

Avis Technique 3/15-796

*Technique de traitement de
sol par injection de résine
expansive*

URETEK Deep Injections®

Titulaires : URETEK France
15 boulevard Robert Thiboust
77 700 Serris

Commission chargée de formuler des Avis Techniques
(arrêté du 21 mars 2012)

Groupe Spécialisé n° 3

Structures, planchers et autres composants structuraux

Vu pour enregistrement le 22 juillet 2015

Le Groupe Spécialisé n° 3 de la Commission chargée de formuler les Avis Techniques a examiné le 12 mars 2015 la technique de traitement de sol par injection de résine expansive URETEK Deep Injections® exploitée par la société URETEK. Il a été formulé, sur ce procédé, l'Avis Technique ci-après. Cet Avis est formulé pour les utilisations en France Européenne.

1. Définition succincte

1.1 Principe et destination

Le procédé URETEK Deep Injections® est une technique de traitement des sols consistant à injecter, dans le sol, en sous-œuvre des fondations ou des dallages et sans intervenir sur la structure de l'ouvrage, une résine bi-composant à fort pouvoir d'expansion contrôlée par niveau laser.

Ces injections permettent d'améliorer les propriétés géotechniques et hydrauliques des sols d'assise : amélioration de la portance des sols sous fondations et dallages, traitement des sols sensibles au retrait gonflement, remplissage et comblement des vides, réduction de la conductivité hydraulique et relevage éventuel des ouvrages affaissés.

Au sens de la norme NF EN 12715, le mode de diffusion de la résine se classe dans la catégorie des injections avec déplacement des terrains et s'opère soit par imprégnation, soit par fracturation/claquage, soit encore par une combinaison de ces deux modes de diffusion.

Le procédé de traitement par injection est constitué d'une résine polyuréthane expansive bi-composant dénommée URETEK Geoplus® appartenant à la famille des polymères réticulés thermodurcis et mise au point exclusivement pour l'application du procédé URETEK Deep Injections®.

Le mélange et la température des deux composants de la résine sont gérés depuis un camion atelier à l'aide d'un système de pompage et de chauffage calibré. La mise en œuvre du procédé d'injection est réalisée à partir du camion atelier équipé du complexe de mixage, de pompage et des composants et relié par un tube et un pistolet d'injection. La résine URETEK Geoplus® est injectée à travers une série de forages de 12 à 26 mm de diamètre et régulièrement espacés.

Chaque injection est accompagnée d'un suivi de l'ouvrage par niveau laser afin de détecter tout mouvement vertical de l'ouvrage traité et d'arrêter les injections.

1.2 Identification

Les deux composants de la résine URETEK Geoplus® sont dénommés Geoplus A et Geoplus B.

Les deux composants sont acheminés sur le site de mise en œuvre à l'aide du camion atelier dans lequel ils sont stockés dans deux cuves séparées et identifiées à l'aide d'une étiquette.

2. AVIS

L'Avis porte uniquement sur le procédé tel qu'il est décrit dans le Dossier Technique joint, dans les conditions fixées au Cahier des Prescriptions Techniques (§2.3).

2.1 Domaine d'emploi accepté

Le domaine d'emploi accepté pour ce procédé est limité à la consolidation et au traitement du sol d'assise, et au relevage d'ouvrages affaissés, sous des fondations superficielles (semelles filantes et isolées), des fondations semi-profondes (massifs), des radiers et des dallages armés ou non armés (au sens du DTU 13.3) d'ouvrages existants. Cet avis est formulé pour les utilisations en France européenne.

Lorsque la descente de charge de l'ouvrage génère une pression au niveau de la fondation supérieure aux capacités de la résine (pression de gonflement), l'utilisation du procédé pour le relevage de l'ouvrage n'est pas possible. Aucun relevage ne pourra être effectué s'il risque d'occasionner une aggravation des désordres existants du fait du tassement.

Lorsque la contrainte moyenne de confinement du sol est supérieure à la pression de gonflement maximale de la résine (10 MPa), l'utilisation du procédé URETEK Deep Injections® pour consolider et améliorer le sol n'est pas possible.

Le procédé est applicable dans tous les types de sols, en présence ou non d'une nappe (possibilité d'injection dans des sols saturés) à l'exclusion des types de sols suivants :

-sols argileux dont les minéraux sont particulièrement sujets aux retraits gonflements interfoliaires de forte amplitude (smectites, ...) : à défaut d'une analyse minéralogique, sol dont l'indice de plasticité I_p est supérieur à 40 ou la valeur de bleu VBS est supérieure à 8. L'utilisation du procédé dans ces types de sol ($I_p > 40$ ou $VBS > 8$) pourra être autorisée uniquement si les critères complémentaires (critères relatifs aux contraintes et aux amplitudes de gonflement du sol basés

sur des essais de gonflement) fixées au Cahier des Prescriptions Techniques (§2.31) sont vérifiées.

-sols compressibles sensibles aux phénomènes de consolidation secondaire : sols à teneur en matière organique supérieure à 10 % (tourbes, vases, ...).

-sols rocheux

-sols gelés

En cas de présence d'une couche drainante et d'un réseau de drainage sous dallage ou sous fondation, l'utilisation du procédé de traitement de sol par injection de résine est exclue.

L'injection de la résine est limitée à une profondeur de 8,0 m par rapport à la plate-forme de travail.

Possibilité d'emploi en zones de sismicité 1 à 4 (selon l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié) moyennant le respect des dispositions prévues au § 2.31 du Cahier des Prescriptions Techniques Particulières.

La conception, la mise en œuvre et les auto-contrôles de mise en œuvre sont réalisés exclusivement par la société URETEK.

2.2 Appréciation sur le procédé

2.2.1 Aptitude à l'emploi

La consolidation et le traitement du sol d'assise des ouvrages existants par le procédé URETEK Deep Injections® peuvent être considérés comme normalement assurés pour le domaine d'emploi accepté dans la mesure où la conception et la mise en œuvre respectent les prescriptions du Cahier des Prescriptions Techniques Particulières du présent Avis (§2.3).

Dans le domaine d'emploi accepté, le relevage des ouvrages à l'aide du procédé URETEK Deep Injections® peut être assuré sous réserve de vérifier la compatibilité des déformations engendrées avec la structure conformément aux prescriptions du Cahier des Prescriptions Techniques Particulières (§2.3).

Utilisation en zone sismique

Etant donné que l'amélioration des sols par injection de résine expansive selon le procédé URETEK Deep Injections® a pour effet de consolider les sols par densification de la masse structurée du sol injecté (augmentation de la résistance au cisaillement du sol), l'utilisation du procédé de traitement par injection ne présente pas de risque d'amplification des sollicitations sismiques.

L'utilisation en zones sismiques 1 à 4 au sens de l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié est donc possible moyennant le respect des dispositions prévues au § 2.31 du Cahier des Prescriptions Techniques.

Prévention des accidents lors de la mise en œuvre du dispositif

Les deux composants Geoplus A et Geoplus B de la résine URETEK Geoplus® disposent d'une Fiche de Données de Sécurité (FDS). L'objet de la FDS est d'informer l'utilisateur de ce produit sur les dangers liés à son utilisation et sur les mesures préventives à adopter pour les éviter, notamment par le port d'équipements de protection individuelle (EPI).

Elle peut être normalement assurée moyennant l'application des mesures de protection habituelles pour les travaux de perforation et d'injection (gants, lunettes, masques, ...) et des conseils de prudence mentionnés dans les Fiches de Données de Sécurité (FDS) des composants Geoplus A et Geoplus B.

Données environnementales et sanitaires

Il n'existe pas de FDES pour ce procédé. Il est rappelé que les FDES n'entrent pas dans le champ d'examen d'aptitude à l'emploi du procédé.

2.2.2 Durabilité - Fiabilité

Conformément au §2.3 de la NF EN 1997-1, la durabilité de la résine doit tenir compte des agents agressifs de l'eau et du terrain (acides, ...), des attaques chimiques (percolation de l'eau et de l'oxygène, ...) et des attaques biologiques (champignons et bactéries).

La résine URETEK Geoplus® a fait l'objet d'essais de dégradation chimique, d'essais de dégradation biologique, d'essais mécaniques avec immersion dans l'eau ainsi que d'essais triaxiaux dynamiques cycliques.

Les résultats de ces essais montrent le bon comportement de la résine par rapport aux champignons et bactéries (aucun développement biologique et aucune dégradation des caractéristiques mécaniques), une forte résistance de la résine aux agents chimiques (hormis aux

acides concentrés), l'absence d'influence de l'eau sur le comportement et les caractéristiques de la résine ainsi que l'absence d'influence des chargements cycliques sur les caractéristiques mécaniques de la résine.

Les essais réalisés permettent de conclure sur le bon comportement de la résine dans le sol.

2.23 Fabrication et contrôle

Les composants de base entrant dans la constitution de la résine sont fabriqués par un producteur exclusif qui dispose des certifications ISO 9001, ISO 14001, ISO 50001, ISO 17020 et ISO 17025.

La fabrication des composants est réalisée sur la base d'un cahier des charges prédéfini par URETEK et fait l'objet d'un plan d'assurance qualité dans les usines.

La fabrication nécessite un contrôle permanent sur les caractéristiques des composants et notamment la réaction du mélange.

Le matériel du camion atelier (générateur, appareillage spécifique pour le mélange des produits, système d'injection, ...) doit faire l'objet de la mise en place d'un autocontrôle systématique du titulaire.

2.24 Mise en œuvre de la technique

Effectuée exclusivement par le titulaire du procédé, la mise en œuvre du procédé URETEK Deep Injections® répondant à la description figurant dans le Dossier Technique ne présente pas de difficultés particulières dans la mesure où le personnel a suivi une formation spécifique et les moyens de mise en œuvre utilisés permettent le respect des prescriptions du Cahier des Prescriptions Techniques Particulières du présent Avis.

2.3 Cahier des Prescriptions Techniques Particulières

Ce procédé de traitement de sol par injection de résine doit être fabriqué, dimensionné, mis en œuvre et utilisé conformément au dossier technique et aux prescriptions particulières complémentaires suivantes.

Un diagnostic géotechnique et un diagnostic structure devront être réalisés afin de définir les causes des désordres et/ou les conditions d'utilisation de ce procédé.

2.31 Conditions de conception des ouvrages

- Dans le cas de sols dont l'indice de plasticité I_p est supérieur à 40 ou la valeur de bleu VBS est supérieure à 8, l'utilisation du procédé est possible uniquement si :
 - la contrainte de gonflement pouvant être exercée par le sol en place est inférieure à la contrainte des fondations, plus celle des terres au repos.
 - l'amplitude de gonflement du sol traité est suffisamment faible pour ne pas entraîner de désordres sur la structure.

La vérification de ces critères sera basée sur la réalisation d'essai de gonflement à l'œdomètre sur échantillon de sol intact, prélevé à l'appui d'un profil de teneurs en eau en période de déficit hydrique, selon la norme XP P94-091 :

$$\sigma'g < \sigma'vo + \Delta\sigma z$$

$$Rg \leq 5\%$$

Avec $\sigma'g$ la contrainte de gonflement du sol, $\sigma'vo$ la contrainte effective des terres au repos, σz la contrainte apportée par la fondation dans sa zone d'influence, Rg le rapport de gonflement.

- L'étude de sol doit être menée selon les prescriptions de la norme NF P 94 -500. L'étude de sol doit systématiquement être réalisée par un bureau géotechnique afin d'être en mesure d'effectuer la conception et le dimensionnement du procédé URETEK Deep Injections® (définition des objectifs d'amélioration à atteindre, faisabilité, maillage et profondeurs des points d'injection, estimation de l'amélioration de la capacité portante du sol,...).

L'étude de sol devra notamment renseigner : la nature et la capacité portante du sol d'assise (caractéristiques mécaniques), la teneur en matière organique du sol, le niveau des eaux et leur variation dans le temps, l'emplacement et la nature des cavités éventuelles, la caractérisation de la sensibilité du sol aux variations hydriques (perméabilité et porosité, teneur en eau, limites d'Atterberg ou valeur au bleu, analyse minéralogique éventuelle) ainsi que la configuration du mode de fondation.

Les fondations devront faire l'objet d'une reconnaissance précise afin d'identifier leur nature, leurs caractéristiques géométriques (épaisseurs, débords, ...), leur implantation et leur profondeur d'assise.

Il conviendra également de repérer l'existence, l'emplacement et l'état de toutes les structures adjacentes, par exemple bâtiments, routes, réseaux, infrastructures et leurs fondations.

- Le diagnostic de la structure de l'ouvrage devra préalablement être réalisé par un bureau d'étude structure afin d'identifier la nature et la cause des désordres observés, la description du système constructif et la nature des matériaux constructifs en tenant compte de la destination de l'ouvrage et des contraintes particulières liées à

son fonctionnement. La descente de charge sur les fondations devra également être déterminée avec précision ainsi que l'état des contraintes en place dans le sol d'assise.

Il conviendra de justifier l'aptitude de la structure à supporter ponctuellement et sans dommages une réaction verticale liée aux travaux d'injection.

Le diagnostic de l'ouvrage devra fournir les déformations admissibles par la structure (en tenant compte de la présence éventuelle de revêtements fragiles) et par les ouvrages d'infrastructure situés à proximité de la zone de traitement (murs enterrés, ...).

- Les possibilités de relevage d'un ouvrage devront être déterminées dès la phase de conception à partir d'une analyse qui tient compte de la nature et de l'état de la structure, de sa typologie, de ses capacités de résistance et de ductilité ainsi que de la nature du sol. Cette analyse devra être réalisée par le titulaire de l'Avis Technique sur la base d'une étude de sol réalisée par un bureau d'étude géotechnique et d'un diagnostic de l'ouvrage supporté réalisé par un bureau d'étude structure tels que définis ci-dessus. Le diagnostic de l'ouvrage devra fournir les déformations admissibles par la structure (en fonction de sa rigidité et de la distribution des charges).
- Les zones de traitement devront être définies en fonction de la configuration des désordres observés dans le cadre du diagnostic de l'ouvrage et des caractéristiques des sols identifiées dans l'étude géotechnique.

Les objectifs d'amélioration du sol à atteindre (capacité portante, module de déformation) devront être déterminés à partir des résultats de l'étude géotechnique et du diagnostic de l'ouvrage (descente de charge sur les fondations).

Avant toute intervention, il conviendra également de réaliser une détection préalable des réseaux enterrés (nature et emplacement) ainsi que des ouvrages en infrastructure (nature, caractéristiques géométriques,...) afin d'adapter en conséquence le positionnement des points d'injection.

- A partir des résultats de l'étude de sol, du diagnostic de l'ouvrage et donc des objectifs d'amélioration à atteindre, le maillage des points d'injection (nombre de niveau d'injection, espacement entre les points, ...) doit être prédéterminé par le titulaire de l'Avis Technique suivant les prescriptions du §5.2 du Dossier Technique.
- Dans le cas des dallages, à défaut de justifications particulières (réalisation d'essais d'injection grandeur nature et vérification de l'influence du traitement de sol par injection sur le comportement mécanique et l'intégrité du dallage), le maillage des points d'injection ne devra pas être supérieur à 1m x 1m.
- En complément de l'étude de sol, avant les travaux d'injection, des essais mécaniques de contrôle in situ devront être réalisés sur la profondeur de sol à traiter. Il conviendra de prévoir un point de sondage tous les 30 ml de fondations ou tous les 100 m² de radiers ou de dallage avec au minimum deux points de sondage. La nature de l'essai mécanique in situ réalisé (pénétrömètre statique, pénétrömètre dynamique de type A ou pressiomètre) devra être adaptée aux objectifs d'amélioration à atteindre (capacité portante, module de déformation pour le calcul des tassements, ...). Dans le cas où le tassement doit être estimé, il conviendra de réaliser des essais pressiométriques.
- Le principe de dimensionnement du procédé URETEK Deep Injections® est le dimensionnement par expérimentation.

Le dimensionnement du procédé d'injection doit être réalisé par le titulaire conformément aux prescriptions du §4.4 du Dossier Technique en tenant compte du maillage prédéfini, des caractéristiques du sol (étude géotechnique) et de la descente de charge (diagnostic de l'ouvrage) afin d'estimer le volume de résine nécessaire et de déterminer le taux d'amélioration de la capacité portante du sol. Ce pré-dimensionnement devra permettre de vérifier si les objectifs d'amélioration à atteindre sont faisables avec l'utilisation du procédé URETEK Deep Injections®.

Dans tous les cas de figure, la détermination des caractéristiques mécaniques du sol après injection du procédé URETEK Deep Injections® sera réalisée sur la base des essais décrits ci-dessous.

- La vérification du taux d'amélioration des caractéristiques mécaniques du sol après les travaux d'injection doit systématiquement faire l'objet d'un contrôle par essais mécaniques in situ sur la profondeur des sols traités. Ces essais mécaniques de contrôle doivent être réalisés dans les mêmes conditions (types et nombre d'essais identiques) que les essais réalisés avant injections.

Ces essais de contrôles devront être réalisés au droit des fondations. Dans le cas des dallages ou des radiers, les essais de contrôle devront être situés au centre du maillage d'injection.

Les essais devront être réalisés au droit des zones de sondage géotechnique avant injections afin d'être en mesure de comparer les résultats.

Seuls ces essais de contrôle permettront de valider les travaux d'injection et l'atteinte des objectifs d'amélioration du sol.

Dans le cas où les objectifs d'amélioration du sol ne sont pas atteints, il conviendra de prévoir la réalisation d'injections complémen-

taires en introduisant des points d'injection intermédiaires par rapport au maillage initial (doublement du maillage). Des essais de contrôle devront être à nouveau réalisés dans les conditions définies ci-dessus.

- Le calcul de la capacité portante du sol après injection (contraintes à l'ELU et à l'ELS, tassements) devra être réalisé à partir des résultats des essais mécaniques in situ de contrôle en fonction du type d'essai et de la nature des fondations.

Traitement des sols sensibles aux phénomènes de retrait-gonflement :

- Dans le cas des sols argileux, les travaux d'injection doivent être réalisés uniquement après retrait du sol ayant entraîné des désordres sur la structure supportée.
- Un diagnostic doit être réalisé par un bureau d'étude géotechnique afin d'identifier les travaux complémentaires associés aux travaux d'injection (ex : drainage, dessouchage, ...).
- La distance entre les points d'injection ne devra pas excéder 45 cm sur le premier niveau d'injection afin de garantir une saturation à la résine du sol sur toute la zone traitée.
- Les ouvrages traités devront faire l'objet d'une période d'observation sur au moins un cycle saisonnier.

Traitement des sols pollués :

- En cas de sols pollués, un plot d'essai préalable d'injection devra être réalisé afin de vérifier les conditions de polymérisation de la résine.

Prescriptions en zone sismique :

- Pour le calcul des actions sismiques suivant les prescriptions du §3 de la NF EN 1998-1 et son Annexe Nationale, la classe de sol devra être identifiée en considérant les caractéristiques du sol avant les travaux d'injection.

2.32 Conditions de fabrication

- La fabrication des composants de la résine doit faire l'objet d'un contrôle permanent portant notamment sur les caractéristiques des composants et la réaction du mélange. Il conviendra de prévoir systématiquement la réalisation d'un contrôle de validation, réalisé par le fabricant, de la réaction parfaite du mélange pour chaque lot du produit livré. Celui-ci doit garantir la conformité de la résine aux performances définies au §2 du Dossier Technique.
- Le matériel du camion atelier (générateur, appareillage spécifique pour le mélange des produits, système d'injection, ...) doit faire l'objet de la mise en place d'un autocontrôle systématique du titulaire. L'étalonnage des appareils de mesure doit être vérifié au moins une fois par mois. Une vérification complète du camion atelier (matériel électrique, pompes, systèmes de compression d'air, ...) doit être réalisée au moins une fois par an.

Les résultats des autocontrôles réalisés doivent être enregistrés dans des registres et des fiches d'autocontrôle prévus à cet effet.

2.33 Conditions de mise en œuvre

La mise en œuvre est effectuée exclusivement par le titulaire. Elle doit être effectuée dans les strictes conditions définies dans le dossier technique établi par le demandeur, notamment pour ce qui concerne le traçage des lignes et niveaux d'injection sur le secteur à traiter, la perforation (et le respect de leur inclinaison), la mise en place des tubes d'injection et le suivi de la phase d'injection par contrôle laser.

- Afin de garantir le positionnement correct des points d'injection, des précautions particulières doivent être adoptées lors du repérage et du traçage des points d'injection ainsi que lors de la réalisation des perforations.

Le repérage et le traçage des points d'injection devront être réalisés à partir d'un plan d'exécution, établi pour chaque chantier, indiquant le positionnement précis de l'ensemble des points d'injection vis-à-vis de l'ouvrage (identification de la zone à traiter, nombre de niveaux d'injection, localisation et espacement des points d'injection par niveau, maillage, ...). Un plan de recollement précisant l'implantation des points d'injection après exécution doit être établi.

Lors des travaux de perforations dans le cas d'injections sous fondations superficielles ou semi-profondes, une attention particulière doit être apportée sur la détermination et le maintien de l'inclinaison des percements. Selon le positionnement des points d'injection, l'inclinaison des percements doit être systématiquement déterminée en fonction de l'encastrement et de la géométrie des fondations (reconnaissance initiale des fondations) à partir d'un trait de niveau référence tracé sur les murs supportés par les fondations et de la localisation du point de percement au niveau de la plateforme de travail.

La tolérance sur le positionnement des points d'injection ne devra pas excéder +/- 10 cm.

- Avant toute intervention, il conviendra de vérifier que le repérage des réseaux (nature et emplacement) a correctement été matérialisé. Les points d'injection devront être situés à une distance minimale de 50 cm (rayon d'influence du « bulbe » d'injection avec grandes déformations du sol) par rapport aux réseaux afin d'éviter toutes dégradations suite aux déplacements de terrain générés par le procédé.

Dans le cas des réseaux sensibles (gaz, fibres optiques, ...), les points d'injection devront être situés à une distance minimale de 2 m.

Lors des travaux d'injection, les réseaux devront systématiquement faire l'objet d'un contrôle continu par caméra afin de détecter toutes déformations éventuelles. Après les travaux d'injection, des essais d'étanchéité devront être réalisés sur les réseaux.

- Dans le cas de la présence d'ouvrage en infrastructure à proximité des zones de sol à traiter (dénivellation de fondation, murs enterrés, ouvrages avoisinants, ...), les points d'injection devront être situés à une distance minimale d'environ 1m vis-à-vis de ces ouvrages afin d'éviter toutes dégradations sous l'effet de la pression de gonflement générée par le procédé.

En cas de présence de murs enterrés, un contrôle continu des déformations du mur lors des travaux d'injection devra être systématiquement mis en place afin de s'assurer du non dépassement de la déformation admissible déterminée au préalable par le bureau d'étude structure dans le cadre du diagnostic initial de l'ouvrage.

- Chaque injection doit obligatoirement être accompagnée d'un suivi de l'ouvrage par niveau laser afin de détecter tout mouvement vertical de l'ouvrage traité avec une précision de 0.5 mm. La réaction de l'ouvrage doit être mesurée en temps réel et l'ensemble de ces mesures doivent être consignées dans des fiches d'autocontrôle.

Afin de garantir une bonne consolidation du sol d'assise, chaque injection doit être systématiquement poursuivie, indépendamment du volume de résine consommé, jusqu'à détection d'un mouvement ascendant de l'ouvrage.

En cas de relevage d'ouvrages affaissés, le relevage doit être contrôlé au millimètre près avec un suivi en temps réel de l'état de dégradation de l'ouvrage sur toute la zone traitée. La séquence de relevage doit se faire par tranches de faible hauteur afin de limiter les sollicitations sur la structure de l'ouvrage.

- Dans le cas du traitement du sol d'assise d'une fondation superficielle avec présence d'un dallage, le dallage devra également faire l'objet d'un suivi par niveau laser afin de détecter tout mouvement vertical lors des injections.
- En complément des contrôles demandés dans la norme NF EN 12 715, les contrôles mentionnés aux § 6 et 7 du Dossier Technique doivent faire l'objet d'un enregistrement dans des fiches d'autocontrôle datées, numérotées et signées par le responsable du contrôle, avec identification du chantier et de la nature du contrôle réalisé, du résultat de contrôle et du traitement décidé en cas de non-conformité. Ces fiches d'autocontrôle doivent notamment comporter : les mesures du contrôle laser avant et après injection pour chaque point d'injection, la vérification de l'inclinaison avant percement de chaque point d'injection, le suivi de l'état de dégradation de l'ouvrage supporté, le suivi de la déformation des réseaux et des murs enterrés éventuels, le volume de résine consommé pour chaque injection, le résultat du contrôle visuel quotidien de la polymérisation à l'air libre de la résine (couleur, texture, vitesse de polymérisation, absence de résidus...), le résultat de la vérification de la conformité de la pression et de la température au niveau du camion atelier.
- Suite aux travaux de traitement du sol par injection de résine, il est nécessaire de respecter une période d'observation et de stabilisation d'une année avant travaux de reprise des fissures et des enduits.

Conclusions

Appréciation globale

L'utilisation de la technique de traitement de sol par injection dans le domaine d'emploi accepté est appréciée favorablement.

Validité

3 ans, jusqu'au 31 mars 2018.

Pour le Groupe Spécialisé n° 3
Le Président

3. Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé

Le Groupe Spécialisé n°3 tient à souligner que le traitement de sol par injection de résine est une technique pour laquelle il n'est pas possible de garantir l'absence d'apparition de fissures sur les ouvrages en béton ou en maçonnerie durant les travaux d'injection.

Il est souligné que le traitement de sol par injection sous un ouvrage existant quelle que soit la technique d'injection utilisée, doit faire suite à un diagnostic préalable de qualification de cet ouvrage (identification de la nature et la cause des désordres observés, description du système constructif et de la nature des matériaux constructifs, détermination de la descente de charge, ...). L'attention du Maître d'œuvre est donc attirée sur la nécessité qu'il y a à faire effectuer un diagnostic aussi précis que possible, permettant de dimensionner et de mettre en œuvre le traitement de sol de manière pertinente.

L'application du procédé de consolidation du sol sous les fondations (ou les dallages), ne confère pas une rigidité supplémentaire à la structure de l'ouvrage qui peut parfois nécessiter des travaux complémentaires.

En cas de déficiences structurelles pouvant entraîner des risques au niveau de la stabilité de l'ouvrage, un bureau d'études spécialisé doit se prononcer sur les travaux de rigidification nécessaires devant être entrepris en complément des injections.

Le Groupe attire l'attention sur les essais de vieillissement réalisés qui ne permettent pas d'appréhender le vieillissement naturel de la résine dans le sol et d'en déduire une méthodologie de prédiction de la durée de vie du procédé.

Le Groupe attire l'attention sur l'absence de retour d'expérience sur les conditions de polymérisation de la résine dans les sols particuliers (ex : sols pollués, ...).

Le Rapporteur du Groupe Spécialisé n° 3

Dossier Technique établi par le demandeur

A. Description

1. Domaine d'application

1.1 Généralités

Le procédé URETEK Deep Injections® est une technique de traitement des sols consistant à injecter, dans le sol, en sous-œuvre des fondations et sans intervenir sur la structure de l'ouvrage, une résine bi-composant à fort pouvoir d'expansion contrôlée par niveau laser. Ces injections permettent d'améliorer les propriétés géotechniques et hydrauliques des sols d'assise des fondations superficielles, semi-profondes et des dallages, en vue de stabiliser les dits ouvrages. Ce procédé a été éprouvé durant plus d'une quinzaine d'années sur des dizaines de milliers de chantiers.

L'exécution des "Travaux Géotechniques Spéciaux" en matière "d'injection" est régie par la norme NF EN 12715.

Ladite norme distingue deux principes d'injection :

- les injections sans déplacement des terrains qui correspondent à des injections dites d'imprégnation (ou perméation),
- les injections avec déplacement des terrains, avec ou sans claquage.

Le procédé URETEK Deep Injections® se distingue de toutes les autres techniques d'injection par :

- l'utilisation d'une résine (URETEK Geoplus®) à expansion forte (plus de 5 fois son volume initial en expansion libre) et rapide (démarrage d'expansion de 2 à 5 secondes),
- la forte pression de gonflement de la résine URETEK Geoplus® lors du processus d'expansion dans le sol,
- une mise en œuvre à l'aide d'un matériel très léger et très réduit permettant une exécution quasi non destructive,
- l'injection de la résine en profondeur (jusqu'à environ - 8,0 mètres par rapport à la plate-forme de travail),
- la maîtrise de l'expansion par l'intermédiaire d'un contrôle des mouvements par niveau laser,
- un mode unique de diffusion de la résine qui s'opère soit par imprégnation (macrovides et fissures), soit par fracturation/claquage, soit encore par une combinaison de ces deux modes de diffusion en y ajoutant systématiquement l'action de compactage statique tridimensionnel.

Le procédé d'injection URETEK Deep Injections® cumule donc, au sens de la norme NF EN 12715, les performances des injections sans et avec déplacement de terrain.

Le procédé URETEK Deep Injections® est protégé par un Brevet Européen :

- N° de dépôt : 97 104 622.2
- N° de publication : 0 851 064
- Bulletin n° 99/24 du 16/06/1999

Ce procédé est mis en œuvre avec la résine URETEK Geoplus®.

Un procédé qui prévoit l'utilisation de la résine URETEK Geoplus® est protégé par un Brevet Européen :

- N° de dépôt : 02 026 410.7
- N° de publication : EP 1 314 824
- Bulletin n° 2003/22 du 28/05/2003

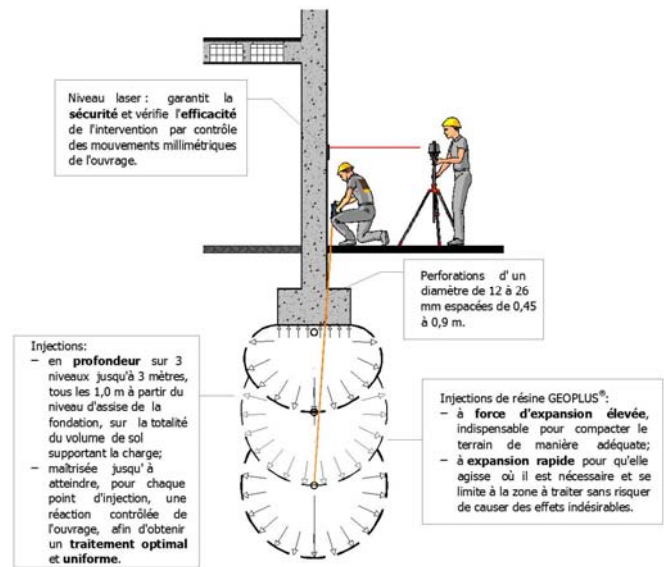


Figure 1.1. Principe d'injection (exemple sur 3 niveaux) de sols situés sous fondation, à l'aide du procédé URETEK Deep injections®.

Ce procédé s'applique aussi bien aux sols d'assise de fondations (semelles filantes, semelles ou massifs isolés, radiers...) qu'aux sols d'assise de dallages.

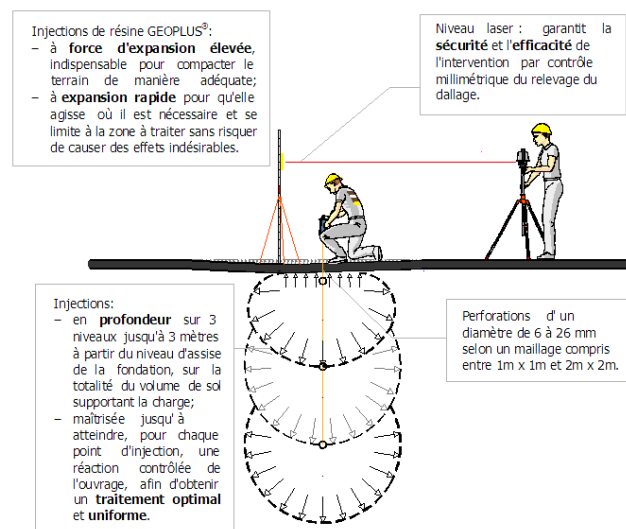


Figure 1.2. Principe d'injection (exemple sur 3 niveaux) de sols situés sous un dallage, à l'aide du procédé URETEK Deep injections®.

Pour ces types d'ouvrages, le procédé URETEK Deep injections® est alors employé pour les applications suivantes :

- amélioration de la portance des sols sous fondations et dallages,
- traitement préventif des sols compressibles,
- traitement des sols sensibles au retrait gonflement,
- remplissage des vides (par exemple : entre le sol et les fondations),
- réduction de la conductivité hydraulique,
- relevage éventuel des ouvrages affaissés.

L'expansion de la résine à la suite de son injection dans le sol peut être assimilée à l'expansion d'un volume de forme irrégulière, occupant selon une première approximation une cavité sphérique, en fonction de l'emplacement et du mode d'exécution des injections.

L'effet sur le sol environnant se caractérise par une augmentation des deux paramètres d'état de référence de tout milieu particulaire (c'est-à-dire la densité et l'état de contraintes de confinement) avec une amélioration consécutive des caractéristiques de rigidité et de résistance d'un volume significatif de sous-sol situé sous les fondations (ou les dallages) de la structure considérée. Ce type d'approche conceptuelle peut être totalement assimilable à celle adoptée pour les interventions faisant appel à des injections solides consistant à injecter sous pression un mortier très visqueux dans le sous-sol.

Pour les interventions destinées à améliorer les caractéristiques mécaniques des sols d'assise des fondations ou des dallages, la technologie URETEK Deep Injections® (Figures 1.1 et 1.2) est une méthode de consolidation non invasive, adaptée tant aux sols granulaires que cohésifs, qui s'applique également à tous types de dallages et de fondations superficielles ou semi-profondes (semelles isolées, semelles filantes, massifs semi-profonds, radriers).

La conception, la mise en œuvre et les auto-contrôles de mise en œuvre sont réalisés exclusivement par la société URETEK.

1.2 Limites d'emploi du procédé

Les caractéristiques de la résine permettent d'augmenter très nettement la capacité portante des sols et de traiter, hormis les sols à teneur en matière organique supérieure à 10 % (par exemple : tourbes, vases, ...) et les sols gelés, la totalité des sols, y compris ceux présentant une faible voire très faible perméabilité, non traitables par simple imprégnation.

1.3 Intervention en zone sismique

L'amélioration des sols par injection de résine expansive selon le procédé URETEK Deep Injections® a pour effet de consolider les sols par densification de la masse structurée du sol injecté. Ceci a entre autres pour conséquence de voir la résistance au cisaillement du sol augmenter à travers l'accroissement de sa cohésion.

Dans les zones présentant un aléa sismique, les sols qui influencent fortement la sollicitation ressentie au niveau des bâtiments sont classés en 5 catégories courantes (en référence à l'Eurocode 8), chacune d'entre elles étant définie par un coefficient de sol (S) qui traduit l'amplification de la sollicitation sismique.

La catégorie d'un sol potentiellement soumis à une action sismique est liée à la nature et à l'agencement stratigraphique de la couche considérée (épaisseur : 20 à 30 m), mais avant tout à la valeur moyenne de la vitesse des ondes de cisaillement, $v_{s,30}$, ou encore aux caractéristiques mécaniques moyennes (N_{sp} ou C_u) caractérisant ladite couche.

On constate alors qu'une amélioration de ces caractéristiques (ce qui est le cas lors d'une amélioration de sol par injections de résine URETEK Geoplus® sur les premiers mètres de profondeur) atténue l'amplification de la sollicitation sismique (S).

Etant donné qu'une amélioration des critères sismiques n'est pas revendiquée, une approche simplifiée et sécuritaire consistera à conserver (pour le calcul parasismique), au niveau des sols d'assise de l'ouvrage traité, les caractéristiques sismiques avant amélioration.

2. Produits d'injection

2.1 Caractéristiques des produits de base

La résine polyuréthane expansive bi-composant dénommée URETEK Geoplus® appartient à la famille des polymères rigides à cellules fermées. Cette résine dont la formulation reste confidentielle, présente des caractéristiques très particulières précisées au paragraphe 2.2.

Mise au point pour une application exclusive d'URETEK, elle se classe dans la catégorie des polymères réticulés thermodurcis. Elle est produite à la suite d'une réaction exothermique de polymérisation entre deux composants mélangés dans des proportions volumétriques spécifiques.



Figure 2.1. Séquences de la réaction de polymérisation

Les deux composants de la résine URETEK Geoplus® sont :

- Geoplus A,
- Geoplus B.

Ces composés sont identifiés au niveau des cuves placées dans le camion atelier.

Le mélange et la température sont gérés depuis le camion atelier par un système de pompage et de chauffage calibrés conformément aux prescriptions du fournisseur.

En cas de réaction en expansion libre (sans confinement), le volume de la résine peut atteindre jusqu'à 30 fois celui du mélange initial.

La masse volumique du mélange à l'état liquide est égale à 1070 kg/m³ et est très proche de celle de l'eau (1000 kg/m³). La résine expansée est, au contraire, caractérisée par une densité significativement plus faible, qui dépend de la pression de gonflement.

Après injection dans le sol, la résine forme un polyuréthane rigide thermodurci stable, non biodégradable et non polluant dont le poids volumique peut varier de 0,7 kN/m³ à plus de 3,5 kN/m³ (selon l'état de confinement) dans le cas d'utilisations courantes. Il est cependant probable de voir le poids volumique de la résine atteindre 5,0 à 6,0 kN/m³ dans des conditions environnementales et structurelles particulières.

2.2 Caractéristiques de la résine expansive URETEK Geoplus®

De nombreux essais en laboratoire ont été effectués sur la résine URETEK Geoplus® afin de déterminer ses principales propriétés physiques et mécaniques

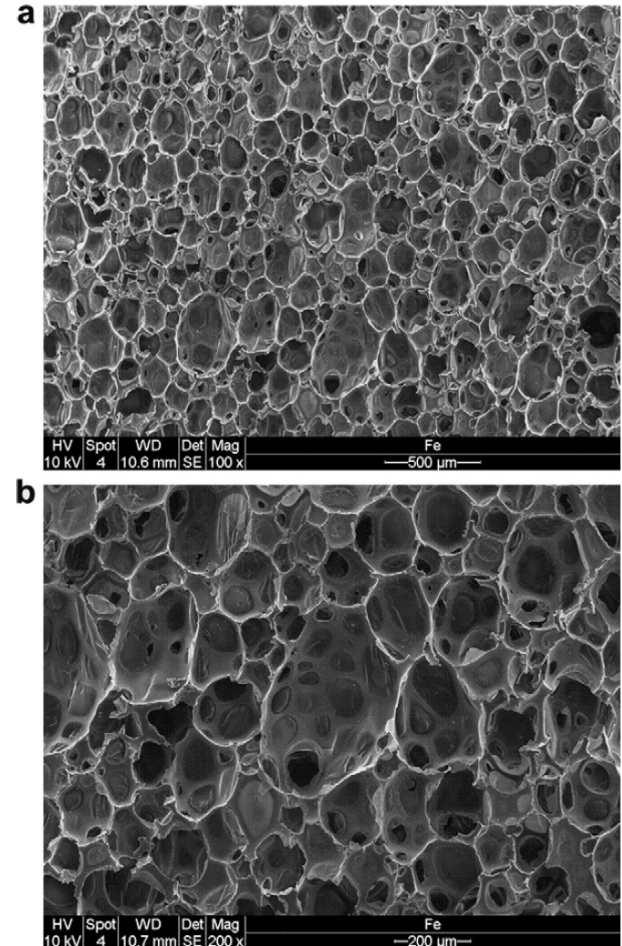


Figure 2.2. Image obtenue au microscope électronique de la résine polyuréthane URETEK Geoplus®, expansée sans confinement (masse volumique égale à 37 kg/m³). (a) Agrandissement x100 ; (b) Agrandissement x200. (Buzzi et al., 2008).

2.21 Pression de gonflement

La pression de gonflement de la résine a été étudiée en conditions œdométriques à l'aide d'un appareillage permettant l'injection du mélange à l'intérieur d'un cylindre métallique rigide muni d'un piston. Lors de l'expansion, compte tenu de la forte rigidité du contenant, le mélange pousse verticalement un piston qui, après une course de quelques centimètres, est bloqué par un élément transversal équipé d'un manomètre.

L'essai a été exécuté avec des échantillons de forme cylindrique (diamètre 80 mm, hauteur de 60 à 116 mm) de poids volumique compris entre 2,0 kN/m³ et 10,15 kN/m³.

La pression de gonflement maximale de la résine obtenue en conditions œdométriques est égale à 10,2 MPa. La relation empirique suivante a été directement déduite des résultats expérimentaux obtenus :

$$P = \exp[0,23 \cdot (\gamma_p - 0,36)] - 1 \quad [1]$$

où :

P = pression de gonflement de la résine, déterminée dans des conditions œdométriques (exprimée en MPa) ;

γ_{rf} = poids par unité de volume (poids volumique ou encore poids spécifique) de la résine expansée (exprimé en kN/m^3).

Par ailleurs, Buzzi et al. (2008) ont rencontré des conditions de gonflement libre de la résine, ou pression de gonflement nulle, pour un poids spécifique $\gamma_{rf} = 37 \text{ kN/m}^3$, $\gamma = 0,33 \text{ kN/m}^3$, où g est l'accélération de la pesanteur ($= 9,81 \text{ m/s}^2$). La relation empirique de l'équation [1] a été obtenue en minimisant l'erreur d'approximation des chiffres de Favaretti et al. (2004) et en imposant $\gamma_{rf} = 0,36 \text{ kN/m}^3$ pour $P = 0 \text{ kPa}$.

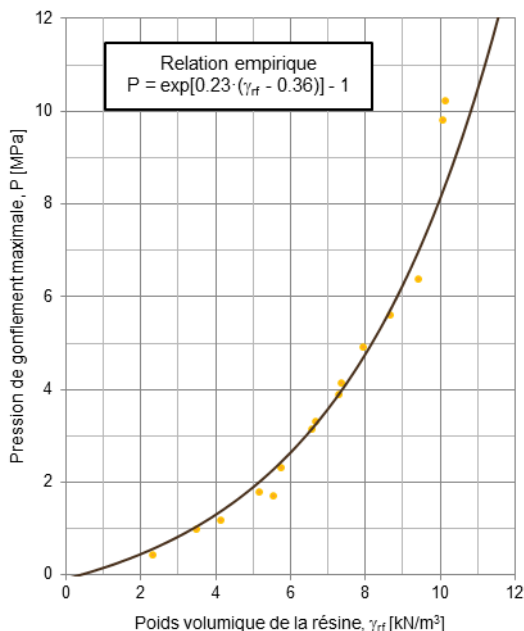


Figure 2.3. Pression de gonflement en fonction du poids volumique initial de l'échantillon.

Le degré d'expansion de la résine Geoplus® injectée dans le sol est compris entre 200 et 2000 % du volume initial. Ces valeurs constituent des seuils.

Rappelons que dans les cas courants, le poids spécifique de la résine injectée est compris entre 0,7 et 3,5 kN/m^3 .

2.22 Résistance à la compression

La résistance à la compression a été évaluée en référence à la norme UNI 6350-68.

L'expérimentation a été effectuée sur des échantillons de forme cubique de 50 mm de côté et d'un poids volumique compris entre 0,5 kN/m^3 et 3,3 kN/m^3 .

Cinq échantillons ont été testés pour chacune des valeurs de poids volumique considérées, comprises entre 0,5 kN/m^3 et 3,3 kN/m^3 . La résistance à la compression du mélange expansé est fortement corrélée au poids volumique initial. La résistance maximale a été mesurée non pas à la rupture propre et franche de l'échantillon, mais lors de sa perte d'alignement entre son axe vertical et celui du piston, rendant impossible la poursuite de l'essai.

En éliminant la force appliquée, l'échantillon a retrouvé ses dimensions géométriques et sa forme cubique initiale.

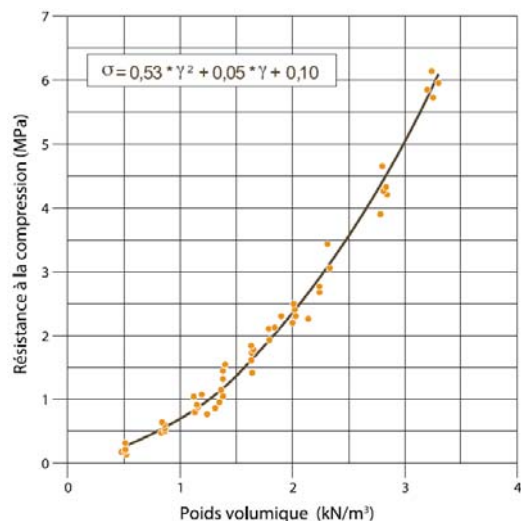


Figure 2.4. Résistance à la compression en fonction du poids volumique initial de l'échantillon (valeurs déterminées sur 55 échantillons).

Dans la plage des poids volumiques γ compris entre 0,5 kN/m^3 et 3,3 kN/m^3 , des résistances à la compression ont été mesurées entre 0,2 MPa et 6,0 MPa. Les valeurs maximales de résistance ont été obtenues avec des déformations verticales comprises entre 3,5 % et 7 %.

2.23 Résistance à la traction

La résistance à la traction a été évaluée conformément à la norme UNI 8071.

L'expérimentation a été effectuée sur des échantillons en forme d'altère dont le poids volumique s'échelonnait entre 0,7 kN/m^3 et 5,0 kN/m^3 .

La résistance à la traction du mélange expansé est là aussi fortement corrélée au poids volumique initial.

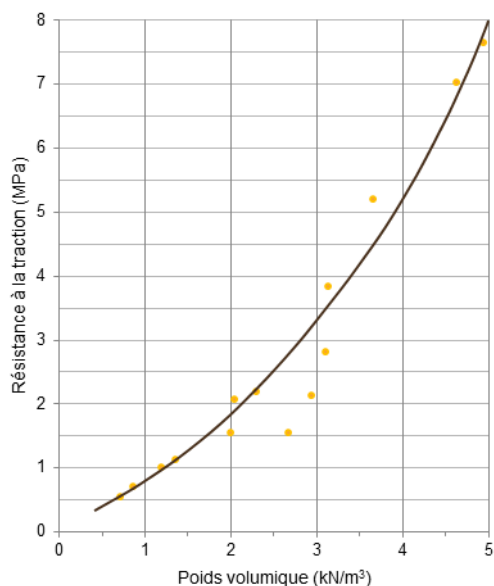


Figure 2.5. Résistance à la traction en fonction du poids volumique initial de l'échantillon.

2.24 Module d'élasticité

Le module d'élasticité de la résine expansive a été déterminé au moyen d'essais de compression verticale avec expansion latérale libre (norme UNI EN 6350-68) exécutés sur des échantillons de forme cubique de 50 mm de côté.

Cinq échantillons ont été testés pour chaque valeur de poids volumiques compris entre 0,5 kN/m^3 et 3,3 kN/m^3 .

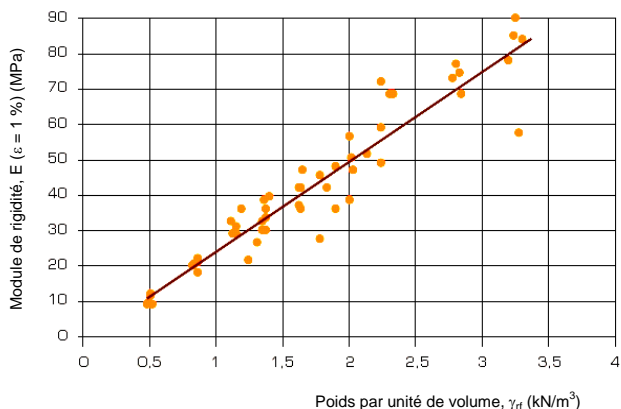


Figure 2.6. Module élastique en fonction du poids volumique initial de l'échantillon.

La valeur du module d'élasticité calculé en fonction d'une déformation verticale du 1 % varie de 10 à 90 MPa.

2.25 Autres caractéristiques mécaniques

La résine URETEK Geoplus® a fait l'objet d'évaluation d'autres propriétés mécaniques telles que :

- résistance à la flexion
- résistance à la compression triaxiale dynamique-cyclique,
- Evaluation de la déformation à 20-30 jours de la résine soumise à une charge constante – Influence de la densité.

2.26 Perméabilité

Buzzi et al. (2008) ont effectué des essais de conductivité hydraulique à la fois sur la résine URETEK Geoplus® pure et sur des échantillons constitués d'un mélange sol-résine. Pour la densité minimale (0,36 kN/m³), ou gonflement maximal, les valeurs de conductivité hydraulique mesurées étaient comprises entre 1·10⁻⁹ et 1·10⁻⁸ m/s sur la résine pure et indiquaient l'existence d'une porosité réduite interconnectée. Sur les échantillons de sol injecté, la conductivité hydraulique s'est avérée égale à environ 10⁻¹⁰ m/s.

À partir de ces résultats, il est possible de conclure que la structure de la résine est presque entièrement constituée d'alvéoles fermées et imperméables à l'eau. La conductivité hydraulique extrêmement faible, mesurée sur des échantillons de sols injectés, est due à la présence de micro-défauts aléatoires. Dans les conditions naturelles, le poids spécifique de la résine ne varie pas dans des conditions d'immersion dans l'eau, si ce n'est à la suite de processus de dégradation imposés artificiellement.

Cette résine peut donc être considérée comme étant presque imperméable et pratiquement étanche à l'eau.

2.27 Durabilité

Le concept de durabilité d'un matériau a été défini par la directive européenne concernant les matériaux de construction 89/106/EEC, Guidance Paper F approuvée en Décembre 2004 "Durability and the Construction Products Directive". La durabilité d'un produit est définie comme sa capacité à maintenir inaltérées ses propriétés au cours du temps sous l'influence d'actions prévisibles.

La durabilité d'un produit dépend de sa destination et de ses conditions d'utilisation.

En accord avec la directive européenne, l'évaluation de la durabilité du matériau polyuréthane URETEK Geoplus® a été évaluée sur la base du comportement du matériau sous l'influence des contraintes prévisibles du terrain injecté.

La résine URETEK Geoplus® est utilisée pour le traitement du sol. Il a donc fallu déterminer les contraintes auxquelles un terrain est normalement soumis et mettre en place les essais permettant d'étudier le comportement du matériau sous leurs influences.

Différentes sollicitations ont été identifiées :

- charges statiques de longue durée ;
- charges dynamiques ;
- présence possible de champignons et bactéries ;
- présence possible de composants chimiques.

Pour chacune de ces contraintes, un essai spécifique a été effectué.

Comportement à long terme sous charge constante

L'étude a été réalisée sur des échantillons de résine prélevés après 4 ans d'enfouissement.

L'essai prévoyait, sur une période de 28 jours, l'application de charges verticales constantes (avec expansion latérale libre) sur des échantil-

lons dont le poids volumique était compris entre 2,4 et 3,1 kN/m³. Cette étude comprenait 4 phases de chargement comprises entre 100 et 1100 kPa.

Les résultats sont reportés dans le diagramme suivant. Les déformations sont négligeables et toujours inférieures à 2 %.

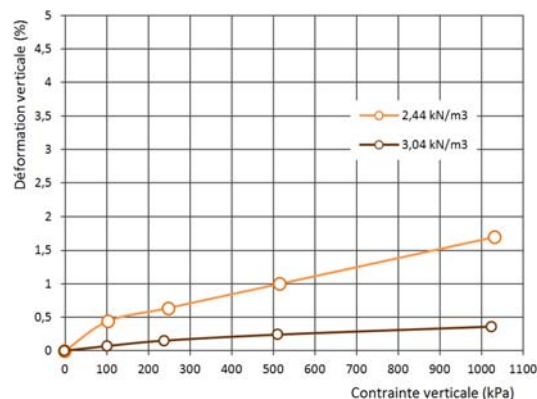


Figure 2.7. Courbes contraintes-déformations sur deux densités de résine différentes

Comportement sous charges dynamiques

Les échantillons ont été soumis à des essais triaxiaux dynamiques cycliques avec une fréquence de 2Hz et un nombre de cycle de chargement/déchargement égal à 50000. La contrainte de confinement était nulle afin de simuler l'emploi de la résine à une faible profondeur dans le sol.

Pour chaque essai, il a été déterminé le module de résistance de la résine représentant le rapport entre la variation de la contrainte verticale appliquée et la déformation verticale induite, mesurée dans la zone de déformation élastique.

Les valeurs des modules sont relatées dans le tableau ci-après :

Essai	Poids volumique (kN/m ³)	Module de résistance (MPa)
A	0,98	24
B	1,67	55
C	2,06	70

Résistance aux champignons et bactéries

La résine a été soumise à un test de résistance à l'attaque de champignons (moisissures) et de bactéries suivant la norme ASTM G21-96 et ASTM G22-76.

Les résultats mettent en évidence l'excellent comportement de la résine par rapport aux champignons et bactéries.

Résistance aux agents chimiques

La résistance du polyuréthane expansé aux différents agents chimiques a été testée.

La résistance du matériau expansé aux agents chimiques a été évaluée en fonction de la perte de volume subie, suite à une exposition prolongée. Elle est évaluée selon les catégories suivantes:

- ■ ■ ■ ■ = Résistance excellente (perte de volume < 3%)
 - ■ ■ ■ = Résistance bonne (entre 3% et 6%)
 - ■ ■ = Résistance moyenne (entre 6% et 15%)
 - ■ = Résistance faible (entre 15% et 25%)
 - = aucune résistance
- Ne pas mettre en contact avec le matériau expansé.
Forte réaction solvante ou agression chimique (matériau détruit)

- | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| ■ ■ ■ ■ ■ Acétate d'Indigotier | ■ ■ ■ ■ ■ Hexane |
| ■ ■ ■ ■ ■ Acétate de Butyle | ■ ■ ■ ■ ■ Formaldéhyde |
| ■ ■ ■ ■ ■ Acétate d'Éthyle | ■ ■ ■ ■ ■ Gas-oil (gazole) |
| ■ ■ ■ ■ ■ Acétone | ■ ■ ■ ■ ■ Éthylène glycol 100% |
| ■ ■ ■ ■ ■ Acide Acétique à 2% | ■ ■ ■ ■ ■ Hydro. d'Ammonium con. |
| ■ ■ ■ ■ ■ Acide Butyrique | ■ ■ ■ ■ ■ Hydro. d'Ammonium 10% |
| ■ ■ ■ ■ ■ Ac. Chlorhydrique con. | ■ ■ ■ ■ ■ Hydroxyde de Potassium 1% |
| ■ ■ ■ ■ ■ Ac. Chlorhydrique 25% | ■ ■ ■ ■ ■ Hydroxyde de Sodium conc. |
| ■ ■ ■ ■ ■ Ac. Chlorhydrique 10% | ■ ■ ■ ■ ■ Isopropanol |
| ■ ■ ■ ■ ■ Ac. Nitrique concentré* | ■ ■ ■ ■ ■ Méthyl-éthyl-cétone |
| ■ ■ ■ ■ ■ Ac. Nitrique à 10% | ■ ■ ■ ■ ■ huile de lin |
| ■ ■ ■ ■ ■ Ac. Sulfurique Conc.* | ■ ■ ■ ■ ■ huile de lubrification |
| ■ ■ ■ ■ ■ Ac. Sulfurique 10% | ■ ■ ■ ■ ■ huiles minérales |
| ■ ■ ■ ■ ■ Eau | ■ ■ ■ ■ ■ Orthochlorobenzène |
| ■ ■ ■ ■ ■ Eau de mer | ■ ■ ■ ■ ■ Orthodichlorobenzène |
| ■ ■ ■ ■ ■ Alcool Butylique | ■ ■ ■ ■ ■ Soude caustique concentrée |
| ■ ■ ■ ■ ■ Alcool Éthylrique | ■ ■ ■ ■ ■ Soude caustique 25% |
| ■ ■ ■ ■ ■ Alcool Méthylrique | ■ ■ ■ ■ ■ Sulfate d'Ammonium 2% |
| ■ ■ ■ ■ ■ Essence | ■ ■ ■ ■ ■ Sulfure d'hydrogène saturé |
| ■ ■ ■ ■ ■ Essence/Benzol 60/40 | ■ ■ ■ ■ ■ Sulfure d'hydrogène 80% |
| ■ ■ ■ ■ ■ Benzol | ■ ■ ■ ■ ■ Solution NaCl saturée |
| ■ ■ ■ ■ ■ Kérosène | ■ ■ ■ ■ ■ Solution NaCl 10% |
| ■ ■ ■ ■ ■ Chlorate de Potassium 5% | ■ ■ ■ ■ ■ Solvant pour vernis |
| ■ ■ ■ ■ ■ Chlorure de Benzol | ■ ■ ■ ■ ■ Styrene |
| ■ ■ ■ ■ ■ Chlorure de Méthylène | ■ ■ ■ ■ ■ Tétrachlorure de carbone |
| ■ ■ ■ ■ ■ Combustible JD 4 | ■ ■ ■ ■ ■ Toluène |
| ■ ■ ■ ■ ■ Combustible JD 5 | ■ ■ ■ ■ ■ Térébinthine |
| ■ ■ ■ ■ ■ Diisobutylène | ■ ■ ■ ■ ■ Trichloréthylène |
| ■ ■ ■ ■ ■ Diisobutyl-cétone | ■ ■ ■ ■ ■ Xylène |

*Dans seulement 2 cas (acide nitrique concentré et acide sulfurique concentré) on ne peut pas parler de résistance car le matériau s'est complètement détruit au contact de ces acides concentrés. Néanmoins, ces composants chimiques sont très actifs et peuvent détruire quasiment tous les matériaux, y compris le métal.

Tableau 1 : Résistance du polyuréthane aux agressions chimiques.

Les résultats montrent une excellente résistance de la résine aux principaux produits testés (voir tableau 1 : *Résistance du polyuréthane aux agressions chimiques*) hormis aux acides concentrés.

Enfin, le fournisseur exclusif des résines URETEK conclu dans une étude sur la durabilité des résines URETEK (Van der Wal A., 2010): "La technique Uretek est mise en œuvre depuis les années 70. De ce retour d'expérience nous pouvons établir une durée de vie d'au moins 35 ans. Le test de vieillissement accéléré n'a montré aucune perte significative des propriétés. Sur la base de ces résultats, la durée de vie des résines Uretek devrait dépasser 60 ans".

2.28 Compatibilité environnementale

La résine URETEK Geoplus® respecte les normes en vigueur en matière d'environnement des sites.

Afin de confirmer le caractère inerte de la résine bi-composante, il a été procédé à une analyse selon les modalités de l'arrêté du 15 mars 2006 codifié à l'article R. 541-65 du Code de l'environnement. Ce décret s'applique aux installations de stockage de déchets inertes régies par l'article L. 541-30-1 du code de l'environnement. Pour l'application de ces dispositions, sont regardés comme des déchets inertes les déchets mentionnés au (e) de l'article 2 de la directive 1999/31/CE du Conseil du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets.

"(e) déchets inertes : les déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. La production totale de lixiviats et la teneur des déchets en polluants ainsi que l'écotoxicité des lixiviats doivent être négligeables et, en particulier, ne doivent pas porter atteinte à la qualité des eaux de surface et/ou des eaux souterraines".

Tableau 2 : Élaboration des résultats obtenus par analyse de l'éluat du test de lixiviation.

Paramètre	Unité de mesure	Valeur	Limite définie à l'annexe 2 tableau 1 de l'arrêté du 15/03/2006
Antimoine	mgSb/kg matière sèche	< 0.001	0.06
Arsenic	mgAs/kg matière sèche	< 0.01	0.5
Baryum	mgBa/kg matière sèche	1.43	20
Cadmium	mgCd/kg matière sèche	< 0.03	0.04
Chrome total	mgCr/kg matière sèche	< 0.1	0.5
Cuivre	mgCu/kg matière sèche	< 0.1	2
Mercurure	mgHg/kg matière sèche	< 0.001	0.01
Molybdène	mgMo/kg matière sèche	< 0.1	0.5
Nickel	mgNi/kg matière sèche	< 0.2	0.4
Plomb	mgPb/kg matière sèche	< 0.3	0.5
Sélénium	mgSe/kg matière sèche	0.01	0.1
Zinc	mgZn/kg matière sèche	0.67	4
Fluorures	mgF-/kg matière sèche	0.1	10
Indice phénols	mgphénol/kg matière sèche	< 0.1	1
COD	mgC/kg matière sèche	435	500
Fraction soluble	mgC/kg matière sèche	200	4000

COD : carbone organique dissous

La conclusion des analyses réalisées par le laboratoire est la suivante : "Après lecture des tableaux 2 et 3, on remarquera que la seule valeur supérieure à la valeur limite imposée par la norme française, correspond au paramètre COT obtenu par l'analyse de la résine telle quelle (tableau 3). Néanmoins, l'aptitude à l'emploi de la résine n'en est pas compromise, puisque la valeur limite pour le COD, mesurée sur l'éluat du test de lixiviation, est respectée (tableau 2).

En conclusion, pour tous les paramètres les concentrations relevées sont inférieures aux valeurs limites indiquées par la norme française, définie par l'arrêté du 15 mars 2006".

2.281 Élaboration des données obtenues par analyse d'un échantillon de résine à haute densité, selon la norme française définie par l'arrêté du 15 mars 2006

L'échantillon d'origine, initialement sous forme de cubes compacts d'une densité égale à 240 kg/m³ a été broyé et passé au crible ; les résultats sur le solide tel quel (tableau 3) ont été obtenus par analyse du produit issu d'un criblage à 4 mm. Ce même produit a également fait l'objet d'un test de lixiviation avec un rapport liquide/solide sec de 10 l/kg, selon la norme française NF EN 12457-2 ; l'éluat du test de lixiviation, à sa propre valeur de pH, a fait l'objet des analyses présentées dans le tableau 2.

De plus, l'application de la méthode URETEK Deep Injections® n'endommage pas la végétation présente à proximité des volumes de terrain traité, comme démontré dans l'étude suivante (§ 2.3.8.2).

Tableau 3 : Élaboration des résultats obtenus par analyse de la résine telle quelle.

Paramètre	Unité de mesure	Valeur	Limite définie à l'annexe 2, tableau 2 de l'arrêté du 15/03/2006
COT	mgC/kg matière sèche	686000	30000
BTEX	mg/kg matière sèche	< 2.2	6
HAP (*)	mg/kg matière sèche	< 0.03	50
PCB (**)	mg/kg matière sèche	< 0.01	1
Hydrocarbures (C10 - C40)	mg/kg matière sèche	< 10	500

COT : carbone organique total

BTEX : benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques

PCB : Biphényles polychlorés

Hydrocarbures (C10 – C40) : Hydrocarbures dont la chaîne carbonée présente entre 10 et 40 atomes de carbone.

(*) Le paramètre "HAP" identifie une famille de composés pour lesquelles la norme italienne prévoit des limites pour chaque composé et une limite pour leur somme. La norme française ne prévoit pas de limite pour chacun des composés, mais une limite pour la somme. Dans la présente élaboration, ainsi que dans le rapport d'essai n° 075/2009, on a considéré les composés énumérés dans le décret législatif de la République italienne 152/2006, section IV, titre V, annexe 5, tableau 1, et on a calculé la somme des concentrations desdits composés.

(**) Le paramètre "PCB" identifie une famille de composés qui est exprimée normalement comme une somme de congénères ; la norme française prévoit que la famille à analyser contient 7 congénères. Dans la présente élaboration, ainsi que dans le rapport d'essai n° 075/2009, on a considéré 12 congénères.

2.282 Analyses réalisées en 2003 par le Laboratoire "Hygiène-Institut des Ruhrgebiets" (Institut pour l'hygiène et la médecine de l'environnement) 45879 Gelsenkirchen (Allemagne)

Afin de confirmer l'absence de nocivité des injections à l'aide de la résine URETEK Geoplus® et notamment par rapport à la croissance des plantes en milieu injecté, des analyses ont été réalisées en 2003 par le Laboratoire Hygiène-Institut des Ruhrgebiets de 45879 GELSENKIRCHEN.

Les conclusions sont les suivantes :

"En termes de toxicité pour les plantes, il peut être démontré qu'on ne commence à détecter un ralentissement du développement des plantes qu'à partir de 1000 grammes de résine pour 1 kg de sol, les plus sensibles étant les radis.

Cependant, la valeur IC-50 (Concentration de 50 %) est très largement supérieure au taux de concentration pris en compte par l'EC Guideline 67/548/EWG (Directives de la Communauté Européenne) pour évaluer la toxicité de l'eau permettant la classification en toxique ou dangereux.

Ainsi, la désignation R54 (toxique pour les plantes) n'est pas applicable (un tel taux de concentration de produit dans le sol n'est jamais pris en compte dans l'appendice VI n°5.22 de EU Guideline 67/548/EEC). En clair, sont réputés dangereux et toxiques les produits qui, à faible taux de concentration dans le sol ont des effets nocifs sur l'eau et les plantes".

Le taux de concentration dans le sol de résine URETEK suite aux injections ne dépasse pas 1,5 % (5 à 30 kg de résine par m³ de sol traité) soit 30 fois moins que l'IC 50 à partir duquel on commence à détecter un ralentissement de croissance sur les radis.

Les injections URETEK n'ont donc aucune incidence sur l'environnement.

3 Modes de diffusion et effets sur le sol

3.1 Processus de diffusion de la résine dans le sol

La propagation s'opère soit par imprégnation (perméation et compensation), soit par claquage ("hydrofracturation") soit encore par une combinaison de ces deux modes de diffusion.

3.2 Modalités de diffusion en fonction de la nature des sols

Les capacités de diffusion de la résine expansive URETEK Géoplus® dans les principaux types de sol sont les suivantes :

Roches franches : aucune diffusion.

Roches fracturées : la diffusion se fait exclusivement par l'imprégnation du mélange dans les fissures. Le processus s'interrompt lors de l'élévation du niveau de viscosité du mélange (viscosité critique) ou à saturation des vides.

Sables et Graviers : la diffusion se fait principalement par imprégnation des vides intergranulaires. On peut observer des phénomènes de claquage dès lors que les pressions d'injection et/ou de gonflement de la résine apparaissent plus élevées que la pression de claquage du sol.

Les volumes de sols sableux traités par la résine forment des masses de sols amalgamés présentant des caractéristiques mécaniques spécifiques. Les tableaux suivants présentent les résultats d'essais en laboratoire effectués sur des échantillons prélevés in situ (chantier « Maison du Peuple » à Castano Primo – Milan - Italie) et constitués de matériaux granulaires amalgamés par la résine.



Photo 1 - Conglomérat résine-graviers + sables



Photo 2 - Conglomérat résine-sables

Les résultats correspondent à un échantillon de forme cylindrique prélevé sur un bloc irrégulier d'environ 50 kg.

Essai de résistance à la Flexion (Selon la Norme UNI 6133)			
Essai	Section	Masse volumique	Résistance à la flexion
n.	mm.	Kg/dm ³	MPa
1	96 x 51	1,695	0,56
2	97 x 47	1,60	0,52

Tableau 4. Essai de résistance à la flexion du sol.

Essai de résistance à la Compression monoaxiale (Selon la Norme UNI 6132)			
Essai	Section	Masse volumique	Résistance à la compression
n.	mm.	Kg/dm ³	MPa
1	97 x 99	1,49	1,84
2	95 x 98	1,635	1,68

Tableau 5. Essai de résistance à la compression du sol.

Essai de résistance à la Traction (Selon la Norme UNI 6135)			
Essai	Diamètre	Masse volumique	Résistance à la traction
n.	Ø, mm.	Kg/dm ³	MPa
1	74	1,55	0,44
2	74	1,51	0,42

Tableau 6. Essai de résistance à la traction du sol.

Un effet de compactage peut être obtenu au moyen du traitement URETEK Deep Injections® dans les sols à grains grossiers (sables et graviers) dans lesquels une perméation initiale de la résine induit la formation d'un véritable bulbe dans le sol. L'expansion de la résine dans la phase de solidification provoque l'augmentation du volume du bulbe, ce qui se traduit par un compactage du sol environnant.

Pour ces types de traitement, il est possible de modéliser les différents phénomènes, en supposant que l'expansion de la résine est comparable à l'expansion d'une cavité cylindrique ou sphérique, et que le processus s'arrête quand un état d'équilibre entre la pression de gonflement de la résine et la pression moyenne de confinement du sol, est atteint. L'évolution du rapport entre le volume de résine finale et le volume de résine initiale peut être évaluée en fonction de la pression de gonflement de la résine et de la contrainte moyenne de confinement du sol, conformément à la représentation de la Figure 3.1.

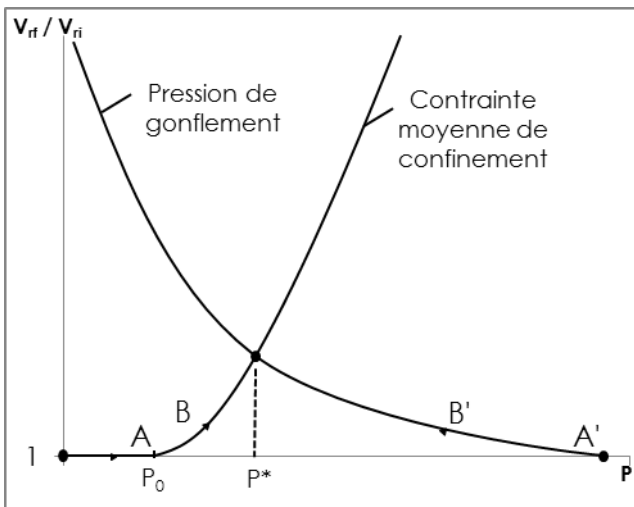


Figure 3.1. Évolutions qualitatives du taux de gonflement (V_{rt}/V_{ri}) en fonction de la pression de gonflement de la résine et de la contrainte moyenne de confinement du sol.

La technologie URETEK Deep Injections® consiste à injecter dans le sol un certain volume de résine, qui se dilate et englobe les grains solides en formant un bulbe, dont l'expansion s'accompagne d'une

réduction de la pression de gonflement et de l'augmentation de la contrainte moyenne de confinement : le processus s'arrête après avoir atteint une pression d'équilibre P^* .

En fonction de la pression d'équilibre, P^* , atteinte à la fin du processus d'expansion, il est possible d'évaluer les variations des contraintes à partir desquelles il est possible d'estimer l'augmentation de la résistance au cisaillement comme de la rigidité.

Il convient de souligner également que, contrairement aux injections avec d'autres types de résines, caractérisées par une faible capacité de gonflement, la technologie URETEK permet d'atteindre des pressions d'équilibre, P^* , ayant des valeurs considérablement plus élevées.

Limons : après une courte phase de perméation (parfois non présente), la diffusion se produit par claquage. La distance de propagation du mélange à partir du point d'injection est principalement liée à la durée du processus de polymérisation.

Argiles : la diffusion s'opère exclusivement par claquage. La pression de gonflement de la résine atteint la pression d'hydrofracturation, les ramifications sont denses et articulées.

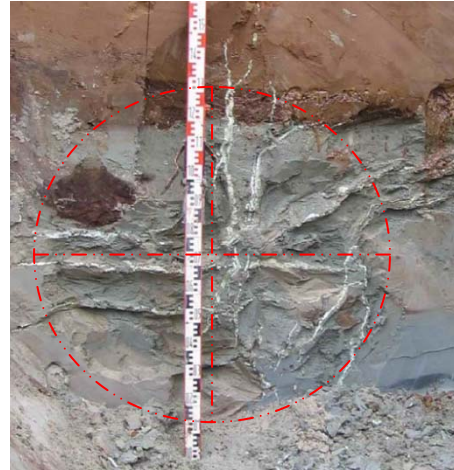


Photo 3 – Injection dans un sol cohésif – Essai réalisé par URETEK Nederland en collaboration avec l'université de technologie de Delft.

Argiles et limons fracturés : Les vides et anfractuosités présents dans la macrostructure du sol sont soit saturés par la résine, soit écrasés par la pression de gonflement lors de l'expansion du mélange.

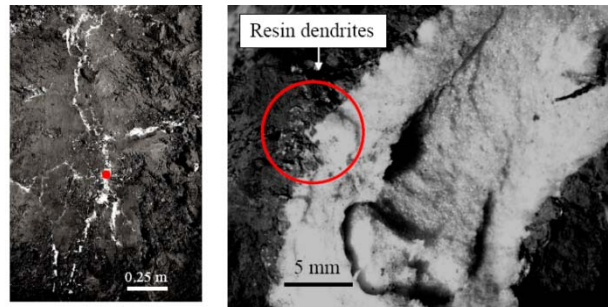


Photo 4 - Agrandissement au microscope

Par ailleurs, il a été observé un phénomène de perméation de 1 à 3 mm à l'interface résine paroi des fissures imprégnées ; la résine pouvant pénétrer à travers des fissures de seulement 0,1 mm dans les sols argileux (Buzzi et al. 2008).

Dans les sols à grains fins (sables fins limoneux, limons et argiles) saturés ou non où il ne se forme pas de bulbe, le mélange se propage à l'intérieur des fractures qui se produisent au cours de son expansion.

La propagation de la fracturation entraîne un effet de raidissement et l'augmentation de la résistance au cisaillement dans le sol, lorsque l'on en arrive à former un réseau de fractures reliées les unes aux autres.

Le schéma de la figure 3.2 présente les principales phases du processus d'injection, d'expansion et de propagation de la résine. L'injection est effectuée dans un sol normalement consolidé ($OCR = 1$, coefficient de pression des terres au repos, $K_0 < 1$), caractérisé initialement par des contraintes géostatiques horizontales, σ_{h0} , moindres que les verticales, σ_{v0} . Au début du traitement, il se forme une fracture verticale puis il se produit l'expansion de la résine à l'intérieur de cette fracture, ce qui en augmente l'ouverture. Cette expansion provoque une augmentation des contraintes horizontales avec pour conséquence une rotation des contraintes principales ($\sigma_1 = \sigma_{h0}$, $\sigma_3 = \sigma_{v0}$) dans le sol environnant.

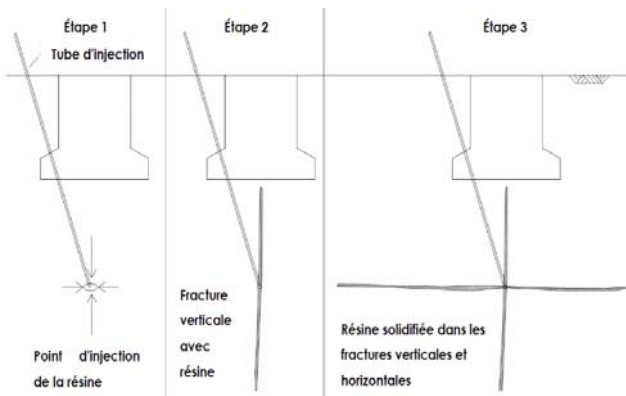


Figure 3.2. Évolution de la fracturation hydraulique lors d'une injection de résine URETEK Geoplus®.

Les mécanismes de diffusion de la résine URETEK Geoplus® ont été décrits et modélisés de manière détaillée par Dominijanni et Manassero (2014).

3.3 Effets du traitement sur le sol

Les différentes études et tests réalisés avant et après injections montrent de manière systématique :

- une densification du sol par diminution de l'indice des vides et compactage statique entraînant une amélioration significative de la capacité portante du sol,
- une amélioration de la cohésion du sol induite à la fois par densification et par effet de cimentation.
- une diminution des teneurs en eau dans les sols fins injectés,
- une diminution de la conductivité hydraulique de la masse structurée des sols fins mais aussi grossiers.

Au niveau structurel, un comblement des vides présents à l'interface sol/fondation assure une parfaite interaction sol-structure.

3.3.1 Amélioration de la capacité portante du sol

Les injections sont effectuées alors que la résine est encore en phase liquide mais déjà en phase d'expansion. En quelques secondes, son volume augmente de 10 à 15 fois et la force de gonflement développée, qui peut atteindre une valeur de 10 MPa, s'autorégule en fonction de la résistance rencontrée.

L'expansion de la résine se poursuit jusqu'à ce que le terrain traité soit densifié au point de refuser une compression supplémentaire et oblige la résine à poursuivre son expansion dans le sens de moindre résistance, ce qui provoque un soulèvement.

Les injections sont concentrées dans un bulbe de pression significatif, c'est-à-dire dans le volume de terrain qui est sollicité majoritairement par les contraintes induites par la charge sus-jacente ; de plus, la rapidité de la réaction d'expansion et de solidification permet de contrôler la diffusion de la résine.

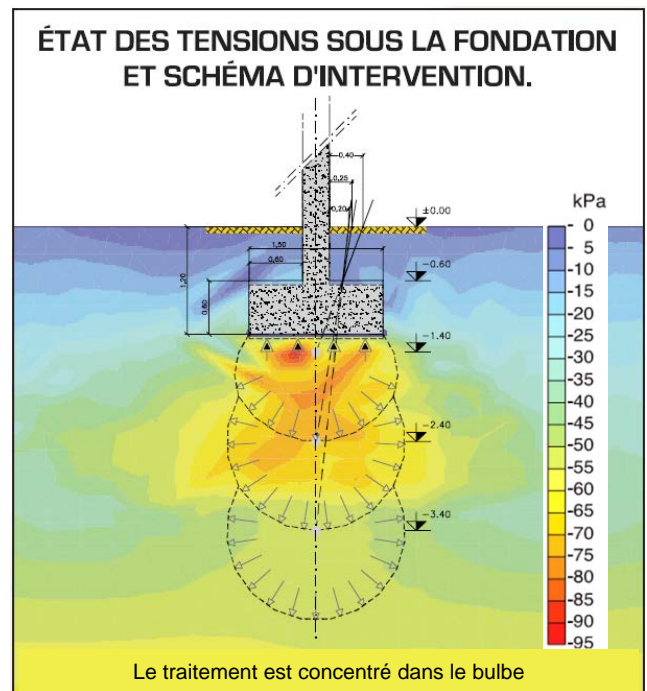


Figure 3.3. Etat de contraintes sous les fondations et schéma d'intervention

3.3.2 Réduction de la conductivité hydraulique

La résine URETEK Geoplus® a une structure presque entièrement composée de cellules fermées et imperméables à l'eau, une caractéristique qui tend à faire de cette résine un produit presque étanche et imperméable à l'eau. Les injections de résine polyuréthane expansive peuvent être utilisées pour remplacer ou refouler l'eau du sol et par conséquent réduire la conductivité hydraulique du milieu traité.

D'après les résultats expérimentaux obtenus sur des argiles fissurées (Buzzi et al., 2008), la résine URETEK Geoplus® est en mesure de pénétrer dans des fissures d'une épaisseur égale à 1/10 mm et l'interface argile-résine atteint une épaisseur comprise entre 1 et 3 mm (Photo 4). La pénétration de la résine dans les macropores de l'argile entraîne une diminution de la perméabilité de la masse structurée du sol, allant essentiellement de pair avec l'état de la fissuration (nombre, longueur et ouverture des fissures).

D'après l'analyse des résultats des essais de perméabilité (Figure 3.4) réalisés sur des échantillons de terrain sous-jacent aux injections de résine URETEK, Buzzi et al. (2010) ont observé que l'injection de résine dans un sol est susceptible de réduire la perméabilité de la masse structurée du sol selon un facteur d'environ 50. Ils ont également montré que la perméabilité d'une argile fissurée et non traitée avec de la résine est 30 à 100 fois plus élevée que la perméabilité intrinsèque de l'argile non fissurée. La perméabilité intrinsèque K (m^2) est corrélée à la conductivité hydraulique k (m/s) par la relation

$$k = K \frac{\gamma_w}{\mu_w}$$

où μ_w (Pa. s) est la viscosité dynamique de l'eau et γ_w (Pa/m) est le poids spécifique de l'eau.

Dans l'étude menée par Pasquetto et al. (2008), il a été démontré que l'augmentation de la densité des sols fissurés, induite par l'expansion de la résine dans les fissures, protège contre le risque de grandes variations de volume futures ; de plus, le refoulement des eaux souterraines grâce à la résine réduit considérablement les risques éventuels d'affaissement liés à une diminution ultérieure de la teneur naturelle en eau.

En effet, un traitement réalisé à l'aide de la résine URETEK augmente la capacité portante et entraîne une saturation des vides du sol, et par voie de conséquence, une réduction de la teneur naturelle en eau, w_n . Ces effets correspondent exactement à ceux observés après une période de forte sécheresse. Il en résulte une diminution considérable du potentiel de retrait du sol en cas de nouvelle sécheresse.

Dans le cas des interventions de consolidation des ouvrages de fondation, les injections réalisées à l'interface sol-fondation permettent de remplir les vides présents directement sous les fondations et d'imperméabiliser l'interface proprement dite.

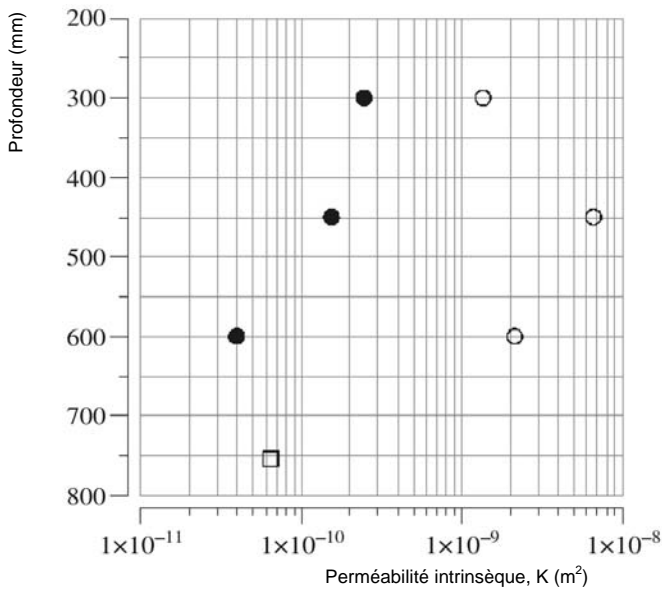


Figure 3.4. Évolution de la perméabilité intrinsèque estimée par des essais de perméabilité à l'air. Les cercles vides représentent des échantillons de sol non traité, tandis que les cercles noirs (plein) représentent des sols traités ; le carré vide représente la perméabilité intrinsèque d'un sol non fissuré. Profondeur de fissuration : 700 mm ; profondeur d'injection : 750 mm (modifié par Buzzi et al., 2010).

Le traitement à l'aide d'une résine polyuréthane à forte expansion a donc pour effet :

- une réduction significative de la conductivité hydraulique des sols injectés par un facteur d'au moins 50 et pouvant atteindre plus de 100 dans les seuls sols argileux (dans les sols grossiers, cette réduction peut être bien plus importante) ;
- une augmentation de la densité du sol et une diminution de sa teneur naturelle en eau, qui atténue les risques liés à une future sécheresse ;
- une inhibition substantielle du potentiel de dessiccation-réhydratation ainsi que du potentiel de retrait-gonflement. Dominijanni et Manassero (2014).

4. Éléments de dimensionnement

Les modalités de dimensionnement des injections de résine URETEK sont directement liées au modèle de diffusion de la résine dans le milieu et donc à la nature et aux caractéristiques du sol injecté. Les modes de calculs analytiques simplifiés décrits ci-après suivent les modèles analytiques définis par Dominijanni et Manassero (2014).

Les modèles analytiques détaillés aux §4.1 et 4.2 permettent de comprendre le modèle de diffusion et d'expansion de la résine dans le sol. Le dimensionnement du procédé est réalisé à partir de la modélisation simplifiée détaillée au §4.4.

4.1 Injections de résine URETEK Geoplus® dans des sols granulaires (condition drainée)

Le modèle d'expansion est déterminé en fonction de la technique d'injection envisagée et donc de la géométrie de la cavité en expansion. Ici, le modèle utilisé est celui de la cavité sphérique pour des injections dites en point.

Le choix de la technique d'injection utilisée reste à l'appréciation d'URETEK en fonction des contextes géotechniques, hydrogéologiques et structuraux du chantier à réaliser.

Le dimensionnement est effectué comme suit :

Étape 1

Détermination du rayon initial de la cavité a_0 par suite d'un effet de perméation initial pour le cas d'une injection avec une source sphérique [2] :

$$a_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot a_f \cdot k_r \cdot \Delta H \cdot t}{n} + a_f^3} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot a_f \cdot K \cdot p_i \cdot t}{n \cdot \mu_r} + a_f^3} \quad [2]$$

où :

k_r : coefficient de conductivité hydraulique du sol à la résine [m/s] ;

- ΔH : différence de charge engendrée par la pression d'injection p_i [m] ;
 n : porosité du sol [%] ;
 p_i : (= $\gamma_{ri} \Delta H$) pression d'injection de la résine [Pa] ;
 γ_{ri} : poids volumique de la résine à l'état liquide [N/m³] ;
 K : perméabilité intrinsèque du sol [m²] ;
 μ_r : viscosité dynamique de la résine (Vinson et Mitchell, 1972) ;
 a_f : rayon du trou d'injection [m] ;
 t : temps de réaction de la résine [s].

Étape 2

Détermination du volume initial du bulbe V_{bi} :

$$V_{bi} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a_0^3 \quad [3]$$

Étape 3

Détermination du volume initial de résine

$$V_{ri} = V_{bi} \cdot n \text{ (porosité)}$$

Étape 4

Détermination de la masse de résine à injecter

$$M_{ri} = V_{ri} / \gamma_{résine}$$

Étape 5

Détermination des contraintes verticales σ_v et horizontales σ_h à l'altitude d'injection.

Étape 6

Détermination de P_0 (comme contrainte moyenne entre celle horizontale et celle verticale. Dans le cas d'une cavité sphérique :

$$P_0 = (\sigma_v + 2 \sigma_h) / 3 \quad [4]$$

Étape 7

Détermination de la valeur de pression d'avant la plastification P_1 :

$$P_1 = \frac{m \cdot [Y + (N-1) \cdot P_0]}{m + N} + P_0 \quad [5]$$

où

P_0 : pression initiale, supposée égale à la contrainte géostatique moyenne, dans le cas d'une cavité sphérique ;

m : coefficient géométrique étant supposé égal à 2 dans le cas d'une cavité sphérique ;

Pour les définitions de N et Y , voir l'étape 8, relations [11] et [12].

Étape 8

Détermination du rayon "a" de la cavité au cours de son expansion en fonction de P (selon l'approche par analyse du sol aux grandes déformations dans la zone plastique) :

$$a = \begin{cases} a_0 & P \leq P_0 \\ a_0 + \frac{(P - P_0) \cdot a_0}{2 \cdot m \cdot G} & P_0 < P \leq P_1 \\ a_0 \cdot R_a & P > P_1 \end{cases} \quad [6]$$

G , module de cisaillement, évalué comme :

$$G = \frac{E'}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

et

$$R_a = \left(\frac{M}{(M+m)} \cdot \frac{N \cdot (M+m)}{R \cdot m \cdot (N-1) \cdot M} \right)^{\frac{M}{(M+m)}} \cdot \left((1 - \delta)^{\frac{(M+m)}{M}} - \frac{N \cdot (M+m)}{[m \cdot (N-1) \cdot M] \cdot \eta} \cdot \Lambda_1(R, \xi) \right) \quad [7]$$

dans lesquels :

$$R = \frac{(m+N) \cdot [Y + (N-1) \cdot P]}{N \cdot (1+m) \cdot [Y + (N-1) \cdot P_0]} \quad [8]$$

$$\Lambda_1(R, \xi) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n^1 \quad [9]$$

$$A_n^1 = \begin{cases} \frac{\xi^n}{n!} \cdot \ln R & \text{si } n = \frac{N \cdot (M+m)}{m \cdot (N-1) \cdot M} \\ \frac{\xi^n}{n! \cdot \left(n - \frac{N \cdot (M+m)}{m \cdot (N-1) \cdot M} \right)} \cdot \left[R^{\frac{n - \frac{N \cdot (M+m)}{m \cdot (N-1) \cdot M}}{m \cdot (N-1) \cdot M}} - 1 \right] & \text{si } n \neq \frac{N \cdot (M+m)}{m \cdot (N-1) \cdot M} \end{cases} \quad [10]$$

$$N = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad [11]$$

$$Y = \frac{2 \cdot c' \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad [12]$$

$$\delta = \frac{Y + (N-1) \cdot P_0}{2 \cdot (m+N) \cdot G} \quad [13]$$

$$\xi = \frac{\left[1 - v^2 \cdot (2-m) \right] \cdot (1+m) \cdot \delta}{(1+v) \cdot (N-1) \cdot M} \times \left[N \cdot M + m \cdot (1-2 \cdot v) + 2 \cdot v - \frac{m \cdot v \cdot (N+M)}{1-v \cdot (2-m)} \right] \quad [14]$$

$$\eta = \exp \left\{ \frac{(M+m) \cdot (1-2 \cdot v) \cdot [Y + (N-1) \cdot P_0] \cdot [1 + (2-m) \cdot v]}{E \cdot (N-1) \cdot M} \right\} \quad [15]$$

$$M = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad [16]$$

où,

- φ : angle de frottement interne du sol ;
- c' : cohésion effective du sol ;
- v : coefficient de Poisson ;
- ψ : angle de dilatance.

Étape 9

Détermination du volume du bulbe de résine final V_{bf} :

$$V_{bf} = \begin{cases} \pi \cdot a^2 \cdot H & \text{cavité cylindrique} \\ \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a^3 & \text{cavité sphérique} \end{cases} \quad [17]$$

Étape 10

Détermination du volume final de la résine V_{rf} :

$$V_{rf} = V_{ri} + \Delta V_b \quad [18]$$

$$\Delta V_b = V_{bf} - V_{bi} \quad [19]$$

Étape 11

Détermination de la pression d'équilibre en tant que point d'intersection entre la courbe d'expansion de la résine et la courbe de confinement du sol, ou égalité entre le rapport V_{rf}/V_{ri} de la courbe d'expansion de la résine et la courbe de confinement du sol pour une pression donnée (pression d'équilibre).

Loi d'expansion de la résine :

$$\frac{V_{rf}}{V_{ri}} = \frac{\gamma_{ri}}{\gamma_{rf}} = \frac{10.5}{0.36 + \frac{1}{0.23} \cdot \ln[1 + P(\text{MPa})]} \quad [20]$$

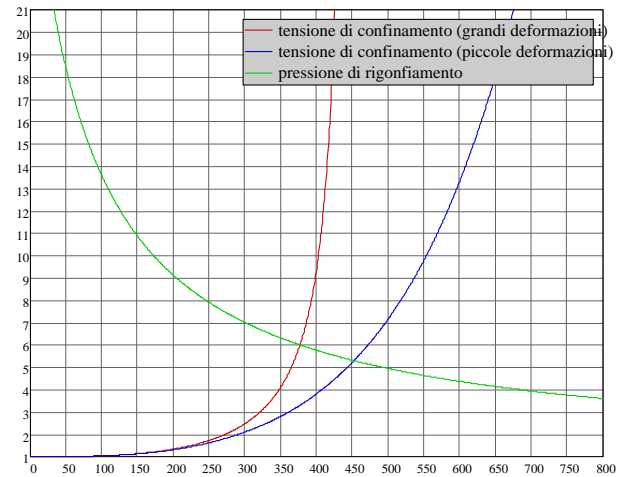


Figure 4.1. Rapport de gonflement de la résine en fonction de la pression de confinement de la résine (ligne verte) et de la contrainte de confinement d'un sol donné, dans l'hypothèse de petites déformations (ligne bleue) et de grandes déformations (ligne rouge).

Étape 12

Détermination de l'état de contraintes induit dans le sol.

L'état de contraintes dans le domaine élastique extérieur au rayon plastique (c'est-à-dire pour $r > b$, où b est le rayon plastique) peut être exprimé au moyen des relations suivantes :

$$\sigma_r = P_0 + \left\{ \frac{m \cdot [Y + (N-1) \cdot P_0]}{m+N} \cdot b^{1+m} \right\} \cdot r^{-(1+m)} \quad [21]$$

$$\sigma_\theta = P_0 - \frac{1}{m} \cdot \left\{ \frac{m \cdot [Y + (N-1) \cdot P_0]}{m+N} \cdot b^{1+m} \right\} \cdot r^{-(1+m)} \quad [22]$$

Dans la région de plastification (c'est-à-dire $r < b$) la contrainte radiale et la contrainte tangentielle peuvent être calculées avec les équations suivantes :

$$\sigma_r = -\frac{Y}{N-1} + \frac{(1+m) \cdot N \cdot [Y + (N-1) \cdot P_0]}{(N-1) \cdot (m+N)} \cdot b^{\frac{m(N-1)}{N}} \cdot r^{-\frac{m(N-1)}{N}} \quad [23]$$

$$\sigma_\theta = -\frac{Y}{N-1} + \frac{(1+m) \cdot N \cdot [Y + (N-1) \cdot P_0]}{(N-1) \cdot (m+N)} \cdot b^{\frac{m(N-1)}{N}} \cdot r^{-\frac{m(N-1)}{N}} \quad [24]$$

Dans le cas où l'on prend pour hypothèse de grandes déformations dans la zone plastique, "b" est donné par :

$$\frac{b}{a} = R \frac{N}{m(N-1)}, \quad [25]$$

où "a" est le rayon du bulbe après que l'expansion a eu lieu.

Dans le cas où l'on prend pour hypothèse de petites déformations, le rayon plastique "b" est donné par :

$$\frac{b}{a_0} = R \frac{N}{m(N-1)}, \quad [26]$$

où a_0 est le rayon initial de la cavité.

À partir de la détermination de la pression d'équilibre, P, il est possible, par conséquent, d'évaluer la modification de l'état de contraintes dans le sol. L'augmentation de la contrainte verticale, $\Delta\sigma_v$, peut être, finalement, évaluée d'après la relation élastique :

$$\Delta\sigma_v = \nu(\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta). \quad [27]$$

Étape 13

Évaluation de la déformation volumétrique, ε_v , qui est égale à :

$$\varepsilon_v = \varepsilon_r + m \cdot \varepsilon_\theta \quad [28]$$

où

ε_r , déformation radiale, donnée par :

$$\varepsilon_r = \left[\delta + \frac{N \cdot M \cdot \xi}{m \cdot (N+M) + N \cdot M \cdot (1-m)} - \frac{M \cdot \ln(\eta)}{M+m} \right] \cdot m \cdot M \cdot \left(\frac{b}{a_0} \right)^{1+\frac{m}{M}} - \frac{M \cdot \ln(\eta)}{M+m} + \frac{N \cdot M \cdot \xi}{m \cdot (N+M) + N \cdot M \cdot (1-m)} \cdot \left[1 - \frac{m \cdot (N-1)}{N} \right] \cdot \left(\frac{b}{a_0} \right)^{\frac{m(N-1)}{N}} \quad [29]$$

ε_θ , déformation tangentielle, donnée par :

$$\varepsilon_\theta = - \left[\delta + \frac{N \cdot M \cdot \xi}{m \cdot (N+M) + N \cdot M \cdot (1-m)} - \frac{M \cdot \ln(\eta)}{M+m} \right] \cdot \left(\frac{b}{a_0} \right)^{1+\frac{m}{M}} - \frac{M \cdot \ln(\eta)}{M+m} + \frac{N \cdot M \cdot \xi}{m \cdot (N+M) + N \cdot M \cdot (1-m)} \cdot \left(\frac{b}{a_0} \right)^{\frac{m(N-1)}{N}} \quad [30]$$

Étape 14

À partir de ce résultat, il est possible de déterminer l'augmentation de la densité relative, D_r , déterminée par l'expansion du bulbe.

La densité relative est fonction de l'indice des vides en fonction de la relation suivante :

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad [31]$$

$$\Delta D_r = \frac{\varepsilon_v \cdot (1 + e_0)}{e_{\max} - e_{\min}} \quad [32]$$

Étape 15

On détermine ensuite la valeur $(N_1)_{60}$ à l'aide de l'expression suivante proposée par Skempton (1986) :

$$D_r = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{60}} \quad [33]$$

On procède à la normalisation de la valeur de N_{SPT} :

$$N_{SPT} = E_r \cdot (N_1)_{60} / C_n$$

$$C_n = (98/\sigma'_{v0})^{0.5} \text{ avec } 0,4 < C_n < 1,7$$

E_r : taux d'énergie spécifique pour le système de masse utilisé.

Ces résultats SPT peuvent être corrélés à ceux du pénétromètre dynamique à l'aide des corrélations définies par Waschkowski (décrits par Cassan, 1988).

De même, les résultats SPT peuvent être corrélés à ceux du pressiomètre à l'aide des corrélations définies par GONIN et al (1992).

Le calcul inverse qui consiste à déterminer la quantité de résine à injecter dans le sol en fonction des objectifs à atteindre est réalisé numériquement à l'aide du logiciel de dimensionnement interne d'URETEK (SIMS).

4.2 Injections de résine URETEK Geoplus® dans des sols fins (condition non-drainée)

Le modèle de calcul est déterminé en fonction du degré de consolidation des sols :

- sol normalement consolidé à sous-consolidé,
- sol sur-consolidé.

La création de bulbe n'étant pas envisageable dans ce cas, la technique d'injection envisagée (en fonction des contextes géotechniques, hydrogéologiques et structuraux du chantier à réaliser) n'a aucune influence sur le dimensionnement.

Les sols d'assise des fondations dans lesquels, en règle générale, il est nécessaire de procéder à une amélioration sont des sols sous-consolidés à normalement consolidés et caractérisés par un coefficient de pression des terres au repos ($K_0 = \sigma_{h0}/\sigma_{v0}$) inférieur à 1. Dans ces conditions, l'injection de la résine URETEK Geoplus® provoque la diffusion de fractures sub-verticales, c'est-à-dire perpendiculaires à la direction des contraintes mineures du sol (contraintes horizontales). L'expansion de la résine provoque une augmentation des contraintes horizontales, jusqu'à provoquer une rotation des contraintes principales. Cet état de contraintes atteint, la poursuite du processus d'injection provoque la formation de fractures dans le plan horizontal.

Par conséquent, le schéma d'exécution du traitement prévoit généralement les étapes suivantes :

1. Première étape de diffusion de la résine polyuréthane dans le sol en-dessous de la fondation. Ces injections aboutissent généralement à la fracturation du sol dans la direction verticale ; l'ouverture de ces fractures est à l'origine d'une inversion des contraintes principales aux alentours de la zone traitée.
2. Deuxième étape de diffusion de la résine polyuréthane avec formation de fractures horizontales, dont l'ouverture aboutit à un soulèvement significatif des sols et ouvrages sus-jacents.

Étape 1

Détermination du volume initial de résine V_{ri} pour la première étape de diffusion.

Étape 2

Détermination de la masse de résine à injecter $M_{ri} = V_{ri}/\gamma_{résine}$.

Étape 3

Détermination, au niveau du point d'injection, des contraintes verticales σ_v et horizontales σ_h .

Étape 4

Détermination de la demi-longueur L de la fracturation sub-verticale à l'aide de la relation suivante :

$$L = \frac{\pi \cdot K_{IC}^2}{4 \cdot p^2} \quad [34]$$

où K_{IC} représente la résistance à la fracture, dont la valeur est fonction de la résistance mécanique du matériau. Pour des sols fins, la résistance à la fracture est toujours prise égale à :

$$K_{IC} = 0.08 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m} \quad [35]$$

où,

m : coefficient géométrique étant supposé égal à 2 dans le cas d'une cavité sphérique – pour la diffusion d'une fissure on prendra m = 1 ;

Cette estimation de K_{IC} vaut quels que soient la teneur en eau et le poids volumique du sol considéré (Fang, 1994).

Étape 5

À partir du point d'intersection des courbes des relations [36] et [20], calculer la pression d'équilibre, P^* entre la pression de gonflement de la résine et la contrainte de confinement du sol.

$$\frac{V_{rf}}{V_{ri}} = \begin{cases} 1 & \text{si } P \leq \sigma_{3i} \\ 1 + \frac{\pi}{V_{ri}} \left[\frac{16 \cdot (1-\nu^2) \cdot L^3}{3 \cdot E} (P - \sigma_{3i}) \right] & \text{si } P > \sigma_{3i} \end{cases} \quad [36]$$

Étape 6

Calculer la pression critique, P_c au moyen de la relation [34].

$$P = \frac{K_{IC}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{L}} + \sigma_h \quad [37]$$

Étape 7

Inversion des contraintes principales au point d'équilibre
 $P^* = P_c + \sigma_h$

Si $P^* \neq P_c + \sigma_h$, il est nécessaire de redéfinir la pression d'équilibre en réévaluant la demi-longueur de la fissure.

Étape 8

Détermination du volume initial de résine V_{ri} et M_{ri} pour la seconde étape de diffusion.

Cette étape de diffusion conduit à la formation d'une fissuration horizontale dont l'expansion se traduit par le soulèvement du niveau de la surface du sol et des éventuels éléments structuraux qui se placent au-dessus du point d'injection.

Étape 9

Tout comme lors de l'étape de diffusion précédente, la pression d'équilibre, P^* (point d'équilibre entre la pression de gonflement de la résine et la contrainte de confinement verticale) peut être déterminé à l'aide des relations [20] et [36].

Étape 10

Calculer la pression critique, P_c au moyen de la relation [34].

$$P = \frac{K_{IC}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{L}} + \sigma_v \quad [38]$$

Étape 11

Si $P^* \neq P_c + \sigma_v$ il est nécessaire de redéfinir la pression d'équilibre en réévaluant la demi-longueur de la fissure.

Si $P^* = P_c + \sigma_v$, alors il est possible de réaliser une première estimation du soulèvement à l'aide de la relation établie par Sneddon et Lowengrub (1969) :

$$w(x) = \frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot P \cdot \sqrt{L^2 - x^2}}{\pi \cdot E} \quad [39]$$

NB: Cette relation ne tient pas compte de la compression de la couche de sol situé au-dessus du point d'injection.

Puisque la dissipation des surpressions interstitielles, au fil du temps, produit une modification de l'état de contraintes, il convient de tenir compte, dans ces cas, de la nécessité éventuelle de procéder à des injections répétées pour atteindre les objectifs fixés.

4.3 Modélisations numériques

Si les modèles analytiques permettent de mieux comprendre les différents processus de diffusion de la résine URETEK Geoplus® dans le sol et ce, quelles que soient ses caractéristiques, l'étude de la dissipation des pressions interstitielles ainsi que de la durée du processus de consolidation doit se fonder sur des modèles numériques.

En effet, ce n'est que par une analyse numérique aux éléments finis qu'il est possible d'évaluer avec précision le processus de consolidation et les déplacements qu'il produit (Dominijanni et Manassero, 2014).

Cependant, la réalisation d'une modélisation numérique aux éléments finis est difficilement justifiable sur de petits projets d'injections.

4.4 Modélisation simplifiée et dimensionnement

Afin de réaliser le dimensionnement de ses injections aussi bien dans les sols frottants que cohésifs, URETEK a développé, en collaboration avec l'Université de Padoue, un logiciel de calcul (SIMS).

Dans un souci de simplification, le modèle choisi s'appuie sur la théorie de la cavité en expansion pour laquelle on considère qu'une partie du volume de résine expansée injectée (V_{ri}), en plus d'occuper la cavité en expansion de rayon "a", pénètre dans la zone plastique selon un pourcentage volumétrique de 30 % (résine/sol = 0,3). Ce taux de pénétration de la résine dans la zone plastique varie en fonction des caractéristiques du sol injecté (Dei Svaldi A., Favaretti M., Pasquetto A., Vinco G., 2005).

L'utilisation de ce modèle de calcul analytique adapté pour l'injection de résine URETEK Geoplus® en condition drainée comme non-drainée s'est avérée extrêmement satisfaisante.

En effet, si ce modèle ne semble pas tout à fait représentatif de ce qui se passe stricto sensu dans les sols fins (formation de fissures et non d'un bulbe) lors d'une injection de résine expansive, il apparait vérita-

blement réaliste du point de vue dimensionnel, tout comme pour les sols granulaires.

Parallèlement, l'expérience montre que dans la grande majorité des cas, la saturation en résine Geoplus® du sol est effective pour :

Les fondations superficielles ou semi-profondes :

- 10 à 30 kg/m³ dans les sols à grains grossiers,
- 6 à 20 kg/m³ dans les sols fins,

Les radiers

- 6 à 10 kg/m³ dans tous les sols,

Les dallages

- 4 à 6 kg/m³ dans tous les sols.

Rappelons enfin qu'un mouvement ascendant de l'ouvrage ne se produisant qu'après une amélioration optimale de la contrainte horizontale du sol, la réaction de l'ouvrage après avoir saturé le sol en résine à l'aide d'injections réalisées suivant un maillage adapté, permet, à elle seule, de valider la consolidation du sol d'assise de l'ouvrage considéré.

4.5 Cas des sols sensibles aux phénomènes de retrait-gonflement

Dans le cas des sols sensibles aux phénomènes de retrait-gonflement liés à la variation de la teneur en eau du sol, les injections de résine expansive URETEK Geoplus® (à travers le procédé Deep Injections®) constituent une solution efficace dans la neutralisation pérenne de ce type de phénomène.

Les cycles successifs de dessiccation et d'humidification des sols génèrent des fissures dues à la fois au retrait et au gonflement.

Dans le cas d'un retrait consécutif à une diminution de la teneur en eau, le sol voit (suite à l'augmentation de la succion) sa contrainte horizontale chuter jusqu'à s'annuler. Lorsque $\sigma_h = 0$, des fissures sub-verticales apparaissent.

De même, lorsque ces fissures, partiellement obstruées, se referment suite à une réhumidification et que la pression de gonflement devient plus élevée que la résistance au cisaillement, de nouvelles fissures apparaissent. Ce sont les fissures de gonflement (Cui U-J. et Delage P., 2003).

Lorsque la résine URETEK Geoplus® est injectée dans ce type de sol qui peut apparaître plus ou moins surconsolidé (dessiccation du sol), celle-ci pénètre dans les fissures existantes permettant :

- 1/ de combler et de refermer les fissures et par voie de conséquence, de réduire considérablement la conductivité hydraulique du sol injecté - ceci à entre autres pour conséquence de fortement atténuer les apports d'eau pouvant entraîner une réhumidification du sol (Buzzi et al, 2008) ;
- 2/ de rééquilibrer les contraintes du sol en augmentant, voire, dans les cas extrêmes de sécheresse ($w_{Nat} < w_r$), en réactivant la contrainte horizontale σ_h jusqu'à entraîner une rotation des contraintes principales ($K_0 > 1$).

D'autre part, le gonflement est quant à lui inhibé par :

- 1/ l'élimination, dans la zone injectée, des chemins de drainage-hydratation que peut constituer le réseau de fissures (le sol est alors saturé de résine) ;
- 2/ le confinement du sol à l'aide d'une résine à la fois fortement expansive (URETEK Geoplus®) c'est-à-dire ayant la capacité de modifier l'organisation des contraintes principales du sol (voir 4.2), et présentant une résistance à la compression bien plus élevée que la pression de gonflement du sol.

4.6 Amélioration de la portance

L'étude de Hellmeier P., Soranzo E., Wu W., Niederbrucker R., Pasquetto A. (2011) "An experimental investigation into the performance of polyurethane grouting in soil", a mis en évidence une nette amélioration de la portance des sols (contraintes et déformations) ayant été traités par une seule phase d'injection de résine expansive URETEK Geoplus® conformément au procédé Deep Injections®.

Le tableau suivant précise les améliorations (au niveau des contraintes et déformations) obtenues lors de cette expérimentation.

	Contrainte	Déformation
Taux d'amélioration après injection *	200 à 300 %	800 à 1000%

Parallèlement, l'énorme retour d'expérience sur de très nombreux chantiers d'URETEK a permis de quantifier le degré d'amélioration de la portance d'un sol ayant été traité par une seule phase d'injection de résine expansive URETEK Geoplus® conformément au procédé Deep Injections®. Cette analyse s'appuie sur les résultats d'essais in situ (pénétrométriques et pressiométriques) exécutés avant et après injections.

	Contrainte	Déformation
Taux d'amélioration après injection *	200 à 250 %	150 à 300 %

(*) Taux d'amélioration du sol = caractéristiques mécaniques finales/caractéristiques mécaniques initiales (à partir des essais de contrôle réalisés avant et après injections).

Ces résultats constituent des valeurs moyennes, représentatives du panel des données obtenues.

En fonction de la configuration du traitement à réaliser (état de contraintes initiales du sol au niveau du point d'injection, nature des sols à traiter ou encore causes ayant nécessité le traitement), un objectif d'amélioration (taux) sera défini lors du prédimensionnement.

Ce taux d'amélioration théorique est classiquement compris entre 120 et 200 % pour une seule phase d'injection. Celui-ci devra être confirmé en phase travaux par les essais de contrôle comparatifs réalisés avant et après injections. Le nouveau taux alors obtenu devra être au moins égal (ou supérieur) au taux théorique défini lors du prédimensionnement. Dans le cas contraire, une nouvelle phase d'injection devra être réalisée jusqu'à obtention de l'amélioration souhaitée.

Un objectif supérieur à 200% pourra être envisagé, mais nécessitera des adaptations dans les modalités d'injection (maillage, phasage, quantité).

Quel que soit l'objectif d'amélioration souhaité, il devra rester compatibles avec la structure (charge, inertie, rigidité...).

5. Mise en œuvre

5.1 Études préliminaires

5.1.1 Étude géotechnique et critères de faisabilité

Chaque projet nécessite une visite des lieux et une étude de sol établie par un bureau géotechnique. Cette étude doit indiquer :

- la nature et les caractéristiques mécaniques des terrains traversés,
- s'il y a lieu, le taux de matière organique,
- la configuration du système de fondation de l'ouvrage.

Le procédé Deep Injections® est applicable dans la grande majorité des sols. Il peut toutefois être contre-indiqué en présence de certains types de sols (Cf. paragraphe 1.2).

Nota : La présence d'eau n'est pas un obstacle aux injections qui peuvent être réalisées aussi bien dans des sols saturés que non saturés.

5.1.2 Étude structurelle

L'application du procédé de consolidation du sol sous les fondations (ou les dallages), ne confère pas une rigidité supplémentaire à la structure de l'ouvrage qui peut parfois nécessiter des travaux complémentaires.

En cas de déficiences structurelles pouvant entraîner des risques au niveau de la stabilité de l'ouvrage, un bureau d'études spécialisé doit se prononcer sur les travaux de rigidification nécessaires devant être entrepris en complément des injections. Ce type de déficience ne remet néanmoins pas en cause la possibilité de traiter les sols à l'aide du procédé URETEK Deep Injections®.

5.1.3 Zones de traitement

Les zones de traitement sont prédéfinies en fonction de la configuration des désordres et des caractéristiques des sols. Le traitement par injections URETEK n'entraîne pas la création de phénomène de point dur, les traitements partiels sont donc envisageables. En conséquence, il est possible de limiter le traitement aux seules parties de l'ouvrage qui ont subi des tassements.

5.14 Réseaux

Avant toute intervention il est nécessaire de connaître l'emplacement et la nature des réseaux enterrés présents dans les zones traitées. À cet effet une détection préalable doit être réalisée (en interne ou par une société spécialisée). La distance minimale entre une canalisation et un point d'injection ne doit pas être inférieure à 50 cm.

Lors d'injections réalisées à proximité de réseaux d'évacuation (EU, EV et EP), un contrôle caméra permanent est réalisé durant l'intervention.

Le risque d'endommager des réseaux peut néanmoins subsister. Il est parfois nécessaire de prévoir leur réfection.

Réseaux sensibles : en cas de présence d'un réseau dit sensible (gaz, fibre optique par exemple) dans la zone de traitement, la distance minimale des points d'injection ne peut être inférieure à 2,0 mètres. Dans le cas contraire, le réseau concerné doit être neutralisé (fermé et purgé) ou dévié avant l'intervention. Ledit réseau ne pourra être remis en activité qu'après vérification de son bon fonctionnement par une entreprise spécialisée et réparation le cas échéant.

5.2 Dispositions des injections

5.2.1 Injections sous fondations

On entend ici par "fondations" l'ensemble des fondations superficielles de type semelles filantes et semelles isolées, les radiers ainsi que l'ensemble des fondations semi-profondes (puits).

Les lignes et les niveaux d'injection sont définis en fonction des objectifs à atteindre.



Photo 5. Position des tubes d'injection le long d'une semelle filante.

Le traitement concerne la zone d'influence de la fondation (Bulbe) ou une couche spécifique définie en fonction des résultats de l'étude géotechnique (couche molle par exemple).

a/ Les semelles filantes:

L'implantation standard d'injection est, pour le premier niveau, d'un point d'injection tous les 0,45 ou 0,90 m environ (selon l'inertie de l'ouvrage). Dans les cas de traitement des sols sensibles au retrait-gonflement, cet entraxe est systématiquement de 0,45 m. Les points sont disposés le long de l'axe de ladite fondation. En cas de semelle élargie (largeur $B > 1,0$ m), la ligne d'injection est généralement doublée. Néanmoins, dans les cas d'ancrages de fondations supérieurs à 1,20 m, il est possible de conserver une seule ligne d'injection jusqu'à $B = 1,5$ m (hors traitement des sols sensibles au retrait-gonflement).

Lorsque le niveau d'ancrage des fondations descend au-delà de 1,5 mètres de profondeur et que la semelle de fondation occupe au moins les 2/3 de la hauteur de la fouille ou est surmontée d'un soubassement en béton armé, l'entraxe des points du premier niveau d'injection peut s'étendre jusqu'à 0,90 m (hors cas de traitement des sols sensibles au phénomène de retrait-gonflement).

Sur les niveaux suivants, l'espacement entre chaque point d'injection est classiquement de 0,90 mètre.

Le nombre de niveaux d'injection (suivant z) est établi en fonction de la profondeur à traiter avec toujours un niveau à l'interface sol d'assise/fondation. Chaque niveau est classiquement espacé en profondeur de 1,0 m environ.

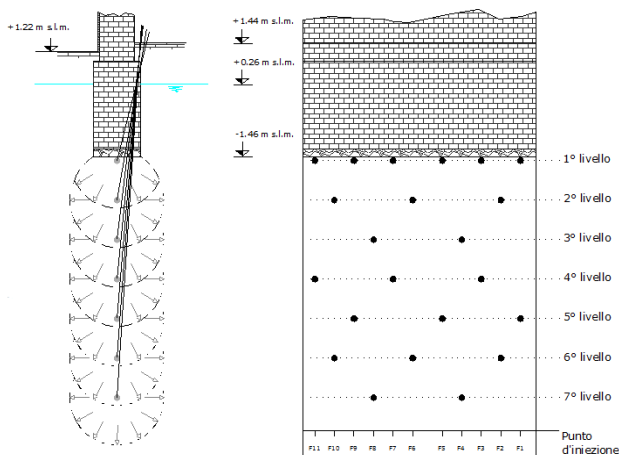


Figure 5.1. Exemple d'implantation d'injection sur sept niveaux, sous une semelle filante

b/ Les massifs isolés :

On entend ici par massifs isolés, des fondations superficielles ou semi-profondes carrées ou rectangulaires.

Pour les massifs isolés carrés de largeur $B \leq 1,0$ m, l'injection comprend classiquement un unique point placé au centre du massif.

Pour les massifs isolés carrés de largeur $1,0 \leq B \leq 1,5$ m, l'injection se compose de 4 points placés au niveau de chacun des 4 angles du massif, à une distance de $\frac{B}{5}$ des bords de la fondation.

Pour les massifs isolés carrés de largeur $1,5 \leq B \leq 2,0$ m, l'injection se compose d'au moins 5 points dont 4 placés au niveau de chacun des 4 angles du massif, à une distance de $\frac{B}{5}$ des bords de la fondation et un point au centre du massif.

Il s'agit ici de configurations classiques qui nécessiteront d'être adaptées en cas de conditions structurelles particulières (ancrage, inertie...).

Pour les massifs isolés carrés de largeur $B > 2,0$ m, l'injection s'organise de la même manière que pour un radier (voir ci-après), mais avec un maillage plus étroit. Les points périphériques doivent être placés à moins de 0,45 m des bords de la fondation.

Enfin, pour les massifs isolés rectangulaires, le maillage est constitué de lignes d'injection avec un espacement : $e \leq 0,90$ m. Les points d'injection sont positionnés en quinconce, tous les 0,90 m. Les points périphériques doivent être placés à moins de 0,45 m des bords de la fondation.

Là aussi, le nombre de niveau d'injection (suivant z) est établi en fonction de la profondeur à traiter avec toujours un niveau à l'interface sol d'assise/fondation. Chaque niveau est classiquement espacé en profondeur de 1,0 m environ.

c/ Les radiers :

Les maillages et les niveaux d'injection sont établis en fonction des objectifs à atteindre.

La couche à traiter est définie suite à l'étude géotechnique.

L'implantation habituelle des points d'injection suit une maille de 1,0x1,0 m environ sans toutefois excéder 1,5x1,5 m.

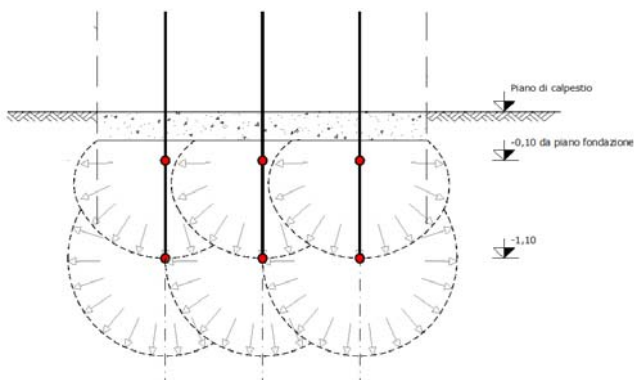


Figure 5.2. Exemple de maillage d'injection sur deux niveaux, sous une dalle béton

Le nombre de niveau d'injection (suivant z) est déterminé en fonction de la profondeur à traiter avec toujours un niveau à l'interface sol d'assise/dalle. Chaque niveau est classiquement espacé en profondeur de 1,0 m environ.

5.22 Injections sous dallages

On entend ici par dallages, les dallages en béton armé ou en béton non armé au sens du DTU 13.3.



Photo 6. Maillage des tubes d'injection sur un dallage

Les maillages et les niveaux d'injection sont établis en fonction des objectifs à atteindre.

La couche à traiter est définie suite à l'étude géotechnique.

L'implantation habituelle des points d'injection suit une maille de 1,0x1,0 à 2,0x2,0 m environ (selon la rigidité de la dalle).

Le nombre de niveau d'injection (suivant z) est déterminé en fonction de la profondeur à traiter avec toujours un niveau à l'interface sol d'assise/dalle. Chaque niveau est classiquement espacé en profondeur de 1,0 m environ.

5.3 Phasages d'exécution

5.31 Modalités techniques d'injection

Les travaux sont exécutés à partir d'un camion atelier URETEK, équipé du complexe de mixage, pompage et des composants.

Préalablement le maillage établi est tracé de façon précise sur tout le secteur à traiter. Le maillage peut être modulé en fonction du passage des réseaux ou de la configuration des lieux. Dans ce cas, l'adaptation du maillage est validée par le bureau d'étude URETEK.

Le traitement de l'interface sol d'assise/structure est réalisé en première phase. Les injections de traitement du sol en profondeur sont réalisées en seconde phase.

Une fois les injections terminées, les tubes d'injection sont sectionnés à la base du sol une partie restant piégée dans le sol.

La mise en application du procédé URETEK Deep Injections® s'articule en trois phases : la perforation, la mise en place des tubes d'injection et l'injection avec mise sous monitoring laser de la structure.

5.32 Perforation

La perforation est réalisée à l'aide de perforatrices manuelles électriques à roto percussion. Ce système de perforation ne transmet pas de vibrations à la structure et permet d'intervenir dans des conditions d'accès difficiles. (hauteur inférieure à 1,50 m et espace de manœuvre d'environ 1 m²).

Les mèches ont un diamètre compris entre 12 et 26 mm et sont constituées d'axes hélicoïdaux de longueurs diverses permettant l'exécution de perforation jusqu'à 2,40 m environ. Au-delà de cette profondeur, des rallonges sont utilisées.

Le traitement superficiel des dallages peut être réalisé à travers des forages de diamètre 6 mm permettant, ainsi, de ne pas endommager les carrelages.

La profondeur maximale d'injection suivant cette procédure est limitée à 8,0 m par rapport au niveau de la plate-forme de travail.

La perforation s'opère en traversant les fondations de l'ouvrage (ou le dallage) afin d'atteindre avec précision le volume de sol d'assise à traiter.

L'inclinaison des percements, lorsqu'elle est nécessaire, est préalablement définie en fonction de la largeur et de la profondeur de l'infrastructure concernée afin que les points d'injection restent dans un plan vertical passant par l'axe de la structure porteuse.

Compte tenu du rayon du bulbe de sol amélioré sous la fondation (rayon de la zone élastique de l'ordre de 1m pour une quantité de résine classique), une tolérance de ± 10 cm du point d'injection théorique reste acceptable. Au-delà de 3,0 m de profondeur par rapport au niveau de la plate-forme de travail, cette tolérance peut être augmentée pour autant qu'elle soit compensée par un accroissement du rayon du volume de sol amélioré impliquant une augmentation de la quantité de résine injectée.

Dans le cas où la fondation concernée présente une largeur supérieure au rayon de la zone élastique (> 1 mètre), la quantité de résine injectée est augmentée ou la ligne d'injection est doublée (Cf. § 5.2.1).



Photo 7. Phase de perforation

5.33 Mise en place des tubes d'injections

La mise en place des tubes d'injection peut se faire à la main ou par "vibro-fonçage" à l'aide des perceuses électriques utilisées en mode percussion.

Les tubes sont en cuivre ou en acier, de diamètre externe variant de 6 à 12 mm et d'une épaisseur égale à 1 mm. Les tubes de 12 mm ont une longueur de 5 m et peuvent être soudés ou manchonnés les uns aux autres en cas de besoin, permettant l'injection à des profondeurs supérieures à 5,0 m.



Photo 8. Phase mise en place des tuyaux

Les longueurs de tube descendues sous le niveau de la plate-forme de travail sont déterminées en tenant compte de la profondeur théorique d'injection et de l'inclinaison du tube par rapport à l'axe vertical. Là aussi, une tolérance de ± 10 cm reste acceptable.

Les tubes de 6 mm de diamètre ont une longueur de 1 m. Ces tubes sont réservés aux injections sous dallage.

Les tubes sont équipés de valves perdues qui permettent d'éviter l'engorgement du conduit lors de son enfoncement.

À la fin de l'injection, le tuyau est abandonné et ne peut être réutilisé.

5.34 L'injection

La mise en place des tubes est suivie de la phase d'injection. Celle-ci est réalisée par l'intermédiaire du pistolet qui est fixé sur l'extrémité supérieure du tube d'injection.

Les Geoplus A et Geoplus B sont véhiculés séparément jusqu'au pistolet d'injection. Les deux produits sont mélangés à haute pression, dans une chambre positionnée à l'arrière du pistolet (garanti un parfait mélange des deux composants), avant d'être diffusés sous la forme d'un bi-composant dans le tube d'injection puis dans le sol.



Photo 9. Phase d'injection

L'arrêt des injections s'opère dès que la réaction de la structure est observée (soulèvement lorsque la structure le permet).

Si la procédure classique prévoit l'injection, point par point, de chaque niveau, les conditions géotechniques du site (par exemple: degré de saturation élevé dans les sols fins) comme la réaction prématurée de l'ouvrage aux injections peuvent imposer d'adapter le protocole d'injection. Chaque niveau d'injection est alors constitué de points primaires, secondaires voire tertiaires pour une injection par phase réalisée comme suit :

- 1 injection de l'ensemble des points primaires,
- 2 injection de l'ensemble des points secondaires,
- 3 injection de l'ensemble des points tertiaires (si présents)...

À la fin des injections, les tubes sont sectionnés à ras du sol lorsque les injections ont été réalisées depuis l'extérieur. Dans les cas de traitements depuis l'intérieur ou directement sous dallage, les tubes d'injection sont sectionnés à quelques centimètres sous la surface de la dalle avant que le trou soit rebouché au mortier ou au coulis.

6. Contrôles

6.1 Contrôle laser

Chaque injection est accompagnée d'un suivi de l'ouvrage par niveau laser afin de détecter tout mouvement vertical de l'ouvrage traité.



Photo 10. Monitoring laser

La précision est de plus ou moins 0,5 mm. L'appareil se compose d'un émetteur et de plusieurs récepteurs solidaires de l'ouvrage.

Les récepteurs détectent les moindres variations altimétriques par rapport au plan horizontal fixe décrit par le rayon laser de l'émetteur. L'émetteur est positionné à distance du lieu d'injection, sur un point neutre ne subissant pas l'influence de l'injection.

Tout mouvement de l'ouvrage est mesuré en temps réel. L'ensemble de ces mesures est consigné dans le rapport de chantier.

Les soulèvements enregistrés sont la preuve de l'efficacité du traitement. En effet, l'expansion de la résine exerce en premier lieu une pression sur les zones de moindre résistance, entraînant prioritairement un compactage horizontal du sol. Une fois l'équilibre obtenu entre les contraintes principales horizontales et verticales, l'expansion de la résine se poursuit en exerçant une pression verticale, opposée à celle (q_{ref}) induite par la surcharge et le poids des terres sus-jacentes. Lorsque l'ouvrage réagit, l'inégalité $q' > q_{ref}$ est alors vérifiée.

6.2 Contrôle des sols injectés

Le principe d'intervention et d'autocontrôle du procédé, est basé notamment sur la méthode observationnelle. Les procédures d'autocontrôles sont les suivantes :

6.21 Avant les injections

Des essais sont réalisés dans la zone de traitement, sur la profondeur des sols concernés et là où les caractéristiques de résistance sont les plus faibles : 1 essai tous les 30 ml (ou tous les 100 m² dans le cas d'un dallage ou d'un radier) avec un minimum de deux essais. Les résultats ainsi collectés, permettent de valider le programme d'injection préétabli ou, si nécessaire, de l'adapter.

Ces caractéristiques peuvent être obtenues à l'aide d'essais géomécaniques in situ normalisés. Les essais exécutés avant et après injections doivent être similaires en tout point. Généralement ces contrôles sont réalisés à l'aide d'essais au pénétromètre dynamique dont la maniabilité, permet d'investiguer le sol à proximité immédiat des fondations.

6.211 Cas des fondations

Dans le cas de fondations linéaires et ponctuelles, les essais de contrôle sont réalisés contre la fondation, au plus près de celle-ci.

6.212 Cas des dalles

Dans le cas des dallages et des radiers, les essais de contrôle sont réalisés au centre de la maille d'injection.

6.22 Pendant les injections

La réaction de l'ouvrage traité est contrôlée en permanence à l'aide des récepteurs laser positionnés sur celui-ci. Il s'agit de l'autocontrôle le plus important.

Les récepteurs doivent détecter une remontée d'ordre millimétrique. La réaction de l'ouvrage indique que le compactage du sol obtenu à la profondeur d'injection déterminée, est suffisant. Les injections sont systématiquement stoppées en cas de réactions imprévues risquant d'endommager l'ouvrage.

6.23 Après les injections

Un dernier contrôle est réalisé afin de vérifier les améliorations obtenues. Ce contrôle est effectué à l'aide d'essai(s) au pénétromètre exécuté(s) dans les mêmes conditions qu'avant injection. En cas d'insuffisance des résultats, des compléments d'injection sont réalisés.

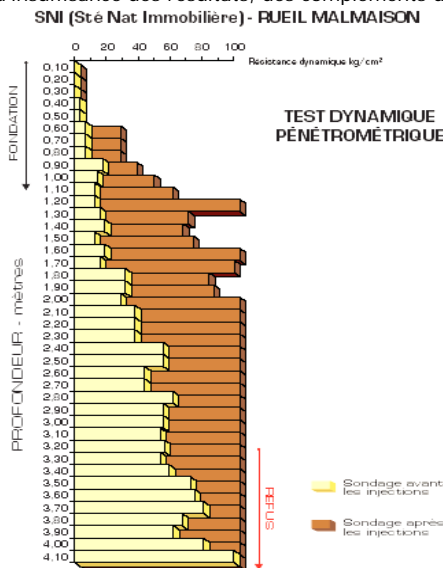


Figure 6.1. Exemple de test montrant les résistances de pointes avant et après injection

Remarques : Les effets des injections sont d'autant plus sensibles que l'on se rapproche des points d'injection. Il est de plus à noter que l'amélioration des caractéristiques mécaniques obtenue sous fondation, est toujours sous-estimée. En effet l'essai, n'est pas réalisé directement sous la fondation, là où les injections ont été exécutées et où la résistance opposée est maximum, mais à côté de celle-ci. Enfin, en cas de vérification des tassements, il y a nécessité de réaliser des essais de contrôle adaptés (essais au pressiomètre par exemple).

6.3 Période d'observation

Comme toute intervention au niveau des fondations d'un ouvrage existant, il est nécessaire de respecter une période d'observation d'une année avant travaux de reprise des enduits. En cas de mouvements résiduels, des injections complémentaires seront réalisées dans le cadre de l'intervention initiale.

7. Fabrication et contrôle des produits et matériels d'injection

7.1 Fabrication (matière première) et contrôles qualité :

La société URETEK s'est dotée d'un système de qualité, qui prévoit un contrôle de tous les produits utilisés dans les processus de production.

Le protocole de fourniture des produits intègre le contrôle qualité (tests réalisés par le laboratoire du fournisseur pour valider la parfaite réaction du mélange) de chaque lot de produit livré à URETEK.

Les contrôles de fabrication concernent les composants de base. Les composants doivent respecter les caractéristiques prédéfinies par URETEK. Chaque lot de matériau est accompagné d'une fiche de sécurité et d'une étiquette sur laquelle sont indiqués le nom du produit et la date d'échéance de validité.

Le producteur et fournisseur des produits de base de la résine URETEK Geoplus® dispose des certifications suivantes :

- ISO 9001,
- ISO 14001,
- ISO 50001,
- ISO 17020, et 17025

7.2 Contrôle sur chantiers

Les contrôles sur les chantiers sont quotidiens, ils concernent les injecteurs (y compris pistolet d'injection) ainsi que la qualité de la résine expansée.

Les contrôles sont réalisés au début de la journée. Ils intègrent la vérification de la conformité de la pression et de la température du système d'injection, ainsi qu'un contrôle visuel de la polymérisation à l'air libre de la résine (couleur, texture, vitesse de polymérisation, absence de résidus...), avant mise en œuvre.

Le générateur rendant le camion-atelier autonome ainsi que l'appareillage spécifique pour un parfait mélange des produits de base (dosage, température, volume de résine, pression, ...) sont vérifiés au moins une fois par mois. Le reste du matériel est intégralement contrôlé au moins une fois par an.

Le système de qualité de l'entreprise prévoit en outre des procédures pour la gestion des défauts de conformité, le cas échéant.

Aucune injection ne peut être réalisée avec du matériel ou un lot de résine non conforme ou défectueux.

B. Références

1. Références chantiers

Le procédé URETEK Deep injections® est utilisé depuis plus de 15 ans en France comme dans de nombreux pays du monde. Chaque année, ce procédé est appliqué sur des milliers de chantiers nécessitant une amélioration des sols d'assise de fondations (filantes comme isolées), de dallages, de voiries, de tarmac, etc.

Depuis sa création en 1990, le groupe URETEK n'a enregistré aucune dégradation des traitements réalisés à l'aide du procédé URETEK Deep Injections®, liée à une éventuelle altération de la résine employée.

2. Références bibliographiques

2.1 Publications

BUZZI O., FITYUS S., SASAKI Y. (2008), Conceptual model for the remediation of expansive clay foundations using expanding polyurethane resin.

CAMBEFORT H. (1964), Injection des sols – Tome 1 : Principes et méthodes.

CASSAN M., (1988), Les essais in situ en mécanique des sols.

CUI Y.-J. & DELAGE P. (2003), Sols non saturés – Applications au calcul des ouvrages.

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.

ERDEMGIL M., SAGLAM S., BAKIR B.S. (2007), Utilization of Highly Expansive Polymer Injection to Mitigate Seismic Foundation Failure for Existing Structures. 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering.

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.

FOTI S., MANASSERO M. (2009), Rinforzo e adeguamento delle fondazioni per sollecitazioni statiche e dinamiche, XXII Ciclo delle Conferenze di Geotecnica.

GABASSI M., MANSUETO F., PASQUETTO A., VINCO G. (2007), Modellazione numerica di un intervento di consolidamento del terreno di fondazione di un palazzo storico sito in rue Joseph de Maistre sulla collina di Montmartre in parigi realizzato con iniezioni di resina poliuretanic ad alta pressione d'espansione, XXIII Convegno Nazionale di Geotecnica.

GUERRA C., PASQUETTO A., GABASSI M., VINCO G., (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 - SEC 2008 pp 343-348

HELLMEIER P., SORANZO E., WU W., NIEDERBRUCKER R., PASQUETTO A. (2011), An experimental investigation into the performance of polyurethane grouting in soil.

MENARD L. (1957), Mesures in situ des propriétés physiques des sols, Annales des Ponts et Chaussées N°14, 357-377.

SNEDDON I.N. et LOWENGRUB M. (1969), Crack problems in the classical theory of elasticity, Wiley, New-York.

VAN DER WAL A. (2010), Longevity of Uretek Resins.

YU H. S. & HOULSBY G. T. (1991), Finite cavity expansion in dilatant soils : loading analysis, *Geotechnique* 41, pp. 173-183.

2.2 Normes

NF P 94-500 de novembre 2013 – Missions d'ingénierie géotechnique – Classification et spécifications.

NF EN 12715 d'octobre 2000 – Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Injection.

NF EN 1997-1 de juin 2005 – EUROCODE 7 – Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales.

NF EN 1997-2 de septembre 2007 – EUROCODE 7 – Calcul géotechnique – Partie 2 : Reconnaissance des terrains et essais.

NF EN 1998-1 de sept. 2005 – EUROCODE 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments.

NF EN 1998-5 de sept. 2005 – EUROCODE 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 5 : Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques.

UNI 6350-68 – Materie plastiche cellulari rigide – Determinazione delle caratteristiche a compressione.

UNI 8071 - Materie plastiche cellulari rigide - Determinazione delle caratteristiche a trazione.

ASTM G21-96 - Standard Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi

ASTM G22-76 (1996) - Standard Practice for Determining Resistance of Plastics to Bacteria

NF EN 12457-2 de décembre 2002 - Caractérisation des déchets - Lixiviation - Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues - Partie 2 : essai en bûchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 4 mm (sans ou avec réduction de la granularité).

C. Résultats expérimentaux

Rapport 1 - Résistance à la compression de la résine Geoplus – Université de Padoue (2001),

Rapport 2 – Pression de gonflement de la résine Geoplus – Université de Padoue (2001),

Rapport 3 – Analyse selon l'arrêté du 15 mars 2006 – Université de Padoue (2009),

Rapport 4 - Résistance à la traction de la résine Geoplus – Université de Padoue (2002),

Rapport 5 - Résistance à la flexion de la résine Geoplus – Université de Padoue (2002),

Rapport 6 - Résistance au cisaillement dynamique de la résine Geoplus – Université de Padoue (2003),

Rapport 7 - Résistance à la compression LT de la résine Geoplus – Université de Padoue (2003),

Chantier expérimental d'injection – Mesures de perméabilité – Rapport RINCENT BTP (2011).

Chantier expérimental d'injection sur le site de Villemurlin– Mesures de perméabilité – Rapport ESIRIS (2014).

Certificato n° 1074/DC – Cantiere di Castano Prima – Prove di resistenza a trazione, flessione e compressione - Studio sperimentale sthadale (2001).