



LA RECHERCHE POUR L'INGENIERIE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Département Equipement pour l'eau et l'environnement

Unité de recherche Erosion torrentielle, neige et avalanches

RAPPORT DE SYNTHESE

CPER 1998-99

LOIS D'ECOULEMENT MICROSTRUCTURELLES DU TRANSPORT SOLIDE PAR CHARRIAGE

Convention : 98-4-92-003

Chef de projet : Christophe ANCEY

12 avril 2000

Groupeement de Grenoble

2 rue de la Papeterie, BP 76, 38 402 Saint-Martin-d'Hères

Tél. : 04.76.76.27.27 fax : 04.76.51.38.03

<http://www.cemagref.fr/>

1. UNE NOUVELLE APPROCHE POUR ETUDIER LE TRANSPORT SOLIDE EN TORRENTS

La spécificité des cours d'eau à forte pente (torrents et des rivières torrentielles) par rapport aux cours d'eau de plaine est principalement liée à leur capacité à transporter de grandes quantités de sédiments grossiers. Sur le long terme, ce transport de sédiment est un processus fondamental de la morphologie des torrents et rivières torrentielles (pavage du lit, divagation, engravement, etc.). Sur le court terme, lors de crues importantes, le transport solide est un processus dynamique aussi important que l'écoulement d'eau. Par exemple, il peut provoquer un exhaussement très rapide du lit et ainsi l'inondation du cône de déjection (cas de la Saltine à Brigue en septembre 1993).

Dans un premier temps, le transport solide sur des cours d'eaux à forte pente a été traité avec les outils issus de l'hydraulique fluviale. A partir d'un grand nombre d'essais en laboratoire où des écoulements d'eau sur fond mobile étaient reproduits à échelle réduite, il a été possible de rechercher les corrélations existant entre ces différentes quantités et ainsi d'aboutir à une relation mathématique entre des groupes de nombres sans dimension relatifs aux débits solide et liquide ainsi qu'aux caractéristiques granulométriques du matériau. Ce sont donc principalement des outils de corrélation multiple et de similitude qui ont été mis en œuvre. Cette approche, souvent qualifiée de *globale* car ne s'intéressant qu'à une échelle globale à l'ensemble des phénomènes, a permis de mettre en avant les grandes tendances du transport solide et d'en quantifier certains aspects (seuil de début de transport, charriage hyperconcentré). Ses résultats sont aujourd'hui d'un emploi courant en hydraulique. En outre, l'approche globale a permis d'éclairer la complexité et la multiplicité des processus intervenant dans les cours d'eau à forte pente. Si certains phénomènes (tels que les divagations, les structures morphologiques du lit, le tri granulométrique, etc.) existent également pour les cours d'eau de plaine, ils sont souvent liés pour les systèmes torrentiels à des échelles de temps, d'espace, d'intensité tout autres. D'autres phénomènes (tels que le pavage) apparaissent également. Compte tenu du nombre de mécanismes impliqués, de paramètres à prendre en compte, et de phénomènes en interaction, l'éclairage apporté par l'approche globale ne peut être que qualitatif.

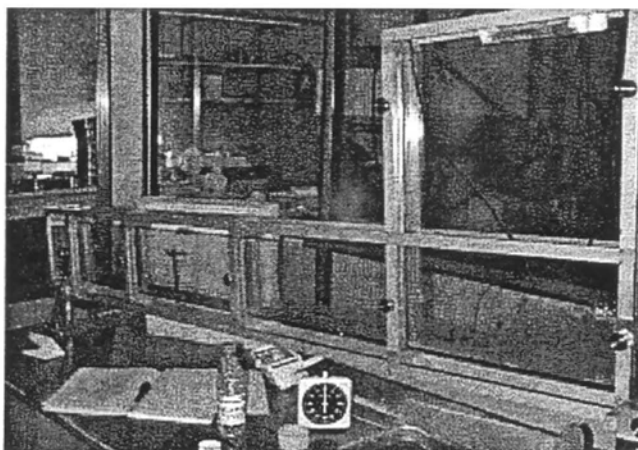
Pour aller plus loin, il est nécessaire de passer à un niveau d'analyse plus fin. C'est ce constat qui a motivé le lancement de notre programme de recherche sur les lois d'écoulement microstructurelles du charriage. Le terme "microstructurelle" renvoie bien ici au fait que nous considérerons le transport solide à une échelle bien plus fine que celle de l'écoulement. Soulignons enfin que cet affinement dans les échelles d'analyse suit la même logique que celle suivie en hydraulique lorsqu'on est passé de modèles globaux de type Chézy ou Manning-Strikler à une description plus fine prenant en compte la turbulence au sein des écoulements. C'est également le cheminement qui a été suivi en transport solide de particules fines pour passer de l'approche globale suivie par Duboy ou Meyer-Peter à une approche microstructurelle telle que celle d'Einstein.

Nous avons construit notre démarche de manière progressive en plusieurs étapes. L'idée principale est d'introduire à chaque nouvelle étape un nouvel ingrédient du transport solide. Le premier objectif assigné a été d'étudier le problème de transport solide le plus simple possible qui soit encore représentatif, même de manière caricaturale, du transport solide torrentiel. Nous avons donc examiné le mouvement d'une particule solide sous l'effet d'un écoulement d'eau le long d'une surface rugueuse inclinée. Cette expérience nous a servi de banc d'essais pour répondre à plusieurs interrogations et tester différentes solutions. Cette étape sera détaillée plus largement dans la suite de ce rapport. Pour l'étape suivante (à venir), l'attention sera centrée sur le comportement collectif de plusieurs particules dans une géométrie d'écoulement simplifiée (écoulement confiné). L'étape ultérieure est de passer progressivement à des géométries d'écoulements plus complexes et des granulométries de matériau plus étendues.

2. LE MOUVEMENT D'UNE SEULE BILLE COMME PHENOMENE DE BASE DU CHARRIAGE TORRENTIEL

2.1 DESCRIPTION DU DISPOSITIF

La première étape du programme de recherche a été d'étudier le mouvement d'une seule particule (sphérique) sur un fond rugueux incliné. Afin d'éviter la divagation de la particule, nous avons choisi de placer la bille dans un canal incliné étroit, de taille légèrement plus grande que le diamètre de la particule. Le cas du mouvement sur un plan incliné a été étudié par ailleurs par P.Y. Jullien au laboratoire d'hydraulique de Fort Collins. La photographie n° 1 montre le dispositif expérimental construit à cet effet. Par rapport au plan incliné, l'emploi d'un canal étroit se révèle particulièrement pratique pour la prise d'images et leur traitement. C'est en effet essentiellement sur le traitement d'images que sont faites les diverses mesures de hauteur d'eau, de vitesse et trajectoire de la particule, etc.



Photographie 1 : dispositif expérimental.

Les paramètres de contrôle sont pour cette expérience : pour le canal, son inclinaison θ (on peut également jouer sur sa largeur, mais essentiellement pour évaluer les effets de bords) ; pour la bille en mouvement, sa taille R et sa masse volumique ρ_p ; pour la rugosité sur fond, la taille équivalente r de la rugosité ; pour la lame d'eau, son débit q . Plusieurs particules ont été utilisées : billes en acier ou en verre de diamètre 6 mm. De même, nous avons testé plusieurs tailles et formes de rugosité (en demie sphère, en dent de scie, aléatoire). A l'aide d'un système par acquisition et traitement d'images, nous pouvons suivre le mouvement de la particule et obtenir des informations diverses sur la trajectoire, la vitesse, etc. De même un suivi de la phase liquide est réalisé. C'est en général la hauteur d'eau qui est mesurée (le débit étant imposé et connu par ailleurs), mais il est également possible d'obtenir (toujours par traitement d'images) le champ de vitesse au sein de l'eau.

2.2 ENJEUX ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

La série d'expériences réalisées autour du petit canal vise à répondre des questions à la fois sur le plan scientifique et sur le plan technique. Sur le plan scientifique, les problèmes sont les suivants :

- Quelle est l'échelle d'espace nécessaire pour modéliser le mouvement ? En effet, l'approche microstructurale repose sur une analyse à une échelle plus petite que celle de l'écoulement, mais cela laisse le choix entre plusieurs possibilités. Naturellement, plus on prend une échelle petite, plus on gagne en finesse mais également plus l'information à connaître est grande. Dans un

premier temps, nous essayons de vérifier si la connaissance de la grandeur moyenne des variables (vitesse, trajectoire) est suffisante. Dans le cas contraire, la prise en compte de la turbulence de l'écoulement et des fluctuations de la bille conduirait à une très grande lourdeur de l'approche microstructurale.

- Dans un grand nombre de cas, les expériences montrent une certaine dispersion des résultats. Les idées ne sont pas encore claires quant à savoir si cette dispersion résulte de fluctuations autour d'un comportement moyen ou bien si elle relève d'un comportement stochastique. Par exemple, il est expérimentalement difficile de déterminer des limites nettes séparant deux régimes (comme le début d'entraînement). Ce problème est crucial et sa réponse influera considérablement notre capacité à modéliser des systèmes plus complexes.
- Les modèles numériques d'écoulement granulaire peuvent-ils être adaptés pour simuler le charriage ? Le cas échéant, on peut espérer pouvoir utiliser avec profit les résultats de simulation numérique pour avoir accès à certaines variables difficilement mesurables (rotation des particules, taux de collision).
- Lorsqu'on réalise les expériences de charriage avec plusieurs particules, quelle est la concentration solide critique au-dessus de laquelle les particules commencent à interagir entre elles ? Est-ce qu'une théorie de champ moyen est encore suffisante à rendre compte du charriage (dans les calculs, peut-on se ramener en fait à une seule particule test, l'action des autres particules n'intervenant que sous la forme d'un terme de force supplémentaire ou bien est-il nécessaire de se ramener à une description sous la forme de champ continu) ? Quelles sont les équations gouvernant la phase solide ?
- Est-ce que des matériaux à granulométrie très resserrée peuvent former des structures morphologiques (telles que des anti-dunes) sur le fond du canal ? Comme dans le cas de systèmes naturels (rivières à fond mobile et à granulométrie resserrée), la réponse est positive, on peut s'attendre à pareil comportement dans notre canal. Il y a alors une structuration très particulière de l'écoulement. Notamment la dissipation d'énergie se fait à la fois à l'échelle des structures morphologiques et à celle des grains composant le fond. Dans les théories du type Engelund & Hansen, la dissipation d'énergie est moyennée sur les deux échelles. En fait, clairement, les deux échelles de dissipation sont liées : par exemple, l'insuffisance de la dissipation d'énergie à l'échelle du grain peut être compensée par une augmentation de la perte de charge au niveau de la structure morphologique. Comment alors se fait la régulation entre la phase liquide, les structures morphologiques et le transport solide ?

Sur le plan technique, le canal actuel sert également comme banc de tests de différentes techniques de mesure (essentiellement par traitement d'images). A la clé de nos tests :

- des méthodes de trajectographie des particules. Il s'agit de faire un suivi des particules en mouvement et de calculer les caractéristiques des trajectoires (vitesse, nature du mouvement, etc.) ;
- des méthodes de détection des limites du lit. Il s'agit d'arriver à classer les particules sur le fond en deux catégories : celles mobiles participant au transport solide, les autres fixes composant le lit à proprement parler. Cela doit permettre d'arriver à faire des bilans précis de masse et distinguer sur un tronçon donné le transport solide provenant de l'amont de celui dû à l'entraînement de particules sur ce tronçon ;
- des méthodes de mesure du débit par classe granulométrique. Il s'agit d'arriver à estimer à tout moment le débit solide d'une classe granulométrique. Cela conditionne la poursuite des essais avec des matériaux proches des matériaux naturels (à granulométrie étendue).

2.3 PREMIERS RESULTATS

Un modèle théorique a été développé pour décrire le mouvement d'une particule sphérique en charriage (roulement et glissement) le long d'une colonne rugueuse composée de billes accolées. Ce modèle repose sur des hypothèses simples pour décrire les actions subies par la particule : du

frottement, des collisions, et une poussée hydrodynamique (de type "traînée"). La phase liquide est décrite par un modèle de turbulence simplifié de type longueur de mélange, largement utilisé en hydraulique des canaux à surface libre. A partir d'un bilan d'énergie, il est possible de calculer la vitesse moyenne de la particule, la condition d'entraînement, etc. Le modèle ne fait pas intervenir de paramètres autres que des paramètres physiques mesurables par ailleurs. Ce modèle permet de retrouver la plupart des caractéristiques du transport solide au moins sur un plan qualitatif : seuil de début de transport, linéarité débits solide et liquide aux forts débits liquides, etc. Nous vérifions maintenant le caractère prédictif du modèle.

La description de la phase liquide par le modèle de turbulence simplifié a donné de bons résultats même dans le cas où la hauteur d'eau n'est que peu de fois plus grande que l'échelle de rugosité. Concernant le seuil de début de mouvement, les résultats expérimentaux ne sont pas toujours bien décrits par notre modèle théorique. Notamment le modèle prévoit qu'il existe une courbe critique $\bar{u} = f(\theta, \varepsilon)$ (où $\bar{u}$, ε , et θ désignent respectivement la vitesse moyenne du fluide, l'échelle de rugosité, et la pente du canal). La figure 1 reporte la variation de cette courbe et quelques points expérimentaux correspondant à des billes soit immobiles, soit en roulement. Même si pour l'heure¹ il ne nous pas été possible de balayer toutes les plages de valeurs possibles pour $\bar{u}$ et θ , on note que le modèle théorique ne décrit qu'approximativement le seuil de mise en mouvement. Notons que des difficultés similaires apparaissent déjà pour des mouvements à l'air libre et qu'elles sont encore plus manifestes lorsqu'on examine la transition entre roulement et saltation.

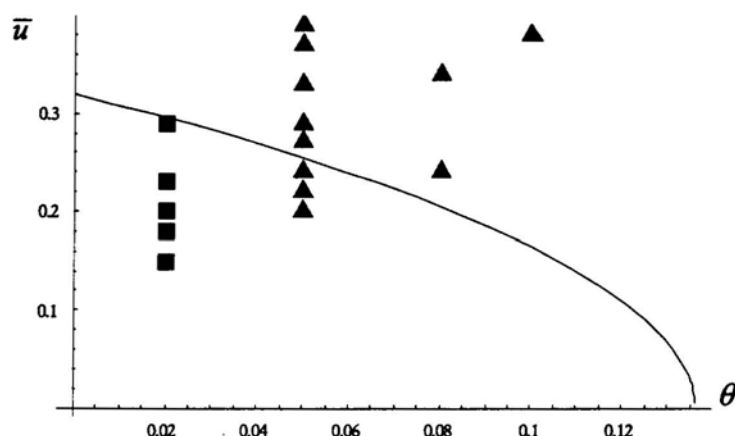


Figure 1 : courbe critique $\bar{u} = f(\theta)$ correspondant au seuil de début de mouvement. Les carrés noirs correspondent à des expériences où la bille restait immobile et les triangles correspondent à des conditions expérimentales pour lesquelles un mouvement par roulement de la bille a été observé.

Des comparaisons ont été également entreprises sur les variations de la vitesse de la particule en fonction de la vitesse moyenne débitante du fluide. Comme le montre la figure 2, le modèle théorique ne décrit correctement la variation de la vitesse de la particule en fonction de la vitesse moyenne du fluide qu'aux forts débits. Aux faibles débits, c'est-à-dire près du seuil de début de transport, le modèle sous-estime la vitesse de la particule, celle-ci semblant indépendante de la vitesse du fluide et fluctuant dans de larges proportions.

¹ Quoique nous ayons employé des billes en acier (densité 7,55), nous avons observé que, pour la plupart des essais, les billes se déplaçaient principalement par saltation ; le modèle développé étant centré sur le roulement, il n'a pas été pour l'heure toujours possible de confronter données expérimentales et théoriques.

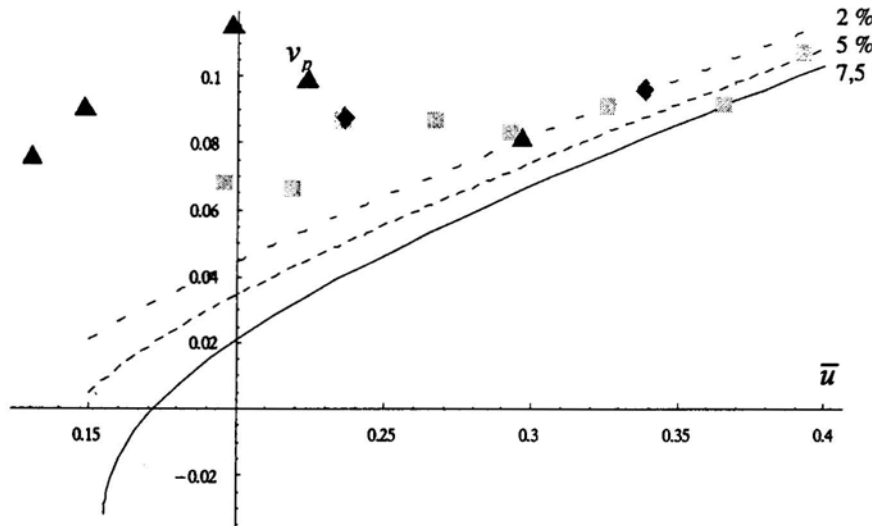


Figure 2 : variation de la vitesse de la particule en fonction de la vitesse débitante pour trois pentes du canal : 7,5 % (carré), triangle (5 %), et losange (2 %). Sont également reportées les courbes théoriques. Expériences réalisées avec un rapport de rugosité de 1 et des billes en acier. Le régime étudié est le roulement.

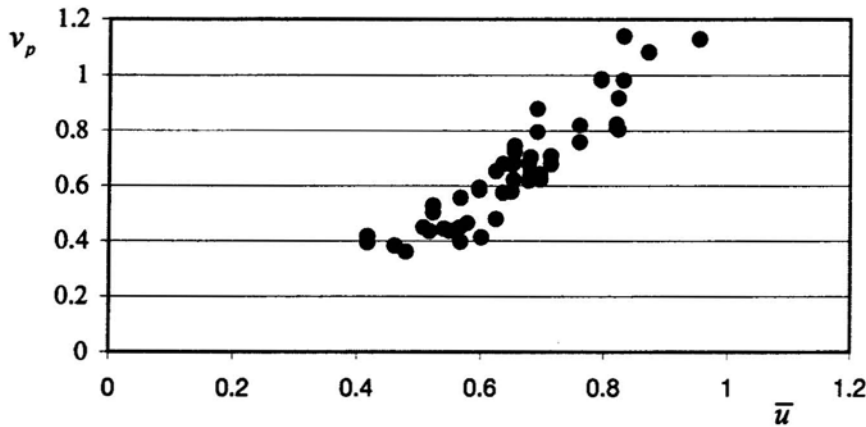


Figure 3 : variation de la vitesse de la particule en fonction de la vitesse débitante pour différentes pentes du canal et valeurs de rugosité (non indiquées). Expériences réalisées avec un rapport de rugosité de 1 et des billes en acier. Le régime étudié est la saltation.

Par ailleurs, un grand nombre d'expériences ont été réalisées avec des particules en saltation. Dans ce cas, la linéarité de la vitesse moyenne de la particule vis-à-vis de la vitesse du fluide y apparaît plus clairement, comme l'indique la figure 3.

2.4 BILAN DE LA PREMIERE ETAPE

La première étape de notre étude microstructurale du charriage visait à étudier le mouvement d'une particule sur un fond rugueux sous l'effet d'un écoulement d'eau. Cette série d'expériences a servi de banc de test à la fois pour le modèle théorique en cours de développement et pour la mise au point et l'adaptation des techniques de mesure par traitement d'images adéquates.

3. PERSPECTIVES

Le projet d'étude comporte trois étapes visant à mieux connaître les mécanismes du transport solide par charriage. Nous arrivons au terme de la première étape. La plupart des outils de mesure nécessaires pour l'étude expérimentale sont désormais opérationnels. Notamment un logiciel de mesure du transport solide par classe granulométrique a été développé. Il marche pour l'instant pour des granulométries peu étendues et des particules régulières, mais ses performances devraient être

augmentées au cours des mois à venir. Il reste principalement à terminer la mesure de l'évolution du lit par traitement d'images stéréoscopiques. En parallèle, un modèle théorique est en cours de développement et un code calcul ("dynamique des contacts") est en cours d'adaptation pour simuler le charriage.

Sur le plan des collaborations, les contacts se sont étendus en direction de deux laboratoires outre le partenariat que nous avons déjà avec le laboratoire *Sols, Solides Structures* à Grenoble (J. Lanier encadrant l'étudiante en thèse) : le *Laboratoire de Mécanique du Génie Civil* à Marseille pour les aspects liés à la modélisation numérique du mouvement de particules dans de l'eau et le laboratoire de *Traitement du Signal et Instrumentation* à Saint-Etienne pour les problèmes liés à la mesure.

Les deux prochaines étapes devraient s'étaler sur les trois prochaines années. Un financement de thèse en poursuite de la thèse en cours a été obtenu et des compléments de financement sont recherchés notamment auprès du ministère chargé de la recherche. La partie liée à la mise au point des techniques de mesures est financée par l'intermédiaire du programme *Avenir* de la région Rhône-Alpes.

Les premières publications sur le travail sont en cours. L'approche générale est décrite dans le chapitre de synthèse "mécanismes du transport solide" qui doit être intégré dans le volume 'micromécanique des milieux granulaires' publié par Hermès. Des articles ont déjà été présentés à des colloques et d'autres sont en préparation pour des revues scientifiques internationales.