

Etude de la propagation de coulis de ciment dans les milieux poreux

Abdelghafour AÏT ALAÏWA

GeM. – Institut de recherche en Génie civil et Mécanique – Ecole Centrale de Nantes –
1, rue de la Noë BP 92101 44321 Nantes Cedex 3

RESUME. Au cours des vingt dernières années, la technique d'injection de sols a évolué pour traiter un large éventail de sols. Quand un coulis de ciment correctement conçu est injecté, il forme des bulbes homogènes avec le sol en place qui densifient et renforcent ainsi le sol environnant. Pour obtenir une injection réussie, la connaissance des conditions hydromécaniques du sol est essentielle. L'amélioration peut être évaluée par le suivi des évolutions de la pression interstitielle et de la prise de masse du massif de sol par des essais de perméabilité. Des expériences de laboratoire ont été entreprises pour analyser l'injection de coulis dans des colonnes de sable de Loire saturées. Elles ont été réalisées afin de souligner l'effet de quelques facteurs principaux : rapport ciment/eau, la densité relative du squelette granulaire sur la perméabilité des sables injectés. Les mesures de pression et de prise de masse ont montré comment le phénomène de filtration se produit dans l'échantillon de sol et détermine l'efficacité du procédé. On propose, ensuite, une évaluation de la concentration employant une technique de traitement d'images. Enfin, des essais de perméabilité au gaz permettent d'analyser la distribution de la perméabilité et de déduire le rayon d'injection.

MOTS-CLÉS : injection, analyse d'images, perméabilité.

ABSTRACT. Over the past twenty years, grouting technology has evolved to treat a wide range of subsurface conditions for construction. When a properly designed cement grout is injected into sand soils, homogeneous grout bulbs are formed that densify and thus strengthen the surrounding soil. For successful grouting, the knowledge of subsurface conditions is important. Ground improvement can be assessed by pressure and weight monitoring and permeability testing. Laboratory experiments were conducted to examine grout injection through Loire sand columns under saturation conditions. They were performed in order to highlight the effect of some key factors: cement-to-water ratio, relative density of the granular skeleton on the permeability of the grouted sands. Pressure and weight measurements showed how the filtration phenomenon occurs in the soil sample determine the efficiency of the process. Besides, an evaluation of concentration breakthrough using image processing technique is proposed. Subsequent the intrinsic permeability was measured by gas permeability and its distribution allows estimating injection radius.

KEYWORDS : grouting, image processing, permeability.

1. INTRODUCTION

L'injection de coulis par imprégnation est un procédé largement utilisé dans de nombreuses applications du génie civil pour améliorer les propriétés mécaniques et/ou hydrauliques des sols. Elle reste pour l'essentiel une méthode intuitive, basée sur l'expérience des concepteurs et des opérateurs. A cela s'ajoute, la disparition progressive, dans le cadre du développement durable, des coulis « chimiques » (silicates, résines) au profil de coulis à base de ciment. Cela a favorisé, depuis quelques années, le développement de recherches dans le domaine des coulis de ciment fin et ultra fin. La difficulté principale avec les suspensions fortement chargées en particules réside dans le phénomène de filtration avec colmatage progressif de la matrice, entraînant à terme le blocage du processus

d'injection. Ainsi l'objectif de cette étude vise donc à une meilleure compréhension des mécanismes contrôlant l'injection de ces types de coulis utilisé en géotechnique.

Pour ce faire, une analyse des facteurs influençant notablement le processus d'injection est mise en œuvre. Elle s'appuie sur un banc d'injection unidimensionnelle permettant de simuler, dans une colonne de matériau de référence instrumentée, mise en place à des densités prédéfinies, d'acquérir les principaux paramètres couramment relevées lors de campagnes d'injection in-situ (pressions de fluide, masses, débits d'injection). D'autres dispositifs ont aussi été développés afin de sonder d'autres paramètres lors de ce processus d'injection afin de mieux capturer le phénomène de filtration très préjudiciable à l'efficacité globale du procédé.

On s'intéresse en particulier à l'influence de l'état de compacité du sable sur les observations expérimentales réalisées. On donne finalement des éléments relatifs aux propriétés de transfert des matériaux injectés évaluées déterminées à partir d'évaluation de champ de concentration via capture optique et des mesures de la perméabilité intrinsèque du sol injecté.

2. PHENOMENE DE FILTRATION

Le terme de filtration englobe, ici, les phénomènes de détachement et de dépôt de particules à l'échelle de l'interface particule-matrice poreuse.

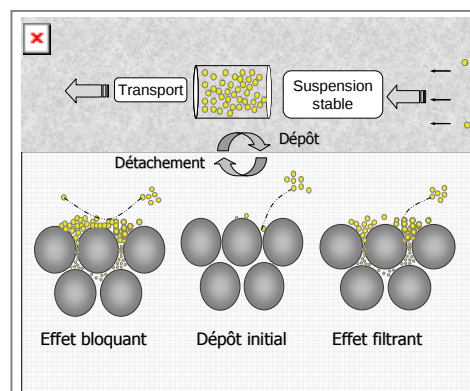


Figure 1 : Phénomènes de rétention pouvant intervenir lors d'une injection unidimensionnelle.

La mobilisation des particules colloïdales à partir de la matrice du sol peut être causée par des perturbations chimiques et physiques du système sol-solution des pores. On décrit, sur la figure 1, les processus et cinétiques conduisant à la mobilisation des particules dans la solution circulant dans la porosité du sol (Kretzschmar et al., 1999, Sharma et al. 1992, Ryan & Elimelech, 1996, Sharma et al., 1992).

2.1. CINETIQUES DE DEPOT

- i) Le dépôt de particules en suspension sur la matrice du sol se fait également en deux étapes :
 - i) le transport de particules colloïdales en suspension vers la matrice du sol par diffusion Brownienne, interception ou sédimentation gravitationnelle résultant des collisions entre particules et matrice et ii) l'attachement des particules colloïdales à la matrice du sol.

Les cinétiques de l'étape de transport dépendent principalement de facteurs physiques comme la taille et la densité des particules colloïdales, des surfaces accessibles pour le dépôt des particules, de la

structure du pore et de la vitesse de circulation du fluide. En revanche, les cinétiques de l'étape d'attachement dépendent surtout de la chimie de la solution et de la chimie de surface des particules. L'attachement des particules est contrôlé par les forces inter-particulaires entre les particules colloïdales et les surfaces de la matrice.

Par ailleurs, la concentration de particules déposées sur la matrice implique une rétroaction sur le transport des particules en solution. S'il y a répulsion entre les particules, les particules déjà déposées sur la matrice repoussent les particules en suspension et évitent ainsi leur dépôt. Dans le cas contraire, quand les interactions entre les particules sont de type attractif, une concentration élevée en solution favorise le dépôt de particules sur la couche déjà présente à la surface de la matrice.

3. PROGRAMME EXPERIMENTAL

3.1. DESCRIPTION DES MATERIAUX ET DES EPROUVETTES

3.1.1. Matériau

Le sable employé pour la campagne d'essais est un sable de Loire, matériau alluvionnaire constitué de particules à l'aspect sphérique comportant également des débris coquilliers de forme allongée. La granulométrie est relativement étalée ($C_u = 3.53$, $C_s = 0.8$). On peut le classer dans la catégorie des sables dits « grossier non uniforme ».

3.1.2. Coulis

Le coulis de ciment ultrafin (Spinor A12, Ciment Originy®) est un liant hydraulique à base de laitier pour coulis d'injection de sol de faible conductivité hydraulique jusqu'à 10^{-4} m/s. Ce type de coulis est utilisé pour la consolidation ou l'étanchement de terrains de faible perméabilité, de massifs rocheux fissurés ou pour le traitement de terrains de granularité moyenne. Il est associé à un superplastifiant dispersant (Sikament FF86, Sika®, plastifiant réducteur d'eau de synthèse) ainsi qu'à un agent stabilisateur. Il est mélangé avec malaxeur colloïdal (VMI-Rayneri® Turbotest).

Les essais réalisés présentent le même rapport massique Ciment/Eau (C/E) pris égal à 0.42. L'agent plastifiant est dosé à une proportion massique d'environ 3.3%. Les mesures de fluidité et de stabilité effectuées sur des échantillons de coulis pour chaque essai montrent que la suspension chargée obtenue présente un caractère suffisamment dispersée et stable pour être considéré comme un mélange homogène pendant toute la Durée Pratique d'Utilisation (cône de Marsh 30.6 s 8% de ressuage après 8h, DPU 20 min) bien supérieure à la durée de l'essai d'injection unidimensionnelle réalisé en laboratoire à 20°C.

3.2. CONFIGURATION DES ESSAIS

Les colonnes de sable sont reconstituées par la technique du compactage par secousses horizontales par couches scarifiées, méthode la mieux adaptée au type de sol employé. La structure obtenue est quasi homogène présente que de faibles gradients d'indice de compacité ($\sigma \approx 0.1$).

Les tubes d'essai employés pour réaliser les colonnes de test sont en plexiglas, d'un diamètre intérieur de 0.10 m, d'épaisseur 0.01m et d'une hauteur de 1.00 m.

Chaque colonne d'essai présente 3 orifices régulièrement espacés de 0,30m assurant la mesure de pression interstitielle au sein du massif de sol durant l'injection. L'éprouvette d'essai comporte à

chacune de ses extrémités une embase maintenue en place à l'aide trois tiges filetées équidistantes. Chaque embase est équipée de joint torique garantissant une étanchéité optimale. Afin d'assurer le contrôle de l'injection, un ensemble de canalisation et de robinets ainsi qu'un système de purge sont mis en place permettant de véhiculer le coulis depuis le réservoir d'injection vers la colonne de test et enfin vers la effluent destinée à collecter le fluide évacué de la colonne durant le processus d'injection (figure 2).

Il est à noter que l'éprouvette d'essai est pourvue à chacune de ses extrémités d'une couche filtrante de graviers de 0.05m destinée à uniformiser le flux d'écoulement.

L'instrumentation complète associée à ce dispositif d'injection s'articule autour de deux systèmes d'acquisition synchronisés :

- Un bloc comportant deux balances SARTORIUS® de 60 kg et de 12 kg de portée maximale présentant respectivement une précision de 1 g et 0.1 g couplées à une batterie de capteurs de pressions AEP de pression limite 1000kPa et de précision relative ± 2 kPa. Cet ensemble est associé à un système d'acquisition WinATS® assurant la synchronisation et le suivi en temps réel des différentes pressions et des différentes prises de masse assurant l'injection,
- un second bloc comportant une caméra CCD au protocole analogique CCIR présentant l'avantage d'une conversion analogique directe des images acquises. Cette dernière est associée au logiciel de capture MATROX Inspector® qui permet l'enregistrement vidéo de l'ensemble de l'essai d'injection réalisé.

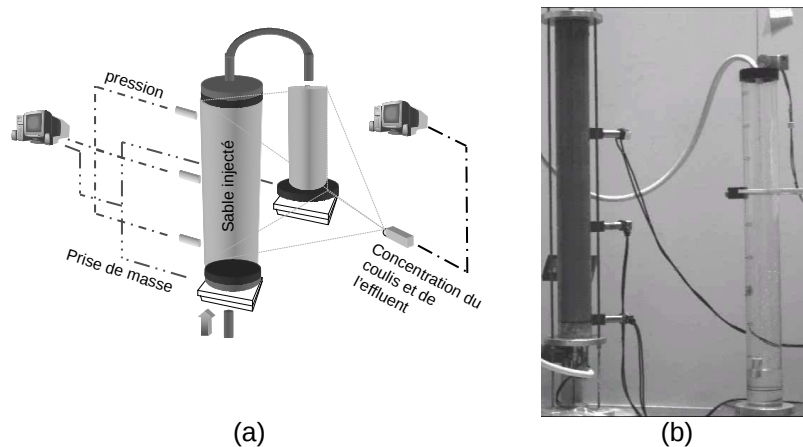


Figure 2 : Schéma fonctionnel (a) et instrumentation associée (b) du dispositif d'injection unidimensionnelle.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. ANALYSE D'IMAGES DES ESSAIS

4.1.1. Préparation des images

Les images obtenues de la colonne durant l'essai d'injection, ont tout d'abord été converties par le logiciel d'acquisition d'images MARTOX Inspector®. Leur résolution est de 768 pixels $\times$ 576 pixels. Ces images ont ensuite été analysées à l'aide du logiciel Matlab® autorisant l'élaboration d'algorithmes de traitement d'images (segmentation [Aït Alaïwa et al. 2007a - NUMOG X] et détection à l'aide de contour actif [Aït Alaïwa et al., 2006 – 2nd ICPS, 2007 - ICEM13]).

4.1.2. Concentration en particules

L'évolution de la concentration en particules dans les effluents ou le long de la colonne, au cours des expériences d'injection, permet de tracer des courbes d'élution en particules. Ces courbes permettront de caractériser la cinétique de mobilisation des particules de ciment. La concentration en particules dans les effluents a été déterminée par une méthode de contre pesée et le suivi optique du fluide effluent. Le principe de la spectrophotométrie repose sur la mesure du rapport entre l'intensité du rayonnement émis par l'appareil et celle du rayonnement après la traversée de la solution. Le spectrophotomètre donne la valeur de la densité optique (A):

$$A = -\log\left(\frac{I_r}{I_0}\right) \quad [\text{Eq. 1}]$$

où I_0 est l'intensité de la lumière incidente et I_r l'intensité de la lumière émergente. La valeur obtenue pour la densité optique est ensuite corrélée à une concentration massique en particules de la solution grâce à une courbe d'étalonnage préalablement établie. La même interprétation peut être faite sur l'intensité de la lumière réfléchie. Pour ce faire, des mesures par spectrophotométrie ont été effectuées sur des colonnes durant l'injection de celles-ci.

Afin de s'assurer de la validité des résultats, plusieurs répétitions de mesures spectrophotométriques ont été réalisées. On a pu constater une faible variation de la réponse de la chaîne d'acquisition vidéo entre éprouvettes de même densité initiale dans la zone de transition. Ce dispositif permet de détecter la progression du front d'injection et de valider les hypothèses couramment employées dans les modélisations numériques de ce type de procédé (figure 3.a).. En effet, le suivi de la zone de transition -autorise l'évaluation de la dispersion hydrodynamique du coulis dans un massif de sol saturé à partir du modèles classique de Convection-Diffusion CDE (Ogata et al., 1961) ou du modèle Continuous Time Random Walks - CTRW (Berkowitz et al., 1995) qui capture aisément l'injection de coulis de ciment et notamment les paramètres de dispersion et de concentration dans les zones situées près du front d'injection (figure 3.b).

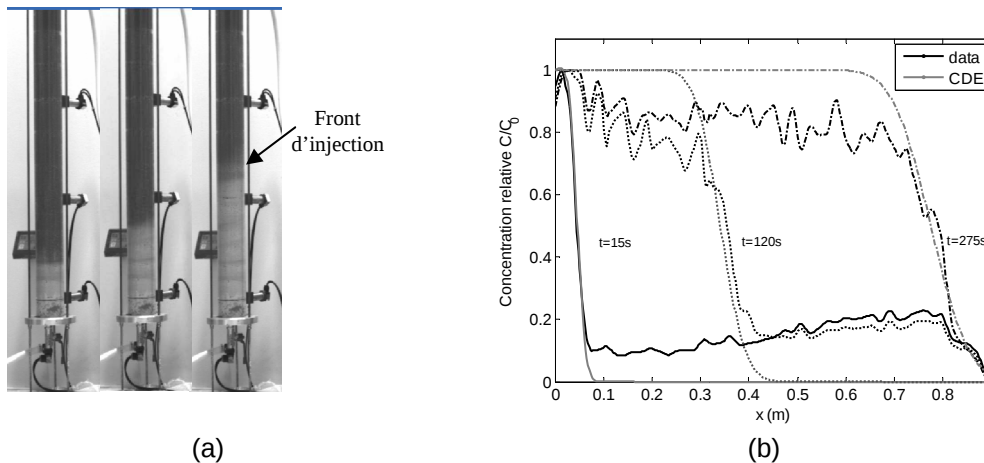


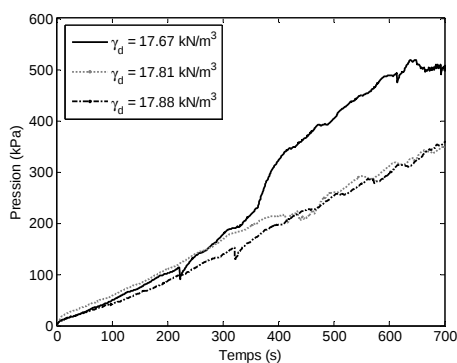
Figure 3 : Suivi du front d'injection d'un essai unidimensionnel par traitement d'images.

, cependant,, qui décroît en fonction de la distance au point d'injection par le milieu poreuxconcept, différent donc. (bruit de fond)

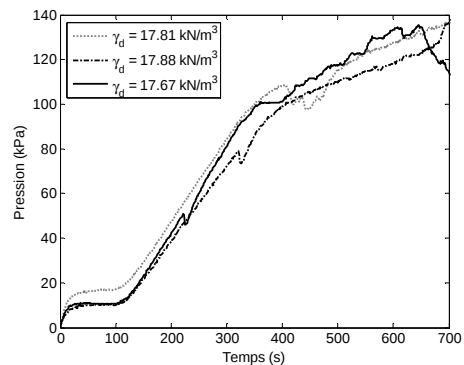
4.2. EVOLUTION DE LA PRESSION INTERSTITIELLE EN FONCTION DE LA DISTANCE AU POINT D'INJECTION

Les figures (4.a-c) montrent l'évolution des pressions interstitielles en fonction de la distance au point d'injection au cours de l'injection. Il ressort que :

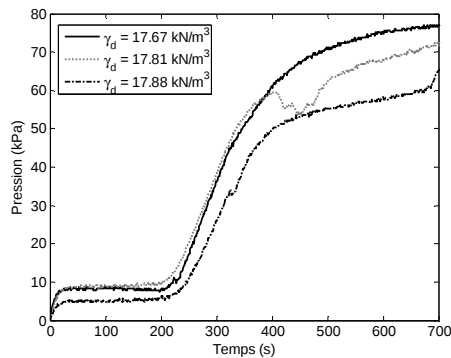
- les particules de ciment s'accumulent dans les différentes couches de la colonne provoquant une augmentation de la perte de charge. La pression aux différents niveaux présente un profil quasi linéaire au niveau du point d'injection (4a.) et un profil multilinéaire par la suite (4b-c).
- une densité initiale trop faible favorise la formation d'un « cake » impliquant une hausse brusque de la pression d'injection dès que le front d'injection du coulis atteint l'extrémité finale de l'éprouvette figure (4.a) suivie d'une croissance plus régulière quasi linéaire. Les fluctuations observées à la figure (4.a) sont liées à la technologie de la pompe d'injection employée (phénomène également observée in-situ).



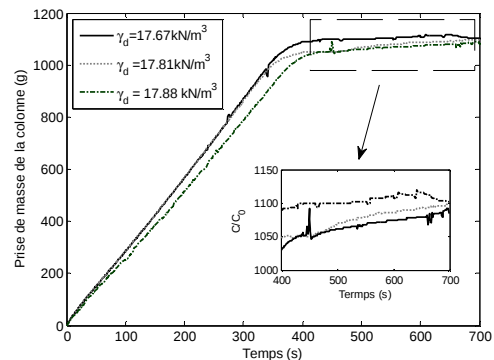
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4 : Evolution de la pression interstitielle au point d'injection (a), à une distance de 0.30 m (b), et de 0.60 m (c) du point d'injection ainsi que de la prise de masse de la colonne de sable de Loire (d).

4.3. EVOLUTION DE LA PRISE DE MASSE DE LA COLONNE

On observe, sur la figure 4.d, que les courbes d'évolution de la prise de masse de la colonne révèlent la présence de deux phases bien distinctes durant l'injection de coulis de ciment. On peut qualifier cette évolution de « bilinéaire ». Les deux phases montrent une augmentation constante de la masse de la colonne durant tout le processus d'injection ce qui est caractéristique du phénomène de rétention de particules.

On peut assimiler la première étape à un remplissage de l'espace poreux par substitution partielle de l'eau liquide saturante par le coulis de ciment injecté (miscibilité du coulis). Le taux de remplissage dans cette partie croît en fonction du rapport Ciment/Eau (C/E). A rapport C/E constant, la prise de masse est inversement proportionnelle à la densité initiale du sol en place (porosité accessible au coulis). Elle est suivie d'une seconde phase où la prise de masse est moins marquée. Dans cette seconde phase, la prise de masse augmente avec la densité initiale en place (influence de la distribution poreuse).

4.4. EVOLUTION DE LA PERMEABILITE LE LONG DE LA COLONNE DE SOL INJECTE

Nous avons donc recours à la perméabilité au gaz d'un sol injecté mesurée de manière similaire à l'essai de perméabilité à charge constante de Darcy. Les essais sont menés et interprétés dans le cadre de l'écoulement purement visqueux en régime permanent et isotherme selon la méthode Cembureau (Kollek, 1989). On tient compte de la compressibilité du gaz s'écoulant, par la loi de Hagen-Poiseuille pour un écoulement de fluides gazeux au travers de corps poreux à capillaires serrés (Picandet, 2001). Le transport de gaz n'étant pas uniquement régi par les chocs entre les molécules de gaz, les chocs des molécules contre les parois (effet Knudsen) et le glissement de molécules le long des parois interviennent. La perméabilité intègre donc l'effet combiné des écoulements laminaires, moléculaires et de glissement. La manière la plus usuelle est basée sur les équations simples de transport auxquelles sont apportées des termes correctifs dues à l'effet de la pression par l'approche de Klinkenberg (Klinkenberg, 1939). Elle permet, à partir d'un jeu de mesures de perméabilités à différentes pressions, d'obtenir la perméabilité intrinsèque du matériau sec (Aït Alaiwa et al., 2007).

La figure 5 montre l'évolution de la perméabilité intrinsèque de trois colonnes de sol injecté après une période de cure de 28 jours. On observe un palier sur les trente premiers centimètres jouxtant le point d'injection suivi d'un accroissement significatif de la perméabilité avec la distance au point d'injection. En fonction de la densité initiale en place, on montre trois comportements distincts.

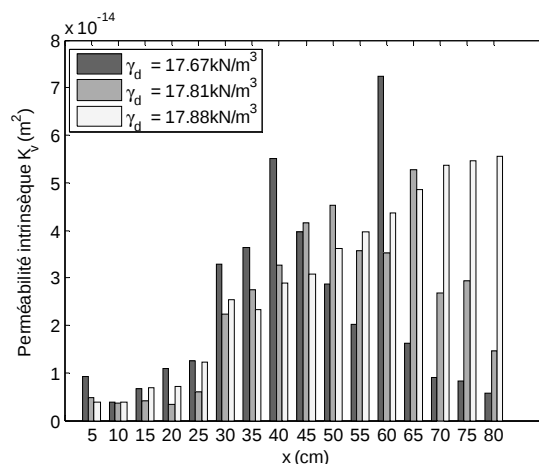


Figure 5 : Evolution de la perméabilité intrinsèque le long d'une colonne de sable de Loire injecté.

Pour de faibles densités, on constate la perméabilité croît très rapidement après le palier. Ce type d'évolution est caractéristique de l'amorce de formation de « cake » très préjudiciable à l'opération d'injection. Pour des densités plus élevées, la figure 5 montre une évolution de type linéaire avec la distance au point d'injection. La dimension finie de l'éprouvette de test ne permet pas une prédiction efficace des phénomènes qui apparaissent très loin du point d'injection (effet de la couche filtrante en

sortie de colonne). On peut, cependant, montrer que le coulis formulé présente une meilleure efficacité pour des densités intermédiaires si l'on tient compte des observations faites durant la phase d'injection.

5. CONCLUSIONS

Nous avons proposé un dispositif expérimental pour étudier le procédé d'injection de coulis de ciment dans les milieux poreux. Il met en évidence l'influence de différents paramètres couramment utilisés dans le cadre des simulations numériques de transport de composant au sein de massif de sol (dispersion, concentration). Les essais présentés montrent également, à partir de l'évaluation d'une des propriétés de transfert du sol injecté, nous pouvons estimer l'efficacité du procédé employé. L'analyse d'images associée à un système d'acquisition autorise le suivi de l'évolution des paramètres d'essai (pressions, masses) de manière assez similaire à celui retrouvé in-situ.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Aït Alaïwa A., Saiyouri N. and Hicher P.-Y. (2006), «Experimental detection of one dimensional grout spread using image processing active contour model ». 2nd International Conference on Problematic Soils, Malaysia.
- Aït Alaïwa A., Saiyouri, N. and Hicher P.-Y. (2007), « Evaluation of grout concentration during grouting process based on convective dispersive flow model », Tenth International Symposium on Numerical Models in Geomechanics - NUMOG X, Greece
- Aït Alaïwa A., Saiyouri N. and Hicher P.-Y. (2007), « MIP and gas permeability measurement on injected soils », 13th International Conference on Experimental Mechanics – ICEM13, Greece.
- Berkowitz B. and Scher H. (1995) «On characterization of anomalous dispersion in porous and fractured media». *Water Resources Research*, 31(6), 1461-1466.
- Elimelech, M. and C. R. O'Melia. (1990). « Kinetics of deposition of colloidal particles in porous media ». *Environ. Sci. Technol.* 24 (10): 1528-1536.
- Klinkenberg, L. J. (1939), «The permeability of porous media to liquids and gases », Production Practice. Bataafsche Petroleum Maatschappij (Amsterdam – The Netherlands) and Shell Development Company (Emeryville – California). p. 200-213.
- Kretzschmar, R., M. Borkovec, D. Grolimund and M. Elimelech. (1999), « Mobile subsurface colloids and their role in contaminant transport ». *Adv. Agron.* 66: 121-193.
- Kollek, J.J., (1989), « The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method – a recommendation », *Materials and Structures*. Vol 22. p.225-230.
- Ogata, A., and Banks, R.B. (1961), « A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media ». *U.S. Geol. Surv., Prof. Pap.* No. 411-A.
- Picandet, V. (2001), « Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons », Thèse de doctorat. Génie Civil. Ecole doctorale de Mécanique, Thermique, et Génie Civil de Nantes. Ecole Centrale de Nantes.
- Sharma, M. M., Chamoun H., Sita Rama Sarma D. S. H. and Schechter R. S., (1992), « Factors Controlling the Hydrodynamic Detachment of Particles from Surfaces », *J. Colloid Interface Sci.* 149 (1): 121-134.