

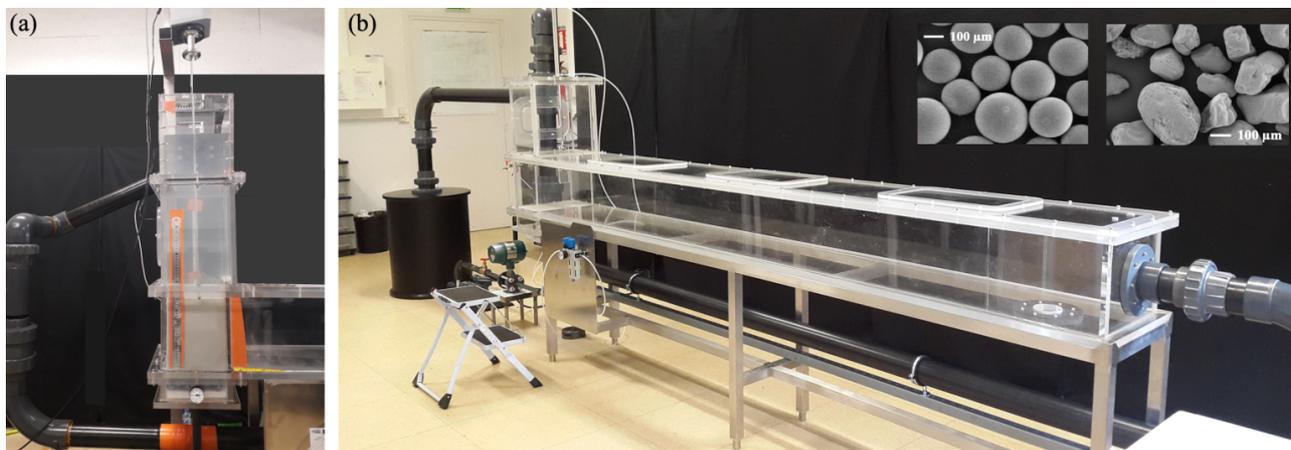
# PORTFOLIO DE L'UNITÉ DE RECHERCHE N°6293 GÉOHYDROSYSTÈMES CONTINENTAUX DE L'UNIVERSITÉ DE TOURS

## PORTFOLIO

### Dynamique des suspensions de sédiments dans les cours d'eau – Mise en place de la plateforme expérimentale type dam-break

Dans certains cours d'eau à faible débit moyen, le transfert de sédiments est périodiquement perturbé par l'occurrence d'événements extrêmes (inondations, crues éclair, ruptures de digue ou de barrage) au cours desquels l'érosion intense et la mise en suspension de particules solides de taille variable peut entraîner la formation de coulées de boue, de concentration variable, qui peuvent se transformer en courants de turbidité ou avalanches sous-marines lorsqu'elles se propagent dans les réservoirs d'eau douce ou en milieu marin. Le caractère imprévisible et dévastateur de ces événements empêche bien souvent leur étude directe (à partir de méthodes d'observation ou de surveillance), limitant ainsi la compréhension et la possibilité de modéliser ces phénomènes naturels de grande ampleur. L'objectif de cette thématique, développée autour des suspensions de sédiments, est de reproduire des mélanges de particules solides et de liquide en laboratoire, tout en étant capable de caractériser proprement leur concentration en sédiments, afin de pouvoir décrire quantitativement les propriétés de ces mélanges et de proposer des modèles physiques de leur dynamique.

Plusieurs études ont été menées, notamment à travers le travail de thèse de Ahmad Amin (2018-2022, direction : F. Moatar et L. Girolami), en collaboration avec Frédéric Risso (Directeur de Recherche au CNRS à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse) dans le but de comprendre le rôle de la concentration en particules, décrite à travers la fraction volumique solide  $\Phi_s$  du mélange normalisée par sa valeur au packing  $\Phi_{\text{pack}}$ , dans les processus de sédimentation des suspensions liquide-solides soumises à un écoulement de type 'rupture de barrage'. L'une des spécificités de ces travaux est basée sur l'utilisation des techniques de fluidisation pour générer des mélanges homogènes dans un régime de fluidisation stable qui nous permet de faire varier ce paramètre  $\Phi_s/\Phi_{\text{pack}}$  sur une gamme de valeurs pouvant s'étendre du régime quasi-dilué, obtenu avec des matériaux à inertie négligeable pour lesquels  $\Phi_s/\Phi_{\text{pack}} = 0.05$ , au régime le plus dense caractérisé par la valeur au packing pour lequel  $\Phi_s/\Phi_{\text{pack}} = 1$ . L'objectif principal de ces travaux repose ensuite sur la reproduction d'expériences inédites de coulées de boues (non-colloïdales) en fin de course, c'est-à-dire se propageant au bord du littoral sur pentes douces et dominées par les processus de sédimentation ; et de courants de turbidité qui se déposent dans les réservoirs d'eau douce et bassins océaniques, c'est-à-dire dans un milieu immergé pour lequel l'effet de la surface libre devient alors négligeable. Dans ces différents types d'expériences, seules les conditions aux limites se distinguent et visent à reproduire des écoulements à surface libre (se propageant dans un canal rempli d'air) ou pleinement immergés dans un canal rempli d'eau.



Dispositif expérimental mis en place au laboratoire GéHCO – Université de Tours. A- Réservoir incluant une cuve de fluidisation pour la reproduction de suspensions homogènes à concentration variable. Un rhéomètre portable avec des

pâles réalisées sur-mesure peut être introduit dans la cuve pour étudier la viscosité du mélange. B- Canal hydraulique dédié à la reproduction d'écoulements à surface libre (coulées de boue) ou immergés (courants de turbidité).

Le dispositif expérimental a été conçu et construit au préalable, à travers deux projets de recherche (FEDER-AELB, 2016 ; Région-IA 2017-2020; porteur L. Girolami), qui ont permis le recrutement de deux ingénieurs de recherche (Romain Morini, 2016 ; Florian Godet, 2017-2018) et l'instrumentation d'une plateforme expérimentale. Les études scientifiques menées à l'issue de ces projets ont ensuite permis de réaliser les expériences souhaitées, à l'échelle du laboratoire, en utilisant différents types de matériaux synthétiques modèles (billes de verre, billes de PMMA) et naturels (sable fin) de taille, de densité, de distribution granulométrique variable et de forme différente. La sélection de ces différents matériaux a permis de faire principalement varier le diamètre des grains  $d_p$  et leur densité  $\rho_p$ . Dans les expériences, les propriétés du fluide (sa densité  $\rho_f$  et sa viscosité  $\mu_f$ ) ont également été étudiées, mais sur une gamme de valeurs plus restreinte, ce qui nous a poussé à comparer certaines données expérimentales avec des expériences similaires réalisées avec différents matériaux et de l'air (dont la masse volumique et la viscosité sont respectivement de trois et deux ordres de grandeur plus faible que celle de l'eau), issues de travaux antérieurs [Girolami, 2008 ; Girolami & Riso, 2018 ; 2019 ; 2020]. Les suspensions de particules reproduites dans les expériences sont considérées comme homogènes, c'est-à-dire associées au régime de fluidisation particulaire, ce qui permet de décrire le comportement global des suspensions comme un fluide équivalent caractérisé par des grandeurs moyennes ( $\rho_m$ ,  $\mu_m$ ). Après analyse dimensionnelle, nous avons montré que la sédimentation des suspensions dépend de quatre groupes adimensionnels :  $\Phi_s$ ,  $\Phi_s/\Phi_{pack}$ , le nombre de Reynolds  $Re$ , le nombre de Stokes  $St_0$ . Lorsque le nombre de Reynolds est faible ( $Re \ll 1$ ), c'est-à-dire lorsque l'inertie du fluide est négligeable devant les forces visqueuses, ce qui est le cas pour les processus de sédimentation que nous étudions dans ces suspensions, le problème ne dépend plus que de  $\Phi_s$ ,  $\Phi_s/\Phi_{pack}$ , et  $St_0$ .

En faisant varier ces trois groupes adimensionnels sur une large gamme de valeurs (aussi large que possible), nous avons pu obtenir une loi de sédimentation universelle obtenue avec différents types de matériaux et de fluide (liquide et gaz) et faisant intervenir ces trois paramètres sous forme de trois fonctions indépendantes. L'analyse physique des résultats nous indique que la vitesse moyenne de sédimentation des particules dans une suspension homogène (décrite comme un fluide équivalent) peut être obtenue à partir de la vitesse théorique d'une particule isolée se déposant dans un fluide pur au repos, à laquelle on doit appliquer une correction en densité (qui affecte la force de flottabilité agissant sur la particule) et une correction en viscosité (qui affecte la force de traînée agissant sur la particule ainsi que sur son agitation locale par rapport à celle du fluide) [Amin *et al.*, 2021]. Des expériences supplémentaires consistant à relâcher une sphère macroscopique, de taille variable, dans ces suspensions, nous ont permis de comprendre que la force de traînée agissant sur la sphère plongeante est attribuée à une fine couche de mélange, coincée entre la paroi de la sphère et la particule la plus proche, fortement cisailée, et caractérisée par la viscosité locale du mélange, telle que l'on peut la décrire à partir de cette vitesse de sédimentation. Au-delà de cette couche, les particules de la suspension glissent par rapport à la sphère [Amin *et al.*, 2022]. Cette loi ne prend pour l'instant pas en compte l'effet de l'inertie du fluide sur la sédimentation des particules, ce qui fait notamment l'objet de la première partie de la thèse de Loïc Rousseau (Direction: M. Boussafir et L. Girolami ; 2021-2024).

En relâchant ces suspensions dans le canal du dispositif, de type 'rupture de barrage', nous avons pu réaliser des expériences inédites de coulées de boue et de courants de turbidité qui nous permettent de mieux comprendre et décrire les processus de transport et de sédimentation des particules dans ces écoulements. Les résultats obtenus nous ont permis de montrer que la concentration en particules dans le mélange tend à diminuer sa mobilité (distance et temps de parcours, vitesse moyenne). Le dépôt laissé par les écoulements est également d'autant plus épais et plus court que la concentration en particules dans le mélange est élevée, ce qui peut s'expliquer notamment par une sédimentation plus rapide des particules. Dans chacun des cas, la propagation des suspensions est principalement contrôlée par les processus de sédimentation (décrits par la loi citée précédemment, qui dépend uniquement des propriétés de la suspension, des matériaux et du fluide) et plus faiblement par la géométrie initiale du mélange décrite par son rapport de forme [Girolami *et al.*, 2022].



Suspensions de sédiments se propageant dans le canal. a- Coulées de boue. B-Courants de turbidité.

Les écoulements immergés se distinguent des écoulements à surface libre par la formation d'une couche de mélange diluée formée en surface qui devient rapidement indépendante de l'écoulement sous-jacent. Son temps de propagation est contrôlé par le temps de chute des particules dans le fluide au repos. L'interprétation des résultats a pour objectif le développement d'un modèle physique capable de prédire les grandeurs caractéristiques des écoulements et la géométrie de leurs dépôts à partir des paramètres de contrôle des expériences. Les simulations numériques des expériences

sont désormais en cours de finalisation, par le biais notamment d'une collaboration avec François James (Professeur en Mathématiques Appliquées à l'Institut Denis Poisson de l'Université d'Orléans) et du travail d'Andrea Bondesan (Post-doctorant en Mathématiques Appliquées, 2020-2021) [*Bondesan et al.*, 2022].

### Publications associées

Amin, A. 2022. Rhéologie et dynamique des suspensions concentrées de type coulées de boue. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle. Université de Tours.

Amin A., Girolami L., Risso F. (2021) On the fluidization/sedimentation velocity of a homogeneous suspension in a low-inertia fluid, *Powder Technology*, 391, 1-10, doi : 10.1016/j.powtec.2021.05.073.

Amin A., L. Girolami et F. Risso (2022) Fall of a large sphere in a suspension of small fluidized particles, *Physical Review Fluids Letter*, en révision.

Bondeson A., Girolami, L., James, F., Rousseau L. (2022) A two-layer depth-averaged model for dam-break suspension flows driven by sedimentation, en préparation.

Girolami L. et Risso F. (2018) Rheological behaviour and runout of short-lived fast-moving flows of hot, dense suspensions, *Journal of Energy Challenges and Mechanics*, 5(1), 17-23.

Girolami L. et Risso F. (2019) Sedimentation of gas-fluidized particles of random shape and size, *Physical Review Fluids*, 4, 074301, doi : 10.1103/PhysRevFluids.4.074301.

Girolami L. et Risso F. (2020) Sedimentation of gas-fluidized particles of random shape and size, Physical modeling of the dam-break flow of sedimenting suspensions, *Physical Review Fluids*, 5, 084306, doi:10.1103/PhysRevFluids.5.084306.

Girolami L., Bondeson, A., Risso F. (2022) On the runouts of sedimenting suspensions, en prep.