

# Biochimie de la biomasse destinée à l'éconstruction

**Hélène LENORMAND**

Transformations & Agro-ressources research unit (ULR 7519)  
UniLaSalle Rouen



### 1 ÉCOLE

4 CAMPUS, 3 REGIONS



**BEAUVAIS**

Campus au vert  
Hébergement  
Infrastructures sportives  
Vie associative foisonnante

**2300 étudiants**



**ROUEN**

Cœur de ville  
10mn de la gare  
Rouen, ville étudiante  
Environnement universitaire  
international

**540 étudiants**

40 nationalités



**RENNES**

Intégré au campus Ker Lann  
Une liaison directe avec  
le centre de Rennes  
Au cœur des enjeux du développement  
durable

**530 étudiants**



**AMIENS**

Sur les quais de la Somme  
Proche du centre ville d'Amiens  
Au cœur des enjeux de la transition  
énergétique, numérique,  
écologique

**650 étudiants**

**700 diplômés ingénieurs/an (dont 150 par la voie de l'apprentissage)**

4 CAMPUS • + de 4000 ÉTUDIANTS • 550 SALARIÉS dont 150 ENSEIGNANT-CHERCHEURS

# Unité de recherche

Transformations & Agro-ressources

# Equipe de recherche

Equipe VAM<sup>2</sup>IN : Valorisation des matières végétales non alimentaires en molécules et matériaux innovants.

## De la diversité biochimique et morphologique de co-produits végétaux



Amidon



Anas de lin et chanvre



Rape straw



Miscanthus



Tige de tournesol (co-produit restant au champ) composé de :



Ecorce ( $\rho = 430 \text{ kg.m}^{-3}$ )

Moelle ( $\rho = 35 \text{ kg.m}^{-3}$ )



**Caractérisation MPV (composition biochimique, morphologie, porosité...)**

**Analyses comparées, identifications caractéristiques communes et études de variabilité**

**Définition paramètres contrôle qualité MPV**

**Standardisation méthodologies**

**Modification chimique de biopolymères**

**Co-valorisations végétal - minéral**



Formulation & Compoundage & Mise en forme



## ... aux matériaux biosourcés



Feuille thermoplastique (packaging, calage)



Panneau de particules (ameublement, construction, transport, design)



Mortiers allégés, Eco-matériaux...

**Performances matériaux avec fonctionnalités spécifiques : isolation thermique ou acoustique, allègement, comportement hygroscopique ou mécanique, durabilité, biodégradabilité.**

**comportement au feu...**



ISO 14855 standard

Relation triptyque: structure-propriété-procédé

# Expertise matériaux biosourcés

*Valorisation des co-produits agricoles*

## Labo « mise en forme »



Broyage – tamisage – mélange - extrusion - thermocompression

## Labo « caractérisation »



ATG – DSC – DVS – VanSoest – Vicat – Biodégradation – conductivité thermique – machine de test au feu – enceinte de conditionnement - rhéologie

## Labo **AGRO**<sup>R</sup>TECH

MEB – flexion/compression/traction –DMA - pycnomètre – microtome – impression 3D – découpeuse graveuse

# Expertise matériaux biosourcés

## SEMANTIQUE

La première fonction d'intérêt recherchée dans l'utilisation de ressources agro-sourcées dans les matériaux de construction est l'apport de **porosité**, permettant des avantages **thermiques, hygrothermiques et acoustiques**. De nombreuses ressources agricoles répondent à cette caractéristique. Ce sont, pour la plupart, des **tiges végétales**, mais des **enveloppes de graines** sont aussi intéressantes.

Plusieurs termes sont employés pour identifier la matière végétale :

- « **Granulat** » : terme venant du secteur de la construction, synonyme de « charge » dans un béton. Ce terme a l'inconvénient d'être spécifique au domaine du béton et d'exclure d'autres voies de valorisation de ces ressources telles que les panneaux de particules, le paillage, la litière, l'énergie... ;
- « **Co-produit agricole** » : terme pour identifier une matière secondaire issue d'un procédé de transformation (tel que le défibrage). Ce terme a l'inconvénient d'exclure les ressources qui ne nécessitent pas de transformation ;
- « **Déchet agricole** » : terme pour identifier une matière secondaire laissée au champ. Ce terme a l'inconvénient d'exclure les ressources dédiées à la production de biomasse ;
- « **Fibre** » : souvent connu et utilisé du grand public mais qui, morphologiquement, ne correspond pas aux matières utilisables ;
- « **Agro-ressource** » : terme pour désigner une ressource venant de l'agriculture. Ce terme a l'inconvénient d'exclure d'autres types de ressources telles que la sylviculture ou encore des ressources à croissance spontanée.

=> Le terme de « **particule végétale** » permet d'éviter les contraintes précédentes et d'englober toutes les ressources végétales à potentiel.

# Matériaux biosourcés pour la construction durable

## Exemples de programmes R&D

### Co-valorisation de co-produits de particules végétales et minérales

6 thèses : Zmamou H. (2013-2015), Vincelas T. (2016-2019), Hussain M. (2019-2022), Ndahirwa D. (2019-2022), Diakité M. (2019-2022), Saouti L. (2020-2023),

7 projets R&D collaboratifs : IBIS, CHANVRISOL, ECOTERRA, DIVA, AMBIOS, NG2B, MAILLONS.



Parpaing 95% cendres volantes  
*Thèse Zmamou H.*



Brique de sédiments fluviaux  
*Thèse Hussain M.*



Eco-matériau *Terre-chanvre local*  
*Thèse Vincelas T.*

### Panneaux de particules végétales thermopressées

✓ 5 projets R&D coll. :  
AGEM, PANOVEGE  
SB&WRC, TIGRE,  
MATBIOCOMP



Panneaux de particules



sans liant ... ou ... avec liant biosourcé



# Panorama des particules végétales françaises

Gisement français des principales particules végétales



défilage  
broyage  
tri  
séchage  
dépoussiérage  
conditionnement



# Tiges de lin et chanvre

*Particules végétales à valoriser*

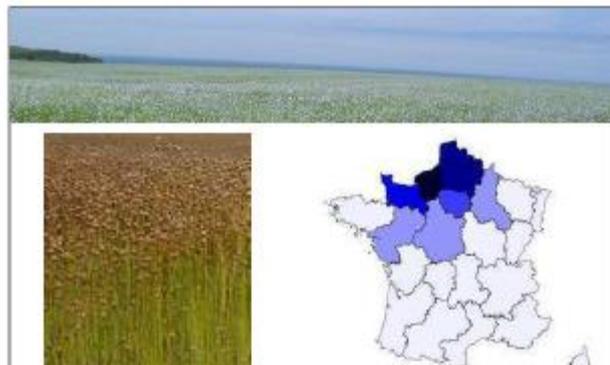
## Culture du chanvre

## Culture du lin textile



données frd  
≈ 11 500 ha

7 T de paille / ha



données frd  
≈ 75 000 ha

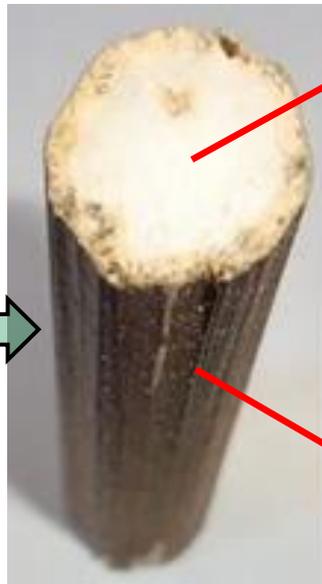
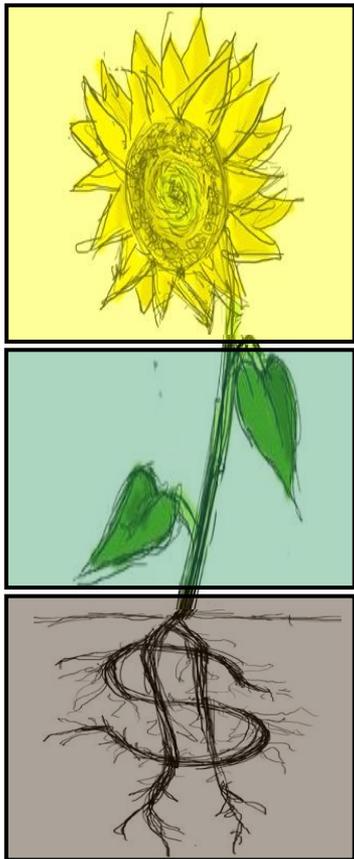
7 T de paille / ha



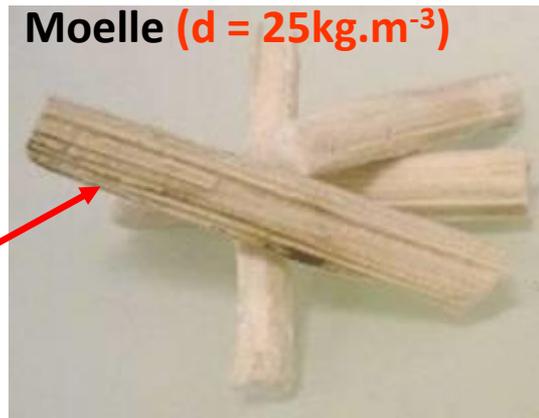
Panneaux de particules  
Mortiers biosourcés

# Tige de tournesol

Particules végétales à valoriser



2 T tige / ha,  
non valorisée



Moelle ( $d = 25\text{kg.m}^{-3}$ )

Faible densité  
Structure alvéolaire



Eorce ( $d = 130\text{kg.m}^{-3}$ )

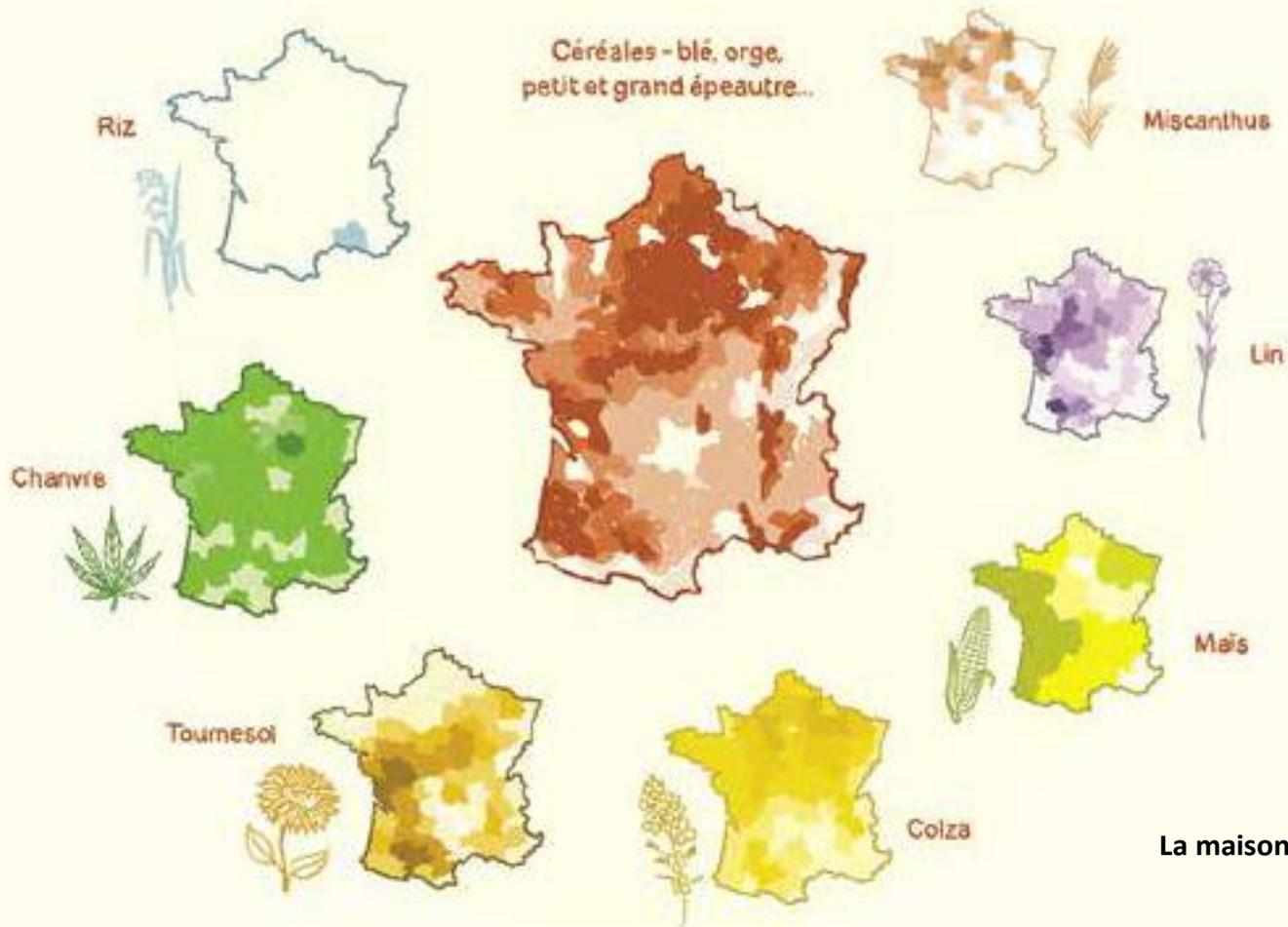


Densité comparable  
anas de lin et chanvre  
Structure poreuse

# Panorama des particules végétales françaises

Gisement français des 10 principales particules végétales

## Cartographie des cultures utilisables en agromatériaux



La maison écologique n°123

# Panorama des cultures utilisables EN AGROMATÉRIAUX

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	Récolte	Superficie (en ha)	Filière	Parties utilisées	Rendements (t/ha)	Principales caractéristiques	Utilisation actuelle
Chanvre														17 000	1 400 exploitations /5 chanvrières	Fibres	3	• Densité (p) : 25 à 60 kg/m <sup>3</sup> • Résistance thermique R pour 20 cm : 5 m <sup>2</sup> .K/W • Conductivité thermique (λ) : 0,039 à 0,042 W/m.K	Panneaux, vrac
																Chêne- vette	3	• λ : 0,048 W/m.K	Bétons de chanvre et vrac
Lin (textile)														106 140	7 100 exploitations + 26 teillages	Fibres	3	• λ : 0,065 W/m.K • p : 100 kg/m <sup>3</sup>	Panneaux, vrac
																Anas	3		Vrac
Lin (oléagineux)														26 300	2 400 exploitations + 2 unités de défibrage	Tiges broyées	0,4	• N.C.	Vrac
Tournesol														552 600	37 000 exploitations	Moelle	1	• λ : 0,050-0,055 W/m.K <sup>(1)</sup> • p : 25-30 kg/m <sup>3</sup>	Vrac, pan- neau, béton
																Écorce	0,5-1	• λ : 0,080 W/m.K • p : 110-130 kg/m <sup>3</sup>	Panneau, béton
Colza														1 615 000	74 000 exploitations + 1 groupement de coopératives actif	Tiges broyées	2	• Pas de séparation entre moelle et écorce. • Parasité 90%. • λ : 0,065 W/m.K <sup>(1)</sup> • p : 60-75 kg/m <sup>3</sup>	Vrac, béton
Maïs														1 423 000	47 000 exploitations	Tiges br.	0,7	Similaires au tournesol	Vrac, béton
Céréales (blé, orge, avoine, seigle)														7 410 800	N.C.	Tiges broyées	0,7	• λ : 0,052 à 0,080 W/m.K • p : 80 à 150 kg/m <sup>3</sup> • R (37 cm) : 7,1 m <sup>2</sup> .K/W	Botte ou vrac
Petit épeautre (IGP Haute Provence)														400	75 exploitations, 1 décortiqueur, des ateliers de conditionnement	Bales	1-1,5	• λ : 0,054 W/m.K (pour Archibale Isolation) • p : 140 à 180 kg/m <sup>3</sup> • R (33 cm) : 6 m <sup>2</sup> .K/W	Vrac
Miscanthus														5400	1200 exploitations, une dizaine d'ateliers de conditionnement	Tiges broyées	14	• λ : 0,075 W/m.K <sup>(1)</sup> • p : 100 à 110 kg/m <sup>3</sup>	Vrac, béton
Roseaux														54 000 <sup>(2)</sup>	Parcs naturels régionaux	Tiges br.	NC	Régulation hygrométrique, bon déphasage (12 à 15 h), λ : 0,048 W/m.k	Vrac
Riz de Camargue (IGP)														17 000	Environ 200 produc- teurs, 27 stockeurs et conditionneurs	Tiges br.	1 à 5	• λ : 0,051 W/m.K • p : 130 à 145 kg/m <sup>3</sup> • R (31 cm) : 6 m <sup>2</sup> .K/W	Vrac
																Bales	1		Vrac

Source : Panorama des marchés « Fibres végétales techniques en matériaux hors bois » - Mémento 2020; article Construction 21 de Hélène Lenormand « Des particules végétales en abondance et renouvelables ! », 2020

1. Valeurs expérimentales, laboratoire UniLaSalle (Rouen)

2. Le Bartz C., Michas M., Fouque C. Les Roselières en France métropolitaine premier inventaire (1998-2008), 2009

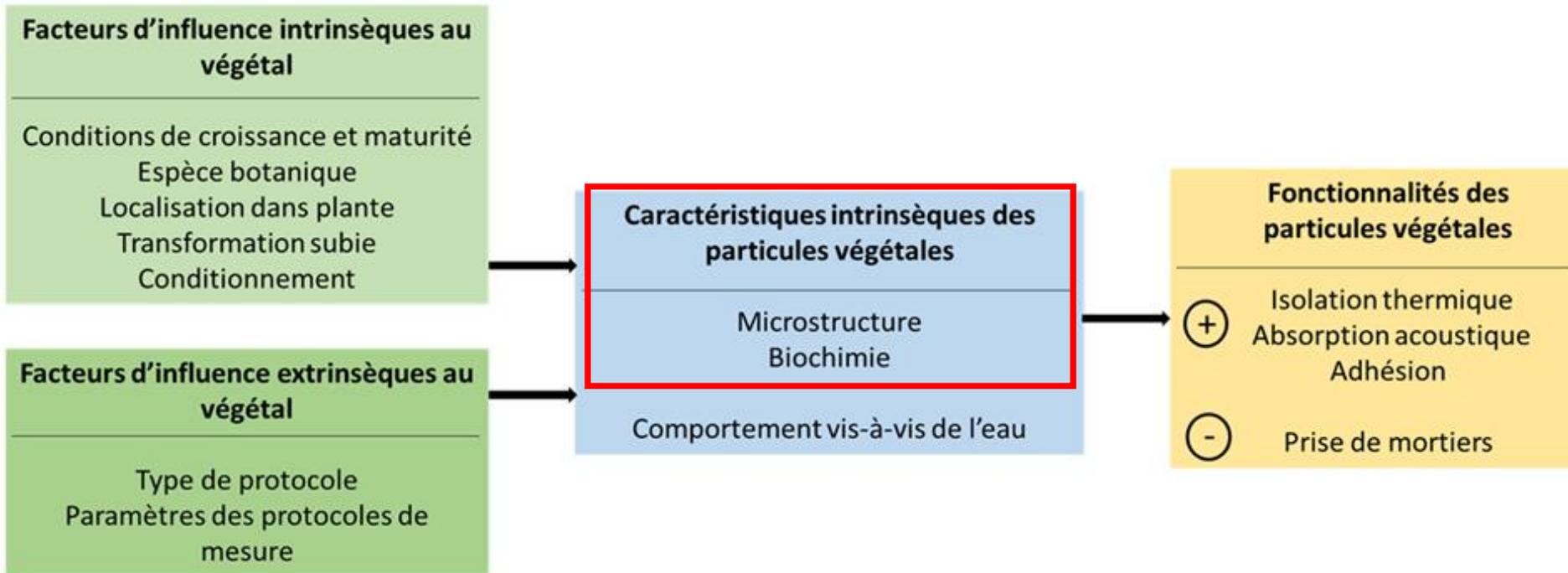
**Estimation à  
+ de 15 millions de tonnes / an**

Lenormand H., Leblanc N., 2020a

La maison écologique n°123

# Panorama des particules végétales françaises

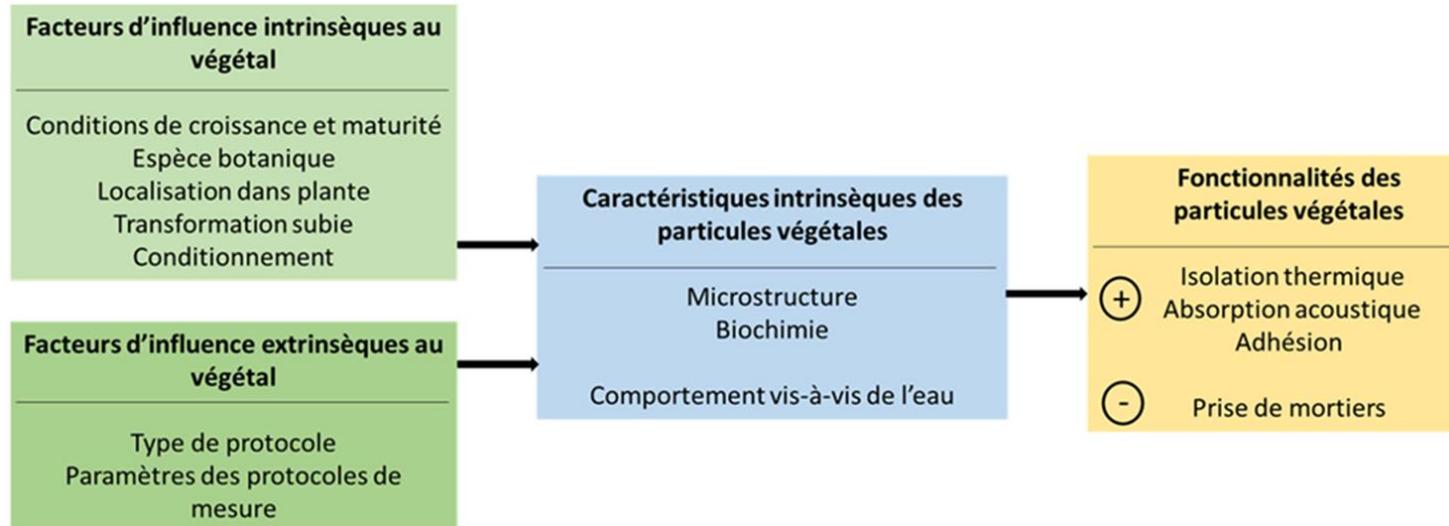
## Caractéristiques des particules végétales



Lenormand H., Leblanc N., 2020a

# Panorama des particules végétales françaises

## Caractéristiques des particules végétales



### Microstructure des particules végétales

1/ Granulométrie, taux de fibres, fibrilles, graines

2/ Porosité

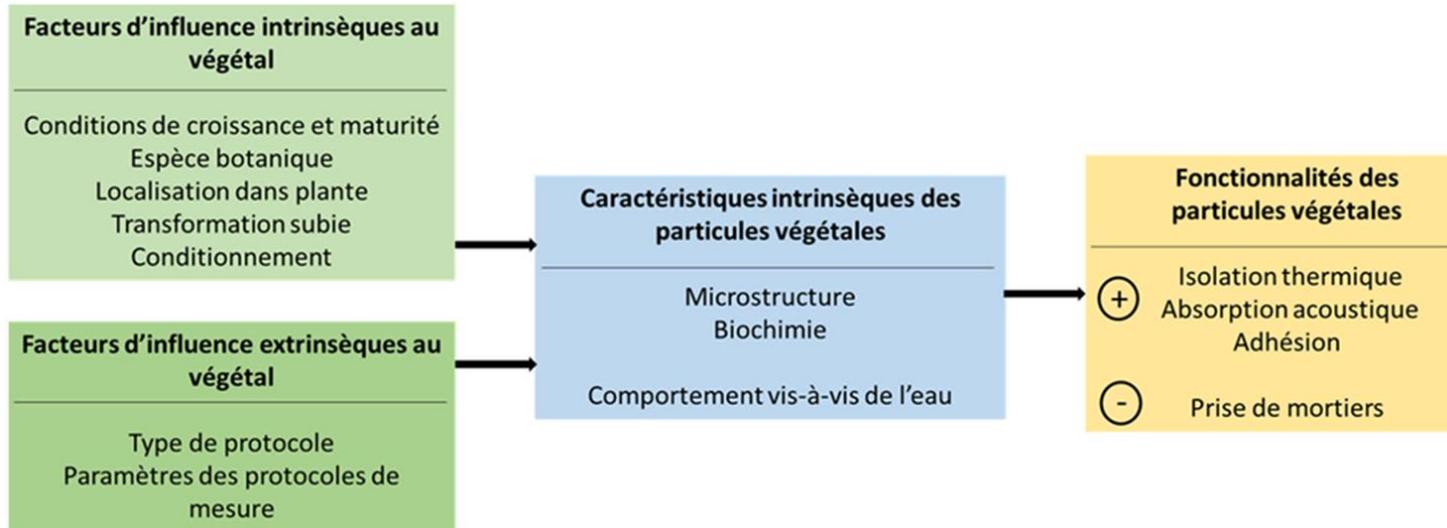
a/ Densité apparente du vrac

b/ Densité particulaire/densité squelettique

3/ Morphologies/structures

# Panorama des particules végétales françaises

## Caractéristiques des particules végétales

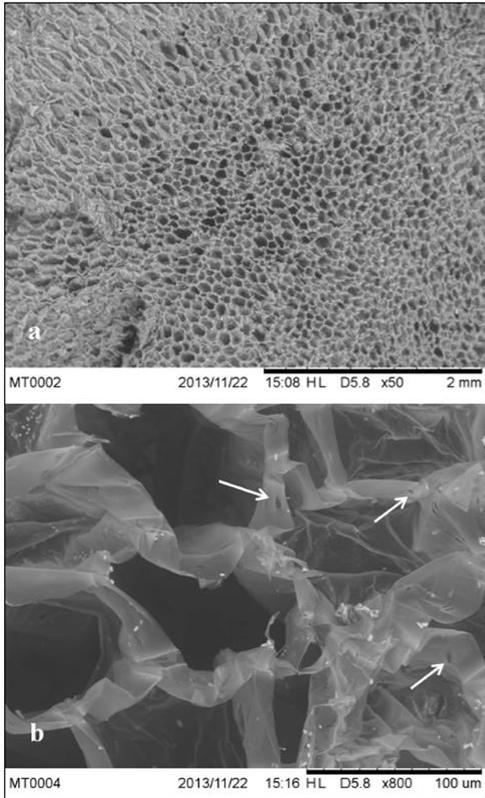


## Biochimie

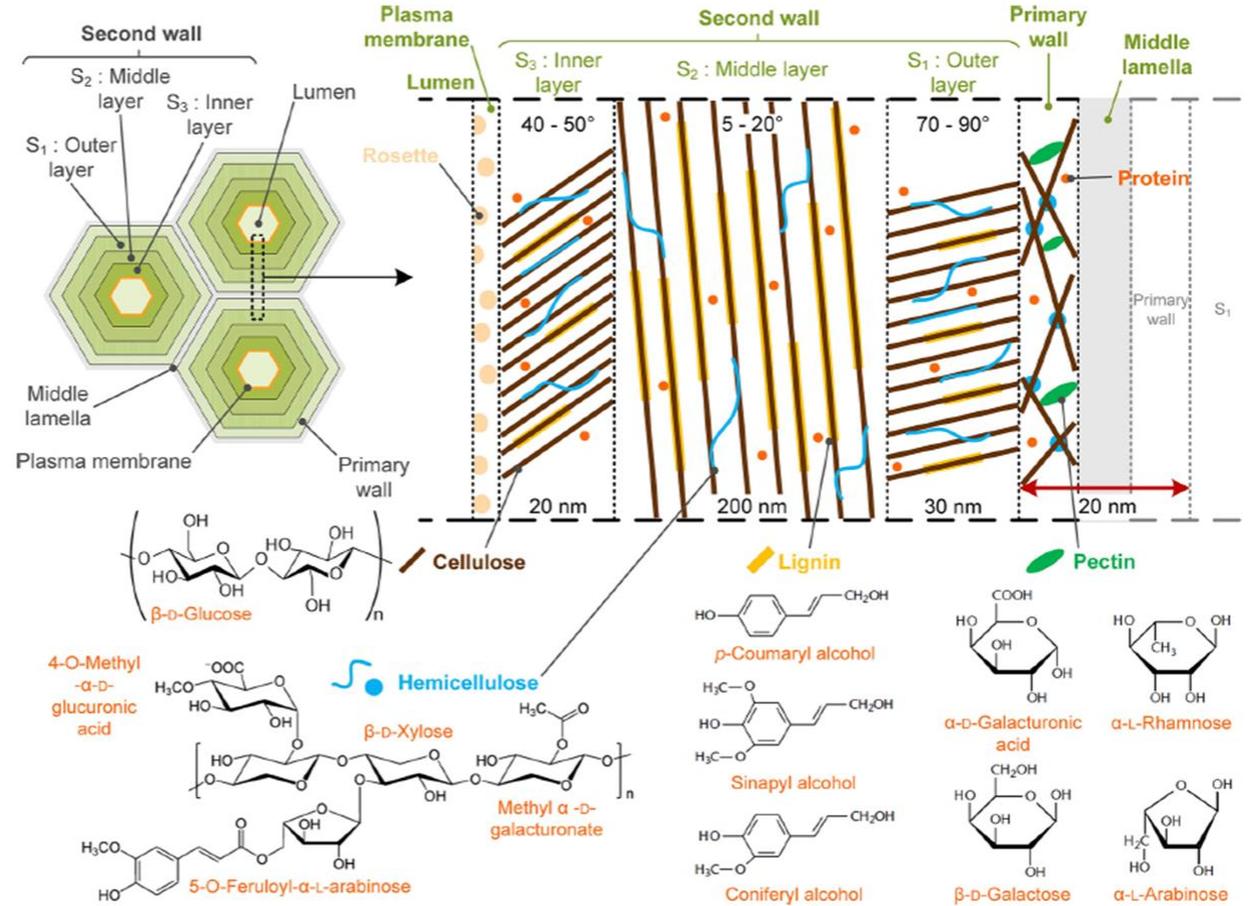
1/ des particules végétales

2/ des lixiviats

# Biochimie des particules végétales



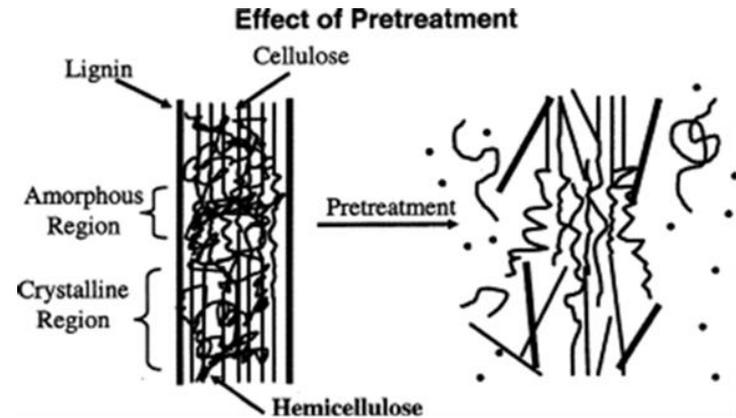
Lenormand et al. 2017



Viel et al. 2018

## Complexité des interactions des différentes molécules chimiques dans la paroi végétale

**Pré-traitement** de la matière pour déstructurer



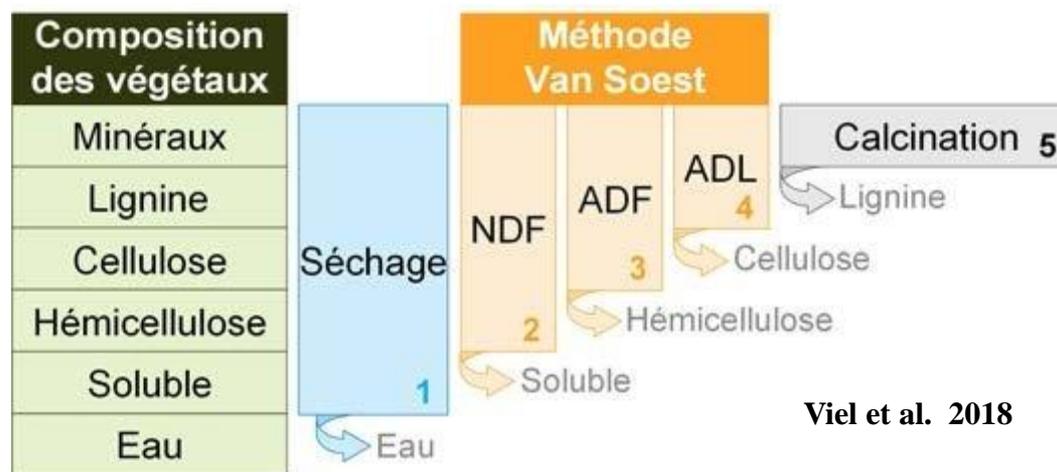
Analyse de la composition par des techniques aux approches :

- **Chimiques** :
  - procédés d'analyses globales (Van Soest, HPEAC-PAD, Prosky, Uppsala...)
  - ou d'extractions séquentielles (spécifiques) suivies analyses chimiques (HPEAC-PAD, RMN, IR, spectro), qui permettent une quantification globale des constituants pariétaux.
- **Morphologiques** : microscopie pouvant valider et visualiser la composition chimique ou le comportement physique
  - microscopie/coloration
- **Physiques** : dégradation thermique, comportement vis-à-vis de l'eau ... apportant des informations supplémentaires relatives à la composition chimique.
  - ATG/DVS....

## méthode Van Soest :

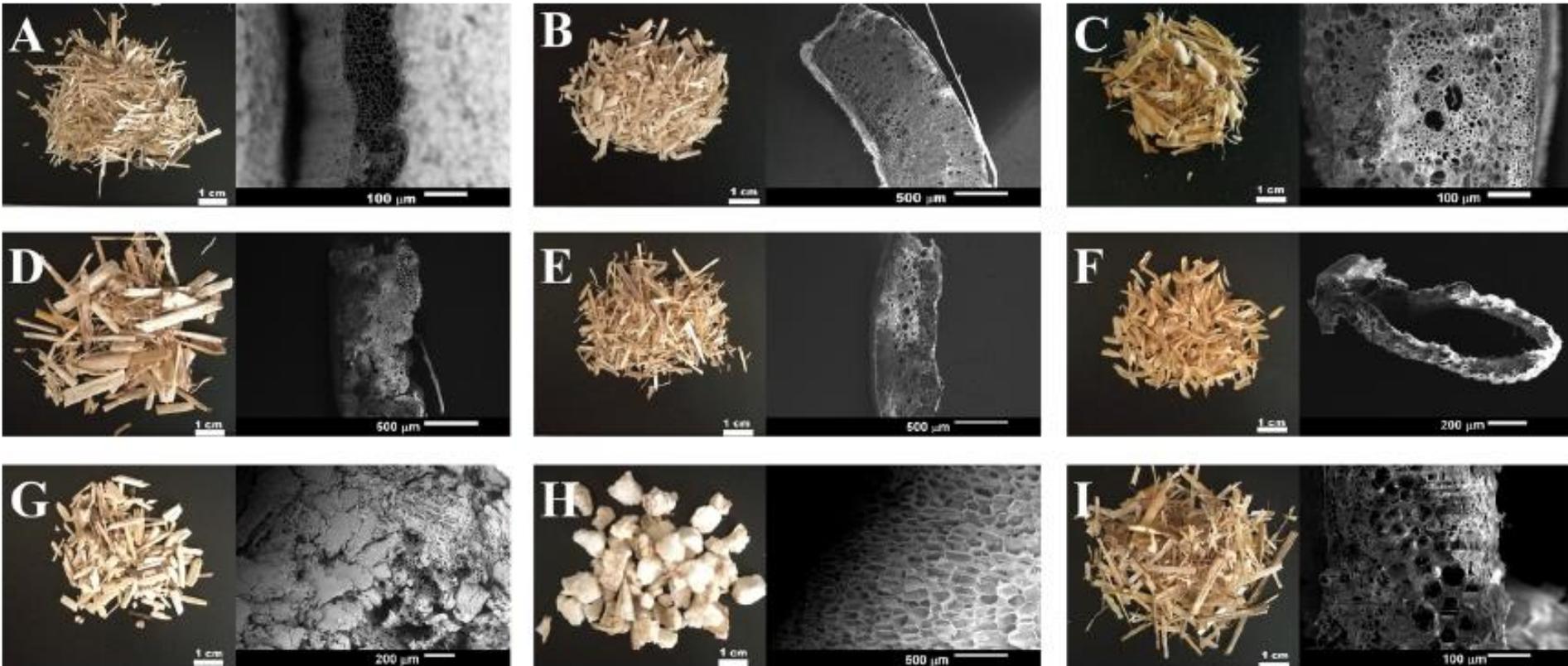
Godin et al. 2011

- la plus connue et utilisée
- meilleur compromis entre qualité de l'information et temps d'analyse.
- méthode gravimétrique (destructive) visant à quantifier les quatre grandes familles de molécules de la paroi végétale (cellulose, hémicellulose, composés solubles et lignine).
- Le principe de cette méthode repose sur le fractionnement biochimique et progressif de la biomasse lignocellulosique à l'aide de solvants, suivi d'une quantification par analyse gravimétrique.



Viel et al. 2018

## Microscopie Electronique à Balayage



Images MEB de particules végétales d'anas de lin (A), chènevotte (B), écorce de maïs (C), miscanthus (D), roseau (E), balle de riz (F), écorce de tournesol (G), moelle de tournesol (H) et paille de blé (I)

Lenormand et al. 2020; Arufe et al. 2021

**Table 1**  
Chemical composition of different studied plant particles.

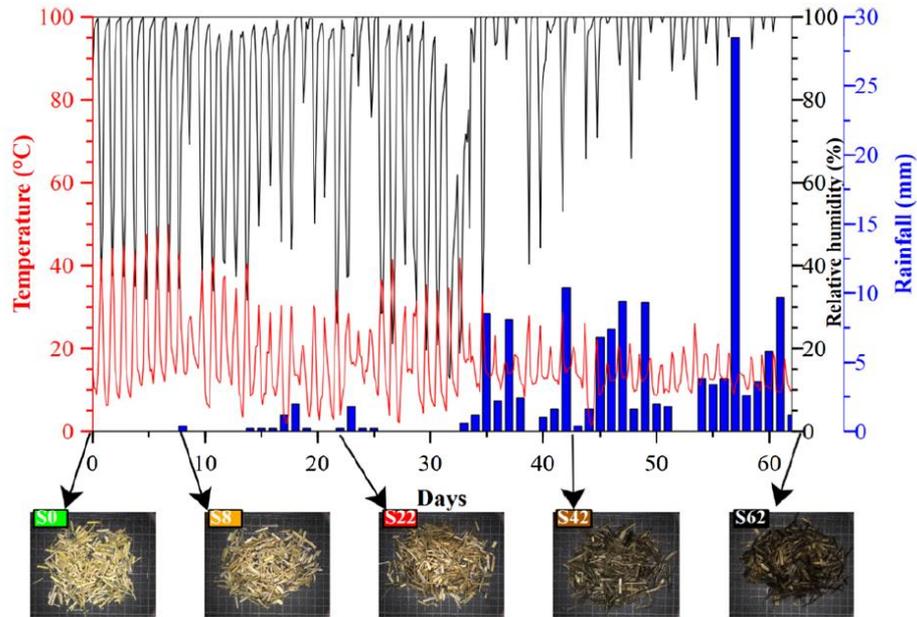
Sample	Soluble (% d. b.)	Hemicellulose (% d.b.)	Cellulose (% d.b.)	Lignin (% d. b.)	Ash (% d. b.)	X <sub>initial</sub> (% d. b.)
Flax Shiv	9.1 ± 1.9	17.6 ± 2.4	43.5 ± 4.7	27.1 ± 4.5	2.7 ± 0.9	4.7 ± 0.7
Hemp Shiv	17.2 ± 1.1	21.6 ± 1.8	49.0 ± 2.8	8.1 ± 0.6	4.1 ± 1.6	3.1 ± 0.4
Maize Bark	15.3 ± 0.2	34.8 ± 0.9	42.8 ± 1.0	3.3 ± 0.2	3.8 ± 0.2	2.8 ± 0.1
Miscanthus	7.2 ± 0.5	27.8 ± 1.4	43.6 ± 9.8	19.0 ± 10.8	2.4 ± 0.1	3.5 ± 1.5
Reed	9.6 ± 1.5	28.3 ± 1.3	47.6 ± 1.2	10.5 ± 1.5	4.0 ± 0.1	2.4 ± 0.1
Rice Husk	7.7 ± 0.3	19.8 ± 0.5	42.1 ± 0.6	16.8 ± 0.2	13.7 ± 0.1	1.9 ± 0.1
Sunflower Bark	6.0 ± 2.2	18.1 ± 2.8	30.3 ± 6.2	41.7 ± 8.5	3.8 ± 0.5	6.5 ± 0.1
Sunflower Pith	38.6 ± 1.1	5.0 ± 1.9	23.3 ± 6.8	21.4 ± 6.4	11.7 ± 0.3	8.7 ± 0.3
Wheat	10.5 ± 0.1	34.1 ± 4.5	45.3 ± 4.3	6.2 ± 0.3	3.9 ± 0.1	5.5 ± 0.1

% d.b.: g/100 g dry solid; X<sub>initial</sub>: Humidity of samples before starting the tests.

**Table 1.** Hemp shiv chemical composition according to the bibliography and expressed in percentage (% *w/w* dry mass).

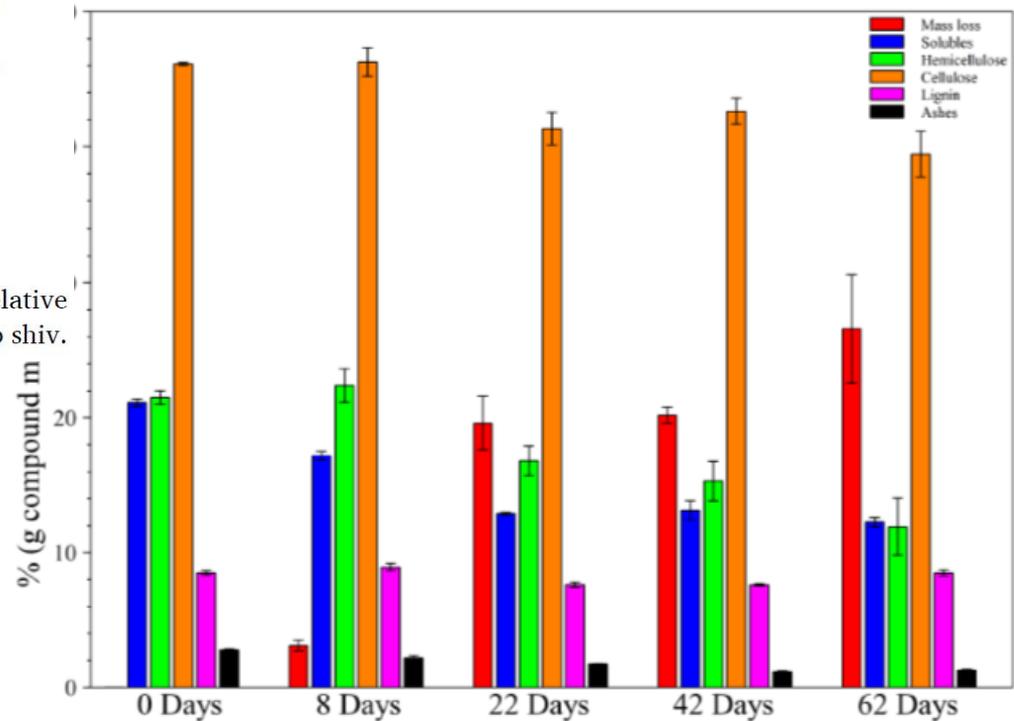
References	Cellulose	Hemicellulose	Lignin	Soluble Compounds	Proteins	Ashes
Hussain et al., 2018 [13]	44.0	18.0–27.0	22.0–28.0	1.0–6.0	-	1.0–2.0
Vignon et al., 1995 [14]	44.0	18.0	28.0	5.0	3.0	2.0
Thomsen et al., 2005 [15]	48.0	21.0–25.0	17.0–19.0	-	-	-
Gandolfi et al., 2013 [16]	44.0	25.0	23.0	4.0		1.2
Garcia-Jaldon, 1995 [17]	48.0	12.0	28.0	7.0	3.0	2.0
Arufe et al., 2021 [11]	49.0	21.6	8.1	17.2		4.1
Arufe et al., 2021 [18]	46.1	21.5	8.5	21.1		2.8
Cappelletto et al., 2001 [19]	51.6	21.5	12.9	12.9		6.6
Godin et al., 2010 [20]	47.5	6.4	8.0	29.4		8.8
Viel et al., 2018 [10]	49.9	21.4	9.5	17.7		0.6

**Diakité et al. 2021**



**Fig. 1.** Evolution of ambient conditions (temperature (red line, -) and relative humidity (black line, -) during 62 of retting and images of obtained hemp shiv.

## méthode Van Soest



Arufe et al. 2021

## ATG - méthode Van Soest

Diakité et al. 2021

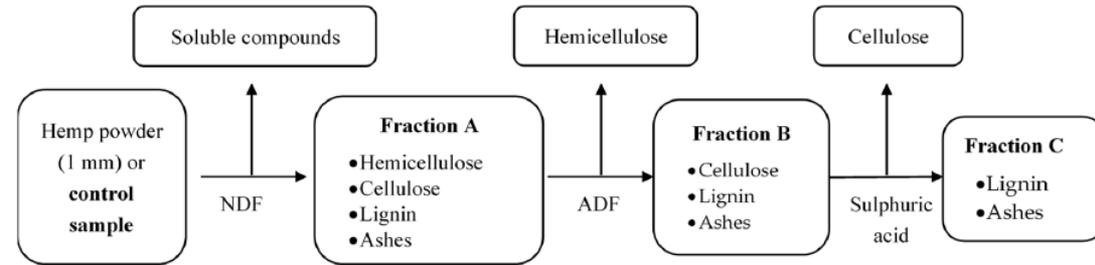
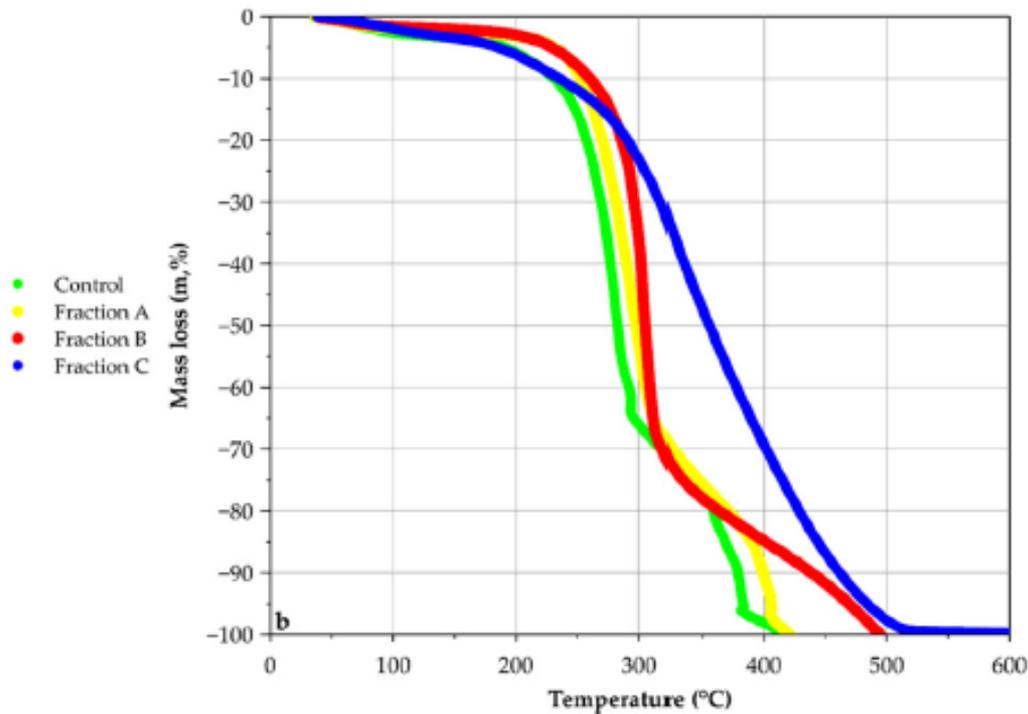
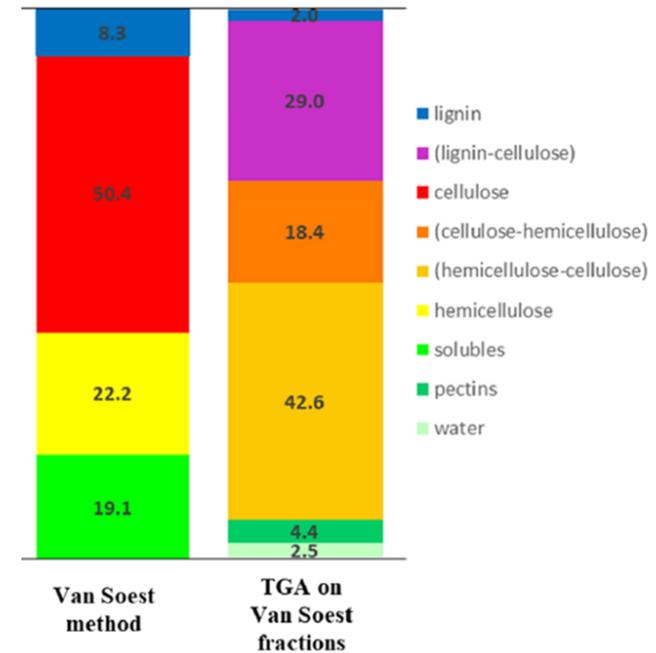


Figure 1. Chemical composition of Van Soest fractions.



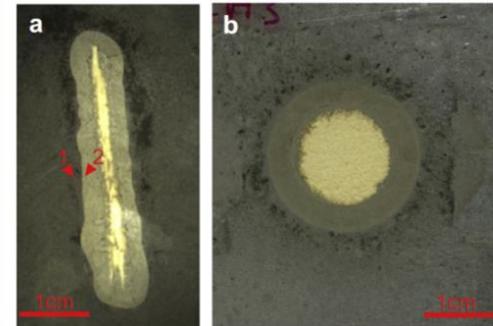
## ATG - méthode Van Soest

Cell Wall Compounds		Control	FA	FB	FC
Argon	Water	2.7 ± 0.8 (40–140 °C)	2.0 ± 0.1 (45–130 °C)	1.2 ± 0.2 (40–130 °C)	2.3 ± 1.2 (40–130 °C)
	Pectins	3.5 ± 0.6 (140–220 °C)			4.0 ± 0.3 (130–230 °C)
	(Hemicellulose–Cellulose)	24.7 ± 4.6 (220–300 °C)	23.5 ± 2.1 (190–330 °C)	83.8 ± 1.2 (180–510 °C)	8.6 ± 1.1 (260–345 °C)
	(Lignin–Cellulose)	38.8 ± 6.4 (300–420 °C)	53.7 ± 3.4 (330–500 °C)		17.6 ± 1.0 (345–450 °C)
Oxygen	Water	2.5 ± 0.6 (40–120 °C)	2.0 ± 0.0 (45–150 °C)	1.5 ± 0.1 (40–115 °C)	3.0 ± 0.1 (45–140 °C)
	Pectins	4.4 ± 0.2 (150–220 °C)			5.2 ± 0.3 (145–230 °C)
	(Hemicellulose–Cellulose)	42.6 ± 1.0 (220–285 °C)	74.6 ± 0.2 (160–360 °C)	80.3 ± 1.0 (180–385 °C)	19.7 ± 10.7 (230–300 °C)
	(Cellulose–Hemicellulose)	18.4 ± 1.6 (285–310 °C)			26.4 ± 1.9 (300–355 °C)
	(Lignin–Cellulose)	29.0 ± 0.8 (310–400 °C)	22.7 ± 0.3 (360–430 °C)	16.6 ± 0.9 (410–500 °C)	48.3 ± 3.8 (350–540 °C)
	Lignin	2.0 ± 0.4 (400–430 °C)			



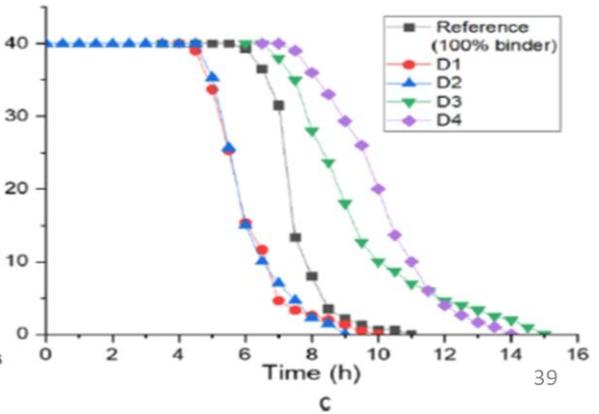
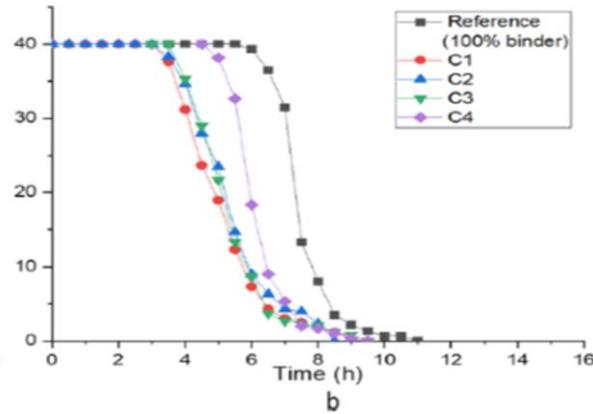
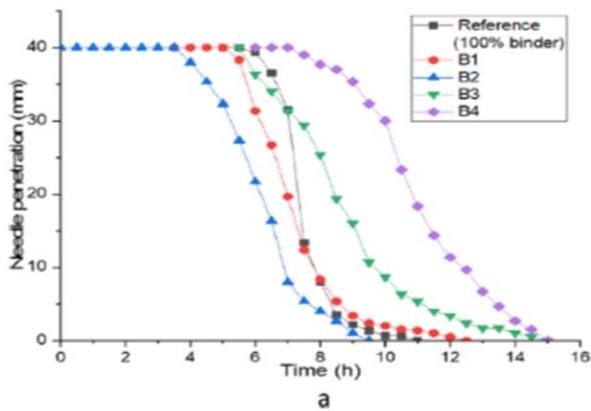
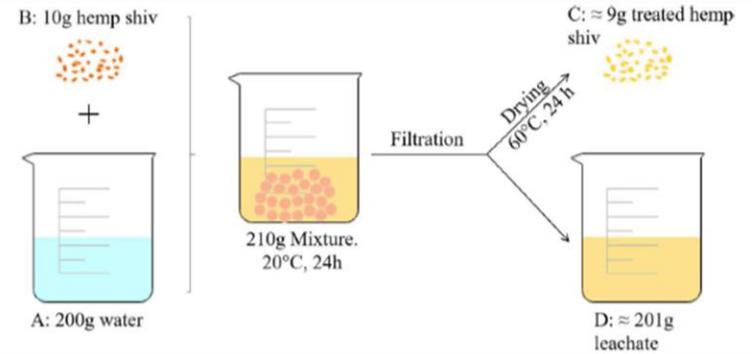
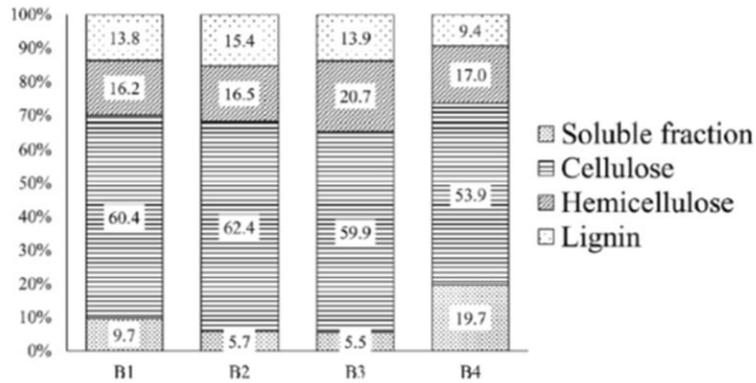
Diakité et al. 2021

- La composition chimique des particules met en évidence un certain nombre de **molécules solubilisables** par le milieu du mortier (eau de gâchage), qui peuvent, un fois lixiviées, modifier la prise et/ou le durcissement du mortier.
- problèmes avec **chanvre** (Arnaud et al, 2012, Diquélou et al, 2015), **bois** (Semple et al, 2000, Wei et al, 2003, Govin et al, 2005), **feuilles de palmier** (Hermawan et al, 2011) et **fibres de bagasse** (Bilba et al, 2003).
- Les molécules lixiviées : principalement des **sucres** de différentes masses molaires (polysaccharides: amidon, pectine, cellulose, hemicellulose / disaccharides: saccharose / monomères : fructose, glucose, mannose...) mais aussi des **polyphénols** (lignines) ou des **sous-produits de dégradation** (acides organiques).
- Le phénomène de retard de prise est souvent expliqué par la formation d'un **“gel”** autour des particules de ciment dû à la complexation ionique entre des groupements anioniques de fonctions chimiques de molécules lixiviées et les cations  $\text{Ca}^{2+}$  du liant minéral.
- mortier allégé avec des anas de lin marqués au  $^{13}\text{C}$  :
  - molécules carbonées lixiviées sont diffusées autour de la particule végétale
  - leur concentration diminue progressivement en s'éloignant de la particule végétale
  - elles sont responsables du problème de prise. Au-delà de 8 mm, il n'y a plus de molécules lixiviées et la prise du ciment est normale.



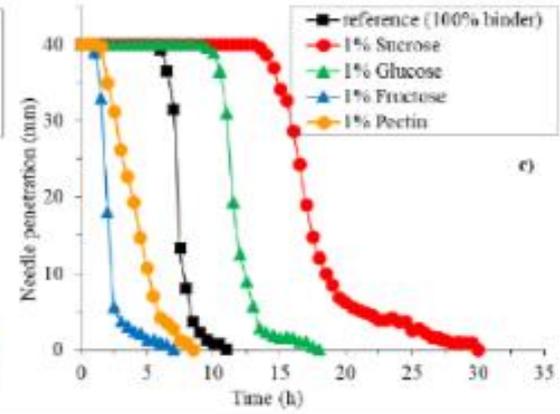
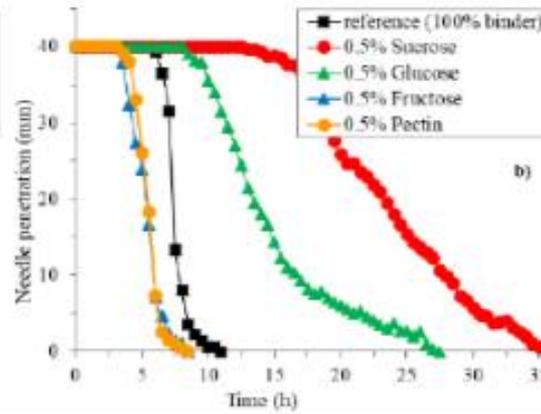
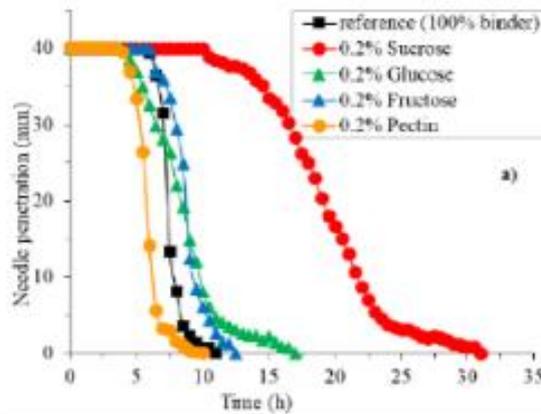
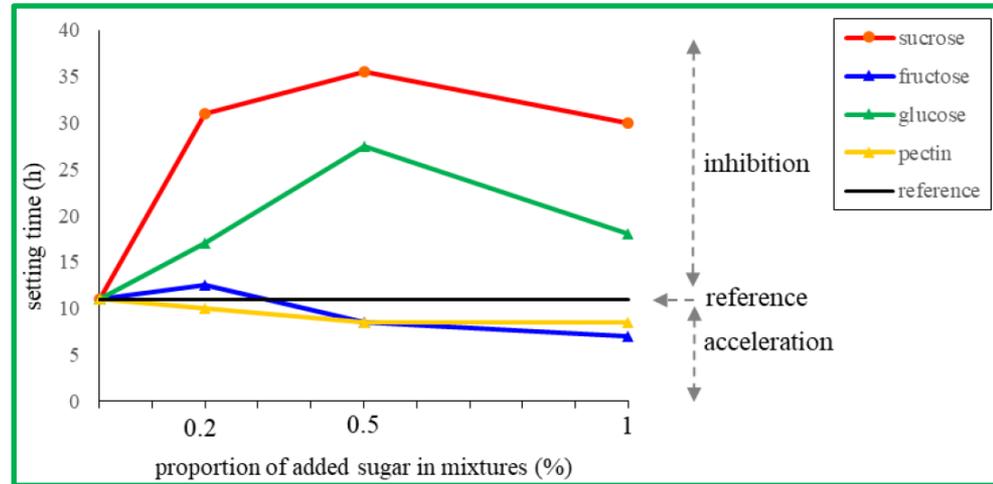
Diquélou et al. 2015

Wang et al, 2021



# Biochimie des lixiviats

Symbol		Binder (g)	Admixture (g)	Water (g)
R	Reference (100% binder)	600	0	360
S <sub>1%</sub>	1% sucrose	594	6	360
F <sub>1%</sub>	1% fructose	594	6	360
G <sub>1%</sub>	1% glucose	594	6	360
P <sub>1%</sub>	1% pectin	594	6	360
S <sub>0.5%</sub>	0.5% sucrose	597	3	360
F <sub>0.5%</sub>	0.5% fructose	597	3	360
G <sub>0.5%</sub>	0.5% glucose	597	3	360
P <sub>0.5%</sub>	0.5% pectin	597	3	360
S <sub>0.2%</sub>	0.2% sucrose	598.8	1.2	360
F <sub>0.2%</sub>	0.2% fructose	598.8	1.2	360
G <sub>0.2%</sub>	0.2% glucose	598.8	1.2	360
P <sub>0.2%</sub>	0.2% pectin	598.8	1.2	360



Wang et al, 2019

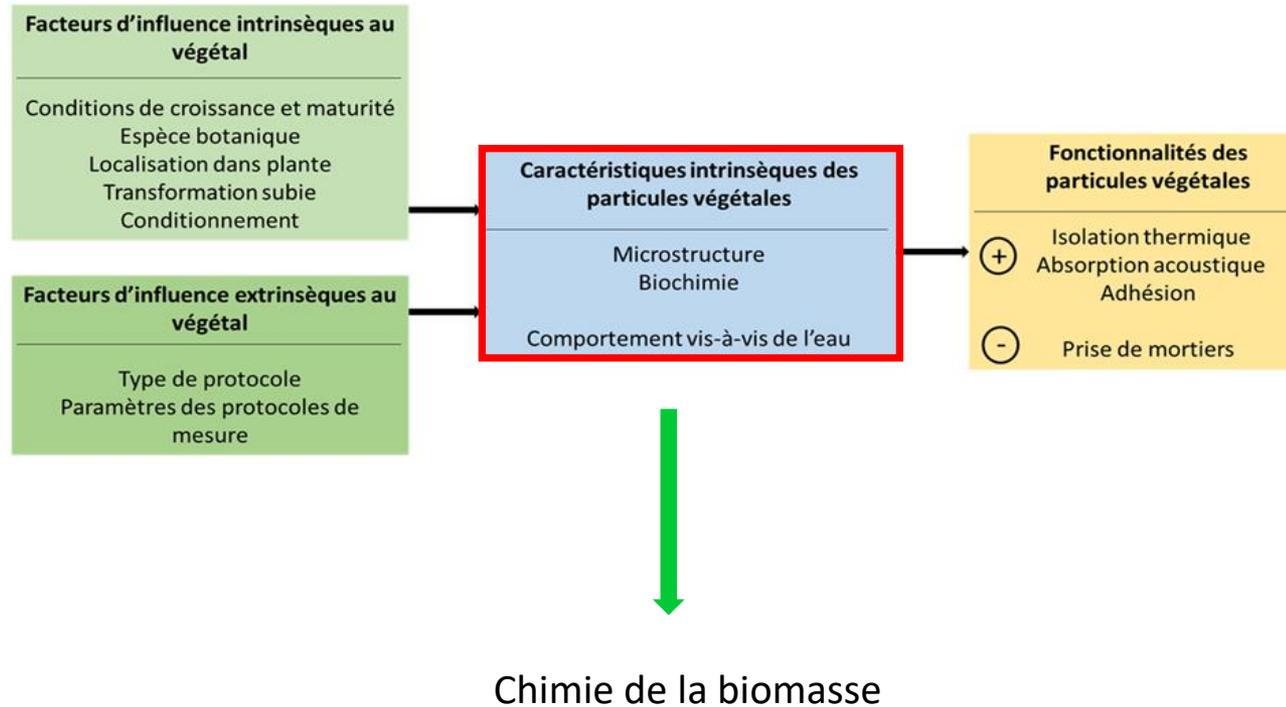
- Thèse Maya DIAKITE (2019-2022) : Influence des paramètres de procédés de transformation subis par la matière végétale : focus sur les fonctionnalités apportées par la température et le pH
- Caractérisation des extractibles avant et après simulation

C13 & C16							
Paramètres de simulations d'extraction	Eau Tamb	Eau 100°C	Eau 50°C	pH 12,5 NaOH Tamb	pH 12,5 NaOH 50°C	pH 12,5 Ca(OH) <sub>2</sub> Tamb	pH 12,5 Ca(OH) <sub>2</sub> 50°C
	Panneaux de particules		Mortiers				

- Soutenance de thèse prévue fin 2022

# Panorama des particules végétales françaises

## Caractéristiques des particules végétales



- Complexe** : nécessaire pour bien caractériser les PV pour optimiser les performances du matériau
- Diverse & variable**: inexorable à ces matières premières et compatible avec un CDC aval
- Abondante mais peu disponible** : Travail de montage de filières en déclinant les spécificités de chaque territoire (gisement, économie)



Merci pour votre attention

[helene.lenormand@unilasalle.fr](mailto:helene.lenormand@unilasalle.fr)