

# Valorisation de cendres sous foyer de biomasse : une alternative aux granulats naturels dans les bétons

**Schlupp Florian**

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

**RESUME** La filière bois énergie française génère annuellement des centaines de milliers de tonnes de cendres de biomasse. De par de leurs caractéristiques, les cendres sous-foyer (CSF) de biomasse pourraient être potentiellement valorisables en tant que matériau de construction. Ce qui permettra de diminuer la consommation de granulats naturels non renouvelables qui se raréfient et d'avoir un nouveau débouché à ces déchets industriels. La faisabilité d'incorporer des cendres de biomasse en remplacement du sable a été démontrée dans une étude préliminaire sur mortier, avec des taux de substitution volumique de 0 à 100 %. Bien qu'une diminution de la maniabilité ait été observée pour la formulation à 100 % de valorisation, la substitution de sable par des cendres de biomasse a permis d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques. Ces résultats prometteurs ont été transposés de l'échelle du mortier vers la formulation de béton. Il a été démontré que la valorisation de 100 % de cendres de biomasse dans les bétons permet d'obtenir des résistances mécaniques semblables à la référence. Bien qu'une légère augmentation de la porosité accessible à l'eau soit observée, les autres propriétés mécaniques analysées (traction et module élastique) ont également montré des propriétés équivalentes à la référence.

**Mots-clefs** Cendres de biomasse, substitution de sable, valorisation de déchets, propriétés mécaniques

## I. INTRODUCTION

La production annuelle française de cendres de biomasse liée à la production d'énergie et de chaleur, toutes technologies et catégories confondues, est estimée à plus de 200 000 tonnes en 2017 (Syndicat des énergies renouvelables, 2021). Cela représente une quantité importante de matériaux à éliminer (centre d'enfouissement) ou à valoriser (engrais agricole) par les exploitants des centrales biomasses, avec des coûts élevés. Les travaux de recherche sur la valorisation des cendres de biomasse portent principalement sur la substitution de ciment (Rajamma et al., 2009; Beltrán et al., 2016) ou la valorisation en travaux routiers (Cabrera et al., 2014). Peu de travaux portent sur la valorisation granulaire des cendres de biomasse en tant que granulats ou filler dans des bétons et avec généralement des taux de substitution inférieurs à 30 % (Beltrán et al., 2014; Cabrera et al., 2021).

Les cendres sous-foyer (CSF) étudiées dans ces travaux proviennent d'une centrale à lit fluidisé des Hauts-de-France. Cette technologie utilise dans son processus de combustion un mélange de sable et de biomasse bois. Les propriétés physico-chimiques des cendres ne montrent aucune contre-indication quant à l'utilisation de celle-ci dans le secteur de la construction. La proximité

de leurs propriétés avec celles d'un sable ouvre la possibilité d'une valorisation granulaire des cendres de biomasse. Ce qui permettra d'avoir un nouveau débouché à ces déchets industriels, tout en diminuant l'utilisation de granulats naturels non renouvelables qui se raréfient.

Ces travaux examinent l'utilisation de CSF comme substitution granulaire dans des mortiers et bétons et comparent les résultats à une référence formulée avec un sable utilisé dans l'industrie. Le premier objectif est d'évaluer les taux de valorisation de CSF pertinents dans des bétons en réalisant une étude de faisabilité à l'échelle du mortier. Des taux de substitution volumique du sable de 0, 25, 50, 75 et 100 % ont été appliqués dans l'étude. Le second objectif est de déterminer les impacts de l'incorporation de CSF dans des formulations de bétons avec une valorisation de 50, 73 et 100 % de CSF. Des essais à l'état frais (étalement au cône d'Abrams, masse volumique) et à l'état durci (résistances mécaniques, porosité accessible) ont été effectués.

## II. PREPARATION DES MATERIAUX

### A. Les cendres de biomasse

La composition chimique des CSF se compose de silice ( $\text{SiO}_2$ ) qui représente la phase majeure du matériau puis de chaux ( $\text{CaO}$ ) et d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (**Tableau 1**). La structure minéralogique se compose de quartz et de calcite sans phase amorphe (Schlupp et al., 2022). La présence majoritaire de silice est attribuée à la technologie à lit fluidisé utilisée lors du processus de combustion (Carević et al., 2019). La masse volumique des CSF est de  $2,28 \pm 0,12$  g/cm<sup>3</sup> et l'absorption d'eau est de  $2,21 \pm 0,17$  % (NF EN 1097-6). Les CSF possèdent une granulométrie 0/2 resserrée autour d'une dimension de granulat de 1 mm (NF EN 933-1).

**TABLEAU 1.** Composition chimique des CSF

Oxydes	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	LOI
(%)	87,99	3,36	2,42	0,21	2,10	1,07	0,46	0,20	1,84

Des analyses MEB ont révélées que la surface du grain de CSF est plus rugueuse et texturée que le grain de sable avant combustion (**Figure 1**) ce qui pourrait conduire à une augmentation des frictions entre les grains et diminuer la consistance des mélanges.

**FIGURE 1.** Observations MEB de la surface d'un grain avant (A) et après combustion (B)

La détermination de la compacité des mélanges binaire (CSF et sable 0/1) a été réalisée avec la méthode de la table à secousses (LCPC n°61) et avec le logiciel « BétonlabPro 3 » développé par De Larrard et Sedran (De Larrard, 1999; Sedran and De Larrard, 2007). La compacité du mélange du sable 0/1 avec les CSF est présentée avec la **Figure 2**, une corrélation quadratique est observable avec un coefficient de détermination élevé ( $R^2 = 0,98$ ) pour la courbe expérimentale. La compacité maximale est atteinte pour la substitution de 73 à 75% de CSF. Il est mis en évidence que les CSF peuvent être utilisées pour compléter le squelette granulaire d'un sable pour des taux de valorisation de 50 à 75 %.

**FIGURE 2.** Courbes granulométriques des granulats (A) et compacité des mélanges de sable (B)

*B. Elaboration des mélanges*

Le ciment utilisé dans cette étude est un CEM I 42,5 R, sa résistance à la compression sur mortier normalisé est de 59 MPa à 28 jours. Un sable avec une granulométrie 0/1 est utilisé dans l'étude. Sa masse volumique est de 2,63 g/cm<sup>3</sup> et son absorption d'eau est de 1,01 %. Dans le but d'étudier la faisabilité de la substitution du sable par des CSF dans des mortiers, cinq formulations ont été confectionnées avec un rapport E/C constant de 0,5 avec C = 450 g. Les taux de substitution volumique sont de 0, 25, 50, 75 et 100 % (**Tableau 2**). Les mortiers sont fabriqués suivant la norme NF EN 196-1 puis stockés dans une chambre humide (HR 70 % ; 20°C).

**TABLEAU 2.** Composition granulaire des mortiers

CSF/(SB+CSF) (%)	0	25	50	75	100
CSF [g]	0	272	544	816	1088
0/1 Sable [g]	1350	1013	675	338	0
Module de finesse NF EN 12620	1,92	2,35	2,78	3,21	3,64

Le béton de référence a été formulé dans le but d'obtenir une consistance S3 et une classe de résistance C35/45 pour des applications dans des éléments de bâtiments (voile, plancher). Un rapport  $E_{eff}/C$  à 0,56 et une quantité de ciment à 350 kg/m<sup>3</sup> ont été utilisés afin de garantir ces propriétés. Un gravillon 2/6 et un gravier 6/12 sont utilisés dans le mélange granulaire du béton. Ils ont une masse volumique de 2,72 et 2,54 g/cm<sup>3</sup> et une absorption d'eau de respectivement 0,83 et 1,11 %. Deux objectifs de valorisation des CSF dans les bétons sont fixés : une substitution totale

du sable par des CSF soit **100 %** de valorisation en tant que sable et une optimisation de la compacité du mélange sable-CSF soit **73 %** de valorisation en tant que sable. Enfin une valeur médiane de substitution à **50 %** de CSF est également étudiée afin de suivre l'effet de l'incorporation de CSF dans la formulation de béton. Les différentes compositions de béton sont explicitées dans le **Tableau 3**.

**TABLEAU 3.** Composition des bétons

CSF/(SB+CSF) (%)	0	50	73	100
CSF [kg]	0	210	307	420
0/1 Sable [kg]	500	250	135	0
2/6 Gravillon [kg]	465	465	465	465
6/12 Gravier [kg]	870	870	870	870
CEM I 42,5 R [kg]	350	350	350	350
$E_{\text{eff}}$ [kg]	195	195	195	195
$E_{\text{tot}}$ [kg]	213	215	216	217
$E_{\text{eff}}/C$	0,56	0,56	0,56	0,56
G/S	0,90	1,22	1,45	1,87

Le protocole de malaxage utilisé dans l'étude est celui développé par Tam et al. (2005) pour des matériaux recyclés, appelé Two-Stage Mixing Approach (TSMA) et détaillé sur la **Figure 3** (Tam et al., 2005). Les propriétés à l'état frais ont été testées immédiatement après une période de malaxage et les moules ont été remplis en 3 couches et vibrés dans les 10 minutes qui suivent. Après 24h, les éprouvettes ont été démoulées puis stockées dans un bassin d'eau à  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  jusqu'aux essais.

**FIGURE 3.** Protocole de malaxage TSMA

### III. FAISABILITE SUR MORTIER

Une étude préliminaire à l'échelle du mortier a été réalisée afin de vérifier la faisabilité de l'incorporation des CSF dans un matériau cimentaire et d'identifier des taux de valorisation intéressants avant un passage à l'échelle du béton. La consistance des mortiers a été évaluée avec la méthode de l'étalement à la table à secousses (NF EN 1015-3). La **Figure 4** présente les résultats des essais. On constate que l'étalement possède un maximum obtenu pour la substitution de 75 % de CSF. L'absorption d'eau plus importante des CSF ne semble pas diminuer l'étalement des mortiers cendrés. La finesse du sable 0/1 réduit fortement la consistance des mortiers produits, notamment pour la formulation à 0 et 25 % de CSF. Le développement des résistances mécaniques

(NF EN 196-1) suit une évolution similaire à la compacité granulaire des mélanges présentée précédemment (**Figure 2**). En effet, la compacité maximale des mélanges granulaire est obtenue pour 75 % de CSF. L'augmentation de la compacité granulaire va diminuer la porosité intergranulaire et va participer à l'augmentation de la résistance à la compression.

**FIGURE 4. Propriétés des mortiers : étalement (A) et résistances à la compression (B)**

#### IV. PROPRIETES DES BETONS CENDRES

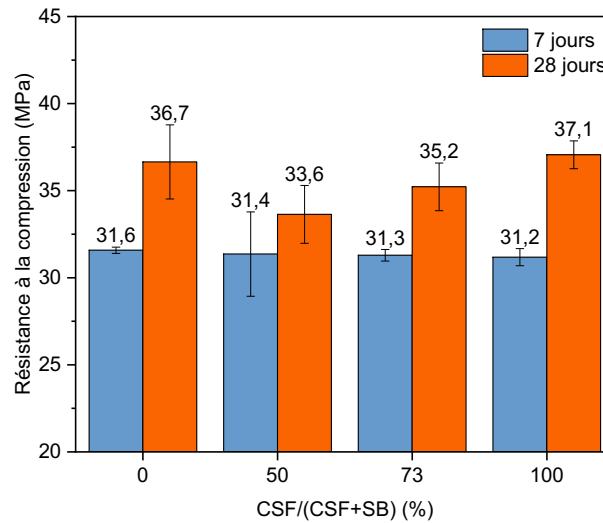
Le **Tableau 4** présente les valeurs d'affaissement à l'état frais des bétons (NF EN 12350-2). Le béton de référence sans CSF a une consistance très plastique avec un affaissement égal à 13 cm (S3). L'incorporation de CSF entraîne une diminution de l'affaissement, notamment pour les bétons substituant 73 et 100 % de CSF qui ont une classe de consistance plastique (S2) avec des affaissements à 9 et 8 cm. La différence de finesse des sables (MF 3,64 pour les CSF et 1,92 pour le 0/1) expose une augmentation de la quantité de grains grossiers avec les CSF ce qui peut entraîner une diminution de la consistance des bétons. De plus, la surface rugueuse des CSF (**Figure 1**) peut également participer à la baisse de consistance en augmentant les frictions entre les grains (Cabrera et al., 2014). Par ailleurs, le volume de sable et de CSF est inférieur dans les formulations de béton par rapport à celles de mortier, les impacts de celui-ci vont donc être dilués avec les autres constituants (graviers, gravillons). Il est également possible que le temps de présaturation initial des bétons ne soit pas suffisant dans le cas des CSF en raison de l'absorption d'eau plus importante de celle-ci.

**TABLEAU 4. Propriétés à l'état frais des bétons**

CSF/(SB+CSF) (%)	0	50	73	100
Affaissement (cm)	13 ± 1	13 ± 1	9 ± 1	8 ± 1
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2328 ± 12	2321 ± 28	2340 ± 18	2331 ± 9

La **Figure 5** présente la résistance en compression (NF EN 12390-3) à 7 et 28 jours des bétons élaborés dans le cadre de l'étude. Les résistances des bétons à 7 jours ne varient pas significativement selon le taux de substitution de CSF. Après 28 jours de cure, les résistances diminuent de 37,1 ± 0,8 à 33,6 ± 1,7 MPa avec une baisse de 9 % pour la formulation avec 50 % de

CSF. Contrairement aux bétons avec 73 et 100 % de CSF, qui présentent une résistance de 35,2 et 37,1 MPa, équivalente à la référence. Comme pour les propriétés à l'état frais, il est possible que le volume de sable et de CSF dans les bétons, différent de celui des mortiers dilue les effets observés.



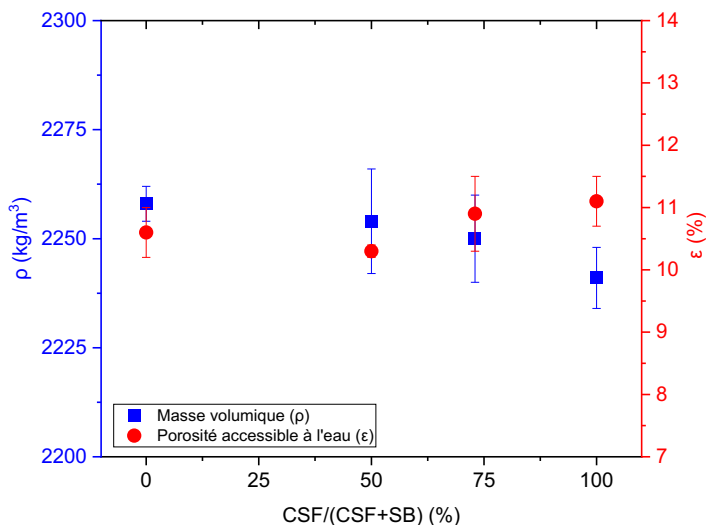
**FIGURE 5.** Résistances à la compression des bétons

Le **Tableau 5** présente les résultats de traction par fendage pour les quatre formulations ainsi que la mesure du module élastique de la référence et du béton avec 100 % de CSF. La résistance à la traction des différentes formulations ne varie pas significativement avec des valeurs comprises entre 3,4 et 3,7 MPa. Les modules élastiques du béton de référence et avec 100 % de CSF montrent également peu de variation avec des valeurs comprises entre 39,1 et 39,3 GPa. La nature minéralogique similaire des matériaux substitués ainsi que la résistance à la compression semblable des formulations peuvent expliquer ces résultats.

**TABLEAU 5.** Autres propriétés mécaniques des bétons

CSF/(SB+CSF) (%)	0	50	73	100
Traction par fendage (MPa) (28 jours)	3,7 ± 0,2	3,4 ± 0,4	3,7 ± 0,4	3,6 ± 0,2
Module élastique (GPa) (28 jours)	39,3 ± 0,5	/	/	39,1 ± 2,6

La **Figure 6** présente les valeurs de masse volumique et de porosité accessible à l'eau (NF P18-459) des formulations de béton. Une diminution de la masse volumique des bétons est observée et peut être liée à la masse volumique des CSF plus faible que celle du sable 0/1. Les formulations incorporant des CSF présentent une légère augmentation de la porosité de 3 à 5 % par rapport à la référence et linéaire avec le taux de substitution. En effet, l'absorption en eau des CSF (>2 %) et l'augmentation du rapport  $E_{tot}/C$  semblent augmenter la porosité des bétons. De plus, la présence de particules imbrulées peut également tendre à une augmentation de la porosité des mélanges contenant des CSF. Des conclusions similaires ont été publiées par d'autres auteurs dans la littérature (Beltrán et al., 2014; Rosales et al., 2016; Agrela et al., 2017; Cabrera et al., 2021).



**FIGURE 6.** Masse volumique et porosité accessible à l'eau des bétons

## V. CONCLUSION

L'objectif de ce travail est de démontrer le potentiel des cendres de biomasse dans des bétons en tant que valorisation granulaire. Les principales conclusions sont les suivantes :

- L'incorporation de CSF provoque une diminution de l'ouvrabilité des bétons formulés. La présence d'éléments plus grossiers ainsi que la rugosité de surface des CSF influencent la modification de l'ouvrabilité.
- Les substitutions intermédiaires à 50 et 73 % de CSF présentent des résistances mécaniques 4 à 8 % plus faibles sans pour autant s'éloigner de manière significative de la classe de résistance du béton de référence.
- La substitution de 100 % du sable par des CSF dans des bétons est prometteuse. Elle permet d'obtenir des propriétés (résistances à la compression, module élastique et porosité) similaires à la référence. Bien que la maniabilité soit réduite par rapport à la référence.

Ainsi, cette étude met en évidence le potentiel d'utilisation d'un déchet de l'industrie de l'énergie (cendres sous-foyer) dans la formulation de béton. La continuité de ces travaux portera sur l'analyse de la durabilité, l'analyse environnementale (ACV) et une évaluation sanitaire (élément trace métallique, composé organique volatil) des bétons produits.

## REFERENCES

- Agrela, Beltran, Cabrera, López, Rosales, Ayuso, 2017. Properties of Recycled Concrete Manufacturing with All-in Recycled Aggregates and Processed Biomass Bottom Ash. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9880-6>
- Beltrán, M.G., Agrela, F., Barbudo, A., Ayuso, J., Ramírez, A., 2014. Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse

- aggregates. *Construction and Building Materials* 72, 231–238.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.019>
- Beltrán, M.G., Barbudo, A., Agrela, F., Jiménez, J.R., de Brito, J., 2016. Mechanical performance of bedding mortars made with olive biomass bottom ash. *Construction and Building Materials* 112, 699–707. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.065>
- Cabrera, M., Galvin, A.P., Agrela, F., Carvajal, M.D., Ayuso, J., 2014. Characterisation and technical feasibility of using biomass bottom ash for civil infrastructures. *Construction and Building Materials* 58, 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.087>
- Cabrera, M., Martínez-Echevarria, M.J., López-Alonso, M., Agrela, F., Rosales, J., 2021. Self-Compacting Recycled Concrete Using Biomass Bottom Ash. *Materials* 14, 6084. <https://doi.org/10.3390/ma14206084>
- 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>
- De Larrard, F., 1999. *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*. CRC Press, London. <https://doi.org/10.1201/9781482272055>
- Rajamma, R., Ball, R.J., Tarelho, L.A.C., Allen, G.C., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M., 2009. Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *Journal of Hazardous Materials* 172, 1049–1060. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.109>
- Rosales, J., Beltrán, M.G., Cabrera, M., Velasco, A., Agrela, F., 2016. Feasible Use of Biomass Bottom Ash as Addition in the Manufacture of Lightweight Recycled Concrete. *Waste Biomass Valor* 7, 953–963. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9522-4>
- Schlupp, F., Page, J., Djelal, C., Libessart, L., 2022. Effet de la combustion sur les cendres sous foyer de biomasse -Valorisation en tant que sable dans un mortier. Presented at the NOMAD 2022 - 4e conférence internationale francophone Nouveaux Matériaux et Durabilité.
- Sedran, T., De Larrard, F., 2007. *Le logiciel BétonlabPro 3*. Presses de l'École nationale des ponts et chaussées.
- Syndicat des énergies renouvelables, 2021. Question réponse - Bois Energie [WWW Document]. URL <https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/publications/>
- Tam, V.W.Y., Gao, X.F., Tam, C.M., 2005. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research* 35, 1195–1203. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.025>