



HAL
open science

Durabilité des bétons bas carbone vis-à-vis de la corrosion induite par carbonatation

Imane Elkhaldi, Emmanuel Rozière, Ahmed Zakarya Bendimerad, Géraldine Villain, Ahmed Loukili

► **To cite this version:**

Imane Elkhaldi, Emmanuel Rozière, Ahmed Zakarya Bendimerad, Géraldine Villain, Ahmed Loukili. Durabilité des bétons bas carbone vis-à-vis de la corrosion induite par carbonatation. NOMAD 2022 - 4e conférence internationale francophone Nouveaux Matériaux et Durabilité, IMT Mines Alès; LMGC; LIFAM, Nov 2022, Montpellier, France. hal-03881067

HAL Id: hal-03881067

<https://hal.science/hal-03881067v1>

Submitted on 1 Dec 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Durabilité des bétons bas carbone vis-à-vis de la corrosion induite par carbonatation

Imane ELKHALDI^{1,2}, Emmanuel ROZIÈRE¹, Ahmed Zakarya BENDIMERAD², Géraldine VILLAIN³, Ahmed LOUKILI¹

¹ Ecole Centrale de Nantes, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UM-CNRS 6183, 1 rue de la Noë, BP 92101, F-44321 Nantes, France

² Edycem, Rue du Fléchet, 85600 Boufféré, France

³ Univ Gustave Eiffel, MAST-LAMES, Campus de Nantes, Allée des Ponts et Chaussées, CS 5004, F-44344 Bouguenais, France

ABSTRACT Compte tenu du contexte climatique actuel, la réglementation en France et dans le monde entier se dirige vers la limitation des gaz à effet de serre de toutes les industries y compris celle du béton. Dans cette perspective, la normalisation des ciments a évolué pour intégrer des ciments bas-carbone à fort taux de remplacement du clinker. Cette étude propose d'étudier des bétons à base de ces nouveaux ciments ternaires clinker-laitier-calcaire et de les comparer à des ciments binaires existants en termes de durabilité vis-à-vis de la corrosion induite par carbonatation à travers deux essais : carbonatation accélérée et mesure de résistivité électrique. Des tendances opposées sont observées sur les deux propriétés.

Keywords Ciments bas carbone, durabilité, corrosion, carbonatation

I. INTRODUCTION

Le contexte climatique actuel exige une action urgente pour réduire les émissions de CO₂ de toutes les industries, y compris l'industrie du béton. Dans cette perspective, la normalisation des ciments a connu une évolution depuis la fin de 2020 ; 2 catégories de ciments dits « bas carbone » rentrent désormais dans le cadre de la norme EN 197-5, à savoir les ciments Portland CEM II/C-M et les CEM VI. Ces ciments ont l'avantage d'avoir un taux de substitution du clinker élevé ; jusqu'à 50% pour les CEM II/C et jusqu'à 65% pour les CEM VI et ils ont la particularité de contenir deux additions minérales.

On s'intéresse dans cette étude aux ciments ternaires à base de clinker, laitier et calcaire dans les limites de la nouvelle norme EN 197-5. Ce choix est motivé par la synergie entre le calcaire et le laitier qui a été le sujet de plusieurs travaux de recherche (Adu-Amankwah et al., 2017). Les travaux présentés dans cet article se focalisent sur l'aspect de durabilité vis-à-vis du risque de corrosion induite par carbonatation de ces ciments dans une formulation de béton.

II. MATERIAUX ET METHODES

Les ciments utilisés dans cette étude ont été préparés à partir de CEMI et CEM II/B de la même usine (source du calcaire) et de laitier. Ces 3 poudres ont été proportionnées par masse pour obtenir 4 ciments ternaires conformes à la nouvelle norme EN 197-5 (sauf le C4) et deux binaires

conformes à la norme sur les ciments EN 197-1. Les ciments ont été fabriqués à l'échelle du laboratoire à l'aide d'un mélangeur de poudre en V. Du gypse de la même usine a été ajouté aux ciments ternaires afin d'avoir un ratio Gypse/(Clinker+laitier) $\geq 3\%$. La composition des ciments étudiés est fournie dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Composition des ciments étudiés

Id	Clinker	Laitier	Calcaire
CEM II	90	0	10
CEM III	35	65	0
C1	35	50	15
C3	50	30	20
C4	57	18	25
C9	57	26	17

Une même formulation de béton a été utilisée pour étudier les indicateurs de durabilité, seul le ciment varie. Le béton est formulé avec un rapport E/C=0,60 et des granulats non réactifs de diamètre maximal de 10mm et un volume total de pâte de 292 ± 2 L.

L'essai de carbonatation accélérée suivant le protocole européen à 3% de CO₂ (P. Turcry et al., 2019) est réalisé sur les bétons référencés CEM II, CEM III, C1 et C3 afin d'évaluer qualitativement la durée d'initiation de corrosion. La durée de propagation étant liée au taux de corrosion, il a été montré que la résistivité électrique se corrèle bien avec le taux de corrosion du béton (Alonso et al., 1988). La résistivité électrique est mesurée pour tous les bétons étudiés sur des éprouvettes de bétons de dimensions $\phi 75 \times 70$, carottées au milieu d'un cube de dimensions $150 \times 150 \times 150$ mm³ au moyen d'un dispositif développé à l'université Gustave Eiffel (du Plooy et al., 2013).

III. RESULTATS ET DISCUSSION

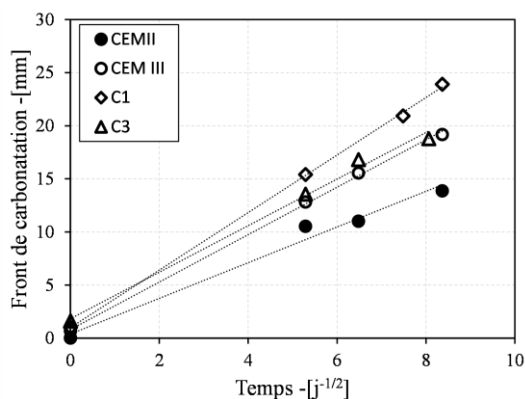


FIGURE 1. Profondeurs carbonatées à 0,28,42,70 j

Les fronts de carbonatation mesurés sont présentés dans la figure 1 et les vitesses de carbonatation qui correspondent aux pentes des courbes sont résumées dans le tableau 2. Le CEMII avec une teneur élevée en clinker présente la plus grande résistance à la carbonatation, C1 résiste le moins à la carbonatation et CEM III et C3 ont des pentes approximativement égales. Une comparaison entre CEM III et C1, qui ont la même teneur en clinker, révèle l'effet négatif du calcaire sur la résistance à la carbonatation du ciment. Le faible taux de carbonatation observé

Béton	Vitesse de carbonatation (mm.j ^{-1/2})
CEM II	1,67
CEM III	2,23
C1	2,70
C3	2,19

TABLEAU 2. Vitesse de carbonatation des bétons étudiés

pour CEM II est attribué à sa teneur élevée en clinker, qui améliore la résistance à la carbonatation comme indiqué dans la littérature. Cependant la vitesse de carbonatation (durée d'initiation) ne permet pas à elle seule de caractériser la durée de vie de l'enrobage, il faut également considérer la phase de propagation qui peut représenter une durée significative dans certains environnements.

La figure 2 montre les résultats de mesures de la résistivité en corrélation avec la teneur en laitier des ciments. En comparant C4 et C9 qui ont la même teneur en clinker, on constate que le remplacement du laitier par du calcaire influence négativement la résistivité électrique. Une tendance différente est observée lorsque l'on compare CEM III à C1, mais la différence reste relativement faible du même ordre de grandeur que l'écart-type. Généralement les bétons contenant des ciments riches en laitier et additions minérales pouzzolaniques présentent des résistivités importantes. Ceci se corréle avec des taux de corrosion des armatures faibles donc des durées de propagation de corrosion importantes.

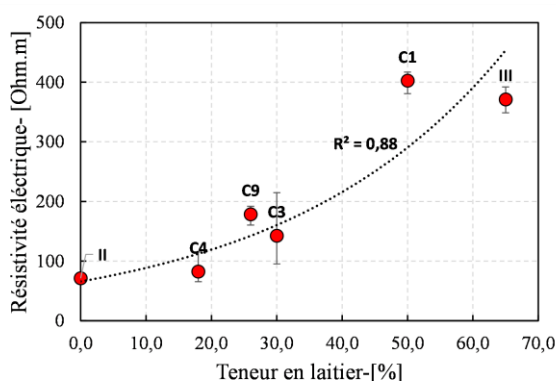


FIGURE 2. Corrélation entre la résistivité électrique des bétons et la teneur en laitier des ciments

La résistivité électrique est liée à deux facteurs intrinsèques du béton : la taille des pores et leur connectivité et la composition de la solution interstitielle. Une bonne corrélation entre la résistivité électrique des bétons et la teneur en laitier est observée. Cela s'explique d'un côté par le raffinement des pores induit par le laitier. D'un autre côté, les ciments contenant des additions minérales comme le laitier, se caractérisent par une faible alcalinité, puisque les alcalins sont liés dans les C-A-S-H. Cela influence positivement la résistivité électrique.

IV. CONCLUSION

Dans cette étude la durabilité vis-à-vis de la corrosion induite par carbonatation des bétons à base des nouveaux ciments de la norme EN 197-5 est étudiée à travers la mesure de vitesse de carbonatation accélérée et de la résistivité électrique. Les résultats montrent que ces bétons ont une résistance à la carbonatation relativement faible par rapport aux bétons avec du ciment Portland au calcaire qui pourrait être compensée par une résistivité élevée et par une durée de propagation plus longue et par une réduction significative des émissions de CO₂ compte tenu de leur composition.

REFERENCES

- Adu-Amankwah, S., Zajac, M., Stabler, C., Lothenbach, B., Black, L., 2017. Influence of limestone on the hydration of ternary slag cements. *Cem. Concr. Res.* 100, 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.013>
- Alonso, C., Andrade, C., González, J.A., 1988. Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types. *Cem. Concr. Res.* 18, 687–698. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90091-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(88)90091-9)
- 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>
- P. Turcry, J. Mai-Nhu, E. Rozière, B. Thauvin, F. Cussigh, 2019. French project “PerfDub” on performance-based approach: from Round-Robin tests to new test procedures for durability indicators and accelerated carbonation. *Proc. Fib Symp. Concr. – Innov. Mater. Des. Struct.* 505–512.