

Etude comparative de l'effet du liant sur la durabilité des bétons de sol à base de sable argileux et de latérite

Alain Kamdem^{1,2}, Javad Eslami¹, Emmanuel Elat¹, Jean Chills Amba², Moussa Sali², Albert Noumowé¹

¹ CY Cergy Paris Université, Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (LM2GC), Neuville sur Oise 95031 Cergy-Pontoise Cedex, France.

² Université de Douala, Laboratoire d'Energie, Matériaux, Modélisation et Méthodes (LE3M), PK17 Logbessou Douala, Cameroun.

RESUME : Le béton de sol est un matériau issu du mélange du sol en place avec un liant hydraulique. Ce travail expérimental vise à étudier l'influence de la nature du liant sur certaines propriétés de durabilité des bétons de sol : la carbonatation (perte de masse (ζ), profondeur de carbonatation (X_c) et porosité accessible à l'eau (η)) et les cycles humidification/séchage (perte de masse (ζ) et résistance en compression (R_c)) des bétons de sol. Pour ce faire, nous avons utilisés trois types de liant : le CEM I 52.5, le CEM II 42.5 et le CEM III 32.5. Le sable argileux (SA5) et la latérite (LA5) de classe granulaires 0/5 sont les sols utilisés. Les formulations pour différents dosages en ciment (150 et 250 kg/m³) ont été obtenues pour une ouvrabilité constante comprise entre 32 et 33 cm. Les résultats obtenus montrent que la perte de masse due aux cycles humidification/séchage (H/S) et la profondeur de carbonatation (X_c) sont plus élevées pour les bétons de sol à base de LA5 que ceux à base de SA5. Les profondeurs de carbonatation (X_c) obtenues sont plus importantes sur des formulations avec du CEM III 32.5, suivit du CEM II 42.5 et du CEM I 52.5. Pour les cycles H/S, les formulations à base de LA5 sont plus sensibles aux cycles H/S que ceux à base de SA5.

Mots-clefs : Béton de sol, ouvrabilité, carbonatation, cycles H/S.

I. INTRODUCTION

Les méthodes d'amélioration et de renforcement des sols suscitent un intérêt croissant et sont de plus en plus exigeantes sur le plan technique. Sur le plan de l'urbanisation, elles permettent d'accroître le nombre de terrains constructibles et présente une solution économique grâce à l'utilisation du sol en place. Le Soil Mixing est l'une des méthodes d'amélioration et de renforcement des sols qui consiste à mélanger le sol en place avec un liant hydraulique. Il est majoritairement utilisé pour réduire le tassement des sols, ou réaliser des parois étanches et des fondations (Abbey & Ngambi, 2015). Aujourd'hui, il est de plus d'envisager pour la réalisation d'ouvrages permanents. L'utilisation structurelle du béton de sol n'est cependant pas encore réglementée comme le béton selon les recommandations de l'Eurocode 2, ni validées par les études de durabilité. De nos jours, très peu d'études portent sur l'influence de la nature du sol et du liant sur la durabilité (carbonatation et cycles H/S) des bétons de sol.

Pour la carbonatation, Hessouh (Hessouh, 2021a) a effectué une étude sur les bétons de sol à base de sol limoneux formulé avec du CEM III 32.5 qui a montré qu'une hygrométrie d'exposition

(40%, 65% et 100%) plus élevée semble ralentir la cinétique de carbonatation. Il a également montré que pour des faibles dosages en ciment, l'augmentation de la proportion d'argile semble également réduire la cinétique de carbonatation. Il l'explique par le fait qu'une augmentation du taux d'argile dans le matériau entraîne une diminution de la proportion des gros pores ralentissant ainsi la cinétique de la carbonatation.

Park (Park, 2010) s'est concentré sur l'utilisation de sable faiblement cimenté comme matériau pour la construction de barrages et de murs de soutènement en Corée. Les résultats ont montré que les propriétés mécaniques étaient améliorées au cours de cycles H/S successifs à partir de 8 % de teneur en ciment par rapport à la masse de sable. Les travaux de (Guimond-Barrett, 2013) montre que dans les cycles H/S, tant que les périodes de séchage n'induisent pas de microfissuration, la résistance en compression et la rigidité des bétons de sol à base de limon et sable formulés avec du CEM III 32.5 continuent d'augmenter avant que le processus d'hydratation du ciment ne soit terminé.

Cet article présente de manière synthétique les résultats des travaux expérimentaux qui ont été conduits afin de mieux comprendre l'influence de la nature sol et du liant sur la durabilité du béton de sol. L'étude présente tout d'abord les propriétés des matériaux utilisés pour la confection du béton de sol. Ensuite, les étapes de formulation, de confection et de conservation des éprouvettes de béton de sol sont détaillées. Puis, les démarches expérimentales pour la réalisation des essais de carbonatation et cycles H/S sont également présentés. En fin, les propriétés du matériau sont analysées en situation de cycles de vieillissement accéléré (H/S) et de carbonatation

II. Programme expérimental

1. Caractéristiques des matériaux

a) Les sols

Dans cette étude, deux sols ont été utilisés comme agrégats pour la réalisation du béton de sol : la latérite (dénommée LA) et le sable argileux (dénommé SA). Ces matériaux proviennent respectivement de Simbog à Yaoundé et de Japoma à Douala au Cameroun. La classe granulaire utilisée pour les deux sols est (0/5). Une analyse granulométrique par tamisage jusqu'à 63 μm suivant la norme (NF EN 933-1) a été effectuée sur les deux sols. La distribution granulaire des fractions fines est obtenue par analyse granulométrique au laser par voie humide. La figure 1 présente les distributions granulaires des sols (LA et SA).

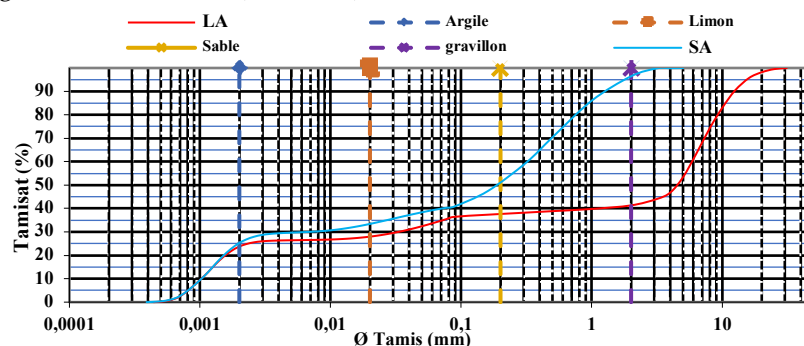


FIGURE 1. Distribution granulaire des sols (LA et SA)

Le tableau 1 présente les différentes caractéristiques intrinsèques des sols utilisés pour la fabrication du béton de sol. Les essais de poids spécifique, pH, valeur au bleu de méthylène, limites d'Atterberg (LA) et d'équivalent de sable (SE) ont été réalisés respectivement suivant les normes : (NF EN 933-8/IN1 ; NF EN 933-9 ; NF EN ISO 10523 ; NF EN ISO 17892-3 ; NF EN ISO 17892-12).

TABLEAU 1. *Caractéristiques intrinsèques de SA et LA*

Matériaux	ρ (kg/m ³)	pH (-)	Surface BET [m ² /g]	VBS (-)	LA (%)			ES (%)
					Wp	WL	Ip	
SA	2487	5,34	0,90	0,43	29,33 %	56,39 %	27,06 %	10,49
LA	2688	5,23	0,76	0,90	42,64 %	76,45 %	33,81 %	5,99

LA et SA ont une limite liquide WL de 76,45% et 56,39% respectivement, un indice de plasticité Ip de 33,81% et 27,06%. Ces résultats montrent que LA5 est un sol plus plastique que SA5.

b) Les ciments

Les ciments utilisés pour cette étude sont le CEM I 52.5 N CE CP2 NF et le CEM III / C 32.5N CE PM- ES NF fabriqués en France, respectivement par EQIOM et CALCIA, et le CEM II B-P 42.5 R NC fabriqué au Cameroun par CIMENCAM, filiale du groupe LAFARGE. Le tableau 2 présente la masse volumique absolue et la surface spécifique des ciments utilisés pour la fabrication du béton de sol.

TABLEAU 2. *Caractéristiques des ciments utilisés*

Matériaux	ρ (kg/m ³)	Surface BET [m ² /g]
CEM I 52,5	3150	0,40
CEM II 42,5	3100	0,35
CEM III 32,5	2900	0,47

2. Dosages et formulations

Deux dosages en ciment (150 et 250 kg/m³) ont été retenus pour la confection des éprouvettes de béton de sol. Les abréviations retenues des bétons sol seront liées à la nature du matériau, la granulométrie, à la nature du ciment utilisé et à dosage. Par exemple, le béton de sol obtenu d'un mélange de SA de classe granulaire 0/5 avec du ciment CEM II 42,5 dosé à 250 kg/m³ sera nommé SA5C250_II.

La méthode de formulation consiste tout d'abord à fixer la valeur du dosage en ciment puis, on en déduit la quantité de sol à rajouter au mélange, de manière à obtenir 1 m³ de béton frais. Le choix du dosage en eau est ensuite vérifié expérimentalement à l'aide d'un mini-cône. Les différentes formulations ont en effet été réalisées à ouvrabilité constante en fixant un étalement compris entre 32 et 33 cm environ correspondant à un béton de sol autoplaçant. Le tableau 3 présente les formulations obtenues.

3. Confection des éprouvettes et cure

Le sol et le ciment sont tout d'abord été mélangés manuellement à sec pendant 5 minutes environ à une vitesse de 63 tours/min, de manière à obtenir un mélange homogène, suivi par un malaxage mécanique avec de l'eau est ensuite effectué à l'aide d'un malaxeur CONTROLAB pendant 10 minutes, car au-delà le malaxage n'a plus vraiment d'effet sur la résistance du béton durci (NF EN 12350-7).

Le tableau 3 présente les résultats obtenus des formulations et étalements du béton de sol frais.

TABLEAU 3. Formulation et étalement du béton de sol frais.

Sable argileux (CEM II 42.5)					
Ciment [kg/m³]	Sol [kg/m³]	Eau [kg/m³]	E/C [-]	Mesure au mini-cône	cm
150	1061	525	3,5	Etalement	33,0 ± 0,6
250	981	525	2,10		33,2 ± 1,0
Latérite 5 mm (CEM II 42.5)					
150	1026	570	3,80	Etalement	32,3 ± 0,8
250	939	570	2,28		32,8 ± 0,9
Sable argileux (CEM III 32.5)					
Ciment [kg/m³]	Sol [kg/m³]	Eau [kg/m³]	E/C [-]	Mesure au mini-cône	cm
150	1053	525	3,50	Etalement	34,1 ± 1,0
250	967	525	2,10		33,3 ± 0,8
Latérite 5 mm (CEM III 32.5)					
150	1017	570	3,80	Etalement	33,2 ± 1,2
250	924	570	2,28		33,6 ± 0,7
Sable argileux (CEM I 52.5)					
Ciment [kg/m³]	Sol [kg/m³]	Eau [kg/m³]	E/C [-]	Mesure au mini-cône	cm
150	1063	525	3,50	Etalement	30,8 ± 1,2
250	984	525	2,10		31,1 ± 0,7
Latérite 5 mm (CEM I 52.5)					
150	1028	570	3,80	Etalement	29,9 ± 1,1
250	943	570	2,28		30,4 ± 0,8

Le remplissage des moules est effectué en trois couches successives. Après chaque couche, les bétons de sol sont serrés par la méthode tapping (15 coups). Pour l'ensemble des mélanges, le remplissage des moules est achevé au plus tard dans les 45 minutes suivant le malaxage avec le ciment. Cela permet de limiter l'influence du temps de repos avant la mise en place sur les caractéristiques du matériau (NF EN 12350-7).

Directement après confection, les éprouvettes de béton de sol sont stockées dans les sacs plastiques, puis dans des bacs dans le but de permettre un séchage endogène. Les éprouvettes de béton sol sont démoulées après 7 jours de cure dans les moules. Le mode de conservation adopté dans le cadre de ces travaux est une cure à l'eau saturée en chaux.

4. Essais

a) Carbonatation

Dans notre étude, nous effectuons une carbonatation accélérée à 0, 1 et 3 jours sur des éprouvettes cylindriques ($\varnothing=6$ mm et $h=4$ mm), et à 7, 14 et 28 jours sur des éprouvettes cylindriques ($\varnothing=6$ mm et $h=12$ mm), conservées dans une enceinte de carbonatation dont la teneur en $\text{CO}_2 = 3\%$, l'humidité relative $\text{HR} \approx 60$ à 70% et la température $T \approx 20$ à 30°C , (figure 2). Nous limitons les paramètres à considérer grâce à différents protocoles afin de mieux cerner le comportement du matériau vis-à-vis de la carbonatation. Les échantillons testés sont soumis à exposés au CO_2 sur une face afin de maîtriser son évolution dans une direction. Au préalable, les éprouvettes sont

récupérées après maturation à 90 jours dans l'eau, pesées, préséchées à l'étuve pendant 24h et 48h respectivement pour les éprouvettes cylindriques ($\varnothing=6$ mm et $h=12$ mm) et ($\varnothing=6$ mm et $h=12$ mm). Sortie de l'étuve, les éprouvettes sont pesées puis filmées à l'aide de papier aluminium autocollant. Les faces latérales sont alors étanchéisées ainsi qu'une des bases. Une seule face est alors exposée à l'air et au CO_2 contenu dans l'air.



Figure 2 : Dispositif expérimental pour la carbonatation : a) étuve, b) échantillon avec une face exposée, c) enceinte de carbonatation

b) Cycles humidification-séchage

Les cycles (H/S) sont démarrés après 90 jours de conservation endogène. Les éprouvettes de béton de sol de dimensions ($\varnothing = 60$ mm et $h = 120$ mm) sont successivement immergées dans l'eau puis séchées, afin d'engendrer un vieillissement accéléré du fait des cycles de variations dimensionnelles qui en découlent.

Une phase de 2 jours d'immersion dans l'eau a été adoptée et correspond pour les bétons de sol testés à un degré de saturation optimal (masse stabilisée). La phase de séchage est cependant plus délicate à établir, car la vitesse de séchage dépend à la fois de la formulation, de la taille de l'éprouvette, de la température et de l'hygrométrie (Hessouh, 2021b). Dans cette étude, le séchage a consisté à placer les éprouvettes de béton de sol cylindriques ($\varnothing = 60$ mm et $h = 120$ mm) dans une salle à température et humidité relative contrôlée (21 ± 6 °C et 69 ± 18 %) pendant 2 semaines, (figure 3). L'objectif recherché étant de se rapprocher au mieux des conditions naturelles (H/S).

Le suivi de l'évolution de la masse et de la Rc a été réalisé après 2, 4 et 6 cycles sur 3 éprouvettes pour chaque formulation.

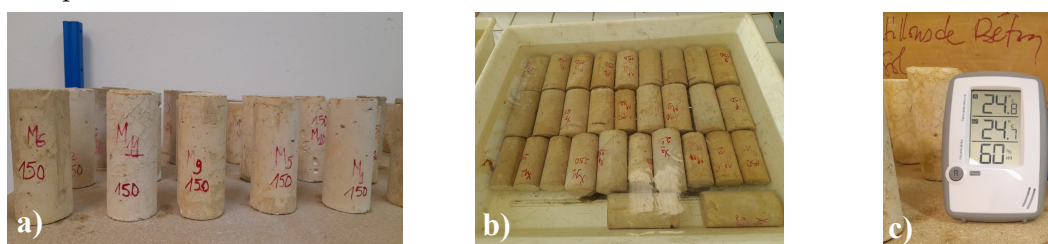


Figure 3 : Dispositif expérimental pour les cycles H/S : a) Séchage des éprouvettes, b) humidification des éprouvettes et c) Dispositif de contrôle de température et hygrométrie

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Carbonatation

a) Perte de masse

L'évolution de la ζ en fonction de la racine carrée du temps sur les éprouvettes ($\varnothing=6$ mm et $h=4$ mm) est présentée sur la Figure 4 (a, b et c). Les résultats obtenus sur les différents bétons de

sol montrent que la ζ varie globalement entre 10 et 27 % environ. La ζ est mesurée aussi bien à l'étuve que dans l'enceinte de carbonatation.

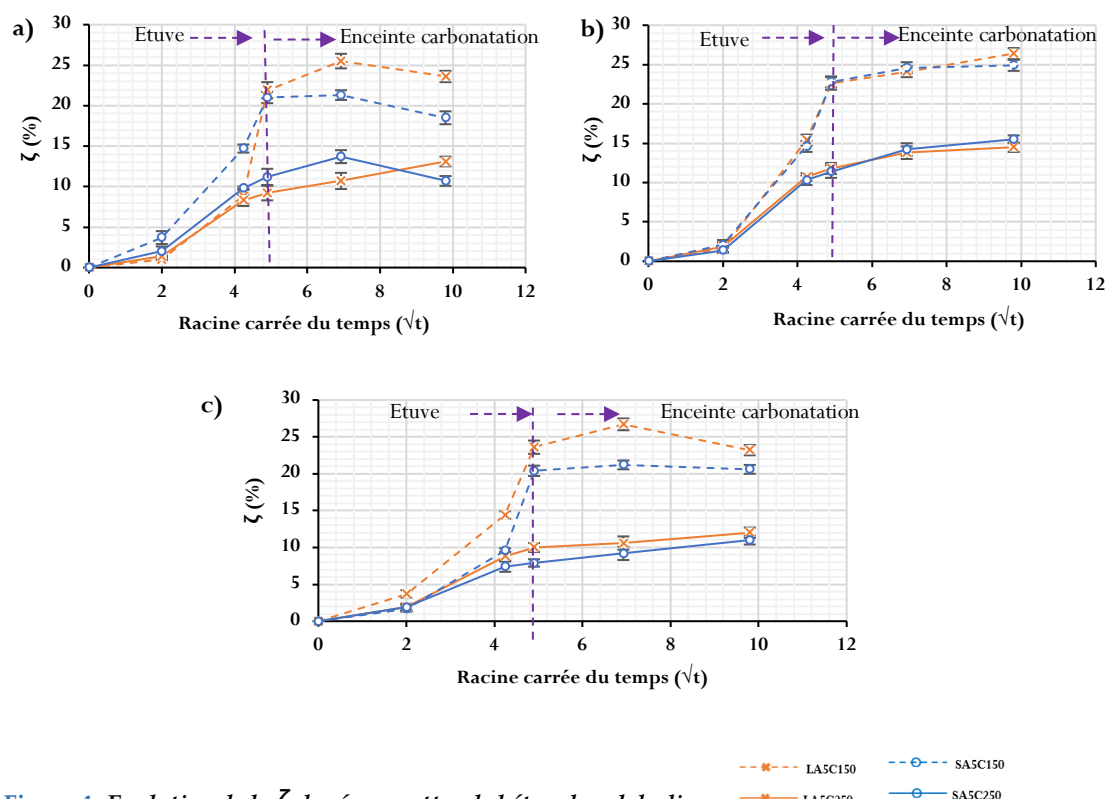


Figure 4. Evolution de la ζ des éprouvettes de béton de sol de dime dosées à 150 et 250 kg/m^3 en fonction du temps, formulées avec : a) CEM I 52.5 ; b) CEM II 42.5 et c) CEM III 32.5

La ζ du béton de sol est due au départ de l'eau libre et liée dans le matériau. Elle est due à une augmentation de la température entraînant une évaporation de l'eau dans le réseau poral du matériau. Cette quantité d'eau perdue est inférieure à la quantité d'eau de gâchage entrant dans la composition du béton de sol. Les résultats expérimentaux obtenus donnent des valeurs plutôt élevées de la ζ pour les formulations à base de LA5 que ceux à base de SA5 quel que soit le type de liant utilisé. Ceci s'explique par la quantité d'eau de gâchage entrant dans la formulation du béton de sol plus importante dans LA5C que dans SA5C. Sur l'ensemble des courbes obtenues, la ζ des bétons de sol est plus importante sur les faibles dosages en ciment (150 kg/m^3) comparativement aux forts dosages en ciment (250 kg/m^3).

b) Profondeur de carbonatation

La X_c est mesurée sur l'ensemble des formulations après 90 jours de maturation dans l'eau. La figure 5 présente l'évolution de X_c en fonction de la racine carrée du temps sur les éprouvettes de béton de sol étudiées de dimension ($\varnothing=6$ mm et $h=4$ mm) et ($\varnothing=6$ mm et $h=12$ mm). L'évolution de X_c en fonction de la racine carrée du temps montre que la cinétique de carbonatation évolue linéairement en fonction de la racine carrée du temps. L'augmentation du dosage en ciment entraîne une diminution de X_c dans les bétons de sol. Des études sur le béton ordinaire par (Duval, 1992; Venuat & Alexandre, 1968) ont montré que la profondeur carbonatée est d'autant plus faible que le dosage en liant est élevé.

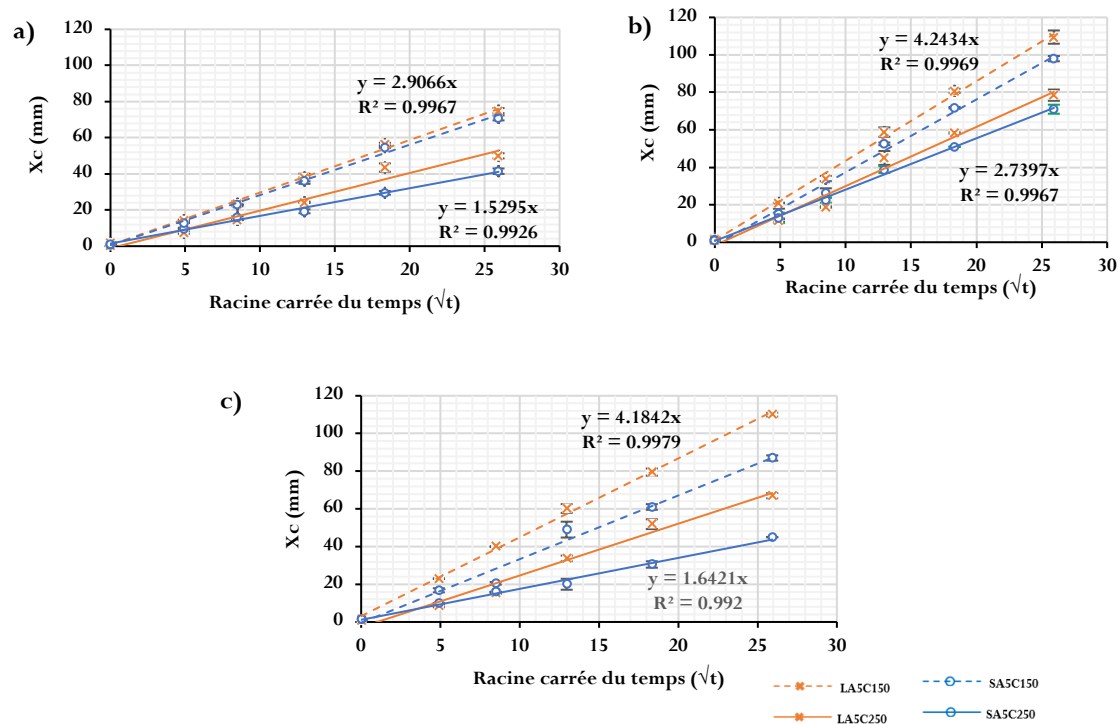


Figure 5. Evolution de X_c des éprouvettes de béton de sol à base de SA5 et LA5, dosées à 150 et 250 kg/m^3 en fonction de la racine carrée du temps et formulées avec : a) CEM I 52.5 ; b) CEM II 42.5 et c) CEM III 32.5

En effet, un fort dosage en ciment, d'une part, augmente la teneur en produits carbonatés (portlandite...), ce qui ralentit l'avancement du front de carbonatation, et d'autre part, réduit la porosité, donc ralentit la diffusion de CO_2 . Après 28 jours dans l'enceinte de carbonatation par exemple et pour un dosage en ciment de 150 kg/m^3 , la valeur de X_c des formulations à base de LA5 formulées avec du CEM I 52.5, du CEM II 42.5 et du CEM III 32.5 sont respectivement de 75 mm, 109,5 mm et 110 mm. L'ensemble des courbes de la figure 5 montre que les formulations à base de LA5 sont plus sensibles à la carbonatation que les formulations à base de SA5. Ceci s'explique par un rapport E/C plus élevé pour les formulations à base de LA5, car plus il est élevé plus le matériau contient de l'eau libre susceptible de s'évaporer. L'évaporation de l'eau excédentaire conduit à une forte porosité favorisant ainsi la diffusion du CO_2 dans le réseau poral (Song et al., 2006; Sulapha et al., 2003). La X_c des bétons de sol augmente avec leur rapport E/C dans le matériau. Des résultats obtenus, on constate que comparativement aux formulations avec du ciment Portland (CEM I 52.5), les formulations avec du ciment au laitier haut fourneau (CEM III 32.5) sont plus sensibles à la carbonatation. L'incorporation d'additions minérales (laitier de haut-fourneau) dans les matériaux cimentaires accélère leur carbonatation à cause de la faible teneur en clinker, ce qui réduit leur teneur en Portlandite (produit carbonatable) et diminue le pouvoir tampon de la solution interstitielle (Namoulriara, 2015).

c) Porosité accessible à l'eau

La porosité à l'eau a été déterminée et présentée sur la figure 6 (a, b et c), qui montre l'évolution de la porosité (η) en fonction de la nature et du dosage du ciment et de la nature du sol.

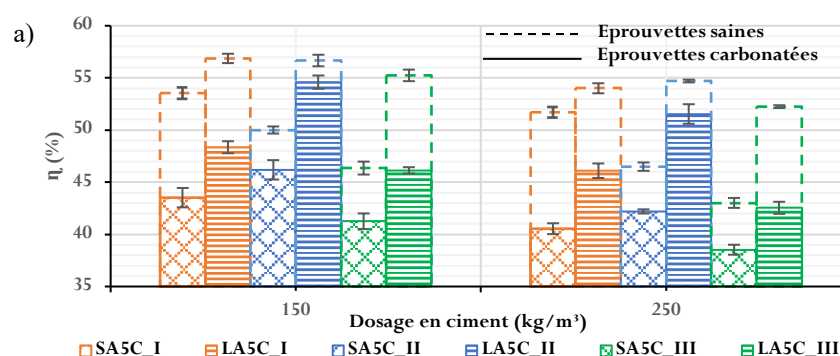


Figure 6. Evolution de la η des éprouvettes des bétons de sol de dimension $6 \times 12 \text{ cm}^2$ à base de SA5 et LA5 en fonction du dosage en ciment.

Les mesures faites à 28 jours sur les éprouvettes carbonatées montrent une réduction de la η sur le béton de sol. La diminution est estimée entre 14,6 et 21,7 % pour les formulations avec du CEM I 52.5, entre 2,1 et 9,2 % pour le CEM II 42.5 et entre 4,9 et 18,4 % pour le CEM III 32.5. Cette diminution de (η) peut s'expliquer par le remplissage des pores par les néoformés dans les matériaux, avec variation des volumes molaires de la portlandite. En effet, la réaction relative à la transformation d'une mole de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en une mole de CaCO_3 par action de CO_2 , induit un accroissement du volume de la phase solide, donc une diminution de l'espace poreux (Thiery, 2006). La η est plus importante dans le béton de sol à base de LA que celui à base de SA. Ceci à cause d'une plus grande quantité d'eau entrant dans sa confection pour une même ouvrabilité.

2. Cycles H/S

a) Observations visuelles

La figure 7 présente un exemple d'observation visuelle des bétons de sol à base de LA5 formulé avec du CEM I 52.5, dosé à 150 kg/m^3 .

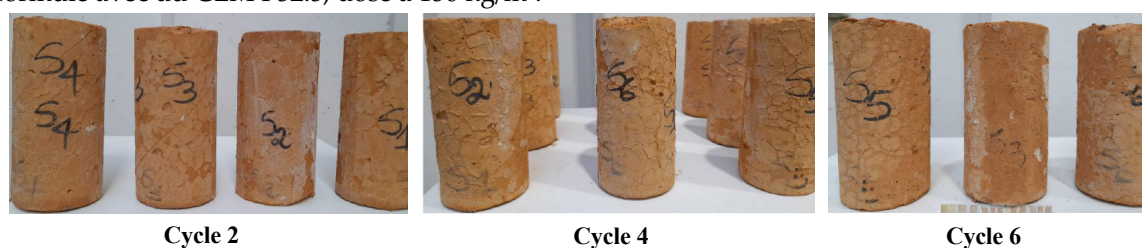


Figure 7. Observation visuelle des éprouvettes de béton de sol à base LA5 dosé à 150 kg/m^3 et formulé avec du CEM I 52.5 et soumis aux cycles H/S

Soumis aux cycles H/S, les éprouvettes de béton de sol présentent des desquamations, lessivages et fissurations comme dégradations sur leurs surfaces. Un phénomène de retrait a lieu pendant la phase de séchage des éprouvettes de béton de sol (retrait endogène, et de dessiccation). Ce retrait est causé par le déséquilibre hydrique entre l'intérieur des éprouvettes de béton de sol et le milieu ambiant de la salle de séchage.

b) Perte de masse

La figure 8 montre l'évolution de la ζ des bétons de sol à base de sable argileux et de latérite formulés avec les trois types de ciment (CEM I 52,5, CEM II 42,5 et CEM III 32,5) en fonction du nombre de cycles H/S.

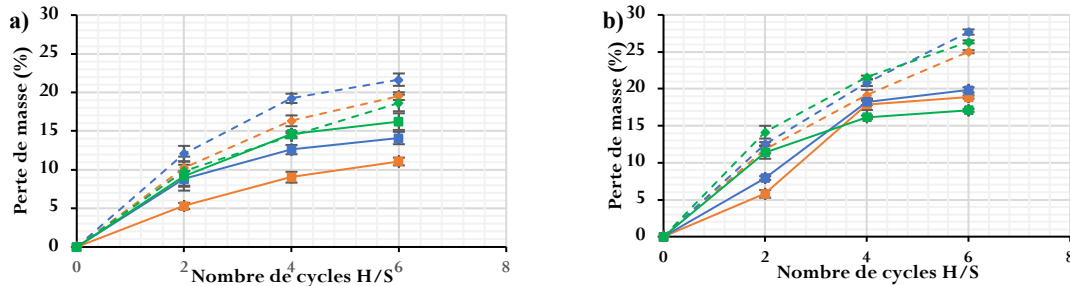


Figure 8 : Evolution de la ζ en fonction du nombre de cycles H/S. a) SA et b) LA

La figure 8 montre que la ζ augmente en fonction du nombre de cycles H/S. Cette tendance presque linéaire s'explique par la progression de la fissuration du matériau au fil des cycles, qui a lieu de la surface vers le cœur des éprouvettes et qui tend à favoriser le séchage. Concernant l'influence de la nature du sol, les valeurs de la ζ des formulations à base LA5 sont plus élevées que celles des formulations à base de SA5. Ceci peut s'expliquer par une plus grande quantité d'eau utilisée pour la formulation à base de LA5. On note sur les courbes obtenues que les valeurs de la ζ des bétons de sol sont plus grandes sur les faibles dosages en ciment (150 kg/m^3) comparativement aux forts dosages en ciment (250 kg/m^3).

c) Résistance en compression

L'évolution de la Rc en fonction du nombre de cycles H/S est présentée sur la figure 9 pour l'ensemble des formulations de béton de sol.

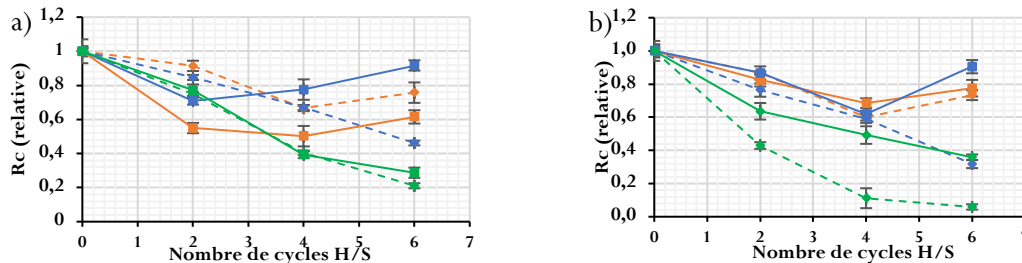


Figure 9 : Evolution de la résistance en compression en fonction du nombre de

Les résultats de la Rc sur la figure 9 sont normalisés par rapport aux valeurs initiales déterminées après 90 jours de cure dans l'eau. Les courbes de la figure 8 montrent qu'au bout de 6 cycles H/S, les chutes de la Rc les plus importantes sont observées sur les éprouvettes de béton de sol formulé avec du CEM III 32.5 et dosé à 150 kg/m^3 et dont les valeurs atteignent 94 % sur les formulations à base de LA5 et 79 % sur les formulations à base de SA5. Tout ceci montre que la Rc des formulations faites avec du CEM I 52.5 et du CEM II 42.5 et soumises aux cycles H/S sont moins affectées que celles formulées avec du CEM III 32.5. L'analyse par exemple de la Rc du 6ème cycle par rapport au 4ème cycle sur les éprouvettes à base de SA5 et LA5 formulées avec du CEM I 52.5, du CEM II 42.5 et du CEM III 32.5 permet de mettre en évidence l'influence de la nature du sol sur l'évolution de la Rc en fonction du nombre de cycle H/S. Ainsi par exemple pour les éprouvettes formulées avec du CEM I 52.5, le gain est de 9 % et 11 % sur les formulations à base de SA5 dosées respectivement à 150 et 250 kg/m^3 puis de 13 % et 9 % sur les formulations à base de LA5 dosées respectivement à 150 et 250 kg/m^3 .

IV. CONCLUSION

Plusieurs facteurs peuvent affecter la durabilité des bétons de sol : la nature du sol, la nature et le dosage en ciment, les conditions de remplissage et de serrage et le type de cure. Dans cette

étude, deux paramètres de durabilité ont été étudiés sur les bétons de sol à savoir : la carbonatation et les cycles H/S :

- 1) Pour la carbonatation des bétons de sol
 - a) La nature du sol influence l'évolution de la ζ et de X_c en fonction de la racine carrée du temps. Ceci s'explique par un rapport E/C plus élevé pour les formulations à base de LA5, car plus il est élevé plus le matériau contient de l'eau libre susceptible de s'évaporer.
 - b) La X_c évolue linéairement en fonction de la racine carrée du temps et l'augmentation du dosage en ciment entraîne une diminution de X_c dans ces bétons de sol.
 - c) Les formulations avec du CEM III 32.5 sont plus sensibles à la carbonatation que les formulations avec du CEM I 52.5 et du CEM II 42.5. Ceci s'explique par la teneur en produits carbonatés (portlandite) plus élevés sur les formulations avec du CEM I 52.5 et du CEM II 42.5 qu'avec du CEM III 32.5.
- 2) Pour les cycles H/S
 - a) La nature du sol et le dosage en ciment influencent l'évolution de la ζ en fonction des cycles H/S. Ceci est dû à la quantité d'eau utilisée pour la formulation.
 - b) L'évolution de la R_c du béton de sol en fonction du nombre de cycles H/S est influencée de façon importante aussi bien par la nature du sol que par la nature du liant. Pour ce qui est de la nature du sol, les formulations à base de LA5 sont plus sensibles aux cycles H/S que ceux à base de SA5.

REFERENCES

- Abbey, S., & Ngambi, S. (2015). Understanding the performance of deep mixed column improved soils-a review. *International Journal of Civil Engineering & Technology (IJCIET)*, 6(3), 97-117.
- Duval, R. (1992). La durabilité des armatures et du béton d'enrobage. *Paris: Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées*, 173-225.
- Guimond-Barrett, A. (2013). *Influence of mixing and curing conditions on the characteristics and durability of soils stabilised by deep mixing* [PhD Thesis]. Université du Havre.
- Hessouh, J. (2021a). *Caractérisations physique et mécanique, et durabilité des bétons de sol : Matériaux de laboratoire et matériaux de chantiers* [Phdthesis, CY Cergy Paris Université].
- Namouniara, D. K. (2015). *Etude expérimentale de la diffusion du CO₂ et des cinétiques de carbonatation de matériaux cimentaires à faible dosage en clinker* [PhD Thesis]. Université de La Rochelle.
- Norme ciment NF EN 197-1: Composition des ciments courants | Infociments. (s. d.). <https://www.infociments.fr/norme-beton-nf-en-197-1-composition-des-ciments-courants>
- Park, S.-S. (2010). Effect of wetting on unconfined compressive strength of cemented sands. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(12), 1713-1720.
- Song, H.-W., Kwon, S.-J., Byun, K.-J., & Park, C.-K. (2006). Predicting carbonation in early-aged cracked concrete. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 979-989.
- Sulapha, P., Wong, S. F., Wee, T. H., & Swaddiwudhipong, S. (2003). Carbonation of concrete containing mineral admixtures. *Journal of materials in civil engineering*, 15(2), 134-143.
- Thiery, M. (2006). Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires: Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques. *ETUDES ET RECHERCHES DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES-SERIE OUVRAGES D'ART*, OA 52.
- Venuat, M., & Alexandre, J. (1968). De la carbonatation du béton. *Revue des matériaux de construction*, 638, 640.