

ARTICLE DE RECHERCHE / RESEARCH ARTICLE

## Nouveau dispositif pour l'étude de la suffusion suivant différents états mécaniques

Didier Marot\*, Bikram Oli<sup>ORCID</sup>, Rachel Gelet<sup>ORCID</sup> et Fateh Bendahmane

Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, Saint-Nazaire, France

**Résumé** – Les instabilités et les ruptures que peuvent subir les digues et les barrages en remblais sont très majoritairement dues aux processus d'érosion externe (surverse) et d'érosion interne (renard hydraulique, érosion régressive, érosion de contact ou suffusion). Cette étude porte sur la suffusion qui peut mobiliser la fraction fine de sols pulvérulents ou faiblement cohésifs. Ce processus complexe combine trois mécanismes : le détachement, le transport et l'éventuelle filtration des particules fines. De nombreux critères ont été proposés dans littérature, pour caractériser la susceptibilité à la suffusion, en considérant uniquement la distribution granulométrique et éventuellement la densité du sol. Toutefois, plusieurs études ont montré que l'initiation et le développement de la suffusion dépendent aussi du chemin de chargement hydraulique. Par ailleurs, chacun des trois mécanismes susmentionnés dépend du chargement mécanique subi par le sol. Dans ce contexte, un dispositif expérimental a été développé afin de caractériser la sensibilité vis-à-vis de la suffusion, de quatre sols pulvérulents à distribution lacunaire (composé de sable et de gravier), en contrôlant l'état mécanique et le chemin de chargement hydraulique. Les essais sont réalisés à l'aide du banc triaxial dédié qui permet d'appliquer à l'échantillon (diamètre : 100 mm ; hauteur : 200 mm) un écoulement vertical descendant. La charge hydraulique appliquée est augmentée automatiquement, par faibles incréments et suivant le même chemin pour tous les essais. Les échantillons sont tous consolidés sous une même contrainte effective moyenne, mais la valeur du déviateur de contrainte est propre à chaque essai. Enfin des essais sont menés en conditions œdométriques. L'interprétation des évolutions de conductivité hydraulique et de taux d'érosion permet tout d'abord d'identifier 4 étapes successives : initiation, filtration, débouillage et état permanent caractérisant la fin du processus de suffusion. Chacune de ces étapes est ensuite étudiée à l'aide de différentes méthodes interprétatives. À la fin de chaque essai, les échantillons sont découpés en 4 couches afin de mesurer les évolutions de distribution granulométrique. Les résultats obtenus soulignent la présence d'écoulements préférentiels circonférentiels pour l'essai réalisé en conditions œdométriques, ce qui conduit à une légère surestimation de la sensibilité à la suffusion. En conditions triaxiales, l'influence sur la suffusion du déviateur de contrainte apparaît limitée, notamment en regard de l'influence du pourcentage de sable. Enfin la confrontation de ces résultats montre que contrairement à l'approche énergétique, l'approche en conductivité hydraulique ne permet pas de détecter toutes les étapes pour tous les essais.

**Mots clés** : suffusion / état mécanique / gradient hydraulique / puissance / énergie

**Abstract** – **New device for the study of suffusion under several stress states.** Dikes and dams can be subjected to instabilities and failures which are mainly due to external erosion (overtopping) and internal erosion processes (concentrated leak erosion, backward erosion, contact erosion and suffusion). This study deals with suffusion which can mobilize the fine fraction of cohesionless or low cohesive soils. This complex process combines three mechanisms: detachment, transport and possible filtration of the fine particles. Numerous criteria have been proposed in the literature to characterize the suffusion susceptibility, by only considering the grain size distribution and possibly the density. However, several studies show that the initiation and the development of suffusion also depend on the hydraulic loading path. Moreover, all aforementioned mechanisms depend on the mechanical state applied on the soil. In this context, an experimental apparatus was developed to characterize the suffusion susceptibility of four cohesionless gap-graded soils (composed by sand and gravel) under controlled stress states and a controlled hydraulic loading path. A vertical downward flow is applied to each specimen (diameter: 100mm, height: 200mm) thanks to a modified triaxial bench. The applied head is progressively increased by small increments and the same hydraulic load is applied for all realized tests. Specimens are all consolidated under the same mean effective stress but under various values of deviatoric stress. Finally, several specimens are tested in oedometric

\* Auteur de correspondance : [didier.marot@univ-nantes.fr](mailto:didier.marot@univ-nantes.fr)

conditions. By following the time evolutions of the hydraulic conductivity and the erosion rate, it is possible to distinguish 4 successive steps: initiation, self-filtration, blow-out and steady state which characterizes the end of the suffusion process. Each step is characterized with different interpretative methods. At the end of each test, the specimen is cut in 4 slices to measure post-suffusion gradations. The results highlight the presence of circumferential flow paths in oedometric conditions, which leads to a slight overestimation of the suffusion susceptibility. In triaxial testing conditions, the influence of the stress state on the suffusion appears limited, in particular when considering the effect of the percentage of sand. The comparison of these results shows that, in contrast to the energy-based approach, the hydraulic-conductivity-based approach doesn't permit the detection of all steps for all performed tests.

**Keywords:** suffusion / stress state / hydraulic gradient / power / energy

## Introduction

Plusieurs études statistiques ont montré que les instabilités des ouvrages hydrauliques en terre, tels que les barrages et les digues sont très majoritairement dues aux phénomènes d'érosion par surverse et d'érosion interne. En ce qui concerne l'érosion interne, quatre processus sont distingués (Fell et Fry, 2013) : l'érosion de conduit, l'érosion de contact, l'érosion régressive et la suffusion. Cette étude porte sur la suffusion qui mobilise les particules fines de matériaux pulvérulents ou faiblement cohésifs. De nombreuses campagnes expérimentales montrent que ce phénomène est le résultat de la succession de plusieurs mécanismes complexes. Lorsque les particules fines ne comblent pas l'espace poral compris entre les grains plus gros, elles peuvent être délogées par un écoulement. Puis, si le chargement hydraulique est suffisant et si la taille des particules fines est inférieure à la taille des restrictions, elles peuvent être transportées. Enfin au cours de leur transport, certaines particules fluidisées peuvent être bloquées au cœur du milieu poreux. L'ensemble de ces processus entraîne des évolutions locales de porosité et par conséquent de la conductivité hydraulique. Le chargement hydraulique et la réponse du sol à cette sollicitation sont donc très fortement couplés. Face à cette complexité, Fell et Fry (2013) mais aussi Garner et Fannin (2010) décrivent les principales conditions d'initiation de la suffusion par trois facteurs : (i) la géométrie du milieu poreux, (ii) le chargement mécanique appliqué sur les particules fines, et (iii) le chargement hydraulique. Selon Fell et Fry (2013), le troisième facteur est lié à la vitesse du fluide alors que Garner et Fannin (2010) ne considèrent que la pression interstitielle. Enfin, Marot *et al.* (2016) représentent le chargement hydraulique à l'aide de la puissance dissipée par le fluide. L'avantage de la puissance est de prendre en compte à la fois la pression et la vitesse. Dans le cas de la suffusion, la puissance totale dissipée, exprimée en  $W$ , est calculée par :

$$P_{flow} = (\gamma_w \Delta z + \Delta P) Q. \quad (1)$$

$Q$  est le débit (en  $m^3/s$ ),  $\gamma_w$  est le poids volumique de l'eau (en  $N/m^3$ ),  $\Delta P = P_A - P_B$ , est l'écart de pression (en Pa) entre la section amont A et la section aval B,  $\Delta z = z_A - z_B$ ,  $z_A$  et  $z_B$  étant les altitudes respectives (en m) des sections A et B.

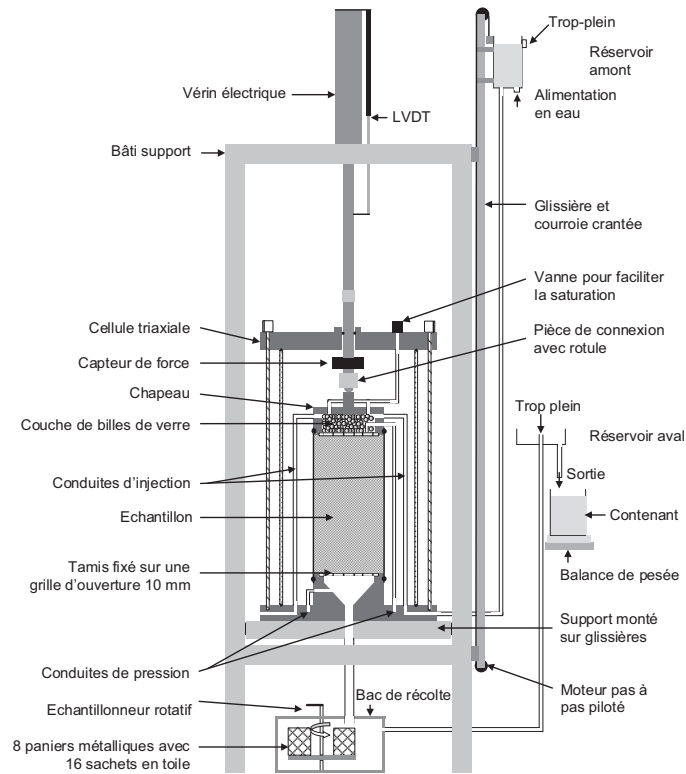
Par ailleurs, pour prendre en compte l'influence significative du chemin de chargement hydraulique sur le développement de la suffusion (Rochim *et al.*, 2017), l'énergie dissipée par le fluide  $E_{flow}$  (exprimée en J) est calculée en intégrant la puissance. La réponse correspondante du sol est caractérisée par la masse sèche perdue (exprimée en kg), y compris pendant la phase de préparation de l'échantillon.

Marot *et al.* (2016) suggèrent de déterminer l'énergie dissipée cumulée et la masse perdue cumulée, jusqu'à ce que la conductivité hydraulique se stabilise et que le taux d'érosion décroît. L'état correspondant est dénommé état d'équilibre et peut être utilisé pour caractériser la sensibilité à la suffusion à l'aide de l'indice de résistance à l'érosion :

$$I_\alpha = -\text{Log} \left( \frac{\text{masse perdue cumulée}}{E_{flow}} \right). \quad (2)$$

À partir des valeurs de  $I_\alpha$ , six catégories sont définies de très érodable à très résistant. Cette méthode a été utilisée pour interpréter les résultats d'essais réalisés sur différentes tailles d'échantillons, ce qui a permis de souligner la robustesse de la classification vis-à-vis des effets d'échelles spatiales (Zhong *et al.*, 2018).

Les facteurs (i) et (ii) dépendent fortement de la distribution granulométrique du sol considéré et dans ce contexte, plusieurs critères granulométriques sont détaillés dans la littérature (notamment, les critères proposés par Chang et Zhang (2013a), Kenney et Lau (1985) et Wan et Fell (2008)). Des essais de suffusion sous écoulement ascendant ont été réalisés à l'aide de perméamètre à paroi rigide sans contrainte axiale (Skempton et Brogan, 1994). Puis avec l'objectif d'appliquer une contrainte axiale, d'autres dispositifs ont été développés avec un piston, l'écoulement pouvant s'effectuer suivant différentes directions (Ke et Takahashi, 2014). Pourtant l'effet de l'état de chargement mécanique n'est toujours pas bien compris et en conséquence, plusieurs dispositifs triaxiaux modifiés ont été développés afin de contrôler le chargement mécanique et d'éviter tout écoulement préférentiel le long de la circonférence de l'échantillon. Avec ce type de dispositif, Chang et Zhang (2013b) ont étudié l'effet de différents états mécaniques triaxiaux, sur les valeurs de deux gradients hydrauliques : le gradient hydraulique d'initiation, associé à une légère augmentation de la conductivité hydraulique (approche initialement proposée par Skempton et Brogan (1994)) et le gradient de déformation du squelette qui se réfère à un accroissement soudain de : la masse érodée, la conductivité hydraulique et la déformation de l'échantillon. Toutefois, le sol testé peut être classé comme stable selon le critère des mêmes auteurs (Chang et Zhang, 2013a) et plusieurs essais ont été réalisés sous un déviateur qui atteignait 71 % du déviateur au pic mesuré lors d'un essai de résistance au cisaillement. Cette valeur apparaît donc très élevée et peu commune sur site. Enfin, le chemin de chargement hydraulique qui a une influence essentielle sur l'initiation et le développement de la suffusion (Rochim *et al.*, 2017) n'a pas été systématiquement le même pour tous les essais. Les



**Fig. 1.** Schéma général du dispositif triaxial.

*Fig. 1.* General diagram of the triaxial device.

faibles écarts mesurés sur les différents gradients hydrauliques pourraient donc être aussi attribués aux variations du chemin de chargement hydraulique. Dans ce contexte, un dispositif triaxial a été développé afin de mener des essais de suffusion sous chemin de chargement hydraulique et état mécanique contrôlés.

## Dispositif expérimental

La [Figure 1](#) présente un schéma général du dispositif qui comprend une cellule triaxiale modifiée, un système de confinement et de chargement mécanique, un bac de récolte des grains érodés, un système automatique de chargement hydraulique, un ensemble d'instrumentations et un système d'acquisition. Ces différents éléments sont succinctement présentés ci-après, de plus amples descriptifs peuvent être trouvés dans [Marot \*et al.\* \(2024\)](#).

### Cellule triaxiale modifiée

Le principe général de la cellule est le même que celui d'une cellule triaxiale classique pouvant accueillir un échantillon de 100 mm de diamètre et de 200 mm de hauteur. Toutefois le chapeau et la base ont été modifiés afin de saturer l'échantillon sous un écoulement ascendant, puis d'appliquer un écoulement vertical descendant. Le chapeau contient une couche de billes de verre pour diffuser uniformément l'écoulement et la base a une forme en entonnoir pour éviter tout colmatage par les particules érodées. L'échantillon est

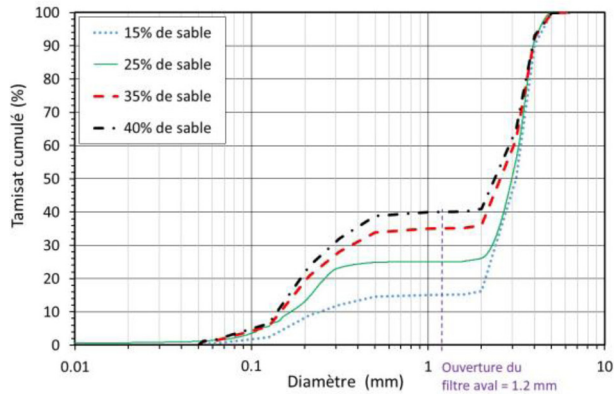
posé sur une grille support, d'ouverture 10 mm et un tamis d'ouverture choisie peut être fixé sur cette grille. Pour faciliter la fabrication des échantillons en dehors du bâti support, la cellule est fixée sur un support monté sur glissières.

### Système de confinement et de chargement mécanique

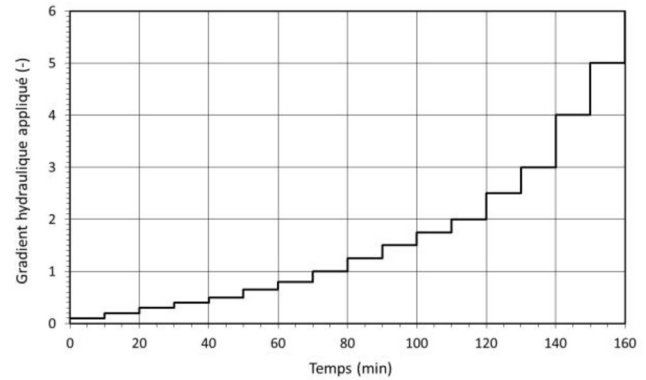
Le confinement est réalisé à l'aide d'une interface air/eau, alimentée en air sous pression *via* un manodétendeur. Les variations du volume de l'échantillon sont mesurées avec un appareil de mesure des variations de volume branché sur le circuit de confinement, afin de pouvoir réaliser la mesure, *y* compris pendant l'écoulement. Une pièce de raccordement entre le chapeau et le vérin électrique a été développée afin de pouvoir appliquer des efforts axiaux de compression ou de traction. Un capteur LVDT permet de mesurer la variation de longueur de l'échantillon.

### Bac de récolte des grains érodés

Le bac de récolte de l'effluent est équipé d'un échantillonneur rotatif qui accueille 8 paniers métalliques, chacun contenant deux sachets en toile de 20  $\mu\text{m}$ . L'objectif est de pouvoir collecter les grains érodés à 16 instants différents au cours de l'essai, sans perturbation de la pression que pourrait produire l'ouverture ou la fermeture d'une vanne. À la sortie du bac de récolte, l'eau est récupérée par un contenant qui est continuellement pesé, pour déterminer le débit de l'écoulement.



(a)



(b)

**Fig. 2.** (a) Distribution granulométrique des sols testés, (b) Évolution au cours du temps du gradient hydraulique appliqué.  
**Fig. 2.** (a) Particle size distribution of tested soils, (b) Evolution over time of the applied hydraulic gradient.

### Système automatique de chargement hydraulique

Avec l'objectif de piloter précisément le chargement hydraulique, les deux réservoirs sont dotés de trop-pleins et le réservoir amont est monté sur une glissière verticale. À l'aide d'un moteur pas à pas et d'une courroie crantée, ce réservoir peut translater verticalement avec une vitesse comprise entre 1 mm/min et 5 mm/min. Pour un échantillon de 200 mm de hauteur, la gamme de gradient hydraulique qui peut être appliqué est comprise entre 0 et 7.

### Instrumentation et système d'acquisition

L'ensemble des capteurs est connecté sur une centrale d'acquisition et un code Labview dédié a été écrit par les auteurs. Ce code permet notamment de visualiser au cours des essais les évolutions de la conductivité hydraulique, du gradient hydraulique et du débit. Il permet également de piloter le déplacement vertical du réservoir amont et d'introduire des pauses si la vitesse souhaitée est inférieure à 1 mm/min.

### Matériaux testés et procédure expérimentale

#### Distribution granulométrique et susceptibilité potentielle à la suffusion

La Figure 2 dresse la distribution granulométrique des quatre sols testés qui sont composés de sable et de gravier (matériaux commercialisés par la Sablière Palvadeau).

Selon le critère Kenney et Lau (1985) ces quatre sols sont instables, alors qu'ils apparaissent tous stables selon le critère Chang et Zhang (2013a). Par ailleurs, les distributions étant lacunaires, le critère Wan et Fell (2008) ne semble pas applicable. Donc même si ces trois critères ont été établis à partir d'essais de suffusion tous réalisés en conditions œdométriques, aucune classification univoque ne peut être dressée et la caractérisation de la sensibilité à la suffusion nécessite des essais dédiés. Pour autoriser l'érosion de toutes les particules fines, tout en interdisant l'érosion des grains grossiers, un tamis aval est choisi avec une ouverture de 1,2 mm.

### Préparation des échantillons et procédure d'essai de suffusion

Les matériaux sont tout d'abord humidifiés (teneur en eau visée : 4 %) avant malaxage pour éviter la ségrégation, puis chaque échantillon est préparé en quatre couches d'épaisseur 5 cm. L'application d'un faible confinement de 20 kPa permet d'éviter tout écoulement préférentiel pendant la saturation. Celle-ci débute par l'injection ascendante de CO<sub>2</sub> sous faible pression, puis la saturation en eau est menée à l'aide du réservoir amont, dont la vitesse de montée est fixée à 0,25 mm/min. Pour tous les échantillons en conditions triaxiales, la consolidation est réalisée afin d'atteindre la même contrainte effective moyenne  $p'$  de 70 kPa, mais avec différentes valeurs de déviateur de contrainte  $q$ . Quatre valeurs du rapport de contrainte de cisaillement  $\eta = q/p'$  sont ainsi obtenues : -0,63, 0, 0,38 et 0,79. Pour la réalisation des essais en conditions œdométriques, le moule métallique est maintenu autour de la membrane qui entoure l'échantillon et aucun effort déviatoire n'est appliqué. Le gradient hydraulique appliqué est augmenté par palier (*cf.* Fig. 2(b)) pour éviter de surestimer la résistance à la suffusion (Rochim *et al.*, 2017).

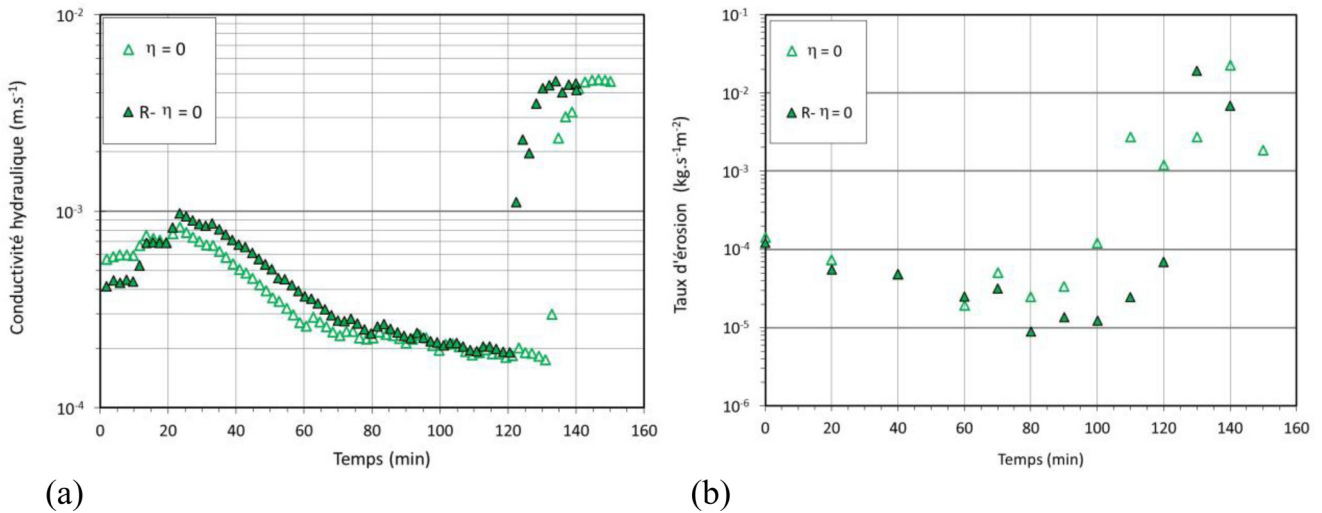
### Résultats et interprétations

#### Identification de quatre étapes et des paramètres associés

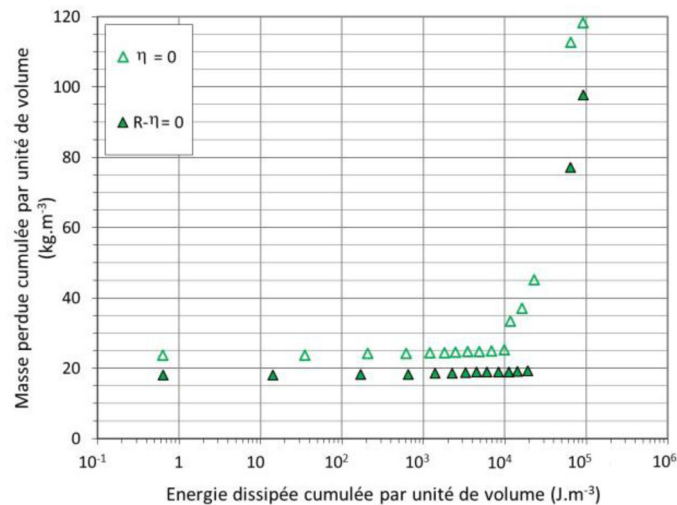
Les Figures 3(a) et 3(b) présentent l'évolution au cours du temps de respectivement : la conductivité hydraulique et du taux d'érosion, pour deux essais réalisés avec 25 % de sable et en condition isotrope ( $\eta = 0$ ).

Tout d'abord ces résultats soulignent la très bonne répétitivité de la procédure expérimentale, puisque la conductivité hydraulique initiale et le taux d'érosion initial sont très proches pour les deux essais. L'étude de l'évolution au cours du temps des deux grandeurs permet de distinguer quatre étapes successives :

- Au cours de la première étape, la conductivité hydraulique augmente légèrement à  $t = 10$  min pour les deux essais. Selon l'approche proposée par Skempton et Brogan (1994), cette étape peut être dénommée initiation. Sur la Fig. 2(b), il



**Fig. 3.** Évolution au cours du temps de : (a) la conductivité hydraulique, (b) du taux d'érosion.  $\eta = 0$ , sol constitué de 25% de sable.  
**Fig. 3.** Evolution over time of: (a) hydraulic conductivity, (b) erosion rate.  $\eta = 0$ , soil composed of 25% sand.



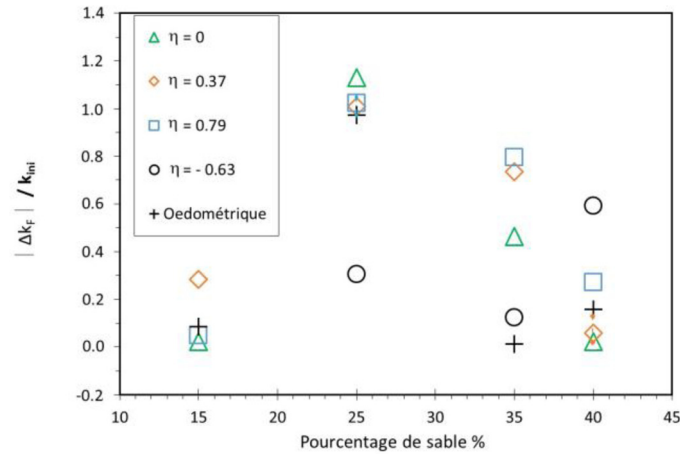
**Fig. 4.** Masse perdue cumulée par unité de volume versus énergie dissipée cumulée par unité de volume,  $\eta = 0$ , sol constitué de 25% de sable.  
**Fig. 4.** Cumulative mass lost per unit volume versus cumulative energy dissipated per unit volume,  $\eta = 0$ , soil composed of 25% sand.

est possible de noter que le gradient correspondant  $i_{SB} = 0,2$  ;

- Après 23 min pour les deux essais, la conductivité hydraulique décroît et les valeurs de taux d'érosion sont très faibles. Donc au cours de cette deuxième étape, l'auto filtration apparaît être le phénomène prépondérant ;
- À partir de 90 min, le taux d'érosion augmente brutalement suivi par l'accroissement de la conductivité hydraulique (à  $t = 120$  min pour l'essai  $R - \eta = 0$  et à  $t = 130$  min pour l'essai  $\eta = 0$ ). Cette étape se caractérise donc par un fort accroissement de l'érosion et est dénommée débouillage. L'initiation de ce débouillage peut être identifiée par l'accroissement de la conductivité hydraulique. Cette approche aboutit aux valeurs de gradient hydraulique  $i_{HC}$  de 3 et 2,5 pour les essais  $\eta = 0$  et  $R - \eta = 0$ . La Figure 4 présente l'évolution de la masse perdue cumulée par unité de volume, en fonction de l'énergie dissipée cumulée par unité de volume. Cette figure montre tout d'abord un faible

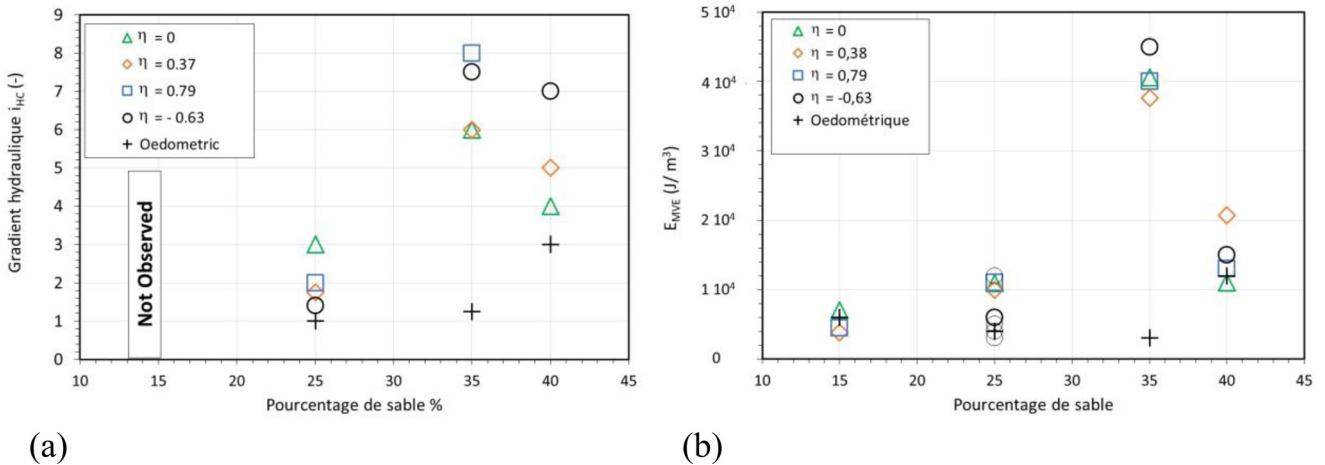
accroissement de la masse perdue, en fonction de l'énergie dissipée, suivi par une brutale augmentation de la masse perdue. L'énergie par unité de volume correspondante  $E_{MVE}$  est égale à  $9,8 kJ/m^3$  et  $18,9 kJ/m^3$  pour les essais  $\eta = 0$  et  $R - \eta = 0$  ;

- Au cours de la quatrième étape, la conductivité hydraulique reste constante et le taux d'érosion diminue. Après suffusion, la mesure par couches du pourcentage de sable a montré une diminution de ce pourcentage, plus marquée en partie aval. Cependant, pour une couche considérée, ce pourcentage est hétérogène avec certaines parties sans sable. Nous pouvons donc supposer que ces zones sans sable peuvent être connectées entre elles, amenant à la création de chemins d'écoulement préférentiel et conduisant à l'état d'équilibre. Cet état peut être caractérisé par l'indice de résistance à l'érosion  $I_\alpha$  (voir Eq. (2)) et qui est égal à 2,77 et 2,89, respectivement, pour les essais  $\eta = 0$  et  $R - \eta = 0$ .



**Fig. 5.** Écart normalisé de conductivité hydraulique en fonction du pourcentage de sable et pour les différentes valeurs du rapport de contrainte de cisaillement  $\eta$ .

**Fig. 5.** Normalized deviation of hydraulic conductivity as a function of sand percentage and for different values of shear stress ratio  $\eta$ .



**Fig. 6.** (a) Gradient hydraulique  $i_{HC}$  et (b) Énergie dissipée cumulée par unité de volume  $E_{MVE}$ , en fonction du pourcentage de sable et pour les différentes valeurs du rapport de contrainte de cisaillement  $\eta$ .

**Fig. 6.** (a) Hydraulic gradient  $i_{HC}$ , (b) Cumulative expended energy per unit volume  $E_{MVE}$  as a function of sand percentage and for different values of shear stress ratio  $\eta$ .

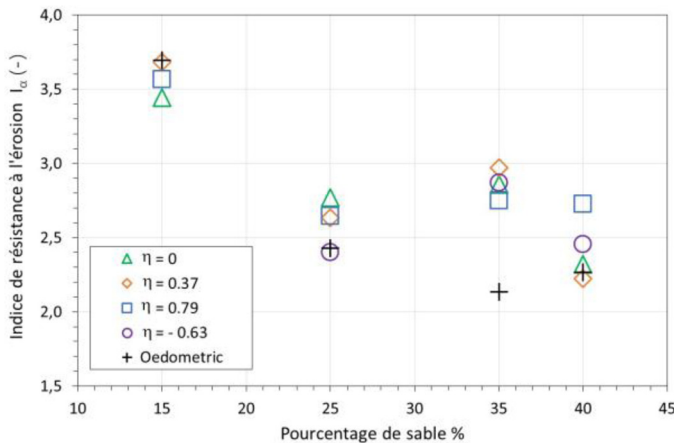
### Comparaison des paramètres pour les différents états mécaniques et les différents pourcentages de sable

L'influence de l'état mécanique pour les quatre sols est étudiée pour les quatre étapes précédemment identifiées. Les 25 essais que comprend cette étude ont tous été réalisés suivant une même densité sèche initiale visée. L'ensemble de cette étude est détaillé dans [Oli \*et al.\* \(2024\)](#) et nous synthétisons ici les principales conclusions.

Pour tous les essais réalisés en condition d'extension triaxiale ( $\eta = -0,63$ ) et pour tous les essais avec 15% de sable, il n'a pas été possible de détecter l'initiation. Pour les autres essais, le gradient  $i_{SB}$  est systématiquement égal à 0,2. Cette étape apparaît donc d'une part difficilement détectable et d'autre part, peu influencée par l'état mécanique et le pourcentage de sable.

Afin de caractériser l'auto-filtration, la différence  $\Delta k_F$  est calculée entre: les conductivités hydrauliques maximale et minimale, mesurées au cours de cette étape. Cette différence est normalisée par la conductivité hydraulique initiale  $k_{ini}$  et les valeurs correspondantes sont représentées par la [Figure 5](#), en fonction du pourcentage de sable et pour les différents états mécaniques. Pour un pourcentage de sable donné, l'état mécanique semble peu influencer cette étape. Par contre, en conditions œdométriques ou en compression triaxiale, l'auto-filtration apparaît favorisée pour le sol constitué de 25% de sable.

En fonction du pourcentage de sable et pour les différents états mécaniques, l'initiation du débouillage est étudiée à l'aide du gradient  $i_{HC}$  ([Fig. 6](#)) et de l'énergie dissipée  $E_{MVE}$  ([Fig. 6](#) (b)). Avec 15% de sable, l'approche en conductivité hydraulique ne permet pas de détecter l'initiation du



**Fig. 7.** Indice de résistance à l'érosion  $I_{\alpha}$  en fonction du pourcentage de sable et pour les différentes valeurs du rapport de contrainte de cisaillement  $\eta$ .

**Fig. 7.** Erosion resistance index  $I_{\alpha}$  as a function of sand percentage and for different shear stress ratio values  $\eta$ .

débouillage (Fig. 6(a)). Par contre, l'approche énergétique permet de détecter cette initiation pour tous les pourcentages de sable et montre qu'en condition triaxiale, la plus grande énergie dissipée est mesurée pour 35 % de sable (Fig. 6(b)).

L'influence de l'état mécanique et du pourcentage de sable sur l'état d'équilibre est étudiée par le biais de l'indice de résistance à l'érosion (Fig. 7). Pour cette étape, l'influence de l'état mécanique apparaît aussi limitée, en regard de l'influence du pourcentage de sable. Le sol le plus résistant apparaît être celui avec 15 % de sable. Cette observation est d'ailleurs corroborée par les mesures de déformation axiale qui augmentent avec le pourcentage de sable.

Enfin il convient de noter que pour l'ensemble des paramètres susmentionnés et pour les quatre sols, les valeurs obtenues en conditions œdométriques apparaissent globalement plus faibles qu'en condition triaxiale. Les sols testés apparaissent donc légèrement moins résistants dans cet état mécanique.

## Conclusions

À l'aide d'un nouveau dispositif triaxial, des essais de suffusion ont été réalisés sur des mélanges de gravier et différents pourcentages de sable (15 %, 25 %, 35 %, 40 %). Les essais ont été menés suivant un même chemin de chargement hydraulique, en conditions œdométriques, ou en conditions triaxiales avec une même contrainte effective moyenne mais différentes valeurs du rapport de contrainte de cisaillement

$\eta = q/p'$  ( $-0,63$ ,  $0$ ,  $0,38$  ou  $0,79$ ). Quatre étapes au cours du développement de la suffusion sont identifiées et caractérisées en gradient hydraulique et à l'aide de l'approche énergétique. Les résultats montrent que contrairement à l'approche énergétique, l'approche en conductivité hydraulique ne permet pas de détecter toutes les étapes pour tous les essais. Pour les quatre sols testés, l'influence de l'état mécanique apparaît limitée en comparaison de l'influence du pourcentage de sable. La classification relative de résistance à la suffusion des différents sols évolue en fonction du paramètre considéré. Les conditions et le cahier des charges sur site doivent donc être aussi considérés.

## Remerciements

Les auteurs remercient EDF et VERBUND pour le support financier et les échanges scientifiques réguliers. L'aide de Laurence Guihéneuf de Capacités SAS est également très appréciée.

## Références

- Chang DS, Zhang LM. 2013. Extended internal stability criteria for soils under seepage. *Soils and Foundations* 53(4): 569–583.
- Chang DS, Zhang LM. 2013. Critical hydraulic gradients of internal erosion under complex stress states. *J Geotech Geoenviron Eng* 139(9): 1454–1467.
- Fell R, Fry JJ. 2013. Erosion in geomechanics applied to dams and levees. Bonelli S, ed. London: ISTE-Wiley.
- Garner SJ, Fannin RJ. 2010. Understanding internal erosion: a decade of research following a sinkhole event. *Int J Hydro Dams* 17(3): 93–98.
- Ke L, Takahashi A. 2014. Experimental investigations on suffusion characteristics and its mechanical consequences on saturated cohesionless soil. *Soils and Foundations* 54(4): 713–730.
- Kenney TC, Lau D. 1985. Internal stability of granular filters. *Can Geotech J* 22(2): 215–225.
- Marot D, Rochim A, Nguyen HH, Bendahmane F, Sibille L. 2016. Assessing the susceptibility of gap graded soils to internal erosion characterization: proposition of a new experimental methodology. *Natural Hazards* 83(1): 365–388.
- Marot D, Oli B, Bendahmane F, Gelet R, Leroy P. 2024. A hydraulic gradient and stress-controlled erosion apparatus for assessing soil internal erosion. *Second relecture Geotech Test J*.
- Oli B, Gelet R, Marot D, Bendahmane F, Coubarde G. 2024. Characterizing the onset and the development of internal erosion under complex stress states. *Soumis à Acta Geotechnica*.
- Rochim A, Marot D, Sibille L, Le VT. 2017. Effect of hydraulic loading history on suffusion susceptibility of cohesionless soils. *J Geotech Geoenviron Eng* 143: 7. doi: [10.1061/\(ASCE\)GT1943-5606.0001673](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT1943-5606.0001673).
- Skempton AW, Brogan JM. 1994. Experiments on piping in sandy gravels. *Geotech* 44(3): 440–460.
- Wan CF, Fell R. 2008. Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations. *J Geotech Geoenviron Eng* 134(3): 401–407.
- Zhong C, Le VT, Bendahmane F, Marot D, Yin ZY. 2018. Investigation of spatial scale effects on suffusion susceptibility. *J Geotech Geoenviron Eng* 144: 9. doi: [10.1061/\(ASCE\)GT1943-5606.0001935](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT1943-5606.0001935).

**Citation de l'article :** Didier Marot, Bikram Oli, Rachel Gelet, Fatch Bendahmane. Nouveau dispositif pour l'étude de la suffusion suivant différents états mécaniques. Rev. Fr. Geotech. 2024, 178, 3.