

21^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Polytechnique Montréal, Montréal, Canada
5 et 6 juillet 2023

RÉSIDUS INDUSTRIELS ET MATÉRIAUX CIMENTAIRES : COMMENT RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE GES DANS LE DOMAINE DE LA CONSTRUCTION ?

F. Delobel^A, P. Lemoine^A, J.-F. Vermette^A

À Centre de transfert technologique en écologie industrielle (CTTÉI), Sorel-Tracy, Canada

RÉSUMÉ : La production mondiale de ciment Portland est responsable d'environ 8 % des émissions totales de gaz à effet de serre d'origine anthropique. Devant ce constat environnemental, le gouvernement du Canada a annoncé vouloir décarboner l'industrie du ciment et du béton d'ici 2050. Le CTTÉI participe à cette mission par sa thématique de valorisation de résidus industriels. Plusieurs projets de recherche menés au Centre ont démontré la possibilité : i) d'incorporer des résidus industriels, des sédiments de dragage et de la peinture en substitution au ciment, aux granulats et à l'eau de gâchage dans une formulation de béton pour trottoirs, ii) de développer une formulation de ciment sulfoalumineux bélitique à partir de résidus industriels (réduction de 30 % des émissions de CO₂ lors de sa fabrication), et iii) de réaliser des matériaux géopolymères avec des résidus industriels et miniers pour remplacer l'entièreté du ciment dans les essais de fabrication de béton.

1. INTRODUCTION

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé à travers le monde. La production mondiale de ciment Portland est estimée à plus de 4 milliards t/an et est responsable d'environ 8 % des émissions totales de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique (Duchesne, 2021; Lehne & Preston, 2018). Ces émissions proviennent des combustibles nécessaires pour atteindre la température de production ($\approx 1\,450\text{ °C}$), et de la réaction de calcination du calcaire, qui libère du CO₂ à ces températures (jusqu'à $\approx 0,9\text{ kg}$ de CO₂ émis par kg de ciment produit). Des études de marché, basées sur les prévisions d'augmentation de la demande en béton, ont conclu qu'il serait impossible d'atteindre les cibles de réductions d'émission de GES de l'accord de Paris en continuant d'utiliser le ciment Portland comme principal liant dans le béton (Lehne & Preston, 2018; Mehta, 2007). Devant ce constat environnemental majeur, le gouvernement du Canada a récemment annoncé la volonté de décarboner l'industrie du ciment et du béton d'ici 2050 (Gouvernement du Canada, 2021).

Le CTTÉI, centre collégial spécialisé en écologie industrielle, s'est donné pour mission de participer à cette décarbonation à travers sa thématique de valorisation de résidus industriels. Plusieurs projets de recherche ont été menés au Centre pour couvrir 3 sujets principaux en lien avec cet objectif : l'incorporation des résidus dans les formulations de bétons, la fabrication de ciments bas carbone et le développement de formulations de géopolymères.

Différents projets ont démontré la possibilité d'utiliser des résidus industriels (cendres, silice amorphe, résidus marins, etc.) en substitution au ciment Portland ou comme ajout dans une formulation de béton pour trottoirs, tout en obtenant une résistance mécanique à 28 jours équivalente, voire supérieure. Des essais parallèles ont même montré la possibilité de substituer une partie de la fraction granulaire aux résidus marins non broyés ou des sédiments de dragage (marin ou d'eau douce). Finalement, des essais pilotes ont même mis en évidence la possibilité de substituer une partie de l'eau de gâchage aux résidus de peinture au latex.

Un autre projet du CTTÉI a permis de développer une formulation de ciment sulfoalumineux bélitique à partir de résidus industriels tels que des fines de calcaires, des poussières calciques de four à chaux, des cendres volantes et des fines d'oxydes de fer. Le développement d'un tel matériau permet l'obtention d'un clinker à basse température ($\approx 1\ 200\ ^\circ\text{C}$), ce qui réduit à la fois les coûts énergétiques et les émissions de CO_2 ($\approx 30\ \%$) lors de sa fabrication.

Finalement, d'autres travaux du CTTÉI ont mis en évidence la possibilité de réaliser des matériaux géopolymères avec des résidus miniers. Ces formulations ont permis de remplacer l'entièreté du ciment dans les essais de fabrication de béton pour trottoirs.

Cet article présente les résultats les plus récents obtenus par l'équipe du CTTÉI et propose des pistes de recherche pour le futur.

2. INCORPORATION DE RÉSIDUS DANS LES BÉTONS

Dans le cadre de ses activités concernant la valorisation des résidus industriels, le CTTÉI est régulièrement sollicité pour des recherches de débouchés. Plusieurs de ces résidus inorganiques présentent un fort potentiel de valorisation en tant qu'ajout ou substitut des constituants du béton. Pour valider ce potentiel, le CTTÉI réalise des essais d'incorporation de ces résidus dans une formulation de béton pour trottoir (béton de type C-2 (ABQ, 2018)), dans laquelle différents taux de substitution des constituants sont remplacés par les résidus. Les propriétés à l'état frais et durci sont alors caractérisées selon la norme CSA A23.2 (CSA, 2019) et comparées aux critères en vigueur dans la réglementation pour ce type de béton (Tableau 1).

Tableau 1 Critères requis pour une formulation de béton de type C-2 (ABQ, 2018).

Critère	Résistance à 28 jours (MPa)	Teneur en air (%)	Affaissement (mm)	Température de livraison ($^\circ\text{C}$)
Valeur cible	> 32	5 – 8	80 ± 30	10 – 32

2.1 Substitution cimentaire

Au cours de ses différents mandats, le CTTÉI a eu l'occasion de caractériser le potentiel de valorisation de nombreux résidus fins en tant que substitution au ciment Portland dans la formulation de béton pour trottoirs. Outre l'incorporation de sous-produits classiques tels que les cendres volantes, les laitiers de hauts fourneaux et des *fillers* calcaires, dont les propriétés sont bien connues (résistance supérieure à 40 MPa après 28 jours (Giergiczny, 2019)), de nombreux résidus ont fait l'objet d'études au laboratoire : poudre de verre, silice amorphe, boues d'assainissement des eaux, cendres de biomasse et résidus marins. Après caractérisation des résidus pour évaluer leurs propriétés physico-chimiques et infirmer leur classification en tant que matière dangereuse (Gouvernement du Canada, 2022), des essais d'incorporation ont été réalisés au laboratoire du CTTÉI.

Les essais d'incorporation de cendres de biomasse ont montré la possibilité de substituer jusqu'à 20 % massique de ciment Portland dans la recette tout en conférant au béton une résistance mécanique comprise entre 35 et 45 MPa selon le type de cendre (légère ou lourde). Cependant, il est important de noter que cette substitution influence la maniabilité du mélange à l'état frais et nécessite donc un apport

supplémentaire en adjuvants (entraîneur d'air et superplastifiant) pour atteindre les propriétés requises en termes de teneur en air et d'affaissement.

Les essais de valorisation des résidus de silice amorphe ont, quant à eux, permis de substituer jusqu'à 30 % en masse de ciment Portland dans la formulation de béton tout en maintenant des propriétés d'environ 45 MPa après 28 jours. Cependant, ces essais ont nécessité un ajustement de la teneur en entraîneur d'air et un ajout de superplastifiant pour maintenir les propriétés requises à l'état frais (maniabilité et air entraîné). Il est possible d'observer une augmentation de plus de 10 % (5 MPa) des propriétés mécaniques à 28 jours entre des taux de substitution du ciment par la silice amorphe de 10 % à 30 % massique. Ceci peut être expliqué par la pouzzolanité de la silice amorphe, qui formerait des liaisons C-S-H par réaction avec la portlandite hydratée (hydroxyde de calcium) du ciment.

L'utilisation des boues d'une unité d'assainissement des eaux d'une industrie métallurgique a également permis de remplacer 10 % massique du ciment Portland dans la recette de bétons pour trottoirs, sans affecter les propriétés mécaniques. Les résultats de ce projet ont permis de trouver un débouché de valorisation pour ces boues en tant qu'intrant dans la fabrication de dalles en béton pour l'aménagement paysager.

Finalement, un projet plus récent a mis en évidence la possibilité de substituer jusqu'à 15 % massique de ciment Portland par des résidus marins tels que des coquilles de palourdes ou un mélange de carapaces de homards et de crabes. La Figure 1 illustre une partie des résidus marins utilisés dans le cadre de ce projet.



Figure 1 Illustration des résidus marins entrant dans la recette de bétons pour trottoirs.

Après broyage et tamisage pour obtenir la granulométrie désirée, les essais de substitution cimentaire ont montré des résultats prometteurs, avec une résistance mécanique comprise entre 45 et 50 MPa, quel que soit le taux de substitution (5, 10 ou 15 % massique). Un ajustement de la teneur en adjuvant (entraîneur d'air et superplastifiant) a cependant été nécessaire pour obtenir les propriétés désirées en termes d'affaissement et de teneur en air. Cependant, une étape de calcination du mélange de carapaces de homards et de crabes a permis d'éviter l'ajout supplémentaire en adjuvant tout en présentant des propriétés équivalentes à la gâchée contrôle.

L'incorporation des carapaces de homard et de crabe induit néanmoins un effet retardateur sur la prise, en raison de la présence de phosphate dans leur composition chimique, et ce, malgré les essais de calcination. Une cure de 72 h (au lieu de 24 h) a été nécessaire avant le démoulage des éprouvettes.

2.2 Substitution granulaire

Outre les essais de substitution du ciment, certaines cendres résiduelles présentaient une granulométrie pouvant substituer une partie du sable dans la recette de béton pour trottoirs. Ainsi, les cendres lourdes

précédemment décrites ont permis de remplacer 10 % en masse du sable standard tout en conférant au béton une résistance supérieure à 40 MPa et sans affecter ses propriétés à l'état frais.

Des essais d'incorporation de sédiments de rivières ont été réalisés avec des taux de substitution massique de 100 % du sable, 100 % des gravillons et 100 % de la fraction granulaire totale (sable et gravillons). Malgré l'ajout de superplastifiant lors des essais de substitution du sable et de la fraction granulaire totale, les résistances mécaniques à 28 jours montrent des résultats prometteurs, avec des valeurs supérieures à 37 MPa. Les essais d'incorporation des gravillons n'ont, quant à eux, pas nécessité l'ajout de superplastifiant tout en conférant au béton des propriétés similaires.

Finalement, les mêmes résidus marins tels que décrits précédemment (coquilles de palourdes et carapaces de homard et de crabe) ont été utilisés pour des essais de substitution de la fraction sable, tout en limitant la finesse du broyage dans ce cas. Ces essais ont montré la possibilité de remplacer jusqu'à 25 % massique de la fraction sable par ces résidus marins, seuls ou en mélange avec des sédiments de dragage. Malgré l'ajout de superplastifiant pour de hauts taux de substitution, les essais mettent en évidence la possibilité de fabriquer des bétons à partir de résidus marins et de sédiments de dragage et présentant une résistance mécanique à 28 jours comprise entre 37 et 50 MPa en fonction du taux de substitution. Cependant, comme observée lors des essais de substitution cimentaire, la présence de phosphate dans le mélange de carapaces de homards et de crabes a induit un effet retardateur sur la prise cimentaire. Le temps de cure a été doublé (48 h au lieu de 24 h) pour ces essais.

2.3 Incorporation de peinture au latex

Dans le cadre de ses projets de recherche de débouchés pour valoriser les résidus industriels, le CTTÉI a été mandaté pour valoriser des résidus de peinture au latex. La littérature scientifique ayant déjà rapporté des travaux sur l'incorporation de peinture liquide par substitution partielle de l'eau de gâchage (Mohammed et coll., 2008; Nehdi & Sumner, 2003), il a été décidé de réaliser des essais de béton au laboratoire à partir de ces résidus. Alors qu'une légère diminution de la résistance en compression était attendue, ces bétons devaient présenter une résistance accrue aux essais de gel/dégel et une amélioration de la résistance à la pénétration des ions chlorures (sels de voirie).

2.3.1 Essais au laboratoire

Les premiers essais d'incorporation des résidus de peinture au latex ont très vite démontré des résultats prometteurs. En effet, il a été possible de fabriquer des éprouvettes de bétons en substituant jusqu'à 15 % massique l'eau de gâchage par de la peinture au latex. Ces essais ont également permis de diminuer la teneur en entraîneur d'air de moitié, la peinture jouant en partie le rôle de cet adjuvant. Des essais dans un laboratoire spécialisé ont démontré que le réseau de bulles d'air entraînées par la peinture respectait la taille requise ($< 260 \mu\text{m}$) pour conférer au matériau une bonne résistance aux essais de gel/dégel. À noter qu'aucun ajout de superplastifiant n'a été nécessaire pour le bon déroulement des essais.

Enfin, les caractérisations des éprouvettes réalisées au laboratoire ont montré une légère diminution de la résistance mécanique en compression (30 à 35 MPa) par rapport à la gâchée contrôle, ainsi qu'une amélioration de 25 % de la résistance à la perméabilité des ions chlorures.

2.3.2 Essais pilote 1m³

Les résultats à l'échelle laboratoire étant prometteurs, il a été décidé de réaliser une gâchée de 1 m³ dans un camion-malaxeur (Figure 2), et ce, afin de s'assurer du bon déroulement de la production à grande échelle. La recette réalisée au laboratoire a été reprise pour cet essai : une substitution de 15 % massique de l'eau de gâchage par de la peinture liquide et une diminution de moitié de la teneur en entraîneur d'air.



Figure 2 Illustration de l'essai de 1 m³ réalisé dans un camion à béton.

Malgré un affaissement légèrement élevé, la mise en œuvre de ce béton a montré une bonne maniabilité et une teneur en air satisfaisante. Les essais mécaniques ont montré une diminution de la résistance à 28 MPa, contre les 32 MPa requis pour ce type de béton. Cette diminution peut s'expliquer par une teneur en eau trop importante lors de l'ajustement réalisé par les opérateurs du chantier. Ceci pourrait également expliquer les valeurs d'affaissement trop élevées. Une diminution de la teneur en eau pourrait donc améliorer à la fois la valeur de l'affaissement et la résistance mécanique du béton.

2.3.3 Essais pilote 17m³

Finalement, un essai pilote a été réalisé à la Ville de Sorel-Tracy pour la réfection d'une allée piétonnière, devant le bâtiment qui héberge le CTTÉI. Cet essai, qui représente 17 m³ de béton et 340 L de peinture au latex, a été coulé en novembre 2016. Les bordures de l'allée piétonnière ont, quant à elles, été coulées la veille de l'essai pilote, avec une recette de béton typique pour trottoir, afin d'avoir un élément de comparaison. La Figure 3 illustre les étapes de cet essai pilote.



Figure 3 Illustration de la coulée pilote de l'allée piétonnière en béton de 17 m³ avec l'ancienne allée à gauche, la coulée au centre et le trottoir frais à droite.

Le tableau 2 rapporte les résultats des caractérisations à l'état frais et durci du béton coulé à l'échelle pilote, respectivement le béton type pour les bordures et le béton contenant 15 % massique de peinture au latex en substitution à l'eau de gâchage pour le trottoir. Les caractérisations à l'état frais des deux bétons (affaissement et teneur en air) présentaient des valeurs légèrement différentes, mais respectant les normes en vigueur pour un béton pour trottoir. De plus, les opérateurs de chantier ont indiqué que l'incorporation de peinture rendait le béton légèrement collant, mais ne détériorait pas pour autant sa maniabilité. Comme attendu, l'incorporation de peinture a induit une diminution (11 MPa) de la résistance mécanique du béton.

Tableau 2 Résultats de caractérisation de la coulée pilote de béton avec incorporation de peinture

	Résistance à 28 jours (MPa)	Teneur en air (%)	Affaissement (mm)	Réseau d'air – facteur d'espacement (µm)
Valeur cible	> 32	5 – 8	80 ± 30	< 260
Béton type (bordures)	41,59	5,6	70	192
Béton CTTEI (trottoir)	30,42	7,5	110	172

Lors de la coulée pilote, des échantillons de béton ont été coulés dans des moules pour les essais de durabilité. Ainsi, des mesures de perméabilité aux ions chlorures (ASTM, 2022) ainsi que des essais de gel/dégel avec sels de déglacage (BNQ, 2018) ont été réalisés sur les deux types de béton. Concernant les essais de perméabilité aux ions chlorures, les deux bétons se trouvent dans une classe de perméabilité modérée. Cependant, le béton contenant la peinture au latex présente une perméabilité 26 % plus basse que le béton type (2 386 coulombs contre 3 215). Les deux bétons présentent également une très bonne résistance aux essais de gel/dégel, avec une valeur de particules perdues après 56 cycles de 0,01 kg/m² pour le béton type et de 0,00 kg/m² pour le béton avec peinture, contre un maximal de 0,50 kg/m² recommandé par la norme.

Malgré une résistance en compression plus faible, l'incorporation de peinture au latex montre une amélioration de la résistance à la pénétration des ions chlorures et aux essais de gel/dégel comparé à un béton habituellement utilisé pour la fabrication des trottoirs au Québec. Il sera intéressant d'observer à long terme si la valeur de résistance mécanique présente un impact sur la durée de vie de ce trottoir.

3. DÉVELOPPEMENT D'UN CIMENT BAS CARBONE

Dans le but de participer à la décarbonation de l'industrie du ciment au Québec, le CTTEI a mené un projet de R&D pour développer une formulation de ciment sulfoalumineux bélitique (CSAB). Outre la possibilité d'utiliser moins de matière première calcaire et de diminuer la température de cuisson du clinker pour réduire de 30 % les émissions de CO₂, ce projet consistait à développer une formulation de ciment à partir de résidus industriels.

3.1 Choix des résidus

Le choix des résidus pour la fabrication du CSAB a été réalisé grâce à leur composition chimique afin d'obtenir un clinker avec une certaine minéralogie après cuisson. Ainsi, 5 résidus ont été sélectionnés grâce à leur composition riche en oxydes CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ou CaSO₄ : des fines de calcaire (filler), des poussières calciques de four à chaux, des boues sèches de polissage, des cendres volantes d'incinération ainsi que des fines d'oxydes de fer. Des matières premières non résiduelles telles que du sable de fonderie, de l'alumine de laboratoire et du plâtre de Paris ont été utilisées dans les recettes de CSAB afin d'adapter les quantités d'oxydes en fonction des phases requises pour le clinker.

Pour chacune des matières résiduelles, des analyses chimiques ont été réalisées afin de vérifier leur caractère non dangereux (analyse chimique et métaux totaux). Des analyses DRX ont permis de déterminer leur minéralogie pour l'optimisation des recettes. Enfin, certaines matières ont nécessité un broyage préalable afin d'obtenir la granulométrie optimale (c.-à-d. 100 % de passant au tamis 125 µm).

3.2 Préparation des compositions de ciment CSAB et essais de fabrication

Différentes recettes de CSAB ont été mises au point à partir de la composition chimique et minéralogique des résidus disponibles. Ces recettes ont été optimisées grâce au logiciel Excel avec le module additionnel

« solver ». Le tableau 3 répertorie les proportions massiques de chacune des phases cimentaires désirées après cuisson, comparées à celles d'un ciment Portland classique de référence (CP-réf).

Tableau 3 Teneurs cibles des phases cimentaires désirées après cuisson pour les recettes de ciment optimisées

Clinker de ciment	C ₃ S (%)	C ₄ A ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)	C ₁₂ A ₇ (%)	C \bar{S} (%)
CSAB	-	20 – 35	20 – 75	0 – 10	10 – 25	0 – 10	0 – 10
CP-réf	60	-	20	10	10	-	-

Avec C : CaO, S : SiO₂, A : Al₂O₃, F : Fe₂O₃, \bar{S} : SO₃

Après modélisation des recettes, les différentes matières premières ont été mélangées selon les proportions optimisées et pressées pour obtenir des pastilles de différentes compositions. Des essais d'optimisation de cuisson à différentes températures et de temps de paliers ont été réalisés sur les échantillons pressés. L'aptitude à la cuisson de ces échantillons de clinker a été déterminée par mesure du CaO libre après cuisson. Le tableau 4 rapporte les valeurs de CaO libre déterminées après cuisson à différentes températures pour les 5 recettes de CSAB les plus prometteuses. Le temps de palier à température maximale a été fixé à 20 minutes grâce à des essais préliminaires. À noter que la valeur de CaO libre ne devrait pas dépasser les 2 % massique pour un clinker optimisé. Ces résultats montrent que seules les recettes CSAB-4 et CSAB-5 présentent une bonne aptitude à la cuisson à température haute et moyenne (c.-à-d. respectivement 1 300 °C et 1 250 °C). De plus, seule la composition CSAB-5 permet d'obtenir un clinker de bonne qualité à la température la plus basse (1 200 °C).

Tableau 4 Teneur (% massique) en CaO libre déterminée après cuisson de 5 recettes de CSAB optimisées en fonction de la température de cuisson

Clinker	1 200 °C	1 250 °C	1 300 °C
CSAB-1	-	5,0 %	-
CSAB-2	-	7,7 %	7,5 %
CSAB-3	-	12,7 %	-
CSAB-4	4,6 %	0,7 %	0,5 %
CSAB-5	1,1 %	0,1 %	0,1 %

Des analyses DRX ont permis de corroborer ces résultats. En effet, les recettes CSAB-1, CSAB-2 et CSAB-3 présentent une phase minéralogique résiduelle indésirable : la phase bélite γ (γ -C₂S) (Le Saoût et coll., 2011; Taylor, 2004). De plus, les pastilles réalisées à partir de ces mêmes recettes ne résistent pas à la cuisson et se désintègrent. La Figure 4 illustre l'évolution de la composition optimisée CSAB-5 en fonction de la température de cuisson.

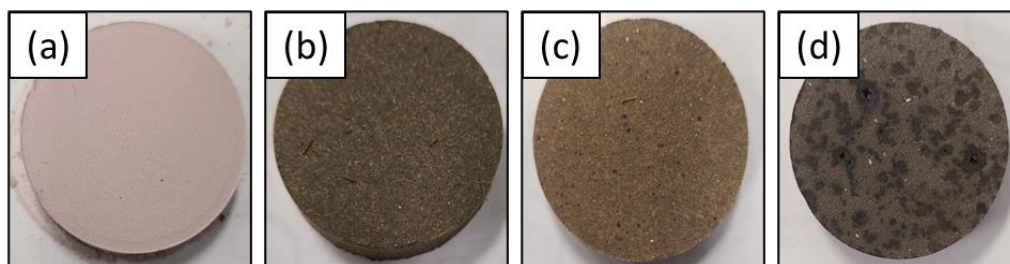


Figure 4 Évolution de composition optimisée CSAB-5 en fonction de la température de cuisson : (a) température ambiante (cru), (b) 1 200 °C (c) 1 250 °C et (d) 1 300 °C.

Finalement, le projet réalisé au CTTÉI a permis de mettre en évidence la possibilité de développer une composition optimisée de CSAB à partir de résidus industriels, présentant la minéralogie finale visée et une bonne aptitude à la cuisson. Des essais d'optimisation ont permis de déterminer une température optimale de cuisson située entre 1 200 et 1 250 °C, soit plus de 200 °C en dessous de la température nécessaire à la fabrication d'un clinker de ciment Portland ordinaire. Cette composition permet ainsi de réduire de 30 % les émissions de GES comparé à la fabrication d'un ciment ordinaire. Des travaux supplémentaires seraient nécessaires afin de trouver des matières résiduelles pour remplacer le sable, l'alumine et le plâtre de cette recette afin de réduire encore plus l'impact carbone de la fabrication de ce CSAB. Des essais de fabrication de bétons en remplaçant le ciment Portland ordinaire par le CSAB optimisé sont prévus dans la prochaine étape de cette étude.

4. FORMULATION DE GÉOPOLYMÈRES

La dernière thématique sur laquelle le CTTÉI travaille dans le but de décarboner l'industrie du ciment et du béton est la fabrication de géopolymères. Ces matériaux résultent de l'activation alcaline de composés aluminosilicates, généralement un mélange de métakaolin, une argile calcinée à 700 °C, et des cendres volantes de classes F issues de la combustion du charbon. Ce type de liant permet de remplacer l'intégralité du clinker dans une formulation de béton, ce qui représente un excellent potentiel pour la diminution des émissions de GES dans cette industrie. Cependant, la conception des géopolymères requiert des paramètres expérimentaux précis en termes de composition chimique et de nombreux défis sont encore à relever, notamment concernant l'intégration des résidus industriels dans leur composition (Khale & Chaudhary, 2007).

4.1 Essais de géopolymérisation

Le principal projet de fabrication de géopolymères du CTTÉI concernait la valorisation de résidus miniers riches en silice. En effet, la présence de silice et d'alumine dans leur composition chimique semblait indiquer un potentiel de géopolymérisation et ses résidus ont donc été choisis pour relever ce défi. Après ajustement du ratio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de ces résidus, les premiers essais de géopolymérisation ont montré des résultats assez prometteurs. En effet, les matériaux formulés présentaient des valeurs de résistance à la compression comprises entre 31 et 66 MPa en fonction des recettes utilisées. Ces essais ont été réalisés sur des cylindres 2" x 4" de géopolymères seuls, après 7 jours de cure avec apport thermique. Les résultats montrent donc un fort potentiel quant à l'utilisation de ces résidus pour la fabrication de géopolymères. De plus, les résultats obtenus après seulement 7 jours démontrent un intérêt supplémentaire à utiliser les géopolymères pour remplacer le ciment dans le béton, qui nécessite une cure de 28 jours.

4.2 Essais sur mortiers

Suite aux premiers essais de géopolymérisation, des essais d'incorporation de sable pour la fabrication de mortiers géopolymères ont été réalisés. Les mêmes résidus miniers riches en silice tels que précédemment décrits ont été utilisés. Un plan d'expérience a été réalisé afin d'évaluer la quantité de sable qu'il était possible d'introduire dans la formulation. Ainsi, différents ratios massiques sable/résidu compris entre 1,75 et 2,75 ont été expérimentés. La validité du ratio a été déterminée par des essais de compression après 7 jours de cure. Ces essais (cube 2" x 2") ont démontré qu'il était possible d'obtenir des valeurs de résistance mécanique d'environ 37 MPa avec des ratios sable/résidu de 1,75 et de 2. Au-dessus de ce ratio, les résistances mécaniques obtenues sont trois à quatre fois moindres. Les résultats obtenus sont tout de même prometteurs quant à l'utilisation de ces résidus miniers pour la fabrication de mortiers géopolymères.

4.3 Essais sur bétons

Les essais de fabrication des mortiers géopolymères étant prometteurs, des essais de fabrication de bétons à partir de résidus miniers en intégrant des gravillons en plus du sable ont été réalisés. Suite à une revue de littérature, il a été décidé de fixer les ratios sable/résidu et pierre/sable respectivement à 0,75 et 1,0. Les premiers essais de mélange à la bétonnière n'ont cependant pas été concluants. En effet, une certaine

hétérogénéité a été observée. Des essais d'optimisation ont donc été réalisés et une procédure en deux étapes a été définie : un premier mélange de type « mortier » a été réalisé dans un mélangeur à pâle et les gravillons ont ensuite été ajoutés dans la bétonnière pour un second mélange avec le mortier. Ces essais (cylindre 4" x 8") ont démontré une homogénéisation parfaite des matières et les essais de compression réalisés donnent des valeurs de résistance mécanique de 45 MPa après 7 jours de cure. La Figure 5 illustre la gâchée de la recette optimisée après le mélange à la bétonnière et après démoulage d'un cylindre.



Figure 5 Illustration de la recette de béton-géopolymère optimisée avec la gâchée après mélange à gauche et un cylindre après démoulage à droite.

Les résultats obtenus lors de ce projet démontrent la possibilité de fabriquer à la fois des mortiers et des bétons géopolymères à partir de résidus miniers et industriels. Ces résultats mettent ainsi en valeur le potentiel de remplacer le ciment dans les formulations de béton par des géopolymères et également l'intérêt d'utiliser les résidus dans ces recettes. En raison d'une prise rapide des géopolymères comparée au ciment Portland ordinaire, cette application se révèle particulièrement intéressante pour l'industrie des préfabriqués.

5. CONCLUSION

De nombreux travaux de valorisation de résidus industriels ont été menés au CTTÉI. Ces travaux ont permis de développer de nouveaux matériaux démontrant la possibilité de réduire l'impact carbone des matériaux de construction actuels. En effet, l'incorporation de résidus en tant que substituant au ciment dans les formulations de béton permet de réduire la quantité de clinker nécessaire et limite les émissions de CO₂ associées. La substitution granulaire, quant à elle, permet de limiter à la fois l'utilisation de matières premières naturelles et de réduire la quantité de résidus voués à l'enfouissement. Finalement, l'utilisation de peinture permet de substituer une partie de l'eau de gâchage, denrée qu'il faudrait préserver dans les années futures. La fabrication de liants alternatifs tels que les CSAB et les géopolymères permet de réduire davantage les émissions de GES grâce à l'utilisation d'une quantité moindre de calcaire et une énergie de fabrication plus faible. L'utilisation de résidus dans ces formulations permet également de maximiser la réduction des émissions et de préserver les ressources naturelles.

Les trois thématiques étudiées par le CTTÉI pour participer à la décarbonation de l'industrie du ciment et du béton montrent des résultats prometteurs. Cependant, des pistes sont encore à explorer pour valoriser d'autres types de résidus en substitution aux composants du béton ou pour optimiser les formulations de liants alternatifs comme les CSAB et les géopolymères.

Finalement, la réglementation du Québec est assez stricte quant à l'incorporation de résidus dans les formulations de bétons et ne permet que très peu de matière en substitution aux constituants usuels de ce

matériau. Les matières résiduelles décrites dans cet article ont toutes fait l'objet d'une caractérisation complète afin d'infirmer leur caractère dangereux, selon la Réglementation sur les Matières dangereuses, avant tout essai de substitution. Ces travaux menés au CTTEI montrent qu'il est possible d'intégrer une large gamme de résidus au béton tout en lui conférant de bonnes propriétés. Ces résultats laissent ainsi la porte ouverte quant à la nécessité de faire évoluer la réglementation du Québec afin de permettre l'intégration de ces résidus dans les bétons en vue de participer à la décarbonation de l'industrie du ciment et du béton.

6. RÉFÉRENCES

- ABQ. (2018). *Les classes des bétons* (TechnoBéton - Bulletin Technique N° 16). <https://betonabq.org/wp-content/uploads/techno-beton/TBnum%C3%A9ro16.pdf>
- ASTM. (2022). *ASTM C1202-22. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. <https://www.astm.org/c1202-22.html>
- BNQ. (2018). *BNQ 2621-905/2018. Béton prêt à l'emploi—Programme de certification*. https://www.bnq.qc.ca/images/pdf/Sommaire_SOD/SOD_2621-905_FR_2018.pdf
- CSA. (2019). *CSA A23.1:F19/CSA A23.2:F19. Béton : Constituants et exécution des travaux/Procédures d'essai et pratiques normalisées pour le béton*. <https://www.csagroup.org/fr/store/product/2701210/#:~:text=1%2FA23.,%2C%201960%2C%201942%20et%201929>.
- Duchesne, J. (2021). Alternative supplementary cementitious materials for sustainable concrete structures : A review on characterization and properties. *Waste and Biomass Valorization*, 12(3), 1219-1236. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01068-4>
- Giergiczny, Z. (2019). Fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*, 124, 105826. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105826>
- Gouvernement du Canada. (2021). *Déclaration commune : L'industrie canadienne du ciment et le gouvernement du Canada annoncent un partenariat*. <https://ised-isde.canada.ca/site/ised/fr/declaration-commune-lindustrie-canadienne-ciment-gouvernement-canada-annoncent-partenariat>
- Règlement sur les matières dangereuses—Chapitre Q-2, r.32. Loi sur la qualité de l'environnement, (2022). <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/q-2,%20r.%2032>
- Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development : A review. *Journal of Materials Science*, 42(3), 729-746. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0401-4>
- Le Saoût, G., Kocaba, V., & Scrivener, K. (2011). Application of the Rietveld method to the analysis of anhydrous cement. *Cement and Concrete Research*, 41(2), 133-148. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.10.003>
- Lehne, J., & Preston, F. (2018). Chatham House Report Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete. *Chatam House Report*. www.chathamhouse.org
- Mehta, P. (2007). Sustainability of the concrete industry—Critical issues. *ACI Strategic Development Committee's "Concrete Summit on Sustainable Development"*, Washington DC, 29.
- Mohammed, A., Nehdi, M., & Adawi, A. (2008). Recycling Waste Latex Paint in Concrete with Added Value. *ACI Materials Journal*, 105(4), 367-374.
- Nehdi, M., & Sumner, J. (2003). Recycling waste latex paint in concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(6), 857-863. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01084-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01084-0)
- Taylor, H. F. W. (2004). *Cement chemistry* (2. ed., Repr). Telford.