

DURABILITE DES BETONS DE SOLS VIS-A-VIS DES CYCLES DE GEL-DEGEL ET DE LA CARBONATATION

DURABILITY OF DEEP SOIL MIXING (DSM) MATERIALS SUBJECTED TO FREEZE-THAW CYCLES AND CARBONATION

Jacques J. M. M. Hessouh¹, Javad Eslami¹, Anne-Lise Beaucour¹, Albert N. Noumowe¹, Philippe Gotteland², Fabrice Mathieu³,

¹ *Université de Cergy-Pontoise, Cergy, France*

² *Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP), Paris, France*

³ *Soletanche Bachy, Paris, France*

RÉSUMÉ – Le Soil Mixing est un mélange de sol en place avec un liant. Ce matériau est utilisé généralement pour des ouvrages provisoires. Il est nécessaire de connaître la durabilité du matériau pour une utilisation pour des ouvrages permanents. Cette étude sur la durabilité de ce matériau vis-à-vis des cycles de gel-dégel et de la carbonatation, révèle une baisse importante des propriétés mécaniques pendant les cycles de gel-dégel et une influence importante du séchage sur la carbonatation.

ABSTRACT – Deep Soil Mixing material is a mix of soil in place with a binder. These materials are mostly used usually as temporary retaining wall or permanent cut off walls. Permanent applications require the assessment of durability parameters. This study on durability regarding freeze-thaw cycles and carbonation shows an important drop in mechanical properties during freeze-thaw cycles and an important influence of drying on carbonation.

1. Introduction

Les bétons de sol sont fabriqués directement in situ en mélangeant le sol en place avec un liant hydraulique. C'est une alternative intéressante avec moins d'impact sur l'environnement par rapport aux méthodes conventionnelles pour le renforcement des sols, les fondations et les murs de soutènement. Actuellement, les deux méthodes d'exécution les plus courantes sont le « deep soil mixing », qui consiste à mélanger mécaniquement le sol en place avec le liant, et le « jet grouting », qui utilise un jet d'énergie cinétique élevée du liant pour briser et ameublir le sol.

Pour le moment, ce matériau est principalement utilisé pour les structures temporaires dans le cas des parois de soutènement et pour des structures définitives dans le cas des parois étanches et de rétention d'eau. Une connaissance précise des propriétés de durabilité du matériau et de leurs relations avec les paramètres de conception du mélange favoriserait le développement du béton de sol à des fins structurelles permanentes. Il existe actuellement peu d'études de recherche sur les propriétés de durabilité comme la carbonatation et très peu d'études sur la résistance au gel-dégel. Or les bétons de sol seront exposés aux cycles de gel-dégel et à l'air ambiant pendant une longue période en cas d'application permanente sur un mur de soutènement.

La carbonatation est causée par la réaction du CO₂ avec les produits d'hydratation du ciment: l'hydrate de silicate de calcium (CSH) et l'hydroxyde de calcium (CH) sont convertis en carbonate de calcium CaCO₃. Le pH de l'eau interstitielle est réduit par carbonatation. Le taux de carbonatation dépend de nombreux facteurs tels que la concentration en CO₂, la teneur en eau, la perméabilité, le type de liant et la température. (Perera et al. 2005) ont constaté que la carbonatation peut avoir des effets importants sur la microstructure des sols stabilisés. Selon (Guimond-Barrett, 2013), la profondeur de

carbonatation ne dépasse pas 10 mm après 180 jours pour les échantillons avec un dosage de ciment de 200 ou 300 kg/m³. Le ciment utilisé était du CEM III. Les tests ont été effectués à une humidité relative de 65% et à une température de 20 ° C sur des échantillons exposés sur toutes leurs faces.

L'objectif de cet article est de comparer les propriétés de durabilité de béton de sol issus de trois chantiers de construction et de béton de sol réalisé en laboratoire. Les propriétés de durabilité étudiées concernent la résistance aux cycles de gel-dégel et la carbonatation.

2. Matériaux et Méthodes

2.1. Présentation des chantiers

Les chantiers de constructions étudiés sont situés en France. Sur le premier chantier, des colonnes de DSM sécantes ont été utilisées pour réaliser une paroi étanche avant l'excavation du sol pour la réalisation d'un sous-sol. Le sol en place a été mélangé avec un coulis dont le E/C est de 1. Le dosage en ciment était de 150 kg/m³ de sol en place. Le ciment utilisé est un ciment au laitier CEM III C 32,5N. Deux colonnes de Soil Mixing de 0,8 m de diamètre et de 3 m de profondeur ont été réalisées sur le chantier pour notre étude. Elles ont été excavées après 21 jours, comme le montre la figure 1, et immergées dans l'eau afin d'éviter la carbonatation.



Figure 1. Colonnes de Soil Mixing excavées après 21 jours

Les colonnes ont été sciées en tranches de 25 cm d'épaisseur. 230 carottes de 10 cm de diamètre et 20 cm de hauteur ont été forées pour les tests de propriétés mécaniques et 130 carottes de 5 diamètres et 10 cm de hauteur ont été forées pour les tests de propriétés physiques.

Sur les chantiers CS_2 et CS_3, des renforcements de parois de digue sont réalisés à l'aide de la technologie Trenchmix. Le ciment utilisé était du ciment au laitier CEM III C 32,5N. Sur le deuxième chantier (CS_2), le mélange est constitué de 210 kg/m³ de ciment et 25kg/m³ de chaux en raison de la présence de matières organiques. Le sol de la première partie de ce chantier est constitué d'argile limoneuse brune et la deuxième partie est constitué d'un mélange de sable et d'argile limoneuse brune. Une résistance à la compression de 2 MPa à 28 jours est requise car une route passe sur le remblai du barrage. Le mélange obtenu présente une consistance fluide. Des échantillons de mélange frais ont été moulés dans 48 moules de 11 cm de diamètre et 22 cm de hauteur. Sur le troisième chantier (CS_3), le dosage en ciment était de 180 kg/m³ de sol en place avec une teneur en eau de 220 kg/m³ de sol en place. Le sol en place était un remblai composé principalement de gravier et de sable. La résistance à la compression cible était de 2 MPa à 28 jours. Le mélange avait une consistance fluide. Des échantillons du mélange frais ont été moulés dans 22 cylindres de 11 cm de diamètre et 22 cm de hauteur.

2.2. Les bétons de sols réalisés en laboratoire

Pour comparer les résultats des échantillons issus des chantiers et les résultats des échantillons réalisés en laboratoire, des bétons de sol ont été fabriqués en laboratoire avec le sol en place prélevé sur le chantier CS_1 et le même ciment utilisé sur les chantiers de construction. Une approche béton a été utilisée pour calculer les proportions. Les mélanges sol-ciment seront appelés les bétons de sol. Les propriétés géotechniques des sols du site CS_1 sont résumées dans le tableau 1. A 1 m de profondeur, le sol peut être considéré comme une argile sablonneuse peu plastique et à 2 et 3 m de profondeur comme un sol limoneux plastique.

Tableau 1. Propriétés des sols prélevées sur le chantier CS_1

Profondeur (m)	Teneur en eau du sol (%)	VBS	Limite de liquidité (%)	Limite de plasticité (%)	Indice de plasticité (%)	Fraction de limon <60µm	Fraction de sable <2mm	Commentaire (Classification LCPC)
1	15,1	1,8	34,4	17,7	16,7	20%	70%	Sol sablo-argileux peu plastique
2	28,2	3,0	35,9	19,1	16,8	60%	90%	Sol limoneux à plasticité moyenne
3	33,1	3,5	38,5	18,0	20,5	55%	90%	Sol limoneux à plasticité moyenne

Cinq dosages en ciment différents de 100, 150, 200, 250, 300 kg/m³ de béton de sol, réalisé avec du sol à 1 m de profondeur nommé S1 et du sol à 3 m de profondeur nommé S3, ont été testés. La même teneur en eau totale de 50% a été maintenue pour tous les mélanges. Le tableau 2 montre les caractéristiques du matériau et le tableau 3 montre les paramètres de conception des différents mélanges ainsi qu'un résumé des propriétés physiques et mécaniques obtenues. Le dosage en ciment est indiqué à la fois par m³ de béton de sol et par m³ de sol en place. La teneur en eau totale des échantillons de terrain a été obtenue en tenant compte de la teneur en eau du sol et de l'eau supplémentaire du coulis de ciment ou de l'eau ajoutée par la machine pendant le mélange. Cette eau supplémentaire a été obtenue grâce aux enregistrements lors de l'exécution des ouvrages.

Tableau 2. Caractéristiques des matériaux

Paramètres	Masse volumique du ciment (kg/m ³)	Masse volumique des grains de sol (kg/m ³)	Masse volumique de l'eau (kg/m ³)	Masse volumique humide du sol (kg/m ³)	Teneur en eau du sol (%)
Valeurs	2900	2650	1000	1679 - 1880	33 - 54

Tableau 3. Paramètres de formulation pour 1 mètre cube de béton de sol

Echantillons	Dosage en ciment (kg par m ³ de béton de sol)	Teneur en eau (%)	Résistance en compression à 90 jours (MPa)	Porosité (%)	Perméabilité à l'eau (m/s)	E/C totale (%)	Dosage en ciment (kg par m ³ de sol en place)
S1C100	100	50	2.30	51	3.00E-10	5.72	135
S1C150	150	50	7.38	50	1.98E-11	3.82	212
S1C200	200	50	11.63	48	1.40E-10	2.87	297
S3C100	100	50	2.72	54	9.38E-10	5.72	135
S3C150	150	50	8.10	54	9.56E-11	3.82	212
S3C200	200	50	12.36	53	1.50E-11	2.87	297
S3C250	250	50	14.41	52	4.35E-11	2.30	390
S3C300	300	50	12.68	52	3.60E-10	1.92	494
CS_1	125	32	2.48	55	9.52E-09	3.69	150
CS_2 Sand	139	35	6.75	/	4.00E-10	3.48	210
CS_2 Silt	139	40	4.59	/	4.00E-10	3.74	210
CS_3	140	23	10.05	/	/	1.22	180

En premier, le sol a été tamisé avec un tamis de 12mm. Ensuite, il a été au moins saturé pendant 72 heures et mélangé pendant 5 minutes. La teneur en eau du sol mélangé a été mesurée. La densité du sol humide dans le tableau 2 a été déterminée à cette étape. Le malaxage consistait d'abord à introduire la moitié du sol, le ciment et l'autre moitié du sol, puis la quantité d'eau requise pour atteindre une teneur en eau totale de 50% pour le béton de sol. Après 10 min de malaxage, des moules cylindriques de 6 cm de diamètre et 12 cm de hauteur ont été remplis. Le remplissage des moules a été réalisé en 3 couches par une méthode de tapping. Après 72 heures, les échantillons ont été démoulés et immergés dans l'eau. Les mesures ont été effectuées à 7, 14, 28, 56, 90 et 180 jours de cure.

2.3. Essais

L'étude de la carbonatation a été réalisée en adaptant la norme NF EN 12390-10 (2018-12-19) pour le béton. Les essais de carbonatation ont été effectués sur des échantillons cylindriques de 11, 10 et 6 cm de diamètre et de même longueur de 5 cm après 180 jours de cure dans l'eau. Tous les échantillons ont été pesés et enveloppés dans une double couche de papier d'aluminium à dos adhésif, ne laissant ainsi que la surface supérieure exposée pour assurer un gradient de séchage unidimensionnel. Les échantillons ont ensuite été placés dans une enceinte climatique assurant une température constante (20 ± 2°C) et une humidité relative constante. Trois humidité relative, 40%, 65% et 85% ont été testées. La profondeur de carbonatation dans les échantillons de béton de sol soumis au séchage a été déterminée sur les cylindres fendu en pulvérisant une solution de phénolphtaléine. La solution pulvérisée produit un changement de couleur en fonction du pH. Incolore à des valeurs de pH faibles (au plus de pH 9), on obtient une couleur violette ou magenta à des valeurs de pH supérieures à 10,5. Cela permet donc d'évaluer la profondeur de carbonatation.

L'essai de gel-dégel a été réalisé selon la norme NF P 98-234-1, sur des éprouvettes cylindriques, de 11, 10 et 6 cm de diamètre et avec un élancement de 2 après 180 jours

de cure à l'eau. Les échantillons une fois sortis de l'eau ont été placés sur une grille pendant une heure. Ils ont été pesés et les mesures de vitesse des ondes P ont été effectuées sur tous les échantillons saturés. Les échantillons ont été enveloppés dans un film plastique pour empêcher toute perte de masse pendant l'essai. Les mesures de la teneur en eau pendant les cycles de gel-dégel montrent peu ou pas de variation de la teneur en eau. Les échantillons ont été exposés à des cycles de gel-dégel dans une chambre dont la température est régulée par une centrale de contrôle « Eurotherm 2500 ». Chaque cycle de gel-dégel a duré 24 heures. La température de l'air variait de +10 à -10°C à une vitesse de 5°C/h suivie d'une étape, où la température était maintenue constante pendant 14 h à -10°C. La vitesse de dégel était de 10 ° C / h suivie d'une étape où la température était maintenue constante pendant 4 h à +10°C.

Après 1, 6 et 20 cycles, deux ou trois échantillons de chaque formulation ont été soumis à des mesures de vitesse d'onde P et à des essais de compression uni-axiale. Les échantillons restants poursuivent les cycles de gel-dégel. Pour chaque formulation, un échantillon a été spécialement préparé pour la mesure de la température. Deux thermocouples ont été installés pour mesurer la température à la surface et au centre de l'échantillon.

3. Résultats et analyses

3.1. Carbonatation

Généralement, pour les structures permanentes, les essais de carbonatation sont effectués avec une concentration de CO₂ suffisamment importante pour accélérer le processus de carbonatation et les échantillons sont préparés avant l'essai pour être dans un état hydrique à l'équilibre. Dans cette étude, les échantillons initialement saturés ont été exposés à des conditions atmosphériques normales et, par conséquent, la carbonatation n'a pas été isolée des phénomènes de séchage.

La figure 2-a montre l'évolution de la profondeur de carbonatation des échantillons prélevés sur le chantier CS_1 dans le temps pour différentes humidités relatives de 40%, 65% et 85%. Chaque point représente la valeur moyenne de 3 ou 4 échantillons. Tout d'abord, les échantillons ont été placés dans une enceinte climatique avec une humidité relative de 40% et à une température de 20°C. La perte de masse est très importante au cours des 14 premiers jours et une densité de fissuration très élevée a été observée sur la surface exposée des échantillons. Selon (Helson et al., 2018), un phénomène de retrait de dessiccation se produit. La fissuration résulte de l'incompatibilité des déformations entre les grains de sable et la phase liante, mais aussi du retrait de séchage.

Après 3 mois, une profondeur de carbonatation d'environ 16 mm a été mesurée. Comparée au béton conventionnel, la cinétique de carbonatation est particulièrement élevée. Cela est dû à la porosité et à la perméabilité élevées du béton de sol (Tableau 3.), ce qui conduit à une cinétique de séchage et de diffusion du CO₂ beaucoup plus rapide que les bétons conventionnels. Afin d'évaluer l'impact des fissures du retrait de séchage sur la cinétique de carbonatation, deux humidités relatives plus douce de 65% et 85% ont été testées. L'évolution de la carbonatation est assez similaire pour une humidité relative de 40% et 65%. Après 3 mois, la profondeur de carbonatation est légèrement inférieure pour une humidité relative de 65%. Dans le cas d'une humidité relative de 85%, aucune profondeur de carbonatation n'a été observée. Cela s'explique par l'absence variation de masse qui indique qu'il n'y pas eu de séchage pour cette humidité (Figure 2-b).

Afin d'étudier l'effet du dosage en ciment et de la nature du sol sur la carbonatation des bétons de sol, les échantillons fabriqués en laboratoire avec deux types de sols et différents dosages de ciment ont été exposés à une humidité relative de 65%. La figure 3-a montre l'évolution de la profondeur de carbonatation après 180 jours d'exposition à une

hygrométrie relative de 65% en fonction des dosages de ciment pour différents échantillons. Jusqu'à un dosage en ciment de 250 kg/m^3 , la profondeur de carbonatation diminue significativement avec la teneur en ciment puis reste constante au-delà. L'effet du type de sol semble non significatif pour les échantillons ayant la même teneur en eau et le même rapport E / C. Les résultats obtenus pour les échantillons prélevés sur les chantiers CS_1 et CS_2 sont également présentés sur la figure 3-a. La profondeur de carbonatation des échantillons de chantier est légèrement inférieure à celle des échantillons fabriqués en laboratoire.

En général, les paramètres influençant la carbonatation des bétons conventionnels sont d'une part, les paramètres intrinsèques tels que la perméabilité, la porosité (quantité et taille des pores) et la teneur en ciment et d'autre part les conditions d'exposition, telles que l'humidité relative et la teneur en CO_2 . L'augmentation de la teneur en eau réduit l'espace disponible pour la diffusion du CO_2 à travers le réseau poreux de la matrice cimentaire. Cependant, la réaction de carbonatation est favorisée par la teneur en humidité dans les pores. Par conséquent, selon le réseau poreux, il existe une humidité relative et une teneur en eau pour lesquelles la réaction de carbonatation est optimisée.

Les courbes de perte de masse montrent que les échantillons de terrain sèchent plus rapidement que les échantillons de laboratoire, comme le montre la figure 3-b. Cela peut s'expliquer par la perméabilité plus élevée ($\times 100$) et une teneur en eau initiale plus faible des échantillons de terrain. Cependant, la réaction de carbonatation s'arrête lorsque l'humidité dans les pores du matériau devient insuffisante pour permettre la dissolution du CO_2 . On peut supposer que la profondeur de carbonatation plus faible des échantillons de terrain est due à un séchage plus rapide du matériau.

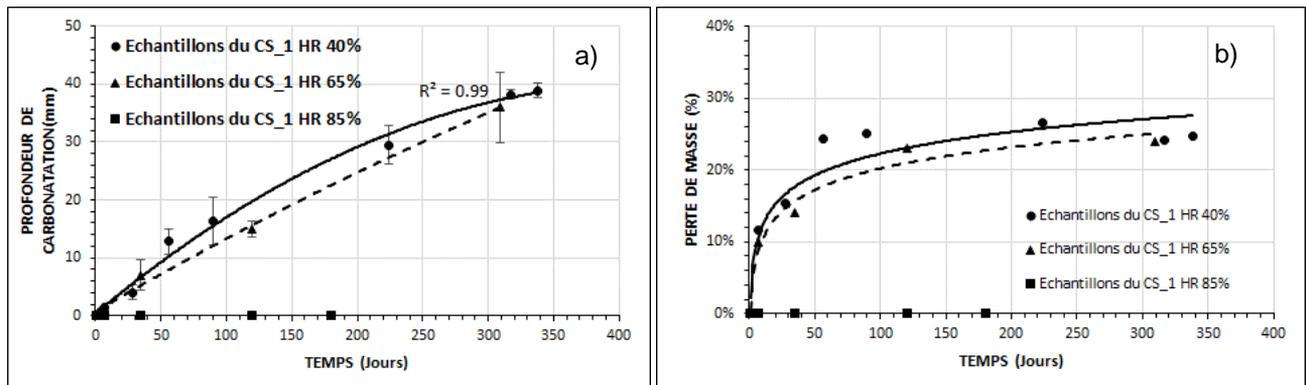


Figure 2. a) Evolution de la profondeur de la profondeur de carbonatation pour les échantillons du CS_1 exposés à différentes hygrométries ; b) Evolution de la perte de masse pour les échantillons du CS_1 à différentes hygrométries.

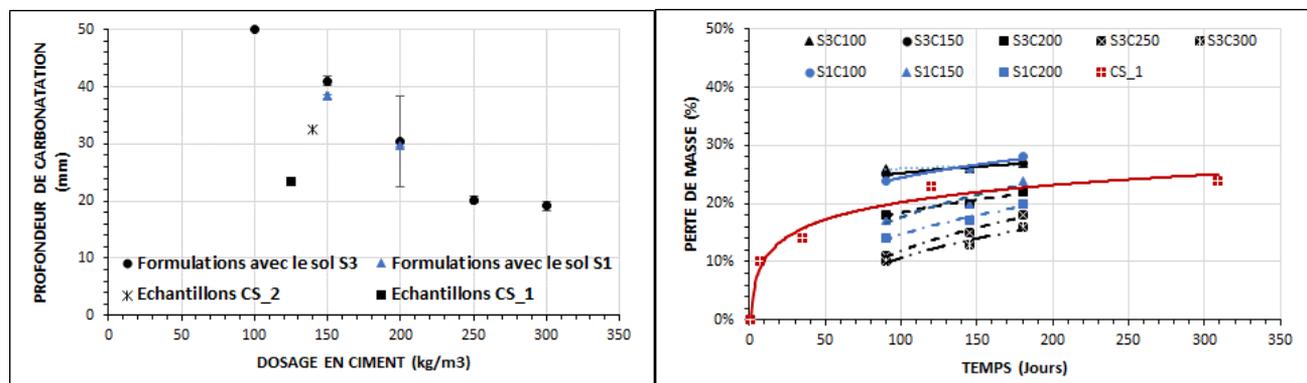


Figure 3. a) Profondeur de carbonatation des différents échantillons testés après 180 jours d'exposition à une hygrométrie de 65% ; b) Perte de masse pour les différents échantillons dans le temps à une hygrométrie de 65%.

3.2. Cycles de gel-dégel

La figure 4-a montre la perte de résistance à la compression et la vitesse des ondes P, pour les échantillons fabriqués en laboratoire avec du sol S1, en fonction du nombre de cycles de gel-dégel. Les résultats sont normalisés par rapport à leurs valeurs initiales déterminées après 180 jours de cure dans l'eau. La résistance à la compression et les chutes de vitesse des ondes P sont plus importantes pour les premiers cycles et la chute de la résistance à la compression peut atteindre environ 68% pour S1C100 après 20 cycles de gel-dégel. Les résultats montrent une meilleure résistance au gel des échantillons avec un dosage de ciment plus élevé.

La figure 4-b montre l'évolution de la résistance à la compression et de la vitesse des ondes P pendant les cycles de gel-dégel pour les échantillons constitués de sol S3 qui suit la tendance générale des échantillons réalisés avec le sol S1.

La figure 5-a montre la perte de résistance et de la vitesse des ondes P des échantillons prélevés sur les différents chantiers de construction. Les échantillons prélevés sur le site CS_1 perdent 100% de leurs propriétés initiales après 6 cycles. Cette sensibilité au gel pourrait s'expliquer par la forte hétérogénéité des échantillons du site CS_1. Cette hétérogénéité du matériau causée par une mauvaise qualité de mélange, favorise le développement de fissures à l'interface sol-coulis lors des cycles de gel-dégel. Pour les échantillons provenant du site CS_3, la chute de résistance à la compression était d'environ 30%.

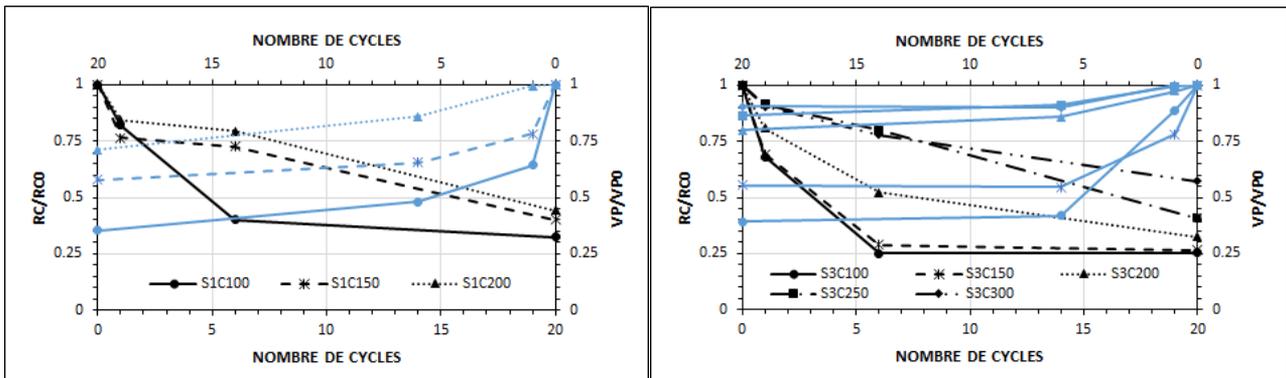


Figure 4. Evolution de la résistance en compression et de la vitesse des ondes P résiduelles en fonction des cycles de gel-dégel pour les échantillons des formulations a) S1 ; b) S3

Dans le cas du site CS_2, à même teneur en ciment, les échantillons constitués du sol argileux perdent 100% de leur résistance après 20 cycles, tandis que les échantillons constitués du sol sableux perdent 75% de leur résistance à la compression.

La figure 5-b montre la perte de performance mécanique après 20 cycles de gel-dégel pour tous les échantillons de site et de laboratoire. Généralement, des paramètres tels que la porosité, la perméabilité, le module élastique et la résistance à la compression et à la traction peuvent affecter la sensibilité au gel des matériaux poreux cimentaires. Comme le montre la figure 5-a, la résistance au gel augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment. En outre, une augmentation très importante de la résistance à la compression avec la teneur en ciment peut être observée dans le tableau 3. Le rôle essentiel des propriétés mécaniques sur la résistance au gel a également été observé pour les échantillons de terrain. Les échantillons du site CS_3 avec de meilleures propriétés mécaniques initiales (Tableau 3) ont une résistance plus élevée aux cycles de gel-dégel. Il convient également de noter que les échantillons du site CS_3 et les spécimens de la

partie sablonneuse du site CS_2 ont un rapport E / C plus faible que les autres spécimens. Un rapport E / C inférieur entraîne une porosité plus faible dans le matériau, puis une sensibilité au gel moindre.

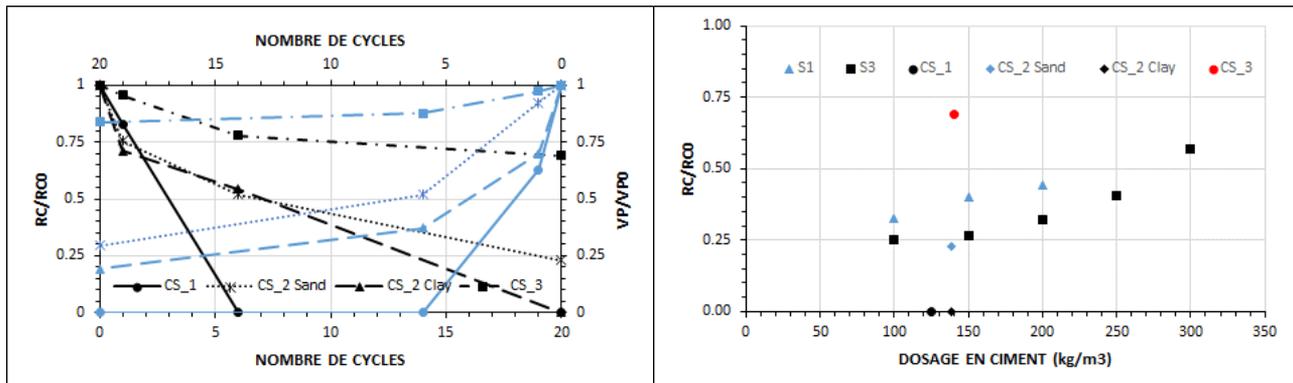


Figure 5. a) Evolution de la résistance en compression et de la vitesse des ondes P résiduelles en fonction des cycles de gel-dégel pour les échantillons de chantier ; b) Variation de la résistance en compression résiduelle en fonction du dosage en ciment pour les échantillons du chantier et les échantillons de laboratoires.

4. Conclusions

Dans ce travail, la carbonatation et la résistance aux cycles de gel-dégel ont été étudiées pour des échantillons prélevés sur 3 sites différents, ainsi que des échantillons de laboratoire constitués de sols prélevés sur sites.

Les résultats de l'étude de carbonatation ont montré que les phénomènes de carbonatation sont plus importants dans les bétons de sol que dans les bétons conventionnels. Cela s'explique par la nature du ciment, le CEM III C qui est un ciment au laitier, la porosité et la perméabilité élevées et la faible teneur en ciment. Le dosage du ciment est le principal paramètre qui influence la carbonatation des échantillons. En augmentant la teneur en ciment, la résistance à la carbonatation est améliorée. Cependant, d'autres paramètres comme la porosité et la perméabilité peuvent affecter la résistance à la carbonatation. La faible profondeur de carbonatation des échantillons de terrain peut être liée à leur perméabilité plus élevée ; le départ de l'eau devient plus rapide que les phénomènes de carbonatation, et la teneur en humidité plus faible ne permet plus la dissolution du CO₂.

La teneur en ciment améliore la résistance aux cycles de gel-dégel pour des échantillons homogènes. Un rapport faible E/C conduit à une meilleure résistance à la compression et à une porosité plus faible et améliore la résistance au gel.

5. Références bibliographiques

- Guimond-Barrett, A., 2013. Influence of mixing and curing conditions on the characteristics and durability of soils stabilised by deep mixing.
- Helson, O., Eslami, J., Beaucour, A.-L., Noumowe, A., Gotteland, P., 2018. Durability of soil mix material subjected to wetting/drying cycles and external sulfate attacks. *Construction and Building Materials* 192, 416–428.
- Perera, A., Al-Tabbaa, A., Reid, J., & Johnson, D. 2005. State of practice report UK stabilisation/solidification treatment and remediation - Part V: Long-term performance and environmental impact. In *Proceedings of the International Conference on Stabilisation/Solidification Treatment and Remediation* (pp. 437–457). Cambridge.