

Proposition d'une approche de caractérisation des bétons bas carbone vis-à-vis du risque de corrosion

Imane ELKHALDI^{1,2}

¹ Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44000 Nantes, France

² Edycem, Rue du Fléchet, 85600 Boufféré, France

RESUME La décarbonation de la filière béton est devenue désormais une nécessité surtout avec l'émergence de la réglementation environnementale RE2020. Pour répondre à cet enjeu, la normalisation des ciments a évolué pour intégrer des ciments dits « bas-carbone » à fort taux de remplacement du clinker (EN 197-5). Le travail présenté se focalise sur le comportement des bétons à base de ces nouveaux liants, notamment les mélanges ternaires Clinker-Laitier-Calcaire (K-S-LL) pour des taux de remplacement de clinker élevés. On propose un indicateur qui caractérise à la fois l'empreinte carbone du béton et sa durabilité vis-à-vis du risque de corrosion induite par carbonatation via sa durée de vie (ddv). L'étude réalisée porte sur les propriétés mécaniques et les paramètres qui influencent la durée d'initiation et de propagation de la corrosion qui sont respectivement la vitesse de carbonatation accélérée et la résistivité électrique. Les résultats mettent en évidence la synergie entre le laitier et le calcaire et montrent que le rapport $E/CaO_{\text{réactif}}$ et la teneur en laitier peuvent être des indicateurs pertinents pour la durée d'initiation et de propagation de corrosion respectivement. Les bétons à base des ciments ternaires présentent des CO_2/ddv intéressants liés à une durée de propagation de corrosion élevée par rapport aux bétons à base de ciment portland.

Mots-clefs Ciment bas carbone, laitier, calcaire, durabilité, carbonatation, corrosion

I. INTRODUCTION

Le béton est très utilisé pour son faible coût, sa durabilité et surtout sa disponibilité. Comparé à d'autres matériaux de construction, il a une empreinte carbone massique relativement faible, ce sont surtout les quantités énormes de béton produites annuellement qui sont à l'origine de l'impact sectoriel. Des efforts visant à optimiser l'utilisation des matériaux de base pourraient contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre de 24 à 50 % en réduisant la demande de clinker, qui est un des principaux contributeurs aux émissions de gaz à effet de serre dans le secteur de la construction (IPCC, 2022).

La norme EN 197, qui définit et présente les spécifications des ciments courants, a évolué en 2021 pour intégrer deux nouveaux types de ciments : CEM II/C et CEM VI. Ces ciments ternaires sont constitués d'un mélange de clinker, de calcaire, de laitier de haut fourneau, de cendres volantes ou de pouzzolanes naturelles. Le pourcentage de clinker varie entre 50 et 64 % pour les ciments CEM II/C-M et entre 35 et 49 % pour les ciments CEM VI.

De nombreuses études ont abordé la définition d'indicateurs spécifiques liés à l'efficacité d'utilisation du ciment parfois relatifs aux émissions de CO_2 pour le béton (Damineli et al., 2010; Proske et al., 2018). La propriété du béton qui a été le plus souvent considérée est la résistance à la

compression, qui est la propriété la plus regardée pour la plupart des applications. Dans son article, (Damineli et al., 2010) propose de remplacer l'unité de volume ou de masse de béton (m^3 ou kg), qui est couramment utilisée pour mesurer l'impact environnemental global de la construction en béton, par une unité de performance fonctionnelle, comme la résistance à la compression. Cette approche est plus précise car elle tient compte de la fonction réelle du béton dans différentes applications, plutôt que de simplement mesurer son volume ou sa masse, qui ne restent pas constants si ses performances varient.

L'objectif de ce travail est de caractériser, par une approche globale, le comportement des nouveaux ciments de la norme EN 197-5 et de proposer un nouvel indicateur d'efficacité carbone. Plusieurs compositions de liants ternaires clinker-laitier-calcaire sont étudiées. Les coefficients d'activité des additions sont examinés dans un premier temps. Ensuite, la durabilité des bétons à base de ces liants vis-à-vis de la corrosion induite par carbonatation est étudiée à travers deux indicateurs spécifiques : la vitesse de carbonatation accélérée et la résistivité électrique. Ces deux propriétés sont par la suite exploitées pour prévoir la durée de vie de l'enrobage en béton à partir d'un modèle analytique. L'empreinte carbone des bétons est finalement rapportée à la durée de vie pour caractériser leur efficacité carbone.

II. CONCEPTION DE LIANTS BAS CARBONE

A. Méthodologie

Afin de concevoir des liants homogènes avec des propriétés physico-chimiques proches des ciments de cimenterie, les liants utilisés dans cette étude ont été préparés à partir de CEM I et CEM II/B (source du calcaire) de la même cimenterie et de laitier de haut fourneau.

Ces trois poudres ont été proportionnées par masse pour obtenir 17 liants dont 15 ternaires (C1 – C15) conformes à la nouvelle norme EN 197-5 (sauf le C4 et C5) et deux binaires (CEM II, CEM III) conformes à la norme sur les ciments EN 197-1 (figure 1). Sur le diagramme ternaire la zone des ciments CEM II/C-M est représentée par un parallélogramme rouge et celle des CEM VI par un parallélogramme jaune.

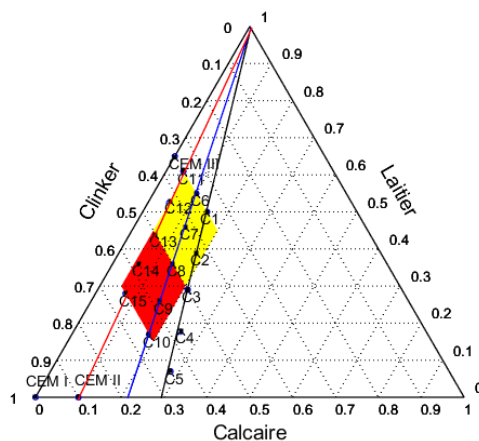


FIGURE 1. Compositions de liants étudiés

La configuration choisie permet d'étudier cinq taux de remplacement du clinker (35 %, 42 %, 50 %, 57 %, 65 %) pour trois rapports Calcaire/Clinker (LL/K) (0,42, 0,28, 0,11) représentés graphiquement dans le diagramme par des droites de couleur respectivement **noire**, **bleue**, et **rouge**. Les liants ont été fabriqués à l'échelle du laboratoire à l'aide d'un mélangeur de poudre en V. Du gypse a été ajouté aux ciments ternaires afin d'avoir un taux de gypse de 3 % constant et conforme aux normes EN 197 sur les ciments. La composition des liants étudiés est fournie dans le diagramme ternaire de la figure 1.

Dans un premier temps, nous évaluons les résistances à la compression de ces liants sur des mortiers normalisés (E/L=0,5, Sable/L=3) à plusieurs échéances : 2, 7, 28, 180 jours. Ces résultats serviront pour calculer les coefficients d'activité des additions (χ_B) par la formule de Bolomey modifiée (Lawrence and Ringot, 2000) (équation 1) :

$$\chi_B = 1 + \frac{\alpha - 1}{p} \left(1 - 0.5 \frac{E + V}{C_0} \right) \quad (1)$$

Où :

$$\alpha = \frac{f_p}{f_0}$$

Avec α l'indice d'activité, f_0 et f_p la résistance à la compression du mélange à 0 et p % d'addition respectivement (en MPa), χ_B le coefficient d'activité de Bolomey, C_0 la masse de ciment dans le mélange considéré (en g), E la masse d'eau en (g) et V représente la masse d'eau équivalente au volume occupé par l'air occlus (en g).

Ensuite, nous calculons l'intensité carbone (IC) de ces liants, telle que définie dans les travaux de (Damineli et al., 2010) (équation 2) :

$$IC = \frac{CO_2}{f_c} \quad (kg \ CO_2 \ eq / kg \ de \ liant / MPa) \quad (2)$$

Où CO_2 est l'empreinte carbone émise pour délivrer une unité de résistance mécanique f_c . Pour le calcul des émissions carbone des liants, on considère un facteur d'émission (en $kg \ CO_2 \ eq / kg$) de 0,881 pour le clinker, 0,114 pour le laitier et 0,0278 pour le calcaire (Proske et al., 2018).

B. Effets des additions sur l'intensité carbone des liants ternaires

L'évolution du coefficient d'activité du couple d'addition (S+LL) à 28 jours (figure 2) montre que l'ajout du calcaire jusqu'à 15 % permet d'obtenir des χ_B à 28 jours supérieurs à 0,7. Ces derniers sont équivalents voire même meilleurs que le coefficient d'activité des cendres volantes (au sens de la norme NF EN 206/CN connues pour leur activité pouzzolanique. Pour certaines compositions ternaires (C11, C14) on obtient des χ_B supérieurs à 0,9 qui est le coefficient de prise en compte du laitier selon la même norme. Notons que le laitier, en plus de son activité pouzzolanique, a une hydraulité latente qui est à l'origine de sa réactivité importante à long terme. Ceci souligne la synergie entre le laitier et le calcaire qui est optimale pour des taux faibles en calcaire.

On observe une forte corrélation entre χ_B et l'intensité carbone des liants (figure 3). Notons que ces coefficients ont été déterminés aux différentes échéances étudiées (2, 7, 28, 180 j). Cette corrélation met en évidence le rôle important de la réactivité des additions à réduire le coût carbone des liants, et l'intérêt d'exploiter la synergie entre les additions pour améliorer la réactivité globale du couple.

Ainsi, la réactivité des additions peut être un levier important pour la réduction des émissions carbone du ciment tout en visant de bonnes performances mécaniques.

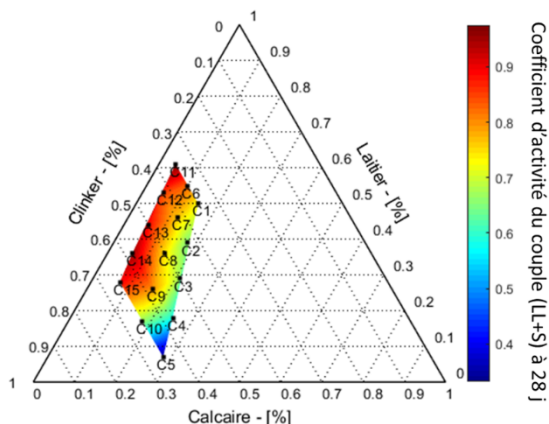


FIGURE 2. Evolution du coefficient d'activité du couple (S+LL) des liants étudiés à 28 jours

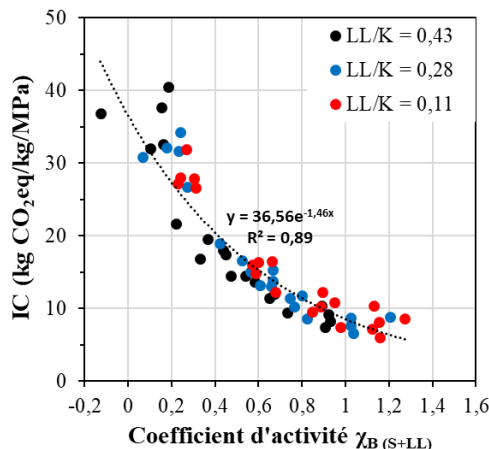


FIGURE 3. Corrélation entre le coefficient d'activité du couple S+LL et l'IC des liants

III. DURABILITÉ VIS-À-VIS DU RISQUE DE CORROSION INDUITE PAR CARBONATATION

A. Méthodologie

En vue d'étudier l'effet de ces liants sur la durabilité des bétons, nous proposons dans cette partie une étude des indicateurs spécifiques de durabilité liés au risque de corrosion induite par carbonatation, à savoir : la vitesse de carbonatation accélérée qui renseigne sur l'initiation de corrosion et la résistivité électrique qui renseigne sur la propagation de corrosion au sens de (Tuutti, 1982). Cette étude concerne les liants C1, C3, C4, C9, CEM II et CEM III (figure 1). Une même formulation de béton a été utilisée pour étudier les indicateurs de durabilité, seul le liant varie. Le béton est formulé avec un rapport E/C = 0,60, des granulats non réactifs (par rapport à la réaction alcali-silice) de diamètre maximal de 10 mm et un volume total de pâte de 292 ± 2 L.

L'essai de carbonatation accélérée est réalisé suivant le protocole français PERFDUD adapté du protocole européen à 3 % de CO₂. La résistivité électrique est mesurée sur des éprouvettes de bétons de dimensions $\varnothing 75 \times 70$ mm², carottées au milieu d'un cube de dimensions 150x150x150 mm³ au moyen d'un dispositif développé à l'université Gustave Eiffel (du Plooy et al., 2013).

B. Durabilité des bétons vis-à-vis du risque de corrosion induite par carbonatation

Une bonne corrélation est observée entre les vitesses de carbonatation accéléré des bétons étudiés et le rapport E/CaO_{réactif} (figure 4). Le CO₂ qui diffuse dans la matrice cimentaire réagit avec les hydrates pour former du carbonate de calcium et des gels riches en silice. Selon (Leemann and Moro, 2017), plus la teneur en CaO réactif (CaO_{réactif}) par volume de pâte est élevée, plus le front de carbonatation progresse lentement dans le béton. Ceci peut être exprimé par le rapport E/ CaO_{réactif}. On considère que le CO₂ ne peut réagir qu'avec le CaO présent dans les hydrates et non celui présent dans le ciment anhydre ou les additions minérales et que le CaO contenu dans le calcaire est non

réactif. Ainsi, le $CaO_{réactif}$ peut être obtenu par la somme des teneurs en CaO des clinker et laitier du liant multipliées par leurs degrés d’hydratation ultimes évalués dans les travaux de (Zajac et al., 2018) sur des systèmes ternaires (K-S-LL) à 90 % pour le clinker et 65 % pour le laitier.

La figure 5 montre une bonne corrélation entre la teneur en laitier des liants et la résistivité électrique mesurée. Le remplacement du laitier par du calcaire réduit la résistivité électrique, comme on peut l’observer pour le C4 et C9 à même teneur en clinker. Généralement, les bétons contenant des liants riches en laitier ont des résistivités élevées, liées à une porosité fine et moins connectée et à une alcalinité faible de la solution interstitielle (Chopperla and Ideker, 2022) qui s’explique par l’adsorption des alcalins dans les feuillettes de C-(A)-S-H formés.

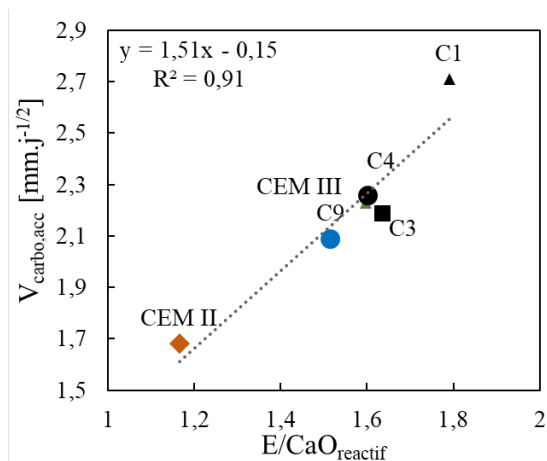


FIGURE 4. Vitesse de carbonatation des bétons en fonction du rapport E/CaO_{réactif}

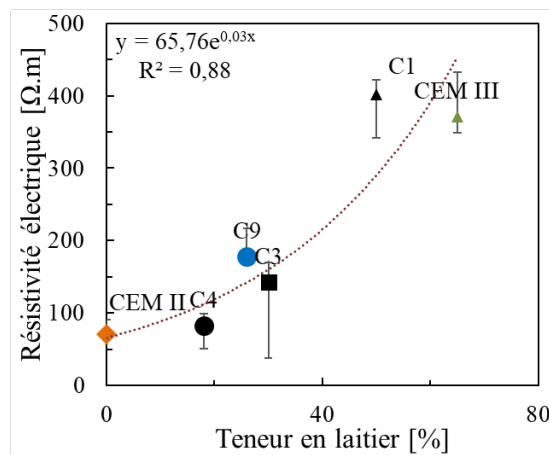


FIGURE 5. Résistivité électrique des bétons en fonction de la teneur en laitier des liants

VI. VERS UN INDICATEUR GLOBAL DES PERFORMANCES DE DURABILITÉ ET DE L’EMPREINTE CARBONE DES LIANTS TERNAIRES

A. Méthodologie

En vue de caractériser l’efficacité des liants étudiés à réduire l’empreinte carbone des bétons, on propose de les comparer au moyen de deux indicateurs :

- Indicateur d’intensité carbone (IC) (kg CO_{2, eq}/m³ béton/MPa) tel que défini par l’équation 1. Pour ce faire, nous avons mesuré les résistances à la compression sur des éprouvettes cylindriques de béton de dimensions Ø110x220 mm² à 2, 28 et 180 jours.
- Indice d’Efficacité Carbone (IEC) (kg CO_{2, eq}/m³ béton/année) qui correspond à l’empreinte carbone par année de service en considérant la durée de vie comme unité fonctionnelle d’un point de vue analyse de cycle de vie (ACV) (Elkhaldi et al., 2022) (équation 3).

$$IEC = \frac{CO_2}{Durée\ de\ vie\ en\ service} \tag{3}$$

Pour l’ICE, nous avons adopté un modèle analytique de prévision de la durée de vie de l’enrobage qui a été développé dans le cadre du PN PerfDuB (El Farissi, 2020). Ce modèle permet de prévoir la durée d’initiation (t_{ini}) et de propagation (t_{prop}) de la corrosion à partir de lois empiriques et analytiques. La figure 6 résume les différentes étapes du calcul afin de parvenir à la prévision de la

durée de vie ($t_{adv} = t_{ini} + t_{prop}$). La méthodologie ainsi que les différents paramètres considérés sont détaillés dans une publication récente (Elkhaldi et al., 2022). Les sorties de ce modèle sont exploitées pour tracer des lignes iso-ddv en fonction des paramètres matériau pour les classes d'exposition XC3 et XC4, à savoir la vitesse de carbonatation accélérée et la résistivité électrique. Pour ces classes d'exposition, on considère une humidité relative (HR) de 75 % et 65 % un taux d'humidification (ToW) de 0 et 0,05 et un enrobage nominal (c_{nom}) de 35 et 40 mm respectivement.

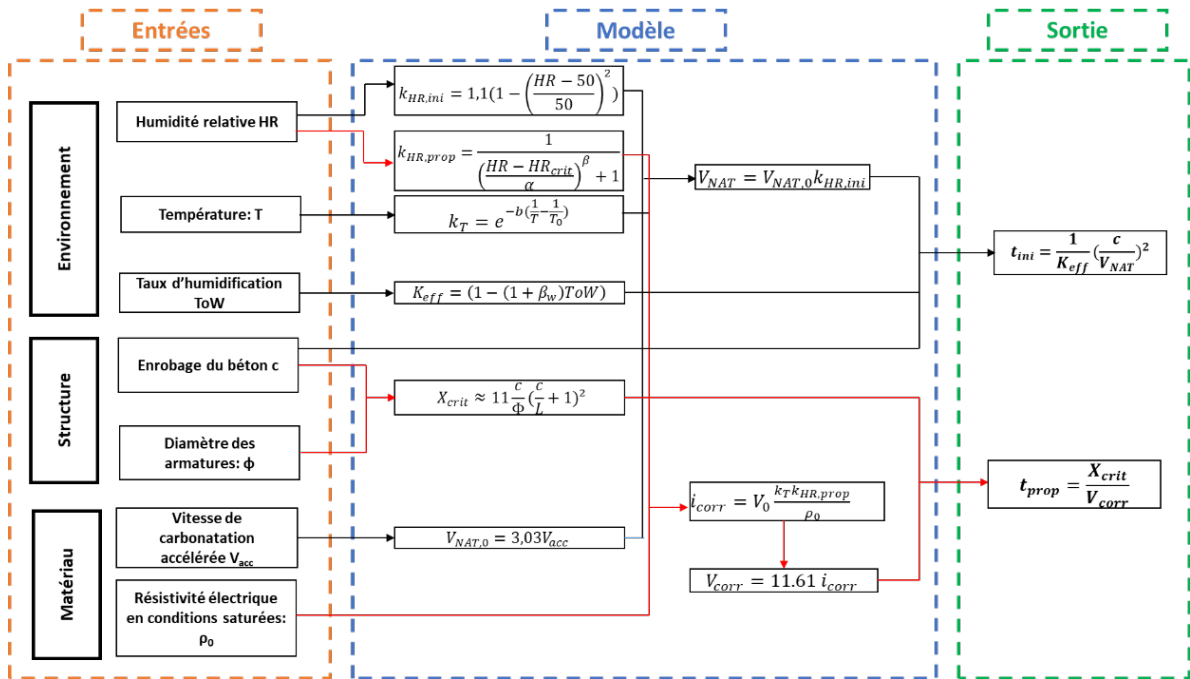


FIGURE 6. Organigramme de modélisation de la durée de vie : Itinéraire noir : durée d'initiation, itinéraire rouge : durée de propagation

B. Cartographies de durée de vie

Pour les classes XC3 et XC4, on remarque que les iso-ddv sont verticales pour les faibles valeurs cinétiques de carbonatation et commencent à s'incliner à partir d'une certaine valeur de $V_{carbo,acc}$ (figure 7).

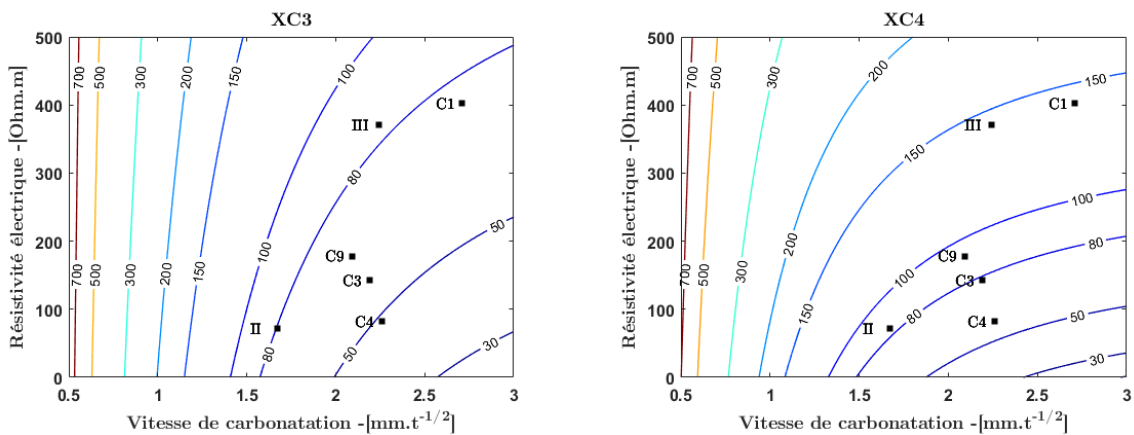


FIGURE 7. Cartographies de durée de vie (en années) prédite par le modèle pour les classes XC3 et XC4

Cela signifie que pour les bétons ayant une faible résistance à la carbonatation, une résistivité élevée contribue significativement à améliorer leur durée de vie, comme c'est le cas pour C1 et CEM III, qui ont une résistivité de l'ordre de 400 $\Omega.m$. On observe également que les conditions environnementales décrites par la classe XC3 conduisent, selon le modèle à des durées de vie plus faibles par rapport à la classe XC4. Avec un enrobage nominal le béton à base du liant C4 qui déroge à la norme actuelle des ciments ternaires n'atteint pas la durée de vie cible, ce qui appuie les recommandations des normes ciment (EN 197) et bétons (EN 206) qui suggèrent de limiter le pourcentage du calcaire dans le liant à 20 %.

C. Indice d'efficacité carbone

La figure 8 présente une comparaison des indicateurs IC (équation 2) et IEC (équation 3) en fonction de la teneur en clinker des liants étudiés. L'IC calculé à partir des résistances au jeune âge est fonction décroissante de la teneur en clinker montrant ainsi le rôle important du clinker au jeune âge, étant le seul composant réactif à cette échéance. A long terme, la contribution des additions au développement des résistances (figure 2) se traduit par une tendance croissante des intensités carbone en fonction de la teneur en clinker. La même tendance est observée pour l'IEC qui est surtout attribuée aux résistivités importantes des liants ternaires qui contribuent fortement à une durée de propagation importante.

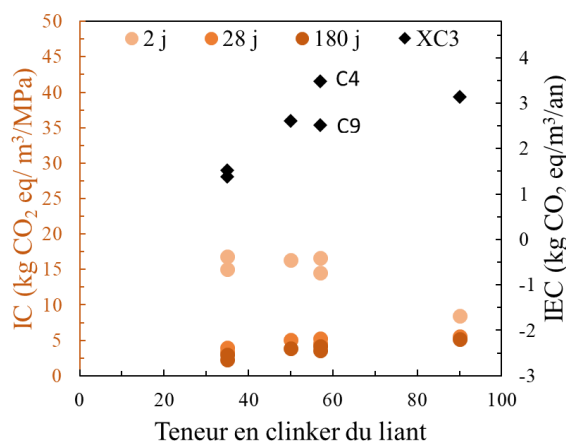


FIGURE 8. Intensités carbone et indices d'efficacité carbone des bétons étudiés

L'IEC s'avère cependant plus pertinent puisqu'il permet de distinguer le comportement défavorable de certains liants vis-à-vis de la durabilité comme on peut l'observer pour les liants C4 et C9 qui ont le même facteur clinker, des ICs comparables mais les IECs bien distincts.

V. CONCLUSIONS

Cette étude propose une nouvelle approche de définition et caractérisation des bétons bas carbone à base des nouveaux ciments de la norme EN 197-5. Les principaux résultats de cette étude sont :

- L'ajout de calcaire jusqu'à 15% dans le ciment permet d'obtenir de bonnes performances mécaniques tout en réduisant les émissions de carbone. Cette amélioration est due à la synergie entre le calcaire et le laitier, qui optimise la réactivité des additions.

- Les vitesses de carbonatation dépendent principalement de la quantité de matière carbonatable, provenant du clinker et du laitier, qui y contribuent à la hauteur de leur degré d'hydratation ultime, par volume de pâte.
- La résistivité électrique du béton est améliorée en présence du laitier. Ceci est expliqué par le raffinement de la porosité et l'alcalinité faible de la solution porale en présence des additions.
- Les bétons à base de ciments ternaires sont avantageux par leurs indices d'efficacité carbone (CO_2/ddv) intéressants et leurs durées de vie prédites importantes en raison de leurs résistivités élevées.

REFERENCES

- Chopperla, K.S.T., Ideker, J.H., 2022. Using electrical resistivity to determine the efficiency of supplementary cementitious materials to prevent alkali-silica reaction in concrete. *Cem. Concr. Compos.* 125, 104282. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104282>
- Damineli, B.L., Kemeid, F.M., Aguiar, P.S., John, V.M., 2010. Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cem. Concr. Compos.* 32, 555–562. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>
- du Plooy, R., Palma Lopes, S., Villain, G., Dérobert, X., 2013. Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition. *NDT E Int.* 54, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.11.007>
- El Farissi, A., 2020. Prédiction de la durée d'utilisation des ouvrages en béton armé par une approche performantielle dans le cas de la corrosion induite par la carbonatation ou l'attaque des ions chlorure (phdthesis). Université de La Rochelle. <https://doi.org/10/document>
- Elkhaldi, I., Roziere, E., Turcry, P., Loukili, A., 2022. Towards global indicator of durability performance and carbon footprint of clinker-slag-limestone cement-based concrete exposed to carbonation. *J. Clean. Prod.* 380, 134876. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134876>
- IPCC, 2022. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report.
- Lawrence, P., Ringot, E., 2000. Prise en compte des additions minérales dans le calcul des résistances de mortiers: Application aux mortiers de cendres volantes. *Rev. Fr. Génie Civ.* 4, 525–542. <https://doi.org/10.1080/12795119.2000.9692285>
- Leemann, A., Moro, F., 2017. Carbonation of concrete: the role of CO_2 concentration, relative humidity and CO_2 buffer capacity. *Mater. Struct.* 50, 30. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0917-2>
- Proske, T., Rezvani, M., Palm, S., Müller, C., Graubner, C.-A., 2018. Concretes made of efficient multi-composite cements with slag and limestone. *Cem. Concr. Compos.* 89, 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.02.012>
- Tuutti, K., 1982. Corrosion of steel in concrete. *Swed. Cem. Concr. Res. Inst. Stockh.*
- Zajac, M., Skoceck, J., Adu-Amankwah, S., Black, L., Ben Haha, M., 2018. Impact of microstructure on the performance of composite cements: Why higher total porosity can result in higher strength. *Cem. Concr. Compos.* 90, 178–192. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.023>