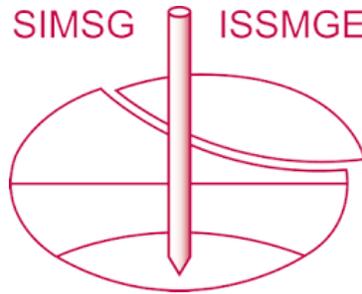


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Approche technique et contractuelle pour l'optimisation des injections d'un parking souterrain

Technical and contractual approach for optimization of grouting for an underground parking

H. Farhat

Arcadis, Agence de Marseille, France

RÉSUMÉ

Dans le cadre de la construction d'un parking souterrain de quatre niveaux sur la commune de la Valette du Var (France), s'est posé, au stade de la conception, le problème de la maîtrise des eaux d'infiltration en fond de fouille. Une approche technique et contractuelle appropriée a été adoptée afin de réaliser les traitements de la façon la plus efficace possible en limitant les injections au strict nécessaire. Cette approche peut être assimilée à la méthode observationnelle. Les aspects techniques et contractuels ont été pris en compte au stade des études de projet, du Dossier de Consultation des Entreprises et pendant l'exécution des travaux. Il s'agit essentiellement des points suivants : (i) montage adéquat du dossier de marché par la mise en place de plusieurs tranches conditionnelles dont le déclenchement a été décidé à la suite des résultats des travaux d'injection et des essais de pompage ; (ii) mise en œuvre d'un phasage et d'une procédure d'injection permettant, grâce au suivi quotidien, une adaptation du maillage et des zones à traiter. Les traitements par injection ont montré leur efficacité puisque les débits d'exhaure mesurés en fin de travaux de génie civil étaient inférieurs à 10 m³/h, ce qui était de l'ordre du cinquième du débit calculé dans les études d'avant projet.

ABSTRACT

When constructing a four-level underground parking structure in La Valette du Var (France), a problem of water infiltration control was handled during the design phase. Both a technical and economical approach was chosen to optimise the soil treatment, limiting grouting to the strictly necessary quantities. This approach would correspond to the "observational method". The technical and contractual aspects were taken into account during the design and construction phases. These points mainly being: (i) the original contract has been divided to a contractual base (firm construction zone) and several conditionals services which are executed only on the bases of the results of the grouting and pumping tests; (ii) due to daily field surveillance, the grouted area and the grouting grid are continuously adapted according to the results obtained on site. This method has proven to be very efficient since the water inflow rate has been limited to 10 m³/h, which was five times less than the rate given by preliminary calculation.

Keywords : underground structure, grouting, observational method

1 INTRODUCTION

La réalisation d'ouvrages de génie civil de grandes dimensions en zone urbaine exige d'importantes ressources financières. Le cas des parkings souterrains, en centre ville ou en périphérie des villes, en est le meilleur exemple. Ces parkings sont de plus en plus profonds et sont, dans la plupart des cas, baignés par une nappe phréatique. Compte tenu des incertitudes sur le comportement des ouvrages géotechniques, les solutions nécessaires à la réalisation des travaux suivant les règles de l'art peuvent s'avérer très onéreuses.

La méthode observationnelle, dont la description est détaillée dans l'Eurocode 7, est une solution adéquate aux cas des ouvrages présentés ci-dessus (Allagnat 2005). Une approche de ce type a été adoptée dans le cadre de la construction d'un parking souterrain. Il s'agit d'un parking de quatre niveaux de sous sols sur la commune de la Valette du Var (France). En effet, lors de la conception de l'ouvrage, s'est posé le problème de la maîtrise des eaux d'infiltration en fond de fouille. Dans ce qui suit sont présentés les aspects techniques et contractuels qui ont permis la gestion du projet au stade de l'étude et pendant la phase exécution.

2 PRÉSENTATION DU PROJET

Il s'agit d'un parking enterré de 408 places sur 4 niveaux de sous-sol. Ce parking est réalisé à l'abri d'une paroi moulée. En surface il est prévu l'aménagement d'une place publique.

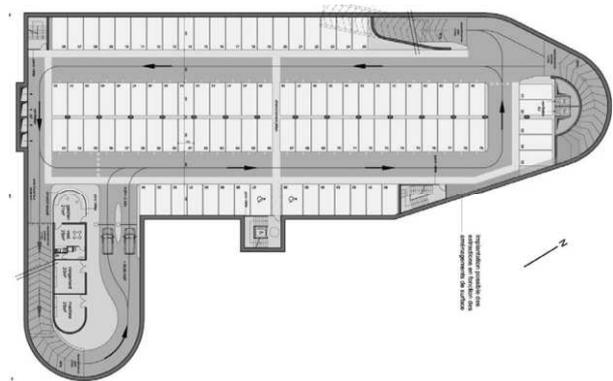


Figure 1. Vue en plan d'un étage courant du parking.

Le Maître d'Ouvrage est la Ville de La Valette du Var représentée par la SEMEXVAL. La Maîtrise d'œuvre est assurée par le groupement des sociétés ARCADIS (mandataire), Atelier du Prado (Architecte) et AUXITEC Bâtiment.

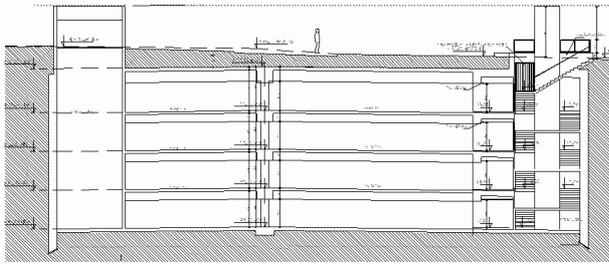


Figure 2. Coupe longitudinale du parking.

3 CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

Les sondages réalisés ont mis en évidence la présence successive des formations suivantes : remblais de faible épaisseur ; alluvions et formations meubles d'altération du substratum sous-jacent ; pélites plus ou moins altérées, pélites gréseuses et grès. Ces terrains appartiennent au substratum du Permien.

Le niveau d'eau a été relevé vers 4 m de profondeur.

Les essais de perméabilité réalisés dans le substratum permien ont donné des valeurs comprises entre 10^{-5} et 5.10^{-5} m/s. Localement une valeur de 10^{-4} m/s a été observée.

Compte tenu des valeurs ci-dessus, il a été demandé la réalisation d'un essai de pompage avec une partie crépinée entre 8 et 23 m de profondeur.

Les différentes interprétations de cet essai (régime permanent, régime transitoire, piézomètres) ont donné des perméabilités comprises entre 5.10^{-3} et 2.10^{-4} m/s.

L'hétérogénéité des valeurs mesurées ainsi que la nature des terrains mettaient en évidence une perméabilité de fissures au sein des grès et marnes raides du Permien.

4 PREVISION DES DEBITS DE DRAINAGE – CONCEPTION DU NIVEAU BAS DU PARKING

Compte tenu des faibles descentes de charge, la solution de drainer sous le niveau bas de l'ouvrage s'est avérée la plus judicieuse.

Les débits de drainage en fond de fouille ont été estimés par la méthode de Davidenkoff (Cassan 1986) qui prend en compte la présence de la paroi moulée mais qui suppose un milieu isotrope.

Pour une perméabilité de 2.10^{-5} m/s, on obtient un débit de drainage en fond de fouille de $55 \text{ m}^3/\text{h}$. Ce débit constituait un seuil à ne pas dépasser. Ce seuil a été imposé par les services publics en charge de l'environnement. Cette limite est inférieure à la valeur imposée par la loi sur l'eau nécessitant une autorisation des services concernés ($80 \text{ m}^3/\text{h}$). Néanmoins, le Maître d'Ouvrage et la Maîtrise d'œuvre ont entièrement adhéré à cette demande par souci de limiter au maximum l'impact de l'ouvrage sur les eaux souterraines.

Compte tenu des valeurs de perméabilité mesurées lors des campagnes de reconnaissance, il n'était pas possible de garantir le débit imposé sans prendre des dispositions adéquates. Un traitement des terrains par injections a donc été jugé indispensable.

5 PHASAGE DES TRAITEMENTS ET PRISE EN COMPTE DANS LE MARCHÉ

Compte-tenu du fait que les perméabilités pouvaient être localement très élevées (présence de fissures ou de fractures) ou au contraire très faibles sans que l'on puisse au stade de l'étude statuer sur la répartition de ces perméabilités, il est apparu nécessaire de prévoir un phasage permettant d'éviter une

généralisation des traitements, généralisation forcément antiéconomique.

Deux dispositions contractuelles ont été envisagées pour pouvoir gérer d'une façon optimale les travaux d'injection. Ces deux dispositions sont les suivantes :

I) le découpage des travaux en tranches fermes et tranches conditionnelles ;

II) la mise en œuvre d'une clause contractuelle de type « gagnant-gagnant » en incitant l'Entreprise à réaliser des économies en lui restituant une partie de ces économies.

La deuxième disposition s'est avérée difficile à mettre en œuvre avec le code des marchés en vigueur (textes régissant les règles d'attribution et de gestion des marchés).

Il a donc été prévu le phasage et les dispositions contractuelles suivantes : i) réalisation de la paroi moulée en périphérie de l'ouvrage - ces travaux ont été contractualisés en tranche ferme ; ii) injection en pied de la paroi moulée - ces travaux ont été contractualisés en tranche conditionnelle (tranche conditionnelle 1) ; iii) réalisation de puits de pompage à l'intérieur de l'enceinte délimitée par la paroi moulée et les injections périphériques - ces essais ont été prévus en tranche ferme) ; iv) injection des terrains sous le futur fond de fouille. Ces travaux d'injection sont réalisés depuis la surface du terrain, avant le démarrage des terrassements. Cette dernière phase a été planifiée dans une deuxième tranche conditionnelle.

Ce phasage permettait de déclencher chaque phase en fonction des résultats des observations et mesures réalisées lors de la phase précédente.

Lors de l'exécution de la paroi moulée, une analyse technique et de délais a été effectuée. Il a été décidé suite à cette analyse de déclencher la tranche conditionnelle 1 correspondant aux injections sous la paroi moulée immédiatement après la réalisation de cette paroi.

Les travaux de mise en œuvre de la paroi moulée et des injections ont été réalisés par l'Entreprise BOTTE FONDATIONS.

6 INJECTIONS SOUS LE PIED DE LA PAROI MOULÉE (JUPE D'ETANCHEITE)

Les forages sous le pied de la paroi moulée ont été réalisés à partir de réservations 102/114 dans la paroi.

Leur espacement était de 1,5 m. L'épaisseur de la zone traitée a atteint 5 m sous le pied de paroi. Les injections dans les tubes à manchettes par passes remontantes de 33 cm. Le dosage pour 1 m^3 du coulis de ciment consistait en : 350 kg du ciment CLK CEM III/C 32,5 PM ES, 30 kg de la bentonite CV15, 860 l d'eau. La densité résultante était de $1,24 \pm 2 \%$, la viscosité de 32 à 38 s Marsch (buse de 4,75 mm) et le ressuage inférieur à 3 % (2 heures). Les critères d'injection sont présentés dans le tableau suivant.

Table 1. Critères d'injection.

Phase	Pression de sécurité (MPa)	Pression à atteindre (MPa)	Débit moyen (l/h)	Volume maximal par manchette (l)
1	3	1,5	600 à 800	70
2	3	1,0	600 à 800	70

Les phases 1 et 2 correspondent au premier et au deuxième passage dans le même forage. Les injections de la jupe étanche ont été réalisées sur toute la périphérie de l'ouvrage.

7 ESSAIS DE POMPAGE DANS L'ENCEINTE DE L'OUVRAGE

Les essais de pompage ont été réalisés après la fin des injections sous la paroi moulée (jupe étanche). Cette campagne d'essai de pompage était prévue dans le marché en tranche ferme.

L'objet de ces essais était de déterminer les perméabilités en différents points de l'ouvrage après la réalisation de la paroi moulée et des injections périphériques.

Cinq puits d'essai de pompage ont été réalisés. Huit piézomètres de contrôle ont été mis en place (quatre intérieurs et quatre extérieurs).

Les essais de pompage ont été effectués suivant la norme NF P 94-130. Sur les cinq essais, trois ont donné des perméabilités aux alentours de 2.10^{-5} m/s. Il s'agit des puits P2, P7 et P8 (voir plan de la figure 3). Le puits P6 a donné par contre une perméabilité de $1,5.10^{-4}$ m/s. Cette valeur est élevée compte tenu des débits recherchés. Le puits P3 a donné une perméabilité de 2.10^{-6} m/s.

Ces essais de perméabilité ont confirmé le fait qu'il s'agit bien de perméabilités de fissures pouvant être très élevées par endroits. Les valeurs mesurées montrent que les perméabilités varient autour de la valeur moyenne de 2.10^{-5} m/s donnant un débit acceptable de $55 \text{ m}^3/\text{h}$.

Néanmoins ces données ont paru peu satisfaisantes pour garantir les débits demandés. Il a été donc décidé de déclencher la tranche conditionnelle 2 concernant les injections sous le niveau du futur dallage.

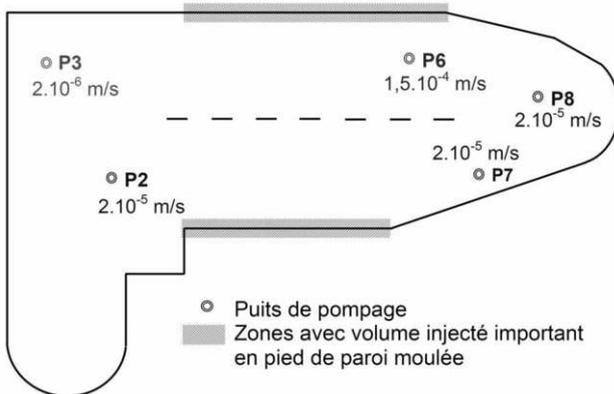


Figure 3. Implantation des puits et des injections importantes sous la paroi.

8 INJECTION DES TERRAINS EN FOND DE FOUILLE

Les informations obtenues pendant les injections en pied de paroi moulée (jupe) et des essais de pompage ont été analysées pour définir ces injections en fond de fouille.

Sur la figure 3 sont indiquées les zones qui ont absorbé des volumes de coulis importants en pied de paroi. Sont également implantés les puits de pompage et notamment le puits P6 qui a donné les plus fortes perméabilités. Compte tenu de ces éléments il s'est avéré évident que les injections en fond de fouille devraient être limitées à une partie de l'emprise de l'ouvrage.

Les injections ont été démarrées dans la zone située au milieu de l'ouvrage.

Il a été décidé également de réaliser ces injections suivant un maillage qui va de la maille primaire à la maille tertiaire suivant les volumes et les pressions enregistrées. La maille primaire était de $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$. Une procédure de suivi en temps réel a été mise en œuvre en collaboration avec l'Entreprise. Ainsi en fonction des observations il a été possible de définir l'implantation des nouveaux forages primaires et de déclencher les forages secondaires voire tertiaires. L'analyse en temps réel s'est appuyée pour chaque forage sur le nombre de passes ayant occasionnés des arrêts sur critère de volume ainsi que sur le volume total injecté.

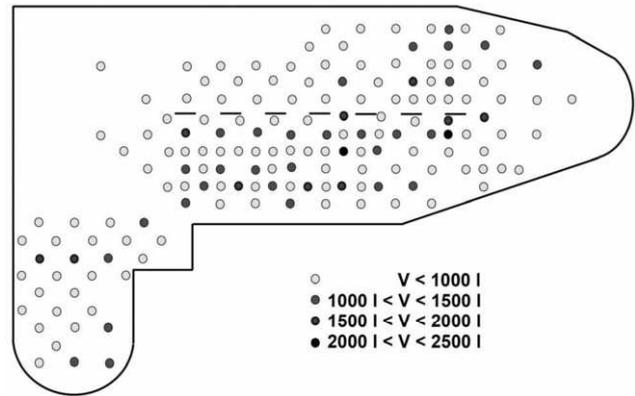


Figure 4. Implantation des forages d'injection.

Sur la figure 4 sont implantés les forages d'injection, colorés suivant les volumes injectés dans chaque forage.

Compte tenu des observations en cours d'injection et du comportement des forages secondaires et tertiaires qui ont montré une diminution de la perméabilité au fur et à mesure de l'avancement des travaux, il n'a pas été jugé nécessaire de réaliser des essais de pompages en fin des travaux d'injection.

Lors des terrassements, il a été possible de visualiser sur des échantillons de Pérites gréseuses le colmatage des fissures par les injections (figure 5).



Figure 5. Colmatage d'une fissure dans un échantillon de Périte

Les mesures de débit d'exhaure en fin de travaux de génie civil ont donné un débit inférieur à $10 \text{ m}^3/\text{h}$, valeur nettement inférieure à la valeur recherchée.

9 CONCLUSION

L'approche technique et contractuelle qui a été mise en place a permis de gérer d'une façon très satisfaisante une partie délicate des travaux en optimisant les travaux d'injection.

La mise en œuvre des tranches conditionnelles dans le marché et leur déclenchement en fonction des observations des phases précédentes est parfaitement dans l'esprit de la méthode observationnelle.

Néanmoins, la mise en application dans les contrats de travaux d'une approche de ce type reste difficile compte tenu des règles légales encadrant les marchés de travaux.

Pour réussir cette démarche ces règles doivent être formulées de façon à permettre des montages adéquats des contrats de

travaux. Les points suivants doivent être tolérés ou acceptés (Allagnat 2005) : accepter d'avoir plusieurs scénarios dans le comportement des terrains et des ouvrages; possibilité de découpage du projet en tranches fermes et tranches conditionnelles; renforcer la notion de sélection des candidats les « mieux disant » en évitant de juger les offres sur le montant cumulé des tranches; se doter des moyens réglementaires permettant d'inciter les entreprises à réaliser des économies; renforcer le rôle du Maître d'œuvre en phase conception et phase travaux et prendre en compte les frais supplémentaires d'études et de suivi que nécessite ce type d'approche.

Notons enfin l'importance du suivi en temps réel des travaux dans le cas des traitements des sols. L'adaptation quotidienne des travaux et des phasages est indispensable pour la réussite du projet.

REMERCIEMENTS

La mise en application de cette approche a été possible grâce à la coopération des différents intervenants et notamment le Maître d'Ouvrage qui a accepté d'introduire ces adaptations dans le marché et le groupement d'Entreprises CAMPENON Bernard - BOTTE Fondations qui a respecté le marché et adhéré à cette approche.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des participants à ce projet et notamment mes collègues de la société ARCADIS qui ont participé à la maîtrise d'œuvre de ce projet.

RÉFÉRENCES

- Cassan, M. 1986. Aide mémoire d'hydraulique souterraine. Paris, Presses ponts et Chaussées.
Allagnat, D. 2005. La méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif des ouvrages. Paris, Presses Ponts et Chaussées.