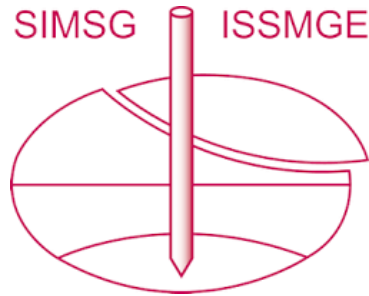


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



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.

Les injections dans le sol et l'environnement

Soil grouting and the environment

D. GOUVENOT, Directeur Technique et Développement, Solétanche Entreprise, Paris, France

RESUME : A une époque où l'on parle beaucoup de protection de l'environnement, il nous a paru intéressant de faire le point sur un domaine assez peu exploré : celui de la protection de l'environnement souterrain. La question est abordée sous deux aspects :

- . soit lors de constructions de Génie Civil,
- . soit dans le cadre des travaux de protection nécessités par les dangers que présentent les déchets industriels, qu'ils soient radioactifs ou non.

Les rapports entre les travaux spéciaux dans le sol (injections, parois moulées) et l'environnement sont donc traités :

- . dans le cadre de la réduction des nuisances, provoquées par les travaux, par la mise au point de matériaux stables et non polluants,
- . dans l'emploi des travaux spéciaux pour la protection de l'environnement au voisinage des stockages de déchets.

L'évolution des coulis d'injection est décrite en partant des coulis classiques. Les nouveaux matériaux mis au point permettent de résoudre le grand problème de la pollution souterraine et particulièrement des nappes phréatiques.

INTRODUCTION

Les matériaux injectés classiquement dans le sol présentent à des degrés divers des instabilités physico-chimiques. Il s'ensuit des risques de pollution de l'environnement. Les coulis les plus stables sont ceux à base de ciment. Les gels de silice destinés à l'injection des matériaux plus fins sont étudiés sous le double aspect de la formulation et de la stabilité dans le temps.

INCIDENCE DES TRAVAUX D'INJECTION SUR L'ENVIRONNEMENT

Rappel des caractéristiques des coulis d'injection classiques

Nous ne parlerons que des coulis de base à savoir :

- . les coulis de ciment, utilisés pour les injections des sables grossiers ou des roches,
- . les gels de silice nécessaires à l'obtention de bonnes caractéristiques dans les sables fins.

1) Les coulis à base de ciment

Ils résultent du mélange d'eau et de ciment auquel peuvent être joints de l'argile, de la bentonite et certains adjuvants (fluidifiants, retardateurs, accélérateurs, etc...).

En général, les coulis de ciment sont considérés comme non polluants à condition que les adjuvants soient bien adaptés à l'environnement.

En conclusion, le choix d'un ciment pour un coulis d'injection se pose donc plus en terme d'agressivité de l'eau vis-à-vis du ciment que l'inverse.

2) Les gels de silice

Il est connu que les coulis de ciment, contenant des grains en suspension, ont un pouvoir de pénétration limité dans les sols. C'est pourquoi, il est fait appel couramment aux gels de silice, pour traiter les sols fins. Il faut rappeler, très sommairement le principe de ces coulis. Dans un silicate de soude, la silice est en état d'équilibre que de nombreux facteurs peuvent rompre (température, pH, etc...). Classiquement, la transformation du silicate en gel se fait à l'aide de réactifs organiques du type esters, qui en libérant des acides neutralisent la soude du silicate (CARON, 1965) (CAMBEFORT, 1967).

Malheureusement, la réaction est rarement complète. De ce fait, des produits chimiques peuvent rester libres et migrer vers les nappes phréatiques. Des précautions peuvent être prises pour limiter ces phénomènes (CAMBEFORT, 1967) (LUONG, GANDAIS, ALLEMAND, 1977), mais des doutes subsistent quant à la stabilité à long terme du gel.

C'est pourquoi de très nombreux procédés ont été proposés pour adapter le mieux possible les gels aux problèmes posés :

- a) gels d'étanchéité à résistance réduite mais stables pour améliorer l'imperméabilité du sol. Pour ces coulis l'utilisation de réactifs minéraux est courante.

- b) gels à neutralisation améliorée qui réduisent les risques de pollution et d'instabilité sans toutefois les annuler complètement.

De récentes découvertes ont conduit à l'obtention de produits stables et non polluants.

Etude particulière des gels de silice

L'essai classique, mais non normalisé, qui permet d'étudier la stabilité d'un sol injecté consiste à le faire traverser par un courant d'eau (sous gradient élevé voisin de 30) et à doser les produits chimiques entraînés par l'eau à la sortie de l'échantillon : essai de percolation (fig. 1 et 2)

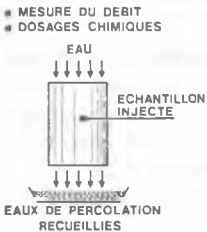


Fig. 1

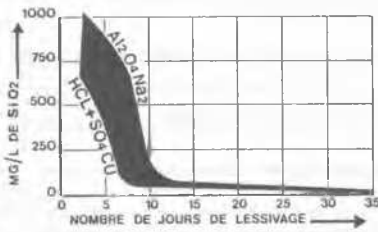


Fig. 2

Schéma d'un essai de percolation

Teneur en silice des eaux de percolation pour différents gels en fonction du temps

Il est intéressant de suivre également l'évolution des débits d'eau (ou la perméabilité k) en fonction du temps.

Cette procédure teste la stabilité du produit injecté sous courant d'eau mais est souvent trop sévère pour rendre compte de la pollution chimique.

A cet effet, on réalise des essais de lixiviation au cours desquels un échantillon est placé dans un volume d'eau donné qui est renouvelé toutes les 24 heures. Les produits chimiques recherchés sont dosés périodiquement.

Deux paramètres importants pour assurer la stabilité des gels ont été mis en évidence :

- la formulation du coulis et le taux de neutralisation (LUONG, GANDAIS, ALLEMAND, 1977),
- la granulométrie du sable injecté (CAMBEFORT, 1967).

Toutefois, en raison des nuisances causées par certains rejets issus des coulis et des difficultés rencontrées pour éviter la synérèse, certains Maîtres d'Oeuvre refusent l'emploi de gels dans les circonstances suivantes :

- recherche d'un traitement dont l'efficacité doit être de longue durée,

- protection absolue de l'environnement et notamment de la nappe phréatique.

Dans ces cas particuliers, les spécialistes peuvent proposer des produits qui présentent encore plus de sécurité par rapport aux gels classiques.

Ce sont ces nouveaux produits que nous allons décrire maintenant.

Les nouveaux coulis non polluants à base de ciment

Récemment, nous avons mis au point des coulis à base de ciment qui présentent les caractéristiques suivantes :

- aucun rejet de produits dans l'environnement,
- très bonne résistance aux eaux agressives grâce à une microstructure très compacte et stable.

- La compacité de la microstructure est donnée fig. 3 et comparée à celle d'un coulis de ciment classique. Ces résultats sont obtenus par la porosimétrie au mercure qui permet d'atteindre la répartition des pores de matériaux en fonction de leur dimension géométrique (PELLERIN, 1980).

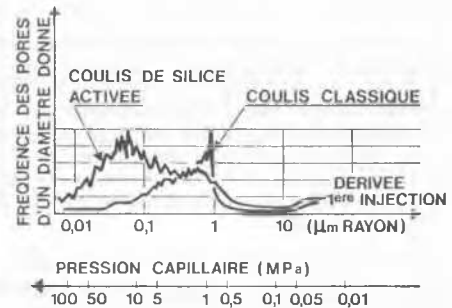


Fig. 3 - Microstructures comparées de deux coulis de ciment par porosimétrie au mercure

La stabilité chimique est bien mise en évidence à l'aide des rayons x car il y a disparition totale de la chaux ainsi que la formation de silicates de chaux hydratés (CSH) bien connue par les chimistes des ciments pour leur insolubilité et leur pérennité.

Les nouveaux coulis de silice

Les nouveaux coulis à base de silice active se composent :

- d'une part d'une liqueur de silice très active où, contrairement aux silicates de soude alcalins commerciaux qui sont en fait

des suspensions instables de micelles de silice ultracolloïdale dans la soude, la silice est dissoute sous forme d'une solution vraie.

- d'un réactif à base de calcium.

A l'inverse des coulis de silice classiques, la silice activée dissoute associée à son réactif minéral ne conduit pas à un gel, mais à une structure cristalline reproduisant exactement celle des ciments.

Les méthodes de détermination des produits formés ont conduit aux résultats suivants :

- . La microscopie électronique à balayage met en évidence les cristaux de CSH occupant l'espace d'une façon homogène, analogue à un ciment base laitier.
- . La diffraction X révèle la composition minéralogique d'un gel de silice, d'un coulis de silice et d'un coulis de bentonite-ciment servant de référence (fig. 4).

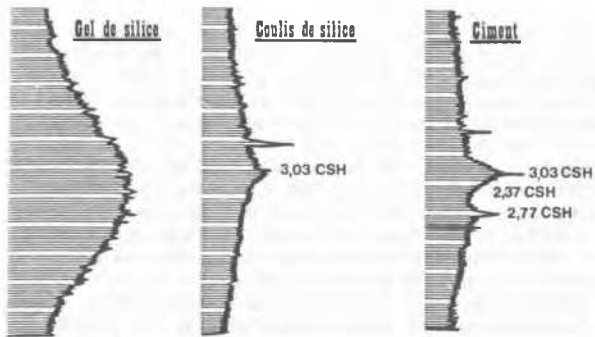


Fig. 4 Diagramme de diffraction X sur :

- a) - Un gel de silice classique
- b) - Un coulis de silice active de conception nouvelle
- c) - Un ciment

Dans le premier cas, le diffractogramme apparaît avec une unique bosse arrondie et l'absence totale de pics, traduisant bien la structure amorphe d'un gel; au contraire dans le deuxième cas, la bosse arrondie correspondant à la structure gel a disparu, des pics apparaissent, notamment celui à 3,03 Å du CSH; ce comportement se rapproche bien de l'allure du troisième diffractogramme du coulis de ciment qui présente également un pic de CSH à 3,03 Å.

3) Conséquences : propriétés des coulis de silice active

. Absence de pollution : d'après les résultats de l'analyse chimique des sous-produits de la réaction, le coulis de silice active apparaît comme un produit d'injection non polluant.

. Stabilité et pérennité : du fait de la nature des produits formés (cristaux totalement insolubles de silicates de chaux CSH) et de l'absence de sous-produits agressifs (Synérèse), le coulis de silice a la stabilité d'un liant hydraulique.

Les essais de lixiviation (fig. 5) montre la très bonne stabilité de ces nouveaux coulis par rapport aux gels classiques.

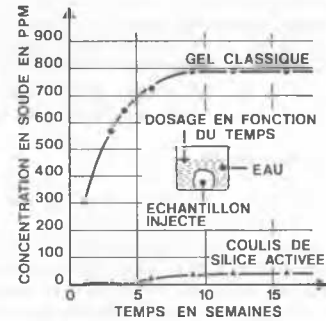


Fig. 5 - Essais de lixiviation comparés sur gel classique et coulis de silice active

Enfin, une propriété très intéressante a été étudiée à l'Université de Vienne : il s'agit de la stabilité sous charge constante ou fluage.

Les essais montrent que les déformations d'un sable injecté au coulis de silice restent très limitées par rapport à celles que l'on obtient traditionnellement avec les gels de silice classiques.

Dans ce domaine de stockage et d'isolation de produits polluants, un nouveau progrès vient d'être réalisé grâce à la mise au point des coulis sorbeurs, qui représentent une barrière physico-chimique complémentaire de la barrière hydraulique.

Position du problème

Le stockage de déchets ou de matériaux industriels variés peut poser des problèmes de pollution du milieu avoisinant, en particulier, pour les nappes aquifères en cas de fuites ou d'infiltrations d'eau.

Une des méthodes désormais classique consiste à créer autour du lieu de stockage une barrière étanche soit par injection de coulis bentonite-ciment soit par création d'une paroi d'étanchéité. Cet écran qui doit s'ancrer dans un substratum étanche, présente en général une perméabilité k moyenne de 10^{-6} à 10^{-8} m/s.

Une amélioration importante a été apportée il y a quelque temps par l'utilisation de matériaux pouzzolaniques activés (cendres volantes, pouzzolanes ou autres), qui améliorent la pérennité et diminuent la perméabilité. Celle-ci peut descendre jusqu'à 1.10^{-9} voire 1.10^{-10} m/s.

LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT PAR LES INJECTIONS : LES NOUVEAUX COULIS SORBEURS

Présentation des coulis sorbeurs

Les coulis sorbeurs sont des coulis classiques à base de liants hydrauliques auxquels l'addition de constituants secondaires confère des propriétés de sorbtion physico-chimique et d'autre part, des propriétés purement chimiques de précipitation des ions indésirables.

1) Etanchéité physique

Les propriétés hydrauliques des liants sont bien connues. L'hydratation de ces liants conduit à la formation de différents cristaux hydratés insolubles tels que des silicates et des aluminates de chaux. Les nouveaux coulis sorbeurs sont conçus pour présenter la microstructure la plus compacte, donc la plus étanche.

2) Rétention chimique

L'addition dans les coulis de certains réactifs chimiques, différents suivant la nature des ions en solution, permet de réduire très fortement la concentration de ces ions nocifs par formation de composés insolubles.

3) Rétention physico-chimique

La rétention se fait par échange d'ions et par adsorption. Les microstructures très fines utilisées dans ces coulis se prêtent très bien à la rétention.

Application des coulis sorbeurs

Les applications sont multiples et deux voies essentielles s'offrent à cette technique :

- obtention des barrières supplémentaires autour des stockages de déchets radioactifs. Cette barrière peut être obtenue aussi bien dans le sol (injection, écran étanche) que dans les containers qui contiennent les déchets. Les cations à sorber sont en général le césium, le radium, le strontium, etc...
- obtention de barrières physico-chimiques qui protègent l'environnement et surtout les nappes phréatiques. Les cations à sorber sont alors le plomb, le mercure, le chrome, etc...

A partir de ces notions de base les propriétés naturelles des différents matériaux ont été exaltées par divers processus :

- . défloculation des argiles pour augmenter les capacités d'échange,
- . addition de matériaux de grande surface spécifique pour accroître les propriétés d'adsorption.

Les réalisations actuelles ont consisté à remplir des containers en béton chargés de déchets actifs et à assurer le remplissage de conduites dans une centrale nucléaire désaffectée.

Le mélange in situ ou dans des malaxeurs de boues industrielles confère aux déchets liquides :

- . résistance (réglable selon les besoins entre 0,1 et 50 MPa)
- . étanchéité (de 10^{-8} à 10^{-12} m/s selon le projet)
- . fixation irréversible des ions selon les procédés décrits ci-dessus
- . durabilité.

CONCLUSIONS

Les travaux de construction ont souvent été réalisés sans grand souci des incidences sur le milieu environnant. Désormais, cette attitude n'est plus de mise et nous pensons que les efforts entrepris pour protéger le milieu souterrain font partie de la qualité des constructions.

Ainsi, les coulis d'injection et des parois moulées peuvent être désormais formulés pour apporter la perturbation minimale dans le milieu souterrain notamment vis-à-vis des nappes phréatiques.

De plus, la question délicate et actuelle de la protection de l'environnement vis-à-vis des stockages de déchets qu'ils soient radioactifs ou non peut trouver une solution par l'utilisation des coulis sorbeurs.

L'homme ressent de plus en plus la nécessité de protéger son milieu tout en produisant de plus en plus de déchets d'une très haute toxicité : les spécialistes doivent poursuivre les efforts entrepris. Les réalisations industrielles décrites dans cet article laissent espérer que des solutions sûres et durables peuvent être apportées à la lutte contre la pollution, particulièrement celle des eaux souterraines si nécessaires à l'humanité.

REFERENCES

- CAMBEFORT, H. (1967). Injection des sols, Tome I Principes et méthodes. Edition Eyrolles - Paris
- CARON, C. (1965). Etude physico-chimique des gels. Annales de l'Institut Technique du B.T.P. n° 207-208
- LUONG, GANDAIS, ALLEMAND (1977). Comportement mécanique des sols injectés aux produits chimiques. Annales de l'Institut du B.T.P. n° 354
- PELLERIN, F.M. (1980). La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 106.