

LES LIMONS TRAITES DU CANAL SEINE NORD EUROPE POUR UN RE-EMPLOI OPTIMAL EN BAJOYER D'ÉCLUSE

TREATED SILTS FROM THE NORTH EUROPE-SEINE CHANNEL FOR A BETTER USE IN LOCK WALL

Charles BIZIEN¹, Olivier QUESTE¹, Véronique BERCHE¹, Sonia FANELLI², Yasmina BOUSSAFIR², Fabien SZYMKIEWICZ², Philippe REIFFSTECK², Nathalie DUFOUR³, Rémy MATTRAS⁴, Mickael LECOEUR⁴

¹ Société du Canal Seine Nord Europe, France

² Université Gustave Eiffel, Département GERS, laboratoire Sols Roches Ouvrages géotechnique, campus de Marne-la-Vallée, France

³ Cerema, DTer Méditerranée, Equipe de recherche GéoCoD

⁴ EGIS, Groupement de Maitrise d'œuvre ONE

RÉSUMÉ – Le projet Canal Seine Nord Europe, va constituer le plus important chantier de terrassement des années à venir. Dans ce contexte, des solutions innovantes de réutilisation des matériaux du site sont recherchées. Les limons issus des déblais font l'objet d'études en vue de leur utilisation dans le cadre des ouvrages du projet. Ces études comportent notamment un programme d'essais spécifiques qui est décrit dans cet article.

ABSTRACT – The Canal Seine Nord Europe project, a wide-gauge channel that extends over more than 100 km between Compiègne and Cambrai, will be the largest earthworks project in the years to come. In this context, innovative solutions for reusing materials extracted from the site are considered. The use of treated silts for the optimization of lock structures is thus the subject of specific test programs described in this article.

1. Contexte

Le projet Canal Seine Nord Europe, itinéraire fluvial à grand gabarit qui s'étend sur plus de 100km entre Compiègne et Cambrai, va constituer le plus important chantier de terrassement des années à venir. La réalisation des travaux du canal Seine Nord Europe est un projet majeur des années 2020, qui permettra avec 100km de tracé de canal neuf jalonnés de sept écluses, d'assurer le trafic fluvial à grand gabarit entre l'Île de France et le Nord de l'Europe. Les travaux de terrassement se feront en traversant les limons de surface et les craies d'âge secondaire.

Les travaux étant excédentaires en matériaux, les enjeux techniques ont porté sur la valorisation maximale des matériaux extraits en déblais pour réaliser les ouvrages géotechniques. Les études se sont entre autres concentrées sur les limons des sites, classés A1/A2.

Les travaux de recherche de ces dernières années ont permis d'envisager des solutions de traitements de sols pour remplir des fonctions spécifiques aux ouvrages. Par exemple, le réemploi des limons a été étudié pour une utilisation en étanchéité du canal, en protection d'étanchéité, et pour constituer des remblais contigus au sas des écluses.

Des études sont conduites par la SCSNE relatives à l'utilisation de limons dans le but de mieux appréhender les caractéristiques de ces matériaux après traitement. Les études en cours comprennent notamment :

- une campagne d'identification de la ressource en limons sur une partie du tracé,
- des essais mécaniques spécifiques sur les sols traités,
- des essais sur des matériaux mis en œuvre sur un chantier expérimental,

Deux enjeux sont à considérer pour ces matériaux

- l'analyse des effets de la fatigue sous l'effet des sollicitations cycliques (comme les sassees des écluses),
- le comportement du matériau sous l'effet du vieillissement.

On présente ci-dessous en figure 1 un profil type d'une écluse du Canal Seine Nord Europe.

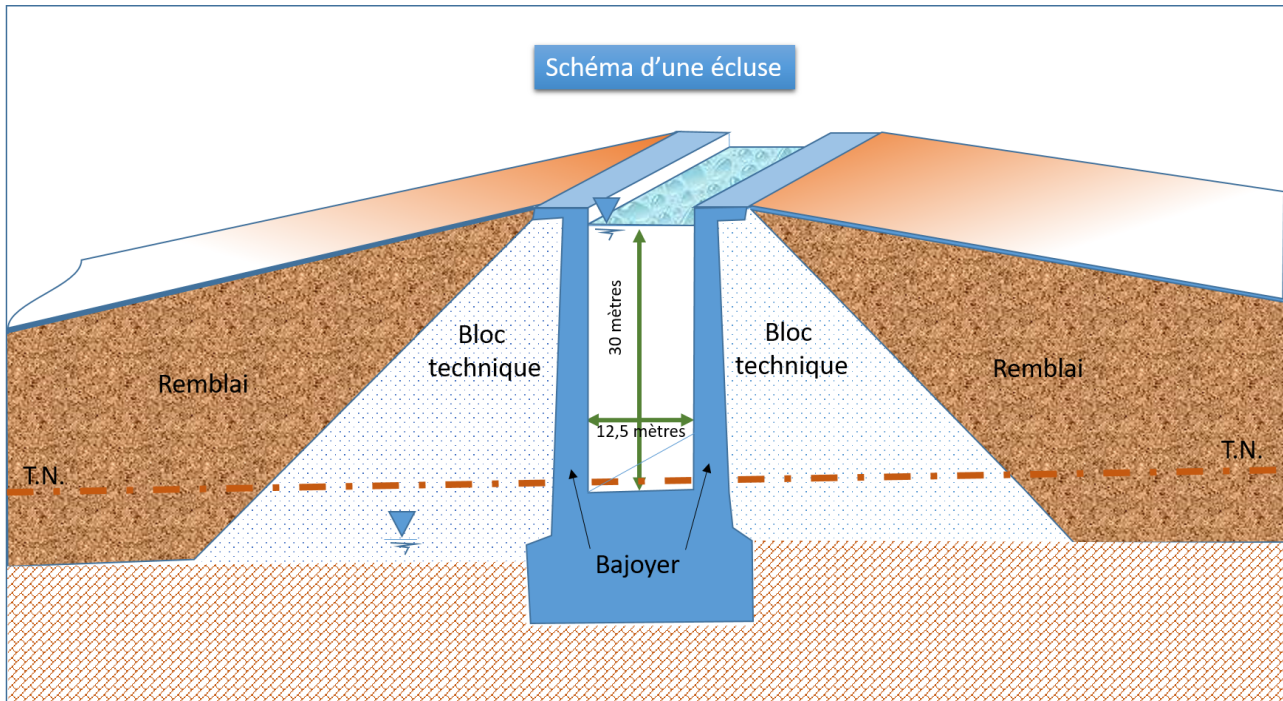


Figure 1. Représentation schématique d'une écluse et localisation des blocs techniques associés aux bajoyers

Cette communication décrit un programme d'essais conduit par la SCSNE concomitamment aux études de conception, et plus particulièrement les essais mécaniques spécifiques réalisés sur ces matériaux.

2. Présentation du programme d'essais sur les limons traités du CSNE

Dans le cadre des études de conception des écluses, la SCSNE et son Maître d'œuvre ONE ont défini et mis en œuvre un programme d'essai spécifique destiné à mieux caractériser le comportement de ce matériau.

Ces essais auront ainsi pour objectif de mieux appréhender les performances mécaniques complétant les études et connaissances existantes comme les données bibliographiques existantes et de guides utilisés par la profession (LCPC-Sétra, 2000).

Les résultats obtenus permettront de contribuer aux études de dimensionnement des ouvrages.

Le programme en cours de mise en œuvre comprend ainsi les étapes suivantes.

- **Une campagne de prélèvements in situ**, et d'identification physique en laboratoire permettant de caractériser les principaux gisements de limons présents sur le tracé du canal, en quantité et en qualité. Cette première étape menée en 2021 a permis d'identifier les sites qui présentent une qualité et une homogénéité de limons compatibles avec leur réutilisation).
- **La réalisation d'études de traitement pour les gisements retenus**, destinées à définir une formulation pour la suite des essais. Cette étude est réalisée en

plusieurs étapes, avec dans un premier temps des essais sous maturation accélérée (28 jours à 40°C) puis des essais normalisés (90 jours à 20°C).

- La réalisation, pour la formulation retenue, **d'essais de mécanique des sols** destinés à appréhender les propriétés mécaniques des limons traités :
 - Pour différentes conditions de préparation :
 - durées de maturation (28 jours à 40°C, et 90 jours ou 270 jours à 20°C)
 - conditions hydriques: air ou immersion
 - Pour différentes contraintes de confinement correspondantes à la position des échantillons dans les ouvrages,
 - Pour différents niveaux de déformation :
 - essais triaxiaux monotones en conditions drainées et non drainées,
 - essais triaxiaux cycliques,
 - essais de résonance en torsion,
 - mesure de la célérité des ondes S et P.
- Un programme pour contribuer à caractériser le vieillissement et le fluage des limons traités qui s'est inspiré d'essais développés habituellement pour la caractérisation des bétons. Ils comprennent des essais de laboratoires couplés à des modélisations numériques :
 - Les essais de fluage en laboratoire sont réalisés pendant au moins six mois en conditions thermiques et hydriques contrôlées.
 - Le comportement observé en laboratoire sur les premiers mois est intégré dans la modélisation, ce qui permet de simuler le comportement au-delà des mois d'observation et d'obtenir une prédiction du comportement à long terme (50 000 jours).
- Un chantier expérimental destiné à fiabiliser la conception et à consolider les données de laboratoire, a été conduit. Le chantier du démonstrateur vise les objectifs suivants:
 - Objectif 1 : Mettre au point une ou des méthodes permettant d'obtenir l'homogénéité et le monolithisme d'un massif en limons traités à l'échelle d'un ouvrage.
 - Objectif 2 : Appréhender les paramètres mécaniques « en grand » du massif en limon traité et ainsi apprécier les écarts entre les propriétés mécaniques des limons traités (modules et résistance au cisaillement) obtenues en laboratoire à l'échelle de l'échantillon et celles obtenues dans des conditions de mise en œuvre de chantier
 - Objectif 3 : définir et tester des solutions de construction pour fiabiliser le comportement et la performance du matériau au contact avec le béton c'est-à-dire l'interface entre massif en sol traité et bajoyers en béton armé.

3. Comportement mécanique des limons traités, sous sollicitations statiques et cyclique

Les écluses se caractérisent par un fonctionnement avec des cycles successifs de remplissage et vidange du sas. Ces ouvrages sont pour certains en interaction avec les nappes phréatiques. Les essais de caractérisation considèrent :

1. des sollicitations mécaniques cycliques
2. des conditions hydriques différentes,

Ainsi, le programme prévisionnel a pour objet de réaliser un ensemble d'essais de mécanique des sols sur des éprouvettes de limons traités reconstituées en laboratoire pour caractériser ces matériaux en essayant de reproduire ces principales sollicitations. Les objectifs de ce programme sont les suivants :

- Déterminer la résistance au cisaillement des limons traités en fonction du temps de maturation.
- Déterminer les modules sécants au premier chargement (E_{50}) et module d'Young de décharge/ recharge (E_{ur}), coefficient de Poisson et dilatance en fonction du temps de maturation.
- Mesurer le module de cisaillement G et l'amortissement D pour différentes gammes de déformation afin d'obtenir l'évolution du module de cisaillement et l'amortissement en fonction de la distorsion ;
- Mesurer les modules au moyen d'essais triaxiaux cycliques et évaluer l'impact de la fréquence de sollicitation sur les modules ;
- Déterminer les modules en très petites déformations (G_{max} , E_{max}) à différentes contraintes de confinement ;
- Mesurer l'évolution des modules d'Young sous un chargement cyclique (jusqu'à 1 000 000 cycles) ;
- Déterminer la résistance au cisaillement des limons traités après une sollicitation cyclique de 1 000 000 cycles.

Une des originalités de ce programme repose sur la prise en compte des sollicitations mécaniques cycliques probablement induites par le fonctionnement de l'écluse et les cycles de montée et de descente du niveau d'eau dans le sas de l'écluse.

Les résultats obtenus permettront de plus d'améliorer la compréhension du comportement des sols fins traités en vue d'une utilisation en remblai contigu d'Ouvrage d'Art, qui est à ce jour peu répandue (Sétra, 2012).

3.1. Préparation des éprouvettes

Pour répondre à ce programme, plus de cent éprouvettes seront reconstituées en laboratoire et testées mécaniquement. Elles seront fabriquées par compactage statique avec le bâti de chargement présenté en Figure 2.

Ce procédé présente plusieurs avantages : l'enregistrement de la courbe de compactage, qui constitue « l'histoire » de l'éprouvette, l'homogénéité et la répétabilité des éprouvettes ainsi fabriquées pour des essais de mécanique des sols assurées par le contrôle de l'effort axial pendant la phase de compactage. En cas d'écart sensible entre les courbes de compactage, l'éprouvette sera écartée de la campagne expérimentale et une nouvelle éprouvette serait immédiatement recompactée (Serratrice, 2018). La plupart des éprouvettes ainsi fabriquées auront un diamètre de 5 cm (élancement 2).

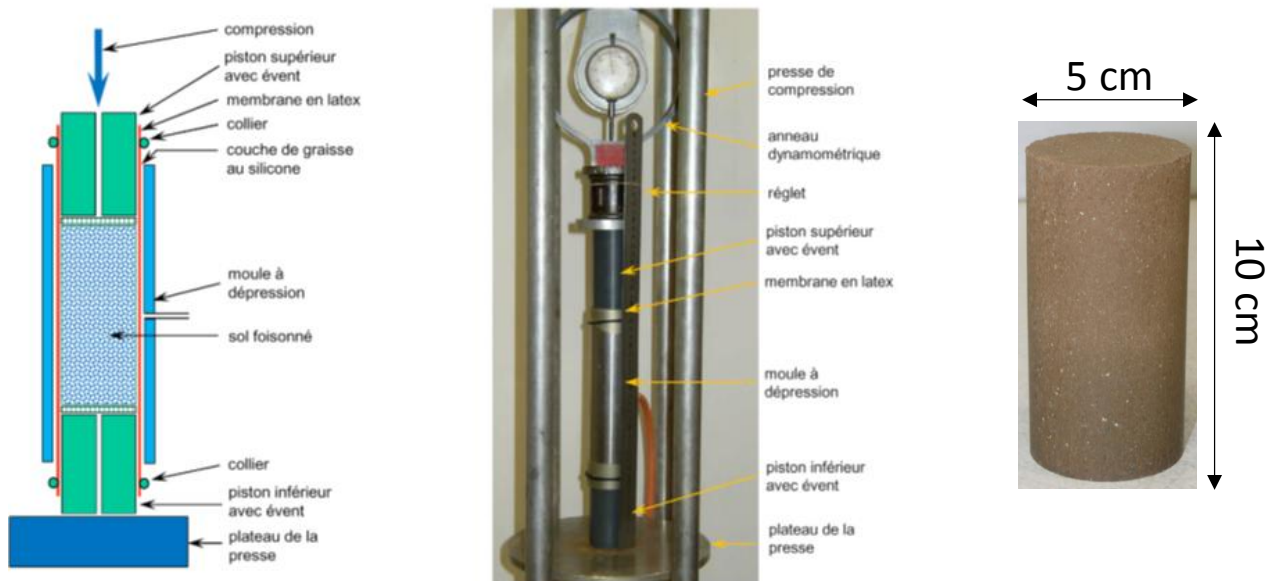


Figure 2. Procédé de compactage statique d'un sol : Schéma du moule de compactage (à gauche) ; photo du bâti de chargement et du moule (au milieu) ; éprouvette de limon traité (à droite) (d'après (Serratrice 2018))

3.2. Résistance

Le premier enjeu de ce programme expérimental sera de mettre en évidence la résistance des limons traités. Des essais triaxiaux consolidés isotropiquement et drainés (CID) et non consolidés non drainés (anciennement UU) pour différentes conditions de cure et pour différentes pressions de consolidation seront effectués. La réalisation de ces essais classiques pour la caractérisation mécanique des sols dans leur état naturel l'est beaucoup moins pour les sols traités. Ils permettent notamment dans le cas présenté ici de mesurer l'évolution des paramètres de résistance au cisaillement en fonction des conditions de maturation des éprouvettes.

Les résultats attendus devraient confirmer l'augmentation de la résistance au cisaillement du matériau traité avec l'augmentation de la durée de cure, en lien avec ce qui est observé classiquement par la mesure des résistances en compression simple lors des études de traitement (LCPC-Sétra, 2000).

Les normes existantes relatives à ces essais serviront de base à leurs réalisations (AFNOR, 2018a ;2018b). Leur transposition à des sols traités amènera les équipes à réfléchir aux problématiques de saturation des éprouvettes traitées, préalables aux essais, et à la qualité du développement de la prise cimentaire attendue, caractérisée indirectement par la durée de cure.

3.3. Déformabilité

Le deuxième enjeu de ce programme est de mesurer les paramètres de déformabilité (modules) du limon traité pour différentes plages de déformation.

En très petites déformations, la raideur du sol est représentée par le module de cisaillement $G_{\max}$ qui est en lien direct avec la vitesse des ondes de cisaillement V_s . Dans la gamme des déformations faibles à moyennes, le comportement des sols est non linéaire et hystérétique. La raideur du sol est représentée par le module de cisaillement sécant G . Il est d'usage de l'exprimer aussi par le rapport $G/G_{\max}$. La dissipation d'énergie par le sol au cours des cycles est représentée par le coefficient d'amortissement D . L'existence d'un amortissement minimal $D_{\min}$ en très petite déformation est admise généralement. Comme beaucoup de propriétés mécaniques des sols, G et D dépendent à la fois de la contrainte de confinement et du niveau de déformation de cisaillement et dans le cas des sols traités des conditions de maturation (Serratrice, 2016).

La Figure 3 présente la courbe de réduction du rapport $G/G_{\max}$ en fonction de la distorsion visée, pour différentes gammes de déformation propres aux ouvrages (dans le cas présent un bajoyer d'écluse) et aux essais en laboratoire.

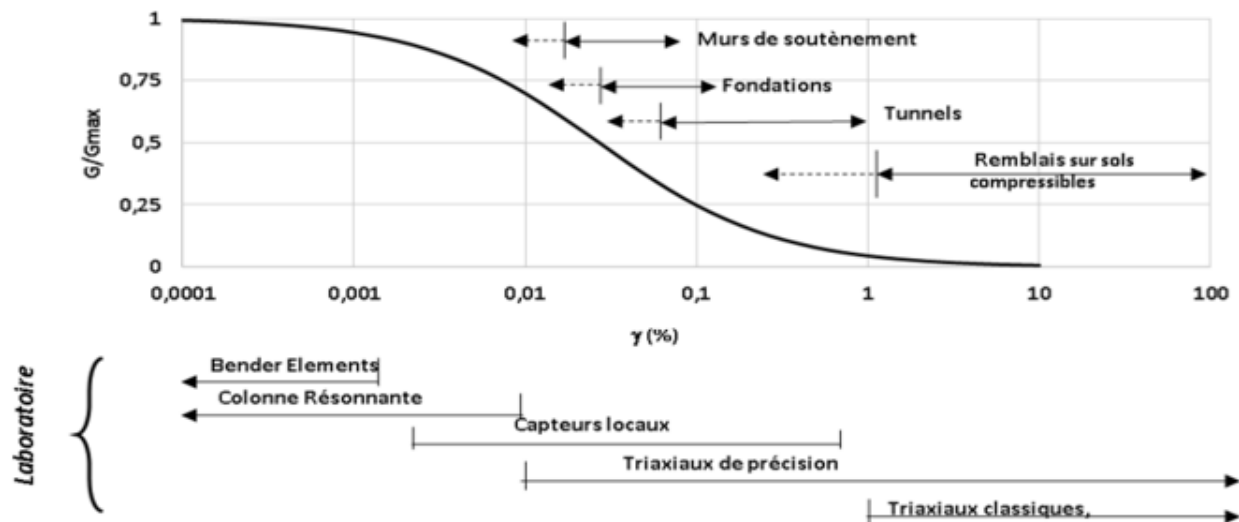


Figure 3. Courbe de réduction du rapport $G/G_{\max}$ en fonction de la distorsion pour les différentes plages de déformation propres aux ouvrages et aux essais de laboratoires (d'après Reiffsteck, 2002)

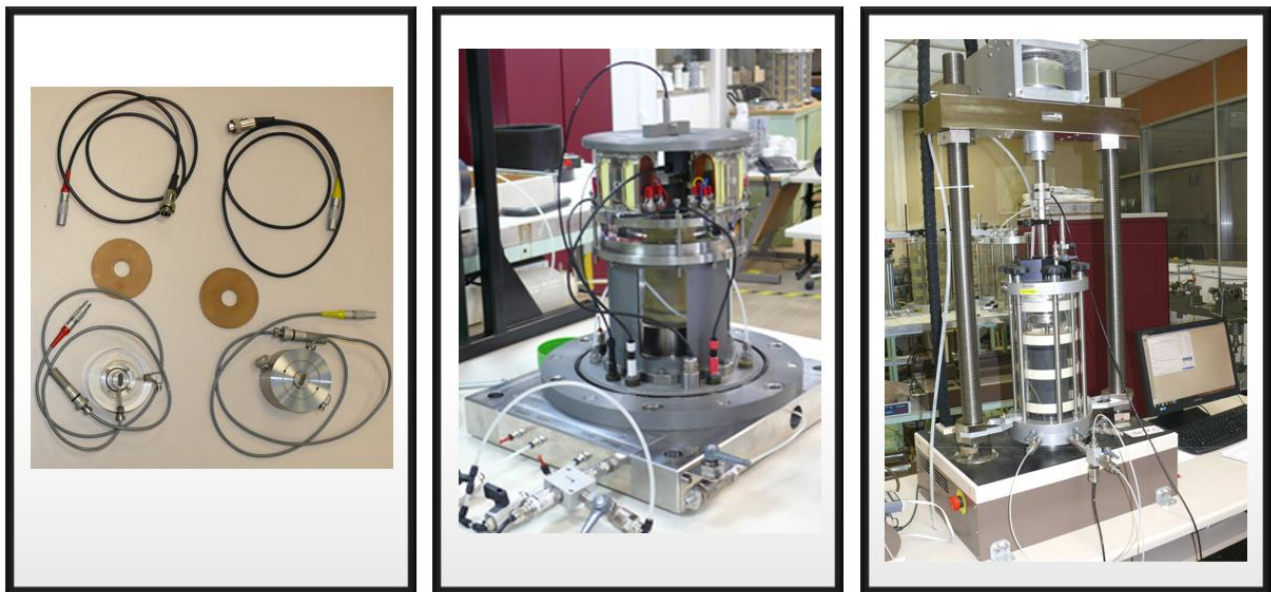


Figure 4. Matériel utilisé au Cerema pour la caractérisation dynamique et cycliques des sols traités en laboratoire : Capteurs piézoélectriques (à gauche) ; Colonne résonante (au milieu) ; Presse triaxiale cyclique asservie (à droite).

En pratique, le recueil des propriétés dynamiques des éprouvettes de limons traités se fera à l'aide de capteurs piézoélectriques (Bender Element) mesurant la célérité des ondes S et P, d'essais de résonance en torsion (colonne résonante) et d'essais triaxiaux cycliques (presse triaxiale cyclique asservie). Les moyens de mesures sont présentés en Figure 4.

En reproduisant des sollicitations cycliques et dynamiques appropriées et contrôlées, les essais de laboratoire permettent d'identifier les paramètres représentatifs du comportement linéaire et non linéaires du limon traité.

Cette caractérisation est extrêmement rare sur des sols fins traités en particulier en ce qui concerne la mise en œuvre d'essais triaxiaux cycliques et d'essais de résonance en torsion. Lors de leur réalisation, des attentions particulières seront apportées sur la mesure des modules (moyen de mesure locale de la déformation fixée sur l'éprouvette par exemple) et aux conditions de saturation, la perméabilité du matériau traité évoluant pendant sa phase de maturation.

Les normes existantes relatives à ces essais serviront de base à leur réalisation (ASTM, 2020 ; 2021).

3.4. Comportement de fatigue sous sollicitations cycliques

Le troisième enjeu de ce programme expérimental sera de préciser le comportement de fatigue du limon traité sous l'effet des sollicitations cycliques. Le comportement de fatigue sera simulé en laboratoire par des essais triaxiaux cycliques avec un nombre de cycles adapté. De plus, à la fin de chaque essai cyclique, un essai triaxial permettra d'évaluer l'évolution des paramètres de résistance du matériau après un nombre de cycles donné.

La fatigue du limon traité sera évaluée pour un nombre de cycles correspondant à 100 ans. Les fréquences de remplissage – vidange d'une écluse serviront de base pour l'évaluation des fréquences d'essai. Une optimisation de ces fréquences sera nécessaire pour reproduire en laboratoire les sollicitations *in situ* dans un temps raisonnable.

La performance des matériaux sous sollicitations cycliques peut dépendre du nombre total de cycles appliqués avant cisaillement, de la fréquence et amplitude appliquée ainsi que des conditions de drainage. La fréquence à appliquer dans l'idéal, reproduit la réalité du site. Cela conduit à prévoir des essais de très longue durée. La réalisation d'essais avec une fréquence plus élevée permet de réduire ce temps mais peut dans certaines conditions influencer sur le résultat des essais. Des sollicitations mécaniques cycliques plus rapides peuvent en effet ne pas reproduire la réalité des phénomènes qui se passent au niveau de la prise cimentaire et de la microstructure, notamment au niveau de la circulation des fluides internes à l'éprouvette.

Dans le but de fiabiliser les résultats des essais cycliques sous presse, il est prévu plusieurs séries de tests avec un nombre de cycles réduit pour évaluer l'effet de l'augmentation de la fréquence, des modifications du confinement ou du drainage sur la réponse en dynamique du matériau, et sur l'évolution du module.

4. Conclusions

La réutilisation des matériaux du site est un enjeu des chantiers de terrassement de grande ampleur, que ce soit du point de vue environnemental ou économique.

Avec plusieurs dizaines de millions de mètres cubes de terrassements, le projet Canal Seine Nord Europe qui s'étend sur plus de 100km de longueur s'inscrit dans cette démarche.

Dans ce cadre, le Maître d'Ouvrage SCSNE et le Maître d'œuvre Ecluses (groupement ONE), ont lancé un programme d'essais à l'échelle de l'ensemble du projet afin de quantifier la ressource disponible en limons de plateau, en vue de leur réutilisation en remblai technique d'ouvrage, notamment dans le cadre des écluses.

Un nombre important d'essais de mécanique des sols, réalisés selon des méthodes complémentaires, est en cours au sein des laboratoires du Cerema et de l'Université Gustave Eiffel. Ces essais permettront à terme de préciser les caractéristiques mécaniques, ainsi que les lois contrainte-déformation pour les limons traités.

Les premiers résultats des essais réalisés en laboratoire ont confirmé l'atteinte des objectifs de performances mécaniques visés (Rc, Module et résistance au cisaillement).

5. Références bibliographiques

- AFNOR (2018a). NF EN ISO 17892-8. Reconnaissance et essais géotechniques — Essais de laboratoire sur les sols — Partie 8 : essai triaxial non consolidé non drainé. 27p.
- AFNOR (2018b). NF EN ISO 17892-8. Reconnaissance et essais géotechniques — Essais de laboratoire sur les sols — Partie 9 : Essais en compression à l'appareil triaxial consolidés sur sols saturés. 39 p.
- ASTM. (2020). D3999/D3999M-11e1. Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus. In: Annual book of ASTM standards. ASTM International, 14 p.
- ASTM. (2021). D4015-21. Standard test methods for modulus and damping of soils by fixed-based resonant column devices. Annual Book of ASTM Standards. USA: ASTM International. 22 p.
- LCPC-Sétra (2000). Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique. Réf. D9924. 246 pages.
- Reiffsteck P. (2002). Nouvelles Technologies d'essai en mécanique des sols-Etat de l'art, Symp. Int. PARAM2002, Paris, Presses de l'ENPC, pp. 201-242.
- Serratrice, J.-F. (2016). Mesures des propriétés cycliques des sols limoneux ou argileux au laboratoire. Revue Française de Géotechnique, n° 148.
- Serratrice, J.-F. (2018). Apport expérimental de la méthode de compactage statique des sols au laboratoire. Revue Française de Géotechnique, n° 156.
- Sétra (2012). Construire des remblais contigus aux ouvrages d'art - Murs de soutènement et culées de pont. Note d'information Ouvrages d'art n°34. Janvier 2012