



**Traitement des sols
sensibles au retrait
gonflement par le**

**PROCÉDÉ URETEK
DEEP INJECTIONS®**



**BREVET EUROPÉEN
N° 0 851 064**

Les injections de Résine de Polyuréthane Expansive (RPE) ne se limitent pas à la consolidation du sol.

Elles modifient également son comportement vis-à-vis de la dessiccation et de la réhydratation des sols sensibles.

Deux études ont été réalisées récemment sur l'effet des injections de résine expansive URETEK (RPE) dans le cadre du traitement des sols argileux sensibles au retrait gonflement :

1 « Modèle conceptuel pour le traitement des argiles gonflantes sous fondations avec une résine polyuréthane expansive »

a été réalisée en Australie par :

- Olivier Buzzi,
- Stephen Fityus,
- Yasumasa Sasaki.

Centre for geotechnical and Materials Modelling,
School of Engineering, University of Newcastle,
NSW2008, Australia.

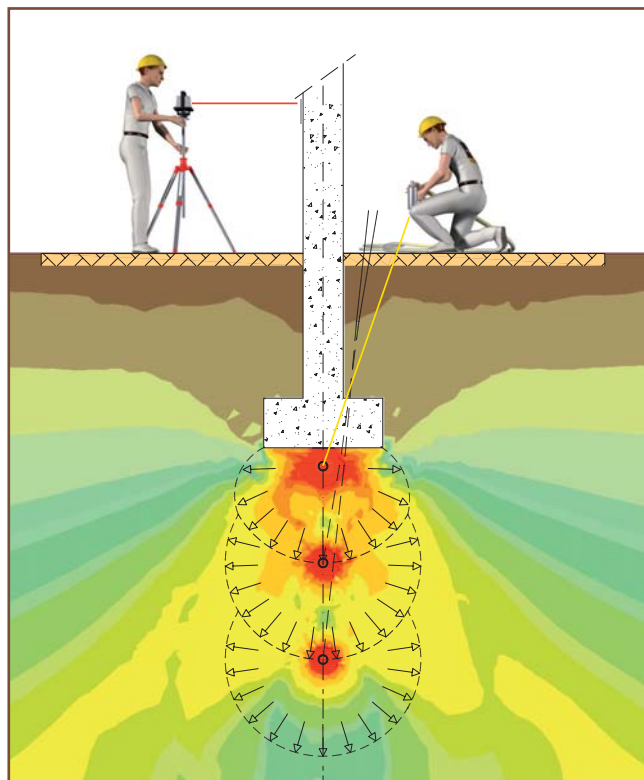
2 « Consolidation du sol par injection de résine polyuréthane (technologie URETEK) afin d'atténuer le gonflement et le retrait des sols argileux »

a été réalisée en Italie par :

- Alberto Pasquetto,
 - Matteo Gabassi,
 - Gianluca Vinco,
 - Cristiano Guerra
- Università di Urbino, Italy

URETEK®

DEEP INJECTIONS



Ces études ont été présentées au Symposium International sur la Sécheresse organisé par le Laboratoire des Ponts et Chaussées (cf. page 343 de l'ouvrage SEC 2008, Magnan, Cojean, Cui et Mestat (Ed.), 2008, Editions du LCPC, Paris).

Procurez vous l'ouvrage au
01.40.43.50.20.



1 La première étude
« **Modèle conceptuel pour le traitement
des argiles gonflantes sous fondations avec
une résine polyuréthane expansive** » a montré :

Premièrement

que la résine pénètre dans des **fissures de
seulement $1/10^e$ mm** et que l'interface
sol/résine atteint une épaisseur de **1 à 3 mm**.

Deuxièmement

que la pénétration dans les macropores par la
RPE URETEK entraîne une diminution de la
« **perméabilité de la masse structurée du sol** ».

En précisant que : « **La perméabilité pertinente
à prendre en considération pour le sol de
fondation n'est pas celle d'un élément de base
du sol (unité structurale) mais la perméabilité
de la masse structurée du sol en place** »

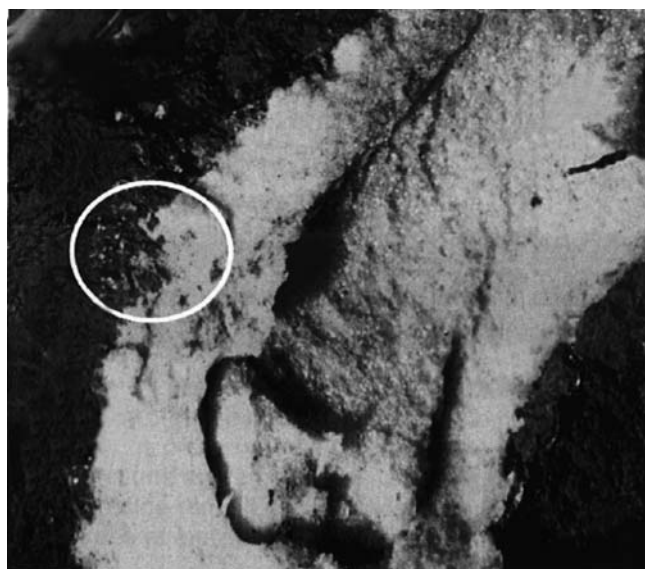
La prise en compte des caractéristiques de la
masse **structurée du sol en place** est
extrêmement importante.

En effet les études réalisées dans le cadre de
l'ARGIC (Analyse du Retrait Gonflement et ces
Incidences sur les Constructions) par le BRGM,
le LCPC et l'Ecole des Mines de Paris, relatées
ci-après **ont montré l'importance des différences
de comportement entre les sols en place et les
sols remaniés** .

Troisièmement

et à la suite des tests de perméabilité réalisés
après injections de RPE URETEK, l'étude « **conclut
que l'injection de résine dans un sol peut réduire
la perméabilité macroporeuse d'un facteur
d'environ 50** »

Ce qui représente **une amélioration déterminante**
pour le comportement du sol face aux phénomènes
de dessiccation et réhydratation.

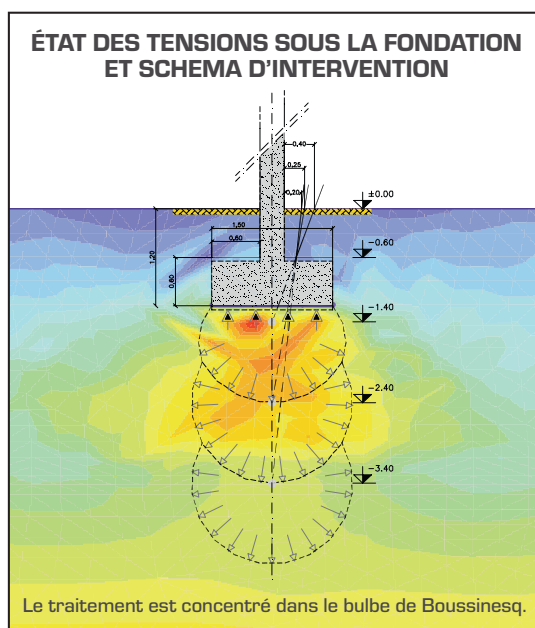


Agrandissement au microscope



Il est également fait remarqué que les injections réalisées lors de la première phase du traitement, à l'interface sol d'assise/fondation entraînent :

- un comblement des vides présents juste sous les fondations et une imperméabilisation de la zone,
- une mise en compression qui permet de reprendre les charges en élévation et assure une parfaite interaction sol-structure : situation originelle de la construction.



(cf. schéma N°1). Ainsi notre procédé permet de justifier une parfaite interaction sol-structure.

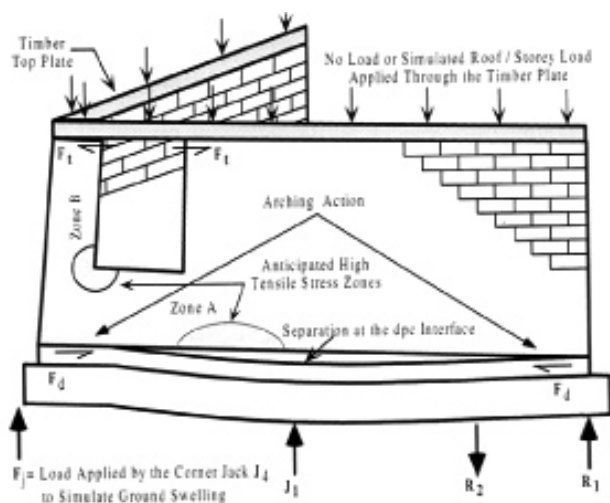


Schéma N°1 : Réactions d'une structure de maçonnerie aux déformations différentielles d'une fondation. (Muniruzzaman, 1997)



Pénétration de la résine par remplissage des fissures de retrait et compactage



2 La seconde étude « Consolidation du sol par injection de résine polyuréthane (technologie URETEK) afin d'atténuer le gonflement et le retrait des sols argileux » a montré :

Premièrement

que « la densité accrue des sols comprimés par l'injection de résine expansive URETEK prévient le risque de futures fortes variations de volume ».

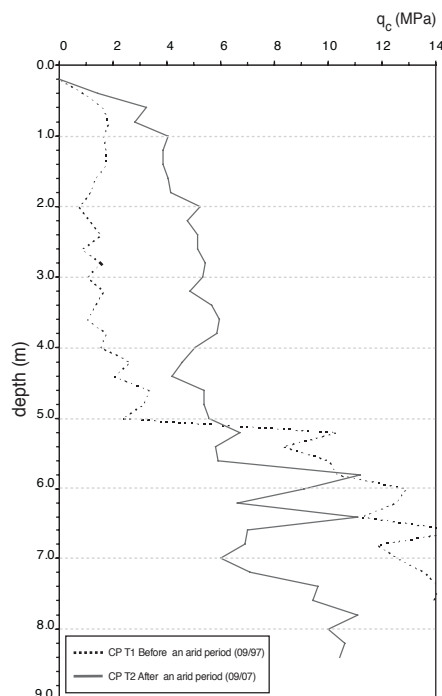
« Le remplacement de l'eau du sol par de la résine réduit fortement les éventuels risques de tassement dus à de nouvelles pertes d'eau en diminuant la teneur en eau. »

(page 348 SEC 2008)

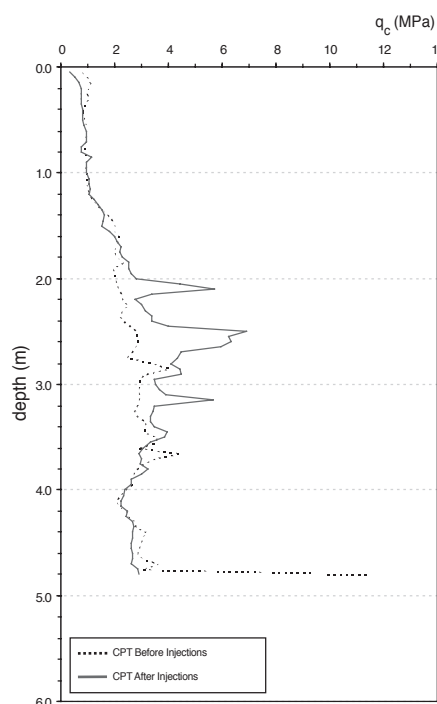
En effet après traitement par la RPE URETEK, nous avons :

- une augmentation de la résistance dynamique du sol,
- une saturation du sol par de la résine qui provoque une diminution de la teneur en eau naturelle w_{nat} .

Ces effets correspondent exactement à ceux observés suite à des périodes de forte sécheresse. Avec pour résultat réduire très fortement le potentiel de retrait du sol lors d'une future nouvelle sécheresse.



Comparaison d'essais pénétrométriques réalisés avant et après une période aride.



Comparaison d'essais pénétrométriques réalisés avant et après injection de 20Kg de résine localisée à 2,8m de profondeur selon le procédé Urettek Deep Injections (2)

Remarque : la figure a pour objectif de montrer l'effet d'une seule injection ponctuelle à 2,80 m de profondeur. Lors d'un traitement sous fondation, une multitude d'injections est réalisée avec des effets sur toute la hauteur traitée combinés à des effets de groupe d'injection.

Deuxièmement

l'étude présente une méthode de calcul pour évaluer la réduction des tassements après traitement par la RPE :

L'étude prend en compte une maison d'habitation ayant subi la sécheresse (IP = 39), située à Antibes Juan-Les-Pins (06) :

Sachant que le volume de résine injecté dans le sol, a représenté environ :

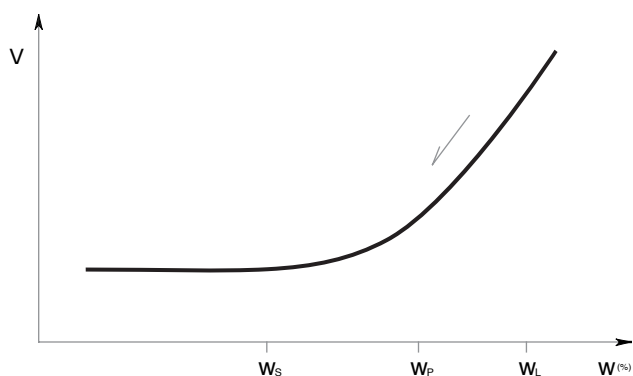
$$RV = \frac{V_r}{V} = \frac{40}{1.000} = 0,04 = 4,0\%$$

la formulation tenant compte du volume de remplacement de l'eau par la résine :

$$\Delta w = \frac{\Delta V_w}{V} \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_d} = 0,04 \cdot \frac{10}{17} = 0,023 = 2,3\%$$

a montré qu'après le traitement par injection de RPE URETEK jusqu'à 3,00 m de profondeur :

« la courbe de l'essai de retrait permet d'évaluer à env. 35 mm la future réduction de tassement due à une nouvelle perte d'eau. »



Relation entre volume et teneur en eau naturelle



Les injections sont toujours contrôlées par laser



Effacité et limite du traitement des sols argileux par le Procédé URETEK DEEP INJECTIONS.

Les injections de RPE URETEK ont donc pour effets :

- une compaction du sol entraînant une diminution de l'indice des vides et une densification du sol,
- un remplissage et une imperméabilisation des macro-vides résiduels sous fondations ainsi qu'au sein des fissures de retrait et des veines drainant les circulations d'eaux telluriques,
- enfin un écrasement de la structure du sol lors de l'expansion tridimensionnelle de la résine qui conduit à une modification des propriétés mécaniques et rhéologiques du sol compacté.

Le traitement par RPE URETEK entraîne :

- une diminution d'un facteur 50 de la porosité du sol, qui régit les chemins de drainage-humidification ainsi que de compression-décompression de la masse structurée du sol en place.
- une augmentation de la densité du sol et une diminution de sa teneur en eau naturelle, qui prévient les risques d'une future sécheresse,
- et donc par voie de conséquence, une modification du comportement de la masse structurée du sol en place, en inhibant de manière substantielle son potentiel de dessiccation/réhydratation et donc de retrait/gonflement.

Les injections de Résine Polyuréthane Expansive (RPE) URETEK constituée par un polymère à chaînes fermées dont la perméabilité est infime, de l'ordre de 10^{-9} m/s. **permettent donc bien de retarder et de limiter de manière déterminante les variations hydriques et donc les phénomènes de retrait-gonflement des sols d'assise traités.**

Les chantiers réalisés de par le monde et notamment plusieurs milliers en France, depuis plus de 10 ans, sur des pathologies sécheresses ont démontré l'efficacité du Procédé URETEK. Cette efficacité est corroborée par les études relatives ci-avant.

Cela étant et dans l'état actuel des connaissances, URETEK limite l'application de son Procédé en présence des sols argileux dont les minéraux sont particulièrement sujets aux gonflements interfoliaires de forte amplitude, **lorsque la contrainte et l'amplitude de leur potentiel de gonflement peuvent entraîner des risques structurels.**

Les critères de faisabilité du Procédé URETEK relatés ci-après ont été établis sur la base des recherches scientifiques énoncées en première partie et de l'expérience des milliers de chantiers réalisés. Ils prennent aussi en compte les recherches géotechniques effectuées dans le cadre du Projet ARGIC (Analyse du Retrait Gonflement et ces Incidences sur les Constructions) organisé par le BRGM, le LCPC et l'Ecole des Mines de Paris dont certaines sont rappelées ci après.



Facteurs d'approche pour évaluer les risques de gonflement suivant les dernières analyses relatées dans le Symposium sur la sécheresse 2008 :

Comme nous l'avons vu ci-avant il est donc très important de pouvoir analyser de manière crédible les caractéristiques des sols argileux **afin de pouvoir se prononcer de manière efficace sur leur nocivité éventuelle.**

Certaines études réalisées dans le cadre de l'ARGIC et présentées lors du Symposium Sécheresse 2008 ont montré que les essais classiques d'analyse ne donnaient pas toujours des résultats satisfaisants :

L'Etude « **Méthodologie d'étude de la sensibilité des sols au retrait-gonflement** » réalisée par L. Duc, M. Makki, A. Maloula, JP. Magnan du Laboratoire Central des Ponts et chaussées Division Mécanique des Sols et des Roches et Géologie de l'Ingénieur (MSRGI) relatée également dans l'ouvrage SEC 2008, Magnan, Cojean, Cui et Mestat (Ed.), 2008, Editions du LCPC, Paris en pages 257 et 272, a mis en évidence les points suivants :

Dans le but d'établir une **méthodologie d'évaluation à la sensibilité des sols argileux au retrait gonflement**, l'étude a pris en considération l'analyse d'un type d'argile en l'occurrence l'argile de Bavent (Région de Rouen).

Dans un premier temps il a été pris en compte « **les méthodes classiques d'analyse de la fraction fine des sols (propriétés plastiques)** » en application des classifications reconnues.

Cette approche a donné le tableau suivant et le commentaire qui suit :

Application des classifications à l'argile de Bavent

Classification	Paramètres	Potentiel de gonflement
Altmeyer (1995)*	W_s	Critique
Rangaratham et Satyanarayana (1963)*	I_s	Fort
Seed et al. (1962)	I_p	Moyen
Classifications SNEP ou ASTM D4546-03 (méthode A)	e_{sw}^*	Faible
Classification BRE (building Research Establishment)	$I_p, \% < 2\mu m$	Moyen
Classification EPA (US Environmental Protection Agency)	A_c, CEC_c	Faible
Chen (1998) **	$w_L, \% < 74\mu m$	Fort
Williams et Donaldson (1980)	$I_p, \% < 2\mu m$	Moyen
Holtz et Gibbs (1956)	$w_L, I_p, \% < 2\mu m$	Très fort
Dakshnamurthy (1978)*	w_L, W_s, I_p	Moyen

* cités par Bultel (2001) ** cités par Windal (2001)

En conclusion, les classifications disponibles ne permettent pas de prévoir le potentiel de gonflement de l'argile de Bavent ni, de façon plus générale, celui de la majorité des sols courants. Classer les sols gonflants à partir de la seule valeur d'un indice tiré d'une mesure indirecte de reconnaissance réalisée le plus souvent sur le sol remanié est en effet difficile. La texture et éventuellement la cimentation des grains (comme par exemple dans le cas des marnes) sont ignorées alors qu'il s'agit de deux paramètres importants et qui ne peuvent être reproduits en laboratoire car ils sont intimement liés à l'histoire géologique du sol. Il est donc indispensable de réaliser des essais mécaniques de retrait ou de gonflement pour caractériser les sols sensibles de façon fiable.

Comme on peut le lire :

« En conclusion les classifications disponibles ne permettent pas de prévoir le potentiel de gonflement de l'argile de Bavent (exemple étudié) ni, de façon plus générale, celui de la majorité des sols courants ».

« Classer les sols gonflants à partir de la seule valeur d'un indice tiré d'une mesure indirecte de reconnaissance réalisée le plus souvent sur le sol remanié est en effet difficile ».

« La texture et éventuellement la cimentation des grains (comme par exemple dans le cas des marnes) sont ignorées alors qu'il s'agit de deux paramètres importants et qui ne peuvent être reproduits en laboratoire car ils sont intimement liés à l'histoire géologique du sol ».

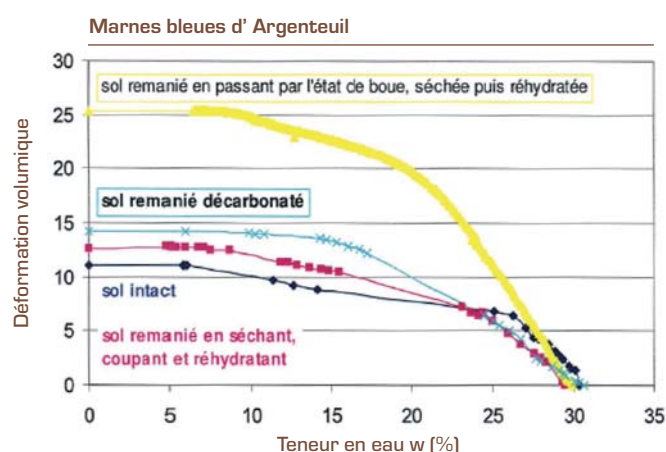
A la suite de quoi, l'étude a porté sur la recherche d'essais probants sur les caractéristiques de retrait gonflement de l'argile en général et l'argile de Bavent en particulier.

Ce qui a conduit à montrer que :

- les essais de retrait et de gonflement libre à l'oedomètre sont les plus adaptés, mais qu'ils doivent être impérativement **réalisés sur échantillon de sol intact et non remanié**.
- les essais à l'oedomètre réalisés selon la Norme XP P94-091 sont moins exploitables que ceux de la norme ASTM D4546-03 méthode A, essai retenu.

Ce que montrent les tableaux extraits suivants :

- Tableau où l'on peut voir la différence extrêmement importante des déformations volumiques du sol en fonction de la variation de la teneur en eau entre un échantillon **sur sol remanié en jaune et sur sol intact en bleu foncé** :



En conclusion et à la suite de la réalisation des différents essais sur l'argile de Barent, on peut lire :

« Néanmoins, toutes ces données confirment que l'argile de Barent n'est pas une argile particulièrement gonflante. Ce point n'est pas clairement déduit des classifications existantes pour les sols sensibles au retrait et gonflement, ce qui renforce l'idée qu'il est indispensable de réaliser des essais mécaniques de retrait ou gonflement sur des sols intacts pour intégrer l'effet de leur histoire et de leur structure, qui ne sont pas toujours liés uniquement aux paramètres de consistance utilisés dans ces classifications »

Ces remarques sont confirmées dans l'étude «**Relations entre les microstructure de deux sols argileux de la Région Parisienne et leur sensibilité au retrait gonflement** » réalisée par M. Audiguier, Z. Geremew et R. Cojean relatée dans l'ouvrage SEC 2008, Magnan, Cojean, Cui et Mestat (Ed.), 2008, Editions du LCPC, Paris en page 235 qui indique :

L'analyse portant sur le comportement de deux sols argileux de la Région Parisienne (Marnes Bleues d'Argenteuil et Argile Verte de Romainville), considérées comme très sensibles au retrait gonflement conduit à la même distinction entre sol intact et sol remanié :

« **Cependant ces deux formations (MBA et AVR) ne présentent pas le même comportement vis-à-vis du retrait-gonflement suivant qu'elles sont intactes (condition in situ) ou remaniées au laboratoire.** »

■ **Tableau II.** Gonflement libre de l'Argile verte de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil:

Formations	AVR	MBA-1 carbonates 27 %	MBA-2 carbonates 58 %
Teneur en eau avant gonflement (échantillon intact) %	25	32	23
Teneur en eau après gonflement (échantillon intact) %	39	36	25
Teneur en eau avant gonflement (échantillon remanié) %	27	34	24
Teneur en eau après gonflement (échantillon remanié) %	51	56	35
Taux de gonflement libre (échantillon intact) %	16	4	1,5
Taux de gonflement libre (échantillon remanié) %	32	26	15

« Pour une teneur en eau équivalente, le taux de gonflement de AVR passe de **16** à **32** % entre l'état intact et l'état remanié, celui de **MBA-2** passe de **1,5** à **15**.

Le taux de gonflement de MBA-1 dont la teneur en eau est plus grande passe de **4** à **26** %... A l'état remanié leur sensibilité est multipliée par **6,5 à 10** ... » (page 237)

Il est donc mis clairement en évidence que les classifications habituellement utilisées ne permettent pas de prévoir le risque réel de gonflement.

Dans le dernier tableau on peut voir que les Marnes bleues d'Argenteuil (MBA-1) dont le taux de gonflement réel est de 4 %, ne présentent en réalité pas de risque. Cela contredit ce que laissent supposer les interprétations habituelles, au travers de leurs caractéristiques :

IP = 47, WL = 89, IR = 68, % < 2 μ m = 78 %
Valeur au Bleu = 10, comme indiqué dans le tableau suivant (page 236).

Tableau I. Caractéristiques minéralogiques, pétrophysiques et géotechniques de l'Argile verte de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil.

Formations	AVR	MBA - 1	MBA - 2
Argiles	I, K, S	I, K, S	I, K, S, A. fibreuses
% Carbonates	13	27	58
Porosité %	42	45	40
Poids volumique sec kN.m ⁻³	15	14	16
% < 2 μ m	78	78	82
Limite de liquidité WL %	75	89	63
Indice de plasticité Ip %	35	47	35
Indice de retrait Ir %	59	68	47
Valeur de bleu	9	10	5
Surface spécifique m ² .g ⁻¹	188	210	110

Cette étude met également en évidence **l'influence des carbonates sur les essais de sensibilité des sols**, qui justifie la différence de comportement par exemple entre les deux marnes MBA-1 et MBA-2 dans le tableau précédent :

« ...pour MBA-1, il (son comportement) est inhibé par l'existence d'un ciment carbonaté formé au cours de la diagénèse qui lie les grains entre eux. A l'état remanié l'histoire diagénétique du matériau a été partiellement effacée. » (page 238)

« Les transformations diagénétiques (dissolution-précipitation) sont responsables de la formation de liens argilo-carbonatés qui sont détruits lors du remaniement. » (page 243)

« Ainsi un matériau argileux, contenant des carbonates, classé parmi les sols à fort ou très fort potentiel de gonflement pourra avoir des taux de gonflement très faibles à l'état intact. » (page 243)

Application à l'étude de faisabilité de traitement des sols argileux par le Procédé URETEK Deep Injections.

Remarques concernant les classifications courantes.

Ces études montrent que les classifications habituellement utilisées sont mal adaptées à la qualification des sols d'assise des ouvrages existants.

En effet, ces tests issus du GTR (Guide Technique Routier) pour qualifier des sols argileux en re-emploi (création de plateformes routières), sont réalisés :

- à partir d'échantillons remaniés
- à partir d'échantillons écrêtés (400 microns)

Ils ne tiennent pas compte :

- de l'histoire diagénétique du sol et notamment de l'influence des carbonates, ni des contraintes géologiques de la masse structurée du sol en place.
- de « la fatigue du sol » suite aux cycles d'hydratation/déshydratation, comme le montre l'étude « Comportement des sols argileux soumis à des sollicitations hydriques cycliques Geremew et Audiguier » (page 246) qui indique « ... les essais montrent une stabilisation du phénomène de retrait-gonflement après quatre ou cinq cycles »

Les investigations classiques donnent très souvent des résultats particulièrement pessimistes pour l'étude des sols argileux des ouvrages existants et sont donc peu exploitables sauf à en modifier, de manière significative, la grille de lecture.



Critères de faisabilité pour l'application du Procédé URETEK Deep Injections :

L'évaluation correcte des caractéristiques de déformation d'un sol argileux présent sous un ouvrage passe donc par la réalisation d'essais de retrait et gonflement libre à l'oedomètre sur sol intact.

Compte tenu du protocole que nécessite ce type d'essai et notamment sa durée, il est rarement mis en place dans les études de sols disponibles. On ne procédera donc à ces essais que si les investigations classiques (Limites d'Atterberg, Valeur au Bleu...) **mettent en évidence une sensibilité avérée des sols argileux en place.**

Les résultats de ces essais, destinés à évaluer les risques liés à la sensibilité avérée des sols argileux, seront appréciés en tenant compte :

■ des propriétés spécifiques du Procédé URETEK Deep Injections :

La densification du sol et l'amélioration d'un facteur 50 de la perméabilité macroporeuse de la masse structurée des sols argileux traités par la RPE permettent raisonnablement de considérer que l'évaluation du risque en fonction de l'IP par exemple, doit être modifiée et à proportion reculée.

■ des résultats des recherches géotechniques ci avant évoquées :

Les valeurs des essais réalisés à partir de sols remaniés ne correspondent pas à celles des sols en place. Les résultats obtenus, très souvent pessimistes, nécessitent donc de modifier leur grille de lecture dans le sens d'une dévaluation du risque.

■ de l'expérience de milliers de chantiers sécheresse traités avec succès par le Procédé URETEK Deep Injection.



Chantier URETEK, Muséum d'Histoire Naturelle à Paris

Dans ce contexte les critères retenus pour l'application courante du Procédé Breveté URETEK Deep Injections, en présence de sols argileux sensibles au retrait-gonflement sont :

Critères établis suivant Cahier des Charges approuvé SOCOTEC
(Enquête Technique n° FX2639/9 Rapport n° 10.1829).

Paramètres d'identification	Application du procédé URETEK
$I_p \leq 40$ ou $VBS \leq 8$	Application courante

Cela étant, quelque soit la valeur de son IP, un sol présentant une teneur en carbonate supérieure à 20 % est une application courante du Procédé URETEK Deep Injections.

% $\text{CaCO}_3 > 20$ % (Norme NF 94-048)

(Ce qui signifie que le traitement des argiles marneuses et des marnes est une application courante quel que soit leur indice de plasticité)

Au-delà de ces valeurs, on limitera l'application du traitement **si et seulement si les deux critères suivants sont concomitants** :

- Si la contrainte de gonflement pouvant être exercée par le sol en place est supérieure à la contrainte des fondations plus celle des terres au repos sur la hauteur du bulbe. $(\sigma'_g < \sigma'_{vo} < \Delta\sigma'_z)$
- Si l'amplitude de gonflement du sol traité peut être suffisamment importante pour entraîner des désordres sur la structure. $(R_g \leq 5 \%)$

Tests à réaliser sur la base d'essai de gonflement à l'oedomètre sur échantillon intact (Norme NF P 94-091).



Chantier URETEK, nouveau Musée d'Art Moderne PINAULT, La Punta della Dogana, Venise



Tableau de Synthèse des Applications pour le traitement de la sécheresse

Données	Données Complémentaires	Application du procédé URETEK
$I_p \leq 40$ OU $VBS \leq 8$	Aucune donnée complémentaire nécessaire	Courante
$I_p > 40$ ET $VBS > 8$	$CaCO_3 \geq 20 \%$ Soit une teneur en carbonate supérieure à 20 % (marnes et les argiles marneuses par exemple)	Courante
	$\sigma'_g < \sigma'_{z_{vo}} + \Delta\sigma_z$ Soit une contrainte de gonflement du sol inférieure à la contrainte des fondations, plus celle des terres au repos	Courante
	Une amplitude de gonflement pas suffisante pour entraîner des désordres sur la structure. Ce paramètre est très variable en fonction des structures. Pour simplifier, on prendra Rapport de gonflement : $R_g \leq 5\%$	Courante
	Aucun des éléments ci-dessus	Nécessite une note technique justificative ou des essais complémentaires

Suivant Cahier des Charges SOCOTEC: Rapport n° 10.1829 - Dossier n° FX2639/9





Coordonnées du siège social :
URETEK France

BP 22 Serris - 77706 Marne la Vallée cedex 04
Tel : 01 60 42 42 42 - Fax : 01 60 42 42 43
www.uretek.fr - e-mail : uretek@uretek.fr

