

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.

Propriétés mécaniques de sables injectés par des coulis de ciment

Mechanical properties of reference sands injected with cement grout

J-C. Dupla – CERMES (ENPC-LCPC)

J. Canou – CERMES (ENPC-LCPC)

D. Gouvenot – Solétanche-Bachy, FNTP, Ecole Centrale Paris

RÉSUMÉ: On présente dans cette communication les résultats d'essais d'injection monodirectionnelle réalisés sur trois sables de référence à partir d'un coulis de ciment, ainsi que la caractérisation mécanique, réalisée en compression simple, du matériau résultant de l'injection après prise. On met en évidence l'influence déterminante des caractéristiques granulométriques de la matrice sableuse à injecter sur le déroulement du processus d'injection, en particulier en termes de filtration et d'obtention ou non d'un régime permanent et l'on montre les liens que l'on peut établir entre les observations faites lors de la phase d'injection (mesure des pressions de fluide le long des colonnes et prise de masse des colonnes) et l'homogénéité des caractéristiques mécaniques du matériau injecté, mesurées le long des colonnes.

ABSTRACT: The results of monodirectional grouting tests carried out on three reference sands with a cement grout are presented in this communication, together with the mechanical characterization of the resulting grouted sand. The significant influence of the grain size characteristics of the sandy matrix to be injected on the grouting process is shown, in terms of filtration and obtention of a permanent regime. The relationship that may be established between the observations done during the injection phase in terms of fluid pressure measured along the columns and mass increase and the homogeneity of mechanical properties of the grouted material are described.

1 INTRODUCTION

L'injection de coulis dans les sols constitue un procédé largement utilisé en génie civil pour de nombreuses applications (Cambefort, 1967 ; Widmann, 1996 ; AFTES, 1998), en vue d'améliorer les caractéristiques mécaniques et/ou hydrauliques de ces sols (Schwarz and Krizeck, 1994). Lorsque l'objectif recherché par le traitement est une amélioration des caractéristiques mécaniques du sol (renforcement du sol en place), en vue de l'implantation d'un ouvrage, l'utilisation de coulis de ciment permet d'obtenir des matériaux injectés après prise de très bonne qualité, tant en termes d'amélioration des caractéristiques mécaniques du matériau initial que de durabilité (stabilité, dans le temps, du matériau injecté) et d'influence sur l'environnement. L'injection de ce type de coulis est cependant relativement délicate, dans la mesure où l'on a affaire à un coulis "granulaire", ou suspension, pour lequel le phénomène de filtration lors de l'écoulement dans la matrice à injecter joue un rôle prépondérant (Delachambre, 1966 ; Azzar, 1997). Il est donc nécessaire que le ciment utilisé pour fabriquer le coulis soit suffisamment fin par rapport à la matrice pour minimiser le phénomène de filtration et obtenir ainsi une bonne homogénéité des caractéristiques mécaniques du matériau résultant de l'injection après prise.

Dans ce contexte, l'objet de la présente communication est de présenter les résultats d'un programme d'essais de caractérisation mécanique de sables de référence injectés dans des colonnes d'injection (injection monodirectionnelle) par des coulis fabriqués à partir d'un ciment de granulométrie usuelle, en mettant en évidence l'influence de la granulométrie du sable à injecter sur l'importance du phénomène de filtration observé au cours de l'injection et son influence sur l'évolution, le long des colonnes, des caractéristiques mécaniques du matériau injecté après prise, mesurées dans des essais de compression simple.

2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET PROCEDURE D'ESSAI

En ce qui concerne le dispositif d'injection proprement dit celui-ci se compose d'une colonne en Plexiglas de 1,10 m de haut et

80 mm de diamètre intérieur équipée d'embases dans laquelle le sable est tout d'abord mis en place par pluviation. La colonne est ensuite saturée à l'eau désaérée, ce qui permet en particulier de mesurer la perméabilité moyenne à l'eau du sable. L'essai d'injection proprement dit est ensuite réalisé grâce à une pompe d'injection à débit réglable, le coulis à injecter étant maintenu en agitation, pendant l'opération, dans un béccher réservoir. L'injection est arrêtée lorsque l'on a fait passer un volume de coulis égal à deux fois le volume des vides du sable dans la colonne ou lorsque l'on atteint un critère d'arrêt en pression, indiquant un phénomène de colmatage et de blocage. Au cours des différentes phases de l'essai d'injection, on mesure les prises de masse de la colonne (celle-ci est placée sur une balance de précision) ainsi que la perte de masse du béccher réservoir, placé lui aussi sur une balance de précision. On effectue de plus des mesures de pression de fluide à cinq niveaux différents équidistants sur la colonne grâce à des capteurs de pression, ainsi que la mesure de pression en sortie de pompe.

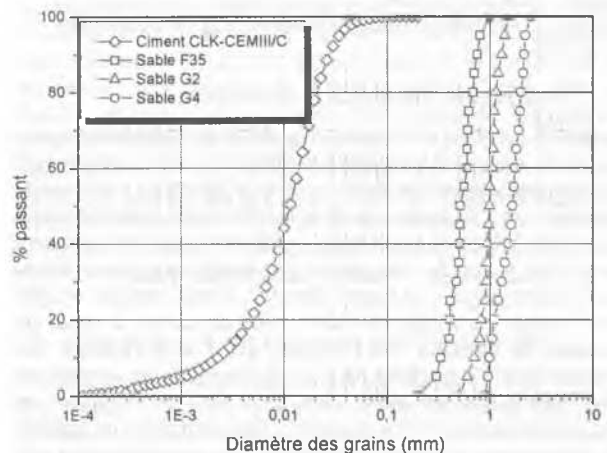


Figure 1 Courbes granulométriques du ciment et des sables utilisés.

À la fin de la phase d'injection, la colonne est stockée sous eau pendant 28 jours pour une période de cure. La colonne est ensuite tronçonnée en cinq éléments permettant de mesurer certaines propriétés physiques du matériau à différents niveaux le long des colonnes et de réaliser des éprouvettes de 80 mm de diamètre et de 160 mm de haut qui sont surfacées puis écrasées en compression simple, permettant ainsi de caractériser l'évolution des propriétés mécaniques du matériau le long des colonnes.

3 RESULTATS TYPIQUES

3.1 Essai d'injection

La figure 2 (a, b et c) présente les résultats d'un essai d'injection typique réalisé sur le sable F35 (sable de silice à grains sub-angulaires, présentant des valeurs de D_{15} et D_{50} de 0,40 mm et 0,50 mm respectivement) à partir d'un coulis de ciment C0 (ciment CLK-CEMII/C, $D_{85} = 29,9 \mu\text{m}$). Les résultats de l'essai sont présentés en termes de l'évolution des pressions de fluide mesurées au cours de l'injection en fonction du temps normalisé t_n (fig. 2.a) sur les cinq capteurs de colonne (numérotés de 1 à 5 en partant du bas de la colonne) et sur le capteur de pompe, ainsi qu'en terme d'évolution de la masse de la colonne et du béccher au cours du processus (fig. 2.b). Le temps normalisé correspond au temps physique qui s'écoule au cours du processus normalisé par le temps nécessaire au remplissage initial de la colonne par le coulis. Une valeur de t_n égale à 1 correspond donc à la fin du remplissage initial de la colonne par le coulis.

En termes de pression de fluide, on observe sur tous les capteurs une pression croissante au cours de l'injection avec des valeurs d'autant plus importantes que le capteur est situé bas sur la colonne, les valeurs les plus élevées correspondant au capteur de pompe. Après le remplissage initial de la colonne par le coulis ($t_n = 1$), les pressions de fluide continuent à augmenter essentiellement sur le capteur de pompe, rendant compte du fait que l'on n'a pas encore atteint de régime permanent. Pour des valeurs de t_n supérieures à 1, on observe une stabilisation progressive des pressions sur les capteurs de colonne, la pression de pompe quant à elle continuant à augmenter fortement.

La courbe de prise de masse de la colonne (fig. 2.c), présente une première phase, jusqu'à une valeur de t_n de 1, durant laquelle le coulis remplit progressivement la colonne en remplaçant l'eau saturant le sable. On observe durant cette phase une évolution linéaire de la masse de colonne avec le temps normalisé rendant compte d'un processus d'injection réalisé à débit constant ($2,5 \text{ cm}^3/\text{s}$). Après le remplissage initial, la masse de la colonne continue à croître, rendant compte d'une accumulation de ciment par filtration dans la colonne et d'un phénomène de colmatage progressif. La prise de masse ne semble pas se stabiliser, ce qui rend compte d'un colmatage progressif de la colonne dans sa partie basse (cohérence avec l'augmentation de la pression de pompe et la stabilisation des pressions le long de la colonne).

3.2 Caractérisation mécanique du matériau injecté

La figure 3 présente les résultats des essais de compression simple réalisés sur les cinq éprouvettes fabriquées après tronçonnage de la colonne d'injection dont la phase d'injection a été décrite ci-dessus. Les éprouvettes sont numérotées par ordre croissant du bas vers le haut de la colonne. On observe donc une tendance claire à diminution des caractéristiques mécaniques mesurées au fur et à mesure que l'on monte dans la colonne, rendant compte d'un matériau de moins en moins riche en ciment à cause du processus de filtration. On remarque que l'on a un assez fort contraste entre l'éprouvette n° 1 (la plus basse) pour laquelle on a des caractéristiques assez fortes (6,4 MPa de résistance en compression simple) et les suivantes, pour lesquelles on observe une décroissance régulière et modérée des caractéristiques mécaniques (décroissance de 3,9 jusqu'à 2,1 MPa de la résistance en compression simple). Cette configuration pourrait rendre

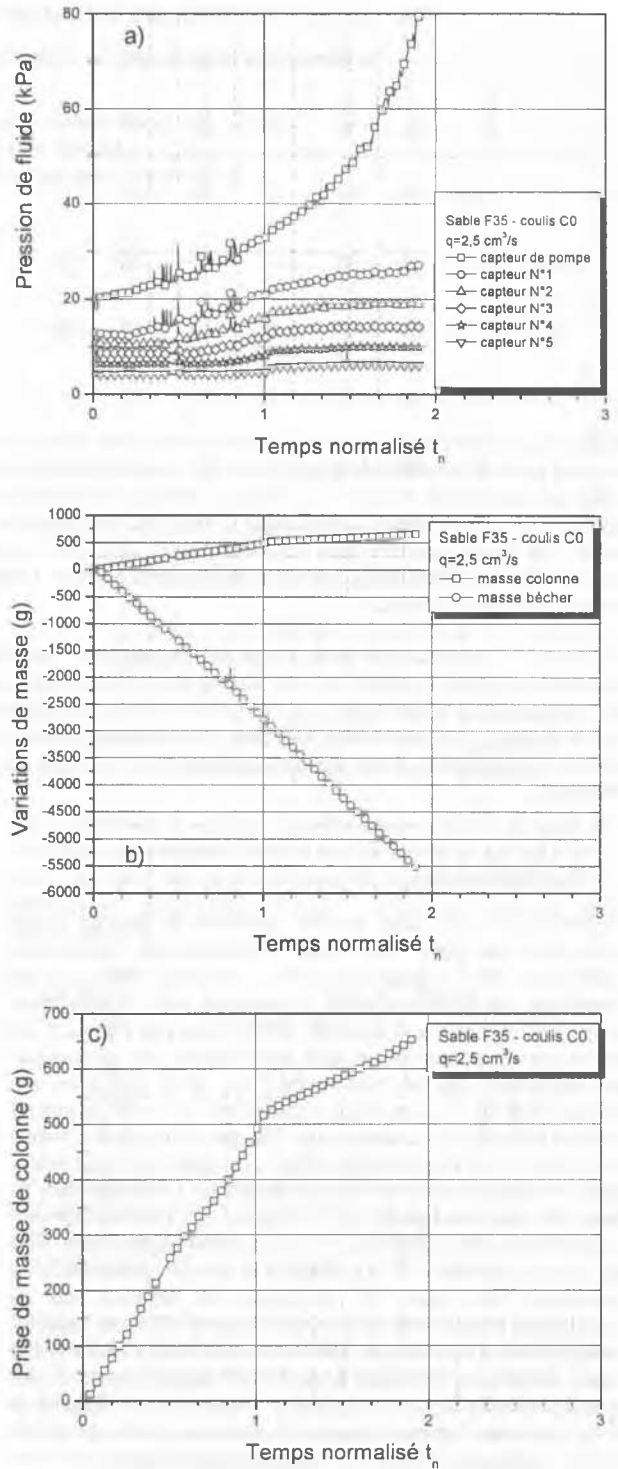


Figure 2 Résultat typique d'un essai d'injection : a) pressions de fluide sur les différents capteurs; b) variations de masse du béccher et de la colonne ; c) variation de la masse de la colonne

compte du fait que l'on avait un matériau beaucoup plus riche en ciment en partie basse de la colonne (éprouvette n°1) par rapport au reste de la colonne, plus homogène, ce qui serait en bon accord avec les observations faites lors de la phase d'injection (stabilisation progressive des pressions mesurées sur les capteurs de colonne, avec augmentation de la pression de pompe, rendant compte d'un colmatage localisé en partie basse). La caractérisation mécanique du matériau injecté après prise donc de retrouver les observations faites lors de la phase d'injection, en terme de régularité du processus, de singularités éventuelles et de filtration.

4 INFLUENCE DE LA GRANULOMETRIE DU SABLE SUR SON INJECTABILITE

L'injectabilité d'un coulis de caractéristiques données dépend fortement des caractéristiques granulométriques de la matrice à injecter et il est important de pouvoir caractériser la matrice la plus fine pouvant être injectée par un coulis de caractéristiques données. Pour le coulis C0 décrit ci-dessus, on a réalisé des essais d'injection sur différents sables, allant du plus grossier (sable G4, D_{50} 1,65 mm) au plus fin (sable F35 déjà décrit). Les résultats correspondants sont présentés ci-dessous, d'abord en termes des mesures réalisées lors de la phase d'injection, puis en termes de caractéristiques mécaniques à 28 jours du matériau.

4.1 Essais d'injection

La figure 4 (a et b) présente les résultats des essais d'injection en termes d'évolution des pressions de fluide mesurées sur le capteur de pompe (fig. 4a) au cours de l'injection, ainsi qu'en terme de prise de masse des colonnes au cours de l'injection (fig. 4b).

En ce qui concerne l'évolution des pressions de fluide au cours de l'injection, les courbes obtenues sont bien différenciées en fonction du type de sable. Pour le sable le plus grossier (G4), on n'a pratiquement pas d'augmentation de la pression de pompe (seulement l'augmentation liée à la différence de masse volumique entre l'eau et le coulis), avec stabilisation de la pression à la fin du remplissage initial ($t_n=1$) rendant compte de l'établissement d'un régime permanent. On est dans le cas où le coulis circule le plus librement dans la matrice très perméable. Pour le sable G2, intermédiaire, on observe une augmentation plus importante de la pression de fluide dans la première phase de l'essai ($t_n < 1$) avec ensuite une stabilisation progressive, mais sans atteindre un palier bien marqué comme pour le sable G4 rendant compte de l'obtention d'un régime permanent. En ce qui concerne le sable F35, l'évolution de la pression de fluide est sensiblement différente, avec un taux d'augmentation plus fort mais sensiblement constant dans la première phase, suivi d'une deuxième phase ($t_n > 1$) où le taux croît très rapidement avec une allure exponentielle de la courbe de pression de fluide, rendant compte d'un régime fortement transitoire allant vers un mécanisme de blocage.

L'examen des courbes donnant la prise de masse des colonnes au cours de l'injection permet de confirmer et de compléter les observations faites à partir des courbes de pression. On retrouve la phase initiale de remplissage pour laquelle on a la même allure de courbe (prise de masse linéaire en fonction du temps) rendant compte d'un processus d'injection à débit constant. Ensuite, dans la deuxième phase de l'essai, l'allure de la courbe de prise de masse de la colonne permet de quantifier l'importance du pié-

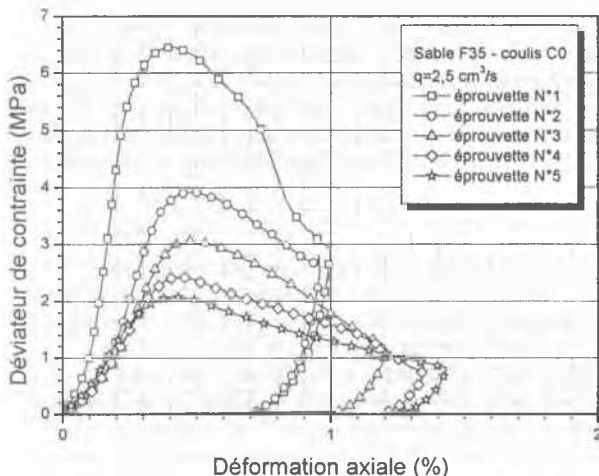


Figure 3 Résultat des essais de compression simple pour le sable F35 injecté

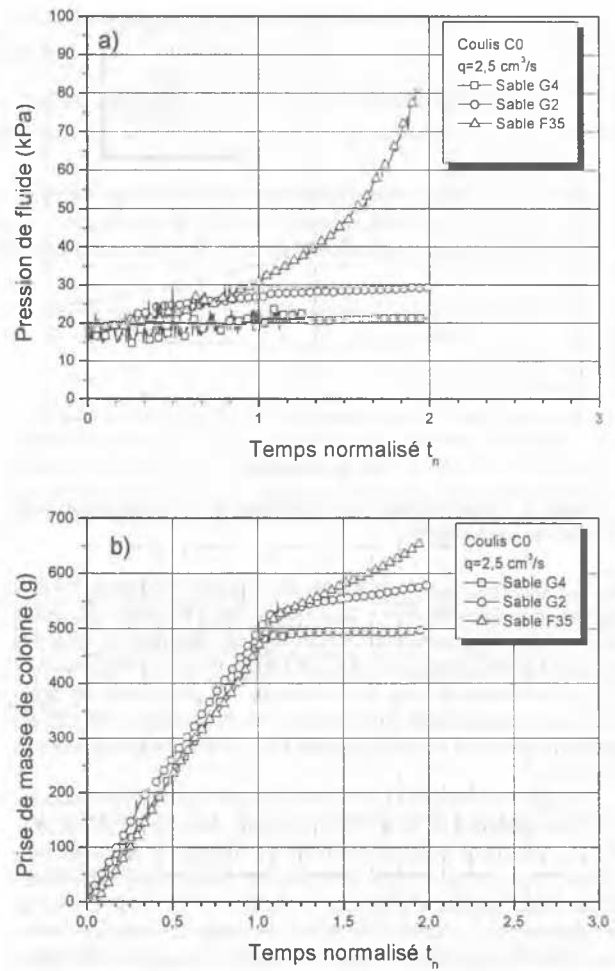


Figure 4 Comparaison entre les trois sables lors de la phase d'injection : a) pression sur le capteur de pompe ; b) prise de masse des colonnes

geage du ciment par filtration dans la colonne. Pour le sable G4, on obtient un plateau horizontal bien défini montrant que l'on n'a pas filtration et que le coulis continue à circuler sans piégeage de grains de ciment, ce qui est bien en accord avec la stabilisation de la pression de fluide rendant compte de l'obtention d'un régime permanent. Pour le sable G2, la masse de la colonne continue à croître avec un taux pratiquement constant, rendant compte d'une filtration significative du coulis dans la colonne sans obtention d'un régime permanent. Ce résultat vient compléter les observations faites sur la courbe de pression pour laquelle la pression mesurée continuait à augmenter en phase 2 de l'essai. Pour le sable F35, on observe une allure qualitative-ment similaire à l'évolution mesurée pour le sable G2, avec cependant un taux de prise de masse en phase 2 plus élevé que pour le sable G2 rendant compte d'un niveau de filtration plus important, en bon accord avec la finesse du sable et les observations faites sur les courbes de pression. Les courbes de prise de masse des éprouvettes constituent donc un outil d'analyse intéressant permettant de compléter les observations faites en termes de pression de fluide et de quantifier l'importance de la filtration dans les colonnes au cours de l'injection.

4.2 Caractérisation mécanique des matériaux injectés

La figure 5 présente les valeurs de résistance à la compression simple obtenues pour les éprouvettes testées en fonction de la position de celles-ci dans la colonne (n°1 à 5, en allant de la plus basse à la plus haute) et ceci pour les différents sables injectés.

La forme des évolutions résultantes donne une bonne indica-

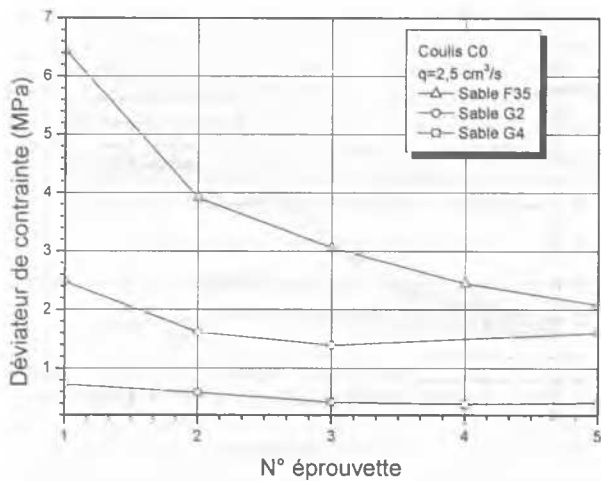


Figure 5 Comparaison des résistances à la compression simple pour les trois sables

tion de l'homogénéité du matériau le long des colonnes. Pour le sable le plus grossier (G4), on obtient une résistance de faible niveau qui évolue faiblement et de manière régulière le long des colonnes (décroissance de 0,8 à 0,4 MPa). Pour le sable intermédiaire, l'évolution le long de la colonne est plus forte, en particulier entre la première éprouvette et les suivantes, avec des résistances dans tous les cas supérieures à celles obtenues pour le sable G4.

C'est pour le sable F35 que l'on observe la plus forte décroissance de résistance le long de la colonne, avec, là aussi une différence importante entre la première éprouvette et les suivantes. L'allure de ces courbes peut être mise en relation avec les observations faites durant le processus d'injection. Le sable G4 est le plus grossier et le moins filtrant et c'est dans ce cas que l'on a donc obtenu le matériau le plus homogène le long de la colonne, ce qui apparaît bien en termes de résistance mécanique. Le sable F35 est le plus fin et le plus filtrant, ce qui se traduit par l'obtention d'un matériau hétérogène avec une concentration en ciment qui décroît le long de la colonne, ce que l'on retrouve bien en termes de résistance mécanique. L'examen des pressions de fluide avait montré, de plus, que l'on avait sans doute un phénomène de colmatage particulièrement important en partie basse de la colonne, ce que l'on retrouve ici avec une éprouvette basse beaucoup plus riche en ciment que le reste de la colonne.

5 CONCLUSIONS

L'étude de l'injection monodirectionnelle d'un coulis de ciment dans des sables de différentes tailles granulométriques a permis de mettre en évidence l'influence de ce paramètre sur l'injectabilité de la matrice, en terme de l'importance du phénomène de filtration du coulis au cours du processus d'injection et de répercussion en terme d'homogénéité du matériau obtenu après prise. La mesure des pressions de fluide à différents niveaux sur la colonne ainsi que la mesure de prise de masse de la colonne au cours de la phase d'injection permettent d'obtenir une bonne image du déroulement du processus et de quantifier l'importance de la filtration en localisant, s'il y a lieu les points singuliers dans la colonne (zones de colmatage préférentielles). On peut ensuite relier de manière assez claire l'allure des courbes donnant la résistance à la compression simple du matériau injecté le long des colonnes aux observations faites lors de la phase d'injection en termes de filtration.

Les résultats obtenus montrent la prédominance des phénomènes de filtration dans le processus d'injection et leur répercussion d'une part sur le déroulement du processus (blocage ou non du processus) et sur la qualité du traitement en termes d'homogénéité.

6 REMERCIEMENTS :

Les auteurs remercient la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP) pour son intérêt marqué et son soutien tout au long du développement de ces travaux.

7 REFERENCES

- AFTES (1988). Recommandation relative à l'emploi des injections pour la réhabilitation d'ouvrages souterrains visitables. N° 146 mars/avril 1998.
- Azzar, G. (1997). Modélisation des injections de coulis de bentonite-ciment dans les sols. Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers de Nancy. 226 pages.
- Cambefort, H. (1967). Injection des sols. Tome 1 : Principes et méthodes. Editions Eyrolles. 394 pages.
- Delachambre, Y. (1966). Contribution à l'étude de l'écoulement d'une suspension à travers un milieu poreux et du mécanisme de filtration. Thèse de doctorat de l'université de Nancy, 99 pages.
- Swartz, L.G. and Krizek, R.J. (1994). Effect of preparation technique on permeability and strength of cement grouted sand. Geotechnical testing journal. Vol. 17, N°4, pp. 434-443.
- Widmann, R. (1996). Commission on rock grouting. Int. J. mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol 33, N°8, pp. 803-847.