

Optimisation de liants ternaires bas carbone, à base de déchets minéraux : Impact sur les performances mécaniques et sur certains indicateurs de durabilité

Selma BELLARA^{1,2}

¹ Laboratoire des Matériaux, Géotechnique, Habitat et Urbanisme (LMGHU), Université 20 Août 1955 Skikda, ALGERIE

² IMT Nord Europe, Junia, Univ. Artois, Univ. Lille, ULR 4515 Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), F-59000 Lille

RESUME

L'intégration de déchets comme matières premières secondaires dans les matériaux de construction fait désormais l'objet de réflexion de plusieurs scientifiques et industriels. Ceci permet, d'un côté, de réduire l'impact carbone du secteur du BTP, et d'un autre de préserver les ressources naturelles. Le remplacement du ciment par ces additions minérales (cendres volantes, fumées de silice, etc.) a suscité plusieurs études ces dernières années. Cependant, les quantités disponibles de ces matériaux restent limitées au regard de la demande croissante du marché. Le présent article s'inscrit dans le cadre d'une logique d'économie circulaire et de développement durable, visant à optimiser les filières de valorisation de déchets (sédiments de barrage, laitier de hauts-fourneaux) en tant que matériaux de construction. Deux volets ont été abordés, le premier concerne l'élaboration d'éco-liants ternaires à base de sédiments de dragage et de sous-produits industriels locaux et le deuxième s'intéresse à l'impact de ces éco-liants sur certains indicateurs de durabilité (porosité par intrusion de mercure et teneur en portlandite).

Mots-clefs : sédiments, laitier de hauts-fourneaux, éco-liants, durabilité, économie circulaire

I. INTRODUCTION

Des opérations de dragage régulières sont nécessaires au maintien du bon fonctionnement des infrastructures hydrauliques et à la prolongation de leur durée de vie. Cependant, la gestion des quantités de sédiments générées par ces opérations est devenue une véritable problématique pour les gestionnaires de ces ouvrages. De ce fait, la recherche de voies de valorisation de ces sédiments demeure une priorité majeure. Par ailleurs, la recherche de nouvelles ressources est primordiale pour faire face à la demande croissante en matériaux de construction (ciment, granulats). En effet, durant les dernières 65 années, les quantités de ciment produites ont augmenté de plus de 34 fois, alors qu'en parallèle la population a seulement triplé sur la même

période (K. L. Scrivener et al., 2018). En Algérie, la production locale du ciment s'élève à 18 millions de tonnes/an, avec un déficit de 5 millions de tonnes/an pour couvrir la demande croissante du marché (Laoufi et al., 2016). En outre, elle seule, l'industrie cimentaire est responsable de l'émission de 5-8% des émissions mondiales de gaz à effet de serre (Yu et al., 2021). La solution la plus adéquate et la plus économique reste le remplacement du ciment par des additions minérales (K. Scrivener et al., 2018). Cette solution contribue également à la préservation des ressources naturelles, qui deviennent de plus en plus rares (Juenger et al., 2019). De plus, leur production nécessite une plus faible énergie comparée à celle nécessaire pour la production du ciment portland. De nombreuses études antérieures se sont intéressées aux caractéristiques pouzzolaniques des additions minérales à moyen et à long terme et leurs effets positifs sur les performances mécaniques et de durabilités des matrices cimentaires. Plusieurs chercheurs se sont orientés vers l'utilisation des sédiments dans le domaine du BTP, étant un grand consommateur de matières premières. Dans cette étude, la méthodologie d'optimisation d'éco-liants ternaires intégrant des sédiments de barrage calcinés est d'abord présentée. Par la suite, une étude de l'impact de l'utilisation de ces liants ternaires sur certains indicateurs de durabilité (teneur en portlandite et la porosité) a été évoquée.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Caractérisation des matériaux

Une caractérisation physico-chimique, minéralogique et environnementale a été menée sur les sédiments du barrage de Zardezas (Algérie), les laitiers de hauts-fourneaux (LHF) provenant du complexe sidérurgique d'El-Hajar (Algérie) et le ciment CEM I 42.5N. Les sédiments de dragage sont constitués de plus de 90% de fines ($\% < 80 \mu\text{m}$). Selon l'analyse minéralogique, les sédiments de Zardezas contiennent principalement les trois phases suivantes : les silicates (Silice), les carbonates (la calcite et la dolomite) et les argiles (Kaolinite, Albite, Chlorite et de l'Illite). L'innocuité environnementale des sédiments a été évaluée à travers des essais de lixiviation selon la norme NF EN 12457-2: 2002. Les résultats de ces analyses ont révélé que ces sédiments sont classés comme déchet inerte, conformément aux seuils définis par l'arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI). Dans le TABLEAU 1, ci-dessous, sont présentées les propriétés physico-chimiques des différents matériaux utilisés ici.

TABLEAU 1. Propriétés physico-chimiques des différents matériaux utilisés.

Propriétés Physiques	Sédiments calcinés	CEM 42,5N	LHF
<i>SS BET (cm^2/g)</i>	2508	9194	9171
<i>Densité (g/cm^3)</i>	2,75	3,16	2,95
<i>D10 (μm)</i>	84,19	1,09	0,73
<i>D50 (μm)</i>	100	12,09	5,70
<i>D90 (μm)</i>	100	43,50	20,09
Eléments majeurs (%)			
SiO ₂	51,84	17,13	34,35
Al ₂ O ₃	19,23	4,51	7,83
FeO ₃	6,92	2,95	0,76
CaO	10,2	60,13	41,47

Le choix de la filière de valorisation a été déterminé en se basant sur le diagramme ternaire illustré sur la FIGURE 1. Il apparaît que la composition chimique des sédiments calcinés est assez proche de celle des cendres volantes et des pouzzolanes naturelles. Ceci est un indicateur déterminant du potentiel pouzzolanique des sédiments calcinés. De ce fait, leur utilisation des sédiments calcinés de Zardezas en tant qu'addition minérale dans les matériaux cimentaires est favorisée.

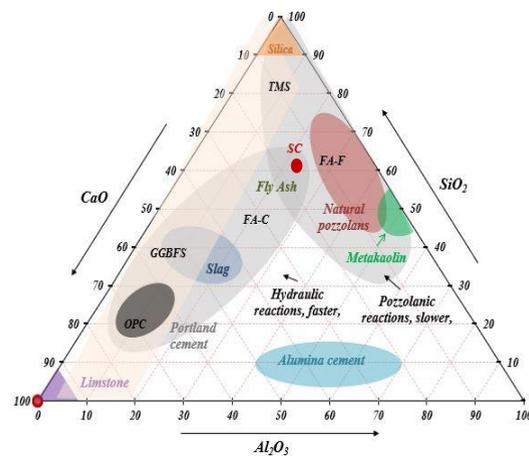


FIGURE 1. Disposition des sédiments calcinés dans le diagramme ternaire

B. Optimisation d'éco-liants ternaires à base de sédiments calcinés et de LHF

La température de calcination permettant d'avoir une activation thermique optimale des sédiments a été déterminée par analyse thermogravimétrique (ATG). Selon les résultats de cette analyse, la déshydroxylation des minéraux argileux et la décarbonatation des carbonates présents dans les sédiments de Zardezas ont été observées dans l'intervalle de variation de température compris entre 350°C et 800°C. D'après ces résultats, la température de calcination permettant d'avoir une activation thermique optimale des sédiments est de 800°C. Le temps nécessaire/optimal à la calcination des sédiments, a été déterminé selon un suivi de perte de masse à 800°C, en fonction du temps. D'après les résultats de cette analyse, la durée de calcination a été fixée à 1h (Benzerzour et al., 2018).

Dans le cadre de cette étude un plan de mélange a été conçu pour l'optimisation de liants hydrauliques. Les plans de mélange permettent d'évaluer simultanément les effets des facteurs (variables d'entrée) sur les réponses du système (variables de sortie) à l'aide de la méthode de surface de réponse (MSR). Les plans de mélange présentent l'avantage de fournir un maximum d'informations pour un nombre réduit d'expériences (un double gain, de temps et de coûts). Le logiciel Design expert a été utilisé afin d'évaluer l'effet du ciment (C) (X1), du laitier de hauts-fourneaux (LHF) (X2) et des sédiments calcinés (SC) (X3) sur la résistance à la compression simple du mortier après 28 jours de cure. Il est à noter que la somme des composants (X1, X2 et X3) est égale à 1 (équation(1)). Les valeurs limites inférieures et supérieures attribuées aux différents facteurs du plan de mélange sont présentées dans le TABLEAU 2.

$$\sum_{i=1}^{i=n} X_i = 1, \text{ avec } 0 < X_i < 1 \quad (1)$$

TABLEAU 2. Valeurs limites des facteurs (paramètres d'entrée) du plan de mélange.

Valeurs limites	X1 (C)	X2 (LHF)	X3 (SC)
Inférieures	50	0	0
Supérieures	100	50	30

Le domaine expérimental obtenu a été construit à partir d'un modèle polynomial quadratique à l'aide du logiciel Design Expert. Onze mélanges ont été proposés pour être testés. Les mortiers ont été formulés et conservés selon les spécifications de la norme NF EN 196-1 : 2016. Le remplacement du ciment par les additions minérales (sédiments calcinés et LHF) a été réalisé par substitution massique à volume constant.

C. Suivi des indicateurs de durabilité

Les indicateurs de durabilité, dont la porosité et la teneur en portlandite, sont des facteurs clés qui permettent d'évaluer le comportement à moyen et long terme des matériaux soumis à des différentes classes environnementales (ALLAHYARI, 2016).

La quantité d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) produite durant l'hydratation du ciment correspond à la quantité d'eau libérée par la portlandite lors de sa phase de décomposition (déshydratation) dans un intervalle de température compris entre 400 et 550 °C (Fernandez and Scrivener, 2009). Elle a été déterminée par analyse thermogravimétrique à 7, 28 et 56 jours et calculée selon l'équation suivante :

$$\% \text{Ca}(\text{OH})_2 = \frac{\Delta(m_{400^\circ\text{C}} - m_{550^\circ\text{C}}) \times 74}{18} \quad (2)$$

$\Delta(m_{400^\circ\text{C}} - m_{550^\circ\text{C}})$: Perte de masse entre 400°C et 550°C,

74: masse molaire de CH, 18: masse molaire de H₂O.

La porosité est considérée comme un paramètre responsable du comportement mécanique et de la durabilité des mortiers durcis en raison de sa capacité à interagir avec le milieu externe à travers les pores existants (Bellara et al., 2021). La distribution de la taille des pores a été déterminée par la méthode porosimétrie par intrusion de mercure (PIM) conformément à la norme ISO 15901-1 : 2016, pour l'ensemble des formulations.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Validation du modèle de prédiction

Les résistances à la compression simple à 28 jours des onze formulations ont été obtenues sur des éprouvettes 4x4x16 cm formulées selon NF EN 196-1 : 2016, avec un rapport E/C = 0,5. Ces résistances ont été par la suite modélisées à l'aide d'un modèle de régression polynomiale du

second degré proposé par Scheffé, comme suggéré par le logiciel Design-Expert. La sélection du modèle de régression polynomiale a été effectuée en se basant sur les résultats de l'analyse statistique. La valeur P était statistiquement significative et inférieure à 0,05 tandis que les R^2 ajustés et prédits étaient très proches de 1 et leur différence était inférieure à 0,2. Les surfaces graphiques en 2D et en 3D illustrées à la FIGURE 2 montrent la surface de réponse avec différentes nuances de couleurs, allant du bleu foncé correspondant aux faibles résistances, à l'orange correspondant aux résistances les plus élevées.

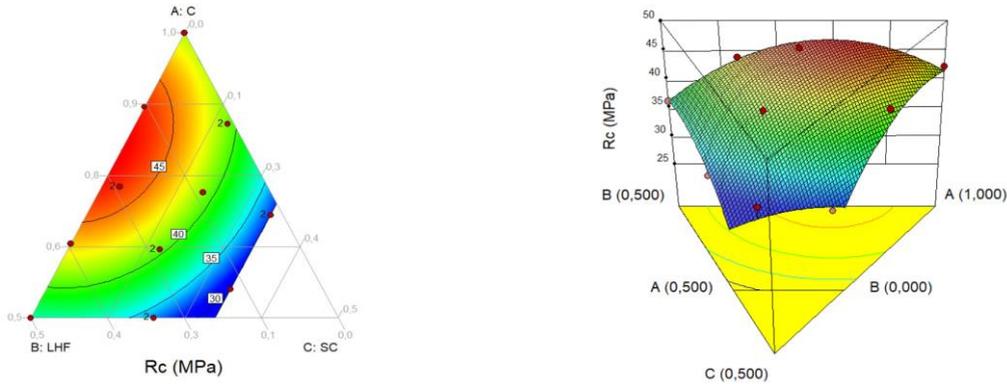


FIGURE 2. Surfaces de réponse représentée en 2D.et en 3D.

Les équations (3) et (4) sont les modèles de régression sélectionnés qui relient la résistance à la compression simple aux trois variables de l'étude : ciment, LHF et SC.

$$R_{c28}(\text{MPa}) = C \times \beta_1 + \text{LHF} \beta_2 + \text{CS} \beta_3 + C \times \text{LHF} \times \beta_{12} + C \times \text{CS} \times \beta_{13} + \text{LHF} \times C \times \beta_{23} \quad (5)$$

β_1 , β_2 , β_3 , β_{12} , β_{13} et β_{23} représentent les coefficients du modèle de régression.

$$R_{c28}(\text{MPa}) = C \times 41,73 + \text{LHF} \times (-29,17) + \text{CS} \times (-105,83) + C \times \text{LHF} \times 120,9 + C \times \text{CS} \times 165,16 + \text{LHF} \times C \times 133,24 \quad (6)$$

Afin de valider le modèle de régression sélectionné, deux formulations ont été choisies, et leur résistance à la compression simple a été testée, après 28 jours de cure normale à 20°C. Les valeurs de résistances obtenues expérimentalement des deux liants 50C35LHF15SC et 80C10LHF10SC de 35,17 et 45,18 MPa sont respectivement comprise dans les intervalles de confiance à 95 % de [33,37 ; 37,32 MPa] et [42,69, 45,54 MPa]. Cela confirme bien l'adéquation du modèle sélectionné.

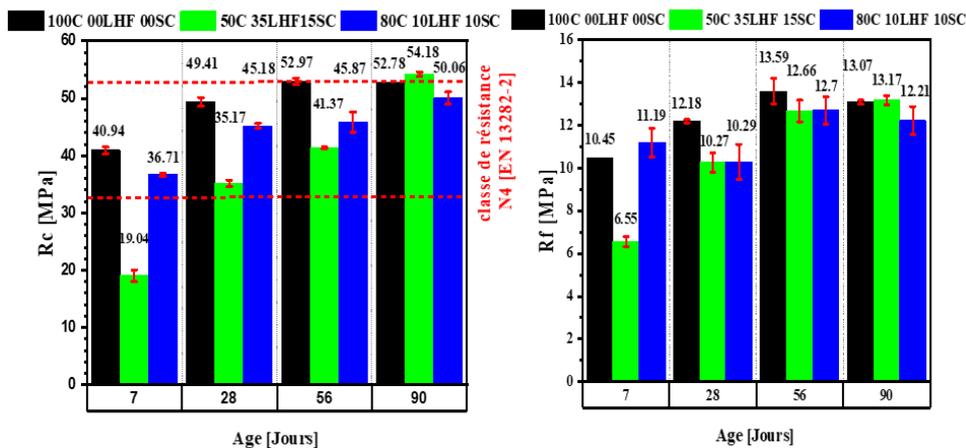
La faisabilité technique et l'innocuité environnementale ont été évaluées à travers des essais de caractérisation sur le mortier frais et le mortier durcis ainsi que des essais de lixiviation. Le tableau 3 montre que les deux éco-liants répondent aux exigences de la norme EN 13282-2 : 2015 et peuvent donc être qualifiés comme liants hydrauliques à durcissement normal.

TABLEAU 3. Caractéristiques physico-chimiques des liants hydrauliques routiers élaborés.

Formulation	Refus en masse à 90 μm [%]	Temps de début de prise [minutes]	Expansion [mm]	Teneur en SO_3 [%]
Reference	0,35	250	0,33	4,09
50C35LHF15SC	0,18	250	1,28	2,63
80C10LHF10SC	0,28	230	0,74	3,46
Valeurs limites [EN 13282-2]	≤ 15	≥ 150	≤ 30	≤ 4

B. Suivi des performances mécaniques et des indicateurs de durabilité

La figure 4 présente l'évolution des résistances mécaniques des mortiers à base des deux éco-liants, comparés à celle d'un mortier témoin. D'après ces résultats il s'avère qu'après 90 jours de cure les mortiers à base du 50C35LHF15SC présentent les meilleures résistances à la compression simple. Ceci peut être attribué à la formation de nouveaux hydrates suite aux réactions pouzzolaniques.

**FIGURE 4.** Performances mécaniques des différents mortiers à base d'éco-liants ternaires

Selon le diamètre deux familles de porosités sont distinguées : pores capillaires, avec les plus grandes tailles et pores d'hydrates, représente la microporosité avec les plus petites tailles. La porosité déterminée par intrusion de mercure permet de caractériser seulement une partie de la microstructure, des pores capillaires avec des diamètres d'environ 0,5 μm et des pores des hydrates avec des diamètres d'entrées d'environ 10 nm (Ollivier and Torrenti, 2008). Cette classification peut présenter une indication sur la durabilité des mélanges. La Figure 5 montre que plus le taux de substitution par des additions augmente, moins les pores capillaires sont importants et plus la porosité fine est importante. Cette porosité ne permet pas la pénétration des agents extérieurs agressifs. En revanche, des pressions de cristallisations peuvent apparaître au niveau de ces nanoporosités et induire des fissures dans le système (Thiebaut, 2018).

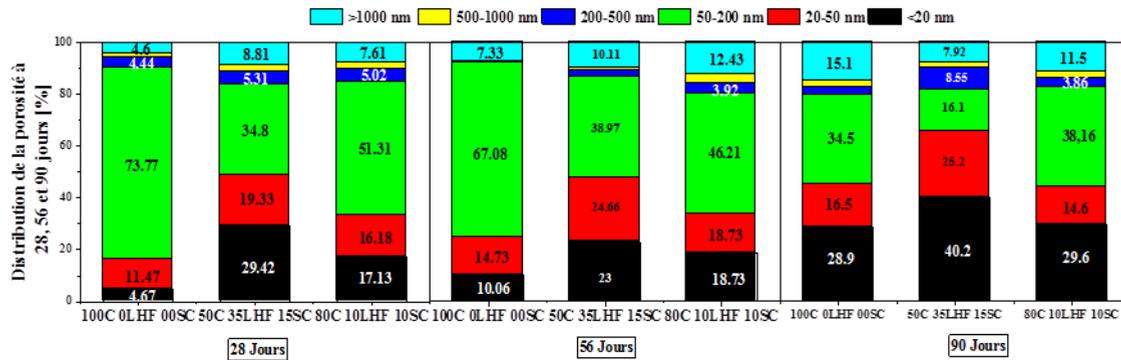


FIGURE 5. Distribution de la porosité.

Le TABLEAU 4 montre une diminution significative (de plus de 50 %) de la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ des mélanges 80C10LHF10SC et 50C35LHF15SC. Après 7 jours de cure, la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ était de 10,50 % et de 13,91 % pour les formulations 50C35LHF15SC et 80C10LHF10SC, respectivement. Cependant, ces quantités ont diminué à 4,07 % et 5,95 % après 56 jours de cure. Cette diminution peut être liée au caractère pouzzolanique déclenché par la réaction des aluminosilicates présents dans le LHF et les SC, qui réagissent avec le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fournit par l'hydratation du ciment. Ces réactions pouzzolaniques génèrent des C-S-H ou C-A-S-H supplémentaires, contribuant à l'amélioration des performances mécaniques des mélanges à base des additions. Toutefois, la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ du mortier témoins, qui est relativement constante sur les différentes échéances, était égale à 6,54 %, 6,96 % et 6,54 % après 7, 28 et 56 jours, respectivement. La consommation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans les mortiers à base des deux LHR est une bonne indication du potentiel pouzzolanique des additions (SC et LHF) (K. Scrivener et al., 2018).

TABLEAU 4. Teneur en portlandite à 7, 28 et 56 jours des différentes formulations.

Nombre de jour	Reference	50C35LHF15SC	80C10LHF10SC
7 jours	6,54%	10,50%	13,91%
28 jours	6,96%	3,62%	5,43%
56 jours	6,54%	4,07%	5,97%

IV. Conclusion

Ce travail a porté sur le potentiel de réutilisation des sédiments calcinés (SC) de barrage et du laitier de hauts-fourneaux (LHF) situé dans le nord-Est de l'Algérie, comme substituants partiels au ciment (C) dans des liants hydrauliques routiers. Deux éco-liants ont été optimisés en utilisant la méthode des surfaces de réponses (MSR). Le premier liant, 50C35LHF15SC, composé de 50% de ciment, de 35% de LHF et de 15% de sédiments calcinés et le deuxième liant, 80C10LHF10SC comprend 80% de ciment, 10% de LHF et 10% de sédiments calcinés. Différents essais ont été effectués pour s'assurer de la conformité des deux liants vis-à-vis du cahier des charges spécifiques aux liants hydrauliques à durcissement normal. Des analyses sur la microstructure (porosimétrie par intrusion de mercure, mesure de la teneur en portlandite) ont été également réalisées afin d'évaluer l'impact sur la durabilité des matériaux élaborés. Le remplacement du

ciment par des additions minérales a permis le développement d'une structure plus dense, avec le raffinement du réseau poreux à travers une diminution de la taille des pores, ce qui a permis l'accroissement des performances mécaniques. La réduction de plus 50% de la quantité de portlandite présente au sein de la matrice des deux liants témoigne de la consommation de cette dernière pour la production de nouveaux hydrates qui ont contribué à l'amélioration de la structure de la matrice. La réutilisation du LHF et des SC contribuera à une meilleure gestion des déchets. Ceci permettra également à la réduction de l'impact environnemental induit par la production du clinker en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

REFERENCES

- ALLAHYARI, I., 2016. Approche performantielle des bétons: vers une meilleure caractérisation des indicateurs de durabilité. Université Toulouse III Paul Sabatier.
- Bellara, S., Hidjeb, M., Maherzi, W., Mezazigh, S., Ahmed, S., 2021. Optimization of an Eco-Friendly Hydraulic Road Binders Comprising Clayey Dam Sediments and Ground Granulated. buildings 11, 443. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings11100443>
- Benzerzour, M., Maherzi, W., Amar, M.A.A., Abriak, N.E., Damidot, D., 2018. Formulation of mortars based on thermally treated sediments. J. Mater. Cycles Waste Manag. 20, 592–603. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0626-0>
- Fernandez, R., Scrivener, K., 2009. Calcined clayey soils as a potential replacement for cement in developing countries. Ph.D Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne 4302, 178.
- Juenger, M.C., Snellings, R., Bernal, S.A., 2019. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. Cem. Concr. Res. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>
- Laoufi, L., Senhadji, Y., Benazzouk, A., 2016. Valorization of mud from Fergoug dam in manufacturing mortars. Case Stud. Constr. Mater. 5, 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.06.002>
- Ollivier, J.-P., Torrenti, J.-M., 2008. La durabilité des bétons, Chapitre 3. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.
- Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., Maity, S., 2018. Calcined clay limestone cements (LC3). Cem. Concr. Res. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>
- Scrivener, K.L., John, V.M., Gartner, E.M., 2018. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. Cem. Concr. Res. 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Thiebaut, Y., 2018. Évaluation des structures en béton armé atteintes de réaction sulfatique interne
Yvan Thiebaut To cite this version : HAL Id : tel-02087795 DOCTORAT DE L' UNIVERSITÉ DE TOULOUSE Evaluation des structures en béton armé atteintes de réaction sulfatique int.
- Yu, J., Wu, H.L., Mishra, D.K., Li, G., Leung, C.K., 2021. Compressive strength and environmental impact of sustainable blended cement with high-dosage Limestone and Calcined Clay (LC2). J. Clean. Prod. 278, 123616. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123616>