

## Etude des propriétés de transfert des sols injectés

Abdelghafour AÏT ALAÏWA, Nadia SAIYOURI & Pierre-Yves HICHER

*Ecole Centrale de Nantes  
Institut de Recherche en Génie civil et Mécanique  
1, rue de la Noë BP 92101 44321 NANTES Cedex 3  
abdelghafour.ait-alaiwa@ec-nantes.fr*

### Résumé :

*A l'origine, procédé de traitement destiné à l'industrie pétrolière, l'injection des sols granulaires, et notamment l'injection au coulis de ciment, voit sa technologie se développer durant ces vingt dernières années. Lorsqu'un coulis de ciment est injecté dans des massifs de sable, il se forme des bulbes de coulis qui densifient et renforcent ainsi localement le sol environnant. Ainsi pour optimiser cette technique, une bonne connaissance des conditions initiales du sol en place s'avère indispensable.*

*L'amélioration consécutive à l'injection ainsi réalisée peut être évaluée par une série de tests. Des mesures de densité permettent de mieux suivre l'efficacité de l'injection et en particulier le phénomène de rétention de particules indissociable de ce procédé de traitement.*

*Des expériences unidimensionnelles en laboratoire ont été conduites pour étudier l'injection de coulis de ciment ultrafin dans des colonnes de sable de Loire préalablement saturées à l'eau.*

*Ces essais permettent de mettre en évidence l'effet de quelques facteurs clefs : le rapport ciment/eau, la densité initiale du squelette granulaire sur la filtration. La gammamétrie montre ainsi comment l'accumulation de particules de ciment s'opère au sein du massif de sable. Les résultats démontrent une dépendance spatiale de la rétention de particule du sable injecté.*

### Abstract :

*Originally oil industry process, grout injection of the granular soils, and in particular cement grout injection was developed these last twenty years. To optimize this technique, a good knowledge of the initial ground conditions is essential. Density measurements allow following the consecutive improvement of the injection carried out and in particular the filtration phenomenon of particles which occurs in this process. One-dimensional laboratory experiments were carried out to study ultra fine cement grout injection in Loire sand columns initially saturated with water. These tests highlight the effect of the initial density of the granular skeleton on filtration. Gammadensimetry measurement shows thus how the accumulation of cement particles occurs within the soil. The results show a spatial dependence of the filtration.*

**Mots-clefs : coulis de ciment ; gammadensimétrie ; filtration**

### 1 Introduction

Des produits et des méthodes d'injection sont utilisés depuis plusieurs siècles. Que ce soit pour étancher ou pour consolider des structures, des milieux rocheux fissurés ou des milieux poreux, on cherche à remplir les vides à l'aide d'un produit liquide se solidifiant dans le temps. Selon le type de milieu à traiter et l'objectif à atteindre, la formulation de ces produits et leur mode d'injection sont différents.

A base de ciment et d'adjuvants minéraux, les coulis de ciment recommandés dans l'optique du développement durable, ont l'avantage, par rapport aux résines chimiques, d'éviter tout problème de pollution du sous-sol et également de la nappe phréatique. Mais, pour que ces matériaux cimentaires possèdent une pénétrabilité adéquate dans un sol fin, il faut utiliser des

ciments à granulométrie suffisamment fine. Des critères de pénétrabilité doivent donc être définis, tenant compte des paramètres du sol, des caractéristiques physiques et rhéologiques du coulis. Les essais d'injection unidimensionnelle, dans des milieux poreux de référence, permettent de mettre en évidence les différents mécanismes mis en jeu et notamment le phénomène de filtration de particules (Chupin, 2005 ; Saada et al., 2005) indissociable de ce procédé de traitement.

Sur un plan purement géotechnique, on dispose de paramètres permettant de quantifier la porosité ou la granulométrie d'un sol. Mais, vis à vis de l'injection, ces caractéristiques ne sont pas suffisantes pour pouvoir prédire la qualité de l'injectabilité. Toutefois, afin d'avoir une « vue interne » du sol considéré, il est intéressant de déterminer la distribution des particules filtrées au cours de l'injection. Cette vue permet une estimation du pouvoir de pénétration du coulis, facteur essentiel à l'optimisation d'une campagne d'injection.

On présente en premier lieu une étude expérimentale, au laboratoire, de l'injection de sol par un coulis de ciment fin. On s'intéresse à l'évolution de la densité apparente du sol après injection en fonction de la densité apparente initiale du sol en place et l'on étudie l'influence de cette dernière sur le pouvoir de pénétration du coulis de ciment.

On expose ensuite une modélisation empirique globale du matériau granulaire injecté en utilisant un modèle de distribution spatiale de type puissance du phénomène de rétention des particules de ciment.

## 2 Programme expérimental

Le dispositif d'injection de colonnes utilisé pour cette étude a été développé au GeM. Il est constitué d'un bâti qui supporte la colonne de sable reconstituée ( $H=1,00$  m,  $\varnothing=0.10$  m). L'injection est réalisée à débit contrôlé à l'aide d'une pompe. La préparation de l'essai se compose de trois étapes :

1. La densification d'une colonne de sable de Loire à des densités apparentes distinctes par couches scarifiées et vibrées par secousses horizontales,
2. La saturation à l'eau de l'ensemble de la colonne,
3. L'injection au coulis de ciment (Spinor A12, Ciments d'Origny) de manière ascendante de la colonne de sable.

Pour cette étude, une formulation unique du coulis à une concentration massique en ciment de  $C/E = 0,36$  est présentée. Une fois la colonne injectée, elle est stockée dans un milieu humide (HR 100%, T 20°C) pour une période de cure de 28 jours. A l'issue de cette période, la colonne est scrutée au gammadensimètre sur toute sa longueur.

Les mesures de masse volumique réalisées permettent alors de suivre la répartition de la prise de masse (filtration du coulis) dans une colonne de sol injecté. Cet essai, non destructif, applicable in-situ autorise également l'étude du rayon d'action du procédé de traitement.

### 2.1 Principe de la mesure de la densité

La méthode de mesure est basée sur l'atténuation par la matière de photons gamma émis par une source radioactive de Césium 137, d'énergie 0,662 MeV, après traversée d'une épaisseur  $x$  de matériau. Le nombre  $N_0$  de photons incidents et le nombre  $N$  (en coups par seconde) de photons recueillis sont reliés par la loi de Lambert :

$$N = N_0 \exp(-Z \cdot \mu' \cdot \rho \cdot x) \quad (1)$$

où  $\mu'$  est le coefficient d'absorption massique du matériau, pour l'énergie du rayonnement considéré ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ),  $\rho$  est la masse volumique du matériau ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ),  $x$  est l'épaisseur du matériau (cm) et  $Z$  est le coefficient de correction défini par la géométrie de l'appareil.

La masse volumique est donc donnée par la relation :

$$\rho = (-) \frac{1}{Z \cdot \mu' \cdot x} \ln \left( \frac{N}{N_0} \right) \quad (2)$$

La connaissance de  $Z$  et  $\mu'$  (Berger et Hubbell, 2001) et la mesure de l'épaisseur  $x$  du matériau permettent de calculer la masse volumique  $\rho$ .

## 2.2 Dispositif expérimental

Les mesures sont réalisées à l'aide d'un banc gamma vertical. Il est composé de l'émetteur (source radioactive de Césium 137) et du récepteur (scintillateur), placés de part et d'autre de l'éprouvette à étudier. Le scintillateur permet de convertir les photons gamma en impulsions électriques qui sont comptées pendant un temps donné, fournissant ainsi un taux de comptage en coups par seconde (*cps*). L'auscultation se fait point par point ou en continu, grâce à des dispositifs de déplacement de l'échantillon rectilignes.

Lors de notre étude, les éprouvettes étant cylindriques, l'auscultation se fait par tranche circulaire d'épaisseur égale au diamètre de la collimation. Les temps de comptage nécessaires à la détermination des taux de comptage  $N_0$  et  $N$  sont choisis en fonction de la précision recherchée sur la masse volumique (Gauthier, 1968). Ils dépendent de l'activité de la source radioactive, de l'épaisseur du matériau traversé et sont donnés par des abaques. À la fin de l'essai, la masse volumique est calculée à partir des taux de comptage  $N_0$  et  $N$  recueillis et des valeurs de  $x$ ,  $Z$  et  $\mu'$ .

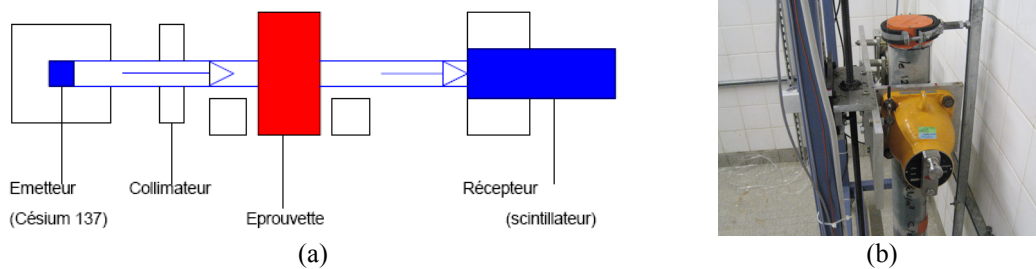


FIG. 1 – Chaîne d'acquisition du banc de gammamétrie (a) et son instrumentation associée (b).

## 2.3 Méthodologie et précision de la mesure

Pour une éprouvette parallélépipédique le volume de matériau concerné par la mesure correspond à celui d'un cylindre ayant pour hauteur l'épaisseur de matériau traversé et comme base celle d'un cercle de 10 mm de diamètre (diamètre de la collimation du faisceau de photons). Les temps de comptage nécessaires à la détermination de  $N_0$  et  $N$  sont choisis en fonction de la précision recherchée sur la masse volumique. Ils dépendent de l'activité de la source radioactive, de l'épaisseur du matériau traversé et sont donnés par des abaques. A la fin de l'essai, la masse volumique est calculée à partir des taux de comptage  $N_0$  et  $N$  recueillis et des valeurs de  $x$ ,  $Z$  et  $\mu'$ . La précision de la mesure de masse volumique est donnée par (Khelidj et al., 2002):

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta Z}{Z} + \frac{\Delta\mu'}{\mu'} + \frac{\Delta x}{x} + \sqrt{\left( \frac{2}{N_0 \cdot t_0} + \frac{2}{N \cdot t} \right)} \quad (3)$$

Les erreurs sur  $Z$  et  $\mu'$  sont négligeables devant celle commise sur  $x$ , qui reste faible (de l'ordre de 0.001 pour une épaisseur voisine de 100 mm). La plus grande partie de l'erreur provient des temps de comptage choisis pour la détermination de  $N_0$  et de  $N$ . A titre d'exemple pour un échantillon de sol injecté de 100 mm d'épaisseur, les taux de comptage  $N_0$  et  $N$  étant respectivement de 6500 et 2400 cps (coups par seconde), des temps de comptage de 600 et 200 secondes donnent une précision sur la masse volumique de 0.50 %.

### 3 Analyse de résultats

Une éprouvette cylindrique de sol injecté (L 1,00 x Ø0,10 m) a été étanchée sur toutes ses faces et mise dans une enceinte à humidité relative et à température contrôlées constantes (100%, 20°C), a été auscultée au banc gammamétrique. Les quarante points de mesure étaient répartis suivant une génératrice, le premier situé au niveau de l'interface couche filtrante<sup>1</sup> et sol injecté, les suivants espacés de 20 mm.

Les résultats mettent en évidence les variations de masse volumique de l'éprouvette en fonction de la distance au point d'injection. Ces variations sont représentatives du phénomène de filtration du coulis de ciment.

#### 3.1 Influence de la densité initiale du sol en place

On observe une évolution monotone de la densité apparente en fonction de la distance au point d'injection. La figure 1 montre deux parties distinctes :

- une première décroissance rapide de la densité apparente proche du point d'injection ( $x < 30\text{cm}$ ),
- une faible variation de densité est détectée par la suite.

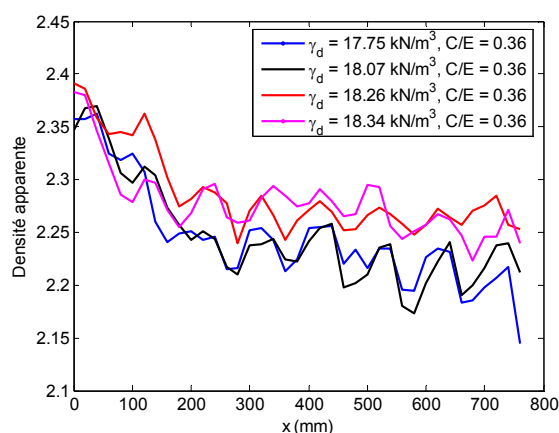


FIG. 1 – Evolution de la masse volumique le long de la colonne de sol injecté.

De plus, plus la densité initiale du sol en place est élevée, plus la seconde phase tend vers un palier. Dans un massif de sol infini, la valeur de ce palier tend vers la densité initiale du sol en place : absence de filtration. La zone fortement influencée par le processus d'injection reste limitée. Elle correspond à la zone de formation de cake dans les massifs filtrants.

#### 3.2 Modélisation empirique globale

Un modèle empirique d'accumulation asymptotique du premier ordre a été testé. Il consiste à faire l'hypothèse que les particules de ciment s'accumulent dans le réseau poreux en sachant

<sup>1</sup> Il agit d'une couche de gravier de 5cm. Elle permet l'homogénéisation de l'écoulement au sein de l'échantillon.

que le taux d'accumulation est proportionnel à la concentration en coulis encore disponible. Il s'écrit sous la forme suivante :

$$\rho = \rho_{\max} \cdot (1 - A \cdot x^B) \quad (4)$$

Ce type de modèle a déjà été utilisé pour décrire l'accumulation des sédiments dans des réseaux d'assainissement unitaires (Bardin J.-P., 2005). Il s'avère également compatible avec les observations effectuées pour établir des profils densimétriques in-situ après injection.

La figure 2 montre les profils mesurés et ceux fournis par le modèle. Elle montre notamment que la densité initiale n'influence que faiblement la densité maximale du sol injecté  $\rho_{\max}$  au niveau du point d'injection et qu'elle ne dépend que la formulation du coulis.

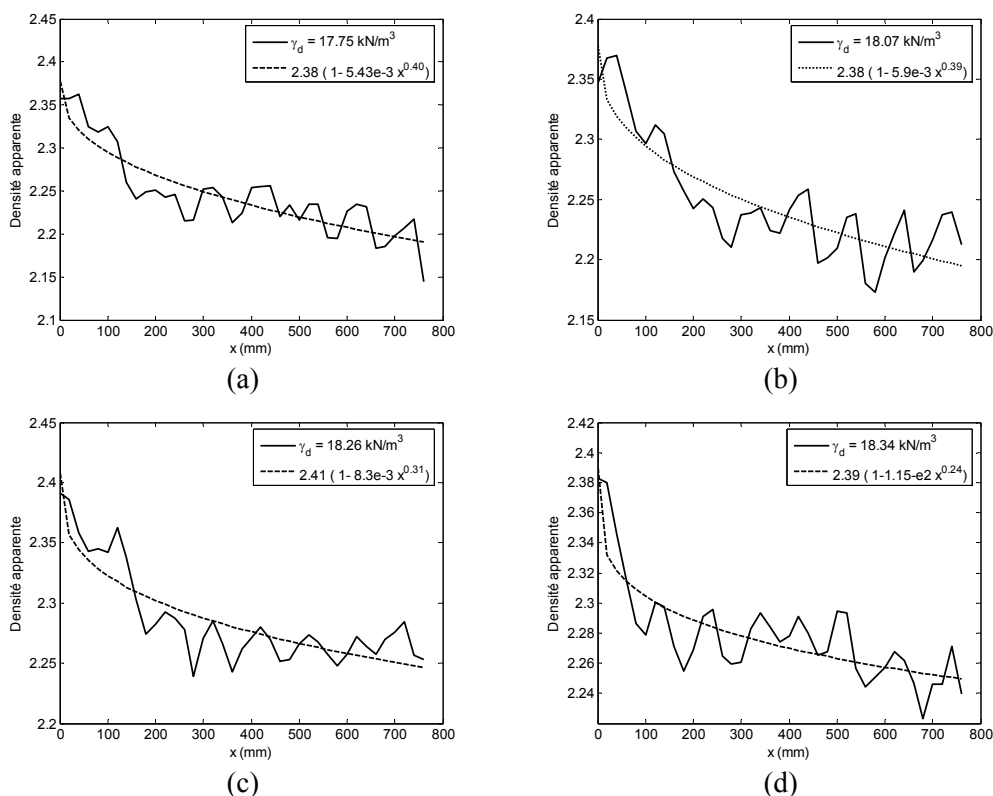


FIG. 2 – Evolution de la masse volumique le long de la colonne.

Dans ce modèle, seuls deux paramètres doivent être calés ( $A$ ,  $B$ ). Ce modèle empirique reste descriptif et n'apporte pas d'information sur les phénomènes physiques en jeu. Il possède néanmoins un intérêt opérationnel, dans la mesure où il permet de prévoir l'accumulation globale des particules de ciment dans un massif de sol homogène à injecter et donc d'envisager une meilleure estimation du rayon d'action du processus d'injection. Il nécessite cependant, pour chaque massif, une campagne de mesure spécifique pour le calage.

Les modélisations numériques actuelles (Chupin, 2005 ; Saada et al., 2005) qui traduisent les phénomènes de transport et de dépôt de particules par filtration tentent d'accéder à un niveau de généralité qui permettra d'en anticiper l'efficacité du procédé d'injection de coulis de ciment. En outre l'évolution de la forme moyenne des profils de densité est restituée. Cependant la complexité des phénomènes mis en jeu, résultant de la combinaison de nombreux mécanismes élémentaires, impose de chercher à les étudier à une échelle relativement fine, plus fine que

celle traduite par les formulations actuellement disponibles. De nouvelles connaissances sur les lois de comportement (viscosité, perméabilité, filtration) devront, par conséquent, être incorporées au fur et à mesure des expérimentations dans des modèles numériques.

#### 4 Conclusions

Les expérimentations conduites sur les colonnes de sol injecté ont permis d'observer l'accumulation de particules de ciment au sein de la matrice poreuse d'un massif de sol homogène. La masse de ciment retenue présente un maximum au point d'injection et atteint une valeur d'équilibre lorsque l'on s'éloigne du point source en raison d'un changement brutal de régime hydraulique (suspension fortement diluée). L'accumulation se produit avec une réduction critique due à la formation de « cake » au point d'injection. L'atténuation progressive de la pente moyenne du profil de densité jusqu'à une valeur limite d'équilibre faible qui n'est autre que la densité initiale du sol en place : absence de coulis dans un massif homogène infini.

Le profil du dépôt formé par les particules de ciment est fortement affecté par la densité initiale du sol. L'accumulation globale des particules de ciment peut être représentée par un modèle empirique simple de type puissance. Ce modèle descriptif n'explique pas les phénomènes en jeu mais peut présenter un intérêt opérationnel. Les résultats fournis par le modèle dépendent des jeux de données utilisés pour leur calage, ce qui constitue un inconvénient pour leur transposition directe à d'autres sites. Un des facteurs les plus difficiles à déterminer est la densité à l'entrée du massif de sol à injecter en raison de la présence d'un filtre jouant le rôle d'interface entre la couche filtrante et le sol en place.

A partir des éléments présentés dans cet article, la deuxième phase du programme de recherche établi aura notamment pour but d'accroître la base de données expérimentales en effectuant des suivis d'injection sur plusieurs formulations de coulis, différents débits d'injection, pour obtenir des profils de densité de manière à étudier l'effet du débit et des propriétés rhéologiques du coulis d'injection sur le taux d'accumulation,

#### Références

- Bardin J.-P., Bertrand-Krajewski J.-L., Gibello C. 2005. Accumulation et chasse des sédiments dans un collecteur unitaire, *TSM*, n° 10, p. 81-95.
- Berger, M. J. et Hubbell, J. H. 2000. Photon attenuation coefficients. In *Handbook of Chemistry and Physics*, pages 10.207—10.211. C.R.C. Press, 81st édition.
- Chupin O., 2005. Ecoulement et transport couplés en milieux poreux saturés : application à l'injection des sols », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes - GeM, p.188.
- Gauthier, C. 1968. Optimisation des mesures de rayonnement : application aux mesures de masse volumique par gammadensimétrie. Rapport technique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Khelidj, A., Baroghel-Bouny, V., Bastian, G., Godin, J. et Villain, G. 2002. Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages : détermination expérimentale des gradients résultant d'une interaction hydratation-séchage dans une dalle en béton. Etudes et Recherches des L.P.C., série Ouvrages d'Art OA39. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Saada Z., Canou J., Dormieux L., Dupla J.-C., Maghous S., 2005. Modelling of cement suspension flow in granular porous media, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 29, p. 691-711.