

# Développement d'assemblages textiles à haute performance thermique adaptés aux conditions de froid extrême

**Marwa STA, Ph.D**  
Chercheure postdoctorale  
(UdeM)

**Mostafa ALAKHDAR**  
Étudiant au doctorat  
(ÉTS)

**Pr Ludwig Vinches, Ph.D (UdeM)**  
**Pr Stéphane Hallé, Ing., Ph.D (ÉTS)**

**Congrès de l'AQHSST**  
**Jeudi 11 mai 2023**

# Contexte

## Le froid est l'un des risques auxquels les travailleurs peuvent être exposés sur leur lieu de travail

Le Québec est une province qui peut connaître des températures très basses pendant l'hiver, ce qui peut entraîner une exposition prolongée au froid pour les travailleurs qui effectuent des activités en extérieur.

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



[www.safetyandhealthmagazine.com/](http://www.safetyandhealthmagazine.com/)



[www.hydroquebec.com/](http://www.hydroquebec.com/)

## Travail en conditions de froid et de froid extrême

Les conditions thermiques froides augmente le risque de **fausses manœuvres** ou d'**accidents** causés par :

- Une diminution de la dextérité manuelle
- Baisse de la vigilance
- Perte de l'aptitude à prendre une décision rationnelle
- Des temps de réaction plus longs
- Une coordination motrice moins précise
- Une diminution de la force musculaire

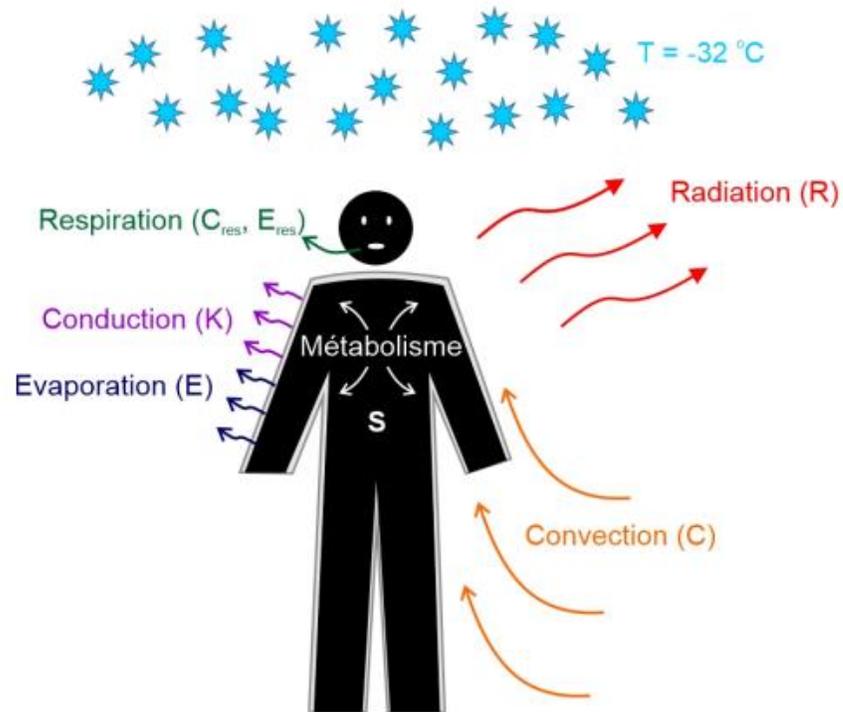
Les conditions de froid ou de froid extrême peuvent aussi causer un danger pour la santé des travailleurs.

Les maladies professionnelles liées à des conditions météorologiques extrêmes, y compris le froid, représentent environ 1 % de toutes les maladies professionnelles déclarées en 2021 [1].

# Contexte

## Thermorégulation

La thermorégulation représente l'ensemble des processus permettant au corps humain de maintenir sa température interne dans des limites normales quel que soit son niveau métabolique ou la température du milieu ambiant.



Bilan thermique du corps humain

## Facteur environnementaux

- Température de l'air
- Humidité relative
- Vitesse de l'air
- Température radiante moyenne

## Facteurs liés à l'individu

- Métabolisme
- **Habillement**

Facteurs influençant l'équilibre thermique du corps

## La résistance thermique des textiles

La résistance thermique des textiles est déterminée par la quantité de chaleur qui peut traverser le matériau.

La résistance thermique d'un textile dépend de plusieurs facteurs :

- La composition
- L'épaisseur
- La structure
- Les propriétés du matériau

La résistance thermique des textiles est souvent exprimée en unité de mesure appelée "clo", qui représente la résistance thermique d'un vêtement.

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

### Isolement thermique requis du vêtement [2]

<u>Température de l'air</u> <u>(° C)</u>	<u>Isolation thermique de base des</u> <u>vêtements de protection contre le froid</u> <u>(clo)</u>
0	2,5
-10	2,5
-20	4,2
-30	4,2

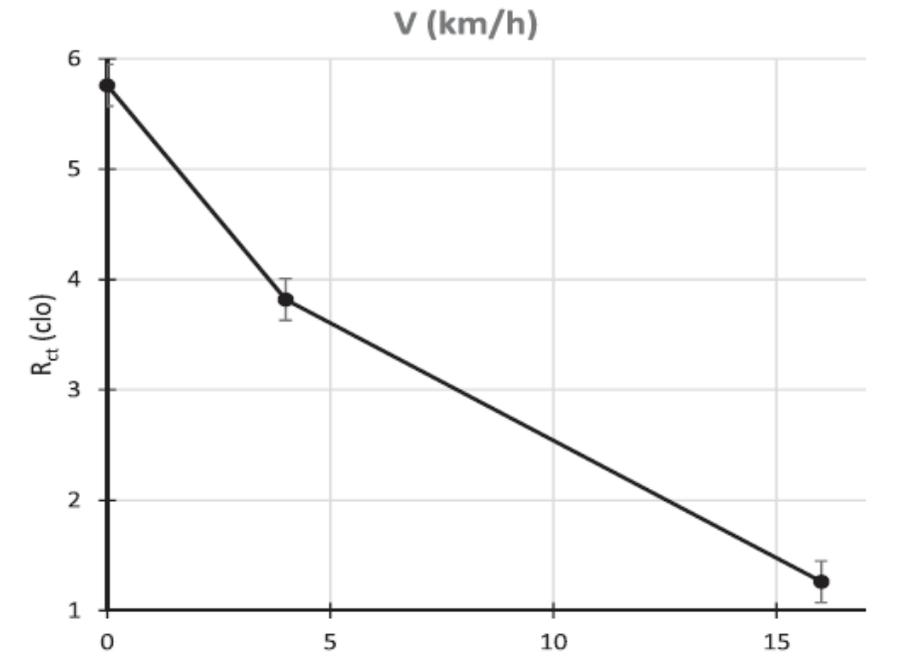
# Contexte

## 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.

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

Température de l'air en °C, ciel ensoleillé	Vitesse du vent									
	Pas de vent notable		8 km/h		16 km/h		24 km/h		32 km/h	
	durée max. d'exposition au froid	nombre de pauses	durée max. d'exposition au froid	nombre de pauses	durée max. d'exposition au froid	nombre de pauses	durée max. d'exposition au froid	nombre de pauses	durée max. d'exposition au froid	nombre de pauses
de -26 à -28	120 min	1	120 min	1	75 min	2	55 min	3	40 min	4
de -29 à -31	120 min	1	75 min	2	55 min	3	40 min	4	30 min	5
de -32 à -34	75 min	2	55 min	3	40 min	4	30 min	5	Interrompre tout travail non urgent	
de -35 à -37	55 min	3	40 min	4	30 min	5	Interrompre tout travail non urgent			
de -38 à -39	40 min	4	30 min	5	Interrompre tout travail non urgent					
de -40 à -42	30 min	5	Interrompre tout travail non urgent							
-43 ou en dessous	Interrompre tout travail non urgent									



**Diagramme d'effet de la vitesse du vent (V) sur le R<sub>ct</sub> de l'assemblage textile [3]**



M. Zemzem et al, Safety and Health at Work, 2022

**Assemblage isolant**

**Fibres naturelles**



www.technitextile.ca

**Assemblages biosourcés isolants**

**Vêtements de travail**

**Modèle de peau**

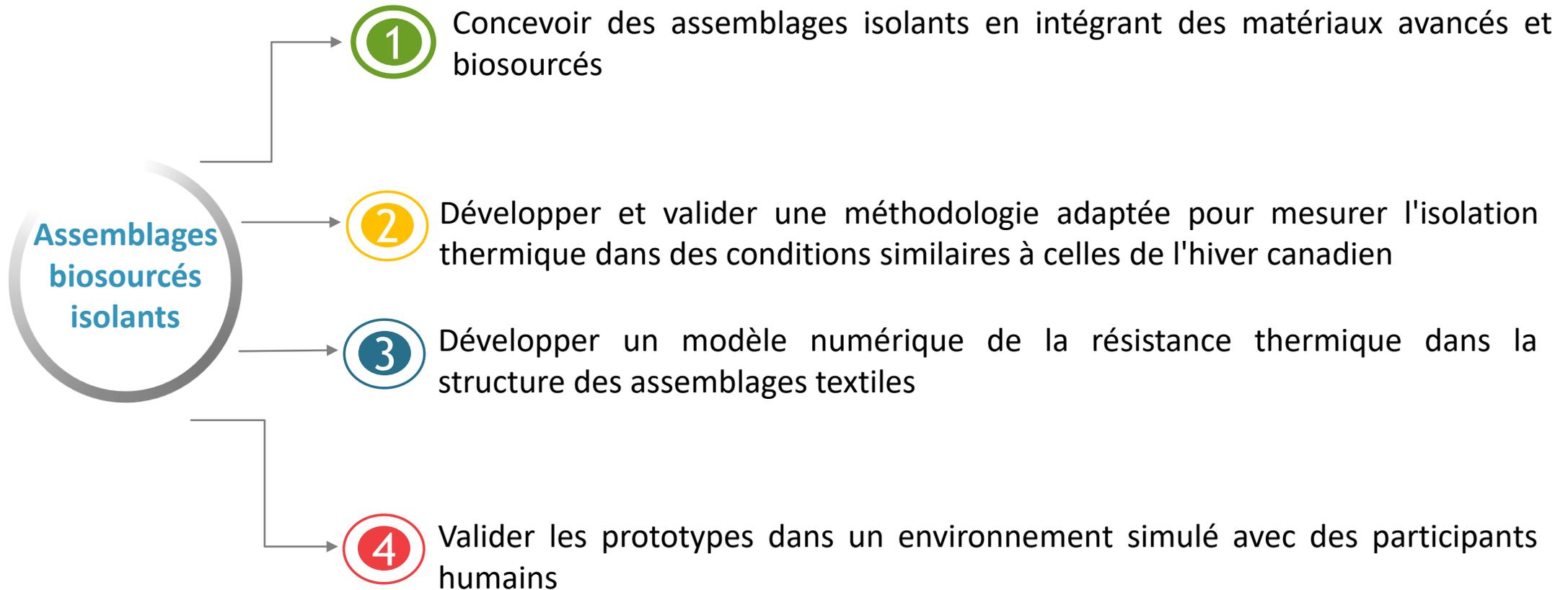


www.latribune.ca



M. Zemzem et al, Safety and Health at Work, 2022

# Objectifs



# Objectif 1: Concevoir des assemblages isolants

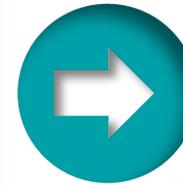
## Caractéristiques d'un assemblage textile isolant

L'assemblage doit avoir une bonne résistance thermique



Isolation thermique

Résistance à la compression



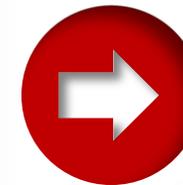
L'assemblage doit avoir une bonne résistance à la compression pour maintenir l'intégrité structurelle

L'absorption et la rétention d'eau de l'assemblage doivent être aussi proches que possible de zéro



Respirabilité et gestion de l'humidité

Confort



L'ensemble doit être léger avec un bon volume pour obtenir un maximum de confort

# Matériaux utilisés dans un assemblage textile isolant

- Isolation thermique
- Structure tubulaire
- Hydrophobe
- Imputrescible

## Asclépiade

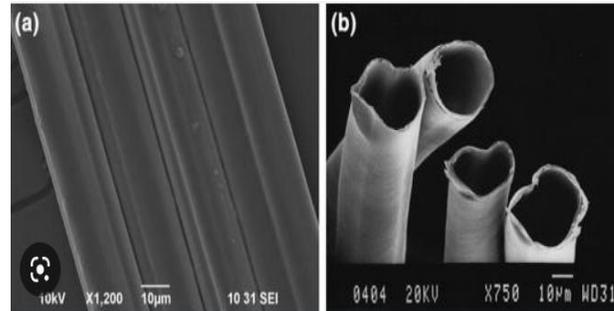


Image MEB des fibres d'asclépiade

## Fibres PLA

- Biopolymères
- Résistance à l'élongation
- Biodégradables
- Antibactériens

- Isolation thermique
- Résistant à l'humidité
- Séchage rapide
- Hypoallergénique

## Kapok

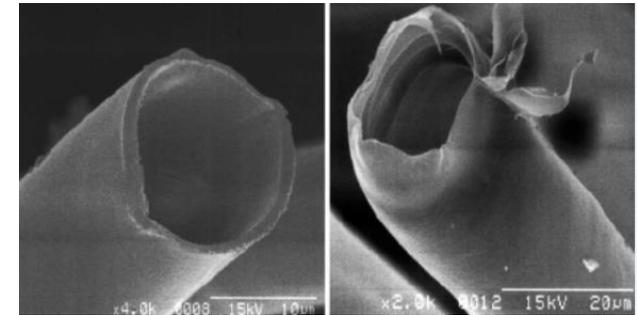


Image MEB des fibres de kapok

## Liège

- Isolation thermique
- Renouvelable/biodégradable
- Imperméable/léger
- Résistant au feu
- Hypoallergénique

Concevoir des  
assemblages isolants  
en intégrant des  
matériaux avancés et  
biosourcés

# Isolant fourni par Eko-Terre (Vegeto ®)

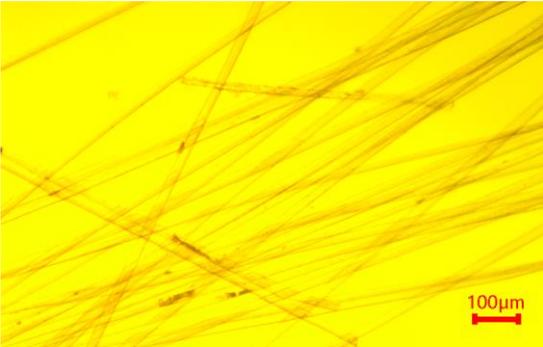


Image au microscope optique de fibres d'asclépiade  
(25 ± 3) µm

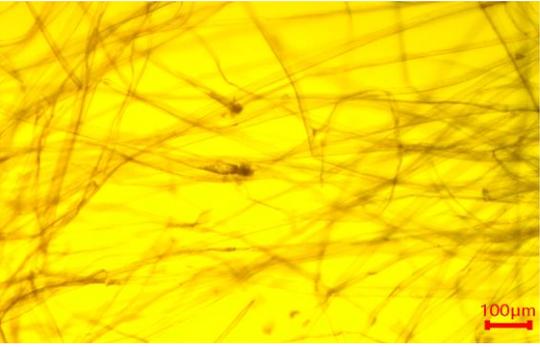
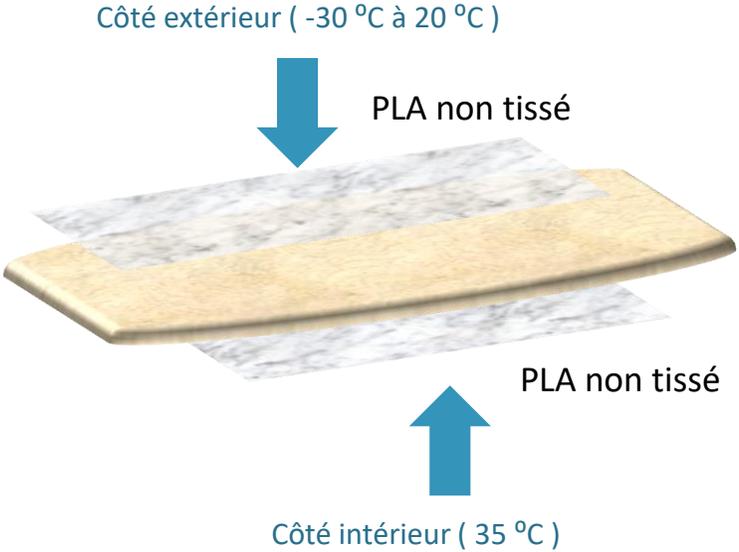


Image au microscope optique de fibres de Kapok  
(25 ± 4) µm



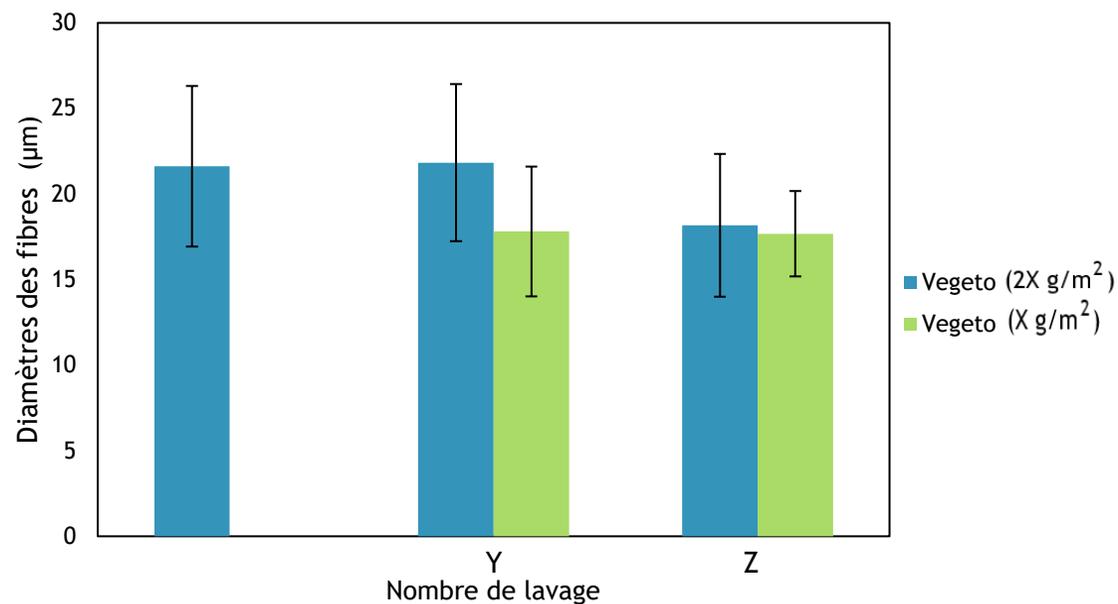
Image au microscope optique des fibres PLA  
(15 ± 0,5) µm



Mélange biosourcé  
(Asclépiade/Kapok)  
avec des fibres PLA

## Isolant fourni par Eko-Terre (Vegeto ®)

<u>Nom d'échantillon</u>	<u>Diamètre des fibres</u>
Vegeto (2X g/m <sup>2</sup> )	(21,60 ± 5) µm
Vegeto (2X g/m <sup>2</sup> ) lavé Y fois	(21,82 ± 5) µm
Vegeto (2X g/m <sup>2</sup> ) lavé Z fois	(18,16 ± 4) µm
Vegeto (X g/m <sup>2</sup> ) lavé Y fois	(17,80 ± 4) µm
Vegeto (X g/m <sup>2</sup> ) lavé Z fois	(17,66 ± 2) µm



Variation du diamètre des fibres en fonction du nombre de lavages

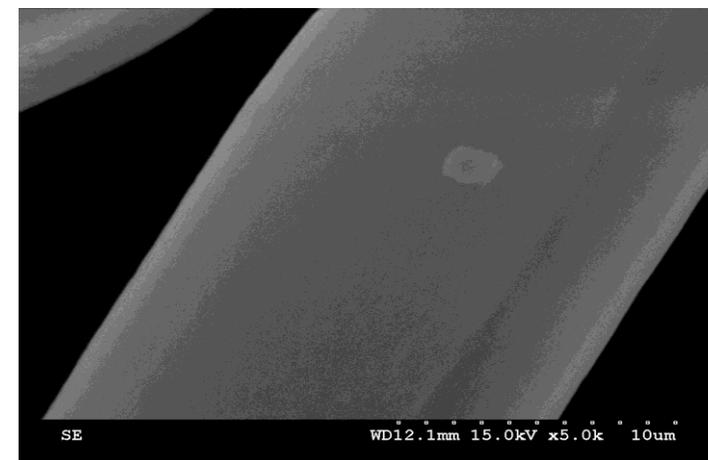


Image MEB des fibres d'asclépiade  
(25 ± 3) µm

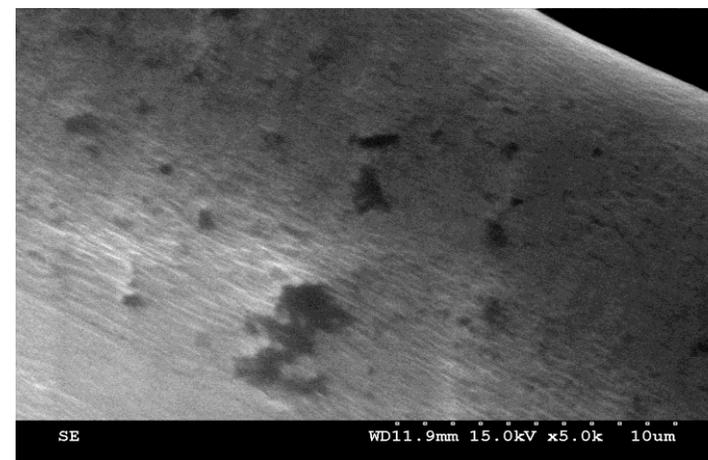
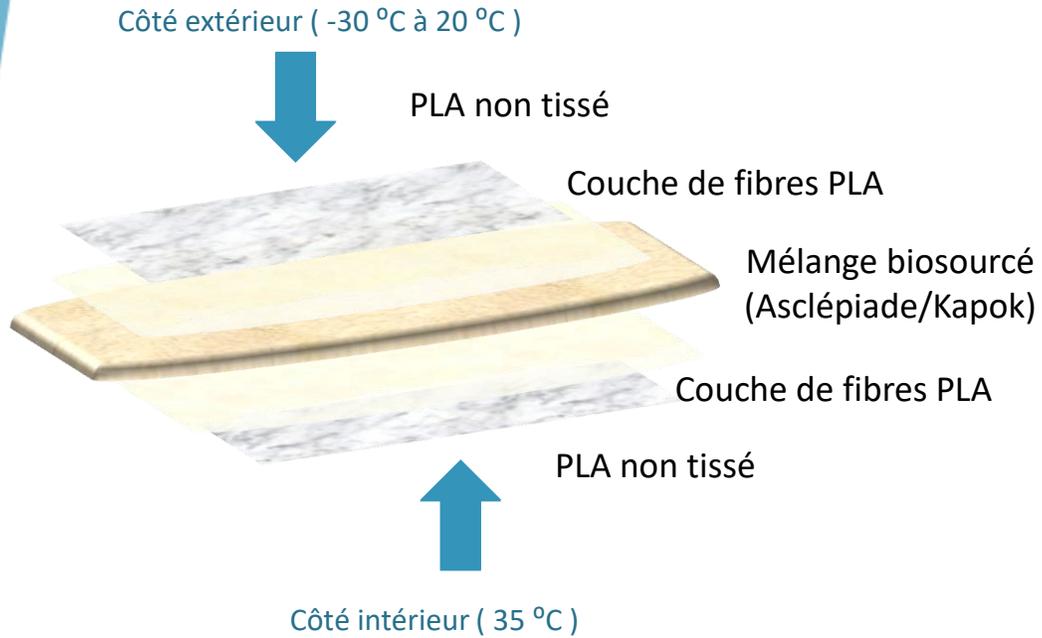
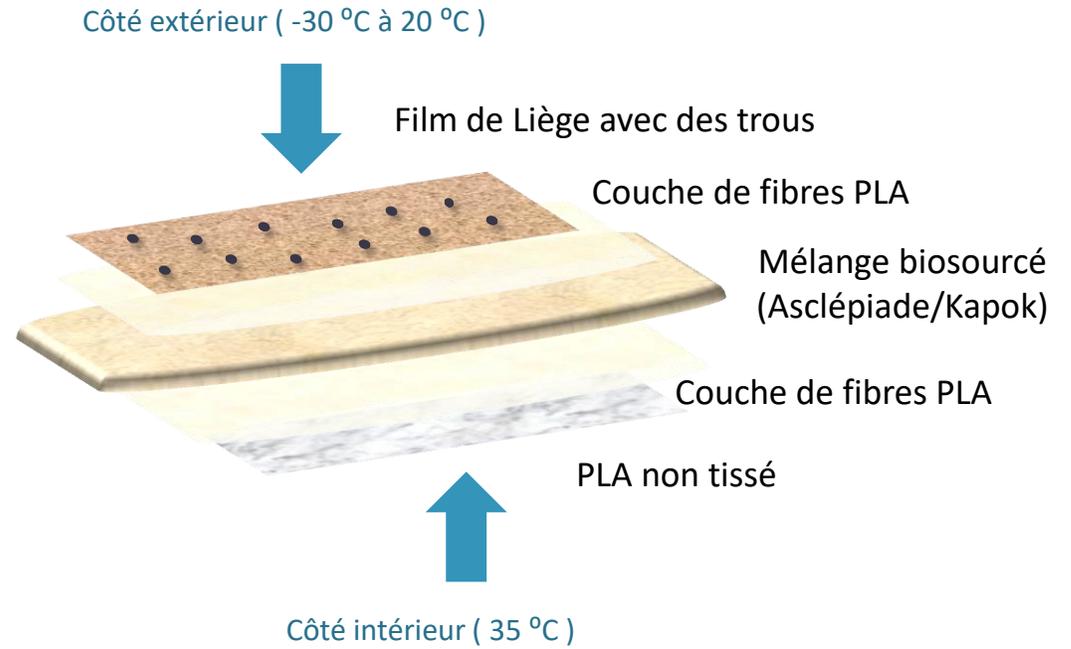


Image MEB des fibres d'asclépiade après lavage  
(24 ± 2) µm

# Assemblage d'isolation thermique multicouche



**Structure multicouche**



**Structure multicouche**

Contrôle des proportions des couches et effet sur la respirabilité et la gestion de l'humidité

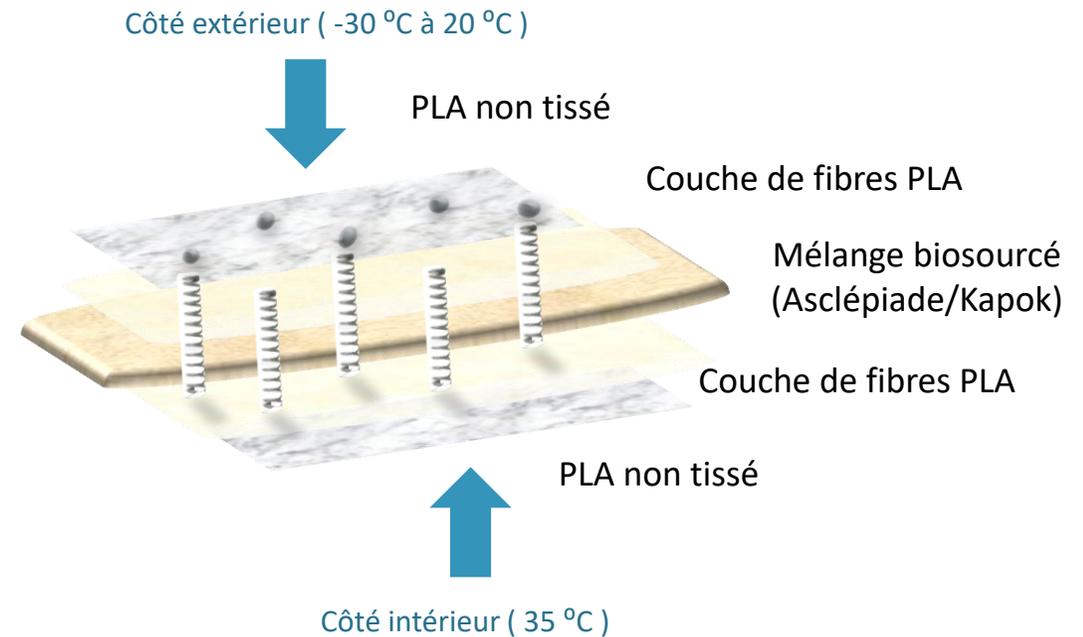
## Assemblage d'isolation thermique à mémoire de forme



<https://fr.made-in-china.com/>

### Alliage à mémoire de forme

- Faible densité
- Excellente résistance à la corrosion
- Non magnétique et non toxique
- Super-élasticité
- Mémoire de forme



Contrôle de l'emplacement et du nombre de ressorts et de leur effet sur la résistance à la compression

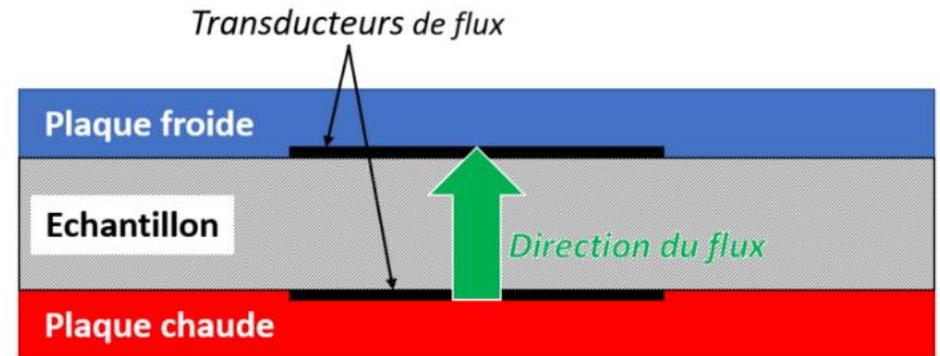
## Objectif 2: Mesurer l'isolation thermique dans des conditions similaires à celles de l'hiver canadien

Méthodes de mesure de la résistance thermique :

- Méthode du flux de chaleur
- Méthode du mannequin thermique
- **Méthode de la plaque chaude gardée**

Développer et valider une méthodologie adaptée pour mesurer l'isolation thermique dans des conditions similaires à celles de l'hiver Canadien

La méthode la plus précise et la plus largement utilisée pour mesurer la résistance thermique des assemblages textiles



<https://www.thermoconcept-sarl.com/>



Thermal manikin (Maria, P.T. Teknik, Denmark)

## ISO 11092

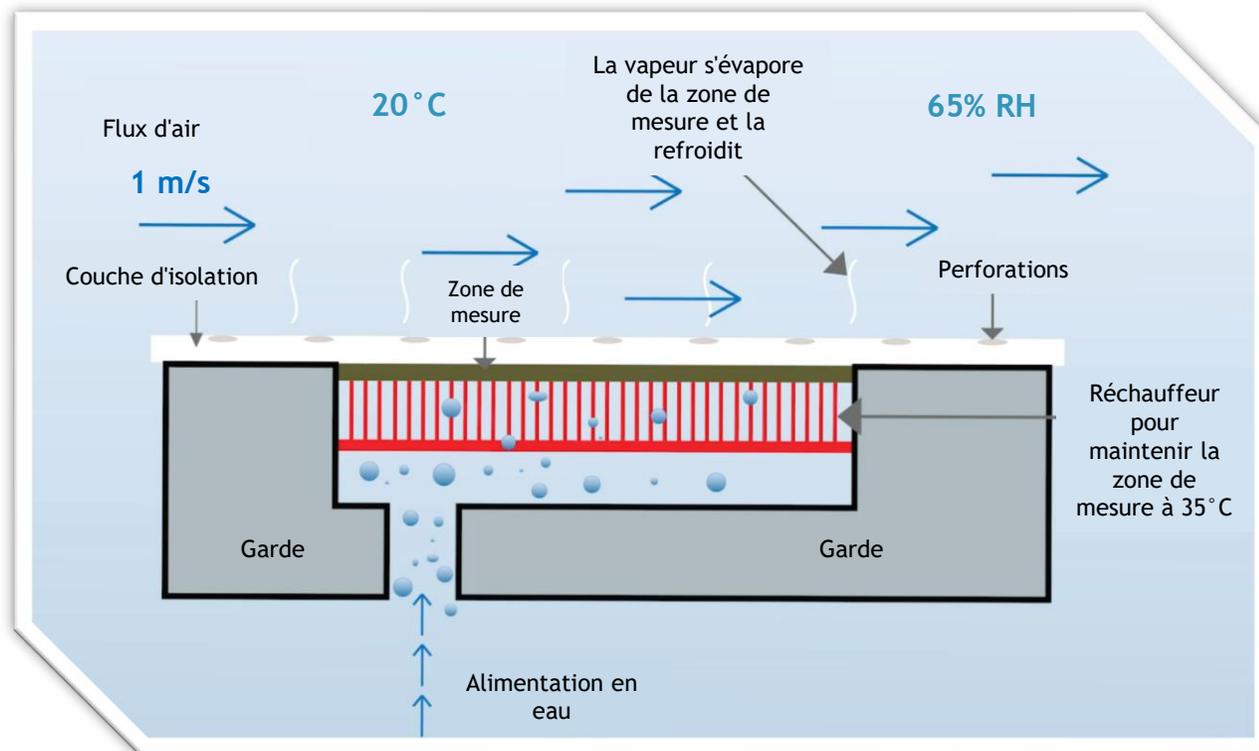


Illustration du modèle de peau selon ISO 11092(2014) (<https://cloinsulation.com>)

La résistance thermique est déterminée en imposant une température ambiante de 20 °C, une humidité relative de 65% et une vitesse d'air latérale de 1 m/s.

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

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)*

## Conception d'un modèle de peau

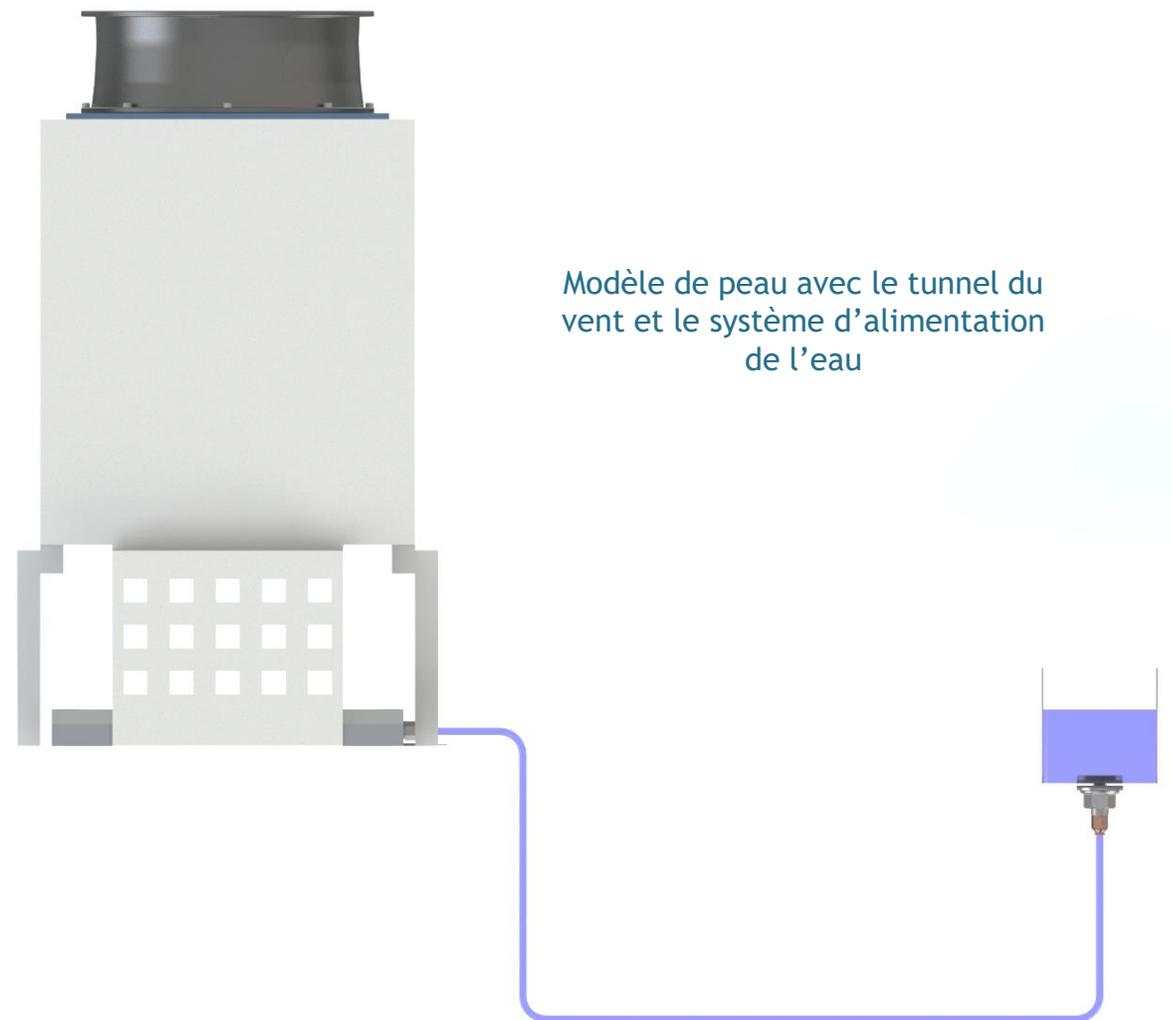
Utilisation d'une chambre environnementale pour mesurer l'isolation thermique :

- À des températures variables entre 20 et -30°C.
- À des taux d'humidité relative variables entre 0 et 100%.
- À des vitesses d'air variables entre 0 et 30km/h.



Chambre environnementale de la laboratoire thermique et science du bâtiment de l'ETS

## Conception d'un modèle de peau



# Validation du modèle de peau

## Homogénéisation de la température dans les plaques

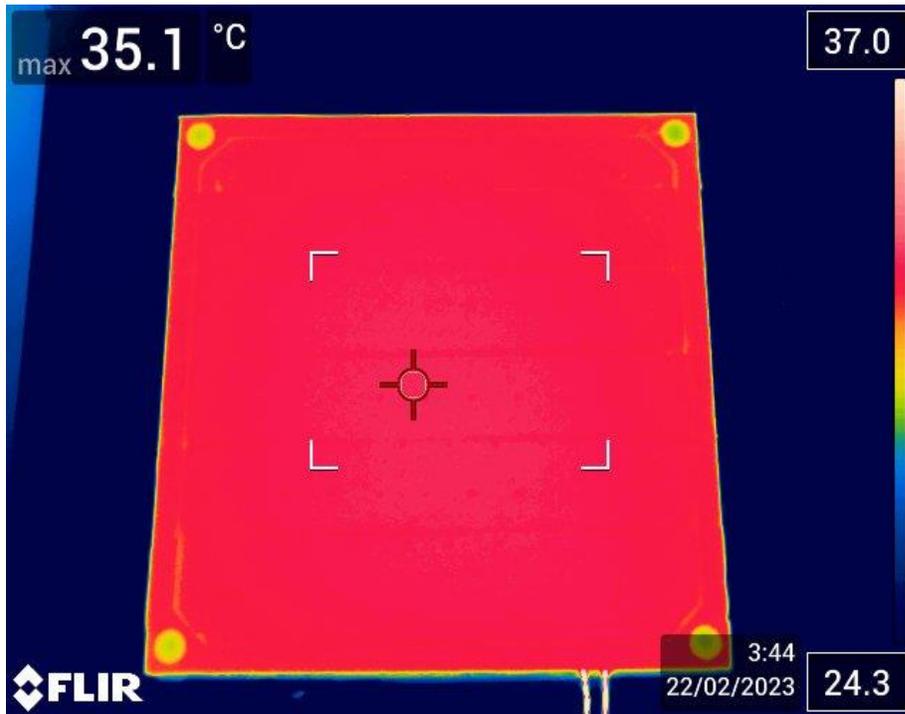


Image thermique du modèle de peau

La température du modèle de peau est de  $35 \pm 0.1 \text{ °C}$

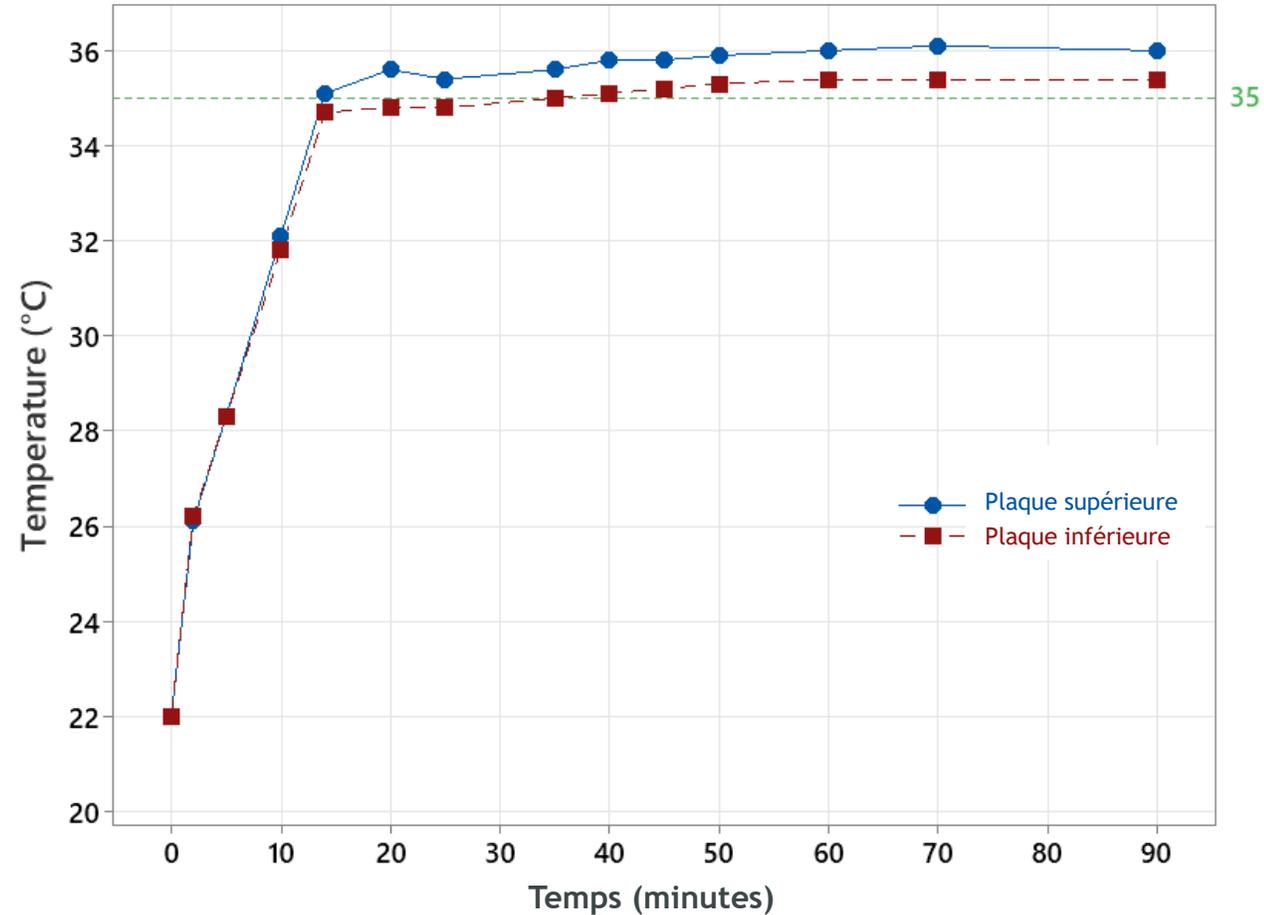


Modèle de peau

Variations des températures des 3 thermocouples en fonctions du temps

# Validation du modèle de peau

## Températures des plaques inférieure et supérieure du modèle de peau



Variations des températures dans les 2 plaques en fonctions du temps

## Futurs travaux

1

Évaluer et mesurer l'isolation thermique et les autres propriétés des différents assemblages à l'aide d'une méthode appropriée au modèle de peau et les classer en fonction de leur performance thermique.

2

Quantifier les différents modes de transfert de chaleur dans les structures textiles à l'aide d'un modèle numérique.

3

Comparer les réactions physiologiques et cognitives de participants exposés au froid portant un dispositif commercial et une combinaison prototype développée dans le cadre de ce projet.

# Groupe de recherche



Pr Ludwig Vinches



Pr Stéphane Hallé



Pr Benoit Dugué



Dr Olivier Dupuy



Marwa Sta, Ph.D  
Chercheure postdoctorale



Mostafa ALAKHDAR  
Étudiant au doctorat



Mohsen Mortazavinejad  
Étudiant au doctorat



Hilary Moukam Njeumeni  
Étudiant en M.Sc.A.



Félix Toupet  
M.Ing. Étudiant



Nils Goujou  
Étudiant au doctorat

Merci pour votre attention !