



Exposition aux froids intenses : vers des vêtements isolants plus efficaces

Stéphane Hallé¹, Ing., Ph.D., Mohamed Zemzem², Ph.D. et Ludwig Vinches², Ph.D.

¹ Département de génie mécanique École de technologie supérieure

² École de santé publique de l'Université de Montréal



Congrès de l'AQHSST
Vendredi 13 mai 2022 – Sherbrooke



Travailleurs exposés au froid

- ✓ Signaleurs routiers
- ✓ Travailleurs de la construction
- ✓ Monteurs de ligne
- ✓ Remorqueurs
- ✓ Membres des forces armées
- ✓ Postiers
- ✓ Ouvriers du secteur alimentaire
- ✓ Plongeurs
- ✓ Camionneurs
- ✓ Etc.



www.hydroquebec.com/securite/lignes-distribution/travaux-degagement-fils-moyenne-tension.html



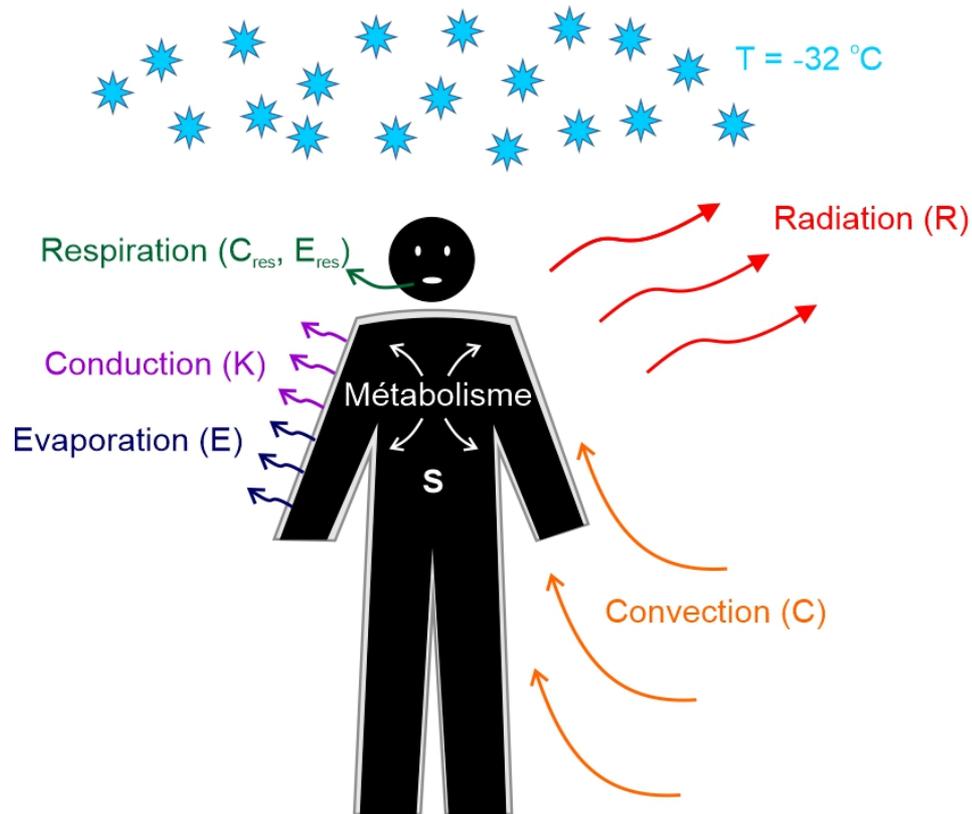
www.neomedia.com/saguenay-lac-st-jean/actualites/societe/268131/des-greves-chez-postes-canada



www.safetyandhealthmagazine.com/articles/20522-working-in-the-cold

Première loi de la thermodynamique

$$S = \underbrace{[M - W]}_{\text{Chaleur métabolique}} + \underbrace{K}_{\text{Conduction}} + \underbrace{C}_{\text{Convection}} + \underbrace{R}_{\text{Rayonnement}} + \underbrace{E}_{\text{Evaporation}} + \underbrace{C_{res} + E_{res}}_{\text{Respiration}}$$



S représente la chaleur perdue ($S < 0$) ou emmagasinée ($S > 0$) par le corps.

À l'équilibre thermique ($S = 0$), il n'y a aucun stockage de chaleur dans le corps.

S s'exprime en W ou en W/m^2 .

En milieu de travail, l'exposition au froid peut être due à une activité réalisée en environnement froid ou au contact avec une surface ou un fluide froid.

Températures maximales susceptibles de causer une sensation de froid :

- ISO 15743 (2008) : +10 °C
- BS 7915 (1998) : +10 °C ~ +15 °C
- DIN 33404-5 (1994) : +10 °C ~ +15 °C

- Vasoconstriction : réduction du débit sanguin au niveau de la peau et en particulier aux extrémités (pieds, mains, etc.).
- Frissons : contraction involontaire des muscles permettant d'augmenter la chaleur métabolique produite.
- Augmentation de la pression artérielle systolique et de la fréquence cardiaque.
- Acclimatation au froid.

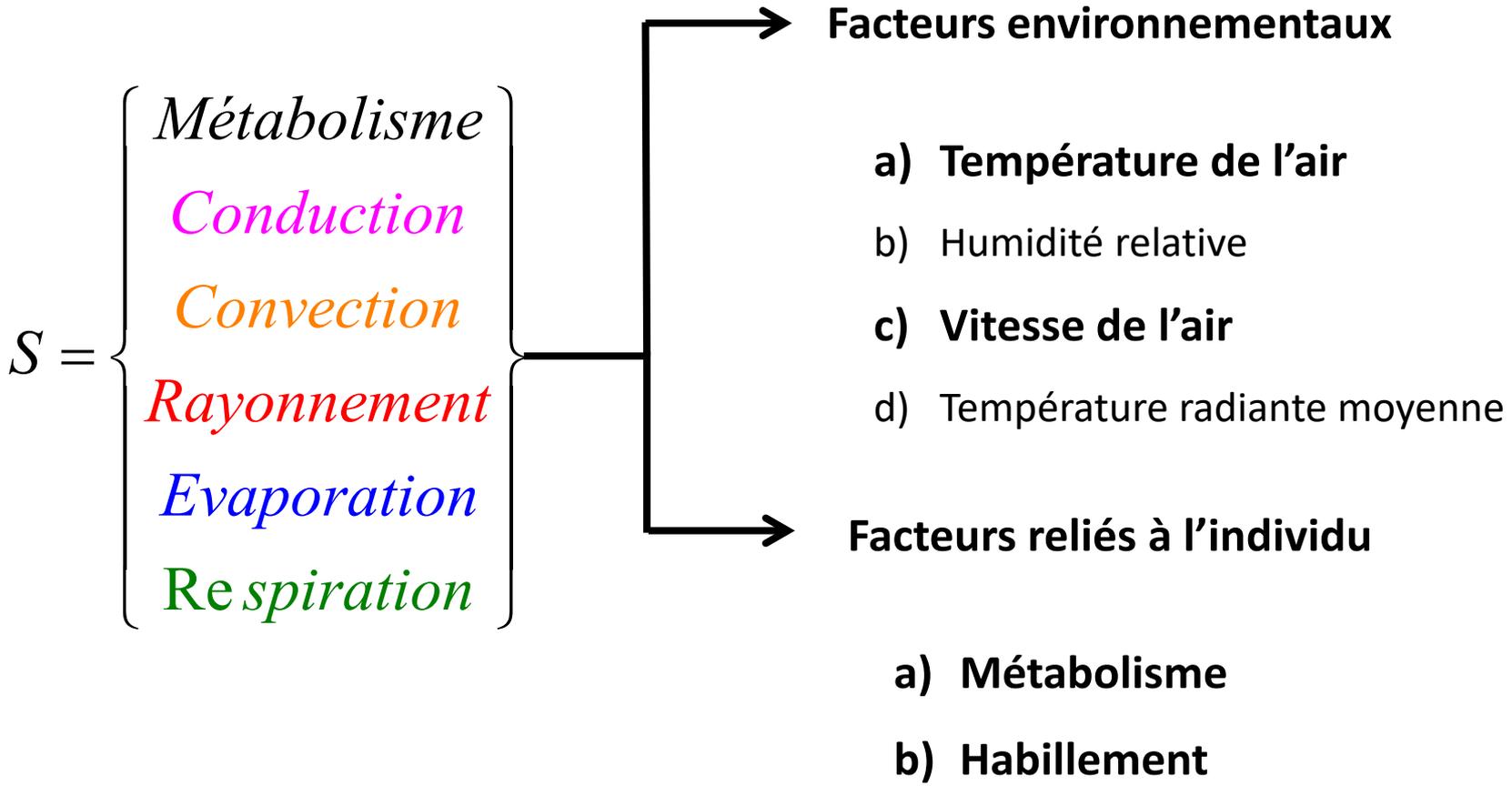
Autres facteurs jouant un rôle dans l'équilibre thermique du corps

- Apport alimentaire
- Glycogène
- Volume liquidien du corps et concentration des électrolytes
- Taille et forme du corps
- Épaisseur des tissus adipeux sous-cutanés

- Engelures
- Gelure
- Pied des tranchées / pied d'immersion
- Hypothermie
 - Légère ($T_{\text{corporelle}} : 35 \text{ °C} \sim 36,5 \text{ °C}$)
 - Modérée ($T_{\text{corporelle}} : 32 \text{ °C} \sim 35 \text{ °C}$)
 - Sévère ($T_{\text{corporelle}} : 30 \text{ °C} \sim 32 \text{ °C}$)
 - Danger immédiat pour la vie ($T_{\text{corporelle}} < 28 \text{ °C}$)
- Pertes de dextérité et de sensibilité tactile
- Fatigue accrue
- Augmentation du temps de réaction
- Baisse de la vigilance
- Jugement et mémoire affectés

Facteurs influençant l'équilibre thermique du corps

$$S = \underbrace{[M - W]}_{\text{Chaleur métabolique}} + \underbrace{K}_{\text{Conduction}} + \underbrace{C}_{\text{Convection}} + \underbrace{R}_{\text{Rayonnement}} + \underbrace{E}_{\text{Evaporation}} + \underbrace{C_{res} + E_{res}}_{\text{Respiration}}$$



$$Q_{pertes} \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{(T_{peau} - T_{extérieure})}{(R''_{conv-peau} + R''_{eff-vêtements} + R''_{conv-ext})}$$

$$R''_{conv-peau} \approx 0$$

$$R''_{conv-ext} < R''_{eff-vêtements}$$

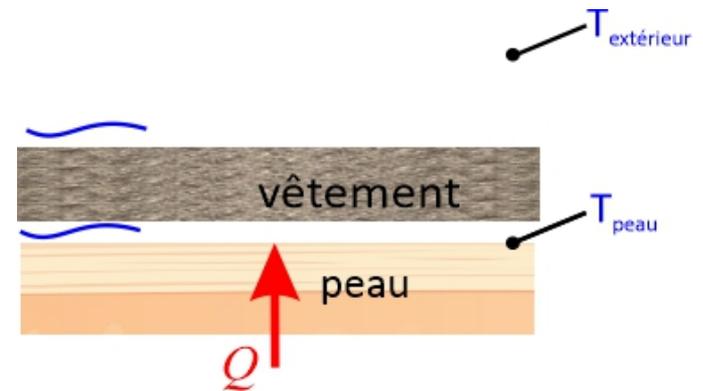
$$R''_{conv-ext}$$

dépend de la vitesse et de la direction du vent

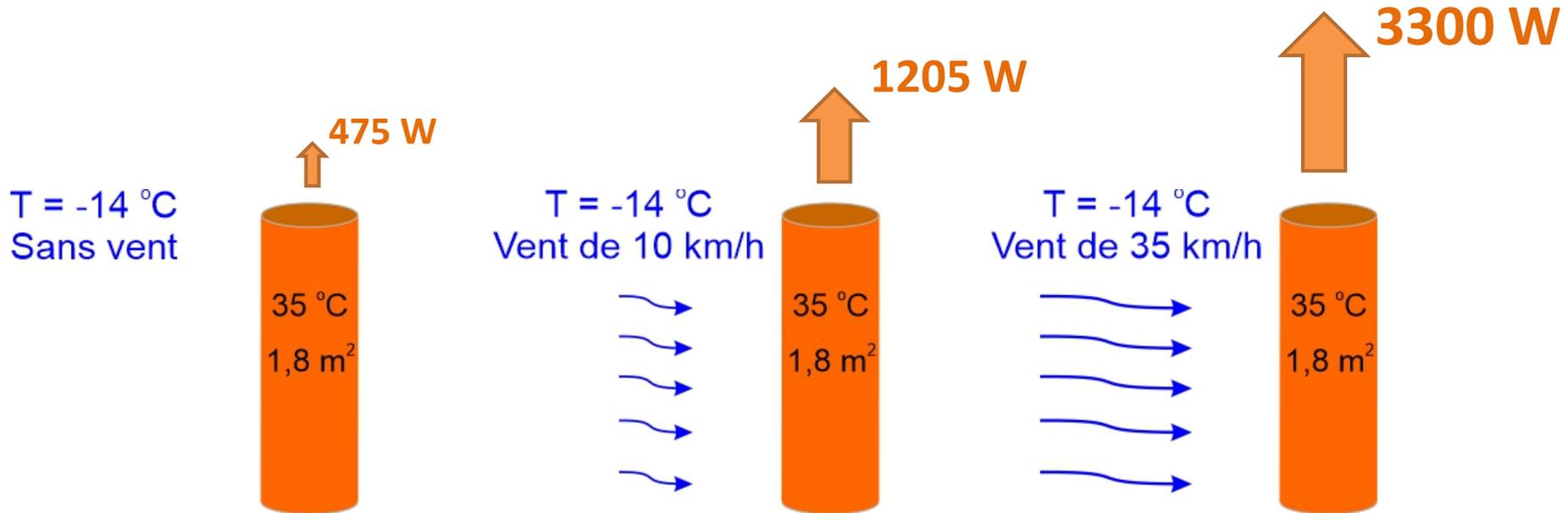
$$R''_{eff-vêtements}$$

s'exprime en clo

$$1\text{ clo} = 0,155 \frac{m^2 \text{ } ^\circ C}{W}$$



Effet du vent sur les pertes de chaleur



Indice de stress thermique dû au froid

➤ **Indice de refroidissement éolien (IRE)**

Cet indice combine l'effet de la température extérieure et du vent. Il s'agit d'une température équivalente ressentie par le corps exposé au froid et au vent.

Indice de refroidissement éolien (IRE)

$$IRE = 13,12 + 0,6215 \times T - 11,37 \times V^{0,16} + 0,3965 \times T \times V^{0,16}$$

| T (°C) | V (km/h) | IRE |
|--------|----------|--------------|
| -5 | 10 | -9,3 |
| -5 | 30 | -13,0 |
| -20 | 10 | -27,2 |
| -20 | 30 | -32,6 |
| -30 | 10 | -39,2 |
| -30 | 30 | -45,6 |

| Vitesse du vent (km/h) | Température de l'air, en °C | | | | | | | | | | | |
|------------------------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 5 | 0 | -5 | -10 | -15 | -20 | -25 | -30 | -35 | -40 | -45 | -50 |
| | Indice de refroidissement éolien | | | | | | | | | | | |
| 5 | 4 | -2 | -7 | -13 | -19 | -24 | -30 | -36 | -41 | -47 | -53 | -58 |
| 10 | 3 | -3 | -9 | -15 | -21 | -27 | -33 | -39 | -45 | -51 | -57 | -63 |
| 15 | 2 | -4 | -11 | -17 | -23 | -29 | -35 | -41 | -48 | -54 | -60 | -66 |
| 20 | 1 | -5 | -12 | -18 | -24 | -30 | -37 | -43 | -49 | -56 | -62 | -68 |
| 25 | 1 | -6 | -12 | -19 | -25 | -32 | -38 | -44 | -51 | -57 | -64 | -70 |
| 30 | 0 | -7 | -13 | -20 | -26 | -33 | -39 | -46 | -52 | -59 | -65 | -72 |
| 35 | 0 | -7 | -14 | -20 | -27 | -33 | -40 | -47 | -53 | -60 | -66 | -73 |
| 40 | -1 | -7 | -14 | -21 | -27 | -34 | -41 | -48 | -54 | -61 | -68 | -74 |
| 45 | -1 | -8 | -15 | -21 | -28 | -35 | -42 | -48 | -55 | -62 | -69 | -75 |
| 50 | -1 | -8 | -15 | -22 | -29 | -35 | -42 | -49 | -56 | -63 | -69 | -76 |
| 55 | -2 | -8 | -15 | -22 | -29 | -36 | -43 | -50 | -57 | -63 | -70 | -77 |
| 60 | -2 | -9 | -16 | -23 | -30 | -36 | -43 | -50 | -57 | -64 | -71 | -78 |
| 65 | -2 | -9 | -16 | -23 | -30 | -37 | -44 | -51 | -58 | -65 | -72 | -79 |
| 70 | -2 | -9 | -16 | -23 | -30 | -37 | -44 | -51 | -58 | -65 | -72 | -80 |
| 75 | -3 | -10 | -17 | -24 | -31 | -38 | -45 | -52 | -59 | -66 | -73 | -80 |
| 80 | -3 | -10 | -17 | -24 | -31 | -38 | -45 | -52 | -60 | -67 | -74 | -81 |

CNESST (2019): Travailler au froid, 4^e édition

- Par l'ingénierie
 - Abri chauffé
 - Isoler les surfaces froides
 - Conception des équipements
 - Pare-vent
 - Etc.
- Administratifs
 - Informations et formations
 - Réorganisation du travail
 - Alternance travail - période de réchauffement
 - Limiter travail susceptible de créer une transpiration importante
 - Limiter le travail sédentaire
- Personnelle
 - **Vêtements avec une isolation thermique élevée**

| Température de l'air en °C, ciel ensoleillé | Vitesse du vent | |
|---|-------------------------------------|------------------|
| | 16 km/h | |
| | durée max. d'exposition au froid | nombre de pauses |
| de -26 à -28 | 75 min | 2 |
| de -29 à -31 | 55 min | 3 |
| de -32 à -34 | 40 min | 4 |
| de -35 à -37 | 30 min | 5 |
| de -38 à -39 | Interrompre tout travail non urgent | |

CNESST (2019): Travailler au froid, 4^e édition



<https://howfarfromhome.com/>

Norme ISO-11092

- La résistance thermique est déterminée en imposant une différence de température de 15 °C (20 °C et 35 °C) de part et d'autre d'un échantillon textile.
- Les tests doivent être réalisés sous une vitesse d'air de 1 m/s et une humidité relative de 65%.

INTERNATIONAL
STANDARD

ISO
11092

Second edition
2014-09-01

**Textiles — Physiological effects —
Measurement of thermal and water-
vapour resistance under steady-state
conditions (sweating guarded-
hotplate test)**

*Textiles — Effets physiologiques — Mesurage de la résistance
thermique et de la résistance à la vapeur d'eau en régime stationnaire
(essai de la plaque chaude gardée transpirante)*

Les conditions expérimentales de la norme 11092 sont très éloignées des conditions d'utilisation réelles des vêtements de protection contre le froid

La validité du modèle prescrit par la norme ISO 11092-2014 en dehors des conditions décrites n'est pas bien documentée.

- Quelle est l'influence de la température froide sur la résistance thermique ?
- Quelle est l'influence de la vitesse et direction du vent ?
- Quelle est l'influence de l'humidité ?

OBJECTIF

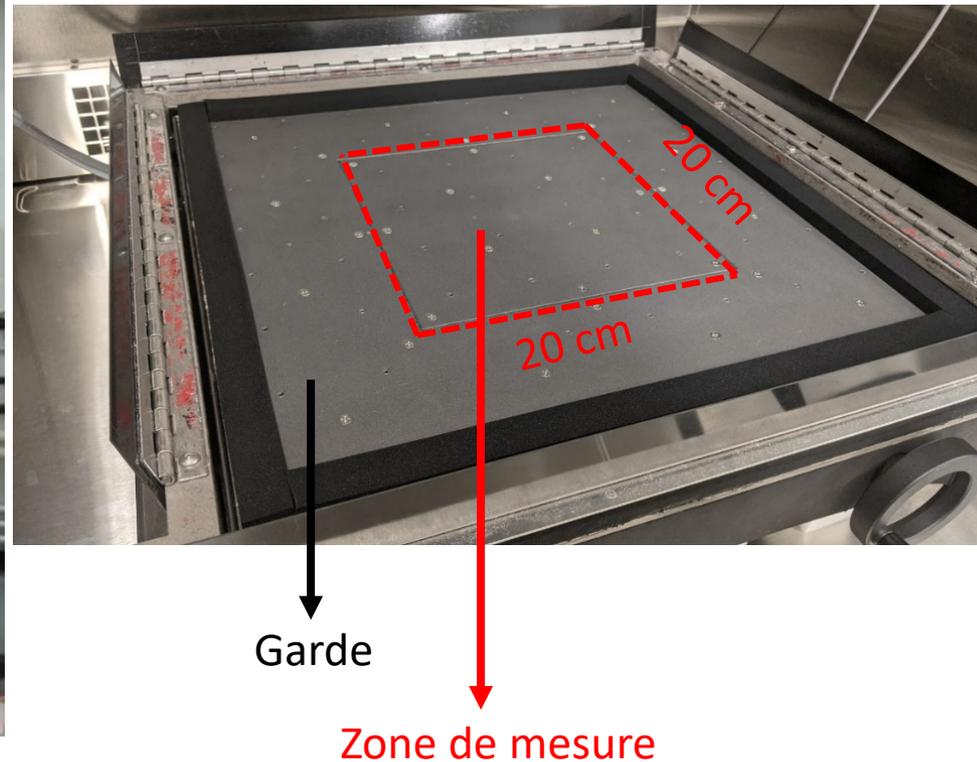
Réaliser des mesures d'isolation thermique de différents assemblages textiles en fonction de la température, de l'humidité et de la vitesse du vent

Essais réalisés au Groupe CTT

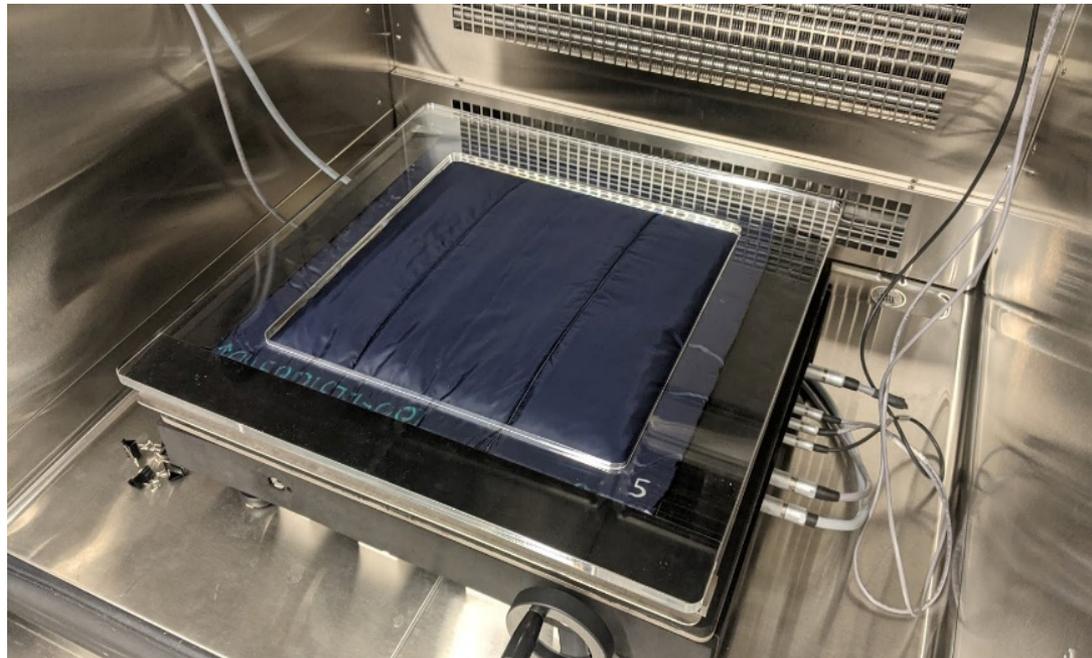
Chambre environnementale (30 °C à -40 °C)



Plaque gardée transpirante



Un assemblage textile sur la plaque gardée

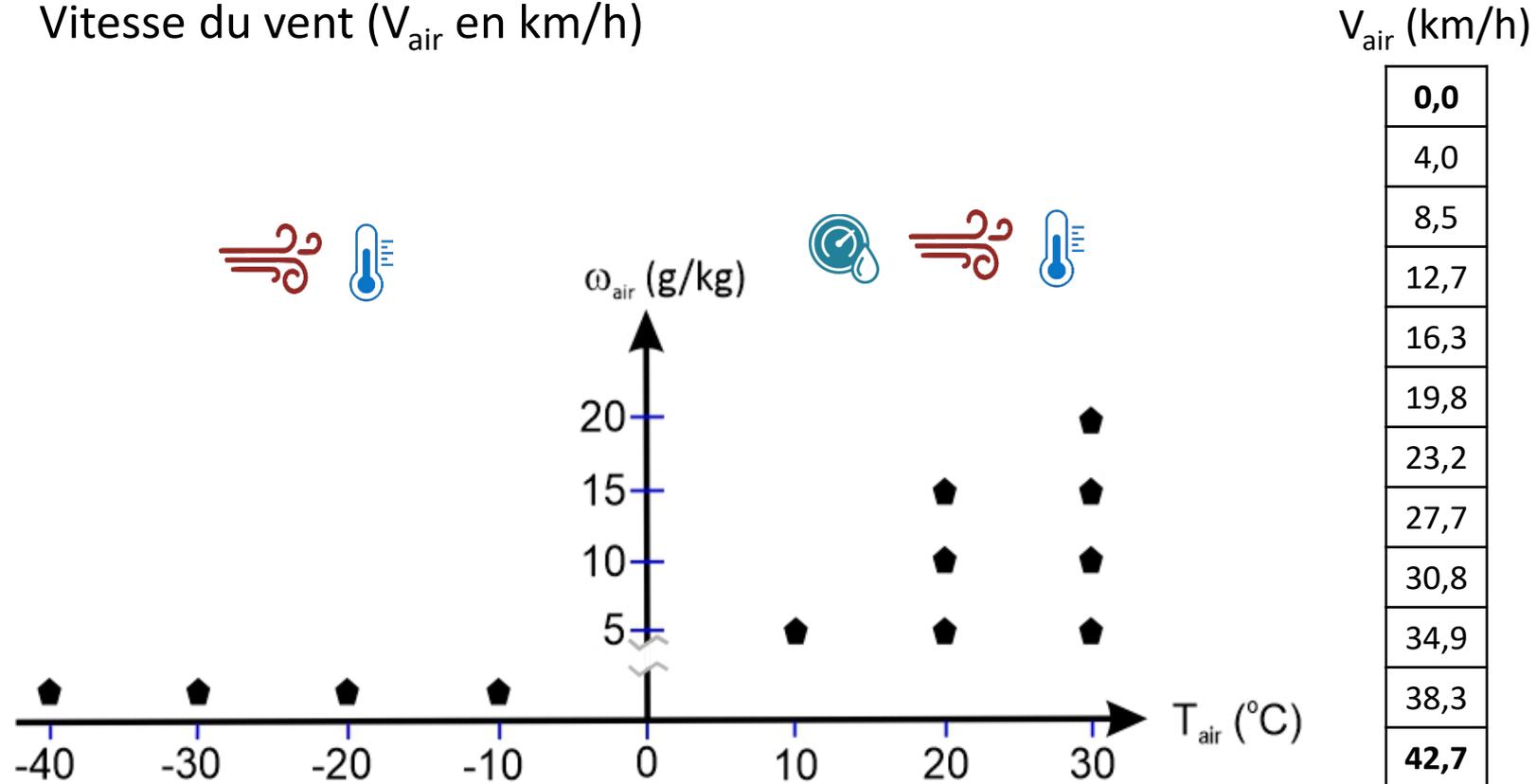


Soufflerie générant un vent de vitesse variable perpendiculaire à la surface des assemblages



Plan d'expérience factoriel complet à trois facteurs:

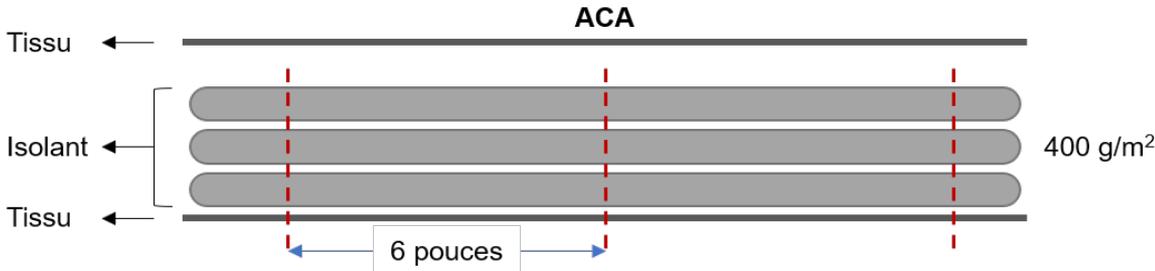
- 1. Température (T_{air} en °C)
- 2. Humidité spécifique (ω_{air} en g/kg d'air sec)
- 3. Vitesse du vent (V_{air} en km/h)



Structures des assemblages textiles techniques testés

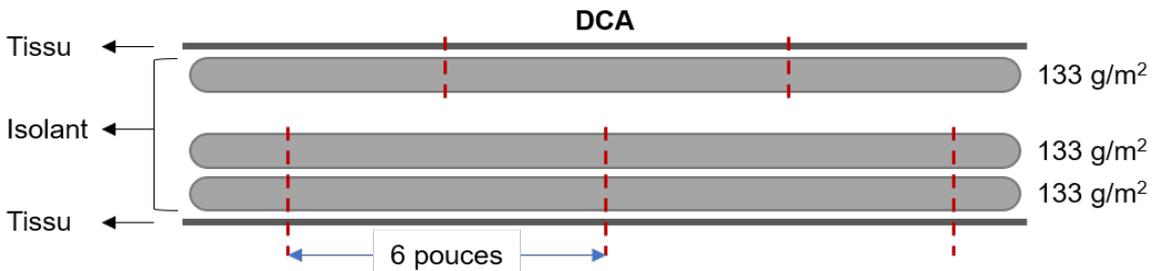
ACA

Tissu protecteur
Isolant : longues fibres continues en polyester



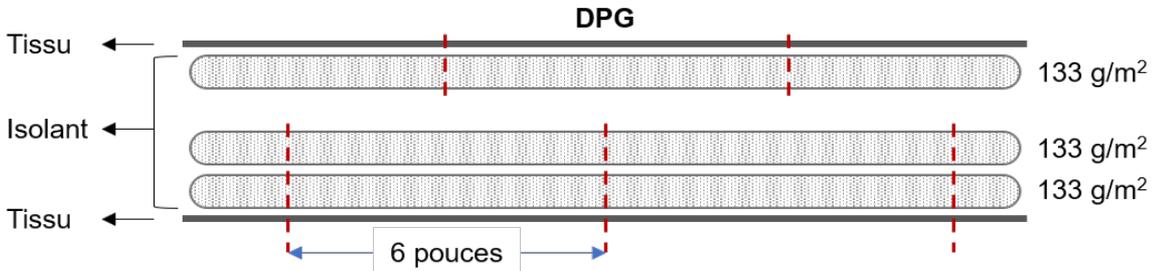
DCA

Tissu protecteur
Isolant : longues fibres continues en polyester



DPG

Tissu protecteur
Isolant : fibres courtes en polyester (2 diamètres)

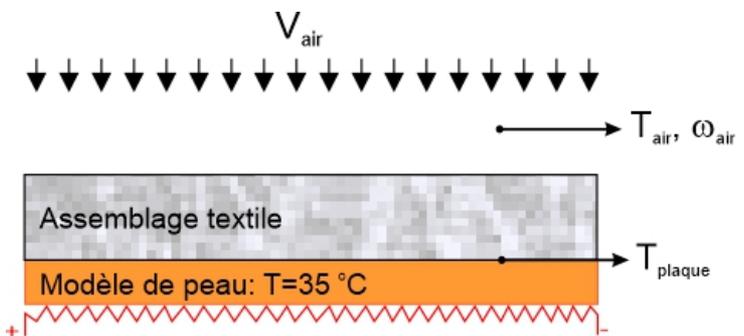


- - - Couture
- Tissu protecteur
- Isolant (Polyester fibres longues)
- Isolant (Polyester fibres courtes)

La résistance thermique effective d'un assemblage textile est:

$$R''_{eff-assemblage} = \frac{A \times (T_{plaque} - T_{air})}{Q_{chauffage}} - R''_{couche\ limite}$$

$R''_{couche\ limite}$ Dépend de la vitesse du vent



| | | | | | | |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| $V_{air} [km / h]$ | 0 | 4 | 16 | 25 | 35 | 45 |
| $R''_{couche\ limite} [clo]$ | 0,34 | 0,20 | 0,13 | 0,09 | 0,07 | 0,05 |

Valeurs mesurées

Valeurs calculées

Perméabilité à l'air des assemblages textiles

La perméabilité a été mesurée avec un appareil Frazier à basse pression conformément à la norme ASTM D737-18



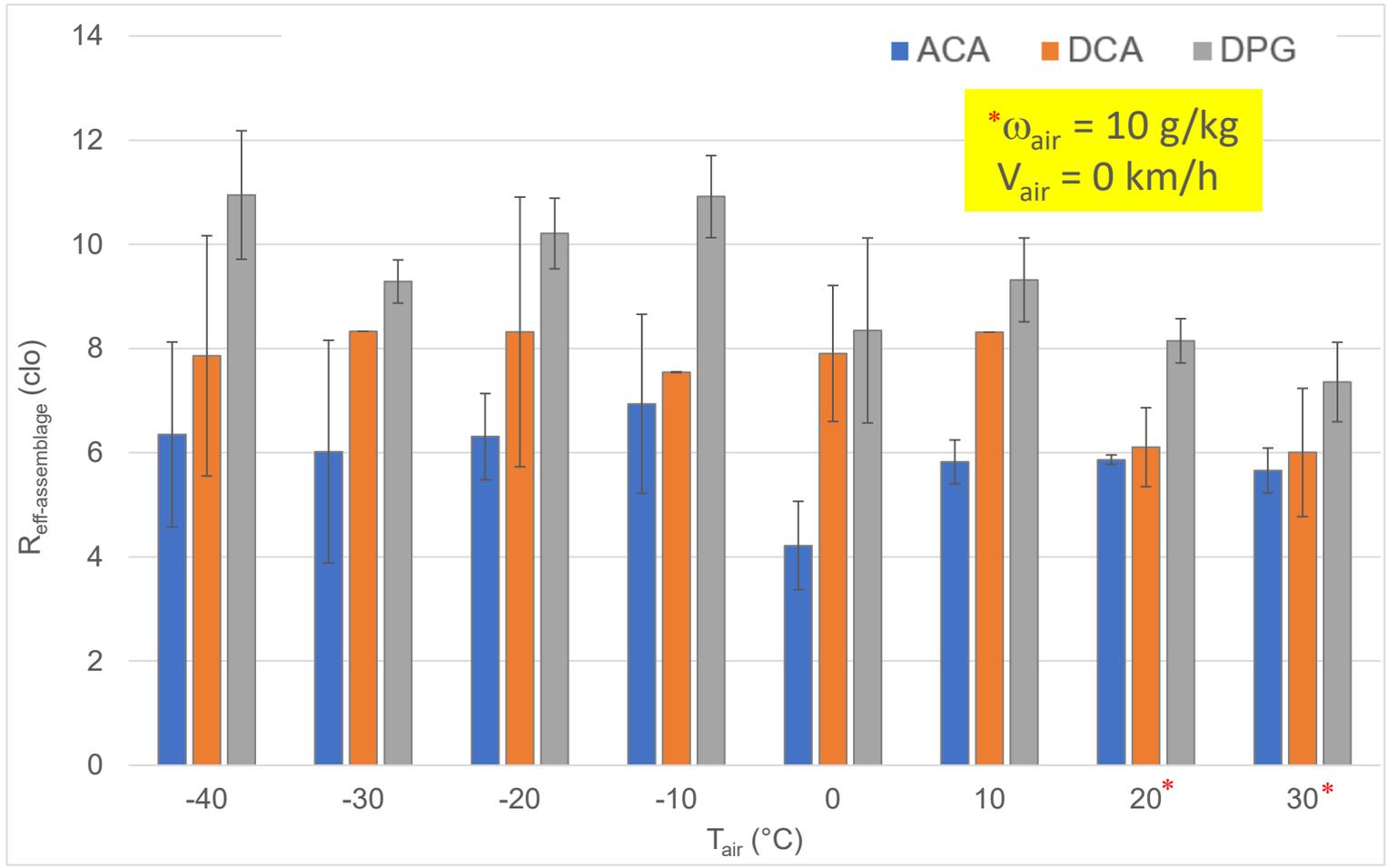
Designation: D737 - 18

Standard Test Method for Air Permeability of Textile Fabrics¹

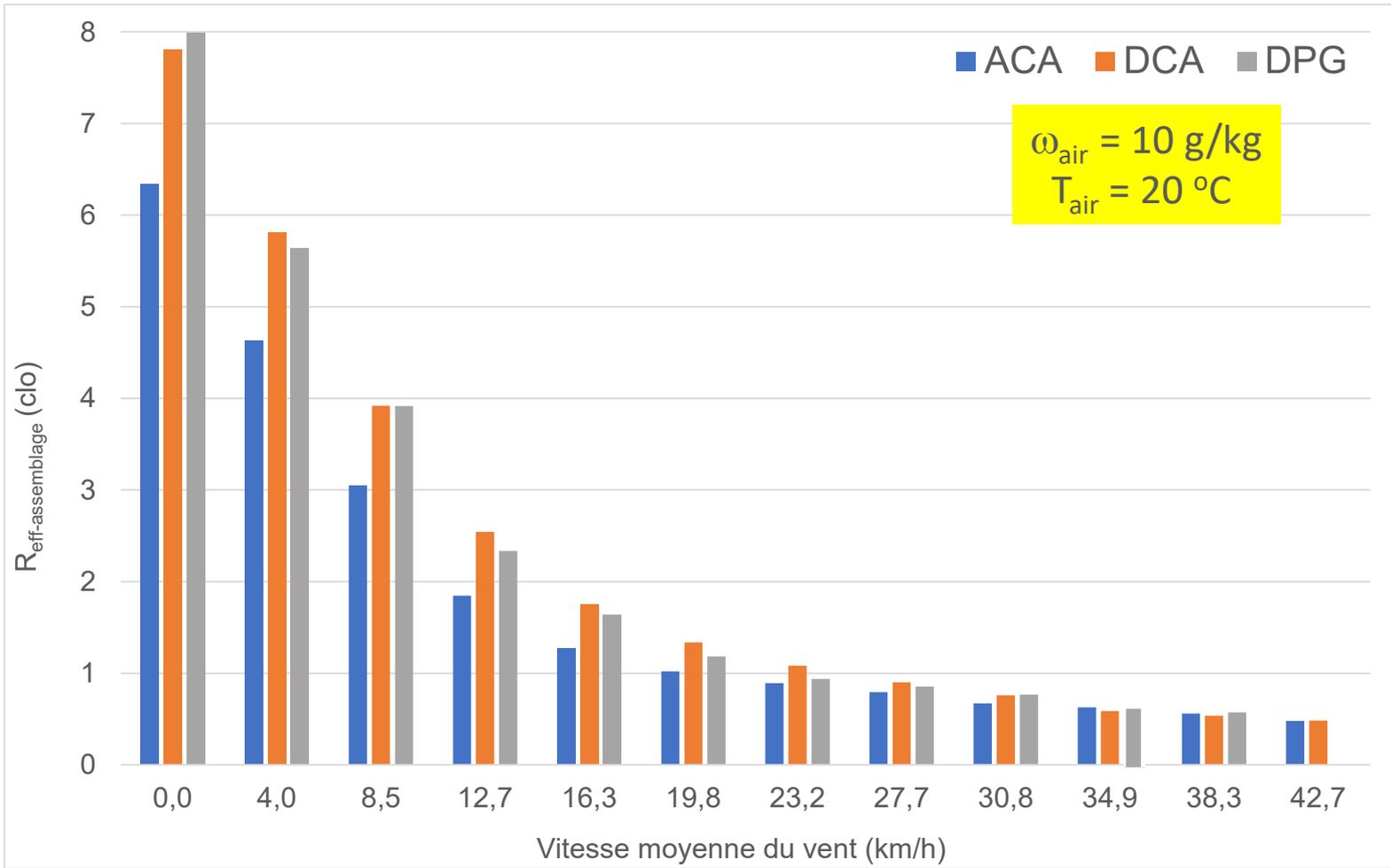
This standard is issued under the fixed designation D737; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

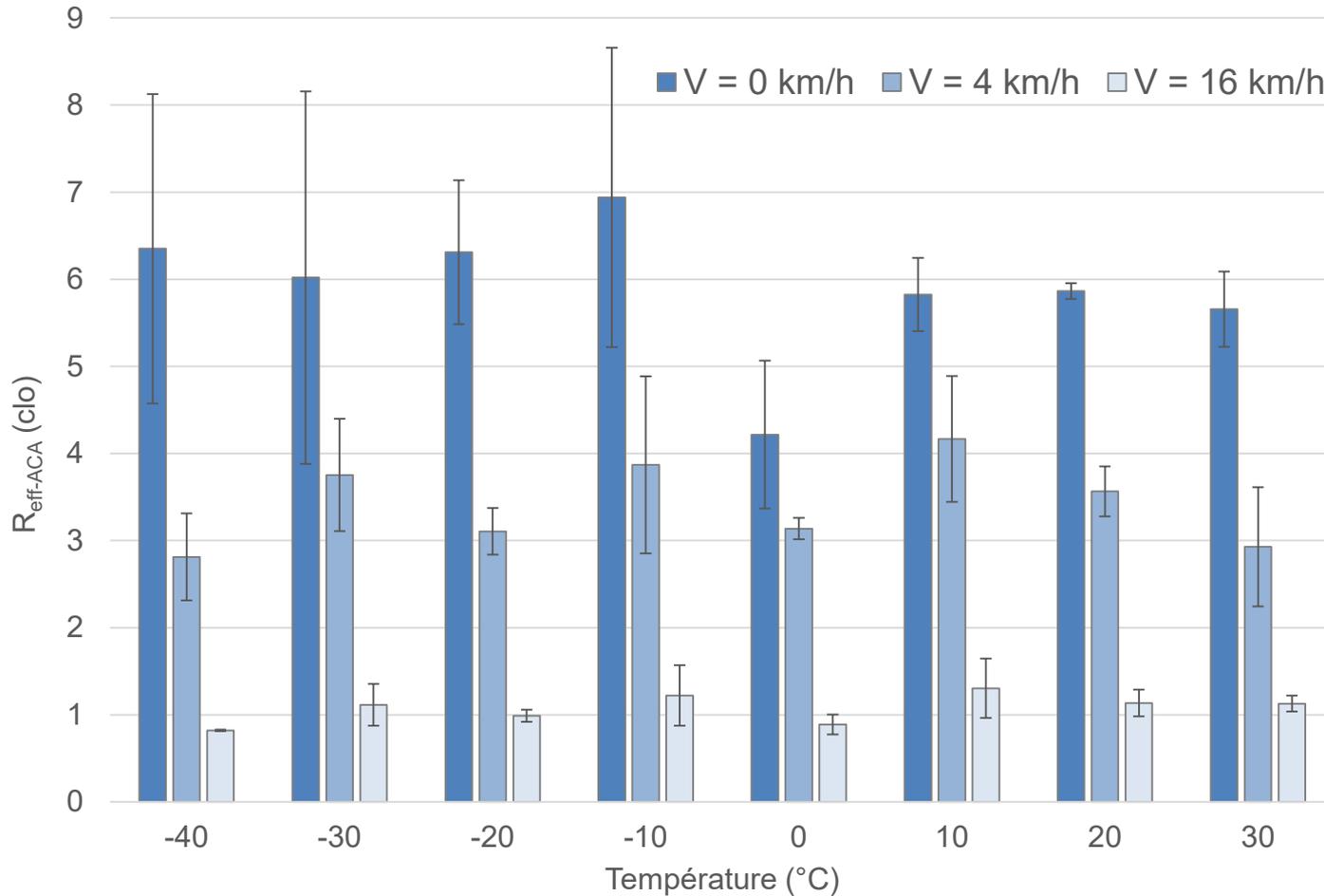
Résistance thermique en fonction de la température pour les trois assemblages textiles



Résistance thermique en fonction de la vitesse du vent pour les trois assemblages textiles

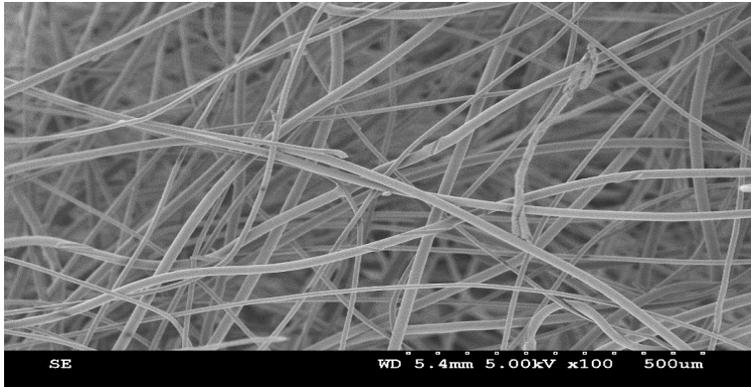


Résistance thermique de l'assemblage ACA en fonction de la température à trois vitesses de vent

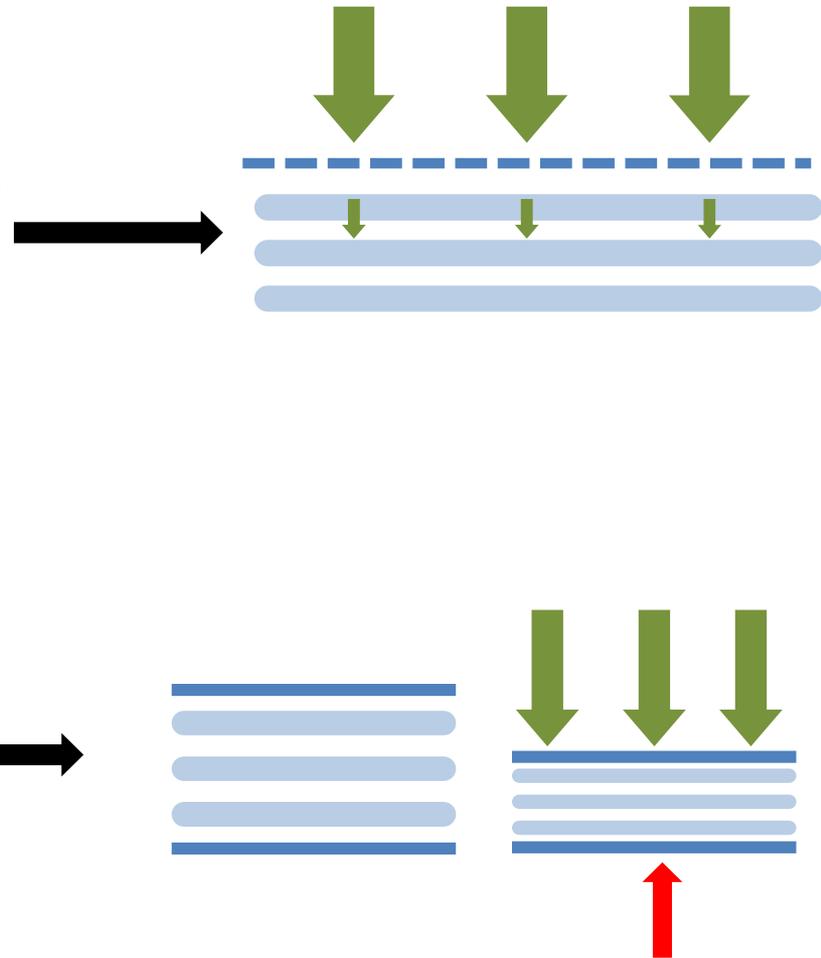


Pourquoi la résistance thermique est largement influencée par le vent ?

Convection dans la structure isolante
Présence des coutures



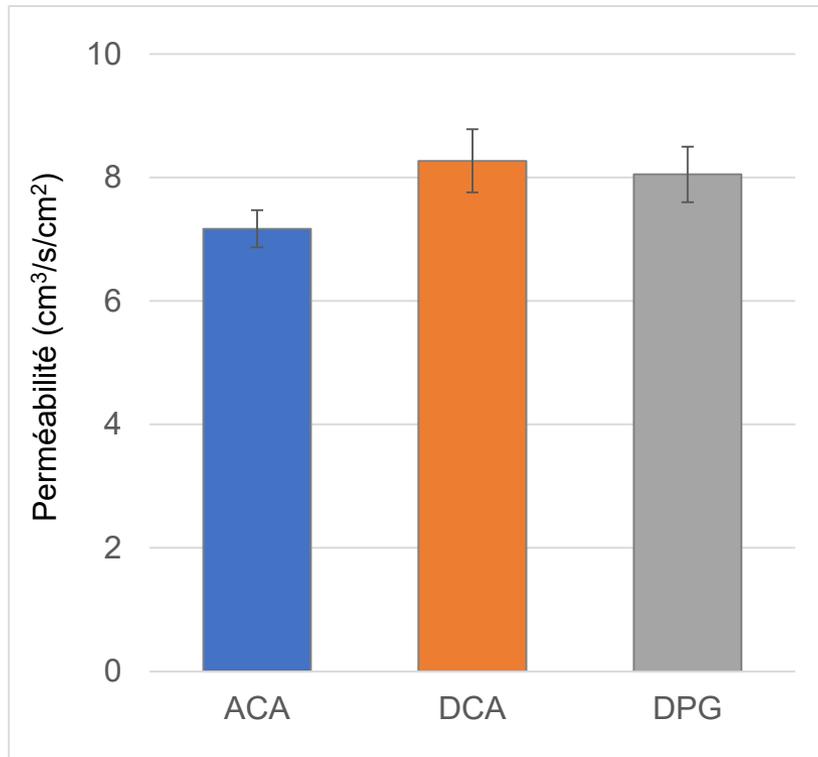
Effet de compression



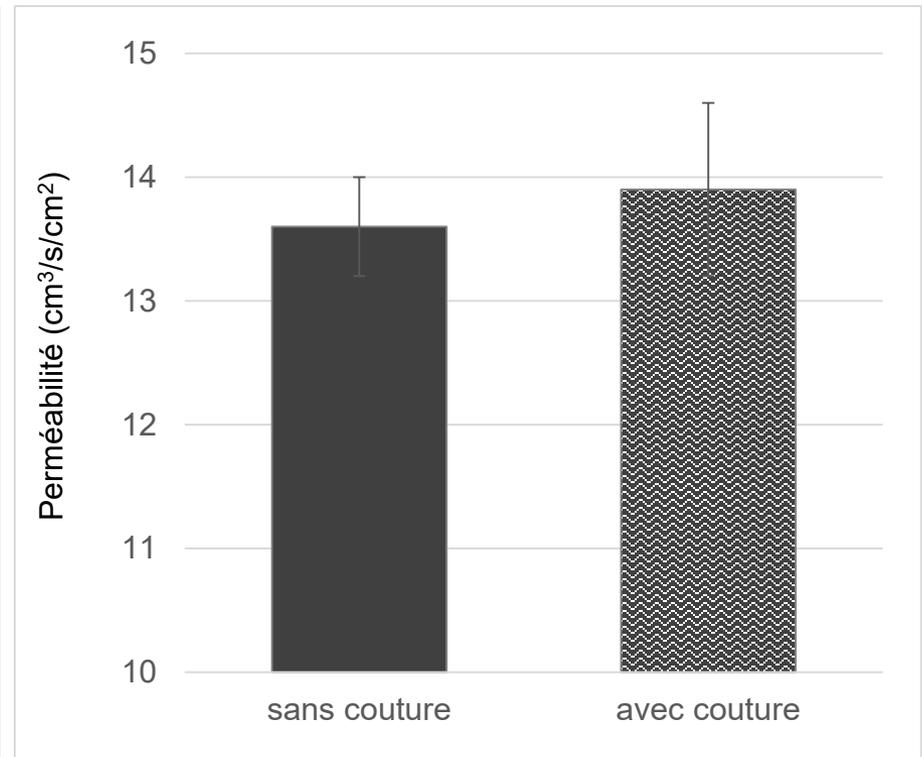
Réduction de la fraction volumique occupée par l'air dans la structure isolante

Perméabilité à l'air

Les 3 assemblages

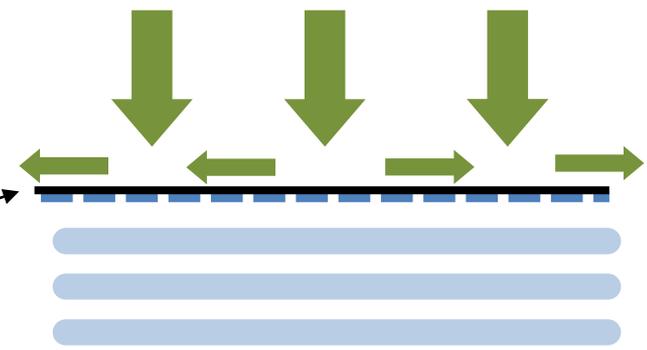


Le tissu de protection avec et sans couture

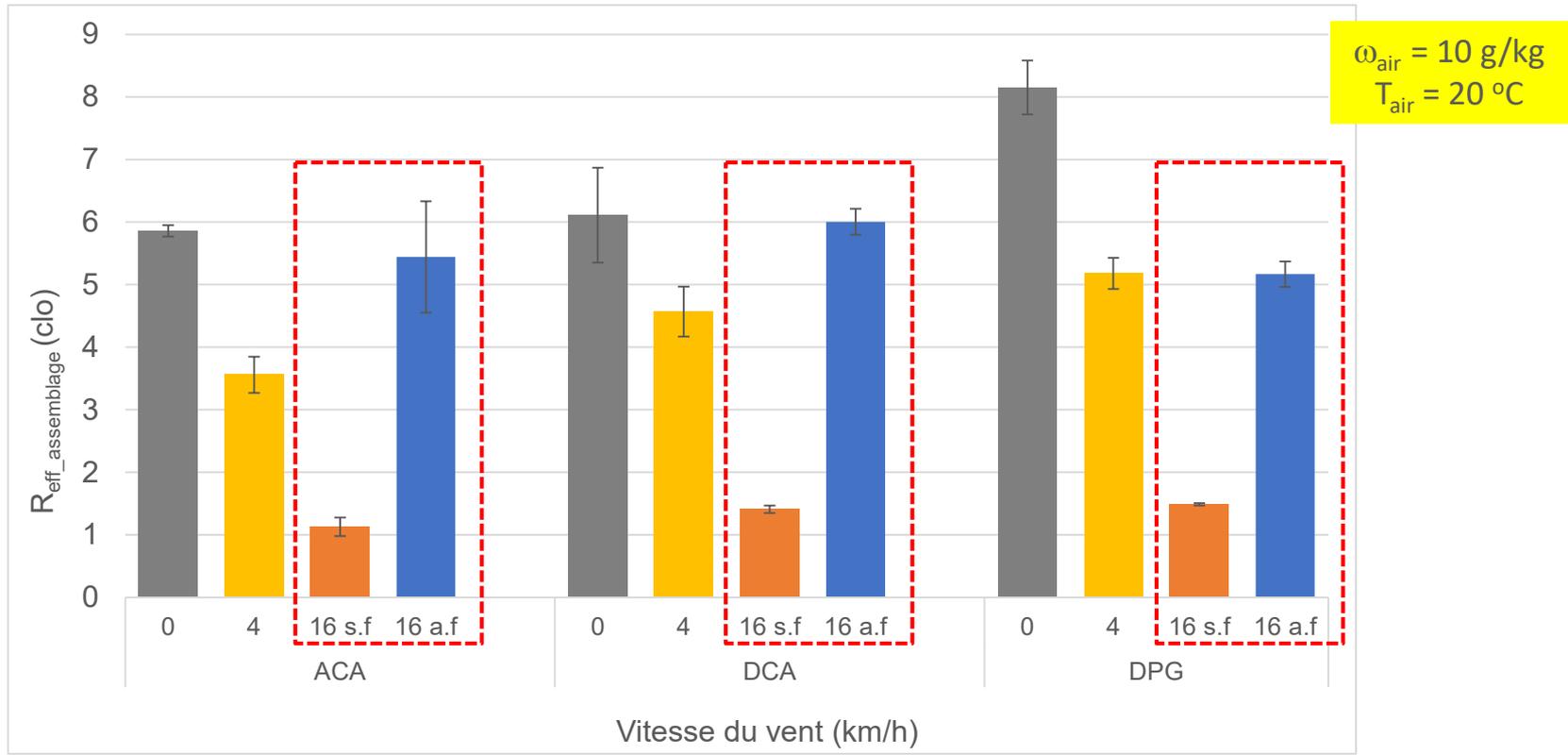


Effet de la présence d'un film imperméable sur la résistance thermique

Pellicule mince avec une perméabilité nulle



a.f : avec film **s.f : sans film**

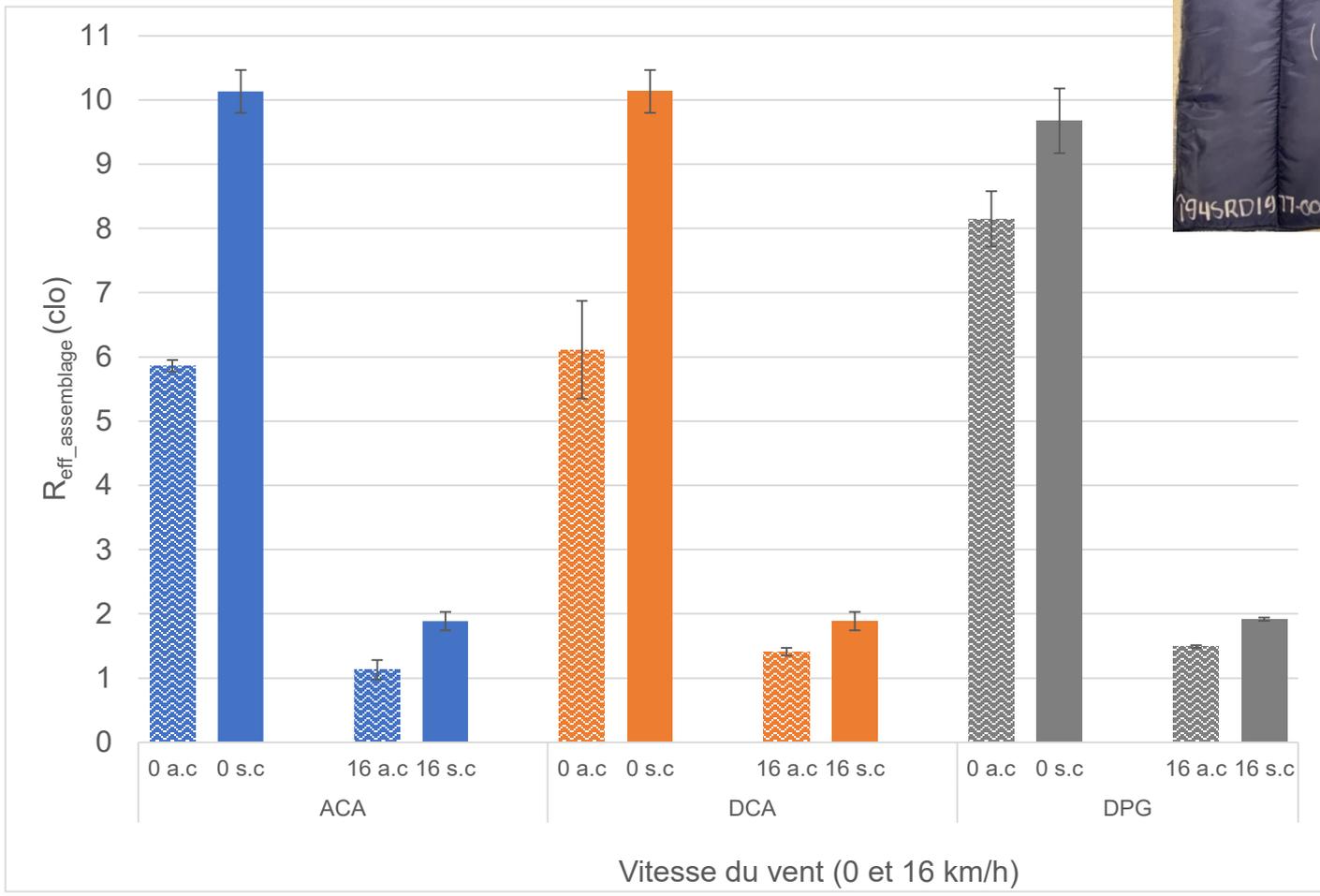


Effet de compression des coutures

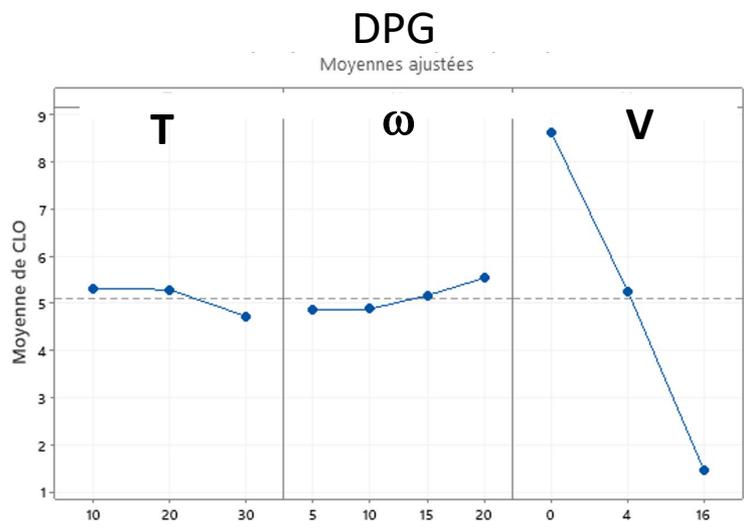
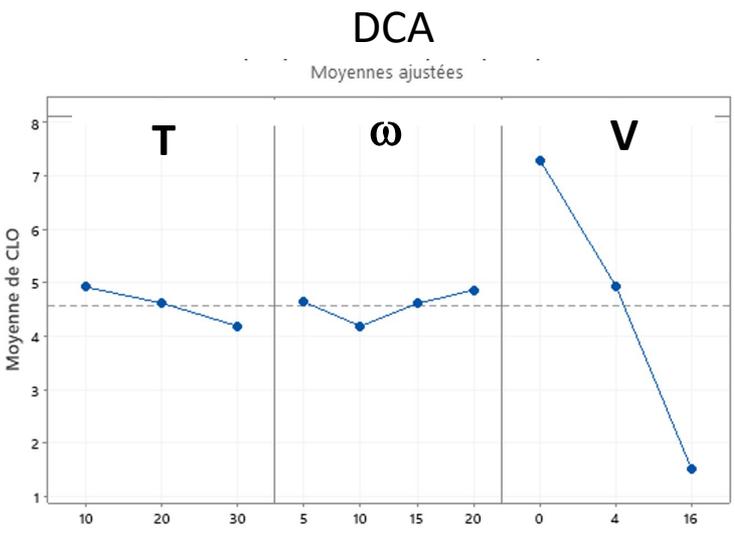
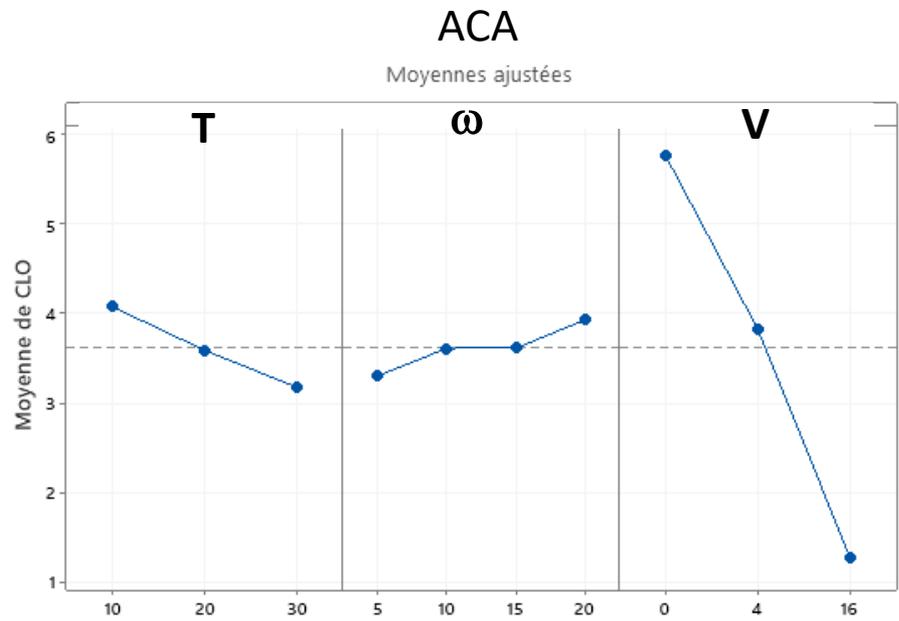
a.c : avec couture s.c : sans couture



$\omega_{\text{air}} = 10 \text{ g/kg}$
 $T_{\text{air}} = 20 \text{ °C}$



Effets de la température, humidité et vitesse de vent sur la résistance thermique tels que générés par le plan d'expérience



- La température n'a pas une influence significative sur les performances d'isolation thermique des assemblages.
- La résistance thermique augmente légèrement avec l'augmentation de l'humidité spécifique dans le milieu.
- Le vent, orienté verticalement par rapport aux assemblages, affecte considérablement l'isolation thermique.
- L'influence du vent sur l'isolation des assemblages est reliée à la compressibilité des assemblages, la perméabilité à l'air et la présence des coutures.



Le génie pour l'industrie

Université 
de Montréal
et du monde.



Conception de structures textiles biosourcées super isolantes et adaptées aux conditions hivernales canadiennes

Ludwig Vinches, Ph.D. (UdeM)

Stéphane Hallé, Ing., Ph.D. (ÉTS)

Benoit Dugué, Ph.D. (Université de Poitiers)

Olivier Dupuy, Ph.D. (Université de Poitiers/UdeM)

Les parties prenantes du projet

➤ 900 000 \$ sur 4 ans



➤ 3 universités

- 1 stagiaire postdoctorale
- 4 étudiants.es au doctorat
- 4 étudiants.es à la maîtrise
- 8 à 10 stagiaires de 1er cycle



➤ 2 partenaires industriels (574 000 \$)



Les objectifs

- Concevoir des assemblages super isolants en intégrant des matériaux biosourcés et avancés
- Développer et valider une méthodologie adaptée pour mesurer l'isolation thermique dans des conditions similaires aux conditions hivernales canadiennes
- Développer un modèle numérique de la résistance thermique dans la structure même des assemblages textiles
- Valider les prototypes en environnement simulé avec des participants humains

Les assemblages super isolants

Isolants thermiques

laterre.ca



Asclépiade

- Intégrité structurelle déficiente
- Très forte sensibilité à l'usure mécanique

shoo-foo.com



Kapok

- Non validé en condition d'utilisation
- Théorie du transfert thermique peu étudiée

french.alibaba.com



PLA

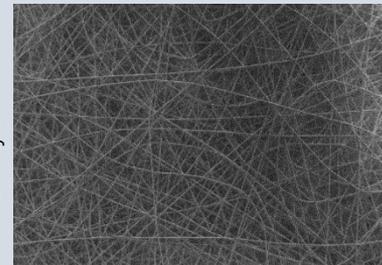
Structures de maintien

thepressfree.com



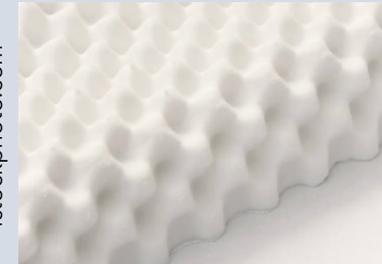
Aérogel

univ-lyon1.fr



Électrofilage

istockphoto.com



Matériaux à mémoire de forme

+

Mesure de l'isolation thermique des assemblages et modèle numérique de la résistance thermique

Isolation thermique

Adaptation de ISO 11092:2014

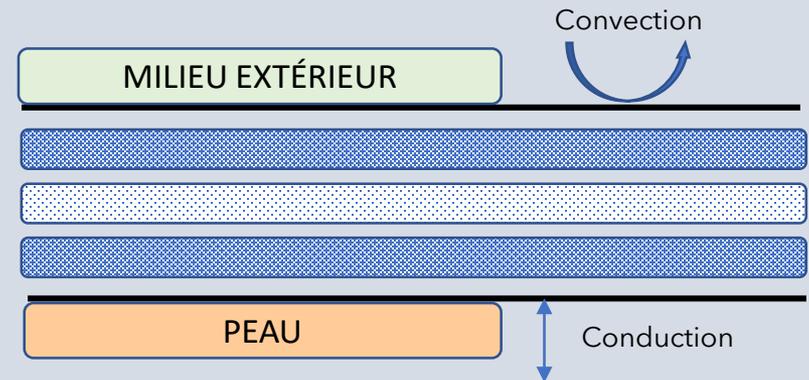
Textiles – Effets physiologiques – Mesurage de la résistance thermique et de la résistance à la vapeur d'eau en régime stationnaire (essai de la plaque chaude gardée transpirante)



Notre propre « modèle de peau »

- Conception et validation
- Utilisation d'une chambre frigorifique
 - - 40 °C à + 20 °C
 - Flux d'air vertical et horizontal à vitesse variable (0 à 40 km/h)

Modèle numérique



Représentation tridimensionnelle fidèle des structures :

- Microscopie électronique
- Tomographie aux rayons X haute résolution

Valider les prototypes en environnement simulé avec des participants humains

Chambre climatique contrôlée
- 20 °C

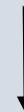
- Utilisation du prototype (combinaison)
- Utilisation d'une combinaison commercialisée

Effort physique (marche/course)
pendant 30 minutes



Mesure des réactions physiologiques
et cognitives
Mesures perceptives de confort thermique

40 participants : 20 hommes / 20 femmes de
18 à 40 ans



Fréquence cardiaque
Consommation d'oxygène
Température interne
Oxygénation musculaire
Oxygénation cérébrale
Tests de vigilance
Tests de fonctions exécutives
Évaluation du confort thermique

Les défis majeurs

- Passer d'un niveau de développement technologique de TRL 3 à TRL 6 en 4 ans
- S'assurer d'une synergie maximale entre les chercheurs et les partenaires industriels dans un projet multidisciplinaire (textile, mécanique, transfert thermique, matériaux avancés, matériaux biosourcés, physiologie de l'effort, contraintes thermiques, etc.)
- Répondre aux attentes des partenaires industriels pour assurer une mise en marché à moyens termes
- Assurer une formation optimale d'une vingtaine d'étudiants.es
- Inscrire le projet dans une économie locale, durable et respectueuse de l'environnement

Merci pour votre attention
Des questions ?

