

# Des courants de gravité en laboratoire

par Vincent DE ZOTTI, Samuel BOURY, Pauline HUSSEINI,  
Hélène PIOT-DURAND et Clémentine ROUVIÈRE

Laboratoire junior *Explique-moi la géophysique*  
École normale supérieure de Lyon - 69007 Lyon  
vincent.de\_zotti@ens-lyon.fr  
samuel.boury@ens-lyon.fr

**L**ES COURANTS de gravité sont des phénomènes naturels couramment rencontrés en géophysique. On peut les modéliser simplement à l'aide d'une cuve constituée de deux parties, chacune contenant de l'eau avec une salinité différente. Cette expérience nécessite peu de matériel, elle peut donc facilement être reproduite en laboratoire ou dans une salle de classe. En plus de présenter ce phénomène géophysique, elle peut permettre d'introduire la notion de densité à des élèves de différents niveaux. L'expérience peut également être analysée plus en détail, en étudiant par exemple la vitesse des courants de gravité en fonction de la différence de densité entre les deux parties.

## 1. LES COURANTS DE GRAVITÉ EN GÉOPHYSIQUE

Un courant de gravité correspond à la mise en mouvement, sous l'effet de la gravité, de fluides de densités différentes. Ce type d'écoulement, naturellement favorisé par une pente, est fréquemment rencontré en géophysique et en milieu industriel.

Les causes de la différence de densité entre les deux fluides sont nombreuses, par exemple une différence de nature des fluides, de température, de turbidité (c'est-à-dire de la teneur de particules en suspensions dans le fluide), ou de salinité dans le cas marin. Les vents catabatiques<sup>(1)</sup>, les avalanches, certaines tempêtes de sable (comme celle de la figure 1, cf. page ci-après), ou encore les nuées ardentes d'éruptions volcaniques sont autant d'exemples de courants de gravité observables dans l'atmosphère.

Les processus qui conduisent à la formation d'eaux denses dans certaines parties de l'océan sont variés. Ils peuvent impliquer entre autres un refroidissement de surface, une addition de sel ou une évaporation intense (surtout dans les mers subtropicales).

(1) Vents produits par une masse d'air froid descendant un relief sous l'effet de son poids, le mistral est un exemple de vent catabatique en France.



Photo issue de Wikimedia Commons

**Figure 1** - Tempête de sable observée à Ransom Canyon au Texas en 2009.

La formation d'eaux denses s'observe par exemple en mer de Weddell, le long des côtes de l'Antarctique. Le phénomène est lié au refroidissement en surface et à la formation de glace, qui rend l'eau environnante plus salée. Cette eau, qui coule le long du talus continental, se retrouve ensuite distribuée dans tous les océans du globe par le courant circumpolaire qui circule tout autour de l'Antarctique.

Les eaux denses peuvent aussi se former dans des mers semi-fermées : la mer Méditerranée en est un parfait exemple. L'eau de cette mer chaude, qui subit une forte évaporation, est plus salée et plus dense que celle de l'océan Atlantique. Ainsi, au niveau du Déroit de Gibraltar, l'eau de l'océan Atlantique recouvre la surface tandis que l'eau méditerranéenne s'engouffre dans l'océan jusqu'à une profondeur de mille mètres environ, correspondant à l'équilibre des densités.

En plongeant, ces eaux denses se mélangent avec le fluide ambiant et ont ainsi un impact primordial sur la distribution de température et de salinité dans la circulation thermohaline, et donc sur le climat dans son ensemble.

## 2. RÉALISATION DU PHÉNOMÈNE EN LABORATOIRE

### 2.1. Courant de gravité avec deux fluides

Le principe des courants de gravité peut être illustré simplement en laboratoire. Pour cela, nous avons utilisé une cuve en plexiglas de 120 cm de longueur, 40 cm de hauteur et 10 cm de profondeur.

La cuve est remplie d'eau jusqu'à une hauteur  $H = 25$  cm. Un séparateur étanche,

de mêmes largeur et hauteur que la cuve, est inséré au milieu pour former deux compartiments égaux en volume. On ajoute ensuite quelques dizaines de grammes de sel dans l'eau de l'un des compartiments afin d'en augmenter sa densité. On ajoute également quelques gouttes de colorant alimentaire à l'eau salée pour la différencier de l'eau douce, puis on homogénéise le mélange dans ce compartiment.

Une chronophotographie de l'expérience est présentée en figure 2 (la vidéo est disponible sur le site de l'UdPPC). La différence de densité entre l'eau salée (colorée en jaune) et l'eau douce (non colorée) vaut  $\Delta d = 3,3 \cdot 10^{-3}$ . La première photographie montre l'état initial du système, les suivantes ont été prises à un intervalle de trois secondes, et la dernière correspond à l'état d'équilibre plusieurs minutes après le début de l'expérience.

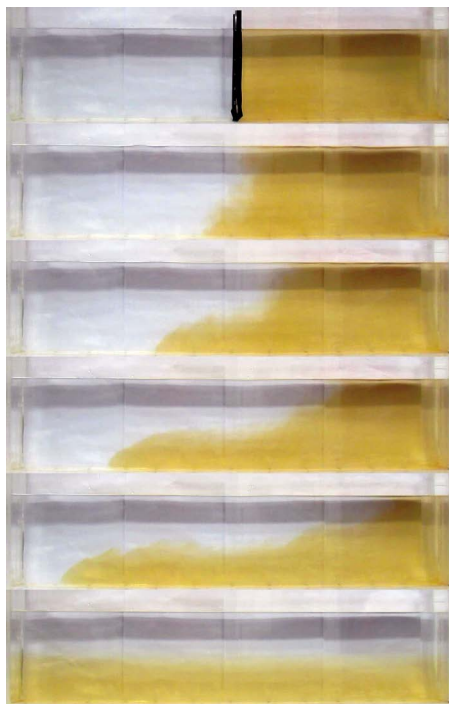


Figure 2 - Chronophotographie de l'expérience de courant de gravité entre de l'eau salée (colorée en jaune) et de l'eau douce (non colorée).

Lorsqu'on retire le séparateur, on observe qu'un front d'eau salée, plus dense, se propage progressivement dans l'autre compartiment en passant sous l'eau douce qui est moins dense. À l'inverse, un front d'eau douce se propage dans le compartiment d'eau salée, en passant au-dessus de cette dernière. Les vitesses des deux fronts sont identiques, elles augmentent avec la hauteur d'eau et la différence de densité entre les deux fluides. Un modèle théorique simple, présenté dans la suite de cet article, permet de comprendre l'évolution avec ces paramètres.

Au cours de la propagation, il est également possible d'observer à l'interface entre les deux fluides l'apparition d'un trouble, dû à la différence d'indice optique, ainsi que des tourbillons causés par l'instabilité de Kelvin-Helmholtz<sup>(2)</sup>.

Lorsque les fronts arrivent aux extrémités de la cuve, le système n'atteint pas immédiatement son état d'équilibre. En effet, le front d'eau salée ayant acquis une

(2) Instabilité d'origine inertielle apparaissant à l'interface entre deux fluides visqueux se propageant à des vitesses différentes.

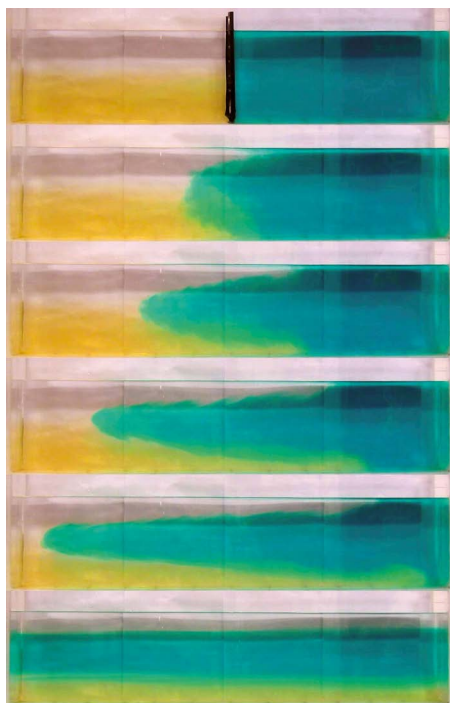
certaine inertie au cours de sa propagation, l'eau salée sera temporairement majoritaire d'un côté de la cuve, et réciproquement pour le front d'eau douce. Après plusieurs minutes, le système se stabilise et on obtient une superposition des deux couches, l'eau douce surnageant au-dessus de l'eau salée.

Une fois l'équilibre atteint, le système reste néanmoins soumis à la diffusion du sel entre les deux couches. Ce phénomène étant très lent (coefficient de diffusion de l'ordre de  $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ), la stratification obtenue peut être observée pendant plusieurs jours.

## 2.2. Courant de gravité avec trois fluides

Il est possible de poursuivre l'expérience précédente en réalisant un courant de gravité entre trois fluides.

Pour cela, on place à nouveau le séparateur au milieu de la cuve, puis on mélange



**Figure 3** - Chronophotographie de l'expérience de courant de gravité entre de l'eau salée (colorée en jaune), de l'eau douce (non colorée) et de l'eau de densité moyenne (colorée en bleu).

les deux couches dans l'un des compartiments. On obtient ainsi une eau de densité moyenne entre l'eau salée et l'eau douce. Afin de la différencier des deux précédentes, on lui ajoute quelques gouttes d'un second colorant (de préférence foncé pour obtenir un meilleur contraste), et on homogénéise le mélange.

Une chronophotographie de l'expérience est présentée en figure 3 (la vidéo est disponible sur le site de l'UdPPC). Comme précédemment, la différence de densité entre l'eau salée (colorée en jaune) et l'eau douce (non colorée) vaut  $\Delta d = 3,3 \cdot 10^{-3}$ . L'eau de densité moyenne est colorée en bleu. La première photographie montre l'état initial du système, les suivantes ont été prises à un intervalle de cinq secondes, et la dernière correspond à l'état d'équilibre plusieurs minutes après le début de l'expérience.

Lorsqu'on retire le séparateur, un front d'eau de densité moyenne s'insère

entre les deux couches de l'autre compartiment. Dans le même temps, un front d'eau douce se propage à la surface et un front d'eau salée longe le fond de la cuve. Comme pour l'expérience précédente, on peut observer un trouble aux interfaces ainsi que des instabilités de Kelvin-Helmholtz.

Le système atteint son état d'équilibre après quelques minutes. L'épaisseur de la couche intermédiaire dépend de la position à laquelle le séparateur a été placé avant le mélange. En le plaçant au milieu de la cuve, on obtient une couche deux fois plus épaisse que les autres.

### 2.3. Intérêt pédagogique de l'expérience

Cette expérience de courant de gravité est intéressante d'un point de vue pédagogique. Elle permet d'aborder la notion de densité avec des élèves, de façon très visuelle, et peut être exploitée à différents niveaux.

Pour les plus jeunes, on peut réaliser l'expérience en détaillant pas à pas le protocole, puis discuter avec eux de son interprétation. Dans la première partie, l'eau colorée glisse sous l'eau incolore, car celle-ci est plus « lourde » à volume équivalent. On peut alors définir la notion de densité pour un fluide, et faire remarquer que l'ajout de sel dans de l'eau permet de l'augmenter. Dans la seconde partie, les élèves doivent comprendre que le mélange de deux fluides de densités différentes produit un fluide de densité intermédiaire, c'est le principe de la dilution. Il s'insère donc entre les deux couches précédentes.

Pour des élèves maîtrisant déjà le concept de densité, il serait intéressant de leur demander d'élaborer eux-mêmes le protocole de l'expérience. Il faudrait alors calculer la masse de sel à ajouter pour obtenir une densité particulière, ou l'inverse.

Enfin, il est possible d'aller plus loin dans l'exploitation de cette expérience en mesurant par exemple la vitesse du front d'eau salée pour différentes densités.

## 3. ÉTUDE DE LA VITESSE DU COURANT DE GRAVITÉ

### 3.1. Précédentes études réalisées

Les courants de gravité peuvent généralement être décomposés en plusieurs phases : une mise en mouvement, une propagation et une phase d'arrêt après avoir atteint son état d'équilibre. Si les étapes de formation et d'arrêt sont complexes à modéliser, son déplacement a fait l'objet de plusieurs études, et il est aujourd'hui assez bien compris.

Shin [1] a récemment réalisé une étude de courants de gravité formés lors du retrait d'une paroi séparant deux fluides de masses volumiques différentes, dans des

conditions similaires à l'expérience présentée ci-dessus. Ses travaux ont notamment permis de retrouver les résultats de Benjamin [2], qui a développé un modèle hydrostatique afin d'étudier la propagation d'un courant de gravité en eau peu profonde.

Des études expérimentales ont permis de confirmer ce développement, en s'intéressant à l'extension d'une bulle d'air dans un tube [3-4]. Les mêmes arguments de conservation énergétique sont utilisés et permettent une description du problème en accord avec les résultats expérimentaux.

### 3.2. Modélisation théorique

La théorie développée par Benjamin [2] permet d'obtenir une prédiction pour la vitesse d'un courant de gravité, nous allons la détailler dans cette partie.

On considère un courant de gravité s'écoulant selon la direction  $x$ . Celui-ci est supposé invariant par translation dans la direction orthogonale  $y$ , ce qui permet de se restreindre à un problème à deux dimensions. On néglige les effets de la diffusion et de la viscosité dans ce modèle. On s'intéresse à l'évolution du courant en régime stationnaire lors de l'écoulement, c'est-à-dire lorsqu'il avance à vitesse constante. Ce régime est atteint lorsque les effets de bords sont négligeables, car ceux-ci peuvent modifier l'écoulement des fluides et par conséquent la vitesse du courant. On délimite ainsi un domaine ABCD au milieu de l'écoulement, comme représenté en figure 4.

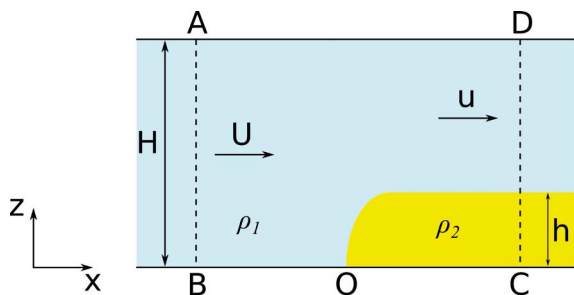


Figure 4 - Modélisation d'un courant de gravité en se plaçant dans le référentiel du front.

Dans ce domaine de hauteur  $H$ , on étudie la propagation d'un front de hauteur  $h$  constitué d'un fluide noté 2 de masse volumique  $\rho_2$ , dans un fluide noté 1 de masse volumique  $\rho_1$ , tel que  $\rho_2 > \rho_1$ .

- ◆ Dans le **référentiel du laboratoire**, le front avance de la droite vers la gauche à la vitesse  $U$  sous le fluide 1 immobile.
- ◆ Dans le **référentiel du front**, le fluide 2 est immobile et le fluide 1 avance de la gauche vers la droite à la vitesse  $U$ . On note  $u$  la vitesse du fluide 1 après le front.

Nous allons nous placer dans le référentiel du front pour faciliter la modélisation du courant de gravité. Pour des fluides sans dissipation visqueuse, l'énergie dans le domaine est conservée au cours du temps. Comme les mouvements sont horizontaux, l'énergie entrante par la section [BA] est donc égale à celle sortante par la section [CD].

Le flux d'énergie entrant étant la somme du travail des forces de pression et de l'énergie cinétique par unité de surface, il s'exprime :

$$\Phi_{BA} = \int_B^A P dz + \int_B^A \rho_1 U^2 dz,$$

avec  $P$  la pression.

On exprime de la même façon le flux d'énergie sortant :

$$\Phi_{CD} = \int_C^D P dz + \int_C^D \rho_1 u^2 dz.$$

L'égalité des flux nous permet donc d'aboutir à l'équation :

$$\int_B^A P dz + \int_B^A \rho_1 U^2 dz = \int_C^D P dz + \int_C^D \rho_1 u^2 dz.$$

La pression est donnée par la loi de l'hydrostatique, elle s'exprime selon la verticale [BA] :

$$P = P_B - \rho_1 g z,$$

et selon la verticale [CD] :

- ◆ pour  $0 < z < h$  :  $P = P_C - \rho_2 g z$ ,
- ◆ pour  $h < z < H$  :  $P = P_C - \rho_2 g h - \rho_1 g (z - h)$ .

En appliquant le théorème de Bernoulli sur une ligne de courant entre les points B et O, on obtient :

$$P_B = P_O - \frac{1}{2} \rho_1 U^2,$$

en faisant de même entre les points O et C, on obtient :

$$P_C = P_O.$$

De plus, le fluide étant incompressible, son débit est conservé, d'où :

$$UH = u(H - h).$$

En combinant ces différentes relations, on aboutit finalement à l'expression :

$$\frac{U^2}{gH} = \frac{1 - \gamma}{\gamma} \frac{h(H - h)(2H - h)}{H^2(h + H)},$$

avec  $\gamma = \rho_1 / \rho_2$  le rapport des masses volumiques des deux fluides.

En négligeant toujours la dissipation visqueuse, Benjamin [2] a montré qu'en appliquant le théorème de Bernoulli le long d'une ligne de courant sur la surface supérieure du canal, on aboutit alors à une autre expression :

$$\frac{U^2}{gH} = \frac{1 - \gamma}{\gamma} \frac{2h(H - h)^2}{H^3}.$$

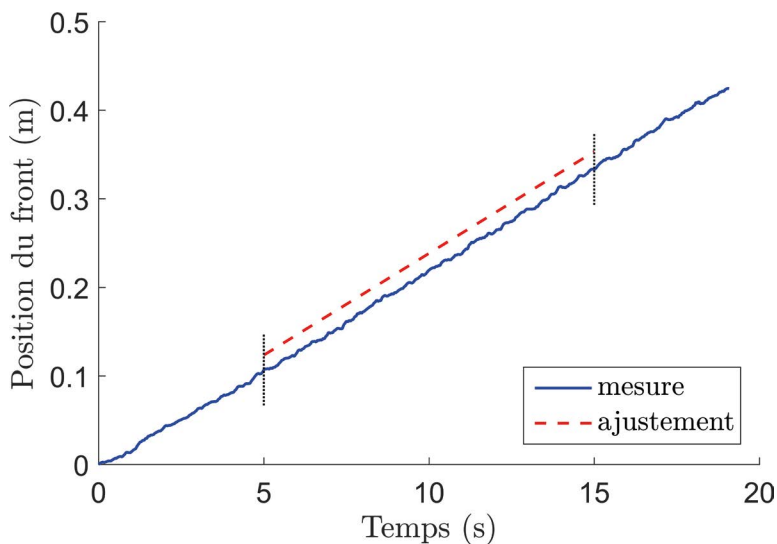


Figure 5 - Exemple de suivi de la position du front d'eau salée lors d'une expérience de courant de gravité.

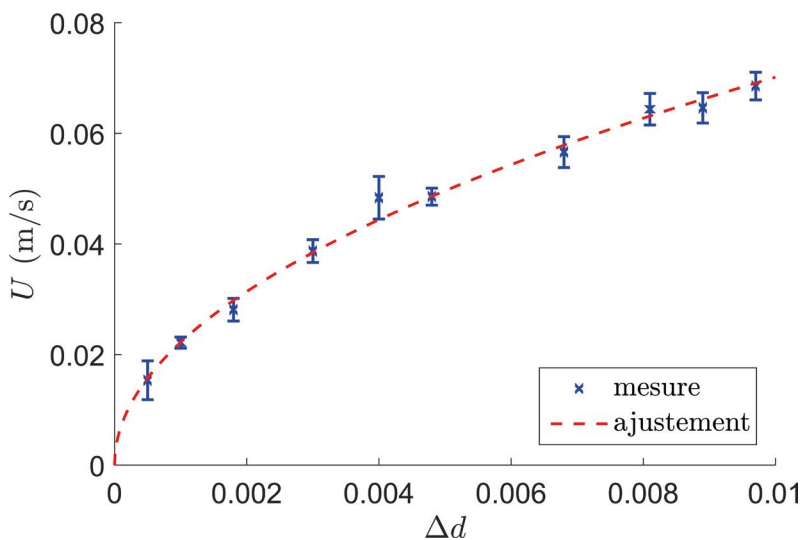


Figure 6 - Évolution de la vitesse du front d'eau salée en fonction de la différence de densité entre les fluides.



Ces deux relations doivent être vérifiées, il n'existe alors que deux solutions possibles :

- ◆ soit  $h/H \approx 0$ , c'est le cas des courants de gravité se propageant en milieu semi-infini, une avalanche dans l'atmosphère par exemple ;
- ◆ soit  $h/H = 1/2$ , c'est le cas des courants de gravité se propageant dans un milieu de hauteur finie, en eau peu profonde par exemple.

Notre expérience se place dans le cas de la seconde solution, elle implique que les fluides se répartissent de façon symétrique lors de leur propagation. On obtient finalement la relation proposée par Shin [1] et Benjamin [2] :

$$\frac{U^2}{gH} = \frac{1}{4} \frac{1-\gamma}{\gamma}.$$

Dans la première partie de l'expérience précédente, le courant de gravité est constitué d'un front d'eau salée se propageant dans de l'eau douce. Cette théorie nous permet alors d'exprimer la vitesse du front en fonction de la différence de densité  $\Delta d$  entre les deux fluides :

$$U = \sqrt{\frac{gH}{4} \Delta d}.$$

Cette modélisation prévoit donc une augmentation lente de la vitesse du front avec la hauteur d'eau et la salinité.

### 3.3. Étude expérimentale

Afin de vérifier cette loi, nous avons réalisé une série d'expériences avec plusieurs différences de densité  $\Delta d$  pour une hauteur d'eau constante  $H = 25$  cm.

Pour chaque expérience, la différence de densité est préalablement mesurée à l'aide d'un densimètre. À partir de la vidéo du courant de gravité formé, nous réalisons le suivi de la position du front d'eau salée au cours de sa propagation. Un exemple de suivi est présenté en figure 5 (cf. page ci-contre), il a été réalisé avec une différence de densité  $\Delta d = 1,0 \cdot 10^{-3}$ .

On observe que le front avance à vitesse constante sur presque toute la longueur de la cuve. Nous estimons sa vitesse en réalisant un ajustement affine sur la zone où le régime stationnaire est établi, on obtient pour cet exemple :

$$U = (2,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-2} \text{ m/s}.$$

En faisant de même pour chaque expérience, nous pouvons tracer l'évolution de la vitesse en régime stationnaire avec la différence de densité, celle-ci est présentée en figure 6 (cf. page ci-contre). Les barres d'erreurs correspondent aux incertitudes sur les régressions réalisées.

Pour valider la modélisation théorique précédente, nous réalisons un ajustement de la forme  $U = a\sqrt{\Delta d}$ . Celui-ci est cohérent avec nos mesures, et nous obtenons un

coefficient  $a \approx 0,70$  m/s proche de celui attendu  $\sqrt{gH/4} \approx 0,78$  m/s.

### 3.4. Limites de la théorie

Bien que la théorie développée par Benjamin [2] et Shin [1] fournit un modèle conforme à nos résultats expérimentaux, elle présente cependant certaines limites. En effet, les différentes hypothèses réalisées ne sont pas toujours valides, en particulier lorsqu'on s'intéresse aux courants de gravité rencontrés en géophysique.

On ne considère dans ce modèle que des courants en eau peu profonde, permettant une répartition symétrique en hauteur. Cependant, de nombreux courants de gravité évoluent dans des milieux semi-infinis où une telle répartition n'est pas possible : c'est le cas par exemple des avalanches ou des coulées pyroclastiques, dont les dimensions sont bien inférieures à l'épaisseur de l'atmosphère. Il faut alors s'intéresser à la solution  $h/H \approx 0$  obtenue dans le développement précédent.

Les effets de reliefs, nombreux dans le cadre de fluides géophysiques, ne peuvent pas toujours être négligés, en particulier si leurs dimensions sont comparables à la hauteur du courant. L'apparition d'un régime stationnaire lors de la propagation n'est alors pas forcément observée.

La dissipation visqueuse n'est pas prise en compte dans ce modèle, où les fluides sont considérés parfaits. Des études ont montré que cette hypothèse est valide lors du déplacement de bulles d'air dans l'eau [3-4], ce qui permet notamment de décrire le comportement des courants de gravité sous-marins. Cependant, elle semble limitée pour des écoulements géophysiques plus complexes.

Enfin, la présence d'instabilités de Kelvin-Helmholtz à l'interface des deux fluides lors de la progression du courant provient de non-linéarités dans le phénomène d'écoulement, qui ne sont pas prises en compte dans le modèle linéaire. Il faudrait alors développer un modèle non linéaire, à partir de l'équation de Navier-Stokes, afin de décrire cette instabilité.

## CONCLUSION

L'expérience présentée dans cet article permet de modéliser de façon simple et avec peu de matériel un courant de gravité. Elle peut être utilisée aussi bien pour présenter ce phénomène géophysique que pour illustrer la notion de densité. Il est également possible d'étudier la vitesse du courant formé afin de valider le modèle théorique proposé.

Les courants de gravité observés dans la nature sont des écoulements complexes, dépendant de nombreux paramètres. Comme pour l'étude de tout phénomène géo-

physique, la modélisation en laboratoire est alors une étape importante afin d'en améliorer notre compréhension.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.O. Shin, S.B. Dalziel and P.F. Linden, "Gravity currents produced by lock exchange", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 521, p. 1-34, 2004.
- [2] T.B. Benjamin, "Gravity currents and related phenomena", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 31, p. 209-248, 1968.
- [3] G.C. Gardner and I.G. Crow, "The motion of large bubbles in horizontal channels", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 43, p. 247-255, 1970.
- [4] D.L. Wilkinson, "Motion of air cavities in long horizontal ducts", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 118, p. 109-122, 1982.

## Compléments de l'article

*Cet article comporte des compléments nommés :*

- ◆ *Courant\_de\_gravite\_a\_deux\_fluides.avi*
- ◆ *Courant\_de\_gravite\_a\_trois\_fluides.avi*

*L'ensemble est disponible sur le site de l'UdPPC sous la forme d'un fichier zippé 10040725.*



**Vincent DE ZOTTI**

*Doctorant*

Laboratoire de physique  
École normale supérieure de Lyon (ENS)  
Lyon (Rhône)



**Samuel BOURY**

*Doctorant*

Laboratoire de physique  
École normale supérieure de Lyon (ENS)  
Lyon (Rhône)



**Pauline HUSSEINI**

*Doctorante*

Laboratoire de physique  
École normale supérieure de Lyon (ENS)  
Lyon (Rhône)



**Héliane PIOT-DURAND**

*Étudiante en Master 2*

École normale supérieure de Lyon (ENS)  
Lyon (Rhône)



**Clémentine ROUVIÈRE**

*Étudiante en Master 1*

École normale supérieure de Lyon (ENS)  
Lyon (Rhône)