

# Rendez-vous de la science

Alireza Saidi

La gestion thermique intelligente  
pour des EPI plus efficaces



# Sommaire

- Contexte général
- Problématiques de santé et sécurité au travail
- État actuel des connaissances
- Objectifs de recherche
- Méthodologie de recherche
- Résultats
  - Détection du stress thermique en temps réel
  - Capteurs de température intégrés ou portables
  - Actuateurs chauffants
  - Actuateurs refroidissants
- Synthèse et perspectives



# Équipements de protection individuelle de pointe (intelligents)

Prévenir les risques à l'aide des **capteurs** et des **indicateurs**

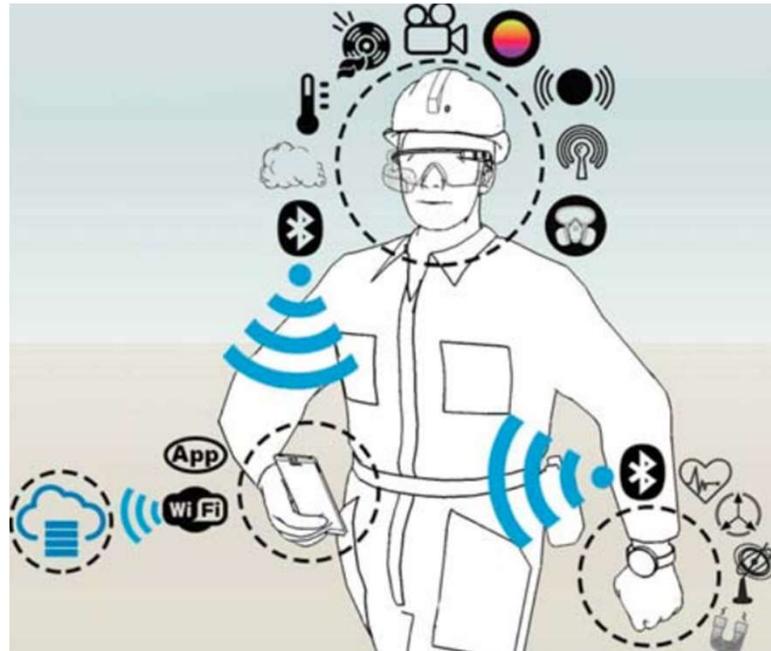
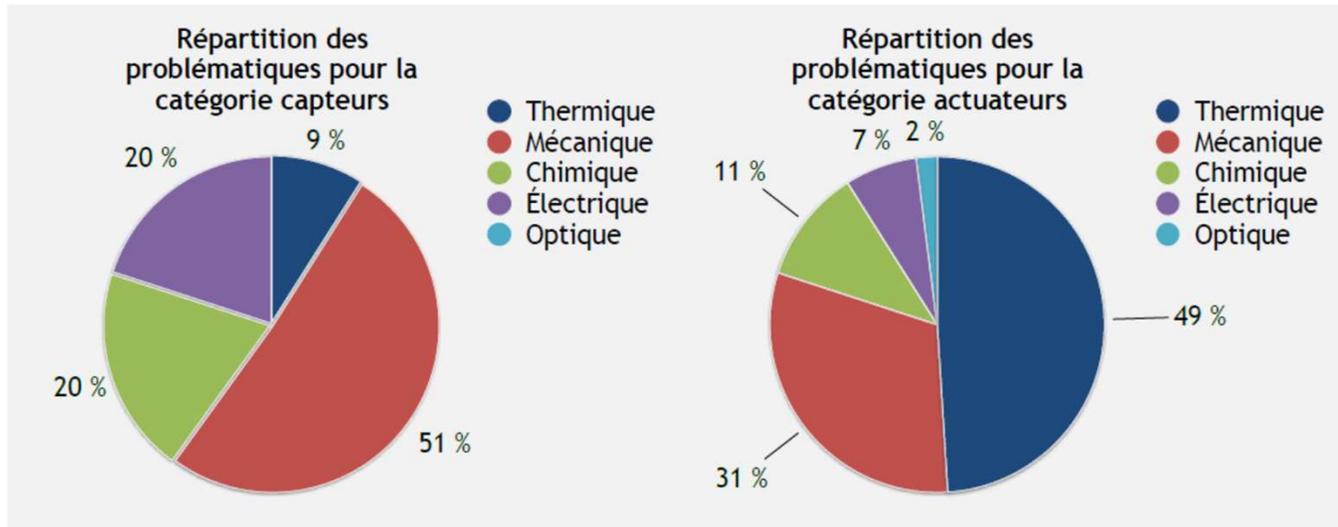


Image: DOI: 10.17794/rgn.2019.1.4

Réagir face aux risques à l'aide des **actuateurs**

# Contexte général (1)

Analyse du potentiel d'application des textiles intelligents en santé et en sécurité au travail  
(IRSST - R-1029 : septembre 2018)



Recensements des besoins en matière de gestion intelligente des risques dans les ÉPI

- Chercheurs et experts en SST
- Conseillers en prévention dans les ASP
- Représentants d'entreprises manufacturières ou utilisatrices d'ÉPI

👉 30 % de l'ensemble des développements des fonctions actives dans les textiles intelligents impliquent la régulation des effets thermiques

# Contexte général (2)

## Le stress thermique dans les lieux de travail Emploi et Développement social Canada

### Le stress thermique dans les lieux de travail

De : [Emploi et Développement social Canada](#)

#### Sur cette page

- [1. Introduction](#)
- [2. Dispositions réglementaires du RCSST sur le stress thermique](#)
- [3. Définitions](#)
- [4. Mesurer le stress thermique](#)

#### 1. Introduction

Les lieux de travail chauds et froids comportent des dangers physiques pour les employés puisque le corps, sous l'effet d'un changement dans la température ambiante, subit un stress appelé le « stress thermique ». Le stress thermique représente un risque qu'il ne faut pas négliger sur le plan de la santé et de la sécurité et qu'il faut prévenir en priorité afin d'éviter les effets catastrophiques qu'il peut avoir sur les travailleurs. Un programme de gestion du stress thermique efficace se traduit non seulement par un sentiment de satisfaction chez le travailleur envers son environnement de travail, mais également par un taux de productivité supérieur et un nombre moins élevé de blessures pour l'employeur.

Le stress thermique se compose de 2 éléments : le stress dû à la chaleur et le stress dû au froid, qui surviennent tous deux dès que le corps n'arrive plus à maintenir sa température entre 36 et 37 °C<sup>1, 2</sup>. Il ne faut pas confondre le stress thermique avec le confort thermique, qui désigne l'état d'une personne qui n'a ni trop chaud, ni trop froid et qui se sent simplement confortable<sup>1</sup>. Selon le milieu de travail, le corps s'adapte et maintient sa température afin que

Le stress thermique se compose de 2 éléments : **le stress dû à la chaleur et le stress dû au froid**, qui surviennent tous deux dès que le corps n'arrive plus à maintenir sa température entre 36 et 37 °C \*

<https://www.canada.ca/fr/emploi-developpement-social/services/sante-securite/rapports/stress-thermique-lieux-travail.html>

# Problématique SST (1)

Risques physiques incluant l'exposition aux contraintes thermiques  
chaud / froid



Image: Le Figaro

Les maladies ou les troubles de santé dus à une exposition à la chaleur :

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, la rhabdomyolyse, etc.



Image: LHSFNA

Les blessures ou maladies causées par une exposition au froid extrême :

L'hypothermie, la gelure, le pied d'immersion, l'engelure, etc.



## Problématique SST (2)

### Risques inapparents (indirectement) liés au travail dans les conditions de températures extrêmes



Image: Le Figaro



Image: LHSFNA

Augmentation prononcée des accidents de travail lors des expositions aux températures extrêmes (selon plusieurs études statistiques) :

- Nuisance au fonctionnement cognitif, à la prise de décision et à l'exécution des tâches
- Affectation des ressources attentionnelles du travailleur à l'évaluation et à la gestion des risques thermiques au lieu de traiter les informations nécessaires à la réalisation d'une tâche
- Modification des fonctions de plusieurs organes liées à l'absorption et au métabolisme des substances chimiques (stress thermique dû à la chaleur)
- Diminution de la dextérité manuelle, réduction de la coordination motrice, baisse de la force et de la proprioception (stress thermique dû au froid)

→ le contexte actuel des changements climatiques peut également accentuer les contraintes thermiques au travail



## Problématique SST (3)

De nombreux secteurs industriels sont exposés aux risques de contraintes thermiques (statistiques de la CNESST 2012-2017)



Image: Le Figaro

- La construction, les mines, la fonderie et la première transformation des métaux, la fabrication de produits métalliques, les travaux forestiers et agricoles, la fabrication d'aliments, les services de prévention d'incendies et de police



Image: LHSFNA

- La construction, l'agriculture, la pêche, la transformation des aliments, l'exploitation forestière (+ toute autre activité extérieure en hiver)



# État actuel des connaissances (1)

Certaines lacunes remarquées dans le cas des indices de contraintes thermiques utilisées dans les directives actuelles

Utilitaires pour la contrainte thermique due à la chaleur en milieu de travail

**Des outils pour éviter les coups de chaleur**

Ne vous laissez pas surprendre par un coup de chaleur. Il est important d'en reconnaître les symptômes et les signes, de prévoir les mesures préventives et, au besoin, de déterminer un régime d'alternance travail/repos en ambiance chaude. L'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) offre des outils pour prévenir les coups de chaleur en milieu de travail.

Pour le grand public : Calcul de la température de l'air corrigée (TAC)  
 Pour les professionnels : Calcul de l'alternance travail-repos selon le RSST  
 Pour les professionnels : Calcul de l'alternance travail-repos selon l'ACGIH®

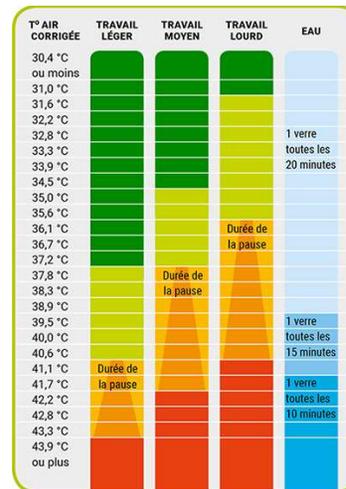


Image : CNESTT

Selon le seuil de l'indice de contrainte thermique calculé, il est recommandé de

- Réaménager le poste de travail,
- Contrôler la charge de travail
- Porter des équipements de protections appropriés

Les réglementations sont parfois peu adaptées ou peu pratiques selon :

- La situation personnelle (sexe, âge, forme physique),
- L'environnement de travail (agriculture, aéroportuaire)
- La charge de travail (sous-estimation de l'exposition lors des travaux lourds - ex. mines profondes)

Les indices visent majoritairement les contraintes dues à la chaleur.



## État actuel des connaissances (2)

Grand manque de confort thermique dans de nombreux ÉPIs



Image : preventionautravail.com

Stress thermique (lié à la chaleur) intensifié en raison de l'usage fréquent d'ÉPI spécifique

- Barrière à la dissipation adéquate de la chaleur produite par le corps
- Structure souvent lourde et peu flexible



Image: solutions.borderstates.com

Vêtements de protection (de travail dans le froid) généralement volumineux et hautement isolants (structures fibreuses multicouches)

- Complication des mouvements du corps et des bras et la diminution de la dextérité manuelle
- Risque de lésions avec la transpiration excessive lors d'activités intenses



## État actuel des connaissances (3)

Les contraintes thermiques continuent à menacer fortement la santé et la sécurité des travailleurs d'une manière directe ou indirecte malgré les progrès dans la conception des ÉPI et dans l'application des normes et recommandations en vigueur



Image: Technology Vista



Image : preventionatravail.com

Image: solutions.borderstates.com



Image: corvexconnect.com

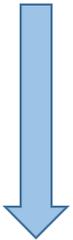
Il est primordial d'élaborer des outils et des équipements permettant d'assurer une gestion des risques thermiques en fonction de la situation individuelle des travailleurs et de leur environnement de travail en temps réel



## Objectifs de recherche

Documenter l'ensemble des connaissances actuelles sur les technologies facilitant une gestion thermique intelligente et soutenue tout au long de l'exécution des tâches dans le contexte SST

- Technologies intégrables aux ÉPI
- Technologies portables pouvant être portées en combinaison avec les ÉPI



- Dresser l'état de l'art des technologies actuelles en identifiant leurs avantages et leurs limites,
  - Travaux effectués dans le cadre de travaux de recherche antérieurs
  - Systèmes actuellement disponibles dans le commerce
- Évaluer le degré de maturité technologique des concepts identifiés (selon l'échelle de maturité d'une technologie - TRL),
- Étudier leur adaptabilité à une utilisation en santé et en sécurité du travail,
- Produire une base de connaissances afin de mieux définir le contour des travaux futurs

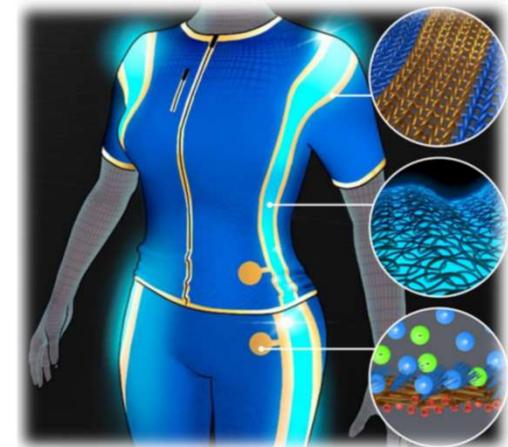


Image: doi.org/10.1021/acs.accounts.1c00433



# Méthodologie de recherche



État de l'art sur les technologies actuelles facilitant une gestion thermique intelligente dans les équipements de protection individuels R-1172 (septembre 2019 – août 2020)

- Revue exhaustive de la littérature (2009-2019) avec l'analyse détaillée de 232 articles (sur 482 présélectionnés /+1200 articles)
- Analyse détaillée des technologies commercialement disponibles
- Résultats de recherche présentés selon quatre catégories de moyens à mettre en œuvre pour assurer la gestion thermique intelligente dans les ÉPIs
  - (i) Méthodes de détection du stress thermique en temps réel
  - (ii) Capteur de température permettant de détecter les agresseurs thermiques
  - (iii) Actuateur chauffant
  - (iv) Actuateur refroidissant

## Tableaux d'analyses

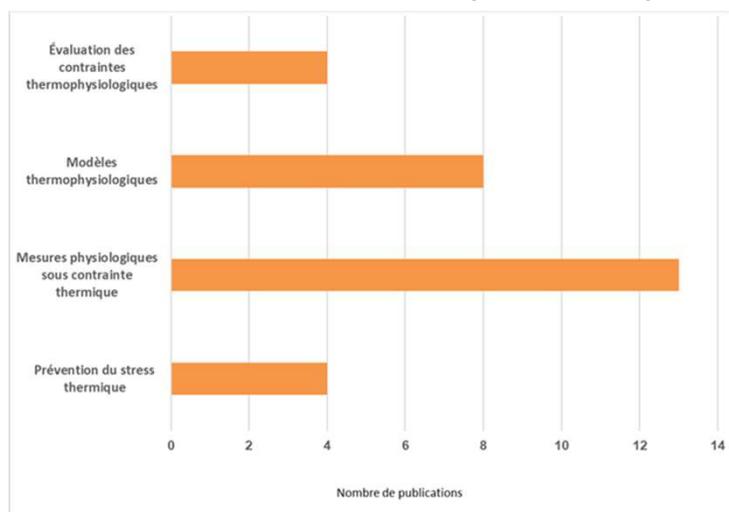
- la méthode d'intégration,
  - le moyen / le protocole de transmission de données,
  - la méthode d'indication et d'avertissement,
  - la gamme de température opérationnelle,
  - la précision de détection,
  - le temps de réaction / d'activation,
  - la consommation énergétique,
  - le poids / le volume,
  - le genre / la conformation physique
- + évaluation du degré de la maturité technologique

## Synthèse des analyses

- l'état des dernières avancées technologiques,
- l'identification des lacunes des systèmes actuels,
- mesures nécessaires à l'adaptation et à l'intégration de différentes technologies à des ÉPI

# Résultats - Détection du stress thermique en temps réel (1)

## Détection du stress thermique en temps réel : revue de la littérature (a)



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

- Très peu d'études sur l'élaboration ou l'évaluation des systèmes de détection du stress thermique en temps réel (lors de l'exécution de tâche)
- Plusieurs modèles permettant le calcul empirique du stress thermique
- Plusieurs études sur les contraintes thermophysologiques à l'aide des technologies portables

## Indice de contrainte physiologique

$$PSI = 5 (T_{rec\ t} - T_{rec\ 0}) \cdot (39.5 - T_{rec\ 0})^{-1} + 5 (HR_t - HR_0) \cdot (180 - HR_0)^{-1}$$

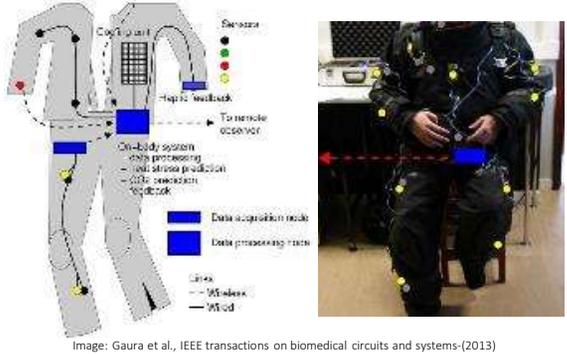
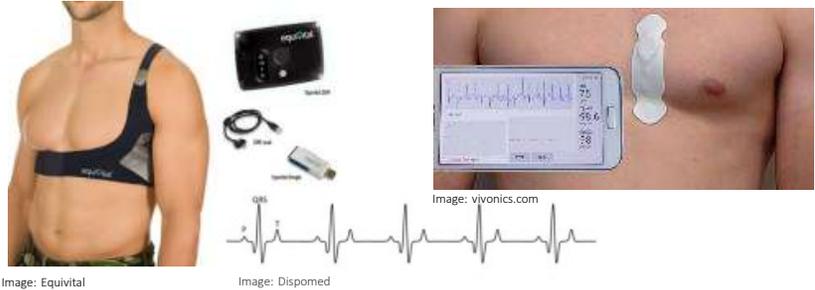
Calcul centré sur le passage de la normothermie à l'hyperthermie :

- L'augmentation maximale de la  $T_{rec}$  de 3°C (36,5–39,5°C)
- La hausse de fréquence cardiaque de 120 battements/min (60-180 battements/min)

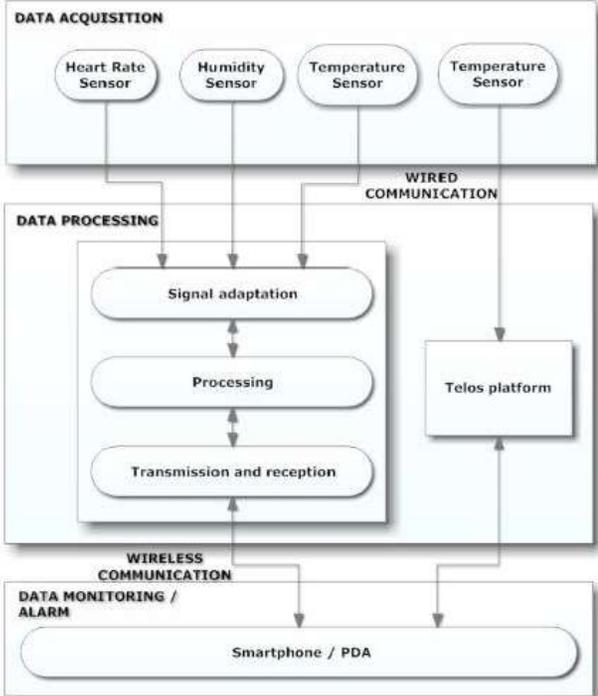


# Résultats - Détection du stress thermique en temps réel (2)

Détection du stress thermique en temps réel : revue de la littérature (b)



Exemples d'études sur les contraintes thermophysiologicals à l'aide des technologies portables



Le schéma de principe d'un système de surveillance du seuil de stress thermique

# Résultats - Détection du stress thermique en temps réel (3)

## Détection du stress thermique en temps réel : produits commerciaux (a)

### Analyse des dispositifs

- Prétendant la capacité de détecter directement le stress thermique
- Capables de mesurer des paramètres physiologiques pouvant alimenter le calcul d'indices du niveau de contrainte thermophysologique



Figure 4 du rapport IRSST - R-1172

Les produits recensés ont été classés selon le type de dispositifs :

- (1) accessoires portables / textiles intelligents (dotés d'électrodes intégrées)
- (2) patches électroniques connectés (intelligents)

\* Une répartition inspirée du classement de différentes technologies portables par la commission 124 d'IEC (International Electro Technical Commission).



- Méthodes de mesure l'activité cardiovasculaire
- Autres paramètres mesurés
- Types d'électrodes déployées
- Designs et conceptions des dispositifs
- Architecture de communication
- Indicateurs / interface usager



# Résultats - Détection du stress thermique en temps réel (4)

## Détection du stress thermique en temps réel : produits commerciaux (b)

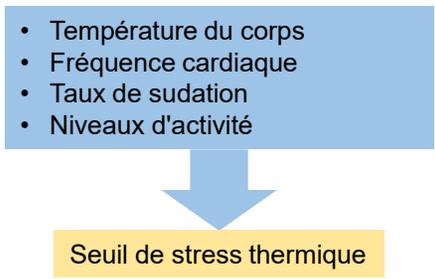


Image: kenzen.com



Image: kenzen.com

Gestion de risque individuel

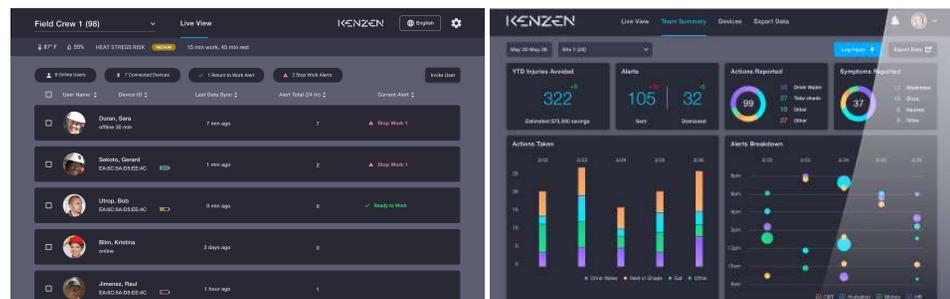


Image: kenzen.com

Gestion de risque centralisé



# Synthèse (1)

## Détection du stress thermique en temps réel

**Modèles basés sur des paramètres physiologiques** ( $T_{rec}$  et FC) comme les indices CHSI et PSI

→ le meilleur potentiel pour la détection de stress thermique en temps réel

**Utilisation de  $T_s$  au lieu de  $T_{rec}$**  pour la détection du stress thermique ? (BTCM, PSI modifié)

→ Nécessité de mesures à plusieurs endroits !

→ Mesures de  $T_s$  influencées par plusieurs paramètres !  
(la peau,  $T_{ambiante}$ , les dimensions du capteur et son positionnement et les contraintes mécaniques)

Designs ajustés et points anti-glissement dans les **chandails et les sangles pectorales connectés**

→ Inconfortables pour une utilisation continue et prolongée

☞ Nécessité de l'optimisation du design  
(pressions ajustées et localisées)



**Patches connectés** comme solution accessible à déployer ?

→ Pas très pratique à déployer dans un contexte SST  
(préparation bien précise de la peau avant leur utilisation, positionnement cœur sur la peau)



**Appareils intra-auriculaires** multiparamétrique et peu intrusifs

→ Lecture grandement impactée par les mouvements du corps et les conditions environnementales

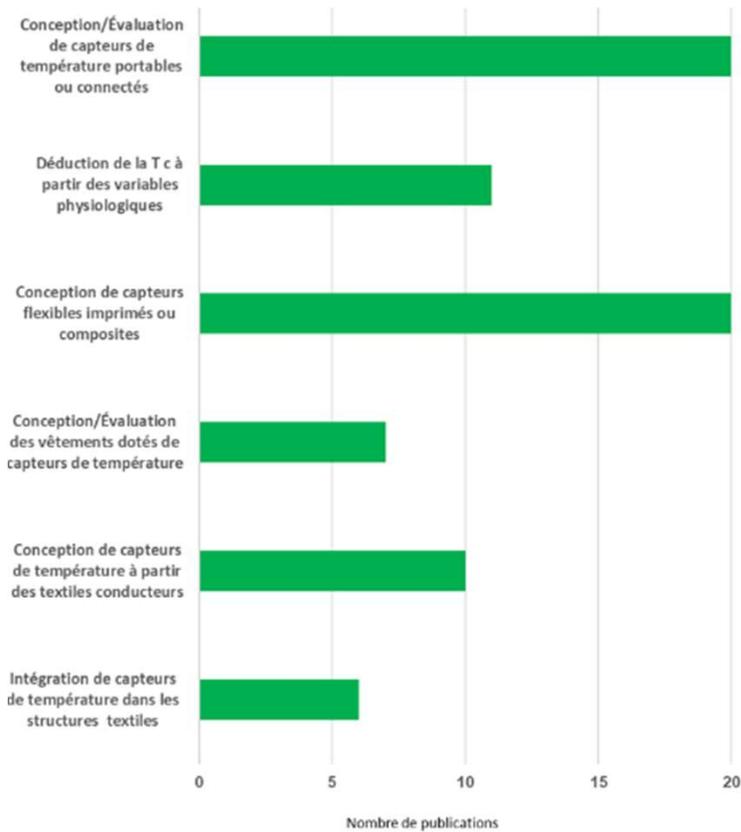
☞ Nécessité de l'optimisation  
(conception, traitement signaux)

Des démarches nécessaires pour la préservation de la confidentialité et la non-divulgateion de données !



# Résultats - Capteur de température (1)

## Capteur de température: revue de la littérature (a)



Répartition des (74) articles analysés concernant les capteurs de température à utiliser dans la gestion thermique intelligente en fonction du principe technologique

- Capteur de température permettant de mesurer
- la température cutanée,
  - la température d'environnement,
  - la température du microclimat sous l'ÉPI

Capteurs de température électriques (portables ou intégrables) analogiques ou numériques

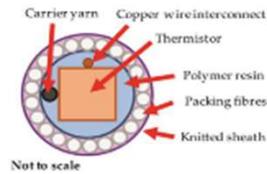


Image: Hughes-Riley et al., 2017



Image: Lugoda, Pasindu, Hughes-Riley, Morris, et al., 2018

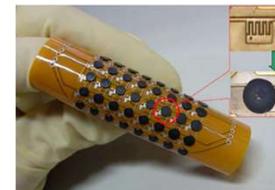


Image: Shih et al., 2010

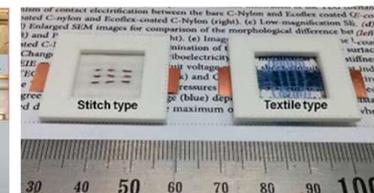


Image: Lee, J.-W. et al., 2018



# Résultats - Capteur de température (2)

## Capteur de température: revue de la littérature (b)

Indice de contrainte physiologique

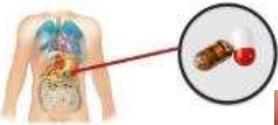
$$PSI = 5 (T_{rect} - T_{rec0}) \cdot (39.5 - T_{rec0})^{-1} + 5 (HR_t - HR_0) \cdot (180 - HR_0)^{-1}$$



Image: worthpoint.com



Image: medicalstorebd.com



BodyCap: e-Celsius System



Image: bmedical.com.au



Image: mindtecstore.com

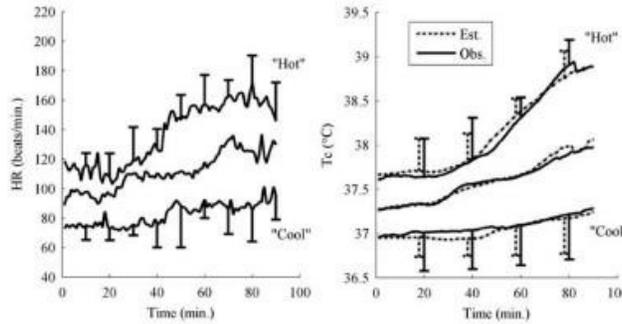


Image: Ergonomics (2015)

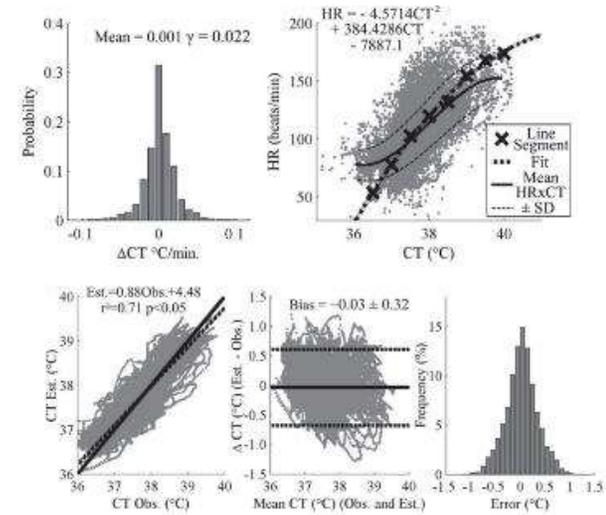


Image: Physiological measurement (2013)

Déduction de la température interne du corps à partir de la fréquence cardiaque (exemple d'application d'un filtre de Kalman)



# Résultats - Capteur de température (3)

## Capteur de température: produits commerciaux

Analyse des dispositifs intégrables ou à porter en combinaison avec un ÉPI et capables de détecter et communiquer en temps réel la température cutanée ou les températures environnementales et microclimatiques (sous l'ÉPI)



Les produits recensés ont été classés selon le type de dispositifs :

- (1) accessoires portables / textiles intelligents (dotés d'électrodes intégrées)
- (2) patchs électroniques connectés
- (3) dispositifs monocapteur/ dispositifs multicapteur

\* Une répartition inspirée du classement de différentes technologies portables par la commission 124 d'IEC (International Electro Technical Commission).



- Principe de fonctionnement
- Types de capteurs employés
- Emplacement des capteurs intégrés
- Protocoles de communication
- Performances (précision/temps de réponse)
- Indicateurs / interface usager

Figure 9 du rapport IRSST - R-1172



# Synthèse (2)

## Capteur de température

De nombreux travaux dédiés à la conception de **capteurs intégrables**

Belles performances de capteurs rigides intégrés  
→ Manque de solidité mécanique  
→ Perte de précision selon la structure du textile

Performances insatisfaisantes des capteurs fibreux  
(sensibilités, précisions, de grandes sensibilités à l'humidité)

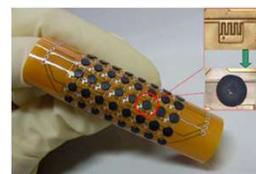
Belles performances de capteurs flexibles : impression/revêtement

(haute sensibilité / précision, faible hystérésis de cycles de chauffage/refroidissement, temps de réponses très rapides, de faibles puissances d'alimentation)

☞ Nécessité des travaux d'intégration aux ÉPIs

La grande promesse de **l'estimation indirecte de  $T_c$**  (à partir de FC ou  $T_s$ ) ?

→ Grandes divergences ente  $T_c$  déduites de  $T_s$  et les mesures  $T_{rec}$   
(Difficulté de mesures , relation  $T_c \leftrightarrow T_s$  influencée par la sueur)



**Études (produits) sur ÉPIs et vêtements** majoritairement avec de l'électronique rigide intégrée

☞ Mieux maîtriser l'influence de la structure fibreuse entourant le capteur sur la lecture

☞ Tendre vers l'utilisation de connecteurs/jonctions flexibles/textiles (contraintes mécaniques)



**ÉPIs commercialisés avec des capteurs intégrés** majoritairement dédiés aux pompiers

(avertissement des seuils de température critiques à l'intérieur ou à l'extérieur de l'ÉPI)

→ Désignation des gammes de températures seuils (arbitraires) selon la structure coupe-feu utilisée

→ Absence de prise en compte de la situation personnelle

Grand potentiel d'optimisation des moyens actuels → l'abondance des capteurs connectés, matrices de capteurs, l'exploitation des données



# Résultats - Actuateur chauffant (1)

## Actuateur chauffant : revue de la littérature (a)

Divers types de vêtements chauffants selon leur principe de fonctionnement :

- 1) centré sur la circulation de fluide,
- 2) à matériau à changement de phase ;
- 3) vêtement chauffant chimique
- 4) vêtement chauffant électrique



Capable de fournir la chaleur d'une manière durable et soutenue tout au long de l'exécution des tâches (en fonction de leurs sources d'énergie portables)

Structures incorporant des éléments chauffants électriques



Image: Bcote



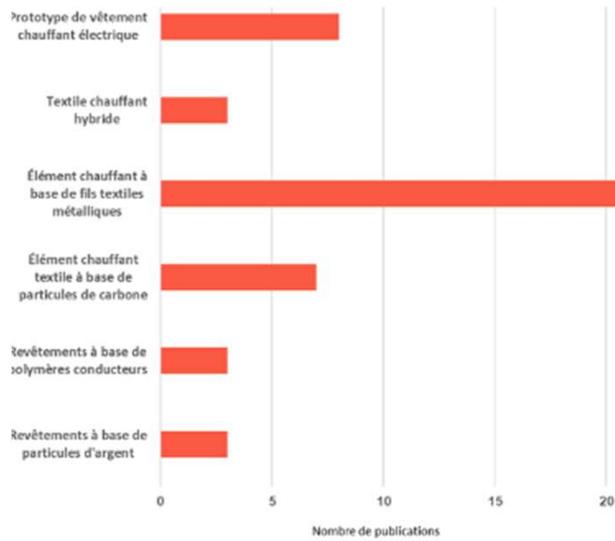
Image: Gerbing

- Diffusion homogène de la chaleur en fonction d'élément chauffant
- Habillement de moindre épaisseur
- Possibilité d'intégration de microcontrôleur électronique
  - niveaux de chauffage modulables
  - niveaux de chauffage ajustables selon la situation personnelle de la personne



# Résultats - Actuateur chauffant (2)

## Actuateur chauffant : revue de la littérature (b)



Élément chauffant textile



Image: embro-tech.eu

Élément chauffant flexible



Image: GSI



Image: entrust



Flexible Printed Heater

UTM | UltraTechnologies

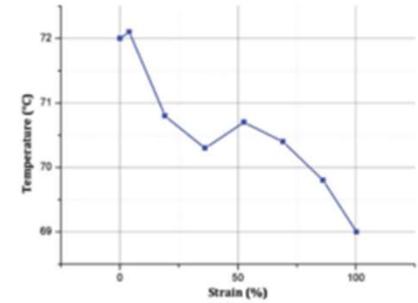


Image: Hamdani, S. T. A., Fernando, Hussain et Potluri, 2016

Répartition des (46) articles analysés concernant les actuateurs chauffants électriques à utiliser dans la gestion thermique intelligente



Image: Li, L., Au, Hua et Wong, 2011

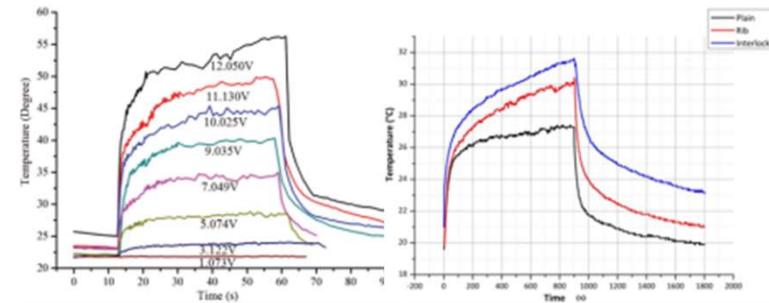
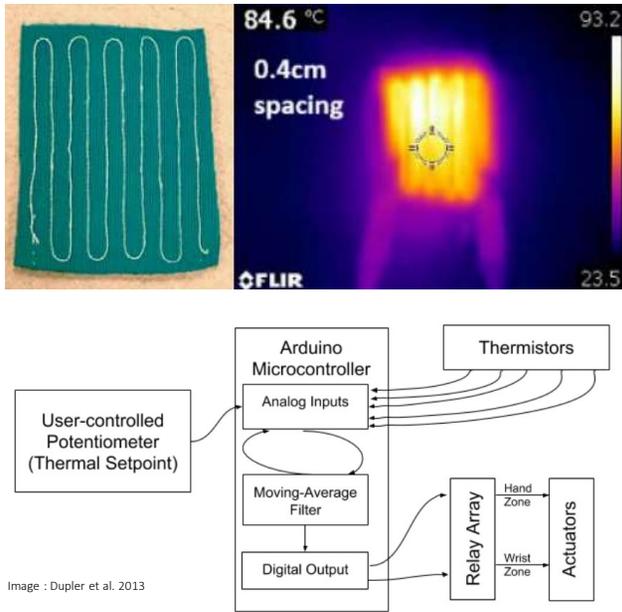


Image: Liu et al., 2016

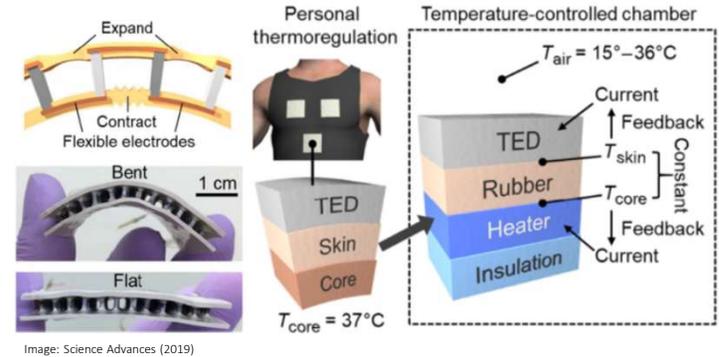
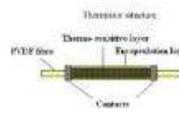
Image: Hamdani, S., Potluri et Fernando, 2013

# Résultats - Actuateur chauffant (3)

## Actuateur chauffant : revue de la littérature (c)



Conception de vêtements chauffants autorégulateurs centrés sur la rétroaction de la température cutanée ou environnementale grâce à l'utilisation des thermistances - placées à divers endroits sur la peau ou dans le vêtement - associées à un microcontrôleur



# Résultats - Actuateur chauffant (4)

## Actuateur chauffant : produits commerciaux

Analyse des produits commercialisés sous forme d'habillements, de vêtements de travail, d'ÉPI ou de solutions intégrables aux textiles ou aux ÉPIs



- Principe de fonctionnement
- Types d'éléments employés
- Emplacement d'éléments intégrés
- Moyen de contrôle de température
- Performances
- Interface usager

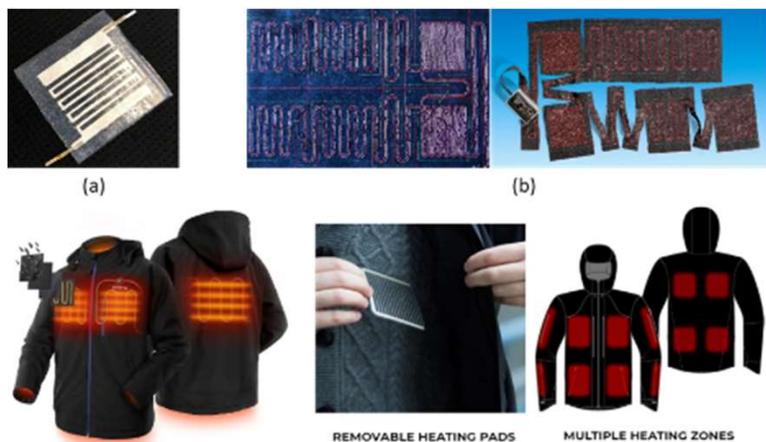


Figure 13 du rapport IRSST - R-1172



Image: Clim8

Image: Odlo

Vêtement chauffant autorégulateur avec la rétroaction de la température environnementale et microclimatique à l'intérieur du vêtement

(capteurs placés à divers endroits + microcontrôleurs + éléments chauffants)



Image: kinesixsports.com



# Synthèse (3)

## Actuateur chauffant

Utilisation de technologie passive ou active selon les exigences en matière d'ÉPI et recommandation

De nombreux travaux pour **remplacer les fils électriques** par des éléments chauffants flexibles (textiles, imprimés)

Baisse de la consommation énergétique grâce aux éléments chauffants brodés avec des fils métalliques

👉 défis de maîtriser les paramètres (le nb de passages de fil, l'espacement entre les fils et la composition du substrat textile → la température de chauffage et le niveau de puissance requise)

Avantages mécaniques d'une structure flexible et étirable avec les éléments tricotés

👉 défis de maîtriser les paramètres (résistance électrique du fil conducteur et ses propriétés mécaniques, la structure du tricot, la méthode de tricotage, le type de fils associés autour, le nombre de plis)

### Modèles théoriques

(prédiction des températures maximales de chauffage et le temps pour les atteindre)

→ validés seulement pour des types spécifiques de fils conducteurs, tissus / tricots.

### Belles performances des éléments chauffants imprimés

(consommations énergétiques amoindries, rapidité d'atteinte de  $T_{max}$ )

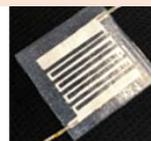
→ faibles durabilités à l'usage et au maintien !

### Meilleure consommation énergétique et des solutions personnalisées grâce aux

👉 éléments chauffants électriques associés aux matériaux fonctionnels (panneaux réactifs aux ondes d'infrarouges lointains, éléments chauffants à PCM, matériaux à mémoire de forme)

👉 zones de chauffage indépendantes avec des contrôles séparés

→ peu de connaissance sur la perte de chaleur de différentes parties du corps selon l'activité et le type d'ÉPI



# Résultats - Actuateur refroidissant (1)

## Actuateur refroidissant : revue de la littérature (a)

L'analyse des systèmes intégrables aux habillements permettant de favoriser les mécanismes de perte de chaleur du corps dans les conditions où :

- Le travailleur doit porter un ÉPI spécifique
- Dans un milieu de travail, il n'est économiquement pas viable ou pratiquement pas possible d'apporter des changements afin de réduire la température ambiante

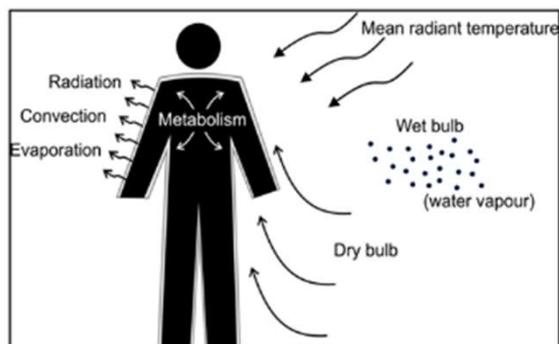


Image: Al Sayed et al., 2016

vêtements refroidissants passifs	vêtements refroidissants actifs
<ul style="list-style-type: none"><li>• éléments refroidissants conducteurs,</li><li>• à changement de phase (PCM),</li><li>• par évaporation</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• thermoélectrique,</li><li>• par ventilation d'air,</li><li>• par circulation de fluide refroidissant</li></ul>
Une performance grandement affectée <ul style="list-style-type: none"><li>○ par les conditions environnementales,</li><li>○ par l'activité de l'utilisateur,</li><li>○ par la génération de chaleur corporelle</li></ul>	Une performance <ul style="list-style-type: none"><li>○ relativement stable</li><li>○ peu susceptible d'être affectée par les conditions environnementales</li></ul>

Technologies de refroidissement intégrables classées selon leur principe de fonctionnement



# Résultats - Actuateur refroidissant (2)

## Actuateur refroidissant : revue de la littérature (b)

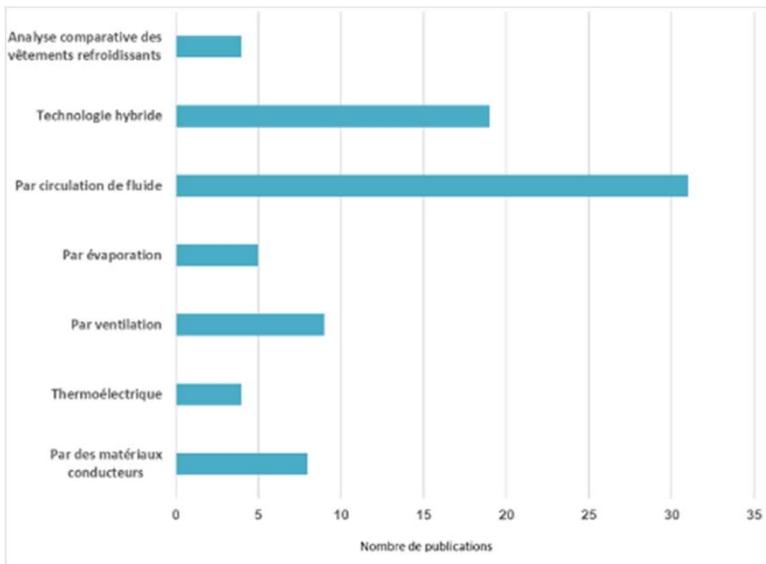


Image: mscooling.com



Image: Universiteit Gent



Image: International Journal of Mining Science and Technology (2019)

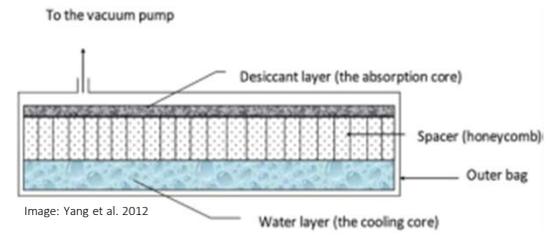


Image: Yang et al. 2012

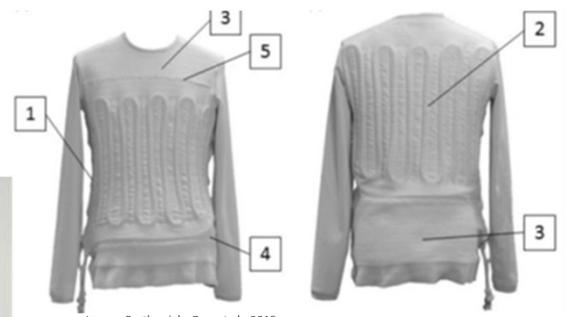


Image: Bartkowiak, G. y. et al., 2015



Image: Zhao, Mengmeng et al., 2013



Image: Shirish et al., 2016

## Résultats - Actuateur refroidissant (3)

### Actuateur refroidissant : revue de la littérature (c)

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

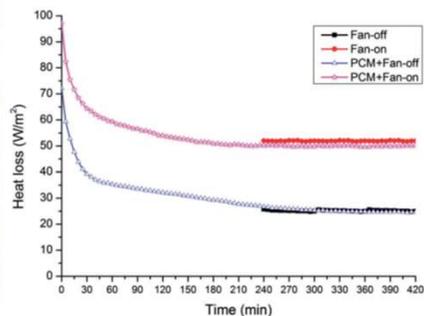
Comparaisons des caractéristiques de divers types de vêtements refroidissants (Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014; Yang, Yifan, 2016)



Plusieurs études comparatives entre les différentes techniques afin de proposer les meilleures stratégies de refroidissement pour différentes conditions



Image: Lai et al., 2017



La mise en œuvre de **technologies de refroidissement hybrides** afin de remédier

- aux lacunes des méthodes de refroidissement selon certains environnements
- à la complexité de la sélection de la meilleure stratégie en fonction d'activités et d'environnements différents



# Résultats - Actuateur refroidissant (4)

## Actuateur refroidissant : produits commerciaux

Analyse des produits commercialisés sous forme d'habillements, de vêtements de travail, d'ÉPI ou de solutions intégrables aux textiles ou aux ÉPIs



- Principe de fonctionnement
- Types et nombre d'éléments employés
- Emplacement d'éléments intégrés
- Moyen de contrôle de température
- Performances
- Coût/Autonomie énergétique

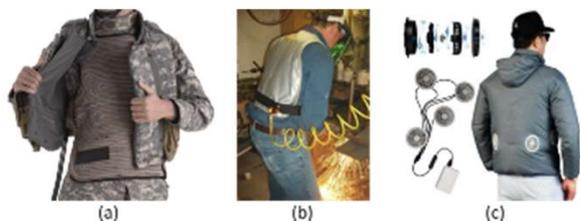


Figure 22 du rapport RSST - R-1172



Image: uline



Image: COOLSHIRT®



Image: YITIAOYU

Les tests de validation sont limités aux conditions contrôlées en laboratoire et sur des échantillons restreints de sujets humains (sexe, âge, conditions physiques)



# Synthèse (4)

## Actuateur refroidissant

Efficacité approuvée des systèmes refroidissants par **circulation de fluide**

→ systèmes lourds et encombrants

☞ réduction de la consommation énergétique et la taille des réservoirs grâce aux systèmes :

- intégrés du contrôle de la température (rétroaction de  $T_s$ )

- de contrôle du débit de circulation du fluide (intermittence ou alternée)



Capacité de refroidissement élevée des systèmes à **dessiccateur sous vide**

→ très peu d'études / produits

→ performances médiocres en environnements humides

☞ nouvelles structures

☞ nouveaux types de matériaux desséchants plus efficaces

La solution technologique la plus étudiée dans un contexte de la SST

Grande portabilité et légèreté des systèmes par **projection d'air à ventilateur**

→ diminution locale de l'humidité de la peau

(effet apparent pour la  $T_s$  locale et insignifiant pour  $T_s$  totale et  $T_c$ )

→ performances influencées par la température ou l'humidité ambiante



Complexité de la **sélection du système le plus approprié** selon le milieu

(à partir des tableaux génériques de comparaison de performances des systèmes refroidissants)

→ Confusion concernant la comparaison des études antérieures

- divergence de sujets d'une étude à l'autre
- différence des charges imposées (la durée et l'intensité de l'exercice),
- l'acclimatation et le degré d'hydratation variables
- différentes propriétés du système (durée, nombre d'éléments refroidissants et emplacement)

Grande capacité de refroidissement des systèmes **par expansion de gaz**

→ durée d'opération assez courte

→ risque de l'échappement de gaz (champs d'application réduits)

Technologies **hybrides** pour contourner les limites des systèmes actuels afin de

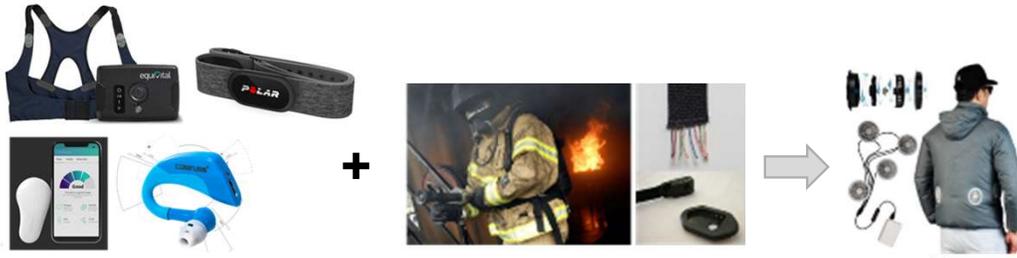
- favoriser l'évacuation de l'humidité accumulée,
- accroître la durée d'opération
- diminuer la consommation énergétique.

→ Risque d'ajout de poids et d'encombrement

→ Très peu de systèmes hybrides ou autorégulants commercialisés



# Perspectives



## Les pistes de recherche et développement en se basant sur les analyses de l'étude

- Instauration de plateformes multicateurs pour la collecte d'un ensemble de données multiparamétriques
- Optimisation des systèmes intra-auriculaires (paramètres physiologiques et peu intrusifs)
- Optimisation des méthodes de détection indirecte de la température centrale du corps à partir des signes physiologiques (IA)
- Prévention d'une situation de stress thermique à partir des signes avant-coureurs extraits des données collectées (IA)
- Élaboration d'ÉPI avec des capteurs de température intégrés à l'aide des E-Textiles / électroniques flexibles
- Mise en place d'actuateurs chauffants/refroidissants autorégulateurs de température à l'aide d'une rétroaction des paramètres personnels
- Promouvoir les actuateurs chauffants/refroidissants hybrides en association de plusieurs technologies (effet synergique, portabilité, confort)
- Déploiement des résultats des études avec des TRL élevés ou des produits commercialisés dans les milieux de travail



# Merci pour attention



Image: textilelearner

Alireza Saidi, Ph. D.  
Service de la recherche  
Prévention des risques mécaniques et physiques  
Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail [alireza.saidi@irsst.qc.ca](mailto:alireza.saidi@irsst.qc.ca)