
Caractérisation du comportement mécanique des bétons de sol.

O. Helson^{1*}, A.-L. Beaucour¹, J. Eslami¹, A. Noumowé¹

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*

Le soil-mixing et le jet-grouting consistent 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, ont fortement encouragé les entreprises du BTP à améliorer les procédés de fabrication, notamment en développant les procédés de mélange [1], mais aussi en proposant un contrôle précis de l'injection du liant [2]. On constate en revanche un manque évident de normes et recommandations nationales dans le domaine. De plus, on ne possède pas encore assez de recul sur ce matériau nouveau dont le composant principal (le sol) varie énormément d'un site à l'autre, et dont la qualité une fois ce matériau durci, dépend aussi des conditions de mélange.

La fiabilisation de la conception des ouvrages en bétons de sol nécessite 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. À partir des courbes contrainte-déformation, la perte de linéarité et le comportement post-pic sont caractérisés.

Dans ce travail de recherche, entrepris au sein du L2MGC, nous avons choisi de travailler sur des sols « artificiels » dans des conditions idéales de mélange. Ainsi, les caractéristiques intrinsèques des sols étudiés sont parfaitement maîtrisées et les résultats ne sont pas influencés par le procédé de malaxage. Les 6 sols étudiés, sont réalisés en laboratoire en mélangeant de la kaolinite Speswhite et du sable de Fontainebleau, selon différentes proportions volumiques. Ces sols sont traités avec un ciment CEMIII/C, suivant 2 dosages (200 et 300 kg/m³ de béton frais). In situ, le procédé de réalisation nécessite un béton de type auto-plaçant, de manière à obtenir une bonne homogénéité du mélange. Afin de représenter au mieux la réalité, nous avons donc choisi de travailler à ouvrabilité constante durant l'ensemble de cette étude. Pour ce faire, le dosage en eau a été déterminé en réalisant des essais d'étalement au mini-cône, jusqu'à l'obtention d'un étalement de 32 cm pour chacune des formulations [3].

Les essais de caractérisation sont réalisés sur des échantillons cylindriques de béton de sol durci (100 mm de hauteur et 50 mm de diamètre). La résistance en compression simple est déterminée au moyen d'une presse électromécanique (INSTRON) sur un total de 396 éprouvettes. Des essais de compression simple cyclique avec les mesures de déformations sont réalisés sur 24 échantillons de béton de sol, pour déterminer leurs modules élastiques initiaux et étudier les variations de ces derniers en fonction du chargement mécanique. Les déformations sont mesurées à l'aide de jauges extensométriques. Deux jauges sont placées en position axiale et deux en position transversale. Des mesures de vitesses ultrasonores sont également réalisées avant chaque essai en compression, et au cours du temps à l'aide d'un Pundit7.

Le comportement mécanique notamment la déformabilité et l'endommagement du matériau en fonction du chargement, ont été étudiés via le suivi des courbes enveloppes et Estat, pour les différentes formulations. Par ailleurs, ce travail a consisté à suivre l'évolution au cours du temps du module statique (Estat) et du module dynamique (Edyn). La comparaison de ces 2 modules soulève

tout l'intérêt de pouvoir passer d'un module à l'autre, notamment afin de prédire E_{stat} en réalisant des mesures non destructives in-situ. Une corrélation entre la résistance en compression simple (f_c) et la valeur du module est également proposée, afin d'adapter les formules de l'Eurocode 2 aux bétons de sol. Enfin, la ductilité du matériau est évaluée à l'aide du degré de non-linéarité (n_L), qui correspond au rapport déformation au moment de la rupture (ϵ_{rupt}) sur déformation élastique (ϵ_{el}). Dans cette dernière partie, une courbe contrainte-déformation type est proposée afin de caractériser le comportement mécanique du matériau, et plusieurs courbes contrainte-déformation résultant d'essais en compression pilotés en déplacements permettent d'observer le comportement post-pic du matériau.

Les résultats obtenus pour les modules d'Young initiaux montrent une diminution en fonction de la teneur en kaolinite. Pour l'ensemble des formulations, on constate une diminution du module d'Young en fonction de la contrainte. Concernant l'évolution du module en fonction du temps de cure, on constate une augmentation puis une stabilisation à partir de 60 jours de maturation. Les résultats indiquent que les valeurs de E_{stat} et E_{dyn} sont proches les unes des autres. De plus, la relation associée aux bétons légers proposée dans l'Eurocode 2, liant E à f_c et ρ , doit inclure un coefficient multiplicatif de 1,6 pour une bonne estimation du module d'Young. Enfin, le calcul des coefficients de non-linéarité montre que n_L est de l'ordre de 2, ce qui correspond à la valeur communément admise pour les bétons.

Références :

- [1] Melentijevic S., "Application of cement deep mixing method for underpinning," *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, pp. 2549–2552.
 - [2] M. Topolnicki and G. Sołtys, "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, pp. 1–10.
 - [3] O. Helson, "Influence de l'argilosité du sol sur les propriétés physico-mécaniques des bétons de sol," in *32èmes Rencontres de l'AUGC*, 2014, pp. 1–10.
-