

Influence de la substitution du filler par des cendres volantes de biomasse sur le comportement rhéologique des matériaux cimentaires

Joëlla Grâce Dossa^{1,2}, Yannick Vanhove¹, Jonathan Page¹, Chafika Djelal¹

¹Univ. Artois, IMT Nord Europe, Junia, Univ. Lille, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), F-62400 Béthune, France

²Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie 20, avenue du Grésillé- BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France

RESUME La faible réactivité des cendres volantes de biomasse (CVB) produites massivement par le secteur énergétique, limite leur emploi en tant que substitut au ciment. Il reste crucial de trouver des voies alternatives pour valoriser ces résidus industriels. Cette étude s'est intéressée à leur utilisation comme substitut potentiel du filler calcaire, fréquemment utilisé pour améliorer la stabilité rhéologique des mélanges cimentaires. Le comportement rhéologique a été analysé en remplaçant progressivement le filler calcaire par des CVB dans des pâtes formulées avec un ciment ordinaire CEM I et un ciment au laitier de haut fourneau CEM III. Les essais ont montré que l'incorporation des CVB entraîne une variabilité accrue du comportement d'écoulement en fonction du gradient de cisaillement. Les CVB diminuent l'ouvrabilité des pâtes en augmentant le seuil de cisaillement et la viscosité en raison de leur demande en eau plus importante. De plus, les pâtes de CVB présentent un comportement de plus en plus rhéofluidifiant lorsque le taux de substitution augmente. Ces résultats mettent en évidence les spécificités rhéologiques des mélanges contenant des CVB et ouvrent des perspectives pour leur utilisation en tant que filler. Les CVB pourraient permettre de maintenir les performances mécaniques des matériaux cimentaires et d'assurer une bonne stabilité rhéologique.

Mots-clés : fines de biomasse, ouvrabilité, pâte de ciment, rhéologie, rhéofluidification.

I. INTRODUCTION

Le développement du secteur de la biomasse énergie engendre une hausse notable de la production de cendres de biomasse atteignant 245000 tonnes en France, en 2021 (Zhai et al., 2021). Ces volumes considérables de déchets sont traités à des prix élevés en centres d'enfouissement ou valorisés par épandage (Carević et al., 2019). Dans le cadre d'une démarche visant à réduire l'empreinte carbone des bétons, à valoriser les déchets industriels et à limiter l'exploitation des matières premières traditionnelles, plusieurs études se sont intéressées à une incorporation dans les matériaux cimentaires des cendres volantes de biomasse (CVB). Les travaux de (Cheah and Ramli, 2012; Ganesan et al., 2007) ont mis en évidence une amélioration des résistances pour des substitutions de 0 à 25% de ciment par des cendres de bois à haute teneur en calcium et des cendres de bagasse tandis que ceux de (Awang and Al-Mulali, 2018; Elinwa and and Ejeh, 2004) ont montré une baisse

significative des performances mécaniques lorsque les cendres de biomasse remplacent le ciment, peu importe le taux de substitution. En effet, les interactions entre les CVB et la matrice cimentaires dépendent fortement des caractéristiques physico-chimiques des cendres, influencées par l'origine de la biomasse et les processus industriels régionaux (Berra et al., 2015; Vassilev et al., 2010). Les cendres issues de la bagasse de canne à sucre en Amérique du Sud ou des résidus de palmiers à huile se distinguent par leur forte réactivité et leur activité pouzzolanique comparable aux cendres volantes de charbon, permettant des taux de substitution de ciment de 14 à 40% (Jamil et al., 2013; Moretti et al., 2018). En revanche, les CVB d'origine bois, dominantes en Europe, se révèlent moins efficaces pour substituer le ciment en raison de la présence de silice sous forme cristalline, qui ne participe pas aux réactions d'hydratation (Teixeira et al., 2019). Elles présentent donc des similitudes avec les additions minérales utilisées dans les matériaux cimentaires. Ces additions sous forme de filler ont pour rôle d'agir sur le comportement visqueux du béton et d'assurer une bonne stabilité. L'absence d'activité pouzzolanique des CVB bois en fait une option intéressante pour la substitution d'addition minérales non pouzzolaniques telles que le filler calcaire. Selon des travaux antérieurs, le comportement et l'influence des cendres volantes de biomasse sur les propriétés rhéologiques dépendent de leur composition chimique, de leur finesse, de la morphologie des particules et de leur teneur dans la pâte de ciment (Liu et al., 2023). Certaines études ont montré que la substitution de ciment par des cendres volantes de biomasse augmentent la viscosité et la contrainte de cisaillement des pâtes (Rajamma et al., 2015; Skripkiūnas et al., 2017). Cette propriété est particulièrement intéressante pour les bétons fluides, conçus pour se mettre en place sans vibration. Ces bétons contiennent une grande quantité de fines apportées par les additions afin de garantir leur stabilité pendant le malaxage, le transport et l'application. Très peu d'études se sont concentrées sur la valorisation des cendres de biomasse en tant que filler dans le béton.

Cette étude a pour objectif d'analyser l'influence des CVB utilisées comme substitut au filler calcaire sur le comportement rhéologique des pâtes de ciment dans le but de les valoriser dans les bétons. L'effet des cendres volantes de biomasse a été analysé dans des pâtes de ciment composées entièrement de clinker CEM I. Certains bétons fluides tels que les bétons de fondations profondes sont fréquemment formulés avec du CEM III afin d'acquérir une bonne résistance aux attaques chimiques et réduire les risques de fissuration. Des pâtes ont donc été formulées également avec un ciment composite à base de laitier CEM III afin d'étudier les CVB en présence d'autres additions.

II. PROGRAMME EXPERIMENTAL

Les cendres volantes de biomasse (CVB) proviennent de la centrale de Lens (France), qui est équipée d'une centrale à lit fluidisé dense. La biomasse est brûlée dans un lit de sable en suspension grâce à un flux de gaz. La biomasse bois utilisée pour la combustion provient de bois rond, de broyats de palettes et de plaquettes forestières. Les opérations de combustion sont effectuées à 850 °C. Les CVB sont constituées des cendres pulvérulentes récupérées après traitement des fumées grâce à des filtres à manches. La centrale génère plus de 600 tonnes de CVB par an et 1800 à 1900 tonnes de cendres sous foyer (Schlupp et al., 2023). Le filler calcaire utilisé est composé de 98 % de CaCO_3 . Un ciment CEM I 42.5 R composé de 95,5 % de clinker et un ciment CEM III/A 52.5 L composé de 36 % de clinker, 62 % de laitier de haut fourneau et de 2 % de calcaire ont été utilisés pour les différentes pâtes.

A. Composition chimiques et minéralogique

Plusieurs paramètres influencent la composition chimique des CVB dont la technologie, la température de combustion et la biomasse utilisée (Cordeiro et al., 2008; Wang and Baxter, 2007). Une analyse chimique par fluorescence à rayons X a été réalisée sur les CVB. Les oxydes à fortes teneurs et la perte au feu (PAF) sont donnés dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Composition chimique des CVB

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	PAF	Autres
Teneur (%)	38,03	3,77	2,04	24,65	2,95	1,07	5,31	1,96	2,92	15,93	1,37

Les principaux composants sont la silice, la chaux et l'oxyde de potassium avec des traces de ZrO₂, Cr₂O₃, TiO₂, ZnO et Mn₂O₃ à moins de 1 %. Cette composition est influencée par le type de biomasse utilisée et la technologie de combustion employée (Vassilev et al., 2010). La Perte Au Feu (PAF) de 15,93% indique la présence de particules imbrulées qui peuvent être responsable d'effets indésirables sur la fluidité car elles absorbent des quantités importantes d'adjuvants et d'eau (Liang et al., 2024). Par application indirecte de la norme NF EN 450-1, portant sur les propriétés physiques et chimiques des cendres volantes de charbon, les CVB peuvent être considérées pouzzolaniques si la somme des oxydes de fer, d'alumine et de silice est supérieure à 70% et si les oxydes sont sous forme amorphes. Les CVB étudiées ont une teneur d'oxydes de 43,85 %. Une analyse minéralogique des CVB réalisée par diffractomètre à rayons X et les résultats sont présentés sur la Fig. 1.

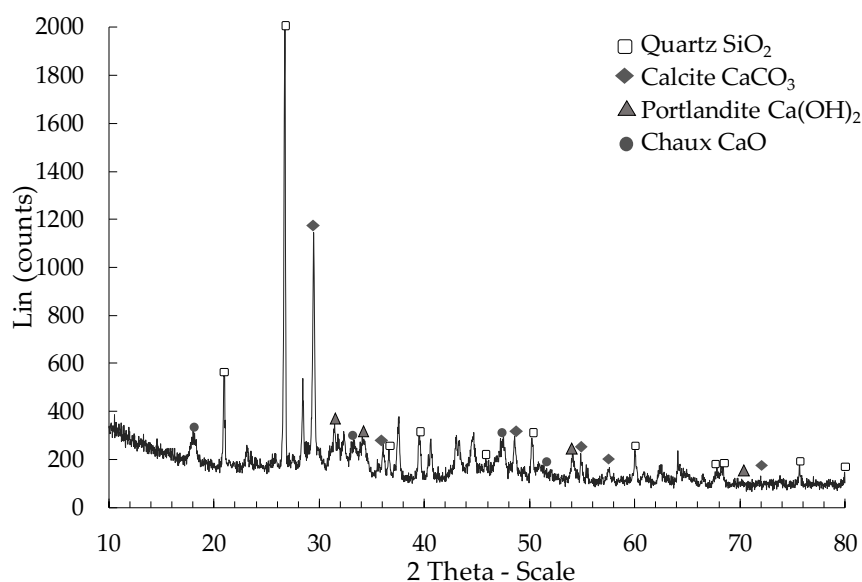


FIGURE 1. Diffractogramme à rayons X

L'analyse DRX a permis d'observer une absence de phase amorphes et une présence abondante de pics cristallins de quartz SiO₂, calcite CaCO₃, portlandite Ca(OH)₂ et chaux CaO. Une absence d'activité pouzzolanique est donc à noter pour les CVB de l'étude.

B. Propriétés physiques

La distribution granulométrique des ciments, du filler calcaire et des CVB est présentée sur la Fig. 2. Les diamètres de CVB s'échelonnent entre 0,1 et 200 μm tandis que ceux des fillers calcaires se situent entre 0,1 et 100 μm . Le diamètre moyen des CVB est de 18,8 μm et les grains de filler calcaire ont un diamètre moyen de 10,9 μm .

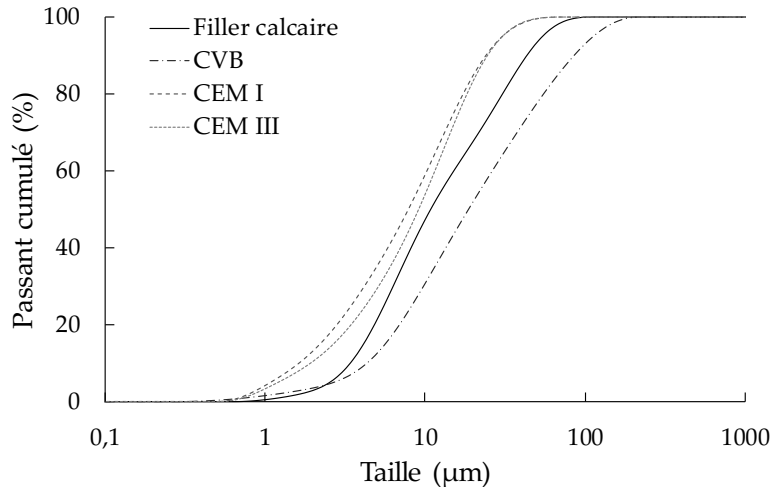


FIGURE 2. Courbes granulométriques des ciments, du filler calcaire et des CVB

Les masses volumiques et les surfaces spécifiques de Blaine sont données dans le tableau 2. La masse volumique des CVB a été déterminée en utilisant de l'éthanol suivant la norme NF P15 435. Les surfaces spécifiques des CVB et du filler calcaire, sont obtenues à l'aide d'un perméabilimètre de Blaine selon la norme NF EN 196-6.

TABLEAU 2. Propriétés physiques des CVB, du filler calcaire et des ciments

	CEM I	CEM III	Filler calcaire	CVB
Masse volumique (g/cm ³)	3,10	3,00	2,70	2,66
Finesse blaine (cm ² /g)	4300	4150	4889	5138

C. Observation microscopique MEB

Des analyses réalisées avec un microscope électronique à balayage MEB/EDS ont permis d'observer l'aspect de surfaces des CVB et du filler calcaire. Les particules observées sont présentées sur la Fig. 3. L'analyse du filler calcaire a montré la présence de plusieurs agglomérats de petites particules lisses de forme angulaire. La provenance du filler calcaire d'un broyage de pierre justifie la structure observée (Nunes et al., 2023; Rojo-López et al., 2022; Sun et al., 2023). L'observation des CVB a montré trois différentes formes de particules. Il s'agit de particules allongées qui pourraient être des imbrulés, des particules sphériques et des particules irrégulières ressemblant à des agglomérats de particules poreux. Plusieurs travaux antérieurs avaient également mentionnés les CVB comme des particules de forme et de morphologie complexe présentant une structure poreuse (Carević et al., 2019; Rajamma et al., 2009; Ukrainczyk, 2016). La morphologie variée des particules de CVB favorise une plus large surface spécifique et peut agir sur les réarrangements à l'échelle de la microstructure, impactant le comportement d'écoulement.

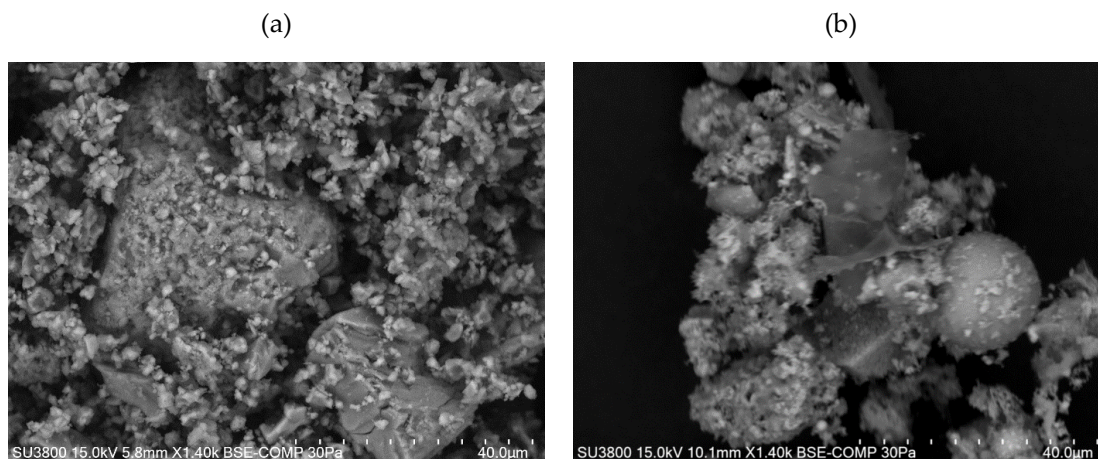


FIGURE 3. Observations MEB de plusieurs grains de filler calcaire (a) et des CVB (b)

L'absence de réactivité pouzzolanique des CVB et la présence de particules fines observées durant l'analyse physico chimiques, confirment le potentiel des CVB de l'étude comme substitut du filler calcaire.

D. Formulation des pâtes

Les pâtes sont formulées en maintenant un rapport Eau/Liant de 0,41 constant. Ce rapport permet l'obtention d'une fluidité adéquate pour les mesures rhéologiques (Haist et al., 2020). Des substitutions volumiques du filler calcaire par les CVB sont effectuées. Les différentes compositions sont données dans le tableau 3 et le tableau 4.

TABLEAU 3. Composition des pâtes de CEM I

Taux de CVB (%)	0	30	50	70	80	100
Filler calcaire (g)	302	211	151	90	45	0
CVB (g)	0	89	149	210	254	297
Ciment CEM I (g)	1037	1037	1037	1037	1037	1037
Eau (g)	554	554	554	554	554	554
E/L	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
Masse volumique (kg/m ³)	1893	1891	1891	1891	1890	1888

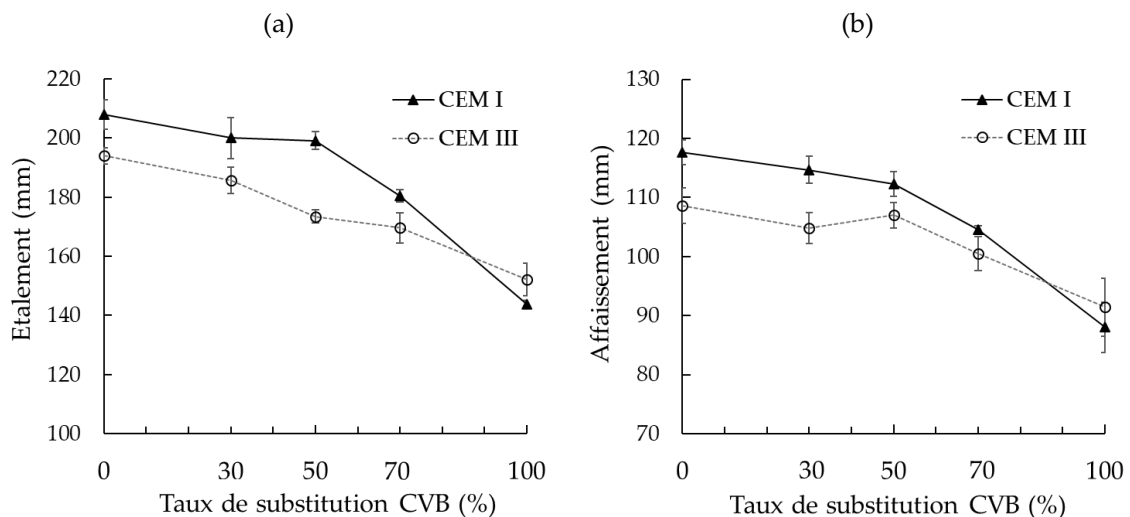
TABLEAU 4. Composition des pâtes de CEM III

Taux de CVB (%)	0	30	50	70	80	100
Filler calcaire (g)	305	214	153	92	61	0
CVB (g)	0	90	151	211	241	301
Ciment CEM III (g)	1018	1018	1018	1018	1018	1018
Eau (g)	548	548	548	548	548	548
E/L	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
Masse volumique (kg/m ³)	1871	1870	1870	1869	1868	1867

Les matériaux secs sont introduits dans le malaxeur et homogénéisés pendant 60 s à vitesse lente. L'eau est ensuite ajoutée et l'ensemble est mélangé pendant 45 s à vitesse lente. La pâte est homogénéisée pendant 90 s en raclant la cuve. Puis, un malaxage a lieu pendant 60 s à vitesse rapide. Cette étape est suivie d'une homogénéisation manuelle pendant 60 s et d'un dernier malaxage à vitesse rapide pendant 120 s. Ce protocole s'inspire des travaux de (Haist et al., 2020) pour obtenir une pâte fluide sans ségrégation ou ressuage.

III. INFLUENCE DES CVB SUR L'OUVRABILITE

Aucun essai n'est normalisé pour la mesure de l'ouvrabilité de pâtes de ciment fluides. Afin d'observer l'influence de la finesse des CVB sur l'ouvrabilité des pâtes, des essais d'étalements et d'affaissements ont été effectués avec un mini cône MBE (Mortiers Bétons Equivalents). Après le remplissage du moule, ce dernier est soulevé et l'affaissement est mesuré au centre de la pâte. L'étalement correspond à la moyenne de deux diamètres d'étalements perpendiculaires.

**FIGURE 4. Diamètre d'étalement moyen (a) et affaissement (b) en fonction du taux de substitution**

Les résultats d'étalements et d'affaissements sont présentés sur la Fig. 4. L'augmentation du taux de substitution de CVB diminue l'étalement et l'affaissement de façon plus importante. Cette diminution est associée à la différence de la demande en eau entre les CVB et le filler calcaire causée par les carbonés imbrulées présentes dans les CVB. Les particules imbrulées provoquent une absorption d'eau nécessaire à la fluidité (Liang et al., 2024).

IV. EFFETS DES CVB SUR LE COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE

A. Mesure rhéologiques et analyses des courbes

Les modifications observées au niveau de l'ouvrabilité impliquent une modification des propriétés d'écoulement des mélanges. Afin de quantifier et d'étudier le comportement d'écoulement, des mesures rhéologiques ont été effectuées à l'aide d'un rhéomètre Anton Paar MCR 72 équipé d'une géométrie vane et d'un système de contrôle thermique Peltier. Pour prévenir les effets de glissement aux parois, le récipient présente des rainures d'une profondeur de 0,5 mm. Un pré-cisaillement de 100 s^{-1} pendant 60 s est effectué afin de créer des conditions uniformes entre chaque essai. Après un temps de repos de 30 s, une rampe décroissante en gradient de cisaillement de 100 s^{-1} à $0,1 \text{ s}^{-1}$ divisé en 14 paliers est réalisée. Les paliers de vitesse ainsi que les temps d'essai sur chaque palier (15 s) ont été fixés selon une étude récente ayant pour objectif d'étudier les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment et de comparer différents rhéomètres et géométrie de mesure (Haist et al., 2020). Les courbes d'écoulement obtenues sont présentées sur la Fig. 5.

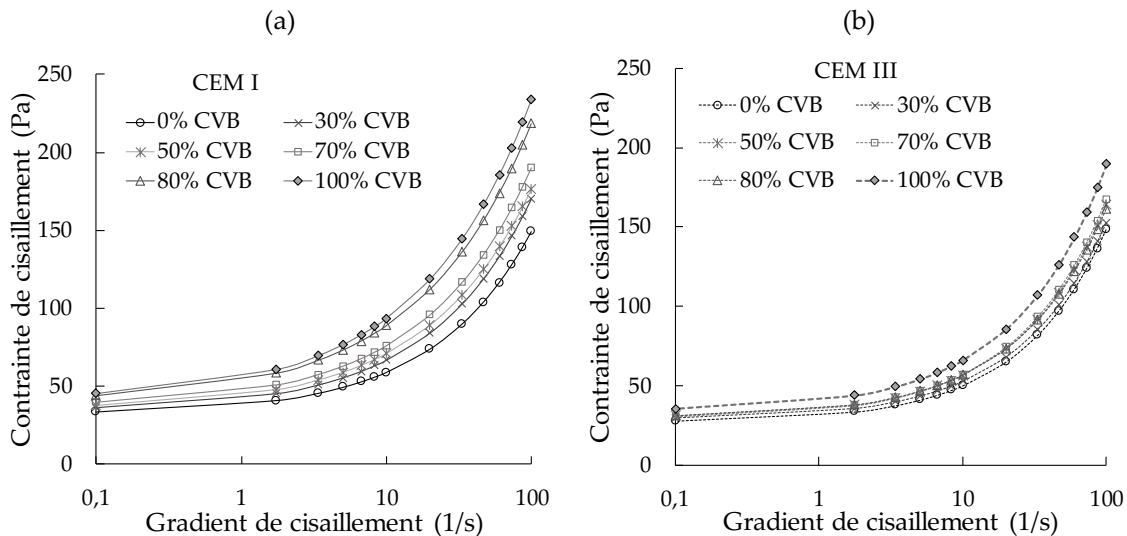


FIGURE 5. Courbes d'écoulement des pâtes de CEM I (a) et CEM III (b)

La non linéarité des courbes révèle un comportement rhéofluidifiant à seuil. En effet, une diminution de la viscosité avec l'augmentation du gradient de cisaillement est observée. Ce phénomène est bien illustré par le modèle de Herschel-Bulkley (Eq. 1).

$$\tau = \tau_{0,HB} + K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Où τ_{HB} (Pa) représente le seuil de cisaillement de Herschel-Bulkley, K ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$) l'indice de consistance ou de viscosité de Herschel-Bulkley et n l'indice d'écoulement de Herschel-Bulkley.

Pour un fluide possédant un comportement de Bingham, l'indice n est égale à 1. Le fluide devient rhéofluidifiant, lorsque n est inférieur à 1.

Le modèle de Herschel-Bulkley ne décrit pas de manière adéquate le comportement rhéologique pour des taux de cisaillement inférieurs à 10 s^{-1} (Nguyen et al., 2011). Ce comportement a été attribué aux forces de Van der Waals ou à la formation d'agrégats structuraux qui réduisent la mobilité des molécules d'eau interstitielles et augmentent la viscosité et le seuil de cisaillement.

Bien que le modèle de Herschel Bulkley approxime les points expérimentaux pour les gradients de cisaillement inférieur à 10 s^{-1} , comme observé sur la Fig. 6, celui-ci ne reflète pas le comportement rhéologique qui peut également être corrélé par la loi de Bingham.

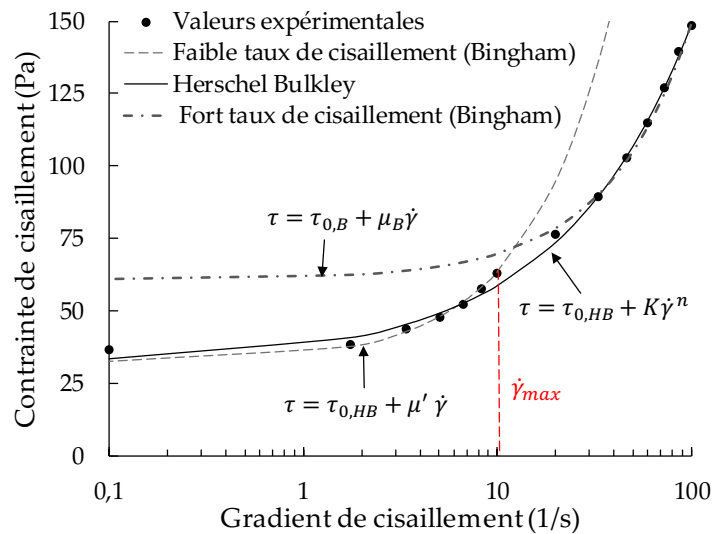


FIGURE 6. Analyse de la courbe d'écoulement de la pâte de CEM I 0% CVB

Aux faibles taux de cisaillement, une viscosité plastique équivalente μ' peut être calculée en ajustant la courbe de Herschel-Bulkley à une ligne droite de Bingham (de Larrard et al., 1998; Mandal et al., 2023). La viscosité plastique équivalente peut être obtenue via la méthode des moindres carrés avec l'équation Eq. (2).

$$\mu' = \frac{3K}{n+2} \dot{\gamma}_{max}^{n-1} \quad (2)$$

Où $\dot{\gamma}_{max}$ (s^{-1}) est le gradient de cisaillement maximal de la zone linéaire à faible taux de cisaillement. Pour de faibles taux de cisaillement (inférieurs à 10 s^{-1} sur la Fig. 5), l'écoulement peut être représenté par le modèle de Bingham exprimé à partir de la viscosité plastique équivalente, comme dans l'Eq. (3) :

$$\tau = \tau_{0,HB} + \left(\frac{3K}{n+2} \dot{\gamma}_{max}^{n-1} \right) \dot{\gamma} \quad (3)$$

Le taux de cisaillement maximal $\dot{\gamma}_{max}$ est calculé grâce à un paramètre adimensionnel ($\Gamma=1$), distinguant le régime de type Bingham d'un comportement rhéofluidifiant. Ce paramètre est donné par l'Eq. (4).

$$\Gamma = \frac{\mu' \dot{\gamma}}{\tau_{0,HB}} \quad (4)$$

Au-delà de la région de rhéofluidification, le modèle de Bingham est utilisé selon l'Eq. (5) :

$$\tau = \tau_{0,B} + \mu_B \dot{\gamma} \quad (5)$$

Avec $\tau_{0,B}$ et μ_B le seuil de cisaillement de Bingham en Pa et la viscosité plastique en Pa.s respectivement.

Il est intéressant d'évaluer si les pâtes contenant des cendres volantes de biomasse présentent un comportement similaire dans les domaines de cisaillement présenté précédemment.

B. Propriétés rhéologiques

Les propriétés rhéologiques des différents mélanges étudiés sont présentées dans le tableau 5. Une augmentation du seuil de cisaillement et de la viscosité est observée quelque soit le type de ciment et le modèle rhéologique utilisé. La surface spécifique plus élevée des CVB comparée à celle du filler calcaire ainsi que la présence de particules imbrulées réduit la quantité d'eau libre dans les pâtes. Cette réduction entraîne une augmentation des forces de frictions entre les particules solides. L'augmentation du seuil de cisaillement et de la viscosité apparente est moins prononcée dans les pâtes de CEM III. La concentration réduite en clinker favorise une distribution plus uniforme limitant la coagulation des particules durant la première heure d'hydratation (Mohammadi and South, 2016). Le seuil de cisaillement des pâtes de CEM III 100% CVB selon les modèles de Herschel Bulkley reste comparable à celui des pâtes de CEM I 0% CVB.

TABLEAU 5. Propriétés rhéologiques des pâtes composées

Ciment	Taux CVB (%)	$\tau_{0,HB}$	K	n	$\tau_{0,B}$	μ_B	μ'	$\dot{\gamma}_{max}$
CEM I	0	32,0	6,08	0,642	60,9	0,88	3,14	10,2
CEM I	30	34,1	7,65	0,625	67,2	1,06	4,91	6,9
CEM I	50	35,0	9,00	0,598	75,2	1,03	5,95	5,9
CEM I	70	36,9	9,81	0,597	79,0	1,13	7,09	5,2
CEM I	80	40,1	13,20	0,565	98,7	1,25	10,4	3,9
CEM I	100	41,1	14,10	0,568	99,8	1,37	11,1	3,2
CEM III	0	27,0	4,31	0,724	48,1	1,00	2,59	10,4
CEM III	30	28,4	4,65	0,713	49,9	1,04	2,73	10,4
CEM III	50	29,6	5,24	0,704	57,4	1,06	3,04	9,7
CEM III	70	29,5	5,45	0,701	56,9	1,12	3,14	9,4
CEM III	80	30,0	5,40	0,692	58,1	1,04	3,06	9,8
CEM III	100	34,0	6,50	0,698	63,6	1,37	3,87	8,8

La viscosité plastique μ_B des pâtes augmente progressivement avec le taux de substitution, quelque soit le type de ciment, jusqu'à l'obtention de la même valeur pour la pâte CEM I 100% CVB et la pâte CEM III 100% CVB. La différence entre les pâtes de CEM I et CEM III est plus importante à faible gradient de cisaillement comme l'indique la viscosité plastique équivalente μ' . Le mélange se déforme plus facilement et devient moins visqueux. La comparaison des modèles de Bingham et de Herschel Bulkley montre que les seuils de cisaillement estimés par Bingham sont systématiquement plus élevés. Cette différence est attribuée à la courbure de la courbe d'écoulement, représentée par l'indice n .

C. Effets des CVB sur la rhéofluidification

Avec l'augmentation du taux de CVB, indépendamment du type de ciment, l'indice d'écoulement de Herschel Bulkley n diminue et l'indice de consistance K augmente. Ces variations traduisent un comportement rhéofluidifiant plus prononcé. Cela illustre l'influence des CVB sur le comportement rhéologique, notamment leur capacité à réduire l'énergie nécessaire pour désagréger les forces interparticulaires. En effet, la rhéofluidification résulte du réarrangement à l'échelle de la microstructure dans le mélange. Pour les faibles taux de cisaillement, les forces d'attraction des particules dominent les forces hydrodynamiques et conduisent à la formation d'agrégats structuraux. Dans la zone de rhéofluidification, les fines particules s'ordonnent en couches longitudinales à l'écoulement pour minimiser les collisions. La forme sphérique des particules rencontrées dans les CVB peut contribuer à créer des couches longitudinales à l'écoulement et lubrifier les contacts entre chaque grain structural. Pour les mélanges de CEM I, l'augmentation du taux de CVB réduit continuellement le taux de cisaillement maximal $\dot{\gamma}_{max}$. Cette diminution traduit également une apparition du comportement rhéofluidifiant à des gradients de cisaillement de plus en plus faibles et une intensification de ce dernier à des gradients élevés.

Ainsi, le comportement rhéofluidifiant est plus important avec les CVB qu'avec le filler calcaire. Cette propriété peut présenter plusieurs avantages pour certaines applications de bétons telles que l'impression 3D, la pompabilité ou le béton projeté (Feng et al., 2022; Feys et al., 2016). Tous les paramètres rhéologiques montrent une dépendance du comportement d'écoulement en présence de CVB au type de ciment utilisé, mettant en évidence l'importance des formulations dans l'optimisation des propriétés rhéologiques.

CONCLUSION

Cette étude fournit une base de données pour l'utilisation de CVB comme substitut au filler calcaire. Les travaux ont montré que les CVB accentuent le comportement non linéaire de l'écoulement en fonction du taux de cisaillement. Les pâtes suivent un comportement de Bingham à faibles et forts gradients de cisaillement mais présentent une rhéofluidification à des gradients intermédiaires. La demande en eau accrue des CVB, liée à leur surface spécifique élevée réduit l'ouvrabilité. De plus, les modèles de Bingham et de Herschel- Bulkley indiquent des tendances similaires pour le seuil de cisaillement avec les CVB bien que les valeurs du modèle de Bingham soient surestimées en raison de l'effet de rhéofluidification. Les pâtes montrent une rhéofluidification plus marquée avec les CVB qu'avec le filler calcaire grâce à certaines formes sphériques de particule de CVB qui favorisent la formation de couches longitudinales. Cet effet est particulièrement prononcé pour les

pâtes de CEM I en raison de la composition importante en clinker et à leur floculation. Des superplastifiants sont couramment utilisés dans la formulation de bétons fluides et peuvent être utiles dans le cadre de l'étude pour maintenir l'ouvrabilité. Des travaux supplémentaires tels que l'analyse du comportement rhéologique en présence de superplastifiants peuvent être nécessaires pour évaluer le potentiel des CVB en présence d'adjuvants.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ADEME pour leur soutien financier au projet BIOGRAFIC. Des remerciements particuliers sont adressés à la société Dalkia et à l'Université de Mons pour leur soutien durant le projet.

REFERENCES

- Awang, H.Bt., Al-Mulali, M.Z., 2018. The Inclusion of Palm Oil Ash Biomass Waste in Concrete: A Literature Review, in: Waisundara, V. (Ed.), Palm Oil. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76632>
- Berra, M., Mangialardi, T., Paolini, A.E., 2015. Reuse of woody biomass fly ash in cement-based materials. *Constr. Build. Mater.* 76, 286–296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.052>
- Carević, I., Serdar, M., Štirmer, N., Ukrainczyk, N., 2019. Preliminary screening of wood biomass ashes for partial resources replacements in cementitious materials. *J. Clean. Prod.* 229, 1045–1064. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.321>
- Cheah, C.B., Ramli, M., 2012. Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement. *Constr. Build. Mater.* 30, 320–329. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.009>
- Cordeiro, G.C., Toledo Filho, R.D., Tavares, L.M., Fairbairn, E.M.R., 2008. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cem. Concr. Compos.* 30, 410–418. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001>
- de Larrard, F., Ferraris, C.F., Sedran, T., 1998. Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material. *Mater. Struct.* 31, 494–498. <https://doi.org/10.1007/BF02480474>
- Elinwa, A.U., and Ejeh, S.P., 2004. Effects of the Incorporation of Sawdust Waste Incineration Fly Ash in Cement Pastes and Mortars. *J. Asian Archit. Build. Eng.* 3, 1–7. <https://doi.org/10.3130/jaabe.3.1>
- Feng, K., Xu, Z., Zhang, W., Ma, K., Shen, J., Hu, M., 2022. Rheological Properties and Early-Age Microstructure of Cement Pastes with Limestone Powder, Redispersible Polymer Powder and Cellulose Ether. *Materials* 15, 3159. <https://doi.org/10.3390/ma15093159>
- Feys, D., De Schutter, G., Khayat, K.H., Verhoeven, R., 2016. Changes in rheology of self-consolidating concrete induced by pumping. *Mater. Struct.* 49, 4657–4677. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0815-7>
- Ganesan, K., Rajagopal, K., Thangavel, K., 2007. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cem. Concr. Compos.* 29, 515–524. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.001>

Haist, M., Link, J., Nicia, D., Leinitz, S., Baumert, C., Bronk, T., Cotardo, D., Eslami Pirharati, M., Fataei, S., Garrecht, H., Gehlen, C., Hauschildt, I., Ivanova, I., Jesinghausen, S., Klein, C., Krauss, H.-W., Lohaus, L., Lowke, D., Mazanec, O., Mechtcherine, V., 2020. Interlaboratory study on rheological properties of cement pastes and reference substances: comparability of measurements performed with different rheometers and measurement geometries. *Mater. Struct.* 53. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01477-w>

Jamil, M., Kaish, A.B.M.A., Raman, S.N., Zain, M.F.M., 2013. Pozzolanic contribution of rice husk ash in cementitious system. *Constr. Build. Mater.* 47, 588–593. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.088>

Liang, X., Li, Z., Dong, H., Ye, G., 2024. A review on the characteristics of wood biomass fly ash and their influences on the valorization in cementitious materials. *J. Build. Eng.* 97, 110927. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110927>

Liu, W., Du, H., Yi, P., Li, Y., Luo, Y., Chen, Q., Xing, F., 2023. The early hydration and rheological characteristics of cement paste containing co-combustion fly ash. *J. Build. Eng.* 78, 107736. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107736>

Mandal, R., Panda, S.K., Nayak, S., 2023. Rheology of Concrete: Critical Review, recent Advancements, and future perspectives. *Constr. Build. Mater.* 392, 132007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132007>

Mohammadi, J., South, W., 2016. Effect of up to 12% substitution of clinker with limestone on commercial grade concrete containing supplementary cementitious materials. *Constr. Build. Mater.* 115, 555–564. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.071>

Moretti, J.P., Nunes, S., Sales, A., 2018. Self-compacting concrete incorporating sugarcane bagasse ash. *Constr. Build. Mater.* 172, 635–649. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.277>

Nguyen, V.-H., Remond, S., Gallias, J.-L., 2011. Influence of cement grouts composition on the rheological behaviour. *Cem. Concr. Res.* 41, 292–300. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.015>

Nunes, G.M., Anjos, M.A.S., Lins, A.B.S.M., Negreiros, A.M.S., Pessoa, L.R., 2023. Evaluation of the mechanical behaviour of representative volumetric elements of 3DCP masonry mixtures with partial replacement of cement by limestone filler and metakaolin. *J. Build. Eng.* 78, 107650. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107650>

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. *J. Hazard. Mater.* 172, 1049–1060. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.109>

Rajamma, R., Senff, L., Ribeiro, M.J., Labrincha, J.A., Ball, R.J., Allen, G.C., Ferreira, V.M., 2015. Biomass fly ash effect on fresh and hardened state properties of cement based materials. *Compos. Part B Eng.* 77, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.019>

Rojo-López, G., González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., González-Taboada, I., 2022. Rheology, durability, and mechanical performance of sustainable self-compacting concrete with metakaolin and limestone filler. *Case Stud. Constr. Mater.* 17, e01143. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01143>

Schlupp, F., Page, J., Djelal, C., Libessart, L., 2023. Use of biomass bottom ash as granular substitute in mortar. *J. Build. Eng.* 75, 106927. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106927>

Skripiūnas, G., Macijauskas, M., Nagrockienė, D., Daugėla, A., 2017. The Influence of Biomass Fly Ash on the Plasticizing Effects in Cement Pastes. *Procedia Eng., Modern Building Materials, Structures and Techniques* 172, 1015–1022. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.152>

Sun, H., Pang, L., Ding, Y., Xing, B., Tang, Y., Sun, X., Yuan, J., Zhou, L., Wang, Y., Lyu, Y., Sha, F., 2023. Influence of the physical morphological characteristics of mineral fillers on the bitumen-filler interfacial interaction. *Constr. Build. Mater.* 378, 131206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131206>

Teixeira, E.R., Camões, A., Branco, F.G., 2019. Valorisation of wood fly ash on concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* 145, 292–310. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.028>

Ukrainczyk, N., 2016. Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials. *Chem. Biochem. Eng. Q.* 30, 137–148. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2015.2231>

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, S., Baxter, L., 2007. Comprehensive study of biomass fly ash in concrete: Strength, microscopy, kinetics and durability. *Fuel Process. Technol., Impacts of Fuel Quality on Power Production* 88, 1165–1170. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.06.016>

Zhai, J., Burke, I.T., Stewart, D.I., 2021. Beneficial management of biomass combustion ashes. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 151, 111555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111555>