

Du végétal au composite minéral–végétal

Qui gouverne la mécanique ? Porosité, interface, végétal — et la rigueur de l'essai

Sofiane Amziane

Université Clermont Auvergne – Institut Pascal

Déroulé — trois idées, un fil rouge : l’essai

Culture du végétal : de la paroi aux cendres

Mécanique : deux courbes, une inversion de rigidité

qui gouverne la mécanique ?

I La porosité

II L’interface

III La mécanique du végétal : l’inversion de rigidité

Synthèse : le rapport d’essai, débat, conclusion

---

60 min

La photosynthèse, origine de la matière végétale

$$6\,CO_2 + 6\,H_2O \xrightarrow{\text{lumière}} C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2$$

Glucose
brique de base

- **Cellulose** — *chaînes linéaires de glucose → microfibrilles*
- **Hémicelluloses** — *sucres variés, chaînes ramifiées*
- **Lignine** — *voie phénylpropanoïde → polymère aromatique*

Carbone stocké *bilan*

≈ 1,7 kg CO_2

fixé par kg de chènevotte sèche

Teneur en carbone

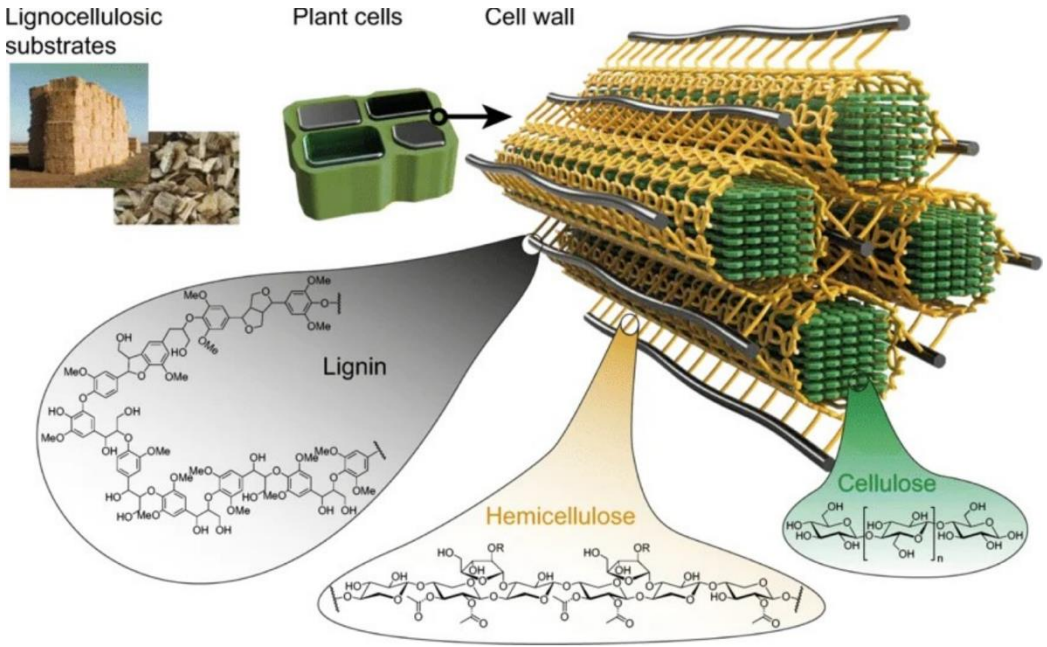
≈ 45–50 %

de la masse sèche

Tout ce que l'on testera ensuite a d'abord été du CO_2 de l'air.

Ordres de grandeur : 47 % C × 44/12 ≈ 1,7 kg CO_2/kg ; varie selon l'espèce, la partie de la plante et l'humidité.

La paroi cellulaire, un composite naturel



Cellulose *renfort*

130–150 GPa

Hémicelluloses *interface*

5–8 GPa

Lignine *matrice*

2–6 GPa

Modules : ordres de grandeur, à l'état sec.

Figure : cours S. Amziane & Y. E. Belarbi, Biobased Building Materials

Du lignocellulosique au minéral



Fibres

cellulose élevée

renfort



Granulats

cœur ligneux

charge isolante



Bois

copeaux, structure

charge, ossature



Biochar

C 50–90 %

filler, cure interne



Cendres

SiO_2, CaO, K_2O

liant partiel

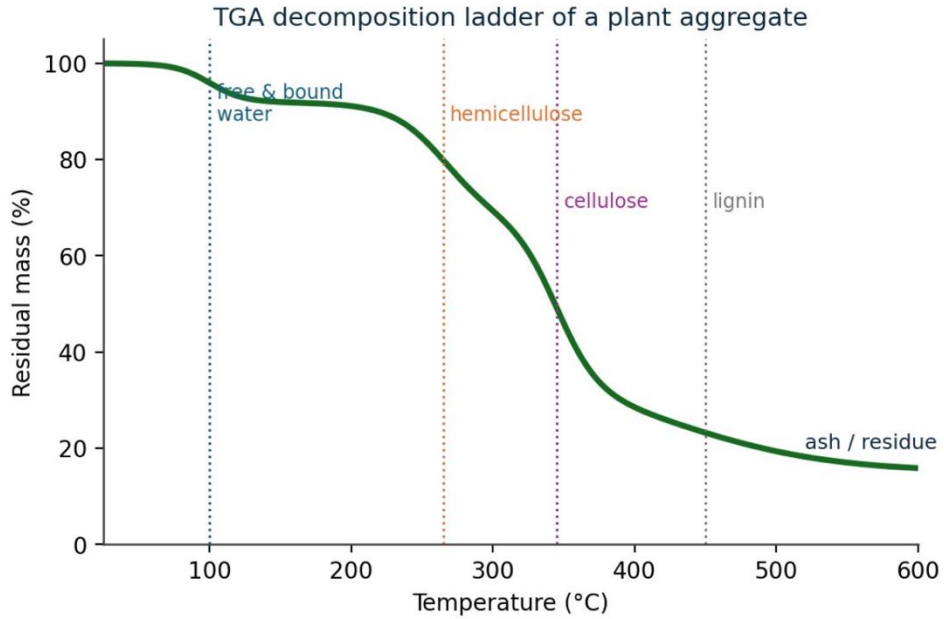
Lien avec l'ATG : biochar = résidu d'une chauffe sans O_2 ; cendres = résidu d'une chauffe avec O_2.

Fibres, granulats et bois remplacent une partie du squelette ; cendres et biochar une partie du liant.

Photographies : cours S. Amziane & Y. E. Belarbi, Biobased Building Materials

Stabilité thermique ≠ performance mécanique

Ordre de dégradation (ATG)



Rigidité croissante

Lignine	2–6 GPa
Hémicelluloses	5–8 GPa
Cellulose	130–150 GPa

La lignine est la plus stable à la chaleur ; c'est pourtant la cellulose qui porte la charge.

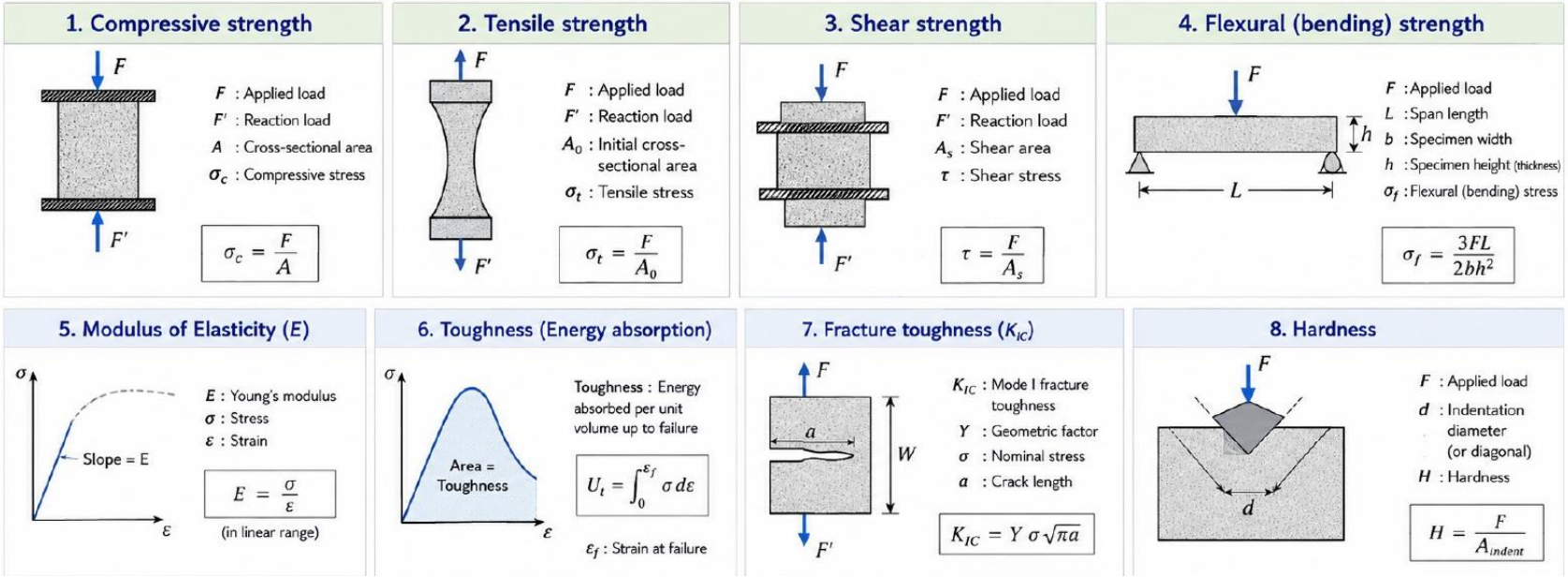
Figure : cours S. Amziane & Y. E. Belarbi, Biobased Building Materials

Composition des matières lignocellulosiques

Matière	Cellulose	Hémicell.	Lignine	Pectines	Tanins
Fibres de lin, chanvre	65–85	10–20	2–5	1–4	< 1
Fibre de coco	35–45	15–25	40–45	—	présents
Chènevotte	44–48	18–25	21–28	3–6	< 1
Anas de lin	45–50	20–25	23–28	2–5	< 1
Miscanthus	40–45	25–30	20–25	< 2	< 1
Paille blé, colza	35–40	25–30	15–20	1–3	< 1
Tournesol (tige + moelle)	30–40	20–25	15–20	5–15	~ 1
Résineux (épicéa, sapin)	40–45	25–30	27–32	~ 1	< 2
Feuillus (chêne, châtaignier)	40–45	20–25	22–28	1–2	5–15

% massique sec, valeurs indicatives.

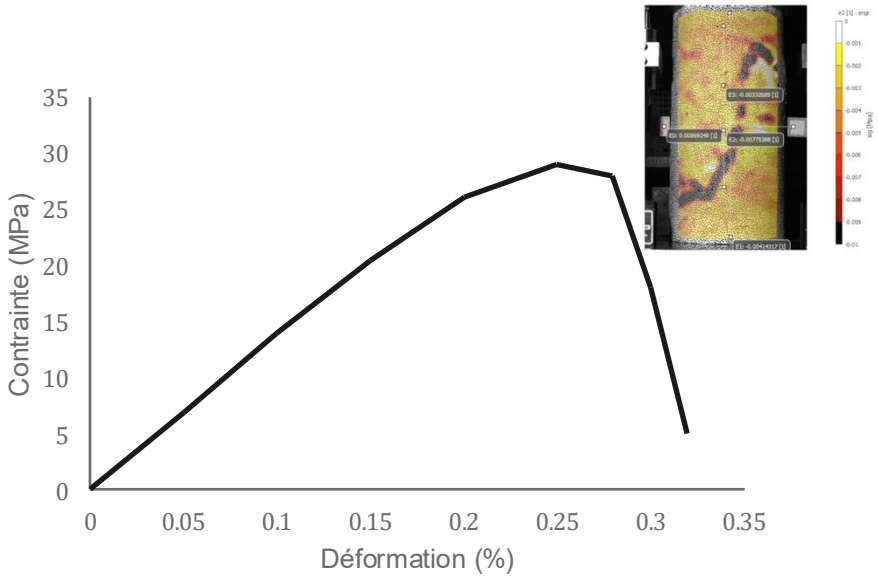
Les essais mécaniques usuels



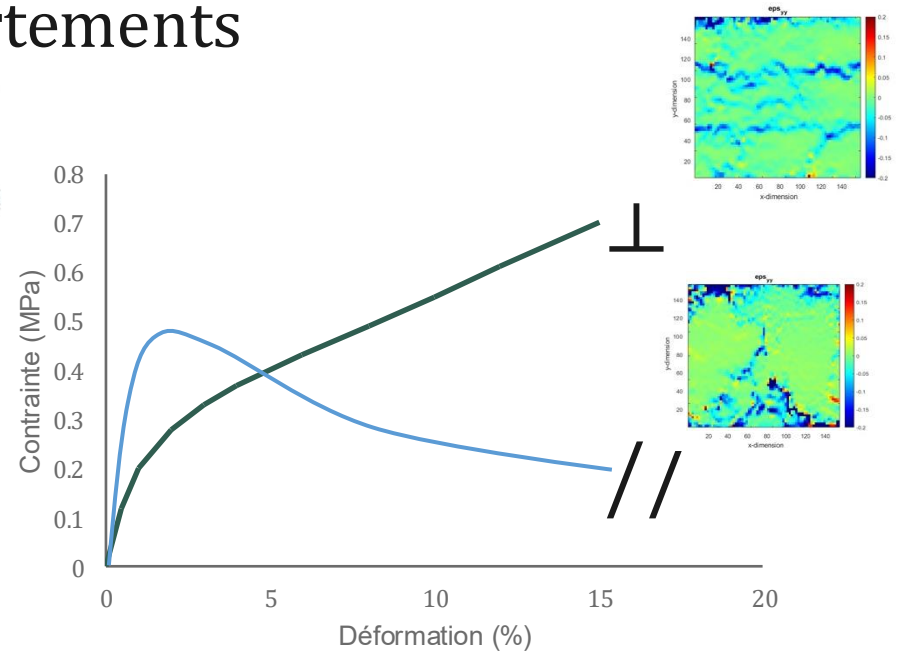
Pour un béton végétal, la compression est l'essai de référence ; la flexion et la traction mesurent surtout le liant et le pontage par les fibres.

Figure : cours S. Amziane & Y. E. Belarbi, Biobased Building Materials

Deux matériaux, deux comportements



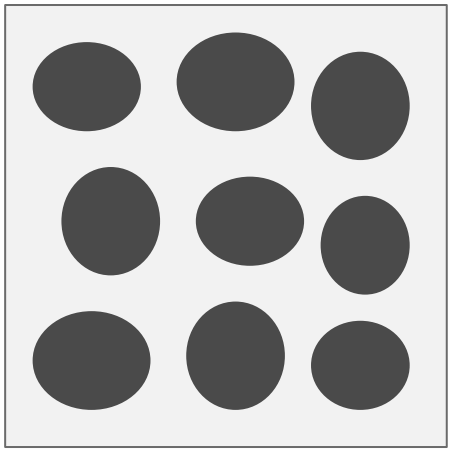
Béton ordinaire : pic net, rupture fragile



Béton de chanvre : pas de pic, densification en ⊥ / et l'inverse en //

Qu'est-ce qui, dans la microstructure, explique cette différence ?

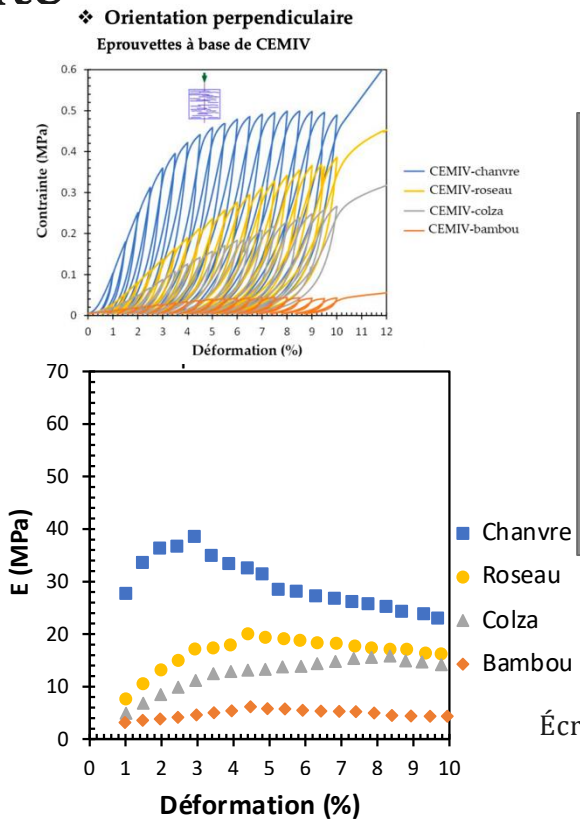
L'inversion de rigidité



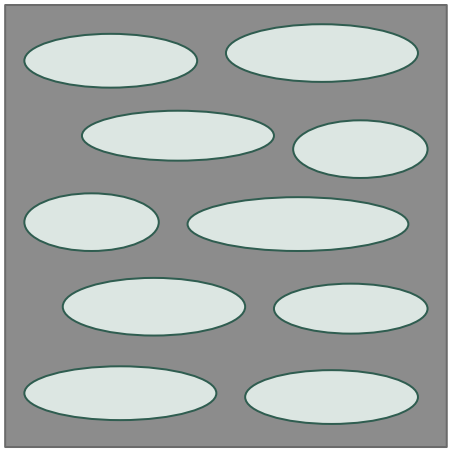
Béton ordinaire

E granulat > E matrice

Fissure qui contourne les granulats → pic rupture fragile



Particules orientées ⊥ au compactage



Béton végétal

E granulat < E matrice

Écrasement des particules et des pores → densification, pas de pic

Même végétal, rôle inversé

Biocomposite lin / polymère

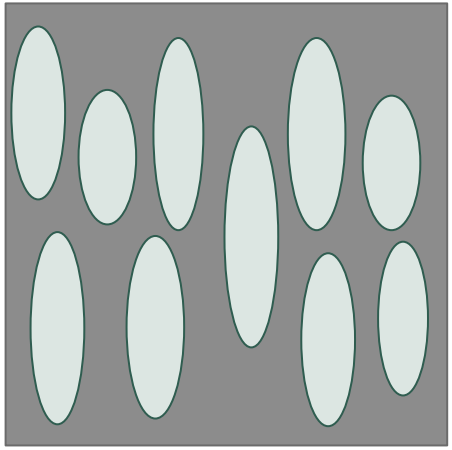
- E fibre ≈ 50 GPa > E matrice ≈ 1–3 GPa (PP, époxy)
- La fibre renforce : composite au sens classique
- La fibre travaille dans son axe
- L'humidité fait chuter E et gonfler la fibre

Béton végétal

- E granulat < E matrice : le liant devient le squelette
- La particule s'écrase : densification, pas de pic
- La paroi est chargée en travers : E transverse d'une fibre de lin ≈ 1,7 GPa
- L'humidité : gonflement différentiel contre un liant qui ne suit pas

Ce qui décide n'est pas la matière, c'est la hiérarchie de rigidité.

Particules orientées // au compactage

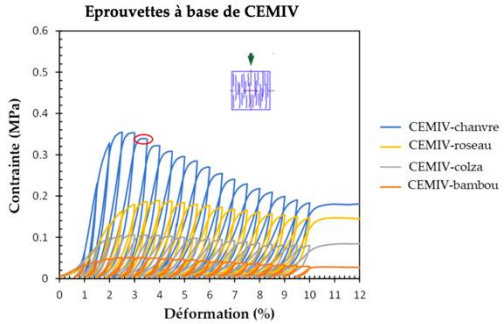


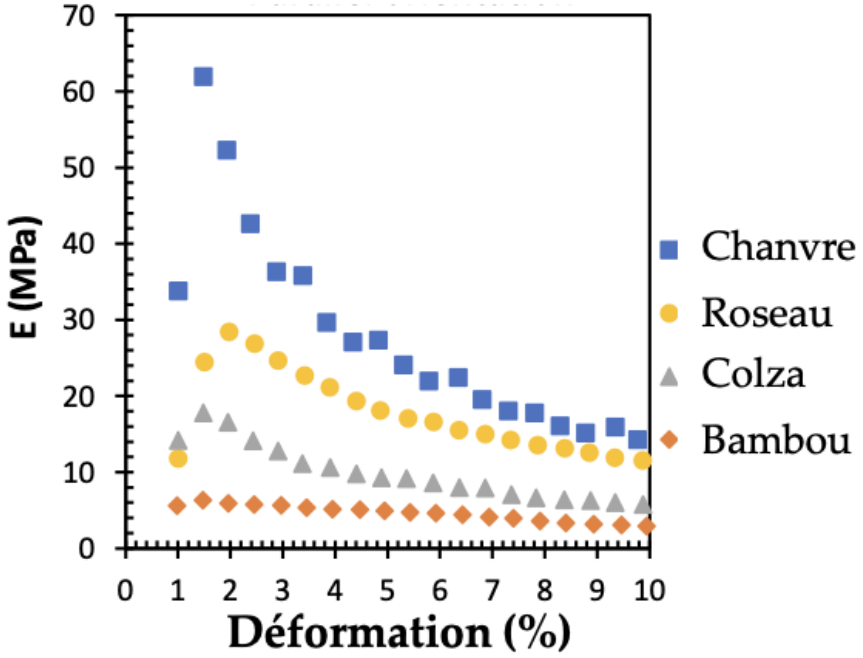
Béton végétal

E granulat < E matrice

Instabilité des particules → Endommagement, pic

❖ **Orientation parallèle**





Qui gouverne la mécanique ?

1. **Porosité inter-particulaire et squelette de liant**
   dosage en liant, compactage, eau disponible pour la prise
2. **Interface (ITZ) et ponts de liant**
   fixe la fin de la rigidification, amorce la décohésion
3. **Compressibilité de la particule**
   porosité interne (lumen), élancement, orientation
4. **Propriétés intrinsèques de la paroi**
   cellulose, cristallinité, angle des microfibrilles ; humidité

× 6

en contrainte quand ρ passe de 190 à 500 kg/m³ par le liant — même chènevotte

× 1,8

entre chargement ⊥ et ∥ aux lits de particules — même matière, même densité

Clé de lecture : l'inversion de rigidité. E granulat < E matrice : la particule poreuse s'écrase, la paroi ne travaille pas.

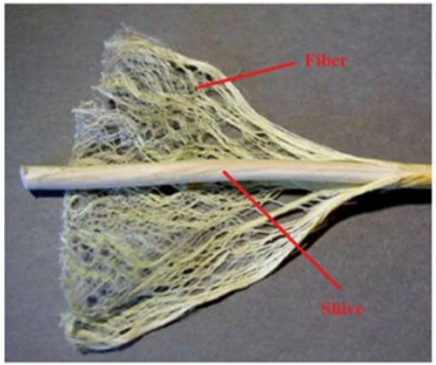
Données : cours S. Amziane & Y. E. Belarbi (dosages à 180 j ; essais croisés RILEM TC 275-HDB, ≈ 4 % de déformation)

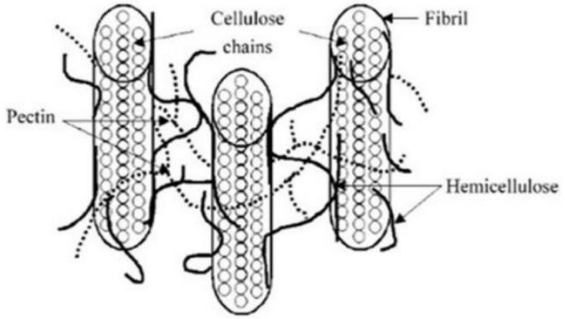
I

La porosité

du vide dans la cellule au squelette de liant

Une particule faite surtout de vide





Des cellules creuses : une paroi solide autour d'un lumen vide. La porosité est fixée à l'échelle de la cellule, avant tout gâchage.

Chènevotte	**ρ (kg/m³)**
Vrac (lit de particules)	100–155
Particule (enveloppe)	250–400
Squelette (paroi)	≈ 1450

Figure : cours S. Amziane & Y. E. Belarbi, Biobased Building Materials

Exemple : ρvrac = 110, ρparticule = 320, ρsquelette (paroi) = 1450 kg/m³

n inter = 1 − 110/320 ≈ 0,66

entre les particules

n intra = 1 − 320/1450 ≈ 0,78

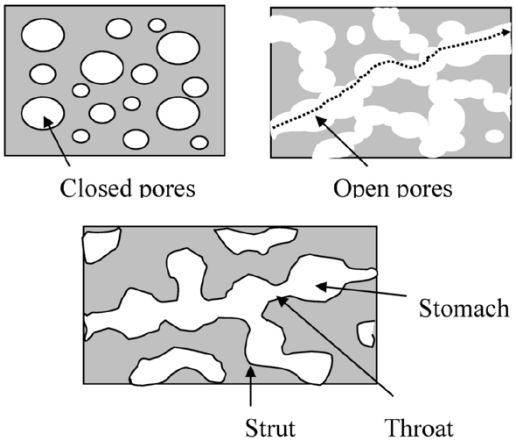
dans la particule

≈ 7,5 %

du volume d'un lit en vrac est de la paroi solide : 110/1450 = (1 − n inter) × (1 − n intra) = 0,34 × 0,22

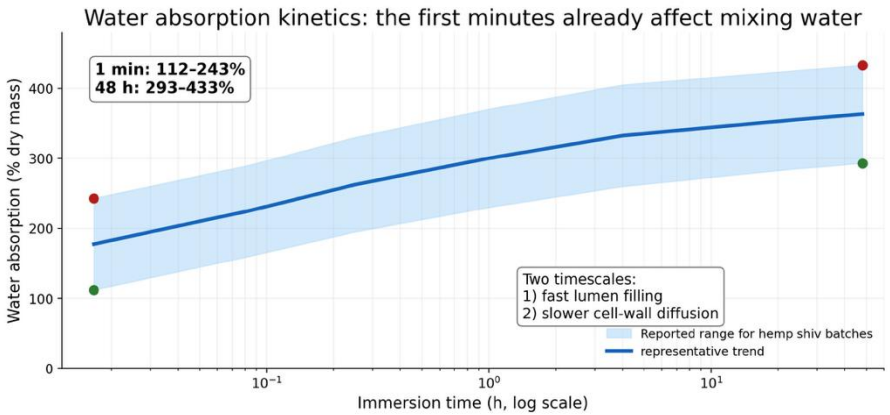
Le reste : 66 % de vide entre les particules, 26 % dans les particules.

Porosité ouverte, porosité fermée



n totale = 1 − ρparticule / ρvraie ≈ 1 − 320/1500 ≈ 0,79
n ouverte = 1 − ρparticule / ρsquelette ≈ 1 − 320/1450 ≈ 0,78
n fermée = n totale − n ouverte ≈ 0,01

ρvraie : *poudre broyée, pycnomètre hélium — matière seule.*
ρsquelette : *particule entière, hélium — inclut les pores fermés (ρsquelette ≤ ρvraie).*
Chènevotte : presque toute la porosité est ouverte.



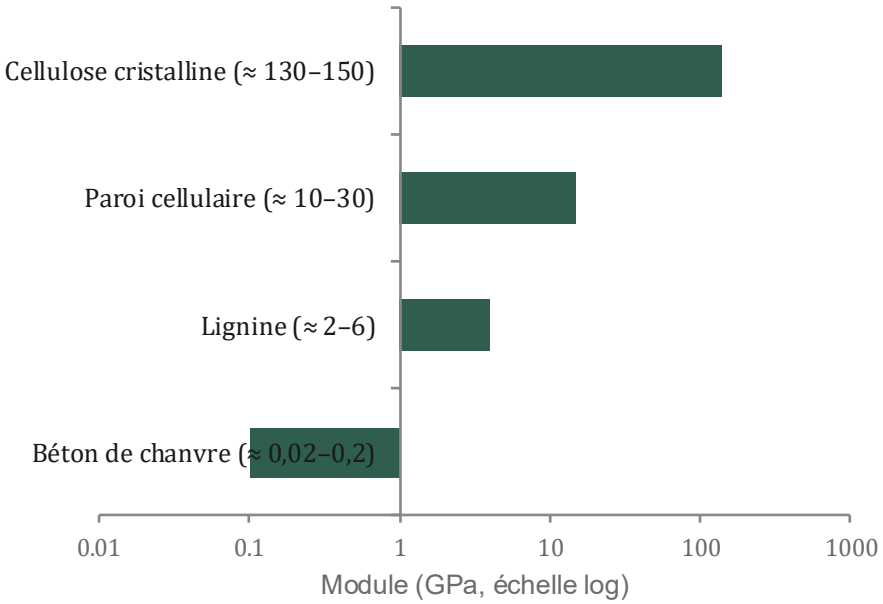
Absorption : 110–240 % de la masse sèche en 1 min, 290–430 % en 48 h.

Absorption max ≈ n ouverte × ρeau/ρparticule = 0,78 × 1000/320 ≈ 240 %
= lumens remplis en 1 min. Au-delà : gonflement des parois, eau retenue entre les particules.

La porosité mesurée dépend du fluide sonde (hélium, eau, mercure) : toujours donner la méthode.

Figure : cours S. Amziane & Y. E. Belarbi, Biobased Building Materials (pores : d'après Miao et al., 2010)

Deux à trois ordres de grandeur d'écart



Loi d'échelle des solides cellulaires

$$E / E_s \approx (\rho / \rho_s)^2$$
$$\sigma / \sigma_s \approx (\rho / \rho_s)^{1,5}$$

E, ρ : le matériau poreux (le béton de chanvre).
Es, ρs : le solide dont il est fait — la paroi (Es ≈ 10–30 GPa, ρs ≈ 1450), pas la cellulose cristalline.
Origine : flexion des parois de cellule ; $\rho/\rho s \propto (t/l)^2$, $E \propto Es\,(t/l)^4$.

Béton de chanvre : ρ ≈ 200–450, ρs ≈ 1450–2300 (paroi + liant)
⇒ $\rho/\rho s \approx 0{,}1–0{,}25 \Rightarrow (\rho/\rho s)^2 \approx 0{,}01–0{,}06 \Rightarrow$ E prédit ≈ 0,1–1,8 GPa

Mesuré : 20–200 MPa, soit 5 à 10 fois moins. L'écart mesure l'imperfection des contacts et de l'ITZ : c'est l'idée II.

Modules : ordres de grandeur ; béton de chanvre ≈ 20–200 MPa selon formulation et définition du module.

ce que la porosité impose

Ce que dit la physique

- Vrac : 7,5 % de paroi ; béton : 10–25 % de solide ($\rho/\rho s$) — le vide porte la déformation
- $\sigma \propto (\rho/\rho s)$ puissance 1,5 : densité × 2 → résistance × 2,8 ; de 190 à 500 kg/m^3 : × 4,3 prédit, × 6 mesuré (le liant ajouté est plus résistant que la paroi)
- Le granulat absorbe 2 à 4 fois sa masse en eau (≈ n ouverte × ρeau/ρparticule)
- La porosité mesurée dépend du fluide sonde

Ce que l'essai exige

- ρ mesurée sur chaque éprouvette, le jour de l'essai
- Teneur en eau à l'essai, après masse constante (20 °C, 50 % HR)
- Diamètre grand devant la taille des particules, H/D = 2
- Méthode de porosité indiquée : hélium, eau.
- À n = 3 : « non significatif » ≠ « pas de différence » (puissance)

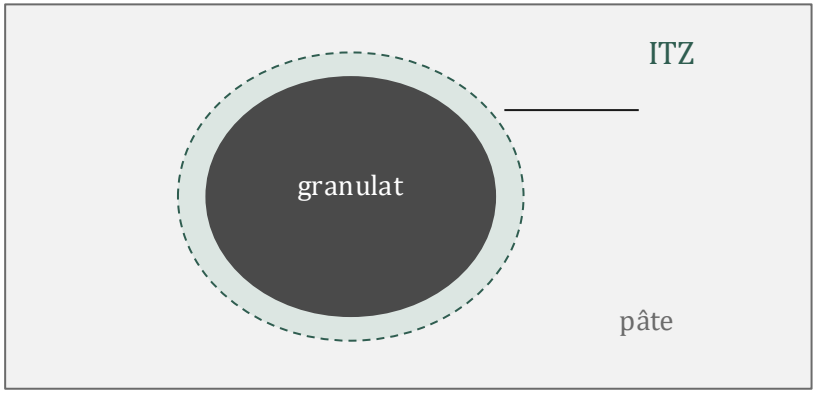
Comparer deux résistances sans leurs masses volumiques, c'est comparer deux densités sans le dire.

II

L’interface

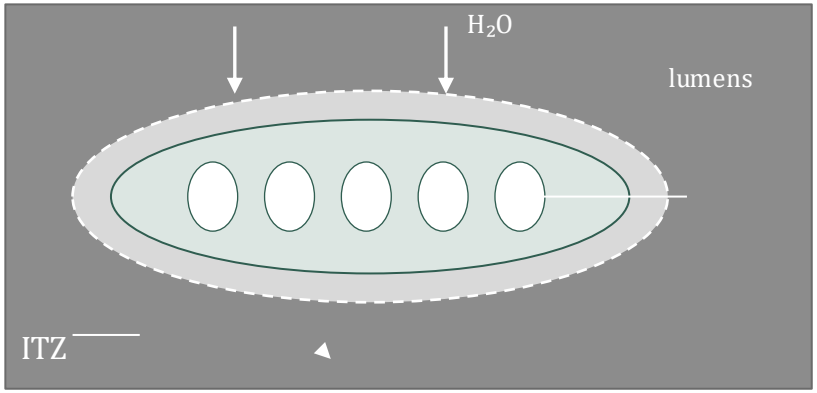
là où le végétal rencontre le liant

La zone de transition interfaciale (ITZ)



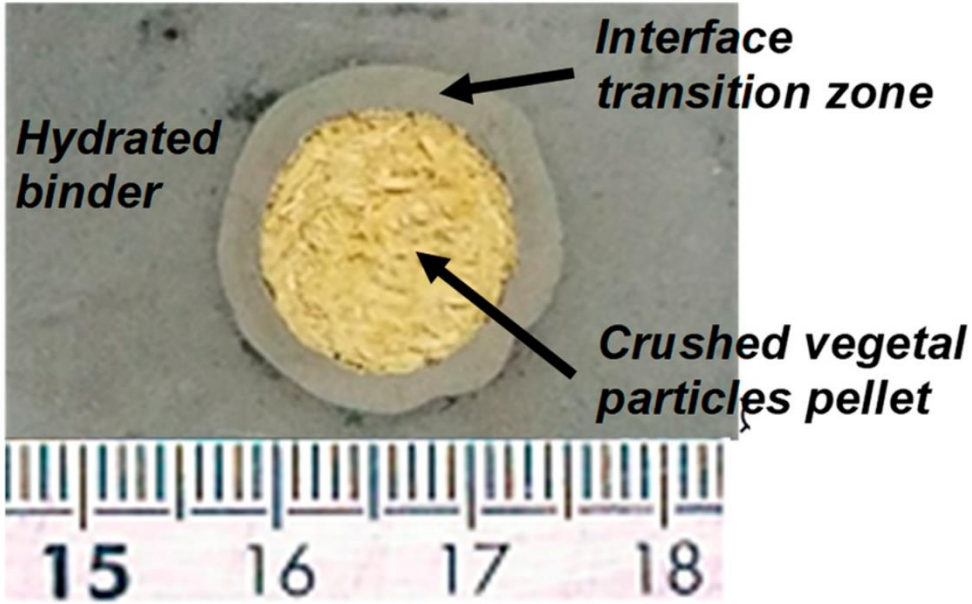
Béton ordinaire

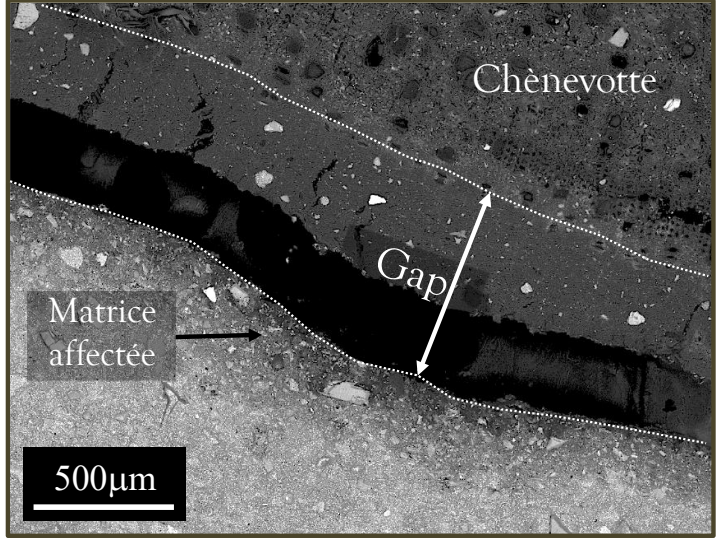
- Effet de paroi : e/c local plus élevé, portlandite orientée
- Porosité accrue sur 20–50 µm : maillon faible
- La fissure s'amorce à l'interface puis contourne le granulat

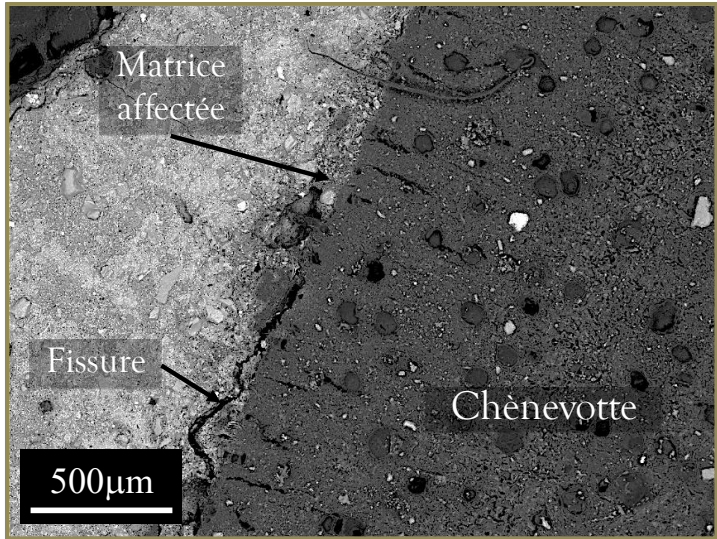


Béton végétal

- Succion de l'eau : liant sous-hydraté au contact
- Sucres et extractibles : prise perturbée localement
- Gonflement différentiel puis retrait : contraintes internes, décollement
- Liant entré dans les lumens ouverts : ancrage


Interface
transition zone
Hydrated
binder
Crushed vegetal
particles pellet
15
16
17
18


Chènevotte
Gap
Matrice
affectée
500µm


Matrice
affectée
Fissure
Chènevotte
500µm

Ce que le végétal fait au liant

Composé	Mécanisme	Effet
Hémicelluloses	Dégradation alcaline → sucres, acides	Retard de prise, gonflement
Pectines	Chélation de Ca^{2+}, gonflement	Retard, interface fragilisée
Tanins	Chélation de Ca^{2+}, adsorption sur les grains	Retard fort, taches
Sucres libres	Adsorption, blocage de l'hydratation	Prise inhibée

La chélation, simplement : la molécule « attrape » l'ion Ca^{2+} comme une pince (chélè = pince de crabe) et ne le lâche plus. Ce calcium manque au liant pour construire ses hydrates : la prise est retardée.

Pectines : groupes COO^- qui piègent Ca^{2+} entre deux chaînes / Tanins : groupes phénoliques, qui en plus enrobent les grains de ciment.

Et dans la durée : dégradation alcaline de la cellulose, minéralisation des fibres par $Ca(OH)_2$ → fragilisation.

Remèdes : lavage à l'eau chaude, prétraitement alcalin, enrobage préalable, choix du liant.

Prédire, puis mesurer la compatibilité

Heuristique de composition *indicateur qualitatif, non calibré*

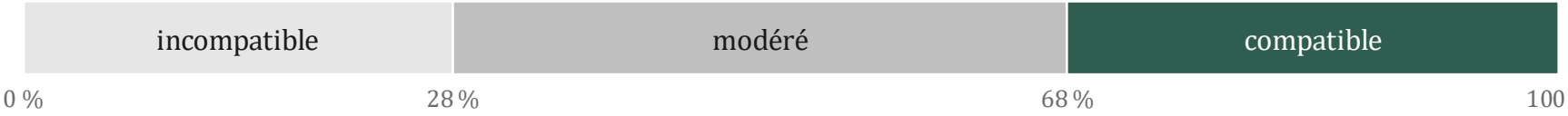
$$R = (H + P + T + S) / (C + L)$$

Fractions massiques sèches, mêmes unités partout (%) : H hémicelluloses, P pectines, T tanins, S sucres solubles (extraits à l'eau chaude), C cellulose, L lignine. R ↑ ⇒ compatibilité avec le liant ↓

Chènevotte : (21 + 4,5 + 0,5 + 2) / (46 + 24) = 28/70 ≈ 0,40 lin ≈ 0,24 · chêne ≈ 0,53 · tournesol ≈ 0,69

Limite : 1 % de sucres ou de tanins pèse bien plus qu'1 % d'hémicelluloses. R oriente ; seul l'indice CA tranche.

Mesure : indice CA = chaleur d'hydratation (ciment + végétal) / (ciment seul), en %



Hachmi, Moslemi & Campbell (1990) ; voir aussi l'indice d'inhibition de Weatherwax & Tarkow (1964).

ce que l'interface impose

Ce que dit la physique

- L'eau aspirée laisse le liant sous-hydraté au contact
- Les extractibles retardent la prise localement
- La chaux carbonate de la surface vers le cœur, pendant des mois
- Gonflement puis retrait : risque de décohésion

Ce que l'essai exige

- Âge à l'essai annoncé et suffisant : 28 j ne suffisent pas avec la chaux
- Cure contrôlée et documentée : température, HR, CO_2
- Front de carbonatation vérifié (phénolphtaléine) sur une éprouvette témoin
- Végétal caractérisé : origine, lot, prétraitement

Un béton végétal « à 28 jours » n'est souvent qu'un béton végétal pas encore pris.

III

La mécanique du végétal

une structure poreuse qui s'écrase

Et les fibres ? Tout dépend du mode de chargement

Compression

Effet marginal : la fibre ne travaille pas, le squelette poreux se densifie.

En travers, la paroi est molle : E transverse d'une fibre de lin ≈ 1,7 GPa, contre ≈ 50 GPa dans l'axe (Govilas, 2023).

Traction, flexion

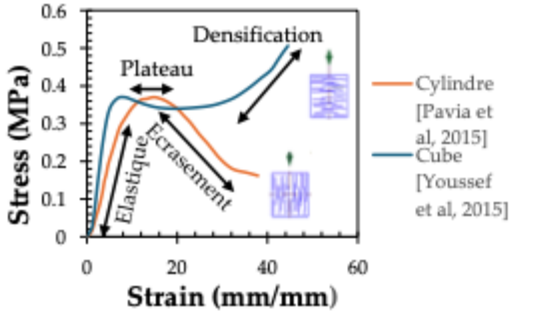
La fibre ponte les fissures. Ce qui compte, par ordre :

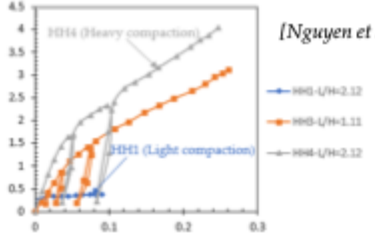
1. Adhérence fibre–matrice, longueur d’ancrage
2. Élancement et dosage
3. Durabilité : minéralisation
4. Module de la fibre

Nuances

À forte compaction, le squelette devient quasi continu et la paroi recommence à peser (blocs pressés, panneaux denses). À densité égale, deux granulats diffèrent surtout par leur porosité interne et leur forme.

Compression

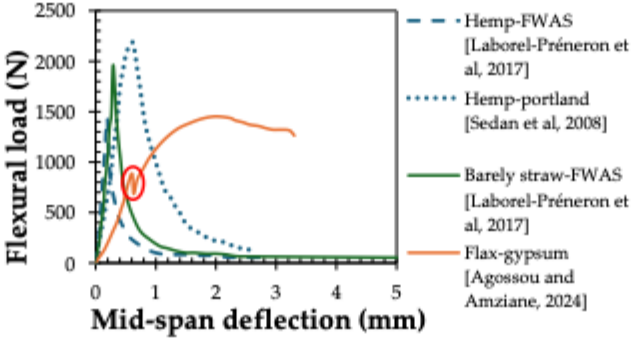




[Nguyen et al., 2009]

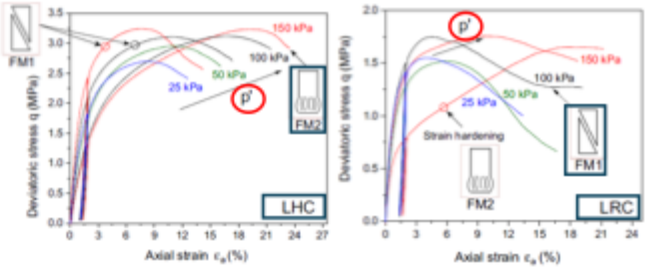
- Comportement en 3 phases : élastique → plateau → ruine
- Plateau plastique lié à la porosité et à la faible contribution de liant
- Phase finale liée géométrie-orientation
- Compacité pilote la ductilité du matériau
- Comportement mécanique anisotrope

Flexion



- Comportement en flexion quasi-élastique avec chute après la première fissure
- Mortiers fibrés : élastique → multi-fissures → rupture progressive
- La paille offre plus de ductilité que le chanvre (particules plus allongées)

Cisaillement Triaxial



LHC: Lime-hemp concrete;
LRC:Lime-rice husk concrete
[Chabannes et al., 2017]

- Phases : élastique → écrouissage → plateau → adoucissement post-pic rapide.
- La pression de confinement augmente la contrainte de déviation
- Modes de rupture: LHC stratifié → flambage (FM2) , LRC isotrope → bandes de cisaillement (FM1)

ce que la particule impose

Ce que dit la physique

- Pas de pic : la particule s'écrase, la structure se densifie
- Particules orientées ⊥ au compactage : anisotropie × 1,8
- Comportement visqueux : la vitesse modifie la réponse
- Grandes déformations, mise en place non négligeable

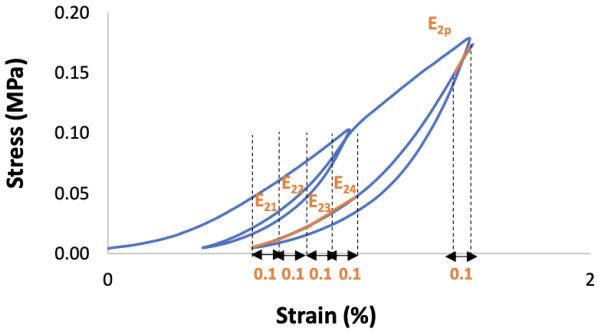
Ce que l'essai exige

- Direction de compactage / chargement toujours notée
- Déplacement imposé, vitesse faible, constante et rapportée
- Déformation sur l'éprouvette (LVDT, CIN), pas à la traverse : raideur machine
- Critère σ(εc) annoncé ; module en décharge–recharge
- Gâchées distinctes : 3 cylindres d'une même gâchée ≠ 3 éprouvettes indépendantes

Sans pic, la « résistance » est une convention : elle n'a de sens que si on l'annonce.

Exploiter la courbe

❖ **Module d'Young (E)**



$$E_n = MAX\left\{E_{np1}\,, E_{np2}\,, E_{np3}\,, E_{np4}\,, \ldots\ldots, E_{npp}\right\}$$

Module

Pente des cycles décharge–recharge, pas la pente initiale (mise en place).

Résistance

Sans pic : critère conventionnel $\sigma(\varepsilon_c)$ à une déformation donnée, annoncé explicitement.

Dispersion

n fixé avant l'essai (CV attendu, précision visée) ; écrire n, la nature du ± et l'unité de répétition.

Figure : cours S. Amziane & Y. E. Belarbi, Biobased Building Materials — trois façons de lire un module

Le rapport d’essai, relu avec les trois idées

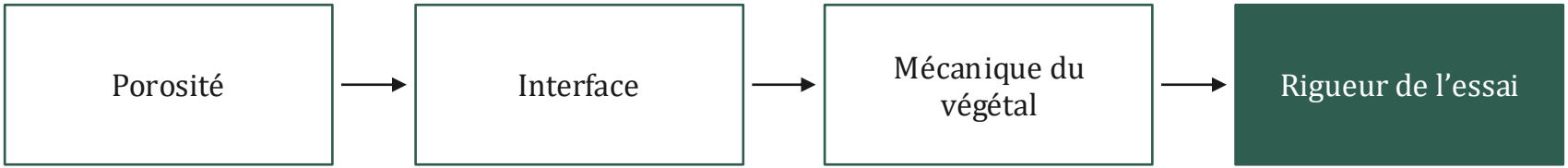
Information	**Pourquoi → idée**
Masse volumique	Pilote résistance et module → porosité
Âge et conditions de cure	Carbonatation lente de la chaux → interface
Teneur en eau à l’essai	Plastification des hémicelluloses, chute de E avec l'HR → végétal
Direction de compactage	Anisotropie → végétal
Géométrie de l'éprouvette	Cylindre ou cube, taille, élancement H/D → effet d'échelle, frettage
Vitesse de chargement	Comportement visqueux → végétal
Critère de résistance	Absence de pic → inversion de rigidité
n, nature du ±, unité de répétition	Forte dispersion, gâchées non indépendantes → les trois idées

Débat · 6 min — essais croisés RILEM TC 275-HDB

Mêmes éprouvettes, deux laboratoires, deux résultats : d'où viennent les écarts ?

Même constat sur fibres de lin : 9 laboratoires, des écarts de protocole (Jeannin et al., 2024). Indice : variance totale = matériau + mesure + laboratoire. Refaire la mesure ne réduit que la part « mesure ».

Synthèse



Qui gouverne la mécanique ? porosité et squelette de liant > interface > compressibilité de la particule > paroi.

Parce que la rigidité est inversée : E granulat < E matrice, donc densification et pas de pic.
La physique dit quoi mesurer ; la statistique, combien et comment l'écrire.

Ouvertures

Durabilité · cycles hygriques et mécanosorption · fluage · bilan carbone

Questions

Pour aller plus loin

Amziane S., Collet F. (dir.) (2017). Bio-aggregates Based Building Materials. State-of-the-Art Report of RILEM TC 236-BBM. Springer.

Amziane S., Arnaud L. (dir.) (2013). Bio-aggregate-based Building Materials: Applications to Hemp Concretes. ISTE–Wiley.

Hachmi M., Moslemi A.A., Campbell A.G. (1990). A new technique to classify the compatibility of wood with cement. Wood Science and Technology, 24, 345–354.

Weatherwax R.C., Tarkow H. (1964). Effect of wood on setting of Portland cement. Forest Products Journal, 14(12), 567–570.

Gibson L.J., Ashby M.F. (1997). Cellular Solids: Structure and Properties, 2e éd. Cambridge University Press.

Amziane S., Toussaint E., Collet F. et al. (2025). Essais croisés du RILEM TC 275-HDB sur le comportement en compression des bétons de chanvre. Materials and Structures.

Jeannin T., Arnold G., Bourmaud A. et al. (2024). Composites Part A, 185 — essai interlaboratoire sur fibres de lin (9 laboratoires), présenté par A. Célino et M. Péron.

Clerc R. (2026). Statistiques pour expérimentateurs. École d'automne GdR MBGS, Pornichet.