

Les composites à renforts naturels : un nouveau challenge pour l'étude de l'interface fibre/matrice

Anne BERGERET et Nicolas LE MOIGNE
Centre des Matériaux des Mines d'Alès

20-24 janvier 2014 – MECAMAT - Aussois

Quels sont les moteurs et les freins du développement des composites à renforts naturels?

■ Moteurs :

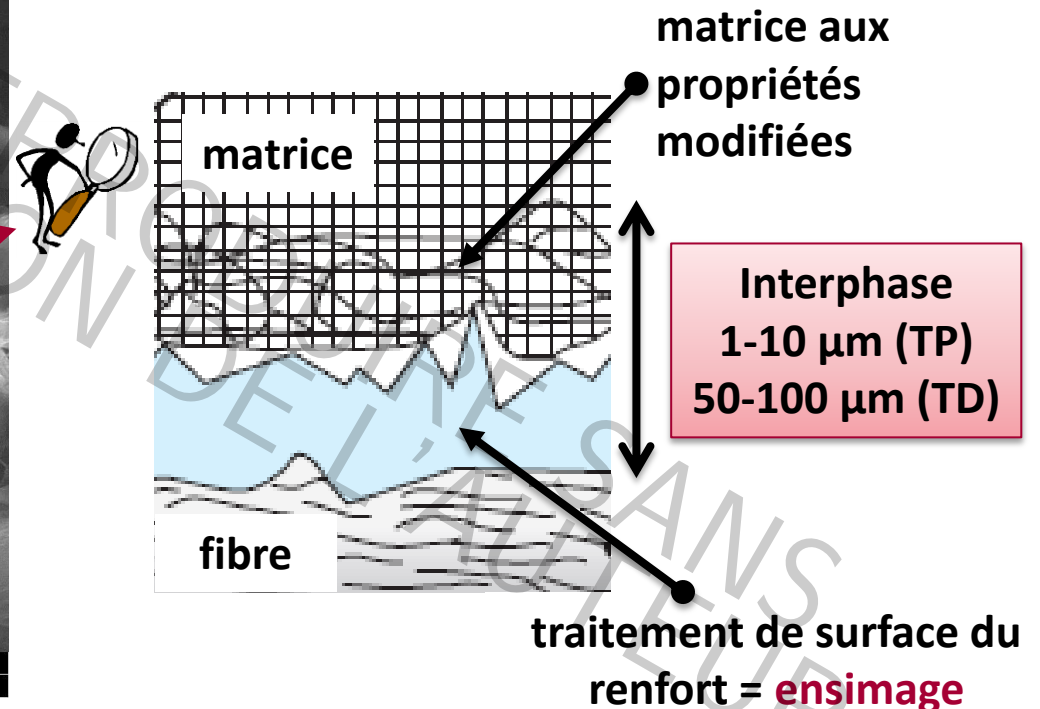
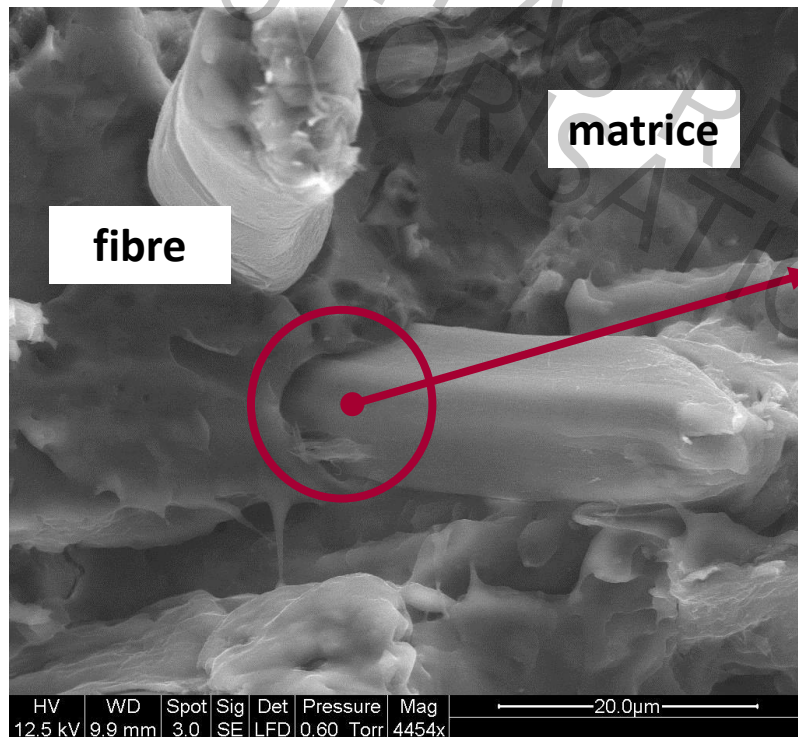
- **Leur impact environnemental**
 - Partiellement ou entièrement issus de ressources renouvelables
 - Consommation énergétique faible depuis l'étape de leur production à leur fin de vie
 - Compostable et recyclable
- **Leurs propriétés mécaniques spécifiques acceptables**

■ Freins :

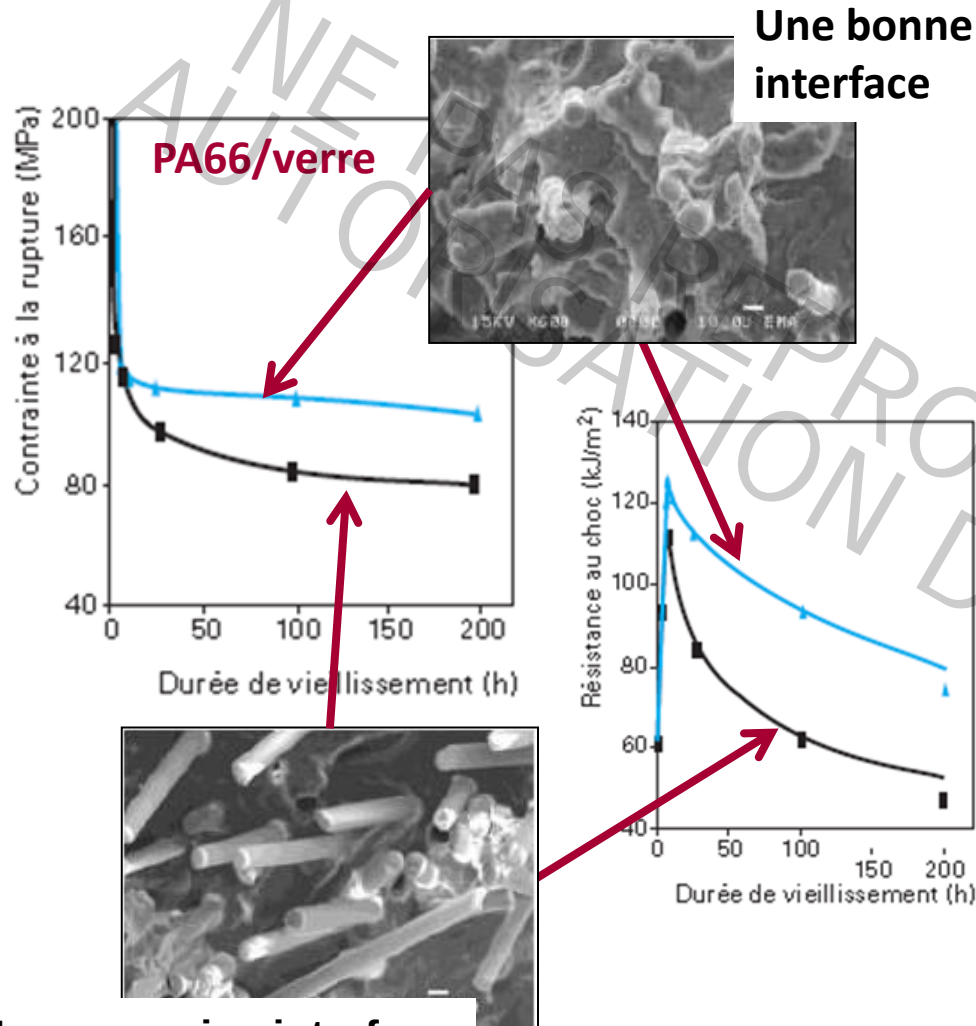
- Une variabilité des propriétés des renforts naturels
- Une interface fibre naturelle / matrice non optimisée
- Une faible durabilité dans les environnements d'utilisation

 **Peu d'applications techniques des composites à renforts naturels**

Qu'est ce que l'interface/interphase fibre/matrice dans un composite?



Quels paramètres gouvernent la qualité d'une interface?



- **Qualité de l'interface gouvernée par:**
 - **Couplage mécanique** (topographie de la fibre, énergie de surface)
 - **Couplage chimique** (interactions fibre/matrice)
- **Permet le transfert de charges de la matrice aux fibres**
- **Protège la fibre du vieillissement**

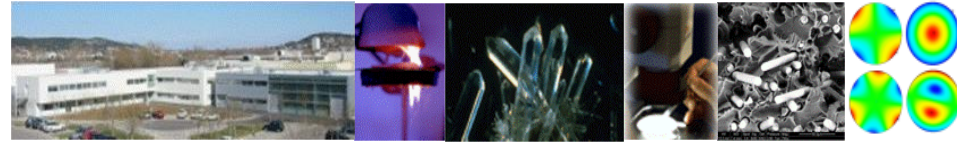
Bergeret et Krawczak, Techniques de l'Ingénieur, AM5305, 2006

Quelles sont les caractéristiques d'une interface fibre/matrice?

- ✓ Son épaisseur est **finie** et **non nulle**
- ✓ Elle possède des **propriétés intrinsèques**
- ✓ Elle permet un **transfert efficace** des contraintes mécaniques sous sollicitations
- ✓ Elle **se forme pendant la mise en œuvre** des composites
- ✓ Elle est le siège de **mécanismes multiples et complexes**

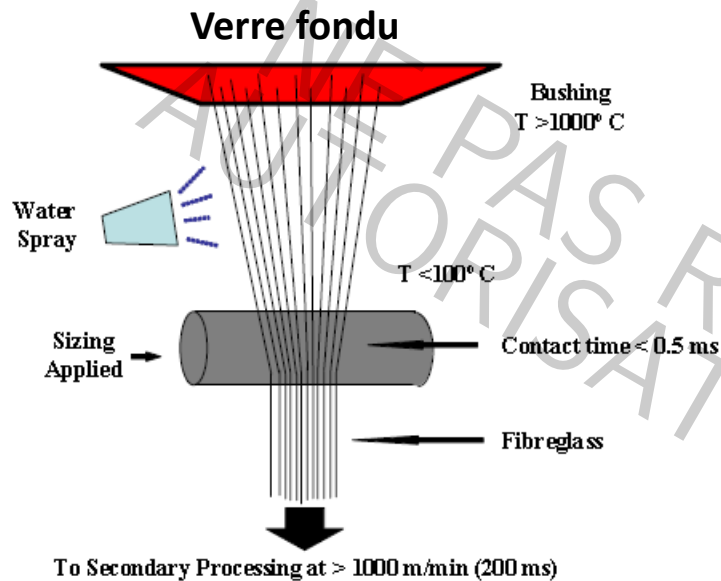
Sommaire de la présentation

- Retours d'expérience sur les composites à renforts de verre
- Les spécificités des renforts naturels
- Méthodes de caractérisation de la surface des fibres naturelles et de l'interface fibre naturelle / matrice



1- Retours d'expériences sur les composites à renforts de verre

La chimie de surface des renforts de verre



Agents antistatiques, agents mouillants, plastifiants, ...

- Stabilisation de l'ensimage

Agent(s) de pontage (organosilanes)

- Liaison chimique entre le verre et la matrice
- Propriétés mécaniques
- Tenue au vieillissement

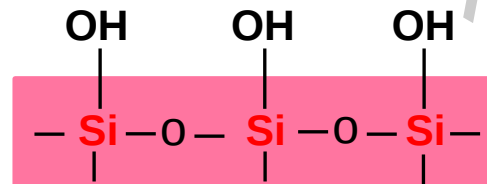
Agent(s) lubrifiant(s)

- Répartition de l'ensimage à la surface du verre
- Protection contre l'abrasion
- Facilité d'imprégnation par la matrice

Agent(s) filmogène(s) collant(s)

- Cohésion des filaments entre eux
- Raideur
- Protection contre l'abrasion
- Facilité d'imprégnation par la matrice

Surface du verre



Les méthodes de caractérisation de l'interface fibre de verre/matrice



Méthodes
d'observation

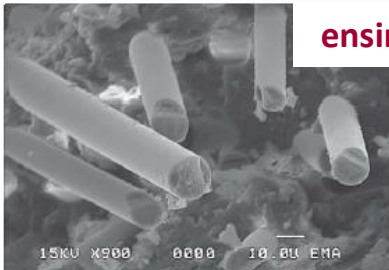
Méthodes
micromécaniques

Méthodes
macromécaniques

Méthodes
physicochimiques

MEB

Microscopie électronique à balayage



ensimage spécifique

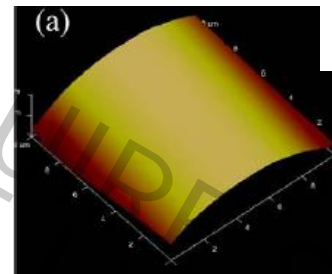


Facies de rupture
PET/verre après
85h dans l'eau à
120°C

Bergeret et al., Polymer Degradation and Stability, 94, 1315, 2009

AFM

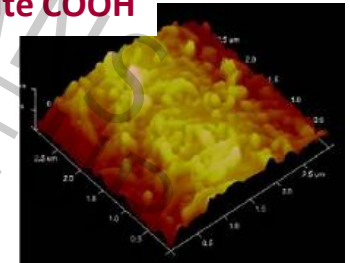
Microscopie à force atomique



Surface d'une
fibre de carbone

Li et al., Carbon, 52, 109, 2013

traité COOH



Les méthodes de caractérisation de l'interface fibre de verre/matrice

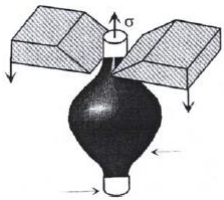
Méthodes d'observation

Méthodes micromécaniques

Méthodes macromécaniques

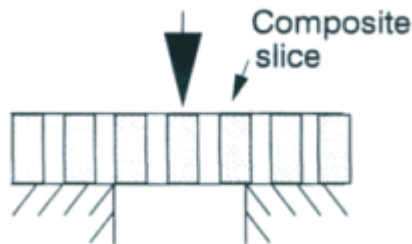
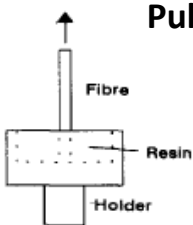
Méthodes physicochimiques

Les différentes méthodes micromécaniques



Composites
modèles
monofilamentaires

Pull out



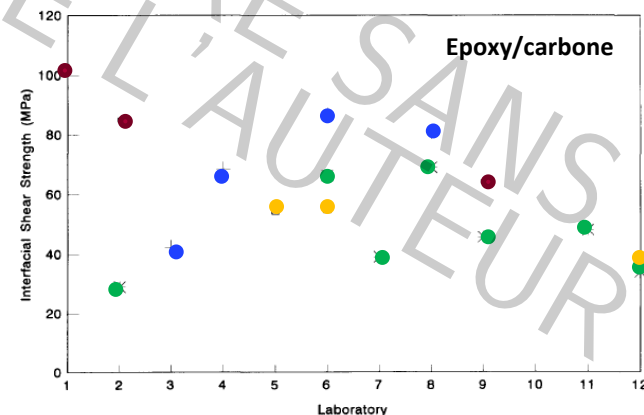
Microindentation

Fragmentation

Les limitations

Divergences importantes des résultats pour un même système :

- Algorithme de dépouillement de données (critère énergétique)
- Conditions expérimentales délicates



Pitkethly et al.,
Composites
Science and
Technology,
48, 205, 1993

● Pullout ● Microbond ● Fragmentation ● Indention

Les méthodes de caractérisation de l'interface fibre de verre/matrice

Méthodes d'observation

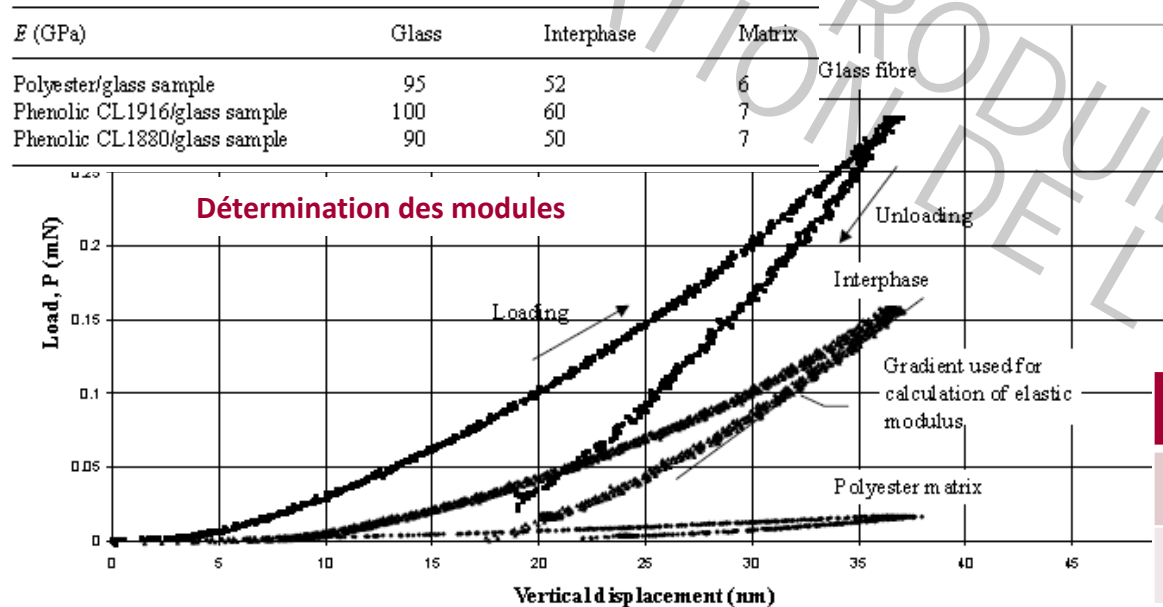
Méthodes micromécaniques

Méthodes macromécaniques

Méthodes physicochimiques

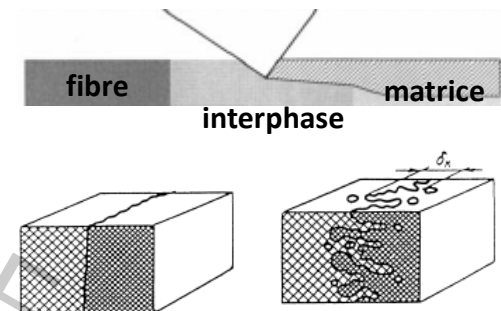
Les développements récents

Nano-indentation...



Hodzic et al., Polymer, 41, 6895, 2000

... et nano-scratch



Détermination de l'épaisseur de l'interphase

μm	Polyester/verre	Phénolique/verre
1 mN	2,11	3,42/6
0,4 mN	2,01	3,67/5,2

Les méthodes de caractérisation de l'interface fibre de verre/matrice

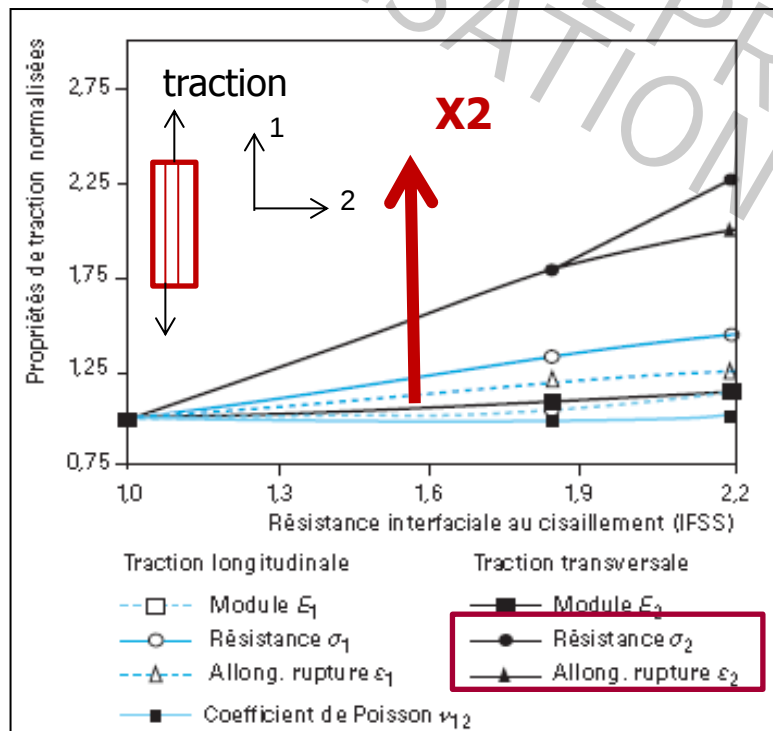
Méthodes d'observation

Méthodes micromécaniques

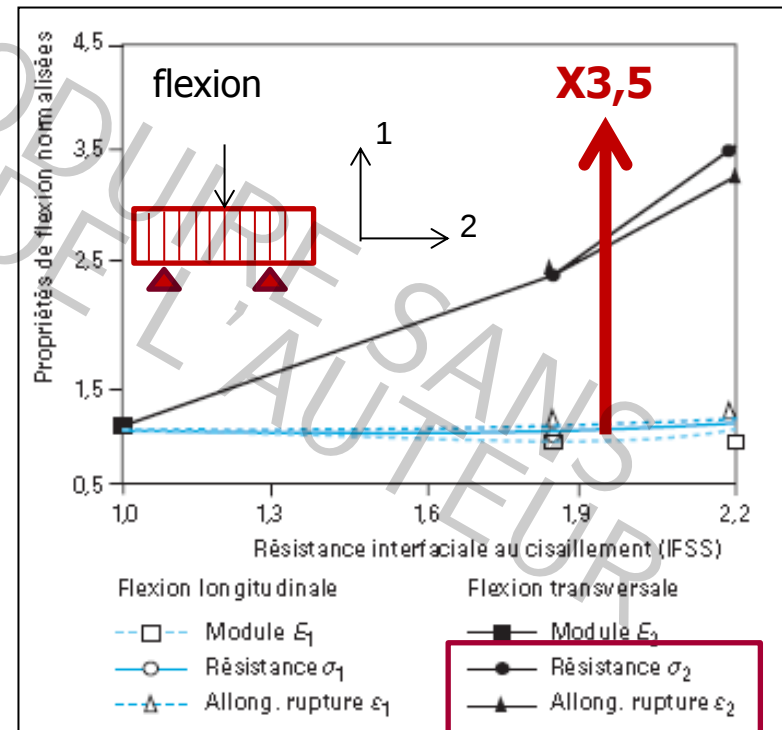
Méthodes macromécaniques

Méthodes physicochimiques

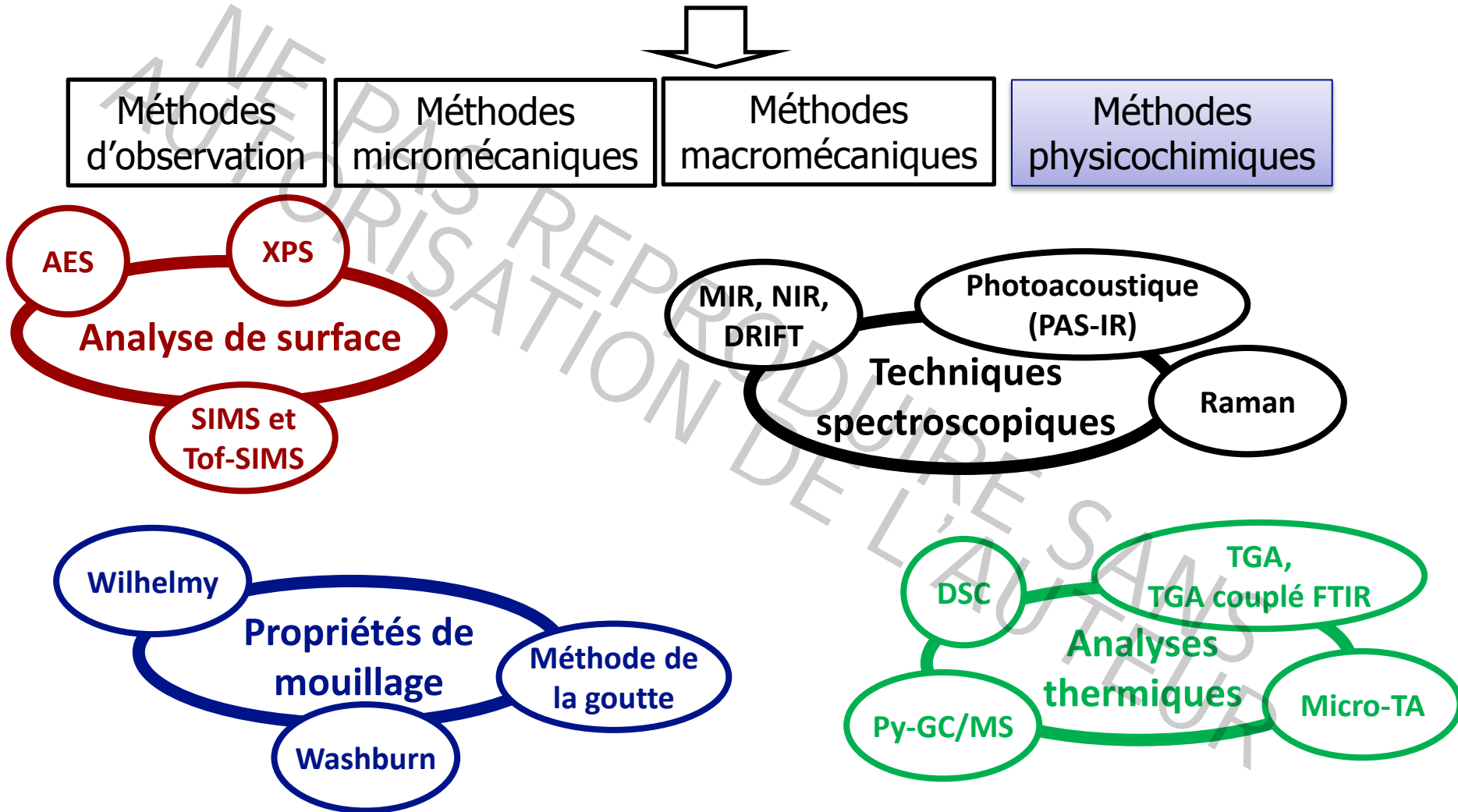
Les grandeurs sensibles à l'interface : propriétés transversales et à rupture

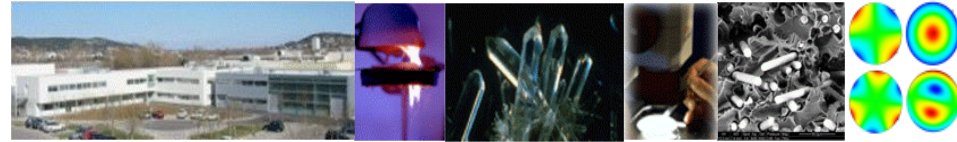


Bergeret et Krawczak, Techniques de l'Ingénieur, AM5305, 2006



Les méthodes de caractérisation de l'interface fibre de verre/matrice





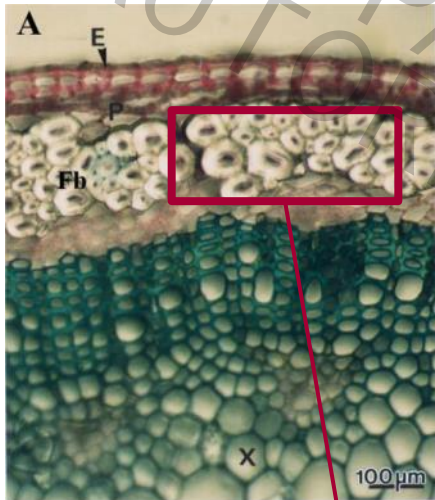
2- Les spécificités des renforts naturels

2.1- La chimie de surface des renforts naturels

2.2- Les traitements de surface des renforts naturels

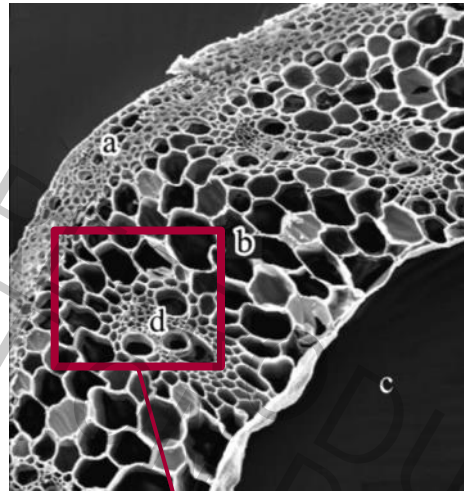
La microstructure des renforts naturels

Fibre de lin



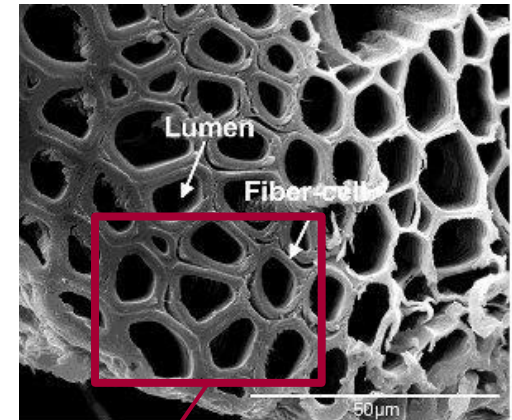
Morvan et. al, Plant Physiology and Biochemistry , 41, 935, 2003

Paille de blé



Yu et al., Carbohydrate Polymers , 72, 122, 2008

Fibre de sisal

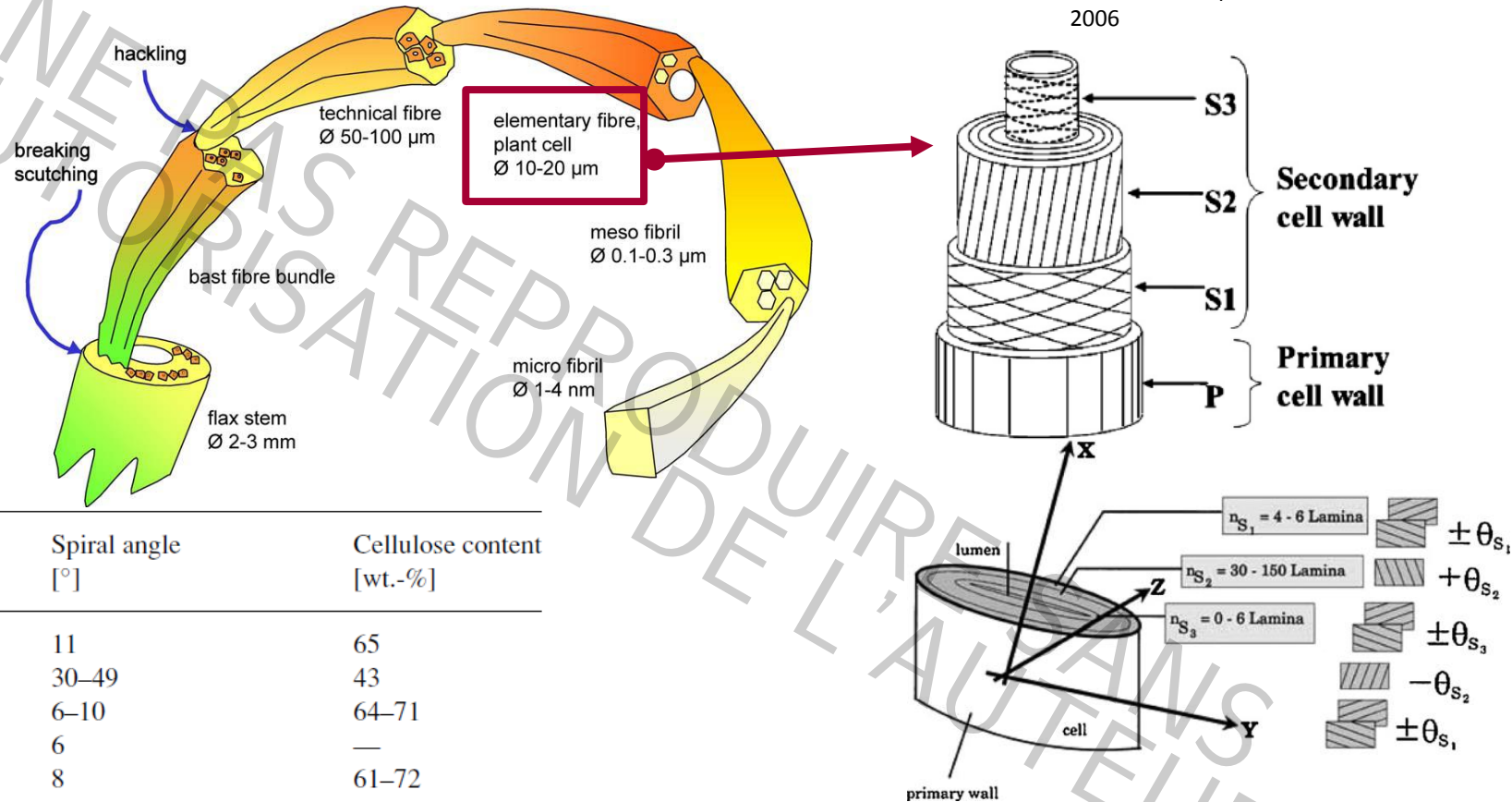


Fidelis et al., Journal of material research and technology , 2, 149, 2013



La microstructure des renforts naturels

Bos et al., Composites: Part A 37 1591, 2006

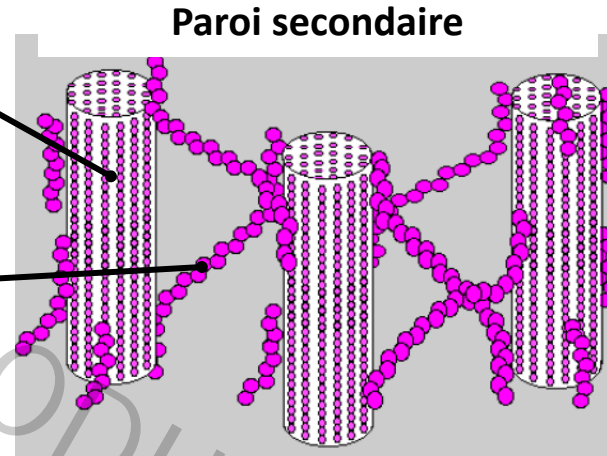
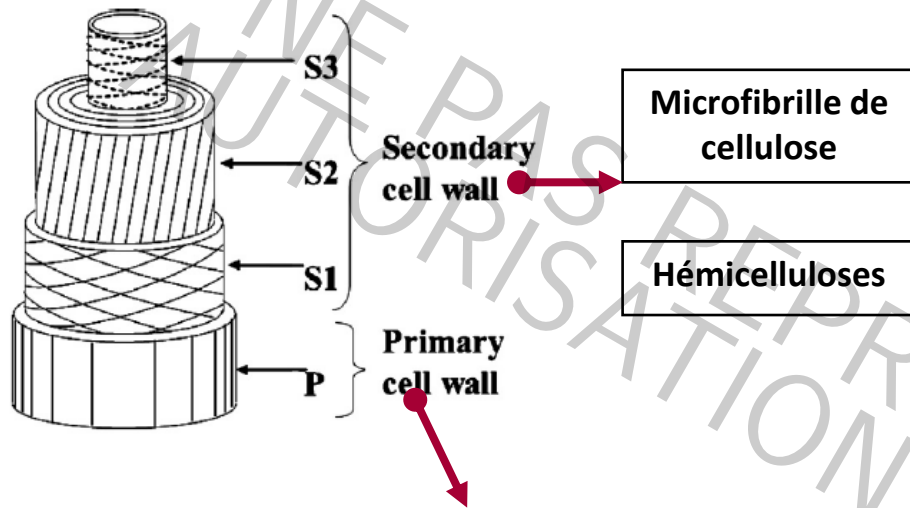


Fiber	Spiral angle [°]	Cellulose content [wt.-%]
Banana	11	65
Coir	30-49	43
Flax	6-10	64-71
Hemp	6	—
Jute	8	61-72
Pineapple	8-14	81
Sisal	10-25	66-70
Ramie	8	69-83

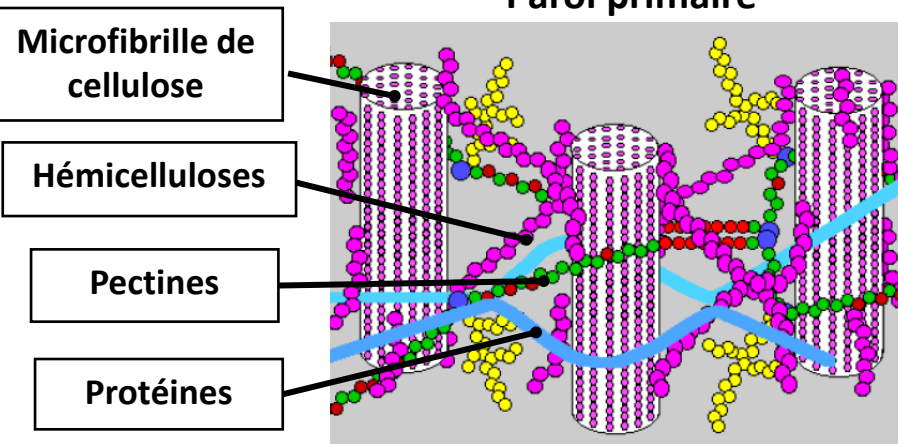
Gassan et al., Journal of Materials Science 36, 3715, 2001

- **Plusieurs parois cellulaires avec des orientations variables selon la fibre**
- **Impact direct sur les propriétés mécaniques**

La composition chimique des renforts naturels



Paroi primaire

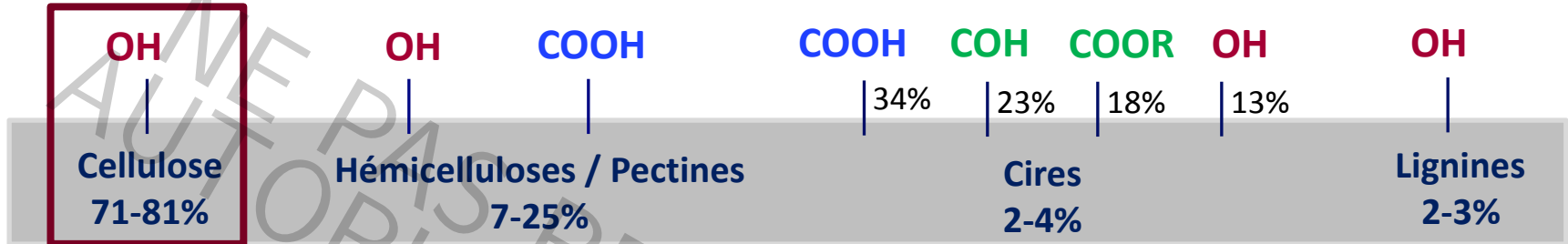


Chemical composition

Fibre type	Cellulose (wt%)	Hemicelluloses (wt%)	Lignin (wt%)	Pectin (wt%)
Flax (bast)	71-81	14-21	2-3	2-4
Sisal (leaf)	66-78	10-14	8-11	2-10
Cereal straw	38-45	15-31	12-20	8

Une grande **variabilité de composition chimique** selon les parois et selon les fibres

La réactivité chimique potentielle de surface des fibres naturelles



■ Diverses fonctions réactives en surface des fibres naturelles

- **Fonctions alcool** : essentiellement de la cellulose; dans une moindre mesure, des hémicelluloses, pectines, cires et lignines
- **Fonctions acide** : essentiellement des cires et des pectines
- **Fonctions aldéhyde et ester** : des cires

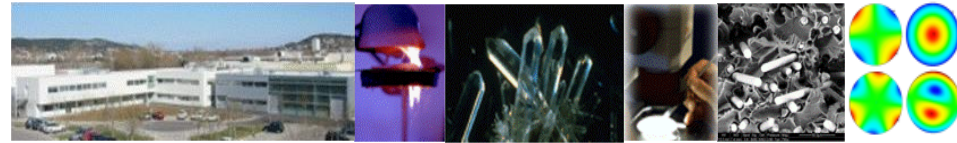
■ Les cires et les pectines sont faiblement liées en surface

■ Les cires, hémicelluloses, pectines, lignines sont susceptibles d'être éliminés lors de l'application des traitements



Une chimie de surface très différente de celle du verre

Morvan et al., Plant Physiology and Biochemistry , 41 935, 2003; Marques et al. Bioresource Technology , 101, 260, 2010
Le Moigne et al., Composites: Part A 42 , 1542, 2011; Le Moigne et al., Industrial Crops and Products, 52, 481, 2014



2- Les spécificités des renforts naturels

2.1- La chimie de surface des renforts naturels

2.2- Les traitements de surface des renforts naturels

Les traitements de surface des fibres naturelles



Traitements physiques

Traitements physicochimiques

Traitements chimiques

- Rouissage



- Broyage



- Teillage



- Peignage

Les traitements de surface des fibres naturelles

Traitements physiques

- Rouissage



- Broyage



- Teillage

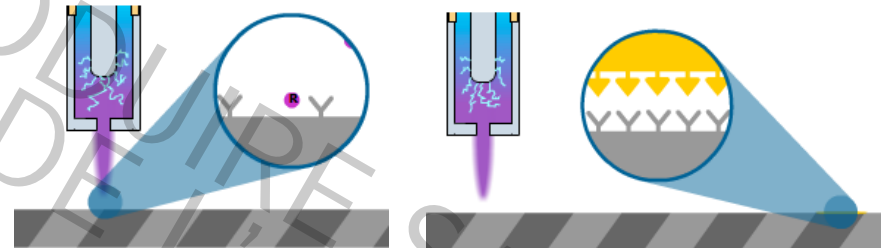


- Peignage

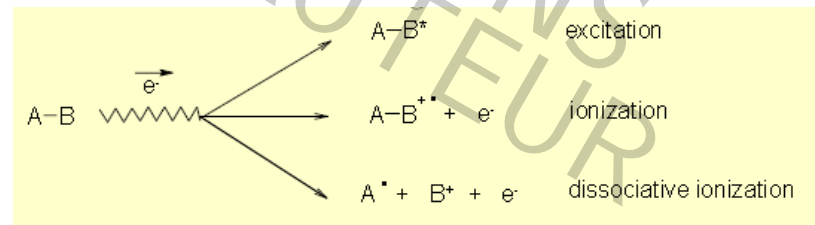
Traitements physicochimiques

Traitements chimiques

- **Plasma (froid ou chaud)** : lié à un effet de décharge entre 2 électrodes portées à un haut potentiel dans un gaz



- **Rayonnements ionisants**



Les traitements de surface des fibres naturelles



Traitements physiques

Traitements physicochimiques

Traitements chimiques

Milieu alcalin

Fibres	Matrice	concentration en NaOH	Temps	Température
Ananas	Polycarbonate	5%	5h	30°C
Baguette bois	Poly (acide lactique)	25%	2h	50°C
Balle de riz	Phénol Formaldéhyde	2% ; 4% ; 6% ; 8%	24h	25°C
Balle de riz	Polypropylène	10%	3h	Ambiante
Balle de riz	Caoutchouc/ Polyéthylène haut densité	5%	3h	Ambiante
Bambou	Polypropylène	0,05 M ; 0,1 M ; 0,2 M ; 0,25 M ; 0,5 M ; 1 M ;	24h	Ambiante
Bambou	Polychlorure de vinyle	0,5% ; 1% ; 2% 5% ; 10%	15 min	Ambiante
Curaua	Polycaprolactone	10%	2h	Ambiante
Henequen	Polyéthylène haut densité	2%	1h	25°C
Jute	Epoxy	5%	2h	Ambiante
Jute	Polypropylène	0,06 M	5h	70°C
Kénaf	Epoxy	5%	1h	Ambiante
Kénaf	Poly (acide lactique)	5%	2h	Ambiante
Luffa	*	0,1 M	20 min	100°C
Noir de coco	Polyuréthane	10%	24h	Ambiante
Palmier	*	0,5% ; 1% ; 1,5% 2,5% ; 5%	1h	100°C
Ramie	Poly (acide lactique)	5%	3h	Ambiante
Sisal	Polyuréthane	10%	1h	Ambiante

Shih, Mat. Sci. Eng., 527, 6, 1516-1521, 2010

Favaro, Comp. Appl. Sci. Manuf., 41, 1, 154-160, 2010

Ndazi, Comp. Appl. Sci. Manuf., 38, 3, 925-935, 2007

Threepopnatkul, Comp. Part B, 40, 7, 628-632, 2009

Syafri, Sains Malaysiana, 749-756, 2011

Nguyen, J. Reinf. Plast. Comp., 29, 21, 3244-3256, 2010

Wang, Comp. Sci. Techn., 70, 5, 847-853, 2010

Gomes, Comp. Appl. Sci. Manuf., 38, 8, 1811-1820, 2007

Valadez-Gonzalez, Comp. Part B, 30, 3, 321-331, 1999

Seki, Mater. Sci. Eng., 508, 1-2, 247-252, 2009

Rahman, Comp. Appl. Sci. Manuf., 39, 11, 1739-1747, 2008

Sgriccia, Comp. Appl. Sci. Manuf., 39, 10, 1632-1637, 2008

Huda, Comp. Sci. Techn., 68, 2, 424-432, 2008

Demir, Comp. Appl. Sci. Manuf., 37, 3, 447-456, 2006

Silva, Comp. Sci. Techn., 66, 10, 1328-1335, 2006

Alawar, Comp. Part B, 40, 7, 601-606, 2009

Yu, Comp. Appl. Sci. Manuf., 41, 4, 499-505, 2010

Silva, Comp. Sci. Techn., 66, 10, 1328-1335, 2006

Les traitements de surface des fibres naturelles



Traitements physiques

Traitements physicochimiques

Traitements chimiques

Organosilanes

Silane	Fibres	Matrice	Concentration de silane (%)	Temps (h)	Solvant	Cuisson (°C)
3-aminopropyltriethoxy silane (APS)	Luffa	Polypropylène	2,5	0,75	Ethanol	X
	Ananas	Polycarbonate	1	6	Méthanol	X
	Noir de coco	Poly (acide lactique)	3	24	Ethanol	X
	Fibre micro cellulose	Epoxy	0,3	24	Acétone	X
	Balle de riz	Caoutchouc/Polyéthylène basse densité	1	0,5	Ethanol	100°C
	Kénaf	Poly (acide lactique)	5	3	Ethanol/l'eau 60/40	X
3-glycidoxypropyltrimethoxy silane (GPS)	Ramie	Poly (acide lactique)	6	24	Acétone	X
	Fibres micro cellulose	Epoxy	0,3	24	Acétone	X
	Kénaf	Epoxy	1	2	Ethanol/eau 50/50	X
	Chanvre	Epoxy	1	2	Ethanol/eau 50/50	X
3-mercaptoproyltrimethoxy silane (MRPS)	Fibre cellulose	Polyéthylène basse densité	3	2	Ethanol/eau 80/20	120°C
3-methacryloxypropyltrimethoxy silane (MPS)	Fibre cellulose	Polyéthylène basse densité	3	2	Ethanol/eau 80/20	120°C
	Ananas	Polycarbonate	1	6	Méthanol	X
Hexadecyltrimethoxy silane (HDS)	Fibre cellulose	Polyéthylène basse densité	3	2	Ethanol/eau 80/20	120°C
Triethoxy- vinyl silane (TVS)	Baguette bois	Poly (acide lactique)	10	12	Acétone	X
Vinyltris (2- methoxy-ethoxy) silane (VMS)	Henequen	Polyéthylène haut densité	0 ,033	1	non mentionné	X
	Henequen	Polyéthylène haut densité	0,033	1	non mentionné	X
3-(trimethoxysilyl)- 1-propanethiol	Luffa	Polypropylène	2,5	0,75	Ethanol	X

1
2
3
4
5
6
7
4
8
8
9
9
2
9
10
11
11

Les traitements de surface des fibres naturelles



Traitements physiques

Traitements physicochimiques

Traitements chimiques

Agents de compatibilisation dans la matrice

Polymère	Taux de balle	Couplage agent (CA)	Concentration de CA (%)	Méthode de traitement
PP	40	Anhydride maléique - copolymère polypropylène (MAPP)	5%	Mélangeur interne 166°C
PP	10; 20; 30; 40	Anhydride maléique - copolymère polypropylène (MAPP)	3%	Compounding
PP	10; 20; 30; 40	Anhydride maléique - copolymère polypropylène (MAPP)	1,2%; 1,4%; 1,6%; 1,8%	Compounding
PP	30; 40; 50; 60	Anhydride maléique - copolymère polypropylène (MAPP)	1%, 3%, 5%	Compounding
PP	30; 40; 50; 60	3-(triméthoxysilyl)-propylméthacrylate (TPM)	Solution de CA 20%	Pulvérisation (Solvant éthanol)
HDPE	65	Terpolymères : Ethylène-(Ester acrylique)-(Anhydride maléique)	2,5%	Mélangeur interne 185°C
HDPE	65	Terpolymères : Ethylène-(acrylique ester)-(Méthacrylate de glycidyle)	2,5%	Mélangeur interne 185°C
HDPE	65	Ethylène-(Ester acrylique)-(Anhydride maléique)	2,5%; 0,73%; 4,27%; 5%	Mélangeur interne 185°C
PLA	20 ; 30 ; 40	Anhydride maléique	7%	Mélange
PLA	20;30	Terpolymères : (PLA)-(Anhydride maléique)-(Dibenzoylperoxide)	5%	Compounding
Caoutchouc Naturel/ HDPE	10	Liquide de Caoutchouc naturel époxyde	Solution de CA : 5%, 10%, 20%	Imprégnation (Solvant toluène)
Polyester insaturé	57	Méthacrylate de glycidyle (GMA) Anhydride maléique (MA) Anhydride succinique (SA)	CA: solvant (2 : 3 v/v)	Imprégnation (Solvant : N,N-diméthyl formamide)

Bledzki, Ind. Crops Prod., 37, 1, 427-434, 2012

Razavi-Nouri, Iranian Polymer Journal, 757-766, 2006

Rosa, Materials Research, 333-338, 2009

Rozman, J. Appl. Polym. Sci., 115, 6, 3456-3462, 2010

Rozman, J. Appl. Polym. Sci., 115, 6, 3456-3462, 2010

Panthapulakkal, Polym. Int., 54, 1, 137-142, 2005

Panthapulakkal, Polym. Int., 54, 1, 137-142, 2005

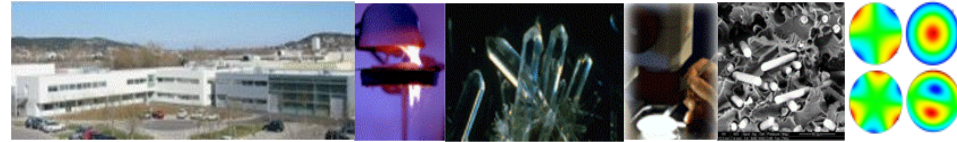
Panthapulakkal, J. Thermoplast. Compos. Mater., 18, 5, 445-458, 2005

Ndazi, eXPRESS Polymer Letters, 119-131, 2011

Dimzosi, J. Polym. Eng, 28, 369-384, 2008

Syafri, Sains Malaysiana, 749-756, 2011

Rozman, J. Appl. Polym. Sci., 97, 3, 1237-1247, 2005



3- Les méthodes de caractérisation de la surface des fibres naturelles et de l'interface fibre naturelle/matrice

3.1- Méthodes d'observation

3.2- Essais micromécaniques

3.3- Tests macromécaniques

3.4- Analyses physicochimiques

Les méthodes d'observation

Essais de propagation de fissure sous MEB

Rupture adhésive à l'interface

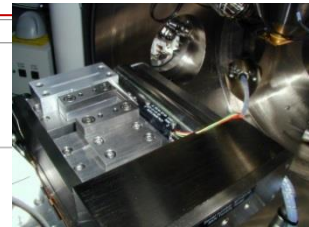
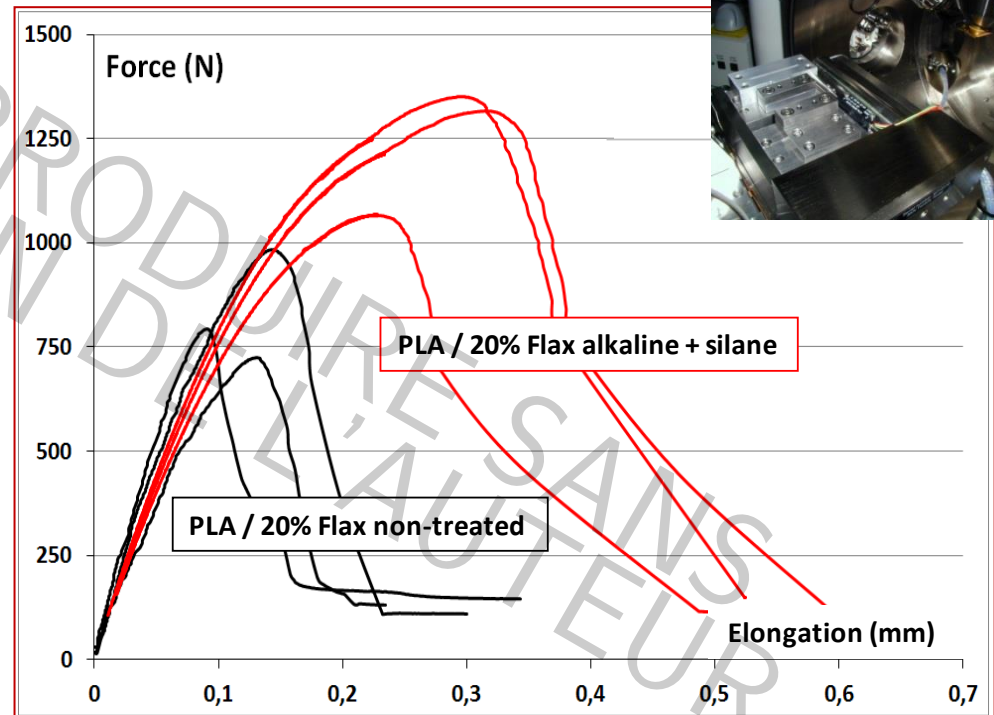
Décohésion des fibres
Rupture nette de la matrice

Test de traction in-situ 0.1 mm/min



PLA/in non traité

PLA/in traité



Rupture cohésive à l'interface

Déchirement de la matrice
Rupture des fibres liées à la matrice

Le Moigne et al., Industrial Crops and Products
52, 481, 2014

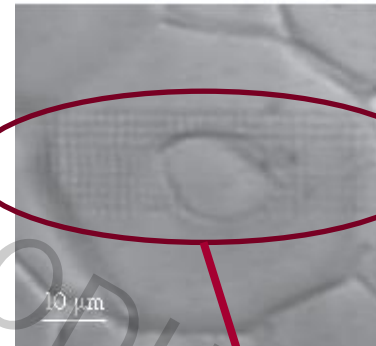
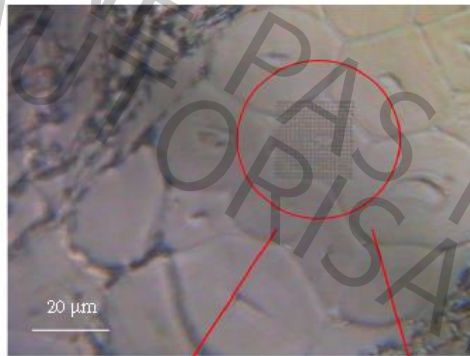
des Mines d'Alès



Les méthodes d'observation

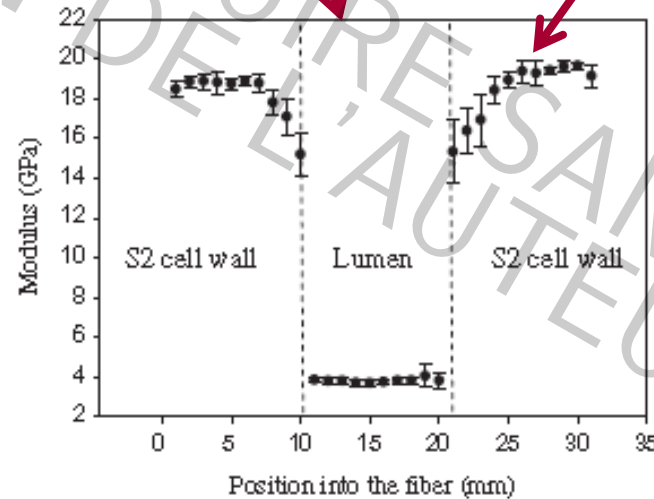
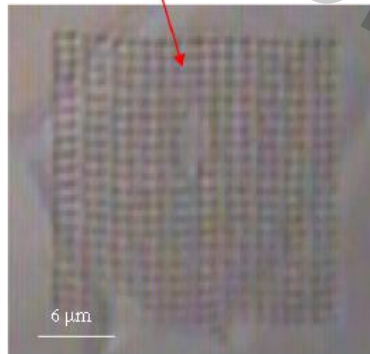
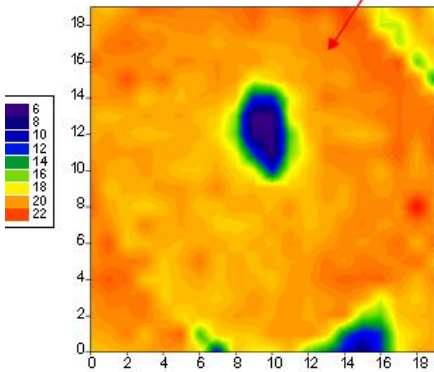
Nanoindentation sous AFM

De la cartographie des modules dans une fibre...



S2 : 3-4 μm
S1 et S3 : 150-600 nm
entre indents : 1 μm

Lin : module S2
de $19,2 \pm 0,7$ GPa
(122 indents)

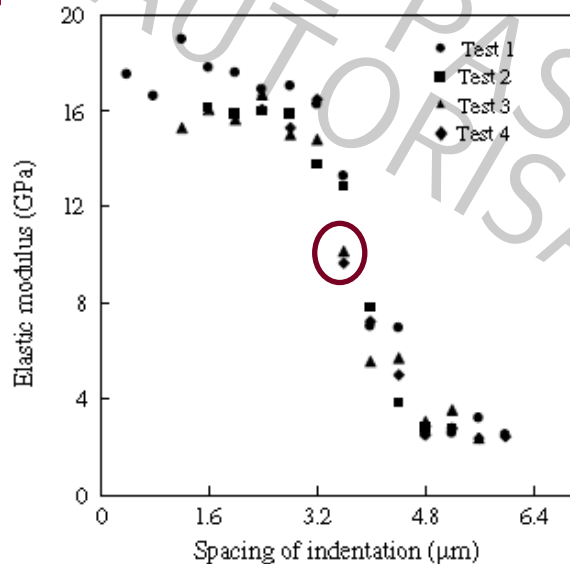


A. Bourmaud et al., Composites: Part B 43, 2861, 2012

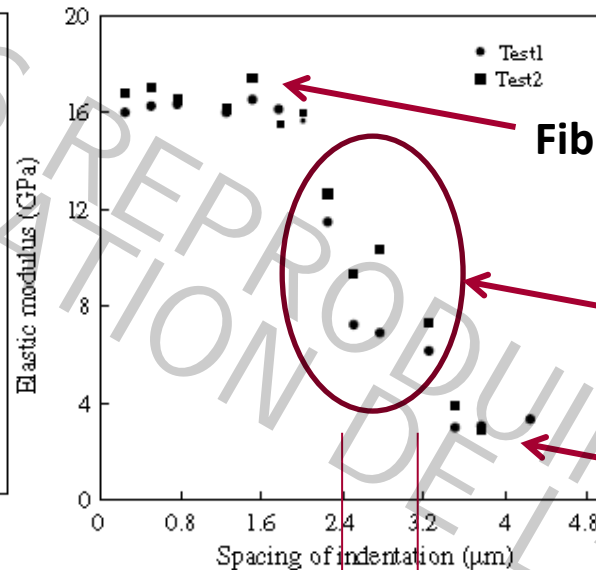
Les méthodes d'observation

Nanoindentation sous AFM

... aux propriétés de l'interphase fibre naturelle/matrice ?



Profondeur : 50 nm
Espacement : 400 nm



Interphase de moins de 1 μm

Profondeur : 30 nm
Espacement : 260 nm

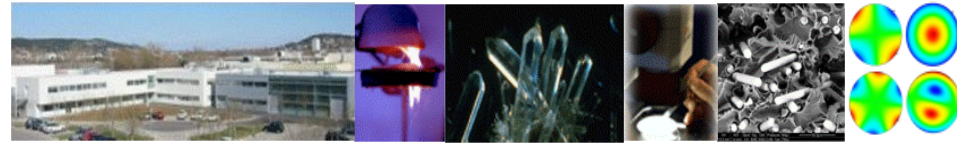
Fibre de cellulose : 16,62 GPa

4 indents propriétés différentes de la fibre et la matrice

Matrice PP : 3,03 GPa

Difficile de calculer les propriétés d'une zone plus petite que la distance entre indents sans inclure l'effet des propriétés de la matrice et de la fibre

Lee et al., Composites: Part A 38, 1517, 2007



3- Les méthodes de caractérisation de la surface des fibres naturelles et de l'interface fibre naturelle/matrice

3.1- Méthodes d'observation

3.2- Essais micromécaniques

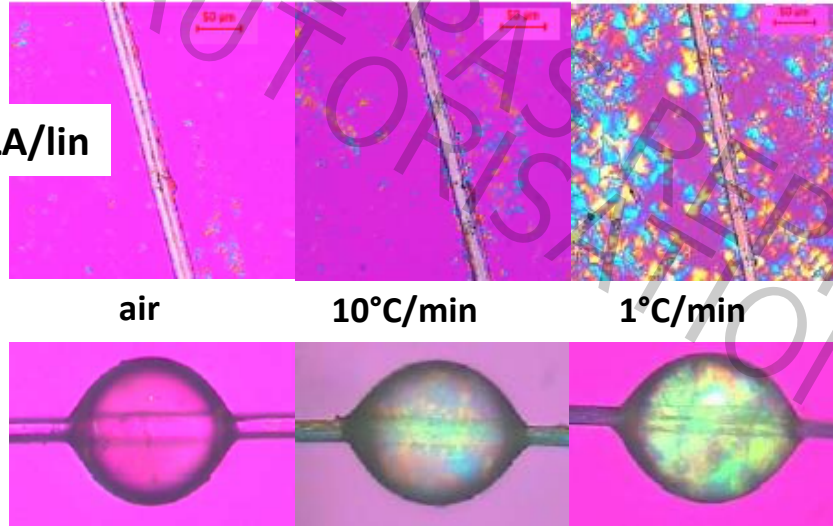
3.3- Tests macromécaniques

3.4- Analyses physicochimiques

Les essais micromécaniques

De l'utilisation des essais classiques...

Test de pull-out...

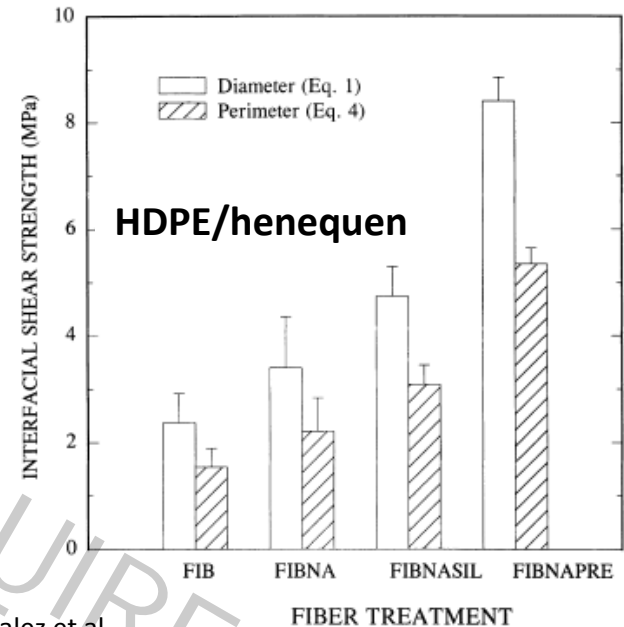


Contrainte de cisaillement interfacial

15,3±3,3 MPa 18,2±1,8 MPa 22,2±3,4 MPa

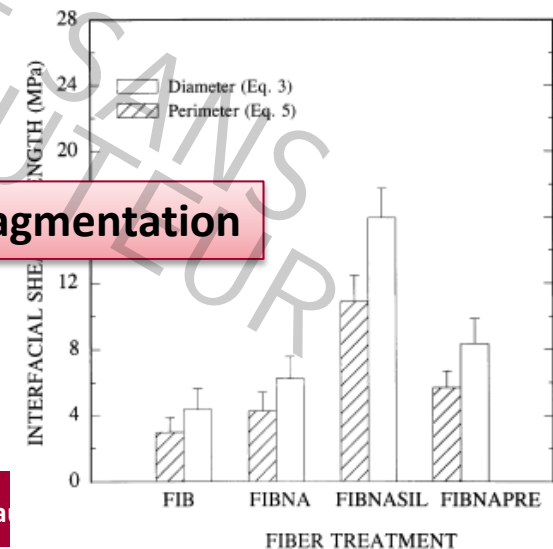
Limitation à la **non prise en compte du diamètre réel des fibres naturelles**

Le Duigou et al., Composites Science and Technology, 70, 2, 231, 2010



A. Valadez-Gonzalez et al.,
Composites: Part B 30, 309,
1999

... et de fragmentation

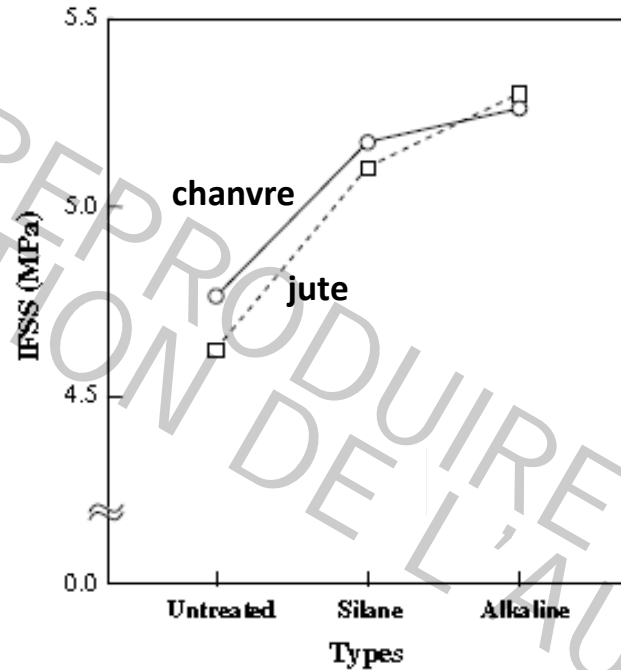
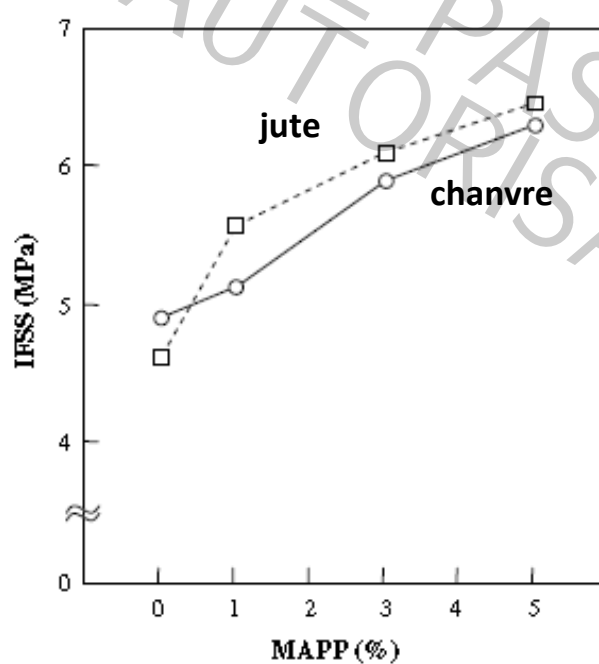


Les essais micromécaniques

De l'utilisation des essais classiques...

Test de pull-out versus test macromécanique

Park et al. , Composites Science and Technology, 66, 2686, 2006

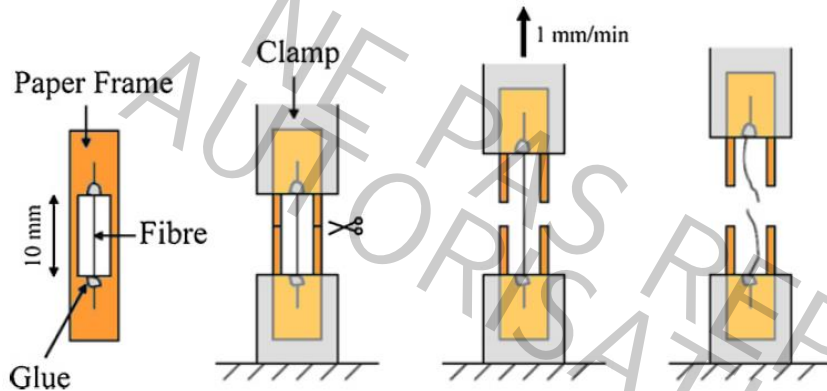


		Contrainte (MPa)	Module (GPa)
Chanvre	Non traité	2140 (504)	143,2 (26,7)
	Silane	2251 (627)	195 (57,4)
Jute	Non traité	1316 (457)	91,9 (27,8)
	Silane	1461 (395)	113,6 (29,3)

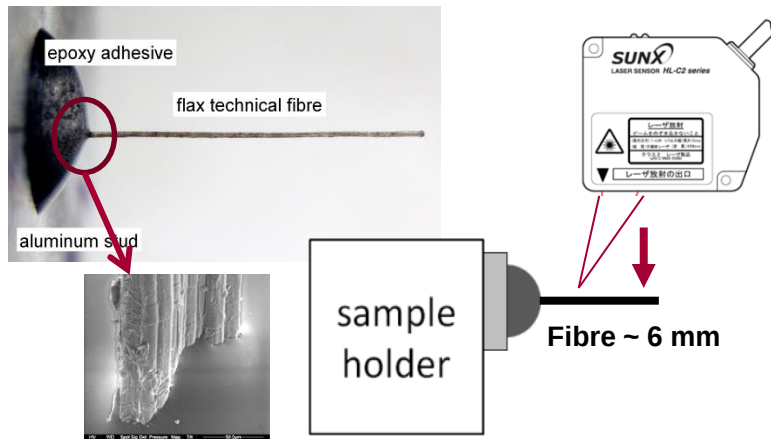
Bonne corrélation avec les tests macromécaniques

Les essais micromécaniques

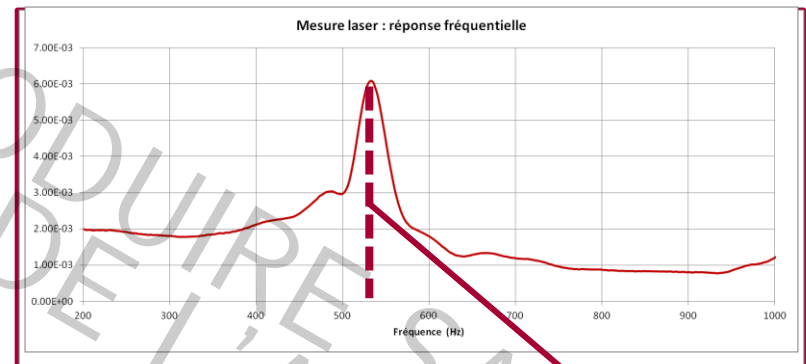
... à des développements expérimentaux nouveaux



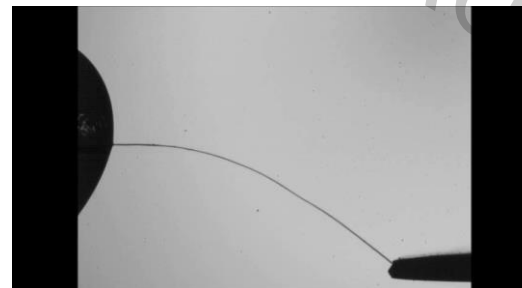
Analyse modale sur fibres naturelles



- **Difficultés techniques de mise en place :**
facteur de forme des fibres, sensibilité des capteurs, fixation des fibres, essai destructif



Fibre de lin, vitesse réelle : X 125



$$E = f^{\circ}(\mu, L, d, f)$$

μ densité
 L longueur
 d diamètre

Les essais micromécaniques

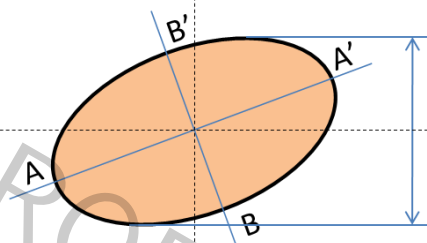
... à des développements expérimentaux nouveaux

Analyse modale sur fibres naturelles

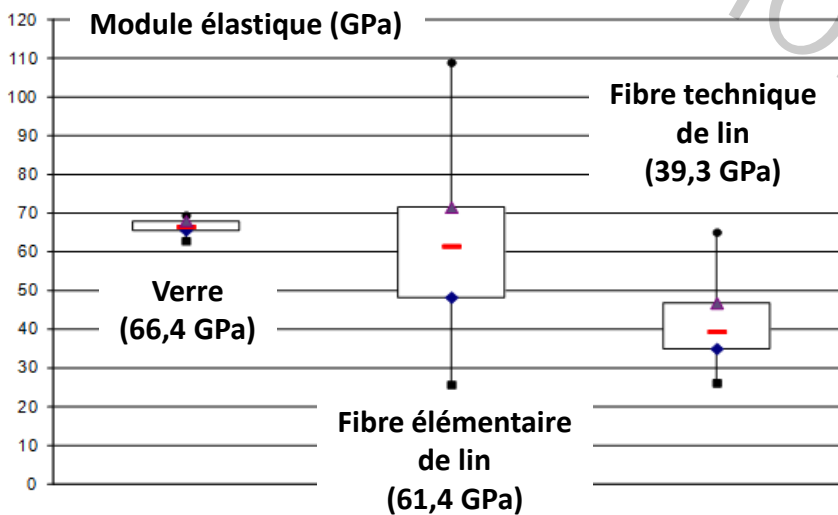
Verrou : mesure de la longueur et du diamètre des fibres naturelles



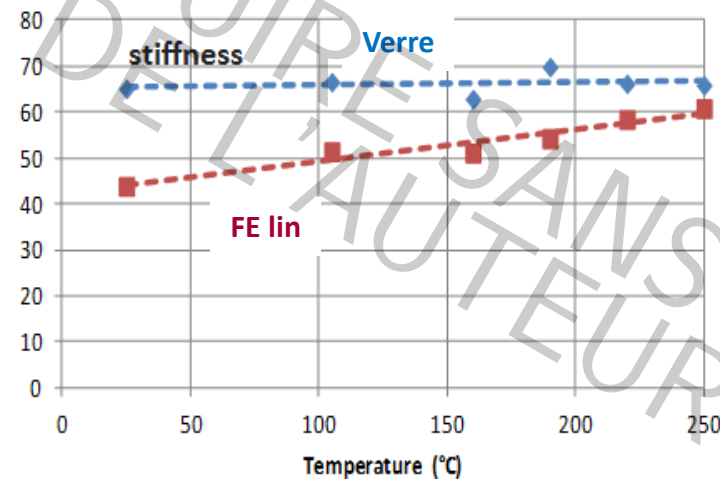
5 mesures le long de la fibre



Moyenne sur 75 mesures (25 mesures sous 3 angles d'observation)



Effet d'un traitement thermique des fibres



d ↓
E ↑

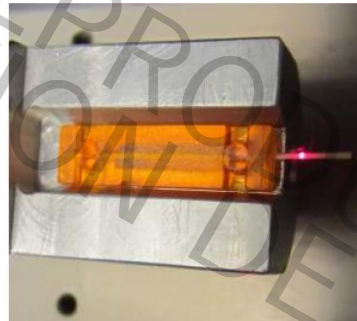
Les essais micromécaniques

... à des développements expérimentaux nouveaux

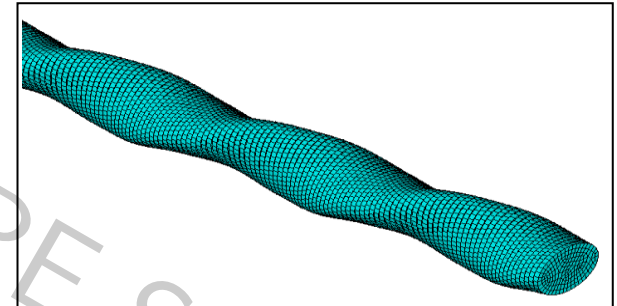
- Mesures dimensionnelles : consommatrices de temps
- Modèle géométrique : nécessite des améliorations



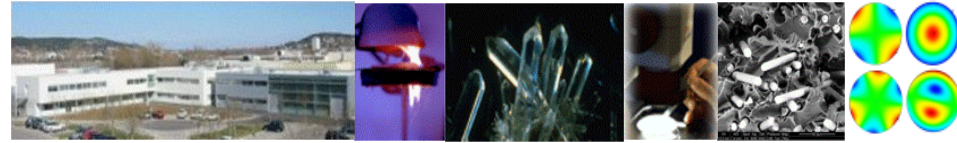
FDAS770 – Fibre Dimensional Analysis System



**Numérisation
+ Modèle 3D par éléments finis**



Application à l'évaluation des traitements de surface de fibres naturelles



3- Les méthodes de caractérisation de la surface des fibres naturelles et de l'interface fibre naturelle/matrice

3.1- Méthodes d'observation

3.2- Essais micromécaniques

3.3- Tests macromécaniques

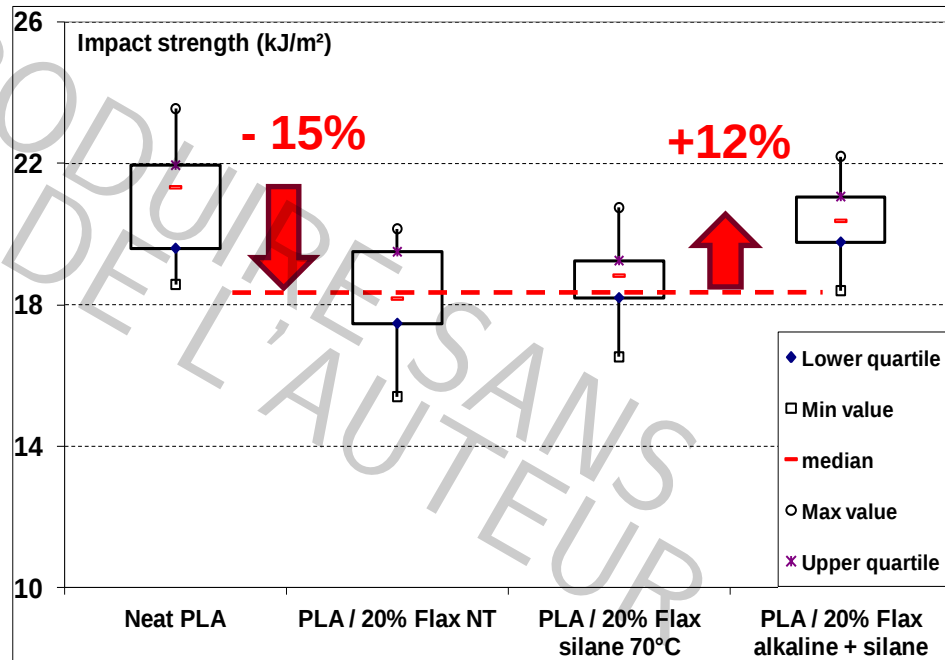
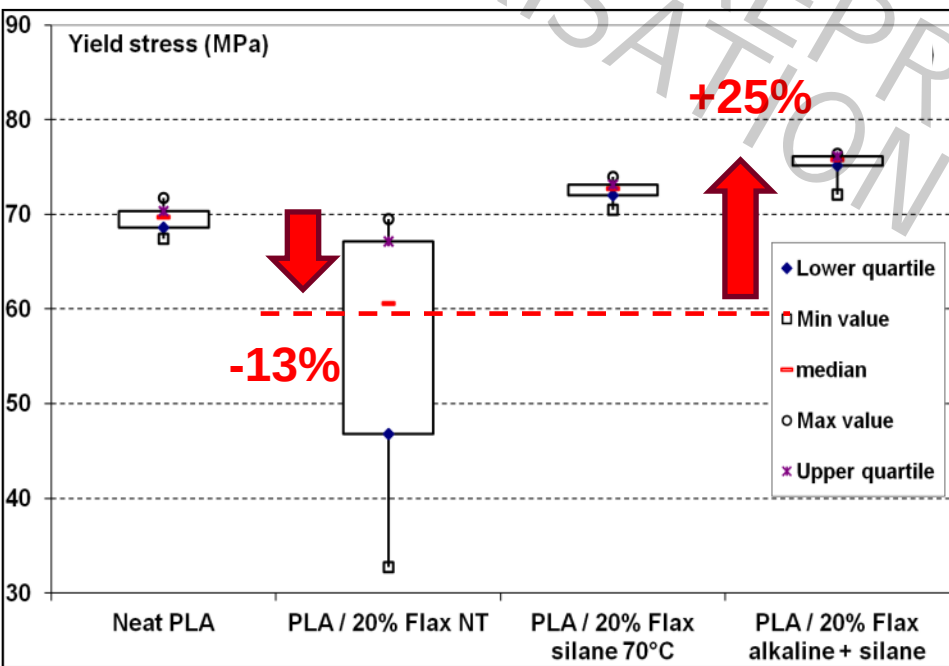
3.4- Analyses physicochimiques

Les tests macromécaniques

Essais mécaniques statiques

■ Tests les plus couramment utilisés pour statuer de l'efficacité d'un traitement de surface

- Effets variables sur les propriétés en contrainte et en choc selon les traitements
- Diminution de l'écart type sur les propriétés
- Prise en compte du facteur de forme après mise en œuvre

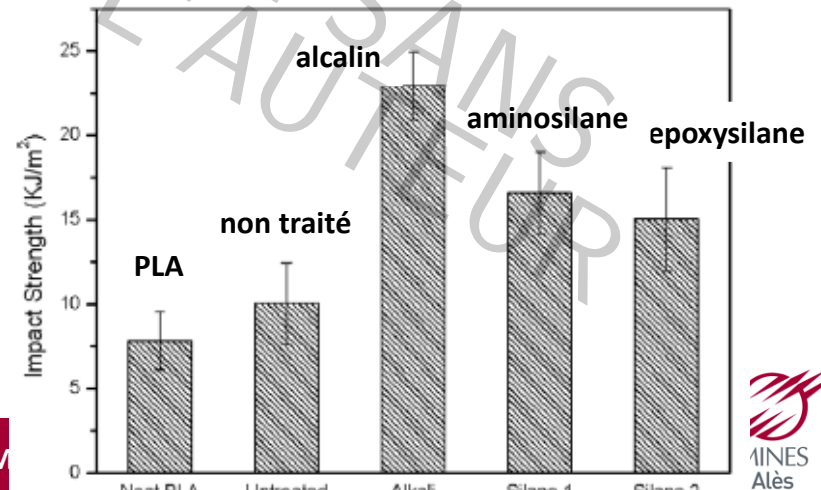
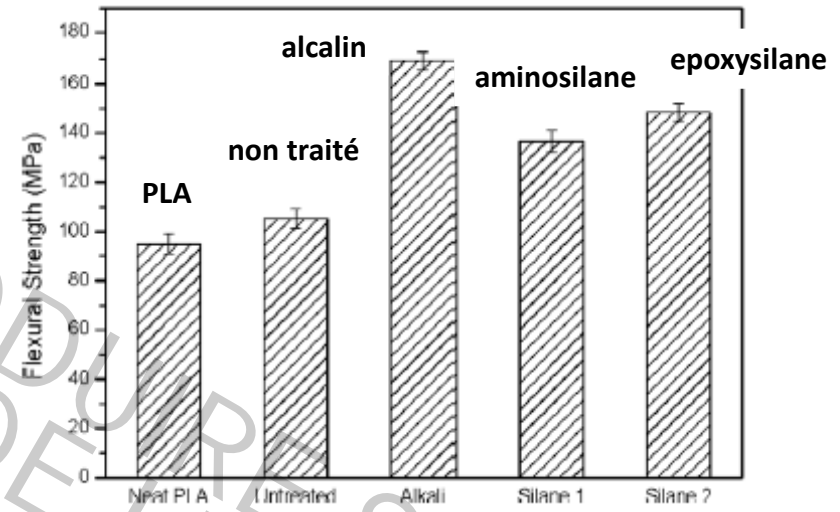
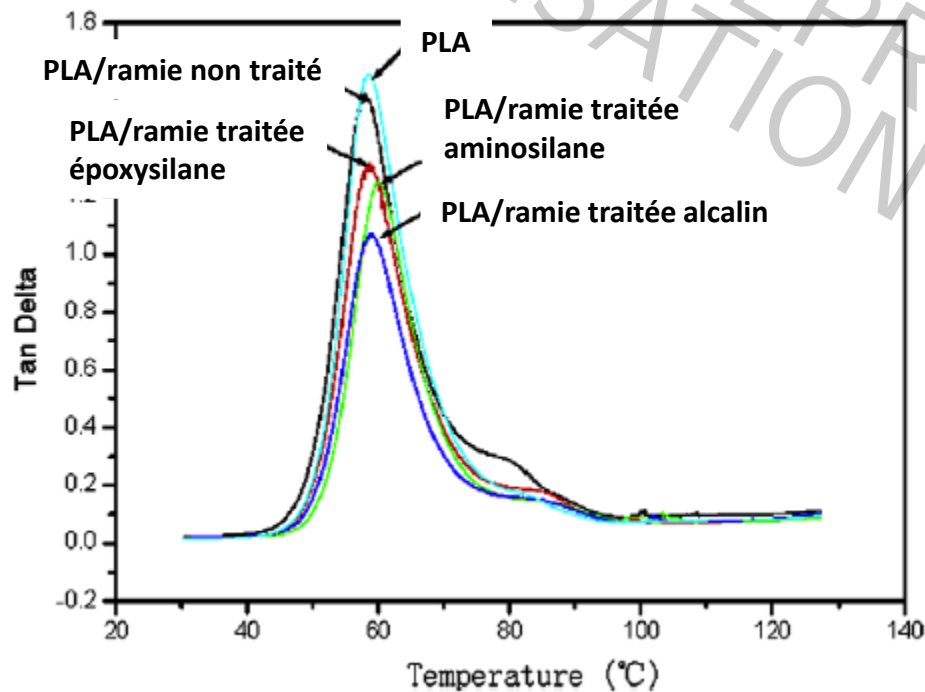


Les tests macromécaniques

Essais mécaniques dynamiques

■ Découplage des composantes visqueuses et élastiques

- **Diminution du facteur d'amortissement** en présence de traitement de surface
- **Corrélation avec les tests statiques**

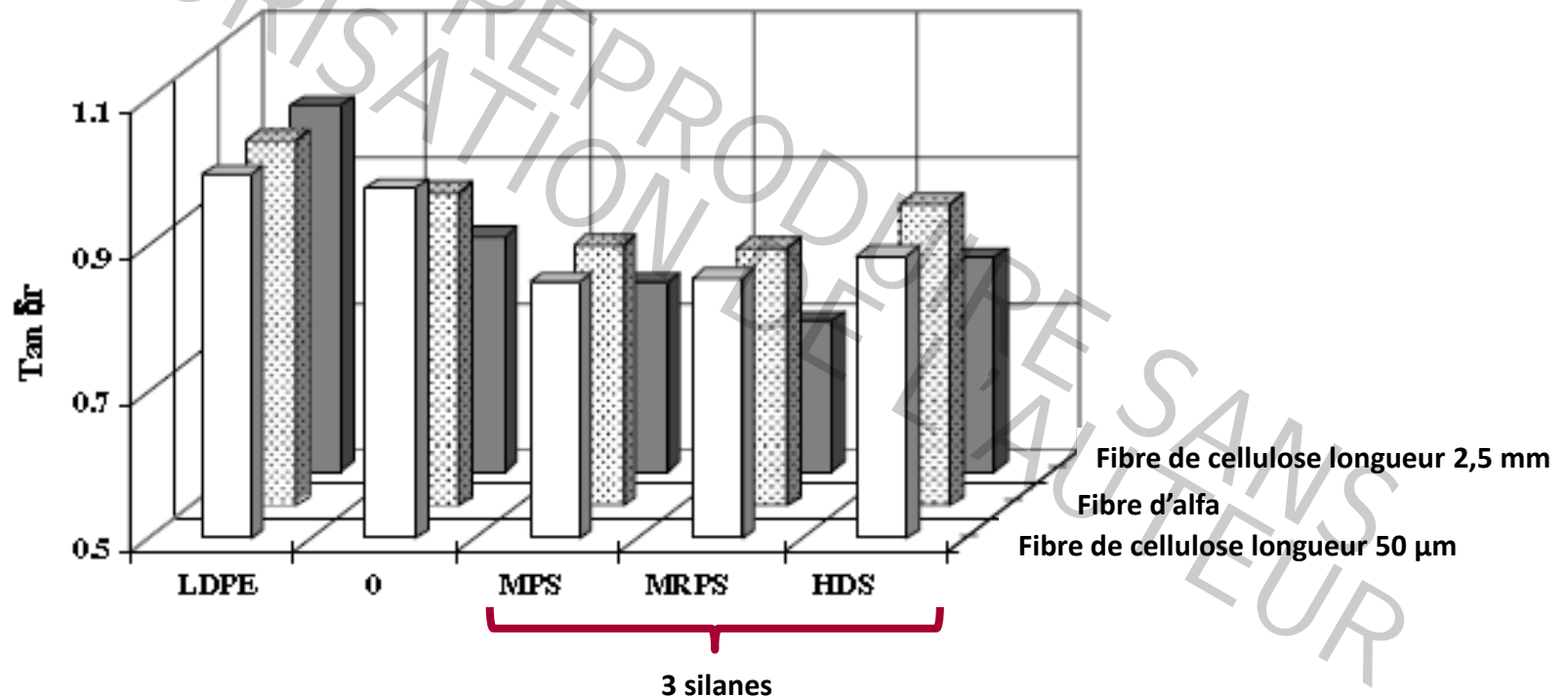


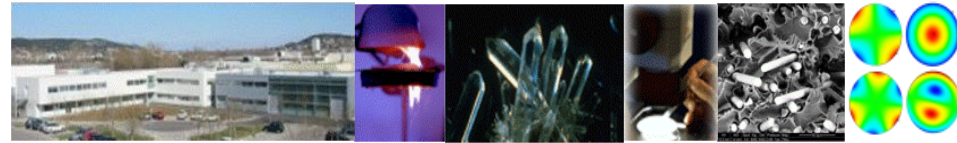
Les tests macromécaniques

Essais mécaniques dynamiques

■ Découplage des composantes visqueuses et élastiques

- Effet des traitements de surface **plus ou moins marqué selon le type de fibre**





3- Les méthodes de caractérisation de la surface des fibres naturelles et de l'interface fibre naturelle/matrice

3.1- Méthodes d'observation

3.2- Essais micromécaniques

3.3- Tests macromécaniques

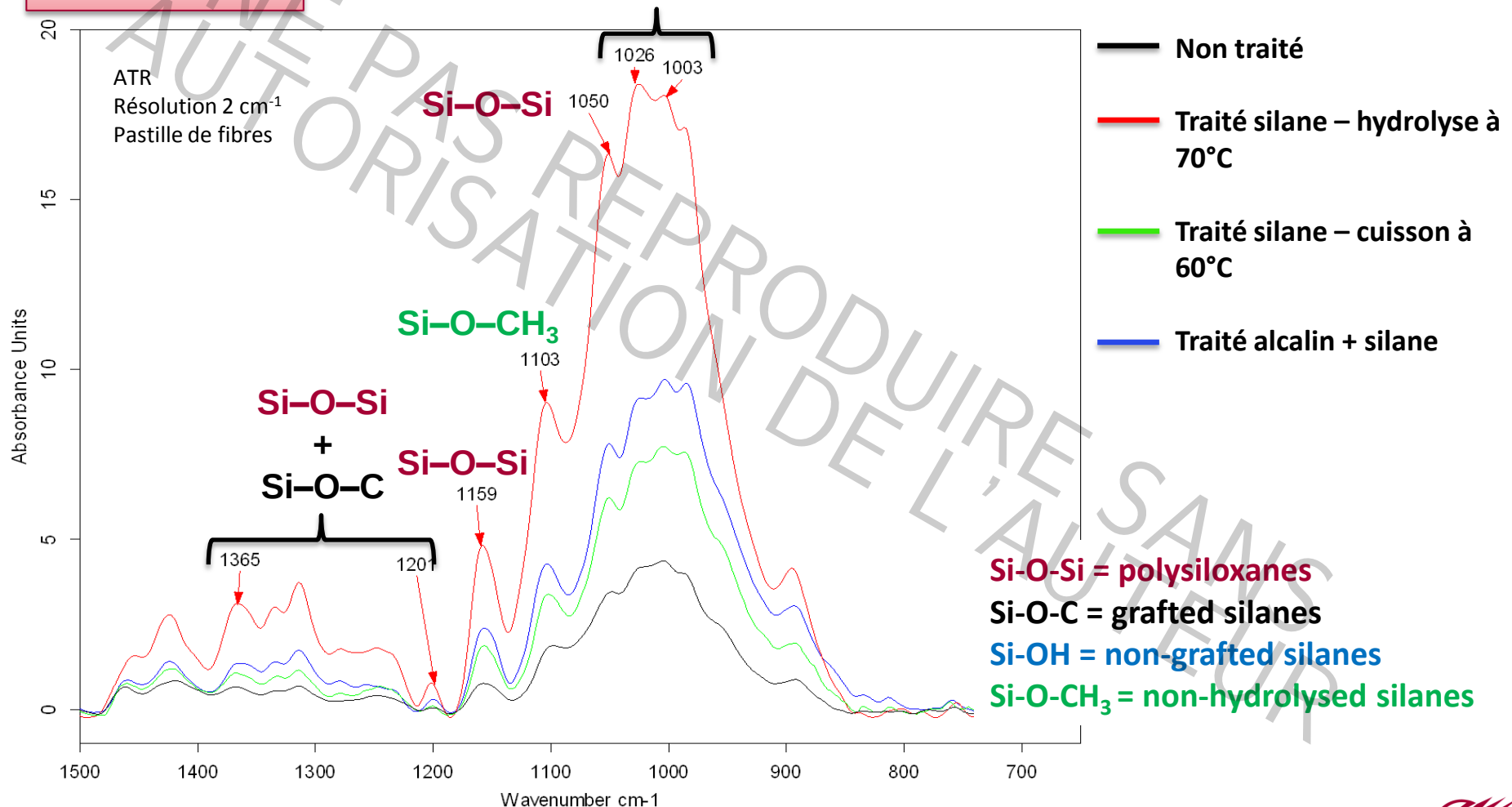
3.4- Analyses physicochimiques

Les analyses physicochimiques

Les techniques spectroscopiques

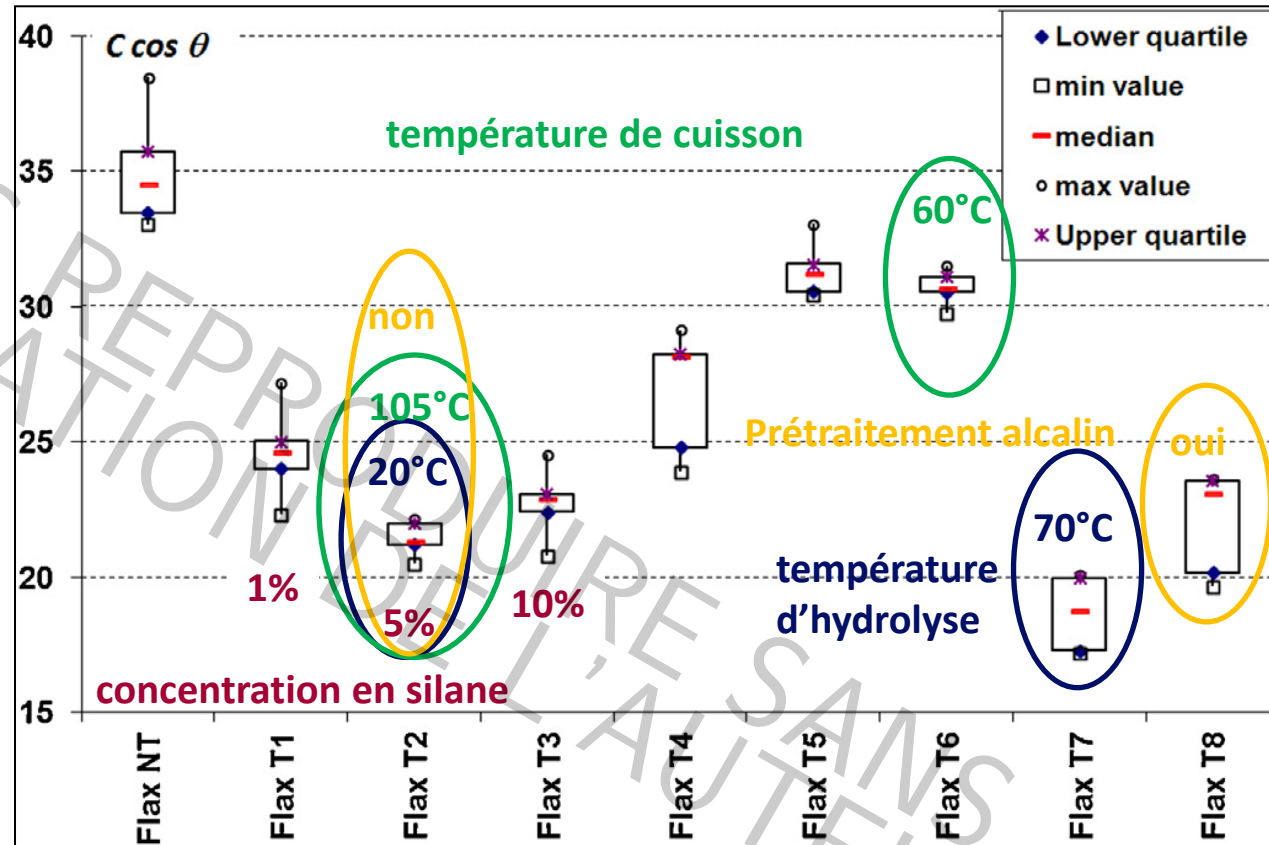
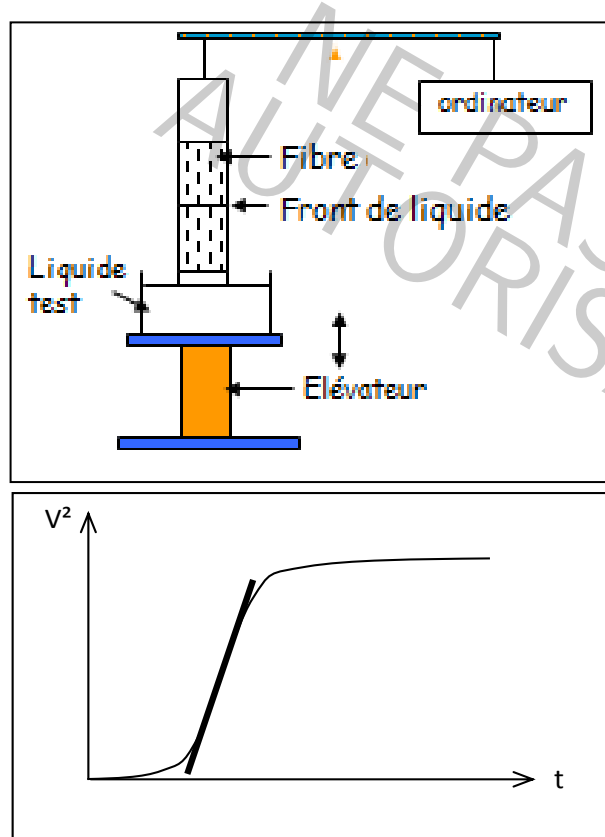
Technique IRTF

Le Moigne et al., Industrial Crops and Products 52, 481, 2014



Les analyses physicochimiques

Les propriétés de surface



$$t = V^2 \frac{\eta}{C \gamma \cos \theta}$$

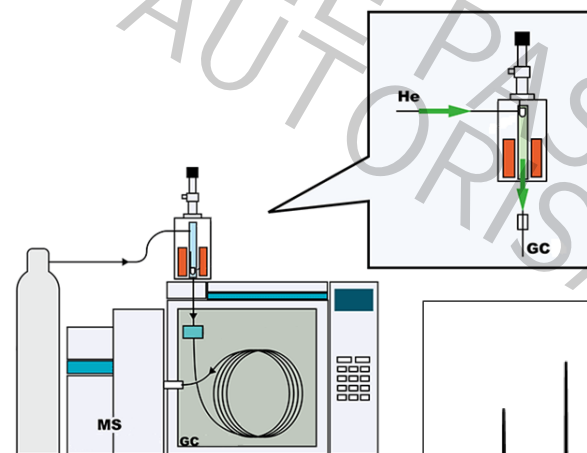
η viscosité du liquide
 γ tension superficielle du liquide
 C caractéristique constante du solide
 V volume de liquide dans la colonne

Le Moigne et al., Industrial Crops and Products, 52, 481, 2014

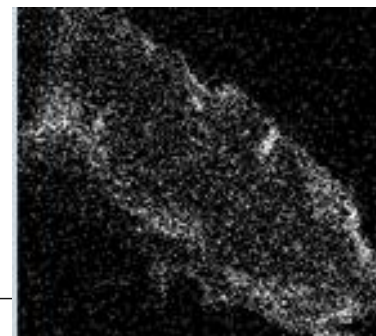
Les analyses physicochimiques

Les propriétés thermiques

Pyrolyse couplée GC/MS

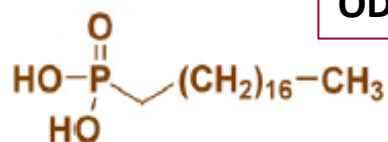


Cartographie EDX du phosphore



Ion 56

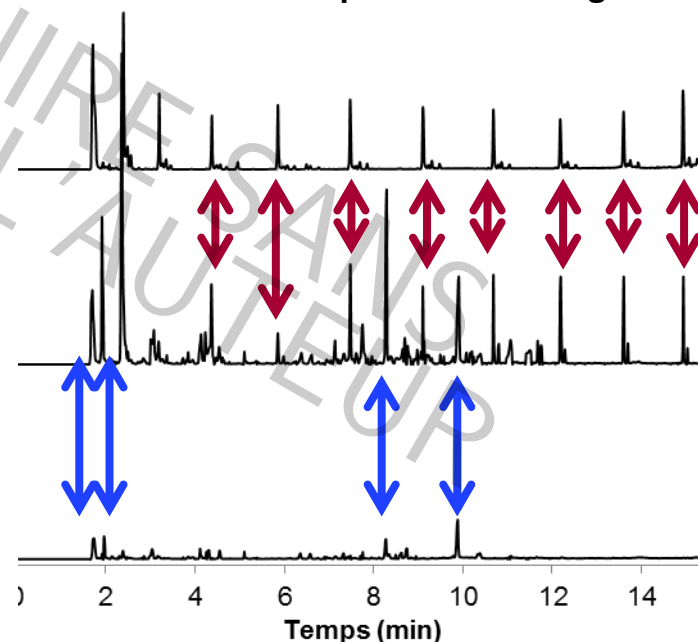
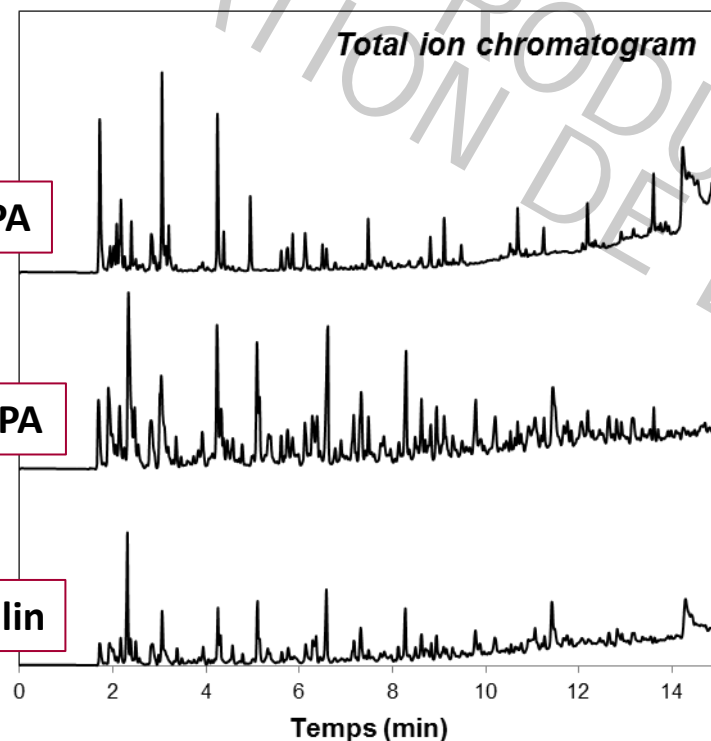
Ion caractéristique de la chaîne grasse

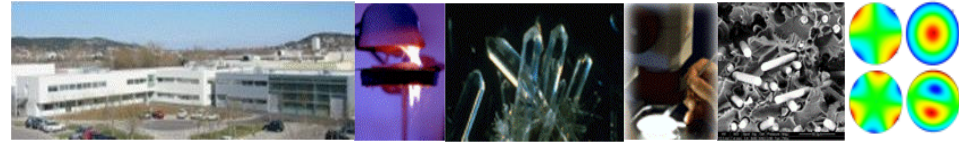


ODPA

Lin greffé ODPA

lin





4- Conclusions

Conclusions

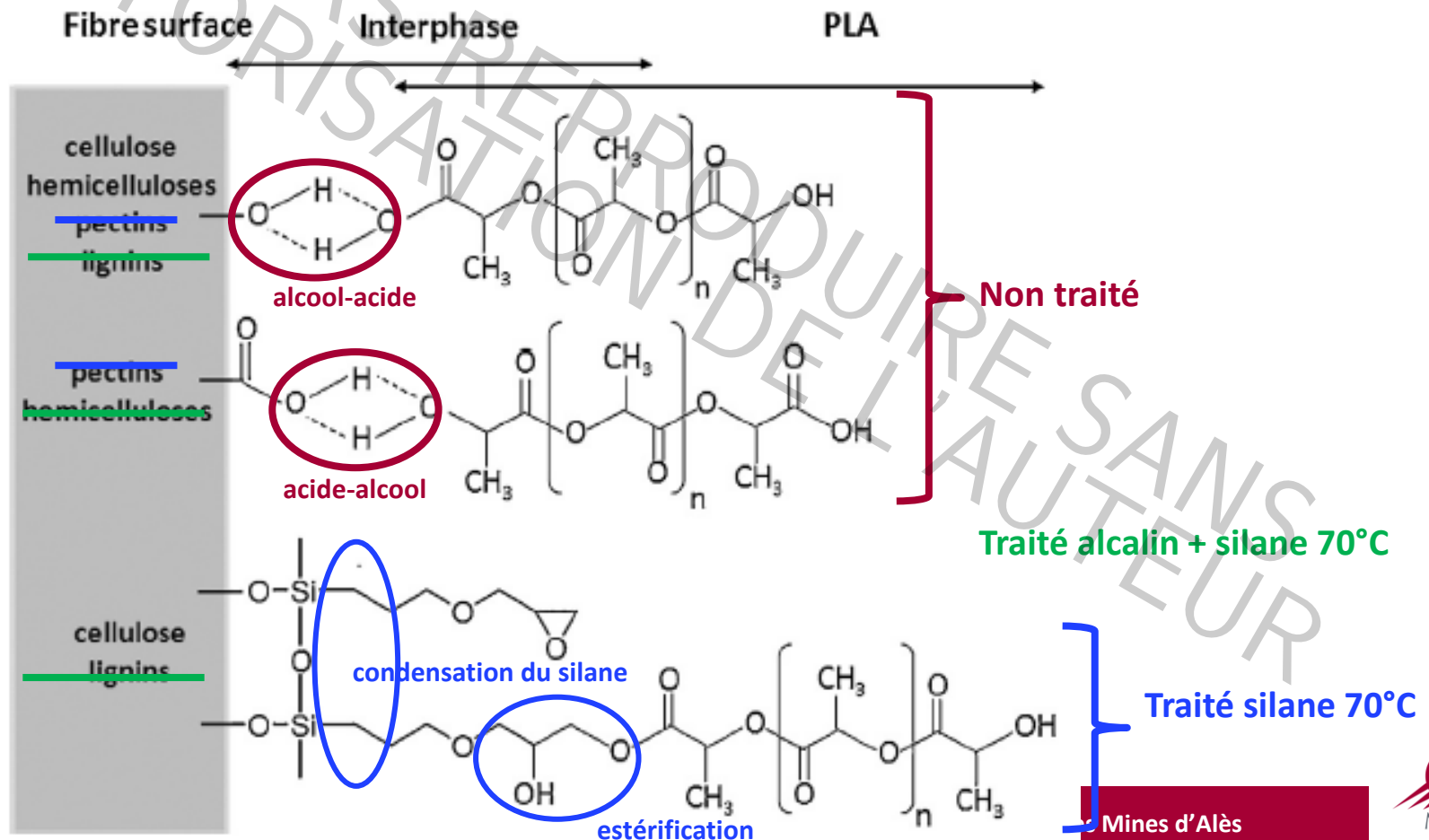
- Une chimie de surface **complexe** en raison des nombreuses **fonctions réactives** (hydroxyle, mais aussi acide, ester, aldéhyde) **de surface**
- Une chimie de surface **évolutive** selon les traitements de surface appliqués
- Des **traitements de surface à optimiser** (choix des molécules, conditions de greffage) **de sorte à assurer à la fois /**
 - une **accroche mécanique**
 - et un **greffage chimique**

Conclusions

Cas d'un composite PLA/lin traité alcalin + époxy-silane à 70°C

- Greffage chimique

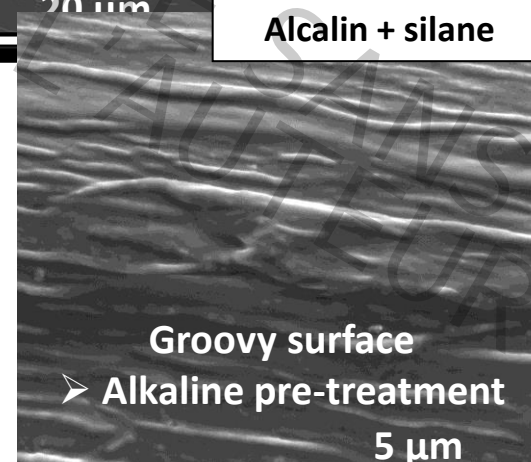
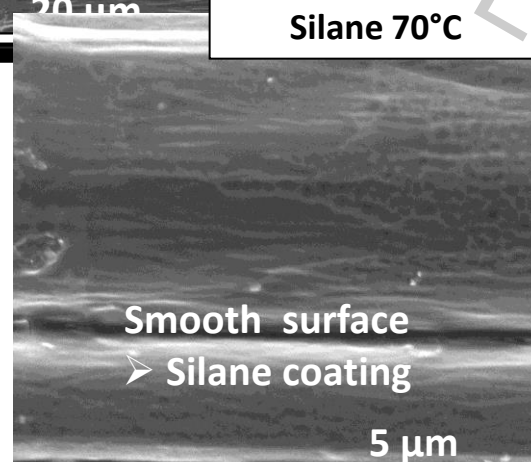
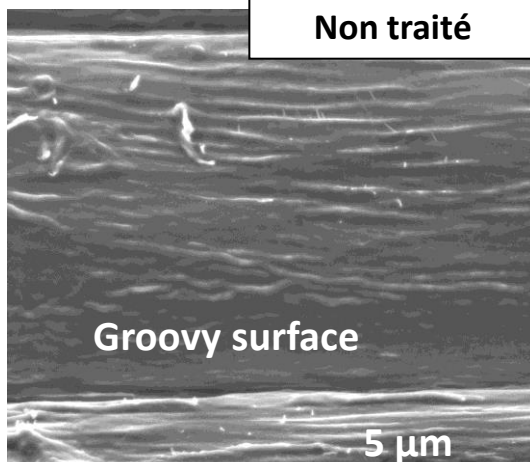
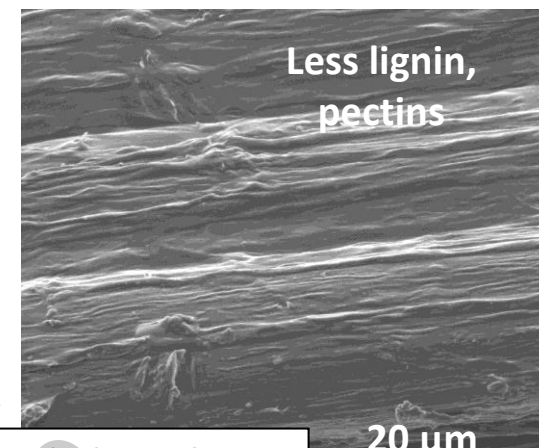
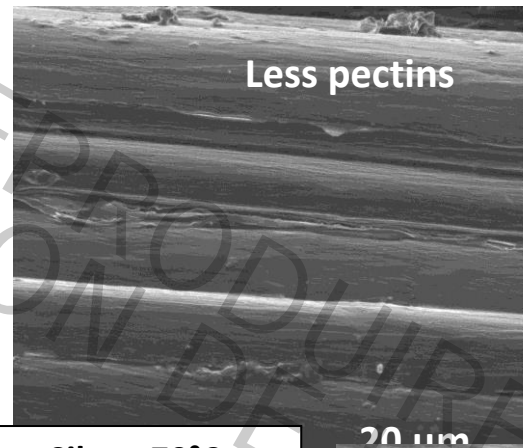
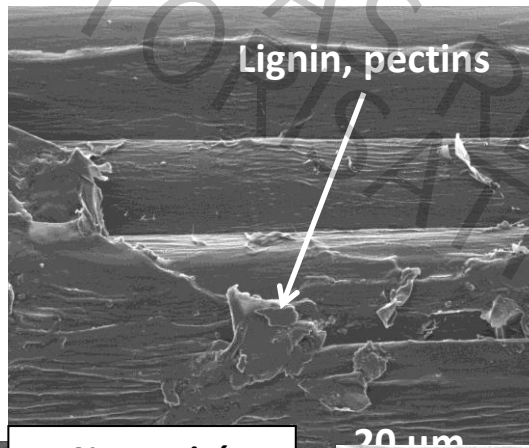
Le Moigne et al., Industrial Crops and Products, 52, 481, 2014



Conclusions

■ Cas d'un composite PLA/lin traité alcalin + époxyxilane à 70°C

- Greffage mécanique

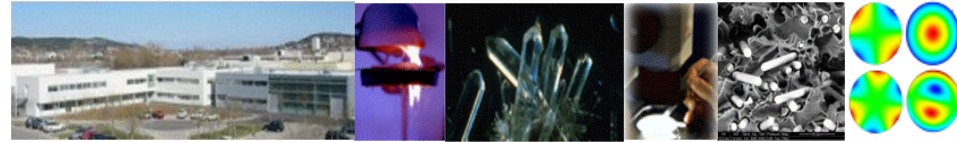


Le Moigne et al.,
Industrial Crops
and Products, 52,
481, 2014

Conclusions

■ Des moyens / méthodologies de caractérisation de l'interface / interphase fibre naturelle / matrice **en plein développement**:

- Tests direct sur fibres naturelles traitées ou indirect sur composites
- Techniques couplées à l'AFM comme la nanoindentation ou la microanalyse thermique
- Tests in-situ : essai mécanique in-situ dans un MEB, essai mécanique dynamique en immersion
- Tests non destructifs : analyse modale
- Prise en compte de la microstructure induite par la mise en œuvre :
 - cristallisation/réticulation induite par les traitements de surface (formation de mésophase)
 - orientation des fibres (micro-tomographie X)



Merci de votre attention !