

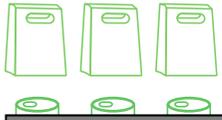
SOLIDAIRES
CHARLIE HEBDO

SFT 8 janvier Paris

Développement de matériaux super-isolants thermiques à partir de coproduits renouvelables

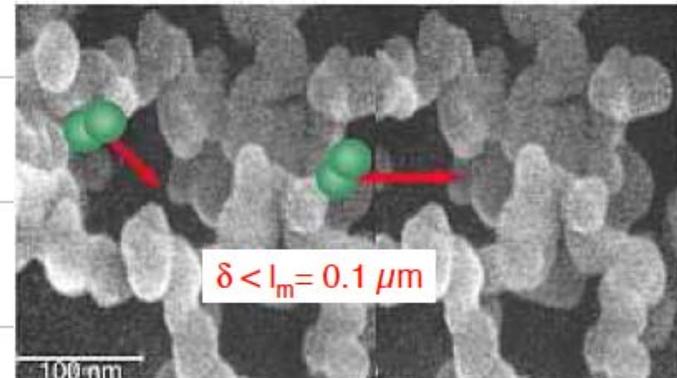
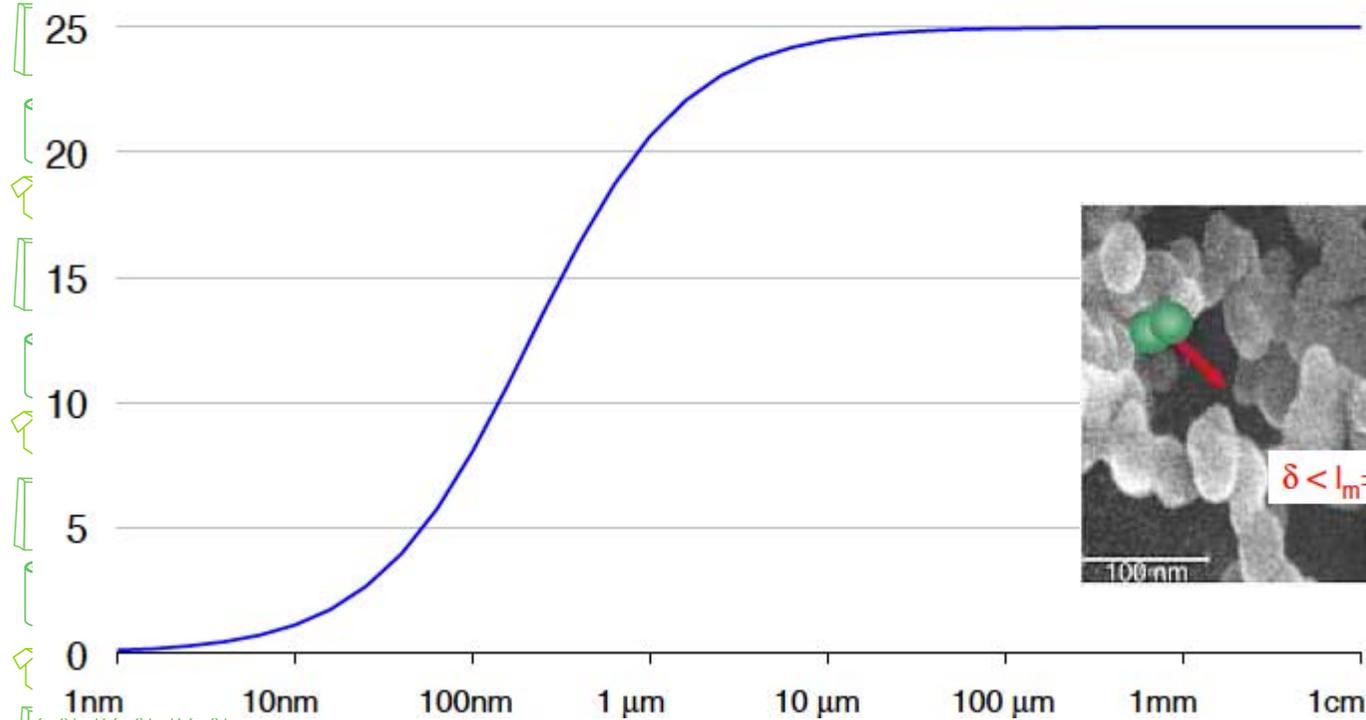
Y.GROHENS, Clara
JIMENEZ SAELICES, Bastien
SEANTIER, Bernard
CATHALA





Super insulation : Air Confinement

Thermal conductivity as a function of pore size



λ
 $\text{mW.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Pore diameter



Contrainte du libre parcours moyen de l'air

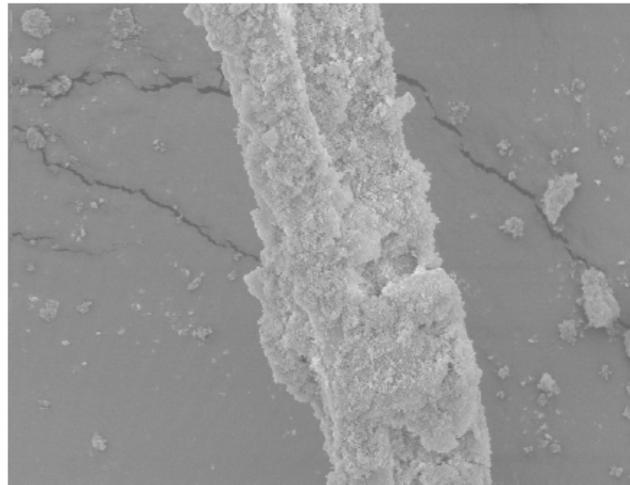
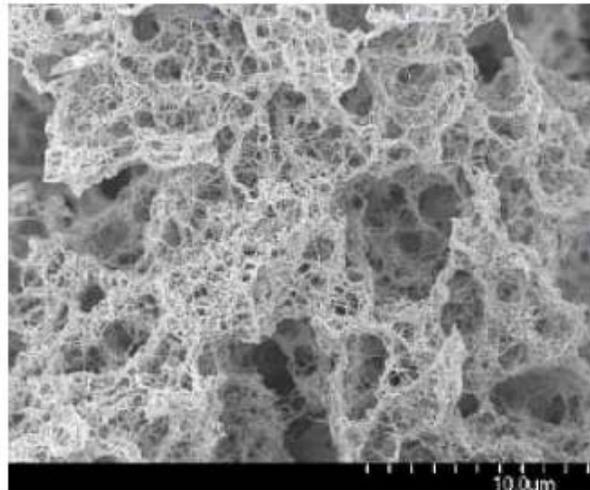
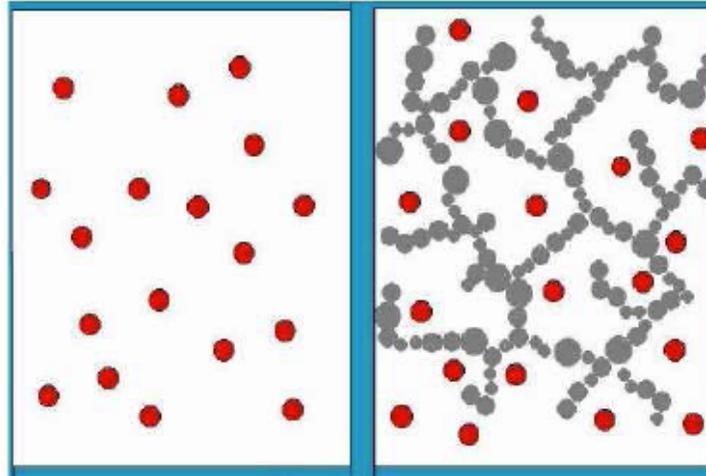
$$\lambda(d) = \frac{\lambda_0}{1 + 2\alpha \frac{l}{d}}$$

Effet Knüdsen

d diamètre de pores

l libre parcours moyen (70nm)

α facteur géométrique (1.5)



Matelas Aspen

$\lambda = 14$



L'aérogel de silice, matériau développé dans les années 30 par Kistler, est connu comme le seul solide superisolant thermique transparent. Sa conductivité thermique effective est inférieure à 20 mW/m.K dans les CNTP.

Aérogels de silice mésoporeuse

Mécanismes physique de la conduction thermique

$$\lambda_e = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r = \lambda_{s+g} + \cancel{\lambda_r}$$

1 : solid conduction (phonons)

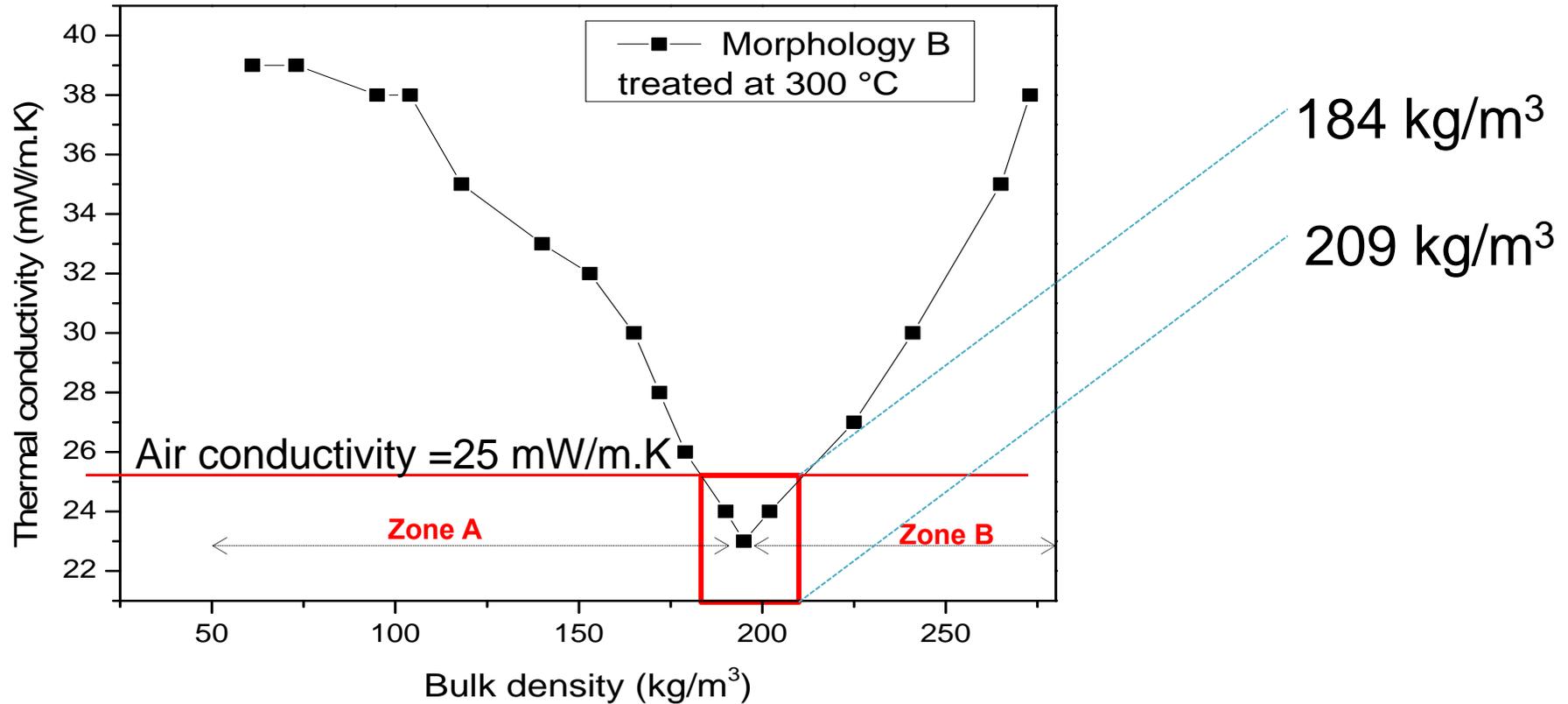
2 : gas conduction (molecules)

3 : radiation (photons)

$$\lambda_{s+g} = \varepsilon \cdot \lambda_g + (1 - \varepsilon) \cdot \lambda_s$$

ε : porosity > 90 %

Conductivité Thermique de silice mésoporeuse



- **Zone A** : Limitation of the mean free path of air molecules (70 nm)

➡ Reduction of gaseous conduction

- **Zone B** : Contact between particles

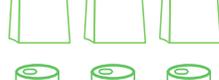
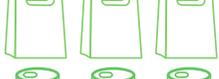
➡ Increasing the solid conduction

CARACTÉRISATION DES BIO-AÉROGELS

- **ORIGINE ET MORPHOLOGIE DES MATERIAUX**
- **PROPRIÉTÉS THERMIQUES**



Lin sur pieds

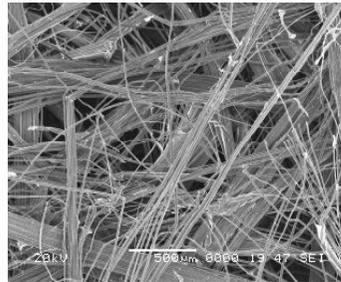


Fibre de Lin

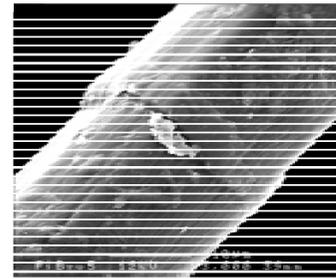
Structure composite hiérarchisé: composite



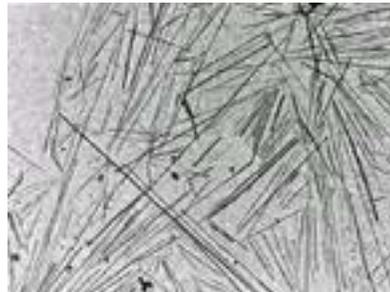
Section Tige



Fibres extraites

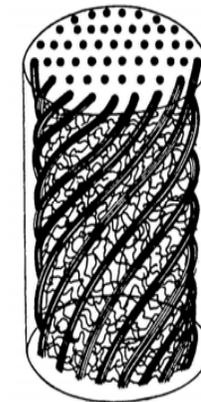


Surface Fibre

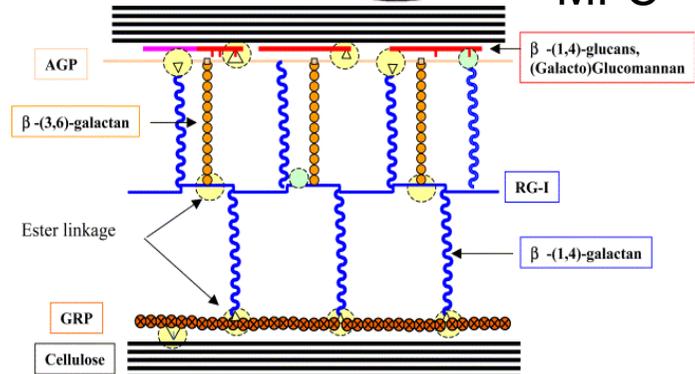


Wiskers

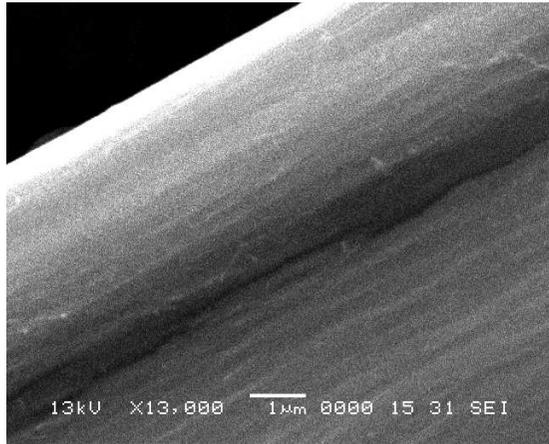
Structures fibres



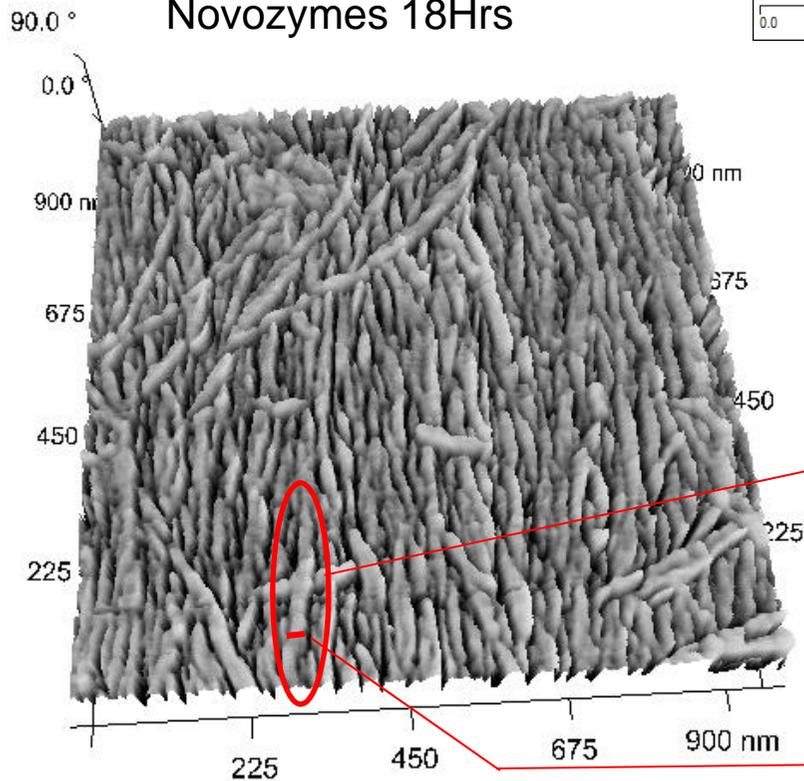
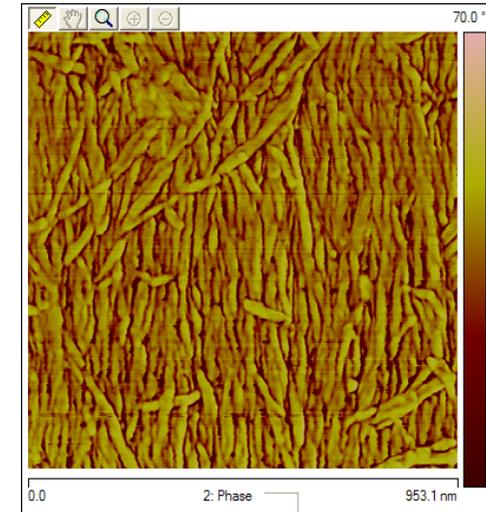
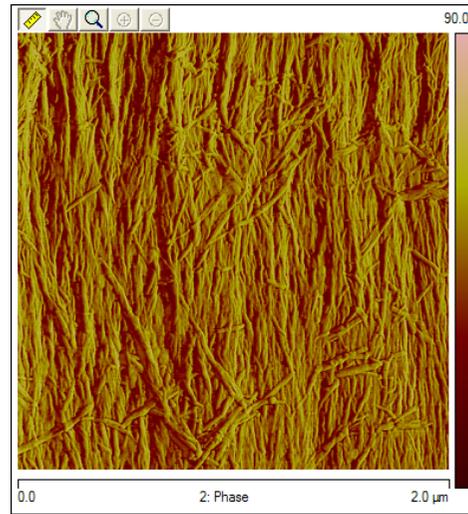
MFC



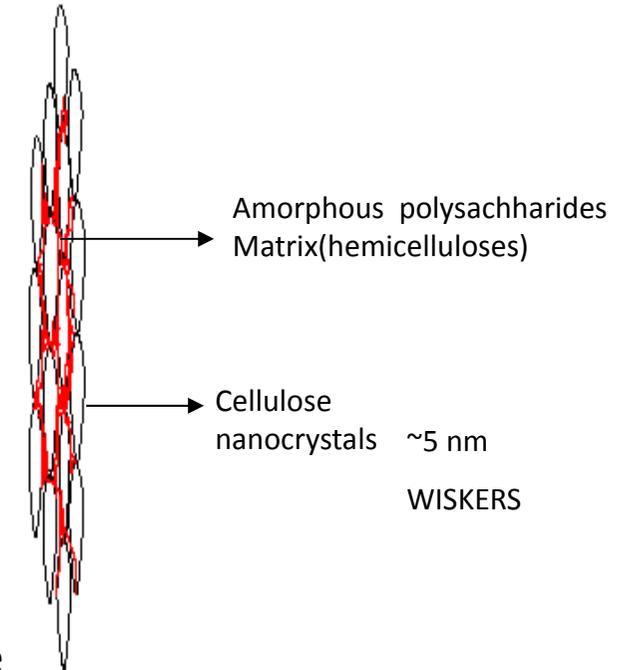
Effets des Enzyme sur les fibres de lin: Topographie



Novozymes 18Hrs



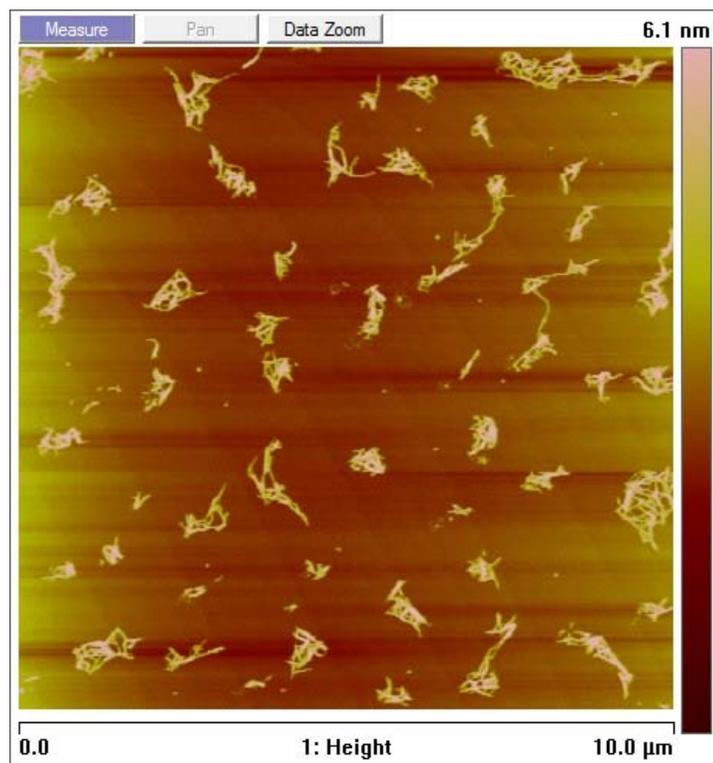
Size of the cellulose fibrils = 25-30 nm



**CARACTÉRISATION DES NANO FIBRILLES DE CELLULOSE
COMMERCIALES PAR AFM**

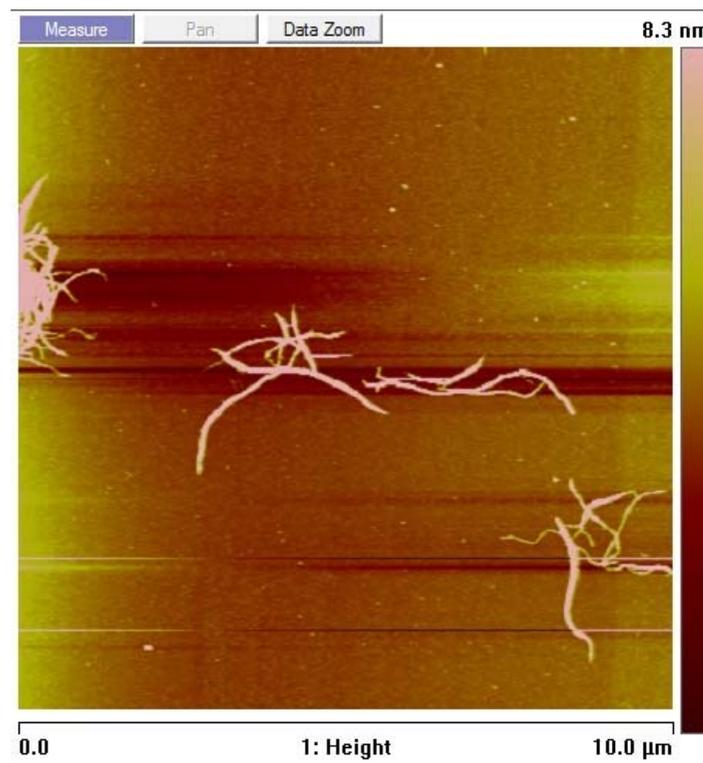
CARACTÉRISATION DES NANO FIBRILLES DE CELLULOSE COMMERCIALES PAR AFM

NFC TEMPO



10 μm

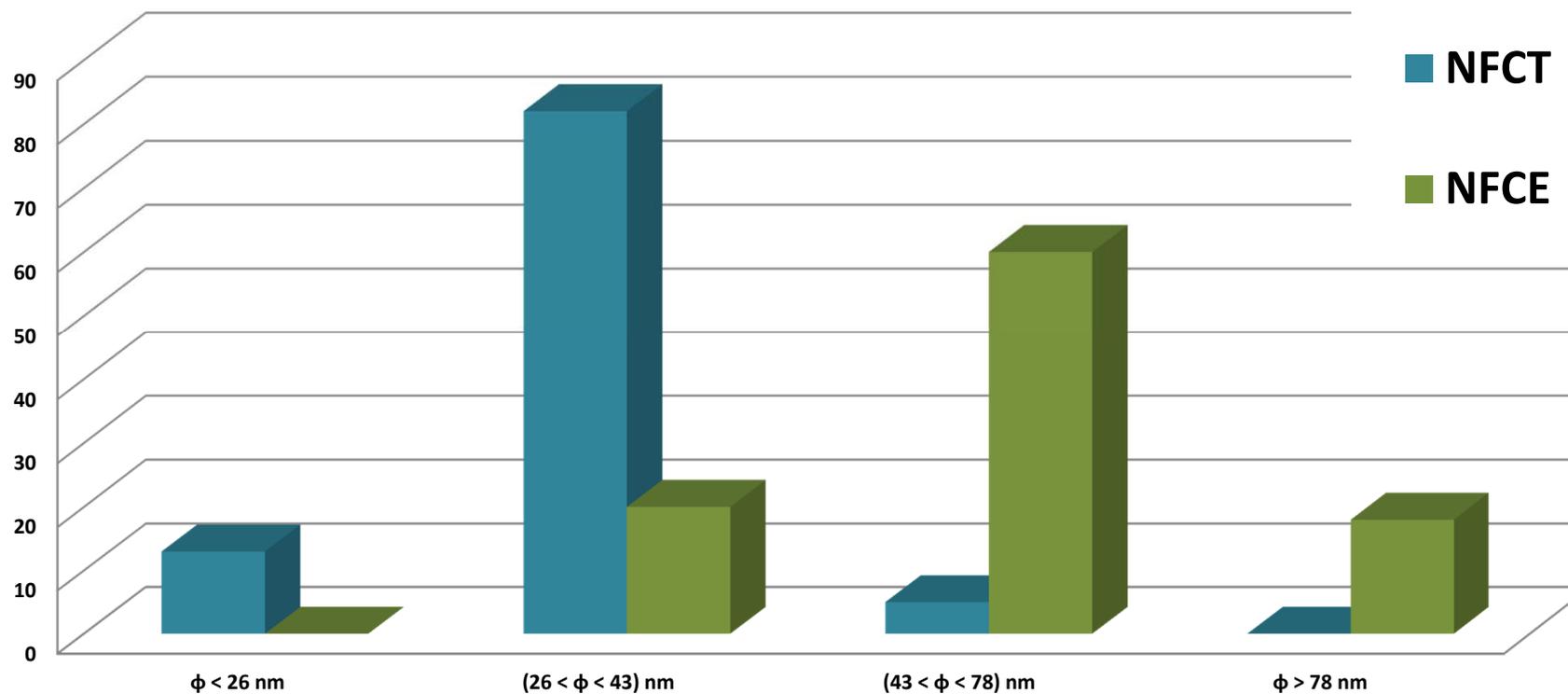
NFC ENZYMATIQUE



10 μm

CARACTÉRISATION DES NANO FIBRILLES DE CELLULOSE COMMERCIALES PAR AFM

DIAMÈTRES

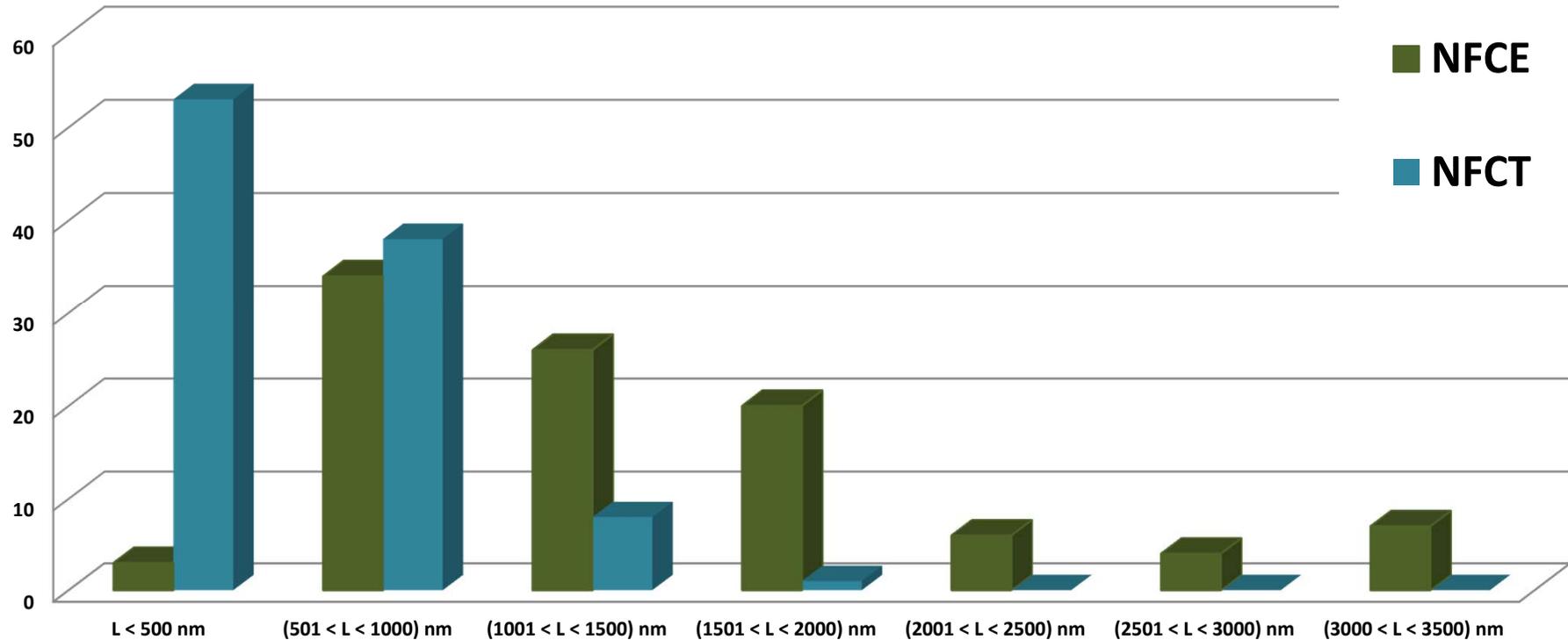


NFC TEMPO	
Diamètre moyenne	$(30,46 \pm 7,89) \text{ nm}$
Diamètre médiane	29 nm

NFC ENZYMATIQUE	
Diamètre moyenne	$(59,04 \pm 19,53) \text{ nm}$
Diamètre médiane	58 nm

CARACTÉRISATION DES NANO FIBRILLES DE CELLULOSE COMMERCIALES PAR AFM

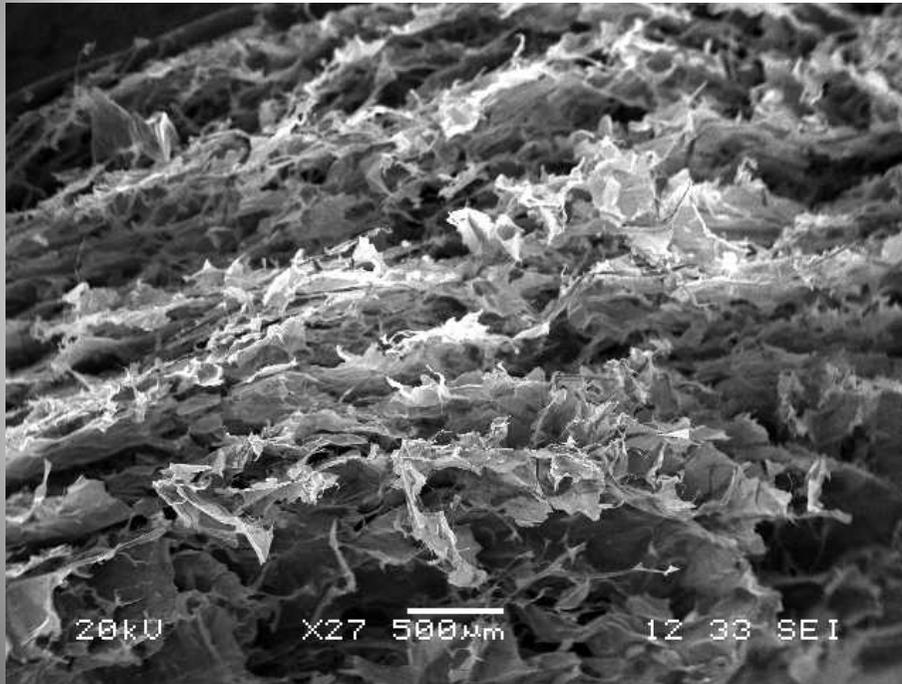
LONGUEUR



	Longueur minimal	Longueur maximal	Longueur moyenne	Longueur médiane
NFC Tempo	160 nm	1874 nm	(558,71 ± 303,07) nm	470,5 nm
NFC Enzymatique	322 nm	3432 nm	(1390,69 ± 767,12) nm	1158 nm

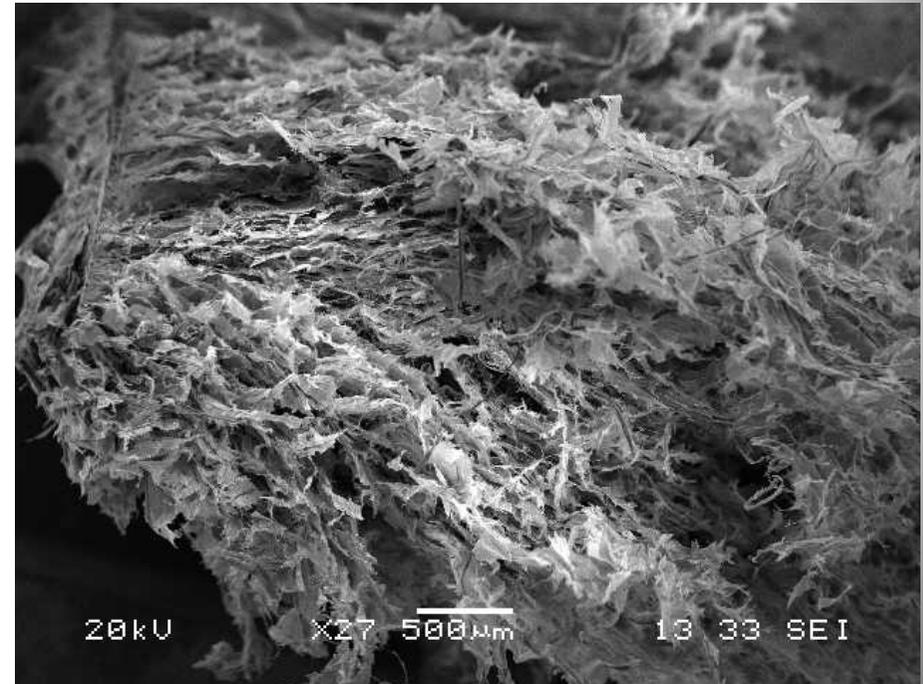
MORPHOLOGIE DES AÉROGELS après LYOPHILISATION

NFC TEMPO 1% (-20°C)



500 µm

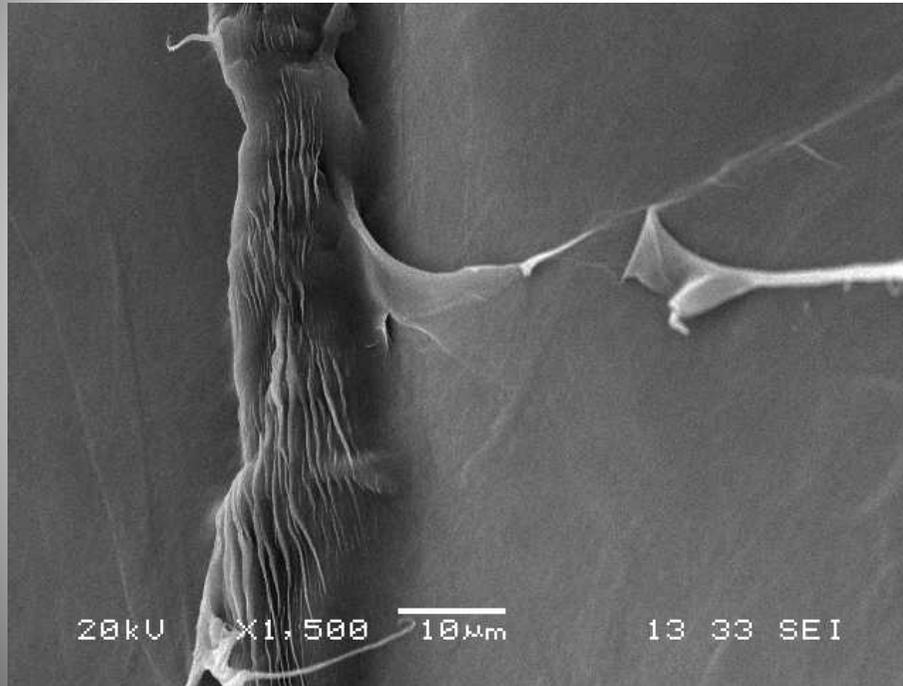
NFC TEMPO 1% (-80°C)



500 µm

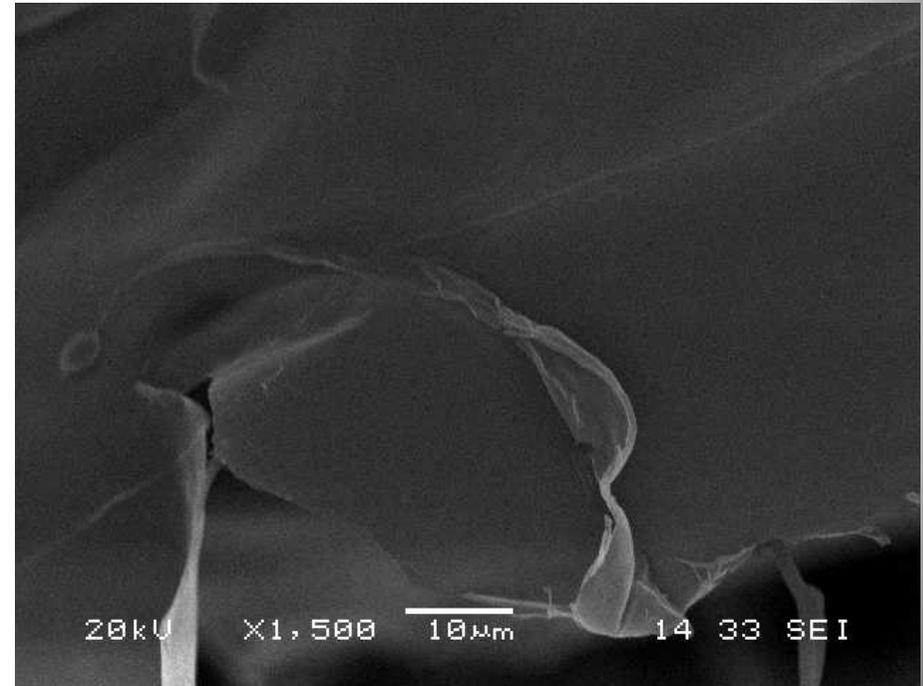
MORPHOLOGIE DES AÉROGELS

NFC TEMPO 1% (-20°C)



10 μm

NFC TEMPO 1% (-80°C)



10 μm



NFC TEMPO
1%



NFC
ENZYMATIQUES
2%



CONCLUSIONS

- **FIBRES OBTENUES PAR TRAITEMENT ENZYMATIQUE PLUS LARGES et LONGUES QUE CELLES OBTENUES PAR TRAITEMENT TEMPO (Chimique)**
- **LES FIBRES TEMPO DONNENT DES STRUCTURES PLUS RÉSISTANTES**
- **LA TEMPÉRATURE DE CONGÉLATION DE -80°C DONNE DES STRUCTURES AEROGELS PLUS STABLES QUE À -20°C**

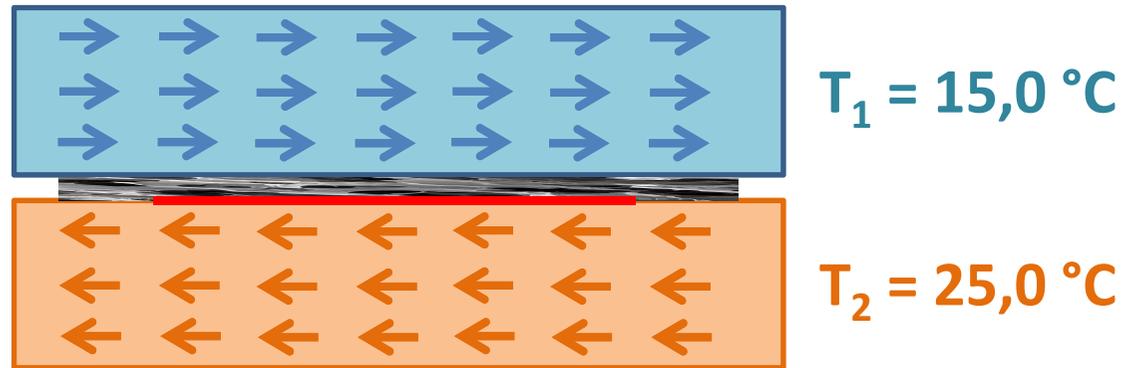
TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION THERMIQUE

PLAQUE CHAUDE GARDÉE

$$\Phi = \frac{\Delta T}{R}$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 10 \text{ °C}$$

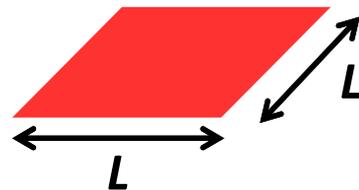
$$R = \frac{e}{S}$$



ΔT est imposée

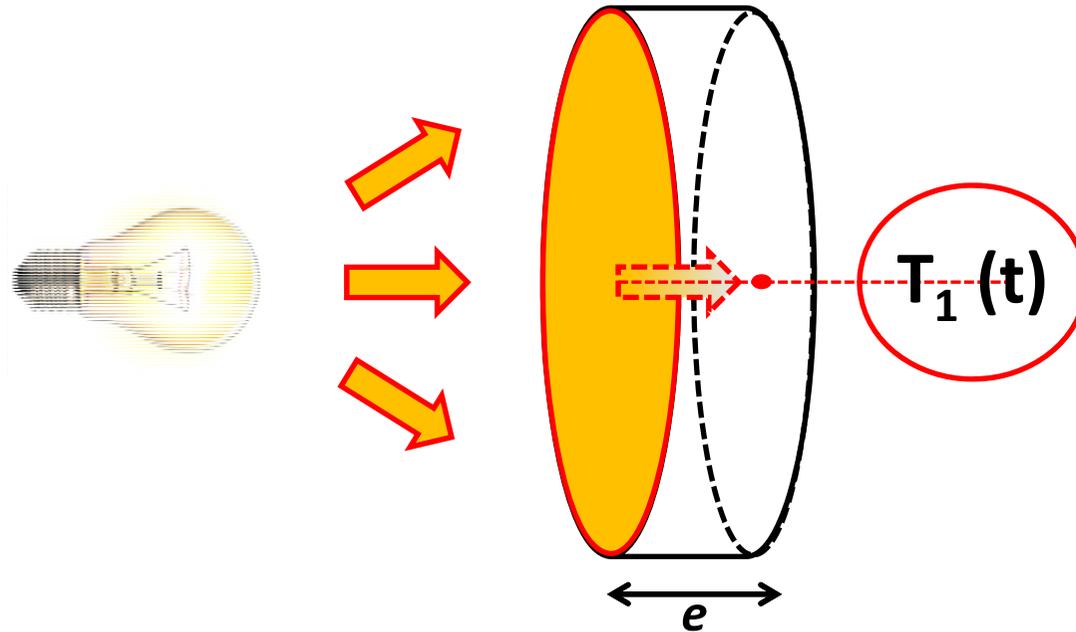
R est imposée

e



$$S = L^2$$

FLASH



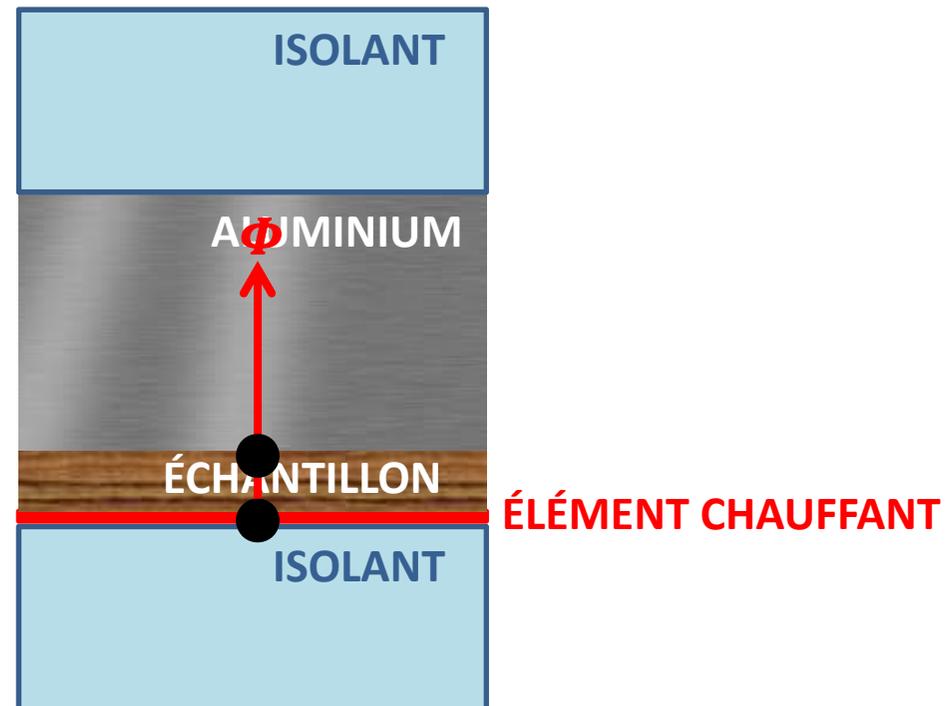
DIFFUSIVITÉ THERMIQUE, a : CAPACITÉ D'UN MATÉRIAU À TRANSMETTRE UN SIGNAL DE TEMPÉRATURE D'UN POINT À UN AUTRE.

$$a = \frac{\lambda}{\rho C}$$

DISPOSITIF IMPULSIONNEL EXPÉRIMENTAL

Basé sur méthode du ruban chaud

- Modélisation basé sur la méthode du tri-couche
- Obtention rapide de λ et a
- Dispositif simple et peu coûteux



MATÉRIAUX DE REFERENCE



	λ (mW / m K)
Polyuréthane Orange	35,12
Liège	48,33
Bois	108,87
Polycarbonate PC111	207,24

MODELE THERMIQUE CONDUCTIF 1D

2. Modèle théorique

Modèle purement conductif – Équation de la chaleur 3D et conditions initiale et aux limites :

$$\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad \text{Pas d'apport interne}$$

$$T(x, y, z, 0) = 0$$

Conditions
limites dans
les directions
 $0x$ et $0y$
orthogonales
à la direction
d'excitation.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial T(0, y, z, t)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial T(x, 0, z, t)}{\partial x} = 0 \end{array} \right\}$$

Adiabatique (condition de symétrie)

$$\left. \begin{array}{l} \lambda \frac{\partial T(L, y, z, t)}{\partial x} + hT(L, y, z, t) = 0 \\ \lambda \frac{\partial T(x, l, z, t)}{\partial x} + hT(x, l, z, t) = 0 \end{array} \right\}$$

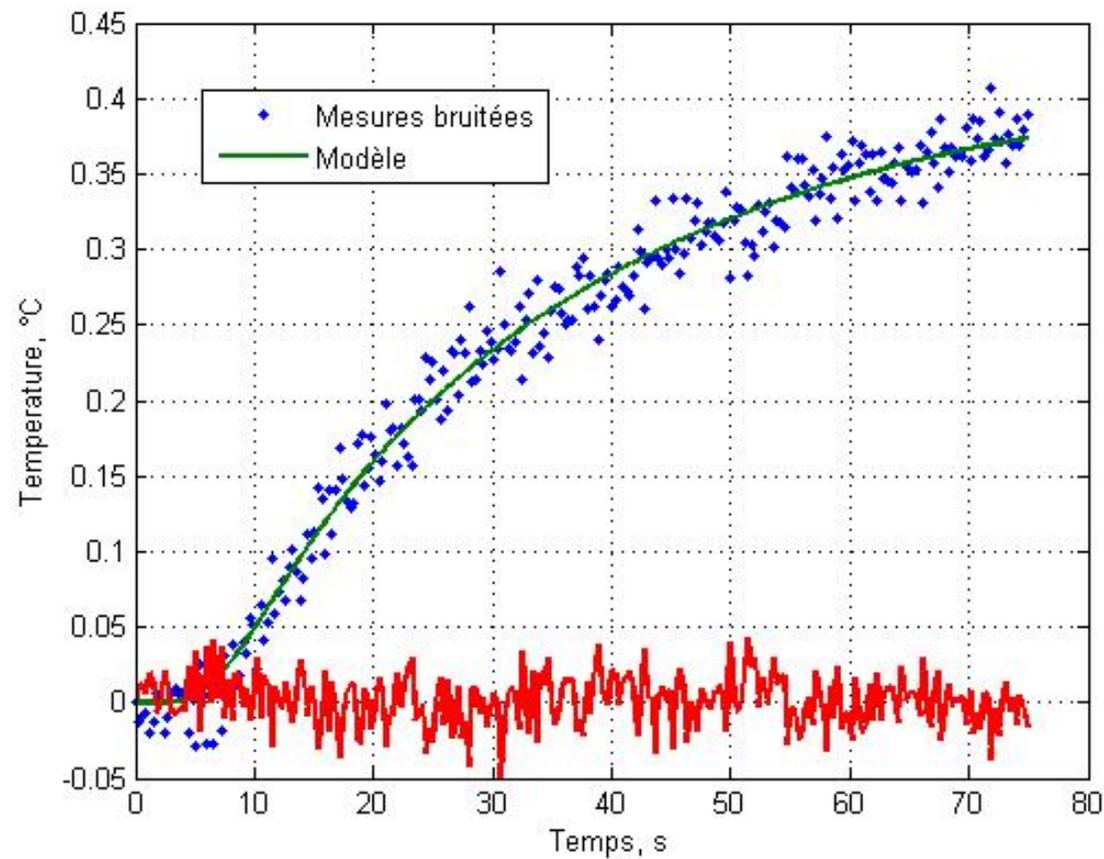
Échanges convectifs latéraux

Résolution par méthode quadripolaire et utilisation de transformations intégrales (Laplace, Fourier).

MODELE d'EVOLUTION DE T avec Temps RUBAN CHAUD

- MODÉLISATION

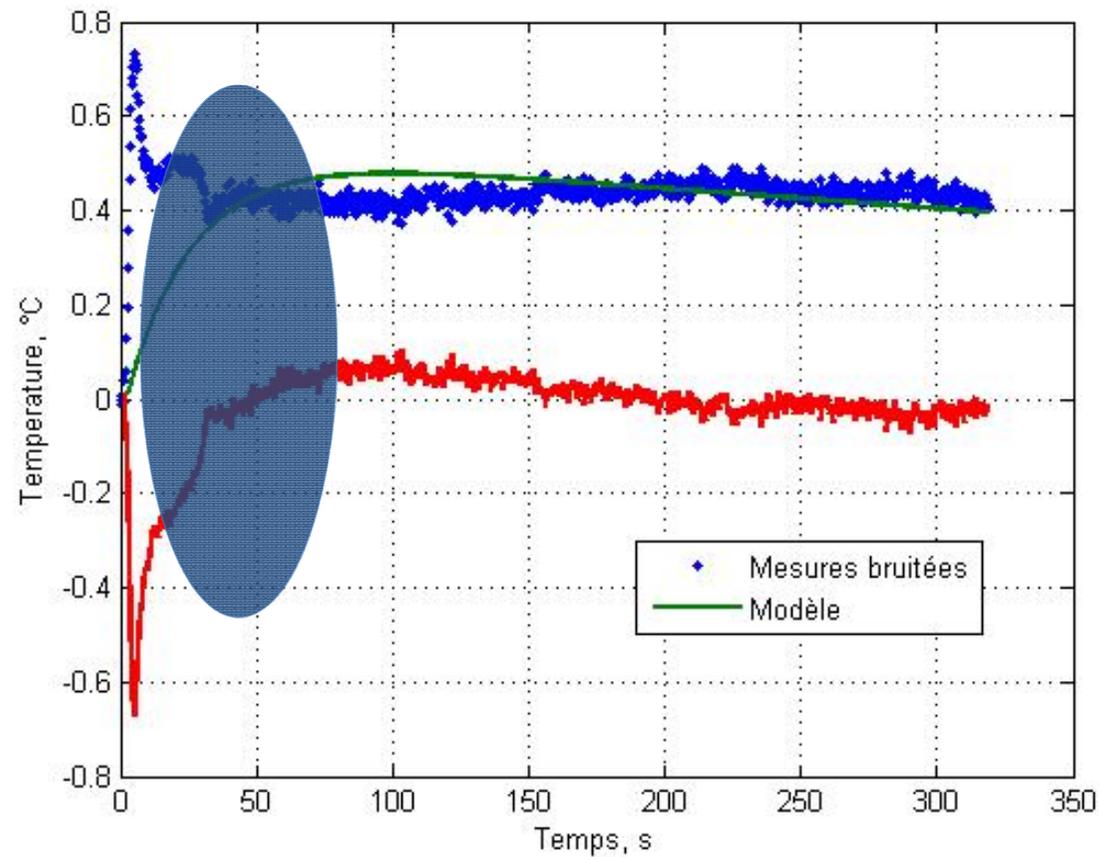
Liège



MODELE d'EVOLUTION DE T avec Temps RUBAN CHAUD

- MODÉLISATION

NFC



CONTRAINTES

- Importance du RAYONNEMENT THERMIQUE pour les aérogels



NFC

$$\lambda_e = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r = \lambda_{s+g} + \lambda_r$$

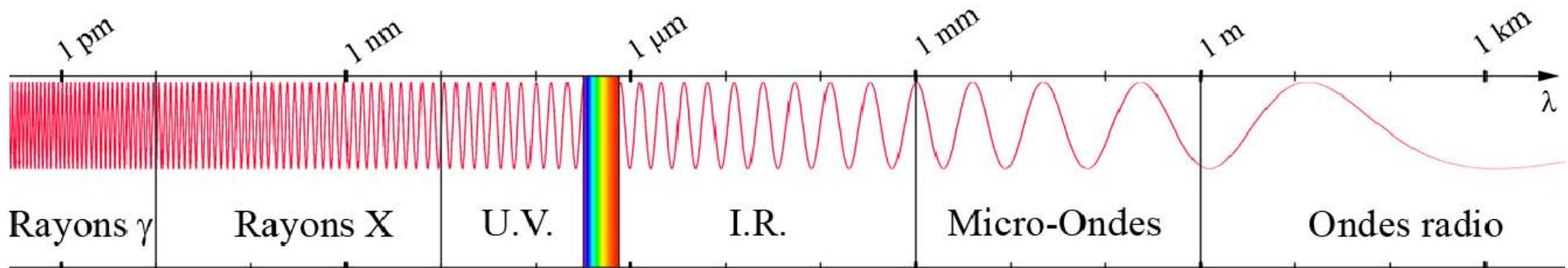
1 : solid conduction (phonons)

2 : gas conduction (molecules)

3 : radiation (photons)

$$\lambda_{s+g} = \varepsilon \cdot \lambda_g + (1 - \varepsilon) \cdot \lambda_s$$

ε : porosity > 90 %



RÉSULTATS de CONDUCTIVITE SUR BIO-AEROGELS

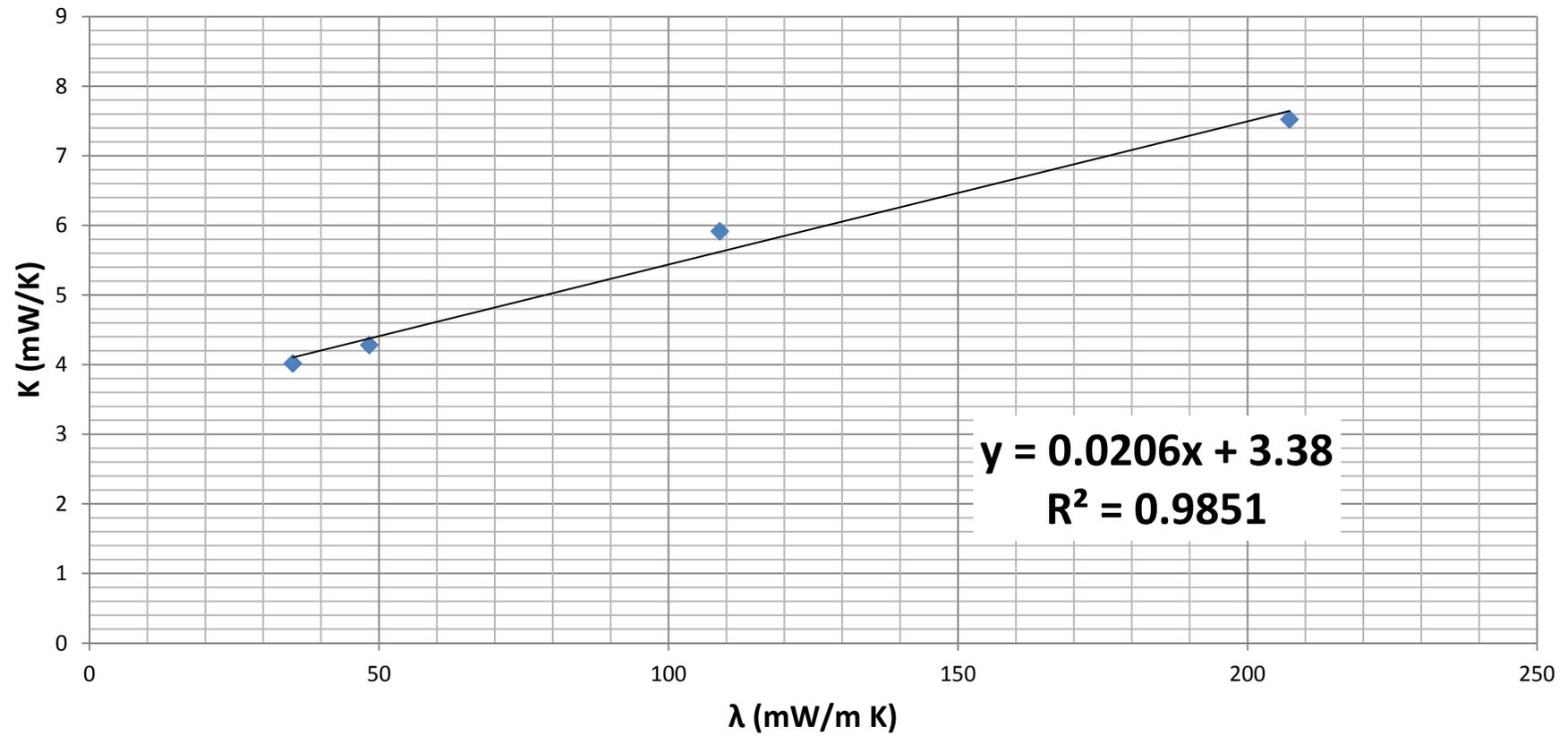
MATÉRIAUX DE REFERENCE

Échantillon	U (W)	V (W)	ΔT (K)	K (mW/K)	K (mW/K)	λ (mW/K m)
Liège	0,16113	9,837	7,1	4,465	4,283	48,330
	0,16167	9,8026	7,5	4,226		
	0,16088	9,8181	7,6	4,157		
PC111	0,16115	9,8533	4,2	7,561	7,523	207,24
	0,16269	9,8774	4,3	7,474		
	0,16137	9,8029	4,2	7,533		
Bois	0,16289	9,9066	5,3	6,089	5,916	108,87
	0,16117	9,8327	5,5	5,763		
	0,16171	9,8424	5,4	5,895		
PU	0,162	9,6935	8,1	3,877	3,938	35,12
	0,1616	9,7912	7,9	4,006		
	0,16479	9,7834	8,2	3,932		

PLAQUE CHAUDE GARDÉE



ÉTALONNAGE



RÉSULTATS

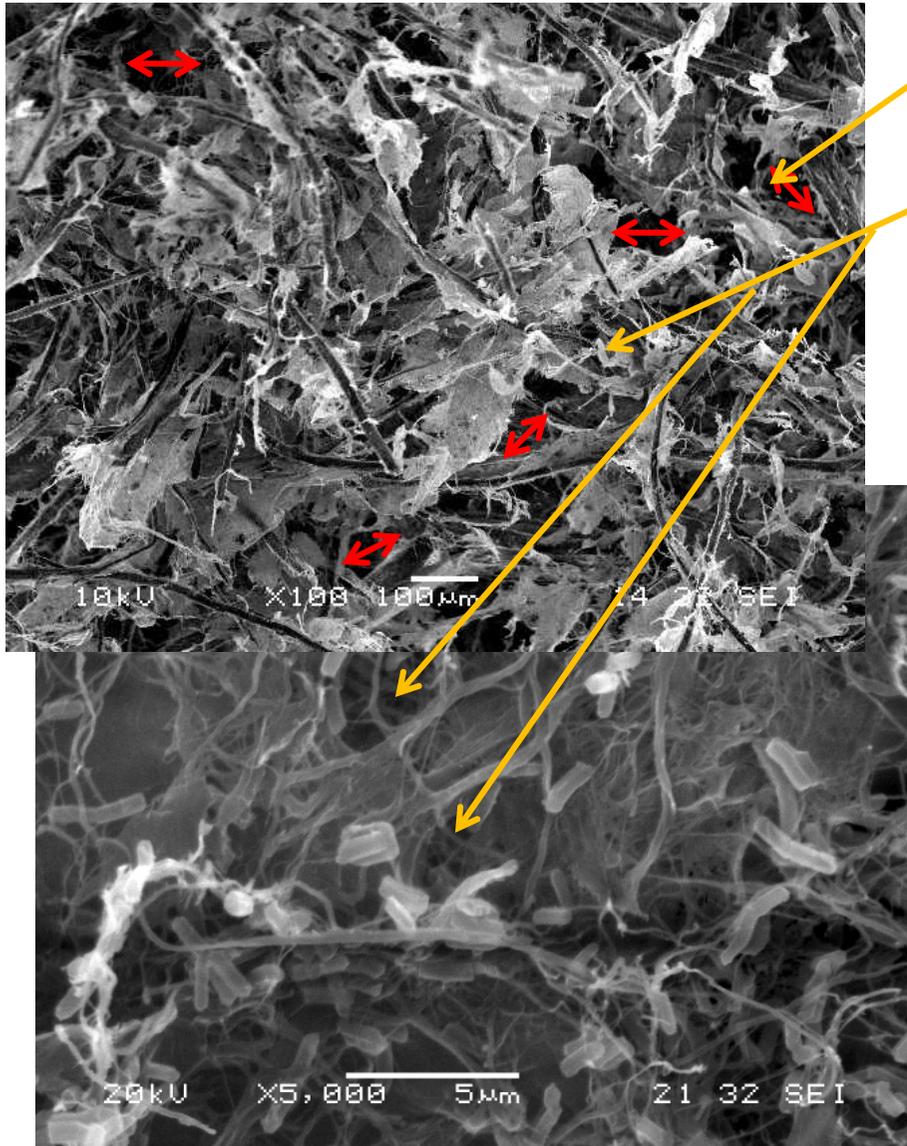
	λ (mW/mK)	ρ (Kg/m ³)	Porosité (%)
NFC TEMPO 2% (-20°C)	20,5 ± 2,2	27,17	98
NFC TEMPO 2% (-80°C)	19,2 ± 1,6	27,58	98
NFC ENZYMATIQUES 2% (-20°C)	31,1 ± 2,0	19,33	98

$$Porosité (\%) = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_c}\right) \times 100$$

$$\rho_c = 1600 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

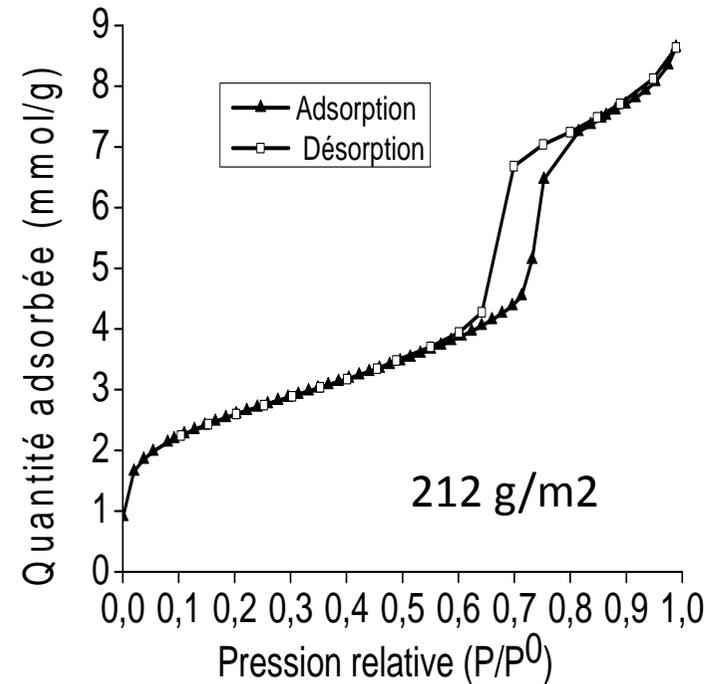
Cellulose Aerogels : Effect of SBA 15

(SBA-15/MFCL=1/8)



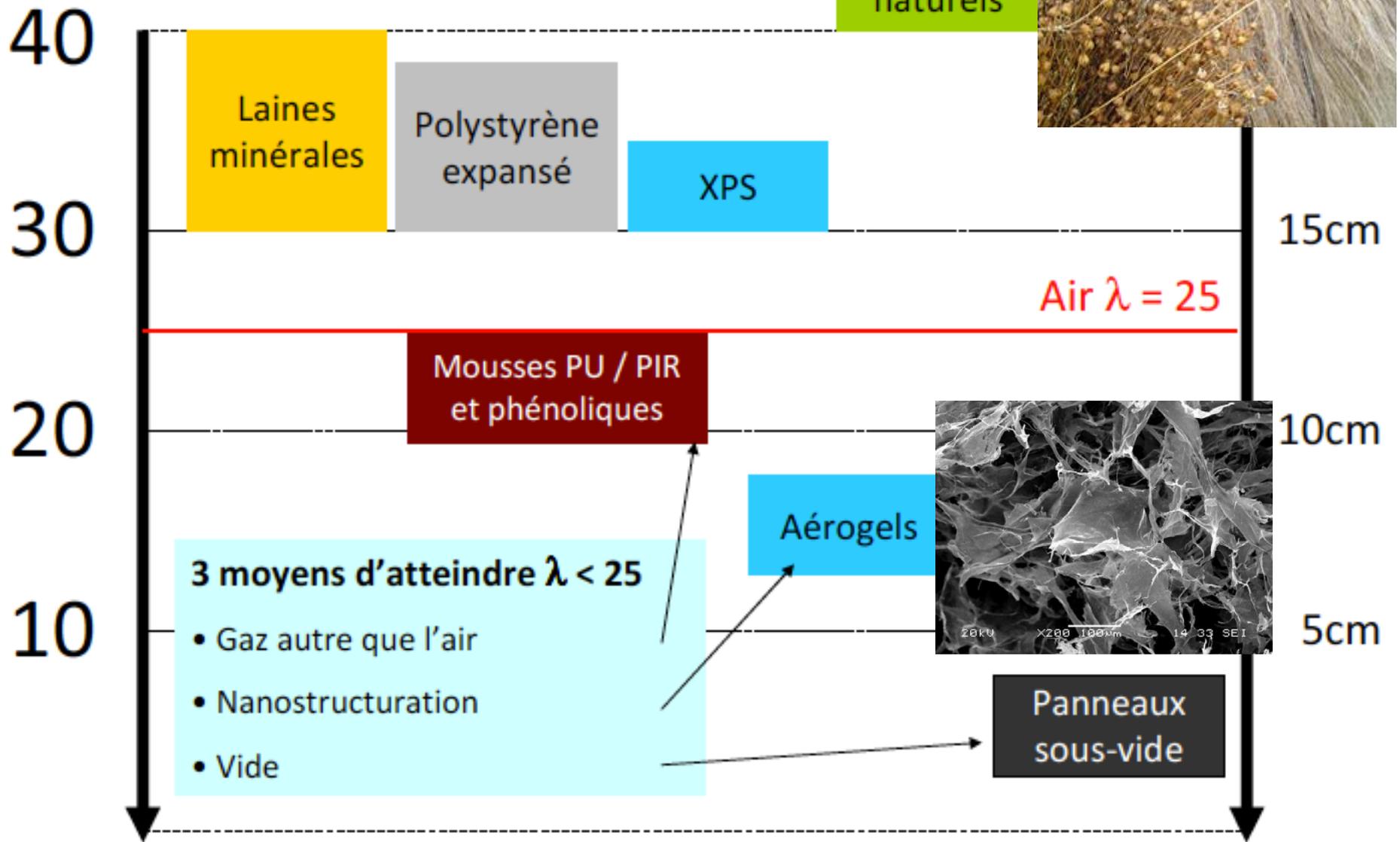
macrovoids

➤ Good dispersion of SBA-15



$\lambda = 18 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Isolant naturel: du macro au nano



Vieillessement et mécanique : les deux challenges des super-isolants