

RÉDUCTION DE LA PERMÉABILITE DES SOLS ARGILEUX APRÈS INJECTIONS DE RÉSINE EXPANSIVE DE POLYURÉTHANE

PERMEABILITY REDUCTION OF CLAYEY SOILS AFTER INJECTIONS OF EXPANDING POLYURETHANE RESIN

Nicolas FAURE¹, Virgile ORSETTI²

¹ URETEK France, Serris, France

² ESIRIS Ingénierie, Saint-Pierre-du-Perray, France

RÉSUMÉ – Afin de préciser les effets des injections de résine expansive de polyuréthane sur la perméabilité des sols argileux, un chantier expérimental a été réalisé. Au sein des terrains d'assise d'une structure provisoire en béton chargée à 0,1 MPa, des essais in situ et en laboratoire ont été effectués avant et après injections de résine expansive de polyuréthane.

ABSTRACT – In order to clarify the effects of expansive polyurethane resin injections on clayey soils permeability, an experimental site was performed. Within the soils under foundations of a temporary concrete structure loaded to 0,1 MPa, in situ tests as well as laboratory tests were carried out before and after injections of expansive polyurethane resin.

1. Introduction

Depuis quelques années, nous voyons apparaître, sur le marché des reprises en sous-œuvre, de nouveaux procédés proposant une alternative plus ou moins intéressante par rapport aux solutions traditionnelles. Certaines de ces solutions, comme les injections de résine expansive, revendiquent la capacité de limiter les risques de mouvements de terrain en présence de sols argileux sensibles au phénomène de retrait/gonflement.

Partant du principe que la résine polyuréthane utilisée est un polymère à cellules fermées et donc imperméable à l'eau, les injections réalisées avec ce type de produit peuvent être utilisées pour réduire la conductivité hydraulique, qui va de pair avec l'état de fissuration (Buzzy et al., 2008). Par ailleurs, le risque de variations importantes et successives de volume liées aux variations de teneur en eau du sol peut être nettement atténué par l'augmentation de la densité des sols traités à l'aide d'injections de résine expansive (Pasquetto et al., 2008).

Si des études ont déjà montré que les injections de résine expansive de polyuréthane peuvent réduire de manière significative la perméabilité d'un sol argileux (Buzzi et al., 2010), il est apparu intéressant de confirmer ces résultats en suivant un protocole normalisé et contrôlé.

2. Présentation du chantier expérimental

Situé au nord de la Sologne, à 10 km au sud de Sully-sur-Loire, le site choisi se place sur la "formation de Sologne" constituée d'alternances de sables argileux plus ou moins grossiers et d'argiles plus franches. La stratification est lenticulaire à lamination oblique. La présence d'argiles sensibles au phénomène de retrait-gonflement au sein de cette formation a eu pour conséquence l'apparition de nombreux sinistres dans la région.



Photo 1. État de la structure avant les injections

La parcelle de près de 3000 m² apparaît subhorizontale. Sa situation privilégiée (près de 75 m d'alignement sur voirie) a permis la mise en œuvre aisée d'une structure provisoire de 5,0 mètres de long sur 1,0 mètre de large. Cet ouvrage était constitué d'une semelle en béton armé (2x2 cages d'armature 15/35) ancrée à -1,2 m/TN et surmontée de 20 blocs en béton de 2,2 tonnes chacun (Photo 1).

2.1. Succession lithologique et hydrogéologie

Afin de préciser l'organisation lithologique et de déterminer les caractéristiques physiques, mécaniques et hydrauliques des sols de surface présents sur le site, une série de sondages a été préalablement réalisée. Les reconnaissances géomécaniques se sont organisées comme suit:

- 10 sondages à la tarière hélicoïdale descendus entre -3,0 et -5,0 mètres,
- 2 carottages au carottier triplex descendus vers -4,0 mètres,
- 4 essais au pénétromètre lourd type B (norme NF P 94-115) descendus vers -5,0 mètres,

Des essais en laboratoire ont été associés à ces sondages pour préciser les caractéristiques physiques des sols étudiés. Enfin, des essais de perméabilité in situ (2 unités) comme en laboratoire (3 unités) ont été répartis sous les 5,0 m de long de la structure, au sein des sols à injecter (Formations n°1 et n°2).

La succession lithologique présente sous l'ouvrage est la suivante:

Tableau 1. Succession lithologique sous la structure d'expérimentation.

N° Form.	Description	Prof. min. du toit (m)	Prof. max. du toit (m)	Epaisseur min. (m)	Epaisseur max. (m)
0	TV + Argile sableuse brune	0,0	0,0	0,8	1,1
1	Sable grossier argileux ocre à gris	0,8	1,1	1,2	1,2
2	Argile vert brun	2,0	2,3	>0,9	1,0
3	Sable argileux gris	3,0	>3,2	--	--

Le niveau statique de la nappe est très fluctuant en fonction des saisons. Globalement, il reste assez proche de la surface avec des cotes oscillant entre -3,6 m/TN en période estivale (de mai à septembre) et -0,1 m/TN en période hivernale.

2.2. Caractéristiques physiques et chimiques

Au niveau des formations 1 et 2, une série d'essais en laboratoire a permis de préciser leur nature et leur état (période estivale de 2013).

Tableau 2. Caractéristiques physiques et chimiques des formations 1 et 2.

N° Formation	Description	w (%)	<80 µm (%)	V _{BS} (g/100g)	w _L	Ip	CaCO ₃ (%)
1	Sable grossier argileux beige	14,3	34,7	3,75	52,2	32,9	3,6
2	Argile vert brun	21,3	57,5	7,30	58,7	34,8	4,1

Ces résultats permettent de classer les sols de la formation n°1 en B6 et ceux de la formation n°2 en A3 en référence à la norme NF P11-300 de septembre 1992. Chacun de ces sols présente une argilosité élevée. Le taux de carbonate reste quant à lui faible.

Enfin, les teneurs en eau naturelles apparaissent faibles. Cependant il est à noter pour la parfaite compréhension du lecteur que l'ensemble de ces essais a été effectué durant la période estivale 2013. Or, cette période a enregistré un fort ensoleillement (jusqu'à 33% supérieur à la normale) pour des précipitations conformes à la saison. Ce phénomène a eu pour conséquence une augmentation de l'ETP (évapotranspiration) de l'ordre de 17%.

2.3. Caractéristiques mécaniques

Afin d'évaluer la résistance mécanique de chacune des couches intéressées par ce test, quatre essais (PD1, PD2, PD3 et PD4) au pénétromètre dynamique lourd type B (norme NF P 94-115) ont été exécutés en périmétrie de l'ouvrage. Ce type d'essai a été choisi pour sa mesure continue et sa logistique limitée. Descendus jusqu'à une profondeur de 5,0 m/TN, ils ont mis en évidence les résultats suivants:

Tableau 3: Caractéristiques pénétrométriques des formations situées sous la structure

N° Formation	Description	q _d min. (MPa)	q _d max. (MPa)	q _d moy. (MPa)
0	TV + Argile sableuse brune	2	5	3,4
1	Sable grossier argileux ocre à gris	8	14	9,3
2	Argile vert brun	1,5	6,5	3,1
3	Sable argileux gris	8	24	10,4

Ces quatre couches présentent des caractéristiques mécaniques très distinctes. Si les niveaux argileux présentent une résistance relativement faible, les niveaux sableux se caractérisent, quant à eux, par des résistances dynamiques élevées. Ceci nous permet d'avoir une succession géomécanique très contrastée.

Enfin, le caractère gonflant des sols d'assise a été évalué à l'aide d'un essai de gonflement à l'œdomètre (norme XF P 94-091) réalisé sur chacune des formations 1 et 2. Si les sables argileux de la Formation 1 présentent une pression de gonflement négligeable ($\sigma_p < 2$ kPa), les argiles de la Formation 2 apparaissent nettement plus gonflantes avec $\sigma_p = 228$ kPa pour $R_g = 2,3 \cdot 10^{-02}$.

Parallèlement, un essai œdométrique (norme XP P 94-090-1) réalisé au sein de la Formation 2, a donné les résultats suivants :

$$\begin{array}{ll} e_i = 0,708 & C_s = 0,008, \\ e_0 = 0,704 & C_c = 0,132, \\ \sigma'_{v0} = 26,3 \text{ kPa}, & c_v = 0,9 \cdot 10^{-08} \text{ m}^2/\text{s} \text{ pour } \sigma'_v \\ \sigma'_p = 82,0 \text{ kPa}, & \text{compris entre 50 et 100 kPa.} \end{array}$$

Un second essai réalisé sur les sables argileux de la Formation 1 n'a pu être exploité en raison d'un défaut d'échantillonnage. Toutefois, compte tenu des caractéristiques pénétrométriques mesurées au sein de cette couche, nous avons considéré sa déformation comme étant de moindre importance par rapport à celle de la Formation 2.

2.4. Mesures de perméabilité

La détermination de la perméabilité des sols rencontrés a consisté en des mesures in situ couplées à des mesures en laboratoire. Les deux couches de sol injectées ont ainsi été testées (Tableau 4).

Les valeurs de perméabilité attendues dans les sols concernés étaient inférieures ou égales à 10^{-6} m/s. La loi d'écoulement de Darcy pour des écoulements laminaires est théoriquement mise en défaut à ces faibles perméabilités. Pour la caractérisation de ces faibles perméabilités, il a été fait appel à de nouvelles méthodes de mesure de perméabilités mises au point dans les années 1990 en France. Ces méthodes permettent de s'assurer du rôle d'étanchéité de couches de sols fins pour les besoins de la protection des nappes phréatiques vis-à-vis du stockage des déchets.

Suite à une campagne de mesure réalisée sous le contrôle de l'ADEME (Cassan et De Marsily, 1998) différentes méthodes in situ utilisant des infiltromètres de surface (à simple ou double anneau) et des mesures en forages ainsi que des méthodes de laboratoire sur échantillons intacts ont été normalisées puis révisées (AFNOR, 1998 à 2014). Les déchets étant évidemment stockés à distance de la nappe phréatique, ces méthodes ont été élaborées afin de réaliser des mesures sur sols non saturés. Ces méthodes sont donc adaptées aux objectifs du présent chantier expérimental.

2.4.1. Essais in situ

Les méthodes de mesure in situ à l'aide d'infiltromètres de surface à charge variable de type CERAS ont été utilisées. Afin d'opérer des mesures sur sols non saturés, une phase préalable de saturation puis une investigation du sol après essai permettent de s'assurer que la mesure d'écoulement s'effectue sur une frange de sol saturée de 30 à 40 mm environ.

La loi de Darcy est appliquée à condition que la courbe expérimentale la vérifie et que l'épaisseur de cette frange saturée soit connue. La limite de détermination des perméabilités est d'environ 10^{-9} m/s pour le double anneau (NF X 30 418) et de 10^{-10} à 10^{-11} m/s pour le simple anneau fermé (NF X 30 420). En effet, l'anneau fermé permet l'application d'une charge hydraulique plus élevée adaptée à des mesures de très faibles perméabilités.

La formation N°2 moyennement perméable a donc été testée au double anneau ouvert et la formation N°3 très peu perméable au simple anneau fermé.

2.4.2. Essais en laboratoire

Des échantillons intacts ont été prélevés par sondages carottés avant analyse en laboratoire. La méthode utilisée est la mesure sous cellule triaxiale à paroi flexible à saturation et pression de confinement sous charge hydraulique constante (NF X 30 443). Cette méthode permet une large gamme de mesure de perméabilité jusqu'à des valeurs d'environ 10^{-11} m/s.

L'enjeu des essais en laboratoire étant la représentativité et le conditionnement de l'échantillon prélevé, il a été réalisé deux essais redondants sur des échantillons prélevés dans la même formation n°2 par deux carottages différents. Ces échantillons intacts de 50 mm de diamètre ont été prélevés dans deux sondages carottés différents.

Les mesures de perméabilité ont été limitées aux formations n°1 et n°2, formations privilégiées en raison de leur nature et de leurs caractéristiques.

Tableau 4. Programme d'essai réalisé avant et après injection

Type de sondages	Code essai	Profondeur d'essai	Formation testée	Type d'essai de perméabilité	Norme correspondante
Fouille	K1 avant - K11 après	1,20 m	1 – sable grossier argileux	Infiltromètre CERAS in situ	Double anneau ouvert NF X 30-418
Fouille	K2 avant - K22 après	2,10 m	2 – argile verte	Infiltromètre CERAS in situ	Simple anneau ouvert NF X 30-420
Sondage carotté avec prélèvement intact	K10 & K10bis avant - K101 après	1,00 - 1,20 m	1 – sable grossier argileux	En laboratoire	Cellule triaxiale à charge constante NF X 30 443
Sondage carotté avec prélèvement intact	K20 avant - K202 après	2,90 m	2 – argile verte	En laboratoire	Cellule triaxiale à charge constante NF X 30 443

Les photographies suivantes présentent les deux types d'infiltromètre en fin d'essai en fouille.



Photo 2[a]. Infiltromètre double anneau ouvert-formation n°1 (1,2 m de profondeur) Photo 2[b]. Infiltromètre simple anneau-formation n°2 (2,1 m de profondeur)

3. Amélioration de sol à l'aide de la technologie Uretek

3.1. Le procédé Uretek Deep Injections®

Le procédé Uretek Deep injections® est un procédé d'amélioration par injection de résine polyuréthane fortement expansive. Il consiste à injecter, au niveau des sols d'assise des fondations superficielles (ou semi-profondes), de la résine à forte pression de gonflement et présentant une bonne résistance à la compression (Figures 1[a] et 1[b]).

Lors de l'injection, les caractéristiques de la résine polyuréthane expansive (polymérisation rapide) permettent de contrôler et de limiter sa diffusion dans le sol. Dans les sols fins et en particulier dans les argiles, la diffusion s'opère par claquage mais aussi par imprégnation au niveau des fissures et autres intercalations à granulométrie plus grossières. Le claquage est principalement obtenu grâce à la pression d'expansion de la résine qui se diffuse alors suivant un réseau de fractures en expansion et dont le cœur est centré au niveau du point d'injection (Dominijanni et Manassero, 2014).

Il s'ensuit une consolidation des sols par diminution de l'indice des vides puis le relevage de la structure, qui est contrôlée en temps réel par niveau laser.

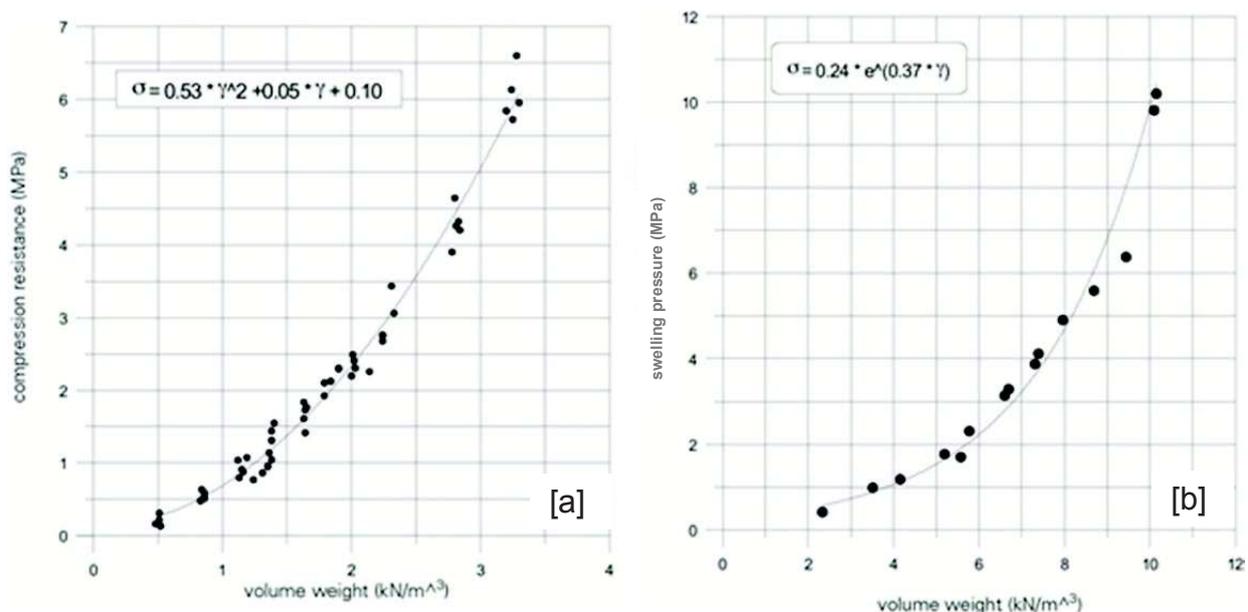
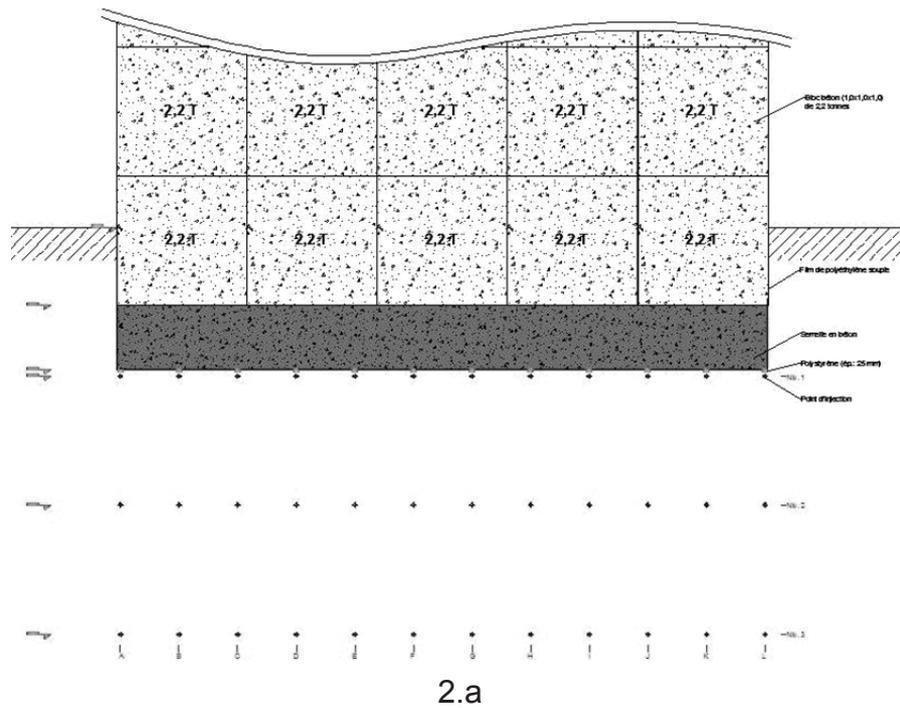


Figure 1 [a]. Évolution de la résistance à la compression, σ_c , avec le poids volumique γ_r de la résine. [b] Évolution de la pression de gonflement maximale, σ_{sw} , avec le poids volumique γ_r de la résine (Dei Svaldi et al., 2005).

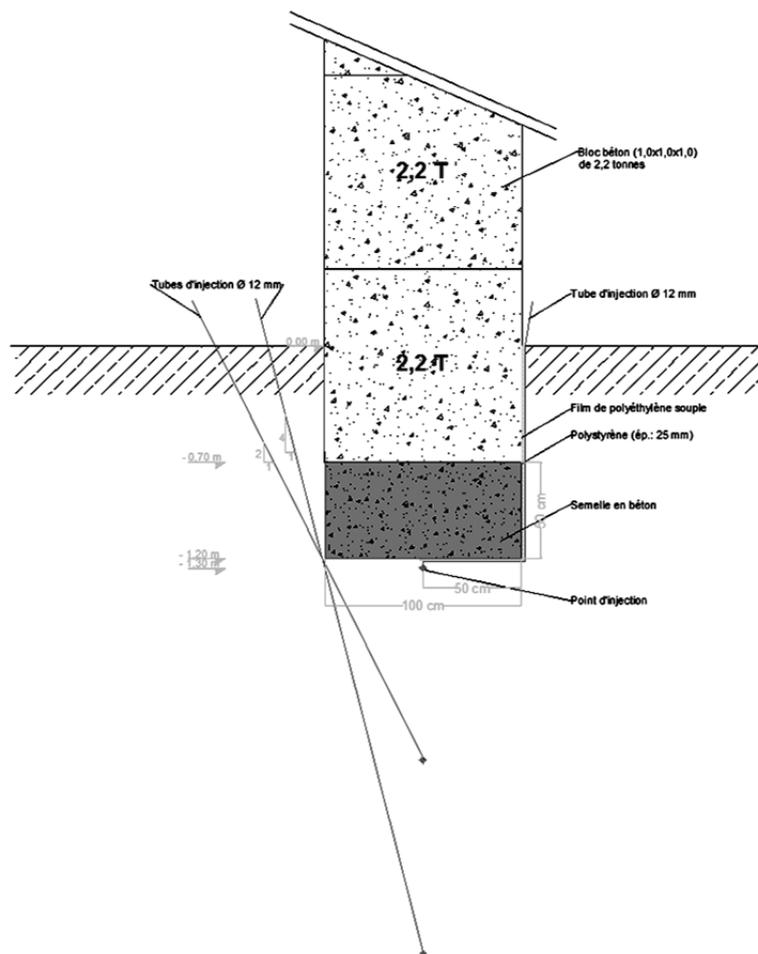
Le procédé prévoit, par ailleurs, un contrôle de l'amélioration par essais pénétrométriques (PDM 30) comparatifs réalisés avant et après les injections.

3.2. L'injection

L'objectif étant de vérifier l'effet des injections de résine expansive de polyuréthane sur la perméabilité des sols argileux présents au niveau de l'assise d'une fondation superficielle ou semi-profonde, une structure provisoire a été construite. Le niveau d'ancrage de la fondation se situant vers -1,2 m/TN, le maillage d'injection était composé de trois niveaux (-1,3 m, -2,3 m, -3,3 m) espacés de 1,0 mètre chacun. De cette manière, les injections ont intéressé toute l'épaisseur constituée par les formations n°1 et n°2, situées sous le niveau d'assise de la fondation. Chaque niveau comportait 12 points répartis sur toute la longueur de la fondation et espacés de 0,45 m l'un de l'autre (Figures 2[a] et 2[b]).



2.a



Figures 2 [a] et 2 [b]. Maillage de l'injection

Le premier niveau d'injection se place directement sous la semelle ancrée à 1,20 m de profondeur (gris foncé) par rapport au TN, avec un point tous les 45 cm. Les deuxième et troisième niveaux présentent le même entraxe et se placent respectivement à -1,0 m et -2,0 mètres sous le premier niveau.

Les injections ont été mises en œuvre près de 9 mois après la construction de la structure. Durant cette période, nous avons pu constater les mouvements au cours du temps des sols d'assise, grâce aux différents relevés altimétriques réalisés tout au long du test. En effet, le relevé réalisé à la fin novembre 2013, soit plus de 3 mois après la mise en place de l'ouvrage, fait état d'un mouvement très légèrement ascendant de la structure, confirmant le caractère gonflant des sols. Corrélé aux relevés pluviométriques de l'époque, ce mouvement ascendant correspond à un phénomène d'augmentation des précipitations et de diminution de l'ETP démarré en octobre 2013. Ce phénomène, qui voit la quantité de précipitation surpasser celle de l'ETP s'étend d'octobre 2013 à février 2014 avec des quantités de précipitation nettement supérieures à la normale en novembre et février. Par extrapolation, on peut considérer que des mouvements ascendants ont perduré bien au-delà de mars 2014 (nappe sub-affleurante jusqu'à la fin avril 2014). À la mi-mai 2014, la structure présentait un tassement global de 6 à 7 mm.



Photo 3[a]. Préparation de l'injection du premier niveau.



Photo 3[b]. Injection du second niveau sous contrôle laser permanent.

En raison des conditions de saturation du sol (nappe sub-affleurante), les injections ont été réalisées en deux phases. La première en mai 2014, la seconde en juillet 2014 (Photos 3[a] et 3[b]). Conformément au dimensionnement réalisé avant l'intervention, près de 200 kg de résine ont été injectés et répartis sur les trois niveaux d'injections.

4. Résultats

Précisons tout d'abord que l'ensemble des essais in situ et prélèvements pour essais en laboratoire a été effectué une semaine après le déchargement de la semelle et 24 h après le démontage de ladite semelle.

4.1. Amélioration des caractéristiques mécaniques

Suite au dimensionnement des injections, un coefficient d'amélioration de 1,5 était attendu. Après les injections, l'amélioration des caractéristiques mécaniques a, entre autres, été constatée à travers deux sondages réalisés au pénétromètre dynamique lourd type B (norme NF P 94-115). Ces essais ont été exécutés dans l'axe de la fondation, après le démontage de la structure.

Le facteur d'amélioration de la résistance dynamique moyenne mesurée au sein de la formation n°1 comme de la formation n°2 est globalement compris entre 1,4 et 1,6. Au niveau de la formation n°2, ce facteur d'amélioration peut ponctuellement atteindre 2.

De plus, les essais de contrôle interne réalisés au pénétromètre dynamique (PDM 30) par Uretex avant et après les injections ont fait état d'un niveau d'amélioration équivalent (coefficient d'amélioration compris entre 1,5 et 2 pour les deux formations) en concordance avec les résultats des essais au pénétromètre lourd.

Tous ces résultats confirment qu'il y a bien eu consolidation en profondeur, au niveau des formations injectées. Reste donc à vérifier si cette amélioration s'est accompagnée d'une diminution de la perméabilité des sols. Mais avant cela, nous avons cherché à déterminer qu'elle était la part de consolidation liée à la seule charge de l'ouvrage. En s'appuyant sur les résultats de l'essai œdométrique réalisé sur les sols de la Formation 2 et en supposant que l'essentiel de la déformation induite par le poids de l'ouvrage est concentré au niveau de cette formation, il apparaît qu'un tassement de 6 à 7 mm n'exprime que 10 à 12% de la consolidation finale (hors injections).

4.2. Diminution de la perméabilité

Les différences de valeurs mesurées entre essais in situ et en laboratoire sont notables. En effet, les essais in situ intéressent un plus grand volume de sol et prennent ainsi en compte les hétérogénéités naturelles alors que les échantillons intacts ne sont représentatifs que d'une faible portion du massif de sol.

Ainsi, au sein de la formation d'argile franche n°2 très peu perméable, les écarts importants entre les résultats des essais in situ et des essais de laboratoire peuvent provenir de fissures ou autres hétérogénéités lithologiques dans lesquels les échantillons intacts n'ont pas été prélevés (Figure 3).

Cette observation concorde avec les écarts de perméabilité d'un facteur d'environ 300 (1.10^{-6} à 3.10^{-9} m/s) rapportés par Benson et al. (1994) entre des essais en laboratoire sur des échantillons d'argile de 70 mm de diamètre et des essais in situ.

Ce même rapport entre essais de laboratoire et essais in situ est inférieur à 10 dans la formation n°1. La présence d'hétérogénéités locales serait donc moindre au sein de cette formation du fait de l'homogénéité de répartition des grains sableux grossiers présents dans la matrice argileuse.

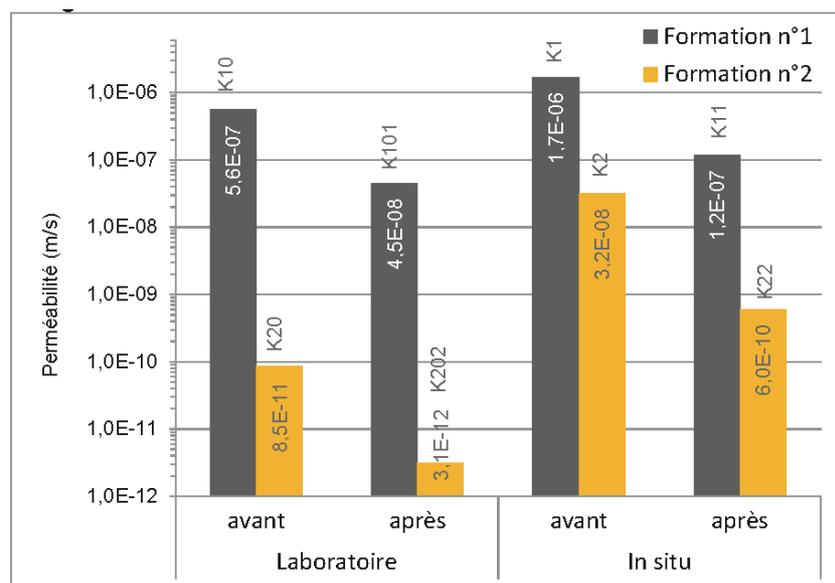


Figure 3. Perméabilités des formations n°1 et n°2 mesurées avant et après injections

D'après l'ensemble des mesures in situ, les valeurs de coefficient de perméabilité ont diminué significativement suite à l'injection. La diminution est plus importante dans la formation d'argile franche (Formation n°2).

Au sein de la formation n°1, les essais de laboratoire redondants avant injection font apparaître une dispersion d'un facteur 2. C'est un facteur relativement faible au vu des incertitudes pouvant résulter de la variabilité liée à l'échantillonnage. La moyenne des deux valeurs de perméabilité de $5,6 \cdot 10^{-7}$ m/s a ainsi été retenue sous la référence K10 sur la figure 3. Au final, les facteurs de diminution de la perméabilité déterminés par les essais en laboratoire et in situ sont voisins, avec des valeurs respectives de 12,5 et 14.

Au sein de la formation n°2, la valeur de perméabilité initiale mesurée par essai de laboratoire de $8,5 \cdot 10^{-11}$ m/s est très faible avec une valeur proche de la valeur limite de détermination de la méthode. Le facteur de diminution de 27 est donc possiblement sous-estimé. En l'état, un facteur de diminution de l'ordre de 50 mis en évidence par l'essai in situ peut être retenu pour cette formation.

D'ailleurs, ce facteur de diminution est cohérent avec les résultats proposés par Buzzi et al. (2010) où les facteurs de diminution de perméabilité mis en évidence sont compris entre 40 et 55.

5. Conclusion

Une structure provisoire en béton a été construite sur des sols argileux. Après une période de 9 mois, des injections de résine expansive ont été exécutées au niveau des sols d'assise de la fondation (sols argileux).

Les résines de polyuréthane sont utilisées depuis plus de 25 ans par différentes sociétés et son utilisation est prise en compte dans la norme d'injection NF EN 12715.

Par ailleurs, la durabilité de la résine Geoplus® utilisée par Uretek a été évaluée à plus de 50 ans. Notre retour d'expérience vient confirmer cette durabilité.

Des essais comparatifs (mesure de la résistance dynamique et de la perméabilité) avant et après injections ont été effectués. L'analyse conjointe des variations de résistances géomécaniques et de perméabilité a donc pu être analysée après démontage de la structure. Le démontage de la structure a permis d'étudier au plus près les améliorations apportées par les injections de résine.

Les résultats ont permis de confirmer la capacité du procédé Uretek Deep Injections® à améliorer les caractéristiques mécaniques des sols sablo-argileux et argileux. Cette consolidation s'accompagne systématiquement d'une diminution significative de la perméabilité des sols par un facteur pouvant atteindre 50. La détermination de facteurs de diminution de perméabilité a nécessité l'utilisation de méthodes de mesure adaptées et d'une exploitation rigoureuse. La prise en compte de la représentativité des essais et du fonctionnement hydraulique du massif de sol ont permis de mettre en évidence des différences entre les sols sablo-argileux et argileux.

La mise en place d'un protocole de contrôle sur ouvrages courants, pourra reposer sur les observations faites dans le cadre de ce chantier expérimental.

6. Références bibliographiques

- Benson C., Zhai H., Wang X. (1994). Estimating the hydraulic conductivity of compacted clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 120. pp.366-387.
- BRGM (2009). Recommandations pour la caractérisation de la perméabilité des barrières d'étanchéité des installations de stockage de déchets.
- Buzzi O., Fityus S., Sasaki, Y. (2007). Conceptual model for the remediation of expansive clay foundations using expanding polyurethane resin. *Proceedings of the 10th*

- Australia-New Zealand Conference on Geotechnical Engineering. Australian Geomechanics Society, Vol.1, pp. 436-441.
- Buzzi O., Fityus S., Sasaki, Y., Sloan S. (2008). Structure and properties of expanding polyurethane foam in the context of foundation remediation in expansive soil. *Mechanics of materials*, Vol.40, pp.1012-1021.
- Buzzi O., Fityus S., Sloan S. (2010). Use of expanding polyurethane resin to remediate expansive soil foundations. *Canadian geotechnical journal*, 47. pp. 623-634
- Cassan M., De Marsily G. (1998). Intercomparaison des méthodes de mesures des faibles perméabilités. *Avis d'expert. Rapport de synthèse ADEME Centre d'Angers.*
- Cassan M. (2005). *Les essais de perméabilités sur site dans la reconnaissance des sols.* ISBN 2-85978-396-2. Presses des Ponts et Chaussées
- Dei Svaldi A., Favaretti M., Pasquetto A., Vinco G. (2005). Analytical modelling of the soil improvement by injections of high expansion pressure resin. *Proc 6th International Conference on Ground Improvement Techniques*, pp. 577-584.
- Dominijanni A., Manassero M. (2014). *Consolidamento dei terreni con resine espandenti – Guida alla progettazione.* Mac Graw-Hill Education.
- Favaretti M., Germanino G., Pasquetto A., Vinco G. (2004). Interventi di consolidamento dei terreni di fondazione di una torre campanaria con iniezioni di resina ad alta pressione d'espansione. *Proc. XXII Convegno Nazionale di Geotecnica*, pp. 357-364.
- Pasquetto A., Gabassi M., Vinco G., Guerra C. (2008). Consolidation du sol par injection de résine polyuréthane, afin d'atténuer le gonflement et le retrait des sols argileux. *Symposium international sécheresse et constructions 2008 (SEC 2008)*, pp. 343-348.

