

5^{ème} Ecole d'automne du GDR MBS

Eco-conception des matériaux biosourcés et géosourcés : de la ressource à la fin de vie

12 au 16 octobre 2025, Douai



Propriétés et applications des cendres de biomasse

Jonathan Page (Univ. Artois)



Laboratoire
de Génie Civil
et géo-Environnement



IMT Nord Europe
École Mines-Télécom
IMT-Université de Lille



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité



GdR MBS
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS



Production énergétique renouvelable

Directive sur les énergies renouvelables fixe comme objectif la part d'énergie renouvelable à 32 % pour 2030

European Commission, Renewable Energy Directive II, 2018

Développement du secteur de l'énergie liée à la biomasse
Augmentation de 46 TWh d'ici 2028 *PPE, 2021*

Déchets liés à l'industrie de la combustion de biomasse



Production mondiale > 170 Mt en 2021

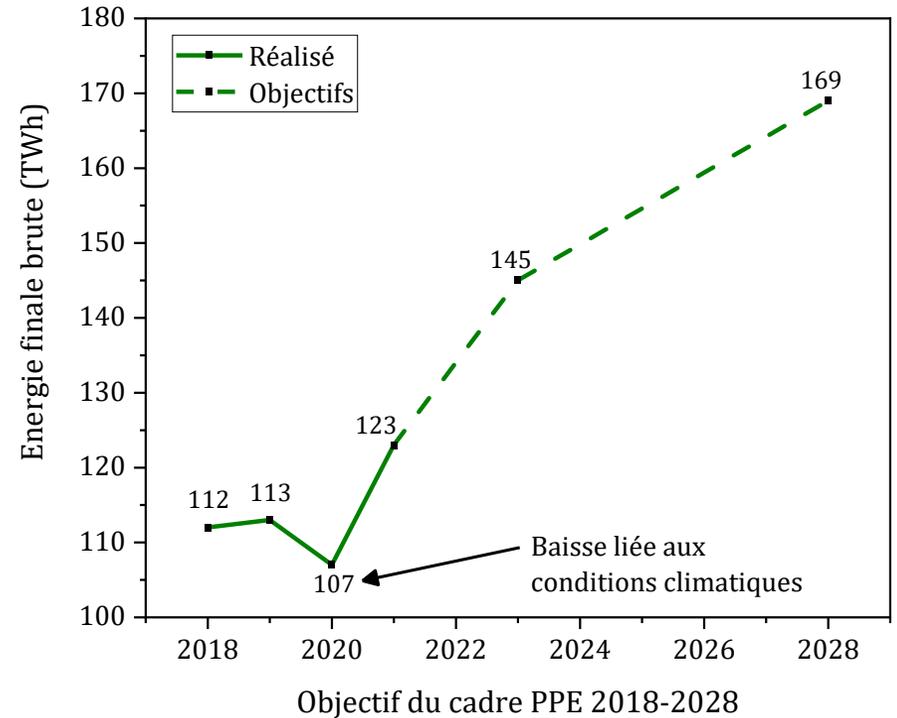
Zhai et al., 2021



France

Production à l'échelle française > 245 kt en 2020

Syndicat des énergies renouvelables, 2021





Définition, origine et production des cendres de biomasse



Caractéristiques et propriétés des cendres de biomasse



Utilisation des cendres comme liant alternatif



Valorisation granulaire des cendres de biomasse

Qu'est-ce qu'une biomasse ?

« La fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origines biologiques provenant de l'agriculture (y compris les substances végétales et animales), de la sylviculture et des industries connexes, y compris la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux »

Parlement européen et Conseil de l'Union Européenne, 2009

Qu'est-ce qu'une cendre de biomasse ?

Cendres de biomasse = résidu de la combustion de la biomasse

Les propriétés des cendres dépendent de plusieurs facteurs, dont principalement :

- Le type de biomasse (bois, résidu d'herbacée et d'agriculture, déchets industriels)
- La technologie de combustion
- La méthode de récupération des cendres (sous le foyer, traitement des fumées)

Type de biomasse

Les types de biomasse utilisés lors de la combustion sont dépendants des industries régionales et de la disponibilité locale en biomasse.

Asie : biomasse provenant de l'industrie de l'huile de palme et de l'industrie de la culture du riz sont très répandues (Hussin et al., 2010; Jamil et al., 2013; Awang & Al-Mulali, 2018).

Amérique du sud : biomasse produite par la culture de la canne à sucre (Sales & Lima, 2010).

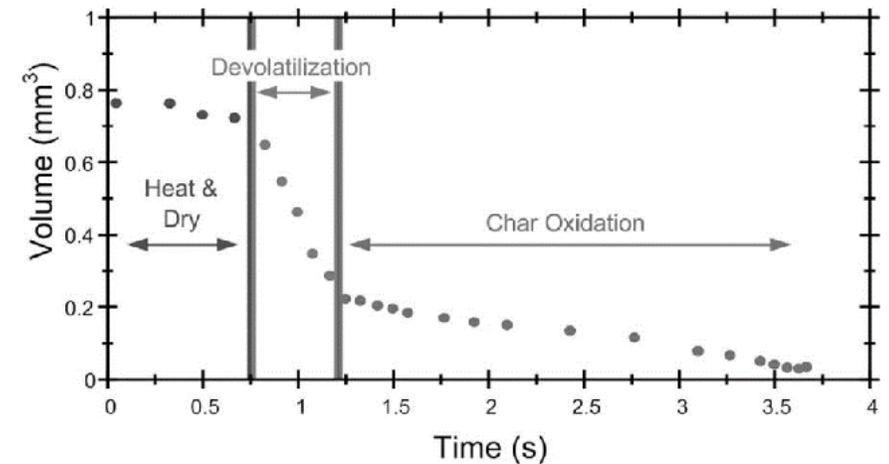
Amérique du nord : biomasse issue de l'industrie de pâte à papier (Lessard et al., 2017 ; Omran et al., 2018)

Bassin Méditerranéen: biomasse issue des résidus d'olives

Europe : la biomasse bois est plus communément analysée (Rajamma, 2011; Carević et al., 2019).

Etapes de combustion :

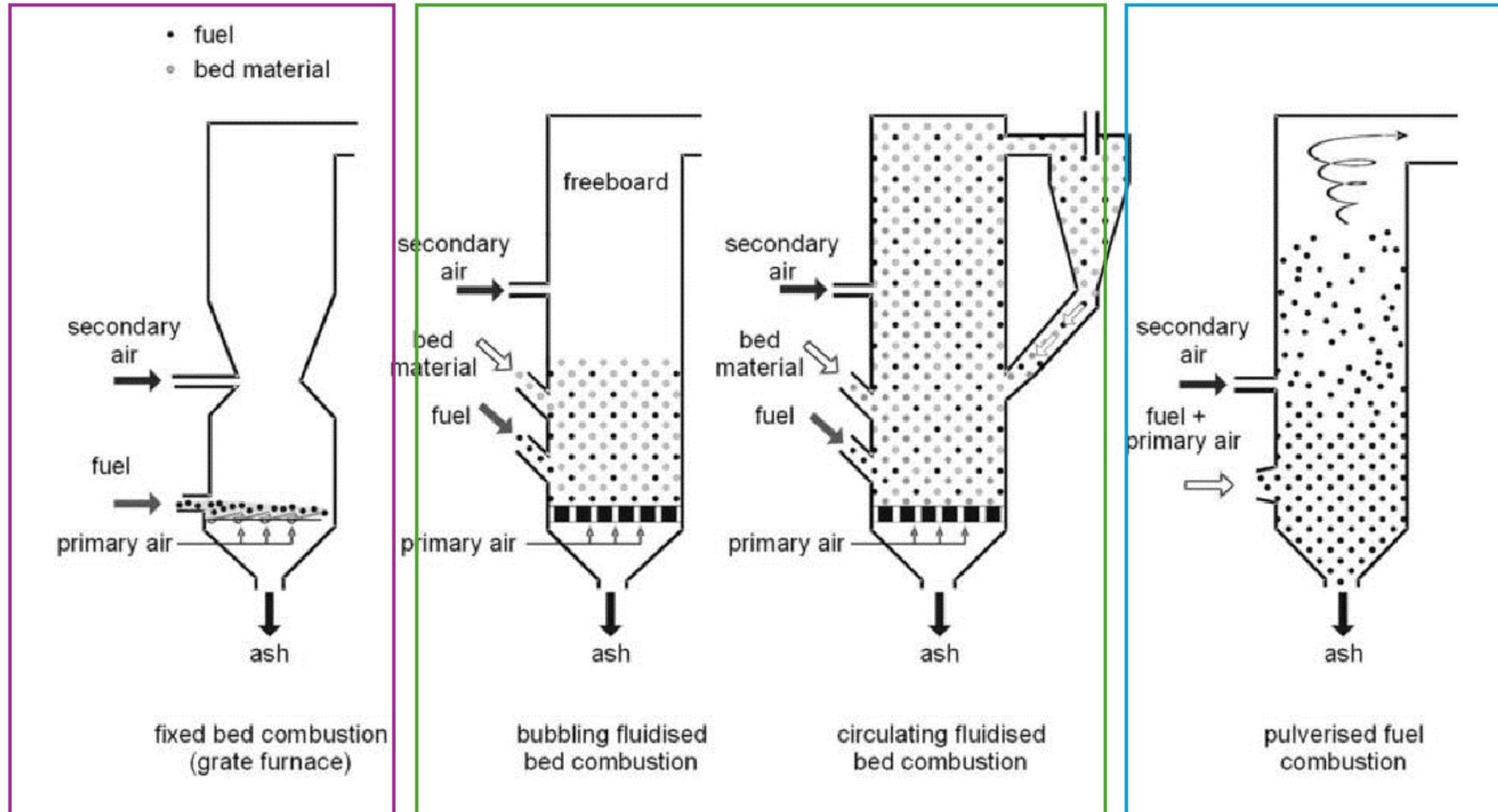
1. séchage
2. pyrolyse
3. gazéification
4. combustion



Koppejan & Van Loo, 2012

Technologies de combustion

Koppejan & Van Loo, 2012



Lit fixe (four à grille)

Lit fluidisé
(dense ou circulant)

Fours à biomasse pulvérisée

Technologies de combustion

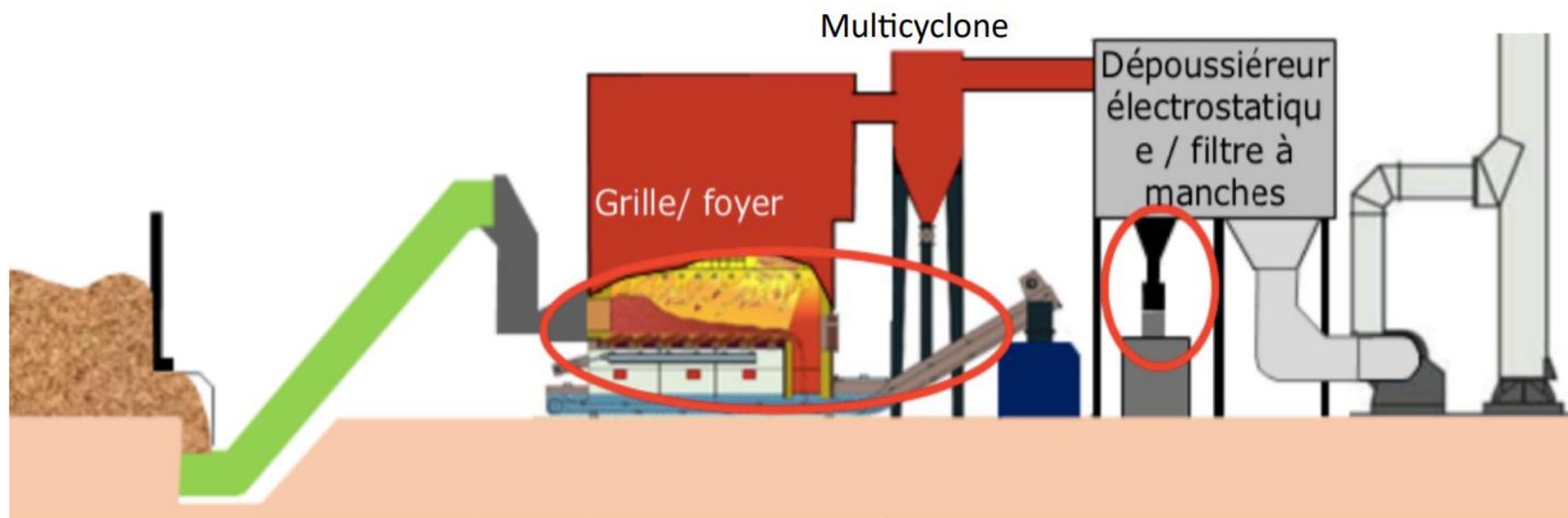
Technologie	Avantages	Inconvénients
Lit fixe (grille)	Faible coût (investissement et fonctionnement) Peu de poussières	Combustion peu homogène Pas de mélange possible de combustible Rendement non optimal
Lit fluidisé	Pas de partie mobile dans la zone de combustion Meilleur rendement Type de biomasse variable	Coût élevé Risque d'agglomération du lit Beaucoup de poussières dans les gaz
Biomasse pulvérisée	Bon rendement Contrôle rapide et facile de la charge du four	Nécessite une granulométrie fine de biomasse (< 20mm) Bruleur nécessaire à la phase de démarrage

Technologies de combustion

Différents types de cendres suivant les principaux points de prélèvement :

- Cendres sous foyer
- Cendres sous multi-cyclones
- Cendres sous équipement de traitement de fumées (filtre à manches ou électrofiltres)

} Cendres sous foyer
} Cendres volantes



Aspect macroscopique



Cendres volantes

Fraction fine issue du traitement des fumées (≈ 1 à $100 \mu\text{m}$)

Cendres sous foyer

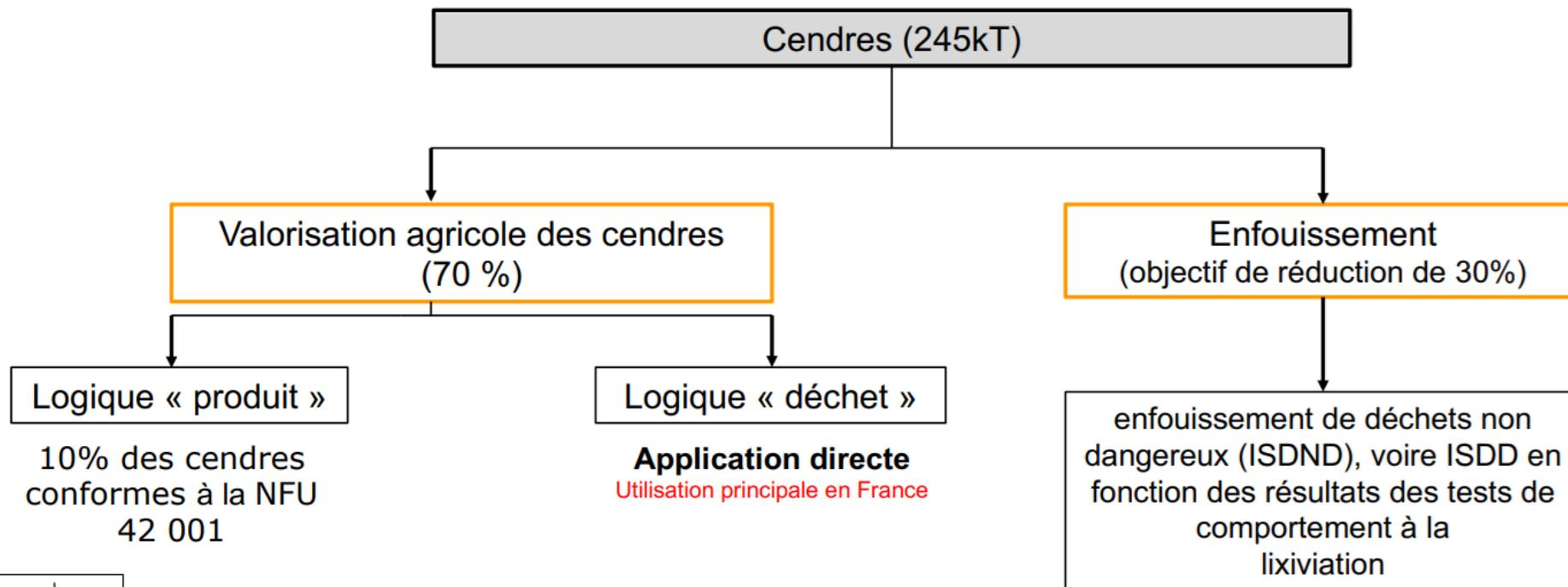
Fraction grossière récupérée sous le foyer de combustion ($\approx 0,1$ à 5 mm)

Lessard et al., 2017

Carevic et al., 2019

Schlupp et al., 2023

Valorisation : contexte réglementaire



Eléments	Norme NF U 42 001	Plan d'épandage Arrêté du 03/08/2018
	mg/kg	
As	60	/
Cu	/	1000
Cd	90	10
Cr	120	1000
Pb	150	800
Hg	2	10
Ni	120	200

Enfouissement

Coût important (jusqu'à 500€/t selon le type de cendres)
Limité par la législation européenne

Valorisation agricole ou forestière

Limité par les propriétés des cendres (pH, métaux lourds)

CIBE, 2022

Valorisation : parallèle avec les cendres volantes de charbon

Cendres de charbon → utilisation dans les matériaux cimentaires

- Comme constituants des CEM II, CEM IV et CEM V (NF EN 197-1)
- Comme addition de type II (NF EN 450-1 et NF EN 206-1)

Statuts des cendres volantes de biomasse dans les matériaux cimentaires : **non définis normativement**

Etudes se réfèrent aux normes des cendres de charbon mais souvent non respecté :

- Perte au feu < 9%
- Silice + Alumine + Oxyde de fer > 70%

Projets et travaux de valorisation des cendres

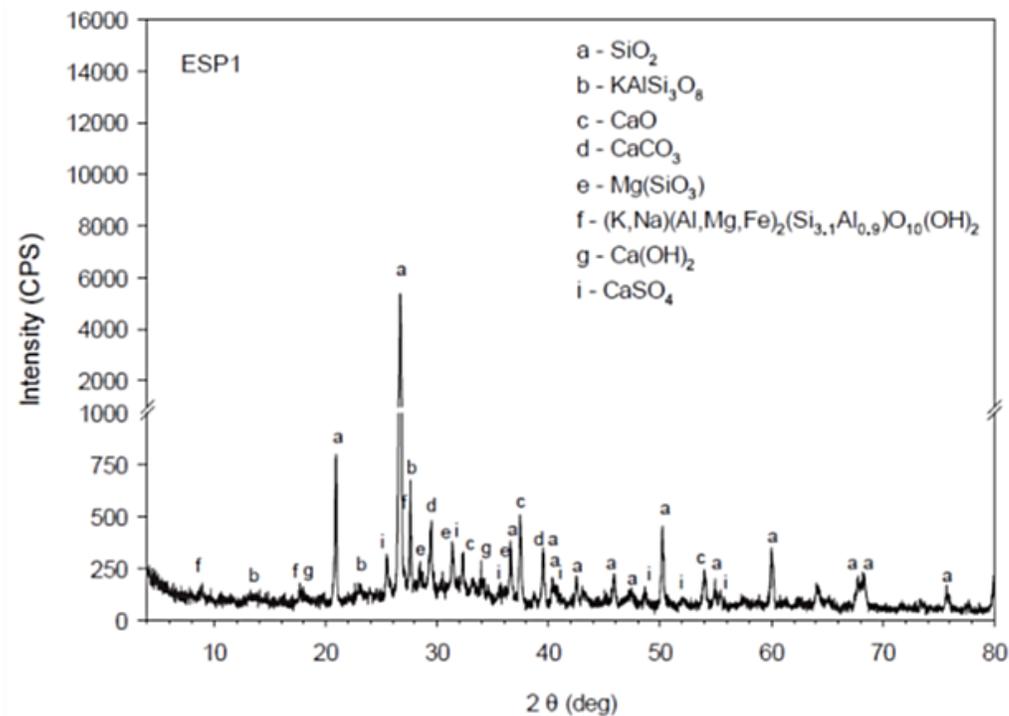
Projet	Financier	Années	Pays	Valorisation
BIOS BioEnergieSysteme	FFG (Autriche)	2009-2013	AT	Routière – stabilisation de sol
BIOCOMBUST	Interreg IV	2013-2015	FR, DE, CH	Substitution ciment
Thèse J. M. Lessard	-	2013-2016	CA	Substitution ciment et granulats dans bétons secs
TWBARCC	CSF (Croatie)	2016-2021	HR	Analyse chimique + substitution granulats
VALOCENDRE	BIP	2015-2018	FR	Valorisation dans des pavés béton
Rapport ADEME	ADEME	2018-2019	FR	Analyses chimiques des cendres
BIMGC	ADEME	2018-2021	FR	Substitution ciment blocs béton
BIOGRAFIC	ADEME	2021-2024	FR	Substitution granulats blocs béton
ASHCYCLE	UE	2022-	FI	Valorisation cendres dans matériaux construction

SYNTHESE

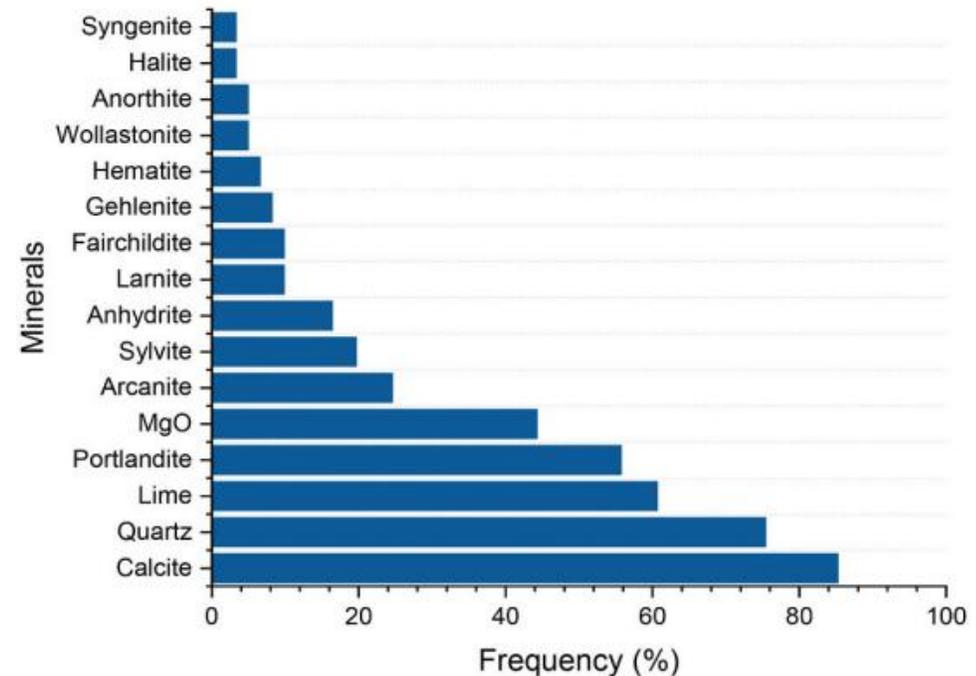
- Déchets à valoriser en quantité importante
- Volumes disponibles en augmentation
- Matériau potentiellement intéressant en construction (ciment, granulats)
- Plusieurs projets sur leur valorisation sur les 15 dernières années

Caractéristiques minéralogiques

- Disparité importante dans la littérature : varie en fonction des 3 facteurs vu précédemment
- Deux phases : amorphe (matière organique) et cristalline (minéraux)
- Cendres de biomasse bois : composées majoritairement de Carbonate de Calcium (CaCO_3) et Quartz (SiO_2)



Tarelho et al., 2015



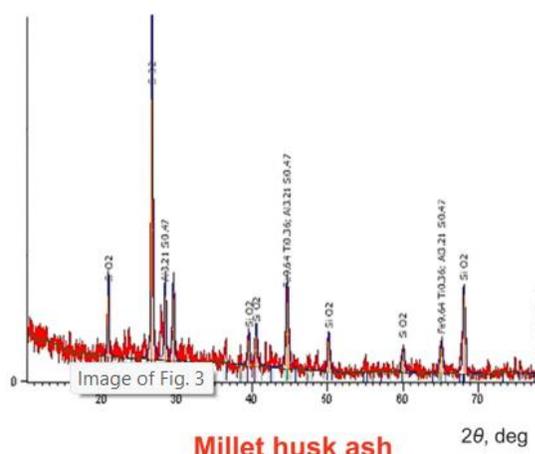
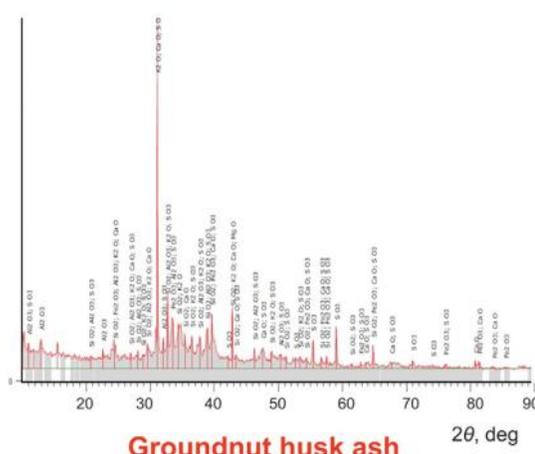
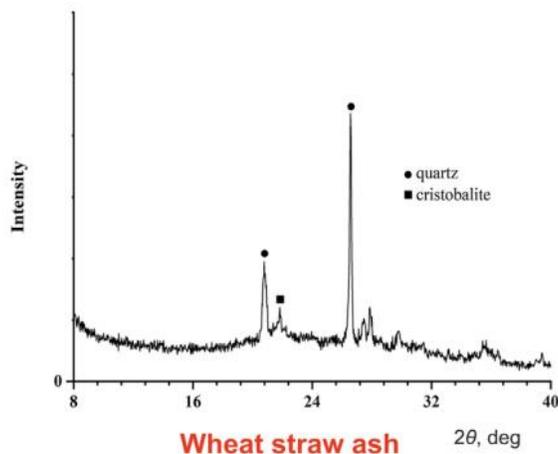
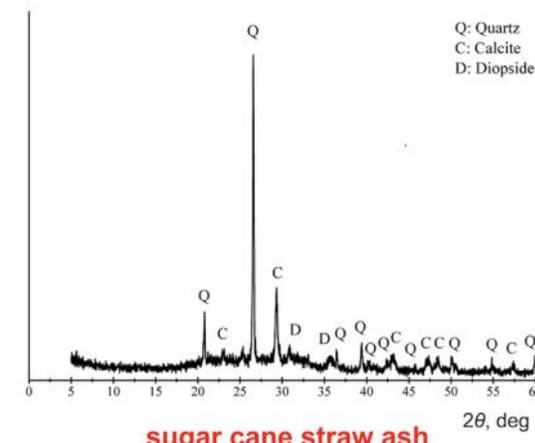
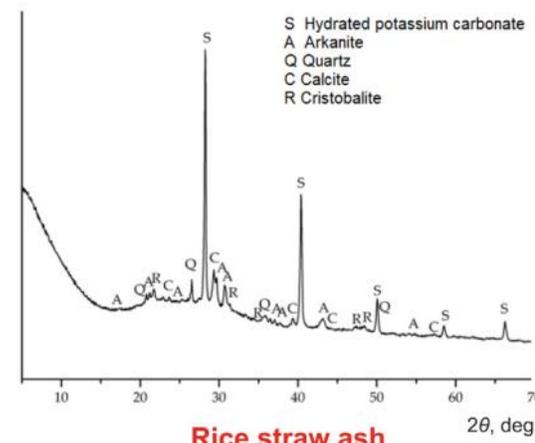
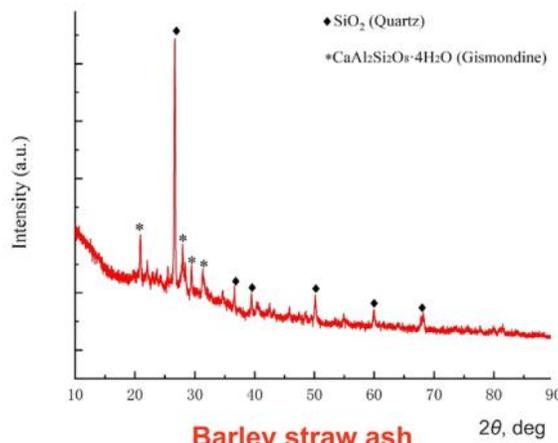
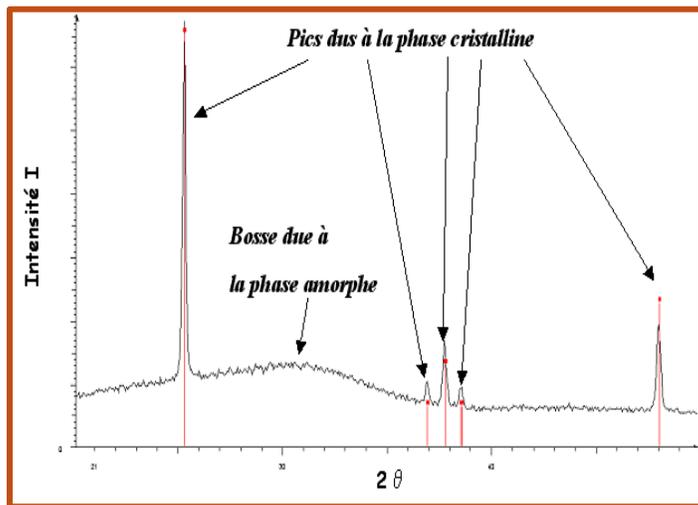
Liang et al., 2024

Caractéristiques et propriétés des cendres de biomasse

Caractéristiques minéralogiques

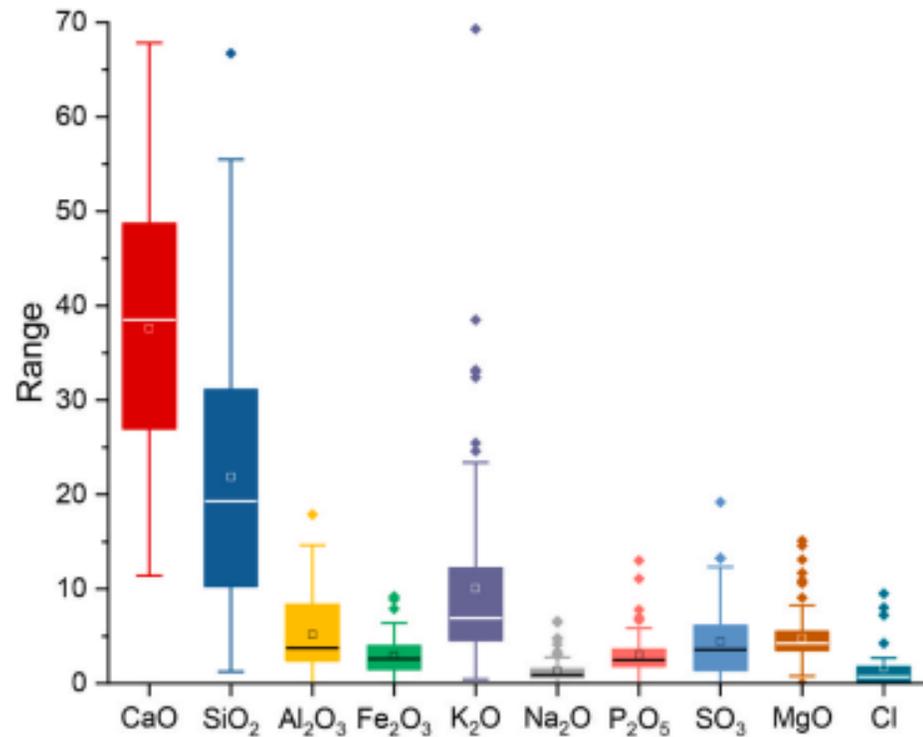
Adhikary et al., 2022

Distinction des phases amorphes et cristallines

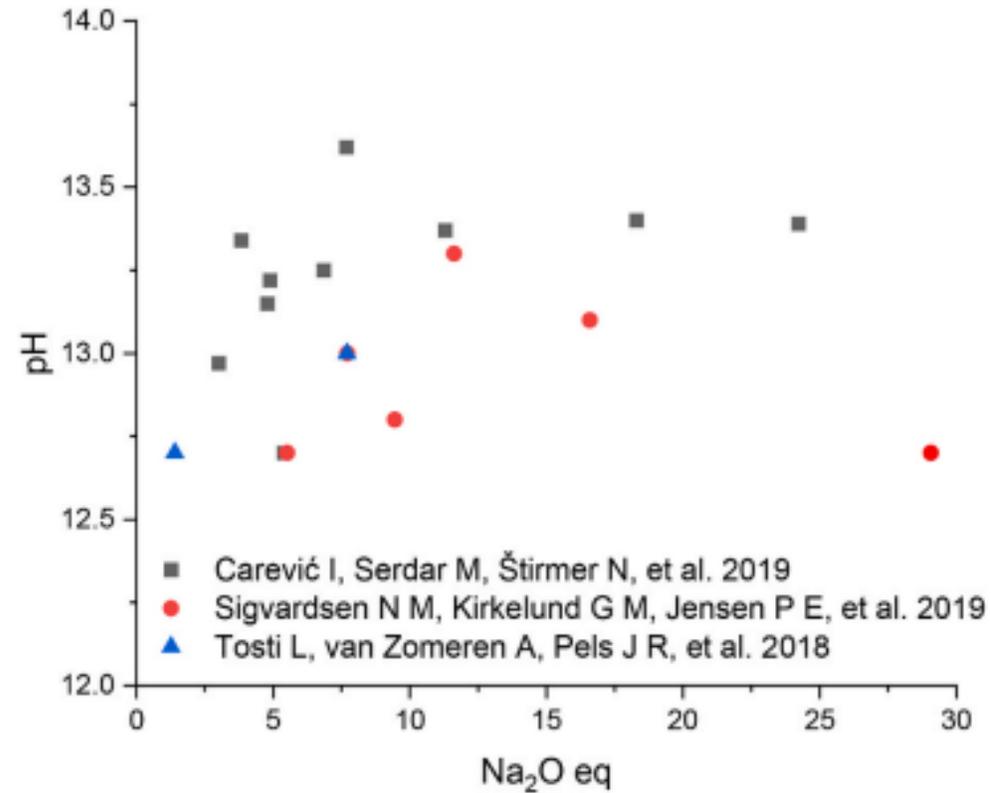


Compositions chimiques

- Principaux constitutants : $\text{CaO} - \text{SiO}_2$
- pH élevé

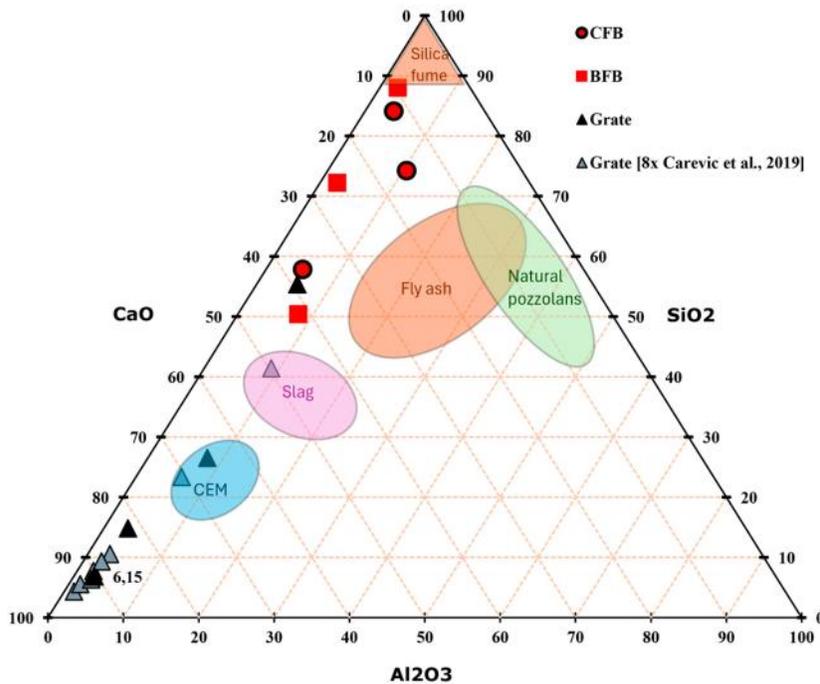


Liang et al., 2025

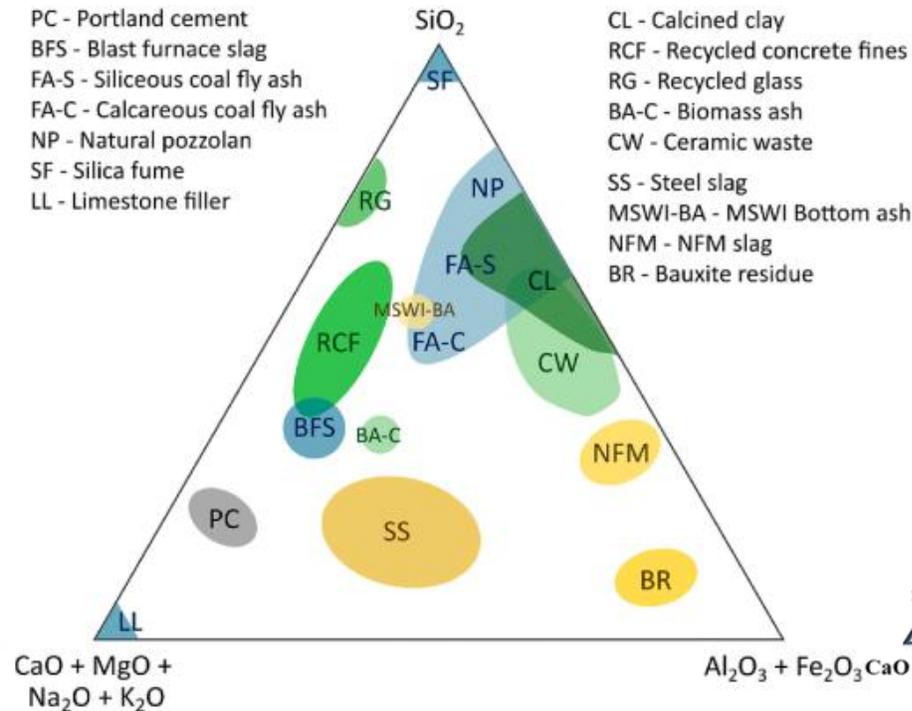


Compositions chimiques

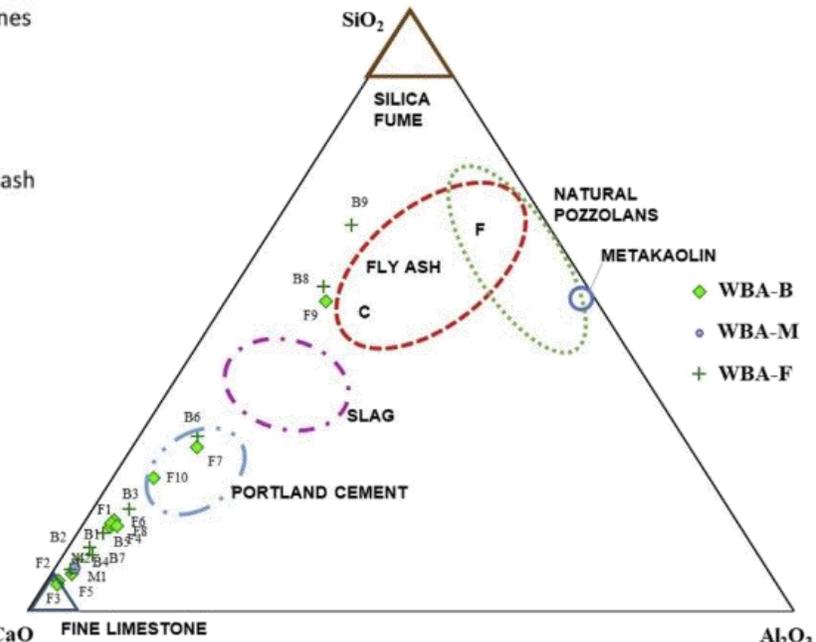
- Représentation dans un diagramme ternaire : $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$
- Forte dispersion des compositions des cendres de biomasse



Jensen et al., 2025



Snellings et al., 2023

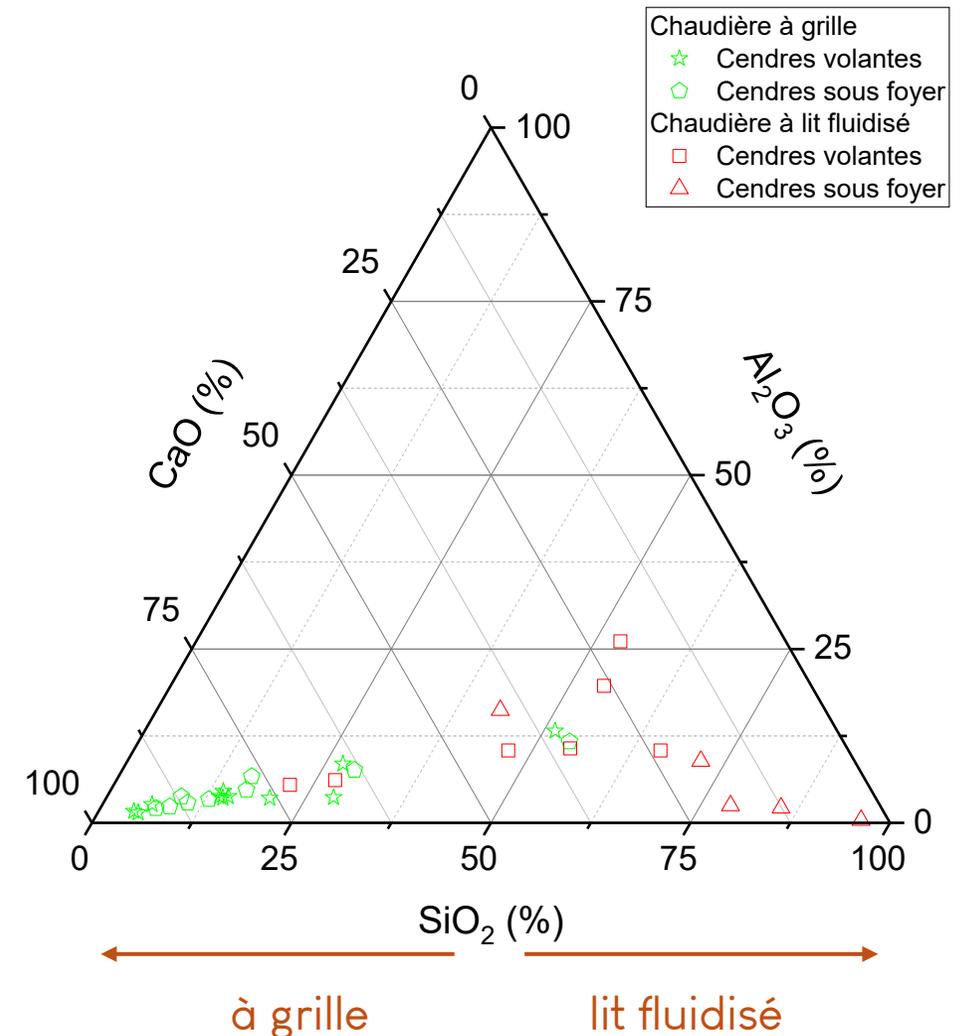


Carevic et al., 2019

Compositions chimiques

- $\text{CaO} > \text{SiO}_2 > \text{K}_2\text{O} > \text{MgO}$ pour la biomasse **bois**
- $\text{SiO}_2 > \text{K}_2\text{O} > \text{CaO} > \text{MgO}$ pour la biomasse issue de la paille d'**herbacée** et d'**agriculture**
- $\text{K}_2\text{O} > \text{SiO}_2 > \text{CaO} > \text{P}_2\text{O}_5$ pour la biomasse issue de résidu d'**herbacée** et d'**agriculture**
- $\text{CaO} > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{K}_2\text{O} > \text{SiO}_2$ pour la biomasse **animale**
- $\text{SiO}_2 > \text{CaO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{P}_2\text{O}_5$ pour la biomasse **contaminée** (Déchets industriels)

Schlupp et al., 2024

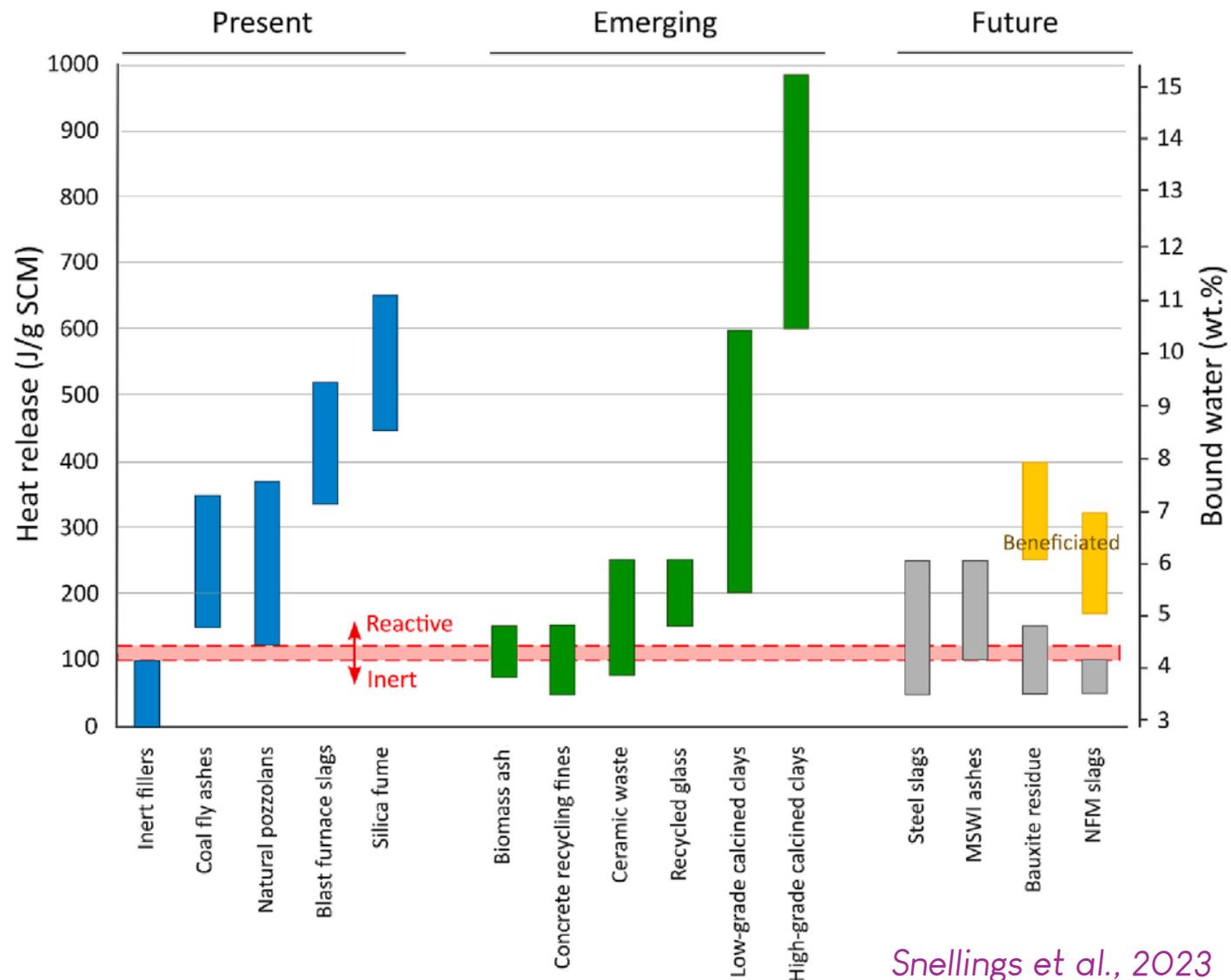
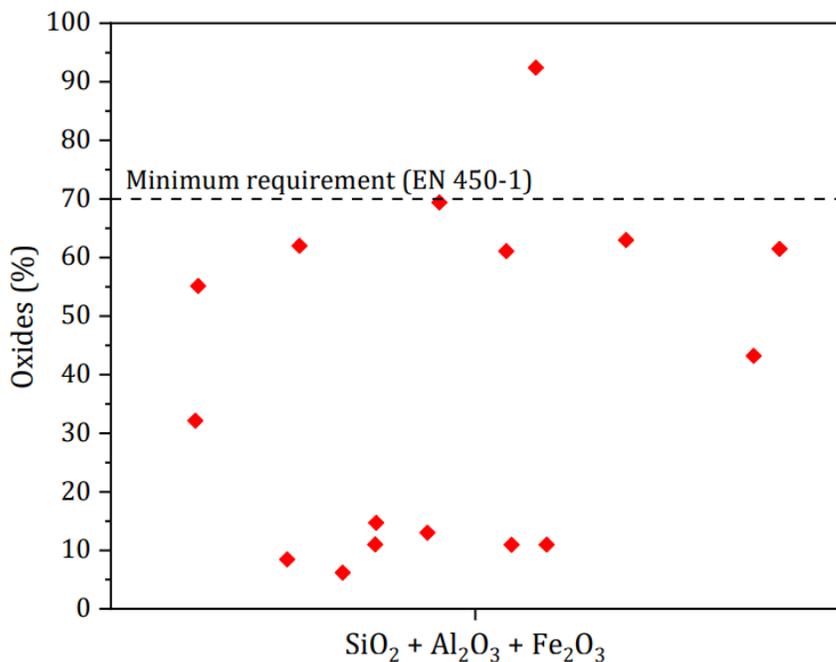


Réactivité potentielle

Selon EN 450-1 :



Schlupp et al., 2024



Snellings et al., 2023

Evaluation de la réactivité

Essais courants :

- Essai **Chapelle** (NF P18-513) : évalue la consommation d'hydroxyde de calcium d'un matériau dans une suspension diluée chauffée comme mesure de l'activité pouzzolanique.
- Essai **Frattini** (EN 196-5) : évalue la saturation en Portlandite dans une solution surnageante d'une suspension hydratée de ciment et d'un matériau pouzzolanique en mesurant les concentrations en OH^- et en Ca^{2+} .
- Mesure de la **silice réactive** (EN 196-2 et EN 197-1) : mesure la fraction de SiO_2 soluble après traitement avec du HCl et une solution bouillante de KOH.
- Essai **Indien pour les matériaux pouzzolaniques** (IS 1727-1967) : mesure de la résistance de mortiers après 10 jours de cure avec formulation et ouvrabilité contrôlée.
- **Méthodes R^3** : eau liée R^3 , consommation de Portlandite R^3 , essai de calorimétrie R^3 , retrait chimique R^3 . Le principe de base des méthodes d'essai R^3 consiste à utiliser un système modèle simplifié pour mesurer séparément la réaction d'une addition.

[Home](#) > [Materials and Structures](#) > [Article](#)

Reactivity tests for supplementary cementitious materials: RILEM TC 267-TRM

RILEM Technical Committee Report | Published: 30 October 2018
Volume 51, article number 151, (2018) [Cite this article](#)



Métaux lourds

- La présence de métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, Hg) dans les cendres de biomasse peut être un facteur limitant leurs valorisations.
- 3 classes de dangerosité : inerte, non dangereux, dangereux.
- La plupart des métaux lourds proviennent des cendres des filtres cycloniques → **cendres volantes**.
- Plusieurs études concluent que la plupart des éléments métalliques ne dépassent pas les seuils pour une classification en tant que déchets inertes et dans certains cas les seuils de déchets non dangereux.

Ref	Measured heavy metals	Employed standards	Heavy metals beyond limit	Results remarks
[37]	Ti, Pb, Cr, Ni, Cd, As, Hg	Fertilizers Regulation Act in Japan	None	The heavy metal levels in WBFA met the regulatory standard, satisfying the requirements for fertilizer production
[38]	Sb, As, Ba, Cd, Cr, Hg, Pb, Mo, Ni, Se, Zn	Measured according to EN 12457; Evaluation based on SQD	Cr, Pb	Cannot be used for construction material due to the exceeded upper limits for Cr and Pb
[47]	Zn, Cd, Cr, Ni, Pb, Mn, Co, Ba, Bi, Sr, Cu, Hg	Measured according to EN ISO 16968:2015 and ASTM D 6722-11; Evaluation based on European Commission: Heavy metals and organic compounds from wastes used as organic fertilisers	Zn, Ni, Cd, Pb	The leaching of Cd surpassed the maximum allowable value in all 10 categories of WBFA.
[96]	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	Measured according to NEN 7345; Evaluation based on SQD	None	WBFA blended with cement showed good environmental stability
[97]	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	US EPA 3015A	n/a	Carbonation and hydration processes can reduce the leaching of heavy metals in WBFA

Carevic et al., 2019

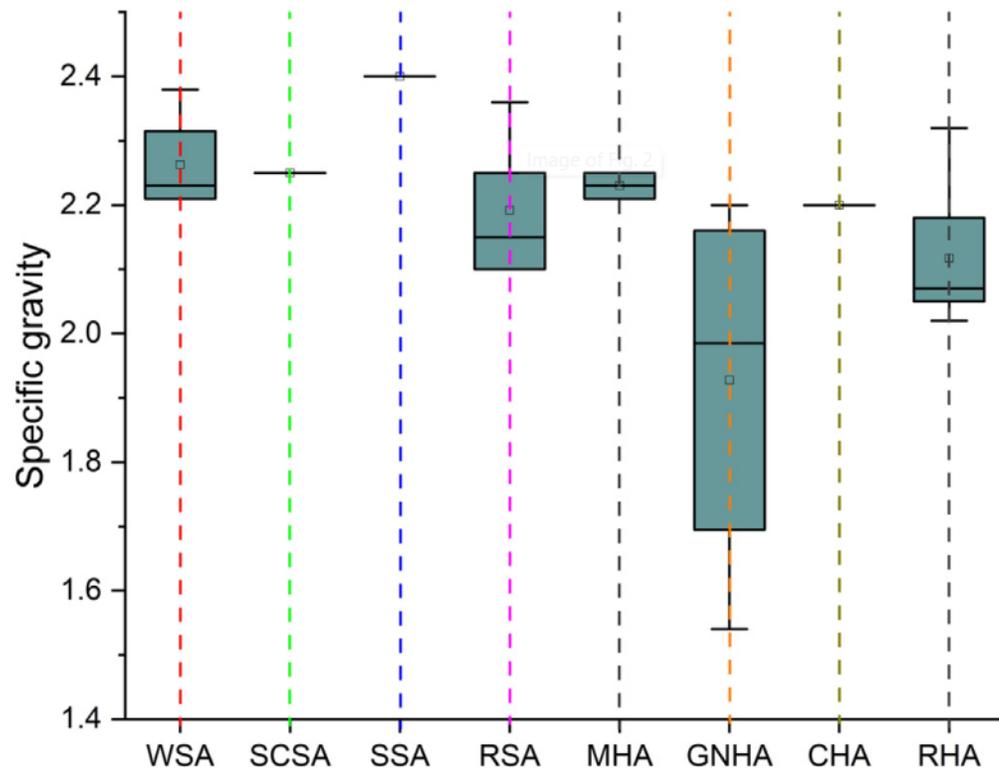
Cuenca et al., 2023

Rosales et al., 2016

Liang et al., 2025

Masse volumique et absorption d'eau

- Masse volumique absolue variable : 1,75 – 2,69 g/cm³
- Forte absorption d'eau



Adhikary et al., 2022

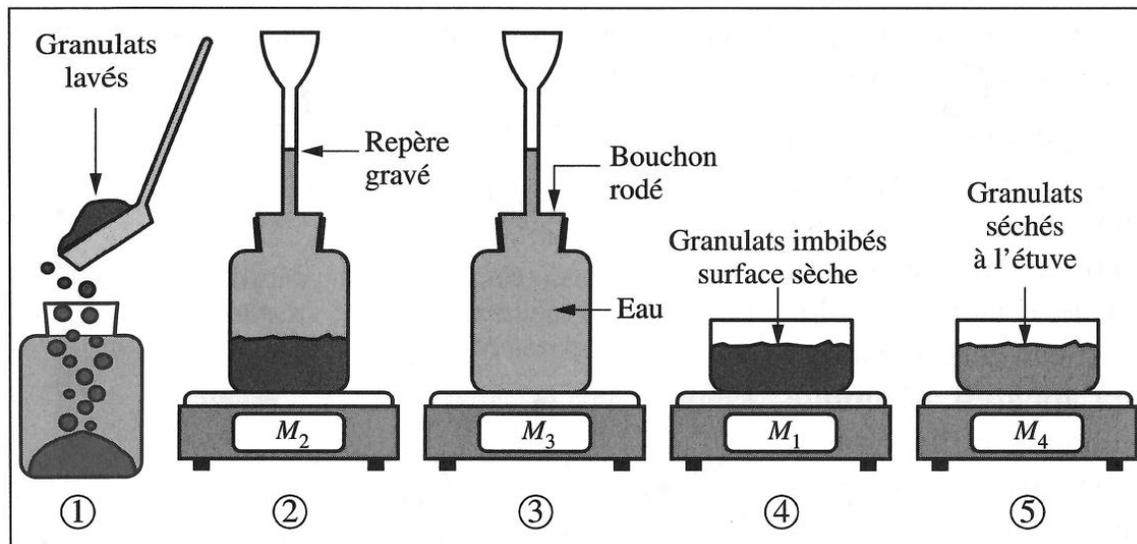
Type de biomasse	Technologie de combustion	Masse volumique (g/cm ³)	Absorption d'eau (%)
Bois	Lit fluidisé	2,65 à 2,67	n.d
Industrie papetière	Lit fluidisé	2,21	5,20
Bois	Multiple	1,75 à 2,69	n.d
Agricole	Grille	2,21 à 2,49	19,60 à 39,30
Agricole/Bois	Grille	1,97	26,60
Agricole/Bois	Grille	1,82	31,90
Agricole/Bois	Grille	1,86 à 2,12	18,90 à 21,80
Agricole	Grille	2,35	n.d
Agricole/Bois	Grille	1,73	19,83
Agricole/Bois	Grille	2,34 à 2,38	9,80 à 10,10
Agricole	n.d	2,02	19,90
Agricole/Bois	n.d	2,34 à 2,41	n.d

Schlupp et al., 2024

Estimation de l'absorption d'eau

Méthode classique des granulats pour bétons (NF EN 1097-6)

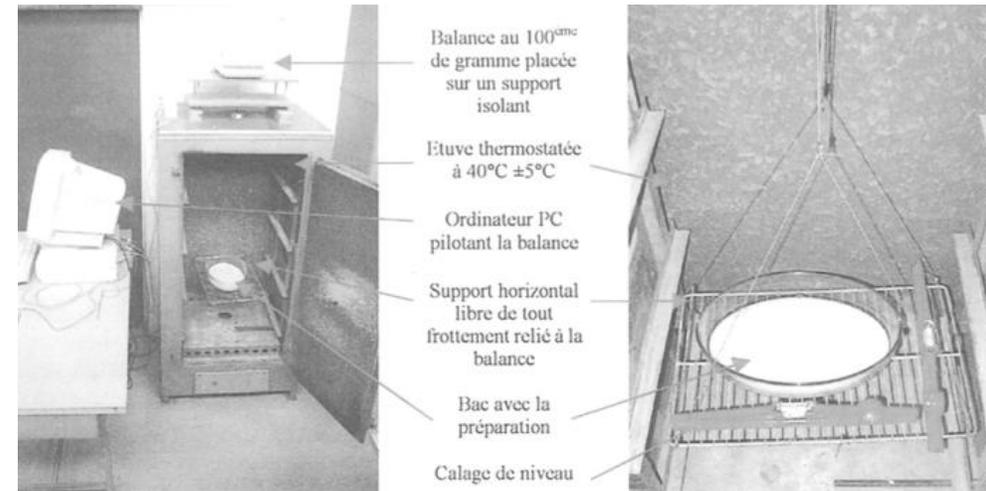
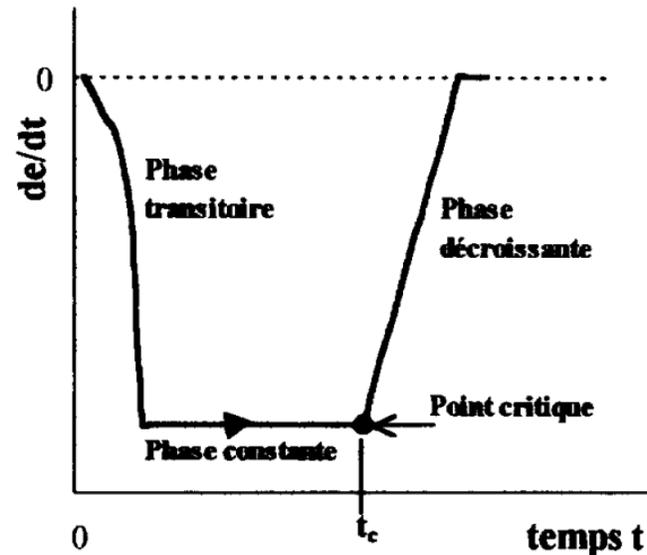
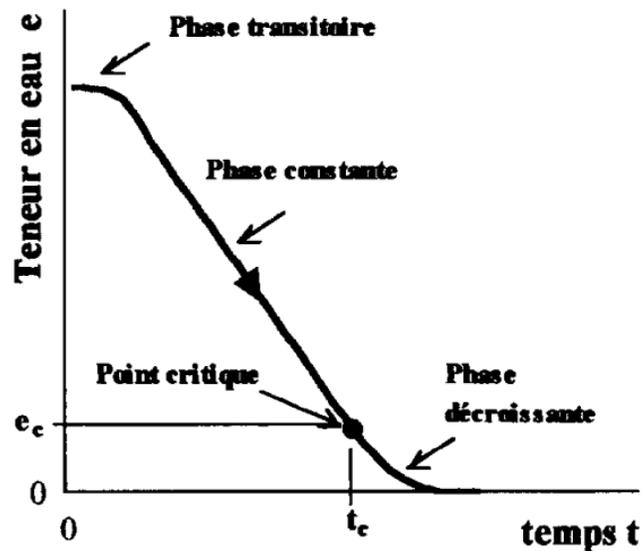
- Valable si la granulométrie le permet (pas trop de fines) et si peu de particules imbrulées
- Beaucoup de problèmes possibles avec les cendres : difficulté de lecture du trait du pycnomètre, impossibilité de récupérer le matériau en intégralité du pycnomètre, état saturé surface sèche très difficile à estimer, ...



Estimation de l'absorption d'eau

Méthode par évaporométrie (J. M. Mechling, 2003)

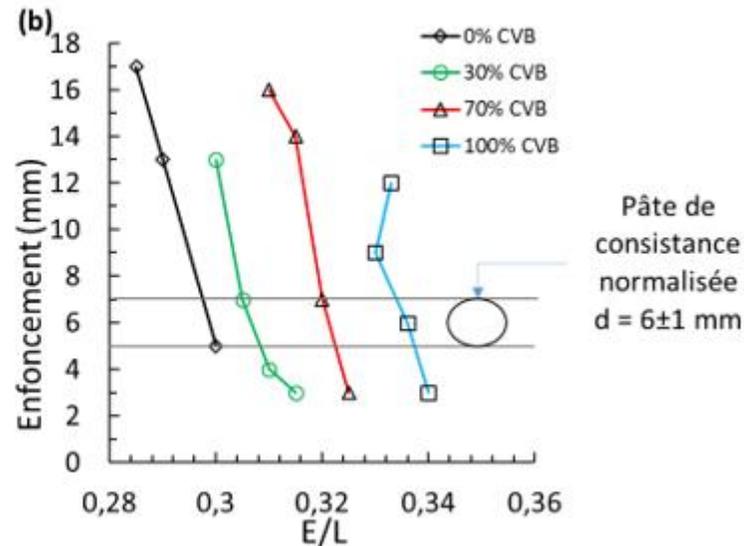
- Plus adapté pour les granulométries fines (additions) mais souvent difficile d'interpréter la courbe expérimentale.



Estimation de l'absorption d'eau

Essai Vicat : demande en eau via consistance normalisée (Dossa, 2024)

- Permet d'ajuster l'eau d'une formulation pour maintenir l'ouvrabilité. Ne mesure pas l'absorption d'eau mais estime une demande en eau additionnelle,



$$Eau_{ciment}(g) = (M_{ciment}) \times 0,30$$

$$Eau_{CVB}(g) = Eau_{totale}(g) - Eau_{ciment}(g)$$

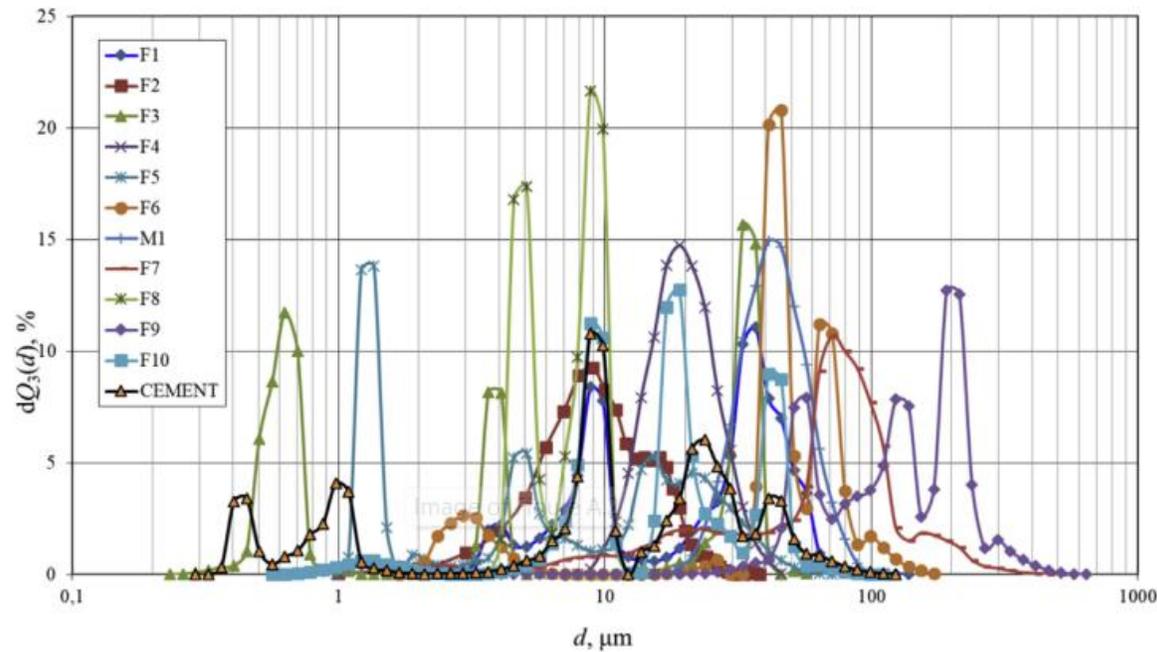
$$Demande\ en\ eau\ additionnelle\ CVB\ (\%) = \frac{Eau_{CVB}}{M_{CVB}} \times 100$$

Dossa et al., 2024

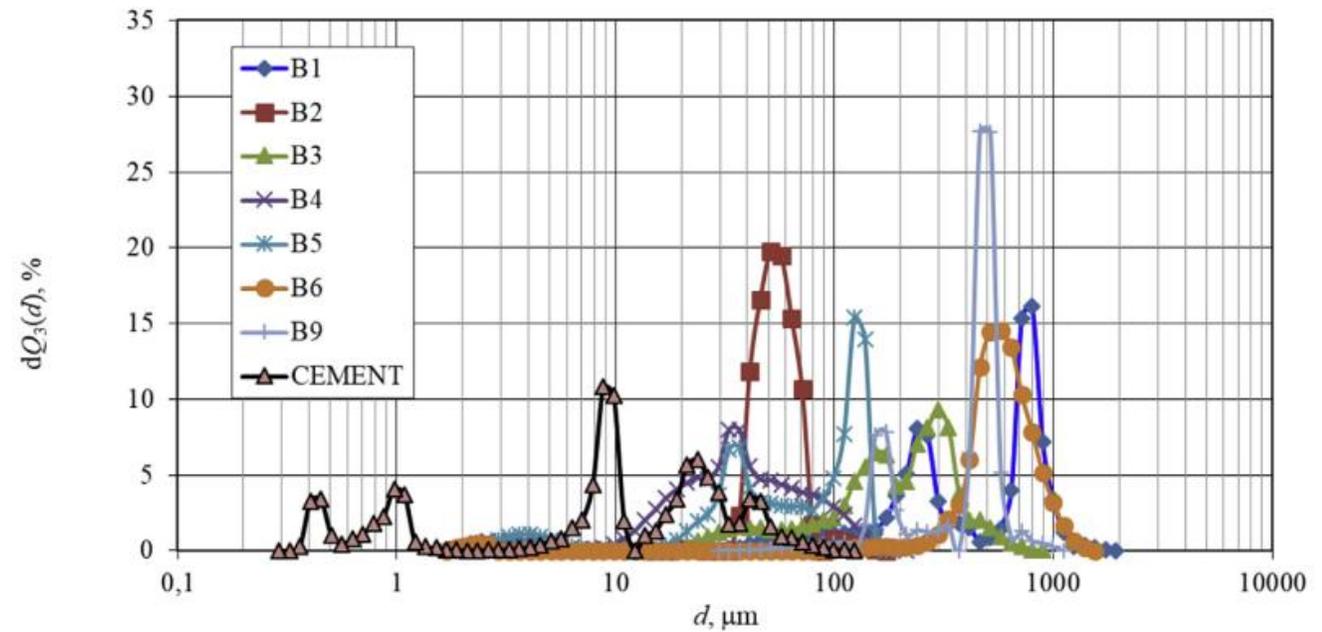
Granulométrie

Granulométrie très différente entre cendres volantes (plus fines) et sous foyer (plus grossières)

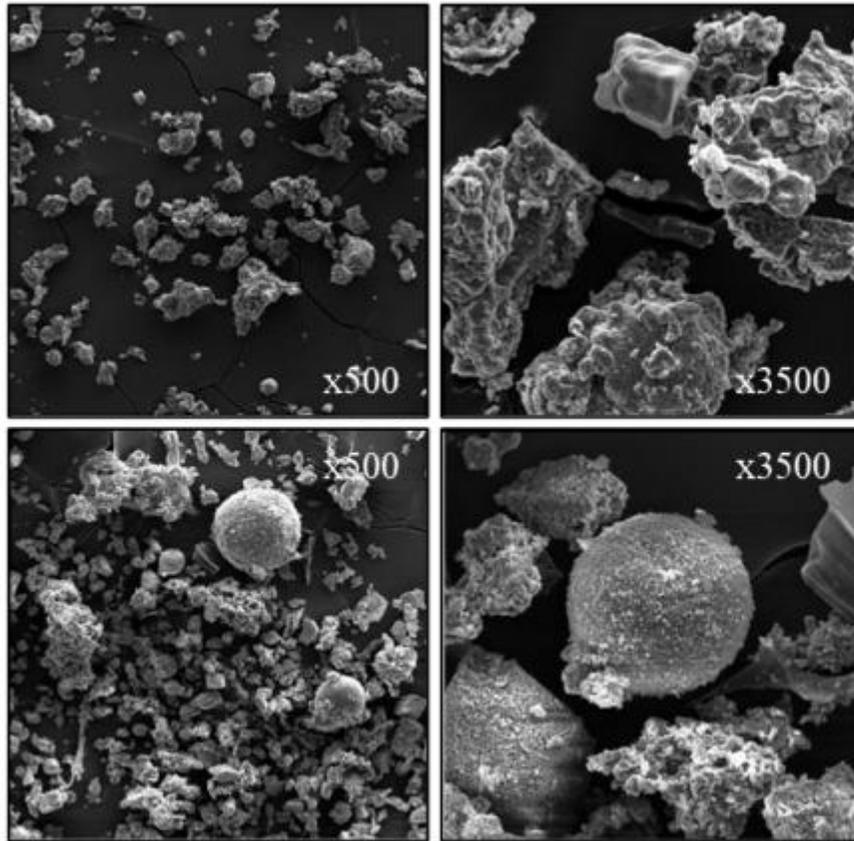
Cendres volantes de biomasse



Cendres sous foyer de biomasse



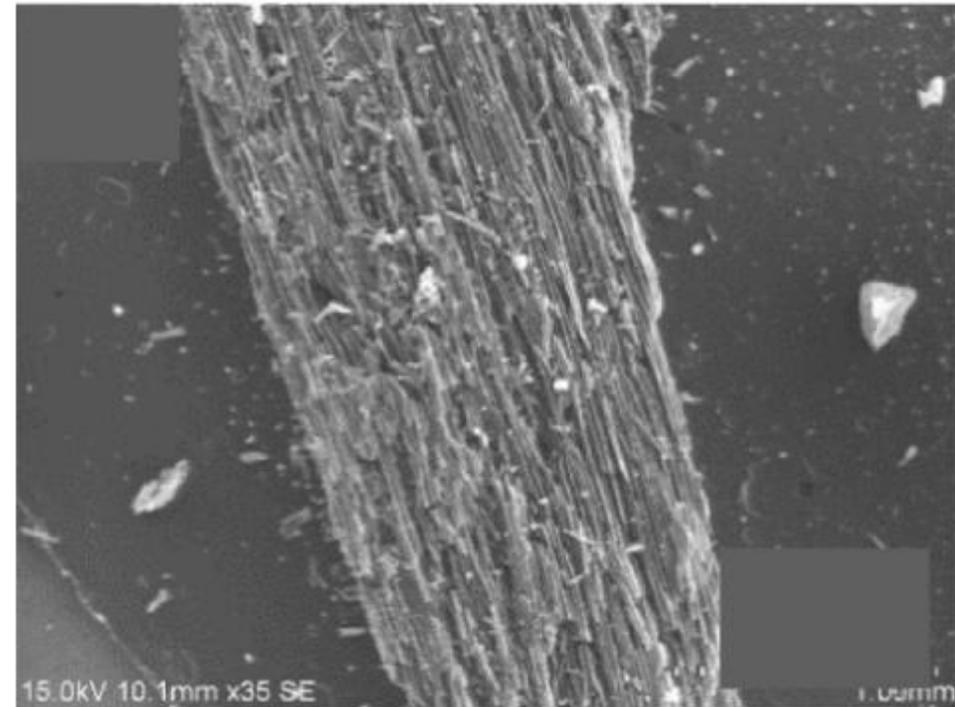
Aspect microstructural



(a)

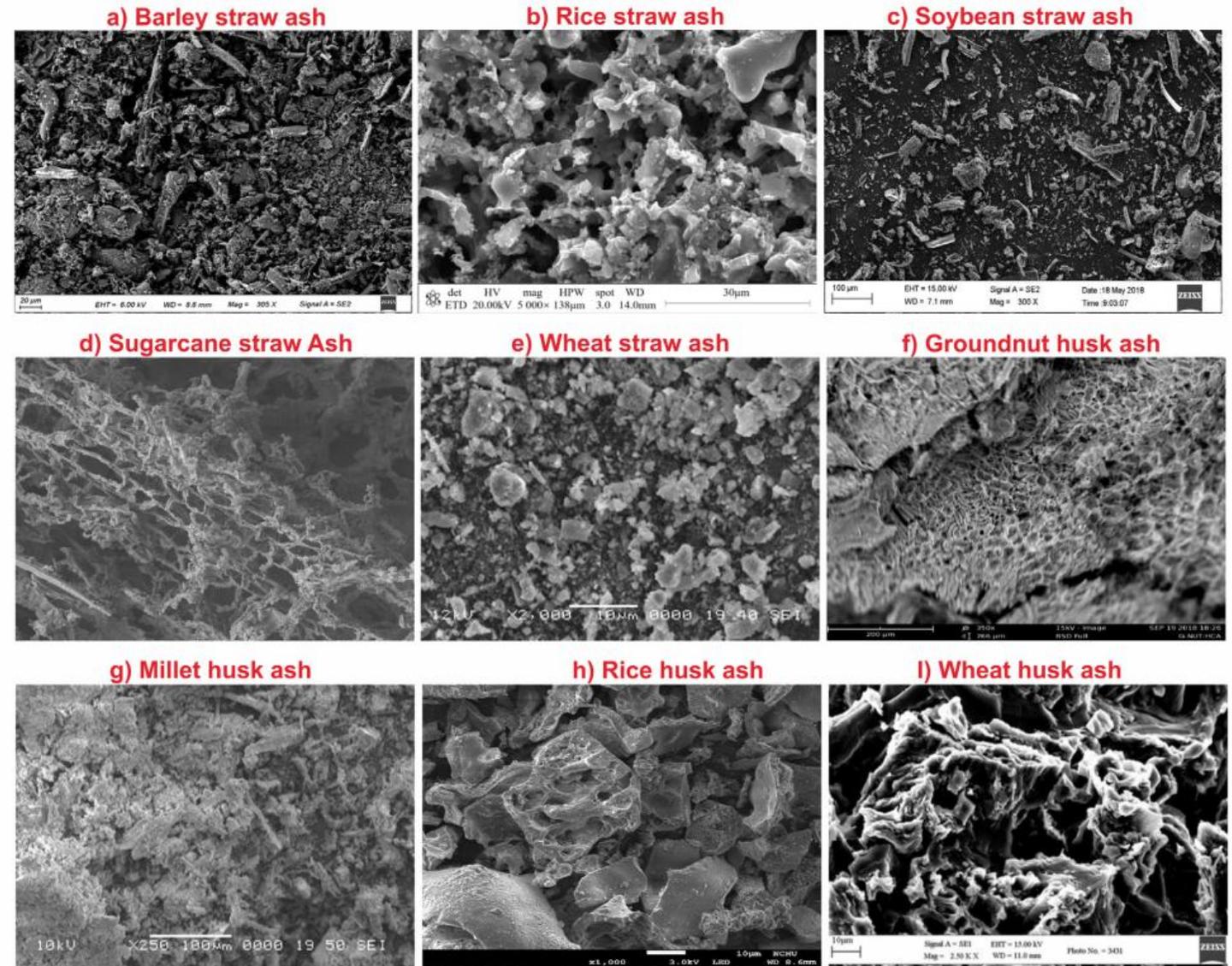
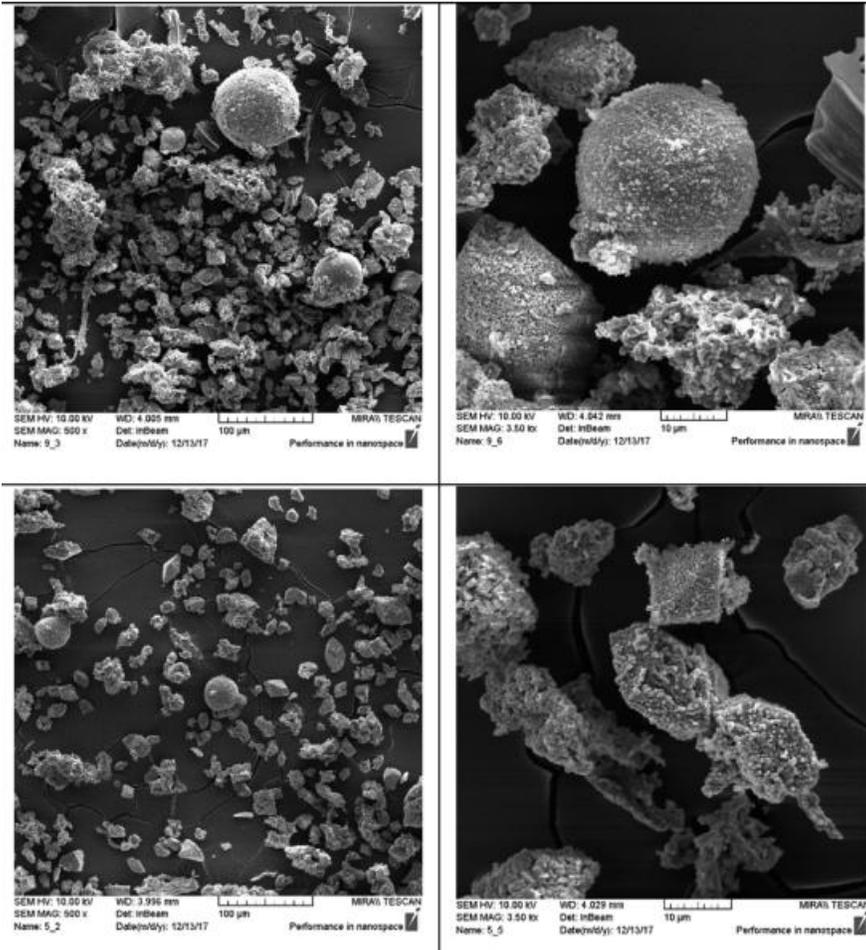
(b)

- a) Chaudière à grille
- b) Chaudière à pulvérisation



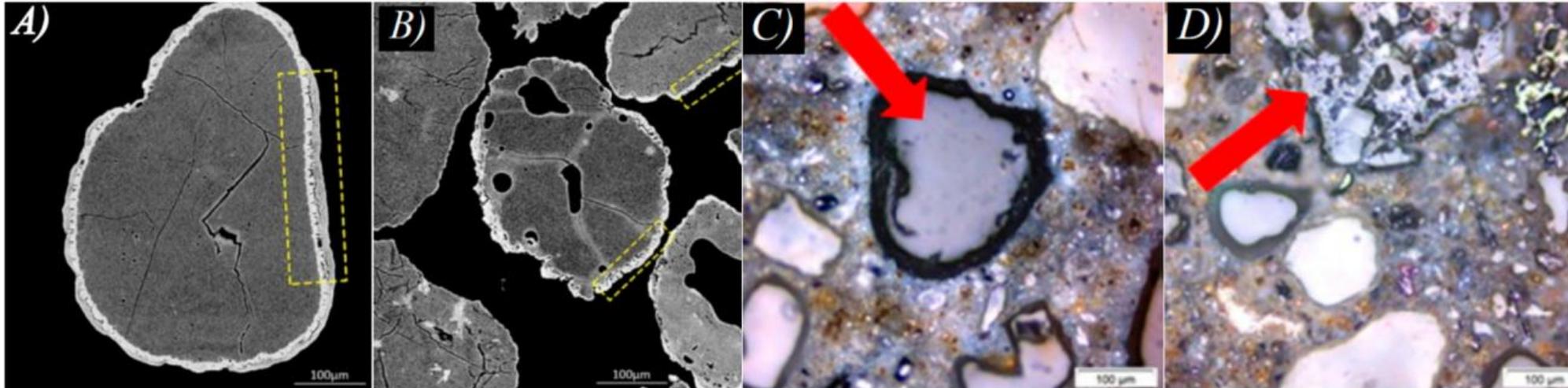
Particule d'imbrulé

Aspect microstructural

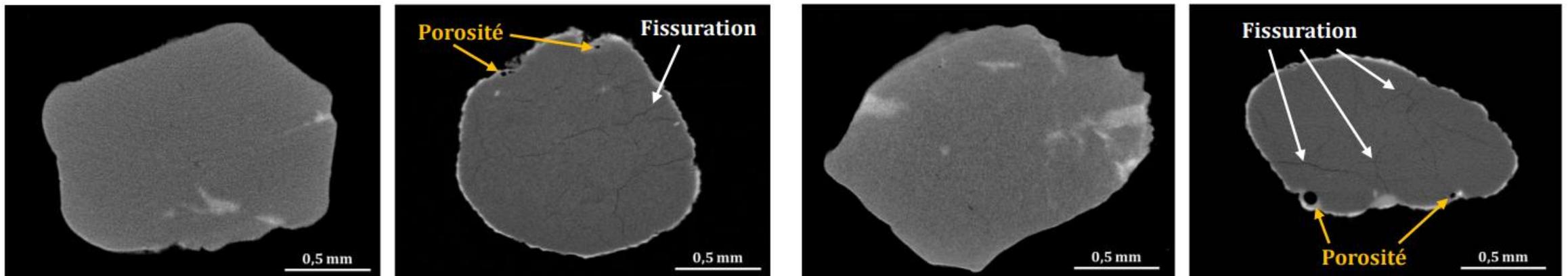


Aspect microstructural

Jensen et al., 2025



Schlupp et al., 2024

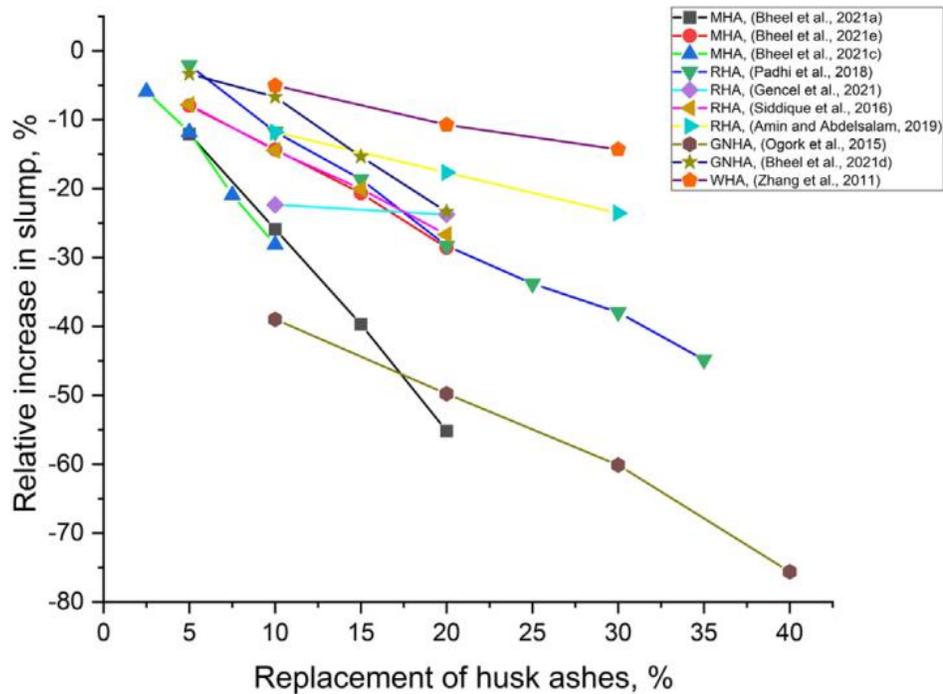


SYNTHESE

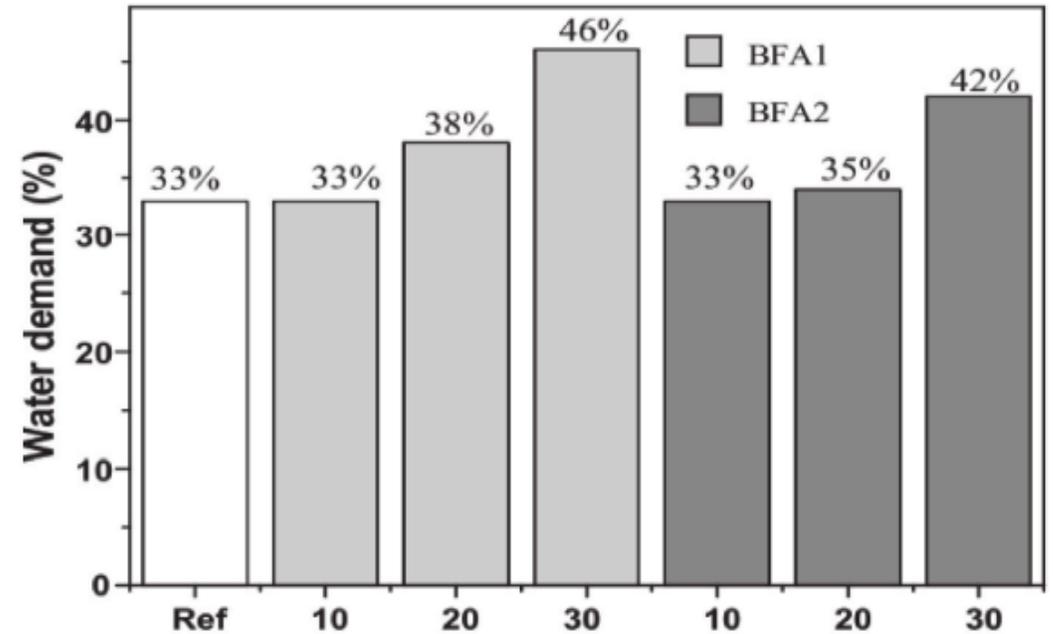
- Composées principalement de $\text{CaO} - \text{SiO}_2$
- Composition très variable selon : type de biomasse, type de chaudière et type de cendres (volantes ou sous foyer)
- Réactivité potentielle mais très variable
- Caractéristiques physicochimiques très différentes entre cendres volantes et sous-foyer → vers des utilisations différentes
- Importance de la demande en eau

Comportement à l'état frais

Pour des taux de substitution de 20 à 30%, les cendres volantes diminuent la maniabilité : particules de forme irrégulière (angulaire et poreuse), teneur en imbrulés parfois importante, ...



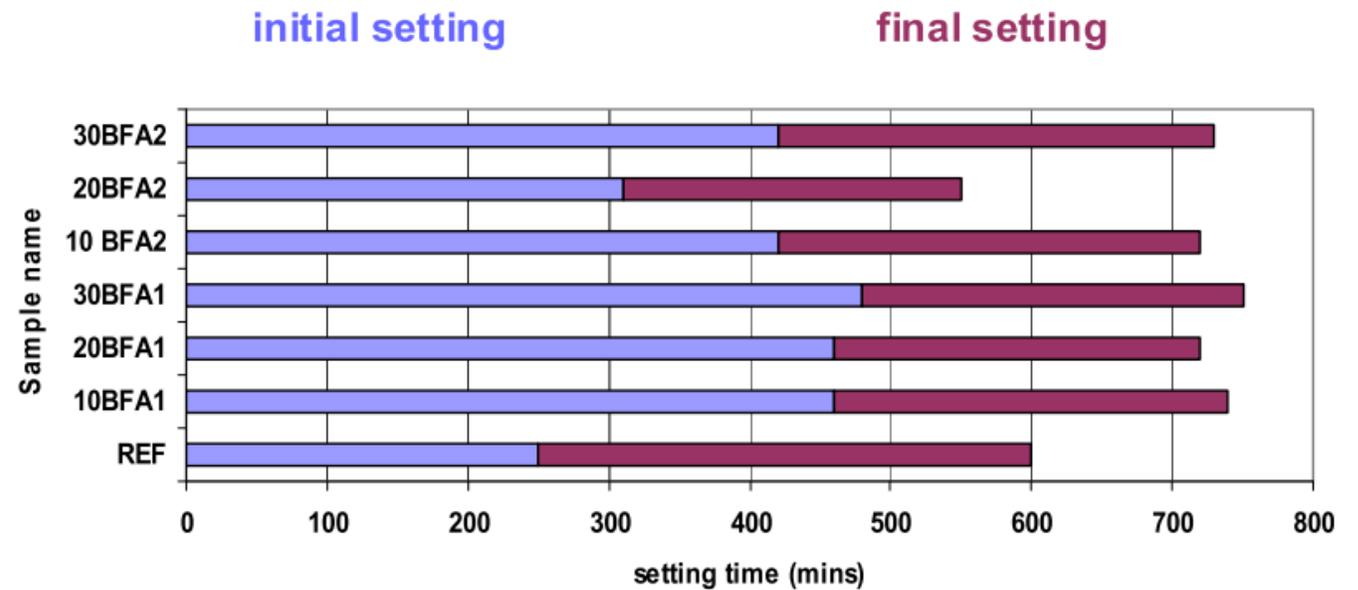
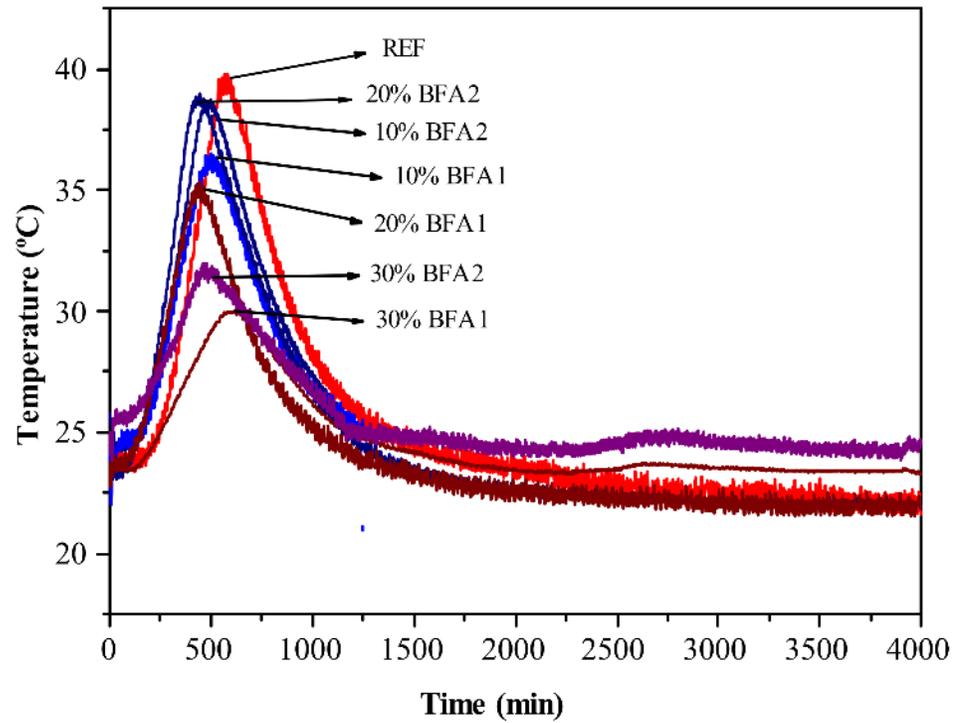
Adhikary et al., 2022



Adinna et al., 2012

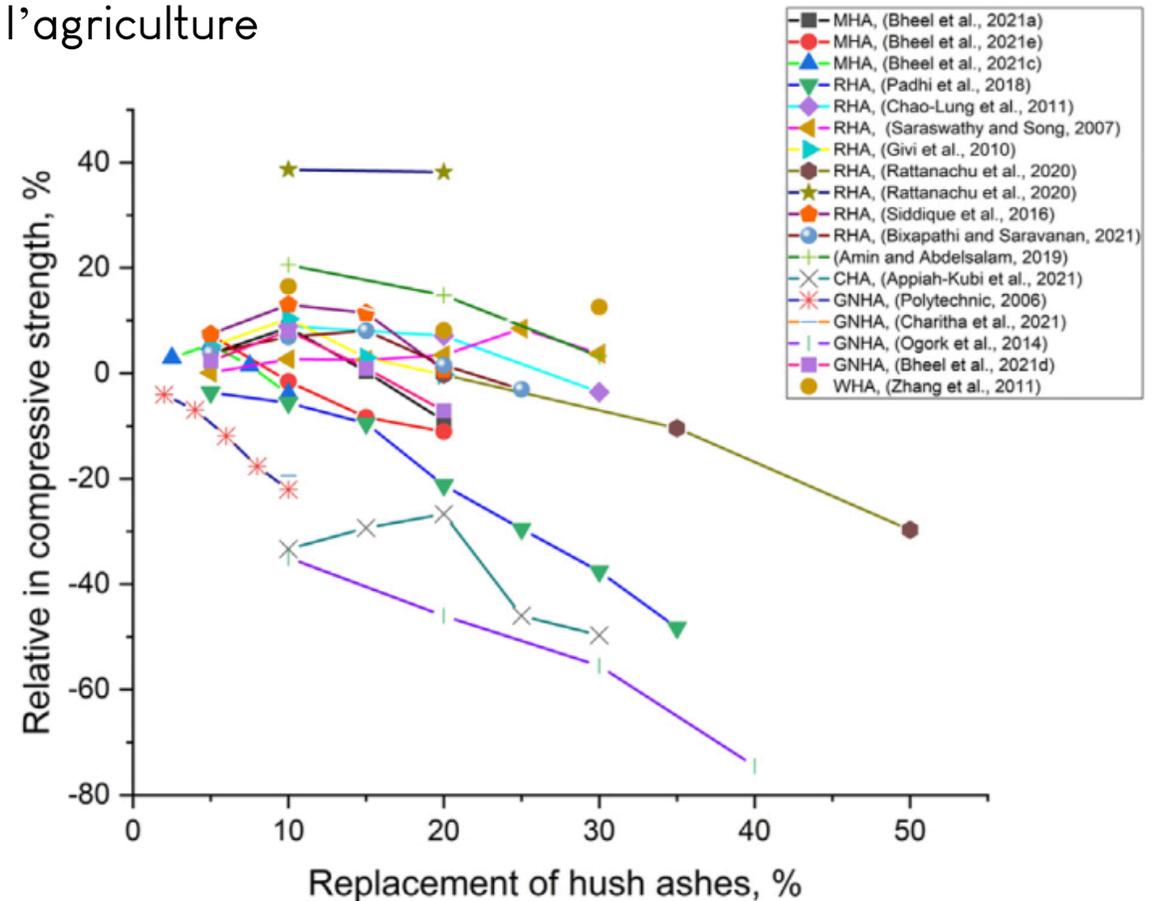
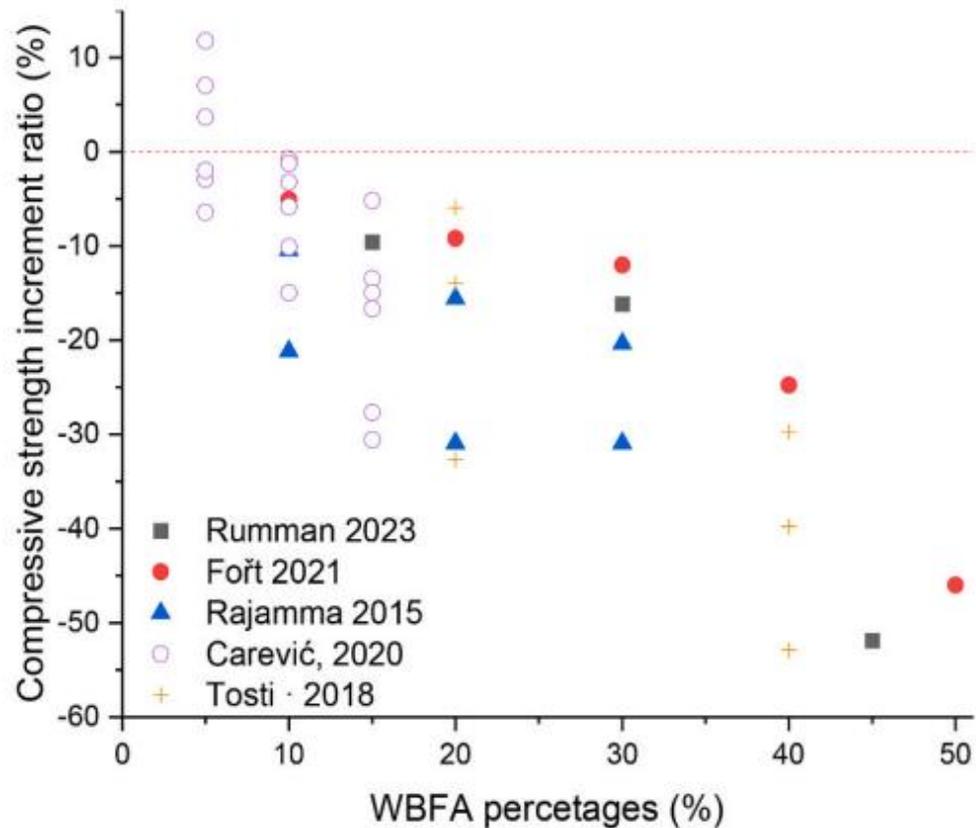
Temps de prise - hydratation

Diminution de la chaleur d'hydratation et temps de prise plus long



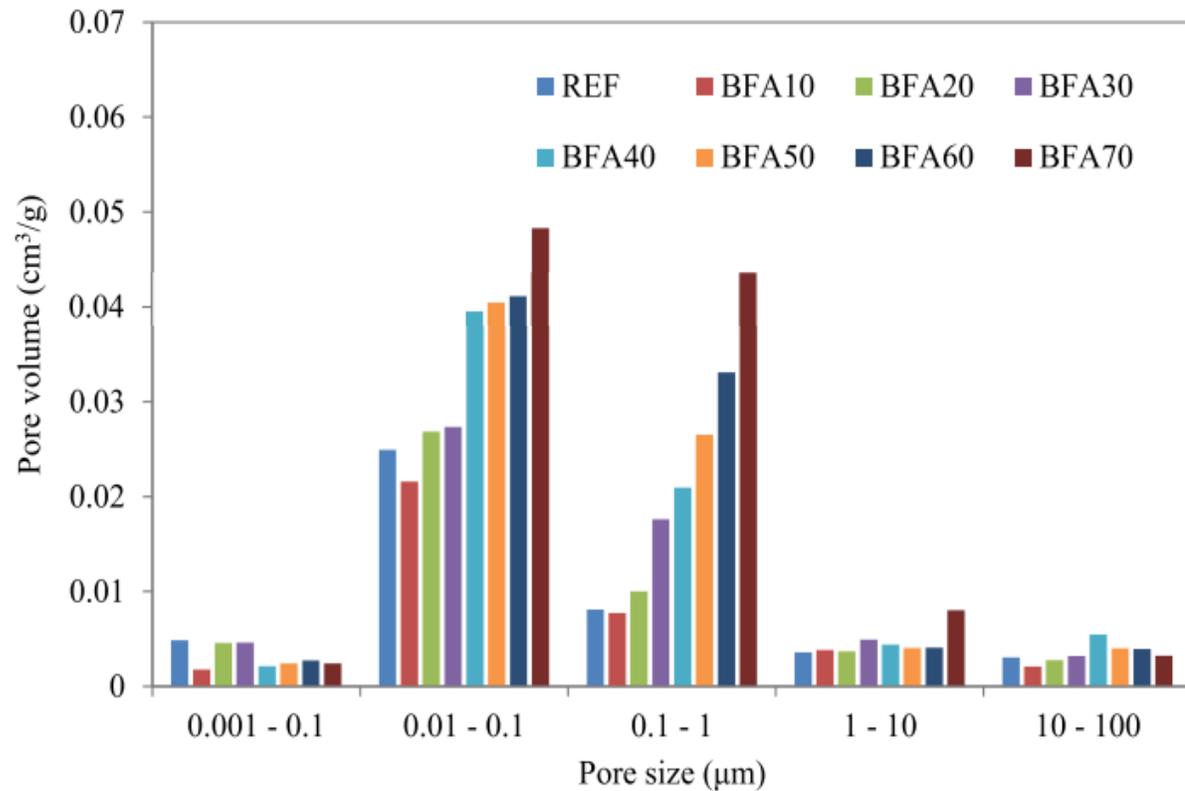
Résistances mécaniques

- Diminution des résistances mécaniques avec le taux d'incorporation : plus marqué au-delà de 20-30 %
- Meilleures résistances pour les biomasses issue de l'agriculture

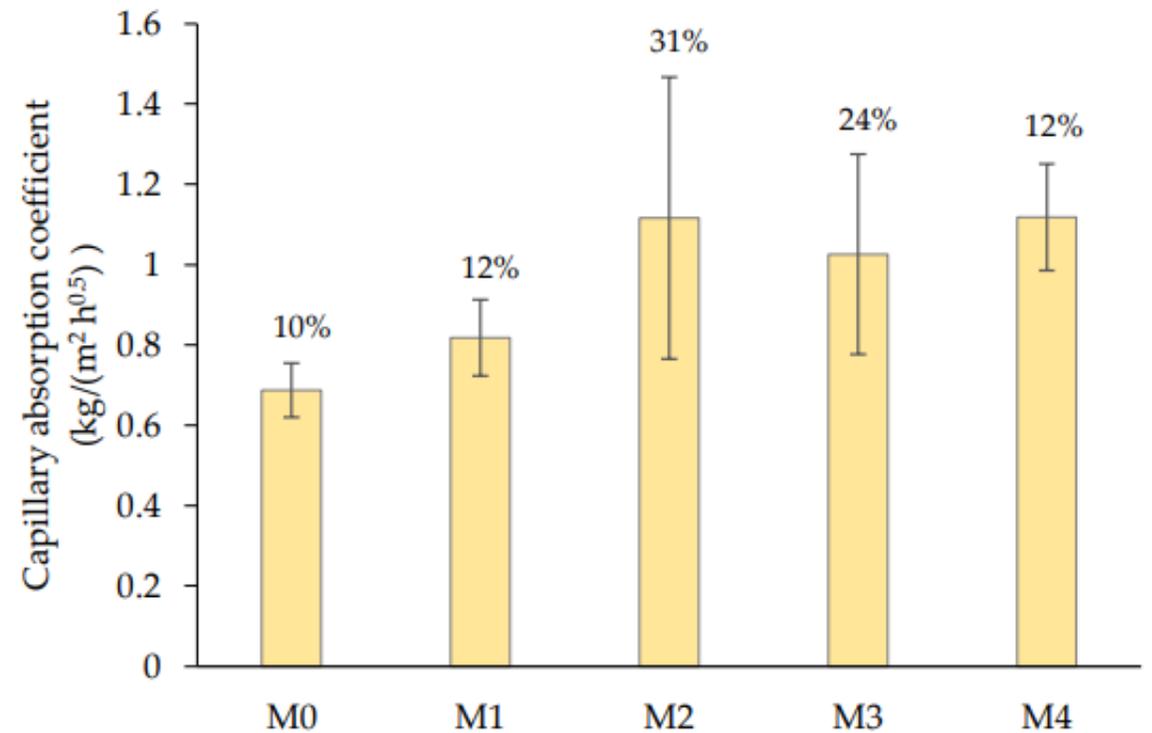


Résistances mécaniques

Porosité et coefficient d'absorption plus importants



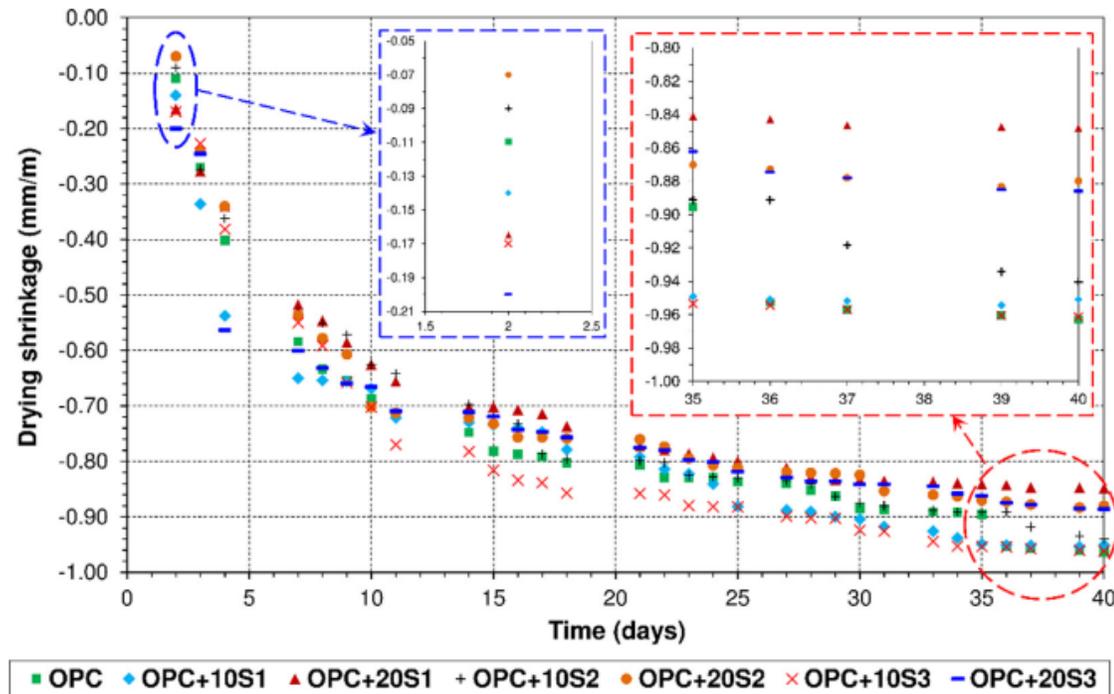
Fort et al., 2021



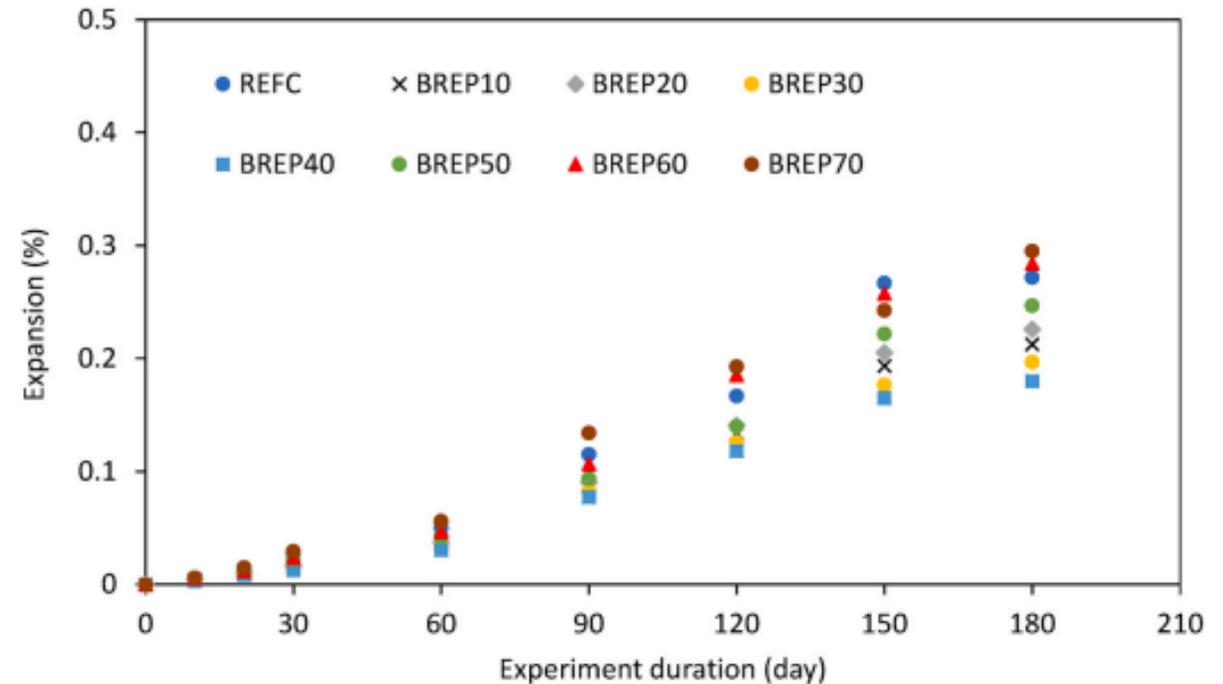
Gabrijel et al., 2022

Durabilité

- Encore très peu étudié dans la littérature
- Points de vigilance : variations dimensionnelles, résistance aux sulfates, carbonatation



Medina et al., 2019



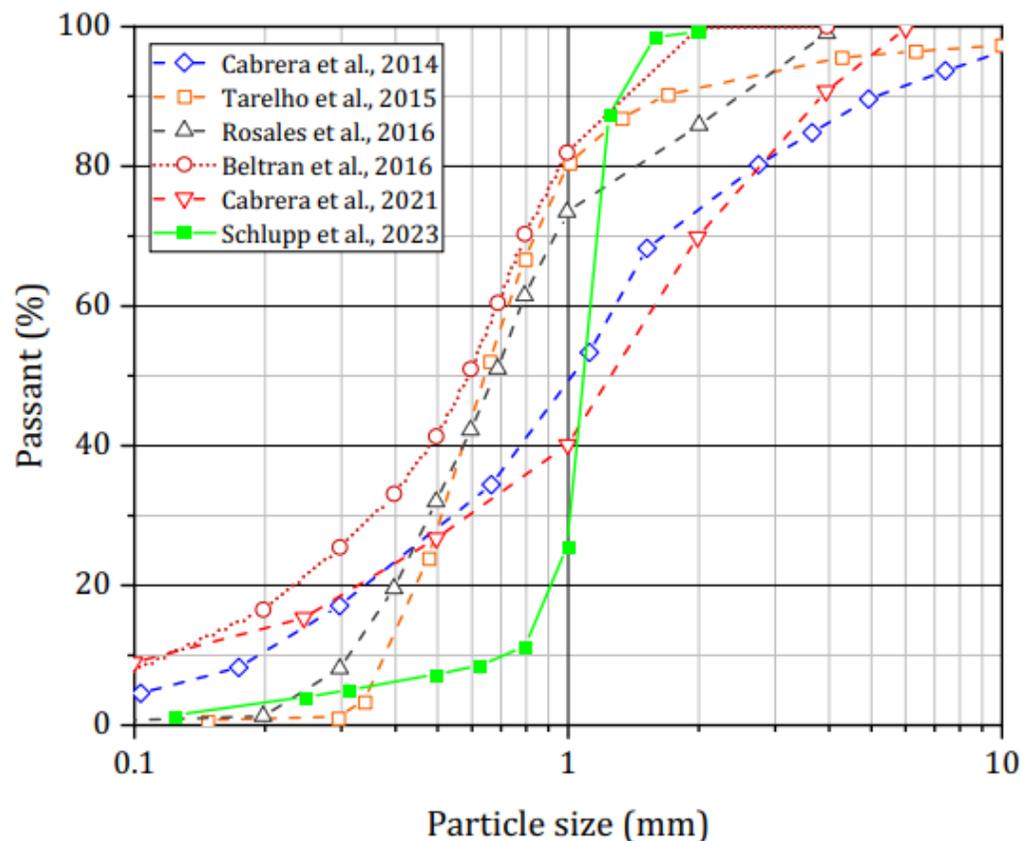
Fort et al., 2024

SYNTHESE

- Cendres volantes pour une utilisation en tant que liant
- Résultats très disparates selon le type de biomasse et la technologie de chaudière
- Meilleures résistances sur les biomasses issues de l'agriculture
- Utilisation difficile au-delà de 20-30 %
- Traitements mécaniques, thermiques possibles pour améliorer la réactivité des cendres

Taille et caractéristiques des particules

- Correspond aux cendres sous foyer



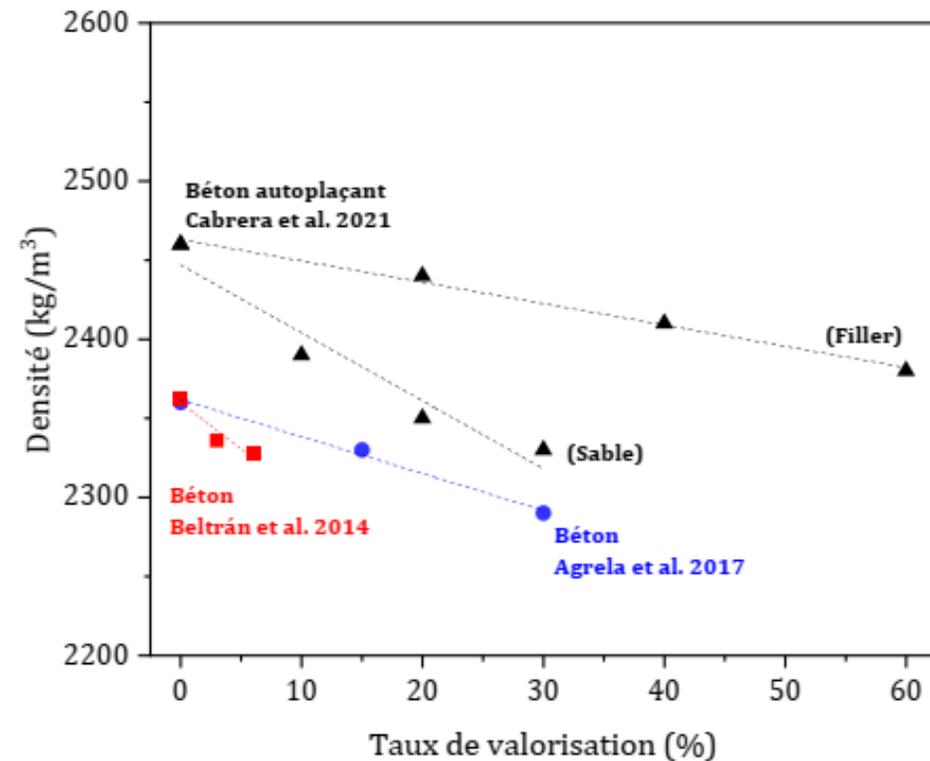
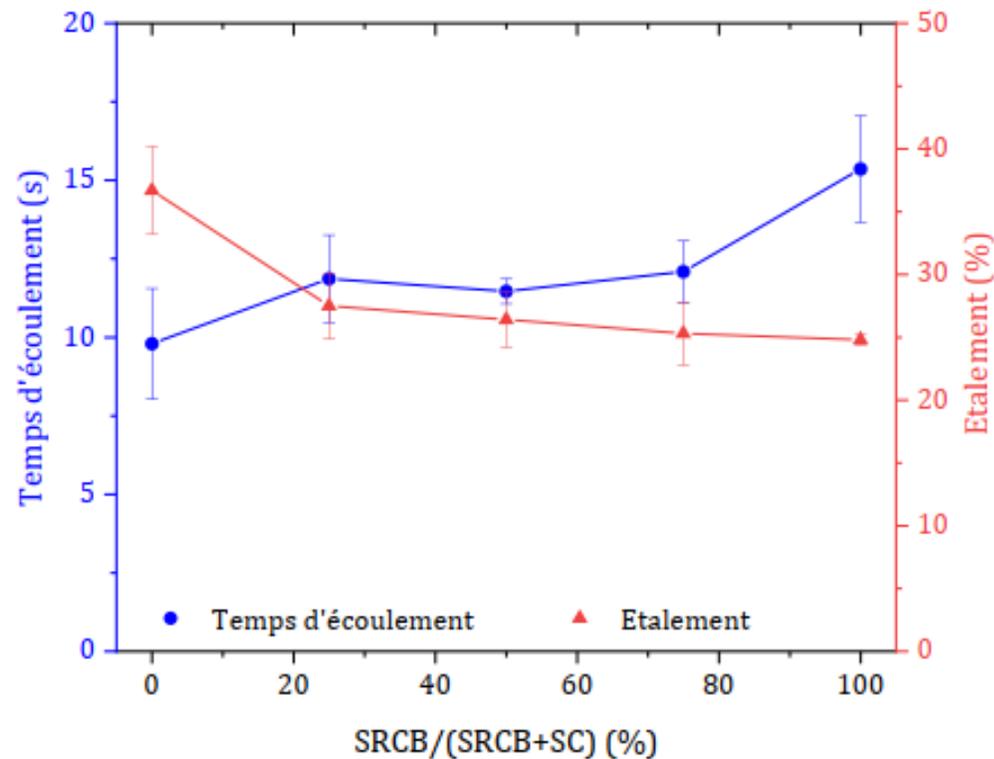
Type de biomasse	Technologie de combustion	Masse volumique (g/cm³)	Absorption d'eau (%)	LOI (%)
Bois	Lit fluidisé	2,65 à 2,67	n.d	1,27 à 2,08
Industrie papetière	Lit fluidisé	2,21	5,20	1,90
Bois	Multiple	1,75 à 2,69	n.d	1,00 à 19,60
Agricole	Grille	2,21 à 2,49	19,60 à 39,30	11,00 à 16,86
Agricole/Bois	Grille	1,97	26,60	4,12
Agricole/Bois	Grille	1,82	31,90	4,85
Agricole/Bois	Grille	1,86 à 2,12	18,90 à 21,80	0,98 à 4,34
Agricole	Grille	2,35	n.d	41,49
Agricole/Bois	Grille	1,73	19,83	n.d.
Agricole/Bois	Grille	2,34 à 2,38	9,80 à 10,10	n.d.
Agricole	n.d	2,02	19,90	3,06
Agricole/Bois	n.d	2,34 à 2,41	n.d	n.d

Schlupp et al., 2024

Propriétés des bétons à l'état frais

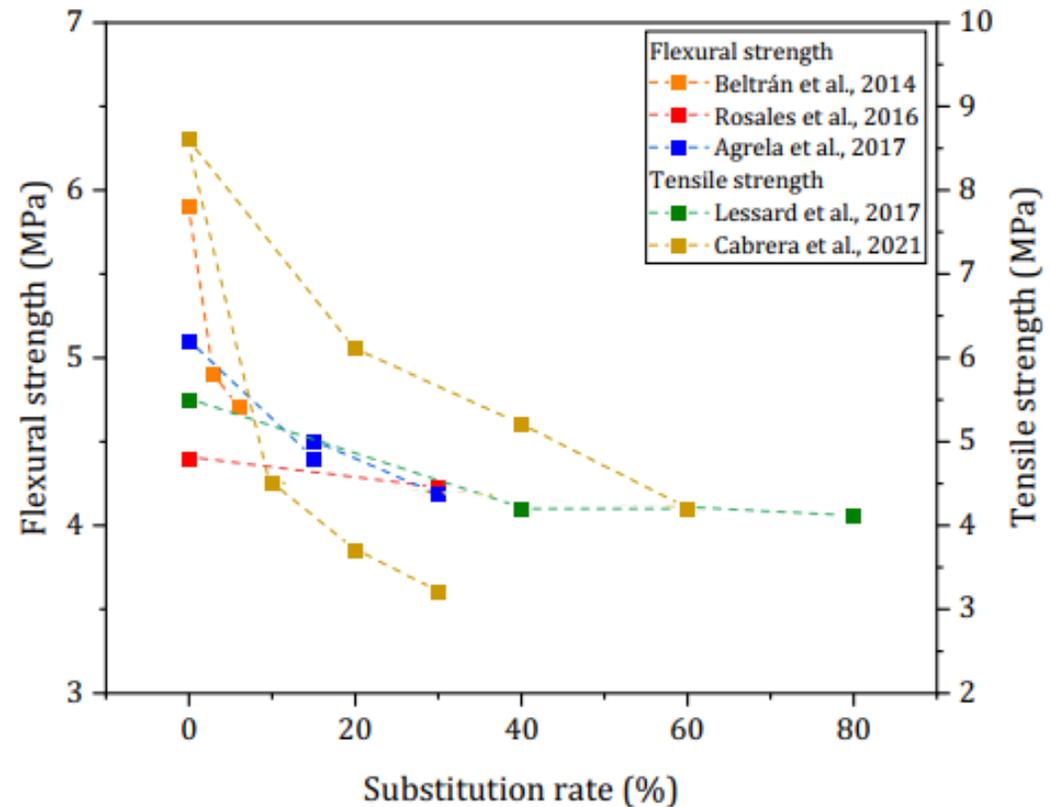
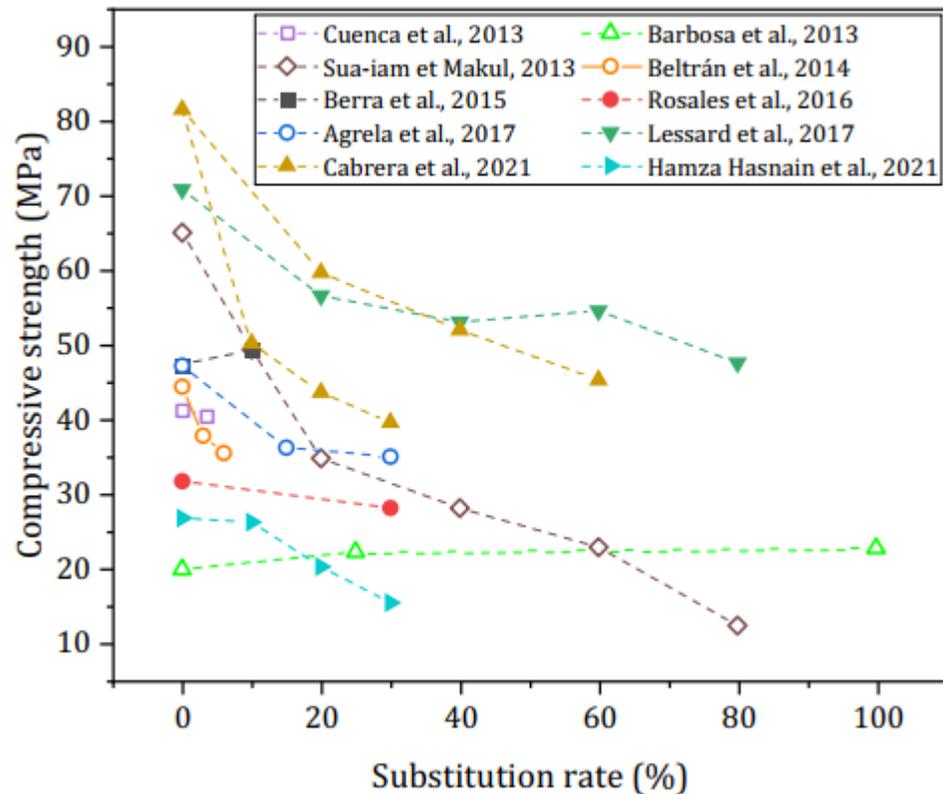
- Très dépendant de l'absorption des cendres
- Maintien de l'ouvrabilité avec des adjuvants

- Baisse sensible de la masse volumique due à la densité des cendres



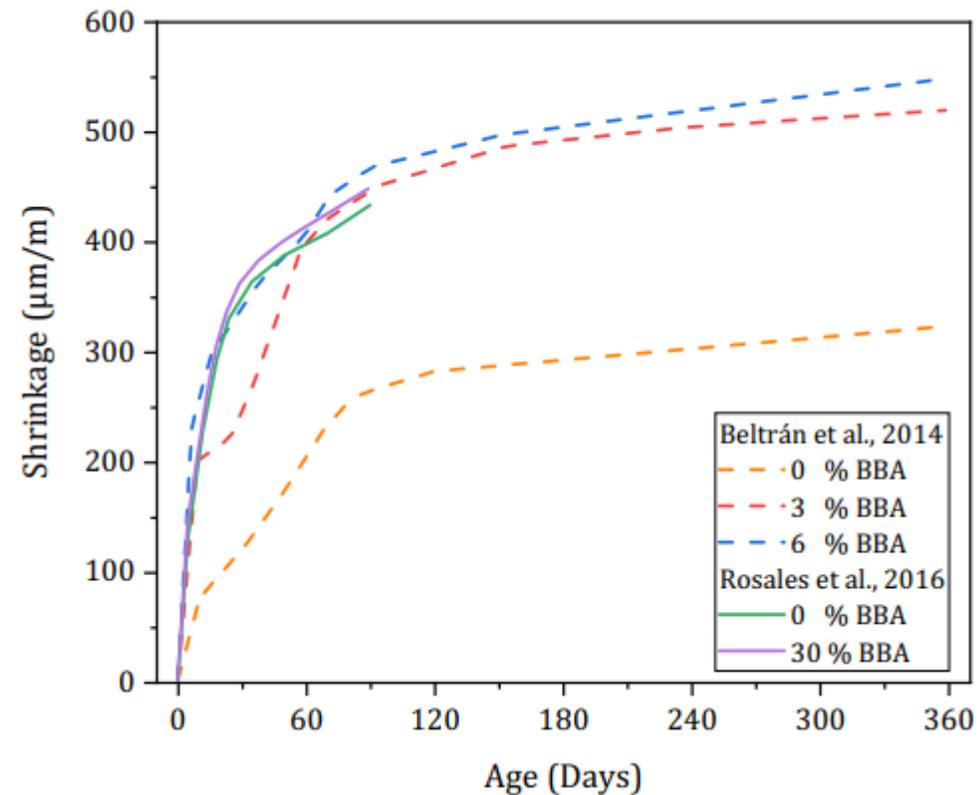
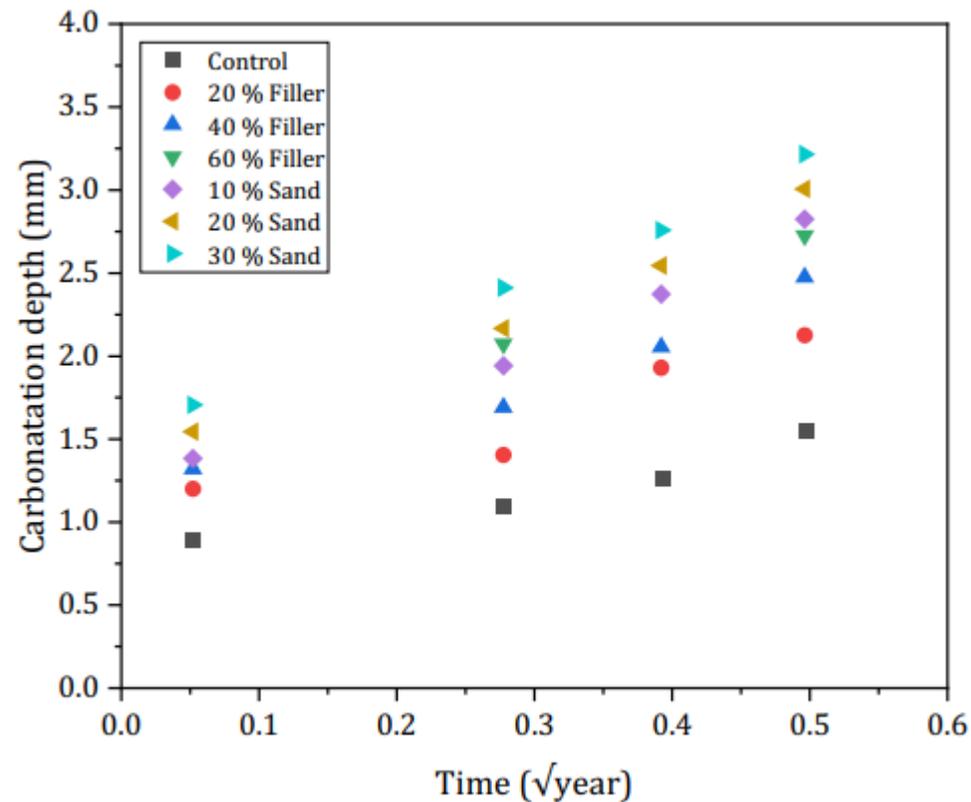
Résistances mécaniques

Tendances générales à la baisse mais moins prononcé pour les bétons à faible résistance.



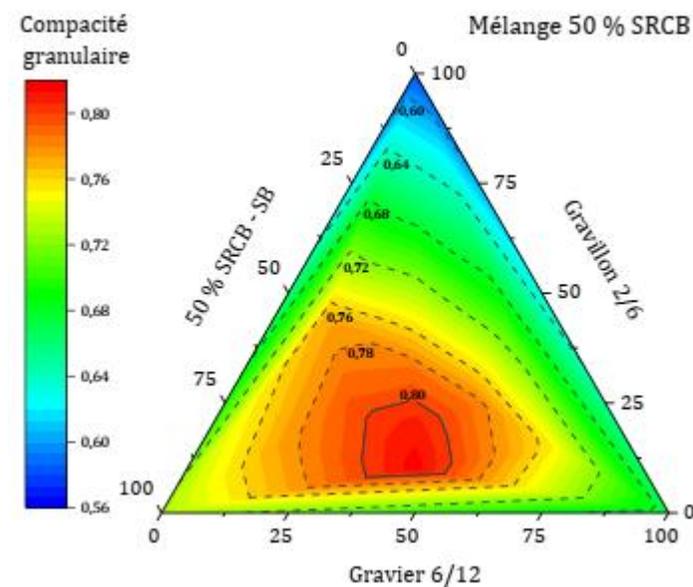
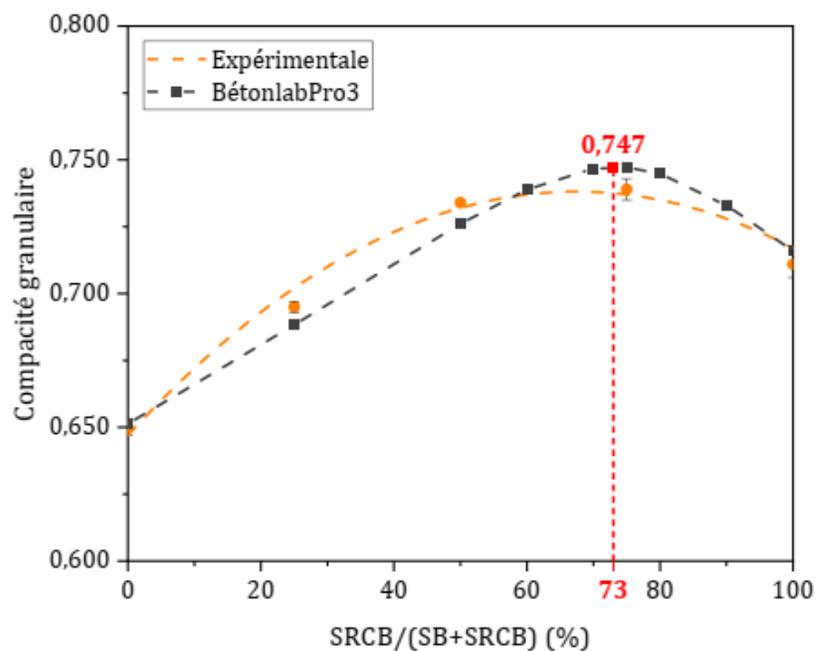
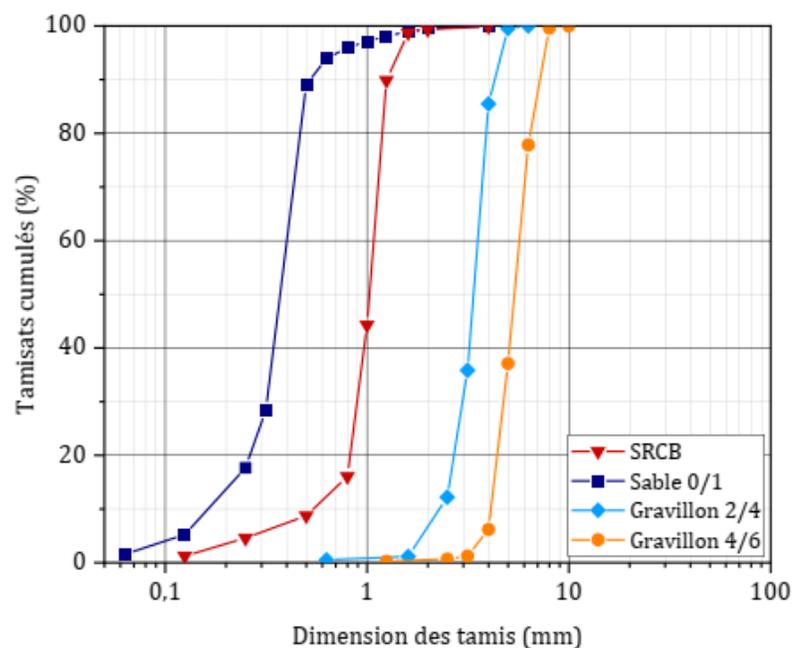
Durabilité

Augmentation de la sensibilité à la carbonatation et au retrait.



Compacité granulaire

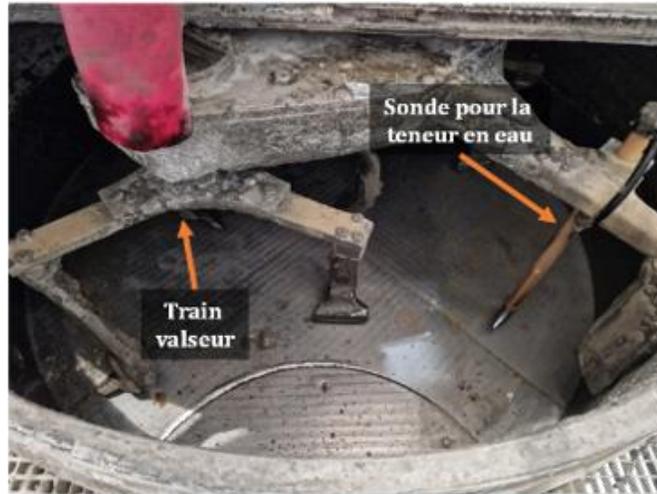
Meilleure valorisation possible avec une incorporation dans des bétons via une optimisation de la compacité granulaire.



Compacité granulaire

Schlupp et al., 2024

Malaxeur (volume utile de 1m³)



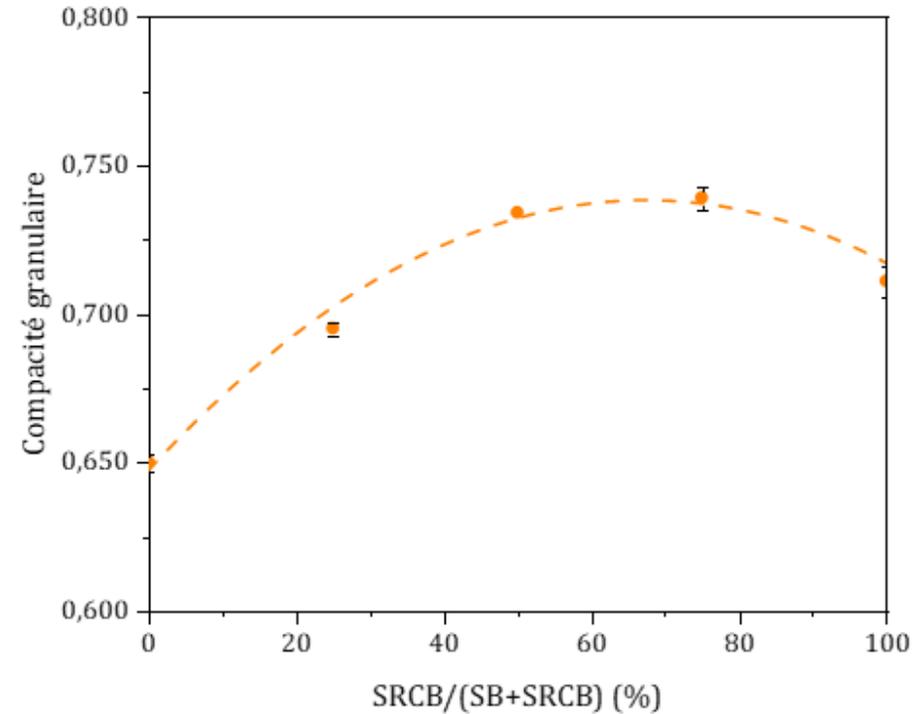
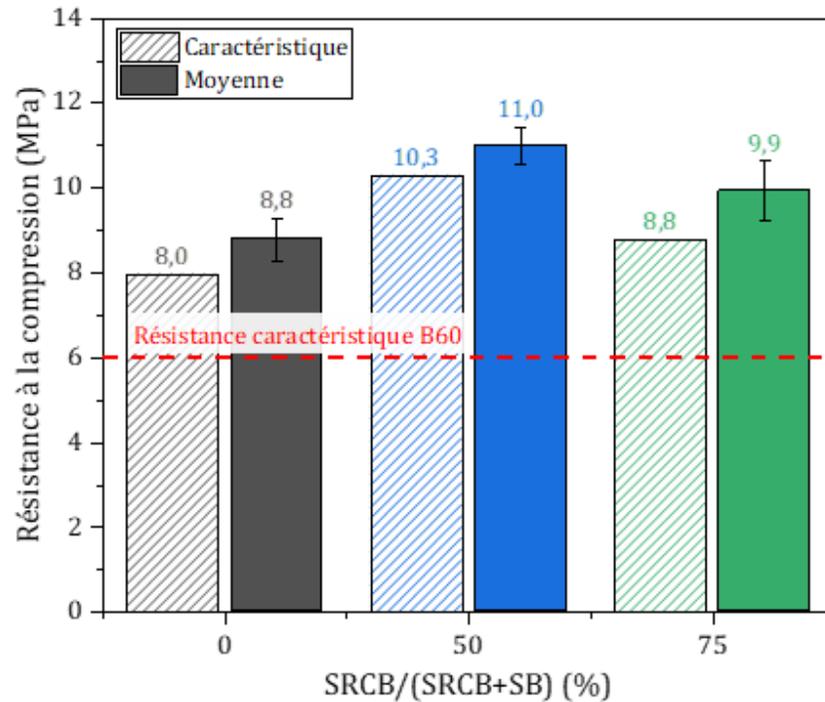
Presse à blocs



Réglages de la presse identique durant la campagne de fabrication

- ✓ Masse en sortie de presse > 18 kg
- ✓ Cohésion maintenue après le démoulage
- ✓ Hauteur du bloc respectée

Compacité granulaire



Résistance minimale atteinte à 7 jours



Lien avec la compacité granulaire

SYNTHESE

- Cendres sous-foyer plus adaptées pour valorisation granulaire
- Résultats variables selon les cendres utilisées
- Point d'attention sur la prise en compte d'absorption d'eau
- Valorisation à adapter en fonction des classes granulaires présentes dans le composite
- Optimisation granulaire importante pour une valorisation plus efficace
- Souvent plus valorisable dans les bétons secs types blocs

Points essentiels

Connaissances des caractéristiques physico-chimiques essentielles pour orienter l'utilisation des cendres :

- Chimique : métaux lourds, composition en oxydes (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , ...), présence d'une phase amorphe, ...
- Physique : densité, taille des particules, absorption d'eau (ou demande en eau)
- Potentielle réactivité ou non ?

Choisir une voie adaptée selon la taille des particules, la réactivité

Biomasse bois moins adaptée pour utilisation comme substitut au ciment

Valorisation granulaire possible en grande quantité avec optimisation

Perspectives

En combinaison dans les matériaux biosourcés : voie peu explorée (liant pour agro-matériaux ?)

Peu de données sur la durabilité

Interactions physico-chimiques avec les autres liants alternatifs peu étudiés