

COMPORTEMENT DES BETONS DE SOL SOUMIS AUX CYCLES HUMIDIFICATION/SECHAGE

BEHAVIOUR OF SOILCRETES SUBMITTED TO WETTING/DRYING CYCLES

O. Helson¹, A.-L. Beaucour¹, J. Eslami¹, A. Noumowe¹, Ph. Gotteland²

¹ Laboratoire de Mécaniques et Matériaux du Génie Civil (L2MGC), Université de Cergy-Pontoise, 5, mail Gay-Lussac, Neuville-sur-Oise, 95031 Cergy-Pontoise, France.

² Fédération Nationale des Travaux Public, 3 rue de Berri, 75008 Paris, France.

RÉSUMÉ – Cette recherche s'intéresse aux bétons de sol fabriqués in-situ par jet-grouting ou soil-mixing. L'objectif est d'évaluer la durabilité de ce matériau en vue d'une possible utilisation structurelle. Des essais de laboratoire réalisés sur différents mélanges sable, argile, ciment, eau, visent à déterminer les indicateurs de durabilité ainsi que les propriétés mécaniques résiduelles dans des conditions de vieillissement accéléré.

ABSTRACT – This research focuses on soilcrettes made in situ by jet grouting or soil-mixing. The aim is to evaluate the durability of this material for possible structural use. Laboratory tests realized on variable mixtures sand, clay, cement and water, are therefore performed to determine the durability indicators and residual mechanical properties under accelerated aging conditions.

1. Introduction

Le soil-mixing et le jet-grouting permettent de mélanger directement le sol en place avec un liant afin de réaliser des éléments structurels provisoires destinés à reprendre des charges (pieux) ou remplissant des fonctions d'étanchéités (panneaux). Ces procédés intéressent les industriels pour leurs avantages économiques et s'accordent avec les nouvelles exigences environnementales. Cependant, en raison des incertitudes liées à l'hétérogénéité des sols, aux conditions environnementales et au malaxage sur chantier, il apparaît difficile de prédire les propriétés du matériau obtenu à long terme.

Seul le type et la quantité de liant, le rapport eau sur liant, et l'énergie de malaxage sont adaptables au cahier des charges. La granulométrie (argile) et les constituants indésirables du sol (matière organique, pollution) sont eux plus délicats à contrôler. Aujourd'hui, les résultats de la littérature ne permettent pas de proposer des seuils à ne pas dépasser. Il existe peu d'études paramétriques, faisant varier les constituants du sol, et reliant les propriétés de formulation aux propriétés physico-mécaniques. La question de la durabilité de ces matériaux se pose donc, afin notamment de valider leur pérennité.

Les travaux de recherche présentés portent sur plusieurs formulations de laboratoire constituées de sable, d'argile, de ciment et d'eau. Différents taux de substitution du sable par l'argile et deux dosages en ciment sont testés. L'objectif est d'analyser l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés mécaniques et sur le potentiel de durabilité des bétons de sol. Les principaux indicateurs de durabilité tels que la porosité accessible à l'eau et la conductivité hydraulique sont analysés. Ces paramètres permettent ensuite de faire le lien avec les pertes de masse, les vitesses d'ondes P, et les résistances en compression simple déterminées en condition de vieillissement accéléré au fil de cycles humidification/séchage (H/S).

2. Protocole expérimental

2.1. Matériaux et formulations

Le tableau 1 présente les différentes formulations testées. Trois sols artificiels sont préparés en substituant du sable avec différentes proportions volumiques d'argile K [%] (0,10 et 25% du volume de sol). Les sols mixtes élaborés sont composés de sable de Fontainebleau NE 0/1 type (0/0.315) et de kaolinite Speswhite™.

Deux dosages en ciment ont été testés (200 et 300 kg/m³). Le ciment utilisé est un CEM/III C 32.5 N CE PM-ES NF contenant plus 81% de laitier de hauts fourneaux, responsables du lent développement de la résistance, mais dont le caractère latent est favorable en matière d'ouvrabilité. En France ce ciment est l'un des plus utilisés en fondations car il résiste particulièrement bien aux attaques chimiques.

Enfin, la quantité d'eau dans les mélanges est fixée par rapport aux techniques de mise en œuvre in-situ. Ce dernier paramètre est ajusté de façon à garder un étalement constant (32 cm au mini-cône) entre les formulations (Helson, 2014).

Tableau 1. Formulations par m³ de béton de sol et caractéristiques du béton durci à 180j.

| K | w | Ciment | Eau gâchage | Kaolinite | Sable | Consistance | ρ_d | Vp _{180j} | fc _{180j} | |
|-----|-----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|----------------------|--------------------|--------------------|----------|
| [%] | [%] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [cm] | [kg/m ³] | [m/s] | [MPa] | |
| 0 | 20 | 200 | 352 | 0 | 1534 | Aff. | 1,0±0,5 | 1820 | 3282 | 8,7±0,2 |
| | | 300 | 353 | 0 | 1441 | | 3,5±0,5 | 1820 | 3640 | 17,3±0,5 |
| 10 | 31 | 200 | 451 | 125 | 1144 | Étal. (BAP) | 31,5±1,0 | 1580 | 3148 | 8,5±0,2 |
| | | 300 | 452 | 115 | 1059 | | 33,5±0,5 | 1600 | 3302 | 14,3±0,4 |
| 25 | 47 | 200 | 557 | 243 | 743 | Étal. (BAP) | 32,0±2,0 | 1295 | 2680 | 6,3±0,2 |
| | | 300 | 559 | 220 | 672 | | 31,5±2,0 | 1310 | 3024 | 11,9±1,0 |

2.2. Procédures

Le sable, l'argile et le ciment sont préalablement mélangés à sec pendant 5 min. Une fois le mélange homogène, on procède au mélange mécanique avec l'eau pendant 10 minutes dans un malaxeur à mortier CONTROLAB d'une contenance de 15 litres. Les moules cylindriques ($\varnothing=50\text{mm}$ et $h=100\text{mm}$ & $\varnothing=40\text{mm}$ et $h=80\text{mm}$) sont ensuite remplis en 3 couches par la méthode tapping. A l'exception des mélanges K0, plus fermes, dont chaque couche est vibrée 20 secondes.

Les éprouvettes sont démoulées après 7 jours de maturation, enroulées dans des chiffons humides et placées dans des sacs plastiques étanches. Ce mode de conservation préserve l'humidité durant la cure, et évite un séchage prématuré des bétons de sol. Les essais de durabilité sont lancés après 180 jours de cure endogène afin d'attendre la fin des réactions d'hydratation et éviter leur interaction avec l'influence des cycles H/S sur l'endommagement du matériau.

La masse volumique apparente sèche (ρ_d) et la porosité accessible à l'eau (η) sont déterminées selon la norme béton (NF P18-459, 2010). Pour ce faire, les éprouvettes ($\varnothing=40\text{mm}$ et $h=100\text{mm}$) sont séchées dans une étuve à 60°C jusqu'à masse constante. Une fois sèche, chaque éprouvette est pesée puis placée sous vide dans un dessiccateur. La phase de saturation par immersion dure 3 jours, et est suivie d'une pesée à l'état saturé et hydrostatique afin de déterminer la valeur de ρ_d et η .

Les essais en compression simple sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques ($\Phi=50\text{mm}$ et $ht=100\text{mm}$) poncées aux extrémités afin d'obtenir deux faces planes et parallèles. Le chargement des éprouvettes est ensuite réalisé en contrainte contrôlée à une vitesse de 0,04 MPa/s, à l'aide d'une presse électromécanique Instron®.

La mesure des vitesses d'ondes de compression (V_p) est effectuée à l'aide d'un Pundit7 ($C_v = 2\%$). La mesure consiste à émettre un signal ultrasonore sous forme d'une impulsion et de mesurer le temps de parcours de l'onde ultrasonore entre deux capteurs piézoélectriques, un émetteur et un récepteur, placés au contact de l'échantillon en vis-à-vis. Ce type de mesures non destructives permet d'obtenir d'importantes informations sur la porosité et l'état de fissuration du matériau.



Figure 1. Dispositif expérimental pour la mesure de la perméabilité à l'eau.

La détermination de la conductivité hydraulique (k) est basée sur l'utilisation d'un perméamètre à parois flexibles (ASTM-D5058, 1997). Une cellule triaxiale est connectée à 3 contrôleurs volume-pression de « GDS instruments Ltd » ($\pm 2 \text{ kPa}$ et $\pm 1 \text{ mm}^3$). Pour la mesure de k , le protocole mis en place au laboratoire est inspiré des travaux de Åhnberg (Åhnberg, 2006). L'éprouvette de béton de sol ($\varnothing = 50 \text{ mm}$ et $h = 100 \text{ mm}$) est tout d'abord découpée et poncée de manière à obtenir une hauteur de 25 mm, puis saturé sous vide. Une fois la phase de saturation terminée, l'échantillon est placé dans la cellule entre 2 papiers filtre et 2 pierres poreuses. L'étanchéité entre l'échantillon et l'eau de la chambre de confinement est assurée par une membrane en latex et 2 joints toriques aux extrémités. L'essai débute par la mesure du coefficient de skempton (β) jusqu'à stabilisation, afin de garantir la saturation maximale de l'échantillon avant de commencer l'essai de perméabilité (Head, 1998). Ensuite, k est déterminé en appliquant un gradient de pression de 25 kPa et une pression effective de 30 kPa. La conductivité hydraulique est calculée à partir de l'équation 1 :

$$k(\text{m/s}) = (Q \cdot \mu \cdot L) / (\Delta P \cdot A \cdot \rho) \times 10^7 \quad (1)$$

avec Q le débit (kg/s), ρ la masse volumique (kg/m^3), μ la viscosité dynamique ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), ΔP la différence de pression, A la section de l'éprouvette (m^2) et L sa hauteur (m).

2.3. Cycles humidification / séchage

Les cycles H/S modélisent les variations du niveau de la nappe phréatique que l'on peut rencontrer in situ en fonction des saisons. Après 180 jours de conservation endogène une partie des éprouvettes ($\varnothing = 50 \text{ mm}$ et $h = 100 \text{ mm}$) est soumise à des cycles H/S, afin d'engendrer un vieillissement accéléré par fatigue mécanique. Dans la littérature plusieurs protocoles ont déjà été proposés (tableau 2). En s'appuyant sur ces différents travaux, 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-elle 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. Dans ce travail de recherche deux types de séchage ont été testés afin d'observer l'influence de la vitesse de séchage sur le niveau de dégradation des bétons de sol. Les échantillons sont ainsi placés soit dans une étuve à 53°C pendant 24 heures (cycles "accélérés"), soit dans une enceinte climatique à un degré d'humidité relative de 50% pendant 2 semaines (cycles "longs"). Dans le cas des cycles "accélérés" la température de séchage est inférieure à 60°C afin de limiter les contraintes d'origine thermique et l'altération de l'argile. La durée de séchage en étuve est choisie de façon à optimiser le nombre de cycle H/S dans une semaine et s'adapter aux contraintes pratiques (week-end). Les essais de caractérisation sont réalisés après 3, 6, 12 et 24 cycles.

Tableau 2. Cycles H/S proposés dans la littérature pour les mélanges sol-liant.

| Référence | Temps de cure | 1 cycle H/S (immersion/séchage) | Nombre de cycle | Taille des éprouvettes | Matériau |
|--|---------------|---|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| (ASTM D559, 2005) | 7j | 5 h dans l'eau / 42 h dans une étuve à 71°C. | 12 | Φ=101,6mm ht=116,4mm | Sol-ciment compacté |
| (Aldaoood, Bouasker, & Al-Mukhtar, 2014) | 28j | 48 h dans l'eau à 20°C / 48 h dans une étuve à 60°C. | 6 | Φ=50mm ht=100mm | Sol gypseux + chaux |
| (Li, 2014) | 28j | 24 heures dans l'eau / 48 h dans une étuve à 40°C. | 10 | Φ=40mm ht=80mm | Limon argileux + CEMI |
| (Guimond-Barrett, 2013) | 7j | 1 à 4 jours dans l'eau / 24 h dans une enceinte à 20°C et 65% HR. | 6 | Φ=50mm ht=100mm | sable/limons + CEMIII/C |

3. Résultats et analyse

3.1. Influence des paramètres de formulation sur les indicateurs de durabilité

La porosité et la perméabilité sont reconnues comme des paramètres ayant une influence prépondérante sur la durabilité des bétons de part leur résistance aux attaques chimiques, à la carbonatation ou au gel. La porosité et la perméabilité conditionnent aussi les transferts de fluide (eau vapeur et liquide) lors des cycles humidification/séchage.

Les valeurs de porosité accessible à l'eau et de conductivité hydraulique après 180 jours de maturation sont présentées dans la figure 4.

Les porosités varient entre 28% et 48% en fonction de la teneur en argile et en ciment. Ces valeurs sont 2 à 3 fois plus importantes que la porosité des bétons structurels ordinaires à cause des fortes quantités d'eau de gâchage. Cependant l'ordre de grandeur des résultats coïncide avec les résultats de Denies et Huybrechts, qui suite au prélèvement par carottage sur 38 sites de construction de Deep Soil Mixing, ont obtenu des porosités comprises entre 25% et 65% (Denies & Huybrechts, 2012). Pour les sols testés, la porosité augmente linéairement en fonction de la teneur en argile, mais diminue de 0,5 à 1% pour une augmentation de 100 kg/m³ du dosage en ciment.

La conductivité hydraulique varie entre 3.10⁻⁹ et 10⁻¹⁰ m/s. Ces valeurs sont suffisamment faible dans le cas d'application des barrières étanches où une conductivité inférieure à 10⁻⁹ m/s est souvent exigée (Grisolia, 2012). La valeur de k est divisée par 4 en augmentant de 100 kg/m³ le dosage en ciment. L'évolution en fonction de la quantité d'argile dans le mélange montre une augmentation quasi linéaire de k en fonction de l'argilosité du sol et donc de la porosité. Cependant avec des porosités similaires les formulations avec 300 kg/m³ de ciment ont une plus faible perméabilité. Ceci pourrait s'expliquer par une plus faible taille de pores liée à la plus grande quantité de liant.

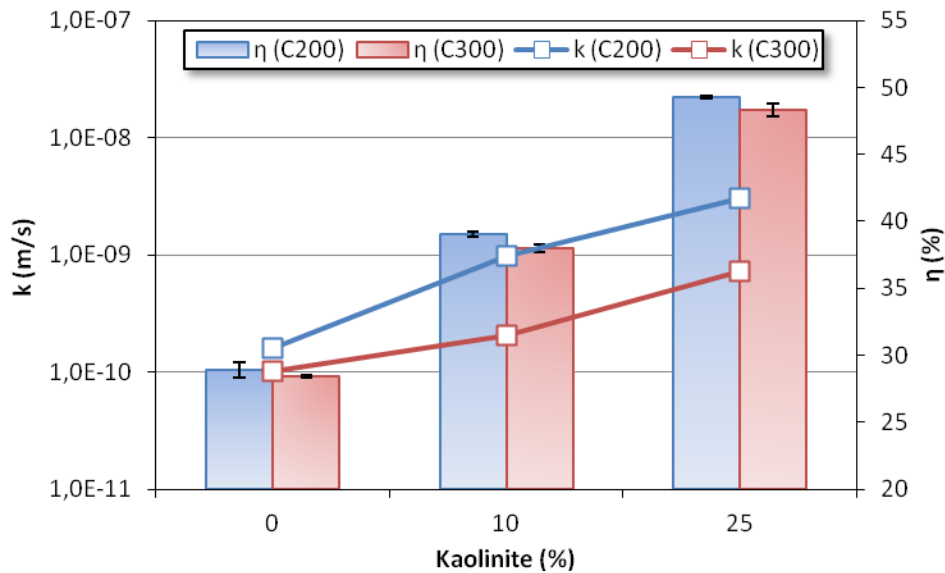


Figure 2. Porosité accessible à l'eau et conductivité hydraulique (180j).

3.2. Les cycles humidification/séchage (H/S)

3.2.1. Suivi de masse et de vitesses d'ondes P en fonction des cycles H/S

La figure 3 présente l'évolution de la masse et de la vitesse des ondes P au cours des cycles H/S. Les résultats sont normalisés par rapport aux valeurs initiales (état saturé).

La diminution de la masse relative en fonction des cycles H/S témoigne d'un séchage plus important au fur et à mesure des cycles, qui s'explique par l'augmentation de la profondeur de fissuration du matériau favorisant le séchage. Que ce soit en cycles "longs" ou "accélérés" l'ordre d'importance des pertes de masse entre les différentes formulations est identique. La perte de masse augmente avec la perméabilité, ainsi les bétons K25C200 ont la plus forte diminution de masse et les bétons K0C300 la plus faible. La perte de masse n'est pas uniquement liée à la quantité d'eau présente dans le mélange initial et donc à la quantité d'argile du sol. En effet, les bétons K25C300 et K10C200 ont une évolution similaire qui s'explique par des valeurs de perméabilité voisines.

Le suivi de la masse relative en fonction des cycles H/S indique un séchage plus important pour les cycles "longs" que pour les cycles "accélérés". La quantité d'eau perdue en deux cycles "longs" équivaut à celle perdue en 24 cycles "accélérés". L'évolution n'est pas la même suivant le type de cycle, car pour les cycles "accélérés" le séchage est plus superficiel. La diminution de la masse relative en fonction des cycles est linéaire pour les cycles "accélérés" et plutôt de la forme d'une loi puissance pour les cycles "longs". De plus après 24 cycles H/S, la chute de la masse relative ne semble pas terminée pour la plupart des bétons de sol. Excepté, pour les formulations K0C200 et K25C200 dans le cas des cycles "longs" qui atteignent un palier dès 5 cycles H/S.

Pour l'ensemble des formulations, une diminution de la vitesse des ondes P est observée. Cette diminution permet d'apprécier les modifications microstructurales issues de l'augmentation du volume des vides par fissuration. Une diminution notable de vitesse des ondes intervient à partir de 12 cycles dans le cas de l'essai "accéléré" et dès les premiers cycles pour l'essai "long".

Les résultats indiquent que l'effet des paramètres de formulation diffère suivant le type de séchage, avec une influence prépondérante de l'argile pour les cycles "accélérés" contrastée par une plus forte influence du ciment pour les cycles "longs".

Dans le cas des cycles "accélérés" une augmentation du dosage en ciment ne permet pas de limiter la chute de V_p . Pour les cycles "longs" en revanche, une augmentation du

dosage en ciment permet de retarder la chute de V_p . Pour les bétons K25, la diminution de vitesse est la même quel que soit le dosage en ciment en cycles "accélérés" tandis qu'en cycles "longs" il existe un écart de 50% entre les bétons K25C200 et K25C300 qui tend à se réduire après 15 cycles. Pour les cycles longs, les pertes de vitesse sont d'autant plus importantes que la résistance en compression initiale des bétons est faible (tableau 1).

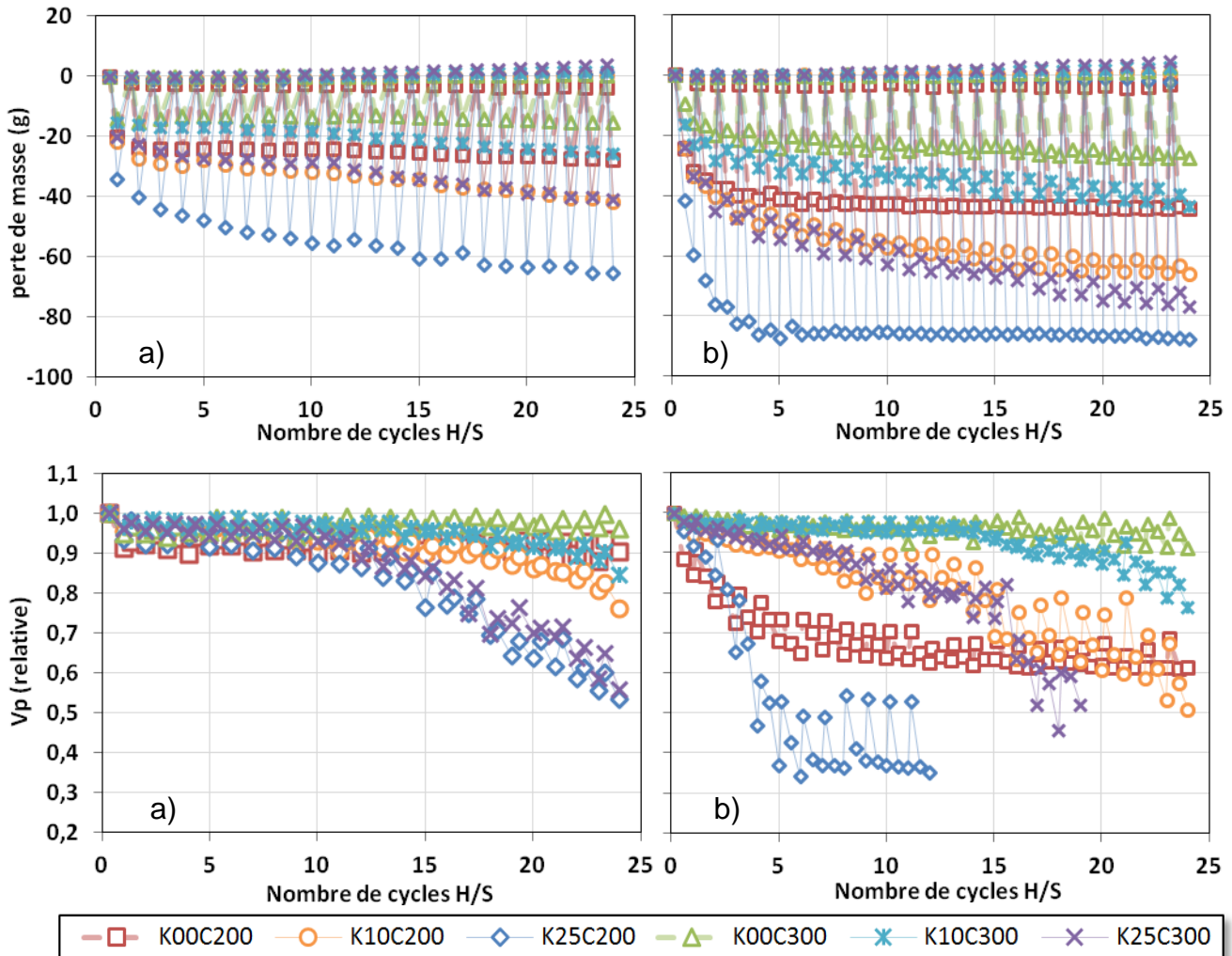


Figure 3. Suivi de masse et de vitesses d'ondes P en fonction des cycles H/S: a) « accélérés » et b) « longs ».

3.2.2. Endommagement mécanique au cours des cycles

Les observations visuelles montrent une fissuration importante pour les bétons de sol contenant de l'argile, qui s'intensifie en fonction de l'argilosité du sol. La peau du béton est clairement la partie la plus dégradée en raison du fort gradient hydrique de surface. Ce type de sollicitation crée un phénomène de faïençage sur tout le pourtour des éprouvettes, dont le taux de maillage augmente en fonction de la teneur en argile. Pour les cycles "longs", la peau des bétons de sol se décolle de façon localisée, pour les formulations les plus endommagées par les cycles (K10/C200, K25/C200 et K25/C300).

Le suivi de l'évolution de la résistance en compression simple (f_c) en fonction du nombre de cycles H/S est présenté sur la figure 3 pour les formulations K10 et K25. Comme pour les vitesses d'onde, la résistance en compression des formulations K10 diminue moins que celles des formulations K25. De plus, la même différence de

comportement entre les cycles "accélérés" et "longs" est observée. Pour les cycles "longs" un plus fort dosage en ciment retarde l'endommagement.

Après 24 cycles H/S, les formulations avec 25% d'argile sont très endommagées et ne conservent que 20 à 50% de leur résistance initiale. Un dosage en ciment supérieur à 300 kg/m³ et une quantité d'argile dans le sol inférieure ou égale à 10%, permettent de conserver suite aux cycles H/S environ 80% des propriétés mécaniques. La corrélation entre les essais "accélérés" et "longs" semble difficile à effectuer. Le séchage est plus intense lors d'un cycle long que lors d'un cycle court. Pour un même nombre de cycles l'endommagement mécanique est donc logiquement moins important pour les cycles "accélérés". L'effet bénéfique d'un plus fort dosage en ciment sur l'endommagement mécanique n'est pas observé suite aux cycles "accélérés" à l'inverse des cycles "longs". En considérant la perte d'eau comme moteur d'endommagement et en se plaçant donc à un degré de séchage identique, les deux types de cycles n'entraînent pas les mêmes pertes de résistance, notamment selon la quantité de ciment.

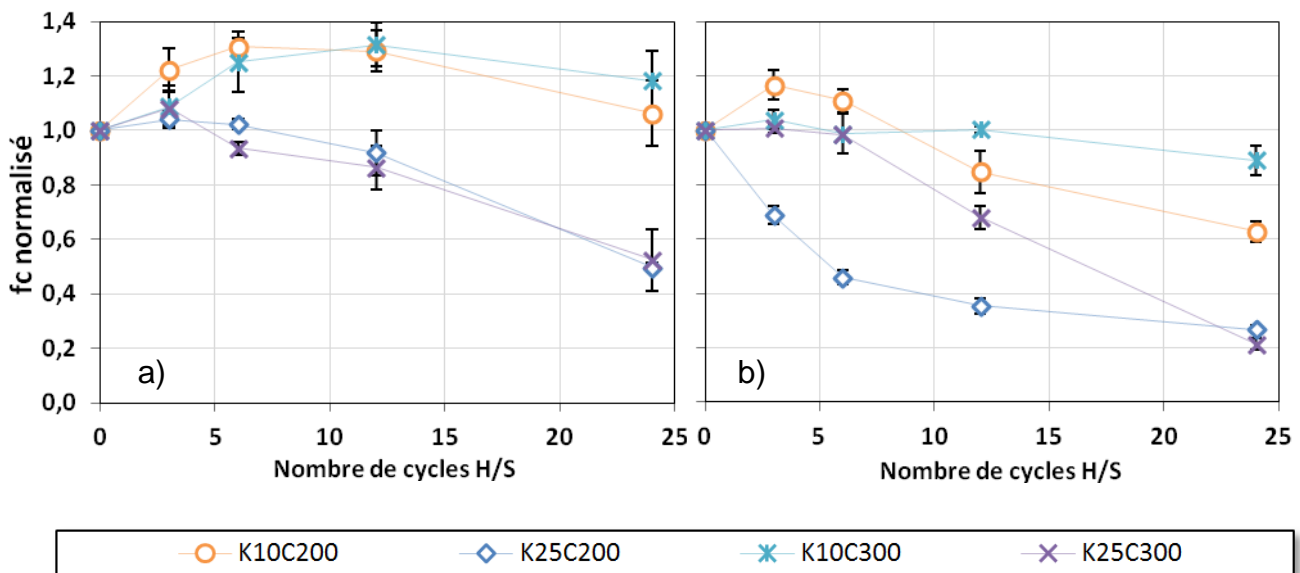


Figure 4. Evolution en fonction des cycles H/S de la résistance en compression normalisée par rapport à la résistance initiale: a) « accélérés » et b) « longs ».

4. Conclusion

En conditions d'exploitation, les bétons de sol sont potentiellement exposés à de nombreux mécanismes de dégradation tels que les attaques chimiques, les réactions alcali silices, et les sollicitations cycliques d'humidification/séchage.

Dans la littérature, l'estimation de la durabilité en laboratoire est souvent simulée par des tests accélérés et il n'est pas toujours évident de proposer des tests à la fois rapides et réalistes. Dans ce travail de recherche la durée des cycles H/S est volontairement relativement longue afin d'accéder aux propriétés physiques et mécaniques à long terme (72 jours pour les cycles "accélérés" et de 384 jours pour les cycles "longs"). Finalement, les transferts de fluide diffèrent selon le type de séchage et soulignent l'importance de maîtriser à la fois la température, l'hygrométrie et la durée de séchage.

Les résultats mécaniques montrent qu'une teneur en argile de 25% réduit considérablement la durabilité des bétons de sol mais qu'un dosage en ciment de 300 kg/m³ permet de réduire l'endommagement jusqu'à un certain nombre de cycles. Les méthodes non destructives sont aussi un excellent moyen d'estimer la durabilité, en sondant l'état de fissuration au sein du matériau. A partir d'un certain seuil de fissuration

les vitesses d'ondes P ne sont en revanche plus mesurables. Cependant à ce niveau là de dégradation, le matériau est généralement déjà arrivé à sa durée de vie maximale.

La résistance aux cycles H/S dépend d'une part de la perméabilité au travers l'intensité du séchage et d'autre part de la résistance mécanique initiale. Les propriétés de transferts obtenues confirment bien que la résistance aux cycles H/S est nettement meilleure pour de faibles conductivités hydrauliques, comme indiqué dans un rapport paru récemment (Perera et al., 2005). Au vu des résultats physico-mécaniques, une porosité inférieure à 40% et une conductivité hydraulique de 10^{-9} m/s semblent garantir une durabilité convenable.

Les essais en cours cherchent à compléter ces résultats, notamment en mesurant la résistance des bétons de sol face à un milieu chimiquement agressif.

5. Références bibliographiques

- Ahnberg, H. (2006). *Strength of Stabilised Soils*. Swedish Geotechnical Institute, Linköping.
- Aldood, a., Bouasker, M., & Al-Mukhtar, M. (2014). Impact of wetting–drying cycles on the microstructure and mechanical properties of lime-stabilized gypseous soils. *Engineering Geology*, 174, 11–21.
- ASTM D559. (2005). Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures 1, 14–19.
- ASTM-D5058. (1997). Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter 1.
- Denies, N., & Huybrechts, N. (2012). SOIL MIX WALLS as retaining structures – mechanical characterization. *ISSMGE-TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI*, 99–117.
- Grisolia, M. (2012). Influence of tire chips on the mechanical properties of cement treated soil.
- Guimond-Barrett, A. (2013). *Influence of mixing and curing conditions on the characteristics and durability of soils stabilised by deep mixing*. Université du Havre.
- Head, K. H. (1998). *Manual of Soil Laboratory Testing: Volume 3 - Effective stress tests*.
- Helson, O., Eslami, J., Beaucour, A.-L., Noumowé, A., & Gotteland, P. (2014). Influence de l'argilosité du sol sur les propriétés physico-mécaniques des bétons de sol. *32èmes Rencontres de l'AUGC*, Orléans.
- Li, J.-S. (2014). Effect of drying-wetting cycles on leaching behavior of cement solidified lead-contaminated soil. *Chemosphere*, 117.
- NF P18-459. (2010). Essai pour béton durci : Essai de porosité et de masse volumique.
- 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, *Proceedings of the International Conference on Stabilisation/Solidification Treatment and Remediation*, 437–457.