

LIMITES DES CRITERES DE SUSCEPTIBILITE A LA SUFFUSION VIS-A-VIS DE LA STABILITE MECANIQUE DES OUVRAGES EN REMBLAI

Limits of suffusion susceptibility criteria with respect to the mechanical stability of earthen hydraulic structures

Antoine WAUTIER, Stéphane BONELLI

IRSTEA, UR RECOVER, 3275 Route de Cézanne - CS 40061 - 13182 Aix-en-Provence Cedex 5
antoine.wautier@irstea.fr ; stephane.bonelli@irstea.fr

François NICOT

IRSTEA, UR ETNA, 2 rue de la Papeterie - BP 76 - 38402 St-Martin-d'Hères cedex
francois.nicot@irstea.fr

MOTS CLEFS

Suffusion, instabilité mécanique, simulations numériques DEM/PFV

KEY WORDS

Suffusion, mechanical instability, DEM/PFV numerical simulations

RÉSUMÉ

La suffusion est indéniablement le mécanisme d'érosion interne le plus complexe. Il s'agit d'une érosion interne sélective qui ne concerne que la fraction fine du sol. La stabilité des barrages en remblais vis-à-vis de la suffusion est classiquement traitée via le concept de stabilité granulométrique interne qui repose sur le non transport des particules fines à l'intérieur de l'ouvrage. Toutefois, il peut sembler trop restrictif de considérer que le moindre transport de matériau à l'intérieur du corps de l'ouvrage suffit à compromettre sa stabilité mécanique.

En se basant sur des simulations numériques par éléments discrets (DEM), l'impact de la suffusion est analysé à l'échelle d'un volume élémentaire de sol. Il est mis en évidence que les particules faiblement impliquées dans la transmission des efforts (et donc mobilisables par un écoulement interne) ont un rôle stabilisateur par leur capacité à enrayer le développement de déformations plastiques. Leur transport sous l'action de l'eau ne conduit cependant pas nécessairement à l'apparition d'instabilités mécaniques. Par exemple, pour un matériau dans lequel les distances de transport sont limitées, un écoulement interne peut même avoir un effet stabilisateur en pré-positionnant les particules libres au contact des particules reprenant les efforts mécaniques.

Les résultats présentés restent du domaine de la recherche amont et ne permettent pour l'heure pas de formuler de nouveaux critères de susceptibilité à la suffusion basés sur l'apparition d'instabilités mécaniques. Ils mettent cependant en évidence l'existence de marges de sécurité résiduelles à caractériser, et indiquent clairement que des travaux de recherches sont nécessaires pour aller plus avant vers une justification des barrages physiquement motivée.

ABSTRACT

Suffusion is definitely the most complex form of internal erosion. It consists in the selective erosion of the finest particles of a soil in between the coarsest particles. The mechanical stability of earthen dams with respect to suffusion is classically assessed thanks to the concept of internal stability that relies on the non-transport of the fine particles inside the hydraulic structure. This criterion may appear too conservative though, because the transport of free particles inside the dam body does not necessarily implies a loss in mechanical stability.

Based on discrete element simulations, the impact of suffusion is analyzed at the scale of a representative elementary volume of soil. The particular role played by particles loosely implied in stress transmission (and thus easily mobilized by an internal fluid flow) is investigated in terms of mechanical stability. It is shown that these particles have a stabilizing role through their ability to prevent the development of large plastic strains. Their transport under the action of an internal fluid flow does not however lead to the loss of mechanical stability. For instance, for a material in which transport distances are limited, an internal fluid flow can even generate a stabilizing effect by placing the free particles in contact with heavily stressed particles.

This study belongs to fundamental research work and its results cannot be used yet to formulate new susceptibility criteria for suffusion based on the loss of mechanical stability. However, they show that some safety margins exist and additional work is needed to move forward to a more physical justification of the stability of earthen dams with respect to the occurrence of harmful suffusion.

1. INTRODUCTION

La France dispose d'un important parc d'ouvrages hydrauliques avec plus de 19 000 km de digues fluviales et maritimes, plusieurs dizaines de milliers de petits barrages, et un peu plus de 500 barrages de plus de 15 m. Ces ouvrages hydrauliques sont pour la plupart construits à partir de matériaux granulaires compactés (c'est le cas pour la grande majorité des digues et pour environ 30 % des barrages), ce qui en fait des ouvrages perméables soumis à des écoulements internes dès lors qu'ils sont en eau. Ces écoulements peuvent alors altérer leur structure interne par érosion. Tant que les ouvrages endommagés ne sont pas soumis aux chargements hydrauliques maximaux pour lesquels ils ont été dimensionnés, les conséquences de l'érosion interne peuvent passer inaperçues. Cependant, les infiltrations d'eau sont susceptibles de générer des instabilités mécaniques responsables de ruptures lors de brusques modifications des conditions de chargement. Aujourd'hui, on observe en moyenne une rupture de digue par an en France, et 45 % d'entre elles sont attribuées à l'érosion interne [2,3]. Dans un contexte de vieillissement des ouvrages et de dérèglement climatique, les conséquences des tempêtes et des crues sont susceptibles de s'aggraver, ce qui fait de la compréhension des mécanismes de rupture des barrages et des digues un enjeu de plus en plus important.

On distingue aujourd'hui quatre types d'érosion interne [2,3] :

- l'érosion de conduit reliant l'amont et l'aval ;
- l'érosion de contact, à l'interface entre un sol fin et un sol grossier ;
- l'érosion régressive, par l'entraînement de matériaux qui se déclenche à l'exutoire d'un écoulement d'eau et qui s'auto-entretient jusqu'à déboucher à l'amont ;
- la suffusion, qui est l'entraînement sélectif, par l'eau en mouvement, des petits grains à travers l'espace poreux formé par les grains les plus gros.

De ces quatre mécanismes, la suffusion est le plus complexe et le moins connu. Sa prise en compte dans le dimensionnement des ouvrages hydrauliques passe par l'application de règles géométriques d'autofiltration des matériaux mis en place. Afin de se prémunir contre l'existence de ce phénomène, les granulométries des matériaux mis en place doivent être telles que les espaces laissés entre les plus gros grains ne soient pas suffisamment larges pour laisser la possibilité aux plus petits grains de circuler au sein même du matériau. Dans ce cas on parle de *stabilité granulométrique*, souvent appelée *stabilité interne*. Les deux principaux critères utilisés dans la littérature [6,7] sont exclusivement géométriques et ne prennent en compte ni le chargement hydraulique, ni le chargement mécanique. La notion de stabilité interne ne présage donc en rien la capacité d'un matériau à reprendre des efforts mécaniques. Elle ne présage pas non plus que tout écoulement d'eau interne sera capable d'éroder les particules fines par suffusion.

La prise en compte du chargement hydraulique a été proposée un peu plus tard, par l'introduction de la notion de gradient hydraulique critique pour la suffusion [9]. Ce gradient correspond à une fraction du gradient critique de Terzaghi prédisant la fluidisation du sol, afin de prendre en considération le fait que les grains les plus fins reprennent généralement moins d'efforts mécaniques que les plus gros grains dans les matériaux granulaires.

Mais là encore, les conséquences en termes de comportement mécanique des sols ne sont pas prises en compte. Seul le non transport des particules fines compte. C'est pour cette raison que nous préférons substituer la notion d'*instabilité mécanique* à la notion d'*instabilité (granulométrique) interne*. Cette notion se définit par l'existence de réponses d'intensité finie à des sollicitations d'intensités infinitésimales en partant d'une configuration d'équilibre. Il s'agit typiquement du problème d'une bille au sommet d'une colline qui reste immobile tant que l'on ne la sollicite pas mais qui ne demande qu'à dévaler la pente à la moindre perturbation. De manière formelle, on peut définir la stabilité ou l'instabilité d'un matériau continu grâce au critère du travail du second-ordre introduit par Hill [5]. Cette définition est plus générale que les différents critères de ruptures classiquement utilisés (comme par exemple le critère de Mohr-Coulomb) et permet d'anticiper certains modes de rupture qu'ils ne peuvent pas prédire, comme par exemple la liquéfaction statique des sols. Ces dernières années, le critère du travail du second-ordre a été appliqué avec succès pour détecter les instabilités mécaniques dans les matériaux granulaires et anticiper leurs modes de rupture [11].

2. OUTILS ET METHODE

Dans cette étude nous proposons d'analyser les conséquences de la suffusion à l'échelle d'un volume élémentaire représentatif de sol (VER), c'est à dire un petit volume de sol suffisamment grand pour que l'approximation de milieu continu soit valable. Cette échelle correspond à un point matériel dans un calcul aux éléments finis (i.e. un point d'intégration d'un élément). A l'échelle d'un VER, un sol non cohésif peut être modélisé en première approximation par un assemblage de grains sphériques interagissant par des lois de contact (élastiques et frictionnelles, régies par un critère de Mohr Coulomb local) et dont la distribution de rayon respecte la courbe granulométrique du matériau considéré. Le comportement mécanique de l'ensemble de ces grains est alors simulé par une méthode aux éléments discrets (DEM) dans laquelle le mouvement de chaque grain est décrit par les équations de Newton. Dans cette étude, le code opensource YADE [10] a été utilisé pour simuler un VER cubique de sol dont l'état de contrainte est contrôlé au moyen de forces extérieures appliquées sur les parois de l'échantillon (voir Figure 1).

L'étude de la suffusion implique la modélisation d'un écoulement interne et la prise en compte d'interactions fluide/grains. Ce couplage est simulé ici grâce à un schéma numérique de type réseau de pores. Il s'agit du schéma PFV (Pore Scale Finite Volume) récemment implémenté dans YADE [4][2]. Ce schéma numérique permet de simuler un écoulement fluide et un transport de particules en trois dimensions en un temps de calcul raisonnable.

Pour un état de contrainte déformation donné, la stabilité mécanique du matériau granulaire considéré est estimée grâce au critère du travail du second-ordre. Un matériau est défini comme instable dans un état donné (caractérisé par sa microstructure et son état de contrainte) s'il existe au moins une direction de chargement incrémental pour lequel le travail du second-ordre est négatif. L'existence d'une telle direction signifie qu'il existe des conditions de chargement pour lesquelles le matériau peut être continuellement déformé sans apport extérieur d'énergie et peut passer d'un comportement quasi-statique à un comportement dynamique (transition inertielle). Pour un matériau instable mécaniquement, la rupture (au sens de la perte d'existence d'un état d'équilibre statique) est ainsi conditionnelle et ne se produit que pour des directions de chargement particulières. Pour les sols, et plus généralement tous les matériaux pouvant être décrits par une loi de comportement élasto-plastique non-associée, l'instabilité mécanique apparaît strictement avant d'atteindre la surface plastique limite (la droite de Mohr-Coulomb dans le plan (p, q) par exemple).

Malgré sa portée universelle, l'utilisation du critère du travail du second ordre n'est pas aisée car elle nécessite de tester toutes les directions possibles de sollicitations incrémentales. Dans cette étude l'ensemble des chargements incrémentaux est restreint au plan axisymétrique des contraintes principales et est exploré grâce à des études directionnelles en contrainte comme illustré par la Figure 2. Différents incréments de contraintes $\underline{\delta\sigma}$ sont considérés et les incréments de déformation $\underline{\delta\varepsilon}$ résultant sont mesurés. En prenant le produit contracté doublement entre déformation et contrainte incrémentales, on calcule alors la valeur du travail du second-ordre $\delta^2 W_2 = \underline{\delta\varepsilon} : \underline{\delta\sigma}$ pour les différentes directions de sollicitation $\underline{\delta\sigma}$ considérées. Dans le cas présent, on peut représenter l'évolution du travail du second-ordre en fonction des différentes sollicitations sous une forme circulaire comme illustrée sur la Figure 2. Dans ce type de diagramme, l'angle des coordonnées polaires caractérise la direction de la sollicitation incrémentale dans le plan axisymétrique des contraintes principales et le rayon des coordonnées polaires correspond à la valeur normalisée du travail du second-ordre ($W_2^{\text{norm}} = \frac{\delta^2 W_2}{\|\underline{\delta\sigma}\| \|\underline{\delta\varepsilon}\|}$) incrémentée d'un offset unitaire. Un exemple de diagramme est présenté sur la Figure 2. Si la courbe polaire intersecte le cercle unité, le matériau est instable au sens du critère du travail du second-ordre, sinon il est dit stable.

Pour un matériau instable, l'ensemble des directions incrémentales pour lesquelles $\delta^2 W_2 < 0$ forme un cône d'instabilité. Il suffit alors d'appliquer au matériau un incrément de contrainte compris dans ce cône d'instabilité (en utilisant une variable de contrôle ad-hoc) pour provoquer sa rupture effective par transition inertielle. Dans les deux parties suivantes, les conséquences mécaniques de la suffusion sont analysées grâce à la combinaison de simulations DEM/PFV à l'échelle d'un VER et l'application du critère du travail du second-ordre.

3. ROLE STABILISATEUR DES PARTICULES LIBRES

Dans un matériau granulaire, seulement une petite fraction des grains reprend la grande majorité des efforts mécaniques. Les autres grains sont peu chargés et ne sont pas forcément indispensables pour reprendre le chargement mécanique à un instant donné. Ils peuvent en revanche être sollicités si le chargement évolue.

Afin de mettre en évidence le rôle particulier joué par les grains libres (et donc facilement mobilisables par un écoulement d'eau) d'un matériau granulaire, l'expérience numérique suivante a été considérée.

Un VER de matériau granulaire a été préparé et soumis à un essai triaxial drainé sous une pression de confinement $\sigma_0 = 100$ kPa jusqu'à un état de contrainte déviatorique $\eta = \frac{q}{p} = 0.45$ où p est la contrainte moyenne et q est le déviateur.

Pour cet état de contrainte, une étude directionnelle dans le plan axisymétrique des contraintes principales ($\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$ dans le repère représenté sur la Figure 1) a été réalisée afin de mettre en évidence l'existence d'un cône d'instabilité visible sur la Figure 2. L'état de contrainte et de microstructure considéré appartient donc au domaine de bifurcation du matériau considéré. Il existe des directions de chargement incrémental pouvant conduire à la rupture effective du matériau. Ces chemins correspondent à un léger déconfinement du matériau pour un matériau sec comme illustré sur la Figure 2. Dans le cas d'une digue ou d'un barrage saturée en eau, cela peut correspondre à une brusque montée des pressions interstitielles (et donc diminution de la contrainte effective moyenne) comme par exemple lors d'une brusque montée du niveau de l'eau en amont.

A partir de l'échantillon préparé, deux évolutions artificielles de microstructure ont été imaginées. Une première évolution consiste à supprimer les particules libres de l'échantillon pré-contraint. Ces particules ne reprenant pas d'effort mécanique, leur absence n'empêche pas l'échantillon modifié de supporter le chargement mécanique imposé. La deuxième évolution de microstructure consiste au contraire à rajouter des particules libres dans les pores existants du matériau. Là encore, l'ajout de particules libres n'empêche pas l'échantillon modifié de supporter le chargement mécanique imposé. Les conséquences de ces deux modifications de microstructure ont ensuite été analysées en termes d'évolution de la stabilité mécanique. La Figure 3 montre l'existence dans les deux cas d'un cône d'instabilité, mais la largeur du cône est modifiée par le retrait ou l'ajout de particules libres. Plus le matériau comporte de particules libres, moins le cône est large, ce qui met en évidence le rôle stabilisateur des particules libres dans un matériau granulaire.

Ce rôle stabilisateur des particules libres a été mis en évidence dans Wautier et al. [12] et est illustré sur la Figure 4. Il s'explique dans un formalisme continu par la capacité des particules libres à modifier les paramètres constitutifs du comportement plastique du matériau (non-associé dans le cas des matériaux granulaires). D'une part, les particules libres limitent le développement des déformations plastiques en se faisant piéger lorsque le squelette granulaire s'effondre, ce qui améliore les capacités d'érouissage du matériau. Dans le cas où le chargement est anisotrope, les effondrements du squelette granulaire se produisent dans des directions privilégiées. En limitant ces effondrements directionnels, les particules libres contrôlent également la direction d'écoulement plastique non-associée de la loi constitutive du matériau. En revanche, n'étant pas impliquées initialement dans la transmission des efforts, elles ne contrôlent pas l'initiation des effondrements du squelette granulaire qui correspondent à l'activation de la plasticité.

En conclusion de cette première étude, on peut retenir que l'érosion hors du matériau de ses particules libres peut générer davantage d'instabilité mécanique alors qu'à l'inverse l'apport de particules libres dans le matériau va dans le sens d'une stabilisation mécanique.

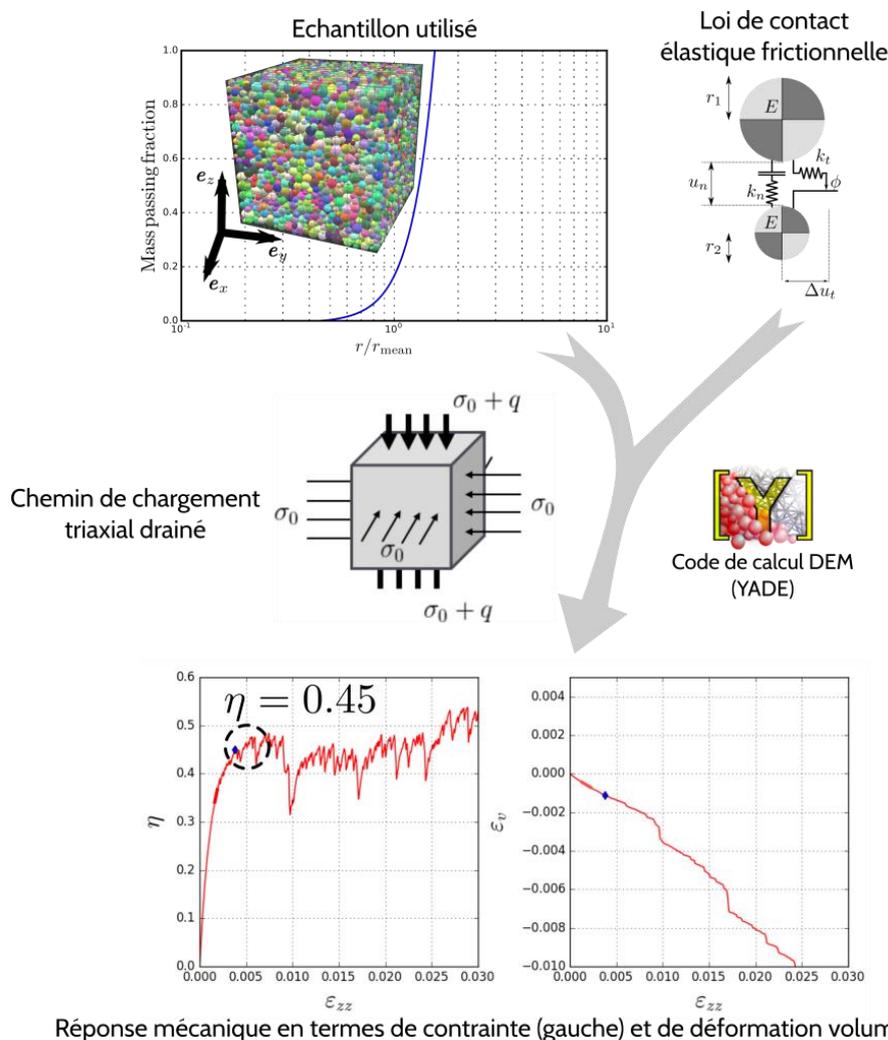


Figure 1 : Définition d'un VER de sol non-cohésif et simulation DEM d'un essai triaxial drainé sous un confinement $\sigma_0 = 100$ kPa. La réponse mécanique est donnée en termes de ratio entre la contrainte déviatorique q et la pression moyenne p : $\eta = q/p$. Par la suite l'état pré-contraint à $\eta = 0.45$ est considéré.

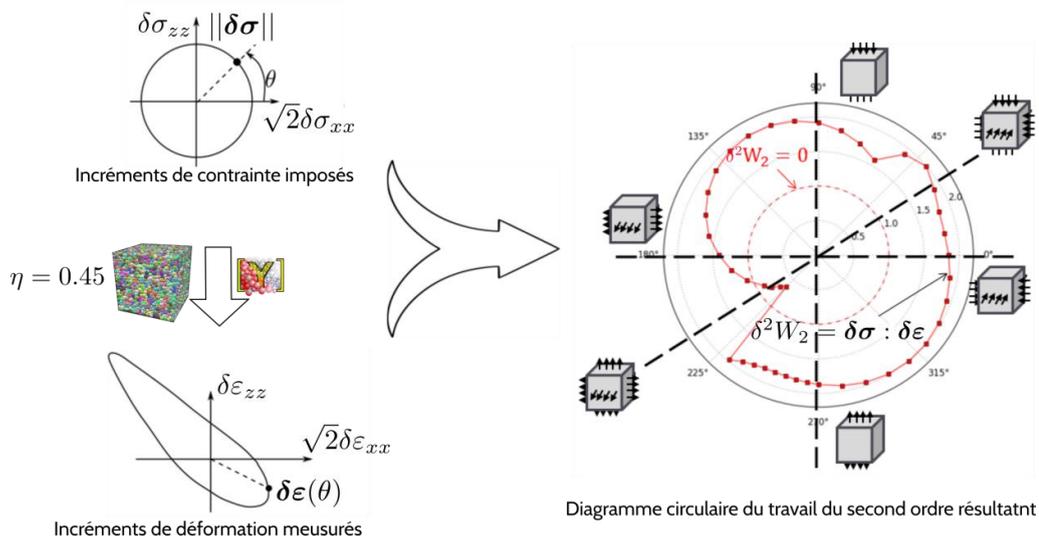


Figure 2 : Procédure d'analyse de stabilité mécanique basée sur l'annulation du travail du second-ordre (W_2) pour certaines directions de chargement incrémental. Le principe d'une étude directionnelle dans le plan axisymétrique des contraintes principales ($\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$) est donné à gauche. Sur la droite, le diagramme circulaire du travail du second-ordre est donné pour l'état de contrainte $\eta = 0.45$. Quelques chargements incrémentaux caractéristiques sont représentés. Un cône d'instabilité est visible proche de la direction correspondant au déconfinement de l'échantillon

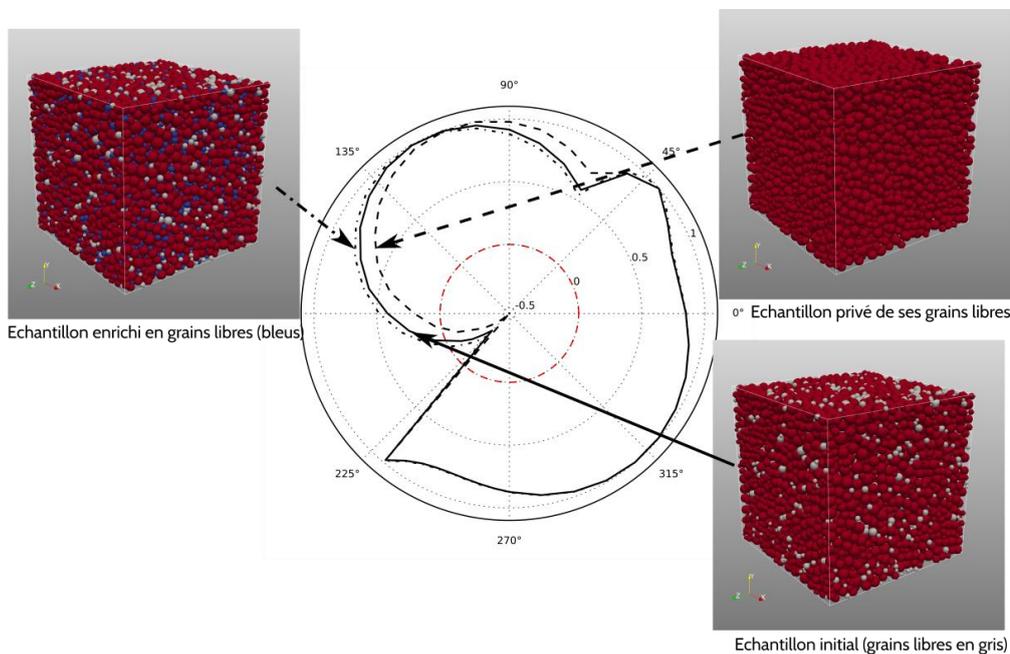


Figure 3 : Mise en évidence du rôle stabilisateur joué par les grains libres. L'ajout de grains libres se traduit par un rétrécissement du cône d'instabilité alors que leur retrait se traduit par un élargissement du cône d'instabilité.

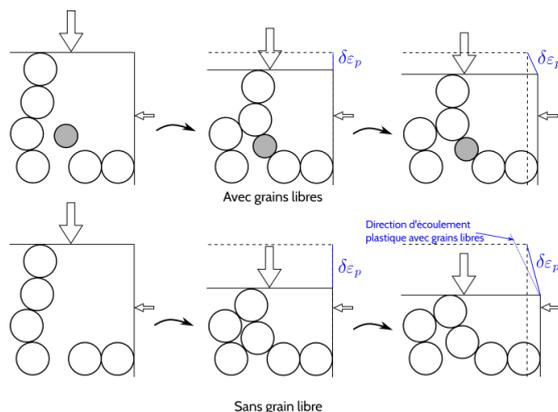


Figure 4 : Schéma explicatif du rôle stabilisateur joué par les grains libres. En cas d'effondrement du squelette granulaire, l'absence de grains libres modifie l'intensité de la déformation plastique $\delta\varepsilon_p$ ainsi que la direction de l'écoulement plastique.

4. SIMULATION NUMERIQUE DE LA SUFFUSION ET CONSEQUENCES MECANIQUES

Les résultats exposés dans la section précédente ont été obtenus pour des évolutions artificielles de microstructure. Dans le cas d'un matériau soumis à un écoulement interne, l'écoulement d'eau provoque une évolution de la microstructure i) en transportant les particules libres du matériau sur des distances plus ou moins importantes selon leur taille par rapport aux dimensions des pores et constrictions du matériau [14], ii) en forçant une réorganisation des contraintes dans le matériau par l'application de forces fluides additionnelles sur les grains transmettant les efforts [13]. Les conséquences de ces évolutions microstructurales en termes de stabilité mécanique sont plus difficiles à anticiper que les évolutions considérées dans la section précédente. Grâce au couplage fluide/grain PFV [4][2], il est possible de simuler ces évolutions à l'échelle d'un VER.

L'expérience numérique réalisée consiste à préparer (comme dans la section précédente), un VER de sol dans un état de microstructure et de contrainte instable au sens du critère du travail du second-ordre. Pour la granulométrie considérée ici (Figure 5), on choisit $\eta = \frac{q}{p} = 0.9$ dans un essai triaxial drainé sous une pression de confinement $\sigma_0 = 100$ kPa. A partir de cet état, un écoulement d'eau est simulé en considérant un gradient hydraulique $I = 0.1$ dans la direction transverse à la direction d'application de la contrainte déviatorique. Cette situation correspond qualitativement aux chargements mécanique et hydraulique auxquels est soumis un petit volume de sol localisé au cœur d'un barrage. Sous l'effet de l'écoulement, les grains libres du matériau sont mis en mouvement et sont soit extraits du VER, soit colmatés et piégés à l'intérieur du matériau. Une fois que plus aucun grain n'est en mouvement à l'intérieur du VER, l'écoulement d'eau est stoppé et la stabilité mécanique de la nouvelle microstructure est estimée grâce à une étude directionnelle en contrainte dans le plan axisymétrique des contraintes principales. L'expérience numérique réalisée est synthétisée sur la Figure 5.

La comparaison des diagrammes circulaires du travail du second-ordre pour les microstructures avant et après application de l'écoulement fluide est donnée dans la Figure 6. Pour le matériau considéré, le transport des particules fines est resté limité et cela se traduit à l'échelle du point matériel par une restabilisation du matériau sous l'effet de l'écoulement interne.

Cet effet stabilisateur du fluide s'interprète localement par la mise en contact des grains colmatés avec les chaînes de grains reprenant les efforts mécaniques. Ceux-ci peuvent alors plus facilement limiter le développement des déformations plastiques en cas d'effondrement de ces « chaînes de force ».

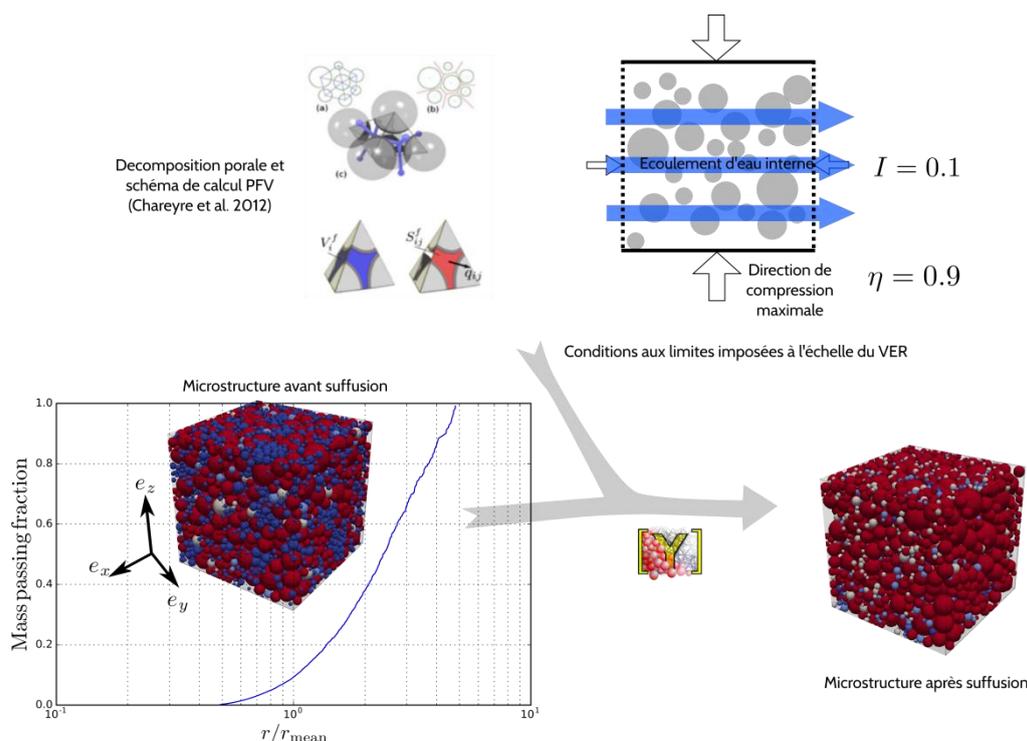


Figure 5 : Simulation DEM/PFV de la suffusion à l'échelle d'un VER de sol. L'échantillon est d'abord préparé dans un état de contrainte $\eta = 0.9$ comme dans la Figure 1 puis un gradient hydraulique $I = 0.1$ perpendiculaire à la direction de compression principale est appliqué pour mettre en mouvement les particules libres et forcer le réarrangement du réseau de transmission des efforts mécaniques. La microstructure résultante est présentée en bas à droite.

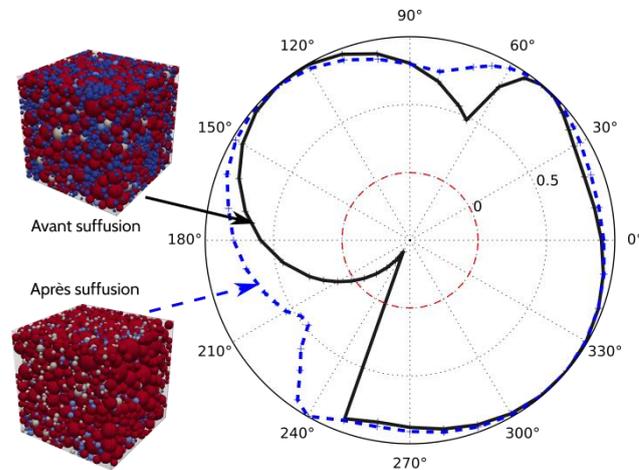


Figure 6 : Diagrammes circulaires du travail du second-ordre pour un état de contrainte $\eta = 0.9$ avant et après suffusion. L'évolution de microstructure induite par l'écoulement interne a fait disparaître le cône d'instabilité.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats présentés ici restent du domaine de la recherche amont et ne permettent pour l'heure pas de formuler de nouveaux critères de susceptibilité à la suffusion basés sur l'apparition d'instabilités mécaniques. Ils mettent cependant en évidence la nécessité de reconsidérer les conséquences de la suffusion en termes d'instabilités mécaniques et pas seulement en termes de perte de fraction fine (instabilité granulométrique). La présence d'un écoulement interne induit des modifications de microstructure plus complexes que le simple retrait des particules fines d'un matériau, et qui peuvent parfois aller de façon surprenante dans le sens de la stabilité mécanique. L'analyse de la stabilité mécanique par le critère du travail du second-ordre montre également que les instabilités supplémentaires générées par le retrait de particules libres restent confinées pour quelques directions de chargement (dans un cône d'instabilité). Ainsi la rupture suite à une érosion massive des particules libre d'un matériau granulaire est conditionnée au type de chargement considéré. Autrement dit, seuls certains chargement bien choisis provoqueront la rupture effective du matériau mais pas tous. La direction du cône d'instabilité indique que les chargements axisymétriques préjudiciables correspondent à un léger déconfinement des matériaux (diminution de la pression effective moyenne). Dans le cas d'un barrage ou d'une digue saturée en eau, cela peut correspondre à une brusque montée des pressions interstitielles responsable une baisse de la contrainte effective moyenne. Il est à noter aussi que la suffusion induit des phénomènes susceptibles de modifier le champ de pression interstitielle et par conséquent la réponse de l'ouvrage à une sollicitation hydraulique : augmentation de perméabilité des matériaux érodés et/ou colmatage du matériau érodé ou des matériaux situés en aval de l'écoulement (dont le système de drainage éventuel). Ce couplage n'est pas étudié ici et méritera un travail spécifique à l'échelle de l'ouvrage afin d'analyser les conséquences de la suffusion sur la redistribution des pressions interstitielles et sur les modifications du champ de contraintes effectives qui pourront ou non correspondre à des directions instables au sens du travail du second-ordre.

Les résultats présentés viennent conforter les résultats expérimentaux obtenus par Aboul Hosn et al. [1] ainsi que Nguyen et al. [8] qui mettent en évidence au moyen d'essais triaxiaux drainés sur des sols érodés que la suffusion peut améliorer parfois la résistance mécanique du sol en ayant généré une réorganisation du squelette granulaire. En effet, lorsque le départ des fines n'est pas compensé par le tassement (le sol devient plus lâche), la résistance du sol est diminuée. A l'inverse, lorsque le tassement équilibre le départ des fines, la résistance du sol érodé est conservée ou même améliorée. Notons que dans tous les cas, il y a un tassement qui peut induire d'autres désordres par ailleurs pour l'ouvrage.

Ainsi les critères géométriques utilisés aujourd'hui pour empêcher l'apparition du phénomène de suffusion dans les digues et les barrages en remblais sont certainement conservatifs et il existe probablement des marges de sécurité résiduelles. Toutefois, à l'heure actuelle, il est encore trop tôt pour proposer des critères alternatifs focalisés sur les conséquences mécaniques de la suffusion. La justification de la tenue d'ouvrages hydrauliques ayant été soumis à de la suffusion passera vraisemblablement par le développement de lois constitutives incluant les effets déstabilisateurs ou restabilisateurs d'un écoulement interne et par l'identification des chargements incrémentaux préjudiciables pour l'ouvrage via par exemple l'utilisation du critère de stabilité du travail du second-ordre dans des calculs aux éléments finis à l'échelle de l'ouvrage.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Aboul Hosn R., Nguyen C. D., Sibille L., Benahmed N. and Chareyre B., 2017. Microscale analysis of the effect of suffusion on soil mechanical properties. In International Workshop on Bifurcation and Degradation in Geomaterials (pp. 117-124). Springer, Cham.
- [2] Bonelli S. (edt), Erosion des géomatériaux, érosion interne et de surface, Traité MIM série Risques Naturels, Hermès Science Publication, 416 p. (2012).
- [3] Bonelli S. (edt), *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*, Wiley/ISTE , 388 p., 2013.
- [4] Chareyre B., Cortis A., Catalano E., Barthélemy E., 2012, Pore-scale modeling of viscous flow and induced forces in dense sphere packings. *Transp. Porous Media* 94(2), 595–615.
- [5] Hill R., 1958. A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 6(3):236–249.
- [6] Kenney T. C. and Lau D., 1985. Internal stability of granular filters. *Canadian geotechnical journal*, 22(2), 215-225.
- [7] Kezdi A., 1979. *Soil physic – selected topics*. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam. 160 pp.
- [8] Nguyen C. D., Benahmed N., Andò E., Sibille L., Philippe P. 2019. Experimental investigation of microstructural changes in soils eroded by suffusion using X-ray tomography, *Acta Geotechnica*, 14(3), 749-765.
- [9] Skempton A. W. and Brogan J. M., 1994. Experiments on piping in sandy gravels. *Geotechnique*, 44(3), 449-460.
- [10] Šmilauer V., et al., 2015. Yade Documentation 2nd edition. The Yade Project. <http://yade-dem.org/doc/>
- [11] Wan R., Nicot F. and Darve F., 2016. *Failure in Geomaterials, a contemporary treatise*. ISTE/Elsevier.
- [12] Wautier A., Bonelli S. and Nicot F., 2019. Rattlers contribution to granular plasticity and mechanical stability. *International Journal of Plasticity*, 112:172–193.
- [13] Wautier A., Bonelli S. and Nicot F., 2018 Flow impact on granular force chains and induced instability. *Physical Review E*, 98(4):042909.
- [14] Wautier A., Bonelli S. and Nicot F., DEM investigations of internal erosion: grain transport in the light of micromechanics, *International journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 43(1), 339-352.