

Modélisation physique du blocage d'un écoulement d'eau dans un sol par injection d'un produit de colmatage

Physical modelling of blocking phenomenon, by injection of a clogging product, of water flow through soils

Truong Q.Q., Dupla J.-C., Canou J.

Université Paris-Est, ENPC, Laboratoire Navier, Marne-la-Vallée, France

Chevalier C.

Université Paris-Est, IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France

Chopin M.

Geomechanical Consult. Intern., Lausanne, Suisse

Fry J.J.

EDF-CIH, Savoie Technolac, Le Bourget-du-Lac, France

RESUME : On présente la problématique du blocage d'un écoulement d'eau dans un sol à partir d'un produit de colmatage. Celle-ci est abordée à partir d'une modélisation physique unidimensionnelle du phénomène, basée sur des essais d'injection localisée, en conduite d'écoulement. Les essais sont réalisés à partir d'un dispositif prototype développé dans le cadre du projet national ERINOH consacré à l'étude des phénomènes d'érosion interne dans les sols. La problématique concerne la possibilité de blocage d'un écoulement d'eau parasite sous une digue ou un barrage, pouvant évoluer vers la rupture de l'ouvrage par érosion interne et renard hydraulique. Après une présentation du dispositif d'essai et du protocole expérimental associé, on présente un résultat typique obtenu sur un gravier de référence à partir de l'injection d'un produit composé d'un mélange binaire de bentonite et d'un filler spécifique, caractérisé par une viscosité et un seuil d'écoulement. On décrit en particulier le mécanisme de blocage complet de l'écoulement et on donne finalement des éléments relatifs aux conditions de blocage en termes de paramètres pression d'eau et pression d'injection.

ABSTRACT : This communication is related to the issue of permanent water flow blocking process by injection of specific clogging products. The latter is tackled through a physical modelling of the blocking phenomenon, based on localized injection tests in a flow pipe. The tests have been carried out on a prototype experiment developed within the framework of the ERINOH French national project, devoted to research on the internal erosion phenomena in soils. The problematic here concerns the possibility of blocking a parasite flow of water under a dike or a dam, which may lead toward the failure of the structure by internal erosion and piping. After presenting the experimental setup and testing procedure, a typical test is presented and analysed, obtained for injection of a clogging product composed of a blend of bentonite and filler, characterized by a given viscosity and yield stress. In particular, the blocking mechanism observed is described and elements are finally given on the blocking conditions in terms of the parameters water pressure and injection pressure.

MOTS-CLÉS : blocage d'écoulement d'eau, érosion interne, coulis d'injection, renard hydraulique

KEYWORDS : water flow blocking, internal erosion, injection grout, piping

1 INTRODUCTION

Le développement d'écoulements d'eau parasites à travers ou sous les digues et les barrages constitue un problème très important associé aux ouvrages hydrauliques, car ceux-ci peuvent entraîner, par érosion interne et développement de renards hydrauliques, des ruptures parfois catastrophiques de ces ouvrages (voir, en particulier, Fry et al. 1997, Monnet 1998, Lautrin 2002, Bendahmane 2005, Fell et al. 2005). Dans le cas où l'écoulement a déjà pris une ampleur significative en terme de débit, il est donc intéressant d'essayer de développer des méthodes permettant de bloquer rapidement, en temps réel, l'écoulement parasite. Les méthodes envisagées ici sont basées sur l'injection de produits de colmatage capable de résister à l'entraînement par l'écoulement en vue de bloquer définitivement ce dernier. L'objectif est donc de trouver des produits d'injection spécifiques associés à des protocoles d'injection appropriés en vue d'arriver à bloquer des écoulements caractérisés par des débits relativement importants dans des sols relativement perméables.

Dans ce contexte, un travail de recherche a été développé dans le cadre du Projet national français ERINOH, avec pour objectif l'étude, dans une configuration unidimensionnelle

(conduite), des mécanismes de blocage d'un écoulement permanent par injection, localement d'un produit de colmatage. Après une présentation du dispositif d'essai prototype, développé de manière spécifique pour cette recherche, et de la procédure expérimentale associée, on présente et on analyse les résultats d'un essai typique réalisé sur un gravier relativement perméable injecté par un mélange de bentonite et d'un « filler » spécifique, en mettant l'accent sur les mécanismes de blocage observés. Finalement, sur la base d'une série d'essais réalisés, on donne quelques éléments sur les conditions de blocage de l'écoulement, en termes de relations entre les paramètres principaux caractérisant le problème.

2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET PROTOCOLE D'ESSAI

2.1 Dispositif expérimental

Le principe de l'expérimentation est de générer, dans un premier temps, un écoulement d'eau permanent dans une colonne de sol contenue dans une conduite. Dans un deuxième temps, on va chercher à bloquer cet écoulement par l'injection locale d'un produit de colmatage, en un certain point le long de la conduite.

L'objectif est alors d'analyser le processus d'injection et d'essayer de comprendre les mécanismes de blocage éventuel de l'écoulement d'eau. Les principaux paramètres caractérisant un essai sont la nature du sol étudié, les caractéristiques de l'écoulement (débit, pressions, gradient hydraulique) et les paramètres d'injection (nature du produit, pression d'injection). Un schéma fonctionnel du dispositif expérimental est présenté sur la figure 1 où sont indiqués les principaux éléments du dispositif ainsi que l'instrumentation mise en œuvre.

La conduite a une longueur utile de 3 m et un diamètre intérieur de 18 cm. Elle est composée d'un assemblage de six modules en plexiglas de 50 cm de long. Chaque extrémité est équipée d'un module conique permettant d'uniformiser l'écoulement. Le module n°2 en partant de l'amont est équipé d'un connecteur spécifique permettant de réaliser l'injection. La conduite est instrumentée avec six capteurs de pression (numérotés de 1 à 6), dont la localisation est indiquée sur la figure 1. Deux débitmètres (petite et grande capacités) sont installés en amont de la conduite. Un turbidimètre est installé en aval de la conduite et permet d'identifier la sortie éventuelle de particules fines de la conduite. L'écoulement d'eau claire, en circuit fermé, est généré par un surpresseur qui permet d'imposer une pression constante régulée à l'entrée de la conduite quel que soit le débit d'eau circulant dans le système. Un réservoir d'eau claire est intercalé dans le circuit et permet de disposer d'une réserve d'eau suffisante pour assurer l'écoulement. L'écoulement peut être dévié vers un autre réservoir dans le cas où une quantité importante d'eau chargée en particules sort de la conduite.

2.2 Protocole d'essai

La réalisation d'un essai est relativement lourde et implique la réalisation de plusieurs opérations successives. La colonne de sol est tout d'abord reconstituée dans la conduite, par compactage de couches successives en empilant les uns sur les autres, les six modules, en position verticale, sur un support pivotant spécifique. Des grilles sont positionnées à chaque extrémité pour retenir le matériau mis en place dans la conduite. Ce support permet ensuite de basculer la conduite à l'horizontale puis de la reprendre au pont roulant pour la positionner sur son support d'essai. Les modules coniques d'extrémité sont ensuite fixés, l'ensemble étant finalement raccordé au reste du circuit. L'écoulement d'eau permanent est ensuite progressivement établi, en appliquant des paliers croissants de pression en vue de bien saturer le sol contenu dans la conduite.

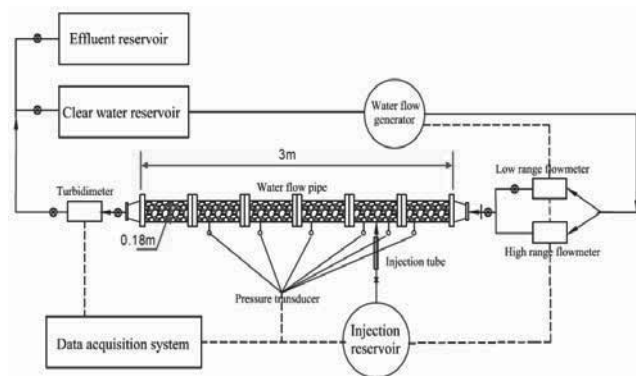


Figure 1. Schéma général du dispositif expérimental

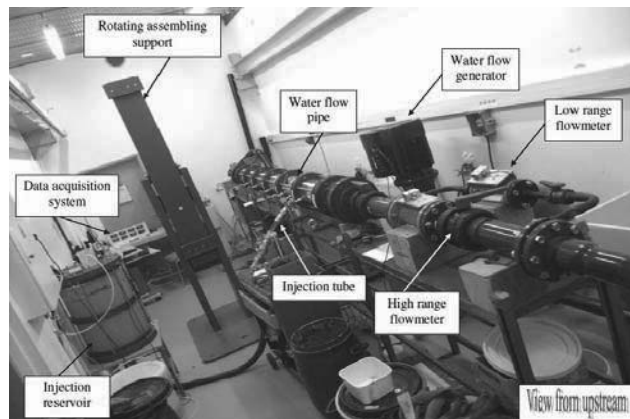


Figure 2. Vue générale du dispositif d'essai, depuis l'amont, montrant la conduite assemblée sur son support, équipée du tube d'injection, le support pivotant, le surpresseur et le réservoir d'injection

Le produit à injecter est préparé en parallèle puis est versé dans le réservoir d'injection. Le tuyau d'injection est saturé en coulis puis raccordé à la canne d'injection. Un robinet permet d'isoler le réservoir du tube d'injection. La pression d'injection souhaitée est ajustée dans le réservoir. L'injection démarre lorsque l'on ouvre le robinet. Pendant l'injection, l'observation visuelle à travers le plexiglas permet d'observer comment se propage le coulis. Pendant l'essai, on réalise l'acquisition des données sur tous les capteurs de mesure, ce qui permet d'obtenir la répartition des pressions le long de la conduite, l'évolution du débit d'eau pendant l'injection et l'évolution du débit d'injection, permettant ensuite de réaliser une analyse complète de l'essai. L'essai est poursuivi jusqu'au blocage éventuel de l'écoulement d'eau. En cas de blocage, on maintient la pression d'eau en amont pendant une certaine durée pour observer s'il n'y a pas de déblocage éventuel au cours du temps.

3 DESCRIPTION D'UN ESSAI TYPIQUE

3.1 Caractéristiques de l'essai

Le sol utilisé pour cet essai est un gravier propre 4-10 mm, de taille moyenne $d_{50} = 7$ mm. Le matériau est mis en place dans un état de compacité moyen, correspondant à une masse volumique sèche de 1,51 t/m³ et une porosité n égale à 0,43. Le débit de l'écoulement d'eau permanent est de 0,49 l/s, correspondant à une pression imposée au niveau du surpresseur de 20 kPa. Le produit d'injection est un mélange de bentonite et d'un filler spécifique (PKA filler) en suspension dans l'eau. La préparation du coulis passe d'abord par la préparation de la suspension de bentonite que l'on doit laisser s'hydrater pendant 24 heures. Le filler est ensuite progressivement rajouté à la suspension, le mélange étant maintenu en agitation. On mesure ensuite les caractéristiques mécaniques du mélange avec un rhéomètre, en termes de contrainte seuil τ_0 et de viscosité μ_p . Le produit injecté ici est caractérisé par un seuil de cisaillement $\tau_0 = 46$ Pa et une viscosité plastique $\eta_p = 41$ mPa.s.

3.2 Phase de génération de l'écoulement

L'écoulement d'eau est progressivement établi en appliquant des paliers croissants de pression sur le surpresseur, par incréments de 50 kPa, jusqu'à une valeur maximale de 350 kPa, correspondant à un débit maximum de 3,23 l/s. Pour chaque

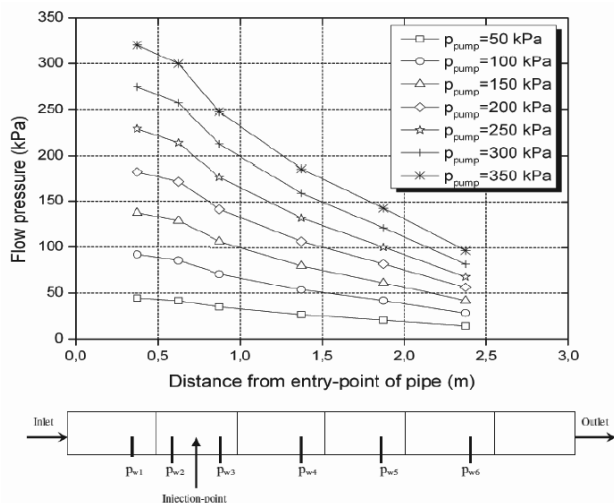


Figure 3. Distribution de la pression d'eau le long de la conduite pour les différents paliers de pression imposés en amont

palier de pression imposé, la distribution des pressions d'eau le long de la conduite est représentée sur la figure 3 en fonction de la distance par rapport à l'entrée de la conduite. Cette phase de l'essai permet de vérifier que l'ensemble du dispositif fonctionne correctement, qu'il n'y a pas de fuite et permet aussi de saturer le matériau en expulsant, pour les pressions les plus élevées, les bulles d'air restant piégées dans le matériau. La pression d'entrée est finalement redescendue jusqu'à la valeur nominale choisie pour l'essai et la phase d'injection peut démarrer.

3.3 Phase d'injection

Pour cet essai, la pression d'injection appliquée dans le réservoir d'injection est de 60 kPa. Dès que le robinet situé à la sortie du réservoir d'injection est ouvert, l'injection démarre. On continue de faire l'acquisition de toutes les mesures pendant cette phase, avec, en plus, la variation de masse du réservoir d'injection qui permet d'avoir accès au débit d'injection ainsi qu'à la masse totale de coulis injecté. La figure 4 présente l'évolution, en fonction du temps depuis le début de l'injection, des pressions d'eau mesurées le long de la conduite ainsi que l'évolution du débit d'eau dans la conduite. En ce qui concerne le débit d'eau, on constate une décroissance rapide de celui-ci jusqu'à l'obtention du blocage complet de l'écoulement au bout de 20 secondes d'injection. L'évolution des pressions d'eau mesurées sur les six capteurs le long de la conduite est en bon accord avec le phénomène de blocage progressif observé. La pression mesurée sur le capteur n°1 augmente régulièrement pendant le colmatage et se stabilise au niveau de la pression imposée en amont par la pompe (20 kPa). La pression mesurée sur le capteur 2 continue à augmenter légèrement au-delà de cette valeur car ce capteur, plus proche du point d'injection, « ressent » la pression d'injection. En aval du point d'injection, les pressions mesurées sur les quatre capteurs décroissent comme normalement attendu. Les trois derniers capteurs (n°4, 5 et 6) se stabilisent clairement autour de la pression atmosphérique, imposée par les conditions aux limites aval (sortie de conduite). Le capteur n° 3 reste significativement au dessus de cette valeur car il « sent » encore la pression d'injection régnant au niveau de la canne d'injection.

3.4 Interprétation du phénomène de blocage

La figure 5 montre, à la fois, l'évolution du débit d'eau et l'évolution du débit d'injection pendant la phase d'injection. Comme précédemment décrit, le débit d'eau décroît

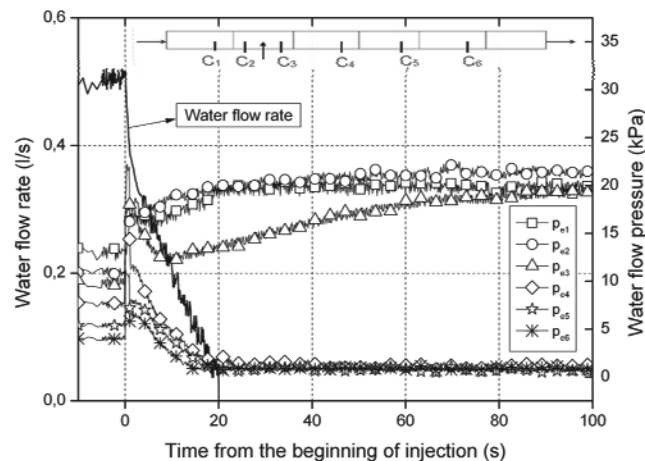


Figure 4. Evolution du débit d'eau et des pressions d'eau le long de la conduite pendant l'injection

régulièrement et rapidement jusqu'au blocage complet de l'écoulement après 20 secondes d'injection. Le débit du coulis est maximum dès le début de l'injection puis décroît lui aussi rapidement. Lorsque le blocage de l'écoulement est atteint, le débit d'injection est encore de l'ordre de 0,1 l/s. Celui-ci continue ensuite à décroître jusqu'à atteindre une valeur résiduelle très faible pour un temps de 100s au bout duquel l'injection est stoppée.

La figure 6 montre une photo du bouchon de blocage formé par le produit injecté après la fin de l'injection. Pour cet essai, le bouchon a une longueur de 74 cm environ, dont 47 cm situés en aval de la canne d'injection et 27 cm en amont de ce même point. Pendant l'essai, on peut visualiser la formation du bouchon, qui commence à se former dans la partie aval puis progresse ensuite vers l'amont, lorsque la partie aval est suffisamment consistante. Dans cet essai, on a injecté environ 8030 cm³ de coulis. A partir de la porosité du gravier ($n=0,43$), on peut estimer le volume de l'espace poreux correspondant à ces 74 cm, à savoir 8100 cm³. Cette valeur est très proche de la quantité de coulis injecté mesurée, ce qui montre que le coulis a bien rempli l'essentiel de la porosité du gravier et a formé un bouchon localisé autour de la canne d'injection.

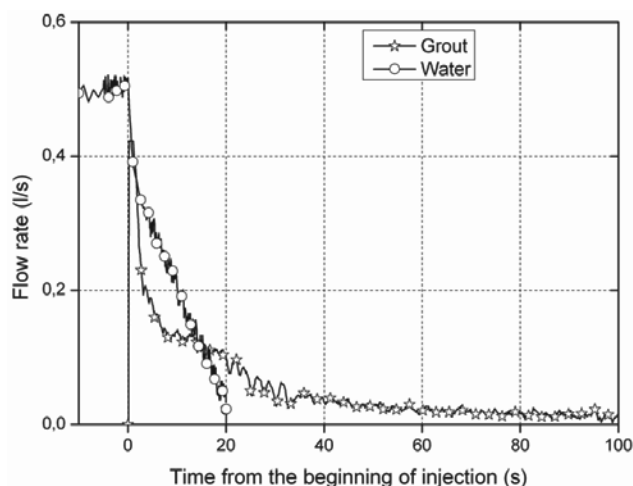


Figure 5 – Evolution du débit d'écoulement d'eau et d'injection pendant la phase d'injection



Figure 6 – Visualisation du bouchon de blocage

4 SYNTHÈSE DU PROGRAMME D’ESSAIS RÉALISÉ

Un certain nombre d’essais ont été réalisés sur le dispositif en vue d’étudier l’influence de différents paramètres d’essai sur les résultats obtenus. En fonction des paramètres d’essai, on observe trois types de comportements : essais avec blocage définitif de l’écoulement, essais avec blocage temporaire et essais sans blocage. Le blocage définitif est défini lorsque, en maintenant la pression d’eau en amont, sur le surpresseur, pendant deux heures, on n’observe pas de déblocage de l’écoulement. Le blocage temporaire correspond au cas pour lequel, après un blocage initial complet de l’écoulement, on observe avant deux heures d’attente, un déblocage progressif de l’écoulement. Le non blocage correspond au cas où on n’arrive pas à bloquer l’écoulement pendant la durée de l’injection.

En particulier, neuf essais ont été réalisés sur le gravier 4/10 mm et le coulis dont les caractéristiques ont été décrites ci-dessus (essais EB1 à EB9), pour différentes combinaisons de pression d’écoulement et de pression d’injection. Les principaux résultats obtenus sont présentés dans le tableau 1 en termes des résultats des essais (blocage définitif, blocage temporaire ou non blocage) et de la longueur des bouchons de blocage obtenus.

Tableau 1. Récapitulatif des résultats obtenus pour un ensemble d’essais réalisés sur le gravier 4/10 mm et le coulis bentonite/filler

Nom d’essai	Pression imposée par la pompe p_p (kPa)	Pression d’injection p_i (kPa)	Observations	Longueur de blocage (cm)
EB1	20	40	Non-blocage	-
EB2	20	50	Blocage définitif	50
EB3	20	50	Blocage définitif	56
EB4	20	60	Blocage définitif	74
EB5	30	60	Non-blocage	-
EB6	30	70	Blocage définitif	102
EB7	40	65	Non-blocage	-
EB8	40	70	Blocage définitif	92
EB9	40	90	Blocage définitif	140

On peut voir à partir du tableau 1 que, pour les essais réalisés dans ces conditions, on n’a pas observé de blocage temporaire (uniquement blocage définitif ou pas de blocage).

Il est intéressant de remarquer que, pour obtenir le blocage de l’écoulement, il faut avoir un différentiel de pression d’au moins 30 kPa entre la pression d’injection (mesurée au niveau du réservoir d’injection) et la pression d’eau amont (mesurée au niveau du surpresseur).

De même, plus le différentiel de pression est important et plus la longueur du bouchon de blocage est élevée. On arrive à une longueur maximale de 140 cm pour un différentiel de 50 kPa (essai EB9).

Il est aussi intéressant de remarquer que, pour un différentiel de pression donné, plus le niveau des pressions est élevé et plus, là aussi, la longueur du bouchon est élevée (comparaison des essais EB4 et EB6).

Par ailleurs, la répétabilité des essais, évaluée à partir des essais EB2 et EB3, est satisfaisante (longueurs de bouchon de 50 cm et 56 cm respectivement).

5 CONCLUSION

On a présenté dans cette communication des essais d’injection de coulis spécifique destinés à bloquer un écoulement d’eau permanent en conduite. Cette recherche a été réalisée dans le cadre du Projet national français ERINOH et a, en particulier, nécessité le développement d’un dispositif expérimental assez lourd qui a pu être entièrement validé.

Sur la base des essais réalisés, on peut déjà dire qu’il est possible de bloquer un écoulement d’eau à partir d’une suspension bentonite/filler assez concentrée, pourvu que la pression d’injection soit suffisamment élevée par rapport à la pression d’eau régnant dans l’écoulement au niveau du point d’injection.

Trois résultats ont pu être obtenus, en fonction des paramètres d’essai, à savoir le blocage définitif de l’écoulement, le blocage temporaire et le non blocage. A partir des essais réalisés dans une configuration unidimensionnelle simplifiée, on peut donc déjà donner certains éléments sur les conditions nécessaires qui devront être respectées, en conditions réelles in situ, pour assurer le succès d’une telle opération.

6 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Projet national ERINOH pour son soutien dans le cadre du développement de ces recherches.

7 RÉFÉRENCES

- Bendahmane F. 2005. *Influence des interactions mécaniques eau-sol sur l’érosion interne*. Ph.D. thesis (french), university of Nantes, 160p.
- Fell R., MacGregor P., Stapledon D., Bel G. 2005 *Geotechnical Engineering of Dams*. Taylor & Francis Edition, 912p.
- Foster M., Fell R., Spannagle M. 2000. *The statistics of embankment dam failures and accidents*. Canadian Geot. J., vol 37 : 1000-1024.
- Fry J. J., Degoutte G., Goubet A. 1997. *L’érosion interne : typologie, détection et réparation*. Barrages & Réservoirs, n°6, 126p.
- Johan L. 2009. *Remedial Injection Grouting of Embankment Dams With Non-Hardening Grouts*. Thesis of KTH Architecture and the Built environment, Stockholm, Sweden, 170p.
- Lautrin D. 2002. *Vieillessement et réhabilitation des petits barrages en terre*. Cemagref éditions, 239p.
- Monnet A. 1998. *Boulance, érosion interne, renard. Les instabilités sous écoulement*. R.F.G., n° 82, p 3-10.
- Raul Flores B., Ramirez-Reynaga M., Macari E.J. 2011. *Internal Erosion and Rehabilitation of an Earth-Rock Dam*. J. of Geot. and Geoenv. Eng., vol. 137, n°2, pp. 150-160.