



Dynamique de déstabilisation gravitaire d'un milieu granulaire immergé et drainé

Félix Bonnet, Thierry Richard, Pierre Philippe

► To cite this version:

Félix Bonnet, Thierry Richard, Pierre Philippe. Dynamique de déstabilisation gravitaire d'un milieu granulaire immergé et drainé. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. ⟨hal-03378602⟩

HAL Id: hal-03378602

<https://hal.science/hal-03378602v1>

Submitted on 14 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Dynamique de déstabilisation gravitaire d'un milieu granulaire immergé et drainé

F. BONNET^a, P. PHILIPPE^a, T. RICHARD^a

a. Cemagref, 3275 route de Cézanne CS 40061, 13182 Aix en Provence cedex 5

Résumé :

De nombreux phénomènes naturels de déstabilisation (liquéfaction, avalanche sous marine, ...) sont initiés et/ou amplifiés par la présence d'eau à l'intérieur du sol. Nos travaux expérimentaux ont pour but de comprendre l'influence des paramètres hydrauliques et des caractéristiques d'un sol granulaire immergé (fraction volumique, granulométrie, ...) sur la stabilité de pente, et plus particulièrement sur la dynamique de déclenchement, visualisée par PIV, des deux modes de déstabilisation observés.

Abstract :

Many natural phenomenon of destabilization (liquefaction, submarine avalanches, etc) are initiated and/or amplified by water occurrence inside soil. The purpose of our experimental works is to better understand the influence of hydraulic parameters and of underwater granular soil characteristics (volume fraction, grain size distribution, etc) on slope stability, and more precisely, on the triggering dynamics, revealed by PIV, of the two different types of destabilization observed.

Mots clefs : granulaire immergé, instabilités gravitaires, mode de déstabilisation, PIV

1 Introduction

La limite de stabilité de pente d'un sol est une donnée de première importance tant pour les ouvrages de génie de civil que dans le cadre des risques naturels (avalanches de surface, glissements de terrain, laves torrentielles [1]). Ce type de déstabilisation gravitaire est observé aussi bien dans l'air qu'en condition immergée. Dans ce second cas, un écoulement hydraulique interne peut de surcroît affecter la stabilité d'un sol et, selon son orientation vis-à-vis de la gravité, aller jusqu'à la fluidisation ou la rupture de pente du sol. A un niveau plus fondamental, le couplage entre les effets de dilatance/contractance d'un sol granulaire et l'apparition d'une surpression interstitielle est encore mal compris bien qu'il joue un rôle déterminant, notamment au moment de l'initiation d'une avalanche. Plusieurs travaux récents tendent à éclaircir le rôle ainsi joué par l'eau [2-4].

Nous présentons ici une situation particulière dans l'étude de ce couplage eau/déformation en faisant le choix d'imposer un drainage interne constant à un milieu granulaire afin d'observer comment cet écoulement hydraulique va modifier le seuil de stabilité de pente du milieu et sa déstabilisation ultérieure.

2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué d'une cellule rotative de dimensions intérieures $5 \times 20 \times 25 \text{ cm}^3$ (figure 1). Dans cette cellule, un échantillon de sol d'épaisseur H est installé entre deux filtres inférieur et supérieur qui jouent également un rôle d'homogénéisation de l'écoulement liquide. Celui-ci est contrôlé par la différence de hauteur Δh entre deux bacs à débordement qui impose au sol un gradient hydraulique $i = \Delta \tilde{P} / \rho_w g H$ où $\Delta \tilde{P}$ est la différence de pression dynamique de part et d'autre de la couche de sol et ρ_w est la densité de l'eau. L'écoulement reste perpendiculaire à la surface libre du sol, seul son sens est modifié. Selon ce sens, et donc selon le signe de i , on distingue un régime stabilisateur (écoulement descendant) et un régime déstabilisateur (écoulement descendant) pour lesquels l'angle limite de stabilité est soit augmenté, soit diminué. L'état ultime du régime déstabilisateur correspond au régime fluidisé.

Une caméra, embarquée dans le référentiel de la cellule ou fixe dans celui du laboratoire, permet de

déterminer le seuil de déstabilisation ainsi que l'évolution dynamique dans la phase d'initiation de l'instabilité, obtenue par CIV (Correlation Images Velocimetry) à l'aide du logiciel DPIVsoft [5].

Le matériau principalement utilisé pour ces travaux est du sable d'Hostun (HN 0.4/0.8), tamisé entre 400 μm et 1 mm, de distribution granulométrique centré à 600 μm . Des billes de verre ont été également utilisées.

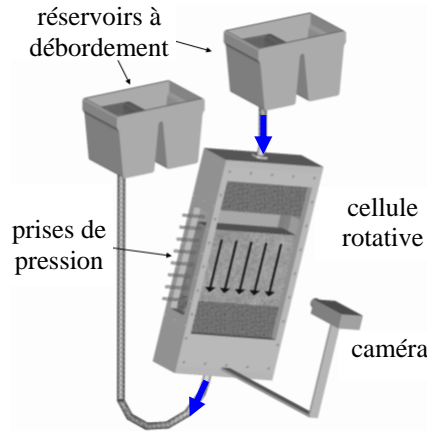


FIG. 1 – Schéma du dispositif expérimental.

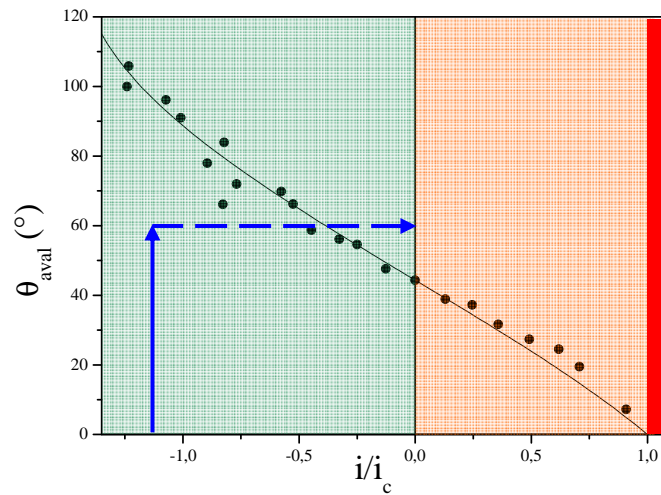


FIG. 2 – Diagramme de stabilité du sable HN 0.4/0.8 représentant l'angle limite de stabilité, mesuré (symboles) ou théorique (courbe), en fonction du gradient hydraulique. Les régimes stabilisateur (vert), déstabilisateur (orange) et fluidisé (rouge) sont également représentés ainsi que le chemin type (flèches bleues) suivi pour les expériences décrites au paragraphe 4.2.

3 Diagramme de stabilité

Des travaux expérimentaux et théoriques sur l'angle de stabilité [6] ont déjà été effectués. D'un point de vue théorique deux approches sont utilisées : une approche discrète et une autre de type milieux continus. Cependant, suivant le régime hydraulique (stabilisateur ou non), différents critères ont été utilisés. Une autre étude théorique [7] basée elle aussi sur les deux approches discrète et continue, mais cette fois en utilisant des critères identiques dans les phases de régime déstabilisateur et stabilisateur. De cette étude, est obtenue une relation entre l'angle limite de stabilité de pente (θ_{ins}) et le gradient hydraulique appliqué à l'échantillon :

$$\theta_{ins} = \varphi - \arcsin\left(\frac{i}{i_c} \sin \varphi\right) \quad (1)$$

Cette expression a l'avantage de ne pas avoir de paramètre ajustable. En effet elle fait uniquement

intervenir le gradient hydraulique i , le gradient critique i_c et φ qui est l'angle de friction effectif dans le cas d'une approche de type milieux continus ou encore l'angle moyen de piégeage des particules [7]. Dans le cas hydrostatique l'angle d'instabilité est φ , il est donc mesurable. Il en est de même pour i_c qui est le gradient critique qui conduit à la fluidisation de l'échantillon. Une hypothèse importante pour obtenir cette relation est que le phénomène de déstabilisation doit être invariant le long de la pente.

La comparaison de cette relation (1) avec des données expérimentales a été faite (figure 2). Les mesures de l'angle de stabilité ont été réalisées avec des empilements de sable modérément dense, d'une fraction volumique proche de 0,55. L'angle de stabilité est mesuré immédiatement après l'apparition d'une instabilité qui, pour ces conditions expérimentales, est une avalanche de surface.

Comme nous le verrons plus tard, l'instabilité du milieu ne se traduit pas toujours par une avalanche, en particulier pour les empilements lâches où un phénomène plus en profondeur est observable. De plus, à gradient hydraulique identique, l'angle limite de stabilité d'un empilement dense est plus élevé que celui d'un empilement lâche. Les résultats expérimentaux (figure 2), nous donnent donc une limite supérieure de l'évolution de l'angle de stabilité en fonction du gradient hydraulique.

4 Influence de la fraction volumique

4.1 Modification du seuil d'instabilité

Le seuil d'instabilité est fortement influencé par la fraction volumique de l'empilement. Des mesures expérimentales ont été réalisées avec le sable d'Hostun (HN 0.4/0.8) saturé en eau, pour des fractions volumiques variants entre 0,52 et 0,58, sans gradient hydraulique (figure 3). L'échantillon de sable introduit dans la cellule initialement verticale a une surface libre horizontale. Ensuite, la cellule est inclinée continûment à faible vitesse jusqu'à l'apparition de l'instabilité.

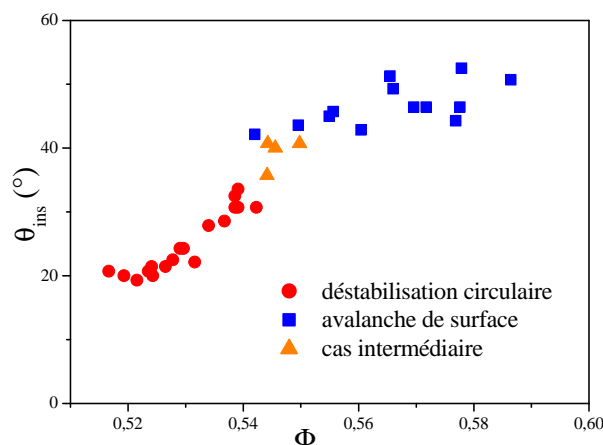


FIG. 3 – banc d'essai d'instabilités gravitaires.

Une distinction très nette peut être faite entre la déstabilisation d'un empilement dense et celle d'un empilement lâche :

- Pour les empilements les plus lâches, nous observons uniquement une avalanche de surface sans événement précurseur pour des angles assez élevés allant jusqu'au alentour de 50°. Nous remarquerons également que la relation (1) est parfaitement valable ici car l'avalanche se produit sur toute la surface libre.
- Pour les empilement les plus lâches, nous observons cette fois ci une déstabilisation en profondeur (plusieurs dizaines de taille de grains) localisée en amont de l'échantillon et ce pour des angles beaucoup plus faibles pouvant descendre jusqu'à 20°. L'hypothèse de milieu infini, qui se traduit par une invariance des phénomènes dans la longueur de l'échantillon, n'est pas vérifiée ici. La relation (1) n'est donc plus applicable pour des empilements lâches.

La reproductibilité des phénomènes dans le cas d'empilement lâche est beaucoup moins bonne que celle des denses.

Nous ne connaissons pas encore l'origine physique de ces deux types de déstabilisation, mais cela semble être un point extrêmement important à éclaircir puisqu'une faible variation de la fraction volumique

(0,52-0,58) conduit à deux phénomènes de déstabilisation totalement différents (une déformation en profondeur localisée en amont de l'échantillon et une avalanche de surface) et à des angles de déstabilisation variant d'un facteur supérieur à 2.

4.2 Mise en évidence des deux modes de déstabilisation

Pour s'affranchir de la qualité de la reproductibilité, en particulier pour les cas lâches, nous devons forcer les phénomènes. Pour ce faire nous utiliserons le protocole expérimental suivant : après la mise en place de l'échantillon dans la cellule nous imposons un gradient hydraulique stabilisateur. Nous inclinons la cellule jusqu'à un angle supérieur à l'angle de stabilité dans le cas hydrostatique, puis nous coupons l'écoulement stabilisateur. La déstabilisation peut ainsi apparaître. Une schématisation du chemin de chargement est visible sur la figure 2. Ce protocole peut être comparé à ceux utilisés par Siavashi [8] et Lajeunesse [9].

Pour l'instant, la coupure de l'écoulement n'est pas parfaitement reproductible mais des améliorations sont en cours. La vitesse d'arrêt de l'écoulement joue un rôle sur l'évolution de la déstabilisation. Dans certains cas, une suppression trop lente de l'écoulement peut arriver à restabiliser le milieu donnant lieu à un arrêt momentané de la déstabilisation. Le résultat final est alors un phénomène discontinu et de moins grande amplitude. De plus la présence ou non de coup de bélier dû à un arrêt de l'écoulement trop brutal favorise la déstabilisation. En effet les mesures de pression différentielle en présence de coup de bélier montrent de fortes oscillations avec changement du signe de ces pressions, ce qui se traduit également par un changement du signe du gradient hydraulique. Donc, après coupure de l'écoulement stabilisateur, un écoulement déstabilisateur apparaît d'amplitude parfois supérieure à celle de l'écoulement initial puis les oscillations continuent jusqu'à amortissement. Il est donc très important d'améliorer la reproductibilité de la coupure de l'écoulement et de s'affranchir de perturbations pouvant générer des réponses du système très différentes.

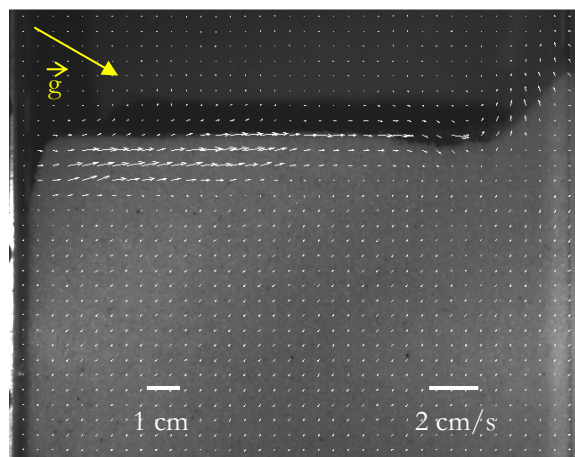


FIG. 4 – Champ de vitesse typique d'une avalanche de surface observée dans le cas dense.

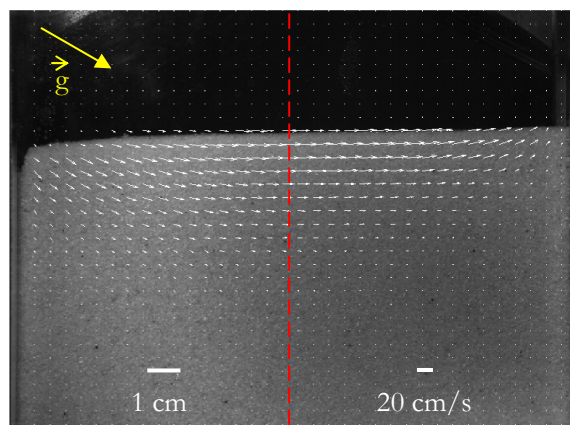


FIG. 5 – Champ de vitesse typique de la déstabilisation circulaire observée dans le cas lâche.

Les deux modes de déstabilisations sont toujours présents avec ce nouveau protocole expérimental et

amplifiés comme attendu. Nous observons toujours une avalanche de surface pour des empilements denses (figure 4). Nous remarquerons que nous sommes en limite de résolution pour un traitement CIV. Pour une étude plus précise, un zoom sur la surface est nécessaire. Ceci sera fait pour voir l'influence de l'écoulement d'eau dans le matériau sur la dynamique de déclenchement et la vitesse de l'avalanche.

Dans le cas d'empilements lâches nous observons une déstabilisation circulaire en profondeur en amont de l'échantillon (figure 5). Cette déstabilisation est différente d'un glissement circulaire, observé en mécanique des sols. En effet nous n'avons pas un cisaillement localisé sur un arc de cercle mais un écoulement continu sur toute une zone dont la frontière inférieure suit approximativement un arc de cercle. Si nous observons le profil de vitesse de ce glissement (figure 6), nous pouvons remarquer que le déplacement est maximum à la surface libre. S'opère ensuite une décroissance à peu près linéaire du déplacement lorsqu'on pénètre à l'intérieur du matériau, pour finir par une queue exponentielle. Cette évolution du déplacement est caractéristique d'écoulement sur fond meuble [10] mais sur des épaisseurs beaucoup plus grandes.

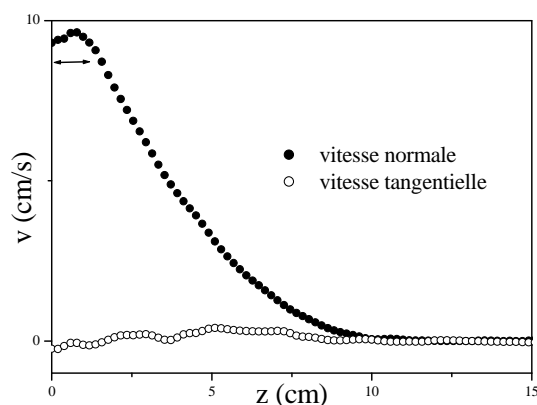


FIG. 6 – Profil de vitesse observé le long d'une coupe représentée sur la figure 5 (trait pointillé), perpendiculaire à la surface libre et située approximativement au centre de la zone circulaire en mouvement.

5 Conclusions et perspectives

Nous avons observé deux modes de déstabilisation totalement différents, une avalanche de surface et une déstabilisation circulaire en profondeur localisée en amont de l'échantillon. La fraction volumique est un des paramètres pilotant ces modes. L'origine physique de ces modes de déstabilisations est une voie que nous explorerons prochainement. Mais avant cela nous effectuerons des analyses plus quantitatives des phénomènes, nous verrons l'influence du régime hydraulique et de la taille des grains.

6 Remerciements

Nous remercions Olivier Pouliquen pour son aide et son encouragement. Ce travail a été partiellement financé par l'ANR (projets PIGE et MONHA).

References

- [1] Iverson R. M., The Physics of Debris Flows, *Rev. Geophys.* 35, 254-296, 1997.
- [2] Courrech du Pont S., Avalanches granulaires en milieu fluide, Thèse université de Paris XI, 2003
- [3] Doppler D., Stabilité et dynamique de pentes granulaires sous-marines. Thèse université de Paris XI, 2005.
- [4] Pailha M., Pouliquen O., Initiation of underwater granular avalanches: influence of the initial volume fraction, *Phys. Fluids*, 20, 111701, 2008.
- [5] Meunier P., Leweke T., Analysis and treatment of errors due to high velocity gradients in particle image velocimetry, *Experiments in Fluids*, 35, 408-421, 2003.
- [6] Van Rhee C. et Bezuijen A., Influence of seepage on stability of sandy slope, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol.118, No.8, 1236-1240, 1992.
- [7] Philippe P. et RICHARD T., Start and stop of an avalanche in a granular medium subjected to an inner water flow, *Physical Review*, E 77, 041306, 2008.

- [8] Siavoshi S. et Kudrolli A., Failure of a granular step, *Physical Review*, 71, 051302, 2005.
- [9] Lajeunesse E., Monnier J. B. et Homsy G. M., Granular slumping on a horizontal surface, *Physics of Fluids*, 17, 103302, 2005.
- [10] GDR MiDi, On dense granular flows, *Eur. Phys. J.*, 14, 341-365, 2004.