

Etude de l'influence des conditions de cure et de conservation, de la compacité et du type d'additions sur la durabilité du béton d'enrobage à empreinte carbone réduite

Marion Vouzelaud^{1,2}, Myriam Carcasses², Jonathan Mai-Nhu¹, Franck Cassagnabère², Patrick Rougeau¹

¹ CERIB, Centre d'Etudes et Recherches de l'Industrie du Béton - France

² Laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions - Institut National des Sciences Appliquées - Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier - France

RESUME

La réduction de l'empreinte carbone des ouvrages est aujourd'hui un enjeu majeur, renforcé par les évolutions réglementaires visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, la filière béton développe des solutions innovantes, notamment par la diminution du clinker dans les liants via l'utilisation de ciments composés ou l'utilisation croissante d'additions minérales dans le béton, en substitution du clinker.

Ce travail s'inscrit dans cette démarche et porte sur l'évaluation de la durabilité de bétons intégrant de fortes teneurs en additions minérales (métakaolin, calcaire, laitier de haut-fourneau) en substitution du clinker. L'influence de la compacité, de la durée de cure et des conditions de conservation a été étudiée à travers divers indicateurs de durabilité, en particulier la vitesse de carbonatation accélérée.

Mots-clefs Béton bas carbone ; Additions minérales ; Indicateurs de durabilité ; Cure ; Conservation ; Rapport E_{eff}/L .

I. INTRODUCTION

Dans le cadre de la transition environnementale du secteur de la construction, réduire l'empreinte carbone des bétons constitue un enjeu majeur. Parmi les stratégies développées, la réduction de la teneur en clinker dans les ciments et les liants apparaît comme une solution particulièrement prometteuse pour formuler des bétons à faible impact environnemental. Toutefois, la sensibilité de ces bétons bas carbone aux conditions de cure et de conservation reste encore peu documentée dans la littérature, notamment en ce qui concerne leur durabilité.

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est d'évaluer la durabilité de bétons d'enrobage à faible empreinte carbone, en considérant l'effet combiné de plusieurs paramètres clés : la nature du liant, la compacité (via le rapport E_{eff}/L), la durée de cure et les conditions de conservation.

Une attention particulière a été portée au comportement vis-à-vis de la carbonatation accélérée. En effet, il est essentiel d'étudier l'impact des conditions de cure et de conservation sur la capacité de ces bétons à protéger les armatures et à maintenir leurs performances dans le temps.

II. CONSTITUANTS ET METHODES D'ESSAIS

A. Matériaux

1) Constituants

Les bétons étudiés sont formulés à partir d'un ciment CEM II/A-LL 52,5 R, composé de 89 % de clinker, 9 % de calcaire LL et 2 % de constituants secondaires. Trois types d'additions minérales ont été utilisées : laitier de haut-fourneau, métakaolin flash et calcaire. Les granulats utilisés sont : un sable 0/4 mm (silico-calcaire) et un gravillon 6/14 mm silico-calcaire concassé. Le même squelette granulaire (44 % sable / 56 % gravillons) est employé pour toutes les formulations. Ce squelette granulaire correspond à celui utilisé dans les bétons mis au point dans le cadre des travaux de thèse de Lucas Mosser (Mosser, 2023). Ce squelette a été optimisé via le Modèle d'Empilement Compressible (De Larrard, 2000). Un superplastifiant haut réducteur d'eau est utilisé pour toutes les formulations, afin de fluidifier les bétons fabriqués.

2) Liants étudiés

L'étude repose sur trois types de liants dont deux ternaires (à faible teneur en clinker : 31 %) formulés à partir de substitutions partielles avec des additions minérales. La figure 1 reprend les dosages des liants utilisés. Chacun de ces liants est décliné avec deux rapports eau efficace / liant (E_{eff}/L) de 0,35 et 0,45, afin d'étudier l'effet de la compacité sur les performances. Le dosage en liant est fixé à 400 kg/m³ pour toutes les formulations afin de garantir un volume de pâte suffisant.

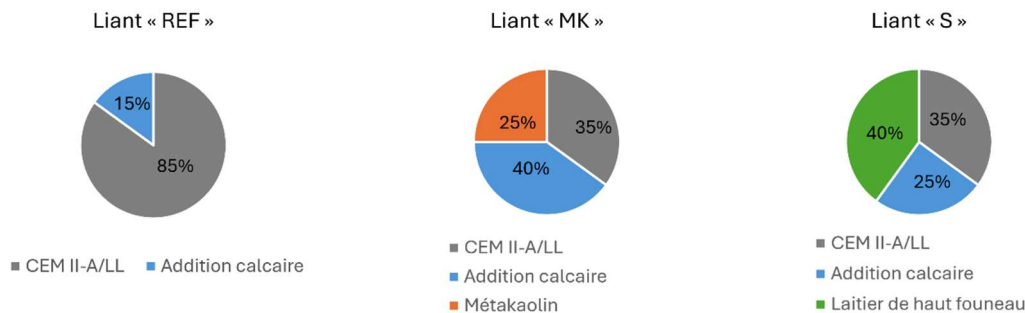


FIGURE 1. Schéma récapitulatif des compositions des liants étudiés

B. Fabrication, conditions de cure et de conservation

Les bétons ont été caractérisés à l'état frais (affaissement, masse volumique, teneur en air). Trois classes de cure ont été définies selon la norme NF EN 13670/CN :

- Classe de cure 2 (C2) : démoulage lorsque 35 % de la résistance caractéristique à 28 jours est atteinte.
- Classe de cure 3 (C3) : démoulage à 50 % de cette résistance.
- Classe de cure 4 (C4) : démoulage à 70 % de cette résistance.

Pour les bétons de référence, les classes de cure adoptées sont C3 et C4. Les bétons ternaires à faible impact environnemental ont été démoulés selon les classes C2 et C3.

Les échéances de démoulage ont été établies par des essais préalables de résistance à la compression. Après démoulage, les éprouvettes sont soumises à deux types de conservation : CoH (ambiance humide (20 ± 2 °C, HR > 95 %)), et CoS (ambiance « sèche » en laboratoire (20 ± 2 °C, HR = 60 ± 5 %)).

C. Essais réalisés à l'état durci

Des éprouvettes cylindriques ($\varnothing 11 \times 22$ cm) ont été fabriquées pour les différents essais à l'état durci. Les bétons ont fait l'objet d'une campagne de caractérisation à différentes échéances (28 et 90 jours). Une partie des résultats est présentée dans cet article : résistance à la compression (NF EN 12390-3), résistivité électrique (XP P18-481) et carbonatation accélérée (XP P18-458). Le programme expérimental a été établi pour permettre d'évaluer l'influence de la formulation, de la cure et des conditions de conservation sur les performances de durabilité des bétons étudiés.

III. RESULTATS

A. Essais à l'état frais

Les résultats des essais à l'état frais indiquent que la masse volumique des bétons se situe entre 2 369 et 2 425 kg/m³. Ces valeurs, en accord avec celles généralement observées pour des bétons traditionnels de préfabrication, correspondent à la catégorie des « bétons de masse volumique normale » au sens de la norme NF EN 206+A2/CN (2022).

L'air occlus reste faible dans l'ensemble des formulations (entre 0,7 % et 1,3 %).

Il convient de noter que les formulations contenant du métakaolin présentent une perte rapide de maniabilité, attribuée à la forte demande en eau du métakaolin dès les premières heures d'hydratation, ce qui accélère la rigidification du mélange (Mosser, 2023). Toutefois, cela n'a pas affecté la bonne mise en place du béton dans les moules.

B. Résistance à la compression

Les résistances à la compression mesurées à 90 jours sont regroupées dans le tableau 1 pour l'ensemble des bétons, en tenant compte des différentes conditions de cure et de conservation.

TABLEAU 1. Résultats moyens des résistances à la compression à 90 jours pour chaque béton étudié

Cures et conservation	REF0,45	REF0,35	MK0,45	MK0,35	S0,45	S0,35
CoH C2 (C3 pour REF) (MPa)	44,3	81,3	42,2	64,8	45,5	77,9
CoS C2 (C3 pour REF) (MPa)	41,6	69,1	31,8	60,5	31,4	60,4
CoS C3 (C4 pour REF) (MPa)	43,8	-	29,7	56	33	65,2
Impact de la conservation (CoS C2 - CoH C2) / CoH C2	-6%	-15%	-25%	-7%	-31%	-22%
Impact de la cure prolongée avant démoulage (CoS C3 - CoS C2) / CoS C2	+5%	-	-7%	-7%	+5%	+8%

Le type de liant et le rapport E_{eff}/L influencent nettement les résistances. Les bétons avec un rapport $E_{eff}/L = 0,35$ sont systématiquement plus performants.

Les résultats à 90 jours soulignent l'impact majeur des conditions de conservation sur la résistance à la compression. La conservation en ambiance sèche entraîne une baisse notable de performance, en particulier pour les bétons à base de laitier de haut-fourneau (-31 % pour S0,45) et de métakaolin (-25 % pour MK0,45). Par interpolation, il semble que dans le cas des formules intégrant du métakaolin,

L'impact de la conservation peut être assimilé à l'impact d'une augmentation du rapport E_{eff}/L de l'ordre de 0,05 sur les résistances mécaniques. Pour les formules avec du laitier de haut-fourneau, l'impact de la conservation peut être assimilé à l'impact d'une augmentation du rapport E_{eff}/L de l'ordre de 0,04.

Les bétons de référence, plus riches en clinker, sont moins sensibles à la dessiccation (-6 % pour REF0,45).

L'effet d'une cure prolongée sur les résistances mécaniques à 90 jours est plus contrasté : elle conduit à une légère augmentation de la résistance mécanique pour certaines formulations (+8 % pour S0,35 ; +5 % pour S0,45) mais conduit à une légère diminution des performances mécaniques pour les formules à base de métakaolin (- 7 %, correspondant à une différence de l'ordre de 2 à 4 MPa). L'effet d'une prolongation de la cure ne semble pas affecter de manière significative les performances mécaniques mesurées à 90 jours. Ces résultats indiquent également que, pour les bétons à additions très réactives comme le métakaolin, une cure prolongée ne compense pas toujours les effets des conditions de conservation (température et humidité relative) probablement en raison d'une évolution microstructurale défavorable en l'absence d'un maintien prolongé de l'humidité.

C. Essais de durabilité

1) Carbonatation accélérée

Les vitesses de carbonatation accélérée mesurées à 90 jours sont regroupées dans le tableau 2 pour l'ensemble des bétons, en tenant compte des différentes conditions de cure et de conservation.

TABLEAU 2. Résultats des essais de carbonatation accélérée à 90 jours pour chaque béton étudié

Cures et conservations	REF0,45	REF0,35	MK0,45	MK0,35	S0,45	S0,35
CoH C2 (C3 pour REF) (mm/jour ^{0,5})	0,7	< 0,1	2,75	1,76	1,47	0,74
CoS C2 (C3 pour REF) (mm/jour ^{0,5})	1,42	0,8	3,21	2,28	1,92	0,99
CoS C3 (C4 pour REF) (mm/jour ^{0,5})	1,43	-	3,74	2,19	1,91	1,08
Impact de la conservation (CoS C2 - CoH C2) / CoH C2	+103 % (+0,72 mm/jour ^{0,5})	-	+17 % (+0,46 mm/jour ^{0,5})	+30 % (+0,52 mm/jour ^{0,5})	+31 % (+0,45 mm/jour ^{0,5})	+34 % (+0,25 mm/jour ^{0,5})
Impact de la cure prolongée avant démoulage (CoS C3 - CoS C2) / CoS C2	Négligeable (+1 %)	-	+17 % (\approx +0,55 mm/jour ^{0,5})	-4 % (\approx 0,1 mm/jour ^{0,5})	Négligeable (-1 %)	+9 % (\approx 0,1 mm/jour ^{0,5})

Les vitesses de carbonatation à 90 jours confirment l'influence majeure du type de liant et du rapport E_{eff}/L sur la résistance à la carbonatation.

En conservation humide (CoH), les bétons REF présentent les meilleures performances (<0,1 à 0,7 mm/jour^{0,5}), en lien avec leur forte teneur en clinker (et leur forte quantité de portlandite produite). Les bétons incorporant du métakaolin affichent les vitesses les plus élevées (1,76 à 2,75 mm/jour^{0,5}). Ce comportement met en évidence la moindre capacité tampon des liants riches en métakaolin, dont les hydrates produisent peu ou pas de portlandite (Mosser, 2023). Les bétons avec du laitier occupent une

position intermédiaire (0,74 à 1,47 mm/jour^{0,5}), compatibles avec une bonne durabilité (pour S0,45 : XC4 pour CoH C2 et XC2 pour CoS C2 et C3).

La compacité améliore nettement la résistance à la carbonatation, notamment pour les bétons MK et S, en réduisant la porosité et la pénétration du CO₂, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus sur des bétons similaires (Pernin et al, 2024).

L'effet de la conservation en revanche est mis en avant : la vitesse augmente en ambiance sèche, notamment pour REF0,45 (+103 %), MK0,35 (+30 %) et S0,35 (+34 %). Il convient de noter que ces ordres de grandeurs sont supérieurs à 0,4 mm/jour^{0,5} qui correspond à l'écart entre deux classes de performances utilisées pour justifier la durabilité des bétons par méthode performantielle (FD P18-480, tableau 3). Par interpolation, il apparaît que, pour les formules à base de métakaolin, l'effet d'une conservation non optimale sur la résistance à la carbonatation peut être assimilé à celui d'une augmentation du rapport E_{eff}/L comprise entre 0,05 et 0,10. De même, pour les formules à base de laitier, cet impact est équivalent à une hausse du rapport E_{eff}/L d'environ 0,07. Ces équivalences permettent de quantifier, de manière indicative, la dégradation potentielle liée à une conservation défavorable.

En revanche, à l'exception du béton MK0,45, l'impact d'une cure prolongée semble négligeable sur les vitesses de carbonatation accélérée mesurées à 90 jours, avec des variations faibles (entre -4 % et +9 %, soit des cinétiques de carbonatation impactées de l'ordre de 0,1 mm/jour^{0,5}), ce qui suggère que la composition du liant et la compacité restent des facteurs prépondérants.

2) Profondeurs de carbonatation accélérée

La figure 2 présente les profondeurs de carbonatation mesurées lors des essais de carbonatation accélérés, en fonction de la racine carrée du temps (en jours^{0,5}) et des conditions de cure et de conservation appliquées. Bien que seuls les liants MK0,35, S0,45 soient illustrés ici, l'analyse a été conduite pour l'ensemble des formulations étudiées.

Ces graphiques mettent en évidence plusieurs points clés. D'une part, pour les conditions CoS C2 et CoS C3, un terme additif apparaît sur les régressions linéaires. Ce terme représente la profondeur de carbonatation initiale, directement mesurée en début d'exposition accélérée. Il traduit l'effet de "peau" mentionné dans les travaux du projet national PerfDuB (IREX, 2023). En effet, il représente l'impact des conditions de conservation sur les premiers millimètres d'enrobage, particulièrement sensibles à la dessiccation et à une hydratation incomplète. Le tableau 3 résume les valeurs de ces termes additifs extraites des régressions linéaires pour les couples de conditions CoS Cx et CoS Cy (avec $y = x + 1$).

D'autre part, on observe pour les liants MK0,35 et S0,45, et plus largement pour l'ensemble des liants ternaires étudiés, que les pentes des régressions linéaires sans prise en compte de la valeur initiale restent proches, quelles que soient les conditions de cure et de conservation. Cette constance suggère que, hormis l'effet initial en surface (effet de peau), le comportement en profondeur du béton vis-à-vis de la carbonatation demeure similaire, indépendamment des conditions d'hydratation ou de conservation initiales.

TABLEAU 3. Termes additifs obtenus par les régressions linéaires des profondeurs de carbonatation mesurées en fonction de la racine carrée du temps pour l'ensemble des liants étudiés

Cures et conservations	REF0,45	REF0,35	MK0,45	MK0,35	S0,45	S0,35
CoS Cx	0,96	1,31	6,0	1,71	7,72	3,99
CoS Cy	1,27	-	4,77	1,98	5,57	3,27

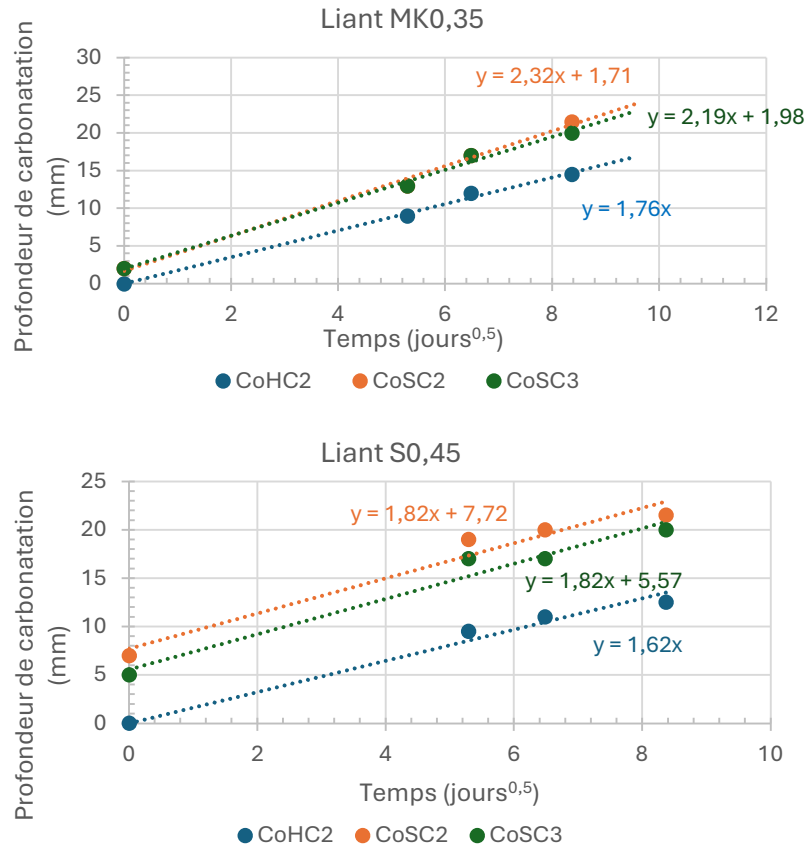


FIGURE 2. Profondeurs de carbonatation mesurées lors des essais de carbonatation accélérés, en fonction de la racine carrée du temps d'exposition (en jours^{0,5}) et des conditions de cure et de conservation appliquées – Exemple MK0,35 et S0,45

IV. ANALYSES

A. Impact des conditions d'expositions

La figure 3 présente la vitesse de carbonatation accélérée des bétons conservés en ambiance sèche, en fonction de celle des mêmes bétons conservés en condition humide considérée comme optimale, après un démoulage effectué selon la même classe de cure.

On observe une forte corrélation linéaire entre les deux modes de conservation, avec un coefficient de détermination $R^2=0,96$, traduisant une excellente cohérence entre les résultats. La droite de régression obtenue est :

$$y = 0,91x + 0,65$$

où :

- x = vitesse de carbonatation en conservation humide (mm/jour^{0,5}),
- y = vitesse en conservation sèche.

Cette équation montre que la conservation sèche induit systématiquement une augmentation des vitesses de carbonatation, illustrée par un coefficient directeur proche de 1 (0,91) et une ordonnée à l'origine positive (+0,65 mm/jour^{0,5}).

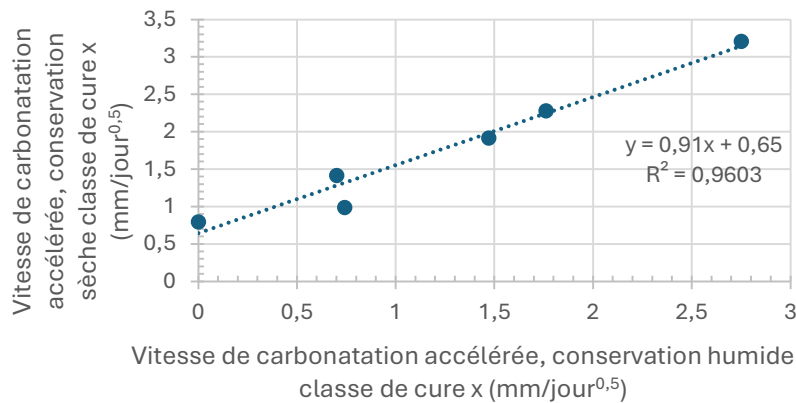


FIGURE 3. Vitesses de carbonatation accélérée des bétons étudiés conservés en ambiance sèche, en fonction de celles des mêmes bétons conservés en ambiance humide

Comme indiqué précédemment et avec les résultats obtenus sur les profondeurs de carbonatation, ce terme additif peut être interprété comme l'effet de "peau" mentionné dans les travaux du projet national PerfDuB (IREX, 2023), qui reflète l'impact des conditions de conservation sur les premiers millimètres d'enrobage, particulièrement sensibles à la dessiccation.

Ces observations sont en accord avec les travaux de Balayssac et al. (Balayssac, 1995) qui ont étudié l'influence de la cure initiale sur la vitesse de carbonatation. Dans leur étude, des éprouvettes démoulées après un jour ou curées à l'eau pendant 3 ou 28 jours ont été conservées jusqu'à 540 jours à 20 °C et 60 % HR. Les résultats montrent que plus la qualité du béton (résistance et rapport E/L) est élevée, plus l'écart entre les vitesses de carbonatation diminue. Pour un béton de plus faible qualité (25 MPa, E/L = 0,65, 300 kg/m³ de ciment Portland calcaire), la profondeur de carbonatation était de 9,5 mm après 540 jours d'essai pour les bétons conservés au préalable dans l'eau pendant 3 jours de cure, contre 6 mm après 540 jours d'essai pour les bétons conservés au préalable dans l'eau pendant 28 jours.

B. Impact de la cure

La figure 4 compare les vitesses de carbonatation accélérée des bétons conservés en ambiance sèche, en fonction de la classe de cure appliquée. Ici, la classe de cure y correspond à une cure prolongée (x+1), c'est-à-dire un démoulage plus tardif.

On observe une relation linéaire forte entre les vitesses de carbonatation des deux cures sèches, avec un coefficient de détermination élevé ($R^2=0,98$). La droite de régression est définie par l'équation :

$$y = 1,07x$$

où :

- x = vitesse pour la cure initiale (classe x),
- y = vitesse pour la cure prolongée (classe x+1).

L'exploitation des résultats confirme les premières tendances : pour les bétons étudiés, prolonger légèrement la cure initiale ne conduit pas toujours à réduire significativement la vitesse de carbonatation, en particulier pour des bétons à faible réserve alcaline. L'augmentation de la durée de cure à jeune âge ne permet pas systématiquement de compenser les effets négatifs d'une conservation sèche ultérieure dans les bétons étudiés.

De plus, il existe peu de données dans la littérature sur l'impact d'un démoulage simplement retardé de quelques jours, notamment pour les bétons à faible impact carbone. Il apparaît donc

nécessaire de poursuivre les recherches afin de mieux comprendre si une cure prolongée peut réellement améliorer la durabilité de ces bétons.

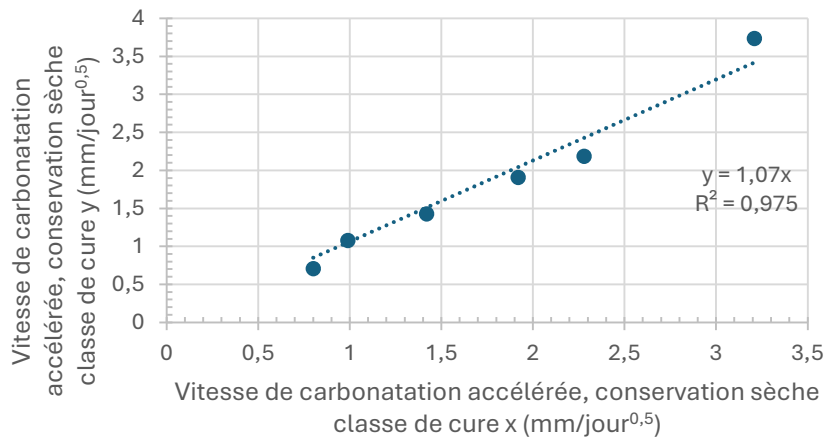


FIGURE 4. Vitesses de carbonatation accélérée des bétons conservés en ambiance sèche, en fonction de la classe de cure appliquée

C. Expression de la profondeur de carbonatation

Compte tenu des résultats obtenus dans cette étude et des enseignements du Projet National PerfDuB (IREX, 2023), la profondeur de carbonatation peut s'exprimer à partir d'une relation intégrant à l'épaisseur impactée par une cure et une conservation non optimale :

$$d_t = c + V_{acc} \times t^{0,5}$$

où :

- d_t est la profondeur de carbonatation (mm) après un temps t (en années) ;
- c représente un terme additif associé à la cure initiale, traduisant notamment la qualité de surface du béton (mm) ;
- V_{acc} est la vitesse de carbonatation accélérée (mm/ $\sqrt{\text{jours}}$) ;

Les résultats expérimentaux montrent qu'une conservation sèche ou une cure insuffisante peut engendrer des propriétés de transfert en « peau » du béton de moindre qualité. Cela se traduit par une profondeur de carbonatation plus importante dans les premiers millimètres du béton d'enrobage dès les premières semaines d'exposition des bétons à l'air ambiant (condition de conservation « sèche »). Dans ce contexte, l'introduction d'un terme additif c dans l'équation permet de modéliser spécifiquement cet effet de surface.

D. Expression du terme additif

L'analyse des valeurs des termes additifs obtenues pour l'ensemble des bétons étudiés permet de dégager plusieurs tendances marquées. Ce terme additif apparaît d'autant plus important :

- lorsque le rapport E/L est élevé ;
- lorsque la teneur en clinker dans le liant est faible. En effet, on observe que les bétons formulés avec le liant REF (contenant 76 % de clinker) présentent des termes additifs plus faibles que ceux élaborés avec des liants ternaires (31 % de clinker).

Par ailleurs, à rapport E/L identique (ainsi qu'à dosage en liant et squelette granulaire constants, cf. paragraphe II.A), les bétons à base de laitier de haut-fourneau (liants S) présentent systématiquement

des termes additifs plus élevés. Cette augmentation pourrait être attribuée à une teneur en CaO plus élevée dans ces formulations. Néanmoins, d'après le paragraphe §7.4.2 du livrable PN PerfDuB, le pourcentage en CaO est inversement proportionnel à la vitesse de carbonatation (IREX,2023).

Le tableau 4 synthétise les quantités estimées de CaO dans les différents liants, permettant de relier directement la composition chimique à l'importance du terme additif observé.

TABLEAU 4. Quantités estimées de CaO présentes dans les différents liants à partir de l'analyse des fiches techniques des constituants utilisés

Formules	REF0,45	REF0,35	MK0,45	MK0,35	S0,45	S0,35
Quantité de CaO estimé (% liant)	59	59	40	40	48	48

Ces influences observées permettent de formuler l'hypothèse selon laquelle ce terme additif serait proportionnel :

$$c \propto \frac{E/L}{\% \text{ CaO dans le liant} \times \% \text{ clinker dans le liant}}$$

Pour les formulations étudiées, la comparaison entre le terme additif obtenu (Tableau 3) et le rapport $\frac{E/L}{\% \text{ CaO} \times \% \text{ clinker}}$ a conduit à la figure 5.

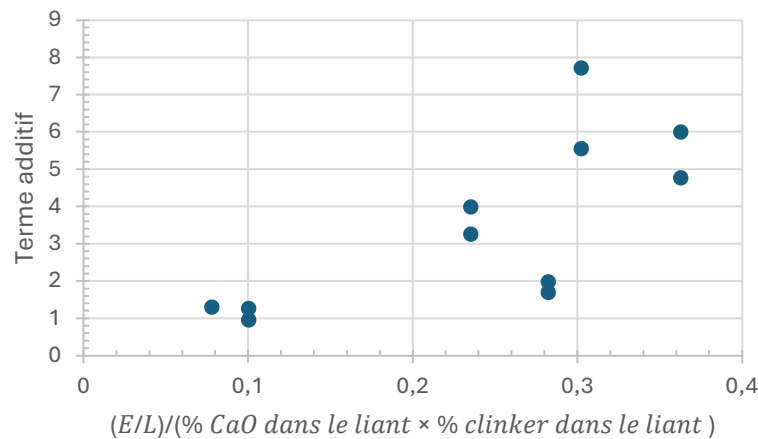


FIGURE 5. Terme additif en fonction du rapport combiné (rapport E/L, %CaO dans le liant, %clinker dans le liant)

Cette tendance confirmerait l'hypothèse selon laquelle le terme additif est influencé par la compacité du béton (via le rapport E/L), la teneur en CaO (liée à la réserve alcaline potentielle) et la proportion de clinker dans le liant. Ainsi, plus le rapport E/L est élevé et plus la teneur en clinker est faible, plus le terme additif est important, traduisant un effet de « peau » plus prononcé et une plus grande vulnérabilité initiale à la carbonatation.

Bien que cette corrélation doive encore être confirmée sur un ensemble plus large de formulations, elle constitue une première approche pour intégrer plus finement l'effet de la cure initiale dans les modèles prédictifs de carbonatation. Le poids relatif de chaque paramètre reste à affiner en élargissant l'étude à d'autres compositions, ce qui permettrait également d'enrichir l'équation de ce terme additif en tenant compte de variables supplémentaires. Il convient de rappeler que, dans cette étude, le dosage en liant et

le squelette granulaire ont été maintenus constants pour toutes les formulations, afin d'isoler les effets des paramètres étudiés.

IV. CONCLUSION

Cette étude a permis d'explorer l'impact de la nature du liant, de la compacité (via le rapport E_{eff}/L), de la durée de cure et du délai avant mise en exposition (conditions de conservation) sur la durabilité de bétons d'enrobage à faible empreinte carbone.

Les résultats confirment d'une part que la réduction du clinker, en partie substitué par des additions minérales (métakaolin ou laitier), permet d'atteindre des performances mécaniques et de durabilité satisfaisantes. Les bétons ternaires à base de laitier ou de métakaolin se sont révélés particulièrement sensibles aux conditions d'expositions sèches après démoulage, notamment vis-à-vis de la carbonatation, tandis que leur sensibilité à la durée de cure avant démoulage s'est avérée plus modérée. La compacité élevée ($E_{eff}/L = 0,35$) contribuerait cependant à atténuer ces effets en densifiant la microstructure.

Des analyses microstructurales sont en cours afin de confirmer cette hypothèse, ainsi que d'évaluer l'influence des conditions de cure et de conservation sur la microstructure des bétons à faible impact environnemental.

L'introduction d'un « terme additif » lié à l'effet de « peau » permettrait de représenter au mieux les phénomènes de carbonatation, ce terme semblant dépendre de la compacité, de la teneur en clinker et de la quantité de CaO.

Ces résultats soulignent l'importance de considérer non seulement la formulation et la cure initiale, mais aussi les conditions d'exposition réelles des ouvrages, afin d'évaluer de manière fiable la durabilité des bétons bas carbone et de garantir leurs performances à long terme.

Enfin, ces travaux ouvrent la voie à de futures recherches visant à valider ces tendances sur un plus large panel de formulations et en conditions réelles d'exposition, ainsi qu'à affiner les modèles prédictifs existants pour mieux prendre en compte les effets combinés de la composition et des conditions de mise en œuvre.

REFERENCES

- IREX (2023). Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton – De la qualification en laboratoire au suivi d'exécution. Projet National PerfDuB. *Editions Eyrolles*
- De Larrard (2000). Structures granulaires et formulation des bétons. *LCPC*
- Lucas Mosser (2023). Formulation de bétons décarbonés à base de clinker, métakaolin et d'addition calcaire pour une application aux produits préfabriqués. *Thèse de doctorat Génie civil. IMT – Mines Alès.*
- Pernin et al. (2024). Durability of concretes with low environmental emissions based on ternary binders : corrosion resistance and positioning with respect to the performance approach. *ACI-RILEM, Proceedings of the Supplementary papers: SUPP2024*
- Rojo-López G. et al. (2022). Rheology, durability, and mechanical performance of sustainable self-compacting concrete with metakaolin and limestone filler. *Case Studies in Construction Materials 17*
- Balayssac, J.P. (1995), Détriché, Ch. H., and Grandet, J. Effects of curing upon the carbonation of concrete. *Construction and building materials*. Volume 9, No. 2. p 91-95.