

Mécanismes élémentaires de l'érosion d'un sol cohésif

F. BRUNIER-COULIN, P. CUELLAR, P. PHILIPPE

IRSTEA Aix en Provence, Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture, unité OHAX.

florian.brunier@irstea.fr; pablo.cuellar@irstea.fr; pierre.philippe@irstea.fr

Résumé :

Les mécanismes élémentaires mis en jeu lors de l'érosion de surface d'un sol cohésif par un écoulement fluide demandent à être mieux connus dans le but d'améliorer la modélisation locale de l'érosion. Cette étude se propose d'analyser le, ou les, mécanisme(s) d'érosion par une approche expérimentale visant à mettre au point des matériaux modèles, pour ensuite les soumettre à des sollicitations hydrodynamiques et mécaniques contrôlées. Dans un premier temps, l'utilisation de matériaux pour lesquels il est possible de faire varier spécifiquement et continûment certaines caractéristiques permettra de déterminer les propriétés ayant une incidence forte sur la résistance à l'érosion et devant être introduites dans des modèles d'érosion. Ensuite, l'analyse plus locale du processus d'érosion permettra d'identifier les mécanismes par lesquels l'action mécanique d'un écoulement fluide conduit à l'arrachement des particules constitutives d'un matériau cohérent.

Abstract:

It is necessary to comprehend better the elementary mechanisms involved during the surface erosion of a cohesive soil by a fluid flow in order to improve the local modeling of erosion. Following an experimental approach, this study presents physical tests on model materials subjected to hydrodynamic stresses and controlled mechanical solicitations, aiming to better understand the mechanisms of erosion. In a first step, the use of materials for which it is possible to adjust specifically and continuously certain physical characteristics, will enable to determine the soil properties having a strong incidence on the erosion resistance and thus being necessary for the erosion models. Secondly, the local analysis of erosion will allow to identify the mechanisms by which a fluid flow leads to the detachment of particles from a cohesive material.

Mots clefs : Erosion, écoulement turbulent, jet impactant, matériaux modèles, sol cohésif.

1 Introduction

L'érosion des sols est un phénomène d'origine naturelle provoquant la dégradation puis le transport solide des couches superficielles d'un sol sous l'effet du vent, de l'eau ou de la glace. C'est

un problème qui concerne de nombreux domaines environnementaux et d'ingénierie. Dans le domaine plus spécifique du génie civil et de la gestion des ouvrages hydrauliques en terre, la maîtrise du risque nécessite de mieux connaître les mécanismes élémentaires mis en jeu lors de l'érosion de surface d'un matériau cohésif par un écoulement hydraulique. En effet, selon les statistiques établies par Foster et al. [1], l'érosion, interne ou externe, est la principale cause de rupture des barrages en remblais et il en est de même pour les digues et les levées. De plus, la Commission Internationale des Grands Barrages recense que 63% des barrages sont en terre, donc soumis à un risque réel d'érosion. La connaissance des mécanismes d'érosion de ces ouvrages est donc cruciale : d'une part pour prédire leur comportement et anticiper les scénarios de rupture, et d'autre part pour permettre de réaliser des ouvrages neufs ou réhabilités plus résistants.

2 L'érosion hydraulique à l'échelle du matériau

L'érosion abordée dans cette étude concerne les interfaces entre solide et liquide, avec une phase solide composée par le matériau constitutif du sol, dont la taille des grains permettra de définir une éventuelle cohésion/adhésion entre eux. Si la contrainte engendrée par l'écoulement de l'eau aux abords de l'interface dépasse une valeur seuil appelée contrainte critique d'érosion, elle va entraîner un départ de matière solide et une modification morphologique du sol [2]. Au-delà de cette contrainte critique, notée τ_c , apparaît un flux de matière arrachée du sol dont on suppose en général qu'il est directement relié à l'écart entre la contrainte hydraulique et la contrainte critique via un coefficient d'érosion noté k_{er} [kg/N.s] ou k_d [m³/N.s] selon que l'on exprime un taux massique ou un taux volumique de matière solide érodée.

Ces deux paramètres, a priori intrinsèques au matériau, permettent ainsi de calculer le taux d'érosion ε_r [m/s], selon une équation simple comme la loi linéaire à seuil postulée par Partheniades en 1965 [3] et majoritairement utilisée depuis ([4], [5] et [6]) :

$$\varepsilon_r = \begin{cases} k_d \cdot (\tau - \tau_c) & \text{si } \tau > \tau_c \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1)$$

où τ est la contrainte hydraulique instantanée en [Pa].

Cette loi très simple se corrèle néanmoins bien avec un grand nombre de mesures réalisées. Cependant, d'autres lois d'érosion ont été évoquées et utilisées, comme une loi de puissance [7] ou une loi exponentielle [8]. Notons également que ces lois sont basées sur une valeur moyenne de la contrainte de cisaillement développée par le fluide qui est reliée, de façon plus ou moins empirique, à la vitesse du fluide et au gradient de pression moyennés dans le temps et dans l'espace. Or, l'écoulement étant en règle générale turbulent, ces paramètres sont très fluctuants. C'est pourquoi une expression statistique de la contrainte de cisaillement peut être utilisée, comme par exemple celle de Van Prooijen et Winterwerp [6] qui est basée sur une distribution Gaussienne de la vitesse.

En pratique, les paramètres d'érosion, τ_c et k_{er} ou k_d , sont ajustés par les lois empiriques précédentes à partir d'essais d'érosion consistant à appliquer une contrainte hydrodynamique à l'interface du matériau et à mesurer, directement ou indirectement, le taux d'érosion. Dans cette étude, nous proposons de réaliser un examen paramétrique afin d'identifier les mécanismes par lesquels l'écoulement fluide va générer le détachement de particules de sol, ainsi que les paramètres pertinents pour rendre compte de la résistance à l'érosion du matériau. Ensuite, les paramètres les plus appropriés pourront être comparés aux paramètres d'érosion et implémentés dans des lois d'érosion enrichies.

3 Matériaux modèles

Cette étude paramétrique nécessite l'utilisation de matériaux modèles pour lesquels il est possible de faire varier certains paramètres de façon continue afin d'analyser leur rôle dans le processus d'érosion. Les différents types de sols, sédiments vaseux, argile, sable, sont constitués d'un matériau granulaire dans lequel les grains sont liés entre eux par une force d'origine atomique, chimique ou électrique, qui vient s'opposer à la déformation ([9] et [10]) et qui agit soit directement entre deux grains en contact (adhésion), soit par l'intermédiaire d'un lien constitué par la fraction la plus fine du sédiment (cohésion). Ainsi, par exemple, il est possible de modéliser un sol granulaire par des grains reliés entre eux par des ponts formés à partir de matériaux de résistance variable (i.e. ponts visqueux, élastiques ou plastiques).

Le premier matériau modèle utilisé pour notre étude paramétrique consiste en un volume déterminé de sable fin qui est mélangé avec différents volumes de paraffine. En mélangeant le sable et la paraffine à une température de 100°C pour liquéfier la paraffine dont la température de fusion est de 62°C, des ponts capillaires apparaissent de façon homogène dans le milieu granulaire. Après refroidissement, ces ponts se solidifient et le sable forme un matériau cohérent friable. La teneur en paraffine permet de faire varier la taille des ponts et donc les forces de contact inter-grains. A l'aide de sollicitations hydrodynamiques adaptées et de tests mécaniques permettant de mesurer ces forces de contacts, il sera possible d'analyser le rôle de la cohésion dans la résistance à l'érosion.

Un second matériau a été utilisé pour le suivi local du mécanisme d'érosion. Il est réalisé sur la base de billes de verre alliées à de l'argile synthétique transparente. La technique déjà utilisée par Philippe et Badiane [11], consiste à ajuster l'indice optique du milieu granulaire et du fluide environnant contenant un colorant fluorescent, et ensuite d'induire cette fluorescence sur un plan laser qui permettra un suivi du processus d'érosion (cf figure 5). Dans la présente étude, le matériau granulaire, composé de billes en verre en borosilicate d'un indice de réfraction $n_d=1.47$, est rendu cohésif par l'ajout d'une l'argile synthétique transparente en quantité suffisante pour former des ponts à chaque contact entre billes. Cette argile est réalisée avec de la poudre de carbopol, un épaississant polymère transparent, mélangé en faible quantité (0.6%) avec une solution aqueuse de même indice optique que le verre borosilicate. Le gel de carbopol est un fluide à seuil présentant une rhéologie complexe de type Herschel-Bulkley [14]. Ce gel n'étant pas miscible avec l'huile, le matériau peut ensuite être saturé lentement avec le mélange d'huile en conservant le même indice de réfraction et en assurant ainsi une transparence totale du milieu. L'ajout d'environ 5.10^{-7} g/g de rouge du Nil, un marqueur fluorescent, permet de visualiser par fluorescence induite la structure interne du matériau à travers un plan laser passant par le centre du jet.

Les ponts formés par le gel entre les billes ont été photographiés afin de qualifier et de comparer la cohésion induite. La figure 1 montre les billes ayant des teneurs massiques en gel d'environ 0.3%, 1.3% et 2.0%. On observe de façon très nette une augmentation de la taille des ponts entre les grains qui accroît la force de cohésion inter granulaire.

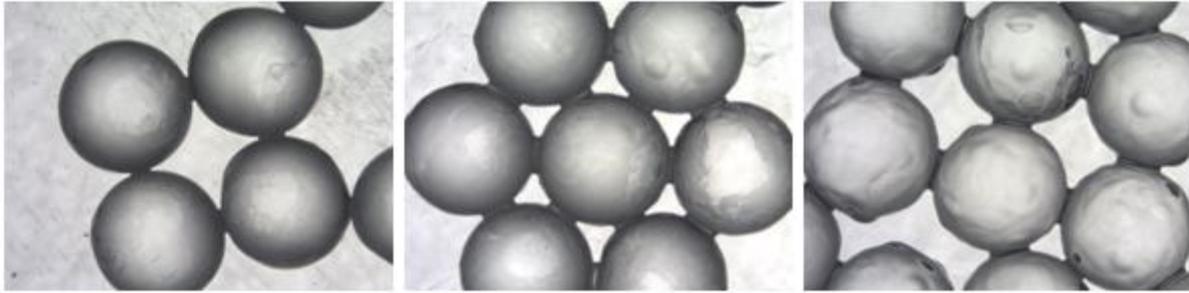


Figure 1 : Billes de verre borosilicate d'un diamètre de 3mm mélangées (de gauche à droite) à 0.3%, 1.3% et 2.0% de gel de carbopol.

4 Dispositifs et méthodologie

4.1 Caractérisation du sol par des essais mécaniques

Afin de rechercher une possible corrélation entre les différents paramètres d'érosion et les caractéristiques mécaniques du sol, des tests mécaniques ont été réalisés pour mesurer ces caractéristiques et suivre leur évolution en fonction de la quantité de liant utilisé lors de la préparation du matériau. Lors du mécanisme d'érosion, une partie du matériau, proche de l'interface, est entraînée alors que les couches inférieures du sol restent immobiles. C'est donc la résistance à la séparation du matériau qui a été mesurée.

Pour cela, nous avons mis au point un essai de traction, représenté sur la *figure 2a*. Celui-ci est constitué de deux parties cylindriques à col conique dont les extrémités sont initialement en contact au niveau de la section minimale. Le matériau est mis en place depuis la partie supérieure, qui est ouverte en son sommet. La partie inférieure étant fixée, une charge progressive va tirer la partie supérieure verticalement jusqu'à la rupture du matériau au niveau de la section de contact. La *figure 2b* représente, pour le matériau composé de sable avec des ponts en paraffine, la contrainte critique à la traction, obtenue à partir du rapport entre la charge critique à la traction et la section moyenne de rupture, en fonction de la teneur volumique en paraffine.

La limite de rupture de notre matériau est comprise entre $100Pa$ (limite de précision de l'essai), pour une teneur en paraffine de 0.2% , et $2640Pa$ pour une teneur de 0.4% (*Figure 2b*). Plusieurs mesures ont été réalisées pour chaque teneur en paraffine et les barres d'erreurs sont déterminées à partir de l'erreur type statistique (écart type divisé par la racine carrée du nombre de valeurs obtenues).

On voit ici que la résistance à la traction augmente de façon de plus en plus marquée avec la teneur en paraffine. Dans l'hypothèse que les ponts sont présents sur chaque contact inter-grain, ces résultats confirment qu'il y a un lien direct entre l'épaisseur des ponts et l'intensité de la force attractive qu'ils créent. Cela reste vrai uniquement dans une certaine gamme et notamment au-dessus d'une teneur volumique limite qui est ici inférieure à 0.2% et qui, pour comparaison, a été mesurée à 0.07% pour de l'eau mélangée à des billes de verre [13].

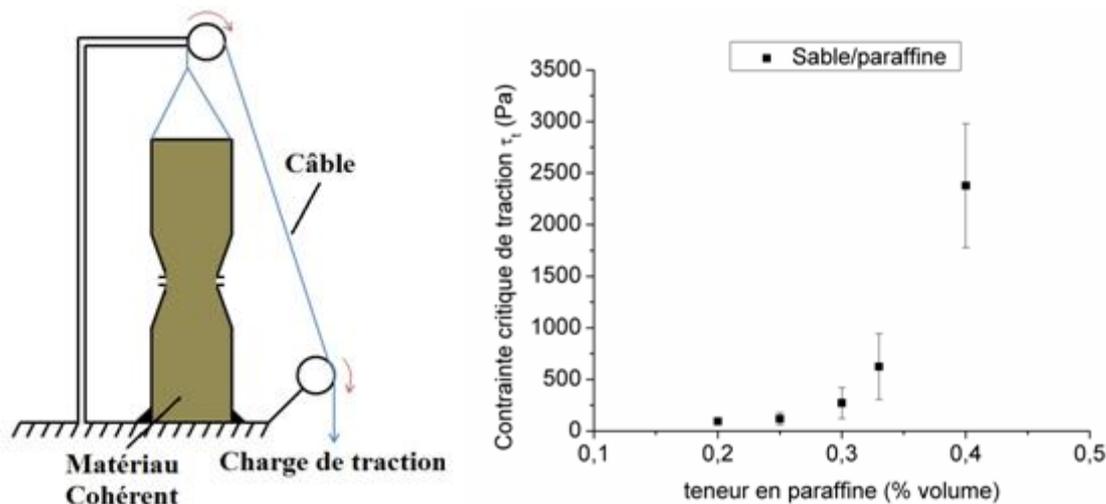


Figure 2:(a) Schéma de l'essai de traction à gauche ; (b) Contrainte critique à la traction d'un mélange de sable fin et de paraffine représentée en fonction de la teneur volumique de paraffine.

4.2 Essais d'érosion

Pour évaluer les paramètres d'érosion, la sollicitation hydrodynamique utilisée est un jet axisymétrique immergé vertical, impactant une surface de sol horizontale, selon un essai appelé Jet Erosion Test (JET) développé par Hanson et Cook [12]. Cet essai consiste à mesurer au cours du temps la variation de la hauteur de l'échantillon au niveau de l'axe du jet qui va impacter et progressivement creuser l'interface (voir la *figure 3*). Connaissant la vitesse du jet, son diamètre et la distance entre la buse et l'interface, il est possible de calculer la contrainte à l'interface τ [12] :

$$\tau = C_f \rho U_0^2 \left(\frac{C_d d_0}{h_0 + x} \right)^2 \quad (2)$$

avec : $C_f = 0.00416$, le coefficient de friction
 ρ , la masse volumique du fluide [kg/m^3]
 U_0 , La vitesse du jet en sortie de la buse [m/s]
 $C_d = 6.3$ la constante de diffusion du jet
 d_0 , le diamètre de sortie du jet [m]
 h_0 , la distance initiale entre la buse et l'interface [m]
 et x , l'épaisseur érodée de matériau [m]

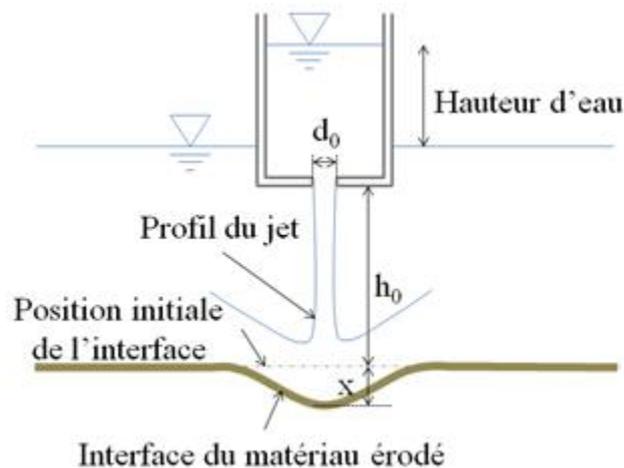


Figure 3 : Schéma de l'essai de Jet Erosion Test (JET)

L'équation (2), ainsi que l'extrapolation de la courbe représentant la variation de hauteur de l'échantillon en fonction de la contrainte à l'interface, permettent d'obtenir, à partir de l'équation (1), la contrainte critique et le coefficient d'érosion.

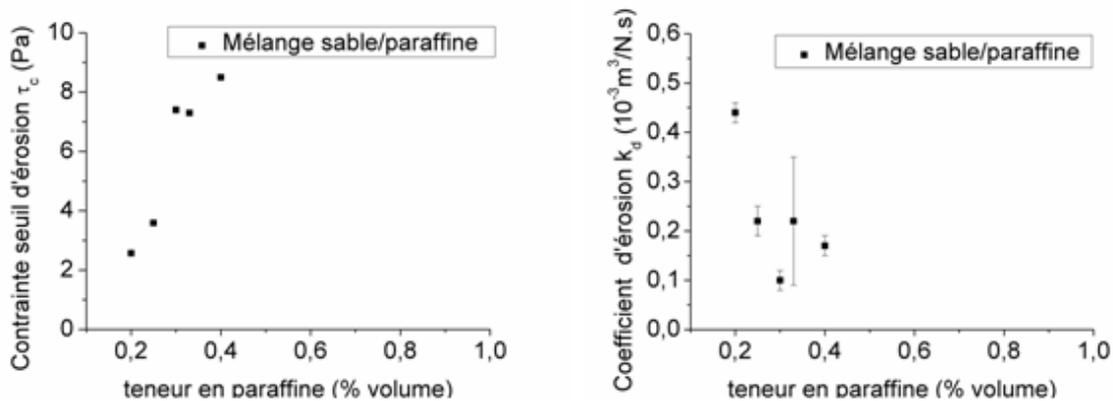


Figure 4 : Contrainte critique d'érosion (à gauche) et coefficient d'érodabilité (à droite) en fonction de la teneur en paraffine.

La valeur des 2 paramètres d'érosion en fonction de la teneur en paraffine est représentée sur la figure 4. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard obtenue lors de la régression non linéaire permettant d'extrapoler les résultats. On voit qu'avec l'augmentation de la teneur en paraffine le matériau devient de plus en plus résistant à l'érosion. En effet, la contrainte critique augmente de 2.6 Pa avec 0.2% de paraffine à 8.5Pa avec 0.4%, et le coefficient d'érosion diminue, mais de moins en moins rapidement, de 440 à 100 $\text{cm}^3/\text{N.s}$. Les deux dernières valeurs sont un peu plus élevées et il faudra plus de données pour estimer correctement la tendance générale. En comparant ces valeurs avec les essais de traction (figure 2b), on voit que, malgré les erreurs de reproductibilité importantes sur l'essai de JET, il semble bien exister une relation entre la résistance du matériau à la traction et le comportement face à l'érosion hydraulique.

5 Suivi local du mécanisme d'érosion

L'utilisation de la technique d'ajustement de l'indice optique avec le second matériau modèle permet de visualiser le processus d'érosion à l'intérieur du matériau lors d'un essai JET. Lors de cet essai, le processus d'érosion visualisé dans le plan du jet est filmé avec une caméra puis analysé par traitement d'image. L'influence de la présence ou non de gel cohésif, et de la quantité de gel, peut être analysée aussi bien sur le plan de la vitesse d'érosion et de la contrainte critique, que sur le déroulement du processus d'érosion (i.e. détachement et trajectoires des particules).

Lors des essais d'érosion à l'intérieur de la cellule iso-indice, la visualisation du processus dans le plan du jet a montré que les billes non recouvertes de gel étaient beaucoup plus mobiles et faciles à éroder pendant toute la durée de l'essai. Au fur et à mesure que les billes se détachent et sont évacuées, des avalanches se produisent à la périphérie du cratère. La figure 5 montre différentes étapes du processus d'affouillement pour des billes de 3mm non cohésives. On voit que l'affouillement est rapide au début puis atteint une profondeur stationnaire "dynamique".

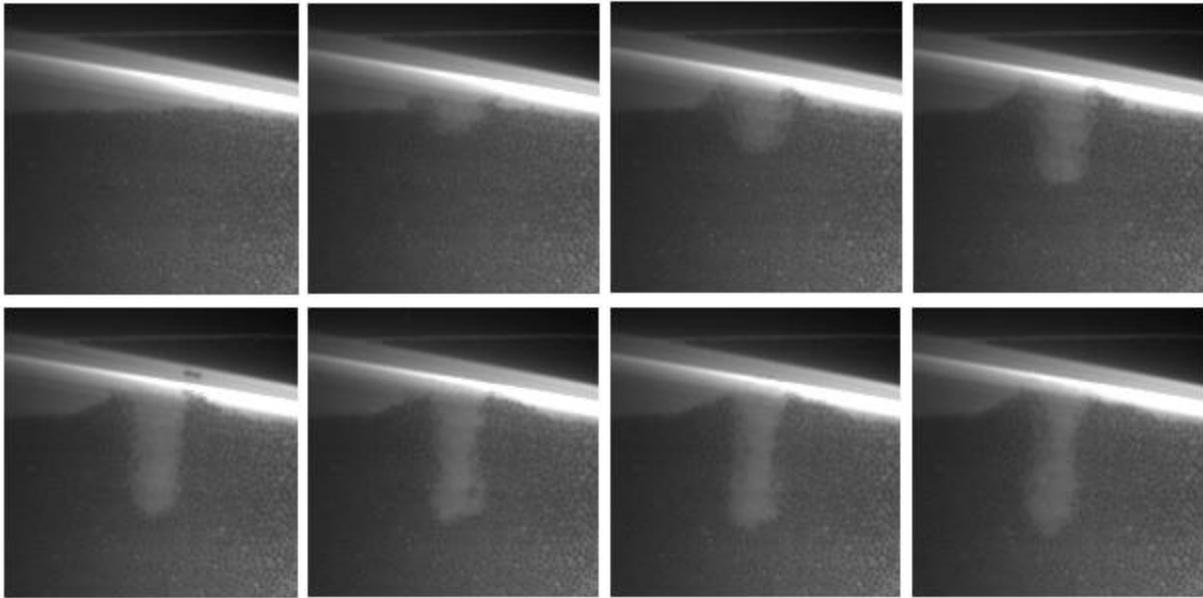


Figure 5 : Essai de JET sur billes de 3mm sans cohésion à $t=0s$; $t=0.2s$; $t=0.4s$; $t=1s$; $t=2s$; $t=3s$; $t=4s$ et $t=5s$

La *figure 6* représente ensuite la hauteur entre la buse de sortie du jet et la surface du matériau sous le jet mesurée après analyse des images prises lors des essais pour différents échantillons et différentes teneurs en gel cohésif.

La hauteur initiale de jet (h_0), varie légèrement pour les trois échantillons. On peut considérer que cela n'influe pas sur la hauteur finale atteinte. On voit sur la *figure 6* que la présence du gel augmente bien la résistance à l'érosion du matériau. En effet, la profondeur finale est de plus en plus faible lorsqu'on augmente la teneur en gel de carbopol, ce qui correspond à une contrainte critique de plus en plus élevée. De plus, le temps caractéristique que met le cratère à atteindre sa profondeur finale augmente : soit $10s$ pour le milieu granulaire pur, $18s$ avec 0.3% de gel, $27s$ avec 1.3% de gel et $30s$ avec 2.0% de gel. Cela se traduit par un coefficient d'érosion plus faible. La différence de comportement est faible pour la plus petite teneur en gel mais très nette pour les teneurs plus élevées. De plus, pour le matériau possédant la teneur maximale en gel, les billes se détachent parfois en agrégats de plusieurs billes qui vont rester collées pendant toute la période de déplacement.

6. Conclusion et perspectives

Les deux études menées précédemment, cherchant à évaluer l'influence d'une cohésion au sein du milieu granulaire dans le processus d'érosion, ont montré que cette cohésion, qu'elle soit induite par des ponts solides (paraffine) ou liquide (gel de carbopol), jouait un rôle déterminant à la fois sur la contrainte critique et sur le coefficient d'érosion. Les techniques qui ont été ici mises en place vont maintenant permettre de quantifier ce rôle et d'observer plus précisément les changements de comportement dans le processus d'érosion suite à l'ajout de ponts solides ou liquides entre les grains. Elles vont aussi permettre de mieux comprendre le rôle de la cohésion en mesurant avec précision les contraintes critiques et les coefficients d'érosion et en les comparant aux essais de traction représentant la force nécessaire pour séparer le matériau en deux.

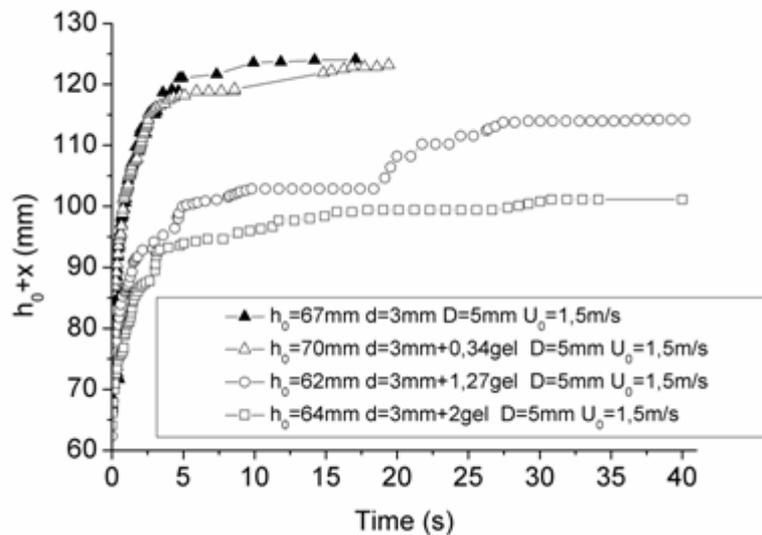


Figure 6 : Evolution de la hauteur de l'échantillon en fonction du temps avec en sortie de la buse un diamètre du jet de 5mm, et une vitesse du jet de 1.5m/s, pour un empilement de billes de diamètre $d=3\text{mm}$ sans gel (▲), avec 0.3% de gel (Δ) avec 1.3% de gel (○) et avec 2.0% de gel (□).

Références

- [1] M. Foster, R. Fell, M. Spannagle, The statistics of embankment dam failures and accidents, Canadian Geotechnical Journal 37 (2000) 1000-1024
- [2] K.S. Pouv, A. Besq, S. Guillou, Dispositif pour l'étude locale de l'érodabilité de sédiments modèles transparents, XIIèmes Journées Nationales du Génie Côtier – Génie Civil, Cherbourg, 12-14 juin 2012
- [3] E. Partheniades, Erosion and deposition of cohesive soils, Journal of the Hydraulics Division, ASCE 91, No.HY1 (1965) 105-139
- [4] R. Ariathurai and K. Arulanandan, Erosion rates of cohesive soils, Journal of the Hydraulics Division, ASCE 104, No.2 (1978) 279-283
- [6] B.C.Van Prooijen and J.C. Winterwerp, A stochastic formulation for erosion of cohesive sediments, Journal of Geophysique Research 115 (2010) C01005
- [7] L.C. Van Rijn, Sediment Pick-up functions, Journal of Hydraulic Engineering 110 (1984) 1494-1502
- [8] T.M. Parchure and A.J. Mehta, Erosion of Soft Cohesive Sediment Deposits, Journal of Hydraulic Engineering 111, No. 10 (1985) 1308-1326
- [9] J. Israelachvili, Intermolecular and Surface Forces, 2nd ed. Elsevier, New York (1997)
- [10] M. Righetti and C. Lucarelli, May the Shields theory be extended to cohesive and adhesive benthic sediments? Journal of Geophysique Research 115 (2010) C01005
- [11] P. Philippe and M. Badiane, Localized fluidization in a granular medium, Phys. Rev. E 87, 042206 (2013)
- [12] G. J. Hanson, K. R. Cook, Apparatus, Test Procedures, and Analytical Methods to Measure Soil Erodibility In Situ, Applied Engineering in Agriculture Vol. 20(4) (2004) 455-462
- [13] Z. Fournier, D. Geromichalos, S. Hermingaus, M.M. Kohonen, F Mugele, M. Scheel, M. Schulz, Ch. Schier, R. Seemann and A. Skudelný Mechanical properties of wet granular materials, Journal of Physics Condensed Matter 17 (2005) S477-S502
- [14] L.H. Luu, P. Philippe, G. Chambon, Experimental study of the solid-liquid interface in a yield-stress fluid flow upstream of a step, Physical review E 91, 013013 (2015)