
Caractérisation du comportement mécanique des bétons de sol.

O.Helson^{1*}, A.-L. Beaucour¹, J. Eslami¹, A. Noumowé¹, P. 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. *Correspondance : Olivier.Helson@etu.u-cergy.fr

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

RÉSUMÉ. Les travaux de recherche présentés concernent plusieurs formulations constituées de sable, d'argile, de ciment et d'eau. Différents taux de substitution de sable par l'argile et deux dosages en ciment sont testés. L'objectif est d'améliorer la connaissance des mécanismes de déformation et de rupture des bétons de sol et d'analyser l'influence des paramètres de formulation sur leurs propriétés mécaniques. Des essais de compression simple sont menés afin de déterminer le module d'Young (E_{stat}), le coefficient de poisson (ν) et la résistance à la rupture (f_c) de ces matériaux. La dégradation des propriétés élastiques en fonction de la contrainte axiale est également évaluée, en réalisant des essais de compression cycliques. Par ailleurs des mesures par ultra-son du module d'Young dynamique (E_{dyn}) ont été réalisées. Les résultats montrent un plus fort impact de la teneur en argile du sol sur les propriétés élastiques que sur les résistances à la rupture. La prédiction du module par les méthodes non destructives est fortement liée à la valeur de ν , qui varie selon la teneur en argile du sol. Enfin, les valeurs expérimentales sont comparées aux valeurs calculées à partir des formules de l'EC2 et de l'ACI.

ABSTRACT. The research presented focuses on several formulations made up of sand, clay, cement and water. Different sand substitution rate of clay and two cement dosages are tested. The objective is to improve the knowledge of deformation and failure mechanisms as well as analyse the influence of the formulation parameters on mechanical properties. Unconfined compression tests were conducted to determine the Young's modulus (E_{stat}), Poisson's ratio (ν) and breaking strength (f_c) of these materials. The degradation of the elastic properties -versus- the axial stress is also assessed, by making cyclic compression tests. Furthermore measures by ultra-sound of dynamic Young's modulus (E_{dyn}) were performed. The results show a stronger impact of soil clay content on the elastic properties than on resistances to breakage. The modulus prediction by non-destructive methods is closely linked to the value of ν , which varies depending on soil clay content. Finally, the experimental values are compared to the values calculated from the formulas of EC2 and the AIT.

MOTS-CLÉS : sol, ciment, argile, résistance, module élastique.

KEYWORDS : soil, cement, clay, strength, elastic modulus.

1. Introduction

Le concept du traitement des sols avec un liant hydraulique, afin de former des inclusions rigides, existe depuis les années 60. Actuellement, les procédés tels que le soil-mixing et le jet-grouting sont en plein essor, ce qui tend à élargir le domaine d'application des mélanges sol-ciment. Le principe consiste à mélanger le sol en place avec un liant hydraulique afin d'en améliorer les propriétés mécaniques et physiques. Le produit formé est ce qu'on appellera un « béton de sol », c'est-à-dire un béton dont les granulats sont remplacés par les particules solides du sol, et qui selon les cas est amené à reprendre des charges (pieux) ou peut remplir des fonctions d'étanchéité (panneaux). Les priorités actuelles, pour la plupart liées à l'environnement, au coût de la construction et à la valorisation des matériaux, encourageant grandement les entreprises du BTP à améliorer les procédés de fabrication, notamment en développant les procédés de mélange [MEL 13], mais aussi en proposant un contrôle précis de l'injection du liant [TOP 12]. Il subsiste cependant, un manque de normes et recommandations nationales dans le domaine, afin de prendre en compte les spécificités de ce nouveau matériau de construction. Les bétons de sols se différencient en effet des bétons classiques par leur plus forte déformabilité. Ils sont généralement 5 à 8 fois moins rigides et capables de se déformer 4 à 5 fois plus avant la rupture qu'un béton ordinaire [KOL 13]. Ces caractéristiques sont déterminantes lors de la répartition des charges entre le béton de sol fabriqué et le sol environnant [GUI 13], d'où l'importance de la connaissance de ces paramètres. Selon l'envergure du projet, la connaissance du module d'Young n'est en revanche pas toujours suffisante et certains auteurs recommandent de compléter la connaissance de la rigidité du matériau par l'étude de l'inertie des réseaux d'inclusion [JEA 13]. En attendant, la prédiction de la valeur du module d'élasticité est de plus en plus aboutie grâce aux nombreuses avancées en matière d'extraction de données basées sur les régressions multiples, les réseaux de neurones artificiels, les machines à support vectoriel ou les réseaux fonctionnels [TIN 13]. Ces méthodes ont l'avantage d'être issues de campagnes d'essais expérimentales, mais plus souvent la principale difficulté réside à identifier correctement l'importance des données d'entrée. Parmi

elles, l'importance de la teneur en argile peut par d'exemple varier de 11 à 23%, selon la quantité d'informations à disposition, le type d'approche adoptée, et le paramètre recherché (fc, E) [TIN 13]. La présence d'argile dans le sol est souvent considérée comme défavorable vis-à-vis des propriétés mécaniques. Pourtant en faible quantité dans le sol et donc dans le béton de sol, elle peut s'avérer favorable en terme de résistance [WAN 15].

La fiabilisation de la conception des ouvrages en béton de sol nécessite donc une bonne connaissance des mécanismes de déformation et de rupture de ces matériaux, notamment en fonction du dosage en ciment et des caractéristiques du sol. Le comportement à la rupture, les modules statiques et dynamiques, et le coefficient de Poisson sont étudiés en fonction du dosage en ciment et de la nature du sol. L'évolution de ces propriétés mécaniques en fonction de la durée de cure et du taux de chargement est analysée.

2. Programme et méthode expérimental

Les calculs de dimensionnement sont souvent complexifiés par l'hétérogénéité du sol, dont la fraction argileuse peut varier de 23 à 47% sur un même site de construction [BEL 12]. C'est pourquoi ce travail de recherche concerne plus particulièrement l'effet de l'argile sur le comportement mécanique en fonction du dosage en ciment (Tableau 1).

Les sols étudiés sont réalisés en laboratoire en mélangeant du sable de Fontainebleau et de la Kaolinite Speswhite™. Dans cette communication six sols au total ont été fabriqués. Le sable et l'argile sont homogénéisés selon différentes proportions volumiques (0, 5, 10, 15, 25 et 50 % d'argile avec respectivement 100, 95, 90, 85, 75 et 50% de sable), de manière à couvrir une large gamme de sols. Le traitement des sols « artificiels » est réalisé avec un ciment CEMIII/C suivant 2 dosages (200 et 300 kg/m³ de béton) et les quantités d'eau ont été déterminées à l'aide d'un mini-cône en fixant un étalement de 320 mm [HEL 14]. In-situ la mise en place nécessite en effet un béton de type auto-plaçant. La quantité d'eau de malaxage augmente avec la teneur en kaolinite en raison de la capacité de rétention et la forte surface spécifique de l'argile. Cette part de l'eau n'est pas disponible pour la lubrification et l'hydratation du ciment et n'est donc pas incluse dans l'eau efficace. Une régression linéaire entre la quantité d'eau de malaxage et la quantité d'argile a permis d'évaluer l'eau absorbée par cette dernière et l'eau efficace des différents mélanges. Pour un même dosage en ciment, on remarque que le rapport E/C efficace est constant d'une formulation à l'autre.

Par la suite, les formulations seront nommées par des abréviations relatant la teneur en argile et en eau du mélange. Par exemple un sol « artificiel » constitué de 90% de sable de Fontainebleau et 10% de kaolinite traité avec 200 kg/m³ de ciment, sera nommé K10C200. Les caractéristiques intrinsèques des matériaux utilisés sont détaillées dans une étude précédente [HEL14].

Teneur en	Teneur en eau	Ciment	Eau de Malaxage	Kaolinite	Sable	Consistance	E/C efficace	ρ béton durci (sèche)	ρ béton durci (humide)
%		kg/m ³ de béton				cm	Sans	kg/m ³	kg/m ³
0	20	200	352	0	1534	0.9 ± 0.6	0.57	1820	2090
		300	353	0	1441	3.3 ± 0.4	0.85	1820	2125
5	27	200	417	67	1295	32.0 ± 1.4	0.57	1695	2035
		300	414	63	1215	33.0 ± 1.2	0.85	1720	2040
10	31	200	451	125	1144	31.4 ± 0.8	0.60	1580	1945
		300	452	115	1059	33.4 ± 0.7	0.87	1600	1960
15	36	200	488	173	998	32.8 ± 1.0	0.61	1485	1850
		300	492	158	912	33.0 ± 1.2	0.87	1495	1880
25	47	200	557	243	743	32.0 ± 2.0	0.61	1295	1760
		300	559	220	672	31.6 ± 1.8	0.85	1310	1780
50	74	200	664	347	353	32.8 ± 1.5	0.59	990	1575
		300	667	299	305	33.6 ± 1.7	0.78	1030	1590

Tableau 1. Formulations, consistance et masse volumique, des bétons durcis à 180 jours.

Le malaxage entre le mélange sol-ciment, préalablement homogénéisé à la main, et l'eau est effectué à l'aide d'un malaxeur CONTROLAB. Après un mélange mécanique de 10 minutes à une vitesse de 63 tr/min, des moules de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur sont remplis en trois couches par la méthode tapping, excepté pour les mélanges sans kaolinite, pour lesquels il s'est avéré impossible d'obtenir à la fois l'ouvrabilité souhaitée et un mélange homogène sans ségrégation. Les formulations K0 n'ont pas été réalisées à ouvrabilité constante mais avec le même rapport E/C efficace que les mélanges avec kaolinite. Ces mélanges de sable de Fontainebleau pur traités au ciment étant par conséquent plus fermes, deux méthodes de remplissage des moules

ont été testées : chacune des couches a été soit tassée par tapping et rodding, soit vibrée 20 secondes afin d'extraire un maximum de bulles d'air [HEL14]

Une fois durcis, les échantillons sont démoulés après 7 jours de cure, enveloppés dans des chiffons humides et conservés dans des sacs hermétiques à l'abri de l'air et donc du séchage. Les essais de caractérisation ont lieu après 7, 28, 56, 90 et 180 jours de maturation. Une fois les échantillons surfacés les essais de compression simple sont réalisés avec une vitesse de 0,04 MPa/s à l'aide d'une presse électromécanique. Certains échantillons de béton de sols sont instrumentés avec des jauges de déformation (Figure 1) de façon à déterminer les propriétés élastiques statiques du matériau [HEL 14]. La méthode consiste à appliquer une couche de résine en partie centrale. Une fois durcie la résine est poncée, puis deux jauges sont collées en position axiale et deux autres en position transversale. Des chargements cycliques sont réalisés tous les 1 MPa avec des décharges à 1 MPa et le 1^{er} cycle a été réalisé à une contrainte de 1,5 MPa. Le module statique est déterminé en calculant pour chaque cycle, la pente lors de la phase de décharge de la courbe contrainte-déformation.

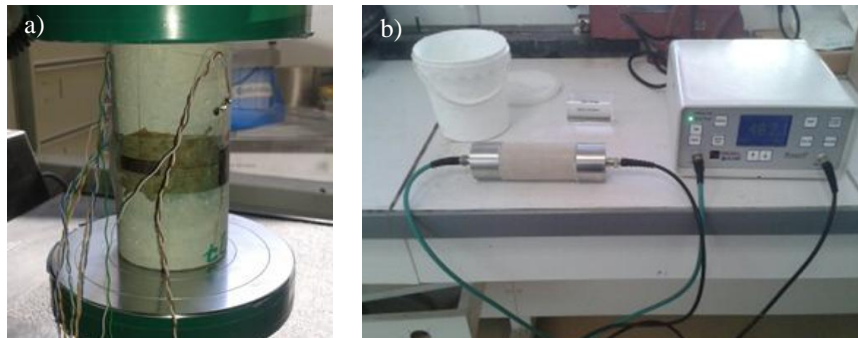


Figure 1. Détermination des propriétés élastiques : a) jauges de déformation b) mesures ultrasonores

La mesure des vitesses d'ondes de compression (V_p) est effectuée à l'aide d'un Pundit7. La mesure de V_p sur des échantillons de béton de sol en laboratoire consiste à émettre un signal ultrasonore sous forme d'une impulsion et d'analyser sa propagation dans l'échantillon. On mesure 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 ; la division de la distance parcourue par l'onde par le temps de parcours permet de déterminer la vitesse de propagation. Les tests sont réalisés à l'état humide (à la sortie du sac de conservation), en fonction du temps de cure et avant chaque essai de compression simple. Ce type de mesures non destructives dans un matériau permet d'obtenir des informations sur la porosité, l'état de fissuration, et les propriétés élastiques. Le module d'élasticité dynamique entre autres est calculé à partir de la vitesse des ondes P (V_p), de la masse volumique du béton durci (ρ) et des coefficients de poisson (ν) déterminés à l'aide des jauges extensométriques [1].

$$E = \rho V_p^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad [1]$$

3. Résultats et analyses

3.1. Propriétés élastiques statiques

3.1.1. Module statique et coefficient de poisson en fonction de la composition du mélange.

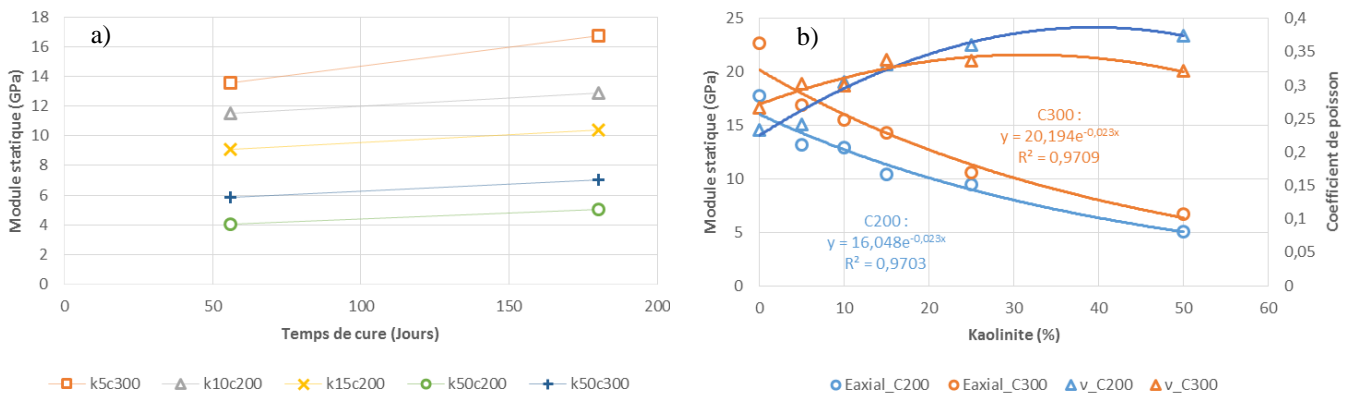


Figure 2. Evolution du module statique en fonction du temps de cure (a) et de la teneur en argile à 180j (b).

Dans cette partie, l'objectif est de montrer l'influence du temps de cure, des caractéristiques du sol et de la quantité de ciment, sur les propriétés élastiques du matériau. Sans argile, le module d'Young varie entre 17.7 et 22.7 GPa selon le dosage en ciment et diminue régulièrement lorsque la quantité d'argile augmente (figure 2b). Pour les mélanges K50C-, les modules sont très faibles et varient entre 5.1 et 6.7 GPa selon le dosage en ciment. L'augmentation du dosage en ciment de 200 à 300 kg/m³ permet de maintenir des modules au-delà de 15 GPa pour des teneurs en argile qui n'excèdent pas 15 %. Enfin, le module statique à 56 jours représente 75% de celui à 180 jours, ce qui signifie que le matériau acquiert l'essentiel de sa rigidité les 56 premiers jours (figure 2a).

Le coefficient de poisson (ν) varie lui entre 0,23 et 0,37 : ce qui est relativement élevé par rapport à un béton classique. Les résultats sont cependant cohérents avec d'autres travaux où ν varie entre 0,3 et 0,4 [DEN 12]. Les valeurs élevées de ν soulignent en tout cas la forte déformabilité du matériau, et sa capacité à se déformer considérablement dans la direction perpendiculaire à l'effort appliqué. Il est aussi intéressant de noter que, lorsque la proportion volumique d'argile dans le sol est inférieure à 15% le coefficient de poisson est plus important pour le plus fort des deux dosages en ciment, mais au-delà c'est l'inverse.

3.1.2. Evolution du module statique en fonction de la contrainte appliquée

La figure 3.a, présente l'évolution du module d'Young en fonction de la contrainte. Les essais sont ici réalisés après 180 jours de cure. Les résultats sont normalisés par rapport aux valeurs du module élastique initial déterminés à une contrainte de 1,5 MPa. Pour l'ensemble des formulations, on constate une diminution très importante du module d'Young en fonction de la contrainte. Ceci indique un développement des fissures et par conséquent des endommagements en fonction de la contrainte. Cette diminution est linéaire et clairement plus importante pour le plus faible des deux dosages en ciment testé (zone 2). L'importance de l'endommagement dépend également de la présence d'argile dans le mélange, même si, à priori cela paraît moins évident que pour le ciment. Il semblerait que la chute du module d'Young en fonction de la contrainte soit plus faible pour les formulations contenant de l'argile, voire lié à un pourcentage optimum de celle-ci compris entre 10 et 15%.

La figure 3.b, présente l'ensemble des enveloppes des courbes contrainte-déformation obtenues lors des différents essais de compression simple. La déformabilité du matériau augmente en fonction de la quantité d'argile dans le mélange et lorsque le dosage en ciment diminue. Cela se traduit par un comportement plutôt non-linéaire pour les plus faibles dosages en ciment (200 kg/m³). À l'inverse, les courbes contrainte-déformation révèlent un comportement davantage linéaire pour les plus forts dosages en ciment (300 kg/m³). Cela confirme que les formulations C200 sont plus sensibles à l'endommagement associé au chargement mécanique et que leur perte de linéarité est plus importante en fonction de ce dernier. Concernant l'effet de l'argilosité du sol, on constate une augmentation de la déformation élastique en fonction de la teneur en argile : $\epsilon_{el} = fc/E$ (figure 7.b).

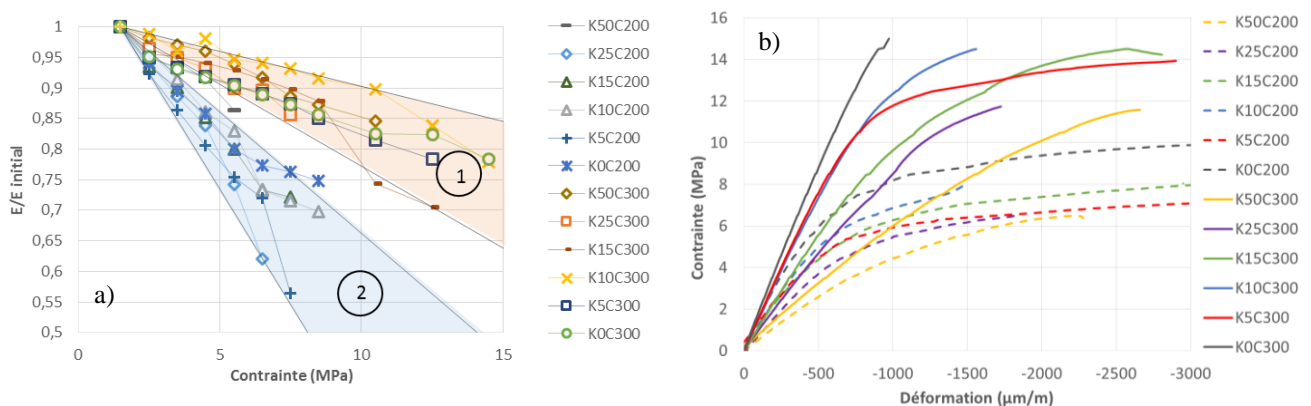


Figure 3. Module de Young axial normalisé en fonction de la contrainte initiale (a) et courbes σ - ϵ (b).

Dans cette communication, les résultats ne permettent pas d'estimer le comportement post-pic du matériau car les jauges de déformation ne fonctionnent pas jusqu'à la rupture. En revanche, il a déjà été montré que l'augmentation du dosage en ciment induisait un comportement fragile, et qu'à l'inverse une diminution de ce dernier conduisait à un comportement plus ductile [FAR 13]. De plus, le type de sol influence également le comportement post-pic du matériau. A dosage en ciment équivalent, un sable de Fontainebleau traité est par exemple plus ductile qu'un limon traité [GUI 13].

3.2. Propriétés élastiques dynamiques

3.2.1. Evolution de la vitesse des ondes P et du module dynamique en fonction du temps de cure

La Figure 4 illustre, l'évolution de la vitesse des ondes P (V_p) et des modules d'Young dynamiques (E_{dyn}) en fonction du temps de cure. L'évolution des modules présente la même tendance que celle des vitesses correspondantes avec deux phases bien distinctes. La première entre 7 et 56 jours, où V_p et E_{dyn} augmentent considérablement, et la seconde au-delà de 56 jours de maturation où la cinétique diminue et la valeur de V_p et E_{dyn} semble atteindre un palier. Malgré une tendance similaire, la position des courbes les unes par rapport aux autres change entre la figure 4.a et 4.b. La différence entre les formulations est plus importante entre les valeurs du module d'Young (figure 4.b) qu'entre les valeurs des vitesses (figure 4.a). Ceci peut s'expliquer par le fait qu'en plus de dépendre de la vitesse et de la masse volumique (humide), E_{dyn} dépend de la porosité (η) et du coefficient de poisson (ν). Par ailleurs, les résultats ont montré une variation significative du coefficient de poisson (ν) (figure 2.b) et de la porosité en fonction des différents dosages. La figure 4.b montre une diminution du module d'Young dynamique en fonction de la teneur en argile pour un dosage donné en ciment, ainsi qu'une augmentation du module en fonction du dosage en ciment pour une teneur en argile constante.

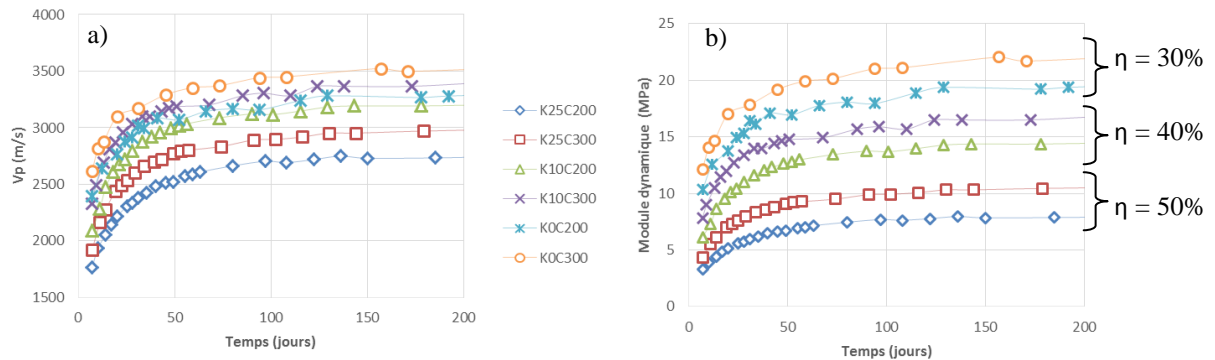


Figure 4. Evolution de la vitesse des ondes P (a) et du module dynamique (b) en fonction du temps de cure.

3.2.2. Comparaison entre la valeur du module statique et dynamique

La figure 5.a, propose une comparaison entre le module statique et le module dynamique. On remarque qu'indépendamment du dosage en ciment et en argile, la valeur du module statique est très proche de celle du module dynamique ($E_{stat} \approx E_{dyn}$). Il semble donc possible d'estimer le module statique à partir du module dynamique. En revanche la précision de la valeur des calculs dépend grandement de l'estimation de la valeur du coefficient de poisson (figure 5.a). Dans la littérature, le module dynamique est généralement plus important que le module statique car la réponse de l'échantillon sur une très courte durée en un très faible niveau de contrainte (condition de détermination des modules dynamiques) est essentiellement élastique. Les valeurs voisines observées entre E_{dyn} et E_{stat} , s'expliquent donc peut-être par la forte porosité des mélanges [HEL 14] et par la méthode de détermination du coefficient de poisson basée sur les résultats obtenus par la méthode des jauges extensométriques, combinant les deux méthodes de mesure du module (statique et dynamique).

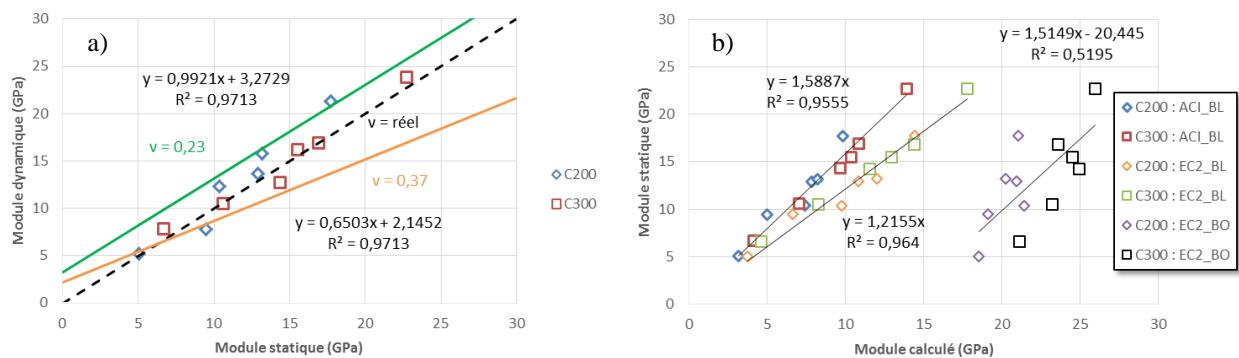


Figure 5. Corrélation entre les modules à 180j : (a) E dynamique et E statique, (b) E statique et E calculé

3.3. Corrélation f_c – E & f_c - V_p

3.3.1. Influence du temps, du dosage en ciment et de la teneur en argile du sol sur la résistance en compression.

La figure 6, indique l'évolution de la résistance en compression simple en fonction du temps, pour les différents dosages en ciment et en argile. L'augmentation de résistance est de la forme logarithmique et peut

s'écrire: $f_{c(MPa)} = a \ln(t_{(jours)}) + b$ [2]. Dans l'équation [2] les coefficients a et b sont déterminés par régression linéaire en traçant une courbe de tendance, et a correspond à la cinétique d'augmentation de résistance. Dans ce travail de recherche, l'utilisation d'un ciment essentiellement composé de laitiers de haut fourneaux (CEM III/C) ralentit sensiblement cette cinétique en raison du caractère latent des laitiers ($f_{c_{28j}} \approx f_{c_{180j}} / 1,6$). Cependant, comparativement à un ciment CEM I l'augmentation est prolongée au-delà de 90 jours de maturation et procure à long terme de meilleures résistances mécaniques [VAN 06]. On remarque également que lorsque l'argile représente 10 à 15% du sol en proportion volumique, son effet est plutôt positif sur la résistance en compression. Concernant l'effet du ciment, on remarque qu'une augmentation du dosage en CEM III/C procure de meilleures résistances mécaniques (Figure 6.a et 6.b.). Lorsque l'on passe de 200 à 300 kg/m³ de ciment, la résistance augmente de 67%. Dans la littérature, certains auteurs proposent des expressions permettant la prédiction de la résistance. La plupart de ces modèles sont basés sur la teneur en eau et en ciment [COR 13], et le plus complet d'entre eux prend en compte le pourcentage de fines [SZY 13].

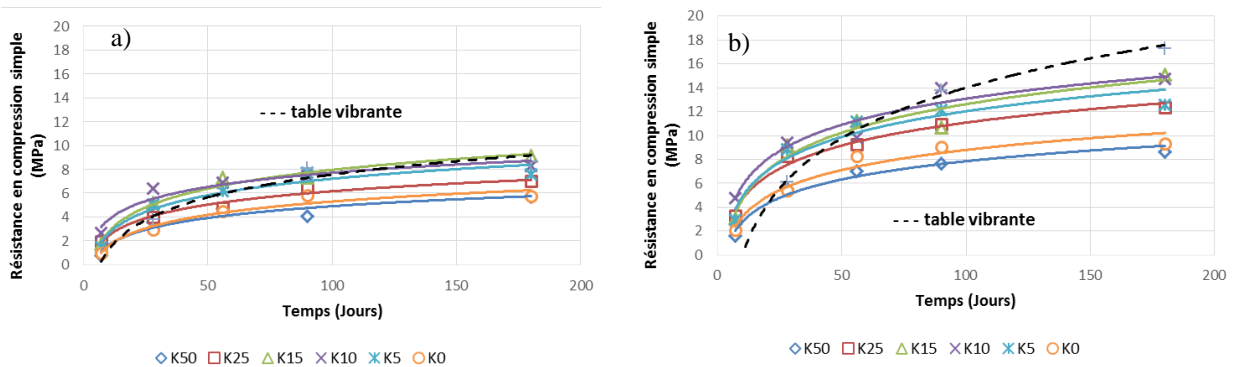


Figure 6. Evolution de la résistance en compression simple en fonction du temps de cure.

On remarque l'effet non négligeable du procédé de mise en place dans les moules, tout particulièrement pour les formulations K0. L'utilisation de la table vibrante permet de réduire considérablement la quantité d'air occlus et améliore sensiblement la résistance en compression simple (figure 6).

3.3.2. Corrélation entre la résistance en compression et V_p , Estat ou Edyn

La figure 7.a, propose une corrélation entre f_c et V_p . Les résultats sont plutôt dispersés et la marge d'erreur semble augmenter en fonction de la vitesse d'ondes P. La résistance en compression simple semble toutefois suivre une loi puissance en fonction de V_p : $f_{c(MPa)} = 5.10^{-12} \cdot V_p^{3,5}$. Cette expression semble coïncider avec les résultats de la littérature [GUI 13]. De plus, conformément à une étude menée sur des carottes de béton de sol prélevées in-situ sur différents sites de construction, la valeur de V_p est censée varier entre 2000 et 3500 m/s pour une plage de résistance comprise entre 0 et 15 MPa [DEN 12]. Ces ordres de grandeur s'accordent aux valeurs obtenues en laboratoire. Les méthodes acoustiques paraissent cependant trop imprécises pour estimer la valeur de f_c in situ à partir d'abaques et l'estimation de la valeur de la rigidité semble approximative lorsque l'on choisit arbitrairement la valeur du coefficient de poisson [DEN 12]. Les méthodes non destructives restent néanmoins un excellent moyen de vérification de l'homogénéité du matériau sur un même site de construction.

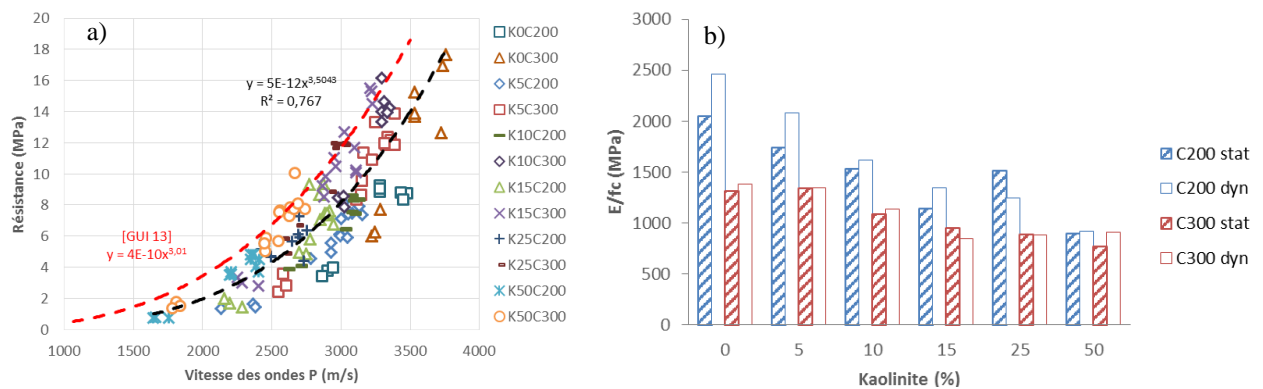


Figure 7. Relations reliant la résistance en compression simple à la vitesse des ondes (a) et évolution d'E/fc en fonction de la teneur en argile du sol (b).

La figure 7.b, présente l'évolution du rapport E/f_c en fonction du pourcentage d'argile dans le sol. La valeur d' E/f_c est comprise entre 900 et 2400 pour les dosages avec 200 kg/m³ de ciment et entre 800 et 1400 pour les dosages avec 300 kg/m³. Le rapport entre le module et la résistance semble diminuer linéairement en fonction du pourcentage d'argile et de façon plus importante pour les formulations avec le plus faible des deux dosages en ciment (200 kg/m³). Autrement dit la rigidité du matériau est plus influencée par la teneur en argile que la résistance en compression, surtout pour les faibles dosages en ciment.

3.3.3. Modèles de calcul : comparaison des valeurs expérimentales avec l'EC2 et l'ACI.

Sur la figure 5.b la valeur du module calculé à partir de l'Eurocode 2 (EC2) [3], [4] et du code de l'American Concrete Institute (ACI) [5] est exprimée en fonction du module statique. Les modèles de l'Eurocode 2 et de l'ACI associés aux bétons légers [4], [5] affichent une meilleure corrélation que les modèles destinés aux bétons de densité normale, et vont dans le sens de la sécurité puisqu'ils sous-estiment la valeur réelle du module élastique. Pour les relations avec 2 paramètres (f_c et ρ), la tendance en fonction de la teneur en argile correspond à celle des valeurs expérimentales, puisque sur la figure 5.b on obtient : $E_{EC2} = 1.22.E_{stat}$ ($r^2 = 0,96$) et $E_{ACI} = 1.59.E_{stat}$ ($r^2 = 0,96$). La formule de l'EC2 pour les bétons ordinaires [3] n'est en revanche clairement pas adaptée aux bétons de sol, ce qui montre l'importance de la masse volumique apparente [AFN10] dans les calculs.

$$E = 22 \left(\frac{f_c}{10} \right)^{0,3} \quad [3]$$

$$E = 22 \left(\frac{\rho}{2200} \right)^2 \left(\frac{f_c}{10} \right)^{0,3} \quad [4]$$

$$E = 0,043 \rho^{1,5} \sqrt{f_c} \quad [5]$$

4. Conclusion

La résistance d'un béton de sol dépend des caractéristiques de l'agent stabilisateur utilisé, du sol, des conditions de mélange et du type de cure [TER 97]. Parmi ces différents facteurs, le travail de recherche présenté proposait tout particulièrement d'étudier l'influence de l'argilosité du sol, du dosage en ciment et du temps de conservation sur les caractéristiques mécaniques de plusieurs mélanges de « référence ».

À 180 jours, les résistances en compression des bétons de sols varient entre 5,5 et 17,7 MPa tandis que leurs modules d'Young varient entre 5,5 et 22,7 GPa. Ces caractéristiques mécaniques sont fortement influencées par la teneur en argile du sol. En imposant une ouvrabilité constante, une plus forte argilosité du sol conduit à une augmentation du dosage en eau. L'augmentation de la porosité qui en résulte, entraîne une diminution quasi linéaire du module d'Young. Mais à l'inverse, les valeurs de résistances en compression ne diminuent pas voir augmentent légèrement lorsque la teneur volumique en argile augmente de 5 à 15%. Au-delà de 15% d'argile dans le sol la résistance diminue et la rigidité du matériau peut poser problème pour certaines utilisations structurelles. Le coefficient de poisson (ν) varie lui entre 0,23 et 0,37, sa valeur augmentant avec la teneur en kaolinite du sol. Le choix arbitraire d'un coefficient de poisson identique quelle que soit la nature du sol peut induire une incertitude lors du calcul du module d'Young dynamique.

Les propriétés mécaniques peuvent être améliorées par un dosage plus important en ciment. Pour des raisons économiques le dosage en ciment excède rarement 33% [SZY 11], ce qui a été respecté pour l'ensemble des formulations (excepté pour le mélange K50C300). Pour une même ouvrabilité (type BAP), le ciment améliore la rigidité (1 à 5GPa) et la résistance en compression simple ($f_{c_{300 \text{ kg/m}^3}} \approx 1,67 \times f_{c_{200 \text{ kg/m}^3}}$) des bétons testés. À 28 jours la résistance en compression des bétons de sol équivaut à 63% environ de la résistance à 180 jours. Ceci est lié à la plus lente cinétique d'hydratation du ciment CEMIII/C qui contient plus de 80% de laitier de hauts fourneaux. À environ 56 jours, le matériau semble avoir néanmoins atteint l'essentiel de sa rigidité ($E_{56j} \approx E_{180j} \times 0,75$). En condition d'exploitation, l'augmentation du dosage en ciment diminue alors le risque d'endommagement lié au chargement mécanique.

Enfin, concernant la détermination de la valeur du module d'Young à partir de la résistance en compression, et de la masse volumique, les valeurs expérimentales suivent la même tendance que les relations proposées par l'EC2 et l'ACI, mais ces dernières peuvent être corrigées respectivement d'un facteur de 1,22 et de 1,59, afin d'améliorer la précision de l'estimation. Du fait de leur faible masse volumique les bétons de sols rentrent dans la catégorie des bétons légers ($\rho < 2000 \text{ kg/m}^3$), de meilleurs résultats sont donc obtenus en prenant en compte la masse volumique apparente sèche du béton lors de l'estimation de la rigidité. Pour répondre aux attentes des industriels, une corrélation entre V_p et f_c est proposée : $f_c(\text{MPa}) = 5.10^{-12} \cdot V_p^{3,5}$. La dispersion relativement importante des résultats implique cependant une assez forte marge d'erreur lors de l'estimation de la résistance à

l'aide des méthodes non destructives. Cependant, la mesure de V_p permet d'estimer la valeur du module statique à partir du module dynamique ($E_{\text{stat}} \approx E_{\text{dyn}}$) si la valeur du coefficient de poisson est connue précisément.

L'objectif des travaux en cours est d'étudier la durabilité de ces matériaux en caractérisant leur perméabilité à l'eau, et en menant des essais de vieillissement accélérés (cycles humidification/séchage et attaques chimiques).

5. Références bibliographiques

- [MEL 13] MELENTIJEVIC S., « Application of cement deep mixing method for underpinning », *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, p. 2549–2552.
- [TOP12] TOPOLNICKI M., « Novel Application of Wet Deep Soil Mixing for Foundation of Modern Wind Turbines », *Proceedings of the 4th International Conference on Grouting and Deep Mixing*, 2012, p. 1–10.
- [KOL 13] KOLOVOS K. G., “Mechanical properties of soilcrete mixtures modified with metakaolin,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, 2013, p. 1026–1036.
- [GUI 13] GUIMOND-BARRETT A., Influence of mixing and curing conditions on the characteristics and durability of soils stabilised by deep mixing. Thèse de doctorat, Université du Havre, 2013.
- [JEA 13] JEANTY J., « Importance et applications des inclusions de grande inertie Importance and practical examples of inertial soil improvement », *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, p. 2505–2508.
- [TIN 13] TINOCO J., « A novel approach to predicting Young's modulus of jet grouting laboratory formulations over time using data mining techniques » *Engineering Geology*, vol. 169, 2013, p. 50–60.
- [WAN 15] WANG F., « Time-dependent performance of soil mix technology stabilized/solidified contaminated site soils », *J. Hazard. Mater.*, vol. 286C, 2015, p. 503–508.
- [BEL 12] BELLATO D., « Long-term performance of CSM walls in slightly overconsolidated clays », *ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI*, Brussels, 2012.
- [HEL 14] HELSON O., « Influence de l'argilosité du sol sur les propriétés physico-mécaniques des bétons de sol », *32èmes Rencontres de l'AUGC*, Orléans, 2014, p. 1–10.
- [DEN 12] N. DENIES, N. HUYBRECHTS, « SOIL MIX WALLS as retaining structures – mechanical characterization », *ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI*, Brussels, 2012.
- [FAR 13] FAROUK A., « Ground improvement using soil–cement columns: Experimental investigation », *Alexandria Eng. J.*, vol. 52, n°4, 2013, p. 733–740.
- [VAN 06] VAN ROMPAEY G., Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chloruré, Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, 2006.
- [COR 13] CORREIA A. A. S., « Prediction of the unconfined compressive strength in soft soil chemically stabilized », *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, p. 2457–2460.
- [SYM 13] SZYMKIEWICZ F., « Etude paramétrique en laboratoire du matériau Deep Soil-Mixing », *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, p. 2605–2608.
- [AFN10] AFNOR, “NF P 18-459 - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique.” 2010.
- [TER 97] M. TERASHI, « Theme lecture : Deep mixing method-Brief state of the art », *14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, 1997, p. 2475–2478.
- [SZY 11] SZYMKIEWICZ F., Evaluation des propriétés mécaniques du matériau Soil-Mixing, Thèse de doctorat, Université de Paris-Est, 2011.
- [ACI 05] ACI 318-05. (2005). Building code requirements for structural concrete and commentary. ACI Farmington Hills : Mich