

MODELISATION DES INSTABILITES HYDROMECHANIQUES D'UN SOL COHESIF LIEES A LA PRESENCE DE KARST

HYDRO-MECHANICAL INSTABILITIES MODELING FOR A COHESIVE SOIL IN KARST CONTEXTS

Li-Hua LUU^{1,2}, Pierre PHILIPPE¹, Gildas NOURY²

¹ Irstea, RECOVER, G2DR, 3275 Route de Cézanne CS 40061 13182 Aix-en-Provence Cedex 5 - France

² BRGM, DRP, 3 avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 Orléans Cedex 2 - France

RÉSUMÉ – La compréhension de la déstabilisation d'un sol cohésif sous forçage hydraulique reste encore très lacunaire et passe principalement par une démarche purement empirique basée sur des essais d'érosion en laboratoire ou *in-situ*. Dans les contextes karstiques, seules des approches conceptuelles ou empiriques sont proposées à ce jour. Nos travaux proposent une modélisation numérique hydro-géo-mécanique, qui décrit le comportement des matériaux par une méthode discrète classique (DEM) et celui du fluide par la méthode de Boltzmann sur réseau (LBM), permettant de reproduire dans un cadre réaliste des aquifères karstiques en situation de vulnérabilité vis-à-vis de l'aléa mouvements de terrain. Des scénarios définis à partir d'études de terrain sont évalués par cette méthode numérique couplée en mettant l'accent sur l'interaction fluide-grain. Parallèlement, une étude expérimentale introduisant une cohésion artificielle et contrôlée dans un milieu granulaire modèle complète les résultats des simulations. La modélisation physique en laboratoire vise notamment à reproduire le phénomène d'érosion régressive d'une couche superficielle de sol cohésif par une technique iso-indice combinée à la fluorescence induite par laser. L'approche innovante proposée couple et compare ainsi des outils numériques et expérimentaux pour une étude allant de l'échelle du grain à celle du phénomène d'effondrement d'une couche de sol dû à la présence d'une cavité souterraine.

ABSTRACT – The understanding of the destabilization of a cohesive soil under hydraulic forcing is still very incomplete and mainly involves a purely empirical approach based on the laboratory or *in situ* erosion tests. In karst contexts, only conceptual or empirical approaches are proposed up to now. Our work proposes a hydro-geomechanical numerical modeling, which describes the behavior of the materials by a classical discrete method (DEM) and that of the fluid by the method of lattice Boltzmann (LBM), allowing to reproduce in a realistic framework aquifers karst in a situation of vulnerability towards ground motions risks. Scenarios based on field studies are evaluated by this coupled numerical method focusing on fluid-grain interactions. In parallel, an experimental study introducing an artificial and controlled cohesion in a model granular medium completes the results of the simulations. In particular, physical modeling aims to reproduce the phenomenon of backward erosion of a superficial layer of cohesive soil by an iso-index technique combined with a laser-induced fluorescence. The proposed innovative approach couples and thus compares numerical and experimental tools for a study ranging from the grains scale to that of the phenomenon of soil layer collapse due to the presence of an underground cavity.

1. Introduction

L'étude proposée s'intéresse au contexte géologique particulier des calcaires karstifiés sous couverture, notamment au sein du bassin de Loire (Perrin et al., 2015). Ce contexte est particulièrement sensible aux effondrements liés à la présence de vides karstiques dans les calcaires (Waltham et al., 2007). Les intempéries de mai-juin 2016 dans le Loiret ont montré que l'inondation de ces terrains contribue de manière spectaculaire à la recrudescence de ces mouvements de terrain (Fig. 1). Globalement, la compréhension de la déstabilisation d'un sol cohésif sous forçage hydraulique reste encore à ce jour très lacunaire. Les travaux existants passent principalement par des essais d'érosion en laboratoire ou in-situ et concernent essentiellement l'érosion de surface (Hanson et Cook, 2004 ; Bonelli, 2013) et la suffusion (Sato et Kuwana, 2015 ; Jiang et al., 2014), phénomènes connus pour ne participer qu'à l'ordre deux au processus de fontis. A notre connaissance, il n'y a aucune étude parvenant à reproduire et suivre de manière contrôlée un processus d'érosion régressif menant à l'effondrement d'une cavité souterraine. L'approche novatrice proposée dans ces travaux est d'explorer les mécanismes élémentaires à l'échelle de l'interaction entre le fluide et les grains constituant le sol. A partir d'une modélisation numérique hydro-géo-mécanique, qui décrit le comportement des matériaux par une méthode discrète (DEM) incluant un modèle de cohésion et celui du fluide par la méthode de Boltzmann sur réseau (LBM), nous avons cherché à reproduire l'effondrement par l'érosion régressive d'un sol cohésif couvrant une cavité souterraine. Pour cet étude, nous nous sommes intéressés à différents scénarios de terrain et plus particulièrement à celui du débourrage. Dans cet article, nous présenterons aussi les premiers résultats d'une modélisation expérimentale qui introduit une cohésion artificielle et contrôlée dans un milieu granulaire modèle.



Figure 1. Cas d'effondrements de cavités souterraines dans le Val d'Orléans (secteur Gidy) après les inondations de juin 2016.

2. Modélisation numérique

2.1. Méthode couplée DEM-LBM

La simulation de la dynamique du fluide est effectuée par la méthode LBM provenant de la théorie cinétique de l'évolution d'un gaz hors d'équilibre. Il s'agit d'une approche statistique qui déduit l'écoulement du fluide à partir de la dynamique des particules

constituant le fluide à l'échelle microscopique. La méthode LBM consiste à discréteriser l'équation de Boltzmann, qui décrit la propagation et la collision des éléments fluides, sur un réseau. Nous avons implémenté le schéma D2Q9 qui est un réseau 2D sur lequel une particule fluide est restreinte à se propager selon 9 directions incluant celle où elle reste immobile sur le même noeud. La résolution classique de l'équation de Boltzmann est basée sur un modèle développé par Bhatnagar-Gross-Krook qui fait intervenir un seul temps de relaxation. Dans nos simulations, nous avons choisi un modèle plus réaliste présentant un opérateur de collision à plusieurs temps de relaxation, il s'agit de la formulation d'Humière appelée *Multiple Relaxation Time* (MRT) (d'Humière et al., 2002 ; Du et al., 2006).

La modélisation de la phase solide est effectuée par la méthode classique des éléments discrets basée sur la méthode pionnière de Cundall & Strack (1979). Le sol érodable est modélisé par un empilement 2D de disques circulaires dont les trajectoires sont calculées par simple intégration des équations du mouvement de Newton. La loi constitutive au contact considère l'interpénétration locale entre deux particules. On implémente une force d'interaction normale donnée par la relation viscoélastique de Kelvin-Voigt. La force tangentielle est décrite par la loi de frottement de Coulomb régularisée. A partir de cette loi constitutive de contact purement frictionnel, nous avons introduit un modèle original de cohésion entre les particules de type pont solide (Cuéllar et al., 2015). On introduit un seuil en traction et en cisaillement tel que le lien solide se casse lorsque la force d'interaction atteint ces seuils. La figure 2 représente la surface critique de forme parabolique dans l'espace des forces de contact. Après la rupture, le contact devient frictionnel.

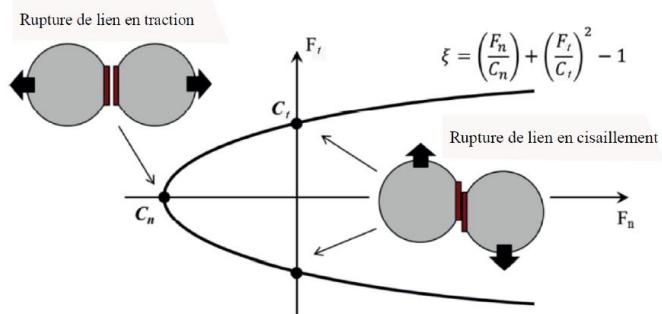


Figure 2. Schéma de principe du modèle de cohésion (Cuéllar et al., 2015)

2.2. Application au phénomène de débourrage

Le processus de débourrage correspond à l'excavation d'un conduit remblayé, lorsque les terrains ont été immergés/saturés/inondés sous de forts gradients hydrauliques (Fig. 3a). Dans ce premier scénario proposé par le BRGM, l'inondation aurait certainement rajouté du poids sur le bouchon provoquant ainsi la déstabilisation de la couverture de sol. Le modèle numérique que nous proposons pour étudier ce premier scénario consiste à implémenter un milieu granulaire immergé, dans lequel se trouve un conduit qui est initialement encombré en superficie (Fig. 3b).

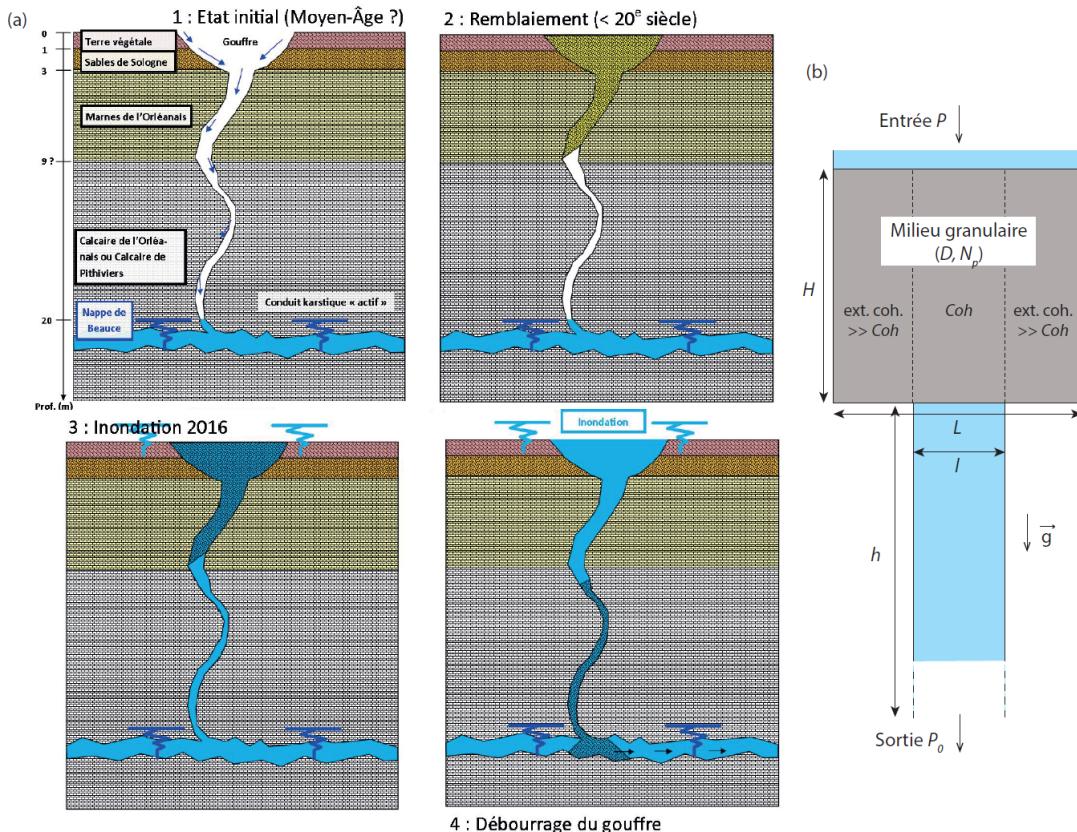


Figure 3. (a) Illustration du scénario de débouvrage d'un gouffre karstique après inondation.
 (b) Schéma du modèle numérique implémenté.

Pour imposer un chemin préférentiel à l'écoulement au sein du sol modèle, nous appliquons un fort contraste en cohésion. Dans les couches extérieures, le seuil de cohésion C est fixé à 1000 N, alors que la valeur pour la couche interne, constituant la partie supérieure du conduit souterrain, est variée entre 5 et 20 N. Pour cette première étude, nous avons modélisé un sol 2D composé d'éléments circulaires de diamètre D=6 mm, de hauteur H=42 cm et de longueur variable L=20 et 40 cm, correspondant à un ensemble de N_p =1816 et 3042 particules. La viscosité cinématique du fluide est de 4.10⁻⁵ m²/s. La déstabilisation du milieu granulaire est enclenchée en imposant un gradient de pression descendant le long du conduit. La pression d'entrée varie ainsi entre 10 et 2000 Pa et la pression de sortie est fixée à 0 Pa. Pour cette étude paramétrique, nous avons fixé la hauteur du conduit h à 60 cm et fait varier la largeur du conduit I entre 1.8 cm et 16.2 cm. Pour la suite, on définit une taille de conduit adimensionnée $\Delta = I/D$, où D est la taille des grains. L'analyse menée s'intéresse à l'influence de la pression d'entrée, de la largeur du conduit Δ , de la longueur de l'échantillon L et du nombre de cohésion $Coh=C/(\rho_s-\rho_f)gV$, où C est le seuil de cohésion, $\rho_s-\rho_f$ la masse volumique apparente, g la pesanteur et V le volume d'une particule. On observe deux principaux comportements : le blocage des grains dans un état stable où aucune érosion ne se produit et l'évacuation intermittente du sol à travers le conduit interne. La figure 4 illustre les trois régimes d'érosion apparus. D'abord, nous avons repéré, pour quelques cas, la formation d'une cavité stable. Ensuite, si les paramètres érodant s'intensifient, on enclenche un mécanisme d'érosion régressive, où le front de déstabilisation évolue dans le sens opposé à l'écoulement. Une fois que le front atteint la surface, les grains arrachés sont évacués du conduit par l'écoulement. Enfin, on peut aussi atteindre un régime où toute la colonne granulaire comprise dans le conduit prédéfini, tombe en bloc. On a appelé ce régime l'extrusion-bouchon.

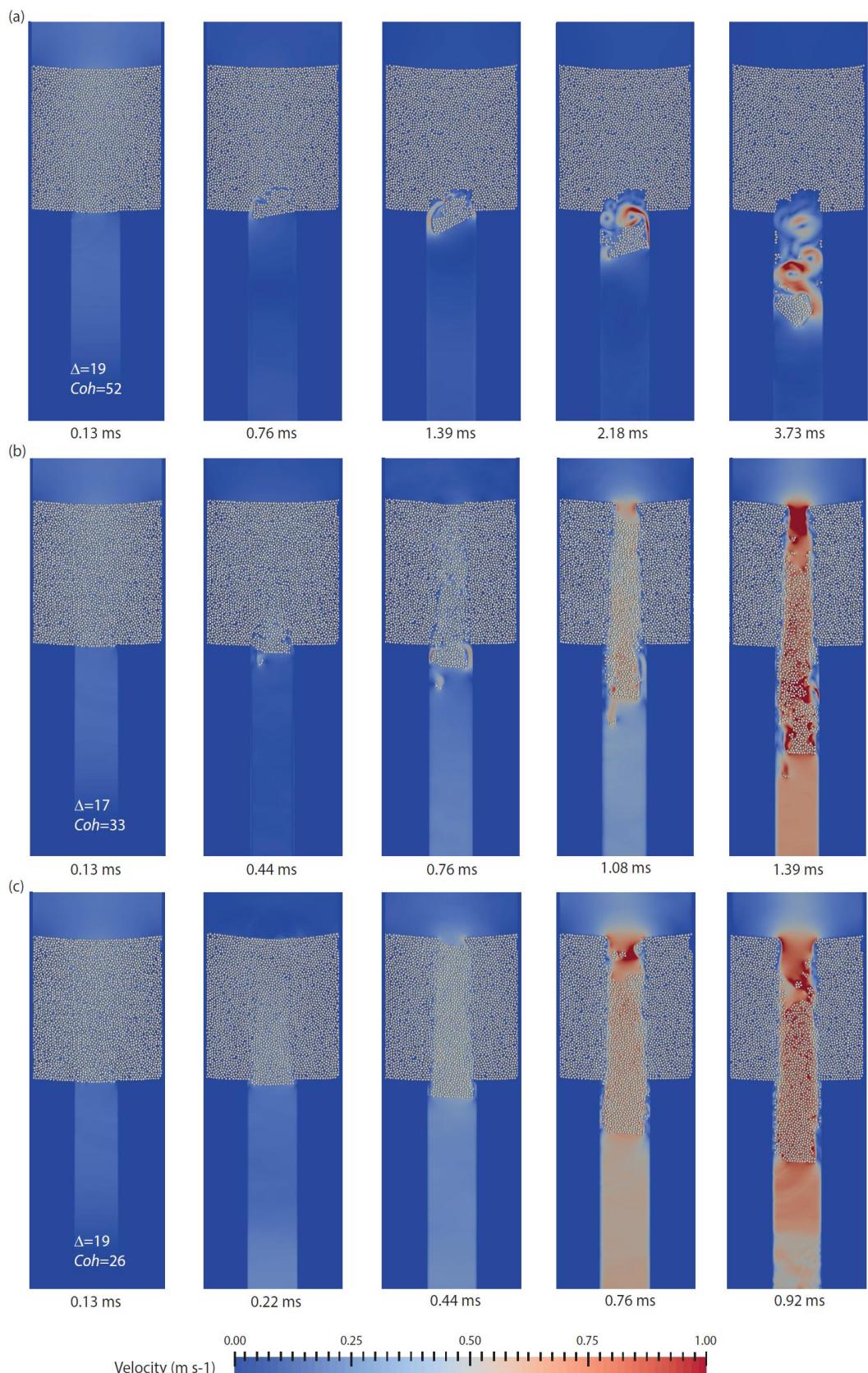


Figure 4. Différents régimes pour $L=40$ cm, $N_p = 3042$ et $P=10$ Pa : (a) cavité, (b) extrusion régressive, (c) extrusion-bouchon

L'analyse détaillée des différentes simulations est donnée dans Luu et al., 2016. En particulier, nous avons établi des diagrammes de phase qui montrent que que l'on passe

du régime de cavité vers le régime d'extrusion régressive, puis vers l'extrusion-bouchon, en augmentant la pression hydraulique d'entrée, en élargissant la taille du conduit et en diminuant la cohésion entre les grains. De plus, nous avons développé un outil d'analyse des vitesses de propagation du front d'érosion par l'établissement de diagrammes spatio-temporels. La poursuite de cette étude paramétrique nécessitera de considérer les autres grandeurs clés (le diamètre des grains, la longueur de l'échantillon...), en ciblant des gammes de paramètres pertinents au vu de notre application terrain (notamment des cohésions plus fortes et des grains plus fins).

3. Modélisation expérimentale

Jusqu'à présent, le phénomène d'érosion régressive survenant en pied de digues en terre pour former le fameux « renard hydraulique » a surtout été traité de manière empirique dans le domaine de l'ingénierie (Bligh, 1910). Typiquement, les valeurs des paramètres d'érosion proposées varient selon la nature des matériaux et de leur granulométrie. Cette approche sert à estimer des facteurs de sécurité très conservatifs pour le dimensionnement des ouvrages, mais ne permet pas de comprendre les phénomènes physiques sous-jacents à l'instabilité pour en prédire l'occurrence dans des conditions particulières. Les études expérimentales les plus récentes (Van Beek et al., 2016) concernent des systèmes 2D interprétés avec des modèles comportant de nombreux paramètres d'ajustement.

Une méthodologie originale a été récemment développée dans l'équipe d'Irstea pour fabriquer des milieux granulaires 3D cohésifs modèles permettant de faire varier spécifiquement et continûment certaines propriétés (Brunier-Coulin, 2016). La figure 5a présente le montage expérimental qui met en œuvre une technique optique iso-indice (*Refractive Index Matching*) combinée à de la fluorescence induite par laser (*Planar Laser Induced Fluorescence*) (Philippe et Badiane, 2013). Cette technique consiste à rendre un milieu granulaire transparent en ajustant l'indice de réfraction du liquide (90% en masse d'huile minérale et 10% d'huile d'immersion) avec celui d'un assemblage de billes borosilicates ($n=1.472$). En ajoutant un colorant fluorescent à la suspension, le liquide s'illumine lorsqu'on éclaire le milieu avec une nappe laser, en laissant les particules sombres. Ainsi, on peut suivre le processus d'érosion de façon directe à l'intérieur du matériau sans perturbation de l'échantillon. Enfin, pour rendre un ensemble de grains cohésif, nous créons des ponts solides en "collant" les grains entre eux avec une résine polyuréthane transparente. Les détails de cette technique novatrice se trouve dans la récente thèse de F. Brunier-Coulin (2016).

Les échantillons sont fabriqués directement dans des cellules en plexiglas ouvertes en haut et en bas, de hauteur 17 cm, de largeur 20 cm et d'épaisseur 5.5 cm. A l'aide d'une pompe hydraulique, on impose un gradient de pression descendant dans l'échantillon de sol cohésif posé au-dessus d'une cavité formée par deux cales. Le forçage hydraulique est ainsi contrôlé par le débit de la pompe. Pour commencer nous nous sommes intéressés à la configuration de débourrage étudiée dans la partie numérique. Pour cela, nous avons fabriqué des échantillons comportant une cohésion plus faible dans un conduit dont le prolongement est équivalent à l'espacement entre les deux cales, fixé à 4 cm .

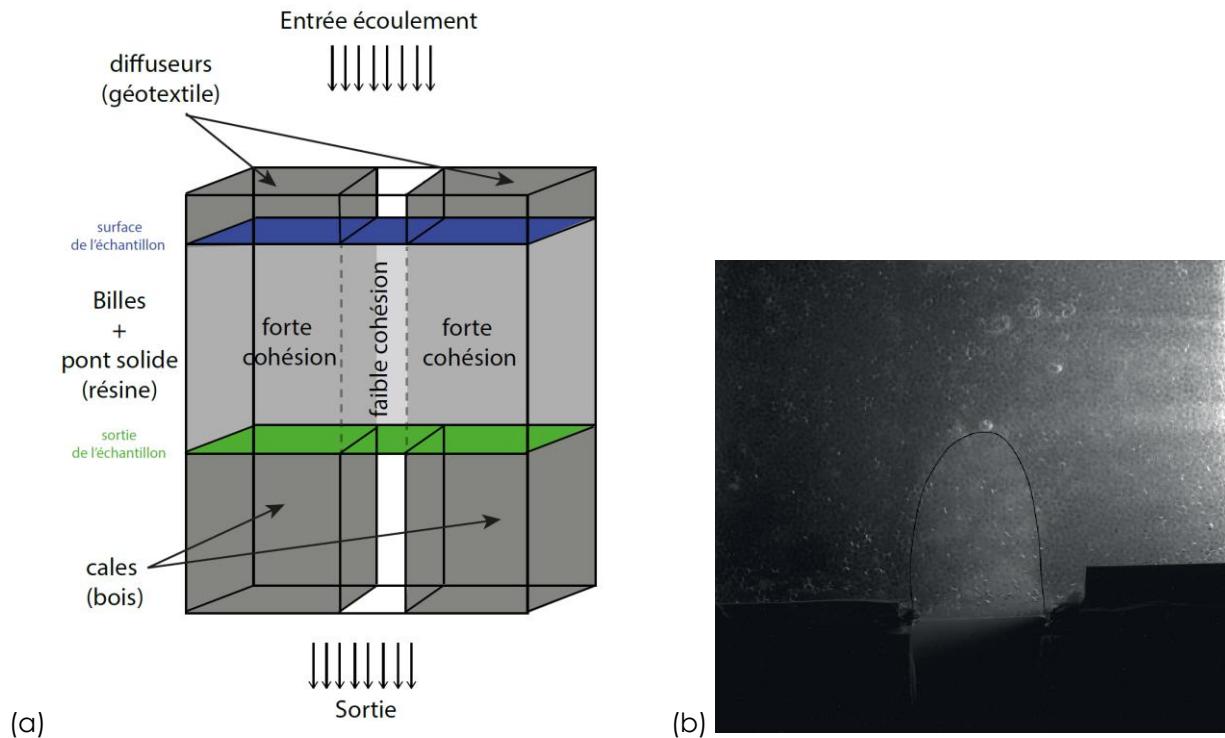


Fig 5. (a) Schéma de principe de l'expérience. (b) Visualisation de la formation d'une cavité stable dans un milieu granulaire modèle iso-indice.

Nous présentons ici les premiers résultats obtenus pour un échantillon de billes de 2 mm de diamètre avec une cohésion dans le conduit central à 0.5 ml de résine par kg de billes et une cohésion latérale de 3 ml/kg (Brunier-Coulin, 2016). En augmentant progressivement le débit de la pompe on observe l'initialisation de l'érosion à environ 130 ml/s. La figure 5b montre la formation d'une cavité stable. En imposant un débit plus important à 140 ml/s, on voit le front d'érosion progresser de manière régressive vers le haut de l'échantillon. Avec un saut plus important du débit à 160 ml/s, on provoque un effondrement en bloc de toute la partie supérieure. Au final, la cohésion latérale permet la stabilisation des parois du conduit érodé. Cette expérience démontre non seulement la faisabilité de la modélisation expérimentale mais apporte aussi une première comparaison qualitative avec les simulations numériques où les trois mêmes régimes ont été observés, à savoir la formation d'une cavité stable, l'érosion régressive et l'effondrement en bloc.

4. Conclusion

Cette communication présente une modélisation numérique et expérimentale des instabilités hydromécaniques d'un sol cohésif liées à la présence de karst par un processus d'érosion régressive sous forçage hydraulique. La configuration étudiée modélise le phénomène de débourrage, où le sol s'effondre par extrusion du matériau à travers un conduit interne. L'étude numérique impliquant une méthode couplée LBM-DEM a permis d'identifier différents régimes de déstabilisation. Une des perspectives immédiates sera de s'intéresser à l'évolution des grandeurs hydrodynamiques (vitesse, pression, contrainte visqueuse, force hydraulique) au cours du processus d'érosion.

Le volet expérimental a consisté à mettre en place un système de sol cohésif modèle 3D dont l'étude permettra d'améliorer à terme les lois prédictives relatives au phénomène d'érosion régressive. L'étude de faisabilité a été validée. Cependant, au vue des difficultés rencontrées pour la fabrication des échantillons, dues en particulier à une fragilité inattendue des ponts solides, des tests complémentaires sont en cours pour améliorer la méthodologie présentée. En parallèle, nous effectuerons une caractérisation de la cohésion des échantillons par des essais spécifiques de traction développés précédemment (Brunier-Coulin, 2016). La confrontation plus poussée entre les deux approches complémentaires numérique-expérimentale pourra alors être envisagée, incluant une transcription de la cohésion issue des essais vers la cohésion du modèle.

- Bligh, W. G. (1910). Dams, barrages and weirs on porous foundations. *Engineering News*, 64(26), 708-710.
- Bonelli, S. (Ed.). (2013). *Erosion in geomechanics applied to dams and levees*. John Wiley Sons.
- Brunier-Coulin, F. (2016). Mécanismes élémentaires de l'érosion d'un sol cohésif. (Thèse de l'Université Aix-Marseille).
- Cuéllar, P., Luu, L.-H., Philippe, P., Brunier-Coulin, F., Bonelli, S., Benahmed, N., Ngoma, J., & Delenne, J.-Y. (2016, September). Micromechanical features of jet erosion - A numerical perspective. In 8th International Conference on Scour and Erosion (pp. 115).
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47-65.
- d'Humières, D. (2002). Multiple-relaxation-time lattice Boltzmann models in three dimensions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1792), 437-451.
- Du, R., Shi, B., & Chen, X. (2006). Multi-relaxation-time lattice Boltzmann model for incompressible flow. *Physics Letters A*, 359(6), 564-572.
- Hanson, G. J., & Cook, K. R. (2004). Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ. *Applied engineering in agriculture*, 20(4), 455.
- Jiang, F., Lei, M., & Jiang-ling, D. (2015). Study on the critical velocity of groundwater to form subsidence sinkholes in a karst area. In 14th Sinkhole conference, Symposium (Vol. 5, pp. 531-536).
- Luu, L. H., Philippe, P., Noury, G., Perrin, J., & Brivois, O. (2017). Erosion of cohesive soil layers above underground conduits. In EPJ Web of Conferences (Vol. 140, p. 09038). EDP Sciences.
- Perrin J., Noury G., Cartannaz C., & Vanoudheusden E. (2015). A multicriteria approach to karst subsidence hazard mapping supported by Weights-of-Evidence analysis. *Engineering Geology* 197 : 296-305.
- Philippe P., & Badiane M. (2013). Localized uidization in a granula medium. *Phys. Rev. E* 87, 042206.
- Van Beer et al. (2016). *Scour and Erosion : Proceedings of the 8th International Conference on Scour and Erosion* (Oxford, UK, 12-15 September 2016). CRC Press.
- Waltham, T., Bell, F. G., & Culshaw, M. (2007). *Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Springer Science Business Media.