

# JOURNÉE DE RESTITUTION DU PROJET LOCABATI

2 juin 2026, Champs-Sur-Marne



## Quel lien possible entre comportement acoustique et comportement au feu?

Rodolphe Sonnier, PCH- IMT Mines d'Alès

Philippe Glé, UMRAE- CEREMA

*Laurent Ferry, Tania Lopes, Raissa Carvalho Martins, Arnaud Regazzi, Placide Uwizeyimana,  
IMT Mines Alès*

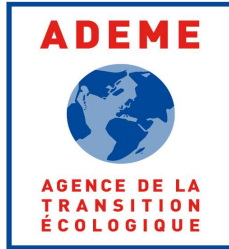
*Tinhinane Chekai, Clément Piégay, UMRAE*

*Camille Chateau, ENPC*

*Thibaut Lecompte, UBS-IRDL*



# Sommaire



- 1- Comportement au feu
- 2- Comportement acoustique
- 3- Quel lien possible?





## COMPORTEMENT AU FEU





## Qu'est-ce que le comportement au feu ?



### **Réaction au feu** (= contribution directe du matériau à la combustion)

Pyrolyse anaérobie suivie d'une combustion en phase gazeuse

Euroclasses (SBI + bombe calorimétrique)

Energie et puissance dégagées, inflammabilité

### **Résistance au feu** (= maintien de la fonction d'un élément)

Eurocodes (feu ISO834)

R : Capacité portante

E : Etanchéité

I : Isolation thermique

### **Feu couvant** (= combustion sans flamme)

A l'interface solide-gaz → pyrolyse aérobie

Caractéristique des matériaux poreux





## Matériaux : agrobétons



Liant minéral + agrégats végétaux

Densité de 200 à 1500 kg/m<sup>3</sup>

Densité  $\nearrow$ , porosité  $\searrow$



**Rôle prépondérant de la densité sur  
le comportement au feu**

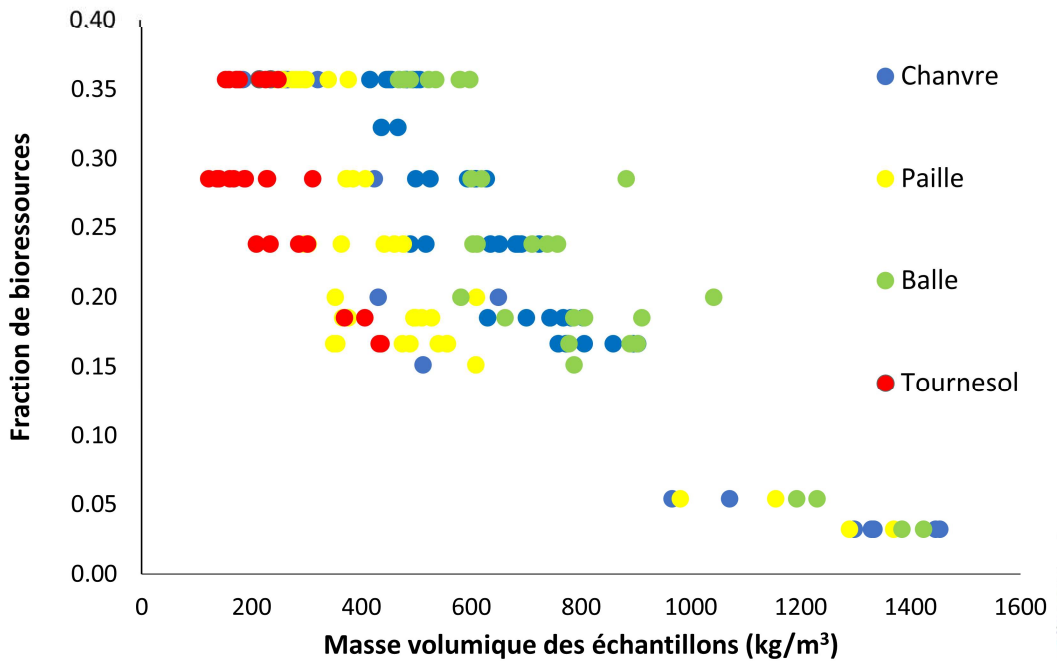
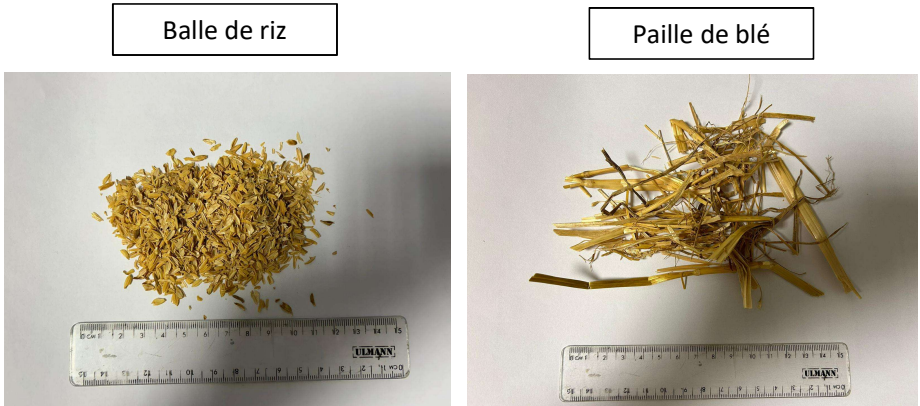
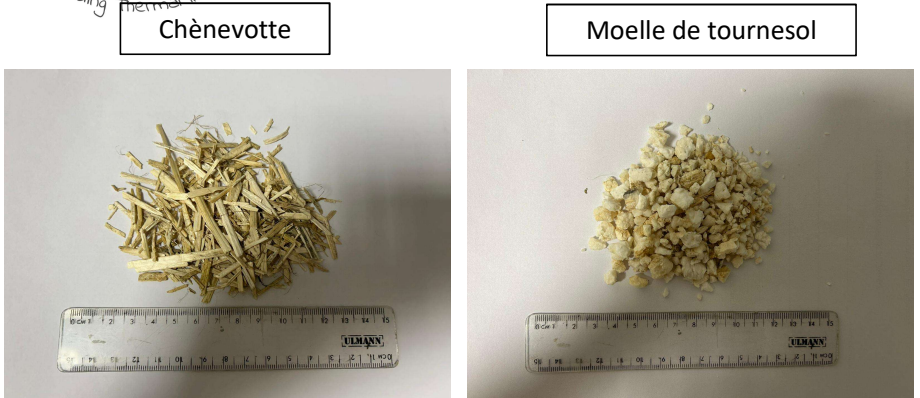
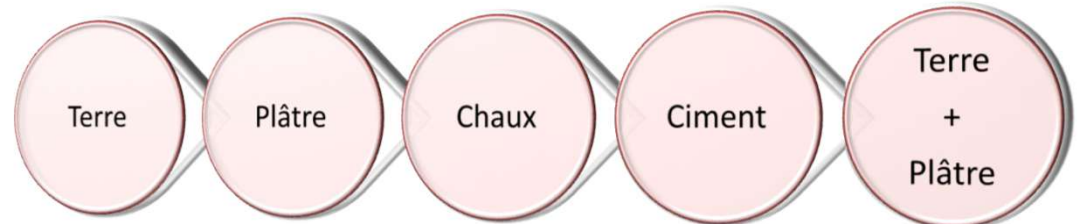




# Matériaux



## Liants minéraux



Bioressources utilisées



# Réaction au feu : cône calorimètre

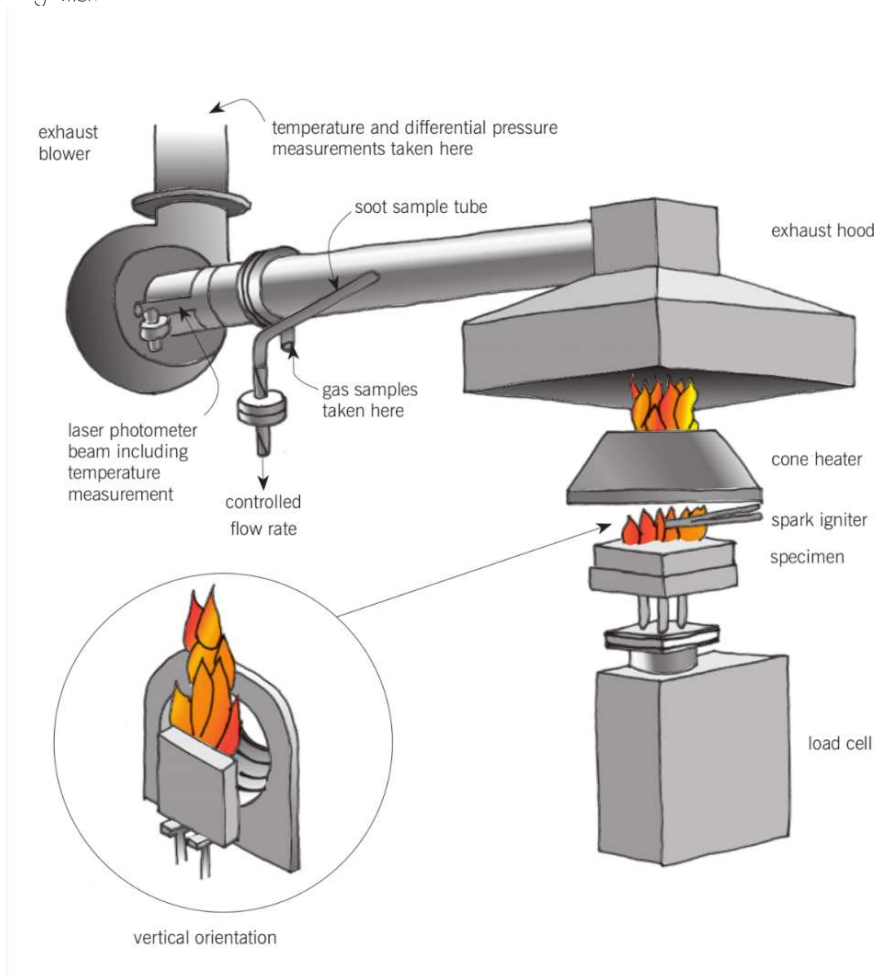


## Une géométrie simple

- Flux de chaleur réglable et homogène en surface (10-100 kW/m<sup>2</sup>)  
*Puissance surfacique reçue du Soleil 1.3 kW/m<sup>2</sup>*
- Surface exposée constante
- Progression du flux de chaleur perpendiculairement à la surface
- Surface arrière isolée
- Bonne ventilation (24L/s)



**Bonne corrélation avec le SBI (logiciel ConeTools)**

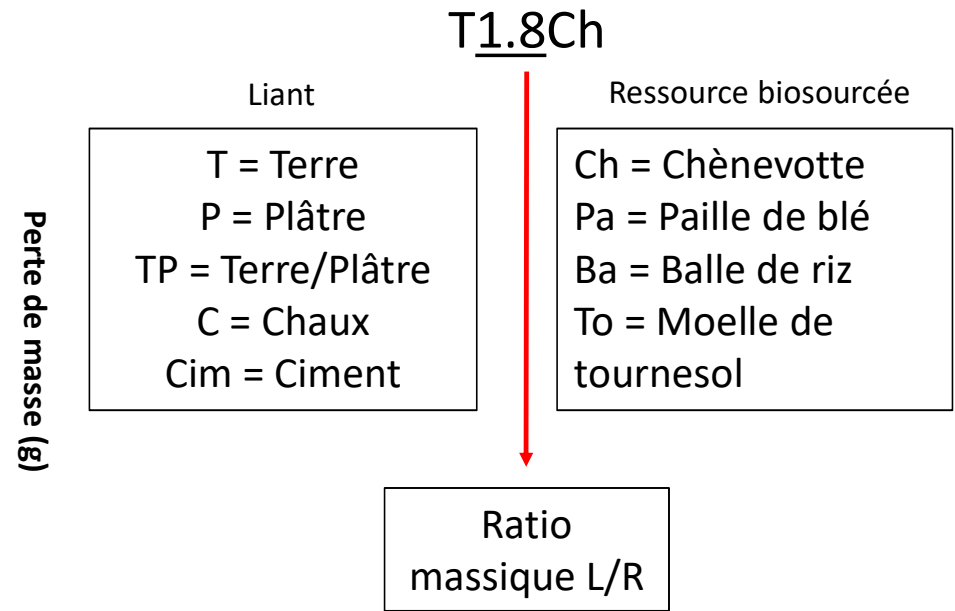
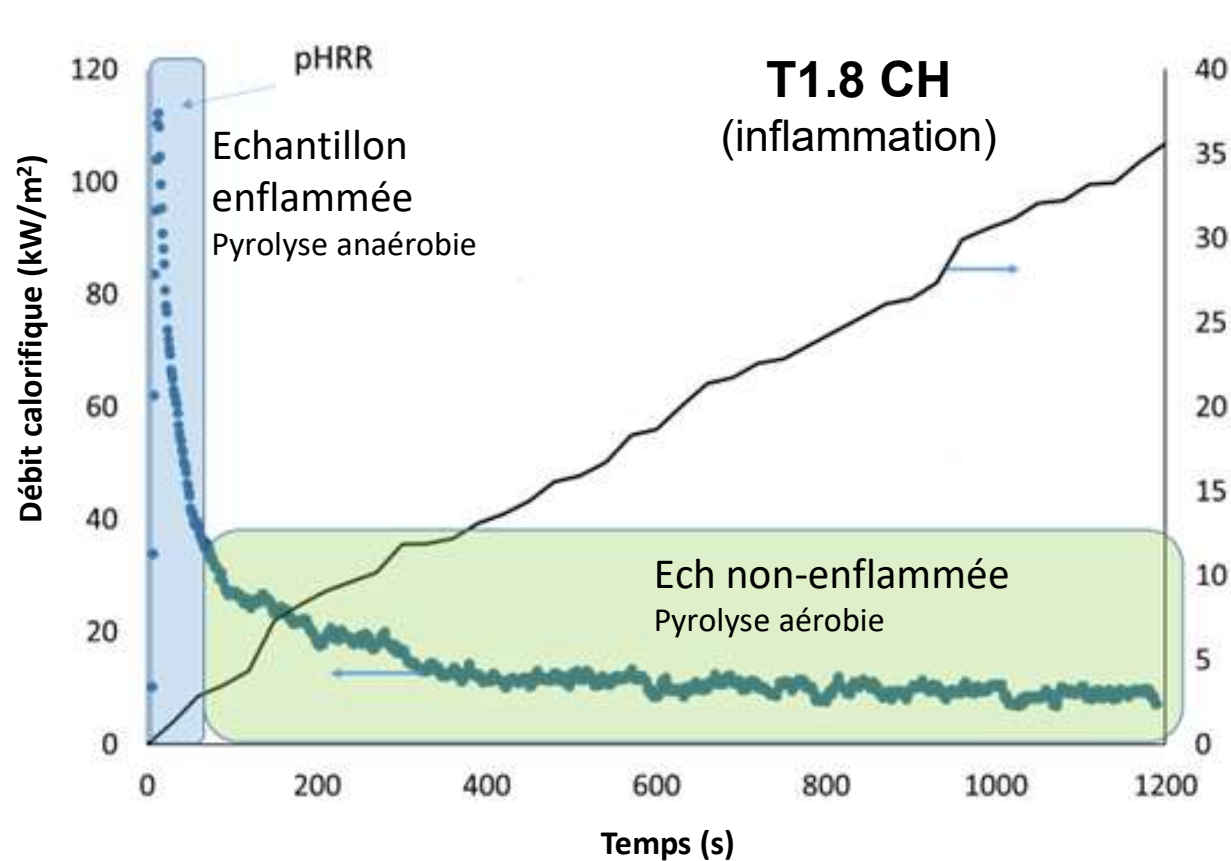




# Réaction au feu



Essais au **cône calorimètre** (50 kW/m<sup>2</sup> pendant 20 min, conformément à la norme ISO 5660)



**T1.8Ch 360** → Masse volumique de l'échantillon (kg/m<sup>3</sup>)

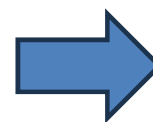
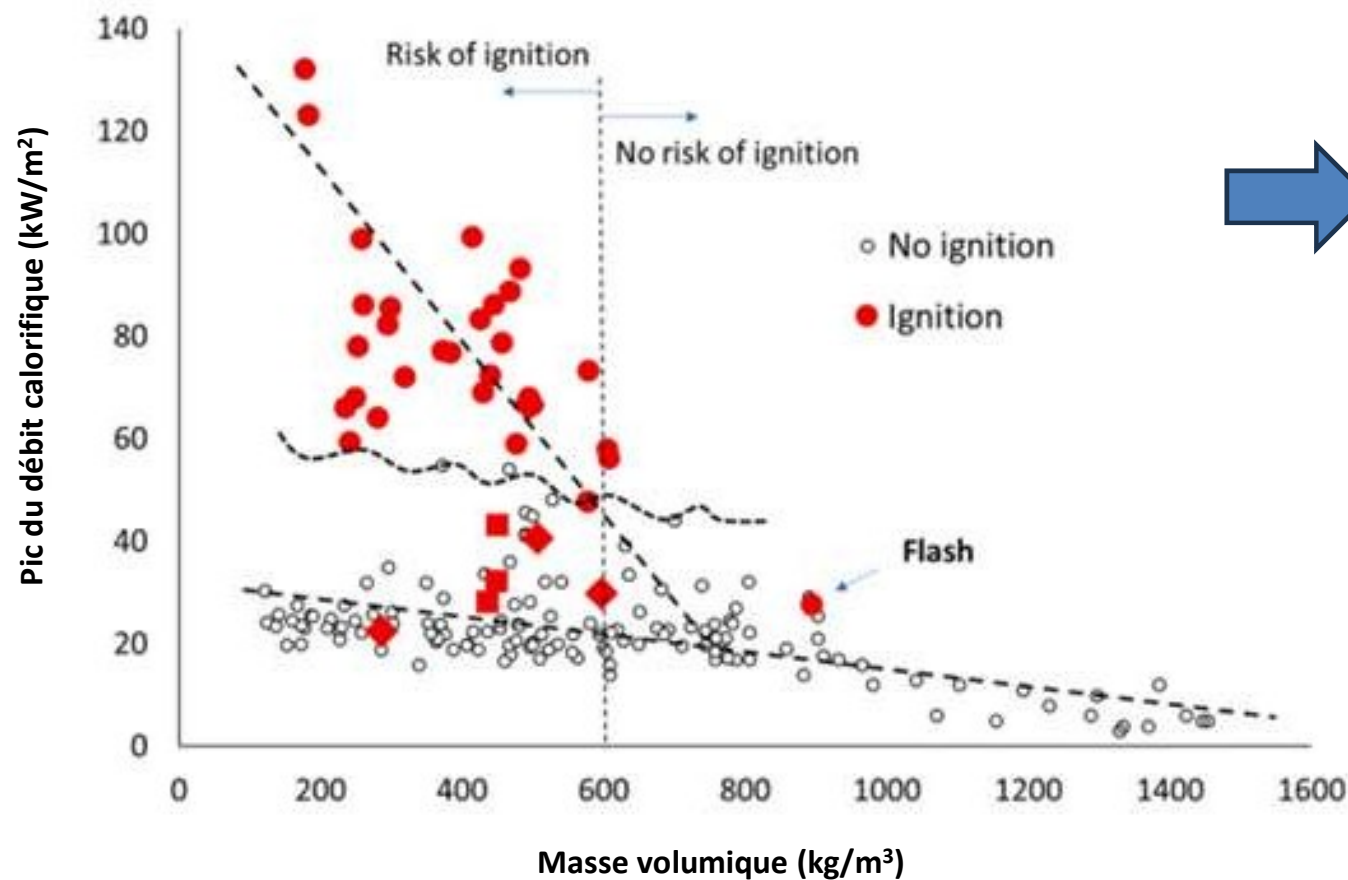




## Réaction au feu



Essais au **cône calorimètre** (50 kW/m<sup>2</sup> pendant 20 min, conformément à la norme ISO 5660)

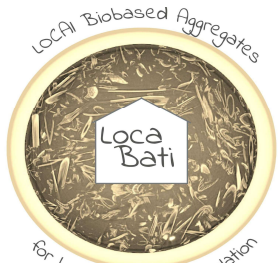


**Risque d'inflammation ?**

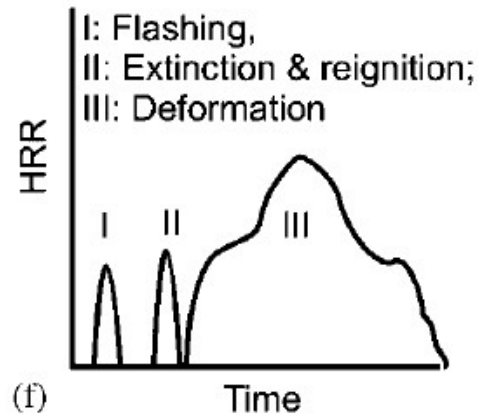
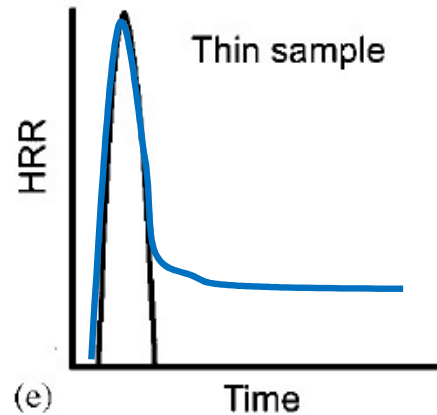
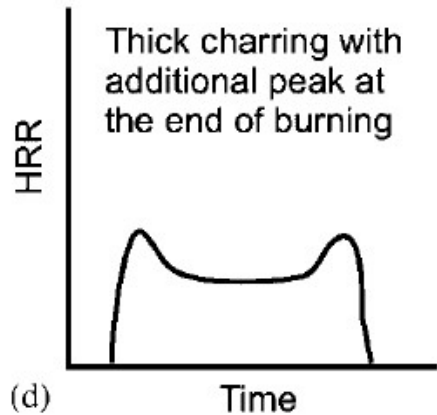
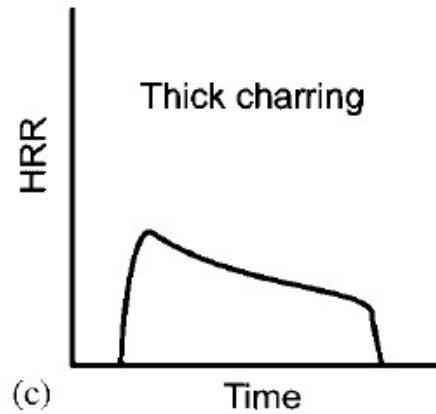
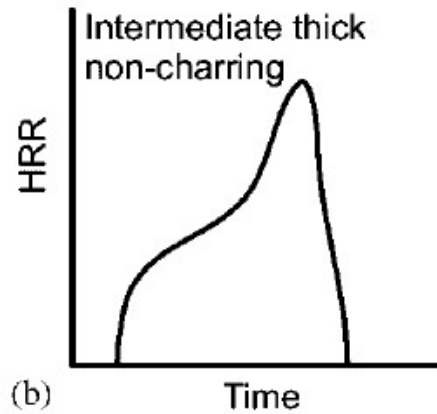
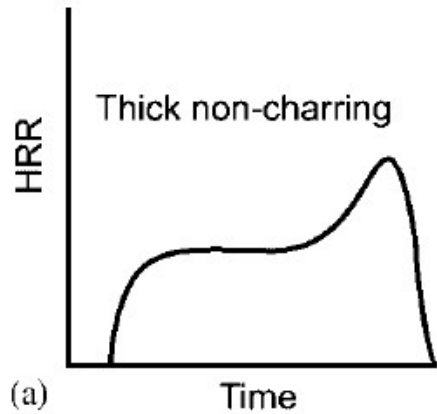
**Energie totale « libérable » ?**

**Puissance dégagée maximale ?**



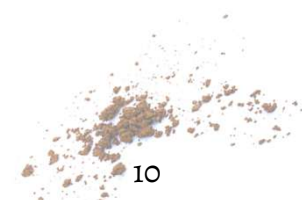


# Matériaux thermiquement fins



Transfert de chaleur lent dans l'épaisseur du matériau

Densité  $\searrow$ ,  
porosité  $\nearrow$ ,  
 $\lambda \searrow$





## Simulation Numérique (COMSOL)

ADEME



AGENCE DE LA  
TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE

Panneau de fibres de chanvre

Densité  $43 \text{ kg/m}^3$

Conductivité thermique  $0.038 \text{ W/(m.K)}$

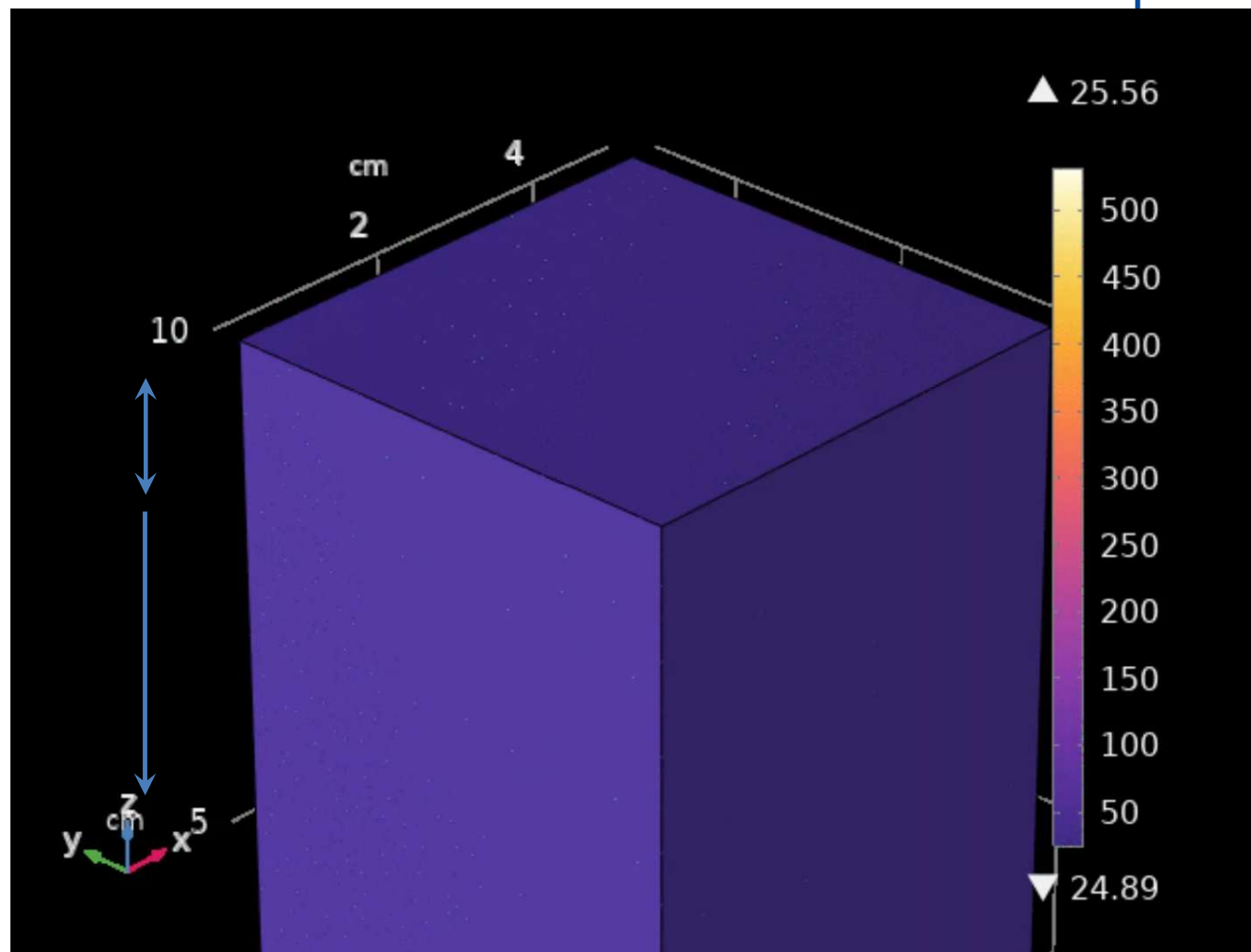
Emissivité 0.9

Capacité calorifique  $1.61 \text{ J/(g.K)}$

Coefficient d'extinction  $450 \text{ m}^{-1}$

*Augmentation rapide de la  $T^\circ\text{C}$  jusqu'à la  
 $T^\circ\text{C}$  de pyrolyse ( $\sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$ )*

*Augmentation de la  $T^\circ\text{C}$  beaucoup plus  
lente*





## Prédiction de la puissance maximale



+ de 400 tests

≠ Echantillons

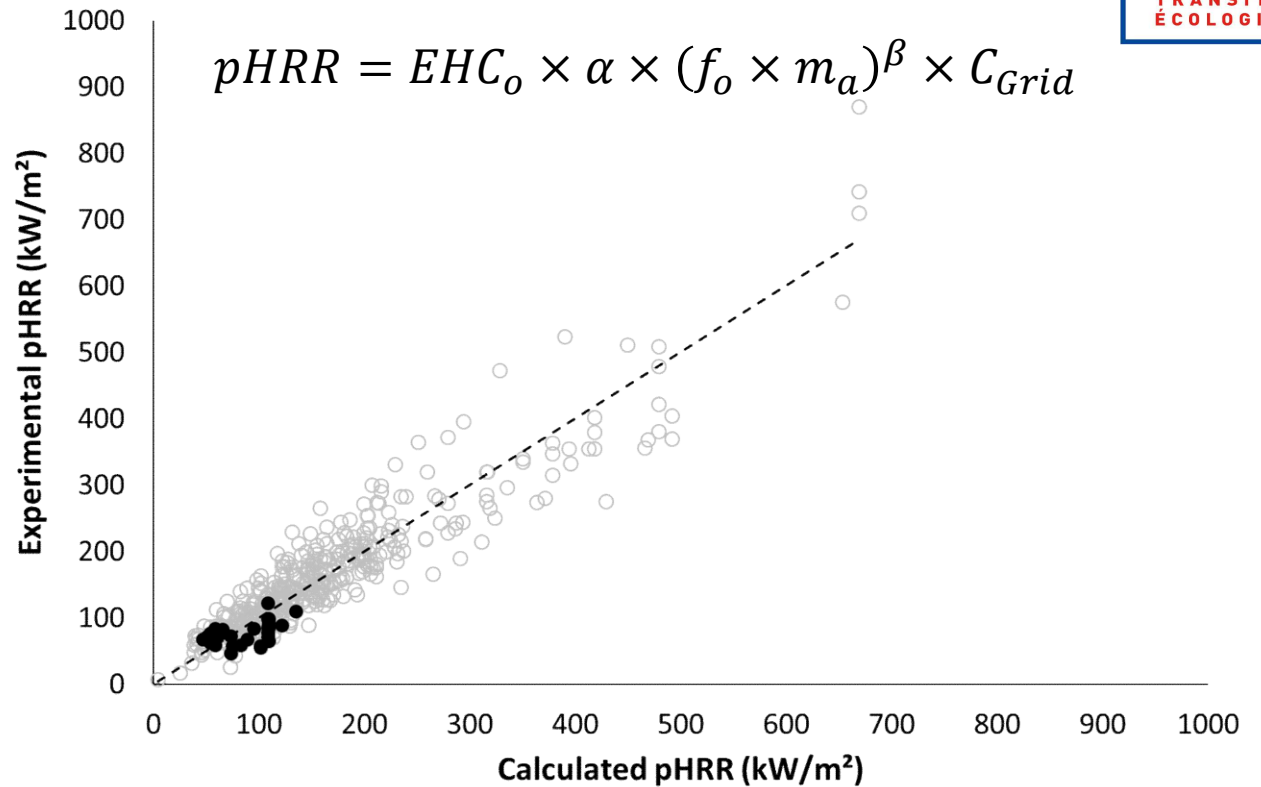
- Textiles
- Fibres en vrac
- Panneaux de particules
- Agrobétons
- Mousses
- Bois

Nature des matériaux : Matériaux lignocellulosiques, alginate, PP, PU, PS...

≠ Flux de chaleur (de 17 à 75 kW/m<sup>2</sup>)

≠ Masses (de < 1g à 500g)

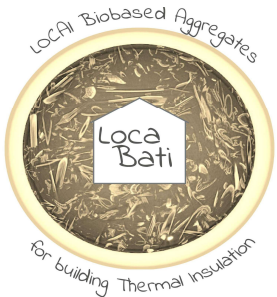
Présence d'une grille ou non



NB: Pour un agrobéton contenant 30% d'agroressource d'énergie de combustion 10 kJ/g,

**pHRR = 114 kW/m<sup>2</sup>**





# Prédiction de l'énergie totale « libérable »



Critères et classe des produits de construction selon l'Euroclasse

Classes des produits selon NF EN 13501-1 (Euroclasses)		
Comportement au feu	Production de fumée	Gouttelettes enflammées
A1	-	-
A2	s1	d0
A2	s1	d1
A2	s2	d0
A2	s3	d1
B	s1	d0
	s2	d1
	s3	d1
C	s1	d0
	s2	d1
	s3	d1
D	s1	d0
	s2	d1
	s3	d1
E	non applicable	d1
E	non applicable	d2
F	non applicable	non applicable

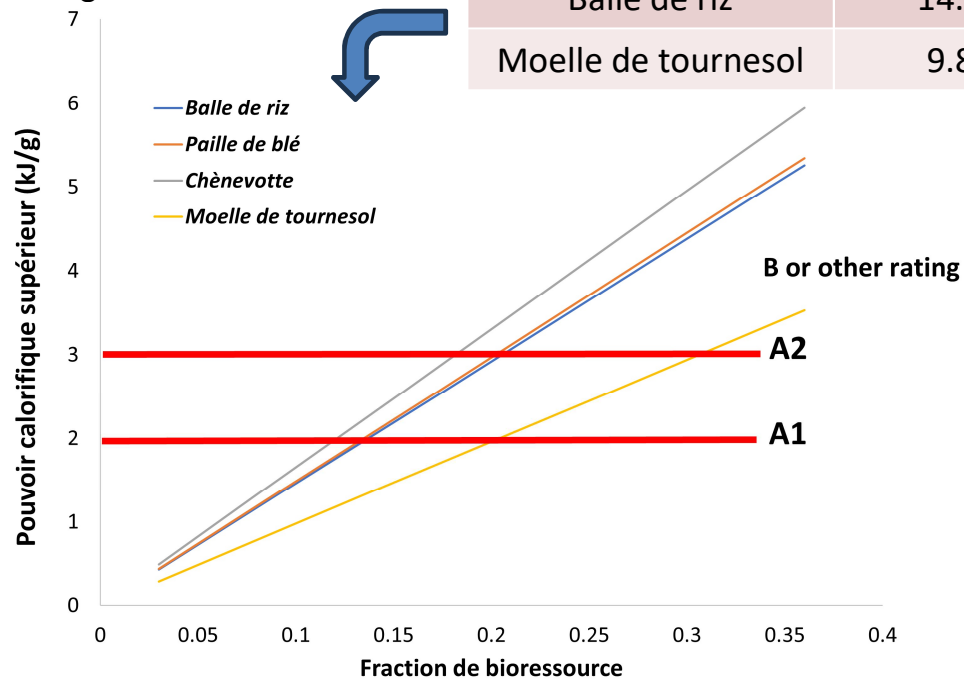
Mesure du PCS des bioressources via la *bombe calorimétrique*

Energie totale < 2 ou 3 kJ/g

Bioressource	PCS (kJ/g)
Chènevotte	16.5
Paille de blé	14.8
Balle de riz	14.6
Moelle de tournesol	9.8

PCS des bétons biosourcés en fonction de la fraction de bioressources selon le système Euroclasse

Evaluation de la fraction de bioressources maximale pour les classements A1 ou A2





# Prédiction de l'inflammabilité



L'ignition résulte de l'équilibre entre l'énergie libérée par le matériau et l'énergie nécessaire pour le chauffer et le pyrolyser.

**Contribution exothermique**  
*Bioressources (combustion)*  
 (car le liant ne brûle pas)

**Contribution endothermique**  
*Bioressources (pyrolyse)*  
*Liants (décomposition endothermique)*

$$\text{Contribution exothermique (De)} = \rho * \text{Fraction de bioressource} * \text{Total heat release (THR)}$$



Densité d'énergie (MJ/g)

Dégagement total de chaleur (THR) des bioressources mesuré au microcalorimètre de combustion (PCFC)

$$\text{Contribution endothermique (P)} = \Delta T * \rho * c_{\text{mod}}$$

$$c_{\text{mod}} = \frac{Hg \left(\frac{J}{g}\right)}{\Delta T \left(^{\circ}C\right)}$$

Delta entre la température ambiante et la température de pyrolyse (425°C)

Hg (J/g) = Énergie nécessaire à la décomposition thermique en combustible volatil<sup>12</sup>

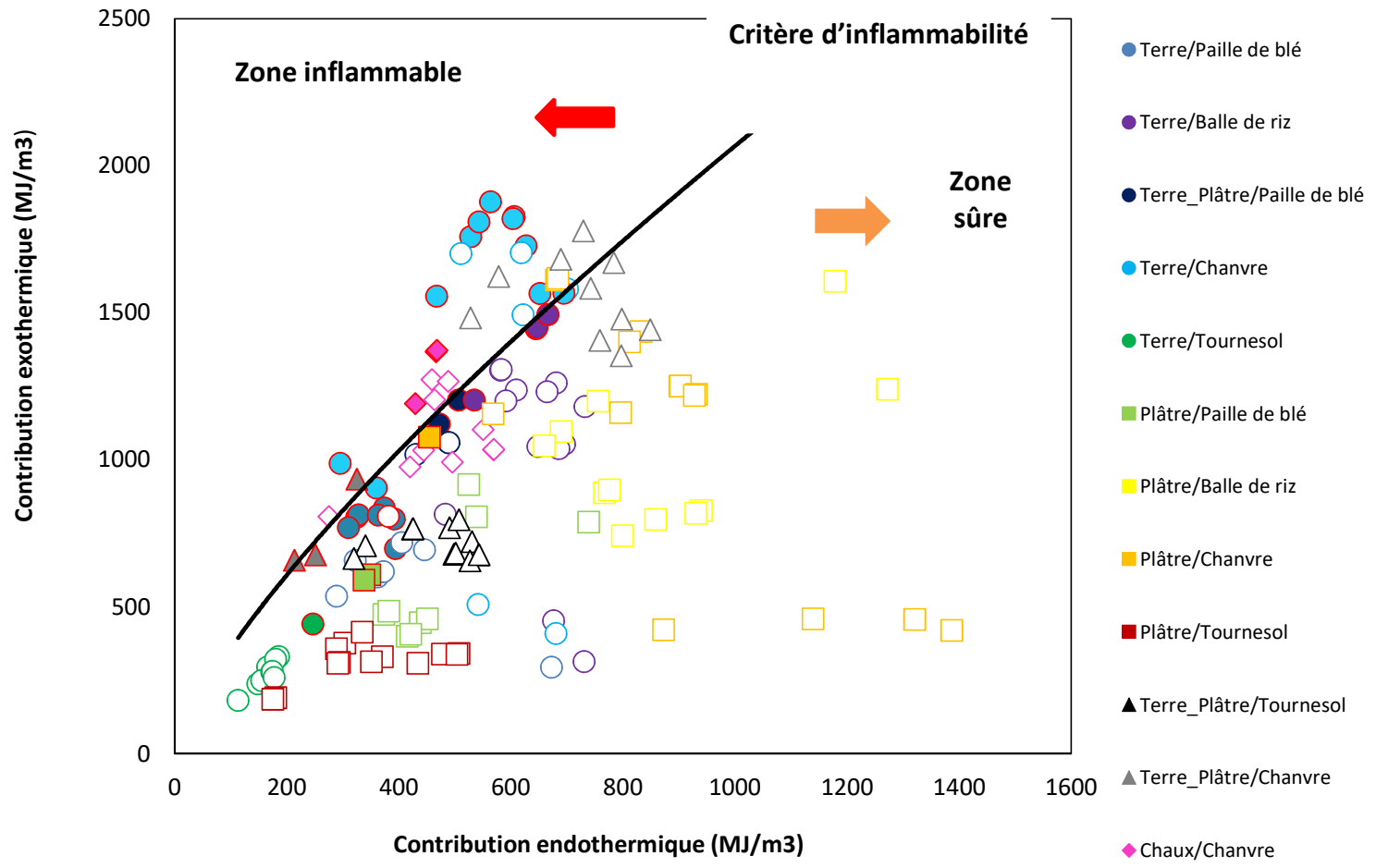
$$Hg = \int_{T_0}^{T_{ign}} c(T) dT \left(\frac{J}{g}\right) + \Delta h_m \left(\frac{J}{g}\right) + \Delta h_v \left(\frac{J}{g}\right)$$

Capacité thermique massique (J/(g.K))

Chaleur nécessaire pour vaporiser une unité de masse de combustible (J/g)



# Prédiction de l'inflammabilité



## Critère d'inflammabilité (inspiré de Lyon & Quintiere <sup>1</sup>)

$$mf'' \cdot hc > HRR^*$$

$mf''$  = Débit massique de combustible (g/(m<sup>2</sup>.s))  
 $hc$  = Énergie de combustion (kJ/g)  
 $HRR^* = 24 \text{ kW/m}^2$

## Densité énergétique critique

$$D_e^* = H_c^* \rho f_{bio} (1 - \mu)$$

$$D_e^* = 449 \times HRR^* \times P^{0.761}$$

$P$  contribution endothermique

$$H_c^* = \frac{HRR^*}{m_f''}$$



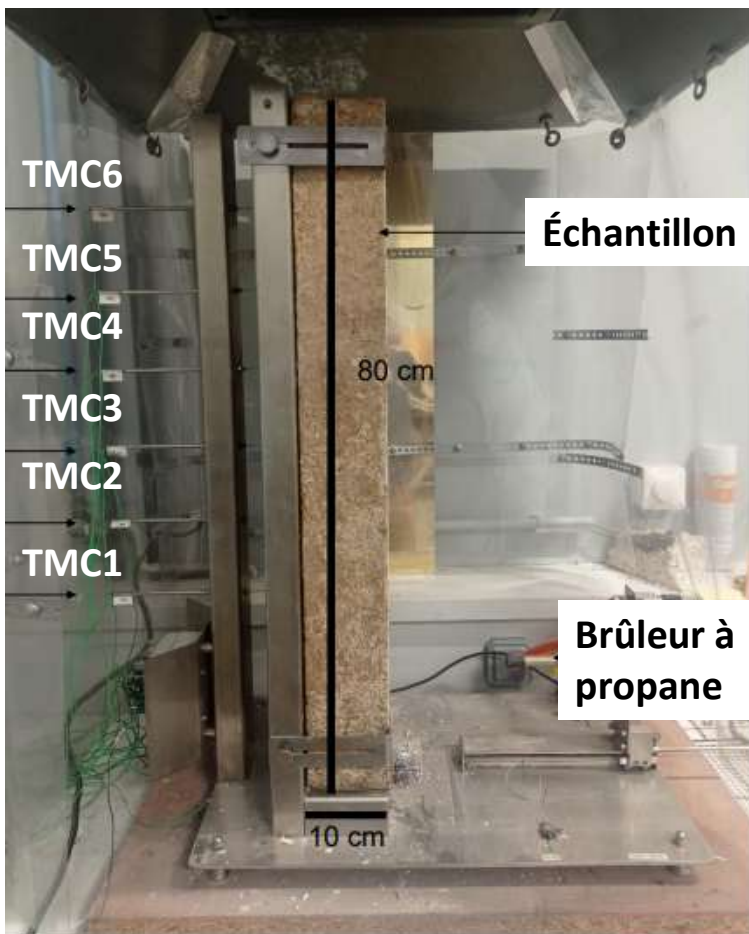
<sup>1</sup> Lyon, R. E., & Quintiere, J. G. (2007). Criteria for piloted ignition of combustible solids



## Feu couvant : Essai normé



### Test normé EN16733



### Déroulement de l'essai

15 min d'attaque thermique

Puis jusqu'à à 6 h de suivi de la température interne en six points (TMC)

### Critères pour qualifier un produit comme propice au feu couvant

- Flammes persistantes au sommet ou sur un côté de l'échantillon;
- Ré-inflammation de l'échantillon au moins 5 min post-arrêt;
- Le TMC6 enregistre une hausse de température  $> 250\text{ °C}$  post-arrêt;
- Après 6 h d'essai, TMC  $> 50\text{ °C}$  ou une hausse continue depuis 1 h.





# Feu couvant : Dispositif ASHES

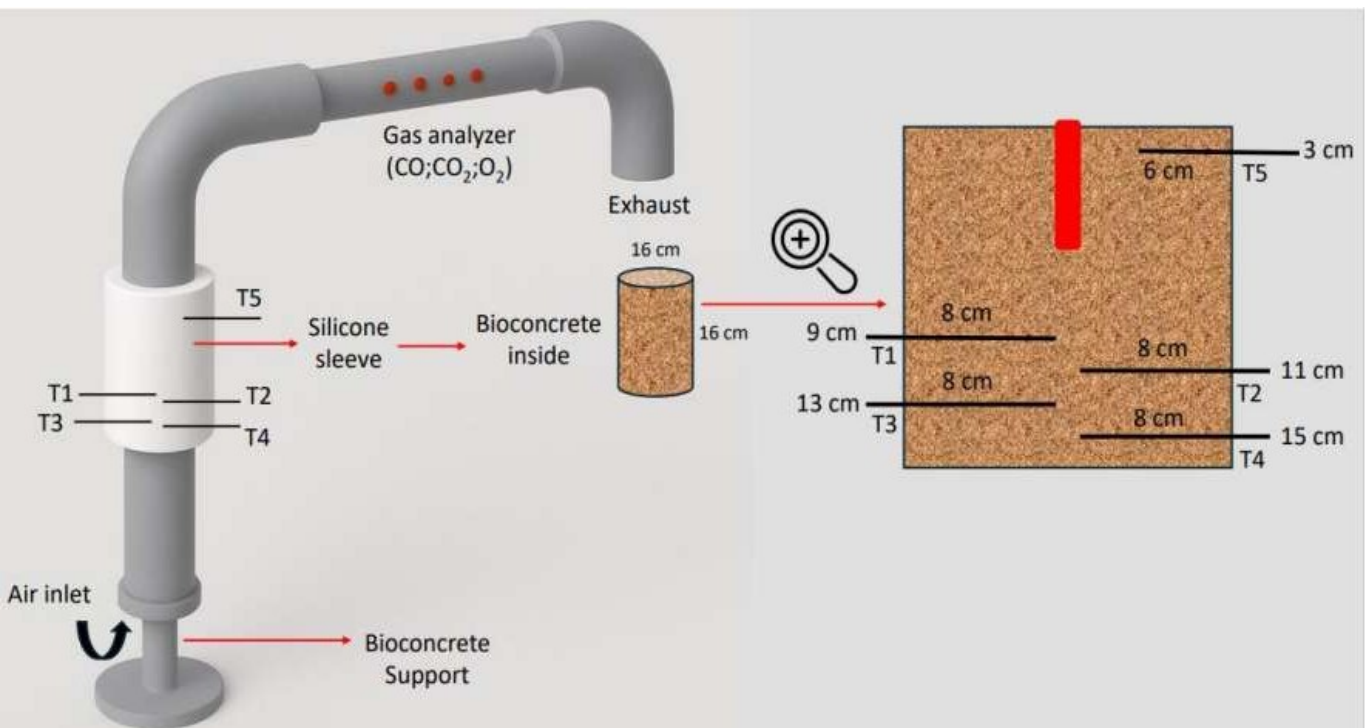
Simulation d'un feu couvant initié par une source de chaleur de faible intensité au cœur de l'échantillon (apport thermique connu);



**Contrôle du débit d'air**, paramètre clé dans le développement du feu couvant (système d'extraction d'air);

Direction du débit d'air également maîtrisée → Feu couvant à contre-courant;

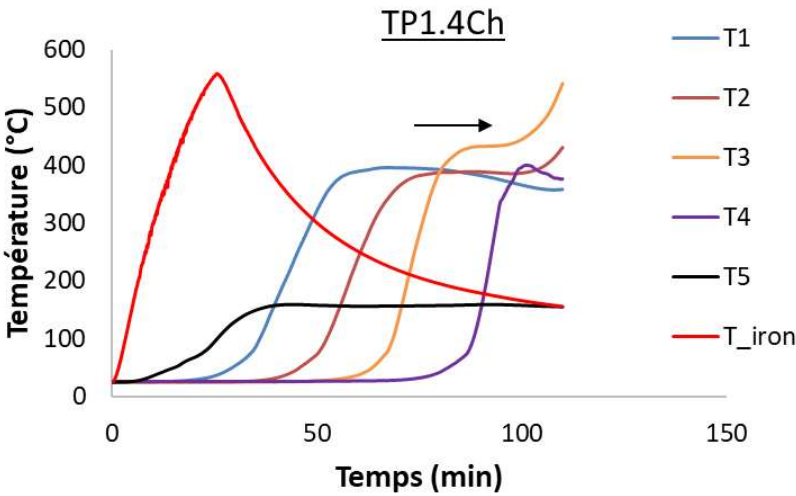
Analyse des gaz CO, CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>, ainsi que de la vitesse de propagation.



## Déroulement de l'essai

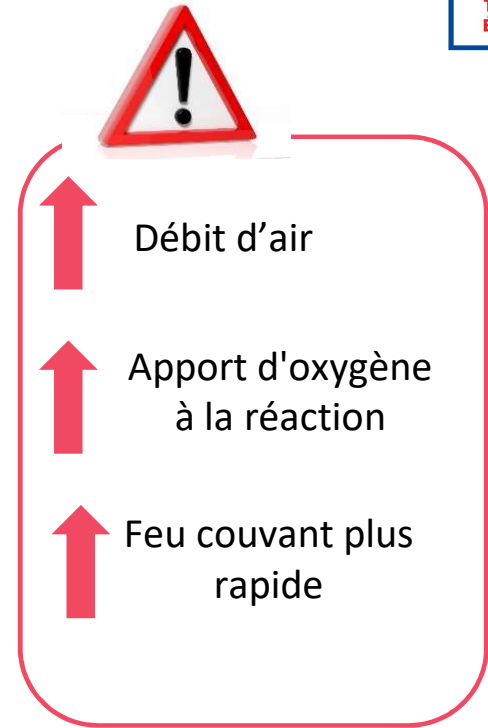
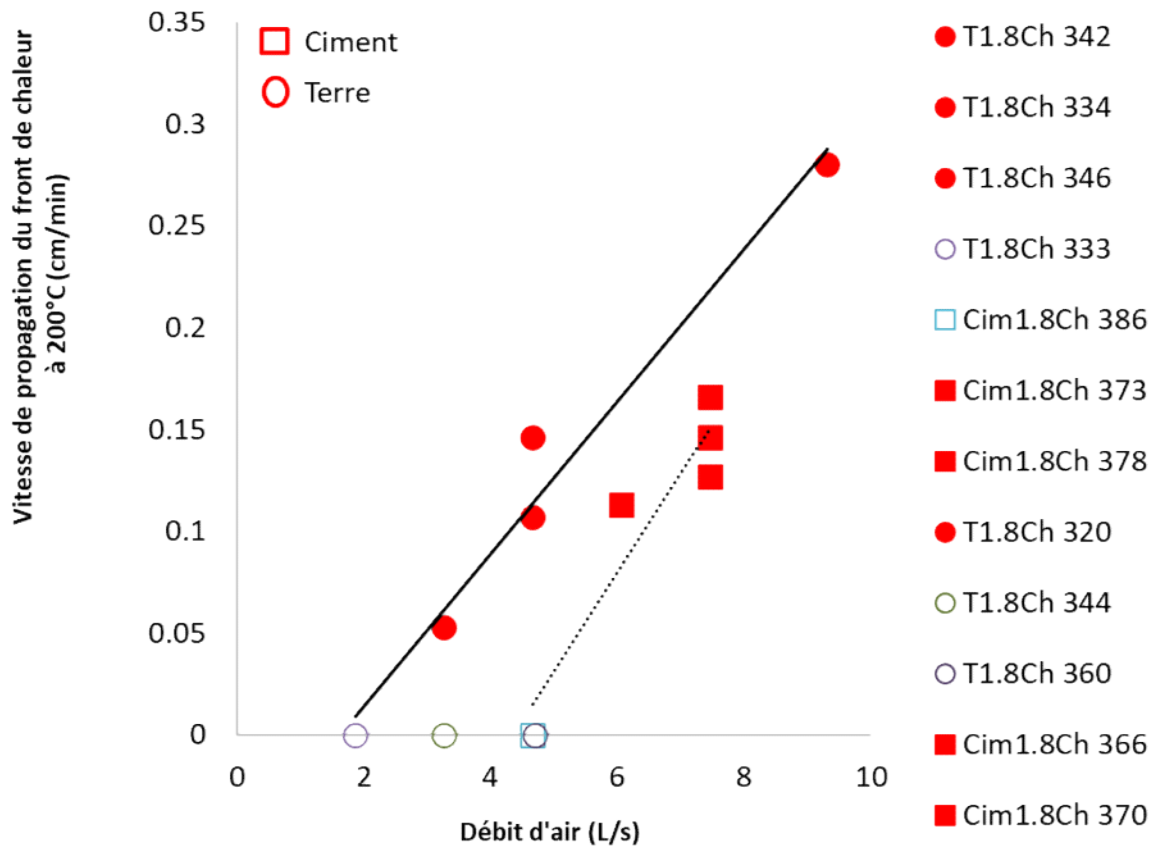
25 min d'attaque thermique avec le fer à souder;

Puis suivi de la température interne en cinq points.





# Feu couvant : Influence du débit d'air



**Influence de la porosité et de la densité**





## Conclusions pour le comportement feu



Réaction au feu et feu couvant sont partiellement régis par les mêmes propriétés, bien que les phénomènes en jeu soient différents.

Le rapport liant/bioressource et la densité sont interdépendants. Ils ont un rôle de premier ordre sur le comportement au feu :

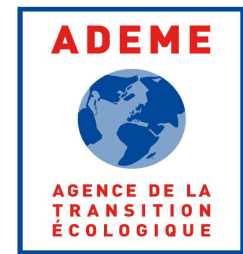
- **Matériaux thermiquement fins** (faible  $\lambda$ )
- **Energie de combustion** ( → *énergie libérable et puissance maximale*)
- **Contributions exo et endothermique** ( → *inflammabilité*)
- **Contrôle le débit d'air** ( → *vitesse de propagation du feu couvant*)





## COMPORTEMENT ACOUSTIQUE

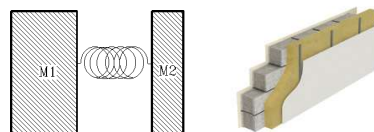
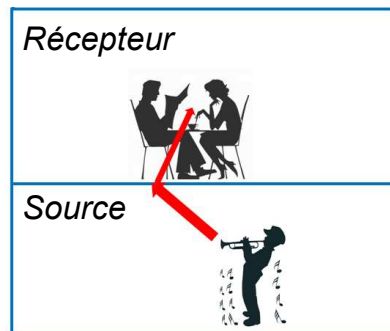




# Quels comportements en acoustique ?

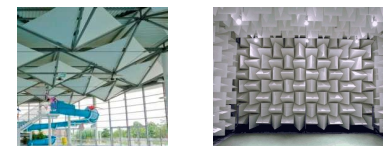
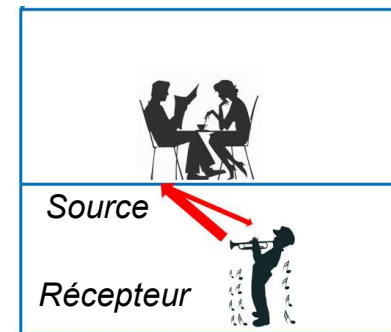
## Transmission acoustique

-> Limiter la propagation du son à travers une paroi



## Absorption acoustique

-> Limiter l'énergie réfléchiée sur une (des) surface(s)



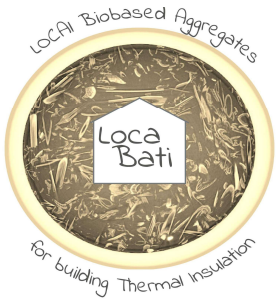
## Trois modes de dissipation associés

**Effets mécaniques**  
(pertes par amortissement structural)

**Effets visco-inertiels**  
(frottements visqueux fluide/solide)

**Effets thermiques**  
(échange de chaleur fluide <=> solide)





## Quels paramètres pour prédire l'acoustique ?

Matériau poreux



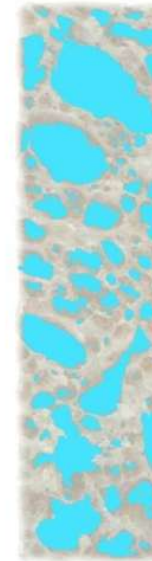
Phase solide



- \* Masse volumique
- \* Module d'Young
- \* Coefficient de Poisson
- \* Amortissement structural



Phase fluide



- \* Porosité
- \* Résistivité
- \* Tortuosité
- \* Longueur visqueuse
- \* Longueur thermique
- \* Perméabilité thermique...





## Des paramètres liés à la densité du matériau

- \* Porosité
- \* Résistivité
- \* Tortuosité
- \* Longueur visqueuse
- \* Longueur thermique
- \* Perméabilité thermique...

$$\phi = \frac{V_{\text{pores ouverts}}}{V_{\text{total}}}$$

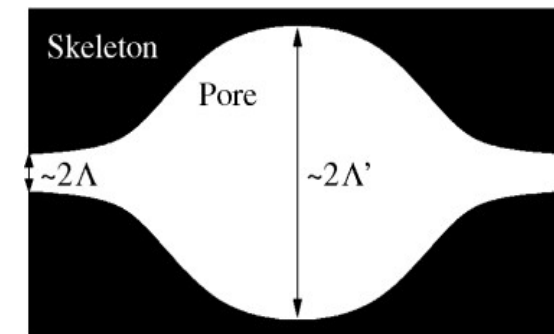
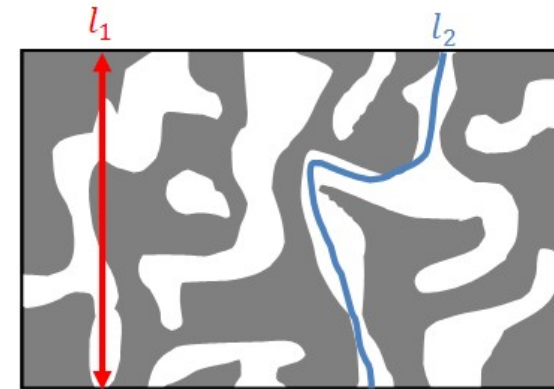
$$\sigma \Phi \vec{v} = -\vec{\nabla} p$$

$$\alpha_{\infty} = \frac{\frac{1}{\bar{V}} \int_V v^2 dV}{\left(\frac{1}{\bar{V}} \int_V \vec{v} dV\right)^2} = \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2$$

$$\frac{2}{\Lambda} = \frac{\int_{S_p} \vec{v}^2 dS_p}{\int_{V_p} \vec{v}^2 dV_p}$$

$$\frac{2}{\Lambda'} = \frac{S_p}{\Phi}$$

$$\tau = j\omega \frac{k_0'}{\kappa} p$$



[apmr.matelys.com]





# Un comportement spécifique pour les agrobétons?



Anisotropie

Polydispersité

Hygroscopicité [Venegas et al. 2024]

**Porosité multiéchelle**

Porosité interparticule

Porosité intraparticule

→ Tailles de pores pas toujours compatibles avec l'acoustique

→ Porosités partiellement connectées

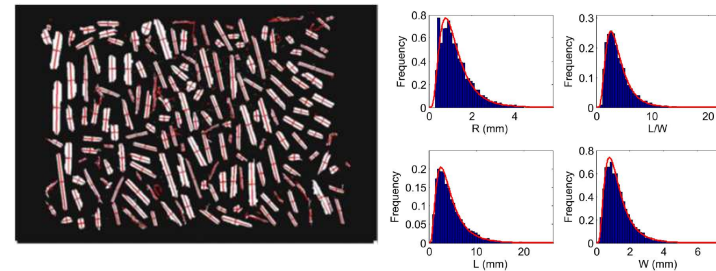
→ Contrastes de perméabilité

**Effet du liant**

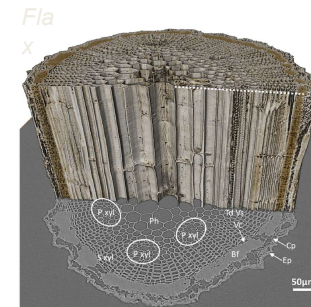
Porosité intra liant

Interface liant / particule

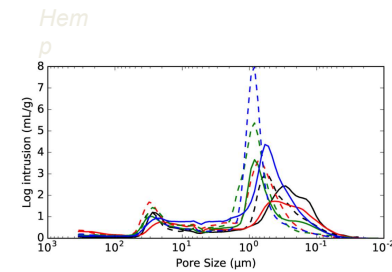
Homogénéité du matériau / colmatage de la porosité



[Glé et al. 2013]



[Nuez et al. 2022]



[Glé et al. 2021]

- Comment caractériser ces spécificités et modéliser le comportement acoustique associé?
- Quel est l'effet du liant d'un point de vue acoustique dans les bétons végétaux?





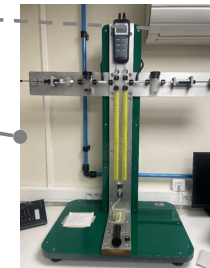
## Les méthodes de caractérisation

**Propriétés acoustiques:** Absorption + Transmission  
Tubes de Kundt  
Méthode à 3 microphones [*Iwase et al 1998, Doutres et al 2012*]



**Résistivité**  
Résistivimètre selon ISO 9053-1 + estimation basses fréquences

**Porosité ouverte**  
Comparaison des volumes d'air [*Leclaire et al 2003*]

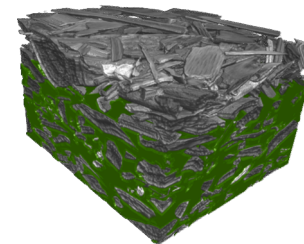


**Porosité interparticule**  
Pycnometrie solide [*Ratsimbazafy 2022*]

**Caractérisation indirecte:** Porosité acoustique, tortuosité...  
Méthode analytique [*Olny and Panneton 2006-2008*]



**Microtomographie**  
Segmentation & Séparation  
Calcul des paramètres morphologiques et de transport





## Applications aux agroressources et agrobétons

### Granulats en vrac

-> 4 matériaux (Chènevotte, moelle de tournesol, roseau, balle de riz)  
Epaisseurs : 20, 40, 60, 80 & 100 mm  
Densité : 5 valeurs différentes  
Diamètre des échantillons: 40 et 100 mm



### Agrobétons

-> 35 formulations ( 4 liants, 4 agroressources,  
Ratio liant / agroressources de 1.4 à 4)  
Densité:  $\rho \in [175 - 575 \text{ kg.m}^{-3}]$   
Epaisseurs: 40 mm  
Diamètre des échantillons: 100 mm





## Résultats sur les granulats en vrac



### Propriétés acoustiques

#### Effet épaisseur

Augmentation d' $\alpha$  et de TL

Déplacement du max( $\alpha$ ) en BF

Déplacement des résonances en BF

-> Caractérisation plus propre entre 40 to 60 mm

#### Effet densité

Augmentation d' $\alpha$  et de TL

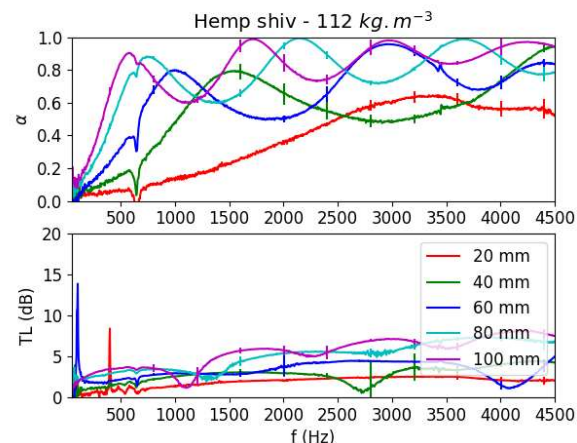
Déplacement du max( $\alpha$ ) en BF

#### Effet agroressource

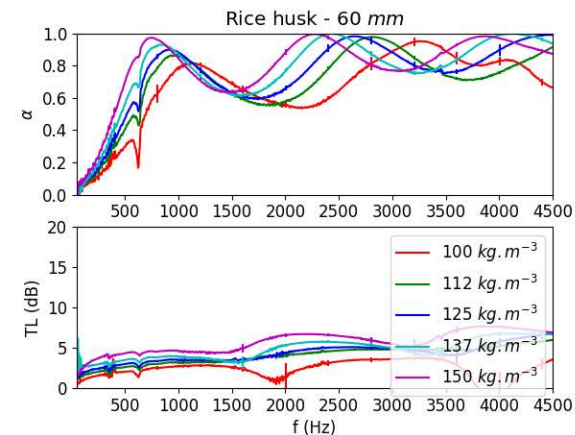
Comportement similaire

Cas de la moëlle de tournesol

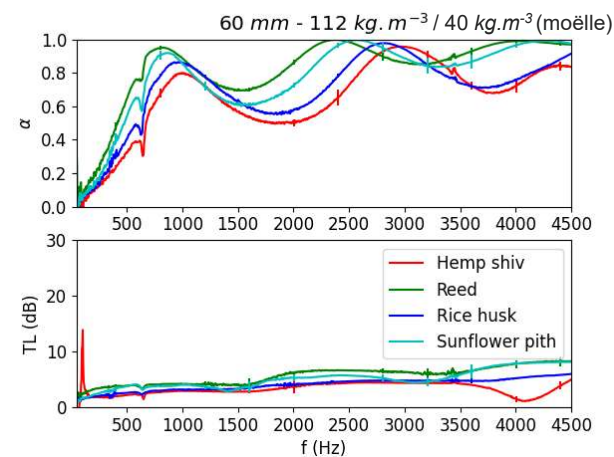
( $\rho_{\text{moëlle}} \sim 50 \text{ kg.m}^{-3} < \rho_{\text{chenevotte}} \sim 250\text{-}300 \text{ kg.m}^{-3}$ )



Effet épaisseur (Chènevotte)



Effet densité (Balle de riz)



Effet agroressource





# Résultats sur les granulats en vrac



## Paramètres acoustiques

Porosité acoustique

Diminution avec  $\rho$

## Résistivité

Comportement sensible pour la moëlle

Augmentation linéaire avec  $\rho$  sinon

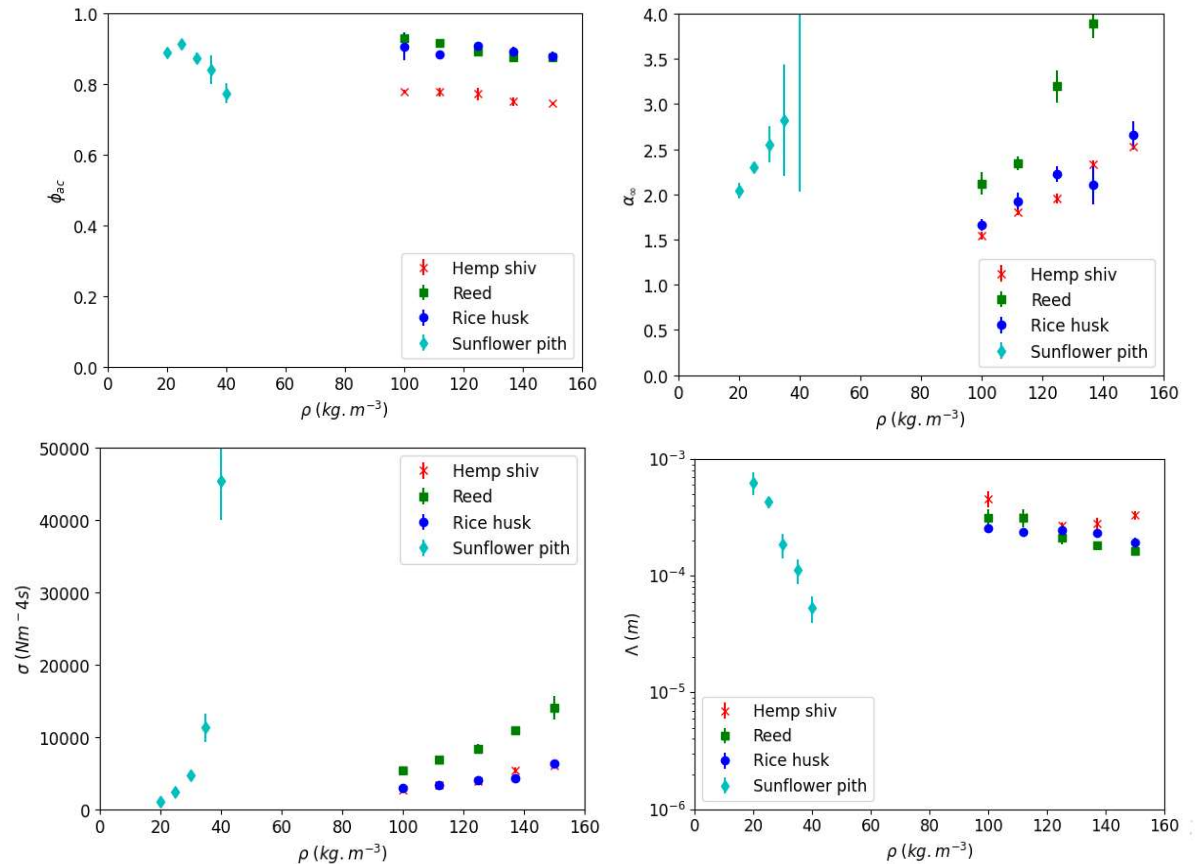
## Tortuosité

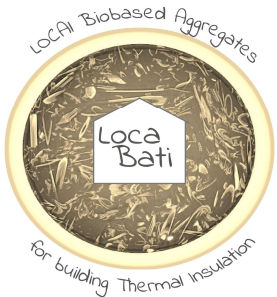
Augmentation avec  $\rho$

Des valeurs relativement importantes

## Longueur visqueuse

Diminution avec  $\rho$





# Résultats sur les agrobétons



## Propriétés acoustiques

### Effet quantité de liant

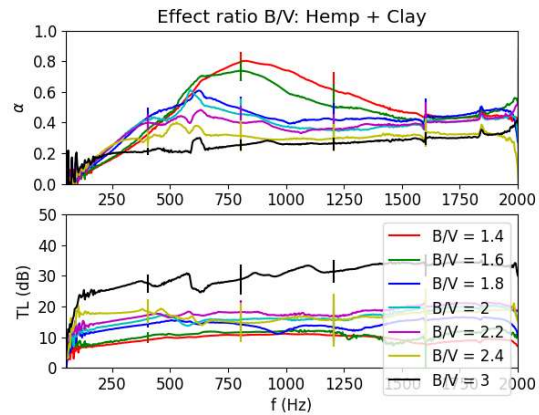
Diminution de  $\alpha$  + augmentation de TL  
 Déplacement du  $\max(\alpha)$  en BF

### Effet type de liant

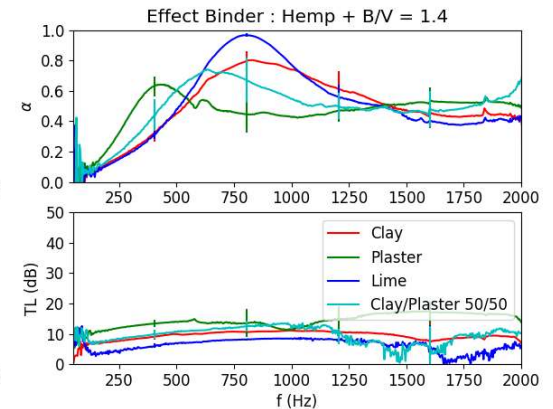
$\max(\alpha)$  plus prononcé avec la chaux  
 $TL_{\text{platre}} > TL_{\text{terre}} > TL_{\text{chaux}}$

### Effet agroressource

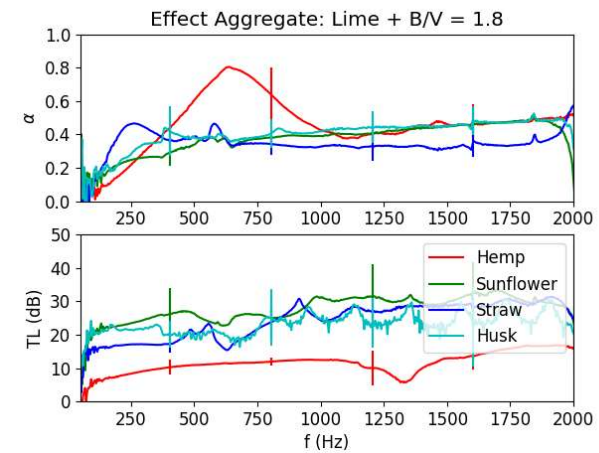
$\max(\alpha)$  plus prononcé avec la chènevotte  
 $TL_{\text{moelle}} > TL_{\text{paille}} > TL_{\text{chenevotte}}$



Effet quantité de liant (Terre + chanvre)



Effet liant (Chènevotte)



Effet agroressource (Chaux)





# Résultats sur les agrobétons



## Paramètres acoustiques

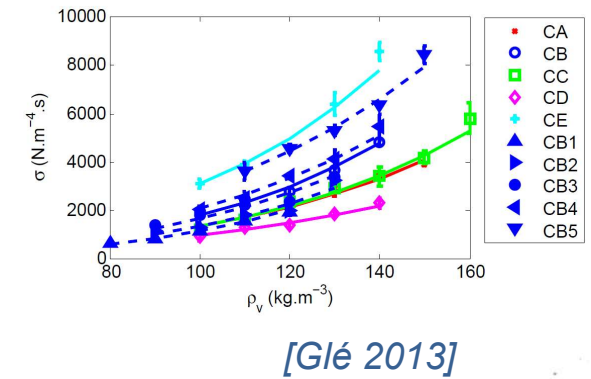
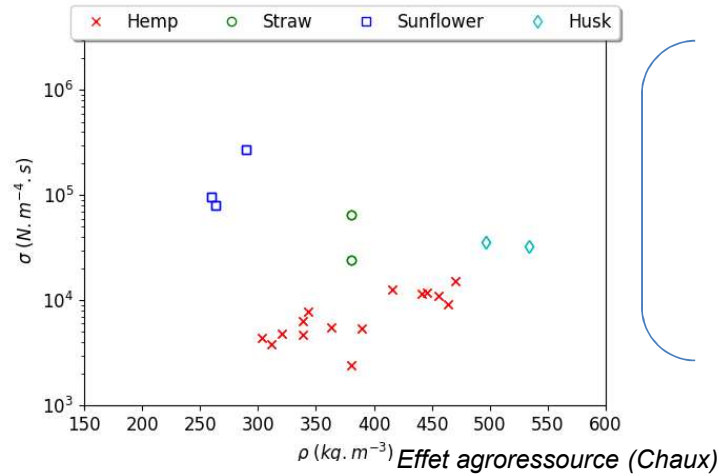
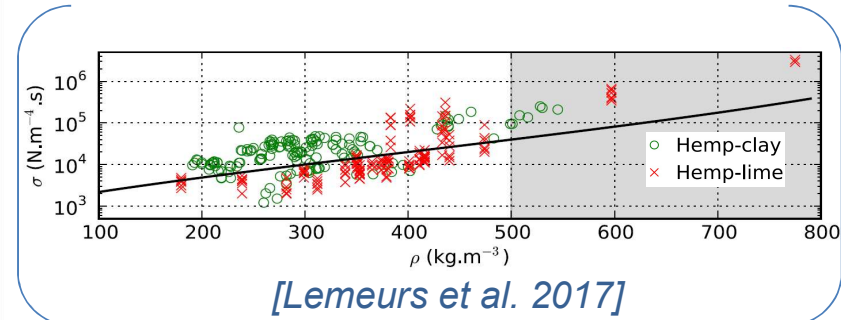
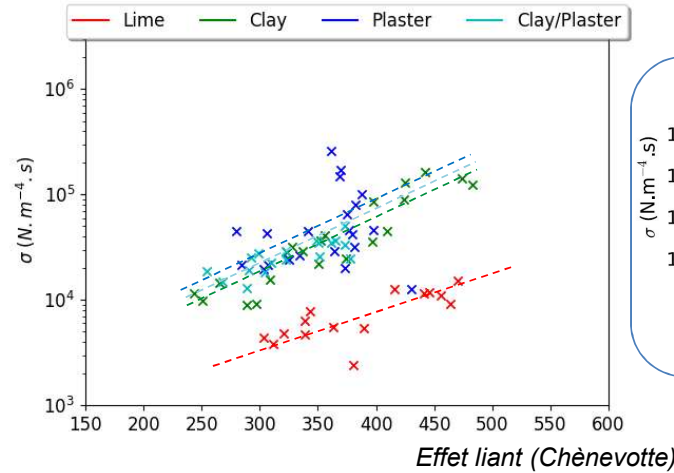
Focus sur la résistivité

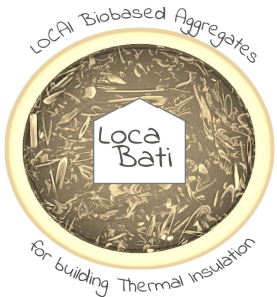
Effet du liant:

$$\sigma_{chaux} < \sigma_{terre} < \sigma_{platre}$$

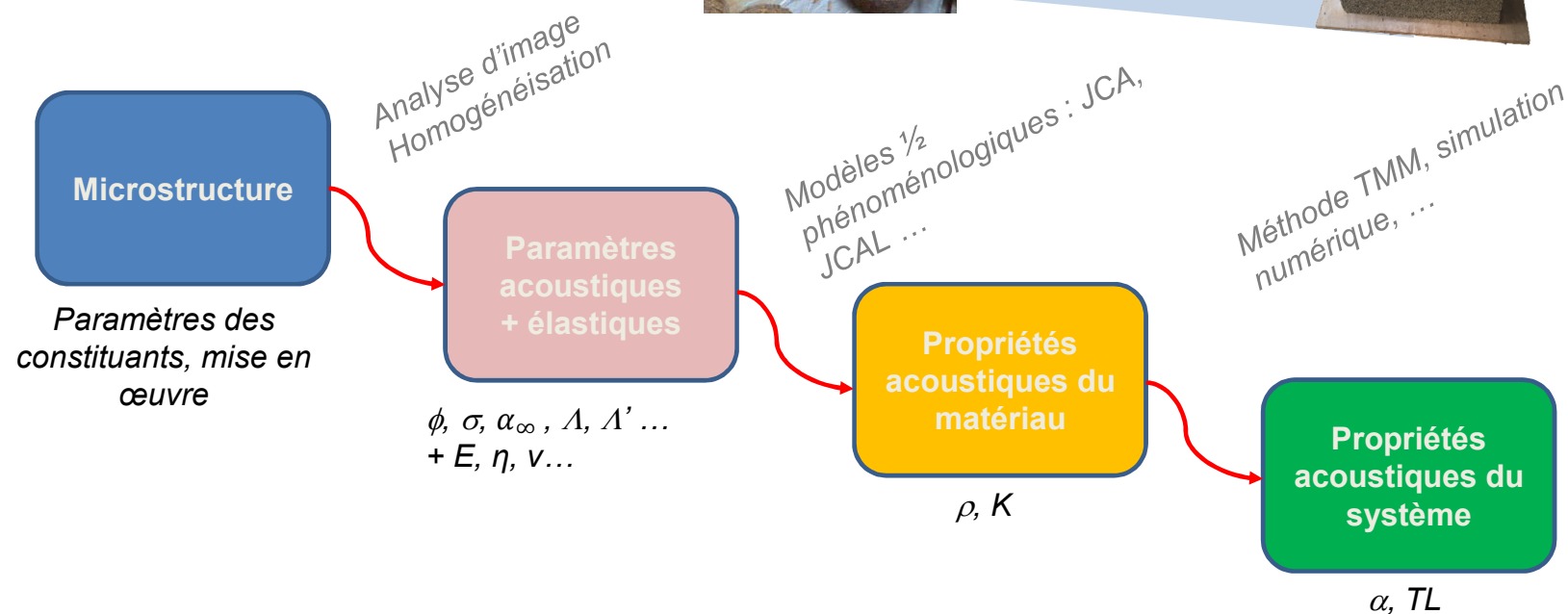
Effet agroressource:

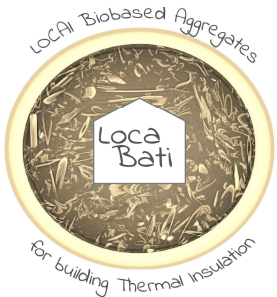
- Densité apparente
- Forme ?
- Taille particules ?





# Modélisation acoustique - Approche





# Modélisation acoustique - Approche

## Hypothèses

### Squelette rigide

Première étape: dissipation phase fluide

Dissipation mécanique est considérée ensuite

### Confrontation de 2 méthodes

Référence : simple porosité -> *une porosité considérée de la même dimension caractéristique*

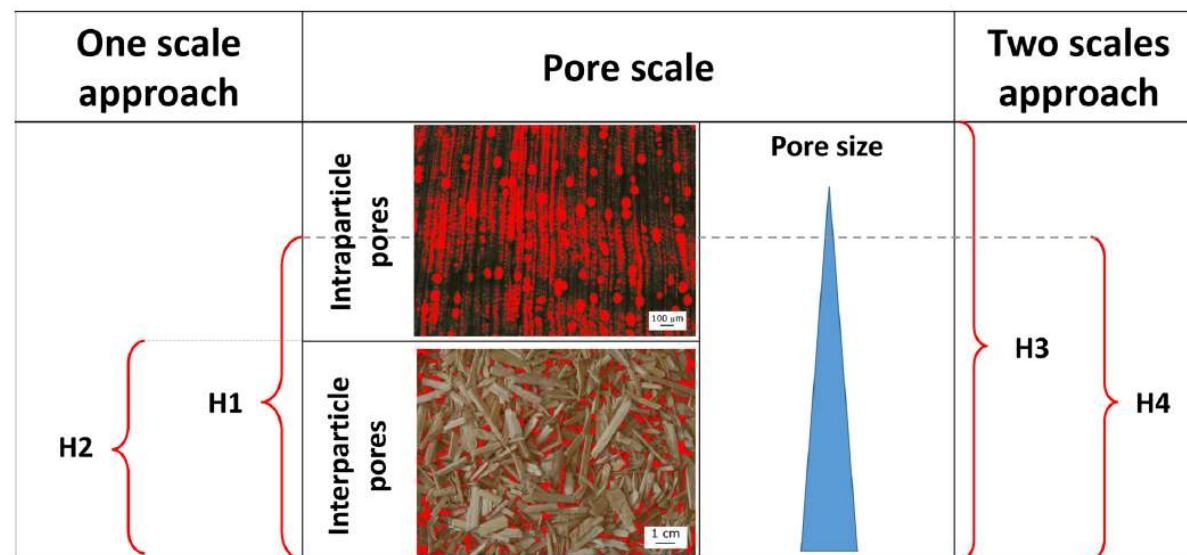
Effets visco-inertiels: [Johnson et al 1987] + Effets thermiques: [Champoux & Allard 1991, Lafarge et al 1997]

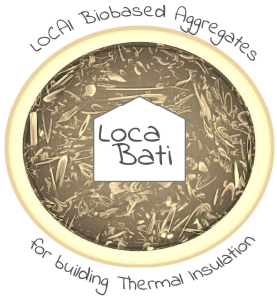
Options (H1, H2) sur la porosité effective

Avancée : double porosité -> *deux milieux interconnectés considérés, deux dimensions caractéristiques*

Somme des dissipations aux 2 échelles [Only & Boutin 2003] [Venegas & Umnova 2011]

Options (H3, H4) sur la porosité intraparticulaire





## Modélisation acoustique - Résultats

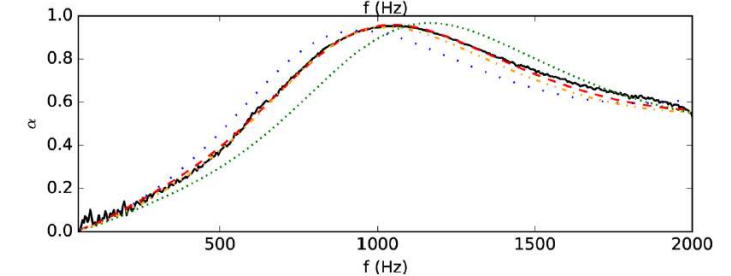
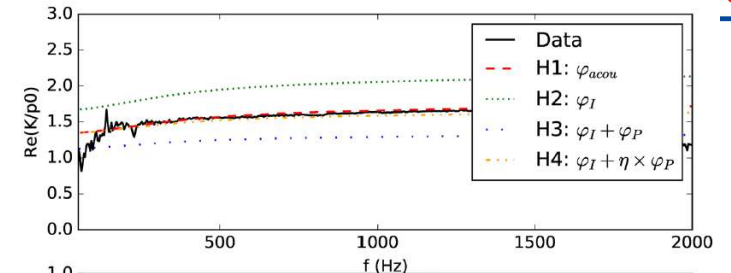


Un comportement multi-échelle retrouvé pour certains matériaux

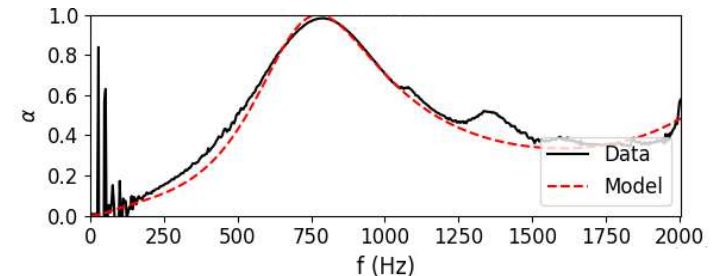
- Approches H1 / H4 généralement les plus pertinentes
  - H1 recommandée comme référence
  - H4 permet d'affiner l'analyse et de prendre
- Quelques exceptions
  - Particules à porosité ouverte -> Porosité totale effective (H3)
  - Particules fermées 'acoustiquement' -> Porosité interparticule (H2)
  - Particules avec nanoporosité -> Sorption [Venegas & Boutin 2017]



- Conclusion :
  - Selon le matériau, tous les pores ne prennent pas forcément part à la dissipation acoustique



Comparaison des approches pour la chènevotte



Modélisation du terre chanvre (L/C=1.4) selon (H1)



## De la microtomographie à l'acoustique



### Campagne expérimentale

### Exploitation

Segmentation

Séparation

Calcul des paramètres morphologiques et de transport

### Comparaison des résultats

Porosité interparticule

Résistivité

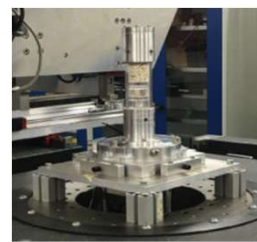
Tortuosité

Longueurs caractéristiques

### Travaux en cours et perspectives

Extension aux autres configurations en vrac

Extension aux agrobétons



Dispositif

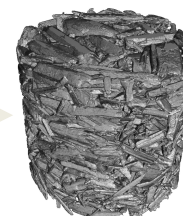
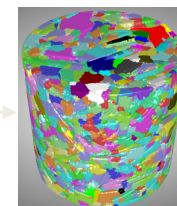
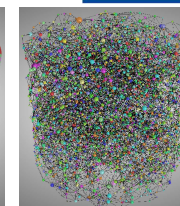


Image brute 3D



Modélisation de l'espace poreux en sphères équivalentes



Chênevotte (130 kg.m <sup>-3</sup> )	Approche acoustique	Données issues de la tomographie
$\phi_{acou} / \phi_{inter}$	0,78	0,54
$\sigma_{inter}$	3900 Nm <sup>-4</sup> s (z)	4100 Nm <sup>-4</sup> s (z) 2000-2300 Nm <sup>-4</sup> s (xy)
$\alpha_{\infty inter}$	2,4 (z)	2,3 (z) 1,5 – 1,6 (xy)
$\Lambda_{inter}$	240 $\mu$ m (z)	260 $\mu$ m (z) 210-230 $\mu$ m (xy)
$\Lambda'_{inter}$	590 $\mu$ m	640 $\mu$ m





# Conclusions pour le comportement acoustique



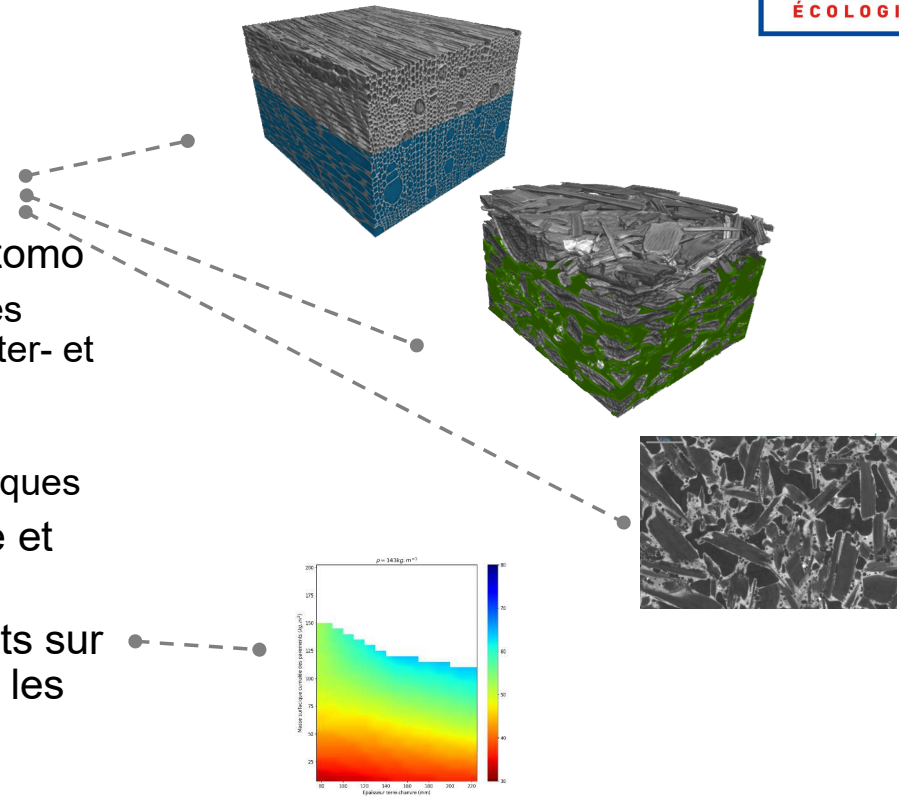
Capitalisation de nouvelles données acoustiques sur les particules vrac et les agrobétons

Mise en évidence des principaux effets liés aux matières premières et formulations

Analyse du comportement multi-échelle, différent selon les agroressources

## Des perspectives

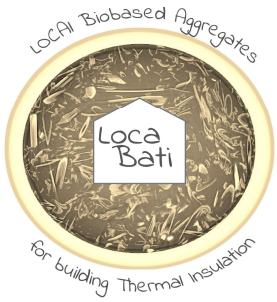
- Exploitation des Images issues de la tomo
  - Caractérisation des microstructures inter- et intra-particule
  - Confrontation aux approches numériques
- Effets d'anisotropie et d'élasticité
- Approfondissements sur l'effet du liant dans les agrobétons



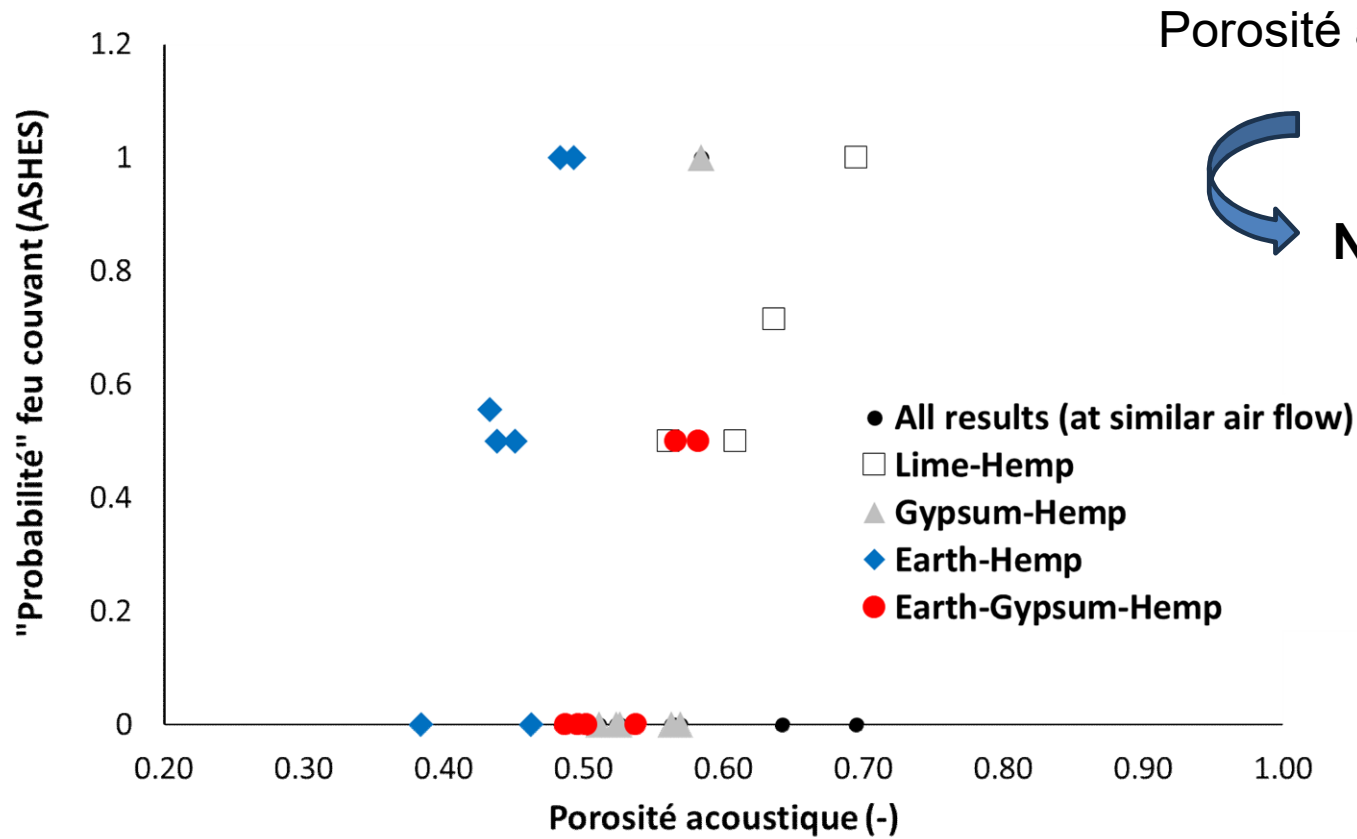


## QUEL LIEN POSSIBLE ENTRE FEU ET ACOUSTIQUE?





# Feu couvant et propriétés acoustiques



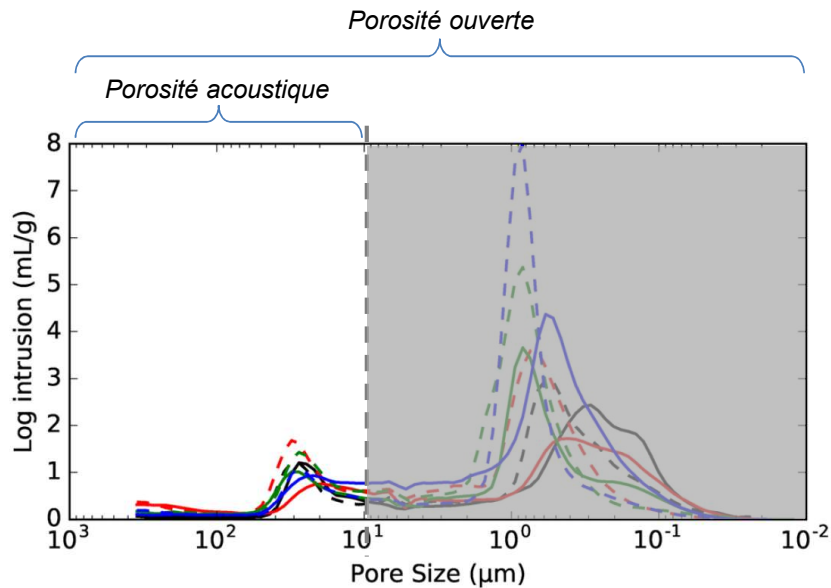


# Feu couvant et propriétés acoustiques

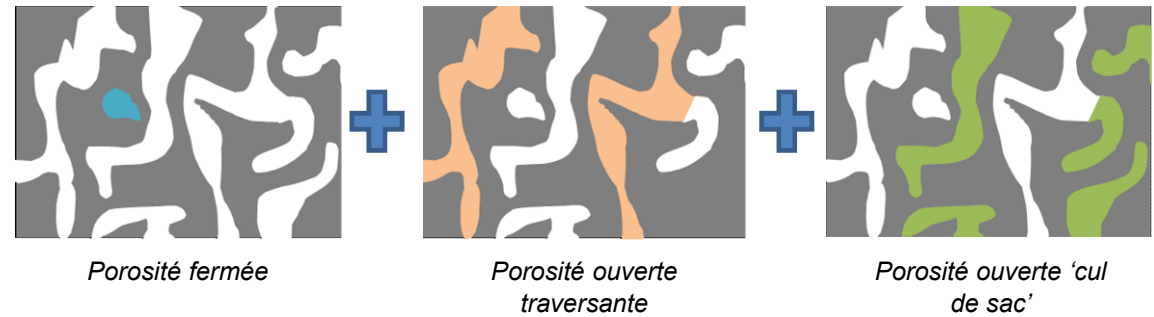
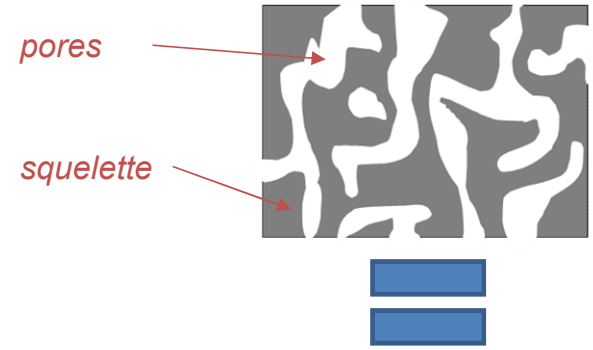


Un lien entre porosité, flux et acoustique?

- Porosité ouverte vs porosité fermée
- Porosité traversante vs 'cul de sac'
- Porosité ouverte vs acoustique



[Glé et al. 2021]

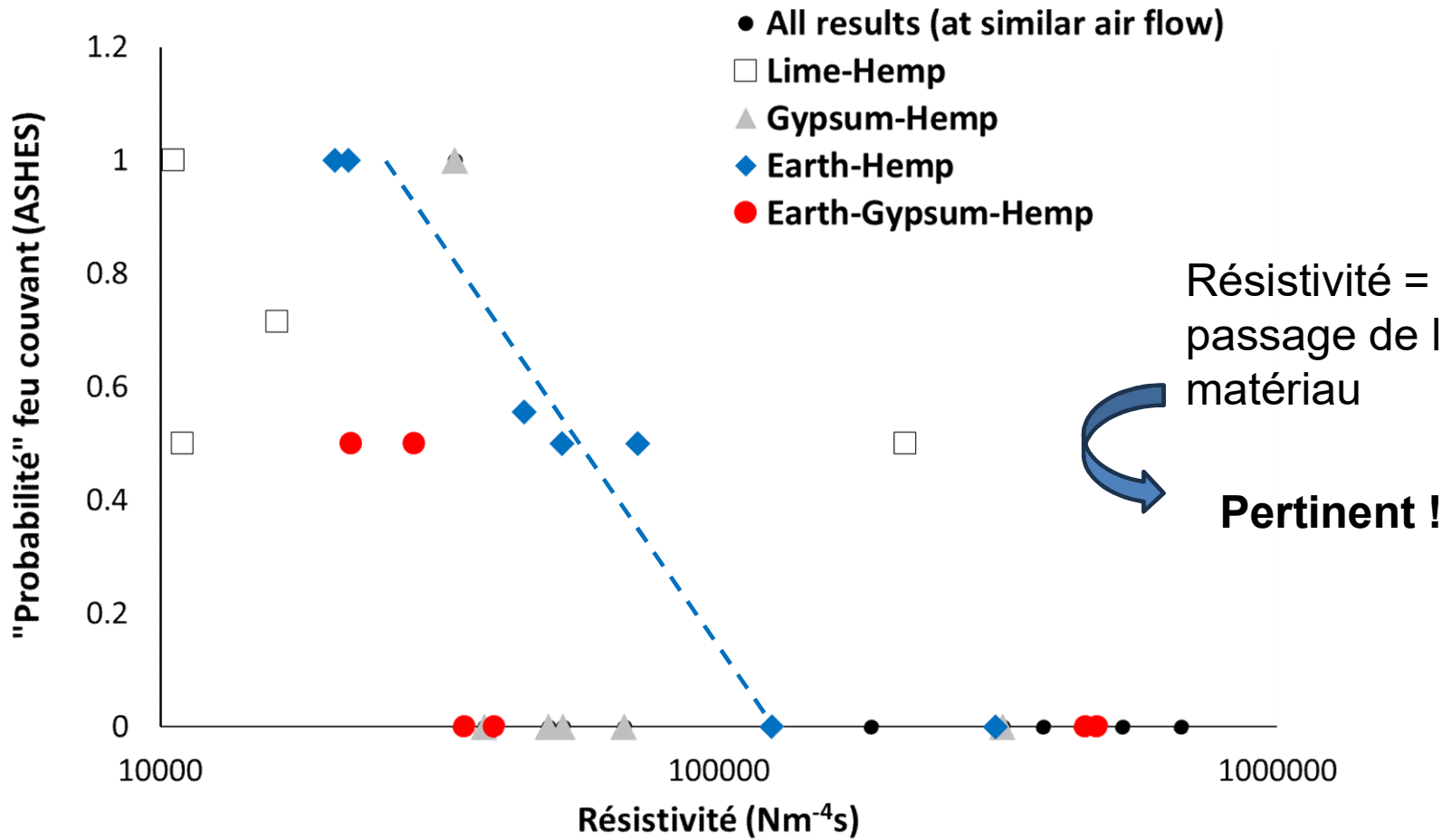


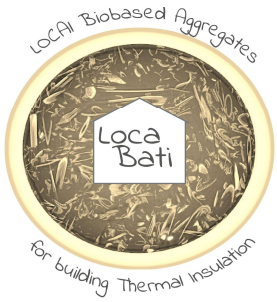
-> Le flux est dimensionné par la porosité traversante, qui peut être différente des porosités totale et acoustique



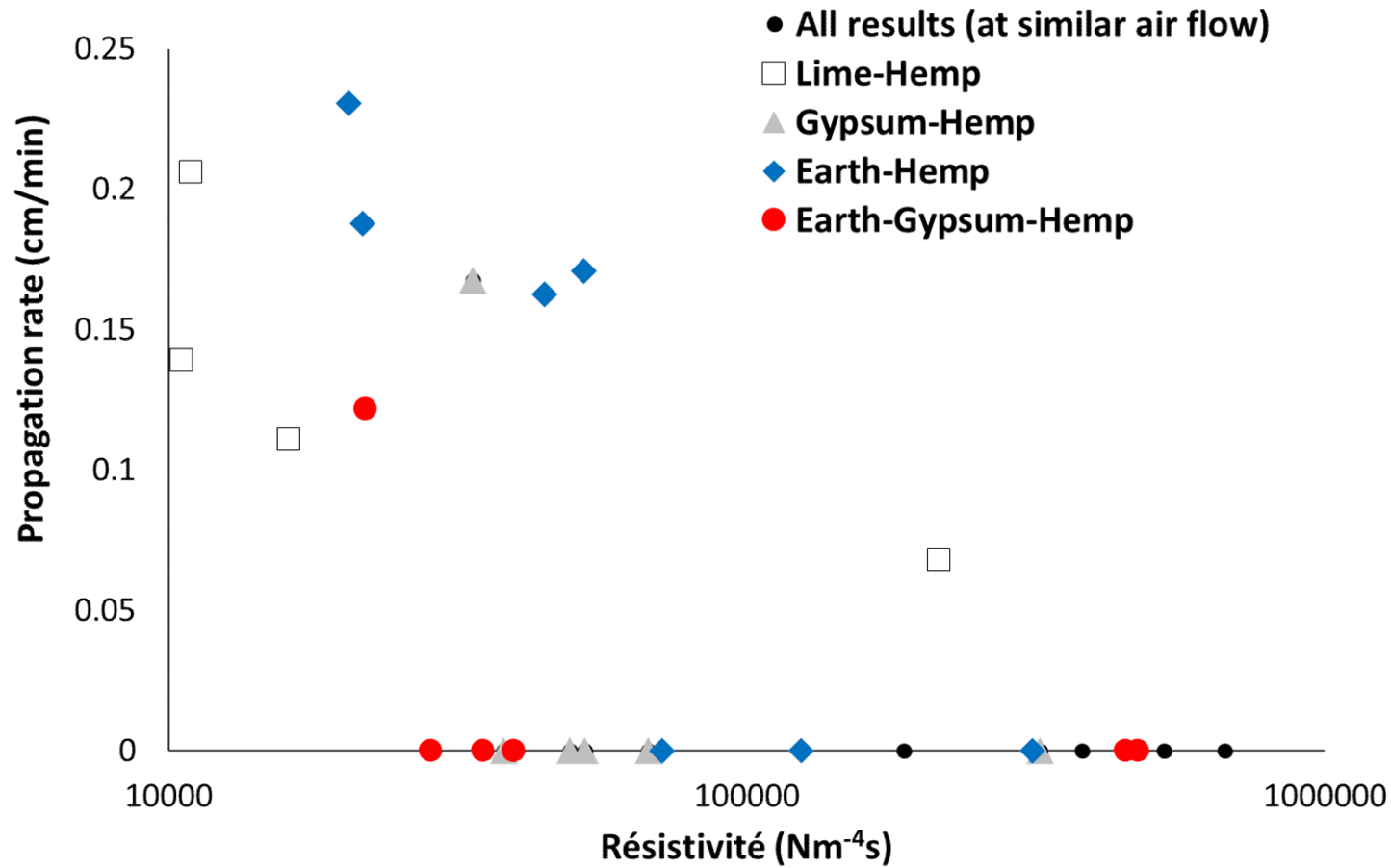


# Feu couvant et propriétés acoustiques





# Feu couvant et propriétés acoustiques

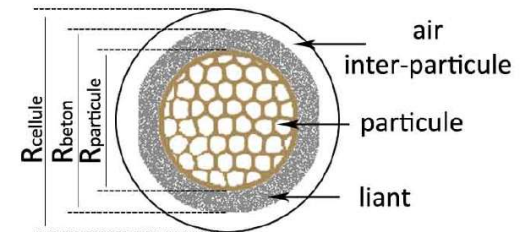
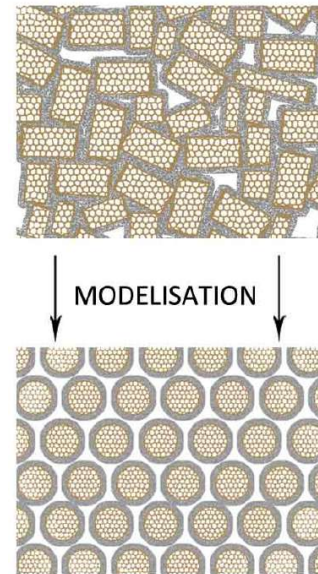




# Feu couvant et propriétés acoustiques

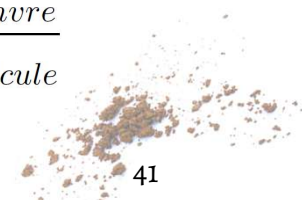
Résistivité: des facteurs explicatifs de l'effet liant?

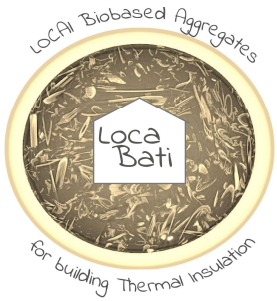
- Une répartition différente ou moins homogène avec certains liants?
- Une densité apparente du liant différente dans le mélange?
- Une porosité plus fermée, ou plus en 'cul de sac' pour certains liants?



$$\sigma = \frac{3\beta^2 \mu}{\left(-1 + \frac{2+3\beta^5}{\beta(3+2\beta^5)}\right) R_p^2} \quad \beta = (1 - \phi)^{1/3}$$

$$\phi_{active} = 1 - \frac{C_{liant}}{\rho_{apparent liant}} - \frac{C_{chanvre}}{\rho_{particule}}$$



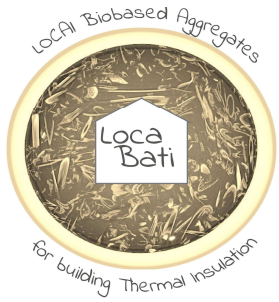


## Conclusions sur le lien entre feu et acoustique



- > Un premier lien identifié entre les comportements feu couvant et acoustique à travers la résistivité des agrobétons
- > Un approfondissement nécessaire pour comprendre les origines des différences constatées sur la résistivité selon le liant (traitement d'images)
- > Vers une modélisation du feu couvant prenant en compte la résistivité





**MERCI POUR VOTRE ATTENTION**

