

IMPACT DES PROPRIETES PHYSIQUES D'UN SOL SUR LES PROPRIETES MECANQUES D'UN MELANGE SOL-CIMENT.

IMPACT OF PHYSICAL PROPERTIES OF SOIL ON MECHANICAL PROPERTIES OF SOIL CEMENT TREATED MATERIALS.

Alain LE KOUBY¹, Lucile SAUSSAYE², Myriam DUC¹

¹ UGE, IFSTTAR, 14-20 boulevard Newton, 77447 Marne-la-Vallée cedex

² Cerema, 11 rue Laplace, CS 32912, 41029 Blois

RÉSUMÉ – Les propriétés du matériau soil mixing ont été étudiées au travers d'essais sur des mélanges argile-sable-ciment, avec différents dosages en argile et en sable et différentes teneurs en eau. Les performances mécaniques sont mises en regard des caractéristiques microstructurales pour expliquer les variations observées et ainsi mieux comprendre le comportement des sols naturels traités par la technique du soil mixing.

ABSTRACT – The mechanical properties of soil mixing materials were assessed by testing clay-sand-cement mixtures, with different clay, sand and water contents. Strength parameters were confronted to the microstructural characteristics of the tested materials in order to explain the mechanical properties and better understand the behaviour of natural soils treated with the soil mixing technique.

1. Introduction

Le soil mixing est une méthode qui consiste à utiliser le sol en place pour réaliser des ouvrages géotechniques par le biais d'un mélange mécanique avec un liant hydraulique, ici du ciment. Ses aspects économiques et écologiques (peu de déblais, peu de matériaux d'apport) ont rendu cette méthode attrayante.

Dans le contexte du renforcement des digues, la minéralogie complexe des matériaux qui les constituent est un paramètre impactant les propriétés mécaniques et hydrauliques du matériau soil mixing. L'argile majoritairement présente dans les digues étudiées jusqu'alors est de type illite, une argile moyennement sensible à l'eau (Le Kouby *et al.*, 2018). Ce minéral argileux est présent en abondance dans de nombreux sols en France, accompagné de chlorite, de kaolinite voire de montmorillonite (argile gonflante).

L'évaluation des performances mécaniques que va atteindre ou non l'ouvrage renforcé par la méthode du deep soil mixing passe par la connaissance de la minéralogie des argiles (Unikowski, 1982 et Szymkiewicz *et al.*, 2012). En effet, la minéralogie et la courbe granulométrique du sol influencent non seulement les interactions entre le ciment et l'eau (possible adsorption d'eau par les argiles au cours de l'hydratation du ciment) mais également la microstructure (porosité) des zones renforcées (Le Kouby *et al.*, 2016). Ces processus impactent de ce fait la durabilité du matériau traité. La teneur en eau initiale du mélange sol-ciment (Szymkiewicz *et al.*, 2013) ou la méthode de malaxage (méthode sèche avec ajout de ciment anhydre et d'eau ou la méthode humide avec ajout de coulis de ciment) sont également des paramètres impactants. L'illite et son mélange avec un ciment est rarement étudiée contrairement à la kaolinite prise comme argile modèle dans de nombreuses études (Le Kouby *et al.*, 2018).

Dans le présent article, une étude paramétrique du traitement au ciment d'un matériau argileux de type illite est présentée en fonction de la quantité de sable qui lui est associée pour constituer le sol et de la quantité d'eau ajoutée, avec un dosage en ciment constant. Les paramètres tels que la résistance à la compression simple R_c et la vitesse des ondes

de compression V_p sont mesurés et corrélés aux observations microstructurales faites à partir de la porosité.

2. Matériaux étudiés et programme expérimental

2.1. Origine et propriétés des matériaux testés

L'illite Arvel (argile verte de la Société Argile du Velay) choisie pour cette étude contient environ 70 % de minéraux illitiques (illite et/ou muscovite), avec la présence de quartz, de calcite et de kaolinite. Le Tableau 1 présente la composition minéralogique de l'illite Arvel et du sable de Fontainebleau (NE34, Sifrac) utilisés pour réaliser les sols sablo-argileux à argilo-sableux testés dans cette étude. Les mélanges testés contiennent de 15 à 50% d'illite Arvel.

Tableau 1. Composition minéralogique de l'illite Arvel et du sable de Fontainebleau

Type de sol	Abréviation	Quartz	Kaolinite	Illite	Calcite
Sable de Fontainebleau	SF	100	0	0	0
Illite Arvel	IA	15.5	2	70	12

2.2. Liant

Le liant hydraulique utilisé pour les mélanges est un ciment au laitier CEMIII/C 32,5 N CE PM-ES NF, fabriqué par Calcia (usine de Rombas), contenant 85% de laitier de haut fourneau et 15% de clinker. Il a une prise lente avec un temps de début de prise de 4h.

2.3. Réalisation des mélanges

La procédure pour réaliser les mélanges est celle proposée par Szymkiewicz *et al.* (2012). Le matériau à traiter (mélange sablo/argileux) est séché au préalable pendant 24h à 40°C. La quantité de matériau pour réaliser une série d'éprouvettes est disposée dans un malaxeur à couteaux (malaxeur Hobart). Le ciment est ensuite ajouté sous forme pulvérulente (c'est-à-dire anhydre) dans la proportion souhaitée, soit un dosage constant de 140 kg de ciment/m³. L'eau est ensuite introduite en une seule fois et le temps de malaxage est de 10 min. L'opérateur homogénéise périodiquement le mélange avec une spatule afin de s'assurer de la qualité du mélange. Le mélange est ensuite moulé dans des tubes cylindriques en plastique (h= 110 mm, d = 52 mm). Ils sont remplis en trois fois avec battage manuel afin d'éliminer les bulles d'air. Les éprouvettes sont conservées hermétiquement pour obtenir une cure dans des conditions endogènes (cure normale).

Afin d'encadrer les teneurs en eau rencontrées en pratique sur un site (où les teneurs en eau peuvent varier dans l'espace et pour assurer le bon fonctionnement de l'outil de malaxage), deux méthodes sont utilisées pour déterminer la plage de teneur en eau de mélange sol-ciment pour nos essais. La teneur en eau selon la méthode 1 est ajustée en fonction de la nature du sol à traiter et de la quantité de ciment, de manière à obtenir un matériau ouvrable, c'est-à-dire avec une teneur en eau supérieure à la limite de liquidité w_L du sol à traiter (Szymkiewicz *et al.*, 2013). La masse d'eau ajoutée est légèrement supérieure à :

$$m_{\text{eau}} = w_L \times (\text{masse de sol sec} + \text{masse de ciment ajoutée au mélange}).$$

La méthode 2 utilisée pour déterminer la teneur en eau du mélange, est basée sur une approche béton, en utilisant l'essai d'affaissement/étalement au cône d'Abrams (NF EN 12350-2).

Les deux teneurs en eau ainsi obtenues couvrent la zone d'ouvrabilité avec une faible teneur en eau selon la méthode 1 (située au début de la zone d'ouvrabilité du mélange) et une teneur en eau élevée pour obtenir un étalement de 30-32 cm au cône d'Abrams selon la méthode 2. La différence de consistance des mélanges obtenus par les deux méthodes est explicite sur la Figure 1 1.

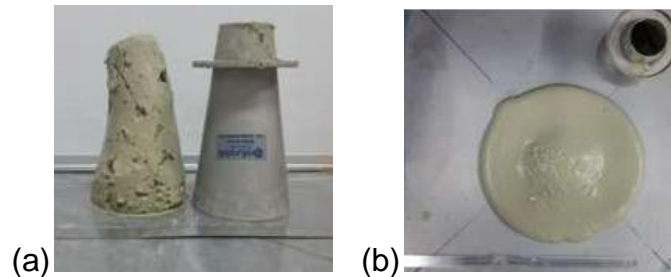


Figure 1. Exemple de l'utilisation du cône d'Abrams (a) sur un mélange réalisé selon la méthode 1 (faible ouvrabilité du mélange) et (b) selon la méthode 2 (mélange avec une teneur en eau permettant d'obtenir un étalement de 30-32 cm)

Pour les quatre mélanges sable/argile étudiés, notés SF_i IA_j C140 w_k (avec i le pourcentage de Sable de Fontainebleau SF du sol, j le pourcentage d'illite Arvel IA du sol, C140, le dosage constant de 140 kg de ciment/m³, et k la teneur en eau du mélange sol-ciment), les teneurs en eau de mélange sont données dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Tableau 2. Teneurs en eau de mélange

Sol	Méthode 1 (faible teneur en eau)		Méthode 2 (teneur en eau élevée)	
	w _L (%)	w mélange (%)	Étalement (cm)	w mélange (%)
SF50-IA50	27	36	31,0	53
SF60-IA40	24	32	30,0	47
SF70-IA30	16	27	30,5	38
SF85-IA15	-	-	30,0	-

Une interpolation des teneurs en eau obtenues avec les méthodes 1 et 2 en fonction de la teneur en argile dans le sol sur la Figure 2 montre que la différence de teneur en eau de mélange augmente avec la teneur en argile ce qui signifie que la quantité d'eau nécessaire pour hydrater l'argile augmente.

La teneur en eau de mélange pour une teneur en argile nulle (soit 14-17%) correspond à une quantité d'eau efficace pour le mélange. D'après la Figure 2, l'argile absorbe environ 75% de son poids en eau avec l'approche béton (méthode 2) et 45% de son poids en eau avec la méthode 1 utilisée par Guimond-Barrett *et al.* (2013) ou Szymkiewicz *et al.* (2013).

Par ailleurs, sur la Figure 3 (a), la masse volumique apparente sèche ρ_d des mélanges diminue en fonction de la teneur en eau mesurée sur les éprouvettes aux différents temps de cure (notée w_{réelle}) quelle que soit la méthode de formulation. La méthode 2 produit globalement des matériaux de plus faible masse volumique apparente sèche, ce qui a des conséquences en termes de porosité donc de durabilité du matériau.

Enfin, aucune variation significative de ρ_d n'est observée en fonction du temps de cure (Figure 3(b)) ce qui atteste des bonnes conditions de conservation des éprouvette de mélange sol-ciment.

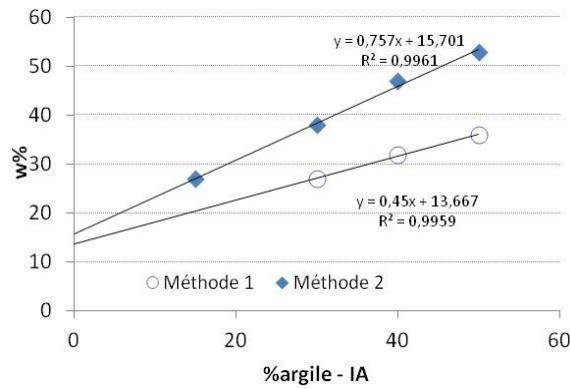


Figure 2 Teneur en eau du mélange versus teneur en argile

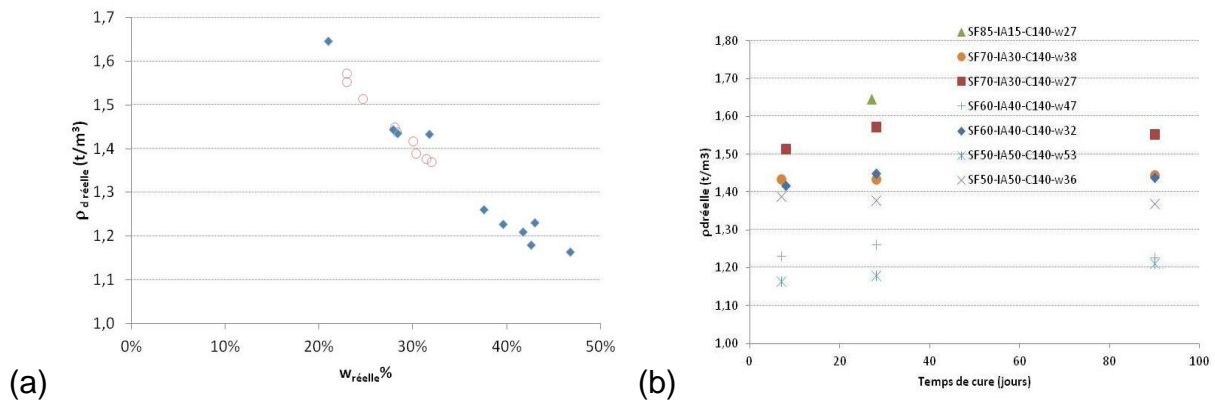


Figure 3. (a) Evolution de la masse volumique sèche des mélanges en fonction de la teneur en eau et (b) évolution de la masse volumique sèche en fonction du temps de cure

2.4. Démarche expérimentale

Les temps de cure testés pour les essais macroscopiques sont de 7, 28, 90 jours. Le temps de cure de 90 jours a été choisi pour étudier les propriétés microstructurales. Le mélange SF60 IA40 C140 w47 a par ailleurs été choisi pour évaluer l'évolution de la distribution des pores avec le temps de cure (7, 28 et 90 jours). La résistance à la compression simple R_c a été évaluée dans le but de caractériser la performance mécanique du matériau sol-ciment. Il en est de même pour la vitesse des ondes de compression V_p , mesurée sur les éprouvettes avant la mesure de R_c . Pour l'évaluation de la microstructure, les matériaux soil mixing sont lyophilisés (après trempe dans l'azote liquide) après l'essai de R_c (la déformation des pores après l'essai mécanique est considérée comme minime). La microstructure des échantillons a été testée par porosimétrie par intrusion de mercure et observée au microscope électronique à balayage.

3. Résultats expérimentaux

3.1. Propriétés mécaniques des mélanges sol sablo-argileux-ciment

Les résultats de la

Figure 4 montrent que R_c et V_p augmentent avec le temps de cure (comme escompté avec un liant hydraulique). La valeur de R_c à 28 jours, souvent prise comme référence dans le domaine des bétons avec un ciment CEMI, n'est toutefois pas la valeur de résistance mécanique maximale qui peut être atteinte pour un mélange sol-ciment. En

effet, pour certains mélanges, R_c double entre 28 et 90 jours. L'évolution semble d'autant plus importante que la teneur en argile du mélange est faible.

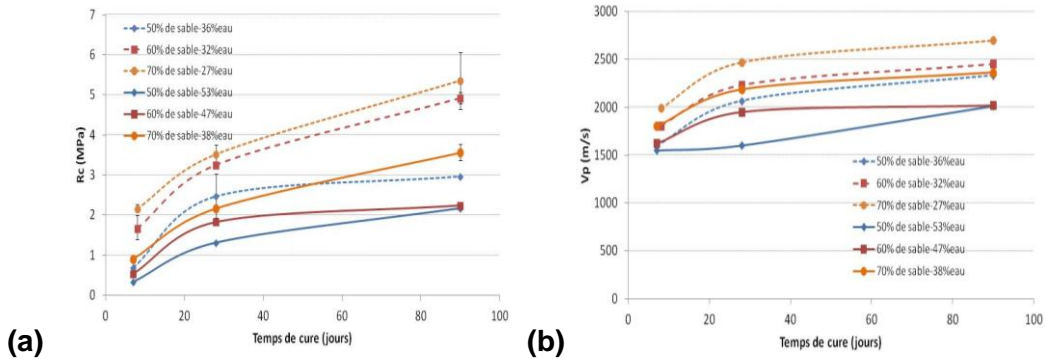


Figure 4. Evolution de la résistance à la compression simple R_c en fonction du temps de cure (a) et du rapport C/E (b) pour les pourcentages d'argile IA de 30, 40 et 50% (méthode 1 et 2)

Cette lente évolution à long terme est liée aux caractéristiques du ciment CEMII/C 32,5 N utilisé, pour lequel une stabilisation des réactions d'hydratation est attendue seulement à partir de 90 jours. Cependant, en présence d'argiles, qui peuvent être à l'origine de réactions pouzzolaniques, cette évolution reste continue, ce qui se traduit des performances mécaniques croissantes.

D'un autre côté, la cinétique d'augmentation de R_c dépend à la fois du dosage en ciment, de la teneur en eau de mélange et du rapport C/E (pour notre cas de la teneur en eau car le dosage en ciment est constant : $C = 140 \text{ kg/m}^3$). Cette influence de la teneur en eau est significative quel que soit le temps de cure (Figure 5). Ces résultats sont en adéquation avec ceux de Bergado et Lorenzo (2005) et de Szymkiewicz *et al.* (2012).

En outre, une augmentation du rapport R_{c28}/R_{c7} et R_{c90}/R_{c7} en fonction de la teneur en eau de mélange et de la teneur en argile du sol est observée pour les deux méthodes de formulation (Figure 5a). La cinétique d'hydratation du ciment et de durcissement du mélange est plus importante dans le cas de la méthode 2, avec une teneur en eau de mélange qui est plus élevée. Lorsque la teneur en eau de mélange est faible, dans le cas de la méthode 1, l'argile, compte tenu de son potentiel d'adsorption d'eau, semble retarder l'hydratation du ciment. De plus, la mobilité des espèces chimiques est réduite ce qui impacte la précipitation des hydrates.

En revanche, aucune évolution significative de V_p n'est observée, notamment pour les mélanges formulés selon la méthode 2 (Figure 5b). Aucune corrélation ne semble avoir été mise en évidence.

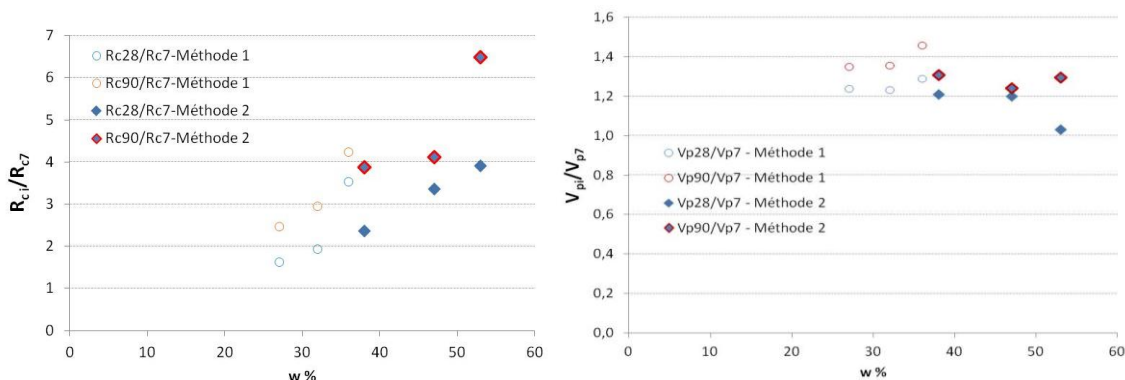


Figure 5. (a) Développement de la R_c entre 7 et 28 j et entre 28 et 90 j et (b) évolution des vitesses V_p pour un mélange sable-argile à différents pourcentages d'argile à dosage en ciment constant (soit 140 kg/m^3) en fonction de la teneur en eau de mélange.

3.2. Propriétés microstructurales des mélanges sol sablo-argileux-ciment

Concernant les aspects microstructuraux, la distribution de taille des pores dans les échantillons de mélanges argile-sable-ciment après 90 jours de cure est corrélée à leur courbe granulométrique. Le sable possède 95% de particules comprises entre 100 et 315 μm ; les grains de ciments CEMIII/C 32,5 N (clinker et laitier) mesurent 20-30 μm comme les agrégats d'illite IA (issus du broyage industriel). Avec une quantité d'argile supérieure à 30%, celle-ci est suffisante pour gouverner le comportement du matériau : les grains de sable sont inclus dans la matrice argileuse qui parvient à remplir en majeure partie les vides entre les grains en contact. Ceci qui explique les courbes en cloche de R_c à la Figure 7, avec un maximum autour de 30% d'argile. L'argile de type Illite a alors un rôle de filler. L'hydratation cimentaire se manifeste quant à elle par la création d'hydrates sous forme de filaments ou de feuillets distants de l'ordre de 0,14 nm autour des particules du ciment (Figure 7c). Cette porosité entre les hydrates cimentaires n'est pas explorée par la porosimétrie par intrusion de mercure.

Comme attendue, une double porosité est observée sur les mélanges de sable, d'argile et de ciment (Le Kouby *et al.*, 2018). Des pores apparaissent autour de 1-2 μm sur la Figure 7a/b, porosité capillaire correspondant aux espaces inter-agrégats d'illite ou inter-particules de sable, ainsi que des pores autour de 30-150 nm, porosité mésoscopique liée à la matrice cimentaire composée des grains de clinker et de laitiers qui s'hydratent et qui peuvent se mélanger aux particules/agrégats argileux selon que l'argile se disperse ou non dans la matrice cimentaire. La famille de pores additionnelle, autour de 15 nm, est associée à la porosité interne des agrégats argileux composés de feuillets d'illite qui ne se dispersent que partiellement même en présence d'une quantité d'eau importante dans le cas de la méthode 2 (Figure 8 b).

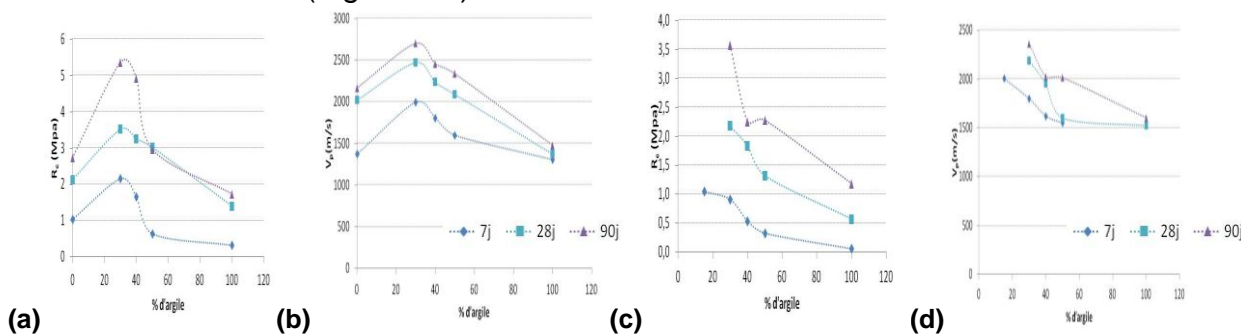


Figure 6. Evolution de R_c et V_p pour la méthode 1 (a et b) et pour la méthode 2 (c et d) en fonction du pourcentage d'argile aux trois temps de cure 7, 28 et 90 jours pour un dosage en ciment de 140 kg/m^3

L'effet de la teneur en eau de mélange est évalué en comparant les mélanges élaborés selon les méthodes 1 (Figure 8a) et 2 (Figure 8b).

Les distributions de taille de pores sont quasi similaires dans les mélanges à teneur en eau élevée (méthode 2).

Les pores capillaires y sont plus nombreux que dans les mélanges à faible teneur en eau et leur quantité augmente avec la quantité d'argile tandis qu'elle reste stable quelle que soit la quantité d'argile dans les mélanges à faible teneur en eau.

Les pores mésoscopiques sont de taille plus importante que dans les mélanges avec une quantité d'eau limitée. Leur quantité reste stable quelle que soit la quantité d'argile

tandis qu'elle augmente avec la quantité d'argile dans les mélanges à faible teneur en eau.

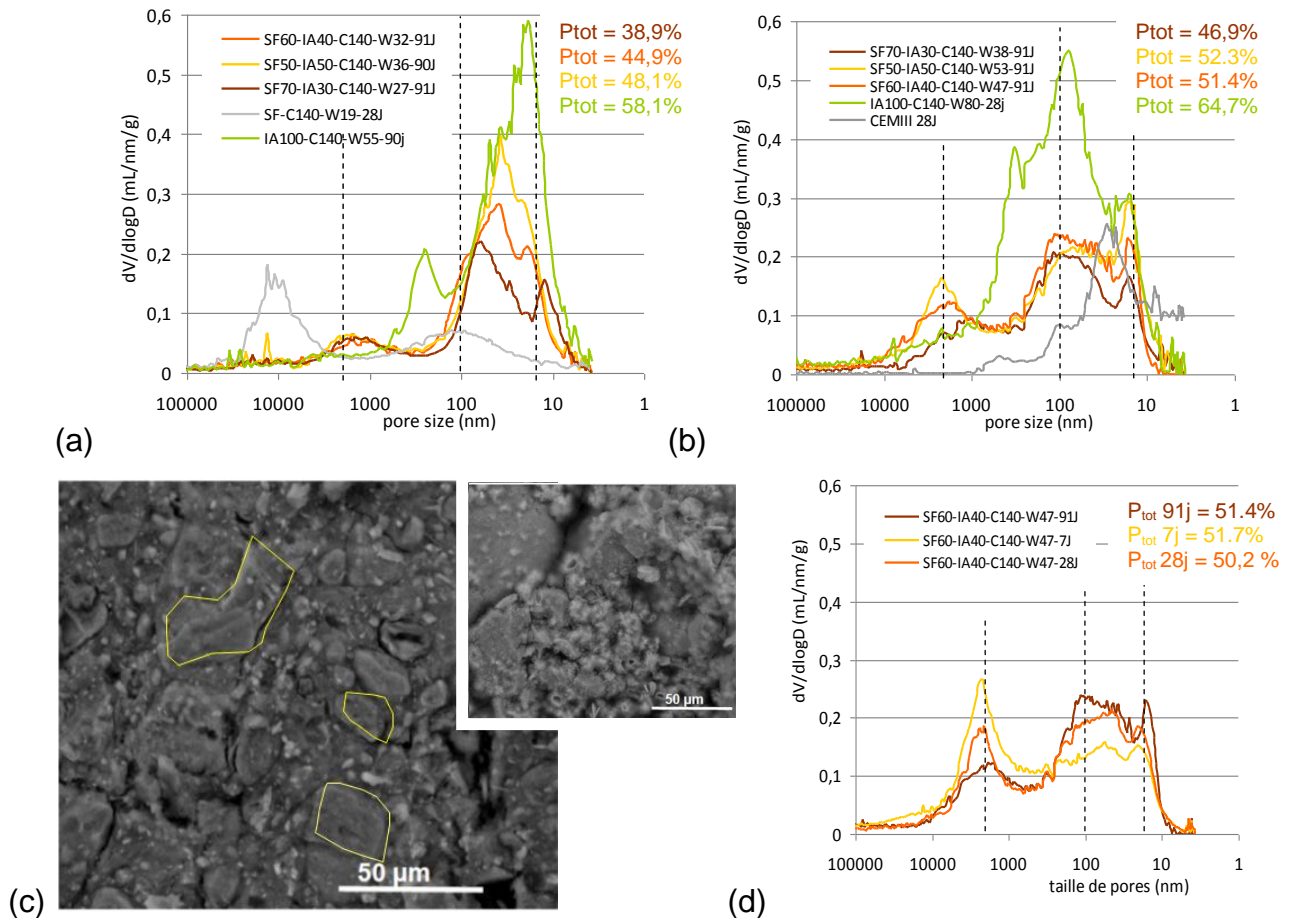


Figure 7 Effet de la quantité d'argile mélangée avec du sable et du ciment sur la courbe de distribution de taille de pores des matériaux soil mixing : (a) w_k = méthode 1, 90j de cure, (b) w_k = méthode 2, 90j de cure, (d) SF60 IA40 C140, w_k = méthode 2 à 7, 28 et 91 j de cure, (c) observations MEB des agrégats d'illite non dispersés dans la matrice cimentaire d'un échantillon de mélange illite-sable-ciment, (en encart) observations MEB des grains de ciment en cours d'hydratation entre les grains de sable (mélange sable-ciment)

L'augmentation de la quantité d'eau se traduit par une légère augmentation de la porosité totale à 90j de 39-48% (méthode 1 à faible teneur en eau) contre 47- 51% (méthode 2 à forte teneur en eau) ce qui explique les différences de R_c observées.

Concernant l'effet du temps de cure (Figure 8d), dans le mélange SF60 IA40 C140 w47, la quantité de pores capillaires diminue au cours du temps. Le développement de phases cimentaires amorphes, non visibles par diffraction de rayons X, s'effectue par précipitation dans les pores capillaires. Le nombre de pores compris entre 30 et 150 μm augmente. Ces derniers sont reliés à la précipitation des hydrates cimentaires autour des grains anhydres de clinker et aux grains de laitiers en cours de dissolution qui sont intimement liés avec la fraction d'argile dispersée. Ces hydrates assurent la rigidification de la matrice cimentaire et l'augmentation de R_c avec le temps.

4. Conclusions et perspectives

Les conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Les deux méthodes pour obtenir un mélange sol-ciment ouvrable (valeurs haute et basse de teneur en eau) devraient être utilisées pour l'étude de formulation du matériau soil mixing avant travaux afin de fournir un encadrement des valeurs de R_c et de V_p à attendre.
- La teneur en argile a une influence significative sur le comportement mécanique d'un matériau sol-ciment durci (R_c et V_p). R_c augmente avec le rapport C/E (E dans notre cas car le dosage en ciment est fixé). Les performances mécaniques maximales sont obtenues pour une teneur en argile du sol de l'ordre de 30% ce qui confirme le rôle de filler de remplissage des agrégats d'illite entre les grains de sable. La sensibilité à l'eau de cette argile n'est alors pas un paramètre déterminant.
- La porosité totale des matériaux testés, mélanges illite-sable-ciment, dépend fortement du temps de cure et, dans une moindre mesure, de la teneur en eau de mélange.
- Les courbes de distribution des tailles de pores couplées à la porosité totale peuvent être utilisées pour expliquer l'évolution de R_c en fonction du temps, de la teneur en eau ou de la teneur en argile. Le matériau illite-sable-ciment présente une double porosité comme la majorité des matériaux soil mixing avec une population de nanopores supplémentaires correspondant à la porosité des agrégats d'illite non dispersés dans la matrice cimentaire.

5. Références bibliographiques

- AFNOR (2003). Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques – Partie 41 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques. NF EN 13286-41. Association Française de Normalisation.
- Bergado, D.T., and Lorenzo, G.A. 2005. Economical mixing method for cement deep mixing. In Proceedings of Geo-Frontiers 2005 Innovations in Grouting and Soil Improvement.
- Guimond-Barrett, A., Nauleau, E. Le Kouby, A. Pantet; A., Reiffsteck, P. Martineau, F. (2013). Free-Free Resonance Testing of In Situ Deep Mixed Soils. Geotechnical Testing Journal – ASTM, Vol. 36, N°2, pp. 1-9., 2013.
- Le Kouby, A., Duc, M., Marino-Paredes, J., Fanelli, S. (2016). Approche multi-échelle du traitement des argiles par la méthode du deep soil mixing. Actes des JNGG 2016, pp. 205-212, Nancy.
- Le Kouby, A., Duc, M., Szymkiewicz, F., Shen, S. (2018). Impact du type de sol, du dosage en ciment et de la teneur en eau sur les propriétés mécaniques et la porosité des matériaux traités au ciment. JNGG 2018, pp. 1-8.
- Szymkiewicz, F. Tamga, F. S., Le Kouby, A., Reiffsteck, P. (2013). Optimization of the strength and homogeneity of the Deep Mixing material by means of the determination of the workability limit and optimum water content. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 50, pp. 1034 – 1043.
- Szymkiewicz, F., Guimond Barrett, A., Le Kouby, A., Reiffsteck, P. (2012). Influence of grain size distribution and cement content on the strength and aging of treated sandy soils. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2012, 1–21.
- Unikowski, Z. (1982). Influence des argiles sur les propriétés des mortiers de ciment. Rapports de recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées.