

Volume 1

SEC 2008

**Symposium International
Sécheresse et Constructions**

***International Symposium
Drought and Constructions***

Avec le parrainage de / Under the auspices of

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable
et de l'Aménagement du Territoire

Fédération Française du Bâtiment
Fédération Nationale des Travaux Publics
Agence Qualité Construction
Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement
Comité Français de Mécanique des Roches
Comité Français de Mécanique des Sols

Marne-la-Vallée, 1 – 3 septembre 2008 / 1 – 3 September 2008



CONSOLIDATION DU SOL PAR INJECTION DE RÉSINE POLYURÉTHANE, AFIN D'ATTÉNUER LE GONFLEMENT ET LE RETRAIT DES SOLS ARGILEUX

SOIL IMPROVEMENT BY INJECTIONS OF POLYURETANIC RESIN FOR MITIGATION OF SWELLING AND SHRINKING OF CLAYEY SOILS

Alberto PASQUETTO¹, Matteo GABASSI¹, Gianluca VINCO¹, Cristiano GUERRA²

¹ Urettek S.r.l., Vérone, Italie

² Université d'Urbino, Urbino, Italie

RÉSUMÉ – La forte progression du nombre de catastrophes naturelles induites par la sécheresse a renforcé la nécessité de réaliser des études analysant la relation entre la fréquence des précipitations et les phénomènes de dessiccation du sol. Les données pluviométriques et le nombre de sinistres survenus au sein d'une zone géographique donnée, située sur le territoire italien, ont ainsi été examinés, afin de déterminer l'indice le plus adapté pour la prédiction des futures périodes problématiques. Les effets de la sécheresse sur les sols d'assise de fondation ont également été examinés, afin d'élaborer une méthode susceptible de permettre de résoudre ou prévenir les problèmes en matière de construction, liés au gonflement et au retrait des sols argileux. La comparaison des effets sur le sol de la sécheresse et de l'injection de résine à forte pression d'expansion a révélé que ces effets sont quasiment similaires en termes d'accroissement de résistance ; ainsi la densité accrue des sols comprimés par l'injection de résine prévient le risque de futures fortes variations de volume.

ABSTRACT – The fast growing number of reported hazards due to drought increased the need of studies analyzing the relationship of precipitation frequency and cracking phenomena. The rainfall data and hazards number of a limited geographical area in Italy have been studied in order to determine the most suitable index for prediction of future problematic periods. Also the effects of drought on foundation ground have been monitored to work out a method which could possibly solve or prevent problems on construction related with swelling and shrinking of clayey soils. The comparison of the effects on soil of drought and of high expansion pressure resin injections showed that they are quite similar in terms of stiffness increase, but the higher density of soil compressed by resin injections, prevents strong future volume variations.

1. Introduction

Il n'est pas toujours aisé de bien appréhender la relation existant entre les variations climatiques extrêmes observées ces dernières années et les risques hydrogéologiques, en particulier ceux induits par la sécheresse dans les sols argileux.

Plusieurs types de données concernant une zone géographique limitée, située en Italie, ont été examinés, afin de déterminer la corrélation existant entre la hausse du nombre de sinistres et la survenance des événements pluvieux.

La région étudiée inclut la partie méridionale de la région de la Romagne (provinces de Rimini et Forlì-Césène), la partie septentrionale de la région des Marches (province de Pesaro et Urbino) et la République de Saint-Marin, territoires situés au sein du bassin hydrographique du fleuve Marecchia. Cette région représente une zone d'étude intéressante en raison de ses caractéristiques géologiques et géomorphologiques, ainsi que de l'existence de données pluviométriques classées en séries représentatives, ou de données de contrôle des risques hydrogéologiques.

1.1. Analyse des séries pluviométriques

L'étude a porté sur quatre stations météorologiques : Rimini, Saint-Marin – Mont Titano, Novafeltria et Pennabilli. Ces stations recueillent des données depuis plus de quatre-vingt ans et représentent différentes situations climatiques et géomorphologiques.

On a constaté ces dernières années une diminution générale du volume mensuel moyen des événements pluvieux dans cette région, en particulier pendant l'hiver. Une hausse du pic automnal et une réduction extrême des chutes de neige ont également été observées.

Ces dernières décennies ont été caractérisées par une alternance d'années très arides (1993, 1994, 1998, 2000 et 2007), d'années extrêmement arides (2003), d'années très pluvieuses (1996 et 1999) et d'années extrêmement pluvieuses (2005).

Les données relatives aux événements pluvieux ont été traitées de manière à obtenir un indice révélant, sur une base mensuelle, les périodes caractérisées par des conditions atypiques. On a utilisé le SPI (Standard Precipitation Index – McKee et al., 1993), établi afin d'obtenir une distribution gaussienne avec une moyenne égale à zéro et une variance égale à un, permettant une comparaison entre des stations situées à grande distance les unes des autres et soumises à des conditions orographiques différentes. Le processus de traitement des données a débuté en 1960.

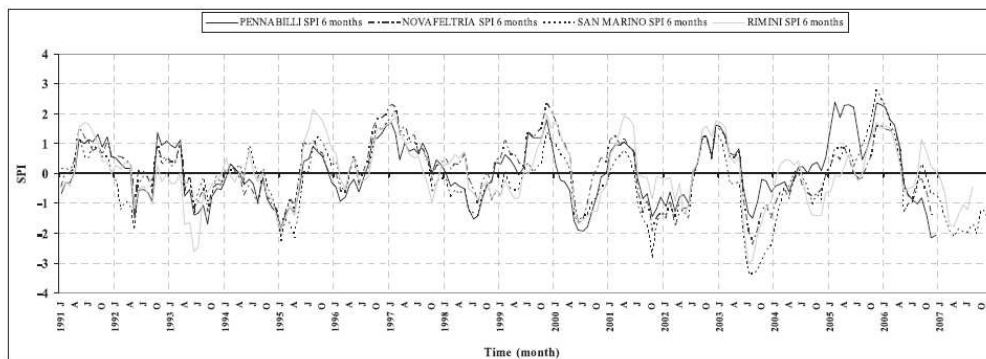


Figure 1. SPI (sur une base semestrielle) des quatre stations météorologiques de référence.

Les valeurs SPI comprises entre -1,0 et 1,0 correspondent à des périodes normales, celles comprises entre 1,0 et 1,5 ou entre -1,0 et -1,5 à des périodes modérément pluvieuses ou modérément arides, celles comprises entre 1,5 et 2,0 ou entre -1,5 et -2,0 correspondent à des périodes très pluvieuses ou très arides, et celles supérieures à 2,0 ou inférieures à -2,0 correspondent à des périodes extrêmement pluvieuses ou extrêmement arides.

On a opté pour un indice SPI sur une base semestrielle, car sur cet intervalle de temps, les précipitations influencent fortement l'écoulement des eaux d'infiltration et le niveau de la nappe phréatique.

Le graphique obtenu met en évidence, sur une base régionale, les périodes extrêmement pluvieuses et surtout les périodes extrêmement arides, qui ont caractérisé le bassin hydrographique du fleuve Marecchia. Entre 1991 et 2006, la valeur SPI moyenne s'est avérée supérieure à 2,0 au cours de l'automne 2005 et inversement, elle a atteint par trois fois une valeur inférieure à -2,0, au cours de l'hiver 1995, de l'été 2003 et du printemps 2007. Au cours des trente années précédentes (1961 – 1990), la valeur SPI moyenne n'avait jamais excédé 2,0 et s'était avérée seulement une fois inférieure à -2,0.

Afin de pouvoir comparer les récents changements climatiques avec les pics des risques hydrogéologiques, on a réalisé une représentation graphique en fonction du temps, retraçant à la fois l'évolution des précipitations et celle des risques hydrogéologiques.

1.2. Relation entre la fréquence des sécheresses et le nombre de sinistres

À partir du nombre de dommages signalés et d'interventions de remise en état des bâtiments affectés par des tassements différentiels et des fissurations, un autre indice a ensuite été mis en place, afin de quantifier, sur une base régionale, les risques dus à l'assèchement des sols d'assise de fondation.

L'évolution du SPI des quatre stations considérées possédant un tracé assez similaire, il a été décidé de considérer la valeur moyenne, afin de faciliter la compréhension du graphique.

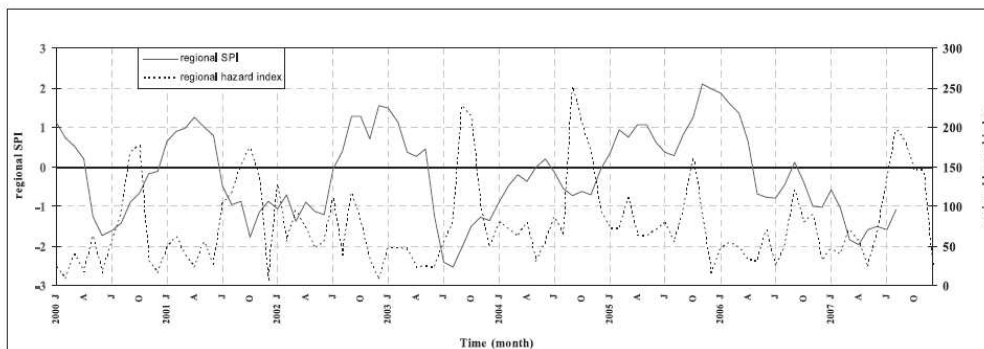


Figure 2. Représentation graphique du SPI régional (sur une base semestrielle) et de l'indice de risque régional.

En comparant les deux courbes, on observe une étroite corrélation entre l'évolution du SPI calculé et les périodes de risques hydrogéologiques importants. À une valeur SPI très faible correspond toujours, parfois avec un certain décalage dans le temps, un nombre très élevé de risques signalés.

La valeur SPI fait ainsi figure d'indice très important pour mettre en évidence les changements climatiques signalés par une augmentation du nombre d'événements extrêmes, et surtout par un accroissement de la fréquence et de la durée des périodes extrêmement arides.

2. Consolidation du sol par la technologie Uretex

Le procédé Uretex Deep Injections® est une technique de consolidation très particulière, consistant à injecter localement dans le sol une résine à fort pouvoir d'expansion, entraînant une amélioration notable des propriétés géotechniques des sols d'assise de fondation. Les étapes opératoires sont relativement simples, et ne nécessitent ni excavations invasives, ni systèmes de raccordement sophistiqués pour consolider les structures de fondation neuves ou préexistantes.

Une fois injectée dans le sol à traiter, la résine commence immédiatement à s'expanser. La pression développée par l'expansion de la résine a tout d'abord pour effet de compacter le sol environnant, puis de relever la structure en surface ; ces mouvements sont contrôlés par un récepteur laser, fixé sur le bâtiment dont les fondations sont traitées.

Comparaison des effets de la sécheresse sur le sol et du procédé Uretex Injections

Lorsque l'on compare les essais pénétrométriques réalisés au sein d'une même zone avant et après une période aride prolongée, on observe une augmentation de la résistance de pointe

pénétrométrique ; des effets similaires sont observés avant et après l'injection d'une résine à fort pouvoir d'expansion. Les graphiques ci-dessous indiquent les niveaux de résistance observés lors d'essais comparatifs réalisés à Saint-Marin en 1997 et en 2007, au sein de la même zone et lors d'une phase d'expérimentation d'injection de résine.

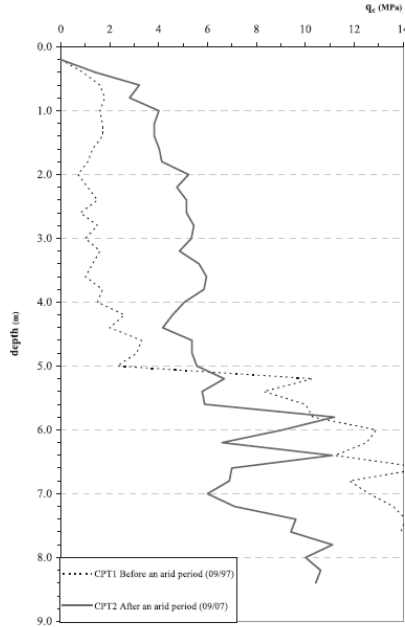


Figure 3. Comparaison d'essais pénétrométriques réalisés avant et après une période aride

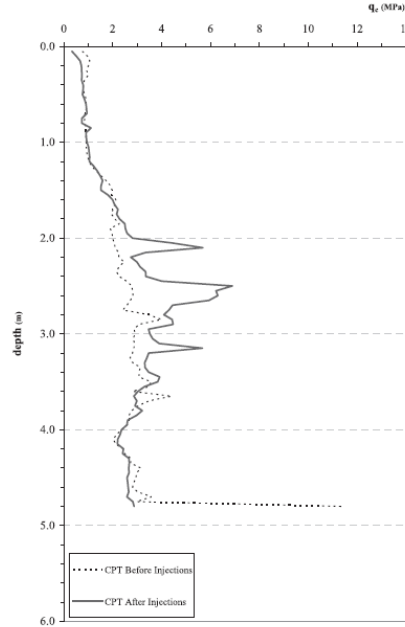


Figure 4. Comparaison d'essais pénétrométriques réalisés avant et après injection de 20 kg de résine localisée à 2,8m de profondeur selon le procédé Uretex Deep Injections (2)

Remarque : la figure 4 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.

Pendant les périodes arides, la diminution de la teneur en eau naturelle w entraîne une perte de volume, dont l'évolution suit une courbe similaire à celle représentée sur la figure 5, qui peut être établie à l'aide d'un essai d'assèchement en laboratoire.

Ce graphique indique que le volume décroît jusqu'à ce que la teneur en eau naturelle atteigne une valeur w_r , en deçà de laquelle toute nouvelle perte d'eau n'entraîne plus de nouvelle réduction du volume.

La teneur en eau naturelle peut être calculée en tant que rapport entre le poids de l'eau et le poids du sol sec :

$$w = \frac{P_w}{P_s} = \frac{\gamma_w \cdot V_w}{\gamma_d \cdot V} \quad (1)$$

Dans le cas de sols saturés ($S_r=100\%$), la variation de volume est égale à :

$$\frac{\Delta V_w}{V} = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \cdot \Delta w \quad (2)$$

D'après cette formule, il est possible de déterminer la variation de la teneur en eau naturelle due à une variation du volume d'eau.

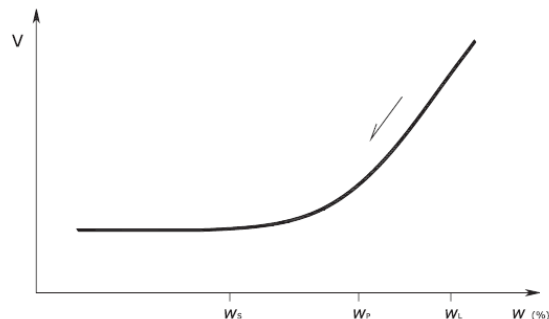


Figure 5. Relation entre volume et teneur en eau naturelle

3. Étude de cas

La procédure décrite ci-dessus peut être illustrée par une intéressante étude de cas, portant sur la consolidation du sol d'assise de fondation d'un bâtiment résidentiel situé à Antibes Juan-Les-Pins, révélant des fissures diffuses dans la structure d'élévation.

Le bâtiment repose sur des semelles continues ayant 0,7 m de profondeur et 0,5 m de largeur. Il est situé dans une zone urbaine, affichant une très légère pente. Il est composé d'un noyau central, cerné d'allées piétonnes. Le bâtiment est de forme rectangulaire et s'élève sur deux étages. Les dommages structurels observés étaient particulièrement concentrés sur le périmètre du bâtiment.

Les premières fissures sont apparues au cours de l'été 2003 et étaient concentrées sur les murs extérieurs. La période extrêmement aride au cours de laquelle sont survenus les dommages et la répartition des fissures suggèrent un tassement dû à la sécheresse.

3.1. Conditions géotechniques

Au cours du mois d'août 2007, une étude géologique a été mise en œuvre, afin de déterminer la nature géologique du sol d'assise de fondation et ses caractéristiques mécaniques, incluant quatre essais pénétrométriques dynamiques, deux sondages, cinq essais pressiométriques, et des essais en laboratoire, tels que la détermination des limites d'Atterberg et de la teneur en eau naturelle, ainsi qu'un essai de retrait et un essai de gonflement œdométrique.

Le sol d'assise de fondation est caractérisé par une couche de 0,6 m de remblai, suivie d'une couche argileuse ($9,7 < E_p < 33$ MPa ; $0,87 < P_p < 2,91$ MPa ; $31 < I_p < 39$ % ; $\gamma_d = 17$ kN/m³) et d'une couche sablo-limoneuse débutant à partir d'une profondeur d'environ 7 m. L'essai réalisé sur l'argile indique qu'une variation de 1% de la teneur en eau entraîne une variation de 0,5% de la hauteur relative, ce qui implique un tassement de 5 mm pour une hauteur du sol d'assise de fondation d'un mètre.

3.2. Opérations de consolidation du sol

Les opérations de consolidation du sol, au-dessous des fondations superficielles par semelle continue du bâtiment principal, de 46 mètres de longueur, ont nécessité quatre jours et demi de travail. La résine a été injectée à trois niveaux de profondeur différents en consolidant les trois premiers mètres du sol d'assise de fondation.

Si l'on considère un facteur d'expansion égal à 4 (Dei Svaldi et al., 2005), le volume moyen de la résine injectée s'est monté, après expansion, à environ 40 dm³ par mètre cube de sol traité. Si l'on considère une unité de volume de sol consolidé, un taux de remplacement

volumique peut être calculé en tant que rapport entre le volume de la résine et le volume du sol, exprimé en % :

$$RV = \frac{V_r}{V} = \frac{40}{1.000} = 0,04 = 4,0\%. \quad (3)$$

En supposant que le volume de remplacement (V_r) dans (3) est égal à la variation du volume de l'eau (ΔV_w), on peut obtenir la variation de la teneur en eau naturelle (Δw).

$$\Delta w = \frac{\Delta V_w}{V} \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_d} = 0,04 \cdot \frac{10}{17} = 0,023 = 2,3\%. \quad (4)$$

Avec la courbe de l'essai de retrait, cette valeur permet d'évaluer à environ 35 mm la future réduction du tassement dû à une nouvelle perte d'eau.

4. Conclusions

À partir de l'analyse des séries pluviométriques, un indice intéressant a été choisi afin d'observer l'évolution des périodes pluvieuses et arides caractéristiques de ces dernières décennies.

Cette tendance a été comparée au nombre de dommages observés et d'interventions de remise en état, afin d'évaluer l'influence de la sécheresse sur la survenue des phénomènes de fissuration.

Les effets d'une technologie de consolidation du sol, impliquant l'injection de résine à fort pouvoir d'expansion, ont été examinés, afin d'évaluer son efficacité dans l'atténuation du gonflement et du retrait des sols argileux.

Une méthode de calcul de la réduction du tassement est présentée.

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 naturelle, mais d'autres effets doivent également être pris en compte. Ils seront analysés lors d'études ultérieures, incluant notamment la restauration de l'état de contrainte au-dessous de la base de fondation, et l'augmentation de la pression de confinement s'exerçant sur le sol d'assise de fondation, la réduction de la perméabilité permettant de limiter les effets de la réhydratation.

5. Références bibliographiques

- 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.
- 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.
- McKee T., Doesken N., Kleist J. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proc. 8th Conference on Applied Climatology*, pp. 179-184
- Pasquetto A., Guerra C., Casagrande M., (2001) Interventi volti all'eliminazione di problemi di cedimenti differenziali occorsi ad edifici siti in aree densamente popolate a mezzo del sistema Solifrac. *Proc. XXI Convegno Nazionale di Geotecnica*, pp. 395-402