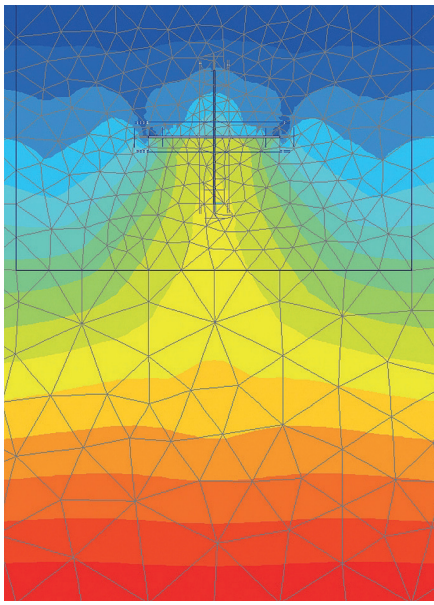
Andrea Dominijanni
Mario Manassero

AMÉLIORATION DES SOLS PAR INJECTIONS DE RÉSINE EXPANSIVE

Guide de conception



EYROLLES

AMÉLIORATION DES SOLS PAR INJECTIONS DE RÉSINE EXPANSIVE

Guide de conception

Andrea Dominijanni & Mario Manassero

Traduit et adapté de l'italien sous la direction de Nicolas Faure

La **reprise d'un ouvrage en sous-œuvre** imposait souvent des travaux lourds et coûteux. Parmi les techniques moins invasives mises au point par les spécialistes du secteur, l'amélioration des sols par injections de résine expansive se révèle particulièrement efficace.

Employée pour consolider les sols des fondations d'un ouvrage, l'injection de résine expansive est une technique désormais bien connue de l'ensemble des professionnels de la construction intervenant dans les travaux de **préservation**, de **restauration** ou de **réhabilitation**.

Néanmoins — afin de mieux appréhender tout le potentiel de cette technique inventée voici près d'une vingtaine d'années — les **mécanismes de diffusion et d'interaction avec le sol** de la résine qui y est injectée (résine polyuréthane) restaient encore à préciser.

À cette fin, deux chercheurs de l'École polytechnique de Turin, Mario Manassero et Andrea Dominijanni, ont conduit une **étude théorique et expérimentale** dont les résultats sont publiés ici ; financée par la société Uretek, cette étude porte sur les effets de l'injection de résine expansive, dans les sols fins comme dans les sols grossiers.

À la suite des récents progrès réalisés dans la **modélisation théorique et expérimentale des milieux poreux et particulaires**, les auteurs proposent notamment dans ce livre un premier cadre théorique général pour la modélisation analytique et numérique de ce type d'injections ; dans leurs recherches ils se sont par ailleurs appuyés sur le procédé Uretek Deep Injections®, seul procédé d'amélioration des sols faisant l'objet d'un **avis technique du CSTB** (avis technique 3/15-796).

C'est ainsi qu'après avoir étudié différentes configurations d'injection, les auteurs montrent comment réaliser une opération de consolidation à l'aide de la technologie Uretek Deep Injections® dans le but d'**atténuer les effets induits par une activité sismique**.

Andrea Dominijanni, chargé de recherche en géotechnique environnementale et enseignant, exerce à l'École polytechnique de Turin. Spécialiste des phénomènes de transport et du comportement mécanique des sols fins, il est l'auteur de nombreuses publications scientifiques. Il a notamment travaillé sur la modélisation numérique des travaux géotechniques et sur les mesures de protection de l'environnement.

Mario Manassero est professeur de mécanique des sols à l'École polytechnique de Turin. Ses principaux thèmes de recherche sont liés à l'étude théorique et expérimentale de la mécanique des milieux poreux, la caractérisation géotechnique des sols in situ, la consolidation et le renforcement des sols, le contrôle et l'extraction des contaminants du sol et, en particulier, les processus d'interactions physico-chimiques entre le squelette solide du sol et les fluides interstitiels. Il préside depuis 2001 le Comité technique de la Société internationale de mécanique des sols et de géotechnique (ISSMGE) dédié à la géotechnique environnementale.

Chez le même éditeur :

Daniel Faisantieu, *Prévention des désordres liés au sol dans la construction*, coédition Eyrolles/Ginger CATED

Victor Davidovici & Serge Lambert, *Fondations et procédés d'amélioration du sol. Guide d'application de l'Eurocode 8*, coédition Eyrolles/Afnor

Olivier Celnik & Éric Lebègue, *BIM et maquette numérique d'architecture*, coédition Eyrolles/CSTB

PUBLICS

Professionnels et futurs professionnels de la construction (bâtiment, génie civil, travaux publics) dont :

Ingénieurs et techniciens des bureaux d'études géotechniques • Experts judiciaires • Architectes • Maîtres d'œuvre • Entrepreneurs

www.editions-eyrolles.com

Consolidation de sols et stabilisation d'une maison individuelle à l'aide du procédé URETEK Deep Injections® (avis technique du CSTB 3/15-796).

Consolidation d'un sol d'assise à l'aide du procédé URETEK Deep Injections® (avis technique du CSTB 3/15-796) d'un château situé en Haute-Garonne (31).

Traitement du sol d'assise d'un dallage de plus de 3 400 m² à l'aide du procédé URETEK Deep Injections® (avis technique du CSTB 3/15-796) – La Halle au blé de Bourges (18).

Renforcement à l'aide du procédé URETEK Deep Injections® d'un remblai VRD sur 650 mètres linéaires de chaussée – Départementale RD 990 à Gilly-sur-Isère (73).

Consolidation d'un remblai ferroviaire à l'aide du procédé URETEK Deep Injections® en Croatie.

SECTION REPRÉSENTATIVE
DES POINTS D'INJECTION

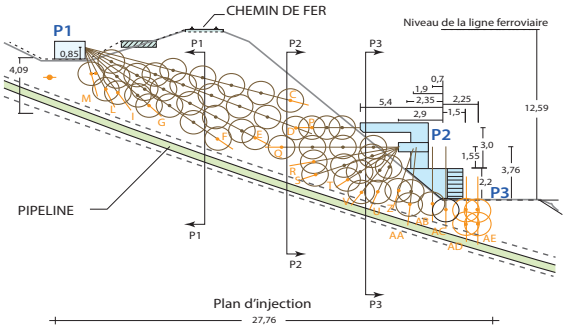


Schéma de la section représentative des points d'injection du remblai ferroviaire.

Traitement du remblai d'assise d'un bassin de décantation (clarificateur) d'une station d'épuration à l'aide du procédé URETEK Deep Injections® (avis technique du CSTB 3/15-796).

Renforcement du sol avant terrassement vertical d'un talus (06) à l'aide du procédé URETEK Deep Injections® (avis technique du CSTB 3/15-796).

Amélioration des sols par injections de résine expansive

Andrea Dominijanni
Mario Manassero

Amélioration des sols par injections de résine expansive

Guide de conception

EYROLLES

ÉDITIONS EYROLLES
61, bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

Ouvrage rédigé dans le cadre du projet de recherche URETEK-POLYTECHNIQUE DE TURIN.

Version française établie par Uretek France sous la direction de Nicolas Faure.

Édition originale en langue italienne :

Consolidamento dei terreni con resine espandenti. Guida alla progettazione © McGraw-Hill Education (Italie), 2014

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation de l'Éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris.

© Groupe Eyrolles et Uretek France pour l'édition en langue française, 2015, ISBN 978-2-212-14115-3

Achevé d'imprimer en Slovénie par GPS group
N° d'éditeur : 9382
Dépôt légal : août 2015

Sommaire

Chapitre 1. **Propriétés physiques et mécaniques des résines polyuréthanes** 1

Chapitre 2. **Critères de conception** 9

Chapitre 3. **Autres typologies d'injections et comparaisons** 23

Chapitre 4. **Modèles théoriques** 31

Chapitre 5. **Modèles numériques** 61

Chapitre 6. **Risque de liquéfaction** 99

Chapitre 7. **Exemples de calcul** 119

Annexe A. **Théorie de l'expansion d'une cavité dans le sol** 131

Annexe B. **Les mécanismes de fracturation dans le sol** 147

Bibliographie 155

Table des matières

Chapitre 1. Propriétés physiques et mécaniques des résines polyuréthanes 1

1. Résines polyuréthanes expansives 1
2. Propriétés mécaniques et hydrauliques des résines polyuréthanes.. 5
3. Injection de résines Uretek dans les sols..... 6

Chapitre 2. Critères de conception 9

1. Introduction..... 9
2. Remplissage des cavités..... 10
3. Réduction de la conductivité hydraulique..... 11
4. Allègement 13
5. Amélioration des propriétés mécaniques..... 14
6. Relevage..... 19

Chapitre 3. Autres typologies d'injections et comparaisons 23

1. Introduction..... 23
2. Injections par imprégnation..... 24
3. Injections solides (injections de compactage)..... 24
4. Injections pour le contrôle et la compensation des affaissements.... 27

Chapitre 4. Modèles théoriques 31

1. Introduction..... 31
2. Comportement de la résine dans le sol..... 32
3. Modèles théoriques pour les sols à grains grossiers 38
   3.1. Effet de pénétration initial 38
   3.2. Détermination de la pression d'équilibre 46

3.3. Variation de l'état de contraintes dans le sol 51
3.4. Variation de l'état de déformation du sol 52
4. Modèles théoriques pour sols à grains fins 53
4.1. Critères d'apparition du phénomène de fracturation 53
4.2. Critères de propagation des fractures 56
4.3. Soulèvements induits par des injections de résine 59
5. Conclusion 60

Chapitre 5. **Modèles numériques** 61

1. Introduction 61
2. Interventions par injection solide 62
2.1. Expansion de la cavité sphérique 62
2.2. Expansion de la cavité cylindrique 70
2.3. Effets induits dans le sol par des injections rapprochées 76
3. Intervention de récupération des affaissements 82
4. Conclusion 97

Chapitre 6. **Risque de liquéfaction** 99

1. Introduction 99
2. Évaluation du risque de liquéfaction 99
2.1. Évaluation du taux de contrainte cyclique (CSR) 101
2.2. Évaluation du taux de résistance cyclique (CRR) 103
2.3. Indice du potentiel de liquéfaction 109
3. Exclusion de la vérification du risque de liquéfaction 110
4. Mesures d'atténuation du risque de liquéfaction 112

Chapitre 7. **Exemples de calcul** 119

1. Introduction 119
2. Injections de résines expansives dans les sols à grains grossiers 119
2.1. Injections de résines fortement expansives 119
2.2. Injections de résines moins expansives 124
3. Injections de résines expansives dans les sols à grains fins 128

Annexe A. **Théorie de l'expansion d'une cavité dans le sol** 131

1. Introduction et définition du problème 131
2. État de contraintes et de déformations dans des conditions purement élastiques..... 133
   - 2.1. Cavité cylindrique 133
   - 2.2. Cavité cylindrique ou sphérique 135
3. État de contraintes et de déformations dans des conditions élasto-plastiques..... 135
   - 3.1. Estimation de la pression d'avant la plastification 137
   - 3.2. Approche par « analyse du sol aux petites déformations » 137
   - 3.3. Approche par « analyse du sol aux grandes déformations »..... 143

Annexe B. **Les mécanismes de fracturation dans le sol** 147

1. Introduction et définition du problème 147
2. Fracturation du sol en condition non drainée..... 147
3. Fracturation du sol en condition drainée..... 152

Bibliographie 155

Chapitre 1

Propriétés physiques et mécaniques des résines polyuréthanes

1. Résines polyuréthanes expansives

Les polymères d'uréthane, ou polyuréthanes, forment une grande famille de polymères qui se caractérisent par diverses propriétés physiques, notamment leur capacité d'expansion (gonflement).

La réaction chimique pour la synthèse des polyuréthanes a été découverte en 1947 par Bayer. Les résines polyuréthanes expansives sont produites lors d'une réaction exothermique entre un polyol et un isocyanate, mélangés dans des proportions volumiques établies en fonction de caractéristiques de production spécifiques. Au cours de la réaction, une grande quantité de dioxyde de carbone est générée, ce qui provoque l'expansion volumétrique du mélange et la formation d'une structure spongieuse, dans laquelle les bulles de gaz sont piégées. La production de dioxyde de carbone implique nécessairement la présence d'eau, laquelle réagit avec le groupe isocyanate ; sans eau, il est nécessaire de recourir à un agent d'expansion liquide, chimiquement inerte et avec un faible point d'ébullition, qui se vaporise en exploitant une partie de la chaleur de polymérisation.

Dans un laps de temps très restreint (de quelques secondes à quelques minutes), le mélange durcit passant de l'état liquide à l'état solide. Le temps de réaction, qui dépend des caractéristiques de la résine et de l'utilisation, entre autres, de catalyseurs, est influencé par la température des composants mélangés. En conséquence, le contrôle de la température des composants permet d'accélérer ou de retarder le temps de réaction.

La pression exercée pendant le gonflement et la densité finale de la résine dépendent de la capacité d'expansion que possède le gaz contenu dans les bulles, avant le durcissement. La structure à « cellules fermées » de la résine expansive est représentée sur la **figure 1.1**, qui regroupe les images obtenues au microscope électronique par Buzzi *et al.* (2008). Les images reproduisent la structure microscopique de la résine utilisée par Uretek (Canteri, 1998) dans le domaine géotechnique, dans des conditions de gonflement libre, auxquelles correspond une densité égale à 37 kg/m^3. Dans ces conditions, le volume expansé est égal à trente fois le volume initial du mélange (Dei Svaldi *et al.*, 2005 ; Buzzi *et al.*, 2008 ; Buzzi *et al.*, 2010).

La densité du mélange à l'état liquide est égale à 1 070 kg/m^3 et est très proche de celle de l'eau (= 1 000 kg/m^3). La résine expansée est, au contraire, caractérisée par une densité sensiblement plus faible, qui dépend de la pression de gonflement.

De nombreux essais en laboratoire ont été effectués sur la résine Uretek afin de déterminer ses principales propriétés physiques et mécaniques (Favaretti *et al.*, 2004).

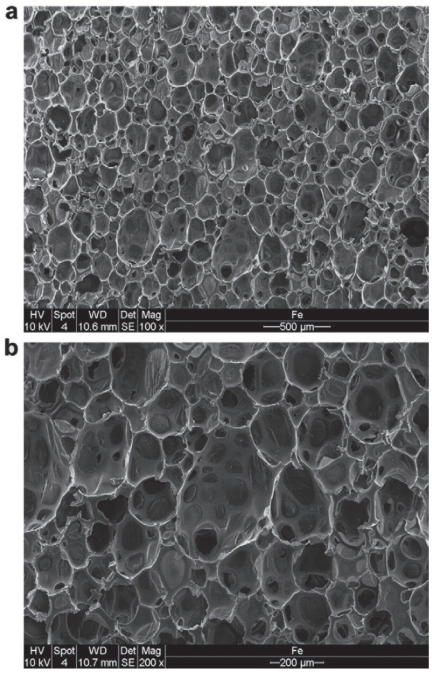


Figure 1.1 Image obtenue au microscope électronique d'une résine polyuréthane Uretek expansée sans confinement (densité égale à 37 kg/m^3). (a) Agrandissement × 100 ; (b) agrandissement × 200. (Buzzi *et al.*, 2008).

En particulier, la relation entre la pression de gonflement et la densité (ou poids spécifique) a été étudiée en conditions œdométriques, à l'aide d'un dispositif spécial qui permet d'injecter une résine à l'intérieur d'un cylindre métallique rigide, muni d'un piston. Immédiatement après l'injection, la résine commence son expansion, qui, en raison de la forte rigidité du conteneur, ne peut se faire que dans le sens vertical. Lors de son expansion, le mélange déplace un piston vers le haut, qui, après une course de quelques centimètres, est bloqué par un élément transversal équipé d'un manomètre. La pression de gonflement a été déterminée comme celle devant être fournie par l'élément transversal pour empêcher le piston de se déplacer vers le haut. La dépendance de la pression de gonflement vis-à-vis de la densité de la résine, obtenue expérimentalement, est représentée sur la **figure 1.2**.

À partir des résultats expérimentaux, on a déduit la relation empirique suivante :

$$P = \exp\left[0,23 \cdot (\gamma_{rf} - 0,36)\right] - 1 \qquad [1.1]$$

où :

- P = pression de gonflement, déterminée dans des conditions œdométriques (exprimée en MPa) ;
- γ_{rf} = poids par unité de volume (ou poids spécifique) de la résine expansée (exprimé en kN/m^3).

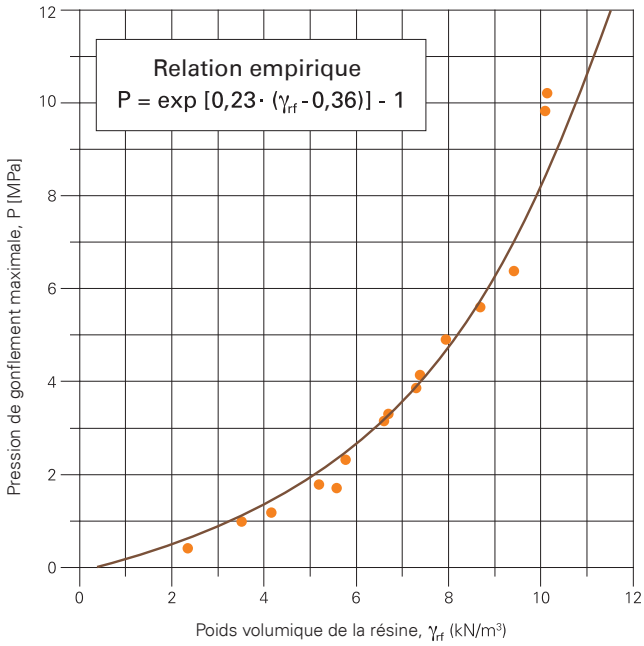


Figure 1.2 Pression de gonflement de la résine Uretek en fonction du poids par unité de volume (données expérimentales de Favaretti *et al.*, 2004).

Dans les essais effectués, les valeurs de pression de gonflement mesurées étaient comprises entre 0,40 et 10,00 MPa, dans le domaine étudié du poids par unité de volume (γ_{rf} = 2.00 à 10,00 kN/m^3). En outre, Buzzi *et al.* (2008) ont rencontré des conditions de gonflement libre de la résine, ou pression de gonflement nulle, pour un poids spécifique $\gamma_{rf} = 37\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\cdot g = 0{,}36\,\frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$, où g est l'accélération de la pesanteur (= 9,81 m/s^2). La relation empirique de l'équation [1.1] a été obtenue en minimisant l'erreur d'approximation des chiffres de Favaretti *et al.* (2004) et en imposant $\gamma_{rf} = 0{,}36\,\frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$ pour $P = 0$ kPa.

D'après ces résultats, il apparaît que la pression de gonflement diminue au fur et à mesure de la diminution de la densité et de l'augmentation de l'expansion. Cette propriété revêt une importance capitale pour les applications dans lesquelles les résines polyuréthanes sont injectées à l'intérieur du sol et, par conséquent, soumises à un effet de confinement.

D'après l'équation [1.1], il est possible de déterminer le rapport entre le volume expansé de la résine (volume de la résine finale V_{rf}) et le volume initial du mélange injecté à l'état liquide à l'intérieur du sol (volume de la résine initiale V_{ri}). En effet, la masse de résine M_r ne varie pratiquement pas lors du passage de l'état liquide initial à l'état final de solide expansé et, par conséquent, les volumes V_{ri} et V_{rf} peuvent être exprimés de la façon suivante :

$$V_{ri} = \frac{M_r}{\gamma_{ri}} \qquad [1.2a]$$

$$V_{rf} = \frac{M_r}{\gamma_{rf}} \qquad [1.2b]$$

où :

- M_r = masse de la résine, inchangée lors du passage de l'état liquide à l'état solide ;
- $\gamma_{ri} = 1070 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot g = 10.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$ = poids spécifique de la résine à l'état liquide ;
- γ_{rf} = poids spécifique de la résine expansée.

À l'aide des équations [1.1], [1.2a] et [1.2b], le rapport de gonflement, défini comme V_{rf}/V_{ri}, est égal à :

$$\frac{V_{rf}}{V_{ri}} = \frac{\gamma_{ri}}{\gamma_{rf}} = \frac{10,5}{0,36 + \frac{1}{0,23} \cdot \ln\left[1 + P(MPa)\right]} \qquad [1.3]$$

La relation entre V_{rf} et V_{ri} obtenue avec cette procédure est illustrée sur la **figure 1.3**.

Comme cela a déjà été observé, si la relation de polymérisation a lieu dans un environnement exempt de confinement (air libre), la résine se solidifie avec un poids volumique égal à 0,36 kN/m^3 avec un taux d'expansion volumétrique égal à environ 30 (Dei Svaldi *et al.*, 2005).

La relation reproduite sur la **figure 1.3** revêt une importance capitale pour l'évaluation des injections de résine dans les sols (Foti & Manassero, 2009).

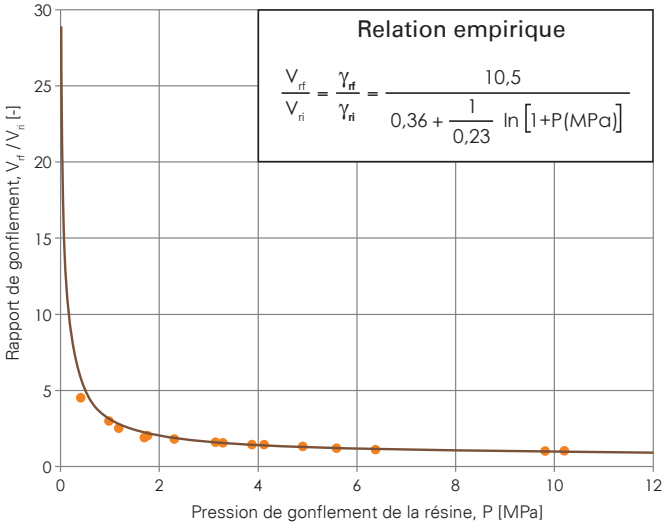


Figure 1.3 Relation expérimentale entre le rapport de gonflement et la pression de gonflement de la résine Uretek.

2. Propriétés mécaniques et hydrauliques des résines polyuréthanes

Les résines polyuréthanes, à la suite des processus de gonflement et de durcissement, développent des caractéristiques mécaniques (à savoir : rigidité et résistance) très élevées, en fonction du poids spécifique final, γ_{rf}.

Sur les résines Uretek, on a déterminé de manière expérimentale (Favaretti *et al.*, 2004 ; Dei Svaldi *et al.*, 2005 ; Foti & Manassero, 2009) :

- le module de rigidité (ou module d'Young), *E*, correspondant à une déformation de 1 % (**figure 1.4**) ;
- la résistance à la compression monoaxiale, σ_c (**figure 1.5**).

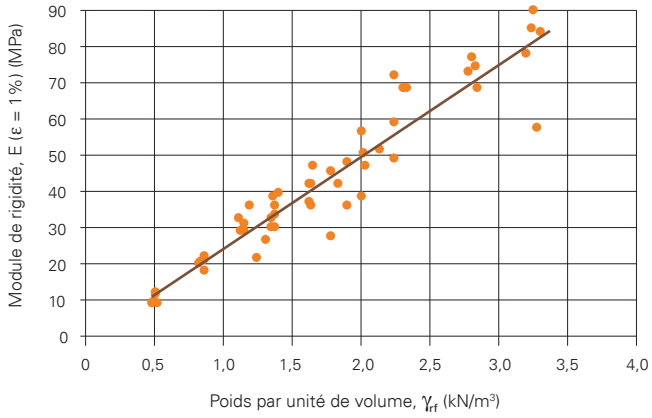


Figure 1.4 Module de rigidité en fonction du poids par unité de volume final de la résine Uretek.

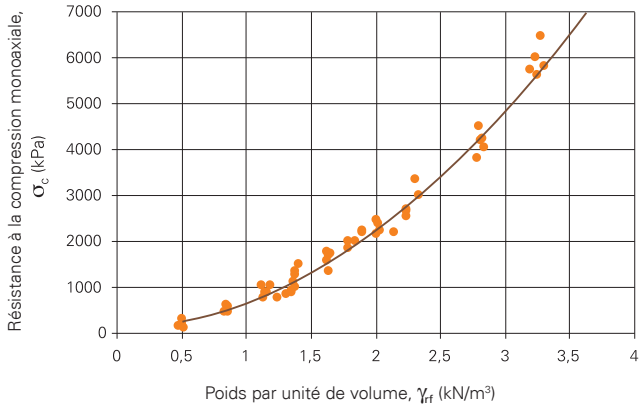


Figure 1.5 Résistance à la compression monoaxiale en fonction du poids par unité de volume final de la résine Uretek.

Ces deux paramètres ont été évalués en fonction du poids spécifique γ_{rf} dans un intervalle de valeurs comprises entre 0,5 et 3,5 kN/m^3.

En ce qui concerne le module de rigidité, les éprouvettes ont permis d'identifier des valeurs comprises entre 10 et 80 MPa, comparables aux modules caractéristiques des terrains densifiés.

Les résistances à la compression mesurées sont significativement élevées (0,25 à 6,50 MPa). À partir de telles valeurs, il est possible de calculer la résistance au cisaillement de la résine, supposée purement cohésive, au moyen de la relation :

$$\tau_f = \frac{\sigma_c}{2} \qquad [1.4]$$

Il en résulte que la résistance au cisaillement varie entre 0,125 et 3,25 MPa, en fonction de la densité finale ou du degré d'expansion de la résine.

Des essais d'imbibition dans l'eau ont également été effectués sur les résines Uretek. Ils montrent des variations de poids spécifiques comprises entre 2 et 3 % à une température de 23 °C. (Gabassi, 2011).

Buzzi *et al*. (2010) ont, en outre, effectué des essais de conductivité hydraulique à la fois sur les résines Uretek pures et sur des échantillons constitués d'un mélange sol-résine. Pour la densité minimale (0,36 kN/m^3), 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 injectés, la conductivité hydraulique s'est révélée 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 de pores fermés et imperméables à l'eau. La conductivité hydraulique extrêmement faible, mesurée sur des échantillons de sol injectés, est due à la présence de micro-défauts aléatoires. Dans les conditions naturelles, le poids spécifique de la résine ne varie pas selon les conditions d'immersion dans l'eau.

Ces résines peuvent donc être considérées comme presque imperméables et pratiquement étanches à l'eau.

3. Injection de résines Uretek dans les sols

Les résines polyuréthanes peuvent être injectées dans les sols à diverses profondeurs par des forages de petits diamètres, ce qui évite de fragiliser les ouvrages de fondations et/ou les dallages traités qui les surmontent. Une description précise de la technologie Uretek dénommée Deep Injections a été effectuée par Canteri (1998). Avec cette technologie, il est possible de réaliser des percements d'un diamètre inférieur à 30 mm (en général, de 12 à 26 mm), avec un entraxe minimal compris entre 45 et 150 cm. Des tubes d'acier sont insérés dans ces forages pour l'injection de la résine polyuréthane. Les interventions sont effectuées par une équipe de techniciens spécialisés, avec un camion-atelier équipé. Des camions de différentes dimensions sont disponibles selon le type d'intervention et selon les conditions d'accès au chantier. Dans les cas exceptionnels, il est possible d'acheminer le matériel et la résine par d'autres moyens de transport : trains, avions, bateaux ou téléphériques. À l'intérieur du camion-atelier, en plus de divers outillages, se trouvent les

réservoirs des deux composants chimiques nécessaires à la production de la résine. Ces deux composants sont mélangés avant leur entrée dans le tube d'injection et ont un temps de réaction variable allant de quelques secondes à quelques minutes. L'injection est effectuée par un opérateur à l'aide d'un pistolet d'injection prévu à cet effet.