

Valorisation de gypse recyclé dans la formulation de ciments sursulfatés

Damien Gaudrel¹, Annabelle Phelipot-Mardele¹, Christophe Lanos¹

¹ Univ Rennes, Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, BP 90422, Rennes, France

RESUME Parmi les grands enjeux environnementaux, la production de liants cimentaires limitant l'émission de CO₂ est un sujet d'actualité. Cette étude s'intéresse à la valorisation de gypse recyclé provenant d'un centre de tri de déchets du BTP dans la formulation d'un ciment sursulfaté (CSS). Les formulations envisagées correspondent au couplage d'un laitier, de gypse recyclé et de ciment Portland jouant ici le rôle de source de clinker. Différentes formulations de liants correspondant à des dosages en laitier constant, en ciment constant ou à des ratios ciment/gypse et enfin ciment/laitier constants sont envisagées. Les liants CSS ainsi formulés ont été caractérisés en compression sur mortiers à 2, 7, 28 et 60 jours selon la norme EN-196. Les résultats montrent la pertinence de l'utilisation d'un gypse recyclé dans la confection d'un CSS et la sensibilité au dosage des activateurs de celui-ci, soit le gypse et le clinker.

Mots-clés ciment sursulfaté, gypse, recyclage, laitier de haut fourneau, ciment bas carbone

I. INTRODUCTION

L'industrie cimentière représente, en France, 23% des émissions de CO₂ de toute l'activité industrielle et 3% des émissions totales nationales. La production du clinker résulte de la calcination d'un mélange de 80% de calcaire et 20% d'argile à 1450°C. Les émissions de CO₂ associées sont, pour un tiers, liées à l'énergie du process de calcination et, pour deux tiers, liées à la décarbonatation du calcaire. Bien que les process industriels se soient améliorés sur l'aspect énergétique, l'impact carbone est directement proportionnel à la teneur en clinker. Une tonne de ciment CEM I produite génère 765 kg de CO₂ eq (SETEC-LERM, 2021). Le laitier de haut fourneau (LHF) peut constituer une alternative au ciment. Coproduit de la fonte, il correspond à la gangue stérile du minerai de fer et de cendres de coke. S'il subit une trempe à son extraction du haut fourneau sous sa forme liquide, le laitier est dit vitrifié ; l'énergie interne ainsi conservée lui apporte des propriétés hydrauliques. Sa production est associée à l'émission de 16 kg de CO₂ eq par tonne. Le laitier activé par une activation sulfato-calciq (gypse/clinker ou chaux) constitue la base de formulation des ciments sursulfatés. Ce type de liant présente donc un impact carbone considérablement diminué par rapport au ciment Portland. Cette étude propose, afin de réduire encore plus l'impact environnemental de tels liants, l'utilisation d'un gypse issu du recyclage de déchets du bâtiment dans la composition du ciment sursulfaté. L'effet de la teneur en gypse ou en CEM I dans la formulation de CSS est évalué en étudiant l'évolution des résistances à la compression sur mortiers à plusieurs échéances.

II. MATERIAUX & METHODES

Le laitier granulé de haut fourneau moulu utilisé dans cette étude, fourni par ECOCEM, provient de Dunkerque. La composition de ce laitier indiquée sur sa fiche technique est rappelée dans le Tableau 1. Le diamètre médian (d_{50}), donné par la fiche technique, est de 11 μm .

TABLEAU 1. Composition du laitier granulé de haut fourneau moulu – Dunkerque (en %m)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ SO ₃	CaO	MgO	TiO ₂	SO ₃	Cl ⁻	S ²⁻	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O _{eqv.}
35,1	11,1	0,4	42,1	7,0	0,8	0,1	0,03	0,6	0,21	0,43	0,48

Le gypse provient d'une usine de recyclage de gypse (VEOLIA). Ce dernier est issu du traitement de la collecte multi-sourcée (plaques et carreaux de plâtre) de déchets de chantiers et de déchetteries. Initialement d'une granulométrie de 5/20 mm, le mélange subit un broyage complémentaire. Le diamètre médian (d_{50}) mesuré par granulométrie laser est de 7 μm et 100% des grains restent inférieurs à 40 μm . La composition déterminée par ATG permet de calculer les dosages en gypse, calcite ainsi qu'en carton (Tableau 2). Pour un dosage en gypse donné, la teneur en CaSO₄ peut ainsi être identifiée. La source de clinker est un ciment Portland CEM I de LafargeHolcim, dont la teneur en clinker est comprise entre 95 et 100% selon la norme EN-197.

TABLEAU 2. Composition du gypse recyclé (en %m)

CaSO ₄ ·2H ₂ O	CaCO ₃	Carton
81,0	9,4	1,1

Selon la norme NF EN 15743, un ciment sursulfaté doit respecter les limites de composition indiquées dans le Tableau 3. Différentes formulations de liant sont envisagées. La première partie de l'étude s'intéresse à la formulation de CSS présentant un dosage constant en LHF, fixé à 83,4 %, valeur sélectionnée à l'issue d'une pré-étude sur la base des travaux de (Baux et al. 2013). Les dosages en CEM I varient de 0,25 à 3,8 % et les dosages en CaSO₄ varient de 16,35 à 12,8%. Une seconde série de formulation de CSS est réalisée en variant le dosage en laitier de 80 à 93,6 % tout en maintenant un paramètre de formulation constant, comme suit :

- CEM I / CaSO₄ = 9,21 ; dosage en CEM I compris respectivement entre 1,69 % et 0,54 %
- CEM I = 0,6 % ; dosage en CaSO₄ compris respectivement entre 19,4 % et 5,8 %
- CEM I / LHF = 0,72 ; dosage en CEM I compris respectivement entre 0,58 % et 0,67 %

Tous les liants formulés sont utilisés pour produire des mortiers selon la norme EN-196. Le rapport massique eau/liant est maintenu égal à 0,5 et liant/sable maintenu à 1/3. Un superplastifiant (Sika Krono 20HE) a été utilisé, si nécessaire, pour maintenir l'ouvrabilité des mortiers (iso-étalement à un test de type consistomètre Vébé adapté aux mortiers). Les éprouvettes 4x4x16 cm³ sont démoulées à 48 h et conservées immergées. Les résistances en compression sont mesurées à 2, 7, 28 et 60 jours.

TABLEAU 3. Composition d'un ciment sursulfaté (en %m)

LHF	CaSO ₄	Clinker	Constituant secondaire
≥ 75	5 ≤ Cs ≤ 20	0 < K ≤ 5	0 ≤ A ≤ 5

III. ANALYSE DES RESULTATS & DISCUSSION

Les résistances en compression sur les mortiers de CSS formulés à dosage en laitier constant indiquent une forte sensibilité au dosage en CEM I (Fig. 1). Un optimum est obtenu pour un dosage en CEM I de 0,54%, quel que soit l'âge du mortier. L'identification d'un optimum en CEM I a déjà été observée dans la littérature (Baux et al. 2013). De manière étonnante, les résistances mécaniques au-delà de ce dosage chutent jusqu'au dosage en CEM I de 2,5%. Au-delà, les résistances mécaniques remontent légèrement, le liant évoluant vers un ciment composé CEM III/C.

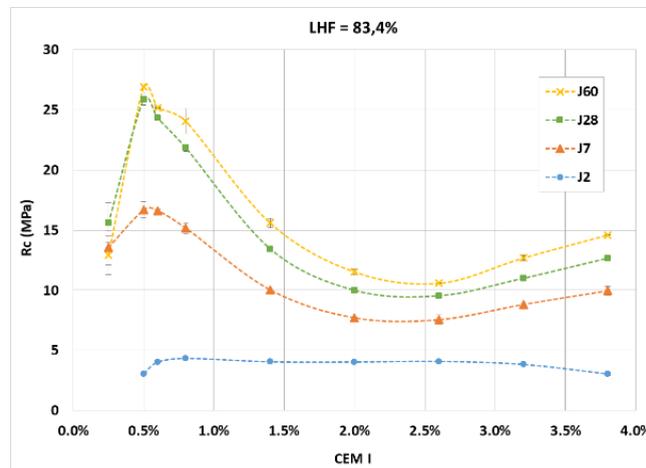


FIGURE 1. Résistances en compression des mortiers de CSS à LHF constant (83,4%)

Les résistances en compression des mortiers réalisés à LHF variable, en première lecture de la Fig. 2a, s'avèrent croissantes avec le dosage en LHF pour un ratio « CEM I / CaSO₄ » fixe. La Fig. 2b suggère que fixer le dosage en CEM I proche de l'optimum identifié sur la Fig. 1 permet d'assurer des résistances en compression quasiment indépendantes du dosage en LHF. Les résultats obtenus pour un ratio « CEM I / LHF » fixe amènent à des conclusions similaires (Fig. 2c). On note cependant une légère amélioration des résistances à 28 et 60 jours pour des dosages en LHF suffisamment élevés.

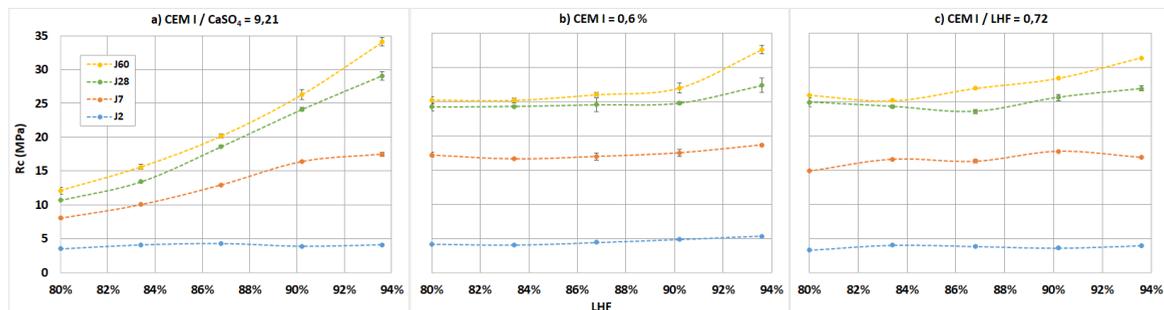


FIGURE 2. Résistances à la compression des mortiers de CSS à LHF variable

Afin de mieux confronter les résultats obtenus avec les deux séries, une comparaison entre les résistances en compression des séries LHF constant (Fig. 1) et variable (Fig. 2a) est proposée sur la Fig. 3 (Rc en fonction du dosage en CEM I). La bonne superposition des courbes obtenues confirme

la prépondérance du dosage en CEM I vis-à-vis des résistances mécaniques. Pour un dosage en CEM I inférieur à 1 % et au-delà de 7 jours, il semble bien qu'une teneur plus élevée en LHF (courbes en trait pointillé) conduit à des résistances plus élevées.

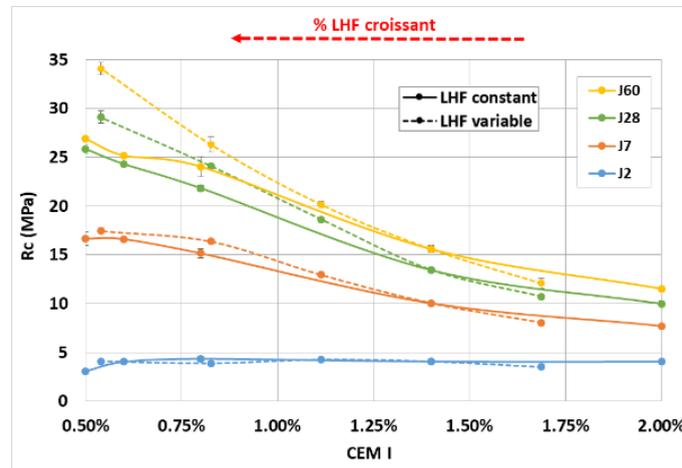


FIGURE 3. Comparaison des résistances en compression des mortiers de CSS à LHF constant et variable

Les résultats montrent toute la pertinence de la valorisation de gypse recyclé dans la confection d'un CSS : les résistances à 28 jours atteignant 30 MPa légèrement inférieures aux résultats de Baux et al. (2013) obtenus avec une anhydrite. La sensibilité du dosage des activateurs est mise en évidence. Les formulations envisagées indiquent que les performances mécaniques sont principalement régies par le dosage en clinker (ici CEM I). Un optimum, voisin de 0,5%, de CEM I, permet d'obtenir les meilleures performances mécaniques. Dans ces conditions, pour les formulations testées, le dosage en CaSO_4 évolue entre 5,86 % et 16,1%. L'identification d'un dosage optimum en CaSO_4 reste donc à évaluer.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier VEOLIA, et plus particulièrement Marie Glorennec pour le soutien financier au projet, sur lequel s'appuie ces résultats.

REFERENCES

Baux, C., Phelipot-Mardelé, A., Lanos, C., Pierre, A., Guilbert, J. (2013). Performance of sulfated cements. *CONSEC'2013*, Nanjing, China. RILEM PRO 84 : pp.1857-1870 - ISBN 978-2-35158-124-7

ECOCEM. Consulté le 03/2022 sur : <https://ecocem.fr>

L'info Durable (2021). Pollution : les industries du ciment et du béton s'attaquent à leurs émissions de CO_2 . Consulté le 03/2022 : <https://www.linfodurable.fr/environnement/pollution-les-industries-du-ciment-et-du-beton-sattaquent-leurs-emissions-de-co2>

SETEC-LERM (2021). *Béton Bas Carbone : Perspectives et Recommandations*. Edition 2021, France : AQC, Réf MU2103. 24p.