

GdR MBGS
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION
BIO et GÉO SOURCÉS

JOURNÉE DE RESTITUTION DU PROJET LOCABATI

2 juin 2026, Champs-Sur-Marne



Modélisation des lits de particules et des mélanges particules-liants

Ariane Abou-Chakra, LMDC, INSA Toulouse

Séverine Rosa Latapie, LMDC, UTTOP

Sara Darwish, LMDC, INSA Toulouse



Sommaire

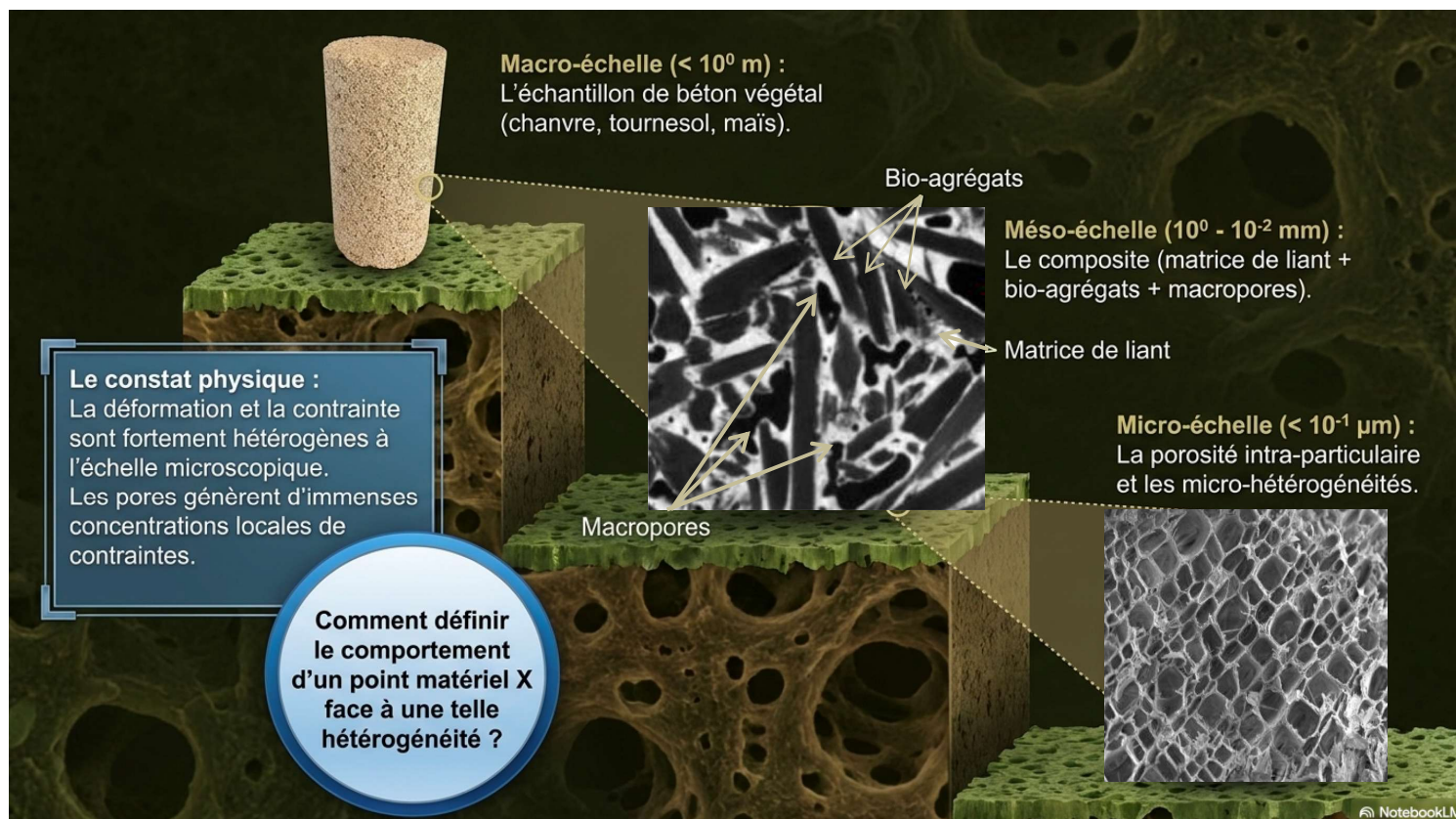
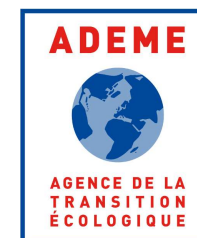


- 1- Approches multi-échelles : atouts et limites
- 2- Enjeux liés aux données d'entrée
- 3- Apports des modèles développés
- 4- Besoin de probabilisme et méthodologie statistique
- 5- Perspectives



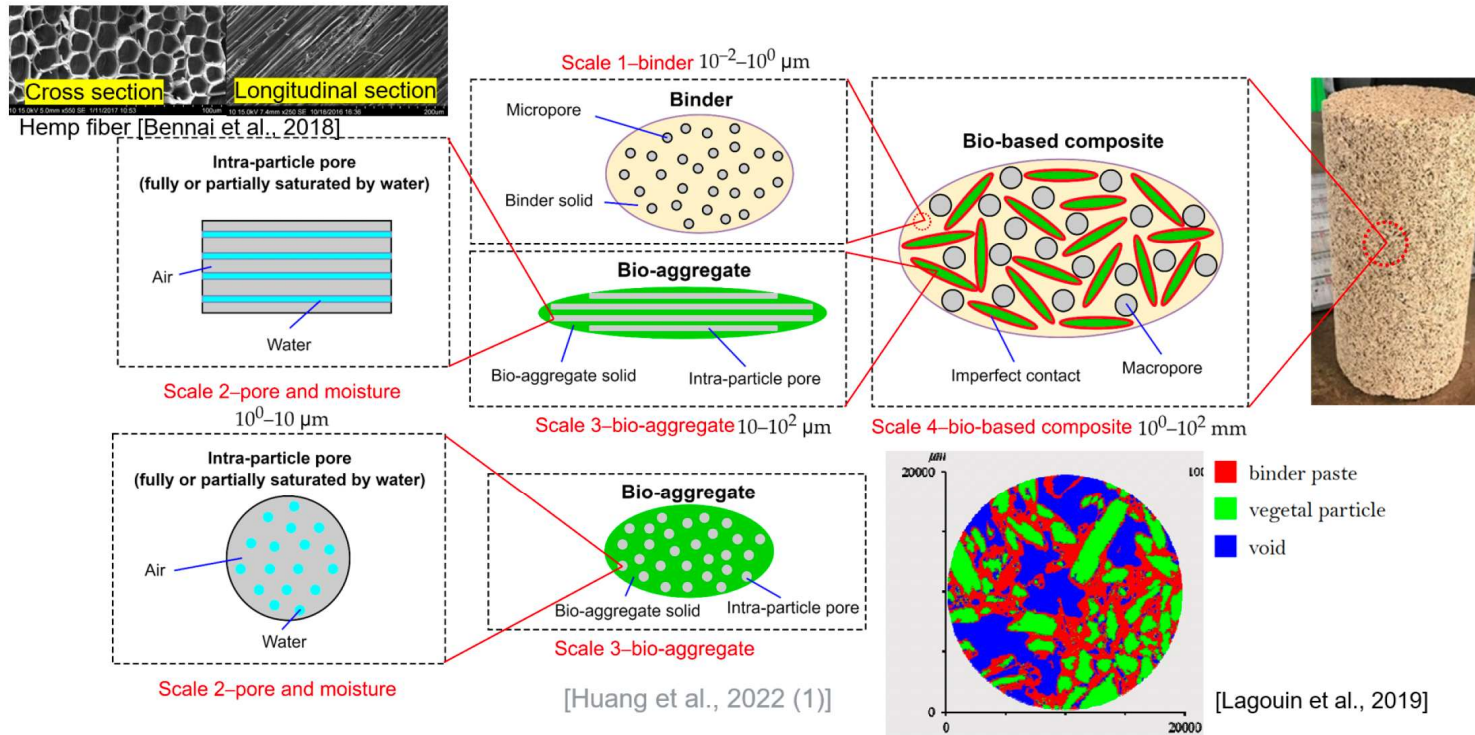
Approches multi-échelles:

Relier: pore → particule → matériau → paroi → bâtiment

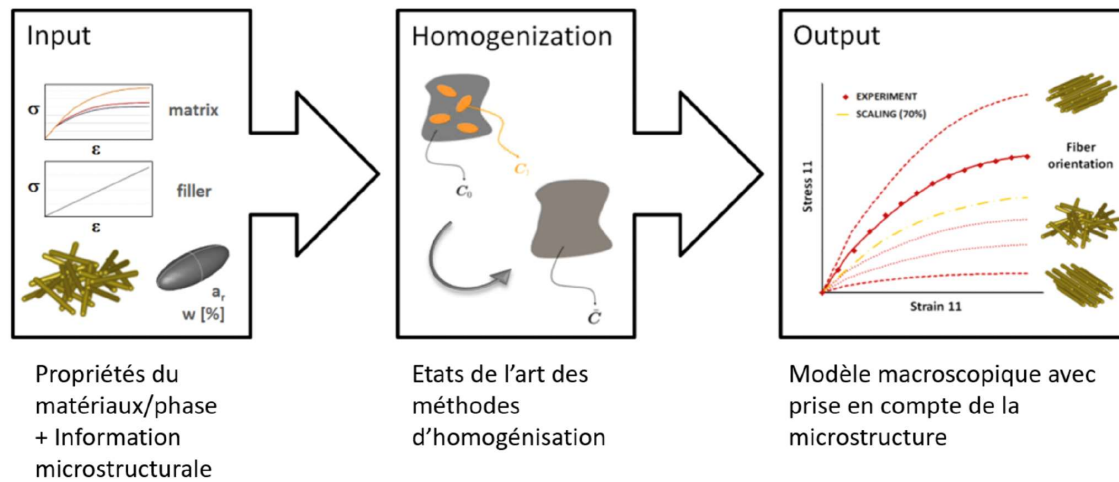


Pourquoi une approche multi-échelle ?

- Matériaux biosourcés = comportement gouverné par la microstructure
- Forte hétérogénéité + porosité multi-échelle
- Difficulté d'accès expérimental à certaines propriétés locales

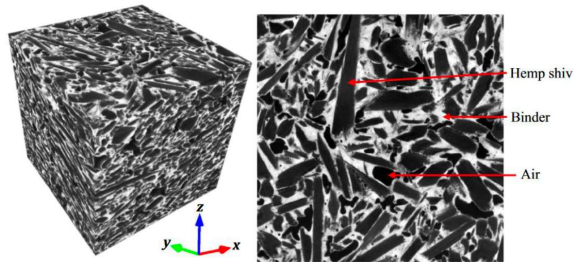


Principe des modélisations multi-échelles

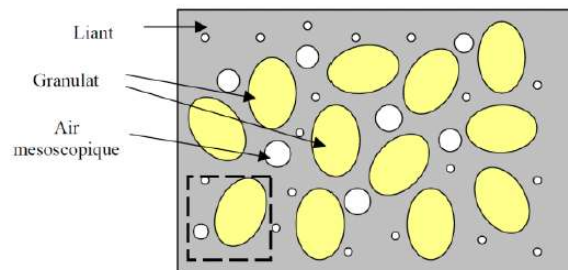


Méthodologie de l'homogénéisation

Représentation (VER)



→ il ne sera pas possible de fournir une description complète et exacte du matériau → hypothèses simplificatrices.



Propriétés à l'échelle micro
 $\sigma_r, \varepsilon_r = f(\Sigma, E, C_r)$

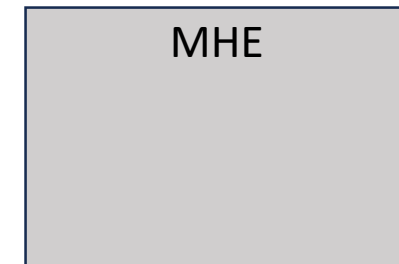
Localisation



Homogénéisation

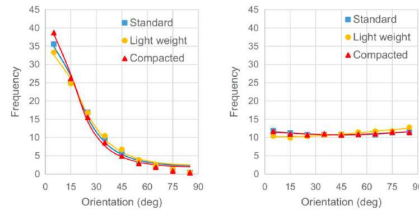


Chargement homogène (Σ, E)

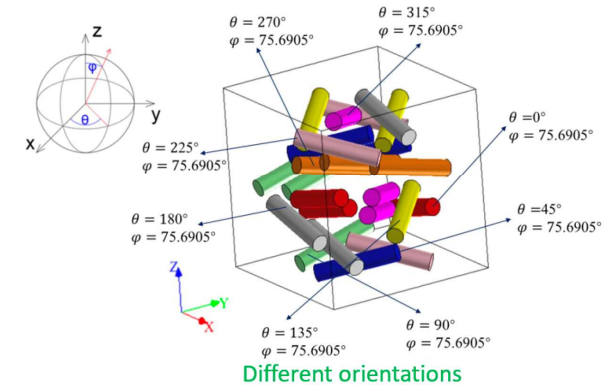
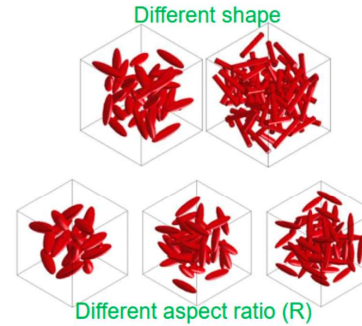
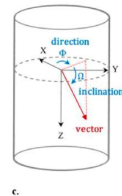
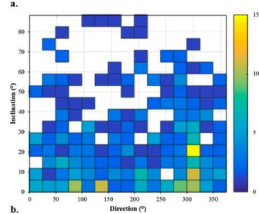
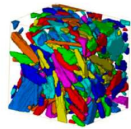


Propriétés homogénéisées:
 C^{CHOM}

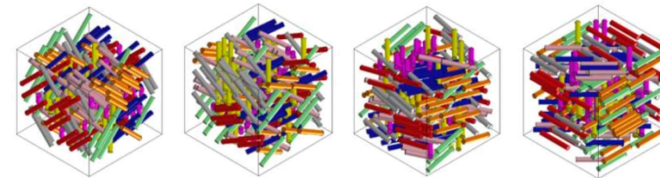
Etape 1: L'art de la représentation



(a) Measured by image analysis [82].



Mathématiser
la nature



Fiber distribution with the degree of compaction

Principe clé:

•il ne sera pas possible de fournir une description complète et exacte du matériau → hypothèses simplificatrices pour construire le VER

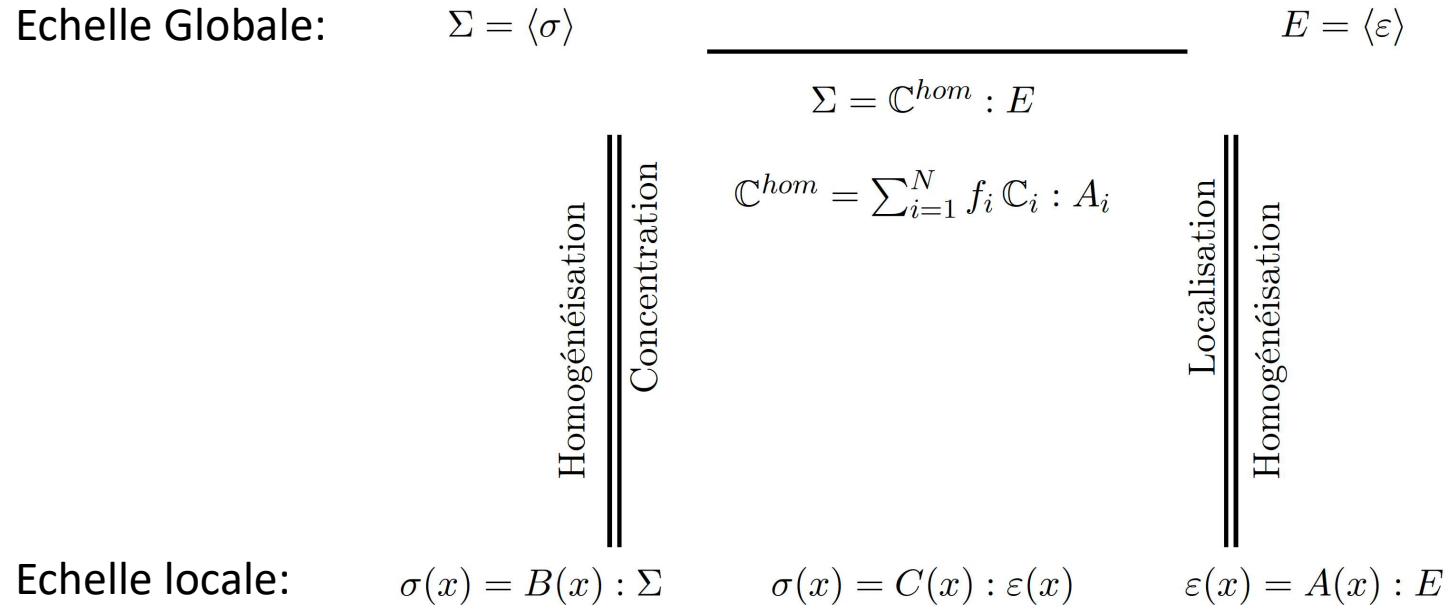
Morphologie:

•Forme des bio-agrégats (sphères, cylindres, ellipsoïdes), facteur de forme (R)

Topologie, Orientation:

•Fraction volumique, distribution spatiale, tenseur d'orientation statistique

Etape 2 et 3: Localisation et Homogénéisation



Compte tenu de la complexité du problème, on n'arrivera jamais définir de manière exacte les tenseurs $A(x)$ et $B(x)$.

→ Ce sont les hypothèses que l'on va introduire qui nous permettront de définir ces tenseurs. Chaque modèle d'homogénéisation vise à définir ces deux tenseurs

Localisation

Schéma	Principe	Milieu de référence	Interactions entre inclusions	Atouts	Limites
Voigt / Reuss	Bornes homogènes	Aucun	Non	Très simple	Peu réaliste
Dilué	Inclusion isolée dans une matrice	Matrice	Non	Rapide	Valable faible fraction volumique
Mori–Tanaka	Inclusion plongée dans le champ moyen de la matrice	Matrice	Partiellement	Bon compromis précision/coût	Limité aux structures matrice-inclusions
Auto-cohérent	Chaque phase incluse dans le milieu homogène équivalent	Milieu effectif	Oui (moyennées)	Adapté milieux granulaires/poreux	Résolution itérative
FEA / VER numérique	Résolution directe sur microstructure	Aucun	Oui	Accès champs locaux	Très coûteux numériquement

Modèles

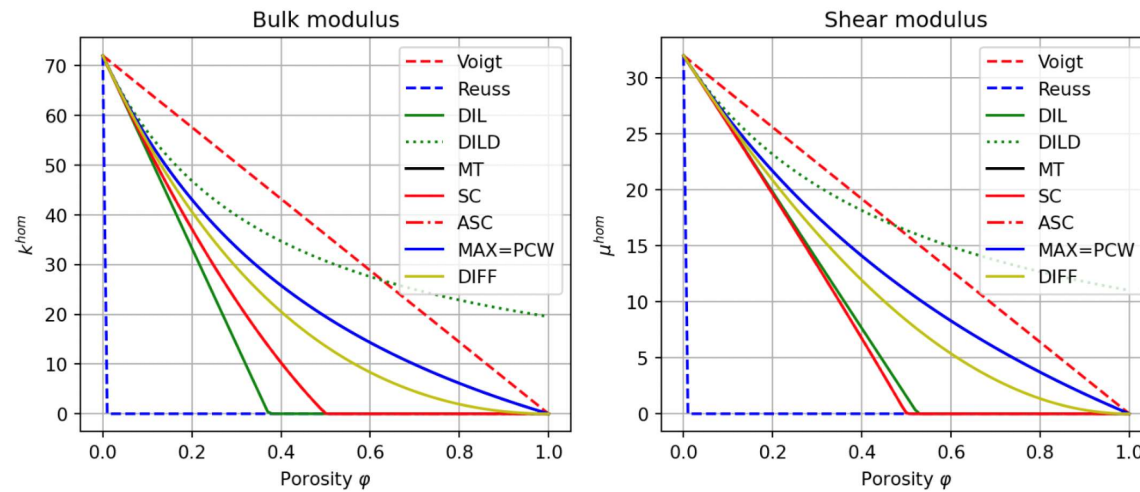


Fig. 12.4: Effective bulk and shear moduli vs. porosity for all schemes (solid: $k = 72$, $\mu = 32$; spherical pores).

Figure – Effective bulk and shear moduli vs. porosity for all schemes (solid : $k = 72$, $\mu = 32$; spherical pores).(Sanhuja)

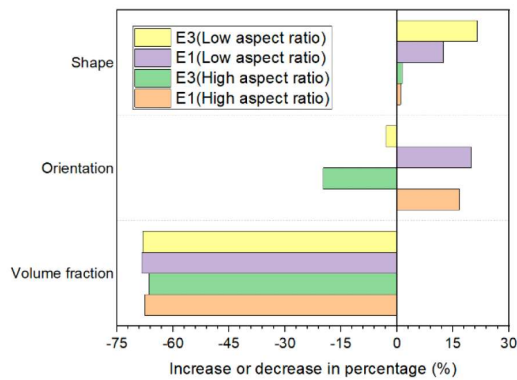
Tous les modèles convergent à faible porosité mais divergent fortement aux fortes fractions volumiques

Analogie élasticité/diffusion thermique

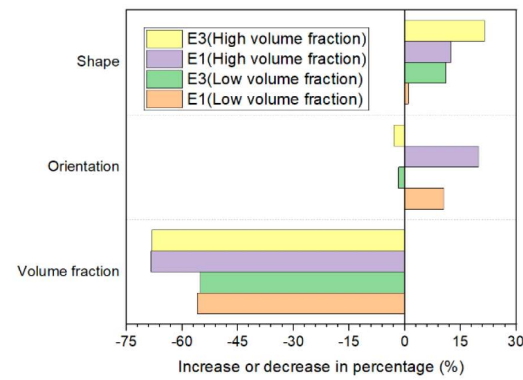
<p>Contrainte : σ Déformation : ε Loi de Hooke : $\sigma = \mathbb{C} : \varepsilon$ Equation d'équilibre : $\text{div} \sigma = 0$ $\forall z \in \delta\Omega \quad \underline{u} = \mathbf{E} \cdot \underline{z}$</p>	<p>Densité de flux de chaleur : \underline{q}_r Gradient thermique : $\underline{\text{grad}} T_r$ Loi de Fourier : $\underline{q} = -\lambda_r \cdot \underline{\text{grad}} T_r$ Régime permanent : $\text{div}(\underline{q}_r) = 0$ $T_r = \underline{\text{grad}} T_r \cdot \underline{z}$</p>
<p>Elasticity : Effective stiffness tensor $\mathbb{C}_{hom}, \mathbb{C}_r$</p>	<p>Transport problems : Effective thermal conductivity λ_{hom}, λ_r</p>
<p>$\mathbb{C}_{hom} = \mathbb{C}_0 + \sum_{r=1}^N f_r \Delta \mathbb{C}_i^0 : \mathbb{A}_r$</p>	<p>$\lambda_{hom} = \lambda_0 + \sum_{r=1}^N f_r \Delta \lambda_r^0 \cdot \mathbf{A}_r$</p>

Résultats mécaniques

- Influence de la porosité sur rigidité effective
- Importance des interactions matrice/granulat
- Pertinence des schémas MT / auto-cohérents selon la microstructure



(a) Different aspect ratios.



(b) Different volume fractions.

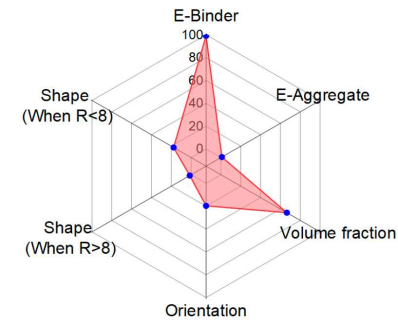


Fig. 24. Differences in optimization for different aspect ratios (Vertical (E1) and parallel (E3) directions).
Low aspect ratio: $R=3$, high aspect ratio $R=8$, low volume fraction: 0.2, high volume fraction: 0.5).

(Gang et al. 2022)

Atouts

- Accès à des propriétés difficilement mesurables expérimentalement
- Prise en compte:
 - des conditions d'usage (T,HR)
 - effet de l'anisotropie
 - transfert entre échelles
 - influence morphologie / porosité
 - comparaison entre ressources agricoles
- cohérence avec ordres de grandeur expérimentaux
- Réduction du coût expérimental
- Possibilité d'analyse paramétrique et d'optimisation
- Cadre prédictif utile pour la conception multicritère

Le front de Pareto : Cartographier les compromis optimaux

Le Concept

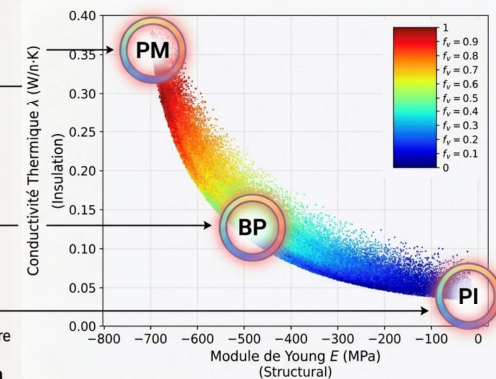
L'homogénéisation génère un espace continu de compromis.

Lecture du graphique

- **Zone PM (Préférence Mécanique) :**
Haute rigidité, faible isolation.
- **Zone BP (Performance Équilibrée) :**
Le point d'inflexion optimal.
- **Zone PI (Préférence Isolation) :**
Faible rigidité, haute isolation.

Le Pouvoir du Modèle

Chaque point correspond à une microstructure spécifique calculée via Mori-Tanaka/Eshelby. L'ingénieur choisit le point, le modèle dicte la recette matérielle.

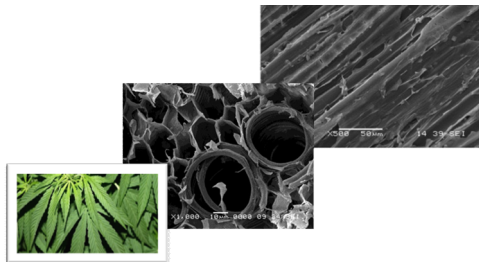




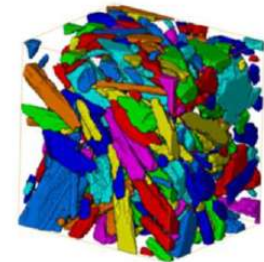
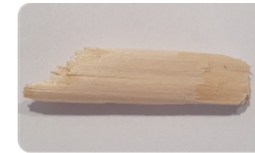
Enjeux liés aux données d'entrée

- Importance de la caractérisation fine de la microstructure

Analyse granulométrique
Images MEB, tomographie à rayons X



Forme
Orientation
Fraction volumique



De nombreux travaux sur la chènevotte et les composites associés mais :

- Lien formulation/ microstructure ?
- Données sur les autres granulats végétaux
- Caractérisation de " toute la chaîne" ?



Enjeux liés aux données d'entrée

- Difficultés d'accès aux données expérimentales pertinentes



Mesure conductivité thermique
Caractérisation vrac/particules

Conditions ambiantes (T, HR)

Etat du matériaux (sec, humide, stabilisé à l'ambiance)

Masse volumique du vrac/de la particule

De nombreux travaux expérimentaux mais :

- Quel(s) dispositif(s) de mesure pertinent ?
- Rigueur dans les résultats ?
- Caractérisation de " toute la chaîne" ?



Enjeux liés aux données d'entrée

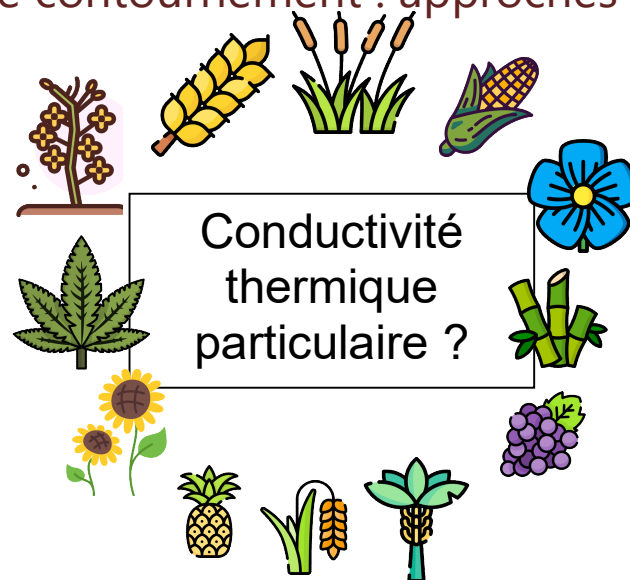
- Stratégies de contournement : approches indirectes et modèles simplifiés

•Problématique	•Solutions
•Forme granulat ?	•Considération isotrope Paramètres ellipsoïde
•Données caractéristiques sur une phase ?	•Méthode inverse Hypothèse simplificatrice
•Accès à la fraction volumique des phases ?	Imagerie Campagne expérimentale



Enjeux liés aux données d'entrée

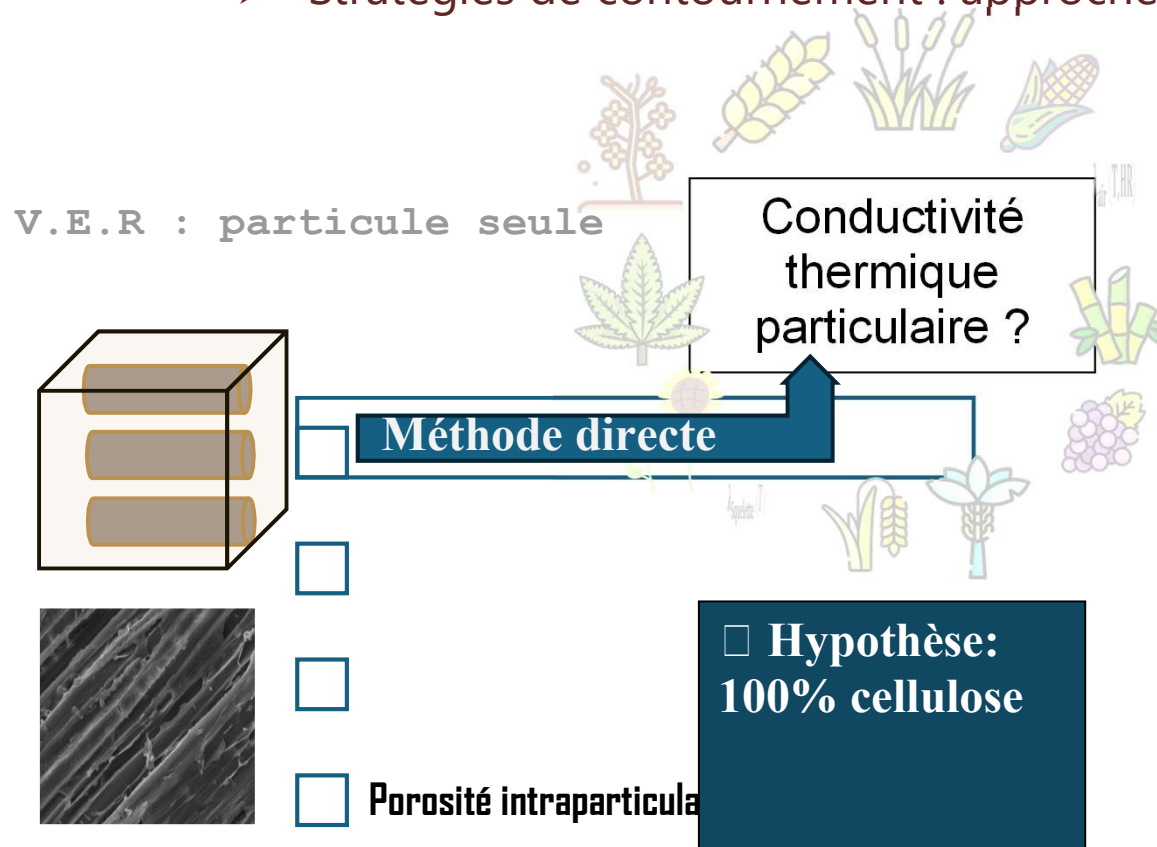
- Stratégies de contournement : approches indirectes et modèles simplifiés





Enjeux liés aux données d'entrée

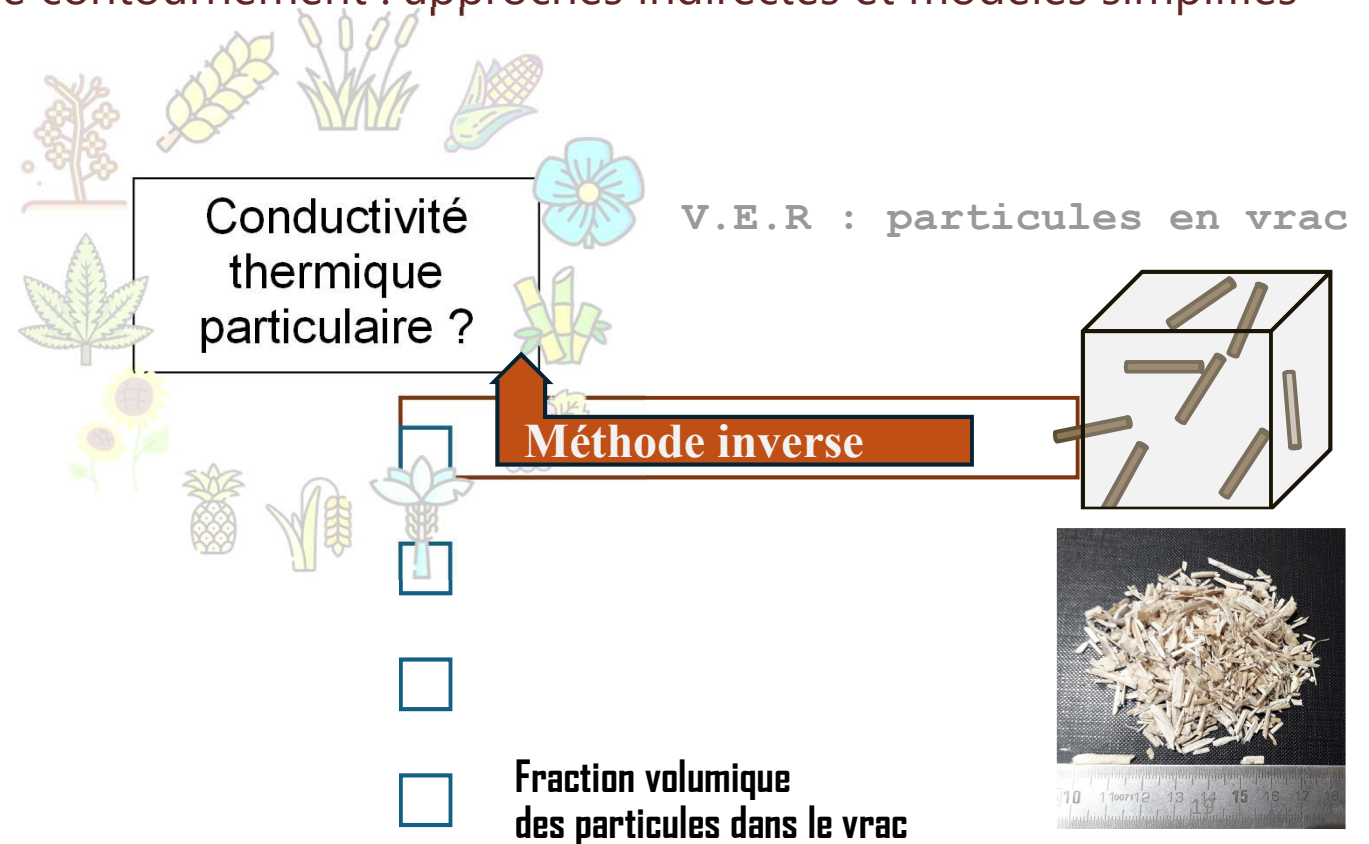
- Stratégies de contournement : approches indirectes et modèles simplifiés





Enjeux liés aux données d'entrée

- Stratégies de contournement : approches indirectes et modèles simplifiés





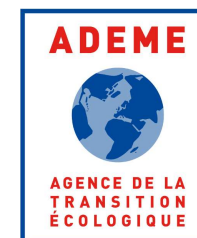
Enjeux liés aux données d'entrée

➤ Données manquantes dans les matériaux bio-sourcés aujourd'hui

- Mesures de la conductivité thermique particulière
- Mesures de conductivités thermiques sur des particules en vrac avec paramètres T et HR
- Caractérisation du granulat au composite
- Images de la microstructure à différentes échelles
- « Traçabilité » de la caractérisation

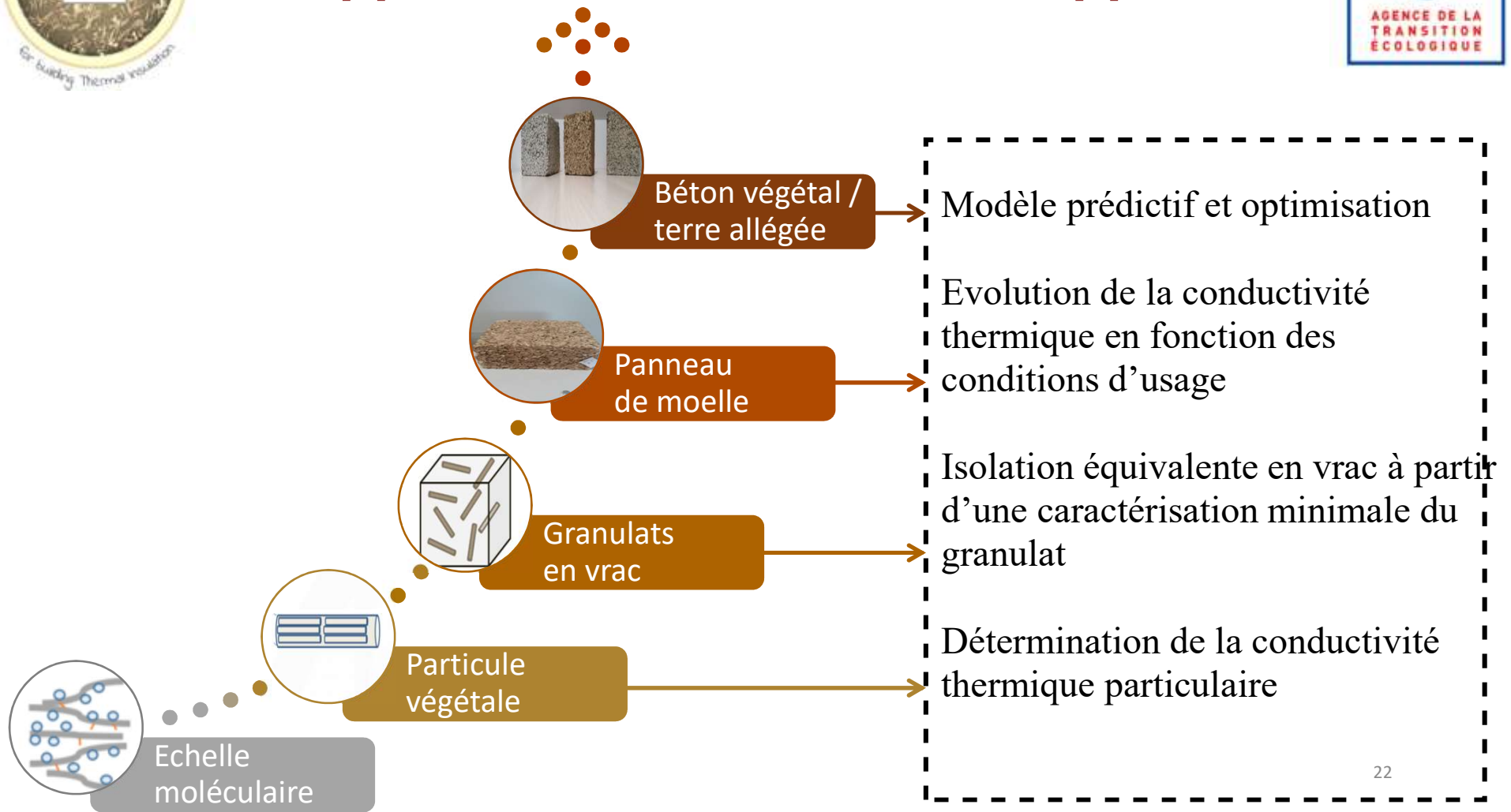


Apports des modèles développés



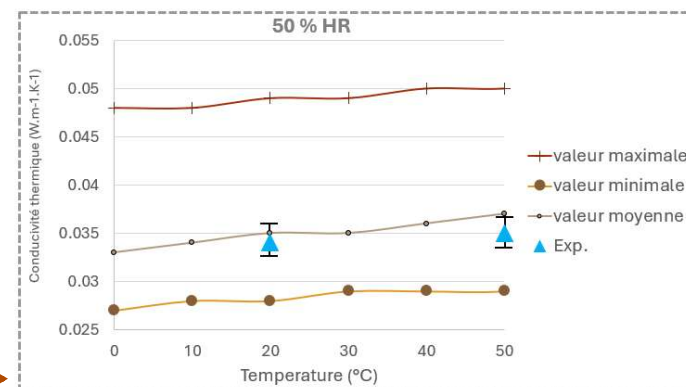
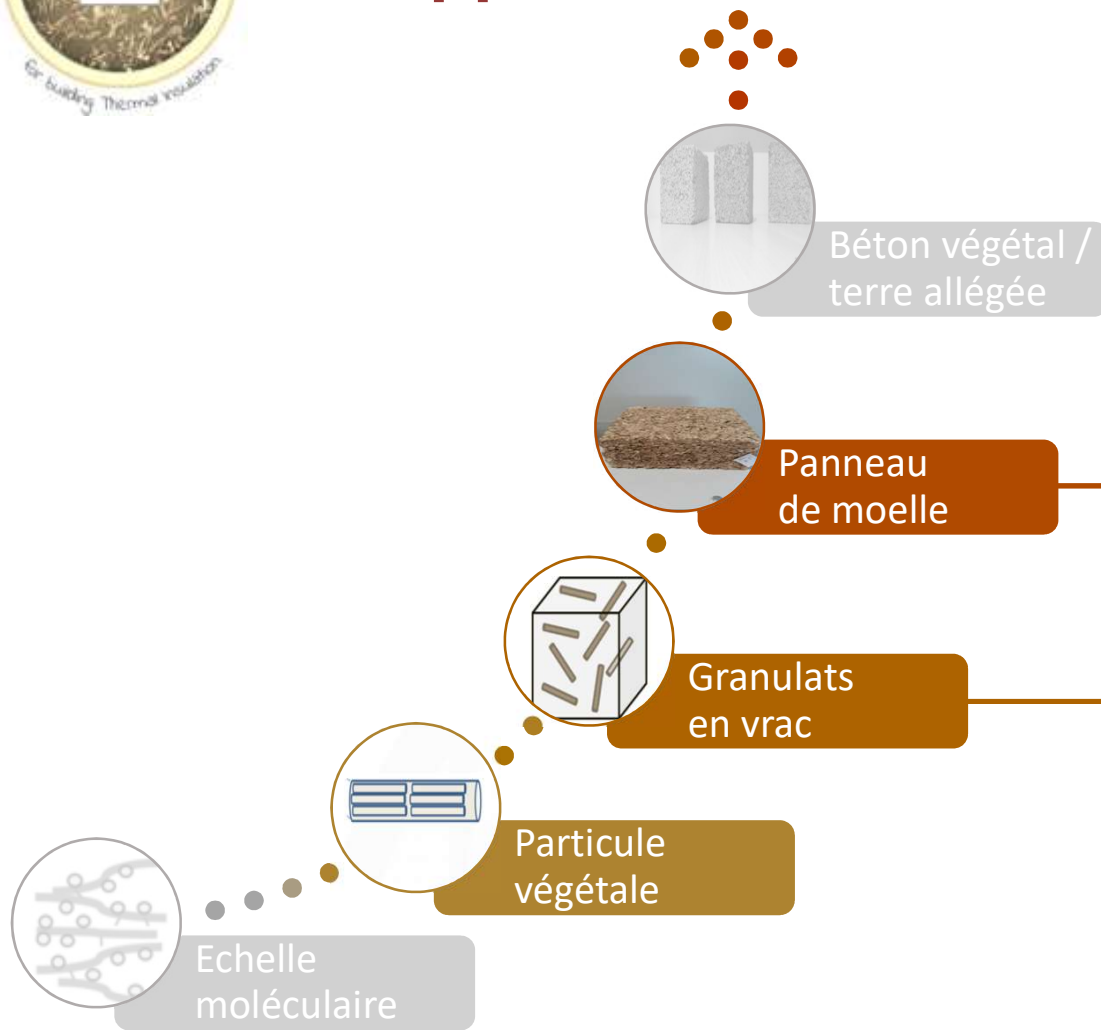


Apports des modèles développés





Apports des modèles développés



PAROIS EQUIVALENTES: isolation en vrac

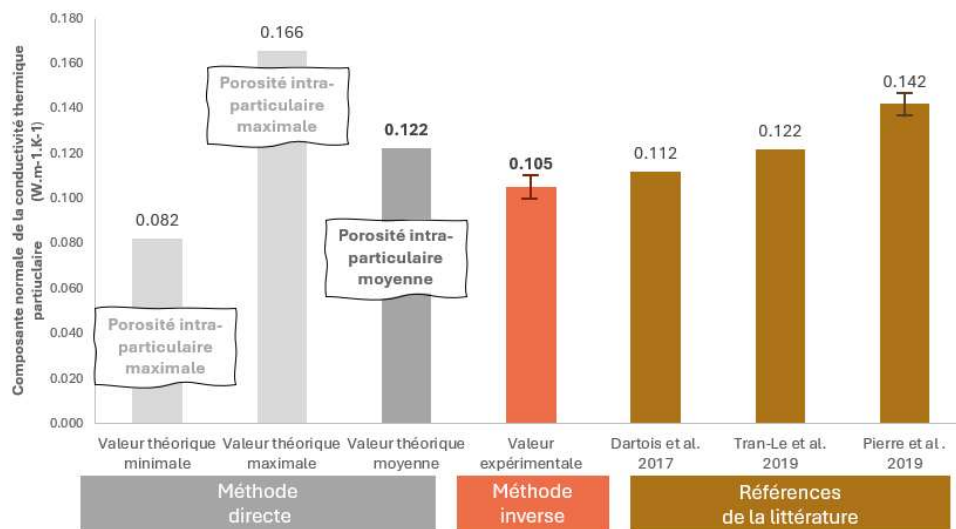
Granulat végétal	Masse volumique du vrac [kg.m ⁻³]	Epaisseur minimale requise pour obtenir 7 m ² .K / W - à sec- [cm]
Chênevotte	100	31.5
Anas de lin	115	30.1
Moelle de tournesol	20	20.3
Ecorce de tournesol	135	32.9
Tige de miscanthus	119	32.2
Sarment de vigne	319	55.3
Paille de coriandre	74	26.6
Paille de blé	42	21.7
Menue paille de blé	56	23.4
Spathe de maïs	51	22.4



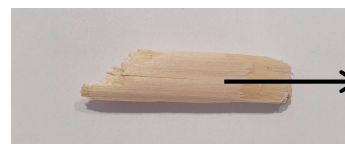
Apports des modèles développés



Conductivité thermique particulaire de la chènevotte: λ_N (état sec)



Particule végétale

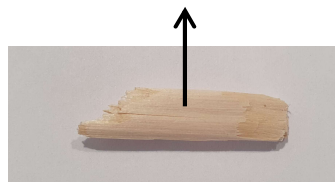
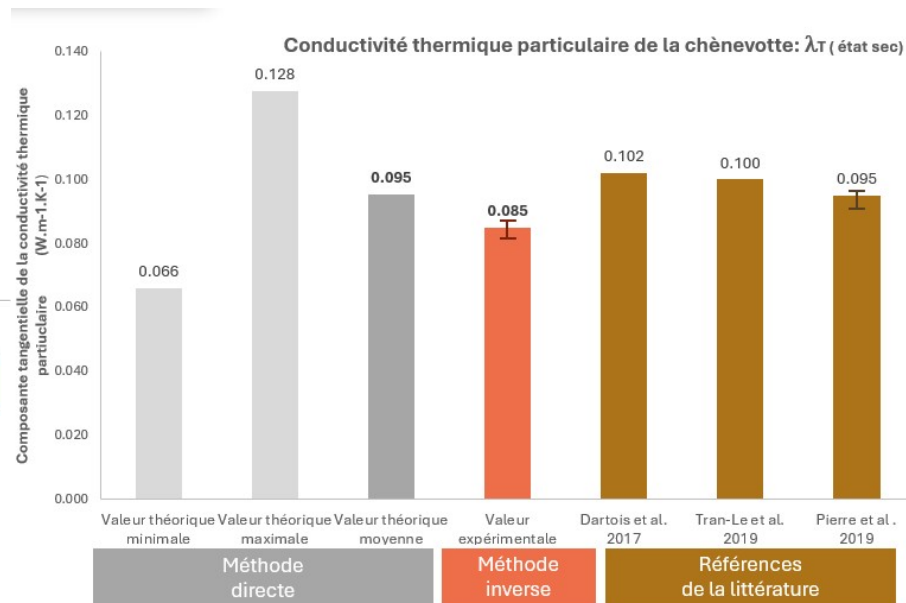
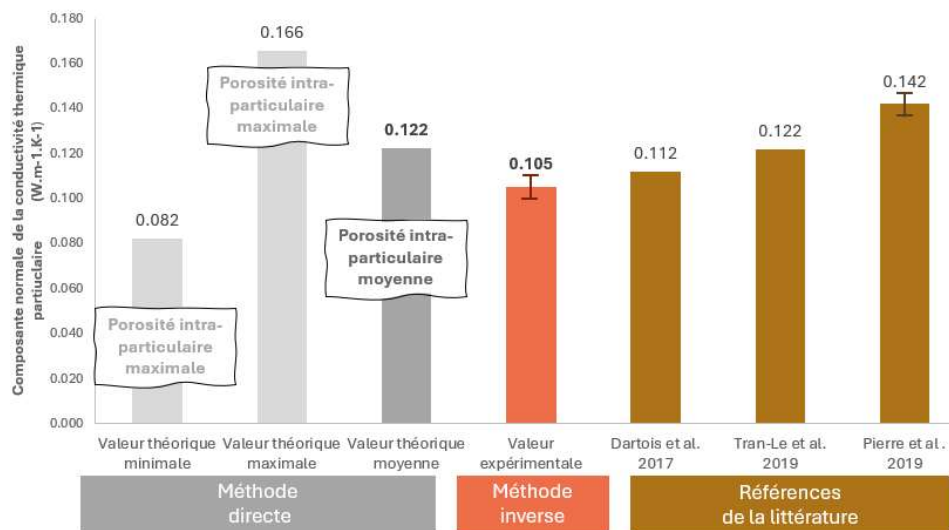




Apports des modèles développés

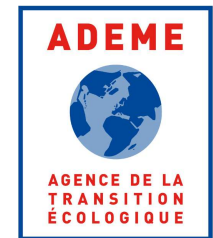


Conductivité thermique particulaire de la chènevotte: λ_N (état sec)





Besoin de probabilisme et méthodologie statistique



Limites des approches déterministes

- Les méthodes d'homogénéisation classiques fournissent des **propriétés effectives moyennes**
- Hypothèse souvent implicite de matériau "représentatif"
- Difficulté à représenter :
 - la variabilité naturelle,
 - l'hétérogénéité des bio-agrégats,
 - les incertitudes expérimentales

Besoin d'approches probabilistes

- Quantifier la dispersion des propriétés
- Propager les incertitudes entre échelles
- Développer des modèles multi-échelles plus réalistes

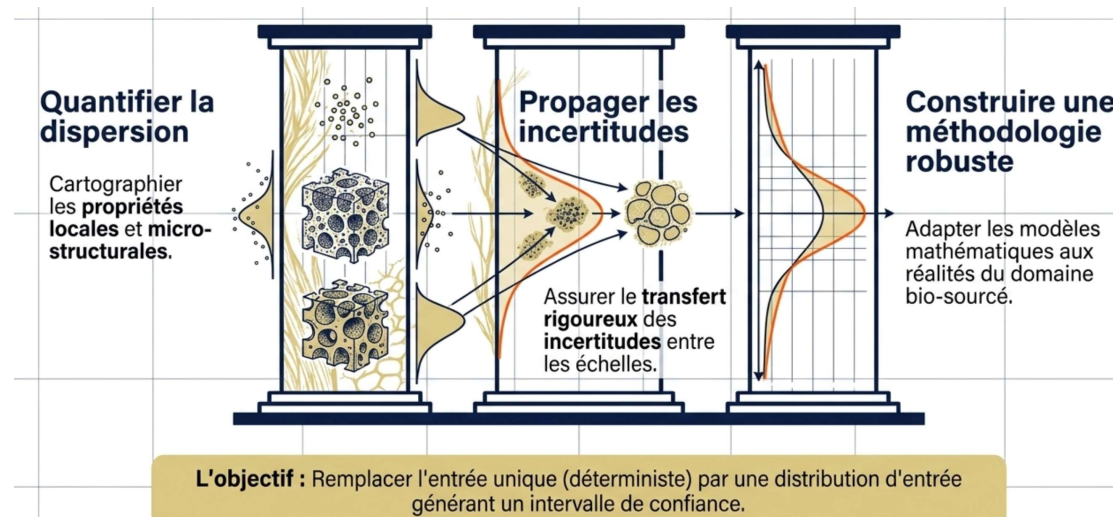
Constat et enjeux

Constats:

- Forte variabilité intrinsèque des matériaux bio-sourcés
- Les valeurs moyennes seules ne sont plus suffisantes
- Nécessité d'intégrer explicitement les incertitudes

Enjeux:

Les matériaux bio-sourcés doivent être décrits non seulement par leurs propriétés moyennes, mais aussi par leur variabilité intrinsèque



Prise en compte de la variabilité statistique des ressources (dispersion des propriétés microstructurales)

- la variabilité n'est pas un "bruit expérimental",
- elle constitue une propriété intrinsèque des matériaux végétaux et elle doit être intégrée explicitement dans les modèles.

Et construire

- une méthodologie probabiliste robuste,
- adaptée aux faibles jeux de données,
- compatible avec les réalités expérimentales du domaine bio-sourcé.

Challenges in Accounting for Variability



Aleatory Variability

Irreducible scatter due to natural origin: climate, soil, harvest season. Cannot be eliminated — must be modelled.



Epistemic Uncertainty

Gaps in knowledge: measurement methods, small datasets, inconsistent testing protocols across labs.



Model Uncertainty

Choice of probability distribution matters. Wrong law → unreliable reliability indices and unsafe design.



Propagation Complexity

Variability at particle level cascades through micro → meso → macro scales in composite models.

Reliable structural design requires probabilistic frameworks that explicitly account for ALL sources of uncertainty

Literature Data Collection

Density values collected from 30+ published studies covering a wide range of bio-based aggregates

Bulk Density (ρ_b) — materials studied

Hemp shiv

Hemp hurds

Fibered hemp

Barley straw

Flax shiv

Rape straw

Rice husk

Wheat straw

Miscanthus stem

Corn cob

Sunflower bark

Maize bark chips

Sunflower pith

Wheat straw fiber

Maize pith

Single Particle Density (ρ_p) — materials studied

Hemp shiv

Hemp hurds

Fibered hemp

Flax shiv

Miscanthus stem

Rice husk

Sunflower pith



Selected for analysis (Group 2 — medium density)



Excluded — extreme density (Groups 1 & 3)

Literature Data Collection

Bulk Density (ρ_b) — Selected Materials

Hemp shiv	70.3	155	122.8
Barley straw	47	116	73.6
Rape straw	115	130	123.3
Flax shiv	90	115	102.5
Miscanthus stem	77.6	119.4	98.5
Corn Cob*	450	497	487
Sunflower pith*	14	34	22.7

* Excluded from analysis (Groups 1 & 3)

Single Particle Density (ρ_p) — Selected Materials

Hemp shiv	248	394	314.3
Hemp hurds	256	256	256.4
Fibered hemp	256	256	256.4
Flax shiv	374	374	374
Miscanthus stem	222	250	236.1
Rice husk*	453	453	453
Sunflower pith*	35	35	35

* Excluded from analysis (Groups 1 & 3)

Key point: Unlike prior studies focused only on hemp, this work spans 10+ different bio-aggregate types.

Reducing Variability: Filtering Extreme Values

Data Grouping Strategy

▲ Group 1

High Density

Bulk: $p_b > 250 \text{ kg/m}^3$

Particle: $p_p > 400 \text{ kg/m}^3$

e.g. Corn Cob (487 kg/m³)

● Group 2

Medium Density ✓

Bulk: $50 \leq p_b \leq 250 \text{ kg/m}^3$

Particle: $200 \leq p_p \leq 400 \text{ kg/m}^3$

e.g. Hemp shiv, Barley straw...

▶ Selected for Analysis

▼ Group 3

Low Density

Bulk: $p_b < 50 \text{ kg/m}^3$

Particle: $p_p < 200 \text{ kg/m}^3$

e.g. Sunflower pith (22.7 kg/m³)

Effect of Filtering on Coefficient of Variation (COV)

Bulk Density

Before: 82%

After: 26%

COV

Single-Particle Density

Before: 34%

After:
20%

COV

Remains high → probabilistic approach essential

Distribution Fitting: Bulk Density (ρ_b)

Posterior Predictive P-values — Bulk Density

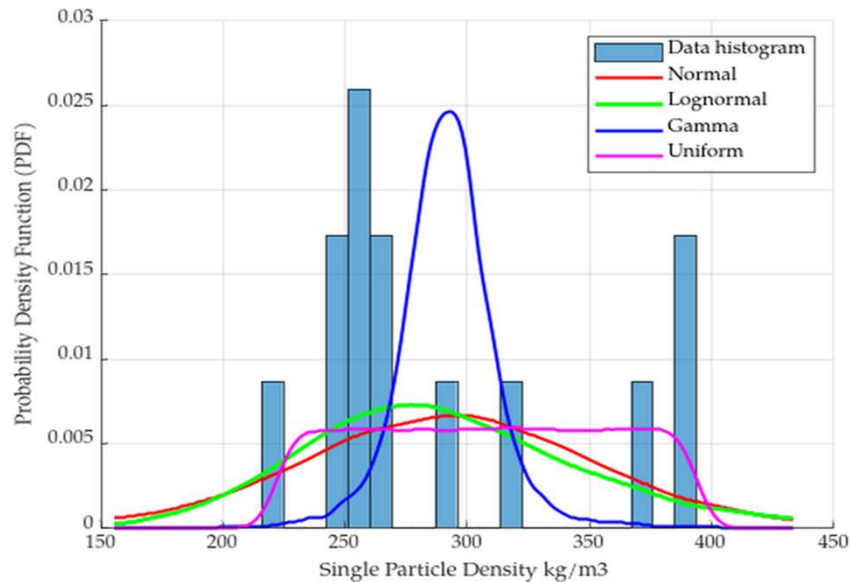
Normal	0.496	0.5163	0.3596
Lognormal ★	0.492	0.3237	0.2471
Gamma	0.498	0.02710	0.0652
Uniform	0.280	0.3883	0.3931

Key Finding:

Lognormal and Normal perform best overall. Lognormal is preferred for its positive support and ability to capture right-skewed data — typical of bio-based materials.

Observation: Gamma shows poor fit for extremes (low Min/Max p-values). Uniform is consistently below 0.35. Normal and Lognormal show p-values close to 0.5 — indicating good predictive adequacy.

Distribution Fitting: Single Particle Density (ρ_p)



Why Lognormal? Bio-based material densities are strictly positive and show right skewness due to natural variability. Lognormal distribution naturally captures these characteristics with its positive support and flexible shape.

Posterior Predictive P-values — Particle Density

Normal	0.496	0.3963	0.4404
Lognormal ★	0.514	0.4288	0.5492
Gamma	0.505	0.0979	0.0568
Uniform	0.282	0.3771	0.3769

Critical Observation:

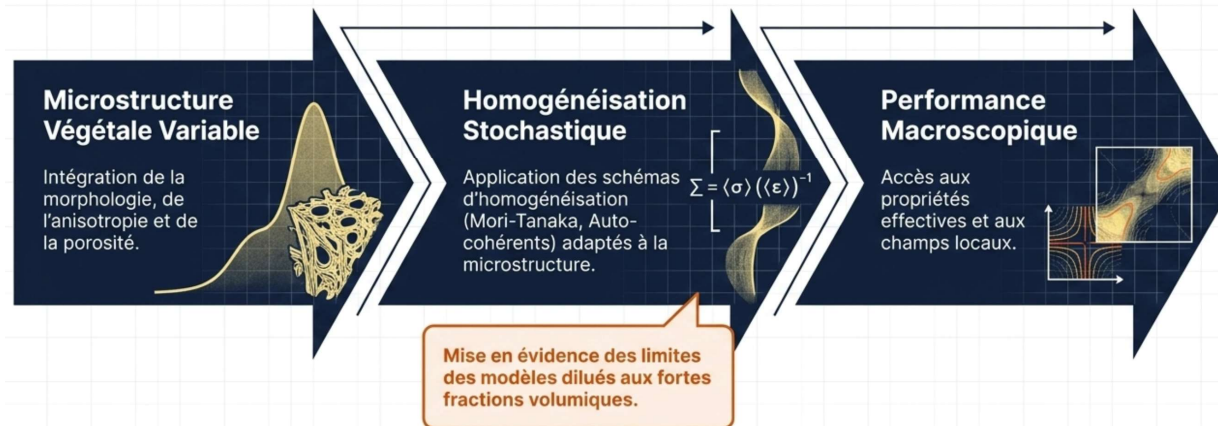
Gamma distribution fails severely: Median p-value = 0.047 (near 0). Uniform also poor. Lognormal achieves the most balanced p-values across all statistics — confirmed as best-fit model.

Perspectives: Ouvrir la voie à des modèles numériques avancés

Vers des modèles numériques multi-échelles plus réalistes des bio-matériaux

“inputs probabilistes” réutilisables par la communauté, fournir des distributions probabilistes

Le pont stochastique : De la microstructure à la performance



Perspectives: Prendre en compte l'évolution des propriétés microstructurales

La modélisation peut permettre de prendre en compte l'évolution de :

- la fraction volumique (tassement)
- les effets de l'écrasement des particules (compactage, porosité intra particulaire)
- les modifications microstructurales dues au vieillissement des matériaux bio-sourcés rapportées dans la littérature:
 - micro-porosité interfaciale (matrice / granulat)
 - modification de la connectivité poreuse
 - déformabilité hydrique (gonflement hygroscopique)

Aider à la fiabilité et standardisation des bio-matériaux

base méthodologique pour la fiabilité des matériaux bio-sourcés

Constat:

Le secteur du bio-sourcé souffre encore d'un manque :

- de standardisation,
- de reproductibilité,
- et de confiance industrielle.

Approches multi-échelles contribue à:

- Lier la formulation au comportement macroscopique
- optimiser

Approches probabilistes contribue à:

- améliorer la fiabilité des caractérisations,
 - quantifier les intervalles de confiance,
 - mieux comparer les matériaux entre études.
-
- Quantification robuste malgré de faibles jeux de données
 - Amélioration de la reproductibilité des études
 - Contribution à la normalisation et à l'industrialisation

Enjeu pour :

- la normalisation,
- les certifications environnementales,
- et l'industrialisation des bio-matériaux.



Merci de votre attention !