HAL open science

Effet de la combustion sur les cendres sous-foyer de biomasse -Valorisation en tant que sable dans un mortier

Florian Schlupp, Jonathan Page, Chafika Djelal, Laurent Libessart

To cite this version:

Florian Schlupp, Jonathan Page, Chafika Djelal, Laurent Libessart. Effet de la combustion sur les cendres sous-foyer de biomasse -Valorisation en tant que sable dans un mortier. NOMAD 2022 - 4e conférence internationale francophone Nouveaux Matériaux et Durabilité, IMT Mines Alès; LMGC; LIFAM, Nov 2022, Montpellier, France. hal-03881451

HAL Id: hal-03881451

https://hal.science/hal-03881451v1

Submitted on 1 Dec 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Effet de la combustion sur les cendres sous-foyer de biomasse – Valorisation en tant que sable dans un mortier

Florian Schlupp, Jonathan Page, Chafika Djelal, Laurent Libessart

Univ. Artois, IMT Nord Europe, Junia, Univ. Lille, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), F-62400 Béthune, France

ABSTRACT

En France, la filière bois énergie génère annuellement des centaines de milliers de tonnes de cendres de biomasse. Du fait de leurs caractéristiques, les cendres sous-foyer (CSF) de biomasse pourraient être potentiellement valorisables dans les matériaux de construction. Ce qui permettra d'avoir un nouveau débouché à ces déchets industriels, tout en diminuant la consommation de granulats naturels non renouvelables qui se raréfient. Ces travaux portent sur le potentiel des CSF de biomasse en tant que substitut des granulats naturels dans des matériaux cimentaires. La première partie de cette étude s'intéresse aux caractéristiques physico-chimiques des CSF afin d'évaluer leur compatibilité avec la matrice cimentaire. Dans ce cadre, une analyse des modifications induites par la combustion de biomasse sur le sable de chaudière (SC) utilisé lors du processus de combustion est proposée. La surface des grains de CSF a été modifiée par la fusion de la biomasse avec le grain de SC, ce qui influence les propriétés physico-chimiques des CSF. L'incorporation de CSF en tant que sable dans la composition de mortier diminue leur consistance tout en améliorant leur propriété mécanique. La quantité de chaleur dégagée augmente également et les porosités diminuent avec l'ajout de CSF dans les mortiers.

Keywords cendres sous-foyer ; biomasse bois ; lit fluidisé ; substitution de sable ; combustion

I. INTRODUCTION

La consommation d'énergie primaire en France représente plus de 2650 TWh en 2020, dont 13 % sont constituées par les énergies renouvelables. La filière bois-énergie va représenter plus du tiers de la production des énergies renouvelables en France (Ministère de la transition écologique, 2021). Ce qui représente une production de déchets qui est estimée à plus de 200 000 tonnes de cendres de biomasse en 2017, en France (Syndicat des énergies renouvelables, 2021). Cela représente une quantité non négligeable de cendres à valoriser ou à stocker dans des centres d'enfouissement par les exploitants. La technologie à lit fluidisé employée par la centrale de cette étude utilise dans son processus de combustion un mélange de sable et de biomasse (Figure 1). Les cendres sous-foyer (CSF) sont constituées du sable utilisé dans la chaudière (>95 %) et de cendres issues de la combustion de la biomasse (<5 %). Une voie intéressante de valorisation des CSF concerne leur utilisation dans le secteur de la construction en tant qu'agrégat. Il est cependant nécessaire d'étudier au préalable les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des

CSF, ainsi que leurs interactions avec la matrice cimentaire avant de pouvoir les valoriser dans le secteur de la construction. Ces analyses vont permettre de définir la part valorisable de cendres de biomasse dans des matériaux cimentaires. Ces travaux font partie du projet ADEME BIOGRAFIC (Valorisation des cendres de BIOmasse en tant que GRAnulats et FIller dans des blocs de Construction).

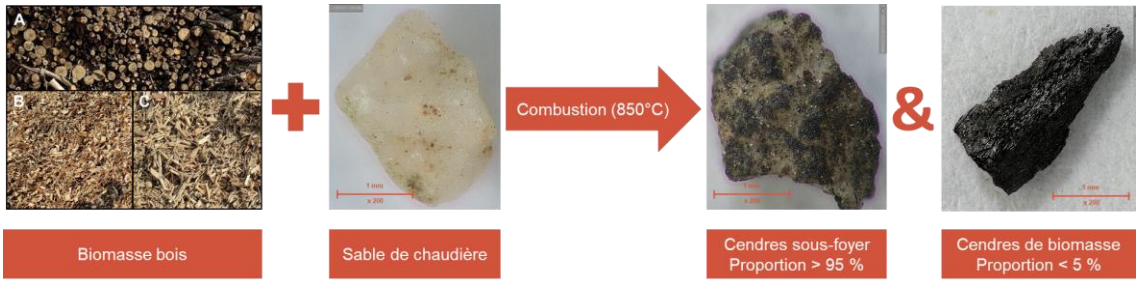

FIGURE 1. Évolution et composition élémentaire des CSF

II. INFLUENCE DE LA COMBUSTION SUR LES PROPRIETES DES CSF

A. Centrale biomasse

Les CSF utilisées dans ces travaux proviennent de la centrale biomasse bois de Lens (France) qui emploie une technologie à lit fluidisé dense. La chaudière de 22 MW permet de produire de la chaleur et de l'électricité par cogénération. La biomasse bois exploitée dans la centrale est issue principalement de grumes, de plaquettes forestières et de bois de recyclage. Les CSF sont composées des cendres récupérées dans le lit de la chaudière et des cendres provenant des filtres cycloniques. Les CSF sont tamisées à 5mm afin de retirer les éléments indésirables (éléments métalliques, bois, granulats D > 5mm).

B. Composition chimique et minéralogique

La combustion de la biomasse avec le sable de chaudière peut modifier et influencer la composition chimique et minéralogique des CSF. L'analyse de la composition chimique est réalisée par fluorescence X (XRF) et est présentée dans le tableau 1. Par ailleurs, elle est nécessaire pour connaître le pourcentage d'éléments chimiques potentiellement néfastes ou bénéfiques pour la valorisation des CSF.

TABLEAU 1. Composition chimique des CSF

Oxydes (%)	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	Fe_2O_3	MgO	PAF
	87,99	3,36	2,42	0,21	2,10	1,07	0,46	1,84

Les CSF se composent majoritairement de silice (SiO_2) à 87,99 % et de chaux (CaO) à 3,36 %. La littérature montre que les cendres de biomasse bois sont constituées en moyenne de CaO, de SiO_2 et de K_2O avec cependant des variations importantes selon les gisements (Vassilev et al., 2010; Carević et al., 2019). Les oxydes de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3) représentent plus de 90 % de la composition chimique. Ils sont généralement utilisés pour décrire le caractère pouzzolanique d'un matériau par la norme NF EN 450-1.

L'analyse minéralogique (DRX) permettra de confirmer ces informations. Les pertes au feu (PAF) peuvent jouer un rôle néfaste dans la production de matériau cimentaire. En effet, ce sont généralement des particules poreuses, friables et de forme allongées qui sont souvent responsables de pertes d'ouvrabilité et de résistances mécaniques des composites cimentaires (Rosales et al., 2017; Teixeira et al., 2019). Dans notre cas, le faible taux de PAF peut être lié à l'efficacité de la technologie de combustion (Tarelho et al., 2015), ce qui diminue les risques de pertes d'ouvrabilité liés à leur présence dans les CSF. L'analyse minéralogique a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre à rayons X (DRX), le diffractogramme des CSF est présenté dans la Figure 2.

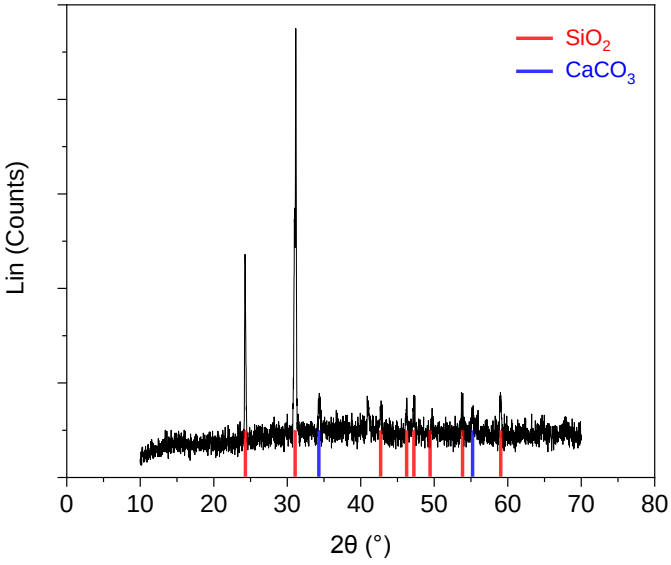

FIGURE 2. Diffractogramme des CSF

Des pics cristallins représentatifs du quartz (SiO_2) et de la calcite ($CaCO_3$) sont présents sur le diffractogramme. L'absence de phase amorphe révèle que les CSF n'auront probablement pas de réaction pouzzolanique. L'utilisation d'un sable de nature siliceuse dans le processus de combustion est responsable de la présence majoritaire de la silice et du quartz (SiO_2) dans les analyses chimiques et minéralogiques (Tarelho et al., 2015; Carević et al., 2019)

C. Modification de la surface des grains

Une couche noirâtre est observable à l'œil nu (Figure 1) à la suite de la combustion sur les grains de CSF. Durant la combustion de la biomasse, les températures élevées (850°C) feraient fondre et s'agglomérer la biomasse à la surface des grains de sable de chaudière (Anicic et al., 2018). Ces évolutions pourraient participer aux modifications des propriétés physico-chimiques des CSF et ainsi avoir une influence sur les propriétés des mortiers. Dans le but d'évaluer les modifications de la surface des grains, des microscopies MEB ont été réalisées et sont présentées dans la Figure 3.

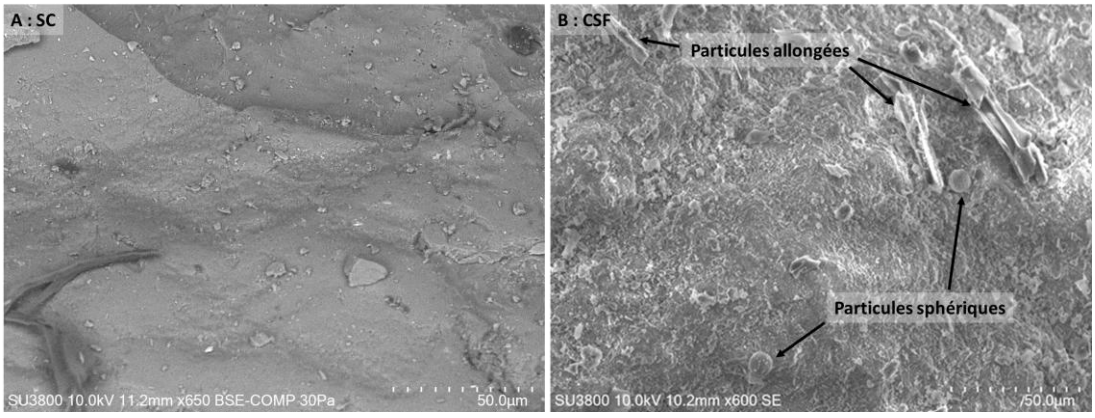

FIGURE 3. Observations MEB de la surface d'un grain avant (A) et après combustion (B)

L'aspect de la surface d'un grain de SC (avant combustion) montre que la surface semble lisse, peu texturée et possède quelques particules à sa surface (Figure 3, A). La surface du grain de CSF semble quant à elle plus rugueuse et texturée (Figure 3, B). On constate également que des particules sphériques (± 9 µm de diamètre) et allongées (± 45 µm de long) sont visibles à la surface des CSF. Ces particules proviennent probablement des résidus de cendres de biomasse présentes dans le matériau, possiblement des cendres volantes. La rugosité de surface plus importante après la combustion pourrait conduire à une diminution de la consistance en augmentant les frictions entre les grains lors de la confection de mortier.

D. Évolutions des caractéristiques physico-chimiques

La modification de la surface des grains de CSF va avoir un impact sur la masse volumique et le coefficient d'absorption du matériau. Ces caractéristiques sont également nécessaires pour la formulation de mortiers/bétons, la masse volumique réelle (ρ_{rd}) et le coefficient d'absorption d'eau (WA_{24}) ont été déterminés selon la norme NF EN 1097-6. Les résultats pour le sable de chaudière (avant combustion) et les CSF (après combustion) sont présentés dans le tableau 2.

TABLEAU 2. Propriétés physiques des matériaux

	Unité	Sable de chaudière (SC)	Cendres sous-foyer (CSF)
ρ_{rd}	g/cm³	2,60 ± 0,01	2,12 ± 0,09
WA_{24}	%	0,82 ± 0,14	7,23 ± 1,67

À la suite de la combustion, la masse volumique diminue d'environ 18 % et le coefficient d'absorption d'eau des CSF est quant à lui 9 fois supérieur au SC. Les cendres de biomasse présentes dans le matériau qui sont plus légères et poreuses peuvent être responsables de ces modifications (Rosales et al., 2017; Carević et al., 2019). La couche apportée par la combustion va également participer aux modifications de ces propriétés. La distribution granulaire a été déterminée par tamisage mécanique, selon la norme NF EN 933-1. Les courbes granulométriques des CSF et du SC sont présentées dans la Figure 4. Elles ont toutes les deux un fuseau granulaire 0/2 resserré autour de 1 mm. Les deux courbes sont très similaires, hormis pour la coupure 0,125/0,80 mm qui est légèrement plus importante pour les CSF. Bien que les CSF semblent dépendantes du matériau initial, elles sont également modifiées par la combustion qui apporte des particules plus fines.

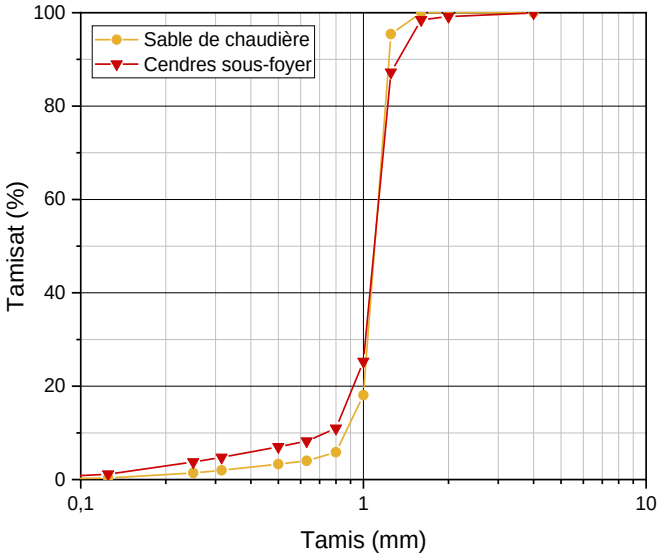

FIGURE 4. Courbes granulométriques

A la suite des analyses physico-chimiques et minéralogiques des CSF après leur combustion, il a été démontré qu'il n'y avait pas de contre-indication quant à leur utilisation dans des matériaux cimentaires. Il faudra cependant veiller aux propriétés comme l'absorption d'eau (WA_{24}), la masse volumique et la finesse des CSF qui pourront influencer les propriétés de matériaux cimentaires formulés.

III. VALORISATION DES CSF EN TANT QUE SABLE DANS UN MORTIER

La combustion influence les propriétés physico-chimiques et provoque une modification de la surface des CSF. Ces évolutions sont également susceptibles de modifier les propriétés des mortiers les incorporant. C'est pourquoi une étude a été réalisée sur l'influence de la combustion sur les propriétés des mortiers.

A. Composition des mortiers

Les compositions et la mise en œuvre des mortiers sont basées sur la méthodologie proposée par la norme NF EN 196-1 (Tableau 3). Durant la période de cure, les échantillons sont stockés dans une chambre humide (HR 70 ± 10 % ; 20 ± 2°C). Dans le but d'étudier les modifications induites par la combustion, le sable de chaudière (SC) a été utilisé comme sable de référence. En raison de la différence de masse volumique des CSF avec le SC, des substitutions volumiques ont été réalisées. La compacité des mélanges granulaires (SC et CSF) a été mesurée selon la méthode LCPC n°61. Les résultats présentés dans le Tableau 3 montrent une augmentation linéaire de la compacité des mélanges suivant le taux de CSF incorporé. En effet, la différence de granulométrie entre les tamis de 0,125 et 0,80 mm ainsi que des modifications de la morphologie des grains à la suite de la combustion peuvent être responsables de l'augmentation de la compacité. Une compacité importante permettra de minimiser la porosité intergranulaire et ainsi participer à l'amélioration des propriétés des mortiers.

TABLEAU 3. Composition des mortiers

Taux de substitution	%vol	0	25	50	75	100
Ciment	g	450	450	450	450	450
Eau	g	225	225	225	225	225
E/C	/	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
SC	g	1350	1013	675	338	0
CSF	g	0	275	550	826	1101
Compacité du mélange	/	0,645 ± 0,002	0,669 ± 0,003	0,689 ± 0,004	0,706 ± 0,006	0,712 ± 0,012

B. Ouvrabilité

L'ouvrabilité des mortiers a été déterminée à l'aide de l'essai d'étalement à la table à secousses (NF EN 1015-3) et l'essai de temps d'écoulement au maniabilimètre à mortier (NF P18-452). Les résultats de ces essais sont présentés avec la Figure 5. L'étalement diminue relativement de 10 à 27 % et le temps d'écoulement augmente de 17 à 57 % avec le taux de CSF. Les deux méthodes indiquent que la consistance des mortiers diminue avec l'incorporation de CSF. On observe qu'après 25 % de substitution, les CSF semblent avoir un effet réduit sur la baisse de consistance. La réduction de l'eau disponible à cause de l'absorption d'eau élevée des CSF (7,23 ± 1,67 %) ainsi que la réduction des vides intergranulaires liée à l'augmentation de la compacité réduisent la lubrification des grains. La rugosité de surface observée sur les grains de CSF peut également participer à la baisse de consistance des mortiers en augmentant les frictions entre les grains. Ces différents points peuvent expliquer la diminution de consistance.

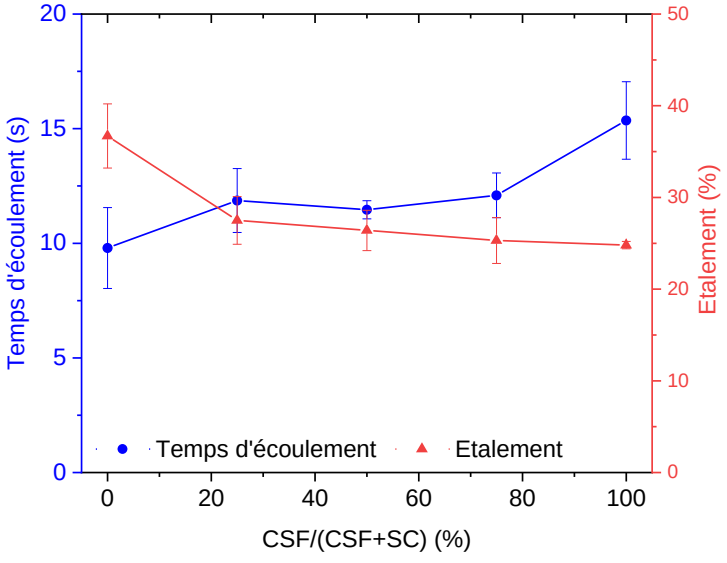

FIGURE 5. Propriétés d'ouvrabilités des mortiers

C. Suivi de l'hydratation

La modification des propriétés des CSF et notamment l'augmentation de l'absorption d'eau des CSF peuvent influencer l'hydratation de la matrice cimentaire. Les quantités de chaleur dégagées durant les 48 premières heures d'hydratation ont été déterminées à l'aide d'un calorimètre isotherme (NF EN 196-11). L'évolution de la quantité de chaleur dégagée des mortiers est présentée dans la Figure 6. Après 48 h, on observe une augmentation maximale de 53 J/g pour l'incorporation de 75% de CSF par rapport à la référence. Les taux de chaleur dégagée les plus importants sont obtenus pour les mélanges avec 50 et 75 % de CSF. Au-delà de 75 % de substitution, la quantité de chaleur diminue sensiblement, mais reste toujours supérieure au mortier de référence. Les résultats montrent que les CSF sont légèrement réactives à court terme. La couche de surface des CSF formée à la suite de la combustion est composée d'oxydes alcalins qui sont potentiellement responsables de ces effets (Anicic et al., 2018).

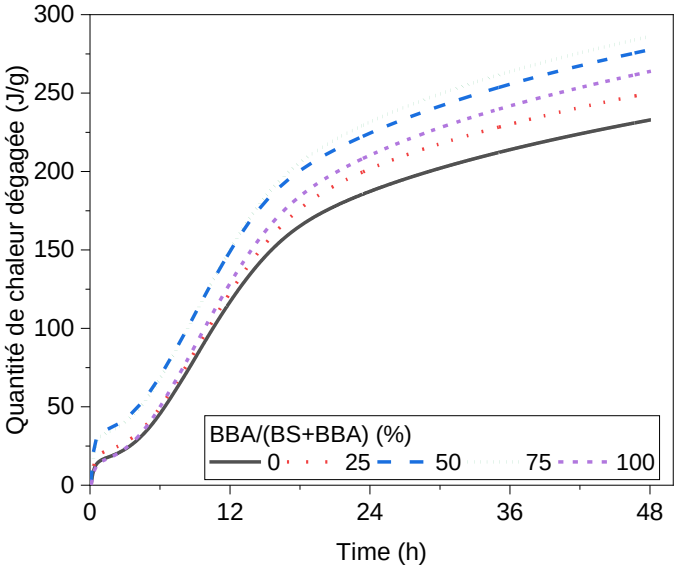

FIGURE 6. Évolution de la quantité de chaleur dégagée durant 48h

D. Résistances mécaniques

La baisse de consistance à l'état frais observée dans la partie précédente peut potentiellement engendrer des baisses de résistances mécaniques. C'est pourquoi il est nécessaire de déterminer les résistances mécaniques des formulations de mortier proposées. Les résistances à la compression ont été déterminées selon la norme NF EN 196-1 aux termes de 7, 28, 90 et 180 jours sur des demi-éprouvettes (4x4x8 cm). Les résultats sont présentés dans la Figure 7. Les résistances à la compression augmentent linéairement avec le taux de CSF incorporé dans les mortiers pour les différentes échéances (Figure 8). L'augmentation des résistances mécaniques peut être corrélée avec l'augmentation de la compacité granulaire (Figure 8). On note cependant qu'après 90 jours, les formulations à 0 et 25 % de substitution possèdent un taux d'augmentation de résistances plus faible que les autres formulations. Il est possible que pour des taux de substitution supérieurs à 50 %, les CSF soient faiblement réactives avec la matrice cimentaire ce qui est en adéquation avec les observations de

quantité de chaleur dégagée (Figure 6.). En effet, la couche de surface et la présence de calcite peuvent réagir localement et à long terme de la même manière qu'un filler calcaire (Wang et al., 2018).

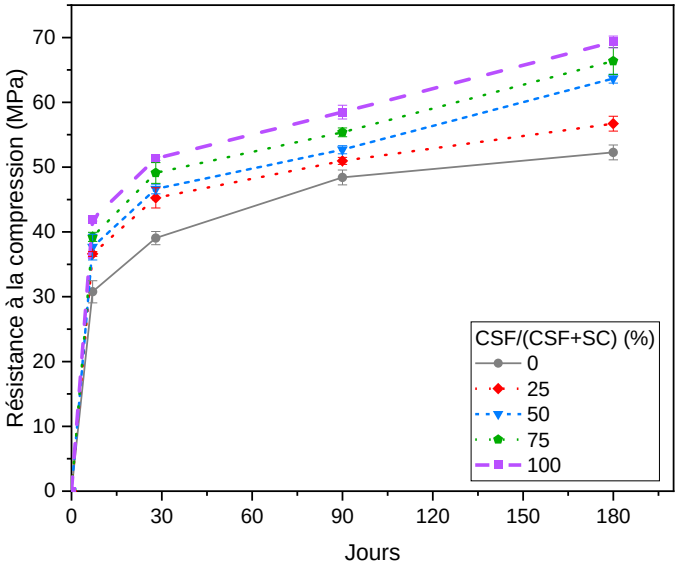

FIGURE 7. Résistances mécaniques

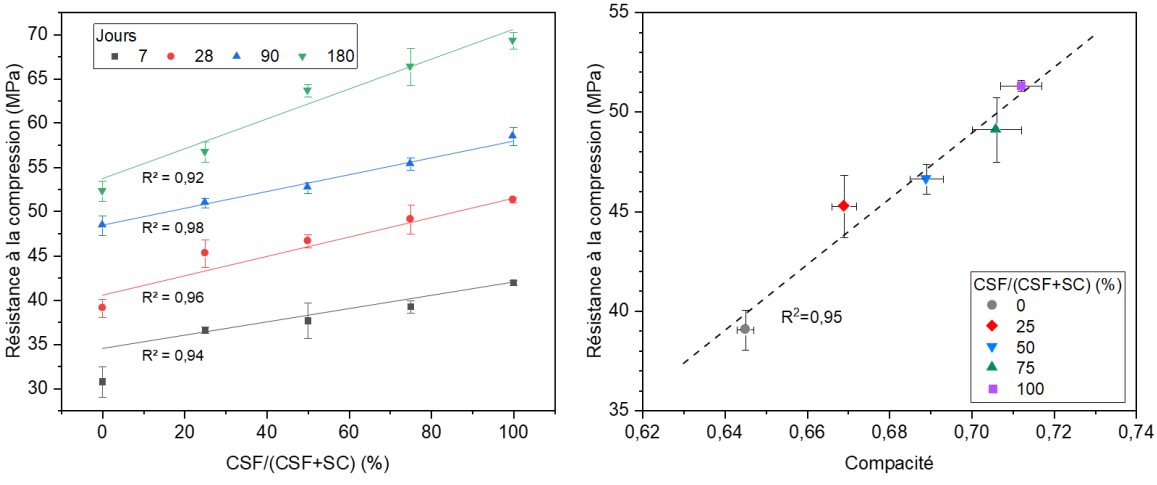

FIGURE 8. Corrélation du taux de CSF et des résistances mécaniques à différents temps de cure (Gauche) Corrélation entre la compacité et la résistance à la compression à 28 jours (Droite)

E. Résistances aux agents extérieurs

Les porosités sont des indicateurs de durabilité des matériaux cimentaires, car elles conditionnent la pénétration des agents extérieurs dans ces matériaux (Arliguie and Hornain, 2007). Dans ce but, deux essais ont été réalisés après 28 jours de cure : l'essai de porosité accessible à l'eau (NF P18-459) et l'essai de capillarité (NF EN 1015-18). Les résultats des essais de porosité et de capillarité sont présentés dans la table 4. Une diminution de la porosité accessible à l'eau est observée lors de l'incorporation de CSF, probablement liée à l'augmentation de la compacité granulaire. Les coefficients d'absorption capillaire à 90 min

ont une tendance similaire à court terme. Cependant, après 48 h d'essais, les coefficients d'absorption capillaire évoluent différemment selon le taux de substitution. En effet, plus le taux d'incorporation de CSF est important, plus le coefficient C_w (48h) est élevé. Ces observations diffèrent de celle de la porosité accessible à l'eau. Une hypothèse est que la présence de PAF va influencer de manière plus importante le réseau poreux et sa cinétique d'absorption à long terme. Ces indicateurs de durabilité montrent une diminution des porosités accessibles lors de l'incorporation de CSF avec cependant une augmentation de la cinétique de pénétration dans le matériau.

TABLE 4. Propriétés liées aux porosités

CSF/(CSF+SC)	%vol	0	50	100
Porosités accessibles à l'eau	%	16,47 ± 0,49	15,74 ± 0,45	15,38 ± 0,24
C_w (90 min)	$kg \cdot m^{-2} \cdot min^{-0,5}$	0,188 ± 0,079	0,192 ± 0,038	0,192 ± 0,043
C_w (48 h)		0,754 ± 0,281	0,832 ± 0,194	0,927 ± 0,186

CONCLUSION

La combustion du sable de chaudière avec la biomasse modifie ses propriétés physico-chimiques pour se transformer en CSF. La composition chimique, minéralogique et la granulométrie sont dépendantes du matériau initial. Cependant, l'aspect de surface plus rugueux, la masse volumique et l'absorption d'eau sont modifiés et s'éloignent des propriétés du matériau de départ. L'influence de la combustion sur les CSF et leurs incorporations dans des formulations montrent une diminution de la consistance à l'état frais croissante avec le taux de substitution. L'absorption d'eau significative et l'augmentation de la compacité des CSF en comparaison du sable de chaudière peuvent être responsables de ces effets. Néanmoins, l'incorporation de CSF augmente la quantité de chaleur dégagée et améliore les résistances à la compression. Les indicateurs de durabilité montrent également des effets bénéfiques liés à l'incorporation de CSF.

Des analyses de la composition chimique de la couche de surface, à l'aide d'une sonde EDS sont prévues afin de la caractériser. À l'échelle de la formulation de mortier, l'étude de l'hydratation à moyen et long terme devrait permettre de confirmer les hypothèses formulées précédemment.

REMERCIEMENT

Les auteurs souhaitent remercier l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) pour le support financier du projet BIOGRAFIC et les partenaires du projet pour leur soutien, à savoir : l'université de Mons, Dalkia et Biallais Industries. Ainsi que l'IJL (UMR 7198) et l'UCCS (UMR 8181) pour le support expérimental.

REFERENCES

Anicic, B., Lin, W., Dam-Johansen, K., Wu, H., 2018. Agglomeration mechanism in biomass fluidized bed combustion – Reaction between potassium carbonate and silica sand. Fuel Processing Technology 173, 182–190. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.10.005

Arliguie, G., Hornain, H., 2007. Grandubé : Grandeurs associées à la durabilité des bétons, ENPC. ed.

Carević, I., Serdar, M., Štirmer, N., Ukrainczyk, N., 2019. Preliminary screening of wood biomass ashes for partial resources replacements in cementitious materials. Journal of Cleaner Production 229, 1045–1064. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.321

Ministère de la transition écologique, 2021. Chiffres clés des énergies renouvelables - Édition 2021.

Rosales, Cabrera, M., Beltrán, M.G., López, M., Agrela, F., 2017. Effects of treatments on biomass bottom ash applied to the manufacture of cement mortars. Journal of Cleaner Production 154, 424–435. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.024

Syndicat des énergies renouvelables, 2021. Question réponse - Bois Energie [WWW Document]. URL https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/publications/

Tarelho, L.A.C., Teixeira, E.R., Silva, D.F.R., Modolo, R.C.E., Labrincha, J.A., Rocha, F., 2015. Characteristics of distinct ash flows in a biomass thermal power plant with bubbling fluidised bed combustor. Energy 90, 387–402. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.036

Teixeira, E.R., Camões, A., Branco, F.G., 2019. Valorisation of wood fly ash on concrete. Resources, Conservation and Recycling 145, 292–310. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.028

Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G., 2010. An overview of the chemical composition of biomass. Fuel 89, 913–933. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022

Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., Jia, H., Ou, Z., 2018. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. Construction and Building Materials 181, 659–672. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.075