

Valorisation des cendres et du sable recyclé de combustion de biomasse dans la fabrication de blocs de béton – Faisabilité industrielle

Schlupp Florian, Page Jonathan, Djelal Chafika

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

RESUME

L'industrie bois-énergie française produit chaque année des centaines de milliers de tonnes de déchets. Parmi ces déchets, des cendres volantes de biomasse (CVB) et des sables recyclés de la combustion de biomasse (SRCB) sont généralement mis en décharge après les opérations de combustion. Le projet ADEME BIOGRAFIC a démontré que leurs propriétés permettraient d'utiliser ces cendres et sables recyclés en tant que sable dans la construction. La faisabilité et l'optimisation des mélanges granulaires contenant ces déchets en remplacement du sable ont été démontrées dans une étude préliminaire sur mortier, avec des taux de substitution volumique de 0 à 100 %. Des résultats prometteurs ont été observés à l'échelle du mortier puis transposés vers la fabrication industrielle de béton. Il a été démontré que l'incorporation de ces matériaux ne modifie pas les propriétés à l'état frais tout en permettant d'obtenir de meilleures résistances mécaniques. L'augmentation des résistances mécaniques a permis de réduire de la quantité de ciment dans les blocs tout en maintenant la résistance au-dessus des exigences du partenaire industriel.

Mots-clefs ADEME BIOGRAFIC ; Cendres de biomasse ; Sable recyclé ; Béton de bloc ; Process industriel

I. INTRODUCTION

Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet ADEME BIOGRAFIC (Valorisation des cendres de BIOMasse en tant que GRANulats et Filler dans des blocs de Construction). L'objectif principal de ce projet est de trouver une voie de valorisation pour les déchets provenant de centrale biomasse à lit fluidisé. La production nationale de déchets (cendres et sables) liée à l'industrie énergétique biomasse est estimée entre 228 000 à 245 000 tonnes pour la période 2017 – 2019 (ADEME et al., 2019; Syndicat des énergies renouvelables, 2021). Ce volume représente une quantité significative de matière nécessitant une mise décharges ou un recyclage, lorsque cela est techniquement et économiquement possible. Le volume de déchets produit par le centrale biomasse de l'étude représente plus de 2500 tonnes par an. Un mélange de sable et de biomasse est employé dans le processus de combustion à lit fluidisé de la centrale. Cela explique que les cendres récupérées sous le foyer sont principalement composées de sable ayant subi une

combustion. Elles sont ainsi nommée *Sable Recyclé de la Combustion de Biomasse (SRCB)*. Par ailleurs, les cendres volantes de biomasse (CVB), collectées lors du traitement des fumées, sont également récupérées et étudiées dans le cadre du projet. Parallèlement à la production de déchets, le contexte actuel impose aux acteurs de la construction à concevoir des produits répondant aux enjeux environnementaux. Notamment avec la réglementation environnementale (RE2020) qui fixe un indicateur de l'impact carbone des matériaux et des procédés de construction à $640 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$, avec une réduction programmée de 35 % d'ici 2031. Pour répondre à cette demande, la tendance actuelle est de favoriser l'emploi de nouveaux matériaux permettant d'améliorer le bilan environnemental de la construction. Une solution de valorisation pertinente consisterait à les intégrer dans des matériaux de construction. C'est dans ce but que des blocs de construction en béton incorporant des déchets de la combustion de biomasse ont été développés en collaboration l'entreprise Biallais Industries (Hauts-de-France, 62) dans le cadre du projet. Les blocs produits ont une dimension de $500 \times 200 \times 200 \text{ mm}$ et une résistance en compression de 6 MPa à 7 jours (B60) selon la norme NF EN 771-3. La valorisation des SRCB et des CVB a un double objectif, le premier est de les retirer de la catégorie des déchets et le second est d'améliorer le bilan environnemental des matériaux de construction. Des études préliminaires ont été réalisées pour caractériser les SRCB et les CVB et identifier les proportions adéquates de substitution du sable par ces matériaux dans des mortiers (Schlupp, 2024). Cette étude présente la campagne de fabrication industrielle des blocs de béton. Dans un premier temps, la préparation et la confection des blocs sont présentées. L'approvisionnement des SRCB entre 2021 et 2023 est analysé afin de vérifier la régularité de celui-ci. Dans un second temps, la préparation et la confection des blocs sont présentées puis les propriétés physico-mécaniques des blocs sont étudiées.

II. PREPARATION ET CONFECTION DES BLOCS DE BETONS

A. Matériaux

Les cendres volantes de biomasse (CVB) de l'études sont inertes, composées principalement de silice (SiO_2) à 38,03 % et de chaux (CaO) à 24,65 %, avec une granulométrie proche d'un filler. Elles ne présentent ni activité pouzzolanique, ni réactivité hydraulique latente. La surface spécifique des CVB ($514 \text{ m}^2/\text{kg}$) augmente leur demande en eau, provoquant une perte d'ouvrabilité lorsqu'elles sont utilisées en tant que filler dans des pâtes de ciment (Vanhove et al., 2025). Le sable recyclé de la combustion de biomasse (SRCB) est composé principalement de silice (SiO_2) à 87,99 %, son absorption d'eau est de 2,41 % (Tableau 2). Les déchets issus de la combustion de biomasse (SRCB et CVB) sont présentés dans la Figure 1 et leurs compositions chimiques détaillées est données dans le Tableau 1.

TABLEAU 1. Composition chimique des CVB et SRCB

| Oxydes (%) | SiO_2 | CaO | Al_2O_3 | Na_2O | K_2O | Fe_2O_3 | MgO | P_2O_5 | PAF |
|------------|----------------|--------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|--------------|------------------------|-------|
| CVB | 34,88 | 22,82 | 4,45 | 0,79 | 4,92 | 2,82 | 2,73 | 1,73 | 20,77 |
| SRCB | 87,99 | 3,36 | 2,42 | 0,21 | 2,10 | 1,07 | 0,46 | 0,20 | 1,84 |

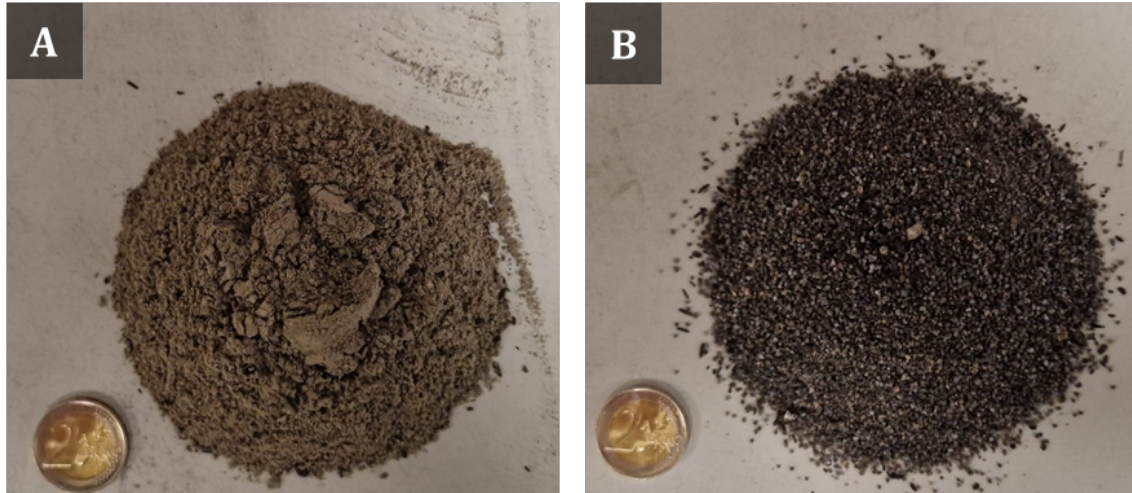


FIGURE 1. Cendres volantes de biomasse (A) ; Sable recycle issue de la combustion de biomasse (B)

Les caractéristiques du sable 0/1, du gravillon 2/4 et du gravier 4/6 utilisés dans ces travaux, sont présentées dans le Tableau 2. La masse volumique réelle et l'absorption d'eau des granulats naturels ont été déterminées conformément à la norme NF EN 1097-6. La compacité granulaire des granulats naturels a été déterminée selon la méthode LCPC n°61. Le ciment est un CEM I 42,5 R fourni par Biallais industries et utilisé pour la fabrication de blocs de béton. Les SRCB et les cendres volantes proviennent de la centrale biomasse Dalkia (Lens, France).

TABLEAU 2. Caractéristiques des granulats de l'étude

| | Masse volumique réelle (g/cm ³) | Absorption d'eau (%) | Compacité granulaire |
|----------------|---|----------------------|----------------------|
| SRCB | 2,28 ± 0,12 | 2,41 ± 0,44 | 0,712 ± 0,005 |
| Sable 0/1 (SB) | 2,63 ± 0,03 | 1,01 ± 0,05 | 0,658 ± 0,003 |
| Gravillon 2/4 | 2,72 ± 0,02 | 0,83 ± 0,02 | 0,590 ± 0,002 |
| Gravier 4/6 | 2,70 ± 0,03 | 0,80 ± 0,05 | 0,580 ± 0,002 |

B. Elaboration des mélanges

La formulation de référence correspond à la fabrication de blocs de béton creux B60 du partenaire industriel. Les bétons issus de cette formulation sont très fermes en raison du faible volume de pâte (19 %) et un volume granulaire important (81 %). Les compositions des bétons sont présentées dans le Tableau 3 avec des taux de substitution volumique de 0, 50 et 75 % de SRCB. Ces taux de substitution correspondent à la zone de compacité optimale du mélange de sable (Figure 2). Une étude expérimentale sur mortier a confirmé l'existence d'un optimum d'ouvrabilité et de résistances mécaniques entre 50 et 75 % de SRCB. La formulation M55 est une substitution de 55 % du sable par un mélange contenant 85 % de SRCB et 15 % de CVB. Elle provient d'une étude préliminaire sur mortier dont l'objectif était d'optimiser la résistance mécanique d'un mélange SRCB/CV.

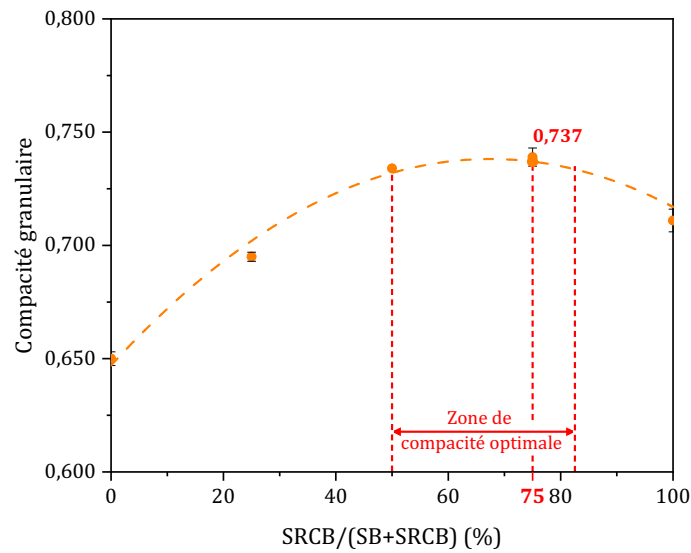


FIGURE 2. Compacité granulaire du mélange de sable

Le processus de production des blocs de béton est totalement automatisé, des trémies à granulats jusqu'à la presse vibrante. Les SRCB ont été introduits manuellement à l'aide d'un big-bag dans la trémie à granulats. Tandis que les autres granulats sont amenés par le pont roulant provenant des silos extérieurs.

TABLEAU 3. Composition des bétons

| Pourcentage de substitution du sable (%) | 0 | 50 | 75 | M55 |
|--|-----|-----|-----|-----|
| CVB (kg) | 0 | 0 | 0 | 31 |
| SRCB (kg) | 0 | 173 | 260 | 177 |
| Sable 0/1 (kg) | 400 | 200 | 100 | 180 |
| Gravillon 2/4 (kg) | 350 | 350 | 350 | 350 |
| Gravillon 4/6 (kg) | 750 | 750 | 750 | 750 |
| CEM I 42,5 R (kg) | 150 | 150 | 150 | 150 |
| Teneur finale en eau (%) | 5 | | | |

La procédure de malaxage se déroule en deux parties est détaillée dans la Figure 3. Dans un premier temps, une homogénéisation à sec des granulats et du ciment est effectuée avec deux courtes périodes de malaxage de 5 et 10 sec (Figure 4). Un échantillon du mélange est prélevé dans le malaxeur et une mesure de la teneur en eau est effectuée. Une fois la teneur en eau initiale du mélange connue, un complément d'eau est ajouté avec une pompe automatique pour obtenir la teneur en eau du cahier des charges. Une seconde phase de malaxage de 30 sec est ensuite réalisée pour homogénéiser le mélange avant la mise en forme des blocs. La durée totale des opérations de malaxage est généralement d'une douzaine de minute.

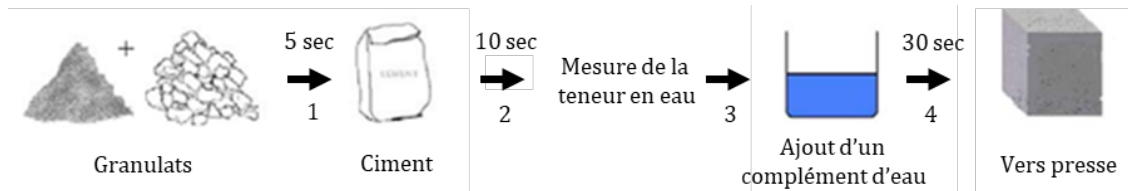


FIGURE 3. Procédure de malaxage

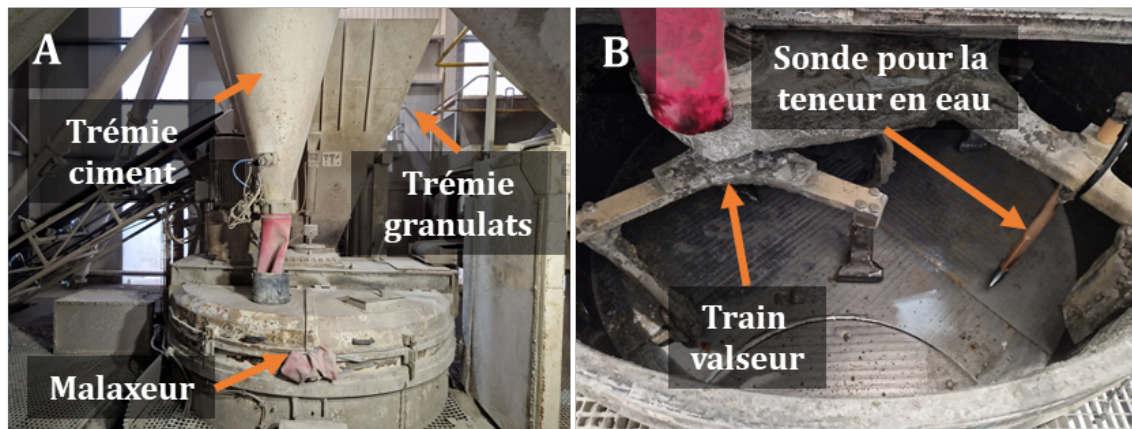


FIGURE 4. Malaxeur à béton et ses trémies (A) ; Cuve du malaxeur et équipements (B)

Une trémie à la sortie du malaxeur permet d'acheminer le béton jusqu'à la presse pour la mise en forme des blocs par vibro compactage (Figure 5). Les réglages de la presse sont identiques pour la fabrication de l'ensemble des gâchées. Les blocs sont ensuite placés dans des cellules de durcissement (cure) pour un séchage à température ambiante sans gestion de la température et de l'humidité.



FIGURE 5. Procédure de malaxage

C. Approvisionnement et caractéristiques des SRCB

Dans le cadre du projet, des prélèvements ont été réalisés afin de suivre les caractéristiques des SRCB et ainsi garantir la régularité de l'approvisionnement pour l'étude. Dans un premier temps, les analyses physico-chimiques (composition chimique, masse volumique, absorption d'eau et granulométrie) ont été réalisées sur les SRCB au laboratoire (prélevés à la centrale en mars 2021). Puis, elles ont été comparées à celles des SRCB de l'étude à l'entreprise Biallais Industries (prélevés à la centrale en mars 2023). Le Tableau 4 présente la comparaison des caractéristiques des SRCB de l'étude au laboratoire et de l'étude à l'entreprise. On observe de faibles variations entre les 2 lots, les caractéristiques observées se situent majoritairement à l'intérieur ou à proximité de l'intervalle défini par l'écart-type. Les caractéristiques des SRCB provenant de l'étude du laboratoire sont proches de celle de l'étude à l'entreprise SRCB, elles peuvent donc être utilisées pour la confection de blocs.

TABLEAU 4. Comparaison des caractéristiques des SRCB

| Prélèvement | Laboratoire | Entreprise |
|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Oxyde majoritaire | SiO ₂ (87,99 %) | SiO ₂ (87,27 %) |
| Perte au feu par calcination (%) | 2,02 ± 0,27 | 1,42 ± 0,13 |
| Masse volumique (g/cm ³) | 2,28 ± 0,12 | 2,44 ± 0,02 |
| Absorption d'eau (%) | 2,41 ± 0,44 | 2,42 ± 0,05 |
| Module de finesse (%) | 3,42 | 3,48 |
| D ₅₀ (mm) | 1,09 | 1,04 |

D. Masse des blocs en sortie de presse

La masse des blocs est généralement utilisée comme un indicateur de performance dans la fabrication industrielle de blocs. Un bloc de béton doit peser environ 18 kg pour répondre aux exigences de fabrication. De plus, les blocs doivent respecter une hauteur en sortie de presse de 190 [-5 ; +3] mm (NF EN 771-3) pour répondre aux exigences de commercialisation.

Les masses des blocs à l'état frais sont comprises entre 17,91 et 18,44 kg et sont récapitulées dans le Tableau 5. L'ensemble des blocs produits avec des SRCB respectent la masse minimale sans montrer de variation particulière entre les formulations. A la sortie de la presse, les dimensions de fabrication des blocs sont mesurées. L'ensemble des formulations de béton respectent les tolérances dimensionnelles de la norme NF EN 771-3. La masse volumique des SRCB inférieure à celle du sable 0/1 pourrait diminuer les masses des blocs en raison du remplacement du sable 0/1 par des SRCB. Ce phénomène est couramment observé lors de l'incorporation de granulats recyclés dans les mélanges (Naik et al., 2003; Zhao et al., 2020). Cependant, il a été observé qu'à l'état frais, les masses des blocs sont similaires. L'augmentation de la compacité des mélanges contenant respectivement 50 % et 75 % de SRCB pourrait potentiellement compenser cette diminution.

TABLEAU 5. Masse des blocs

| Numéro de gâchée | Formulation | Masse des blocs (kg) |
|------------------|------------------|----------------------|
| 1 | 0 % (référence) | 18,44 ± 0,16 |
| 2 | 0 % (référence) | 18,35 ± 0,12 |
| 3 | 55% SRCB | 18,39 ± 0,08 |
| 4 | 55% SRCB | 18,32 ± 0,13 |
| 5 | 75 % SRCB | 18,10 ± 0,07 |
| 6 | 75 % SRCB | 18,36 ± 0,18 |
| 7 | M55 (SRCB + CVB) | 18,22 ± 0,12 |
| 8 | M55 (SRCB + CVB) | 17,91 ± 0,16 |

III. PROPRIETES A L'ETAT DURCI DES BLOCS

Les blocs de béton produits par le partenaire industriel doivent avoir une résistance caractéristique à la compression supérieure à 6 MPa à 7 jours pour leur commercialisation. L'incorporation de SRCB peut modifier les propriétés des bétons, ainsi il est nécessaire de s'assurer que ces propriétés correspondent bien au béton de l'entreprise.

A. Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression ont été réalisés sur les blocs de béton après un surfacage au soufre. Ils sont réalisés avec une presse à blocs hydraulique « FORM+TEST » d'une capacité de 2000 kN, conformément à la norme NF EN 772-1. La vitesse de chargement est constante, de 0,05 MPa/s. La surface prise en compte lors du calcul de la résistance à la compression est la surface dite « brute » comme exigée par la norme NF EN 772-1. Elle correspond à la surface totale du bloc en ignorant les parties creuses et la forme du contour. La résistance caractéristique des blocs de béton est définie comme la résistance, exprimée pour le fractile à 5 % selon la norme NF EN 771-3. La résistance caractéristique à la compression pour la catégorie des blocs de l'étude doit donc correspondre à la classe B60 (6 MPa à 7 jours).

La Figure 6 présente les résistances moyennes et caractéristiques à la compression à 7 jours des blocs. Les valeurs de résistance caractéristiques sont comprises entre 7,4 et 10,0 MPa. La résistance la plus élevée est atteinte pour la formulation incorporant 50 % de SRCB avec 10,0 MPa et représente une augmentation de 32 % par rapport au béton de référence. L'incorporation de 75 % de SRCB conduit à une résistance similaire à la référence. L'ensemble des formulations atteint le minimum de résistance de 6 MPa à 7 jours (B60). L'évolution des résistances à la compression en fonction du taux de SRCB incorporé dans les mélanges est cohérente avec la compacité granulaire. En effet, lors de l'étude de la compacité du mélange SRCB - sable 0/1, un plateau semble être atteint entre 50 et 75 % de SRCB pour la compacité expérimentale. De plus, les résistances mécaniques des mortiers étaient similaires pour ces taux de substitution.

La formulation M55 avec des cendres volantes a une résistance proche de la référence, donc satisfait les exigences industrielles. Cependant, elle reste moins performante que celles avec uniquement des SRCB. Le caractère inerte ainsi que la demande en eau liée à la finesse des particules des CVB pourrait expliquer les résultats obtenus pour cette formulation. La présence de perte au feu (PAF) en quantité importante dans les CVB ($\approx 20\%$) pourrait également perturber l'hydratation des bétons et influencer leur résistance mécanique. L'utilisation de CVB semble atténuer les effets bénéfiques que les SRCB ont sur les propriétés des bétons.

La corrélation entre la masse des blocs et la résistance mécanique à 7 jours est présentée dans la Figure 7. Des relations linéaires fortes sont observées entre la masse des blocs et les résistances mécaniques à 7 jours. Les blocs incorporant des SRCB présentent de meilleure performance, car pour une masse volumique identique, la résistance à la compression est supérieure à celles des blocs témoins. L'augmentation de la compacité des mélanges de sables ainsi que l'amélioration des réactions d'hydratations en présence de SRBC pourrait permettre d'expliquer l'augmentation des résistances (Schlupp et al., 2023).

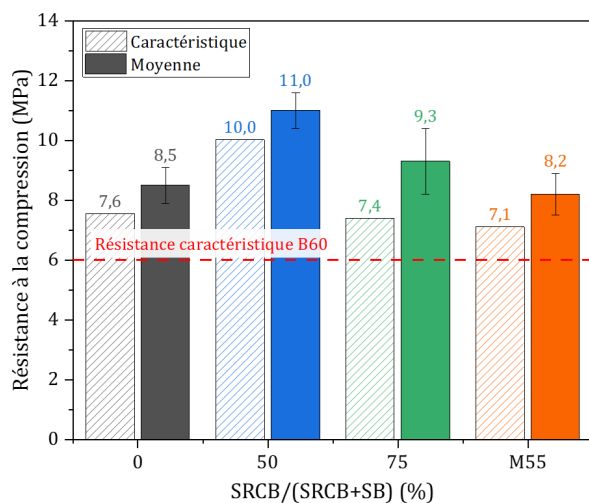


FIGURE 6. Résistances moyennes et caractéristiques à la compression à 7 jours

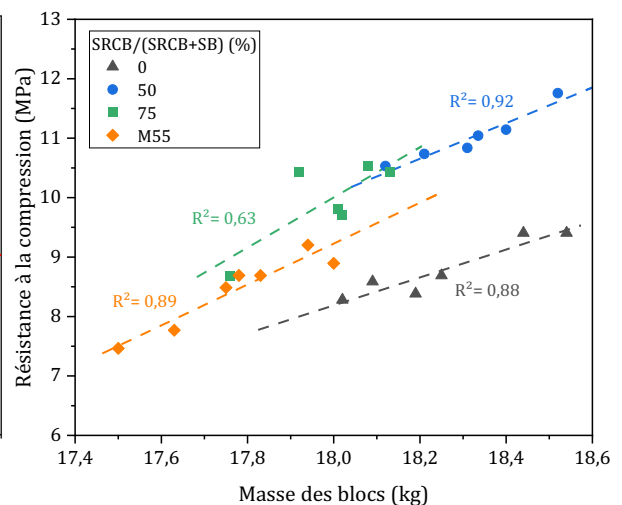


FIGURE 7. Résistance à la compression à 7 jours en fonction de la masse des blocs

B. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est réalisée sur les blocs après 7 jours de cure. Elle est réalisée à partir des dimensions et de la masse sèche du bloc. La quantification du volume apparent du bloc reste difficile en raison des formes géométriques complexes et variables de la partie creuse des blocs. C'est pourquoi une méthode simple de détermination du volume apparent du bloc est proposée (Figure 8). La masse du bloc après séchage est mesurée puis la partie creuse du bloc est remplie avec un sable dont la masse volumique apparente est déterminée en amont. La masse du sable introduit dans la partie creuse avec celle du bloc est ensuite mesurée. Cela permet de déterminer le volume de la partie creuse comme étant le volume de sable contenu dans celle-ci.

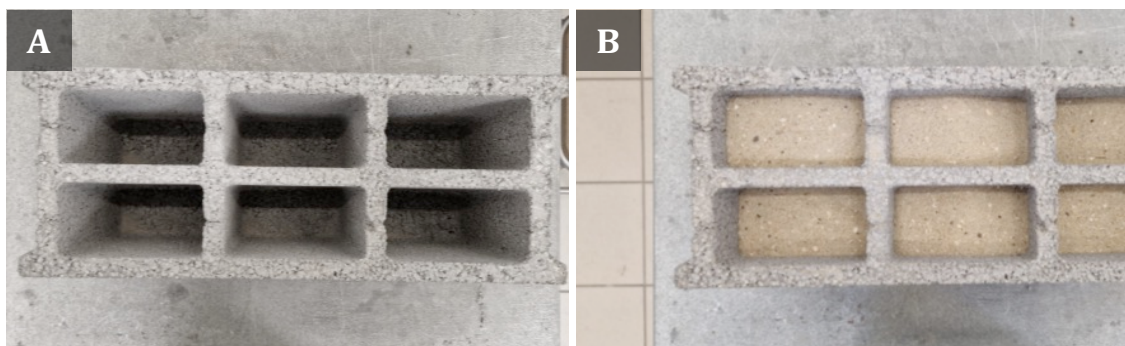


FIGURE 8. Bloc après séchage (A) et remplissage des creux avec du sable (B)

Les masses volumiques apparentes des blocs sont comprises entre 1960 et 2077 kg/m³. La formulation incorporant 50 % de SRCB permet d'obtenir la masse volumique la plus élevée tandis que celle incorporant 75 % semble équivalente au béton de référence. Les propriétés mécaniques des blocs de béton sont dépendantes de leur masse volumique ainsi que de la compacité du squelette granulaire. La Figure 9 reprend les résultats pour différentes formulations de blocs de béton. Les propriétés mécaniques des blocs de béton sont dépendantes de leur masse volumique ainsi que de la compacité du squelette granulaire (Cuadrado Rica, 2016).

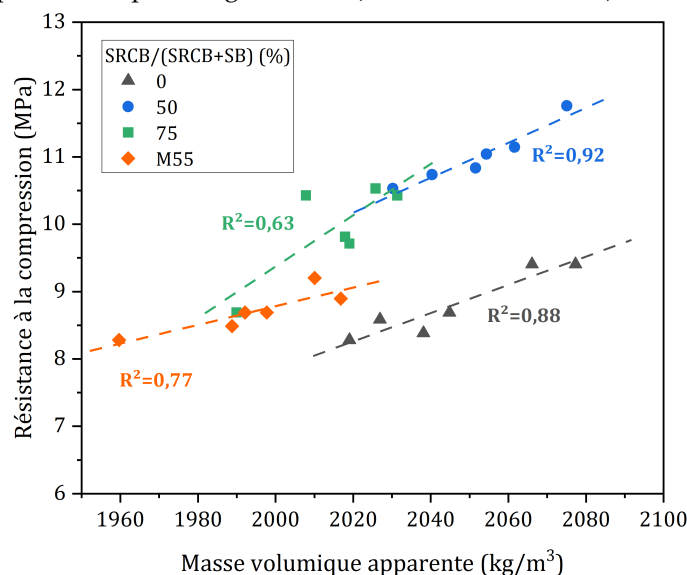


FIGURE 9. Masse volumique apparente en fonction de la résistance à la compression des blocs

C. Réduction de la quantité de liant

La réduction de la quantité de liant dans les mélanges a été étudiée dans ces travaux dans le but de réduire l'impact carbone du matériau produit par l'entreprise. La formulation contenant 50 % de SRCB a été retenue comme référence pour l'élaboration de deux nouvelles formulations, en raison de ses performances mécaniques. Dans cette démarche, la quantité de ciment a été réduite de 10 kg et 20 kg, donnant lieu aux formulations 50-C140 et 50-C130, correspondant respectivement à des quantités en ciment de 140 kg et 130 kg avec un taux de substitution de 50 % de SRCB. Durant la phase de fabrication des blocs, les tolérances dimensionnelles en sortie de presse ont été respectées sans présenter de modification de forme ou de défaut de cohésion. Le

Tableau 6 présente les masses des blocs et les résistances mécaniques moyennes et caractéristiques. La masse des blocs produits avec une réduction de liant sont de $18,45 \pm 0,15$ kg et $18,65 \pm 0,14$ kg pour respectivement les formulations 50-C140 et 50-C130. Il n'y a pas de variation significative par rapport aux formulations contenant 150 kg de ciment. Concernant la résistance à la compression caractéristique, l'ensemble des formulations avec une réduction de liant respectent le critère de 6 MPa à 7 jours. Ces résistances sont respectivement de 10,5 et 10,1 MPa et sont comparables aux formulations de références.

TABLEAU 6. Propriétés des blocs de béton avec une réduction de liant

| SRCB/(SRCB+SB) (%) | 0 | 50 | 50-C140 | 50-C130 |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Masse des blocs (kg) | $18,39 \pm 0,13$ | $18,36 \pm 0,11$ | $18,45 \pm 0,15$ | $18,65 \pm 0,14$ |
| Résistance à la compression moyenne (MPa) | $8,5 \pm 0,6$ | $11,0 \pm 0,6$ | $11,3 \pm 0,5$ | $11,1 \pm 0,6$ |
| Résistance à la compression caractéristique (MPa) | 7,6 | 10,0 | 10,5 | 10,1 |

IV. CONCLUSION

L'objectif de ces travaux est de développer un produit destiné au marché de la construction. Les blocs fabriqués par Biallais industries doivent avoir une résistance caractéristique en compression de 6 MPa à 7 jours (B60) conformément à la norme NF EN 771-3. L'incorporation de SRCB dans des blocs de béton ne provoque pas de défaut de cohésion ou de modification de forme après le démoulage. Les tolérances dimensionnelles (190 [-5 ; +3] mm) ainsi que la masse minimale (2000 kg/m³) au démoulage sont respectées. La substitution de 50 % de SRCB permet une amélioration des résistances mécaniques avec 10,0 MPa et de 7,4 MPa pour 75 % de substitution. La possibilité de réduire la quantité de liant dans les formulations a également été analysé pour la formulation contenant 50 % de SRCB. Il a été démontré qu'il est possible de réduire de 15 % la quantité de ciment sans influencer significativement les propriétés en sortie de presse et les résistances mécaniques. L'incorporation de SRCB dans des blocs de construction est prometteuse puisqu'elle permet de produire des blocs sans défaut apparent et possédant des résistances mécaniques en accord avec les normes en vigueur. Cela confirme le potentiel des SRCB en tant que sable dans l'industrie de construction.

Une perspective d'étude concernant l'approvisionnement de plusieurs centrales à lit fluidisé permettrait de créer une base de données plus importante sur ce type de matériau en France afin de pouvoir faciliter leur valorisation.

REFERENCES

- ADEME, Plumail, D., Bourgeois, S., Guibert, B., Desanglois, V., CEDEN, Biomasse Conseil, FIBOIS, 2019. Campagne d'analyses des cendres de chaufferies biomasse - 2018-2019.
- Cuadrado Rica, H., 2016. Etude du comportement de bétons de coproduits coquillers pour une utilisation en récifs artificiels (These de doctorat). Université de Caen.

- Naik, T.R., Kraus, R.N., Chun, Y., Ramme, B.W., Singh, S.S., 2003. Properties of Field Manufactured Cast-Concrete Products Utilizing Recycled Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering* 15, 400–407. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:4\(400\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:4(400))
- Schlupp, F., 2024. Valorisation des cendres de biomasse: une alternative aux sables naturels dans les bétons.
- Schlupp, F., Page, J., Djelal, C., Libessart, L., 2023. Influence of recycled sand from biomass combustion on the mechanical, hydration and porous properties of mortar mixtures. *Construction and Building Materials* 404, 133193. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133193>
- Syndicat des énergies renouvelables, 2021. Question réponse - Bois Energie [WWW Document]. URL <https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/publications/>
- Vanhove, Y., Dossa, J.G., Page, J., Djelal, C., 2025. Rheological benefits of biomass fly ash as filler replacement in cement-based materials. *Case Studies in Construction Materials* 22. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04133>
- Zhao, Z., Courard, L., Gros Lambert, S., Jehin, T., Léonard, A., Xiao, J., 2020. Use of recycled concrete aggregates from precast block for the production of new building blocks: An industrial scale study. *Resources, Conservation and Recycling* 157, 104786. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104786>