

Valorisation des déchets de composite d'éolienne dans les matrices cimentaires

Natalia LORA-ACEVEDO

MAST-CPDM, Univ Gustave Eiffel, F-77454 Marne-La-Vallée, France

Département de Génie Civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec J1K 2R1, Canada

RESUME La valorisation des pales d'éoliennes en fin de vie, constituées de composites renforcés de fibres de verre, représente un défi à cause de la nature thermdurcissable des résines utilisées dans leur fabrication. Aujourd'hui, l'enfouissement et l'incinération sont les principales options de fin de vie pour ces matériaux. Cette étude propose une nouvelle forme de valorisation peu étudiée dans la littérature : il s'agit de l'intégration du composite en tant que remplacement partiel du ciment, afin de tirer parti du potentiel pouzzolanique du verre broyé. En comparant la résistance à la compression de deux mortiers dans lesquels le ciment est partiellement remplacé par de la poudre de verre (20 % de verre) et par la poudre d'un composite renforcé par des fibres de verre (20 % de verre + 10 % de résine), les résultats montrent que la poudre de composite renforcé par des fibres de verre est moins efficace pour améliorer la résistance à la compression que la poudre de verre. Cependant, nous avons constaté que les deux poudres présentent une activité pouzzolanique quasi similaire. Ainsi, la moindre efficacité de la poudre de composite renforcé par des fibres de verre dans l'amélioration de la résistance mécanique pourrait être attribuée à la présence de résine, qui ne participe pas à la réaction, crée de mauvaises interfaces, se dégrade en milieu alcalin et libère des extractibles organiques affectant négativement l'hydratation du ciment.

Mots-clefs recyclage, poudre de verre, résine thermdurcissable, interface, hydratation

I. INTRODUCTION

Le développement des énergies renouvelables est devenu fondamentale dans la lutte contre le changement climatique. L'énergie éolienne est la deuxième source d'énergie électrique renouvelable et la troisième source de production d'électricité en France (France Energie Eolienne, 2022). Les éoliennes ont une durée de vie fixe de 20 à 25 ans, et au vu du démantèlement des éoliennes de première génération, leur traitement en fin de vie devient un enjeu de plus en plus important. Les pales d'éoliennes sont constituées de composites, dont 60 à 70 % sont des fibres de renforcement (verre/carbone) et 30 à 40 % des résines thermdurcissables (époxy, polyester). (Fonte and Xydis, 2021; Tangler, 2000). La méthode de recyclage des polymères par solubilisation ou fusion n'est pas applicable aux polymères thermdurcissables, ce qui rend difficile le recyclage de ces composites (Ahmed, 2023). Les principales options aujourd'hui sont l'enfouissement ou l'incinération avec ou sans récupération d'énergie (Gennitsaris et al., 2023; Tao et al., 2023). En 2022, le démantèlement des pales d'éoliennes est estimé avoir généré jusqu'à 15 kt de déchets de

matériaux composites. Ce chiffre devrait atteindre 25 kt d'ici la fin de 2025, puis près de 60 kt d'ici 2030 (EuCIA, 2024).

La valorisation des pales d'éoliennes dans le béton a déjà fait l'objet d'études. La valorisation sous forme de granulats permet d'intégrer dans le béton une grande quantité de composite, mais la littérature montre une diminution des performances mécaniques du béton lorsqu'une partie des granulats naturels est remplacée par des granulats composites (Fox, 2016). Ce phénomène s'explique principalement par une mauvaise qualité de l'interface entre la pâte de ciment et les granulats composites, en raison de la faible rugosité de ces derniers, qui limite l'ancrage mécanique (Tao et al., 2023). Les composites déchiquetés peuvent également être valorisés sous forme de fibres de renforcement dans le béton. Plusieurs études montrent une amélioration de la résistance à la flexion pouvant aller jusqu'à 15 % (Baturkin et al., 2021), et jusqu'à 52 % pour la résistance à la traction (Fu et al., 2021). Toutefois, les proportions introduites pour ce type de renforcement vont de 1% à 6% du volume de béton, ce qui pose des problèmes d'ouvrabilité et limite la quantité de composite valorisées (Yazdanbakhsh et al., 2018).

Enfin, l'utilisation de composites renforcés de fibres de verre comme ajout cimentaire dans le béton reste une option peu explorée (Tao et al., 2023). La réaction pouzzolanique du verre broyé, qui constitue 70% de la masse du composite, peut contribuer aux propriétés mécaniques du béton (Zhang et al., 2023). Cette alternative présente un double avantage : elle permet la valorisation des déchets composites en plus grande quantité que lorsqu'ils sont déchiquetés sous forme de fibre, tout en diminuant l'utilisation du ciment dans le béton, réduisant ainsi son empreinte carbone.

Cette étude porte sur la valorisation des déchets de composite provenant des pales d'éoliennes en fin de vie dans les matrices cimentaires. Tout d'abord, l'intégration du composite en tant que remplacement partiel du ciment dans des mortiers est évaluée. Une optimisation du broyage a été réalisée afin d'obtenir une poudre micronisée qui pourrait réagir avec la matrice cimentaire. Ensuite, une étude des propriétés mécaniques des mortiers contenant le composite broyé a été réalisée, en prenant comme référence une série des mortiers formulés avec une poudre de verre couramment employée dans l'industrie comme ajout cimentaire. Afin de mieux comprendre l'origine microscopique du comportement mécanique, une analyse physico-chimique du composite dans la matrice cimentaire est réalisée. L'activité pouzzolanique du composite est évaluée par l'essai Chapelle modifié, et le rôle de la résine dans la matrice cimentaire est analysé à travers l'observation des fractures fraîches des mortiers et à travers ses conséquences sur l'hydratation du ciment.

II. VALORISATION DU COMPOSITE COMME AJOUT CIMENTAIRE

A. Broyage des pales d'éoliennes

La première étape de cette étude a été le broyage du composite provenant des pales d'éoliennes en fin de vie. Plusieurs panneaux de composite mesurant 20 cm x 20 cm ont été découpés en carrés de 10-20 mm de côté, à l'aide d'une scie à l'eau. Ensuite, les carrés ont été mis dans un broyeur à boulets. Le matériau a été broyé pendant deux cycles de 45 minutes, avec une pause de 30 minutes entre chaque cycle, puis la poudre obtenue a été tamisée à 630 µm, et les morceaux

restants ont de nouveau été soumis aux cycles de broyage, jusqu'à ce que l'ensemble du composite soit transformé en une poudre dont la taille des particules est inférieure à 630 μm .

La granulométrie de cette poudre a été ensuite optimisée à l'aide d'un broyeur à jets d'air. Le gaz de broyage est de l'air comprimé à 20°C et à une surpression de 6 bars. Les collisions entre particules dans les jets d'air et dans la zone centrale provoquent le broyage. La vitesse de broyage détermine la finesse de la poudre (Hosokawa Alpine Group, n.d.). Une optimisation de la granulométrie du composite a été faite, en étalonnant la vitesse de broyage. Un granulomètre laser Sync by Microtrac MRB est utilisé à cet effet. Les particules sont dispersées dans l'eau distillée, et l'indice de réfraction utilisé pour tous les échantillons est celui du verre (1,51).

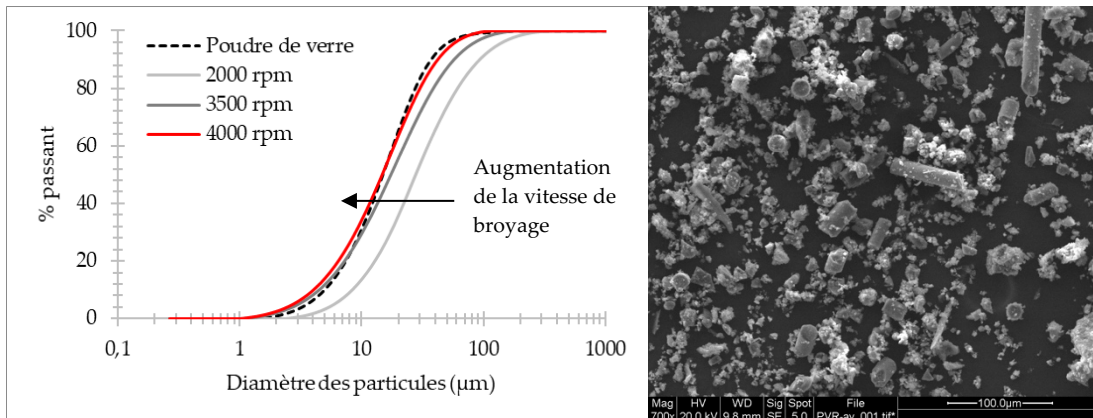


Figure 1. A Gauche : Granulométrie de la poudre composite à différentes vitesses de broyage. La granulométrie de la poudre de verre est mise comme référence. A droite : morphologie de la poudre de composite broyée à 4000 rpm.

Les distributions granulométriques obtenues pour chaque vitesse de broyage sont illustrées dans la Figure 1. La vitesse choisie a été 4000 rpm car elle permet d'obtenir une granulométrie semblable à celle de la poudre de verre utilisée dans l'industrie comme ajout cimentaire.

La Figure 1 montre également les particules du matériau composite après le broyage optimisé. L'image a été prise avec un microscope électronique à balayage FEI/Philips XL-30, sous vide, à 20kV. La poudre a été métallisée au préalable avec une couche fine de carbone. Bien que la taille moyenne des particules obtenues soit d'environ 15 μm , on observe qu'il n'y a pas de séparation entre la résine et la fibre de verre, du fait d'une très bonne qualité de l'interface fibre – résine. Par conséquent, les particules de verre broyées présentent des résidus de résine à leur surface.

B. Caractérisation des poudres

Pour disposer d'un matériau de référence dont l'activité pouzzolanique est connue, une poudre de verre VCASTM de type E produite par Vitrominerals a été choisie. Un ciment Portland à usage général (OPC, type GU conforme à la norme CSA A3000) est utilisé tout au long de l'étude.

Les propriétés physico-chimiques de la poudre de verre, le composite broyé, et le ciment sont résumés dans le Tableau 1. Pour les deux premiers matériaux, leur composition chimique a été analysé avec un spectromètre à fluorescence X Panalytical Axios. La perte au feu a été préalablement déterminée en introduisant les échantillons dans un four à 650°C pendant 4 heures.

La surface spécifique des poudres a été calculée selon la méthode BET et les mesures ont été effectuées avec un analyseur d'adsorption ASAP 2020 Plus.

Tableau 1. Propriétés physico-chimiques des matériaux étudiés.

Analyses chimiques (%)	Poudre de verre (PV)	Composite (CP)	Ciment GU
SiO ₂	61,8	39,4	20,3
CaO	21,3	11,2	63,4
Al ₂ O ₃	12,4	10,4	4,8
MgO	2,9	3,7	1,6
Na ₂ O	1,2	1,2	0,35
Fe ₂ O ₃	0,3	1,6	2,9
Perte au feu (650°C)	0,3	31,8	2,2
Surface spécifique [m ² /kg]	755 ± 26	1310 ± 25	408
Masse volumique [kg/m ³]	2698 ± 8	1970 ± 14	3100
d ₅₀ [µm]	14,9	14,7	15,2

C. Evaluation de la résistance à la compression des mortiers

Un mortier standard a été préparé conformément à la norme ASTM C109 (ASTM, 2024), avec du ciment Portland, du sable de rivière et de l'eau du robinet à température ambiante (23 °C). Deux séries de mortiers ont été préparées : PV20, où un taux de remplacement massique du ciment de 20% par de la poudre de verre a été appliqué, et CP30, où 30% du ciment a été remplacé par la poudre composite (environ 20% correspond au verre broyé et 10% correspond à la résine). Le rapport eau/liant (liant = ciment + ajout cimentaire) a été gardé constant à 0,485, ainsi que le volume de pâte de liant, en tenant compte de la masse volumique des matériaux.

Les quantités de chaque gâchée en kg/m³ sont résumées dans le Tableau 2. Le processus de fabrication des mortiers et l'évaluation de la résistance à la compression ont été réalisés conformément aux normes ASTM C305 et ASTM C109, respectivement.

Tableau 2. Proportions de mélange des mortiers (en kg/m³ de mortier).

Gâché e	Taux massique	Eau (Kg/m ³)	Ciment (Kg/m ³)	Sable (Kg/m ³)	Poudre de verre (Kg/m ³)	Composite broyé (Kg/m ³)
Réf	0%	264	545	1498		
PV20	20%	260	430	1498	108	
CP30	30%	247	356	1498		153

La Figure 2 montre l'évolution de la résistance à la compression à 7, 28, et 91 jours pour le mortier de référence, ainsi que pour les mortiers contenant 20% de masse de poudre de verre (PV20) et 30% de masse de poudre composite (CP30), en remplacement du ciment. Il faut garder à l'esprit que dans le mortier avec le composite, la masse de remplacement correspond à environ 20% verre broyé et 10% correspond à la résine.

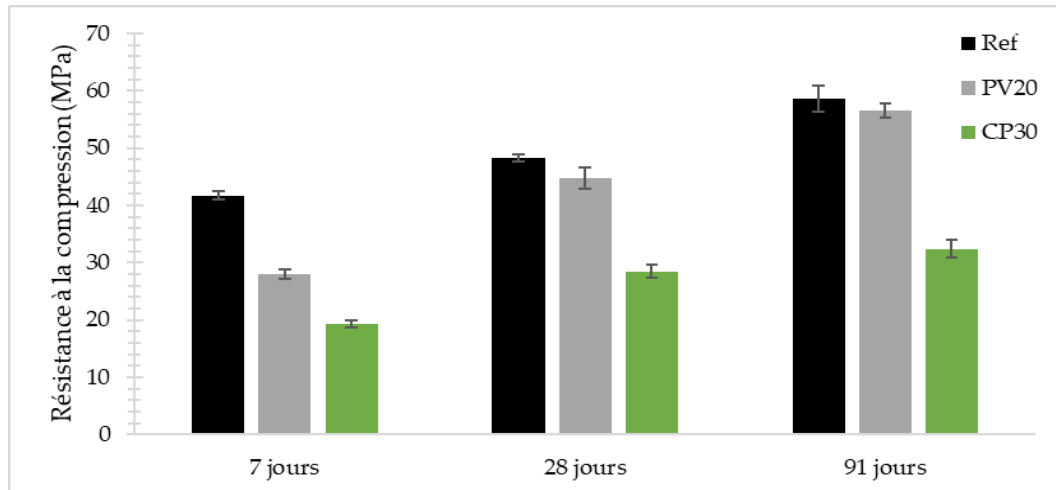


Figure 2. Résistance à la compression des mortiers avec un taux de remplacement du ciment de 20% de poudre de verre (PV20) et 30% de composite broyé (CP30) à 7, 28, et 91 jours.

A jeune âge (7 jours), les deux mortiers fabriqués avec les ajouts cimentaires présentent une performance notablement inférieure à celle de la référence, atteignant 67 % et 46 % de la résistance à la compression du mortier de référence, pour les mortiers avec la poudre de verre et le composite, respectivement. Cependant, à 28 et 91 jours, le mortier avec la poudre de verre atteint plus de 95% de la résistance à la compression de la référence. Pour le mortier avec le composite broyé, cette évolution n'est pas si importante, puisqu'après 28 et 91 jours, la résistance à la compression du mortier représente toujours environ 60 % de celle du mortier de référence.

De nombreuses recherches ont été menées sur l'utilisation de la poudre de verre en tant que pouzzolane. Un mélange de béton contenant 20 % de verre broyé peut avoir une résistance à la compression supérieure à celle d'un béton classique, mais les bénéfices de la réaction pouzzolanique ne sont visibles qu'à partir de 28 jours, car cette réaction prend plus de temps que l'hydratation du ciment Portland (Chen et al., 2006; Soliman and Tagnit-Hamou, 2016; Thomas et al., 2021). Cela explique le rôle de la poudre de verre dans la résistance mécanique des mortiers.

Bien que 70% de la masse du composite broyé soit un verre de la même nature, la poudre composite est moins efficace pour améliorer la résistance à la compression que la poudre de verre. Dans un premier temps, cela peut s'expliquer par le dosage en ciment plus faible des mortiers CP30, mais cela n'explique pas pourquoi leur résistance à la compression ne suit pas la même évolution que celle des autres mortiers. Afin de mieux comprendre les potentielles causes des faibles résistances mécaniques obtenues pour les mortiers contenant les composites, l'impact de celui-ci sur la réactivité du ciment a été étudié.

III. ETUDE PHYSICO-CHIMIQUE DU COMPOSITE DANS LA MATRICE CIMENTAIRE

A. Activité pouzzolanique

Tout d'abord, l'activité pouzzolanique du composite a été évaluée avec l'essai Chapelle modifié. Cet essai est décrit dans la norme française NF P18-513 (annexe A). Il permet de quantifier l'hydroxyde de calcium fixé grâce à la réaction pouzzolanique, en combinant 1 g de l'ajout

cimentaire avec 2 g de CaO dans 250 ml d'eau distillée. La suspension est mise en agitation à 90°C pendant 16 heures. La quantité d'hydroxyde de calcium fixée par la pouzzolane est déterminée par extraction de saccharose et titrage acide (Ferraz, 2015). Cet essai a été réalisé également sur la poudre de verre, pour avoir une valeur d'activité pouzzolanique de référence.

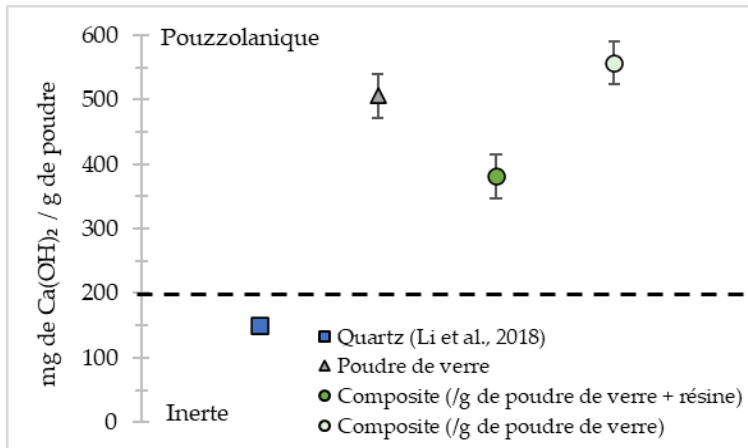


Figure 3. Activité pouzzolanique de la poudre de verre et du composite broyé selon l'essai Chapelle modifié.

La Figure 3 montre l'activité pouzzolanique (exprimée en mg de Ca(OH)₂/g de poudre) de la poudre de verre et du composite broyé. L'activité du quartz (Li et al., 2018) est également présentée à titre de référence, afin de situer les matériaux par rapport à un produit inerte.

Il est constaté que l'activité pouzzolanique de la poudre de verre est légèrement supérieure à celle du composite. Néanmoins, il convient de noter que les valeurs sont calculées sur la base de la masse totale de poudre utilisée dans l'essai. Dans le cas du composite broyé, cette masse contient environ 30 % de résine inerte sur le plan pouzzolanique, ce qui diminue la valeur d'activité totale.

Si l'on recalcule l'activité pouzzolanique du composite, mais en ne tenant compte que de la fraction massique correspondant au verre broyé, on constate que l'activité pouzzolanique du verre contenu dans le composite est comparable à celle de la poudre de verre, comme l'illustre la Figure 3.

En revanche, les résultats des essais mécaniques (Figure 2) suggèrent que, dans les mortiers composites, la réaction pouzzolanique du verre est moins développée, ce qui se traduit par une résistance à la compression plus faible. D'une part, cela s'explique par le fait que 10% du ciment est remplacé par la résine, ce qui réduit la quantité de chaux produite par l'hydratation du ciment, et donc la réactivité pouzzolanique potentielle du verre dans le composite. D'autre part, comme le montre la Figure 1, des résidus de résine restent présents à la surface des particules de verre, limitant ainsi leur surface réactive disponible.

B. Effet de la résine dans la matrice cimentaire

La présence de la résine dans la matrice cimentaire peut aussi affecter les propriétés mécaniques des mortiers. Chen et al., (2022) ont constaté qu'un inconvénient de l'utilisation de résines thermodurcissables dans le béton est que la qualité de l'interface entre les thermodurcissables et le ciment est faible. Pour étudier cela, des fractures fraîches du mortier contenant des composites ont été prélevées à 91 jours, puis elles ont été observées à l'aide d'un microscope électronique à

balayage (MEB). Un microscope Phenom XL ThermoFisher a été utilisé, à vide partiel, et à 10 kV pour les observations des échantillons qui n'ont pas été métallisés au préalable.

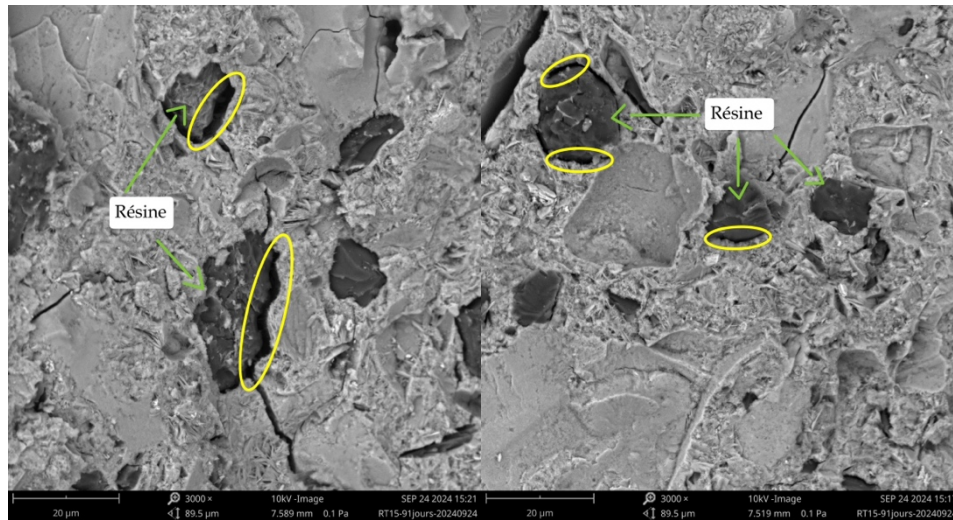


Figure 4. Images au MEB de fractures fraîches de mortiers fabriqués avec de la poudre composite.

La Figure 4 montre les fractures fraîches des mortiers fabriqués avec le composite. Des porosités et des cavités (entourées en jaune) sont observées autour des particules de résine dans la matrice cimentaire. Ces défauts peuvent provenir d'un manque de compatibilité entre la résine et les produits d'hydratation du ciment, entraînant une réduction des résistances mécaniques (Chen et al., 2022).

D'autres études menées sur la durabilité des barres d'armature composites renforcées de fibres de verre en milieu alcalin ont révélé des interfaces semblables à celle de la Figure 4. Les auteurs ont attribué ces défauts à la dégradation chimique de la résine en milieu alcalin (Benmokrane et al., 2017). Pour déterminer si notre composite subit aussi cette dégradation, une mesure de Carbone Organique Total (Shimadzu TOC-V CSH) a été prise dans une solution alcaline avant et après 4 heures d'immersion de la poudre composite, suivant la méthode décrite par Bessaies-Bey et al., (2021). Les résultats sont résumés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Carbone Organique Total de la solution alcaline avant et après immersion du composite.

Carbone organique extrait (g/L)	
Avant immersion	0,014
Après 4 h d'immersion	23,962

La forte augmentation de la quantité de carbone extraite en solution indique que l'exposition du composite au milieu alcalin entraîne une dégradation de celui-ci, libérant des extractibles organiques en solution. Ainsi, les porosités observées entre la résine et la pâte cimentaire peuvent être également liées à une hydrolyse partielle de la résine. De plus, pour déterminer si ces extractibles organiques libérés lors de l'hydrolyse affectent l'hydratation du ciment nous avons évalué par microcalorimétrie l'évolution du flux de chaleur d'une pâte de ciment en présence de ces extractibles.

C. Suivi de l'hydratation du ciment par microcalorimétrie

Afin d'analyser uniquement l'effet des produits de dégradation relargués en solution, la poudre composite n'a pas été mélangée avec le ciment dans cette partie de l'étude. En revanche, nous utilisons la solution d'extractibles obtenue après l'exposition du composite en milieu alcalin.

Pour le suivi de l'hydratation du ciment, deux pâtes de ciment avec un rapport eau/ciment de 0,5 ont été préparées. Une pâte de référence a été préparée avec la solution alcaline, et une deuxième pâte de ciment a été fabriquée en mélangeant le ciment avec la solution d'extractibles. La concentration de ces extractibles représente un taux de remplacement de 30 % des déchets composites. Un calorimètre isotherme de TA Instruments est utilisé pour déterminer l'évolution du flux de chaleur pendant 24 heures à 23 °C, en introduisant des flacons scellés avec $4 \pm 0,5$ g de pâte de ciment.

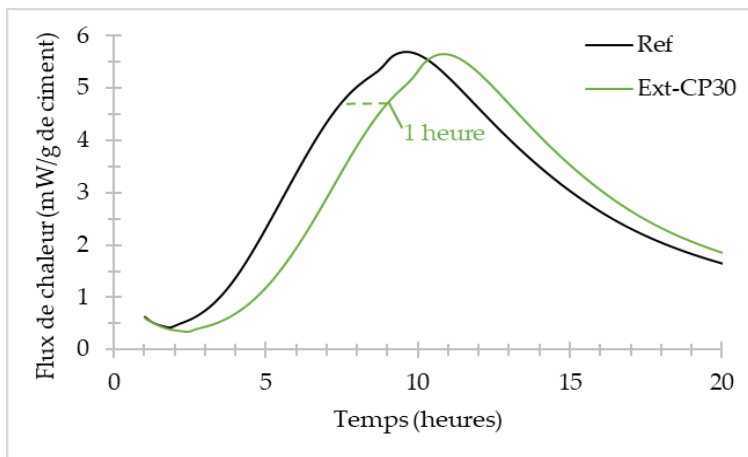


Figure 5. Evolution de l'hydratation des pâtes de ciment.

La Figure 5 montre l'évolution de l'hydratation de la pâte de ciment de référence, et de la pâte de ciment fabriquée avec la solution d'extractibles du composite broyé (CP30). Il est constaté que, malgré que le flux total de chaleur reste inchangé, les extractibles du composite broyé entraînent un retard significatif dans le temps de prise du ciment. Cela montre que la résine contenue dans le composite broyé peut affecter l'hydratation du ciment à court terme. Cependant, les conséquences de ces extractibles sur les performances mécaniques à long terme doivent être explorées davantage.

Des phénomènes similaires ont été observés dans la littérature des bétons biosourcés (Delannoy et al., 2020; Diquélou et al., 2016; Nalet and Nonat, 2016; Xu et al., 2024). Les lixiviats organiques tels que les polysaccharides, les dérivés de saccharides ou les composés phénoliques ont un impact sur l'hydratation du ciment, retardant surtout le temps de prise. Delannoy et al., (2019); Diquélou et al., (2016, 2015) démontrent que les effets négatifs sur l'hydratation du ciment affectent considérablement les propriétés mécaniques des bétons.

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce projet a étudié la valorisation des composites renforcés de fibres de verre en tant que remplacement partiel du ciment. Les valeurs de résistance à la compression à 7, 28 et 91 jours des deux séries de mortiers dans lesquels le ciment est partiellement remplacé par de la poudre de

verre (20 % de verre) et par la poudre composite (20 % de verre + 10 % de résine) montrent que la poudre de composite de fibres de verre est moins efficace pour améliorer la résistance à la compression que la poudre de verre.

L'essai Chapelle nous a permis de constater que les deux poudres présentent une activité pouzzolanique quasi similaire. Ainsi, la moindre efficacité de la poudre de composite renforcés par des fibres de verre dans l'amélioration de la résistance mécanique peut être attribuée à la présence de résine.

Les fractures fraîches des mortiers contenant le composite montrent que la résine crée des mauvaises interfaces, dû à la dégradation chimique de celle-ci en milieu alcalin. De plus, ce phénomène libère des extractibles organiques en solution, qui affectent l'hydratation du ciment, ce qui se manifeste dans les premières heures d'hydratation par un retard dans le temps de prise.

Ce projet développe une nouvelle voie de valorisation des déchets de composites renforcés de fibres de verre issus de différentes industries telles que le transport, l'éolien et le sport. Il permet également de réduire la quantité de ciment utilisée, réduisant ainsi l'empreinte carbone de l'industrie du ciment.

REFERENCES

- Ahmed, N., 2023. Utilizing plastic waste in the building and construction industry: A pathway towards the circular economy. *Construction and Building Materials* 383, 131311. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131311>
- ASTM, 2024. ASTM C109/C109M-23 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 50 mm [2 in.] Cube Specimens).
- Baturkin, D., Hisseine, O.A., Masmoudi, R., Tagnit-Hamou, A., Massicotte, L., 2021. Valorization of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete. *Resources, Conservation and Recycling* 174, 105807. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105807>
- Benmokrane, B., Ali, A.H., Mohamed, H.M., ElSafty, A., Manalo, A., 2017. Laboratory assessment and durability performance of vinyl-ester, polyester, and epoxy glass-FRP bars for concrete structures. *Composites Part B: Engineering* 114, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.002>
- Bessaies-Bey, H., Massoussi, N., Mulik, S., Baumann, R., Schmitz, M., Radler, M., Gelardi, G., Flatt, R.J., Roussel, N., 2021. Polycarboxylate ester adsorption on cement grains: Influence of polydispersity. *Cement and Concrete Research* 143, 106383. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106383>
- Chen, C.H., Huang, R., Wu, J.K., Yang, C.C., 2006. Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. *Cement and Concrete Research* 36, 449–456. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.010>
- Chen, H., Qin, R., Chow, C.L., Lau, D., 2022. Recycling thermoset plastic waste for manufacturing green cement mortar. *Cement and Concrete Composites* 104922. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104922>
- Delannoy, G., Marceau, S., Glé, P., Gourlay, E., Guéguen-Minerbe, M., Diafi, D., Amziane, S., Farcas, F., 2020. Impact of hemp shiv extractives on hydration of Portland cement. *Construction and Building Materials* 244, 118300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118300>

- Delannoy, G., Marceau, S., Glé, P., Gourlay, E., Guéguen-Minerbe, M., Diafi, D., Nour, I., Amziane, S., Farcas, F., 2019. Influence of binder on the multiscale properties of hemp concretes. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 23, 609–625. <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1457571>
- Diquélou, Y., Gourlay, E., Arnaud, L., Kurek, B., 2016. Influence of binder characteristics on the setting and hardening of hemp lightweight concrete. *Construction and Building Materials* 112, 506–517. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.138>
- Diquélou, Y., Gourlay, E., Arnaud, L., Kurek, B., 2015. Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix. *Cement and Concrete Composites* 55, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.004>
- EuCIA, 2024. Enabling circular composites starts with waste codes [WWW Document]. URL <https://eucia.eu/knowledge-hub/position-papers/> (accessed 3.14.25).
- Fonte, R., Xydis, G., 2021. Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials. *Journal of Environmental Management* 287, 112269. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112269>
- Fox, T.R., 2016. Recycling wind turbine blade composite material as aggregate in concrete (Master of Science). Iowa State University, Digital Repository, Ames. <https://doi.org/10.31274/etd-180810-4761>
- France Energie Eolienne, 2022. Observatoire de l'éolien 2022.
- Fu, B., Liu, K.C., Chen, J.F., Teng, J.G., 2021. Concrete reinforced with macro fibres recycled from waste GFRP. *Construction and Building Materials* 310, 125063. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125063>
- Gennitsaris, S., Sagani, A., Sofianopoulou, S., Dedoussis, V., 2023. Integrated LCA and DEA approach for circular economy-driven performance evaluation of wind turbine end-of-life treatment options. *Applied Energy* 339, 120951. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120951>
- Hosokawa Alpine Group, n.d. AFG [WWW Document]. Hosokawa Alpine. URL <https://www.hosokawa-alpine.com/powder-particle-processing/machines/jet-mills/afg/> (accessed 3.25.24).
- Li, X., Snellings, R., Antoni, M., Alderete, N.M., Ben Haha, M., Bishnoi, S., Cizer, Ö., Cyr, M., De Weerd, K., Dhandapani, Y., Duchesne, J., Haufe, J., Hooton, D., Juenger, M., Kamali-Bernard, S., Kramar, S., Marroccoli, M., Joseph, A.M., Parashar, A., Patapy, C., Provis, J.L., Sabio, S., Santhanam, M., Steger, L., Sui, T., Telesca, A., Vollpracht, A., Vargas, F., Walkley, B., Winnefeld, F., Ye, G., Zajac, M., Zhang, S., Scrivener, K.L., 2018. Reactivity tests for supplementary cementitious materials: RILEM TC 267-TRM phase 1. *Mater Struct* 51, 151. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1269-x>
- Nalet, C., Nonat, A., 2016. Retarding effectiveness of hexitols on the hydration of the silicate phases of cement: Interaction with the aluminate and sulfate phases. *Cement and Concrete Research* 90, 137–143. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.09.018>
- Soliman, N.A., Tagnit-Hamou, A., 2016. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete. *Construction and Building Materials* 125, 600–612. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.073>
- Tangler, J., 2000. The Evolution of Rotor and Blade Design.
- Tao, Y., Hadigheh, S.A., Wei, Y., 2023. Recycling of glass fibre reinforced polymer (GFRP) composite wastes in concrete: A critical review and cost benefit analysis. *Structures* 53, 1540–1556. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.018>

- Thomas, M.D.A, Smith, D, Moffatt, E.G, Kasaniya, M, 2021. The Use of Ground Glass as a Pozzolan. SP 349, 752–761. <https://doi.org/10.14359/51732786>
- Xu, W., Mance, D., d’Espinose de Lacaillerie, J.-B., Flatt, R.J., 2024. A sweet answer to how sucrose delays tricalcium silicate hydration. *Cement and Concrete Research* 181, 107531. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107531>
- Yazdanbakhsh, A., Bank, L.C., Rieder, K.-A., Tian, Y., Chen, C., 2018. Concrete with discrete slender elements from mechanically recycled wind turbine blades. *Resources, Conservation and Recycling* 128, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.005>
- Zhang, W., Yu, H., Yin, B., Akbar, A., Liew, K.M., 2023. Sustainable transformation of end-of-life wind turbine blades: Advancing clean energy solutions in civil engineering through recycling and upcycling. *Journal of Cleaner Production* 426, 139184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139184>