

Dynamique de dégazage dans un milieu granulaire immergé : différents aspects

Valérie Vidal, Germán Varas & Jean-Christophe Géminard

Laboratoire de Physique, Université de Lyon, Ecole Normale Supérieure de Lyon - CNRS
46 Allée d'Italie, 69364 Lyon cedex 07, France
Valerie.Vidal@ens-lyon.fr

Résumé. Nous présentons ici une revue de plusieurs résultats expérimentaux concernant la dynamique de dégazage à travers un milieu granulaire immergé. Dans un premier temps, nous regardons comment le gaz pénètre le milieu à partir d'un point d'injection (expérience 2D). La localisation de l'émission en surface dépend fortement de la géométrie de l'invasion, et l'on observe, en 3D, la distribution des points de sortie du gaz. Aux temps longs, le gaz injecté forme une zone fluidisée au centre de la couche de grains immergée. On observe alors différents régimes de dégazage : émission de bulles, formation d'un canal ouvert, ou intermittence spontanée entre ces deux régimes. Pour une hauteur d'eau suffisamment grande au-dessus du lit granulaire, un cratère se forme, composé de deux talus symétriques par rapport au point d'injection du gaz. Contrairement à l'intuition, nous montrons que la dynamique de formation de ce cratère ne dépend pas du régime d'émission du gaz.

Abstract. We present a review of different experimental results about the outgassing through an immersed granular layer. First, we investigate how the gas penetrates the medium from the injection nozzle (2D experiment). The location of gas emission at the surface strongly depends on the invasion pattern and we observe, in 3D, the distribution of gas emission locii. In stationary regime, the injected gas generates a fluidized zone in the granular layer. We then observe different degassing regimes : bubbles, open channel, or spontaneous intermittence between the two previous regimes. For a water layer high enough above the granular bed, a crater forms, composed of two dunes symmetric respect to the gas injection point. Contrary to the intuition, we show that the crater formation dynamics does not depend on the gas emission regime.

1 Introduction et dispositif expérimental

Les phénomènes naturels mettant en jeu le passage d'un fluide (liquide ou gaz) dans un milieu granulaire immergé sont nombreux. On peut citer, parmi eux, l'émission d'hydrocarbures en surface des sédiments marins [1], les fractures hydrauliques [2], la formation de cratères par dépôts successifs d'éjecta en milieu océanique, ou les volcans de boue [3]. Comprendre la dynamique de ces systèmes a un intérêt géologique évident. Cependant, la difficulté de réaliser des mesures de terrain convenables dans les fonds marins ou sur les volcans rend leur étude particulièrement difficile. A ce titre, les expériences de laboratoire représentent un moyen de reproduire, à petite échelle, ces phénomènes naturels dans le but de comprendre et éventuellement prédire leur dynamique.

De nombreuses études ont été réalisées dans le cas des systèmes diphasiques (solide/liquide), pour mimer la remontée de fluide dans les sédiments marins (*'fluid venting'*), observée sur les marges continentales [3]. Trois principaux régimes sont rapportés lorsqu'on injecte un fluide avec un débit constant Q dans un matériau granulaire immergé : à faible Q , les grains restent immobiles et l'air percole à travers le milieu (équivalent à un milieu poreux rigide) ; quand Q augmente, le lit granulaire se déforme ; enfin, pour des Q importants, on observe une fluidisation locale du milieu, associée à l'apparition de conduits (*'pipes'*) et à des modes explosifs d'éjection du fluide [4,5,6]. Il est à noter que ces conduits ne sont pas stationnaires et peuvent migrer dans le lit de grains immergés, jusqu'à fluidiser une région de plus en plus grande. Ce phénomène est responsable de l'instabilité massive de certains sols saturés en eau [4]. Les systèmes mettant en jeu trois phases (solide, liquide, gaz) présentent une dynamique encore plus complexe, qui n'a pas été entièrement caractérisée à l'heure actuelle.

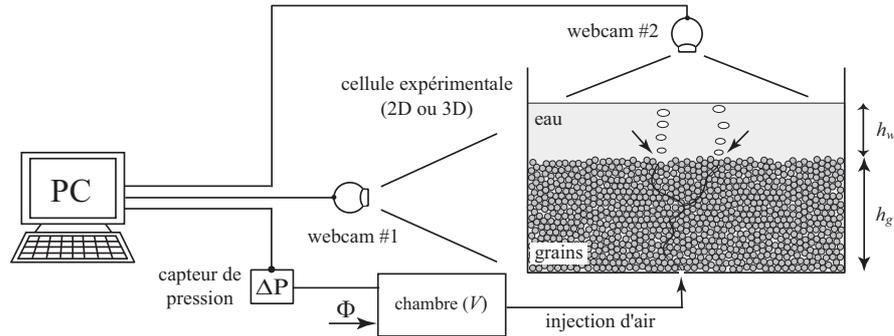


Fig. 1. Schéma du montage expérimental (2D ou 3D). On injecte de l'air à débit constant Φ , via une chambre de volume V , en base d'une couche de granulaire immergée. On enregistre la surpression ΔP dans la chambre au cours du temps, et on observe la dynamique du système. Les flèches noires indiquent le(s) point(s) de sortie de l'air en surface du lit granulaire.

Nous présentons ici une revue de différents résultats expérimentaux, visant à caractériser la dynamique de passage d'un gaz à travers un matériau granulaire immergé (système triphasique). Le dispositif expérimental utilisé, commun à toutes ces expériences, est présenté Fig. 1. La cellule expérimentale peut être 3D (cylindre de plexiglas de diamètre 24 cm pour la localisation en surface, section 3, ou 7.4 cm pour l'étude des régimes, section 4) ou 2D (plaques de verre 40×30 cm, espacées de 2 mm, sections 2 et 5). Les grains utilisés sont des billes de verre sphériques (USF Matrasur) tamisées afin d'obtenir des diamètres typiques 100–125, 200–250, 250–425 ou 400–500 μm . Après immersion, la couche de grains est mélangée puis lissée à l'aide d'une tige mince (en 2D) ou d'une palette (en 3D). On note h_g la hauteur de grains, et h_w la hauteur d'eau au-dessus du lit granulaire. Un débit d'air constant Φ est envoyé, via une chambre de volume V , en base de la couche de granulaire immergée par un système de valve et capillaire (Φ entre 1.5 et 4.3 mL/s) ou par un contrôleur de débit (Bronkhorst, Mass-Stream Series D-5111, Φ entre 0.17 et 1.74 mL/s). Un capteur de pression (MKS Instruments, 223 BD-00010 AB), connecté à une carte d'acquisition (National Instruments, PCI-6251) enregistre la surpression ΔP dans la chambre (sensibilité ~ 10 Pa). La cellule expérimentale est éclairée par un plan lumineux (Just NormLicht, Classic Line), assurant un éclairage homogène. Une visualisation directe du système est réalisée par deux caméras web positionnées sur le côté (webcam #1, Logitech QuickCam Express, expérience 2D) ou à la verticale (webcam #2, Logitech QuickCam S7500, expérience 3D).

2 Pénétration de l'air dans le milieu granulaire immergé

Dans cette première expérience, nous considérons les chemins formés par l'air injecté dans le milieu granulaire immergé. Nous utilisons une cellule 2D, qui permet d'observer la dynamique du gaz aux premiers instants d'injection - typiquement, entre le moment où l'air commence à pénétrer dans le milieu par la buse d'injection placée en bas de la cellule, et l'instant où il atteint la surface.

A faible débit Φ , l'air pénètre dans le milieu en chassant le fluide environnant (eau), sans déplacer les grains de manière notable (Fig. 2a, gauche) ; on a une pénétration de type milieu poreux. L'air explore différents chemins, de manière simultanée, et vient s'échapper en surface du matériau granulaire immergé en un ou plusieurs points d'émission. Les chemins ainsi formés ('branches') évoluent au cours du temps. Pour des débits plus forts, l'air fracture le milieu : le fluide environnant, ainsi que les grains qui forment la matrice du milieu, sont déplacés (Fig. 2a, droite). On observe également la formation de plusieurs branches, mais dans ce cas, seule la branche principale atteint la surface du lit granulaire (un seul point d'émission de l'air). Sur des temps longs, cette branche peut se déplacer et se pincer, donnant naissance à de nouvelles branches actives (différents points d'émission du gaz en surface du lit granulaire).

Ces observations sont similaires à l'instabilité de Saffman-Taylor observée dans des systèmes biphasiques non-miscibles (pénétration d'un fluide dans un milieu granulaire non-cohésif à l'horizontale, par

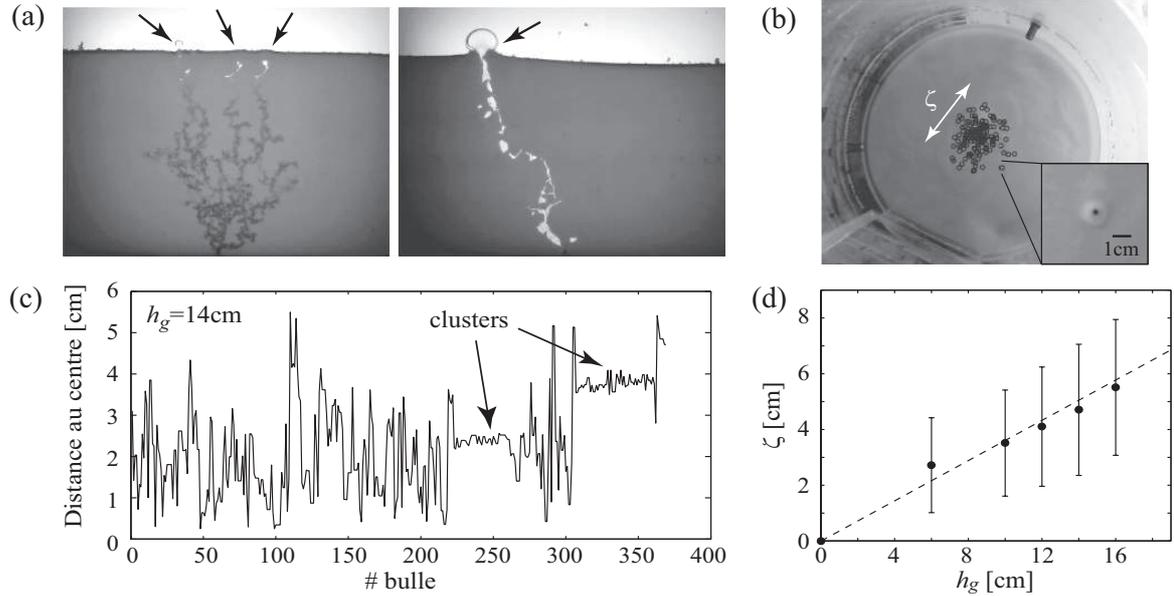


Fig. 2. (a) Injection de l'air à travers la couche de granulaire immergée pour différents débits (gauche, $\Phi = 0.30 \text{ mL/s}$); droite, $\Phi = 3.04 \text{ mL/s}$). Les flèches noires indiquent le(s) point(s) de sortie de l'air en surface du lit granulaire [expérience 2D, grains $200\text{--}250 \mu\text{m}$]. (b) Détection des points de sortie (*Inset* : exemple de sortie d'une bulle). (c) Evolution de la distance au centre pour une série de bulles ($h_g = 14 \text{ cm}$). Noter l'apparition de clusters. (d) La taille moyenne ζ de la distribution des points de sortie augmente linéairement avec la hauteur du lit granulaire [expérience 3D, grains $250\text{--}425 \mu\text{m}$, $\Phi = 4.3 \text{ mL/s}$].

exemple). Dans ce cas, la force responsable du mouvement des grains est le gradient de pression généré par le passage du fluide. Ce gradient de pression est maximum à la pointe des fractures qui se développent dans le milieu, expliquant pourquoi la branche la plus avancée voit sa croissance favorisée, alors que la croissance des branches latérales ralentit puis s'arrête [7]. Dans notre cas d'étude (système triphasique vertical), la présence d'une part, de la gravité, et d'autre part, du fluide interstitiel, rend le système plus complexe. Le seul effet du gradient de pression prédirait une unique branche, à la verticale du point d'injection. On observe cependant des branches latérales, qui se développent à cause des hétérogénéités locales du matériau (Fig. 2a, gauche), et un cheminement complexe du gaz à travers le milieu (Fig. 2a, droite). Une étude précise des différents régimes d'invasion en fonction des paramètres du système (h_g , h_w , taille des grains et Φ) est actuellement en cours.

3 Localisation des points de sortie en surface

L'expérience précédente montre que pour un point d'injection fixé, l'air non seulement n'est pas émis à la verticale de ce point, mais peut explorer des points de sortie différents, dans l'espace (Fig. 2a) et dans le temps. Afin d'étudier la localisation des points de sortie de l'air en surface du lit granulaire immergé, nous sommes donc passés à une étude 3D, dans laquelle on observe au cours du temps, pour différents paramètres expérimentaux, les points d'émission du gaz (webcam #2, Fig. 1).

Pour une hauteur de grains fixée h_g , on injecte à l'instant $t = 0$ de l'air à débit constant Φ par un point d'injection centré en base du lit granulaire immergé. La hauteur d'eau h_w est choisie de manière à juste recouvrir le lit granulaire ($h_w \sim h_g$), afin que la remontée des bulles dans l'eau ne perturbe pas la visualisation. On enregistre les images pendant $\sim 10 \text{ min}$, puis on change de hauteur de grains, on prépare cette nouvelle couche afin d'avoir une condition initiale reproductible (voir section 1) et on recommence. La figure 2b (inset) montre un exemple d'émission de bulle en surface du lit granulaire immergé. Lors

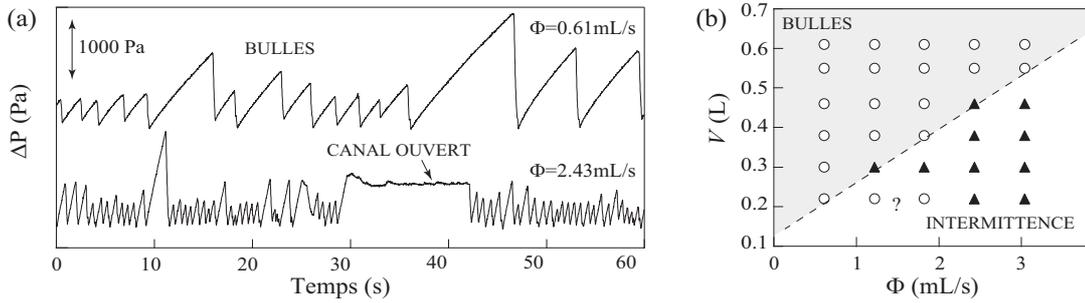


Fig. 3. Différents régimes de dégazage observés à travers une couche de grains immergée (expérience 3D, grains 315–400 μm , $h_g = 2$ cm, $h_w = 10$ cm). (a) À faible débit, le gaz est émis sous forme de bulles successives ; à débit plus fort, on observe une intermittence entre le régime bulles et le régime canal ouvert. (b) Diagramme des régimes lorsque l'on fait varier le volume V de la chambre et le débit Φ (*cercles*=bulles, *triangles*=intermittence). La ligne pointillée indique la séparation des deux régimes. Noter la difficulté à établir la limite avec précision, due au temps d'acquisition fini (1 min).

de l'éclatement de la bulle, pendant un bref instant (typiquement, une fraction de seconde), on observe sur les images une région circulaire noire, bien contrastée, correspondant au corps de la bulle qui vient de s'ouvrir - qui s'effondre rapidement après l'explosion de cette dernière. Ce contraste permet de procéder à une détection automatique précise, à l'aide du logiciel Matlab (*The MathWorks*) (Fig. 2b). On peut alors déterminer l'évolution de la distance au centre des bulles, sur une série donnée (Fig. 2c).

Lorsque l'on augmente la hauteur de la couche de grains (h_g) à débit fixé, on observe que les points d'émission du gaz en surface du lit granulaire explorent une zone de plus en plus grande. On définit la taille caractéristique de cette zone, ζ , comme la valeur moyenne de la distance au centre. On trouve que ζ varie linéairement avec la hauteur de la couche de grains h_g (Fig. 2d). Il est à noter que pour des hauteurs suffisamment grandes (typiquement, $h_g > 10$ cm), on observe la formation de clusters : les bulles sont émises dans une zone déterminée (Fig. 2c). Dans la gamme de paramètres considérés, cette localisation ne modifie pas la variation de la taille de la distribution globale ζ (Fig. 2d).

4 Différents régimes de dégazage

Les expériences précédentes montrent que l'air, aux premiers instants, pénètre en général dans le milieu sous forme de doigt (section 2). Selon les paramètres de l'expérience (en particulier, la hauteur de la couche de grains), il peut également traverser le système sous forme de bulles individuelles (section 3). Ces différents régimes ont été rapportés dans la littérature, que ce soit pour des milieux granulaires immergés [8,9] ou pour des fluides complexes, par exemple des gels [10,11]. De manière générale, dans les fluides complexes présentant des propriétés rhéofluidifiantes (la viscosité diminue avec la contrainte appliquée), on observe trois régimes d'émission du gaz : à bas débit, l'air est émis sous forme de bulles successives, remontant indépendamment les unes des autres (régime *bulles*) ; pour des débits très importants, l'air s'échappe par un canal ouvert, stabilisé grâce aux propriétés rhéologiques du milieu (régime *canal ouvert*) ; enfin, pour des débits intermédiaires, le système alterne spontanément entre les régimes bulles et canal ouvert (régime *intermittent*). Dans ce dernier cas, les bulles émises successivement dans le milieu peuvent se connecter entre elles pour former un canal ouvert ; après un temps fini, ce canal se pince, le système repasse en régime bulles, etc.

Nous avons repris l'étude de Gostiaux et al. [8], qui avaient observé ces régimes lors de l'injection d'air dans un milieu granulaire immergé (expérience 3D). Pour une hauteur de grains donnée ($h_g = 2$ cm) et une hauteur d'eau pouvant être considérée grande par rapport à la couche de grains ($h_w = 10$ cm), nous avons étudié les différents régimes d'émission du gaz, en fonction du débit Φ et du volume de la chambre V , ce dernier représentant l'élasticité du système. Les régimes sont caractérisés à partir de l'enregistrement de la surpression ΔP dans la chambre (Fig. 3a). Dans le régime bulles, on observe un signal de pression

en dents de scie, avec des montées quasi-linéaires et des descentes bien marquées, chacune de ces dernières correspondant à l'émission d'une bulle (Fig. 3a, signal du haut). Lorsqu'un canal ouvert se forme et se maintient dans le temps, l'air peut s'échapper continûment et la surpression dans la chambre est alors quasi-constante, et égale à la pression hydrostatique, à la perte de charge dans le canal près.

Le diagramme des régimes (V, Φ) montre une séparation bien marquée entre le régime bulles et intermittent, pointant ces deux paramètres comme responsables de la dynamique du système (Fig. 3b). Notons que dans la gamme de paramètres utilisée, nous n'avons pas observé de régime où le canal ouvert reste stable dans le temps. Il est important de noter la difficulté à séparer clairement les deux régimes (Fig. 3b, point d'interrogation). En effet, la durée d'acquisition finie (10 min) peut ne pas être suffisante pour observer le passage d'une émission de bulles à la formation d'un canal ouvert, qui prend plus de temps pour des débits faibles. On ne peut cependant pas caractériser, pour une hauteur de grains donnée, le régime de dégazage pour des temps trop longs, comme expliqué dans la section suivante.

5 Dynamique de formation d'un cratère

Aux temps longs, le passage de l'air forme une zone fluidisée au centre du système. Les grains éjectés sont advectés par la remontée des bulles dans la couche d'eau, et on observe la formation d'un cratère par dépôts successifs de grains. Dans l'expérience 2D menée ici, le cratère est formé de deux talus symétriques, qui grandissent au cours du temps (Fig. 4a). On s'intéresse ici à la dynamique de formation de ce cratère et, en particulier, à l'évolution de sa taille L , prise comme la distance entre les maxima des talus (Fig. 4b, insert). On se place toujours dans le cas d'une hauteur d'eau suffisante pour que l'advection des grains soit considérée en milieu infini. Une simple considération géométrique montre que la valeur maximale accessible pour la taille du cratère, limitée par la hauteur d'eau, est $L_{max}^w = 2(1 + \sqrt{2})h_w / \tan \alpha$, où α est l'angle d'avalanche des grains sur la partie interne du cratère. De même, la taille du cratère limitée par une hauteur de grains insuffisante est donnée par $L_{max}^g = (2 + \sqrt{2})h_g / \tan \alpha$. Dans nos expériences, on a typiquement $h_g = 8$ cm et $h_w = 16$ cm, qui donne $L_{max}^w = 64$ cm et $L_{max}^g = 50$ cm, bien supérieurs à la largeur de la cellule expérimentale (40 cm). On montre que la taille du cratère augmente logarithmiquement dans le temps (Fig. 4b), et on peut écrire :

$$\frac{L}{L_0} = \ln \left(\frac{\Phi t}{V_0} \right) \quad (1)$$

où V_0 est un volume typique [9]. Cette loi empirique peut être expliquée en considérant le dépôt des grains loin du centre. On propose que le flux déposé, à grande distance, s'écrive $Q(x) = a(x/L_c) \exp(-x/L_c)$.

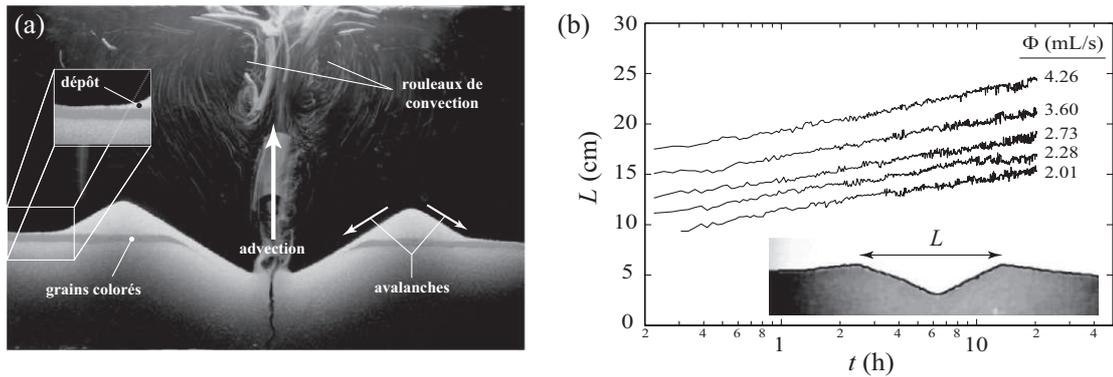


Fig. 4. Dynamique de formation d'un cratère (expérience 2D, $h_g = 8$ cm, $h_w = 16$ cm). (a) Les grains sont emportés, puis redéposés soit à l'intérieur du cratère (ils avalanchent au centre, et sont de nouveau entraînés), soit à l'extérieur du cratère (ils participent alors à sa croissance) [grains 400–500 μm , $\Phi = 3.6$ mL/s]. (b) La taille L du cratère augmente en logarithme du temps [grains 400–500 μm]. *Insert* : Exemple de détection de contour et détermination de L .

Une analyse géométrique simple donne le volume v des grains déposés sur la partie externe de l'un des talus : $v = (L^2/8) \tan \alpha / (1 + \sqrt{2})^2$. En notant que seul le dépôt des grains sur les flancs extérieurs du cratère contribue à sa croissance, on peut écrire $\frac{dv}{dt} = \int_{L/2}^{\infty} Q(x) dx$, ce qui mène à l'équation gouvernant la croissance des talus :

$$\frac{1}{4} \frac{\tan \alpha}{(1 + \sqrt{2})^2} L \frac{dL}{dt} = a \int_{L/2}^{\infty} \frac{x}{L_c} \exp\left(-\frac{x}{L_c}\right) dx \quad (2)$$

En supposant $L \gg L_c$ (toujours satisfait expérimentalement) on retrouve, asymptotiquement, $L(t) \simeq L_0 \ln(\Phi t/V_0)$ avec $L_0 = 2L_c$ et $\Phi/V_0 = a(1 + \sqrt{2})^2/\tan \alpha$, en accord avec les résultats expérimentaux. Comme précédemment, on observe différents régimes de dégazage : bulles ou intermittence. Les bulles entraînent une grande quantité de grains dans l'eau, alors que le canal ouvert donne lieu à la remontée dans l'eau de petites bulles, de fréquence d'émission plus élevée, mais entraînant une quantité de grains beaucoup plus faible. De manière surprenante, on trouve que contrairement à l'intuition, la dynamique de croissance des talus en logarithme du temps est indépendante du régime de dégazage [9].

6 Conclusion

Cet article présente une revue non exhaustive des expériences menées dans notre laboratoire, concernant la dynamique de passage de l'air dans un milieu granulaire immergé. Si certaines de ces études ont donné lieu à une bonne compréhension du phénomène étudié (par exemple, la formation d'un cratère [9]), d'autres sont encore en cours, et devraient amener plus d'informations sur la dynamique complexe de ces systèmes. Si la quantification et, éventuellement, le piégeage des gaz (bien souvent hydrocarbures) émis en surface des sédiments marins est un enjeu économique évident, il est également nécessaire de souligner les enjeux géophysiques. Une meilleure connaissance des mécanismes conduisant au dégazage au fond des océans pourrait en effet avoir des implications importantes sur la prédiction des séismes sous-marins [12].

Références

1. L. NAUDTS *et al.*, Anomalous sea-floor backscatter patterns in methane venting areas, Dnepr paleo-delta, NW Black Sea, *Marine Geology*, **251**, 253-267 (2008).
2. E. G. FLEKKØY, A. MALTHER-SØRENSEN & B. JAMTVEIT, Modeling hydrofracture, *Journal of Geophysical Research*, **107**, 2151 (2002).
3. T. MÖRZ, E. A. KARLIK, S. KREITER & A. KOPF, An experimental setup for fluid venting in unconsolidated sediments : New insights to fluid mechanics and structures, *Sedimentary Geology*, **196**, 251-267 (2007).
4. T. WILHELM & K. WILMAŃSKI, On the onset of flow instabilities in granular media due to porosity inhomogeneities, *International Journal of Multiphase Flow*, **28**, 1929-1944 (2002).
5. P. RIGORD, A. GUARINO, V. VIDAL & J.-C. GÉMINARD, Localized instability of a granular layer submitted to an ascending liquid flow, *Granular Matter*, **7**, 191-197 (2005).
6. F. ZOUESHTIAGH & A. MERLEN, Effects of a vertically flowing water jet underneath a granular bed, *Physical Review E*, **75**, 056313 (2007).
7. Ø. JOHNSEN, R. TOUSSAINT, K. J. MÅLØY, E. G. FLEKKØY & J. SCHMITTBUHL, Coupled air/granular flow in a linear Hele-Shaw cell, *Phys. Rev. E*, **77**, 011301 (2008).
8. L. GOSTIAUX, H. GAYVALLET & J.-C. GÉMINARD, Dynamics of a gas bubble rising through a thin immersed layer of granular material : an experimental study, *Granular Matter*, **4**, 39-44 (2002).
9. G. VARAS, V. VIDAL & J.-C. GÉMINARD, Dynamics of crater formations in immersed granular materials, *Physical Review E*, **79**, 021301 (2009).
10. I.L. KLIAKHANDLER, Continuous chain of bubbles in concentrated polymeric solutions, *Physics of Fluids*, **14**, 3375-3379 (2002).
11. T. DIVOUX, E. BERTIN, V. VIDAL & J.-C. GÉMINARD, Intermittent outgassing through a non-Newtonian fluid, *Physical Review E*, **79**, 056204 (2009).
12. L. GÉLI *et al.*, Gas emissions and active tectonics within the submerged section of the North Anatolian Fault zone in the Sea of Marmara, *Earth and Planetary Science Letters*, **274**, 34-39 (2008).