

25^{èmes} Journées Scientifiques de l'Environnement,
Hôtel du département, Créteil, 18 février 2014

Un matériau biosourcé de choix : les fibres naturelles

Caractérisations et applications

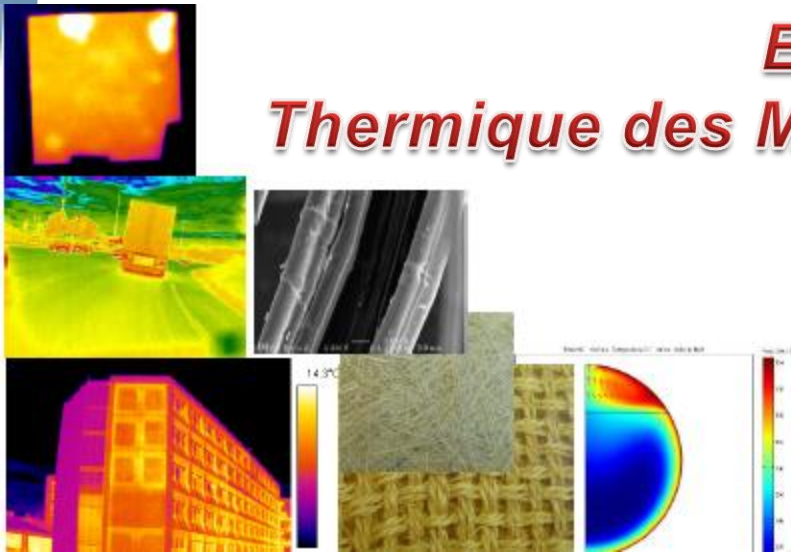
Nicolas DUJARDIN, Maître de Conférences
nicolas.dujardin@u-pec.fr

Equipe THEMACS :
Thermique des Matériaux et Contrôle de Structures

CERTES :

Centre d'études et de recherches en thermique,
environnement, systèmes, EA 3481

www.certes-upec.fr



Plan détaillé de l'exposé

I. Activités de l'équipe Themacs

- 1) Optimisation des propriétés thermophysiques de matériaux composites
- 2) Contrôle de Structures par thermographie infrarouge
- 3) Parc instrumental

II. Présentation des fibres naturelles

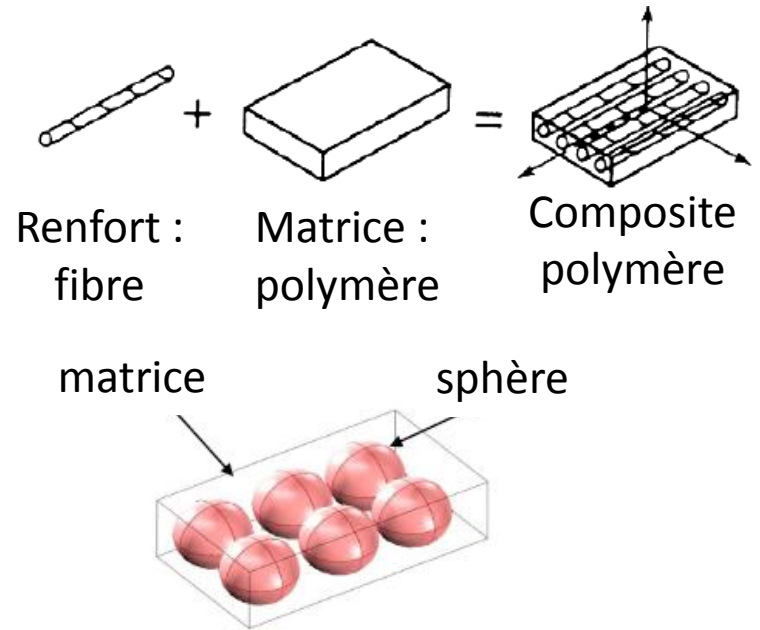
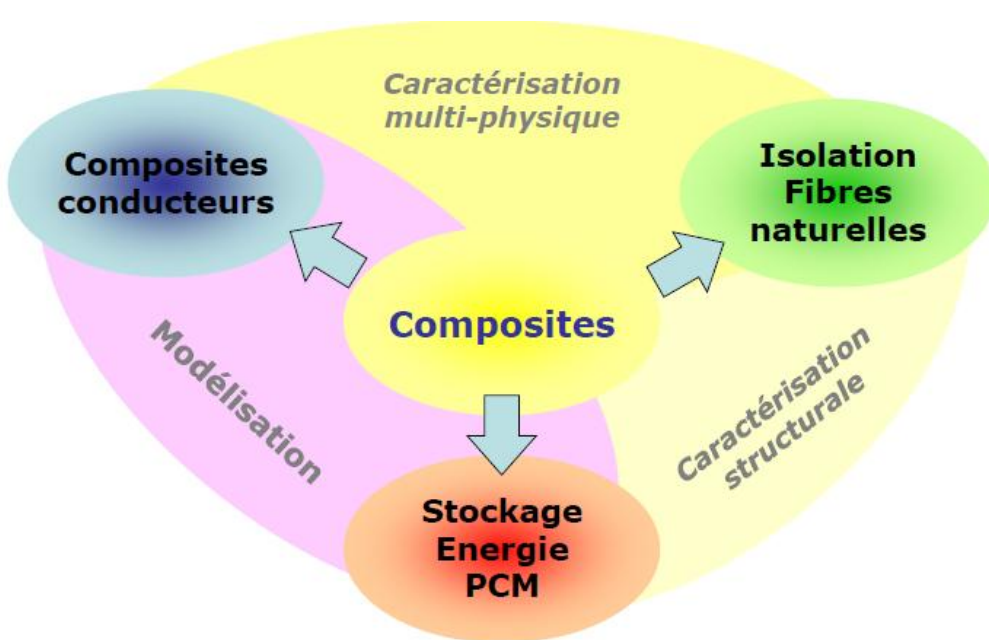
- 1) De quoi parle-t-on ?
- 2) Quelles ressources ?
- 3) Quels avantages ?
- 4) Quelles applications ?
- 5) Techniques de caractérisation

III. Exemples de résultats

- 1) Fibres exotiques / polymère (sisal, banane, PALF)
- 2) Fibres exotiques seules (palmier dattier)
- 3) Fibres de lin/epoxy

I. Activités de l'équipe Themacs

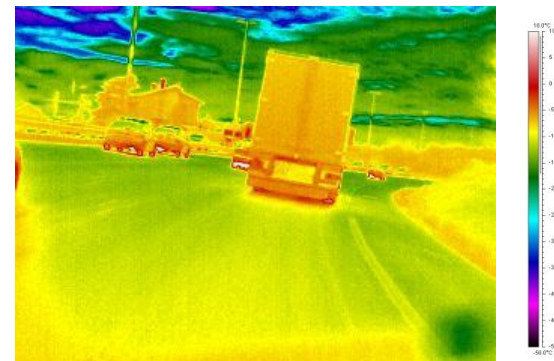
1) Optimisation des propriétés thermophysiques des matériaux composites



2) Contrôle de structures par thermographie infrarouge



Diagnostic d'isolation thermique

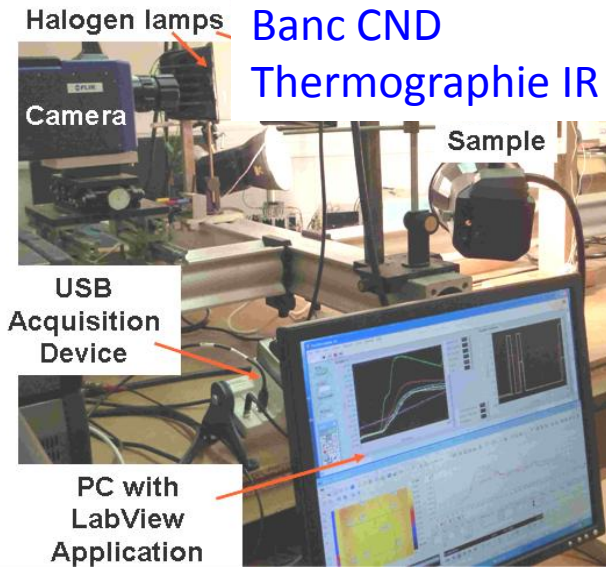


Auscultation de chaussées et d'ouvrages d'art

I. Activités de l'équipe Themacs

3) Parc instrumental

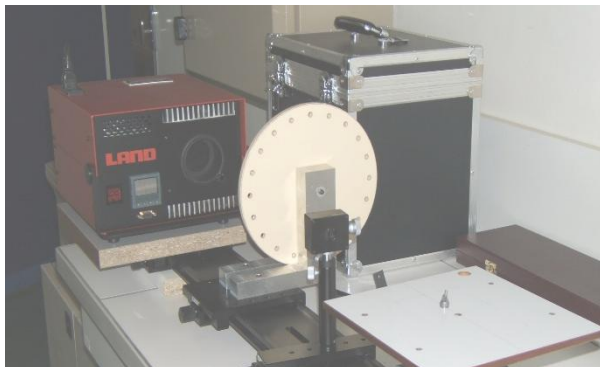
Métrie, caractérisation de caméras, mesures de propriétés radiatives, CND, mesures de terrain



Emissomètres



Mesures spectrales
(UV, Visible, IR...)



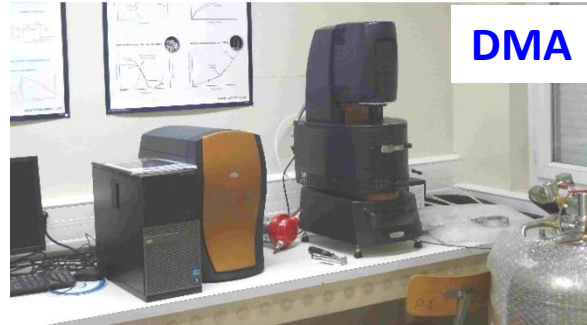
I. Activités de l'équipe Themacs

3) Parc instrumental

Etude des composites conducteurs, composites renforcés par des fibres naturelles, composites incluant MCP



DSC



DMA



Conductivité électrique



Plaque chaude gardée

DICO :
Diffusivité, Conductivité



Plan détaillé de l'exposé

I. Activités de l'équipe Themacs

- 1) Optimisation des propriétés thermophysiques de matériaux composites
- 2) Contrôle de Structures par thermographie infrarouge
- 3) Parc instrumental

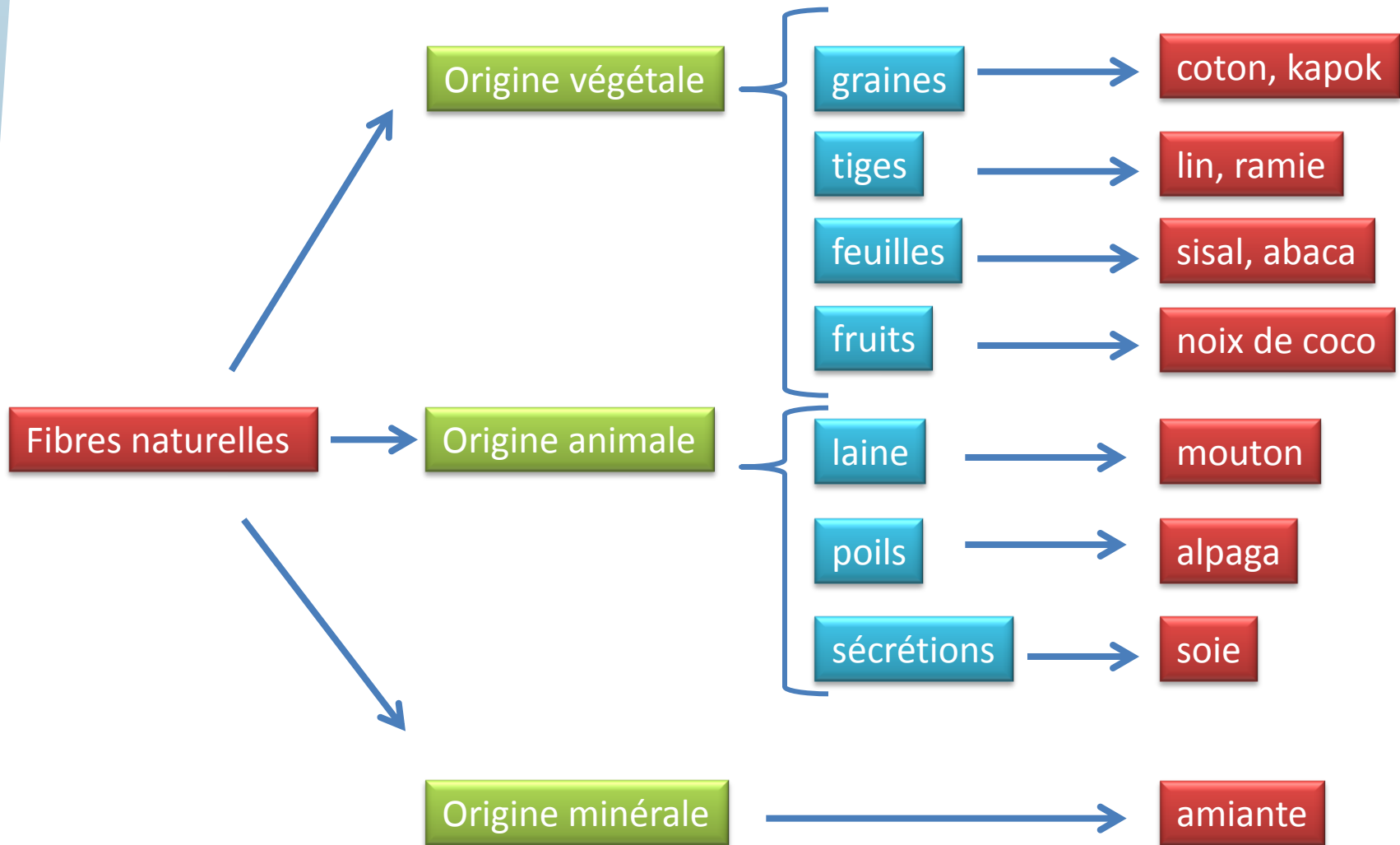
II. Présentation des fibres naturelles

- 1) De quoi parle-t-on ?
- 2) Quelles ressources ?
- 3) Quels avantages ?
- 4) Quelles applications ?
- 5) Techniques de caractérisation

III. Exemples de résultats

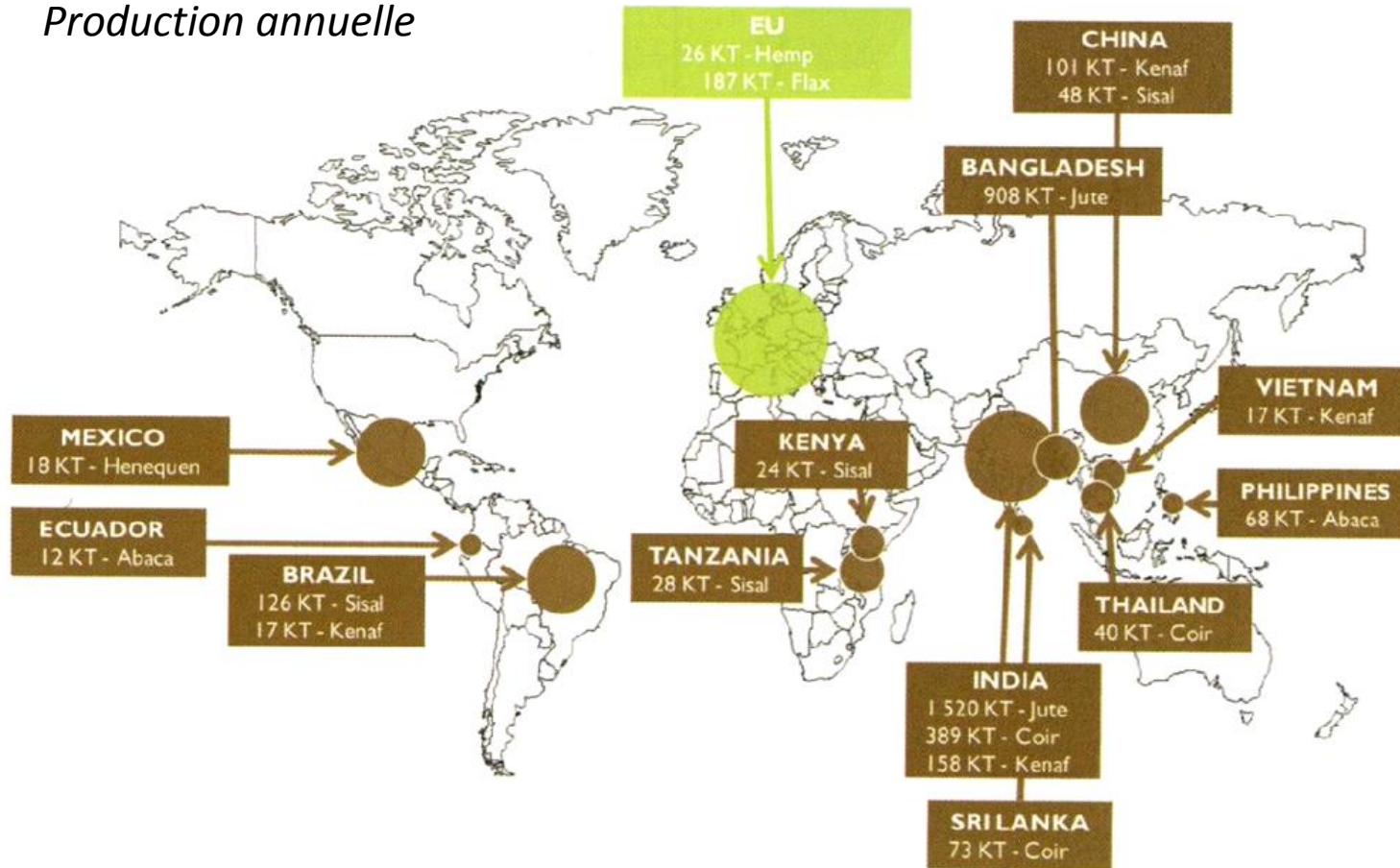
- 1) Fibres exotiques / polymère (sisal, banane, PALF)
- 2) Fibres exotiques seules (palmier dattier)
- 3) Fibres de lin/epoxy

II. Présentation des fibres naturelles



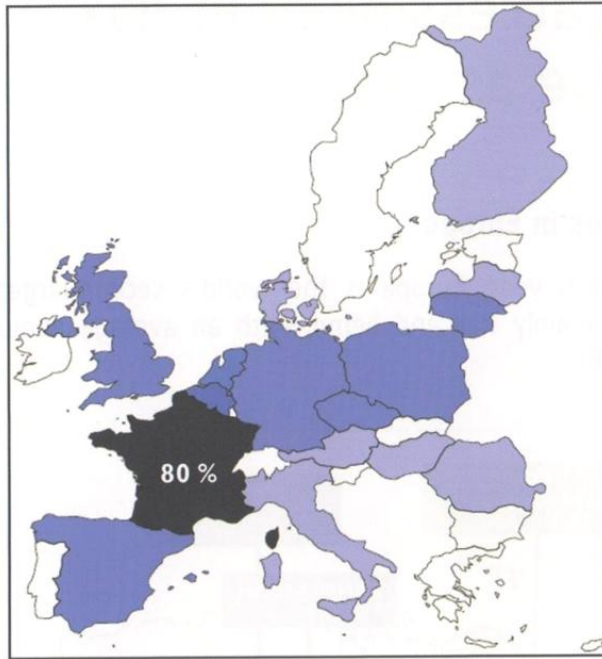
II. Les fibres végétales : quelles ressources ?

Production annuelle

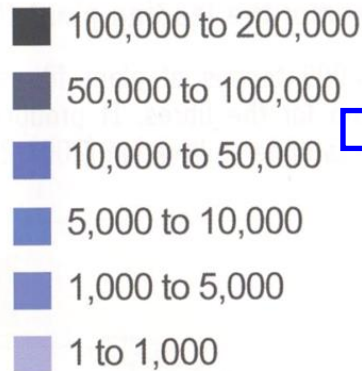


Disponibilité dans presque tous les pays du monde !

II. Les fibres végétales : quelles ressources ?



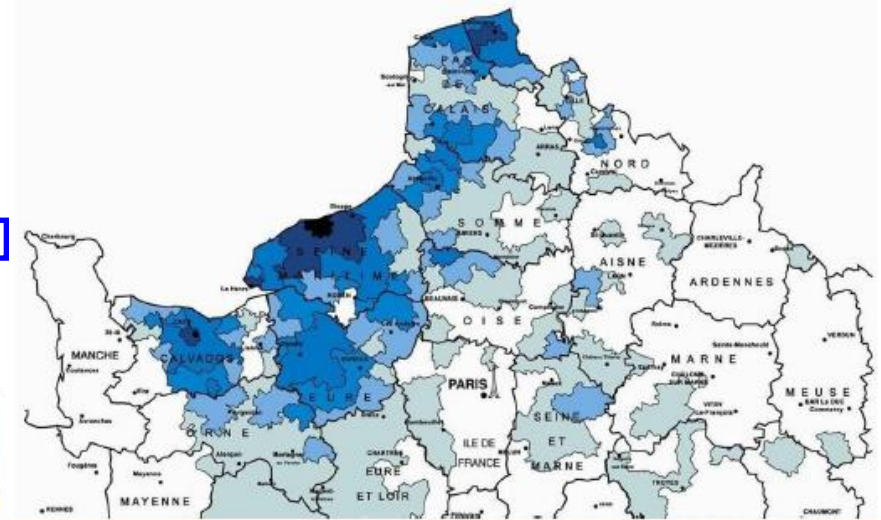
Fibre Production (tonnes)



Le France représente 80% de la production européenne

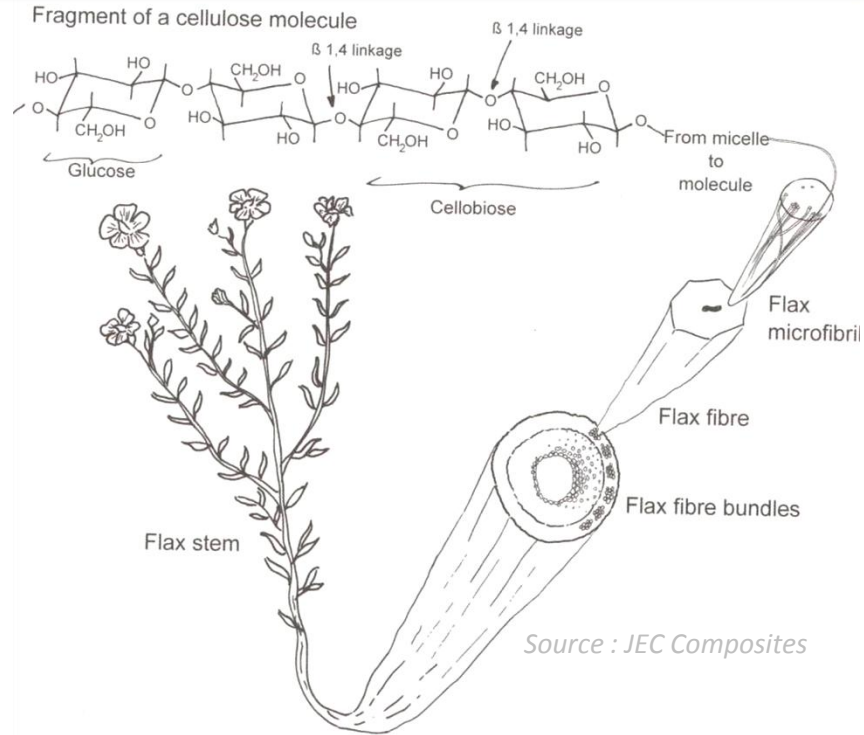
Source : JEC Composites

Le Normandie représente 55% de la production française de lin

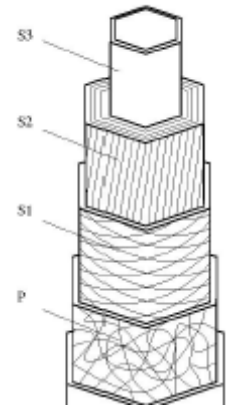


II. Les fibres naturelles : Composition ?

Exemple : Le lin



Fibre élémentaire



Fiber	Cellulose (wt%)	Hemicellulose (wt%)	Lignin (wt%)	Waxes (wt%)
Bagasse	55.2	16.8	25.3	-
Bamboo	26-43	30	21-31	-
Flax	71	18.6-20.6	2.2	1.5
Kenaf	72	20.3	9	-
Jute	61-71	14-20	12-13	0.5
Hemp	68	15	10	0.8
Ramie	68.6-76.2	13-16	0.6-0.7	0.3
Abaca	56-63	20-25	7-9	3
Sisal	65	12	9.9	2
Coir	32-43	0.15-0.25	40-45	-
Oil palm	65	-	29	-
Pineapple	81	-	12.7	-
Curaua	73.6	9.9	7.5	-
Wheat straw	38-45	15-31	12-20	-
Rice husk	35-45	19-25	20	14-17
Rice straw	41-57	33	8-19	8-38

Source : Faruk et al., Progress in Polymer Science 37, 2012, 1552-1596

II. Les fibres végétales : quels avantages ?

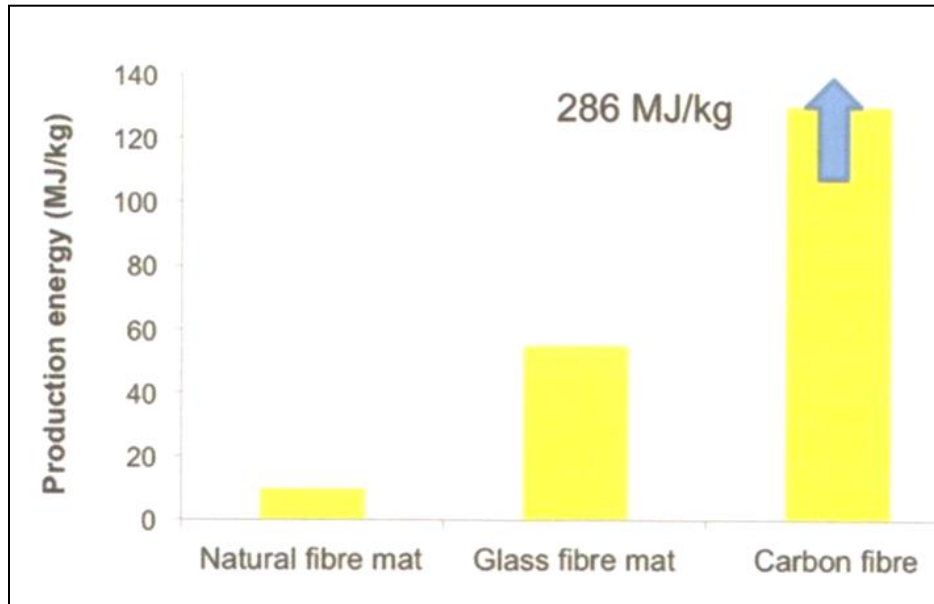


- Grande variété de fibres disponible dans tous les pays du monde
- **Faible coût** (9 fois moins que les fibres de verre)
- **Issues des parties renouvelables des plantes**
- Faible impact environnemental
- Faible densité

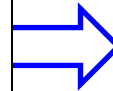
II. Les fibres végétales : quels avantages ?



- Grande variété de fibres disponible dans tous les pays du monde
- Faible coût (9 fois moins que les fibres de verre)
- Issues des parties renouvelables des plantes
- **Faible impact environnemental**
- Faible densité



Source : JEC Composites



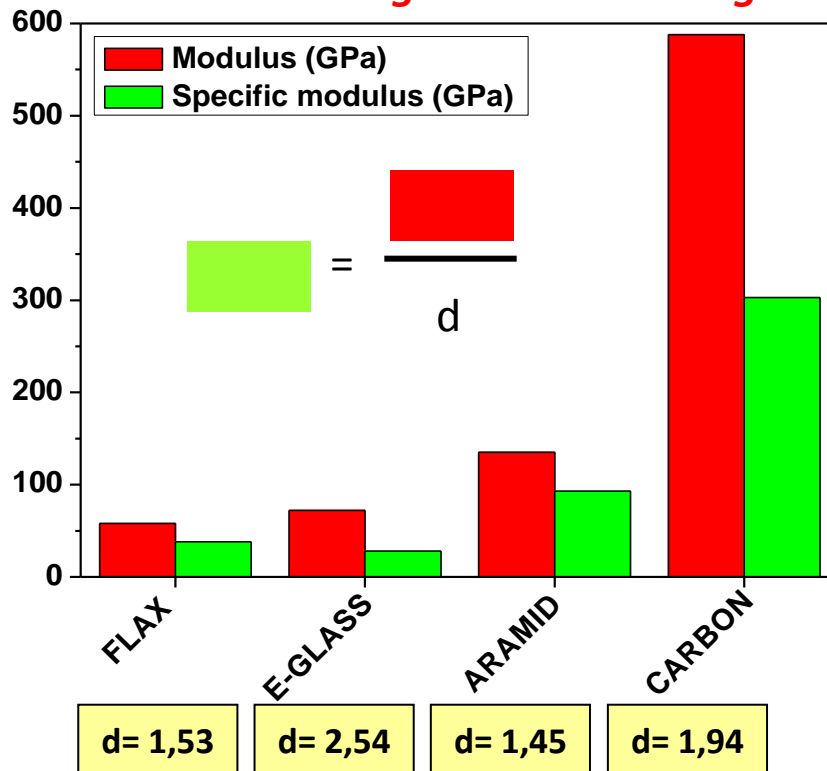
La quantité d'énergie pour produire un kilogramme de fibres naturelles est très faible

II. Les fibres végétales : quels avantages ?



- Grande variété de fibres disponible dans tous les pays du monde
- Faible coût
- Issues des parties renouvelables des plantes
- Faible impact environnemental
- Faible densité : Légèreté !

Le module d'Young caractérise la rigidité



**Gain de masse et bonnes propriétés spécifiques,
Le lin, alternatif aux fibres de verre.**

Intérêt pour le transport !

Source : Thèse, Z. Chérif

CERTES

II. Les fibres végétales : quels inconvénients ?

Culture



Récolte



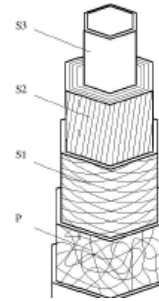
Extraction



Transformation finale



- Irrigation
- Densité de semis
- Apport d'azote
- Date de récolte



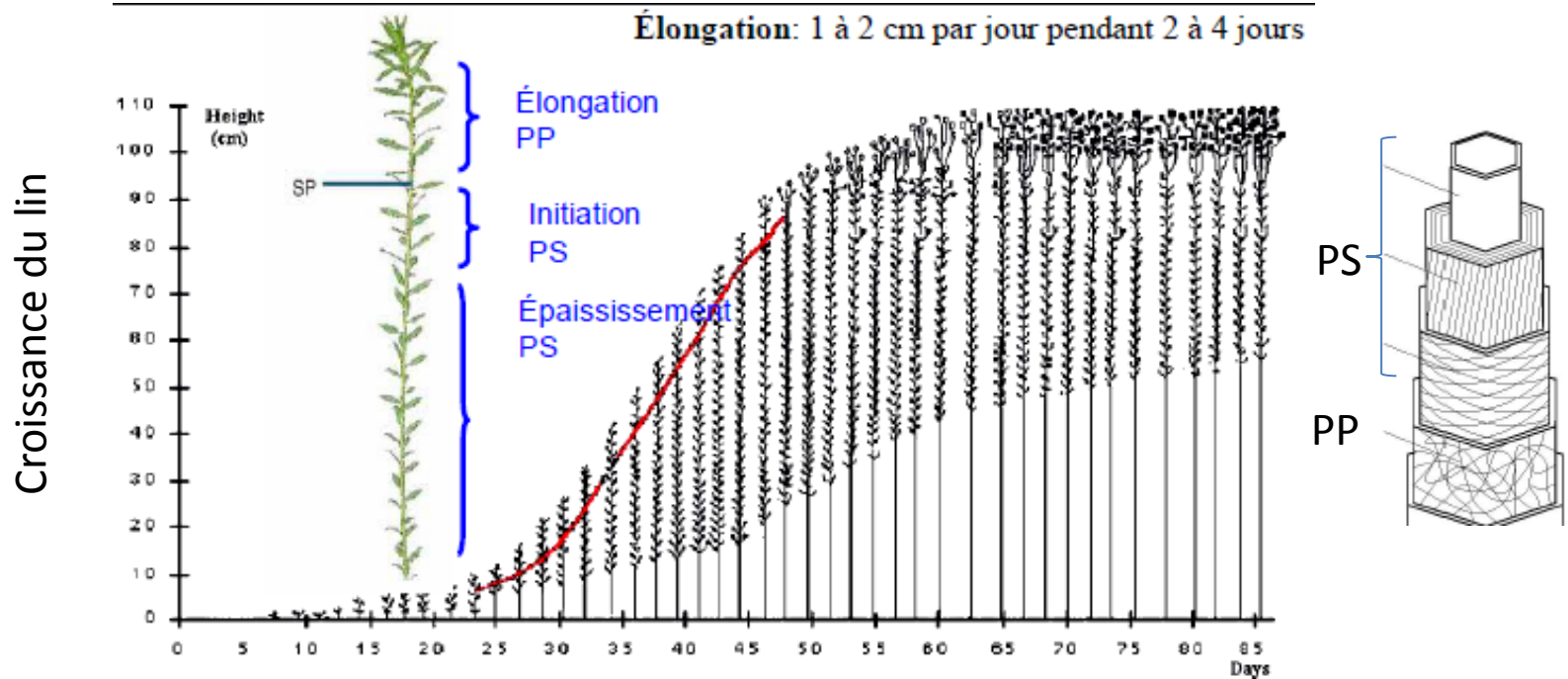
Fibre élémentaire

- Forte variabilité de propriétés pour une même espèce, en fonction de plusieurs facteurs :

- Climat	- Âge de la plante
- Taille	- Position de prélèvement
- Composition	- Date de prélèvement



II. Les fibres végétales : quels inconvénients ?



Sources : Gorshkova et al., *Industrial Crops and Products*, V18 (3), 2003, p213-221

C. Baley, *Renforcement des polymères par des fibres végétales*, Troyes, Septembre 2011

- Forte variabilité de propriétés pour une même espèce, en fonction de plusieurs facteurs :

- Climat

- Taille

- Composition

- Âge de la plante

- Position de prélèvement

- Date de prélèvement



II. Les fibres végétales : Applications

Secteurs traditionnels : textile et papeterie

Secteurs grandissants : bâtiment, transports, loisirs

Utilisation des fibres seules :



$k=0,035 \text{ W/(mK)}$

Ouate de cellulose

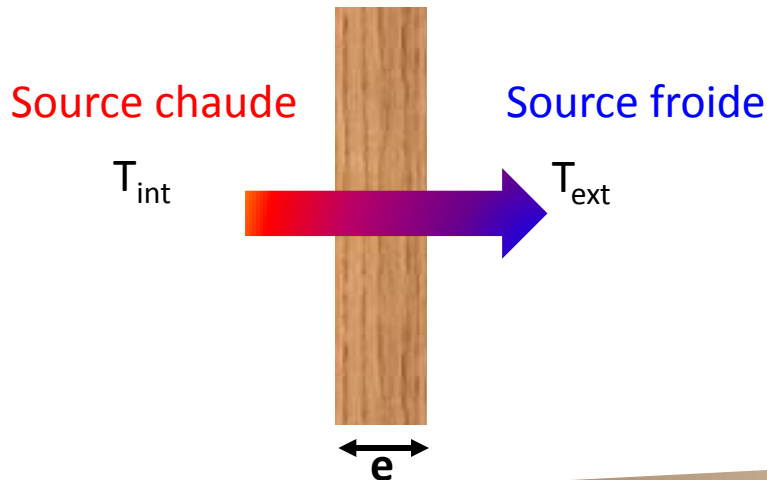
Matériau	Conductivité (W/(mK))
Polyuréthane	0,025
Laine de verre	0,034
Ouate de cellulose	0,035
Laine de roche	0,038
Laine de chanvre	0,04



$k=0,04 \text{ W/(mK)}$

Laine de chanvre

Cas d'une paroi



$$\Theta = \frac{k}{e} \cdot S \cdot (T_{ext} - T_{int})$$

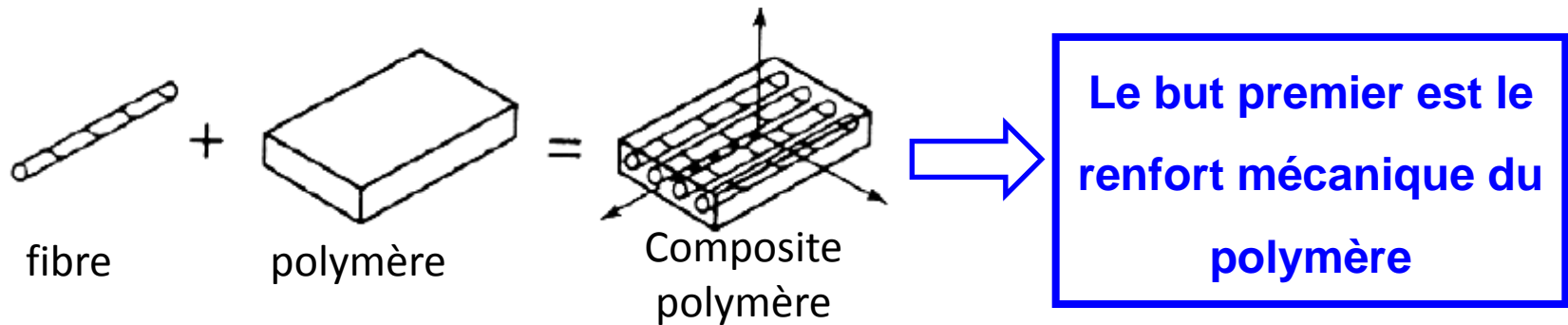
Où Θ : flux thermique (W)
 k : conductivité thermique (W/(m.K))
 S : surface (m²)
 e : épaisseur (m)

II. Les fibres végétales : Applications

Secteurs traditionnels : textile et papeterie

Secteurs grandissants : bâtiment, transports, loisirs

Utilisation des fibres comme renforts de composites polymères :



II. Les fibres végétales : Applications

Secteurs traditionnels : textile et papeterie

Secteurs grandissants : bâtiment, transports, loisirs

Utilisation des fibres comme renforts de composites polymères :

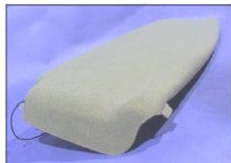


Lin / epoxy

Source : LINEO NV



Citroen C2



RENAULT
TWINGO



Chanvre / PP

Source : AFT Plasturgie



OPEL CORSA
COUPE



OPEL
ASTRA

CITROEN
C5

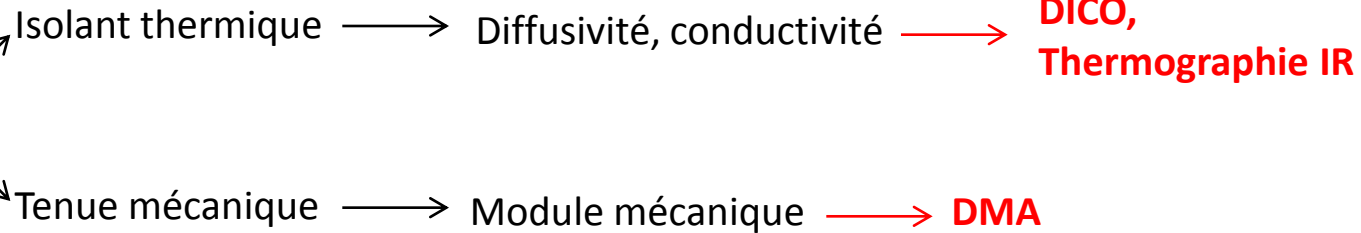


Fibres de lin

Source : Ecotechnilin

II. Problématique et moyens mis en place

Quelles propriétés ?



Quels paramètres étudiés ?

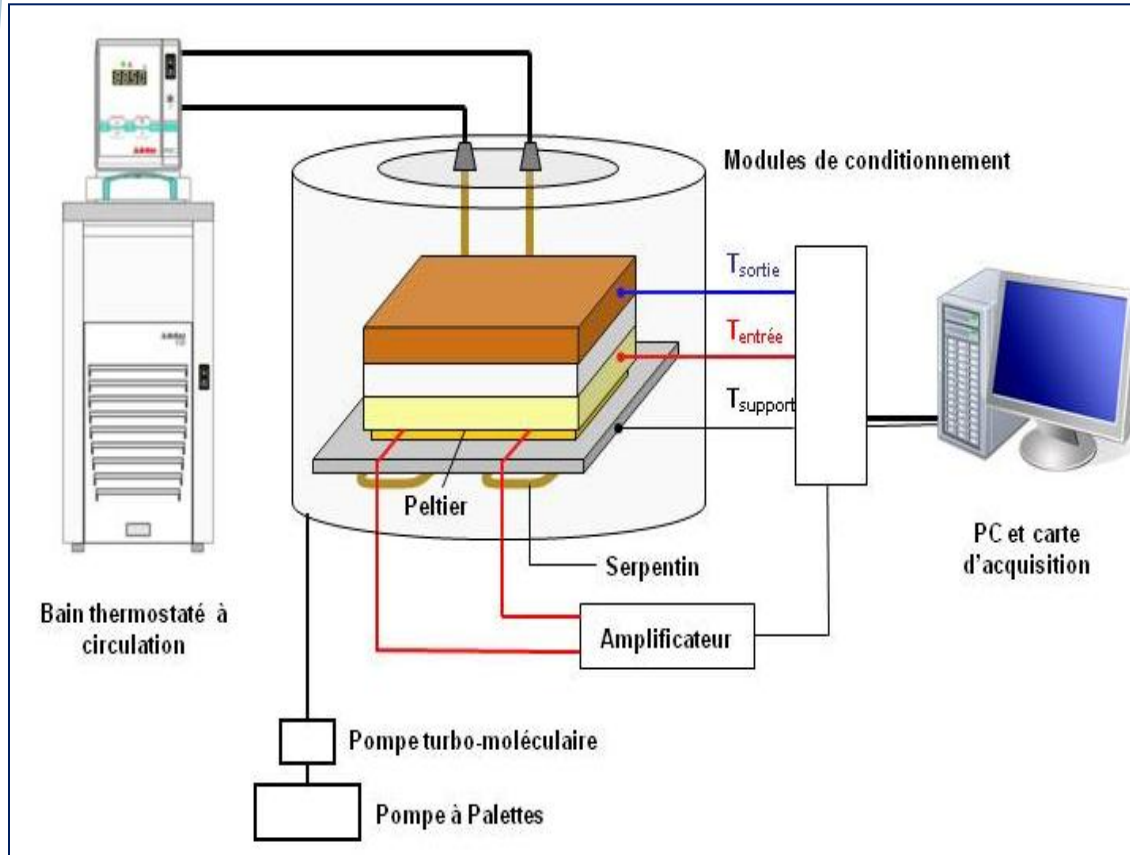
- Variété des fibres
- Zone de prélèvement
- Traitement des fibres
- Procédé de mise en œuvre
- Fraction volumique des fibres
- Porosité

$$\varphi_{vol} = \frac{V_{fibre}}{V_{fibre} + V_{matrice}}$$

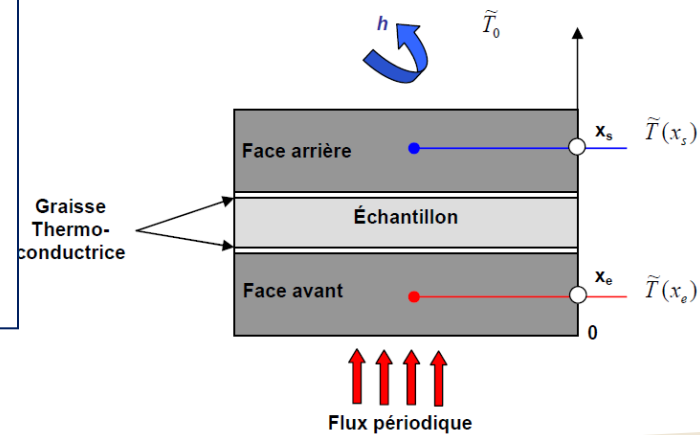
II. Technique de caractérisation : DICO

Dispositifs DICO :

Diffusivité, a
Conductivité, k



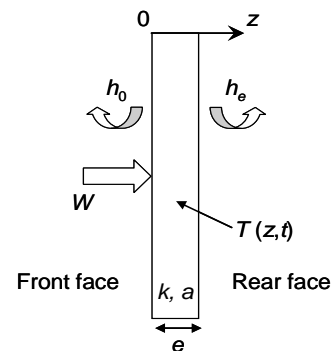
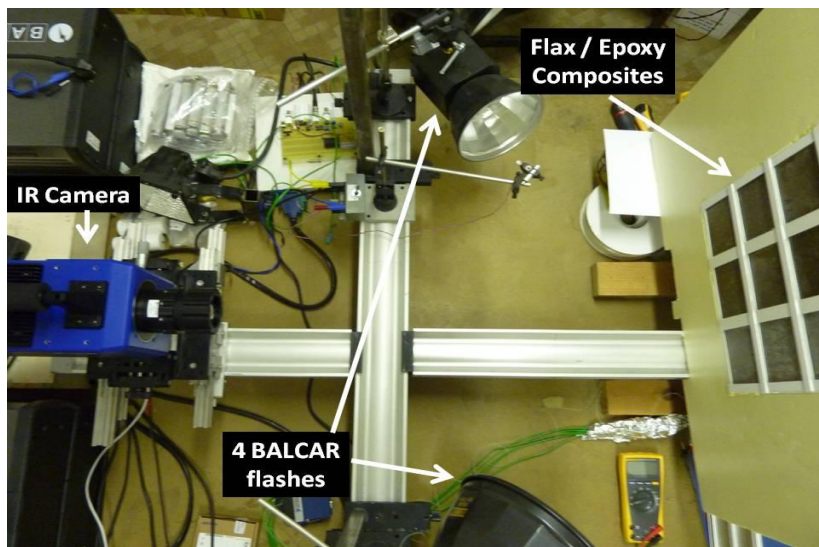
Dispositif DICO (diffusivité, conductivité)



Source : A. Boudenne, L. Ibos, E. Gehin, Y. Candau, A simultaneous characterization of thermal conductivity and diffusivity of polymer materials by a periodic method, J. Phys. D: Appl. Phys. V37, (2004), 132-139

II. Technique de caractérisation : Thermographie infrarouge

Dispositif expérimental



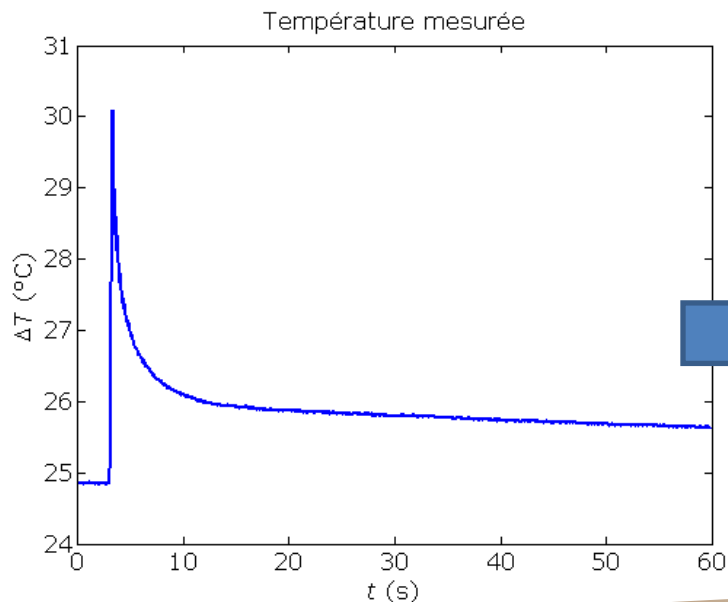
Modélisation thermique

$$DT(z,t) = 2G \sum_{n=1}^{\infty} \frac{X_n [X_n \cos(X_n d) + B_0 \sin(X_n d)]}{(X_n^2 + B_0^2) \left(1 + \frac{B_e}{X_n^2 + B_e^2} \right) + B_0} \exp\left(-\frac{X_n^2 t}{t}\right)$$



Distributions de conductivité
et
diffusivité thermique

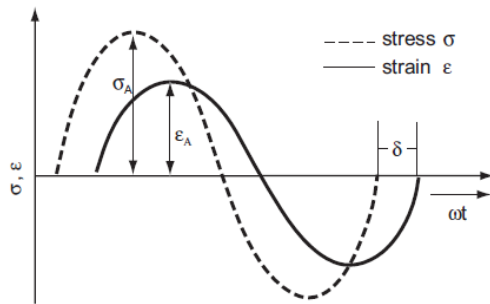
Mesure



II. Technique de caractérisation : Analyse mécanique dynamique

Intérêt : Permet de déterminer les propriétés mécaniques d'un matériau viscoélastique

Principe : Application d'une sollicitation sinusoïdale / mesure la déformation correspondante



$$|E^*| = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_A}$$
$$|E^*| = \sqrt{[E'(\omega)]^2 + [E''(\omega)]^2}$$
$$E'(\omega) = |E^*| \cdot \cos \delta$$
$$E''(\omega) = |E^*| \cdot \sin \delta$$
$$\tan \delta = \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)}$$

DMA
donne accès

E', G' :
module élastique,
module de stockage,
module de conservation

E'', G'' :
module de perte,
module dissipatif

Appareil utilisé : DHR2 de TA Instrument



DMA en torsion
 G', G''



« Qualité » de l'interface
fibre/matrice

Plan détaillé de l'exposé

I. Activités de l'équipe Themacs

- 1) Optimisation des propriétés thermophysiques de matériaux composites
- 2) Contrôle de Structures par thermographie infrarouge
- 3) Parc instrumental

II. Présentation des fibres naturelles

- 1) De quoi parle-t-on ?
- 2) Quelles ressources ?
- 3) Quels avantages ?
- 4) Quelles applications ?

III. Exemples de résultats

- 1) Fibres exotiques / polymère
- 2) Fibres exotiques seules (palmier dattier)
- 3) Fibres de lin / epoxy



III. Etudes expérimentales des fibres végétales

Fibres exotiques / polymère

Fibres exotiques seules

Fibres de lin / polymère

III.1) Propriétés thermophysiques de composites fibres exotiques / polymère

a) Présentation des systèmes étudiés

Fibres	Matrice	φ_{vol} (%)	Mise en oeuvre
Banane/Sisal	Résine	20, 40	Imprégnation,
Hybrides ratio 1 :1	Polyester		Polym. sous pression
PALF/Verre	Résine	40	Imprégnation,
Hybrides ratios variables	Polyester		Polym. sous pression
Banane <i>Commingled</i>	Polypropylène	10, 50	Moulage par compression
Sisal	Résine	20, 30, 40	Resin Transfer
	Polyester		Molding (RTM)

$$\varphi_{vol} = \frac{V_{fibre}}{V_{fibre} + V_{matrice}}$$

2 types de matrice

3 procédés de mis en oeuvre

3 types de fibres végétales

Fibres de feuilles d'ananas → PALF : « Pine Apple Leaf Fiber »



Fibres de banane → Ressource non exploitée à ce jour

Fibres de sisal → Parmi les plus utilisées

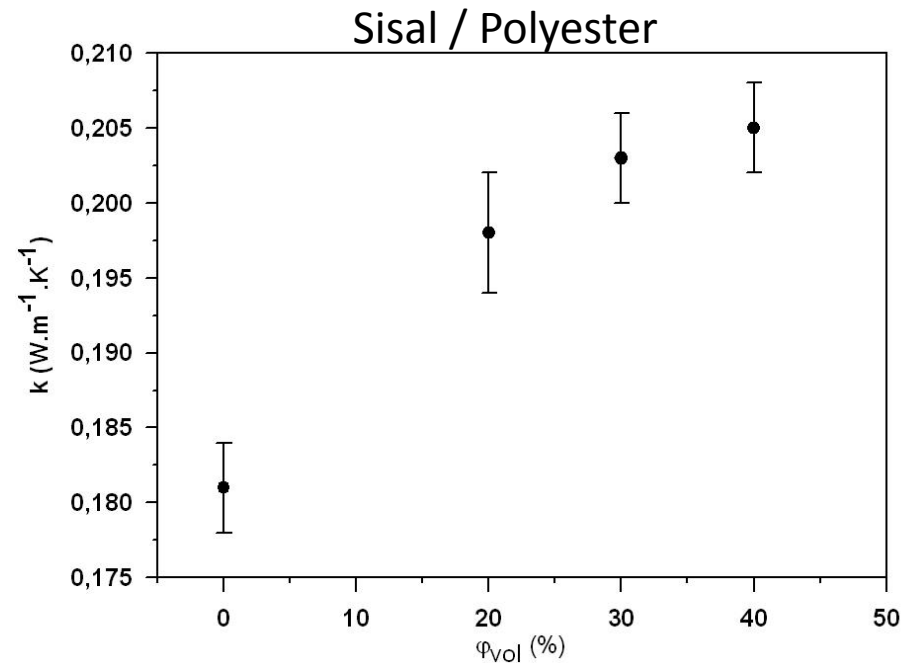
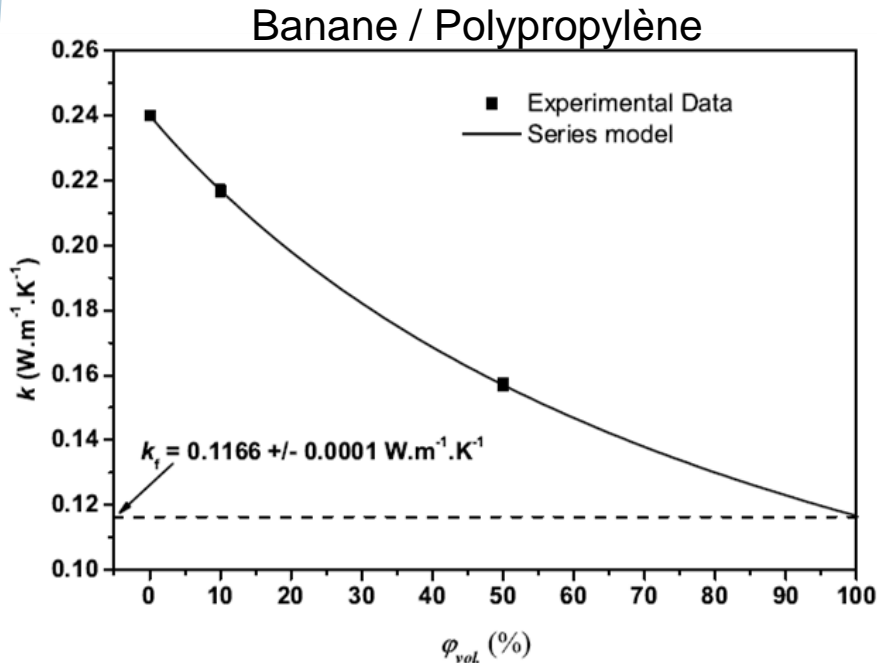


III.1) Propriétés thermophysiques de composites fibres exotiques / polymère

b) Identification des facteurs d'influence

➔ La quantité de fibres

$$\phi_{vol} = \frac{V_{fibre}}{V_{fibre} + V_{matrice}}$$



- Comportements opposés : $\left\{ \begin{array}{l} k \searrow \\ k \nearrow \end{array} \right\}$ quand $\phi \nearrow$

- Fibres de banane sont plus isolantes que le polypropylène

-Fibres de sisal sont plus conductrices que la résine polyester

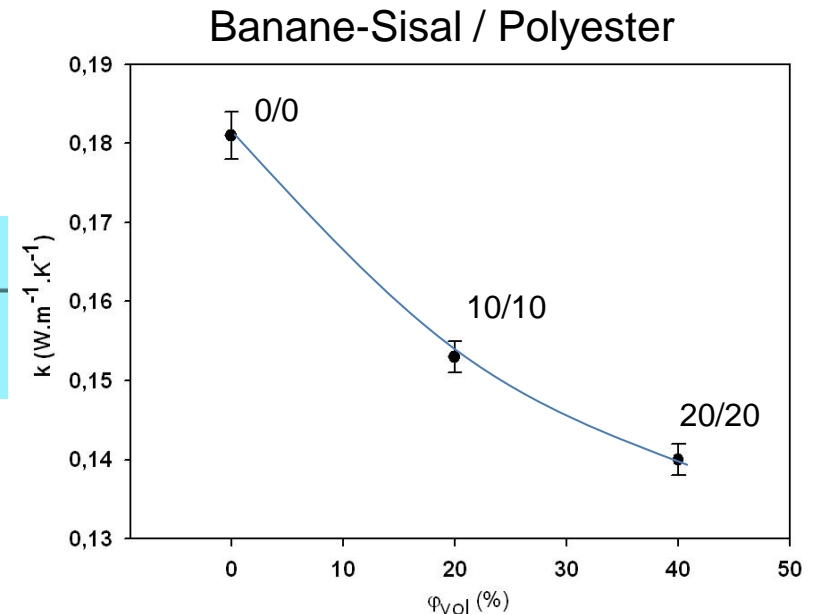
- Moyen d'estimer $k_{fibre\ banane}$

III.1) Propriétés thermophysiques de composites fibres exotiques / polymère

b) Identification des facteurs d'influence

➔ **L'hybridation des fibres (mélange de plusieurs types de fibres)**

Composites	φ_{vol} (%)	Ratio	k ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
Polyester + fibres hybrides	0	-	0.181 ± 0.003
Banane : Sisal	20	10 : 10	0.153 ± 0.002
	40	20 : 20	0.140 ± 0.002



Observation : $k \searrow$ quand $\varphi \nearrow$

- Or : $\left\{ \begin{array}{l} k \nearrow \text{ quand } \varphi_{\text{sisal}} \nearrow \\ k \searrow \text{ quand } \varphi_{\text{banane}} \nearrow \end{array} \right\} \Rightarrow$

Les propriétés thermophysiques sont fixées par la fibre la plus isolante

III.1) Propriétés thermophysiques de composites fibres exotiques / polymère

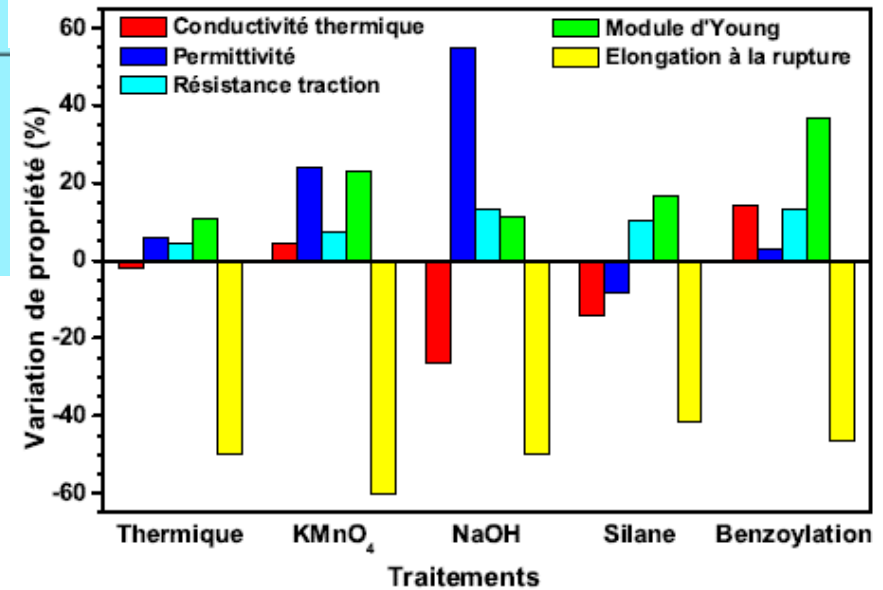
b) Identification des facteurs d'influence

➔ **Traitement des fibres**

Problématique majeure dans les composites : l'adhésion fibre/matrice

Littérature abondante sur propriétés mécaniques, très peu sur propriétés thermophysiques

Composites	φ_{vol} (%)	Traitement	k ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
Polyester/ fibres sisal	40	Aucun	0.205 ± 0.003
	40	Thermique 100 °C	0.201 ± 0.003
	40	Benzoylation	0.234 ± 0.003
	40	KMnO ₄	0.214 ± 0.007
	40	NaOH 5%	0.151 ± 0.003
	40	Silane	0.176 ± 0.003



2 types de traitements

- ➔ Amélioration du transfert de chaleur
KMnO₄, Benzoylation
- ➔ Peu d'effet ou diminution de la conductivité thermique
Thermique, NaOH, Silane

III.1) Propriétés thermophysiques de composites fibres exotiques / polymère

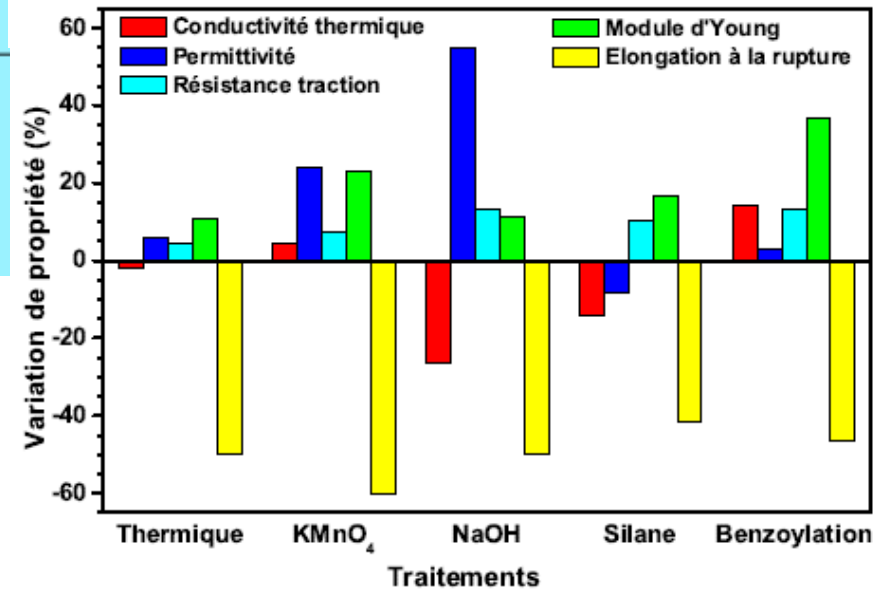
b) Identification des facteurs d'influence

➔ **Traitement des fibres**

Problématique majeure dans les composites : l'adhésion fibre/matrice

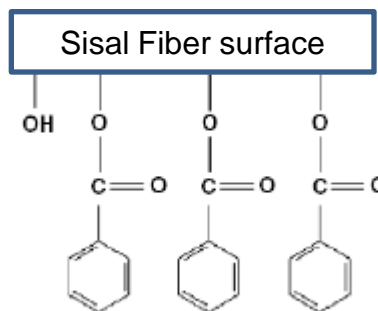
Littérature abondante sur propriétés mécaniques, très peu sur propriétés thermophysiques

Composites	φ_{vol} (%)	Traitement	k ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
Polyester/ fibres sisal	40	Aucun	0.205 ± 0.003
	40	Thermique 100 °C	0.201 ± 0.003
	40	Benzoylation	0.234 ± 0.003
	40	KMnO ₄	0.214 ± 0.007
	40	NaOH 5%	0.151 ± 0.003
	40	Silane	0.176 ± 0.003



Amélioration du transfert de chaleur :

Benzoylation



Réduction de l'hydrophilicité
Augmentation la compatibilité fibre / matrice

III.1) Propriétés thermophysiques de composites fibres exotiques / polymère

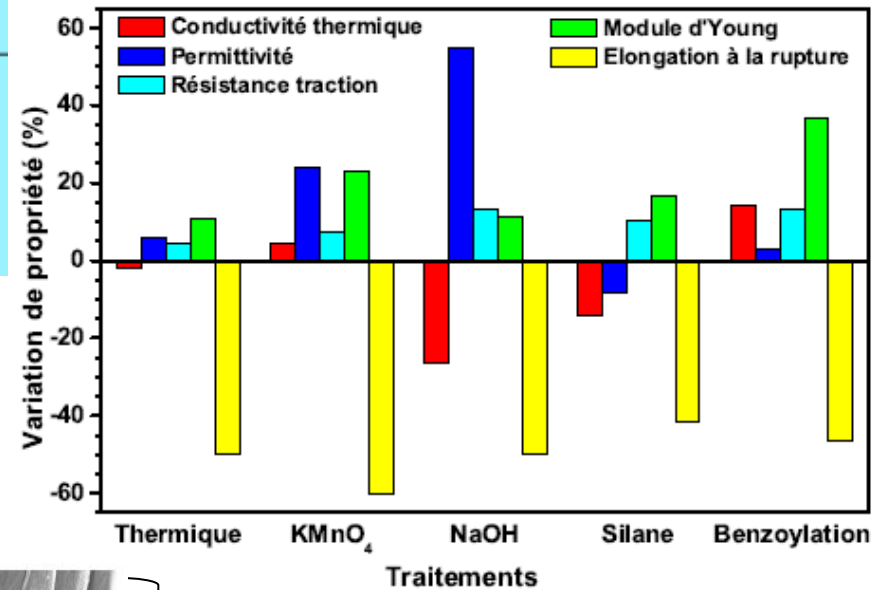
b) Identification des facteurs d'influence

➔ Traitement des fibres

Problématique majeure dans les composites : l'adhésion fibre/matrice

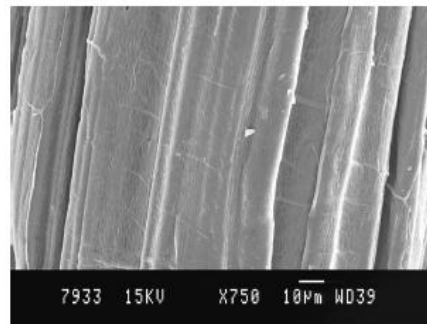
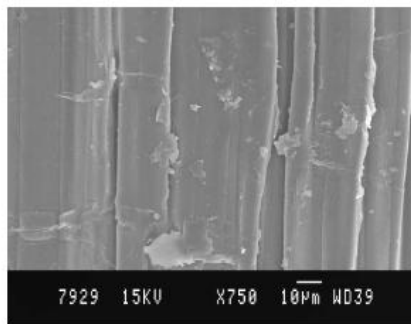
Littérature abondante sur propriétés mécaniques, très peu sur propriétés thermophysiques

Composites	φ_{vol} (%)	Traitement	k ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
Polyester/ fibres sisal	40	Aucun	0.205 ± 0.003
	40	Thermique 100 °C	0.201 ± 0.003
	40	Benzoylation	0.234 ± 0.003
	40	KMnO ₄	0.214 ± 0.007
	40	NaOH 5%	0.151 ± 0.003
	40	Silane	0.176 ± 0.003



Diminution de transfert de chaleur :

NaOH



Fibrillation

↗ de la surface de contact

Diminution de k

(a) Pas de traitement



III. Etudes expérimentales des fibres végétales

Fibres exotiques / polymère

Fibres exotiques seules

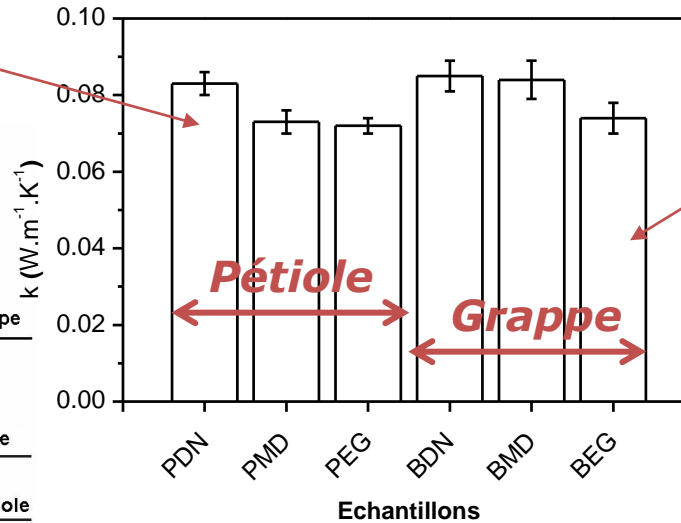
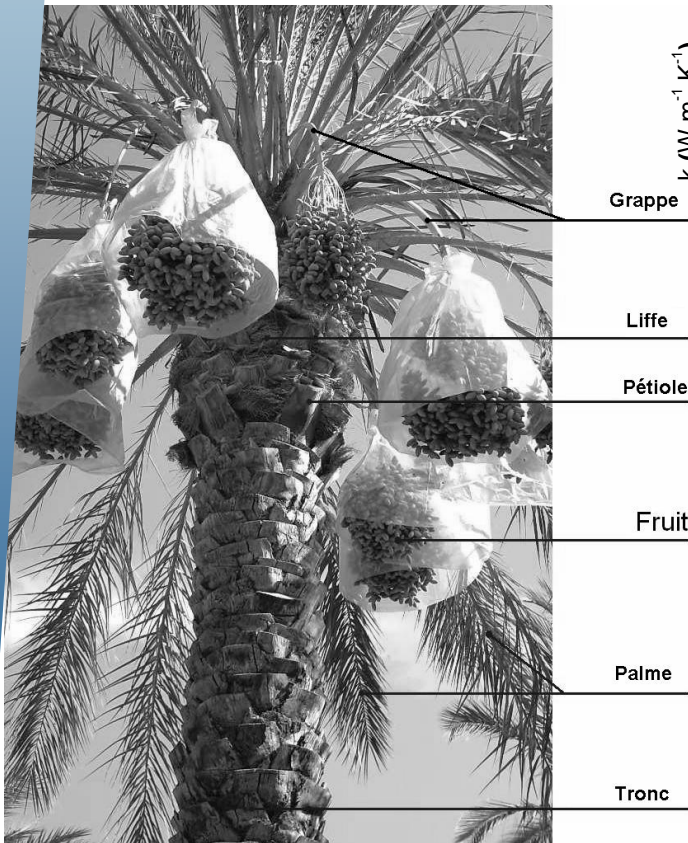
Fibres de lin / polymère

III.2) Propriétés thermophysiques du bois de palmier dattier

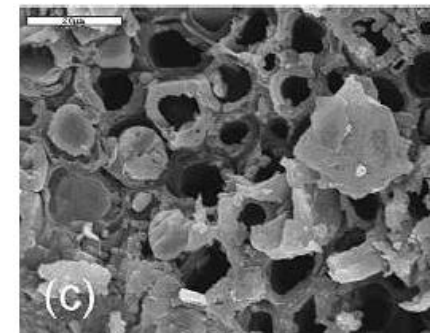
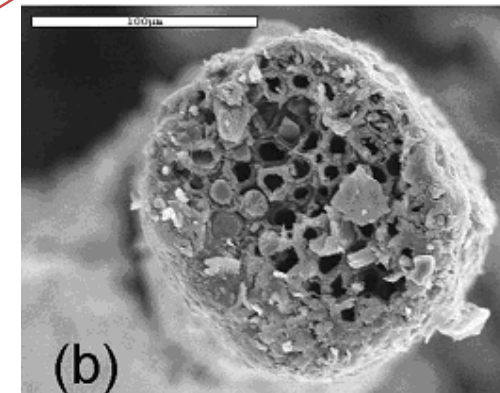
Application dans le domaine du bâtiment, remplacement des matériaux d'isolation classique
Exploitation annuelle : Potentiel de 2 Mtonnes annuelles (parties renouvelables)

Influence de la variété de bois et de la zone de prélèvement :

Variété de bois: ElGhers, Deglet-Nour, Mech-Degla



Prélèvement dans la plante



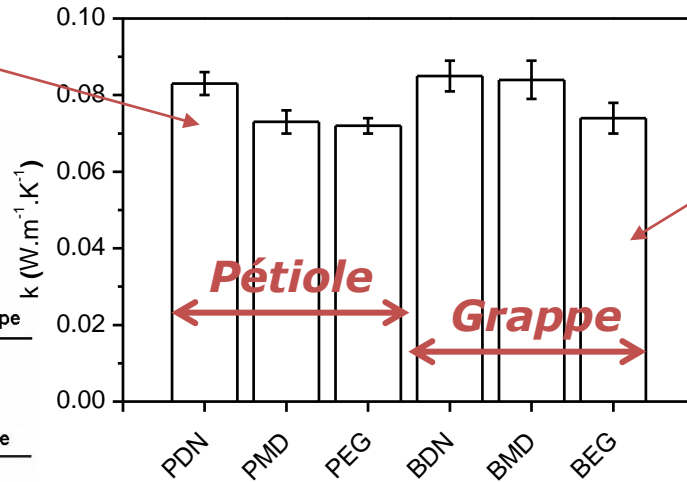
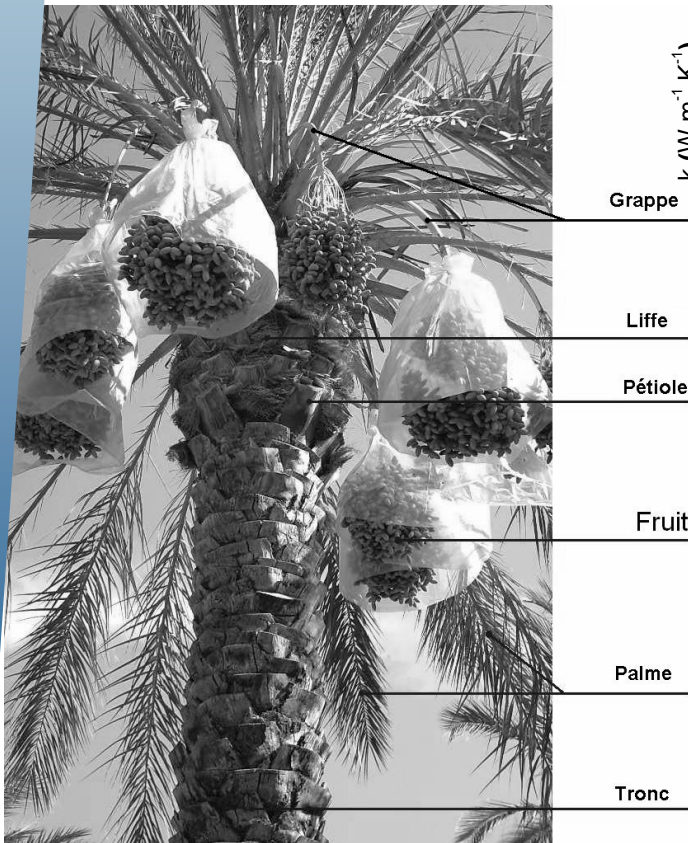
P : Pétiole
B : Grappe
DN : Pétiole Deglet Nour
MD : Pétiole Mech-Degla
EG : Pétiole ElGhers

III.2) Propriétés thermophysiques du bois de palmier dattier

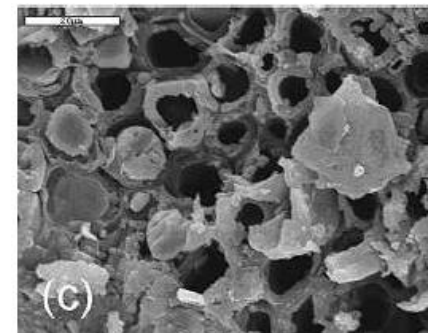
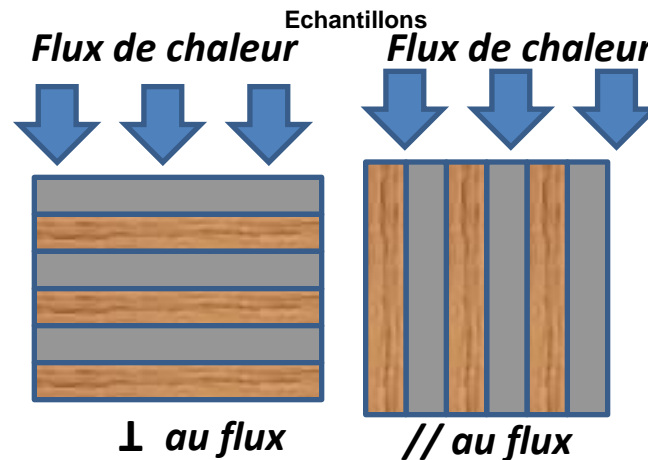
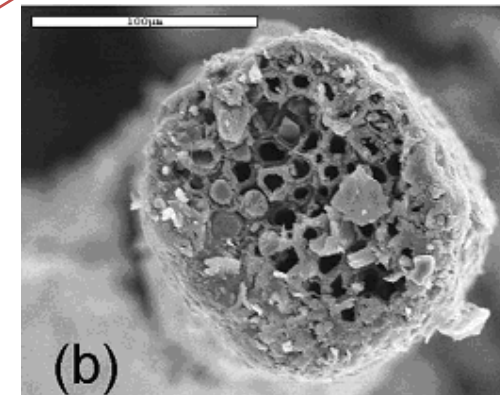
Application dans le domaine du bâtiment, remplacement des matériaux d'isolation classique
 Exploitation annuelle : Potentiel de 2 Mtonnes annuelles (parties renouvelables)

■ **Influence de l'orientation des fibres :**

Variété de bois: ElGhers, Deglet-Nour, Mech-Degla



Prélèvement dans la plante

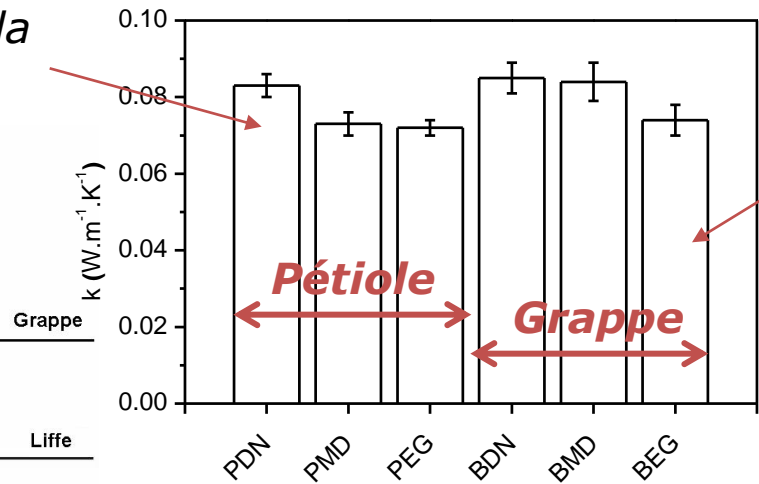
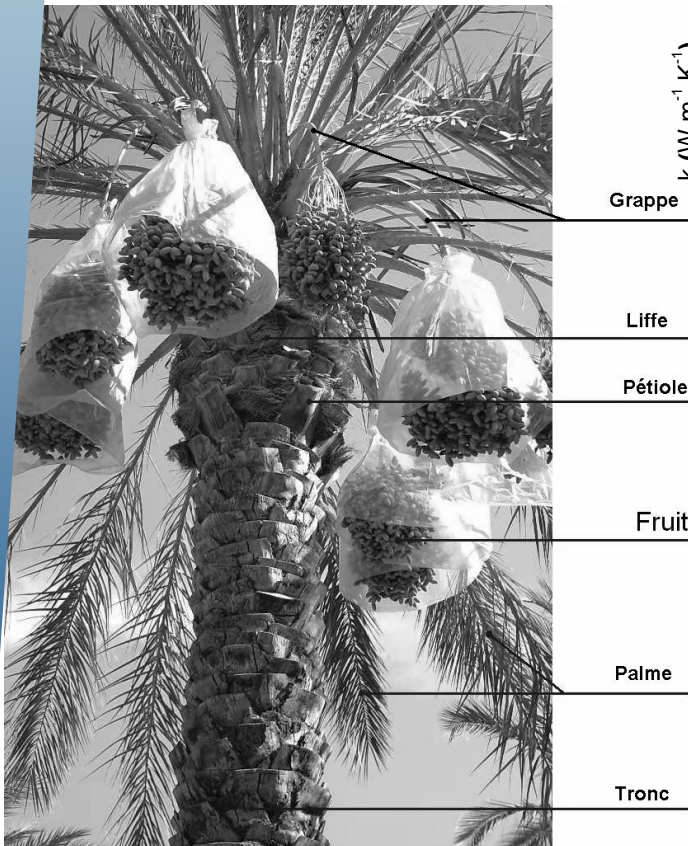


III.2) Propriétés thermophysiques du bois de palmier dattier

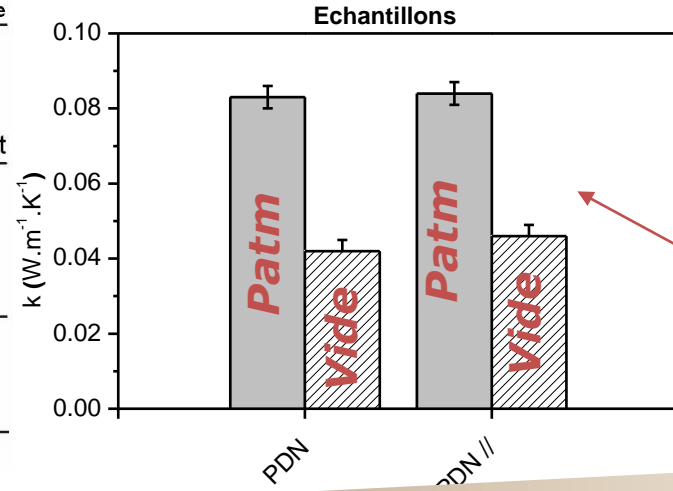
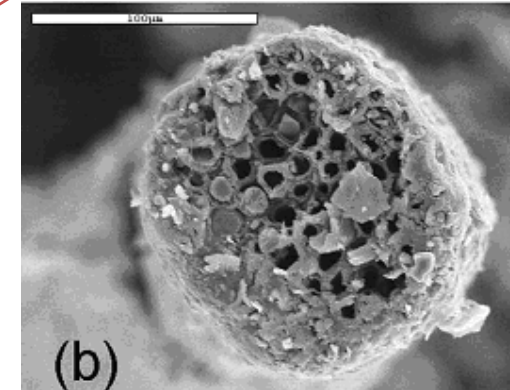
Application dans le domaine du bâtiment, remplacement des matériaux d'isolation classique
Exploitation annuelle : Potentiel de 2 Mtonnes annuelles (parties renouvelables)

Influence de l'orientation des fibres et de la pression :

Variété de bois: ElGhers, Deglet-Nour, Mech-Degla



Prélèvement dans la plante

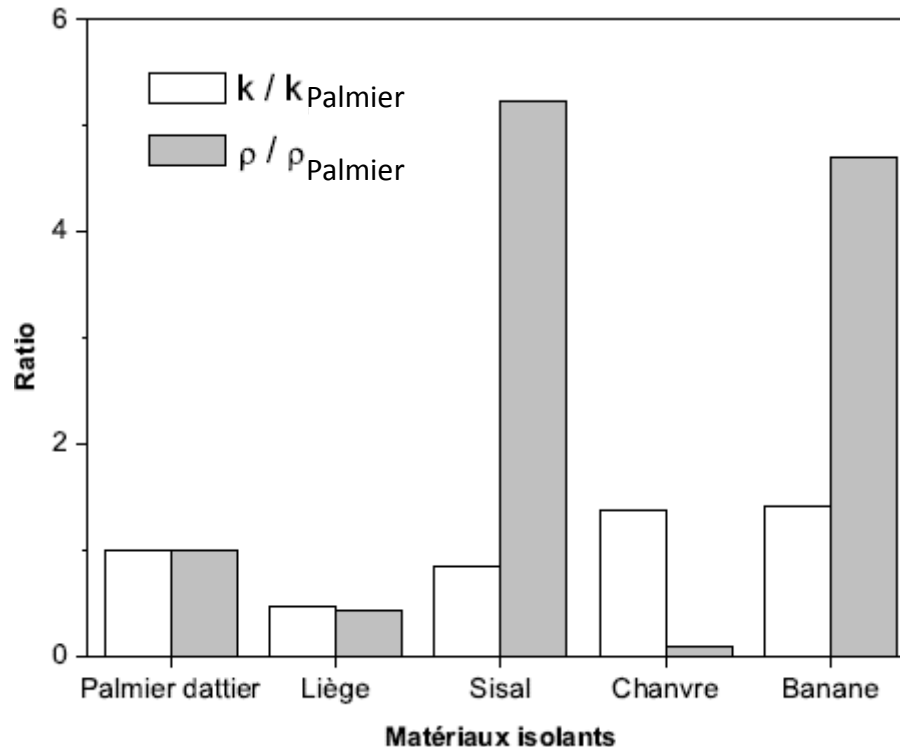


Orientation des fibres, Porosité

III.2) Propriétés thermophysiques du bois de palmier dattier

Application dans le domaine du bâtiment, remplacement des matériaux d'isolation classique
Exploitation annuelle : Potentiel de 2 Mtonnes annuelles (parties renouvelables)

■ Comparaison à d'autres matériaux naturels



Conclusion :

- Les parties renouvelables du bois de palmier constituent un bon isolant thermique
- Effet de l'orientation des fibres n'est pas significatif
- Effet important de la porosité

III. Etudes expérimentales des fibres végétales

Fibres exotiques / polymère

Fibres exotiques seules

Fibres de lin / polymère

III.3) Porosité de composites lin/epoxy par méthode thermique

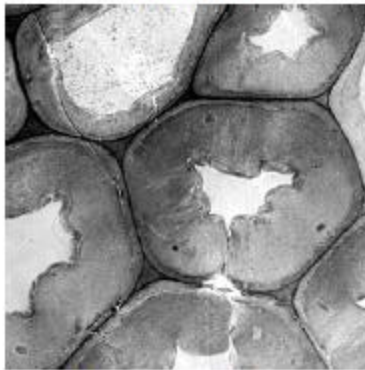
Variations de k en fonction de la pression : essais sur composites Epoxy / fibres de Lin ; collab (U. Caen)

CiMap CERTES

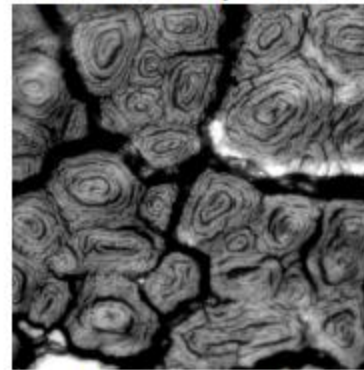
Objectifs : Obtenir la distribution de taille pores pour remonter aux types de porosité

MICRO
&
MÉSO

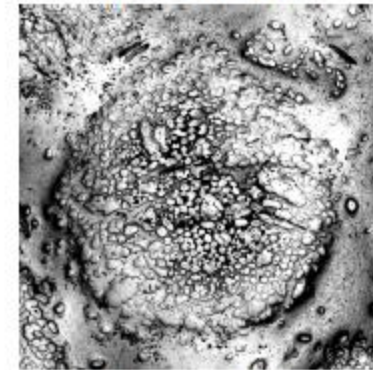
Lumen



Dans les parois

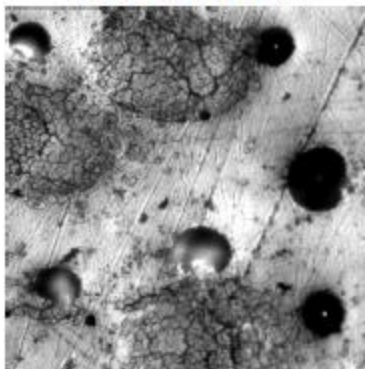


Dans les fils

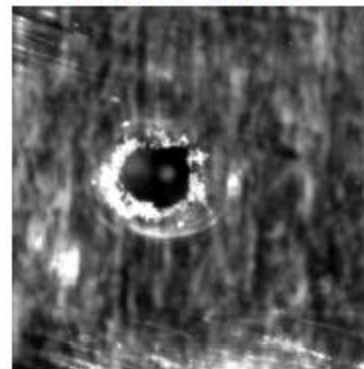


MÉSO
&
MACRO

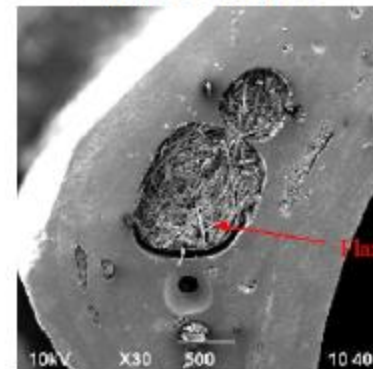
Dans la résine



Dans la maille



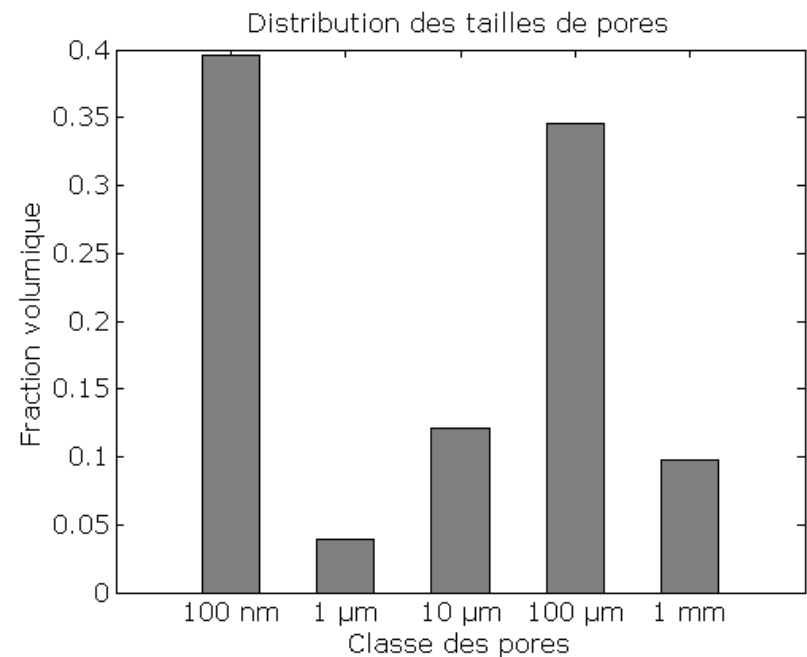
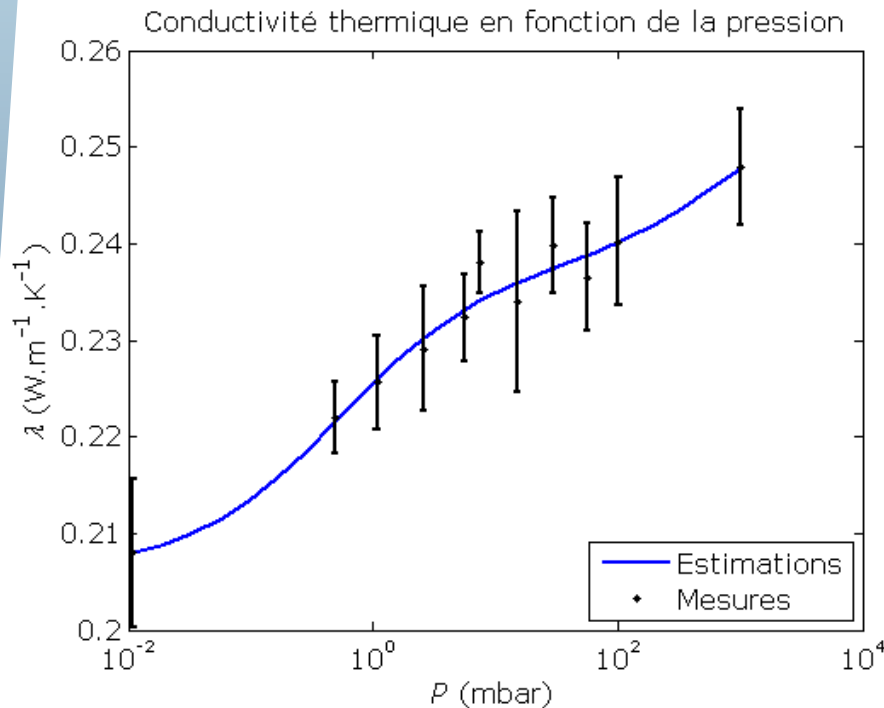
Zones sèches



CERTES

Variations de k en fonction de la pression : essais sur composites Epoxy / fibres de Lin ; collab (U. Caen)

CiMap CERTES

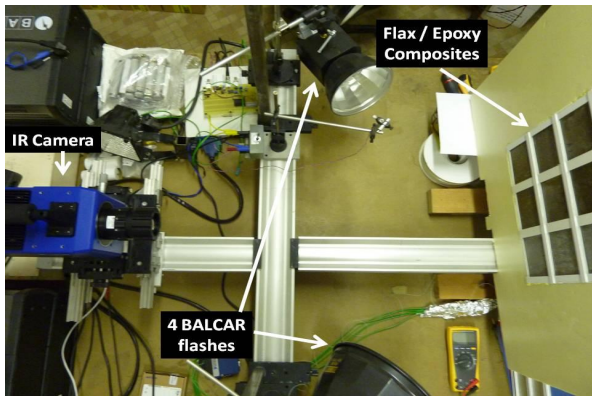


Conductivité thermique de l'air :

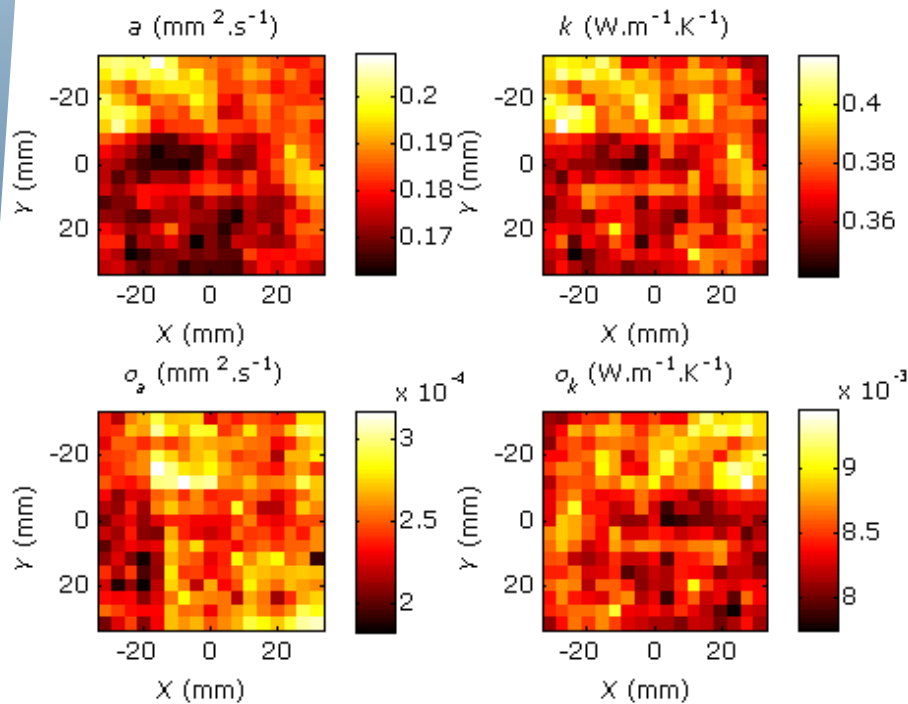
- Effet Knudsen :

$$\lambda_{air} = \frac{\lambda_{air,atm}}{1 + C \left(\frac{T}{Pd} \right)}$$

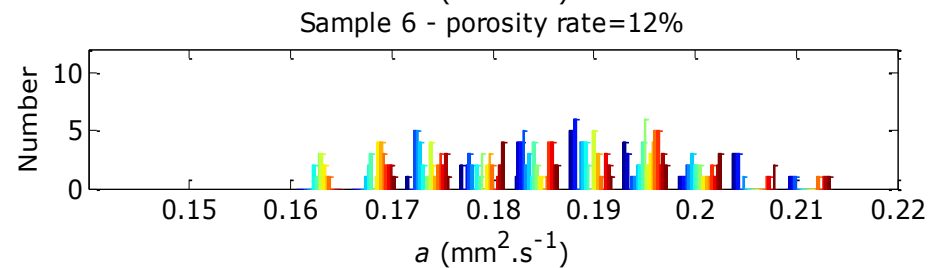
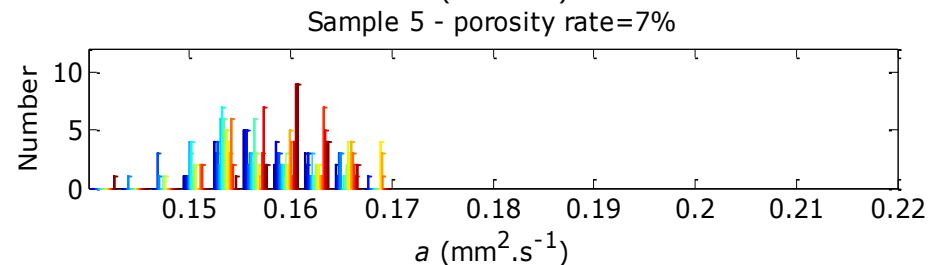
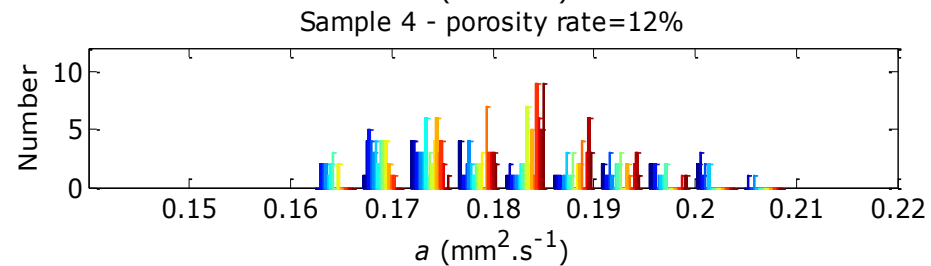
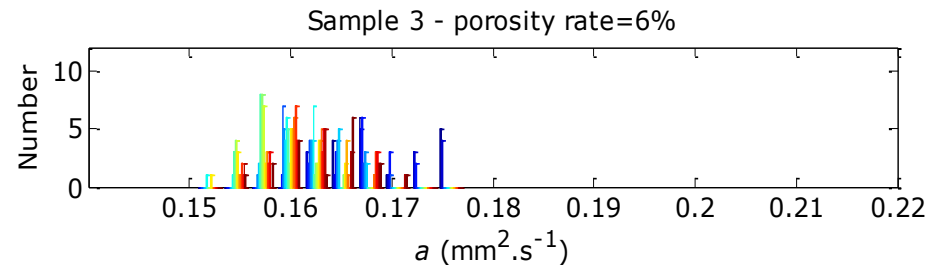
III.3) Porosité de composites lin/epoxy par thermographie IR



Dispositif expérimental

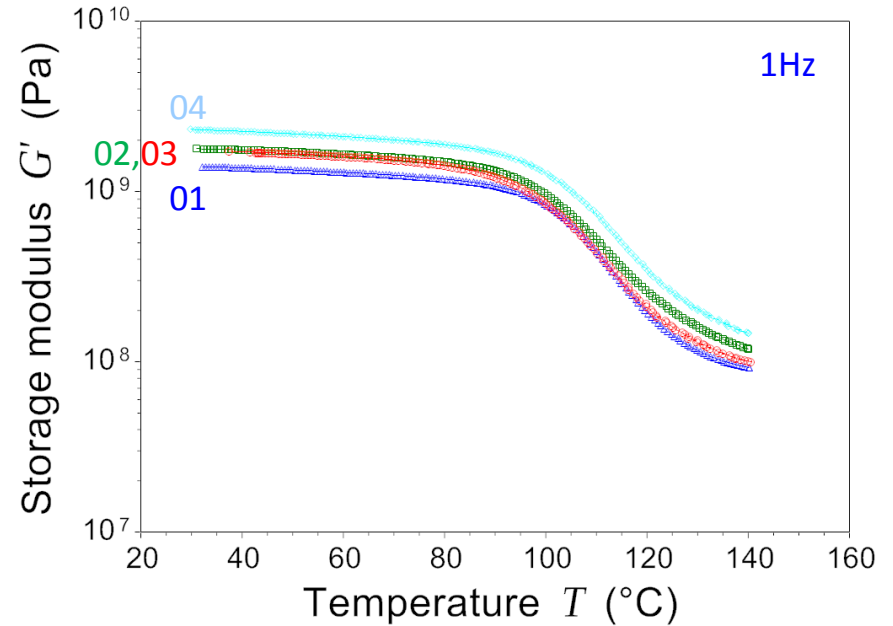


Distribution diffusivité et conductivité thermique

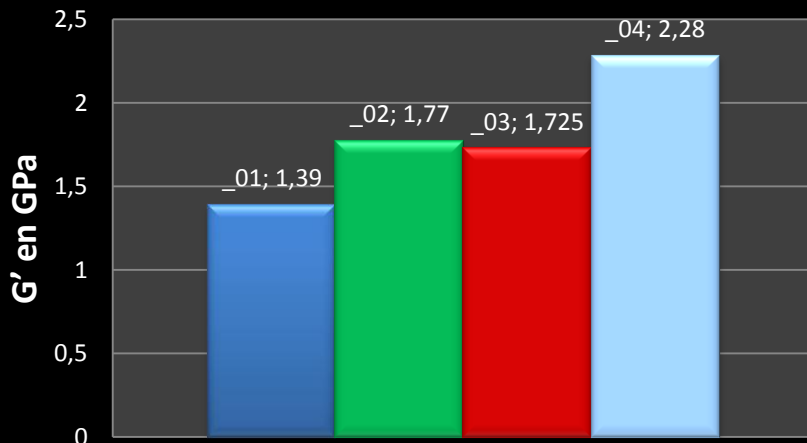


Influence des traitements chimiques sur les propriétés mécaniques

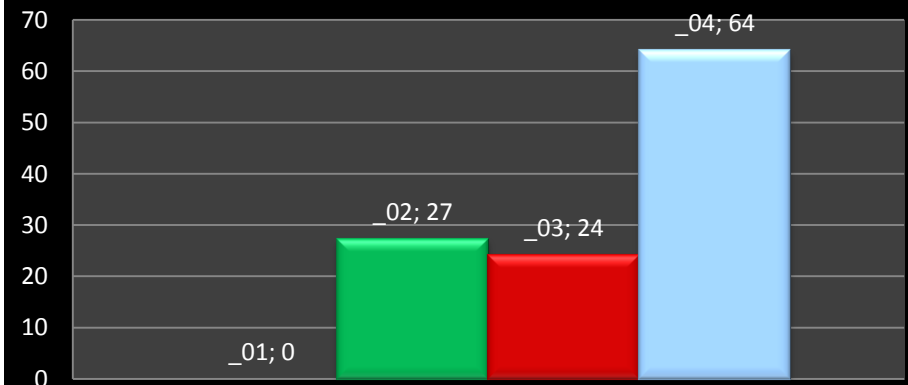
Echantillon	Nom	Traitement textile
01	Non traité	Non treated tissue
02	Lessivé	Leaching of tissue with a detergent
03	Blanchi	Bleaching of tissue with peroxide
04	Mercerisé	Mercerization of tissue with NaOH at T=20-30 C



Comparaison de G' à T_{amb}



% d'amélioration de G' par rapport au non traité



Conclusion et Perspectives

- Les fibres végétales : utilisation en pleine expansion, renouvelables, légères

- Mise en évidence de plusieurs facteurs d'influence :

Taux fibres, hybridation ,traitement des fibres, variétés des fibres, orientation des fibres, porosité...

- Prochaines études :

- Prolongation de l'étude sur la porosité : Influence du procédé de mise en œuvre sur le taux de porosité

- Les études futures devraient à l'avenir privilégier :

- l'utilisation de ressources locales

- l'utilisation de résidus de végétaux actuellement non valorisés

- l'utilisation de matières naturelles pour le traitement des fibres

- Actuellement, collaborations universitaires et industrielles... d'autres applications ?

Remerciements

Science des
matériaux

Magali FOIS

Modélisation des
transferts

Abdel BOUDENNE

Atef MAZIOUD

Yves CANDAU

Laurent IBOS

Métrologie,
Instrumentation

Jean-Pierre MONCHAU

Vincent FEUILLET

Méthodes
numériques

Merci pour votre attention.