

Séminaire du 11 mai 2023
Groupe de **R**éflexion pour la **R**éduction du **R**ejet de **G**az **R**échauffants

*Matériaux de construction biosourcés :
les défis microstructuraux des bétons végétaux*

Sophie DARTOIS

Mais avec l'aide de plein de gens : Hélène DUMONTET, Abdelwahid BEN HAMIDA, Sophanarith MOM, Marc QUIERTANT, Sophie KLINTZING, Agnès de LESTRANGE,...

I. Réduire l'empreinte environnementale de la construction

→ *Revue non exhaustive de pistes explorées*

1. Les matériaux de construction
2. Dimensionnement structurel
3. Urbanisme et équipement

- Plan -

II. Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

1. Objectifs et moyens à disposition + rappel homogénéisation linéaire
2. Difficultés liées au matériau étudié
(*Richesse microstructurale + Lois de comportement complexes*)
3. Mise en œuvre de méthodes d'homogénéisation linéaires sur ces matériaux
(*Méthode d'homogénéisation itérative numérique*)
4. Estimation du comportement des phases
5. Comportement effectif de bétons de chanvre compactés
6. Identification du comportement anisotrope des particules végétales
7. Tentative de prise en compte du comportement Non Linéaire de la matrice

III. Conclusion, perspectives et questions

Quelques définitions et chiffres repères pour débiter

EUROPE

- 20 % et - 55 %

Objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre

pour 2020 **- 20 %**
pour 2030 **- 55 %**

1990-2020 et 1990-2030

- 28 %

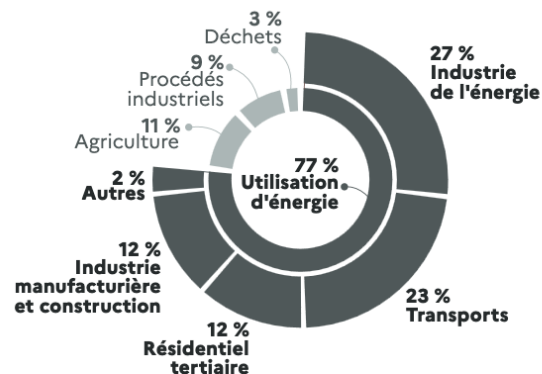
Évolution des émissions de gaz à effet de serre dans l'Union européenne

1990 - 2019

+68% d'émission de CO₂ à l'échelle mondiale

Gaz à effet de serre

Répartition des émissions de gaz à effet de serre, dans l'Union européenne



2019

FRANCE

+ 2,3 °C

Hausse des températures en métropole

période 1961-1990 - 2020

- 20 %

Évolution des émissions de gaz à effet de serre en France

1990 - 2019

- 40 %

Objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre

1990 - 2030

48 %

des émissions de GES de l'empreinte carbone de la France sont importées

2017

37 Md€

Dépenses de l'État favorables au climat dans le projet de loi de finances 2021

2021

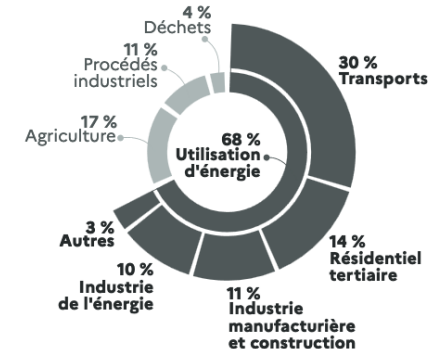
47,9 Md€

Investissements en faveur du climat

2019

Gaz à effet de serre

Répartition des émissions de gaz à effet de serre en France



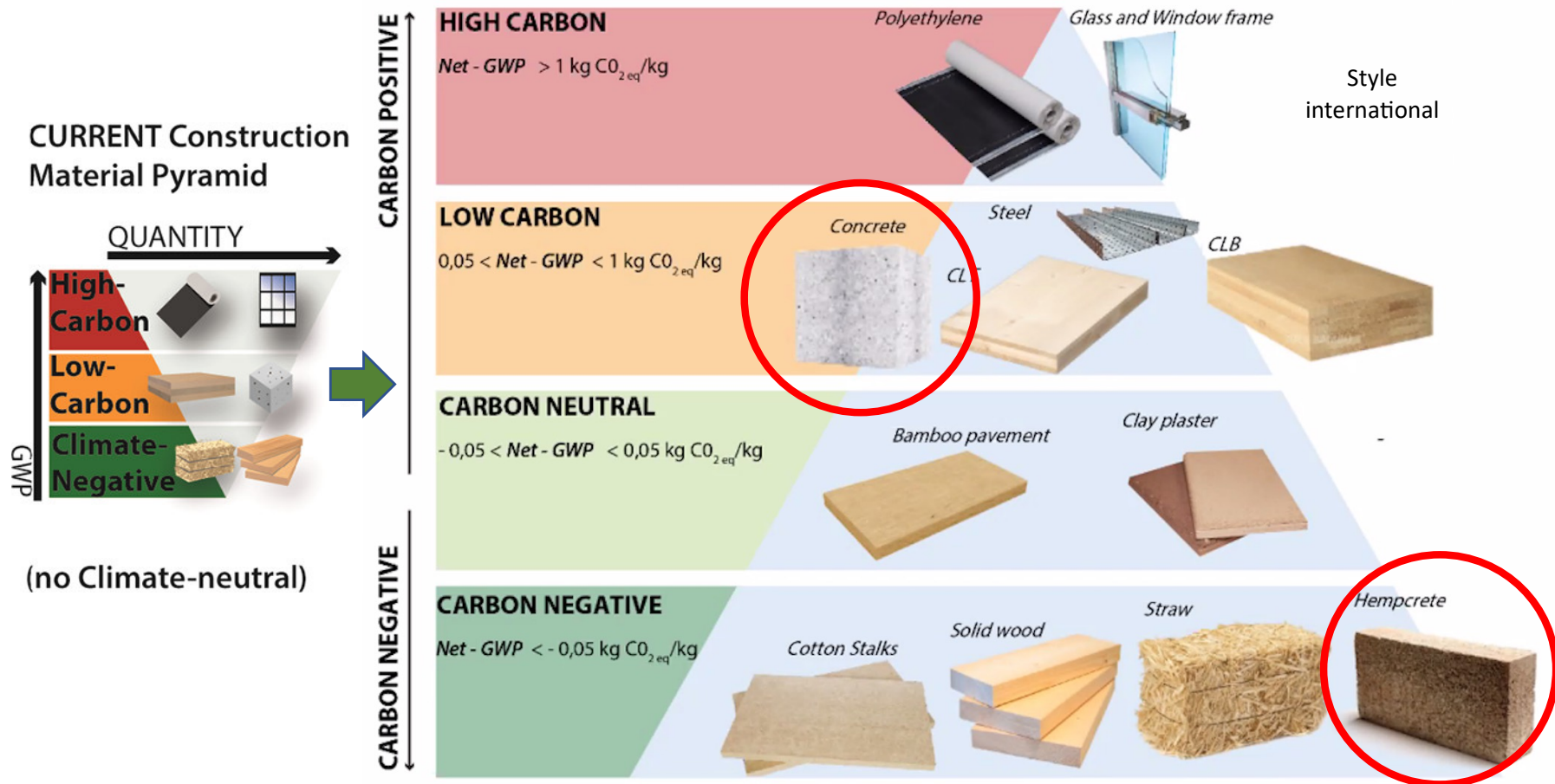
2019

Gaz à Effet de Serre / GHG (Greenhouse Gas) : qui absorbent et réémettent le rayonnement infrarouge H₂O (0,4 à 4% du volume atmosphérique) / Autres <0,1% : CO₂ / CH₄ / N₂O / HFC / PFC / SF₆ / NF₃

Pistes pour réduire l'impact environnemental de la construction

Les matériaux de construction

→ Idée globale : Inverser la pyramide des matériaux de construction

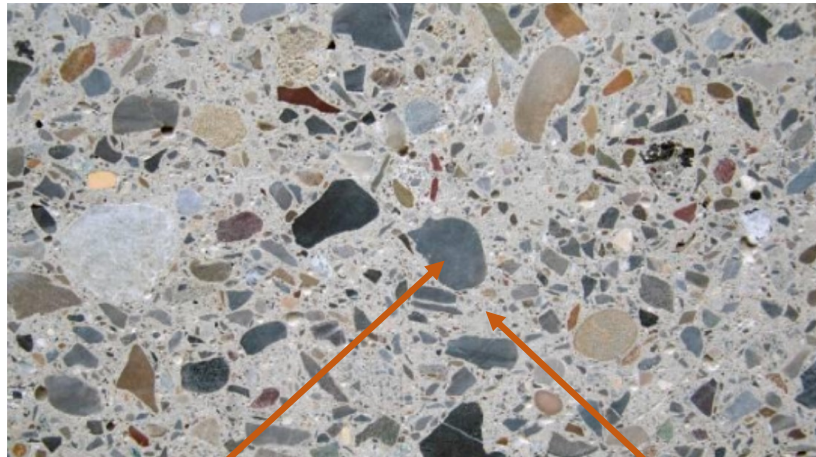


Material Diets for Climate-Neutral Construction.
Carcassi et al. *Environ. Sci. Technol.* 2022, 56, 8, 5213–5223

CLT/B : cross laminated timber/bamboo
GWP = **G**lobal **W**arming **P**otential

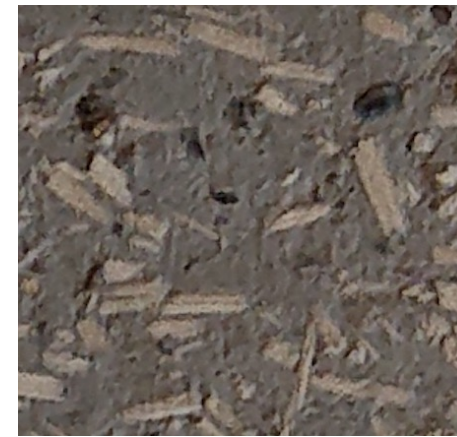
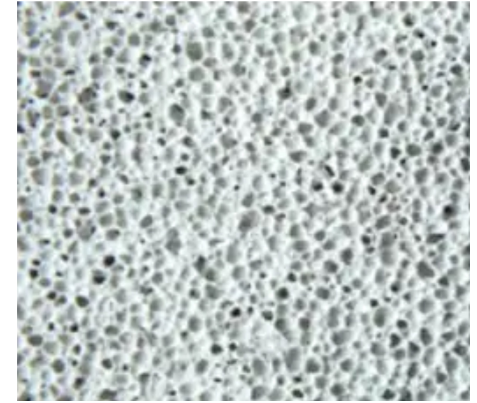
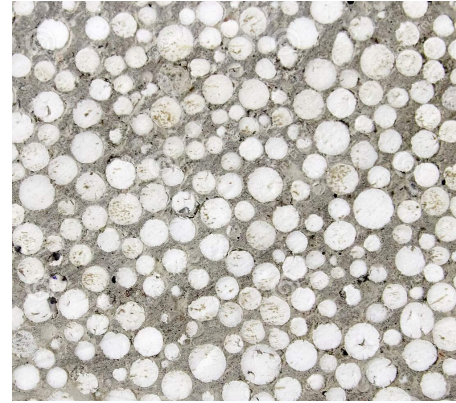
Pistes pour réduire l'impact environnemental de la construction

Les matériaux de construction



Granulats

Matrice
cimentaire



Le béton un matériau **composite** :
Granulats + matrice cimentaire

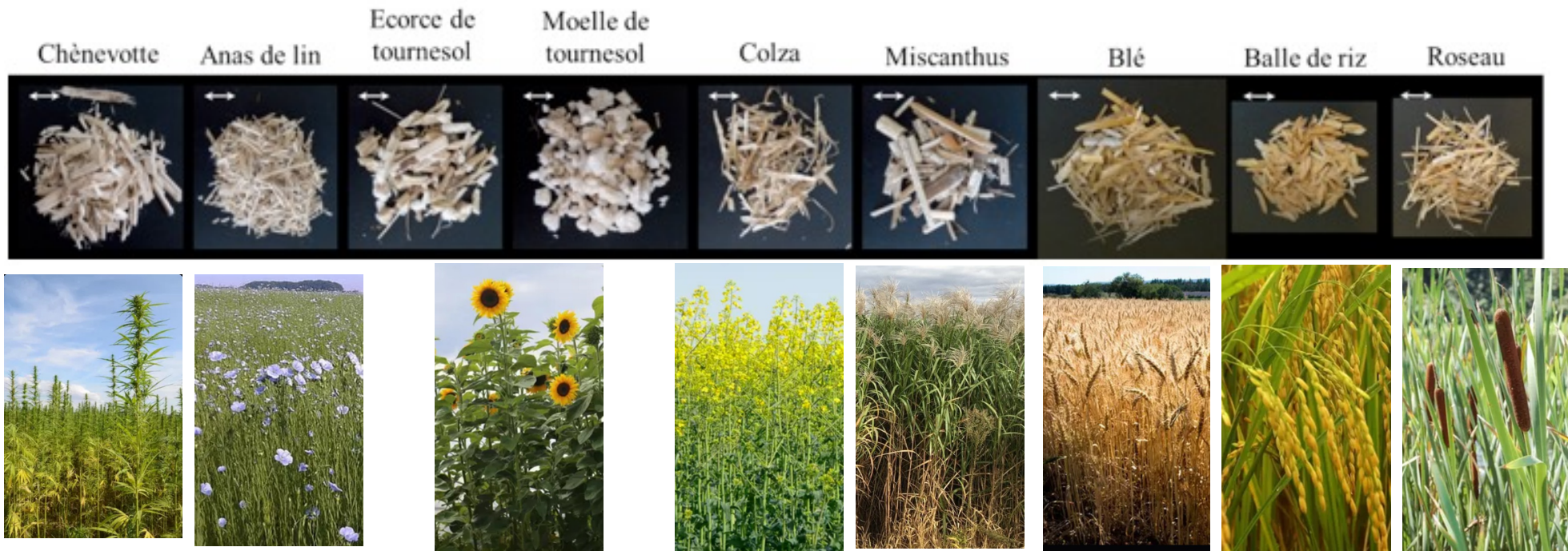
La piste des granulats

Bétons légers pour réduire l'impact à l'utilisation (remplissage, isolation, confort)

- Billes de polystyrène (allègement, isolation)
- Mousse cellulaire
- Bétons Innovants Structurels (BIS) – schiste, pierre ponce, argile,...-
- Particules et/ou fibres végétales...

Pistes pour réduire l'impact environnemental de la construction

Les matériaux de construction



- Résidus bois
- Plantes à fibres : chanvre, lin, coco,...
- Plantes alimentaires (pailles) : blé, tournesol, colza, riz,...
- Coproduits de l'énergie : miscanthus,...
- Autres : bambou, roseau, sarments de vigne,...
- Issue de transformations : ouate de cellulose

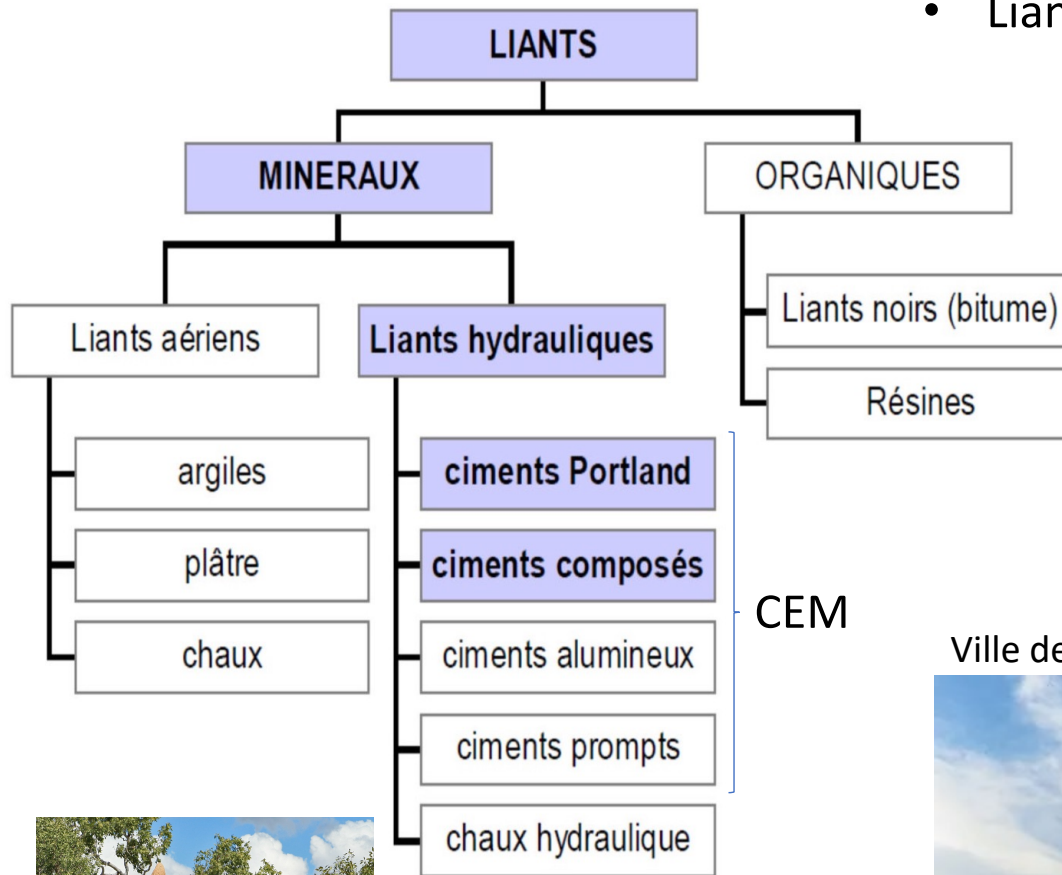
→ Séquestration de carbone,
renouvelable, dégradable



Pistes pour réduire l'impact environnemental de la construction

Les matériaux de construction

La piste des liants :



- Liants **géosourcés** (terre crue : argile, limon)

Mosquée de Djenné (Mali)



Ville de Yazd et ses tours à vent (Iran) >3000 ans



W. Bulach 2007 (7m)



J.J. Argoud 2019

Pistes pour réduire l'impact environnemental de la construction

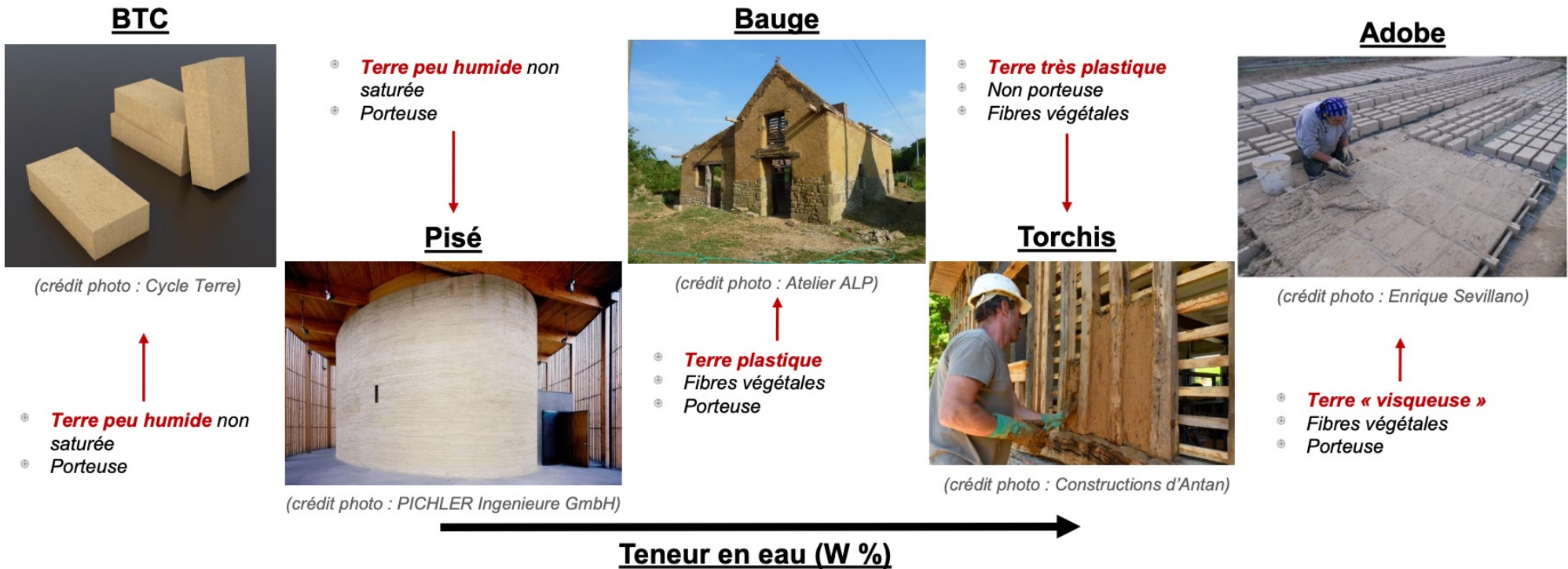
Les matériaux de construction

La piste des liants :

- Liants **géosourcés** (terre crue : argile, limon)

Et en France...

Techniques de construction traditionnelles en France



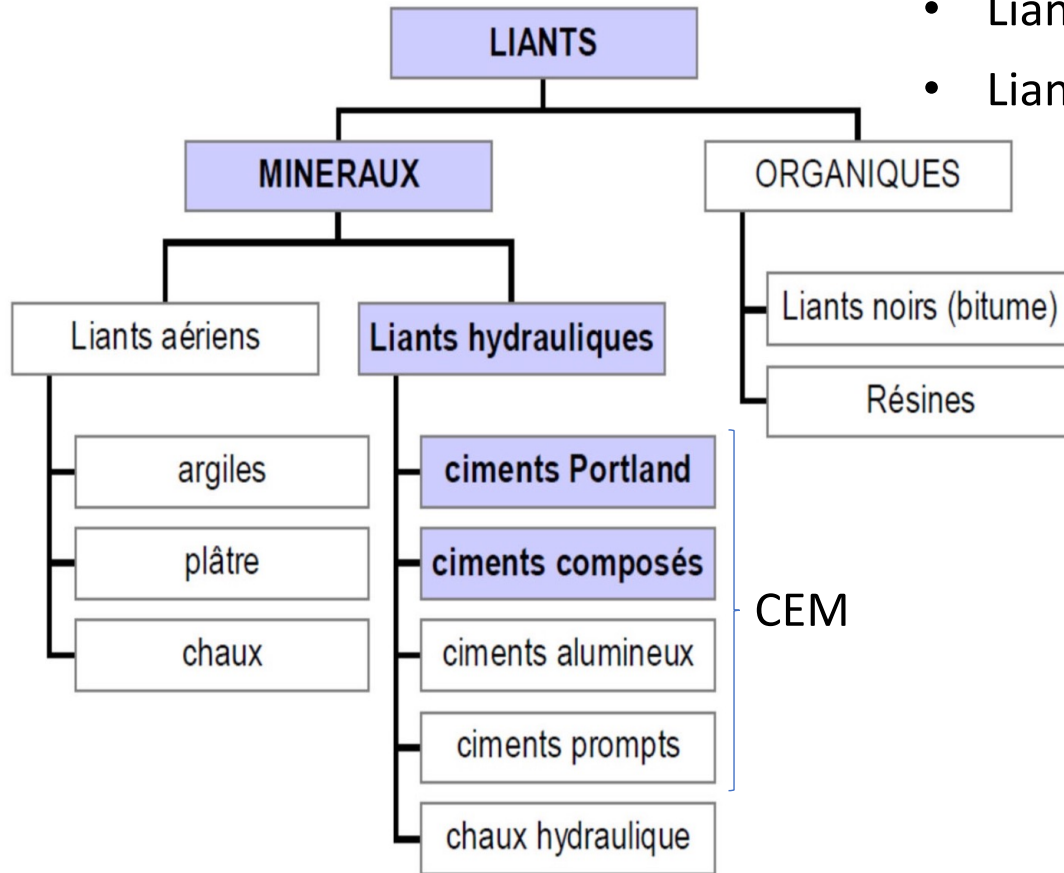
Modes de mise en œuvre localement adaptés aux caractéristiques variables des terres

(thèse de S. Guihéneuf 2020)

Véritable intérêt : pas de cuisson

Pistes pour réduire l'impact environnemental de la construction

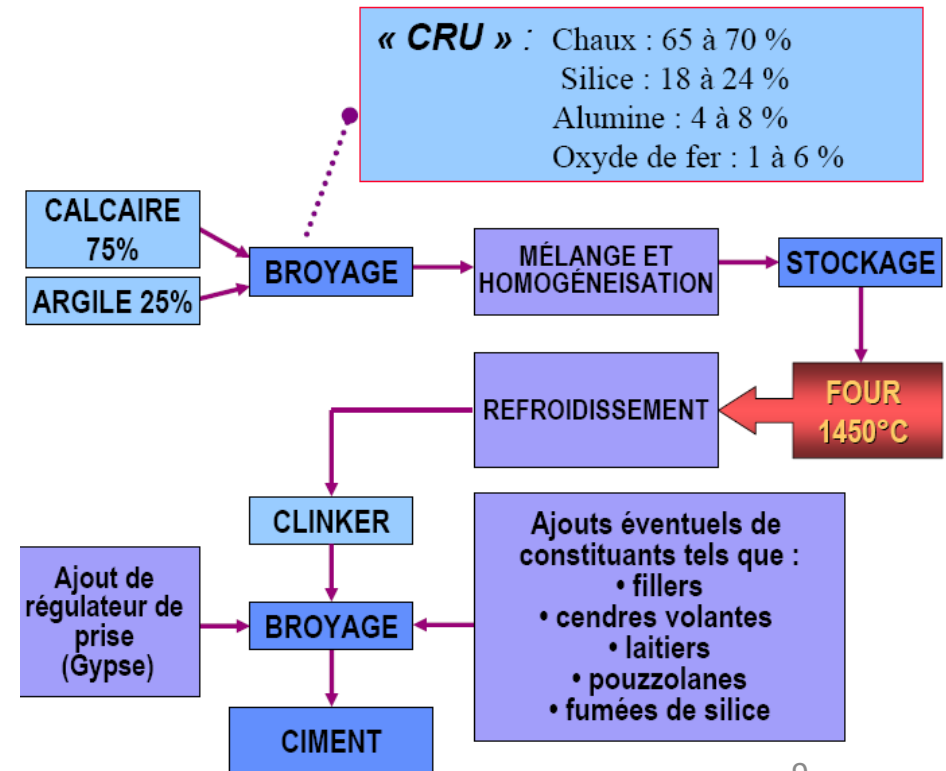
Les matériaux de construction



- Liants **géosourcés** (terre crue : argile, limon)
- Liants « **biosourcés** » cuits

Impact carbone de la production du ciment vient de deux phénomènes principaux :

- La **décarbonatation du calcaire** lors de la cuisson : (~60% des émissions de GES)



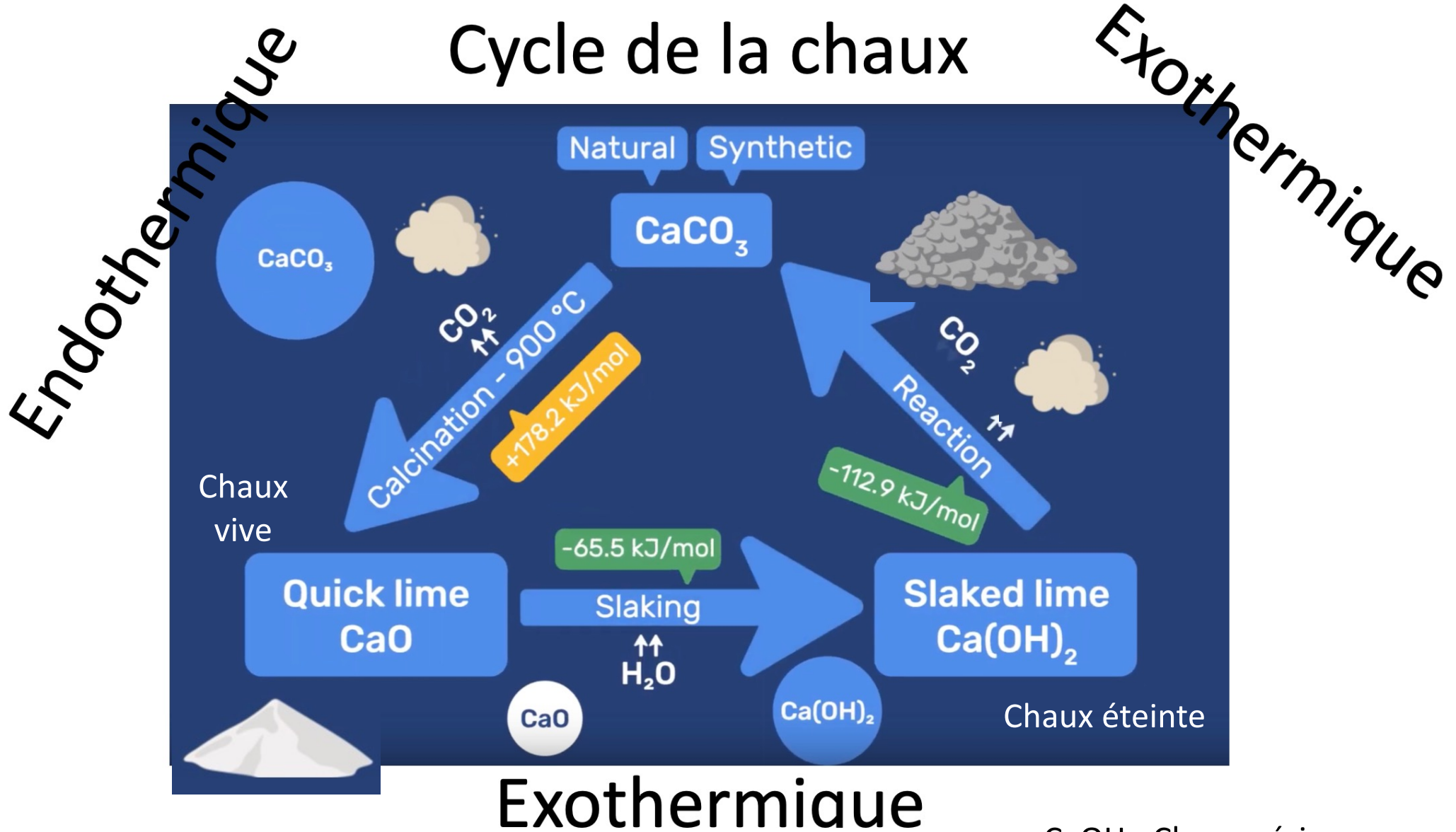
- La cuisson du clinker à 1450°C via des combustibles fossiles ou de substitution : (~40% des émissions de GES)

→ 1 tonne de ciment ~1 tonne de CO₂

Pistes pour réduire l'impact environnemental de la construction

Les matériaux de construction

Cycle de la chaux



CaOH : Chaux aérienne

Utilisation :

chaux pour ciment + mise en forme et baisse de la masse volumique (porosité accrue)

Pistes pour réduire l'impact environnemental de la construction

Les matériaux de construction

Gain sur les processus d'élaboration ?



- Peu de gain possible sur l'élaboration en France (process optimisés).
- Utilisation de combustibles de substitution (déchets)

Cimenterie Vicat de Montalieu

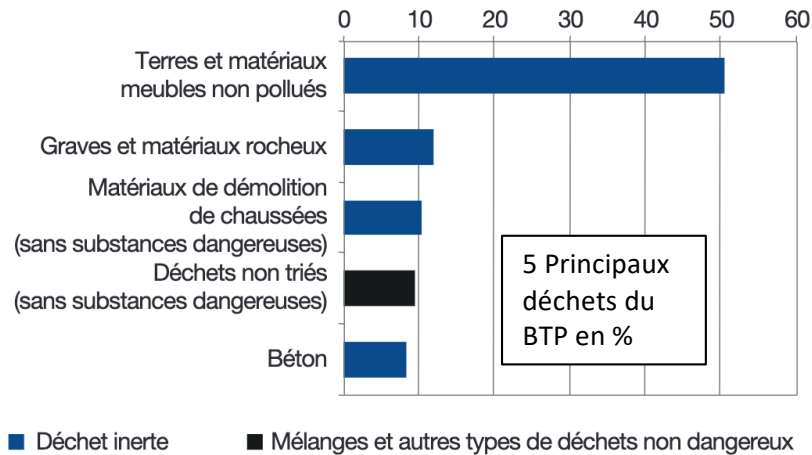
Déchets et recyclage ?

Production de déchets en France, par secteur d'activité en 2018 et 2020 (en milliers de tonnes)
C. Scribe -Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires - 2022

	Agriculture pêche		Industrie		Construction		Traitement déchets, eau, assainissement, dépollution		Tertiaire		Ménages		Total	
	2018	2020	2018	2020	2018	2020	2018	2020	2018	2020	2018	2020	2018	2020
Déchets minéraux non dangereux	0	0	4 338	1 326	224 162	197 394	3 382	2 978	806	839	2 857	2 893	235 544	205 429
Déchets non minéraux non dangereux	979	954	18 664	15 879	13 056	12 724	20 198	18 435	17 149	15 956	25 886	29 756	95 932	93 704
Déchets dangereux	331	337	2 880	2 399	2 972	2 615	3 652	3 609	1 221	1 387	1 042	894	12 098	11 241
Total	1 310	1 291	25 882	19 603	240 190	212 733	27 232	25 022	19 175	18 182	29 785	33 544	343 574	310 374
Évolution 2018/2020 en %	- 1,4		- 24,3		- 11,4		- 8,1		- 5,2		+ 12,6		- 9,7	
Total hors déchets secondaires	1 310	1 290	25 580	19 247	240 188	212 731	15 396	14 909	19 154	18 161	29 785	33 544	331 413	299 882

Pistes pour réduire l'impact environnemental de la construction

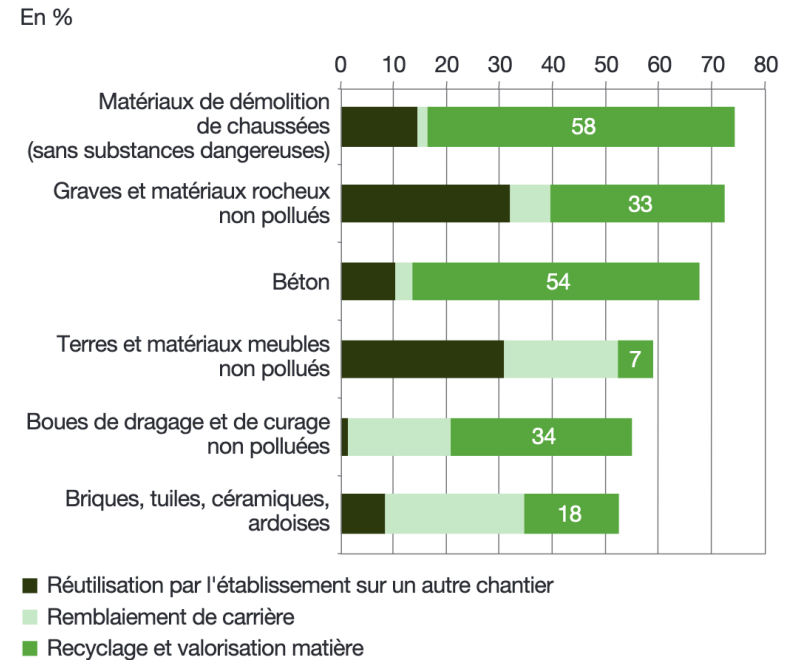
Les matériaux de construction



Source : Sdes, EDD 2014

→ Les déchets minéraux non dangereux représentent les **deux tiers des déchets produits**.

Graphique 3.2 : répartition des destinations « vertes » des déchets les plus recyclés en première intention, selon le type de déchet



Source : Sdes, EDD 2014



Ex : Béton avec granulats recyclés non triés (dosage réglementé)

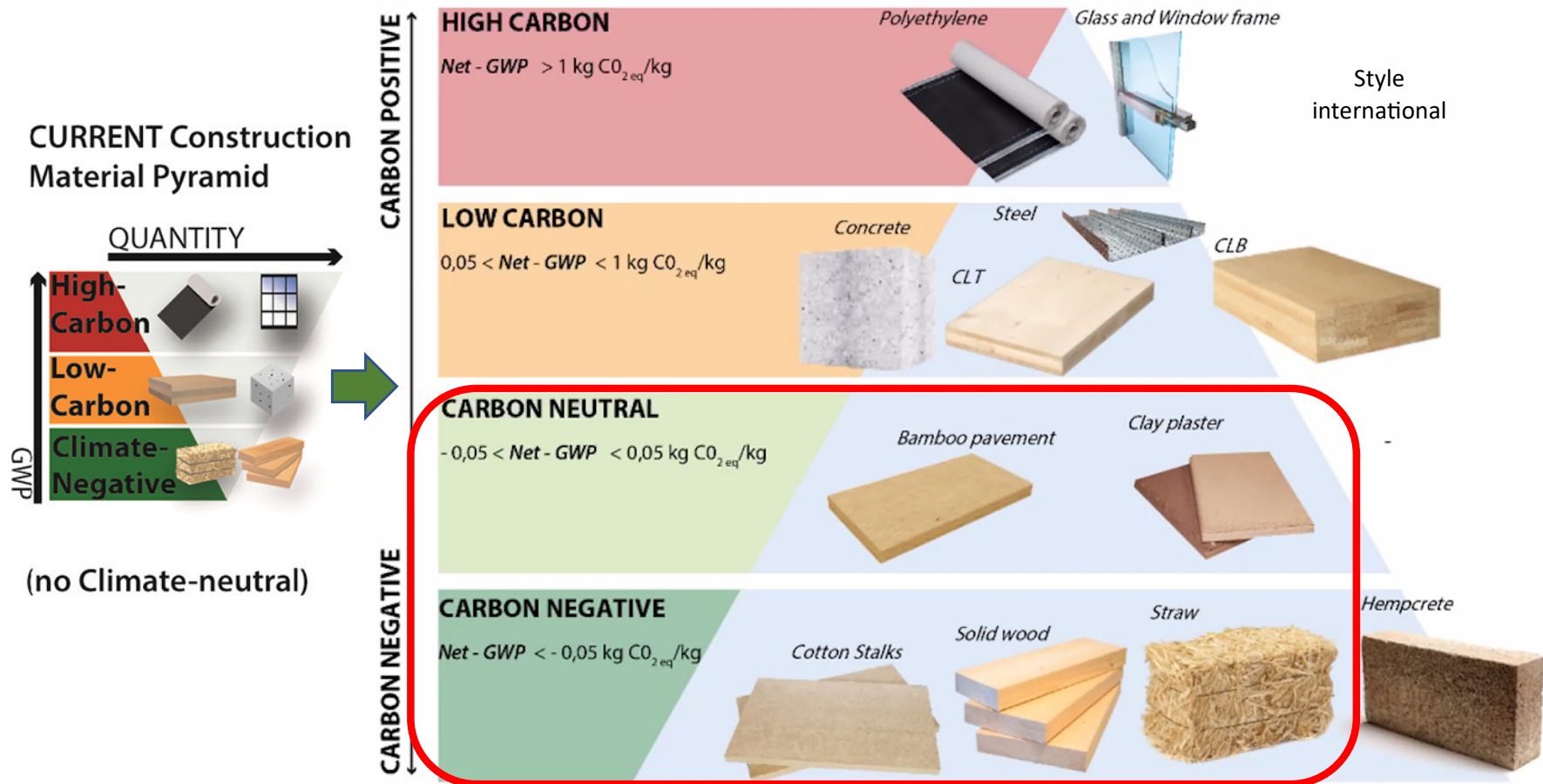


Asphalte (béton bitumineux – liant hydrocarboné-)

Pistes pour réduire l'impact environnemental de la construction

Les matériaux de construction

→ Idée globale : Inverser la pyramide des matériaux de construction



Material Diets for Climate-Neutral Construction.
Carcassi et al. *Environ. Sci. Technol.* 2022, 56, 8, 5213–5223

CLT/B : cross laminated timber/bamboo
GWP = **G**lobal **W**arming **P**otential

Pistes pour réduire l'impact environnemental de la construction

Les matériaux de construction



Pont routier en bambou à Sumatra, Indonésie 2017
(conception Occo Living, Zellinger, Stemm, Murrer)



Bâtiment Cocoon, Tiruchirappalli, Inde 2014
Tuiles d'écorce de palmier moulées à chaud dans une presse mécanique et fixées par des fils métalliques.
Charpente en bambou



Echafaudage en bambou (Inde)

Différents continents, différentes ressources

Pistes pour réduire l'impact environnemental de la construction

Les matériaux de construction

Gare de Nîmes Pont du Gard

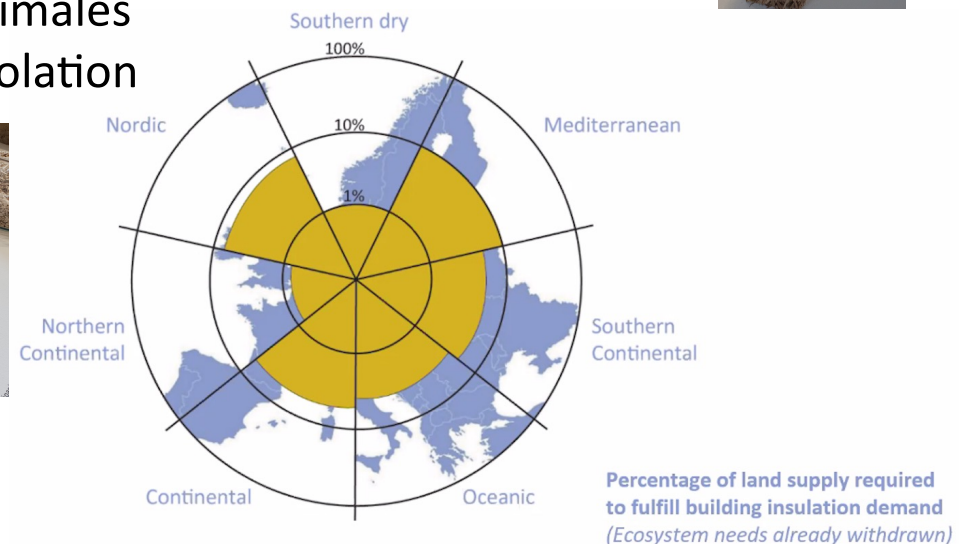


Parquet de Paris Gare du Nord



Exemples :

- Le bambou comme élément structurel
- La paille comme élément d'isolation
- Toutes les fibres végétales (chanvre, lin bois, coton recyclé...) et animales (laine) pour l'isolation



→ Les quantités de paille disponibles en Europe couvrent les besoins en rénovation et construction nouvelles.

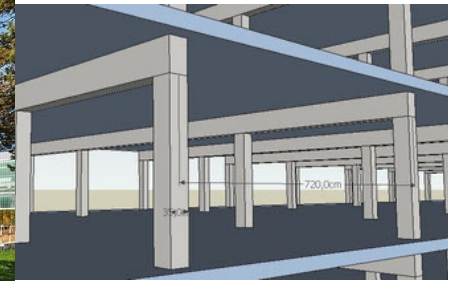
Göswein et al. 2021 *Sustainable Cities and Society*.

Pistes pour réduire l'impact environnemental de la construction

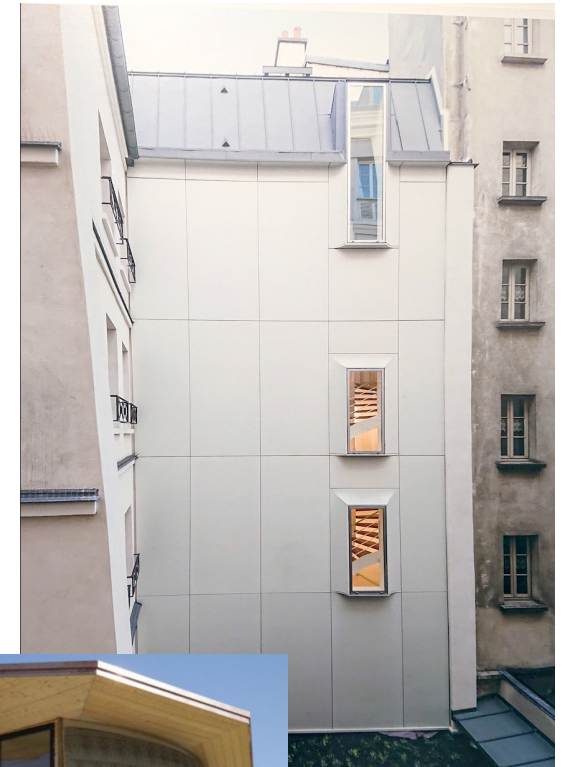
Dimensionnement structurel

Exemples :

- **Limiter la portée des dalles** (i.e. mettre plus de poteaux) car elle fait croître exponentiellement le poids carbone
- Utiliser des bétons **précontraints** (par câbles par ex. Peu accessibles pour la construction courante)
- Utiliser les **mix de matériaux** (surtout avec biosourcés) pour éviter les surdimensionnements liés au confort acoustique et thermique.
- Création d'**eurocodes** dédiés
- **Optimisation** de l'utilisation de la matière
- Bâtiments à énergie positive (BEPOS)



Réhabilitation d'un immeuble
du XVIII^{ème} siècle (2014)
Doublage béton de chanvre



Pistes pour réduire l'impact environnemental de la construction

Urbanisme et équipement

Exemples :

- Surface non construites
- Ombrières
- Mobilier urbain
- Modulaire / réutilisable
- Gestion des trajets
 - Voies de circulation douces
 - Symbioses industrielles

Parking du CHU de Strasbourg
(bambou)



©Ville de Paris - DTEC

Ombrières square St Eloi Paris 12ème



Le Grand Palais Éphémère ©
Collection Rmn - Grand Palais
© Patrick Tourneboeuf -
Tendance Floue



Sineu Graff

Pistes pour réduire l'impact environnemental de la construction

Conclusion partielle

Les vues d'artiste....



«Paris Smart City 2050»

Maison du tourisme à Troyes 2013
(rénovation et construction chaux/chanvre)



Logement social
Paris 18^{ème} (2014)
Montants en
bois, Isolation
chaux chanvre
Panneaux Fibre-
Gypse

Ravalement en
béton de chanvre
Paris 14^{ème}



Maison en paille



Maison modulaire béton de chanvre
(image Tradical)

I. Réduire l'empreinte environnementale de la construction

→ *Revue non exhaustive de pistes explorées*

1. Les matériaux de construction
2. Dimensionnement structurel
3. Urbanisme et équipement

- Plan -

II. Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

→ *pour favoriser et optimiser leur utilisation dans la construction*

1. Objectifs et moyens à disposition + rappel homogénéisation linéaire
2. Difficultés liées au matériau étudié
(*Richesse microstructurale + Lois de comportement complexes*)
3. Mise en œuvre de méthodes d'homogénéisation linéaires sur ces matériaux
(*Méthode d'homogénéisation itérative numérique*)
4. Estimation du comportement des phases
5. Comportement effectif de bétons de chanvre compactés
6. Identification du comportement des particules végétales
7. Tentative de prise en compte du comportement Non Linéaire de la matrice

III. Conclusion, perspectives et questions

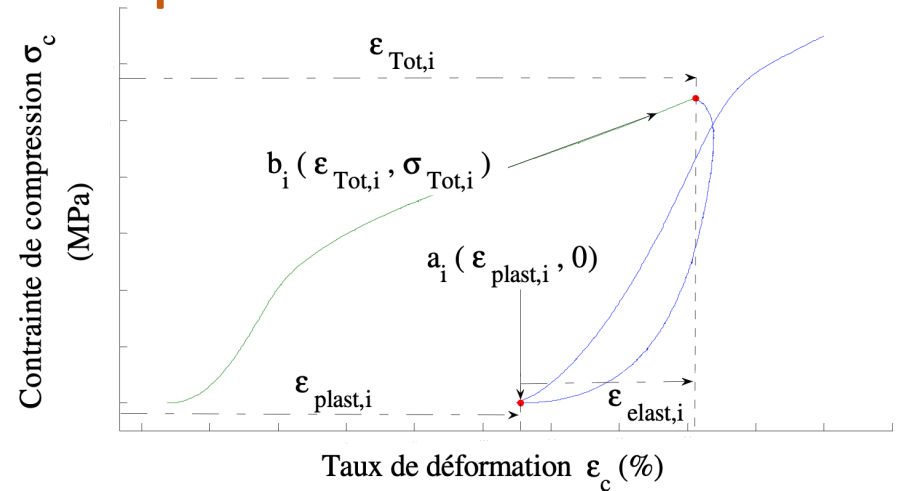
Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Objectifs et Moyens à disposition

- Des propriétés mécaniques / thermiques initiales effectives (Homogénéisation linéaire)
- Reproduire une courbe comportementale non-linéaire (Traitement incrémental linéarisé + Milieu linéaire de comparaison)

→ **Essais expérimentaux** adaptés
Identifier les comportements spécifiques.

→ **Modèles phénoménologiques** (sur-mesure, riches et complexes)
Reproduction des essais [Tronet 2014], [Niyigena 2016]



Paramètres d'étude de la déformation plastique lors de chargement-déchargement [Tronet 2014]



Béton chanvre et chaux

Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Objectifs et Moyens à disposition

- **Des propriétés mécaniques / thermiques initiales effectives** (Homogénéisation linéaire)
- **Reproduire une courbe comportementale non-linéaire** (Traitement incrémental linéarisé + Milieu linéaire de comparaison)

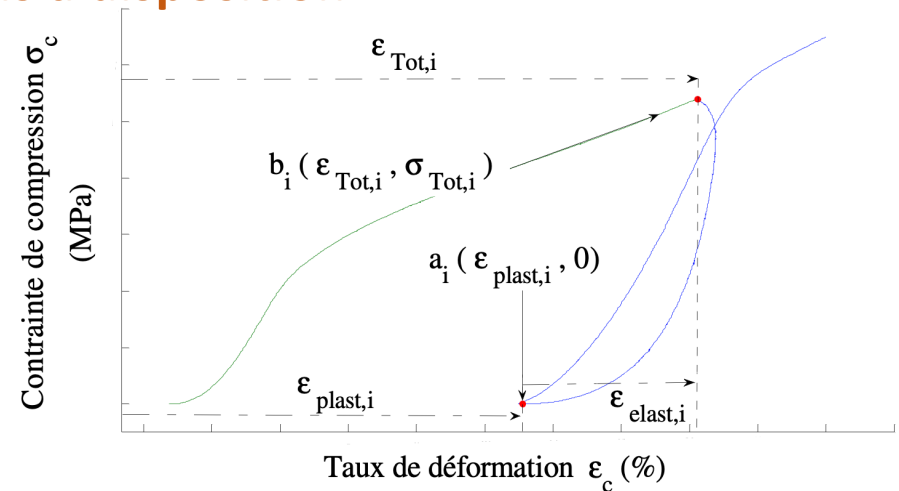
→ **Essais expérimentaux** adaptés
Identifier les comportements spécifiques.

→ **Modèles phénoménologiques** (sur-mesure, riches et complexes)
Reproduction des essais [Tronet 2014], [Niyigena 2016]

MAIS

- Tout changement de milieu
→ **ré-identification du comportement ou des paramètres des modèles** phénoménologiques.
- Intéressant de faire le **lien entre caractéristiques microstructurales et comportement macroscopique**.

→ Développement de méthodes de **modélisation multi-échelles**



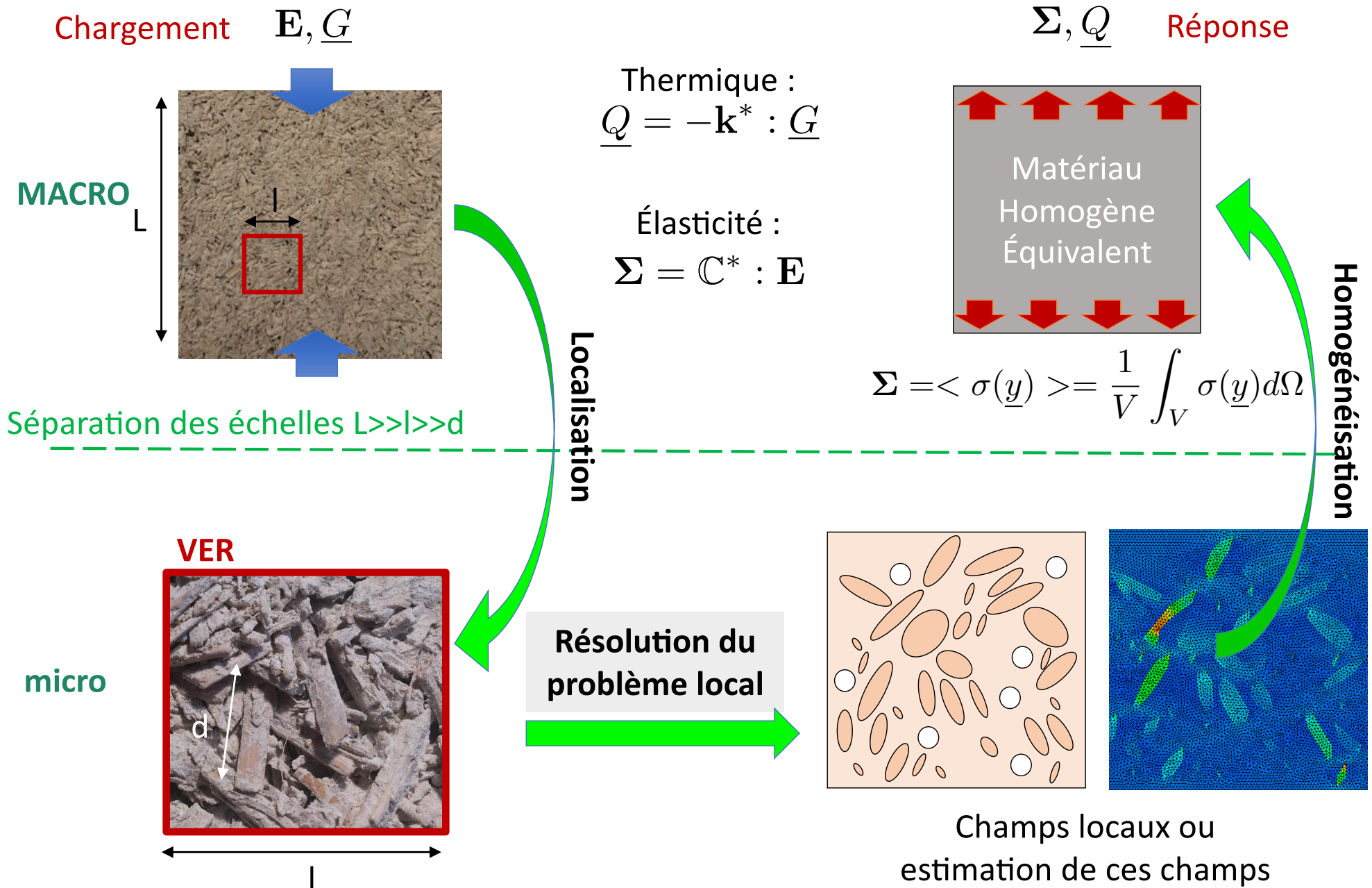
Paramètres d'étude de la déformation plastique lors de chargement-déchargement [Tronet 2014]



Béton chanvre et chaux

Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Homogénéisation linéaire



Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Homogénéisation linéaire

Résolution du problème local

➤ Pour un composite à n-phases (certaines pouvant être des pores)

➤ On suppose connus :

- La **concentration** des phases (fraction volumique) : $f_\alpha = \frac{V_\alpha}{V}$ $\sum_{\alpha=0}^N f_\alpha = 1$
- La **distribution spatiale, morphologie** et les **propriétés** des différentes phases (sauf pores)

$$\mathbf{k}(\underline{x}) = \sum_{\alpha=0}^1 \mathbf{k}_\alpha \chi_\alpha(\underline{x})$$

$$\mathbb{C}(\underline{x}) = \sum_{\alpha=0}^1 \mathbb{C}_\alpha \chi_\alpha(\underline{x})$$

χ_α Fonction
indicatrice
valant 0 ou 1

- Le **chargement macroscopique**

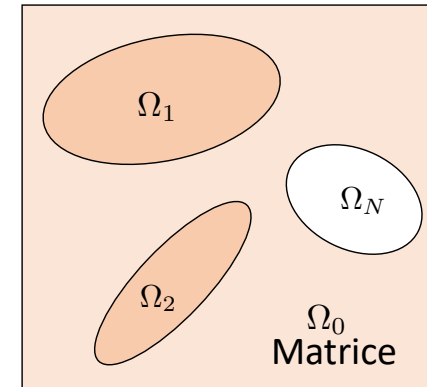
thermique : \underline{G} élasticité : \mathbf{E}

➤ La **linéarité** du problème donne :

$$\underline{\varepsilon}(\underline{y}) = \mathbb{A}(\underline{y}) : \mathbf{E}$$

$$\underline{g}(\underline{y}) = \mathbf{a}(\underline{y}) \cdot \underline{G}$$

Localisation

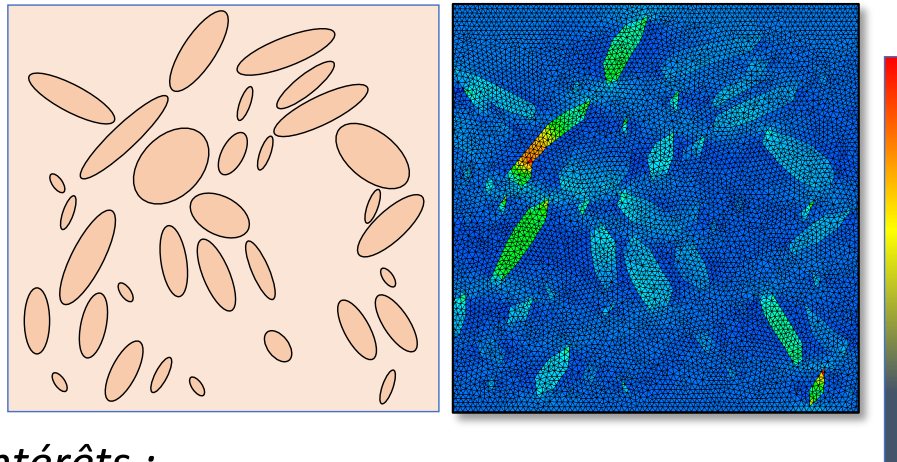


Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Homogénéisation linéaire

Les modèles à champs **complets**

(simulations numériques, Éléments finis, FFT)



Intérêts :

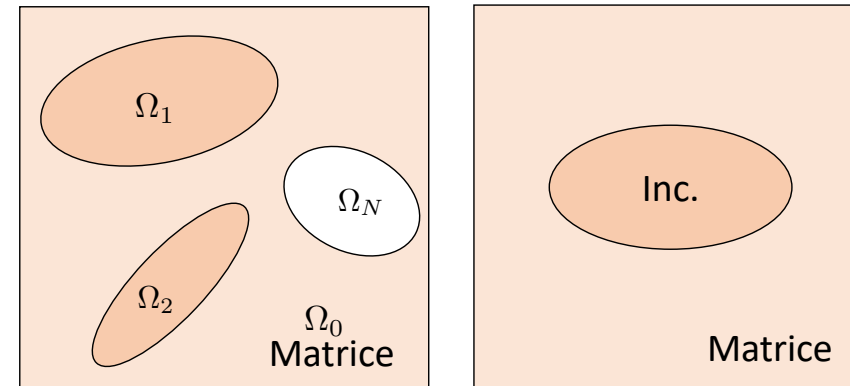
- Permettent de **traiter toutes les géométries** (morpho. et distrib. spatiale)
- **Accès direct aux champs locaux et leurs variations** spatiales et temporelles

$$\underline{grad}T(\underline{x}) \quad \underline{q}(\underline{x}) \quad \underline{\varepsilon}(\underline{x}) \quad \underline{\sigma}(\underline{x})$$

Inconvénients :

- **Lourds à mettre en œuvre** (possibilité CL périodiques pour diminuer la taille du Pb)
- Approximation numérique (reconstruction d'image, maillage, MEF/FFT elle-même...)

Les modèles à champs **moyens**



Intérêts :

- **Faciles à mettre en œuvre** (expressions analytiques)
- Concordance des solutions à faible taux de renforts (jusqu'à ~25%)

Inconvénients :

- **Pas de solution** pour toutes les géométries, toutes les anisotropies, etc
- Estimation **moyenne** des champs locaux et éventuellement de leurs fluctuations
- Correctes pour un contraste modéré

Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Richesse microstructurale

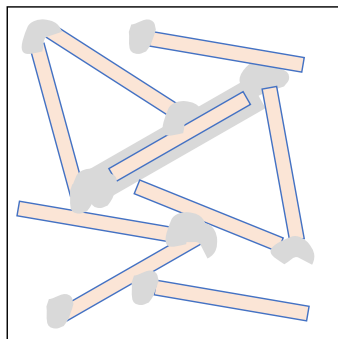
- **Composition**

- **multiphasique** (liant, particules végétales, pores,...)
- de composition finale exacte **mal connue**
- avec fort **contraste mécanique** entre phases

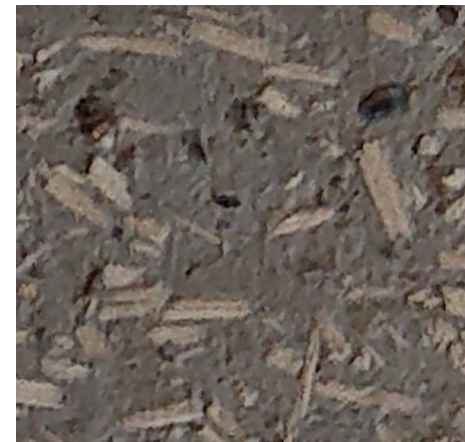
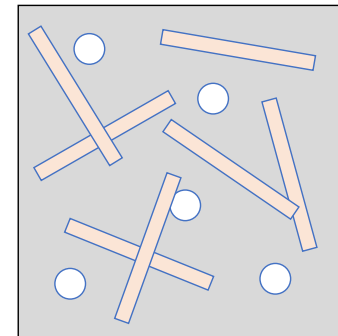


- **Concentration**

- Taux de remplissages **élevés** (dosage en liant de 10% à 40%)



Dilution



Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Richesse microstructurale

- **Composition**

- **multiphasique** (Liant, particules végétales, pores,...)
- de composition finale exacte **mal connue**
- avec fort **contraste mécanique** entre phases

- **Concentration**

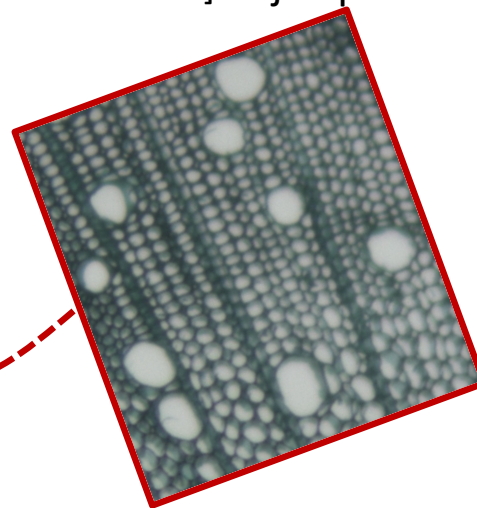
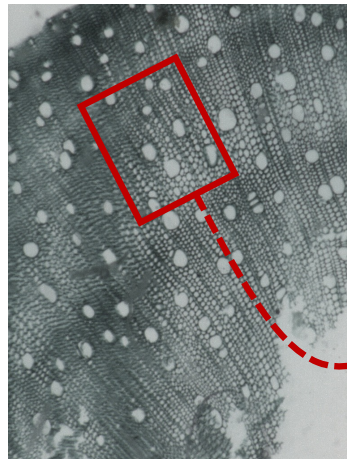
- Taux de remplissages **élevés** (dosage en liant de 10% à 40%)

- **Polydispersion**

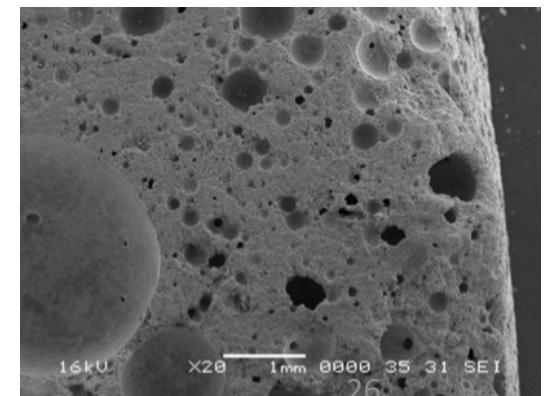
- **Particules de différentes tailles**
- **Porosité multi-échelles** (micro, méso, macro)
 - Interphase (souvent ouverte, entre particules, 1-5 mm)
 - Intrapase (ouverte ou fermée 2 ordres de grandeurs dans liant 30-700nm [Driss 2008] [Collet 2004] , 40 μ m [Laborel-Préneron 2018] et jusqu'à 100 μ m dans la chènevotte)



Chènevotte de chanvre :
échelle micro



Liant : échelle méso et micro

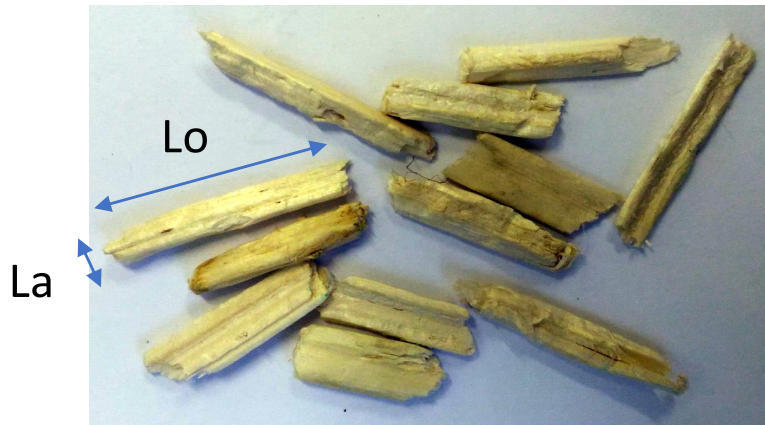


[Nguyen 2010]

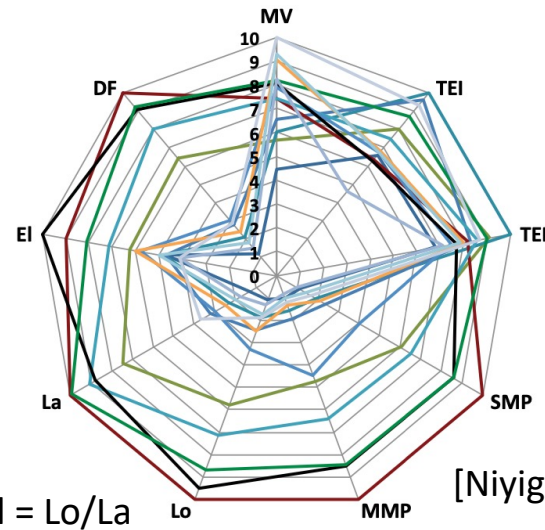
Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Richesse microstructurale

- **Distribution spatiale et morphologie**
 - Géométrie plaquettaire des chènevottes
 $Lo = 15\text{mm}$ $La = 4\text{mm}$ $e = 2\text{mm}$
 - ➔ Anisotropies primaire et induit
 - ➔ Renforcée par mise en œuvre



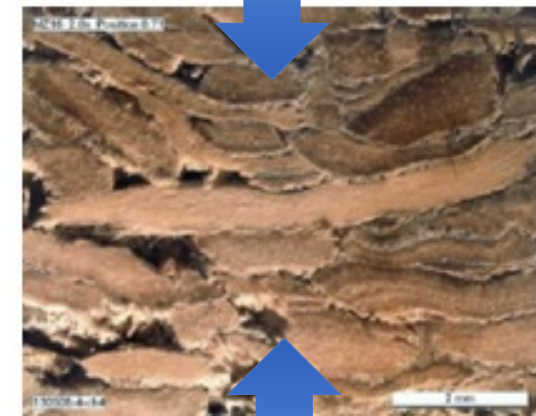
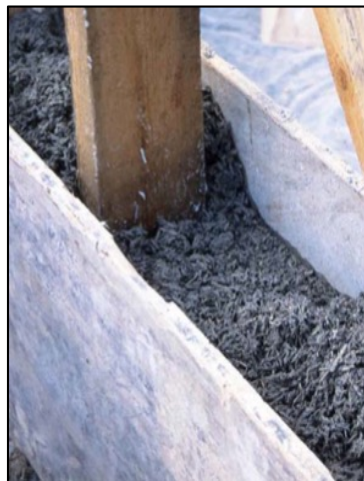
Comparaison de 13 types de chanvres



$EI = Lo/La$ Lo MMP
 $DE = \text{Diamètre équivalent}$



[Niyigena 2014]



[Nguyen 2010]

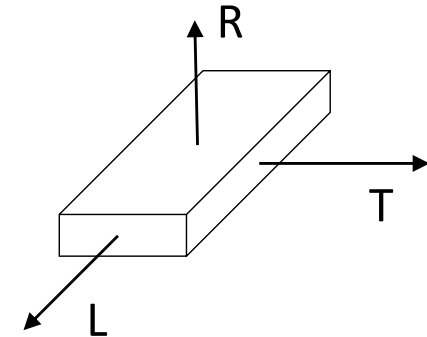
Stratification 27

Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Lois de comportement complexes

- **Comportement des phases**

- Quasi isotrope transverse de chènevotte
 → Anisotropie renforcée
- NL endommageable du liant, écrasement des particules
- Variabilité



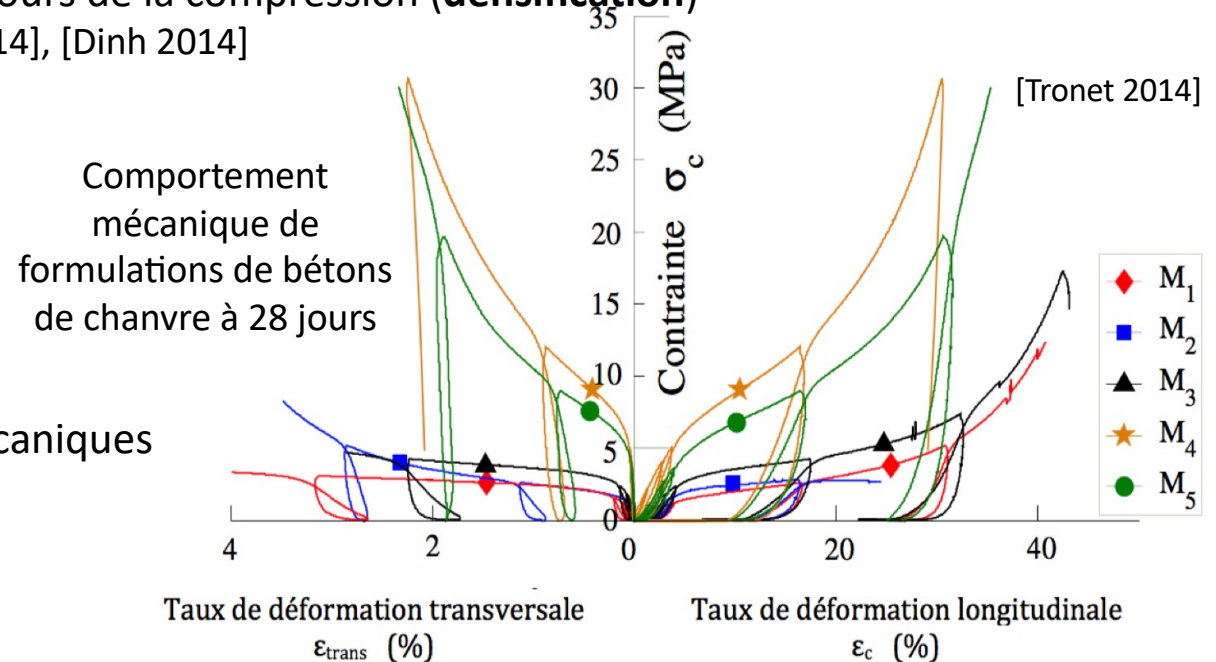
- **Comportement effectif**

- non linéaire : Pseudo-plasticité et effet rigidifiant (« écroûissage positif ») lié à la diminution de la porosité au cours de la compression (**densification**)
[Nguyen 2010], [Pham 2014], [Tronet 2014], [Dinh 2014]

- Déformation élevée à rupture
- Localisation

Mais aussi :

- Effets de taille des particules
- Couplages multi φ thermo-hygro-mécaniques
- Durabilité / vieillissement
- etc



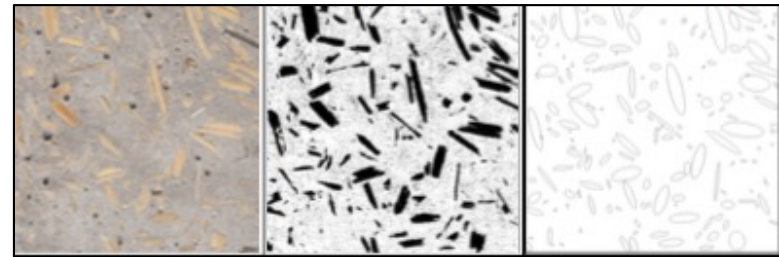
→ Pas de méthode micro-macro qui réponde **directement et simplement** à tous ces enjeux

Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

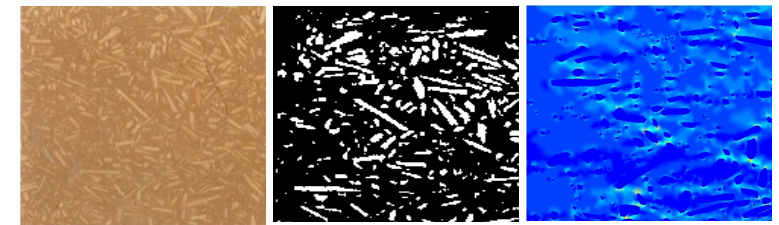
VERs et méthodes en champs complets

- **Travail sur microstructures « réelles »**
 - **micrographies optiques (2D)**
 - **microtomographies RX (3D)**
 - Taille et nombre des échantillons
 - Artefacts + Difficultés de maillage
- **Génération de microstructures**
 - Difficile d'atteindre des **taux de renfort élevés** sauf matériaux très polydisperses
 - Majorité des travaux sur sphères, ellipsoïdes, cylindres,... (pas plaquettes)

Analyse de micrographies, bétons de chanvre

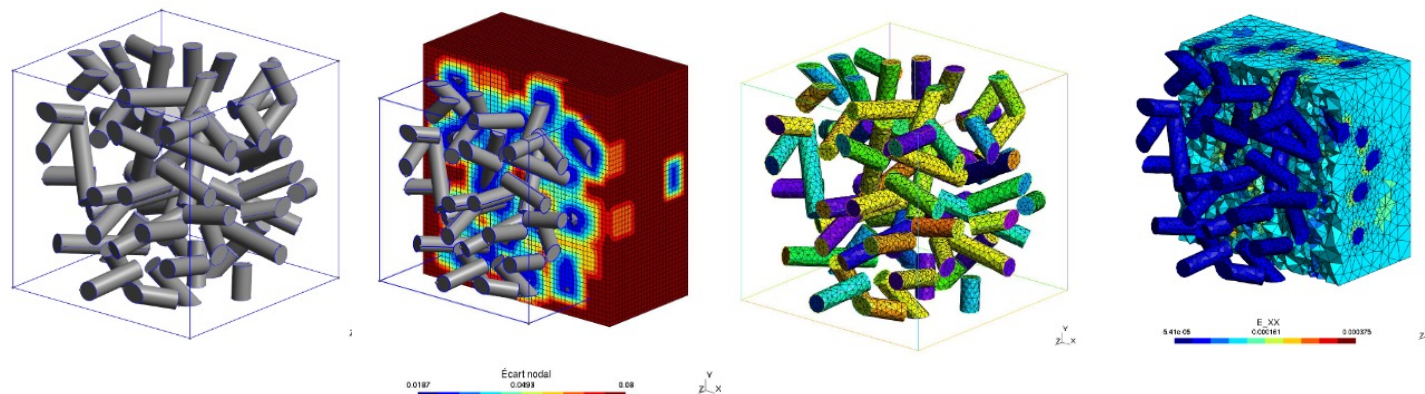
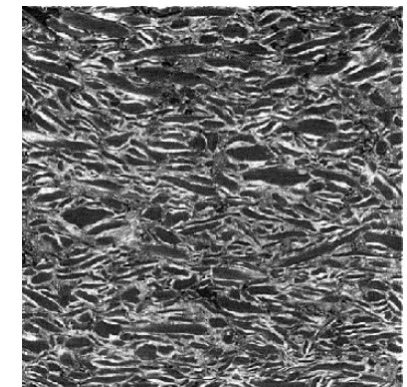


[Pham 2014]



[Hassanein 2011, Breittmayer 2012]

Ex : de microtomographie RX, béton de chanvre
[Tronet 2014]
Mesure volumique des taux de porosité



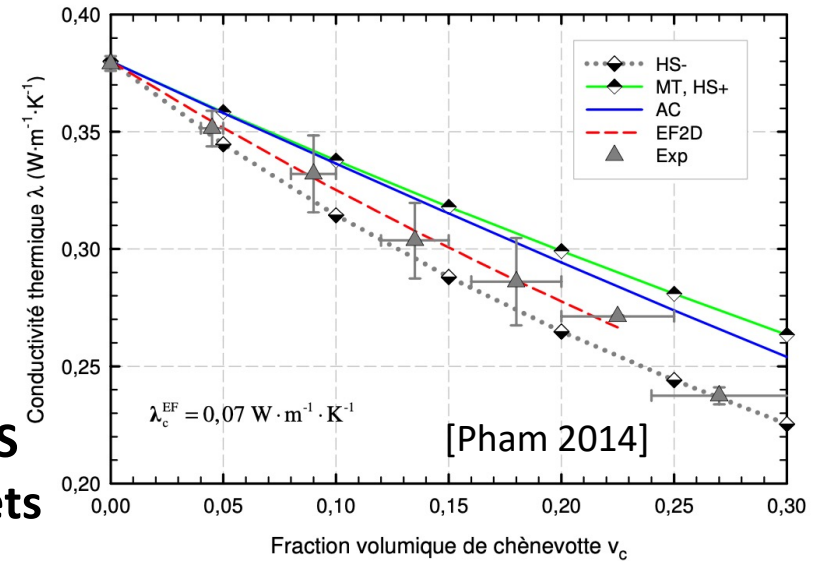
Développement d'une méthode de génération de microstructures
[Couture 2019]

Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Méthodes en champs moyens

- Sur les **bétons de chanvre**

- [Cerezo 2005]
- Schéma **auto-cohérent**
- [Pham 2014]
- **Mori Tanaka** et schéma **auto-cohérent** + Bornes HS
- **Comparaison** à des simulations en **champs complets**



$$\mathbb{C}^* = \mathbb{C}_0 + \sum_{\alpha=1}^N f_{\alpha}(\mathbb{C}_{\alpha} - \mathbb{C}_0) : \underbrace{\left[\mathbb{I} + \mathbb{P}_E^1 : (\mathbb{C}_1 - \mathbb{C}^*) \right]^{-1}}_{\mathbb{A}_1}$$

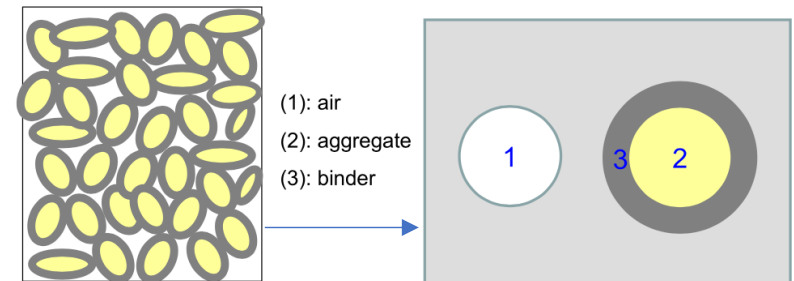
$$\mathbb{C}^* = \mathbb{C}_0 + \sum_{\alpha=1}^N f_{\alpha}(\mathbb{C}_{\alpha} - \mathbb{C}_0) : \underbrace{\left[\mathbb{I} + (1 - f_{\alpha})\mathbb{P}_E^1 : (\mathbb{C}_1 - \mathbb{C}_0) \right]^{-1}}_{\mathbb{A}_1}$$

$$\mathbb{P}_E^1$$

Tenseur d'influence de Hill (dépend notamment de la forme de l'inclusion)

- Sur les **bétons de bois** [Akkaoui 2017]

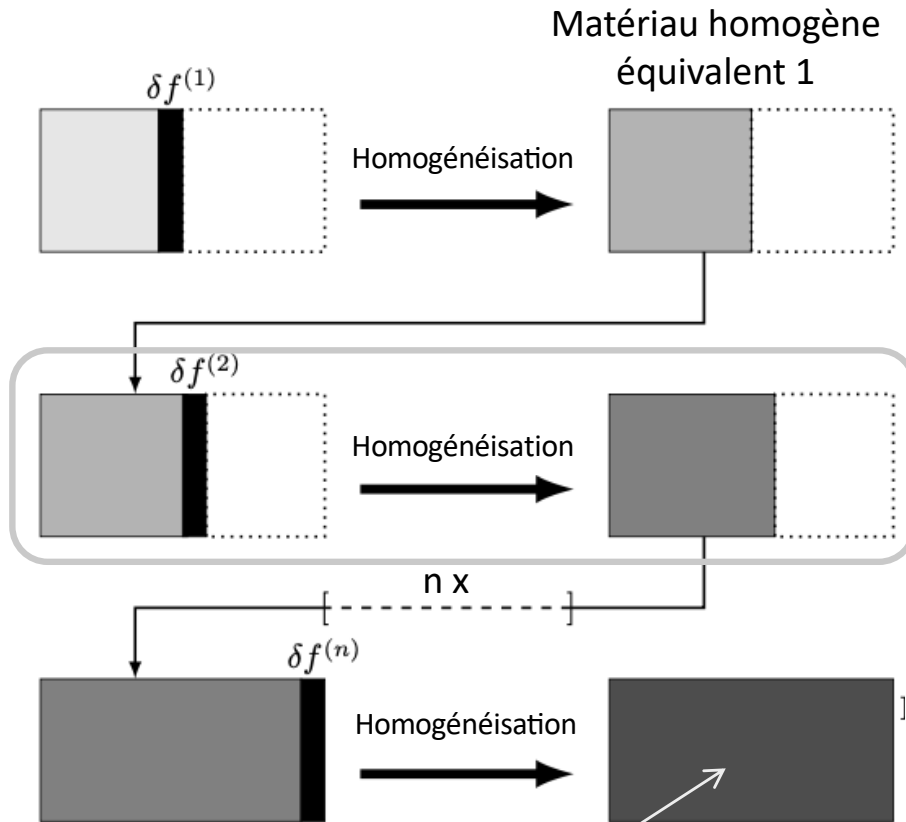
- Résolution et combinaison de deux problèmes
 - Pore dans matrice
 - Inclusions enrobée [Hervé et Zaoui 1993]
 - Toutes inclusions sont **sphériques**
- Schéma **auto-cohérent**



Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Méthodes d'homogénéisation itérative numérique

[Mom 2013], [Dartois et al. 2017]



Matériau homogène équivalent au BC étudié (même taux de remplissage)

Inspiré du schéma différentiel de Norris (1985) et Zimmerman (1991)

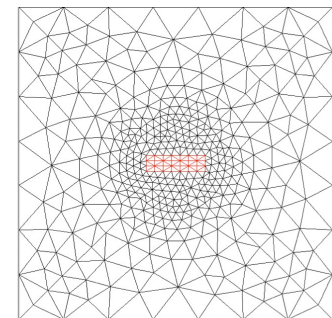
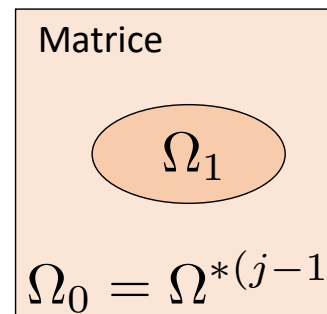
A chaque itération :

- Un problème local à résoudre
- Fraction d'inclusion = **faible**, + matériau bi-phasé = structure simple

$$f^{(j)} = \frac{\delta f^{(j)}}{(1 - f) + \sum_{p=1}^j \delta f^{(p)}}$$

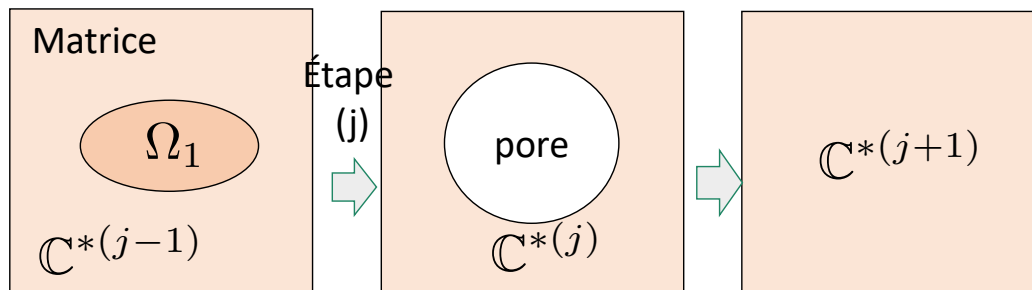
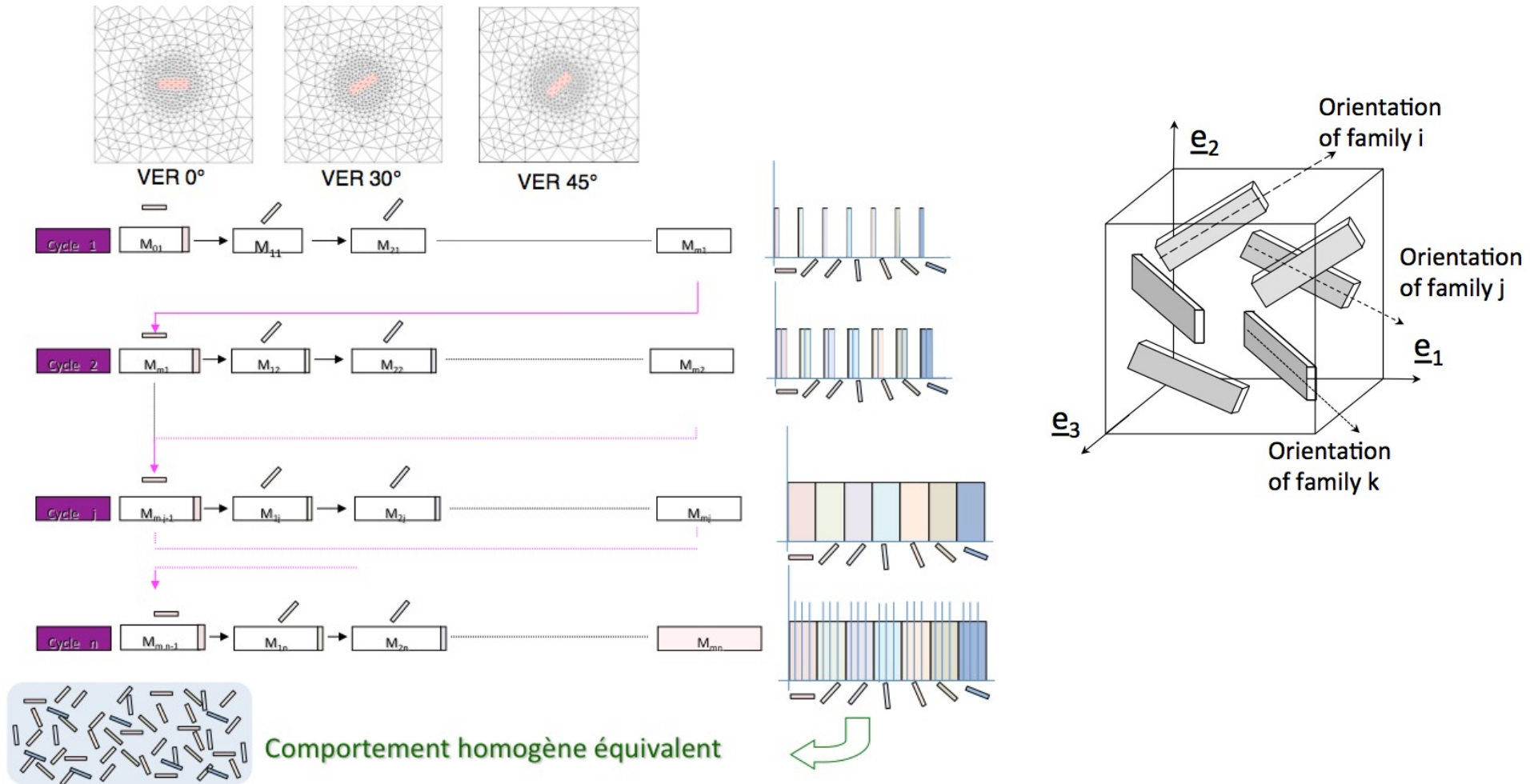
→ **Domaine de validité des techniques usuelles d'homogénéisation linéaires** y compris modèles en champs moyens.

→ Rapidité de mise en œuvre (résolution analytique ou numérique)



Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Méthodes d'homogénéisation itérative numérique



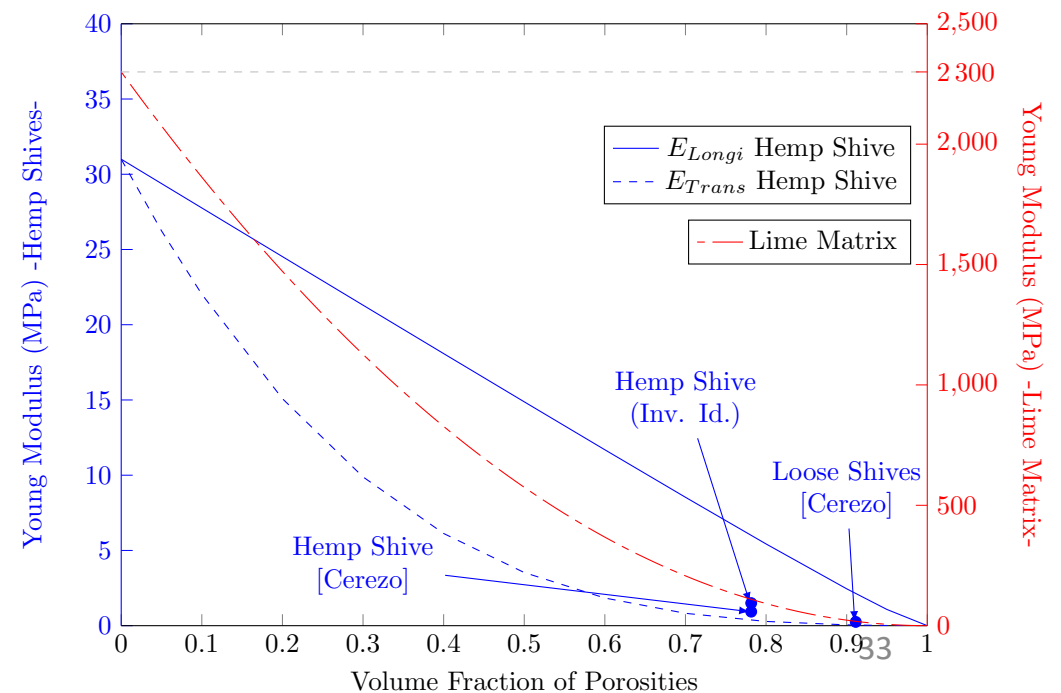
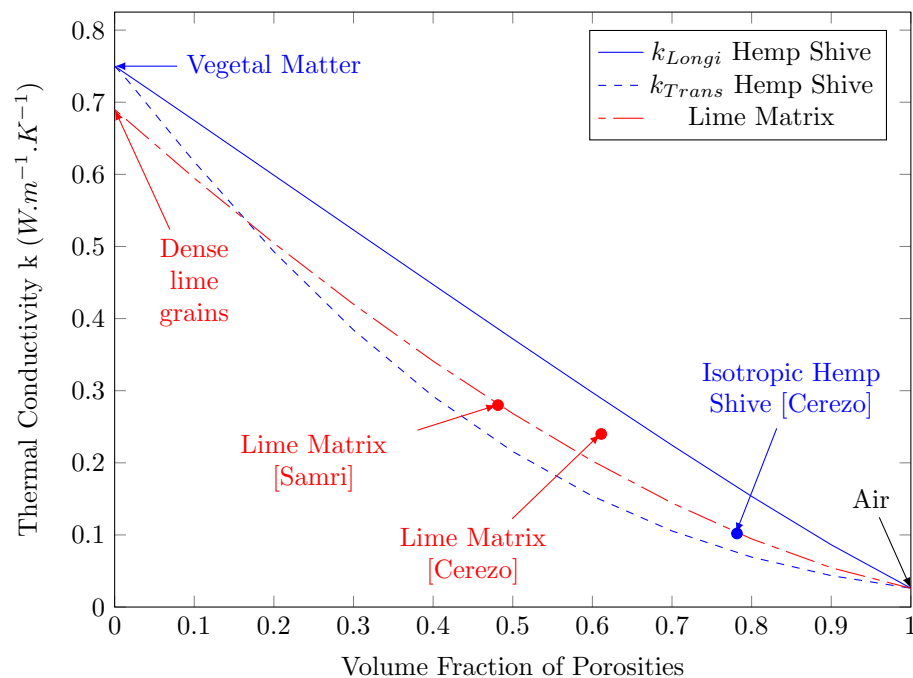
→ Possibilité de **changer l'orientation et la nature de l'inclusion** à chaque étape.

→ Milieu homogène équivalent = potentiellement **anisotrope**

Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Estimation du comportement des phases

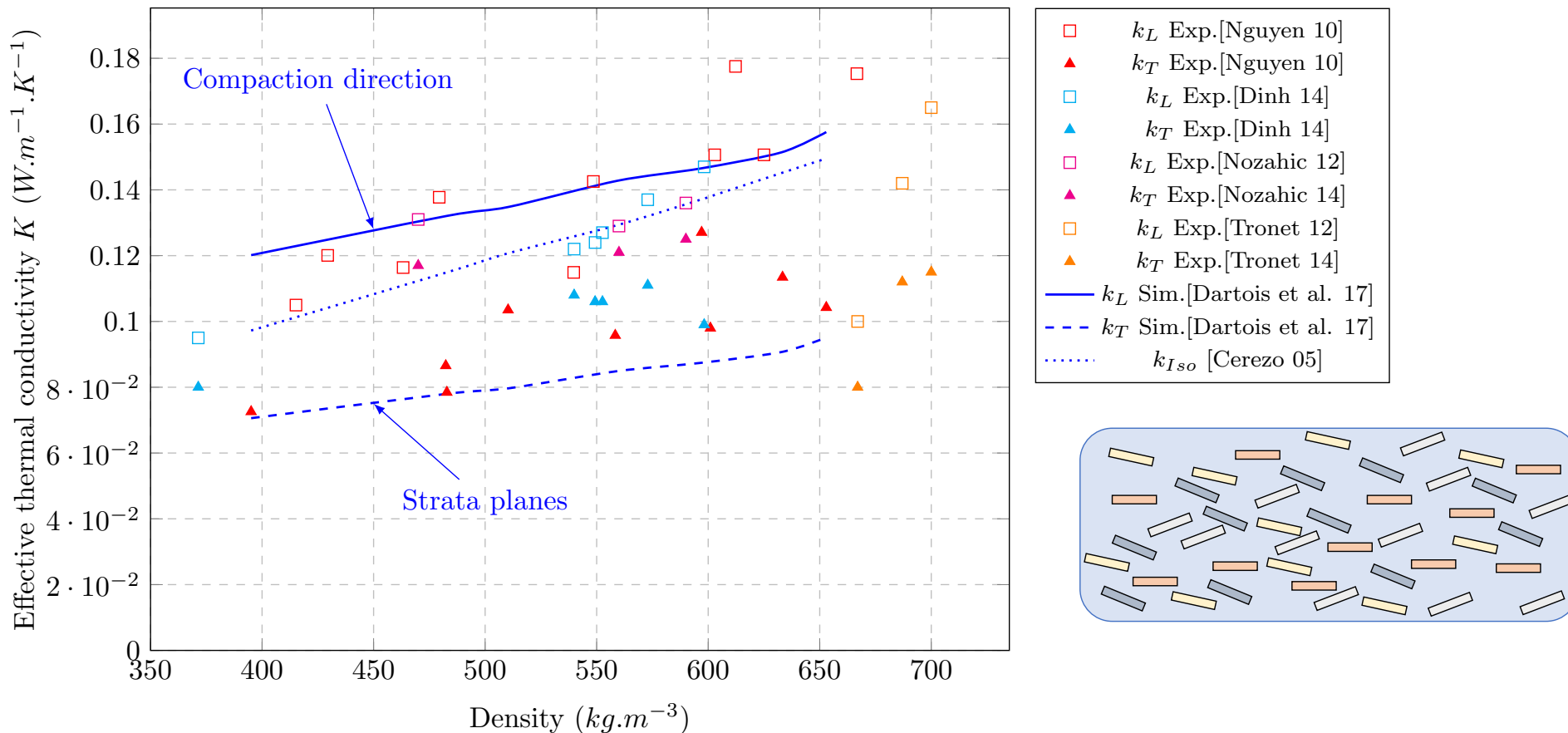
- Volonté de mise en œuvre pour déterminer le **comportement effectif de bétons de chanvre**.
- Pb : mauvaise connaissance des données d'entrée des modèles :
 - **Compositions réelles des bétons**
 - **Analyse inverse** à partir de la masse volumique
 - **Scenari d'évolution des porosités** en fonction du compactage
 - **Loi de comportement des chènevottes**
 - Mise en œuvre de la méthode itérative à l'échelle de la chènevotte



Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Identification du comportement effectif de bétons de chanvre

- **Béton compacté isotrope transverse** (conductivité thermique effective)



- **Simulations 3D**
- Poly-orienté plan
- **Différentes formulations**

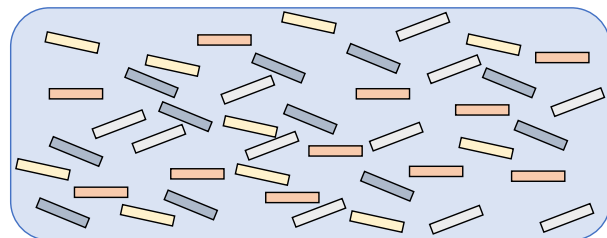
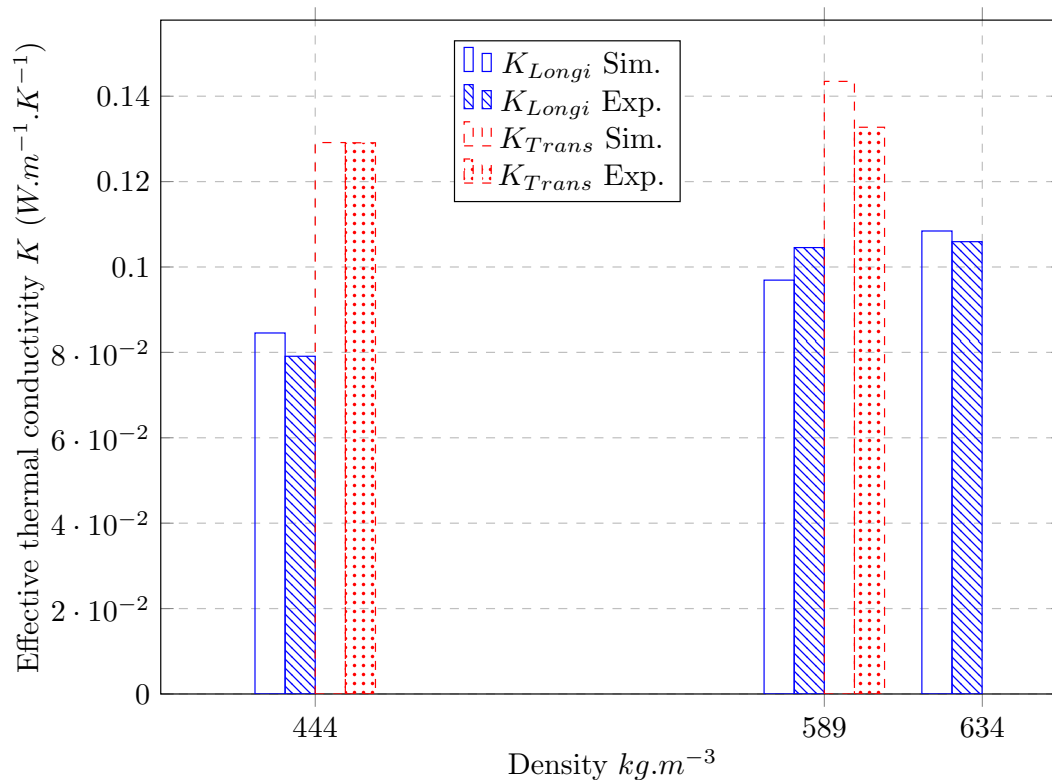
Rq : Schéma auto-cohérent : particules = distribuées aléatoirement, équivalent à sphères) → résultats de Cérézo retrouvés

→ Prise en compte de la morphologie permet de mieux approcher prédire le comportement anisotrope pour le cas de bétons compactés.

Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Identification du comportement effectif de bétons de chanvre

- **Béton compacté isotrope transverse** (conductivité thermique effective)

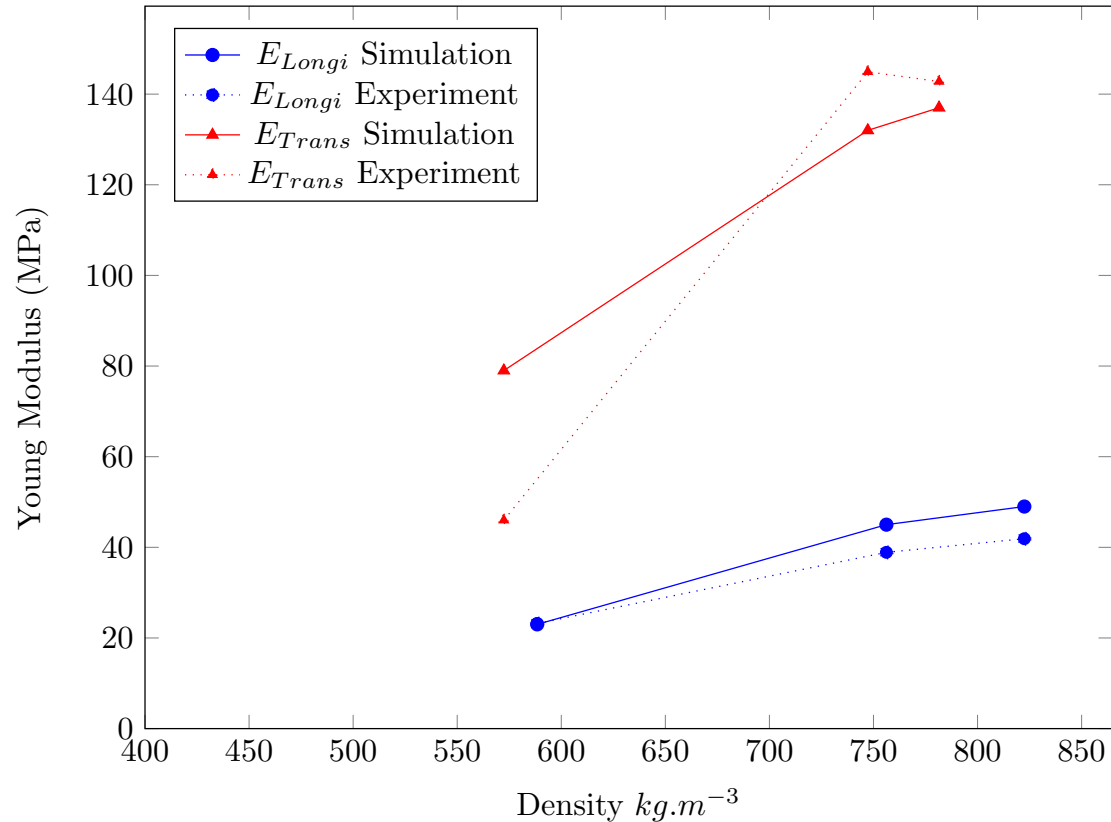


- **1 formulation de béton donnée** (Exp. [Nguyen 10])
- Mais **différents niveaux de compaction**.
- Calcul 3D
- Méthode itérative avec schéma dilué
- Matériau triphasé avec **prise en compte de l'évolution de la porosité** (jusqu'à l'écrasement des chènevottes)

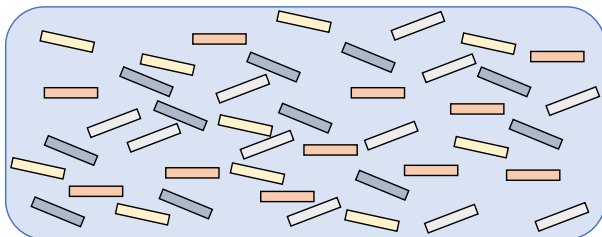
Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Identification du comportement effectif de bétons de chanvre

- **Béton compacté isotrope transverse** (rigidité effective)



- **1 formulation de béton donnée** (Exp. [Nguyen 10])
- Mais **différents niveaux de compaction**.
- Calcul 3D
- Méthode itérative avec schéma dilué
- Matériau triphasé avec **prise en compte de l'évolution de la porosité** (jusqu'à l'écrasement des chènevottes)



→ De nouveau bonne restitution du comportement isotrope transverse mesuré expérimentalement.

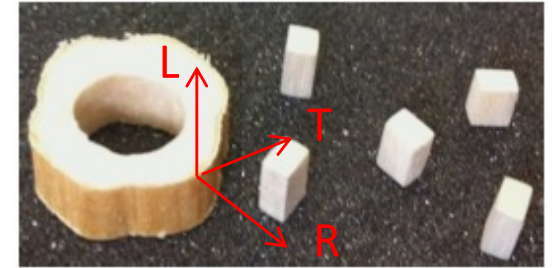
Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Identification du comportement anisotrope des particules végétales

- Pour améliorer les estimations en homogénéisation linéaire
 - **Mieux identifier les compositions** (à faire)
 - **Mieux estimer le comportement des particules végétales**

Problématique :

- **taille**, **poids** et **rigidité** des particules empêchent une caractérisation immédiate :
 - En traction (et dans une moindre mesure en compression)
 - Acoustique
- Peu de jeux de valeurs dans la littérature (Modules de Young ?)

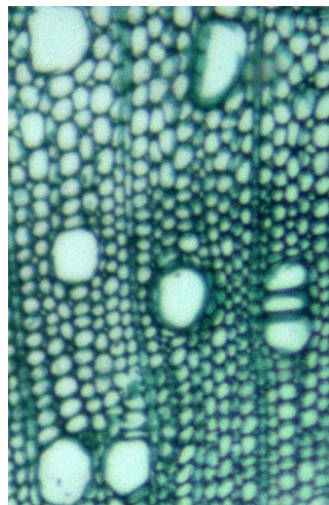


[Pham 2014]

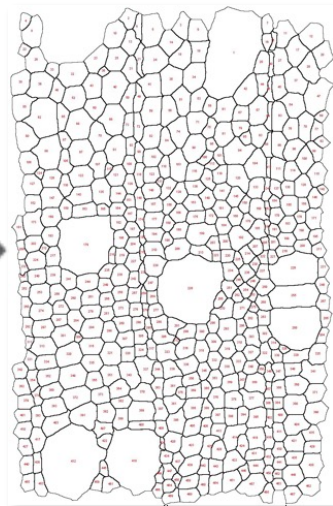
$$E_R = 52,$$

$$E_T = 30,$$

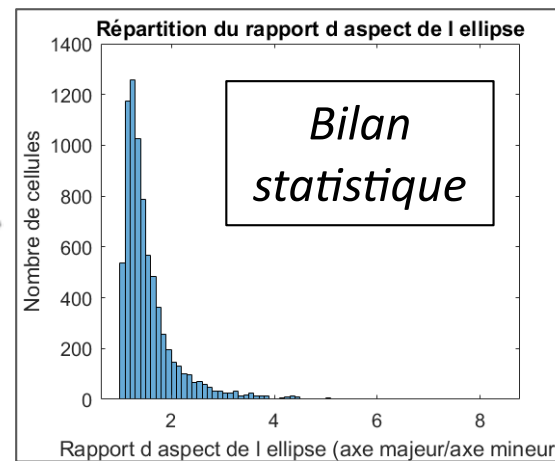
$$E_L = 419 \text{ (MPa)}$$



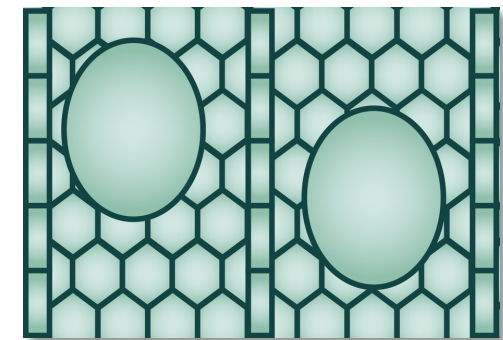
Micrographies



Traitement
d'image



Descripteurs
morphologiques



Microstructure idéalisée
+ Comparaison avec
simulations numériques

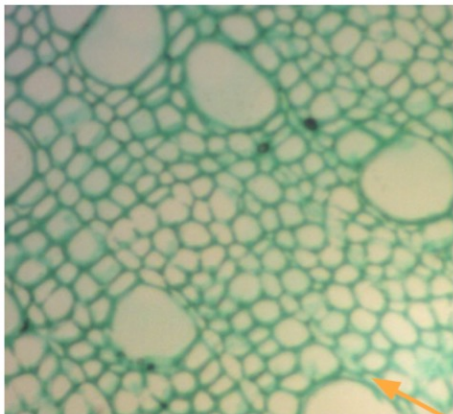
Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Identification du comportement anisotrope des particules végétales

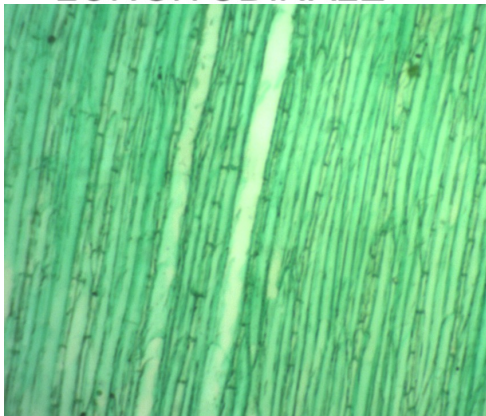
Obtention des micrographies :

1. Imprégnation
2. Inclusion dans milieu de découpe
3. Découpe au microtome
4. Coloration et Microscopie optique
5. Analyse d'image pour caractériser la

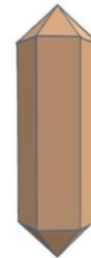
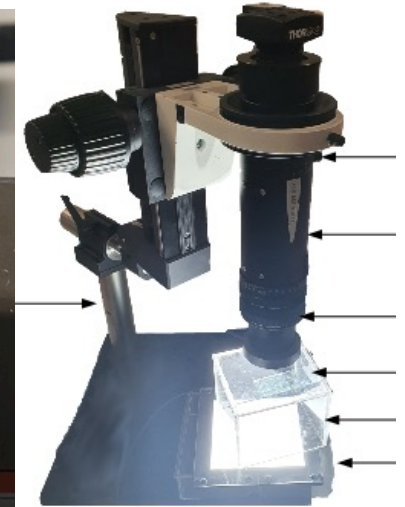
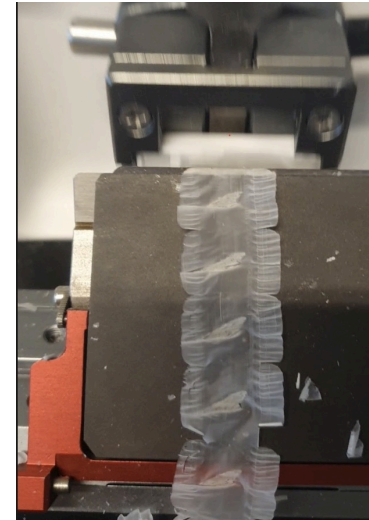
TRANSVERSALE



LONGITUDINALE



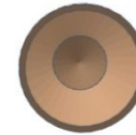
microstructure



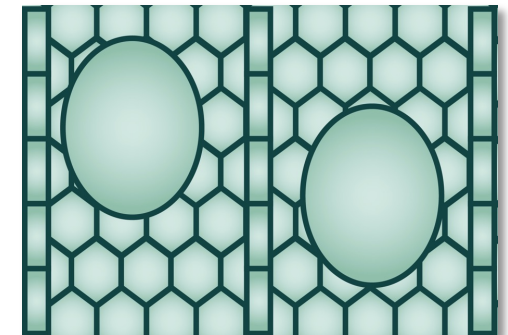
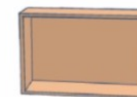
Trachéides
>80%



Canaux
~10%



Rays ~5%



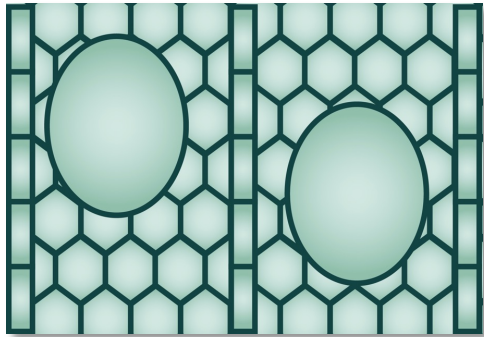
➤ Trois populations de canaux de sève

$$\rho = 258 \text{ kg.m}^{-3}$$

S Klintzing et A. de Lestrangé

Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Identification du comportement anisotrope des particules végétales

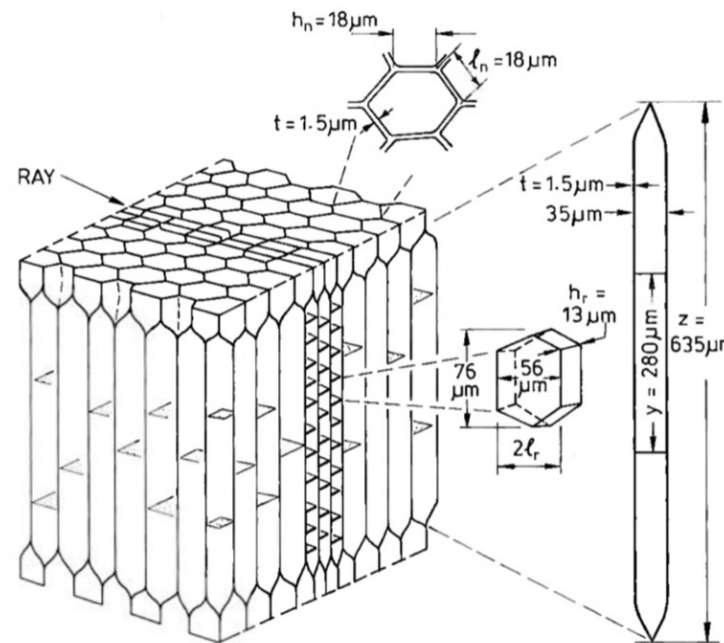
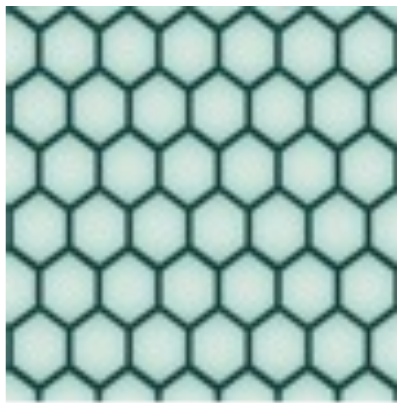


3D

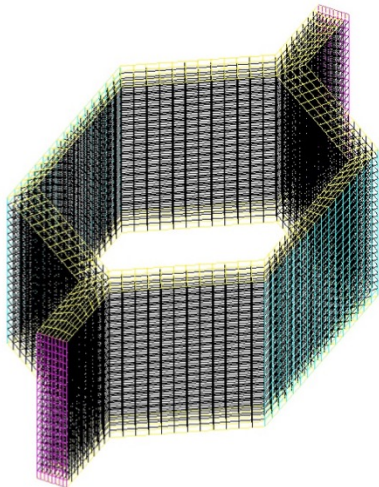
Idée =
**homogénéisation
itérative**

- **Modèle analytique** de [Gibson et Ashby 1988]
- **Simulation par MEF sur cellule périodique** (résolution sous Cast3M)
- Identification des **propriétés des parois végétales à partir de résultats de nanoindentation** de la littérature (Beaugrand et al. 2014)

ANALYTIQUE



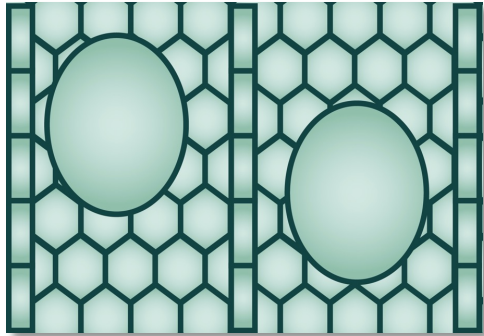
NUMÉRIQUE



Milieu homogénéisé résultant = **orthotrope**.
(hexagone non parfait)

Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Identification du comportement anisotrope des particules végétales



3D

Idée =
**homogénéisation
itérative**

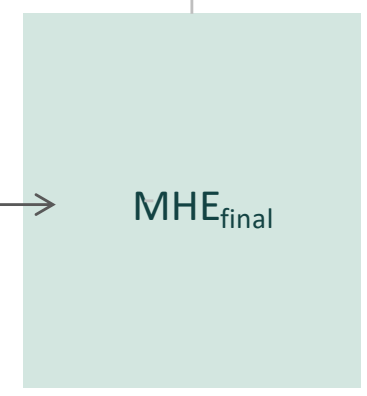
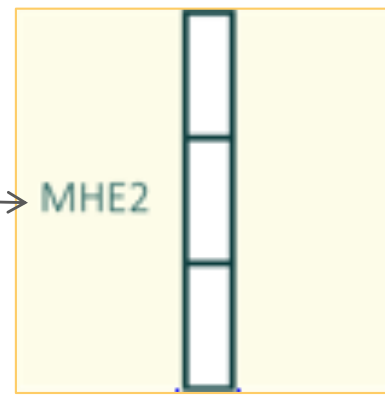
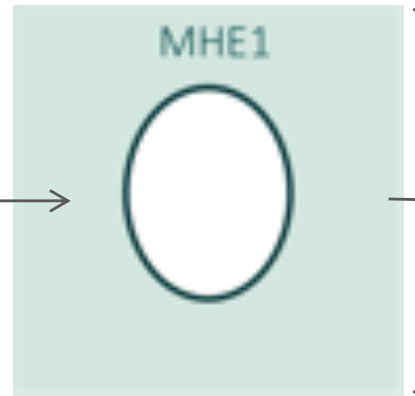
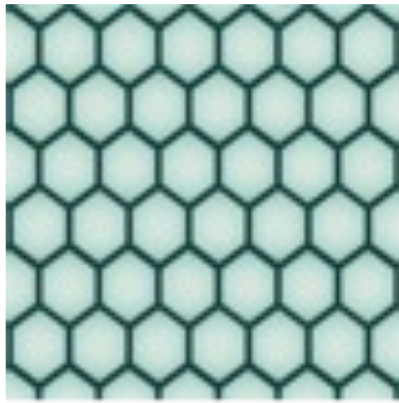
Propriétés mécaniques
homogénéisées transversales de la
chênevette

→ Travaux en cours (légère sous-
estimation)

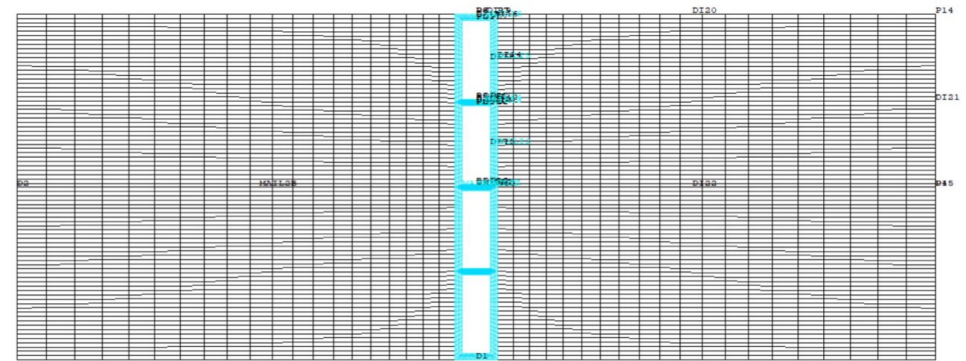
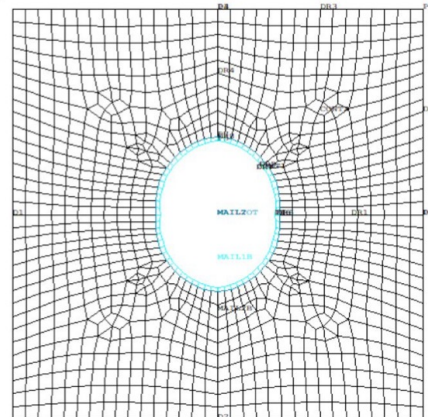
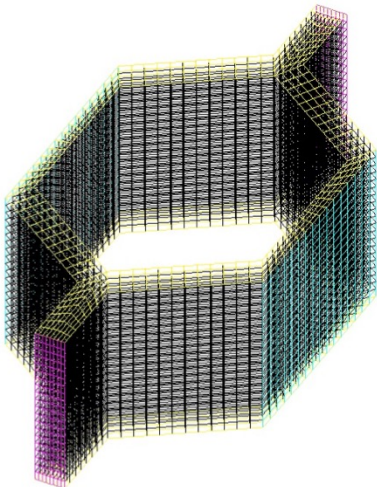
2D

2D

ANALYTIQUE



NUMÉRIQUE



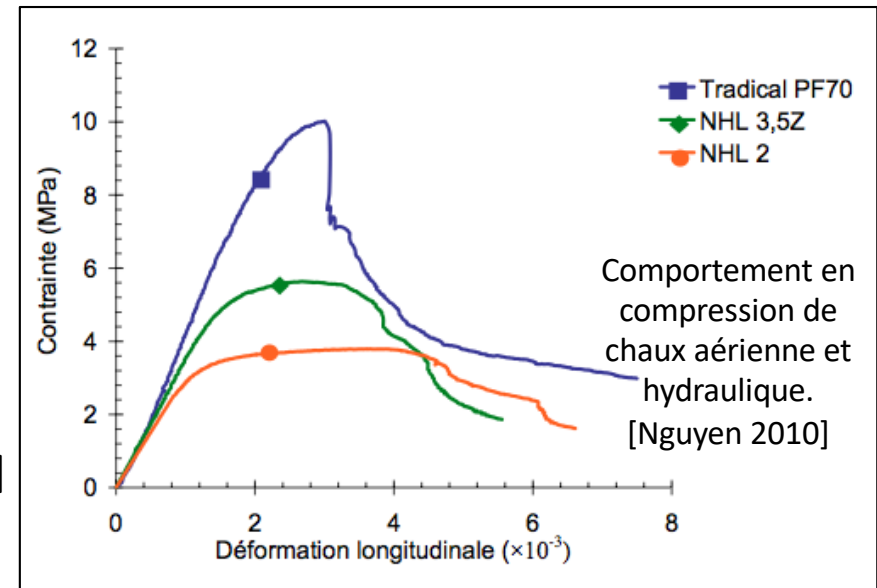
Inclusions = cylindres à section rectangulaire +
interaction non négligeable

Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Tentative de modélisation du comportement NL de la matrice

Hyp : Perte de non-linéarité aux **premiers stades** = **endommagement** de la matrice

- Matrice élasto-**endommageable** + **comportement dissymétrique traction/compression**
- Utilisation en 1^{ère} approche du **modèle de [Mazars 1984]**
- Mise en œuvre par procédure de **linéarisation sécante**



$$\sigma = [1 - d(\tilde{\varepsilon})] \mathbb{C}^0 : \varepsilon$$

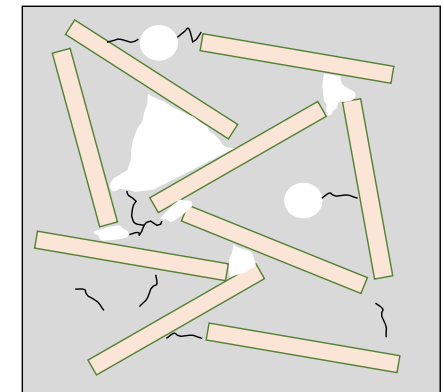
$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\sum_i \langle \varepsilon_i \rangle^2} \quad i \in \{I, II, III\}$$

$$d = \alpha_t(\tilde{\varepsilon})d_t + [1 - \alpha_t(\varepsilon)]d_c$$

$$d_c = f(E, \nu, \varepsilon_{cmax}, \sigma_{cmax})$$

$$d_t = f(E, \nu, \sigma_{tmax}, \sigma_R, \mathbf{f})$$

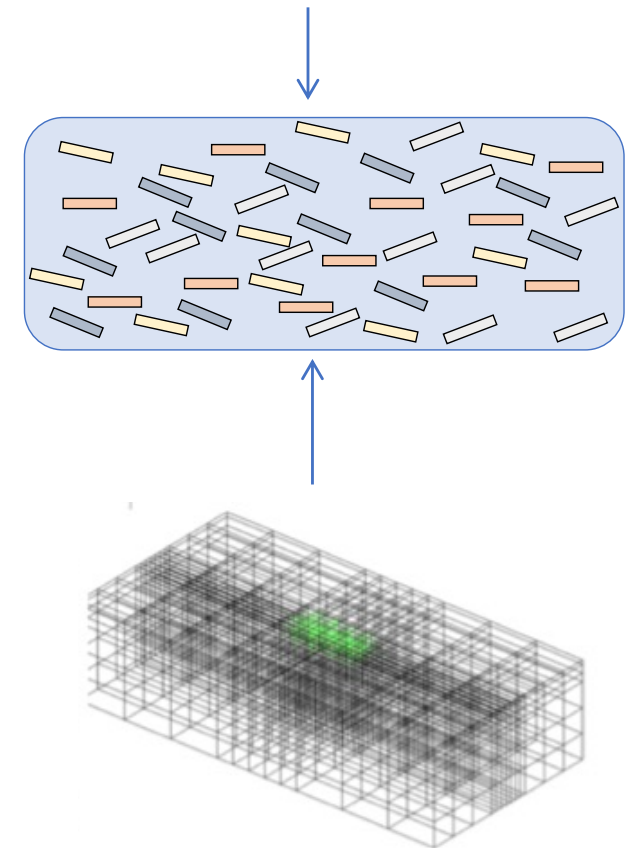
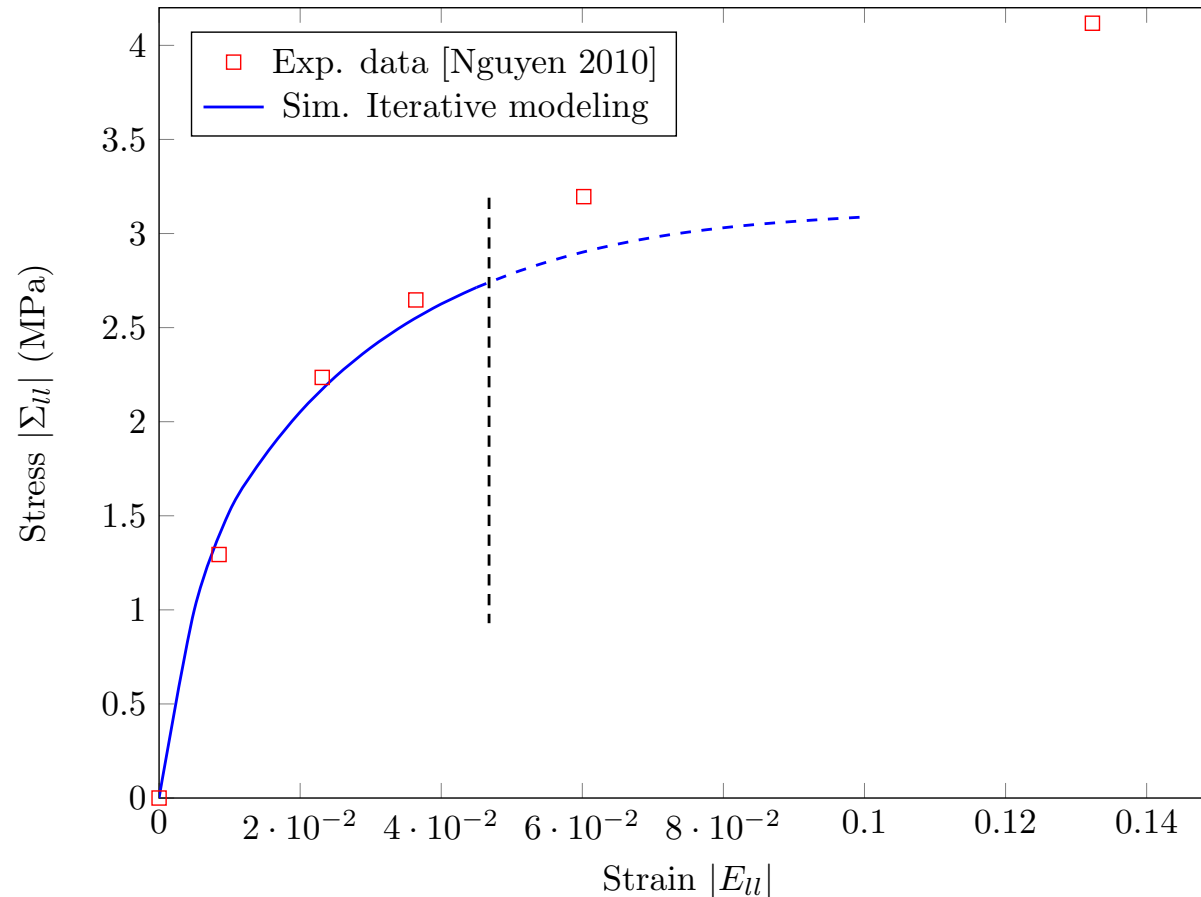
- **Endommagement diffus** (d scalaire, microfissures).
- Seuil d'endommagement dépendant de ε .
- **Dissymétrie traction/compression.**



Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

Tentative de modélisation du comportement NL de la matrice

- Prédiction du comportement non-linéaire de **bétons de chanvre compactés**
- Prise en compte du **comportement élastique endommageable du liant**



- Capture du **début de la courbe non-linéaire.**
- Divergence en raison de l'apparition d'autres phénomènes de dégradation microscopique (**fermeture de pores à différentes échelles, écrasement de chènevotte,...**)

I. Réduire l'empreinte environnementale de la construction

→ *Revue non exhaustive de pistes explorées*

1. Les matériaux de construction
2. Dimensionnement structurel
3. Urbanisme et équipement

- Plan -

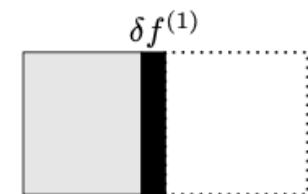
II. Comprendre et prédire le comportement des bétons végétaux

1. Objectifs et moyens à disposition + rappel homogénéisation linéaire
2. Difficultés liées au matériau étudié
(*Richesse microstructurale + Lois de comportement complexes*)
3. Mise en œuvre de méthodes d'homogénéisation linéaires sur ces matériaux
(*Méthode d'homogénéisation itérative numérique*)
4. Estimation du comportement des phases
5. Comportement effectif de bétons de chanvre compactés
6. Identification du comportement des particules végétales
7. Tentative de prise en compte du comportement Non Linéaire de la matrice

III. Conclusion, perspectives et questions

Conclusion perspectives et questions

- Les **approches micromécaniques** permettent de décrire les propriétés effectives en tenant compte de la **richesse microstructurale** des milieux
- Un **modèle d'homogénéisation itérative numérique** permet de s'adapter aux **spécificités des bétons végétaux**.
 - **Taux d'inclusions élevé**
 - **Polydispersion** (nature et taille de inclusions variable)
 - **Morphologie plaquettaire** des inclusions et **anisotropie initiale & induite**
 - Temps de calcul limité
- Sa mise en œuvre permet **d'estimer les propriétés effectives anisotropes des bétons végétaux** en thermique et en élasticité.
- Elle permettra à très court terme **d'estimer également les propriétés des particules végétales** (faisabilité prouvée, valeurs quantitatives en cours d'obtention)
- L'utilisation du modèle d'homogénéisation itératif numérique permet de décrire les **premiers stades du comportement non-linéaire de bétons végétaux** par endommagement de la matrice

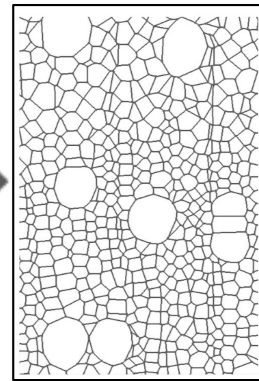
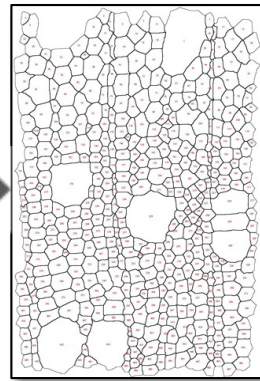
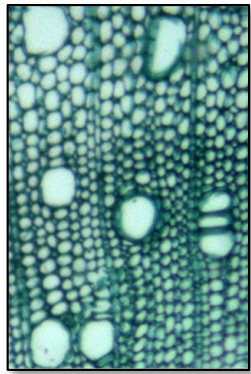


Conclusion perspectives et questions

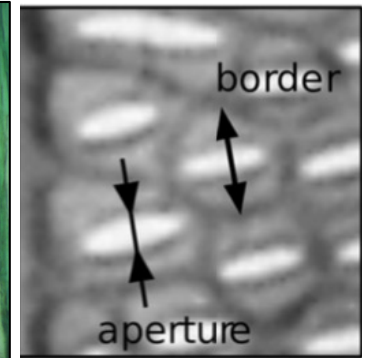
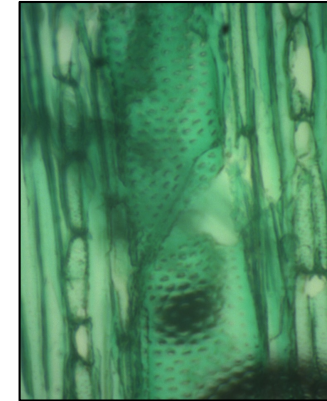
Pour améliorer la qualité des estimations :

1. Mieux identifier les données d'entrée des méthodes d'homogénéisation

- **Propriétés des phases** (en particulier les particules végétales)
 - Modélisation itérative : (en cours)
 - comparaison avec méthodes en champs complets (taille du VER ?)
 - Paroi végétales = composite anisotrope

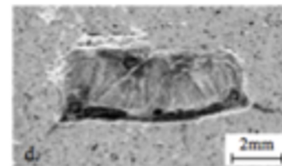


Maillage généré
par croissance
de grains à partir
des données
morphologiques

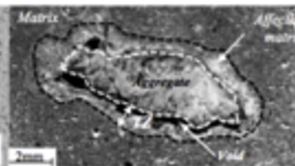


[Helmling et al. 2018]

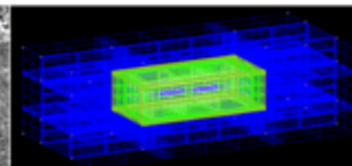
- **Compositions après mise en forme et séchage** (i.e. en conditions d'utilisation)
- **Meilleure description des morphologies, distributions et arrangements spatiaux**
 - Exploitation d'images microstructurales (**modèles de distribution statistique** des tailles et orientations,...) et meilleure description de **l'anisotropie initiale + effets de taille**
 - Particules avec **défauts d'interfaces** (modèles d'interfaces, phase supplémentaires,...)



V. Nozahic, 2011



V. Nozahic, 2011



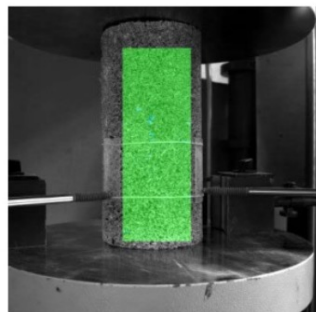
Col A. Hassanein, 2011

Conclusion perspectives et questions

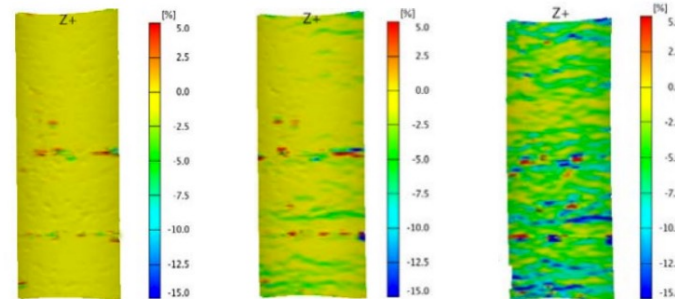
2. Enrichissement de la modélisation :

- Extension de la méthode d'homogénéisation numérique à **d'autres comportements non linéaires**
 - ex : Pseudo-plasticité, effet rigidifiant (évolution de porosité, friction de lèvres de fissures)
- Prise en compte de **l'évolution des microstructures**
 - Évolution de la porosité, orientations -tenseurs de texture-,...
 - Utilisation de **critères micromécaniques exploitant les champs locaux** (Brini, Zouari, Smaoui 2004-06)
 - Passage aux **transformations finies**.
- Phénomènes de **localisation dans les derniers stades de compression**

Sujet de stage et de thèse 2023



Dispositif de mesure avec ARAMIS®



phase quasi-élastique linéaire

régime en plateau

régime de densification

Visualisation de l'évolution du champ de déformation longitudinale par mesure optique ARAMIS®

[Nguyen 2010]

- **Optimisation** des formulations et microstructures

Agenda et Ouverture

Des RVs en 2023 pour en savoir plus :



- **Semaine des GT Mécamat** fin juin : GT Écomatériaux
- **Webinaire** du 4 juillet 2023 : *Projets internationaux et chaires en lien avec les matériaux de construction biosourcés*
- **École d'automne** Bagnères de Bigorre 17-20 Octobre



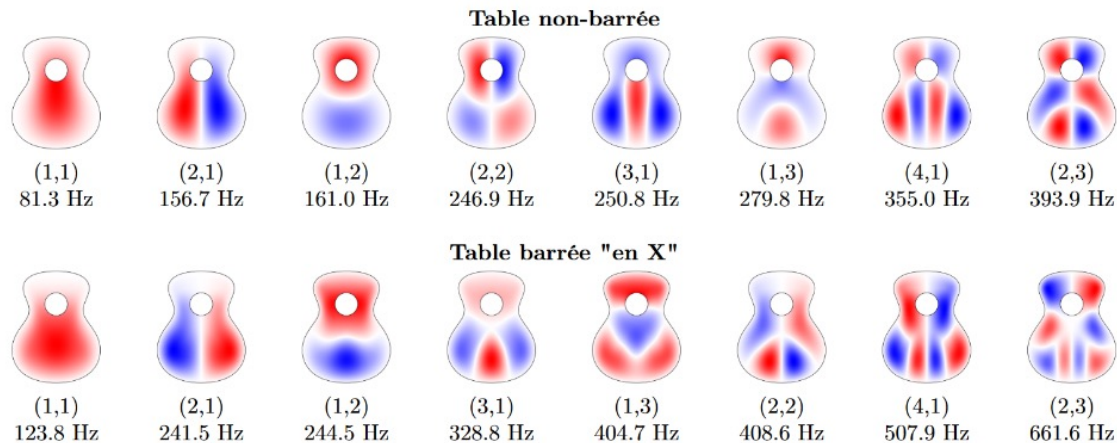
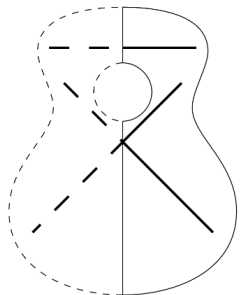
GdR MBS
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

Pour d'autres discussions GrrGr... (application à un autre secteur)

Thèse Yvan Giro

Écoresponsabilité et facture instrumentale

J.L. Le Carrou, A. Vincenti, B. Navarret (IReMus) , R. Viala (ITEMM), S. Dartois



Guitare avec fibres de lin (Fred Kopo)