

1 Effet de la combustion sur les cendres sous- 2 foyer de biomasse – Valorisation en tant que 3 sable dans un mortier

4 **Florian Schlupp, Jonathan Page, Chafika Djelal, Laurent Libessart**

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

ABSTRACT

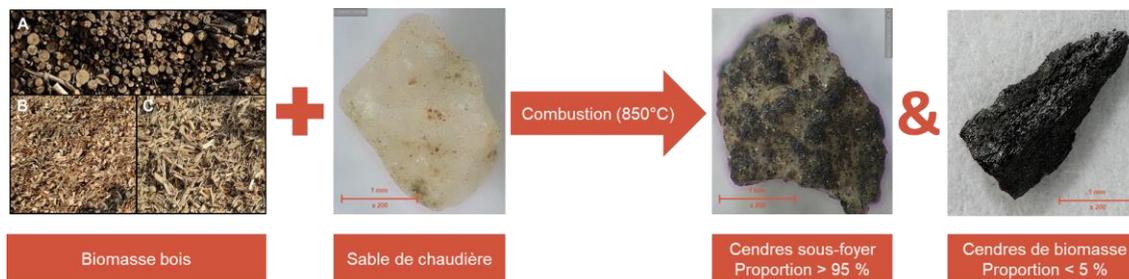
En France, la filière bois énergie génère annuellement des centaines de milliers de tonnes de cendres de biomasse. Du fait de leurs caractéristiques, les cendres sous-foyer (CSF) de biomasse pourraient être potentiellement valorisables dans les matériaux de construction. Cela permettrait d'avoir un nouveau débouché à ces déchets industriels, tout en diminuant la consommation de granulats naturels non renouvelables qui se raréfient. Ces travaux de recherche étudient 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

7 I. INTRODUCTION

8 La consommation d'énergie primaire en France représente plus de 2650 TWh en 2020, dont 13
9 % sont constituées par les énergies renouvelables. L'utilisation des énergies renouvelables
10 dans le secteur de l'énergie est en constante augmentation, notamment avec les engagements
11 politiques de développement durable en Europe et en France. Parmi les différentes filières
12 d'énergie renouvelable, la filière bois-énergie représente plus du tiers de la production
13 primaire d'énergie (Ministère de la transition écologique, 2021). La production d'énergie à
14 partir de biomasse bois conduit également à la production de déchets, en France à plus de
15 200 000 tonnes de cendres de biomasse en 2017 (Syndicat des énergies renouvelables, 2021).
16 Cela représente une quantité non négligeable de cendres à valoriser ou à stocker dans des centres
17 d'enfouissement par les exploitants. La technologie à lit fluidisé employée par la centrale de cette
18 étude utilise dans son processus de combustion un mélange de sable et de biomasse (Figure 1).

19 Cette particularité fait que les cendres sous-foyer (CSF) sont constituées du sable utilisé dans la
 20 chaudière (>95 %) et de cendres issues de la combustion de la biomasse (<5 %). Cela rend les CSF
 21 intéressantes pour une valorisation en tant que sable dans des mortiers. Il est cependant
 22 nécessaire d'étudier au préalable les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des
 23 CSF, ainsi que leurs interactions avec la matrice cimentaire avant de pouvoir les valoriser dans le
 24 secteur de la construction. Ces analyses vont permettre de définir la part valorisable de cendres de
 25 biomasse dans des matériaux cimentaires. Ces travaux font partie du projet ADEME BIOGRAFIC
 26 (Valorisation des cendres de BIOMasse en tant que GRANulats et Filler dans des blocs de
 27 Construction).



28
29

FIGURE 1. Évolution et composition élémentaire des CSF

30 II. INFLUENCE DE LA COMBUSTION SUR LES PROPRIETES DES CSF

31 A. Centrale biomasse

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

39 B. Composition chimique et minéralogique

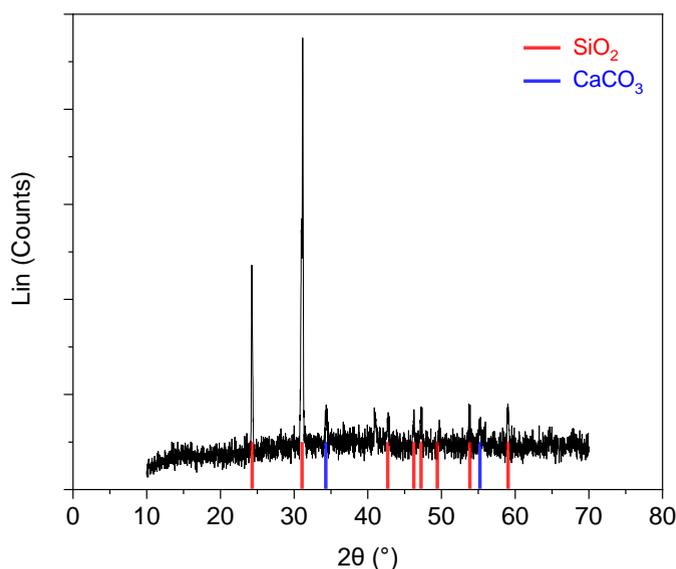
40 La combustion de la biomasse avec le sable de chaudière peut modifier et influencer la
 41 composition chimique et minéralogique des CSF. L'analyse de la composition chimique est
 42 réalisée par fluorescence X (XRF) et est présentée dans le tableau 1. Par ailleurs, elle est nécessaire
 43 pour connaître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

45

TABLEAU 1. Composition chimique des CSF

Oxydes (%)	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	PAF
	87,99	3,36	2,42	0,21	2,10	1,07	0,46	1,84

46 Les CSF se composent majoritairement de silice (SiO_2) à 87,99 % et de chaux (CaO) à 3,36 %. La
47 littérature montre que les cendres de biomasse bois sont constituées en moyenne de CaO puis de
48 SiO_2 et de K_2O avec cependant des variations importantes selon les gisements (Vassilev et al., 2010;
49 Carević et al., 2019). Les oxydes de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3)
50 représentent plus de 90 % de la composition chimique. Ils sont généralement utilisés pour décrire
51 le caractère pouzzolanique d'un matériau par la norme NF EN 450-1. L'analyse minéralogique
52 (DRX) permettra de confirmer ces informations. Les pertes au feu (PAF) peuvent jouer un rôle
53 néfaste dans la production de matériau cimentaire. En effet, ce sont généralement des particules
54 poreuses, friable et de forme allongée qui sont souvent responsables de pertes d'ouvrabilité et de
55 résistances mécaniques des composites cimentaires (Rosales et al., 2017; Teixeira et al., 2019). Dans
56 notre cas, le faible taux de PAF peut être lié à l'efficacité de la technologie de combustion (Tarelho
57 et al., 2015), ce qui diminue les risques de pertes d'ouvrabilité liés à leur présence dans les CSF.
58 L'analyse minéralogique a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre à rayons X (DRX), le
59 diffractogramme des CSF est présenté dans la Figure 2.



60

61

FIGURE 2. Diffractogramme des CSF

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

67 C. Modification de la surface des grains

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

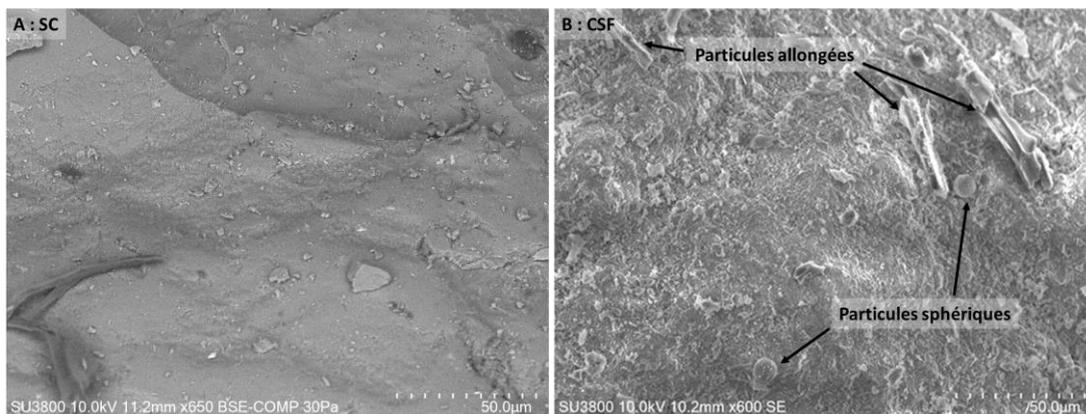


FIGURE 3. Observations MEB de la surface d'un grain avant (A) et après combustion (B)

74

75

76 L'aspect de la surface d'un grain de SC (avant combustion) montre que la surface semble lisse, peu
 77 texturée et possède quelques particules à sa surface (Figure 3, A). La surface du grain de CSF semble
 78 quant à elle plus rugueuse et texturée (Figure 3, B). On constate également que des particules
 79 sphériques ($\pm 9 \mu\text{m}$ de diamètre) et allongées ($\pm 45 \mu\text{m}$ de long) sont visibles à la surface des CSF.
 80 Ces particules proviennent probablement des résidus de cendres de biomasse présentés dans le
 81 matériau, possiblement des cendres volantes. La rugosité de surface plus importante après la
 82 combustion pourrait conduire à une diminution de la consistance en augmentant les frictions entre
 83 les grains lors de la confection de mortier.

84 D. Évolutions des caractéristiques physico-chimiques

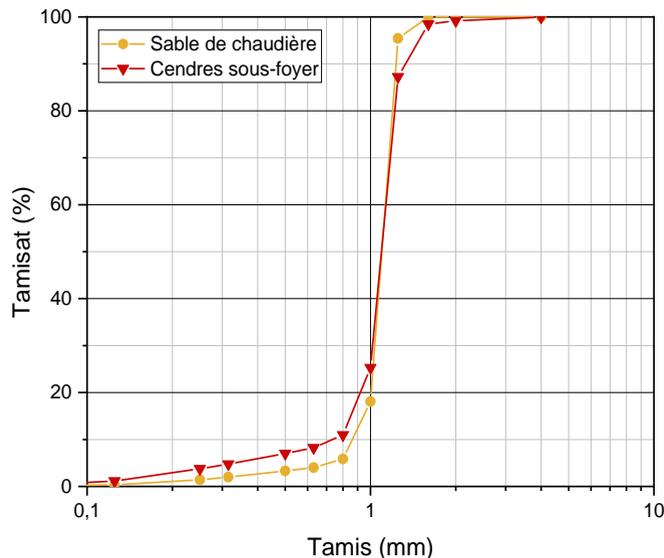
85 La modification de la surface des grains de CSF va avoir un impact sur la masse volumique et le
 86 coefficient d'absorption du matériau. Ces caractéristiques sont également nécessaires pour la
 87 formulation de mortiers/bétons, la masse volumique réelle (ρ_{rd}) et le coefficient d'absorption d'eau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

90

TABLEAU 2. Propriétés physiques des matériaux

	Unité	Sable de chaudière (SC)	Cendres sous-foyer (CSF)
ρ_{rd}	g/cm^3	$2,60 \pm 0,01$	$2,12 \pm 0,09$
WA_{24}	%	$0,82 \pm 0,14$	$7,23 \pm 1,67$

91 À la suite de la combustion, la masse volumique diminue d'environ 18 % et le coefficient
 92 d'absorption d'eau des CSF est quant à lui 9 fois supérieur au SC. Les cendres de biomasse présentes
 93 dans le matériau qui sont plus légères et poreuses peuvent être responsables de ces modifications
 94 (Rosales et al., 2017; Carević et al., 2019). La couche apportée par la combustion va également
 95 participer aux modifications de ces propriétés. La distribution granulométrique a été déterminée par
 96 tamisage mécanique, selon la norme NF EN 933-1. Les courbes granulométriques des CSF et du SC
 97 sont présentées dans la figure 3. Elles ont toutes les deux un fuseau granulaire 0/2 resserré autour de
 98 1 mm. Les deux courbes sont très similaires, hormis pour la coupure 0,125/0,80 mm qui est
 99 légèrement plus importante pour les CSF. Bien que les CSF semblent dépendantes du matériau
 100 initial, elles sont également modifiées par la combustion qui apporte des particules plus fines.



101

102

FIGURE 3. Courbes granulométriques

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

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

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

113 A. Composition des mortiers

114 Les compositions et la mise en œuvre des mortiers sont basées sur la méthodologie proposée
115 par la norme NF EN 196-1 (Tableau 3). Dans le but d'étudier les modifications induites par la
116 combustion, le sable de chaudière (SC) a été utilisé comme sable de référence. En raison de la
117 différence de masse volumique des CSF avec le SC, des substitutions volumiques ont été
118 réalisées. La compacité des mélanges granulaires (SC et CSF) a été mesurée selon la méthode
119 LCPC n°61. Les résultats présentés dans le Tableau 3 montrent une augmentation linéaire de
120 la compacité des mélanges suivant le taux de CSF incorporé. En effet, la différence de
121 granulométrie entre les tamis de 0,125 et 0,80 mm ainsi que des modifications de la
122 morphologie des grains à la suite de la combustion peuvent être responsables de
123 l'augmentation de la compacité. Une compacité importante permettra de minimiser la
124 porosité intergranulaire et ainsi participer à l'amélioration des propriétés des mortiers.

125

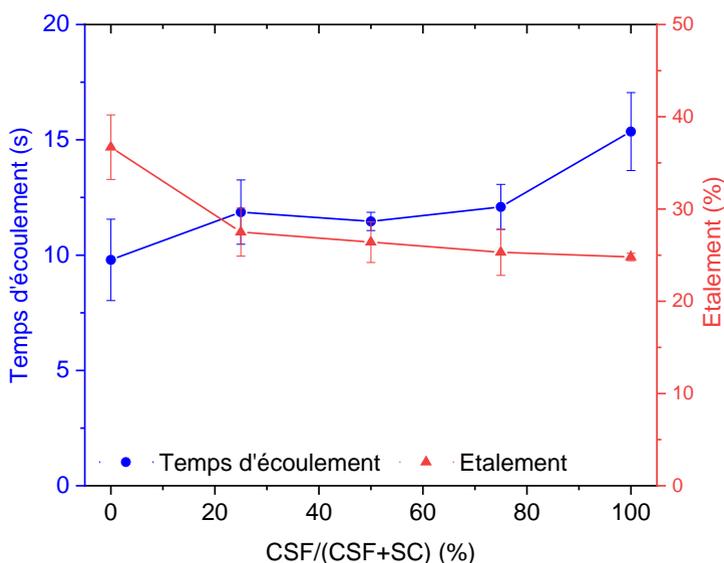
126

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	0,722 ± 0,012

127 *B. Ouvrabilité*

128 L'ouvrabilité des mortiers a été déterminée à l'aide de l'essai d'étalement à la table à
 129 secousses (NF EN 1015-3) et l'essai de temps d'écoulement au maniabilimètre à mortier (NF
 130 P18-452). Les résultats de ces essais sont présentés avec la Figure 4. L'étalement diminue
 131 relativement de 10 à 27 % et le temps d'écoulement augmente de 17 à 57 % avec le taux de
 132 CSF. Les deux méthodes indiquent que la consistance des mortiers diminue avec
 133 l'incorporation de CSF. On observe qu'après 25 % de substitution, les CSF semblent avoir un
 134 effet réduit sur la baisse de consistance. La réduction de l'eau disponible à cause de
 135 l'absorption d'eau élevée des CSF ($7,23 \pm 1,67$ %) ainsi que la réduction des vides
 136 intergranulaires liée à l'augmentation de la compacité réduisent la lubrification des grains. La
 137 rugosité de surface observée sur les grains de CSF peut également participer à la baisse de
 138 consistance des mortiers en augmentant les frictions entre les grains. Ces différents points
 139 peuvent expliquer la diminution de consistance.



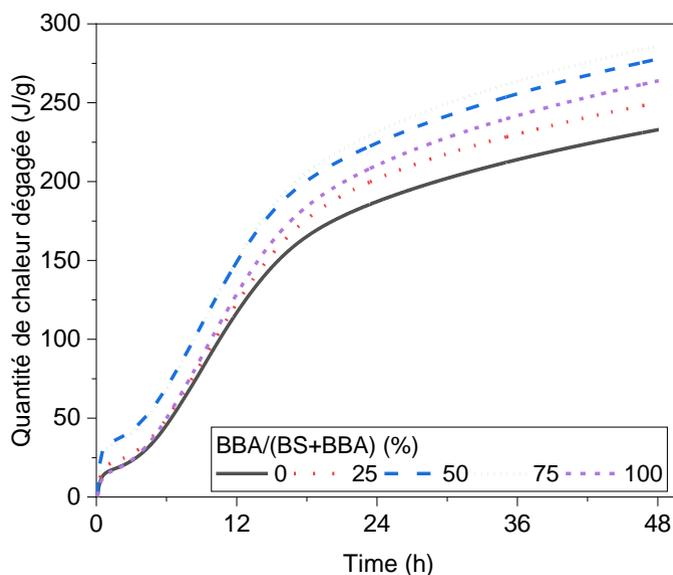
140

141

FIGURE 4. Propriétés d'ouvrabilités des mortiers

142 C. Suivi de l'hydratation

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



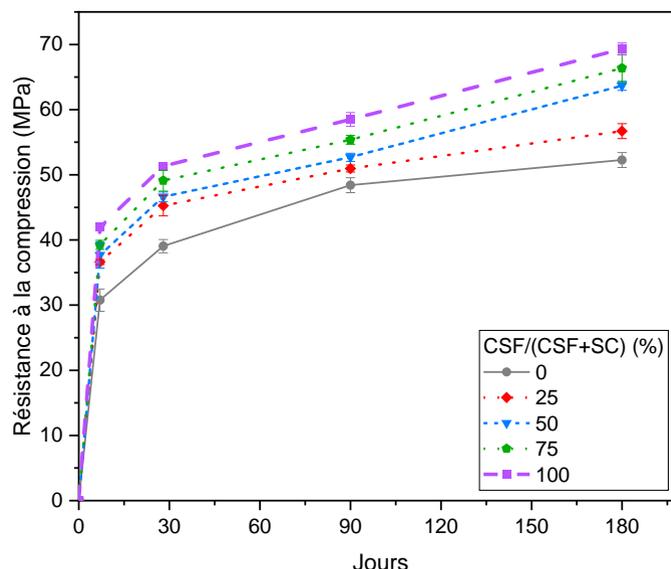
153

154

FIGURE 5. Évolution de la quantité de chaleur dégagée durant 48h

155 D. Résistances mécaniques

156 La baisse de consistance à l'état frais observée dans la partie précédente peut potentiellement
157 engendrer des baisses de résistances mécaniques. C'est pourquoi il est nécessaire de déterminer
158 les résistances mécaniques des formulations de mortier proposées. Les résistances à la
159 compression ont été déterminées selon la norme NF EN 196-1 aux termes de 7, 28, 90 et 180 jours
160 sur des demi-éprouvettes (4x4x8 cm). Les résultats sont présentés dans la Figure 6. Les
161 résistances à la compression augmentent linéairement avec le taux de CSF incorporé dans les
162 mortiers pour les différentes échéances. L'augmentation des résistances mécaniques peut être
163 corrélée avec l'augmentation de la compacité granulaire. On note cependant qu'après 90
164 jours, les formulations à 0 et 25 % de substitution possèdent un taux d'augmentation de
165 résistances plus faible que les autres formulations. Il est possible que pour des taux de
166 substitution supérieurs à 50 %, les CSF soient faiblement réactives avec la matrice cimentaire
167 ce qui est en adéquation avec les observations de quantité de chaleur dégagée (Figure 5.). En
168 effet, la couche de surface et la présence de calcite peuvent réagir localement et à long terme
169 de la même manière qu'un filler calcaire (Wang et al., 2018).



170

171

FIGURE 6. Résistances mécaniques

172 *E. Résistances aux agents extérieurs*

173 Les porosités sont des indicateurs de durabilité des matériaux cimentaires, car elles
 174 conditionnent la pénétration des agents extérieurs dans ces matériaux (Arliguie and Hornain,
 175 2007). Dans ce but, deux essais ont été réalisés après 28 jours de cure : l'essai de porosité
 176 accessible à l'eau (NF P18-459) et l'essai de capillarité (NF EN 1015-18). Les résultats des
 177 essais de porosité et de capillarité sont présentés dans la table 4. Une diminution de la
 178 porosité accessible à l'eau est observée lors de l'incorporation de CSF, probablement liée à
 179 l'augmentation de la compacité granulaire. Les coefficients d'absorption capillaire à 90 min
 180 ont une tendance similaire à court terme. Cependant, après 48 h d'essais, les coefficients
 181 d'absorption capillaire évoluent différemment selon le taux de substitution. En effet, plus le
 182 taux d'incorporation de CSF est important, plus le coefficient C_w (48h) est élevé. Ces
 183 observations diffèrent de celle de la porosité accessible à l'eau. Une hypothèse est que la
 184 présence de PAF va influencer de manière plus importante le réseau poreux et sa cinétique
 185 d'absorption à long terme. Ces indicateurs de durabilité montrent une diminution des
 186 porosités accessibles lors de l'incorporation de CSF avec cependant une augmentation de la
 187 cinétique de pénétration dans le matériau.

188

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·m ⁻² ·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

189

190 CONCLUSION

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

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

204 REMERCIEMENT

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

209 REFERENCES

- 210 Anicic, B., Lin, W., Dam-Johansen, K., Wu, H., 2018. Agglomeration mechanism in biomass fluidized
211 bed combustion – Reaction between potassium carbonate and silica sand. *Fuel Processing Technology*
212 173, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.10.005>
- 213 Arliguie, G., Hornain, H., 2007. *Grandubé : Grandeurs associées à la durabilité des bétons*, ENPC. ed.
- 214 Carević, I., Serdar, M., Štirmer, N., Ukrainczyk, N., 2019. Preliminary screening of wood biomass ashes
215 for partial resources replacements in cementitious materials. *Journal of Cleaner Production* 229, 1045–
216 1064. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.321>
- 217 Ministère de la transition écologique, 2021. *Chiffres clés des énergies renouvelables - Édition 2021*.
- 218 Rosales, Cabrera, M., Beltrán, M.G., López, M., Agrela, F., 2017. Effects of treatments on biomass
219 bottom ash applied to the manufacture of cement mortars. *Journal of Cleaner Production* 154, 424–435.
220 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.024>
- 221 Syndicat des énergies renouvelables, 2021. *Question réponse - Bois Energie [WWW Document]*. URL
222 <https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/publications/>
- 223 Tarelho, L.A.C., Teixeira, E.R., Silva, D.F.R., Modolo, R.C.E., Labrincha, J.A., Rocha, F., 2015.
224 Characteristics of distinct ash flows in a biomass thermal power plant with bubbling fluidised bed
225 combustor. *Energy* 90, 387–402. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.036>

- 226 Teixeira, E.R., Camões, A., Branco, F.G., 2019. Valorisation of wood fly ash on concrete. *Resources,*
227 *Conservation and Recycling* 145, 292–310. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.028>
- 228 Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G., 2010. An overview of the chemical
229 composition of biomass. *Fuel* 89, 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- 230 Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., Jia, H., Ou, Z., 2018. A review on use of limestone powder in
231 cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. *Construction and Building*
232 *Materials* 181, 659–672. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.075>