

# Influence de l'arrangement granulaire d'un sédiment polydisperses sur le seuil de mise en mouvement

O. BLANPAIN<sup>a</sup>, P. CANN<sup>b</sup>, P. LE HIR<sup>b</sup>, P. CUGIER<sup>b</sup>, P. BAILLY DU BOIS<sup>c</sup>, R. LAFITE<sup>d</sup>, T. GARLAN<sup>a</sup>

a. SHOM – DOPS/HOM/CFuD/Sédimentologie – blainpain@shom.fr

b. IFREMER – DYNECO – plehir@ifremer.fr

c. IRSN – PRP-ENV/SERIS/LRC – pascal.bailly-du-bois@irsn.fr

d. Université de Rouen – CNRS – UMR M2C – robert.lafite@univ-rouen.fr

## Résumé :

*La prédiction du transport d'un mélange de particules de plusieurs tailles est un point sensible d'une représentation de la dynamique sédimentaire sur de nombreux faciès en rivière ou en mer. Afin de déterminer les processus critiques qui régissent la mise en mouvement de tels mélanges et de quantifier leur contributions, des essais ont été réalisés dans un petit canal à courant. Ils ont porté sur des échantillons reconstitués, formés de sables naturels lithoclastiques bien triés ou de mélanges sableux bimodaux. L'objectif est d'observer et de quantifier les différences de comportement à l'entraînement entre un sédiment unimodal et un sédiment mélangé. Les résultats obtenus sont comparés à une sélection de formulations issues de la littérature.*

*La série de tests a permis de mettre en évidence quelques processus particuliers du début du transport sédimentaire multiclasse dans un écoulement stationnaire. La granulométrie utilisée s'étend des sables fins aux sables très grossiers. Des paramètres du mélange tels que le rapport de taille des particules, le taux de saturation des échantillons par les grains dont la taille est la plus fine ou la porosité influent sur la modulation de la contrainte de frottement critique. Les comparaisons mesures / formules ont mis en évidence la difficulté de prédire le seuil de mise en mouvement des particules d'un mélange hétérométrique. Par conséquent, l'incertitude sur la granulométrie transportée s'accroît lorsque le frottement est proche du frottement critique d'une certaine classe de taille.*

## Abstract :

*Forecast of size graded particle transport is a challenging issue for most of river and seabed facies made of sediment mixture. A set of experiments have been carried in a small current flume to investigate sensitive parameters leading to incipient sediment motion of these mixtures. Samples were made of well sorted natural sand or with a bimodal distribution of size from fine to coarse sand. Data collected have been compared with several existing formulations.*

*Several features of the mixture as size ratio, saturation rate of the coarse matrix by fine grains or porosity can affect each particle population threshold shear stress. Common formulations described badly these variations, thus the sizes in motion are predicted with more uncertainties when the shear stress is close to the threshold one.*

## Mots clefs :

Seuil de mise en mouvement, canal à courant, mélange granulométrique, modélisation, porosité.

# 1 Introduction

Les expérimentations en canaux de laboratoire ont été abondamment utilisées pour étudier le transport sédimentaire depuis près d'un siècle ([1], [2], [3]). Les canaux permettent un contrôle des conditions hydrosédimentaires et ont donc été privilégiés pour étudier des processus spécifiques indépendamment de la variabilité habituellement rencontrée en nature. En granulométrie étendue, les études en canaux ont notamment permis d'étudier le seuil de mise en mouvement différentiel, le transport partiel, la stratigraphie des dépôts, le phénomène de pavage, le phénomène d'affinement granulométrique à l'aval d'un écoulement, le tri granulométrique sur un fond ridé, ou encore d'évaluer la contrainte de frottement en présence de grosses aspérités.

Depuis une vingtaine d'années, des canaux ont été développés pour étudier l'érodabilité d'échantillons de sédiments naturels (seuil de mise en mouvement et flux transportés) (revue de synthèse par Black et Paterson [4] et intercomparaisons par Tolhurst *et al.* [5] ou Amos *et al.* [6]). Certains opèrent *in-situ*, directement sur le fond (Sea Carousel : Amos *et al.* [7] ; Niwa straight benthic flume : Aberle *et al.* [8]), d'autres nécessitent le prélèvement puis la mise en place d'échantillons sédimentaires non perturbés ([9], [10]). Ainsi, les conditions hydrodynamiques sont maîtrisées et les spécificités (nature, caractéristiques physiques, bioturbation) du sédiment sont conservées. En général, l'échantillon ne peut être soumis qu'à un courant unidirectionnel. L'érodimètre, conçu au centre Ifremer de Brest, a été développé dans ce but ([11], [12]). Il permet de travailler sur des échantillons reconstitués, ou provenant d'un prélèvement par carottage dans le milieu naturel.

Dans le cadre de cette étude, des essais ont été réalisés sur des échantillons reconstitués formés de sables naturels bien triés ou de mélanges bimodaux. Le sable provient de plages finistériennes, il est lithoclastique et couvre la gamme des sables fins aux sables grossiers. L'objectif est d'observer et de quantifier les différences de comportement à l'entraînement entre un sédiment unimodal et un sédiment mélangé. Les résultats obtenus sont comparés à une sélection de formulations issues de la littérature.

## 2 Matériels et méthodes

### 2.1 Expérimentations

L'érodimètre est un canal en charge à courant unidirectionnel. C'est un instrument portable qui a été conçu pour réaliser des tests d'érodabilité rapidement (seuil de mise en mouvement et flux transportés).

Le canal a une longueur de 1,20 m, une section de 8 cm de large et de 2 cm de haut. La longueur de 80 cm qui précède le sédiment à éroder est suffisante pour que le régime d'écoulement et la couche limite de fond (d'épaisseur centimétrique) soient établis. En outre, un abrasif de rugosité moyenne a été collé sur le fond du canal pour accentuer les turbulences et atténuer le contraste de rugosité lors de la transition entre le fond lisse du canal et le sédiment [11]. Le diamètre interne du support de l'échantillon est de 9 cm, tronqué par la largeur intérieure du canal de 8 cm. La surface érodée est estimée à 30 cm<sup>2</sup> (l'érosion est moins importante voire nulle le long des parois du fait de la couche limite qui se met en place).

L'échantillon de sédiment à éroder affleure à la base du canal dans lequel un écoulement à circuit fermé est forcé par une pompe dont le débit est contrôlé (figure 1). Pour chaque test, un débit est imposé pendant un laps de temps déterminé. La quantité de matière mise en suspension est mesurée à l'aide d'un turbidimètre à rétrodiffusion optique. Un piège à sédiment, localisé en aval de l'échantillon, permet de récupérer les grains transportés par charriage.

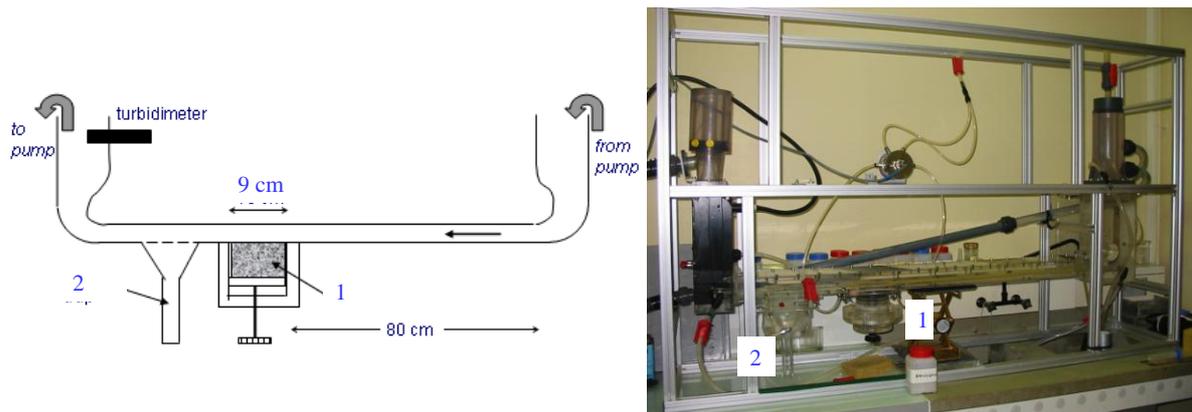


Figure 1. Principe de fonctionnement de l'érodimètre. 1 : échantillon de sédiment. 2 : piège à sédiment.

L'appareil a été calibré de telle sorte qu'à un débit donné corresponde une contrainte de frottement de peau. La calibration a été obtenue en recherchant le débit critique dans le canal à partir duquel un matériau d'une granulométrie et d'une densité donnée commence à bouger « significativement ». L'application du critère de mise en mouvement de Shields permet d'en déduire la contrainte de cisaillement appliquée. On dispose ainsi d'une relation entre le débit délivré par la pompe et la contrainte de cisaillement au droit de l'échantillon.

Trois classes de sable ont été retenues pour cette série de tests :

- de 0,16 mm à 0,2 mm,  $D_m = 0,18 \text{ mm}$  (sable fin), noté SF par la suite ;
- de 0,5 mm à 0,63 mm,  $D_m = 0,565 \text{ mm}$  (sable grossier), noté SM ;
- de 1,6 mm à 2 mm,  $D_m = 1,80 \text{ mm}$  (sable grossier), noté SG ;

La classe SM est très proche des sables moyens dont le diamètre est compris entre 0,25 mm et 0,50 mm.

Les tests ont porté sur les trois classes non mélangées et sur des mélanges bimodaux des trois classes suivant quatre proportions massiques (20%, 40%, 60% et 80%). Pour chaque type d'échantillon, au moins cinq essais d'érodimétrie ont été réalisés. Le seuil de mise en mouvement a été déterminé pour chaque sable monoclasse et pour chaque classe dans un mélange.

Pour chaque type d'échantillon, la porosité a été calculée dans un cristalliseur en faisant la différence de la masse mouillée ( $m_m$ ) et de la masse sèche ( $m_s$ ) obtenue après passage de l'échantillon à l'étuve :

$$p = \frac{V_{ei}}{V_t} = \frac{m_{ei} / \rho_e}{m_{et} / \rho_e} = \frac{m_m - m_s}{m_{et}}$$

Avec :

- $V_{ei}$  le volume d'eau interstitielle en  $\text{m}^3$  ;
- $V_t$  le volume total considéré (eau interstitielle + sédiment) en  $\text{m}^3$  ;
- $m_{ei}$  la masse d'eau interstitielle en kg ;
- $m_{et}$  la masse d'eau totale que peut contenir le cristalliseur en kg ;
- $\rho_e$  la masse volumique de l'eau en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

## 2.2 Modélisation

L'interaction entre les grains de tailles différentes dans la détermination du début d'entraînement est généralement traduite par l'introduction d'un coefficient de masquage–exposition  $\xi_i$  qui module la contrainte de seuil de mise en mouvement en fonction de la répartition granulométrique de la couche active.

Le coefficient  $\xi_i$  a souvent été déterminé empiriquement et est alors exprimé sous la forme :

$$\xi_i = \left( \frac{D_i}{D_{ref}} \right)^b$$

Avec :

$D_{ref}$  un diamètre caractéristique du mélange qui varie selon les auteurs ;

$b$  un coefficient généralement compris entre 0 et -1.

Des formulations théoriques ont aussi été proposées, soit à partir de l'étude mécanique de l'équilibre d'un grain à la surface d'un lit sédimentaire [13], ou d'une étude sur les probabilité d'un grain à être exposé ou masqué en fonction de sa taille [14].

Toutes ces formulations traduisent le fait que le masquage ou bien l'exposition d'un grain à la surface du lit dépend principalement du rapport entre sa taille et une taille représentative des grains qui l'entourent. La mise en mouvement d'un petit grain sera retardée alors qu'une grosse particule verra son début d'entraînement facilité :

$$\text{pour } D_i > D_{ref} : \xi_i < 1 \text{ et donc } \theta_{i,cr,\xi} < \theta_{D_{50},cr}$$

$$\text{pour } D_i < D_{ref} : \xi_i > 1 \text{ et donc } \theta_{i,cr,\xi} > \theta_{D_{50},cr}$$

Suite à une étude sur les méthodes d'estimation du coefficient de masquage–exposition les plus fréquents, Buffington et Montgomery [15] concluent qu'aucune relation universelle ne peut être établie.

Plusieurs formulations ont été sélectionnées à partir des résultats obtenus in-situ par Blanpain [16] et de Van der Scheer *et al.* [17]. Ces derniers ont comparé dix-sept formulations en termes de domaine de validité, de comportement et de prédiction de transport. La composition du transport est confrontée à dix séries d'expérimentations en canaux à courant. En se basant sur leurs conclusions, trois formulations ont été sélectionnées pour leurs bonnes adéquations aux mesures : Wu *et al.* [14], Wilcock et Crowe [18] et Ackers et White [19] en plus de la formulation couramment utilisée de Shields [3].

- **Shields** [3]

Le paramètre de mobilité de Shields  $\theta_i$  (ou contrainte de frottement adimensionnelle) pour la classe  $i$  est défini par :

$$\theta_i = \frac{u_*^2}{(s-1) g D_i} = \frac{\tau}{\rho_e (s-1) g D_i}$$

Avec :

$u_*$  la vitesse de frottement en  $\text{m.s}^{-1}$  ;

$s$  la densité du sédiment ;

$g$  l'accélération de la pesanteur en  $\text{m.s}^{-2}$  ;

$D_i$  le diamètre des grains de la classe considérée ;

$\tau$  la contrainte de frottement de peau en  $\text{N.m}^{-2}$  ;

$\rho_e$  la masse volumique de l'eau en  $\text{kg.m}^{-3}$ .

Ce paramètre est une estimation du rapport entre la force exercée par l'écoulement sur le grain et le poids immergé du grain. Il est donc un indicateur de la mobilité du grain. La contrainte adimensionnelle seuil  $\theta_{i,cr}$  pour la classe  $i$  est calculée de la même manière avec la vitesse de frottement critique  $u_{*,cr}$  ou la contrainte critique de mise en mouvement  $\tau_{cr}$ .

Shields a relié empiriquement cette contrainte critique adimensionnelle  $\theta_{cr}$  au diamètre adimensionnel  $D^*$  :  $\theta_{cr} = F(D^*)$ . Van Rijn [20] a proposé une paramétrisation de la courbe définie par Shields qui a permis d'exprimer la fonction  $F$  :

$$\theta_{cr} = \begin{cases} 0,24 \cdot D^{*-1} & \text{pour } D^* \leq 4 \\ 0,14 \cdot D^{*-0,64} & \text{pour } 4 < D^* \leq 10 \\ 0,04 \cdot D^{*-0,1} & \text{pour } 10 < D^* \leq 20 \\ 0,013 \cdot D^{*0,29} & \text{pour } 20 < D^* \leq 150 \\ 0,055 & \text{pour } D^* > 150 \end{cases}$$

- **Wu et al.** [14]

La formule de Wu *et al.* est inspirée de la formulation de Meyer-Peter et Müller [21] et a été calibrée sur un nombre conséquent de données issues d'expérimentations en canal et de données acquises en rivières. Son domaine de validité est ainsi particulièrement étendu que ce soit en terme de granulométrie ( $D_{50}$  compris entre 0,2 mm à 50 mm) ou d'intensité de forçage (paramètre de mobilité de Shields  $\theta_{50}$  compris entre 0,009 et 4,076).

La particularité de cette formulation tient dans l'intégration d'un coefficient de masquage-exposition exprimé de manière probabiliste : le coefficient est le rapport des probabilités d'exposition et de masquage de chaque grain en considérant que la surface d'exposition d'un grain a une distribution normale. La formule a été adaptée pour être exprimée directement en fonction de la contrainte de frottement de peau :

$$Q_{char,i} = CE \cdot \beta_i \cdot 0,0053 \cdot \left[ \frac{\tau}{\tau_{cr,i}} - 1 \right]^{2,2} \cdot \sqrt{\left( \frac{\rho_s}{\rho_e} - 1 \right)} \cdot g \cdot D_i^3$$

Avec :

$Q_{char,i}$  le débit solide de la classe  $i$  en  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  ;

$CE$  le coefficient d'entrave ;

$\tau$  la contrainte de frottement de peau en  $\text{N.m}^{-2}$  ;

$\tau_{cr,i} = (\rho_s - \rho_e) \cdot g \cdot D_i \cdot \theta_{cr} \cdot \xi_i$  la contrainte de frottement critique en  $\text{N.m}^{-2}$  ;

$\xi_i = \left( \frac{p_{e,i}}{p_{m,i}} \right)^{-0,6}$  le coefficient de masquage-exposition ;

$p_{e,i} = \sum_{j=1}^N \beta_j \frac{D_i}{D_i + D_j}$	la probabilité d'exposition ;
$p_{m,i} = \sum_{j=1}^N \beta_j \frac{D_j}{D_i + D_j}$	la probabilité de masquage ;
$\theta_{cr} = 0,03$	le paramètre de mobilité critique ;
$g$	l'accélération de la pesanteur en $m.s^{-2}$ ;
$\rho_s$	la masse volumique des grains en $kg.m^{-3}$ ;
$\rho_e$	la masse volumique de l'eau en $kg.m^{-3}$ ;
$\beta_i ; \beta_j$	la proportion de la classe $i$ (ou $j$ ) dans la couche de surface ;
$D_i ; D_j$	la taille moyenne des grains de la fraction $i$ (ou $j$ ).

Le paramètre de mobilité critique est pris constant pour toutes les classes de particules ; le coefficient de masquage–exposition est donc primordial pour permettre de distinguer la mise en mouvement des différentes classes d'un mélange.

- **Wilcock et Crowe [18]**

La formulation de Wilcock et Crowe [18] est basée sur des études de transport partiel de mélanges sables/graviers réalisées en canal à courant ([22], [23]). Le  $D_{50}$  de chaque mélange est contenu dans un intervalle réduit compris entre 4,5 mm et 10,2 mm, les valeurs du paramètre de mobilité de Shields investiguées sont faibles ( $< 0,2$ ). Ces expérimentations ont fait ressortir l'influence de la teneur en sable dans la couche de surface sur le comportement dynamique du mélange [24].

Cette formulation a la particularité de ne pas faire apparaître de seuil de mise en mouvement : un débit solide très faible est calculé même pour  $\tau < \tau_{cr,i}$ .

$$Q_{char,i} = \beta_i \times \frac{u_*^3}{((\rho_s / \rho_e) - 1) \cdot g} \times \begin{cases} 0,002 \cdot T_i^{7,5} & \text{pour } T_i < 1,35 \\ 14 \cdot \left(1 - \frac{0,894}{T_i^{0,5}}\right)^{4,5} & \text{pour } T_i \geq 1,35 \end{cases}$$

Avec :

$u_*$  la vitesse de frottement en  $m.s^{-1}$  ;

$T_i = \frac{\tau}{\tau_{cr,i}}$  le rapport entre la contrainte de peau et la contrainte critique.

La contrainte de frottement critique de la classe  $i$  est une modulation (par le biais d'un coefficient de masquage-exposition  $\xi_i$ ) de la contrainte seuil du diamètre médian du mélange ( $D_{50}$ ). Suivant les observations de Wilcock et Kenworthy [24], celle-ci est estimée en fonction de la proportion de sable  $\beta_{sable}$  contenue dans la couche active et non selon la paramétrisation classique proposée par Shields :

$$\tau_{cr,i} = \tau_{cr,50} \cdot \xi_i \quad \text{avec} \quad \xi_i = \left(\frac{D_i}{D_{50}}\right)^B \quad \text{et} \quad B = \frac{0,67}{1 + \exp\left(1,5 - \frac{D_i}{D_{50}}\right)}$$

$$\tau_{cr,50} = \theta_{cr,50} \cdot D_{50} \cdot (\rho_s - \rho_e) \cdot g$$

$$\theta_{cr,50} = 0,021 + 0,015 \cdot \exp(-20 \cdot \beta_{sable})$$

- **Ackers et White [19]**

Ackers et White [19] ont proposé une formule pour calculer le transport total d'une couverture sédimentaire de granulométrie uniforme représentée par le diamètre caractéristique  $D_{35}$ . Cette formulation a été ajustée à partir de tests réalisés en canaux à courant sur des particules de taille comprises entre 0,04 mm et 4 mm.

Day [25] a élargi le domaine d'application de la formule au cas multiclasse par le biais d'un coefficient de masquage et d'exposition. Il l'a validé pour des estimations du charriage sur des granulométries s'étendant de  $D_{50} = 0,4$  à  $13,9$  mm.

$$Q_{char,i} = CE \cdot \beta_i \cdot K_i \cdot U \cdot D_i \cdot \left( \frac{U}{u_*} \right)^{n_i} \cdot \left( \frac{Y_i}{\xi_i \cdot Y_{cr,i}} - 1 \right)^{m_i}$$

Avec  $Y_i$ , le paramètre de mobilité :

$$Y_i = \frac{u_*^{n_i}}{\sqrt{(s-1)gD_i}} \left( \frac{U}{5,66 \cdot \log(10h/D_i)} \right)^{1-n_i}$$

La valeur critique du paramètre de mobilité,  $Y_{cr,i}$  et les constantes  $K_i$ ,  $n_i$  et  $m_i$  dépendent du diamètre adimensionnel  $D_i^*$  :

Pour $D_i^* < 60$	si $D_i^* \geq 60$
$K_i = 10^{-3.53+2.86 \cdot \log(D_i^*) - (\log(D_i^*))^2}$	$K_i = 0,025$
$Y_{cr} = \frac{0,23}{\sqrt{D_i^*}} + 0,14$	$Y_{cr} = 0,17$
$n_i = 1 - 0,56 \cdot \log(D_i^*)$	$n_i = 0$
$m_i = \frac{9,66}{D_i^*} + 1,34$	$m_i = 1,5$

Valeurs des paramètres de la formulation de Ackers et White [19].

Le coefficient de masquage-exposition de Day [25] s'écrit :

$$\xi_i = 0,4 \cdot \sqrt{\frac{D_a}{D_i}} + 0,6$$

Avec  $D_a$ , le diamètre de grain défini comme :

$$D_a = 1,6 \cdot D_{50} \cdot \left( \frac{D_{16}}{D_{84}} \right)^{0,28}$$

## 3 Résultats

### 3.1 Observations

Pour chaque type d'échantillon, le premier test a consisté à augmenter progressivement le débit dans le canal jusqu'à l'obtention d'un mouvement perceptible des particules. Régulièrement, quelques grains en situation de déséquilibre à la surface de l'échantillon se mettent en mouvement à des débits faibles, puis se retrouvent en position stable et immobile. Cette première phase de remaniement a lieu à des valeurs de contrainte de frottement bien en dessous des valeurs critiques théoriques. Elle agit en faveur de la stabilisation du lit sédimentaire. Ce phénomène n'est sans doute pas qu'un artefact expérimental : dans une mer à marée, lors de l'accélération du courant suite aux périodes de renverse, cette réorganisation peut affecter les particules déposées peu avant ou pendant la renverse et qui sont en situation de déséquilibre sur le fond.

Le critère de début d'entraînement retenu est un mouvement continu d'un ensemble de grains. Lorsque la mise en mouvement a lieu pour une des classes, le débit correspondant est noté pour déterminer la contrainte de frottement critique. Il est ensuite progressivement augmenté jusqu'à la mise en mouvement de la seconde classe.

Afin de mieux appréhender la variation de la contrainte critique suivant les caractéristiques granulométriques de l'échantillon, la figure 2 et la figure 3 ci-dessous illustrent le seuil de mise en mouvement des trois classes de grains en fonction de la composition du mélange. Les droites vertes, légendées « échantillon monoclasse », indiquent la contrainte de frottement critique de la classe considérée dans un échantillon de granulométrie homogène.

La mise en mouvement de la classe grossière (SG) est généralement facilitée lorsqu'elle est mélangée à du sable de granulométrie plus fine (SM et SF). Le début d'entraînement est d'autant plus facile que la proportion de particules fines est importante. Cependant, pour les mélanges contenant 80% de SG, le frottement critique de cette classe est supérieur à celui nécessaire pour faire bouger un échantillon unimodal. Dans un tel mélange, la matrice de grains grossiers n'est pas saturée (il y a pavage, tous les interstices ne sont pas occupés par des particules plus fines), ces grains ne sont donc pas plus exposés au fluide que lorsque les petites particules sont absentes (figure 4C et 4D).

Par contre, la porosité du mélange est inférieure à celle d'un échantillon unimodal (figure 5), il y a alors d'avantage de contacts entre les grains ce qui augmente la force de friction et retarde le début de mouvement. De la même manière, le fait que la mise en mouvement soit favorisée en présence de SM plutôt que de SF peut s'expliquer par le fait que les contacts entre grains sont plus nombreux lorsque la granulométrie est plus fine (SF) : la force de friction augmente et l'érosion d'un grain SM aura un effet déstabilisateur plus important que le départ d'un grain SF (figure 4A et 4B). Ce résultat est à relier à la porosité qui est plus importante pour un mélange SG/SM que pour un mélange SG/SF. Ce dernier arrangement est donc plus compact.

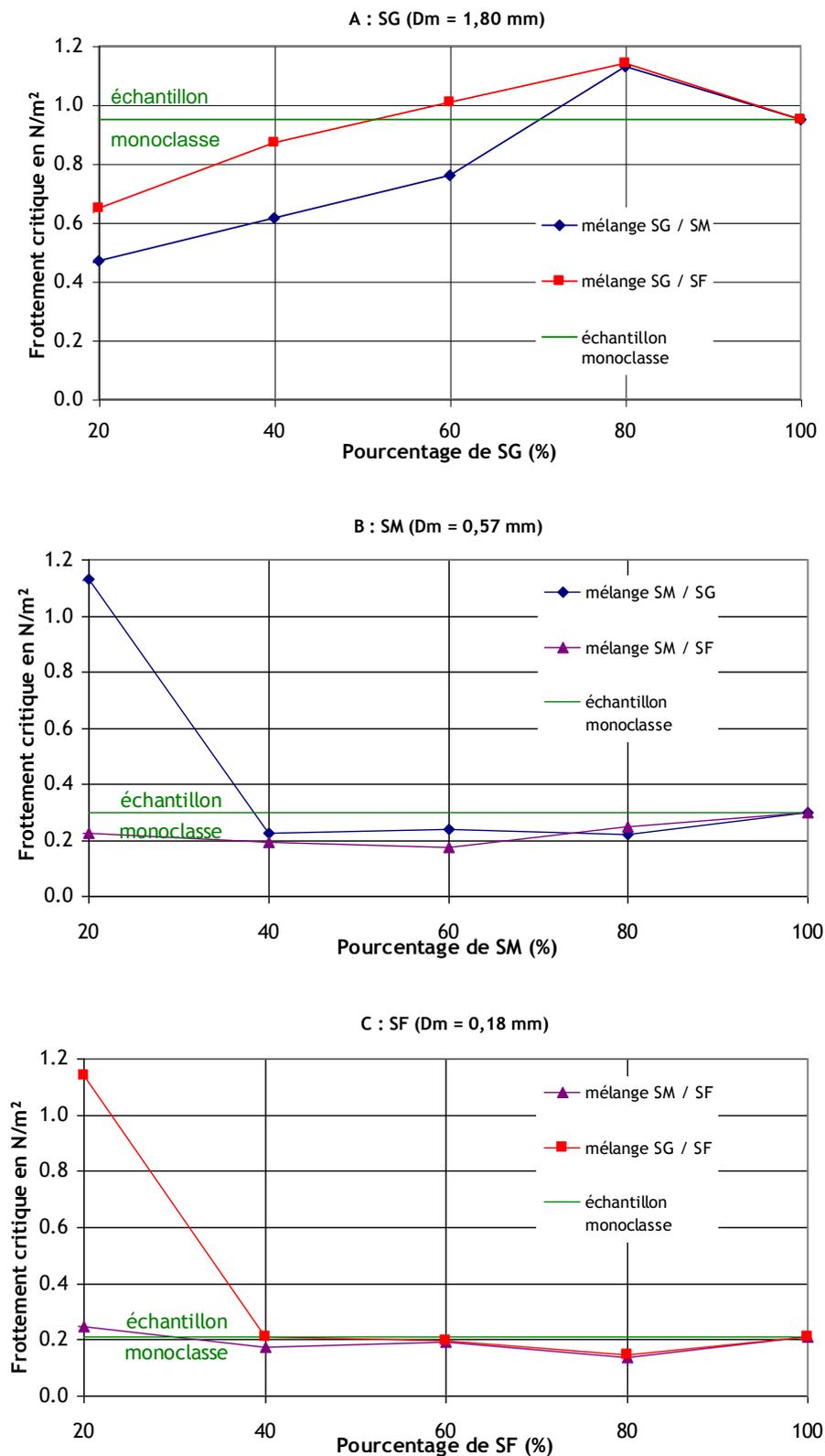


Figure 2. Contrainte de frottement critique d'une classe en fonction de la composition du mélange bimodal. A : Pour la classe SG ( $D_m = 1,80$  mm). B : Pour la classe SM ( $D_m = 0,57$  mm). C : Pour la classe SF ( $D_m = 0,18$  mm). Les droites vertes représentent la contrainte critique pour un échantillon monoclasse.

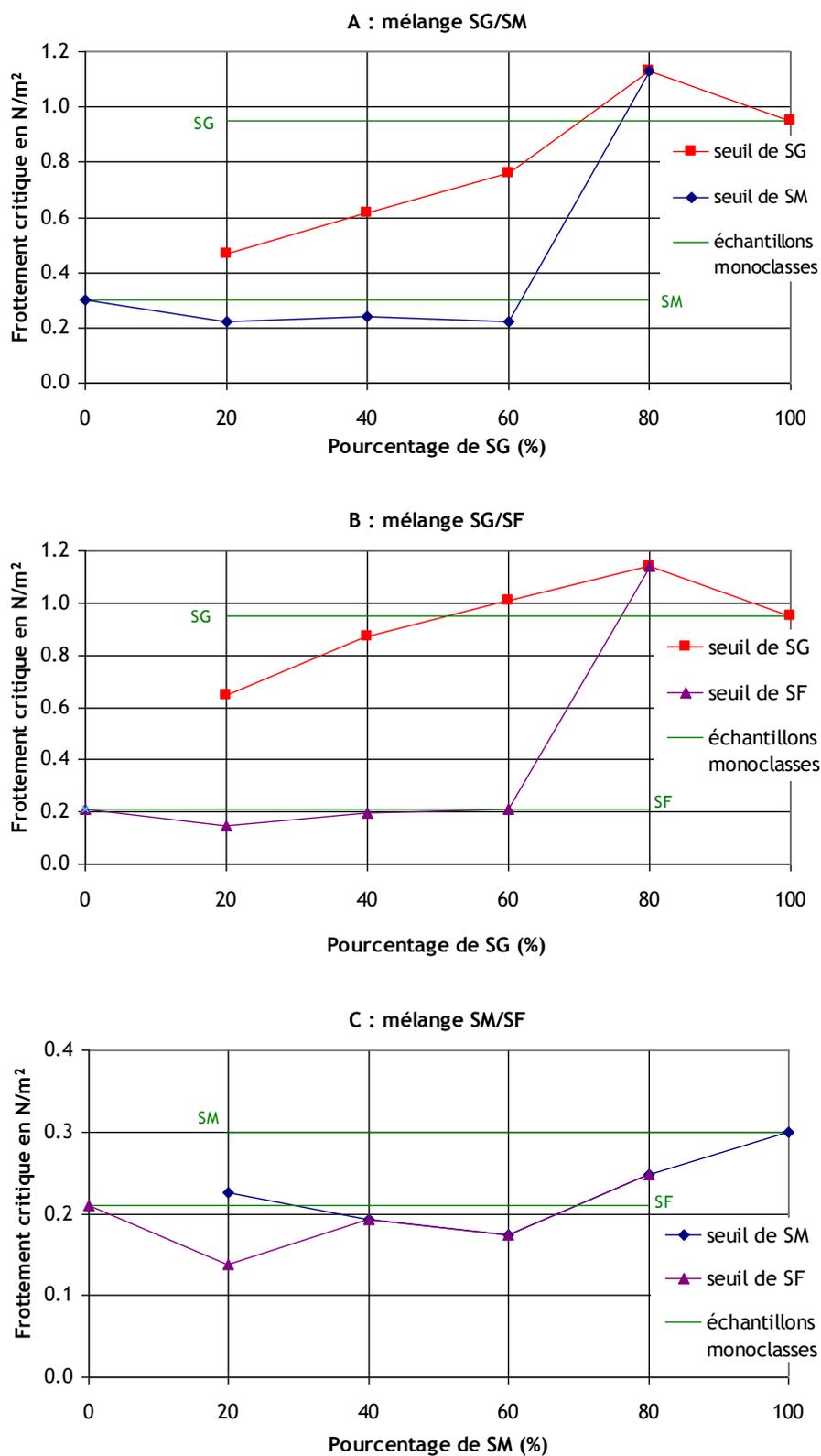


Figure 3. Contrainte de frottement critique des deux classes d'un même mélange en fonction de la composition du mélange. A : Pour le mélange SG/SM. B : Pour le mélange SG/SF. C : Pour le mélange SM/SF. Les droites vertes représentent la contrainte critique pour un échantillon monoclasse.

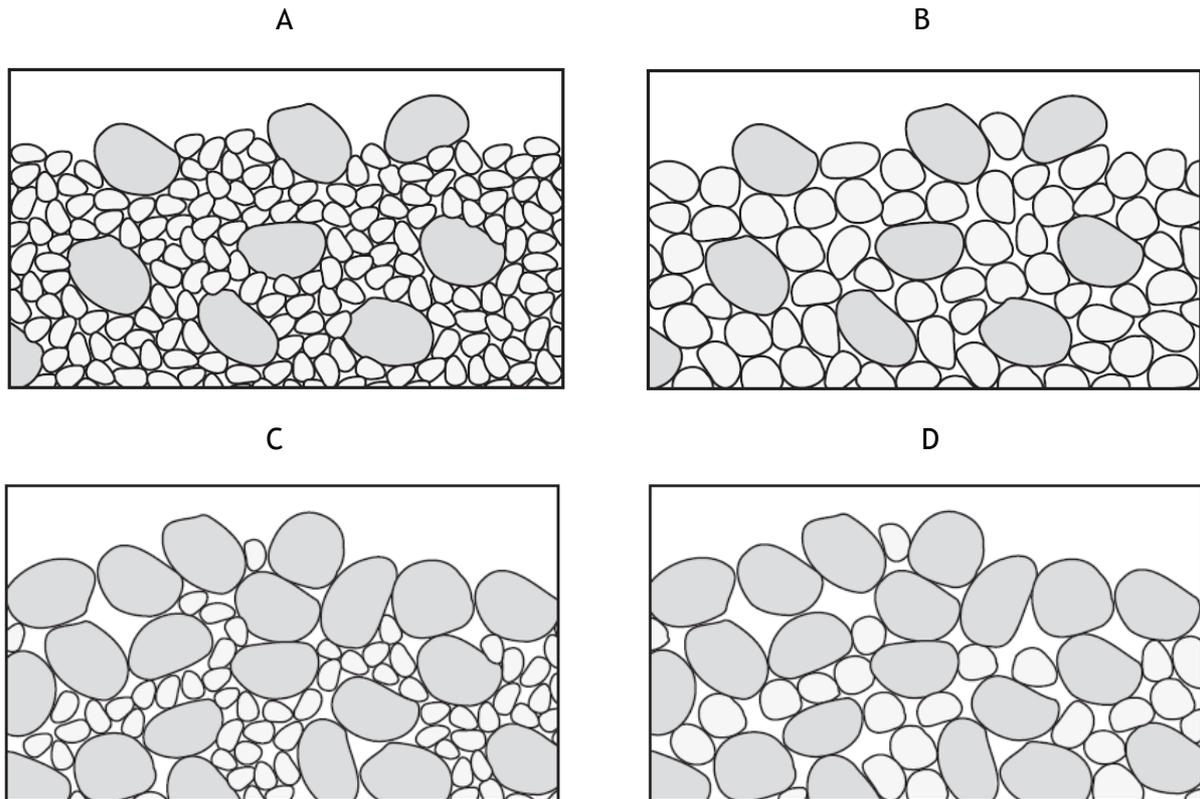


Figure 4. Schémas d'arrangements de mélanges bimodaux A : Mélange saturé de sables fins et grossiers (mélange SG/SF). B : Mélange saturé de sables moyens et grossiers (mélange SG/SM). C : Mélange non saturé (et pavé) de sables fins et grossiers (mélange SG/SF). D : Mélange non saturé (et pavé) de sables moyens et grossiers (mélange SG/SM).

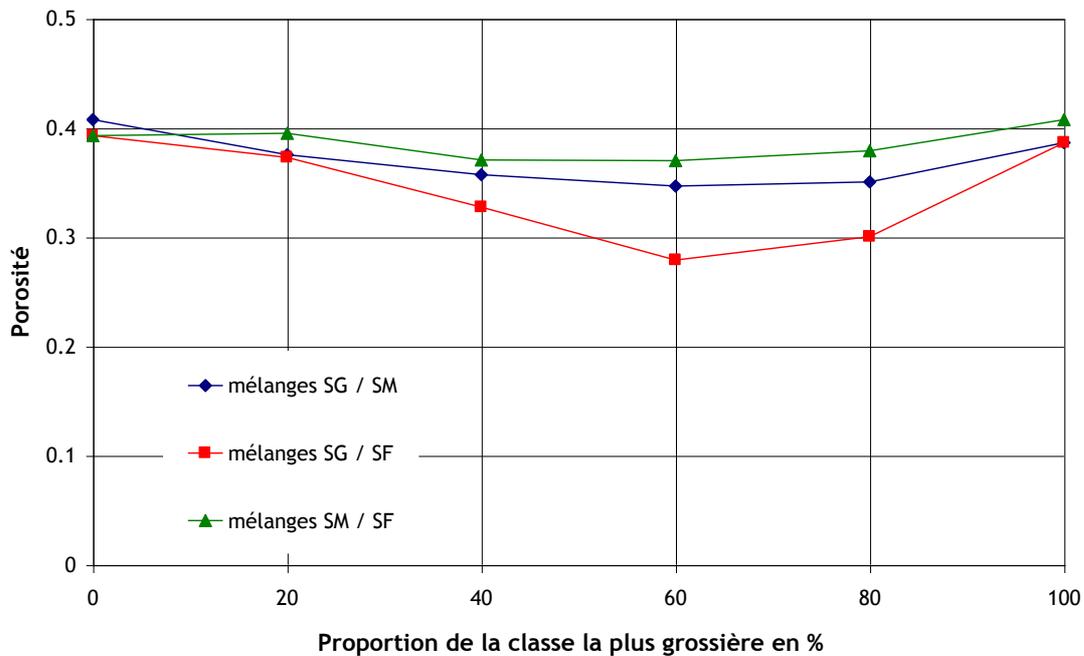


Figure 5. Évolution de la porosité en fonction de la composition du mélange.

La mise en mouvement de la classe SM en présence d'une classe plus fine (SF) se fait elle aussi à une contrainte critique moins élevée que lorsque la classe SM est seule. Cependant l'écart est moins marqué que celui décrit précédemment pour la classe SG. Cette observation est sans doute à relier à la diminution de porosité qui est moins conséquente dans le cas d'un mélange SM/SF.

En présence d'une classe plus grossière, la contrainte critique des classes SM et SF est quasi équivalente au seuil de mise en mouvement d'un lit homogène pour une proportion de 40%, 60% ou 80% de la classe la plus fine (figure 4A et 4B, figures 2 et 3). L'écart observé en faveur d'une mise en mouvement facilitée peut être dû à la présence de grains plus grossiers qui ont pour effet d'augmenter la rugosité de l'échantillon et donc l'intensité de la turbulence. Lorsque la fraction de la classe SM ou SF n'est que de 20% (figure 4C et 4D), le seuil est alors le même que pour les particules plus grossières. A une telle proportion, le mélange est dominé par les grains dont la taille est plus importante. Les grains SM ou SF font partie de la matrice de particules plus grossières sans pour autant la saturer, leur mise en mouvement est alors conditionnée par la mise en mouvement des grains grossiers (phénomène de pavage). Il y a alors mise en mouvement simultanée des deux populations de particules.

### 3.2 Modélisation

L'analyse des mesures ayant fait ressortir un comportement similaire des classes SF et SM mélangées, les comparaisons présentées sont basées sur les mélanges SG/SF et SG/SM.

Les formulations ont été appliquées à tous les mélanges bimodaux. Pour chacune des classes, la tension de cisaillement critique est calculée puis comparée aux mesures. La figure 6, représente les seuils de mise en mouvement obtenus pour les mélanges SG/SF et SG/SM. La formulation de Shields ne considère pas la présence d'autres classes de grain dans le mélange ; le frottement critique d'une classe particulière est donc constant quelque soit la composition du lit. Lorsque le lit n'est composé que d'une seule classe (proportion de SG = 0 ou proportion de SG = 1), la figure 6 fait ressortir la différence de tension critique entre les formulations pour un mélange mono dispersé.

Les expressions de Wu et al. [14], de Wilcock et Crowe et de Shields reproduisent mieux la contrainte critique des classes fines (figures 6A et 6C) que celle de Ackers et White [19] avec le coefficient de masquage-exposition de Day [25] pour laquelle la mise en mouvement est trop retardée. Pour les mélanges comportant 80% de particules SG, le seuil est toujours largement sous-estimé. Ces mélanges présentent une couche de pavage, les particules fines sont donc quasiment absentes de la surface de l'échantillon qui va subir le forçage. Ainsi, il est abusif d'appliquer les formulations à la proportion de grains fins compris dans l'ensemble de l'échantillon. Ce cas met en évidence l'intérêt de discrétiser la couverture sédimentaire et d'appliquer les formulations à la seule couche de surface dans les modèles de transport multiclasse.

Les valeurs de frottement critique de la classe la plus grossière du mélange (SG) sont moins bien représentées par le calcul lorsque la taille de la classe fine diminue (figures 6B et 6D). Le fait que la mise en mouvement soit facilitée à mesure que la proportion de particules fines augmente est correctement reproduit par les formules lorsque l'échantillon n'est pas pavé. Par contre, leur comportement en fonction de la taille des classes fines est opposé à ce qui a été observé en canal, à savoir : pour les rapports de taille expérimentés, le seuil diminue lorsque le rapport  $D_{\text{grossier}}/D_{\text{fin}}$  augmente. La formulation de Wilcock et Crowe [18] fournit des valeurs de frottement critique de SG similaires quelque soit la taille du grain fin mélangé.

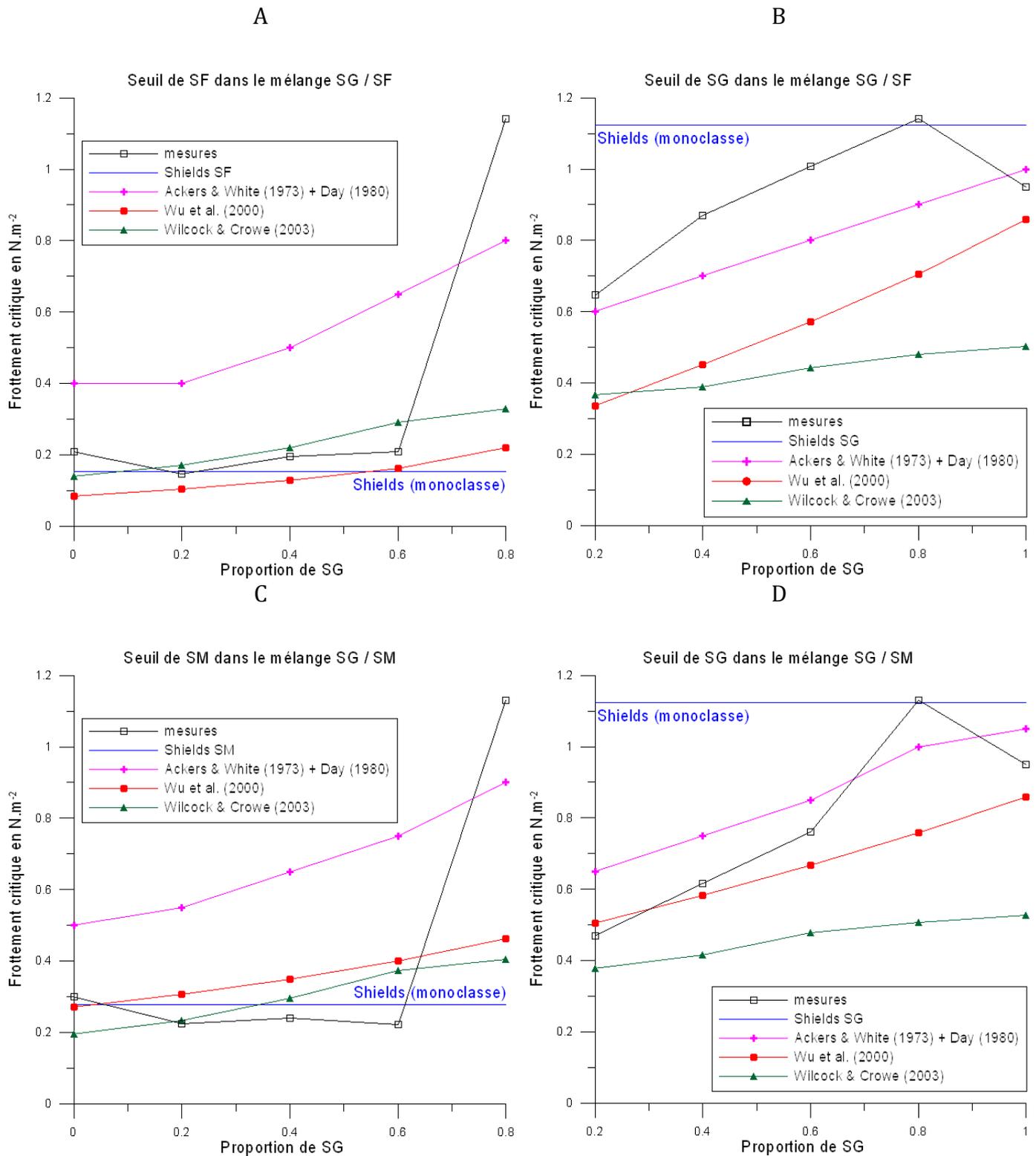


Figure 6. Frottement critique des deux classes d'un mélange SG/SF (A et B) et d'un mélange SG/SM (C et D) : comparaison des mesures et des résultats de plusieurs formulations.

## 4 Discussion

Dans un mélange bimodal, le seuil de mise en mouvement d'une classe de grain est généralement affecté par la présence de l'autre. Deux cas de figure sont à distinguer en fonction de la présence ou non d'une couche de pavage (ou de la saturation en fines de l'échantillon) (figure 7).

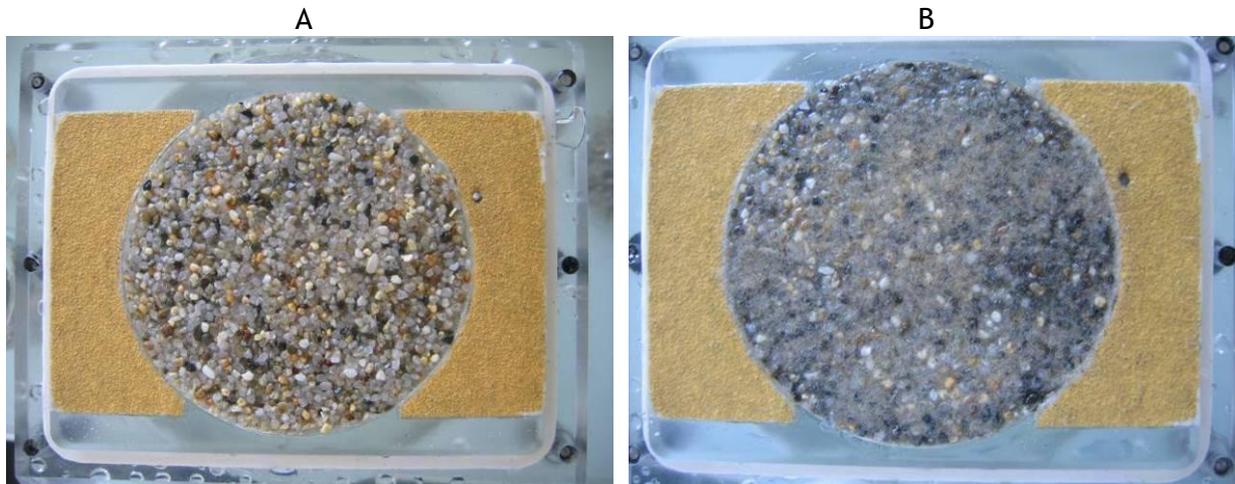


Figure 7. Echantillons présentant des taux de saturation différents. A : Echantillon non saturé en fines ne présentant pas de grain fin en surface (pavage) (SG80SF20). B : Echantillon saturé en grains fins (SG60SF40).

### 4.1 Echantillon saturé en fines

Dans le cas d'un échantillon saturé en fines (non pavé) (figure 7B) : tous les pores de la matrice formée par les grains les plus grossiers sont occupés par les grains de granulométrie plus fine, les plus gros grains de l'échantillon voient leur début d'entraînement facilité car ils présentent une surface plus importante au fluide que dans un arrangement unimodal (phénomène d'exposition). Comme l'a indiqué Houssais et al. [26] lors d'une expérimentation similaire, la mise en mouvement est d'autant plus facile que la proportion de particules fines est importante. La facilité de mise en mouvement semble aussi reliée au rapport de taille entre les deux populations de particules : le seuil diminue lorsque le rapport  $D_{\text{grossier}}/D_{\text{fin}}$  augmente jusqu'à un  $D_{\text{fin}}$  optimal à partir duquel le seuil augmente. Ce comportement est schématisé sur la figure 8. Le peu de mesures réalisées ne nous permet pas d'estimer une gamme de validité.

Ces deux derniers paramètres sont directement liés à la porosité du mélange. Dans le cas d'un mélange saturé en fine l'évolution de la mise en mouvement des grains les plus grossiers pourrait donc être expliquée par la seule variable porosité (figure 9). La dépendance de la faculté au mouvement d'un grain par rapport à la porosité a déjà été relevée par Jacobs et al. [27] pour des mélanges sable – silt ou par Roberts et al. [28] pour des particules non cohésives de tailles inférieures à 400  $\mu\text{m}$ : la mise en mouvement d'un mélange donné, est une fonction décroissante de la porosité de surface de l'échantillon.

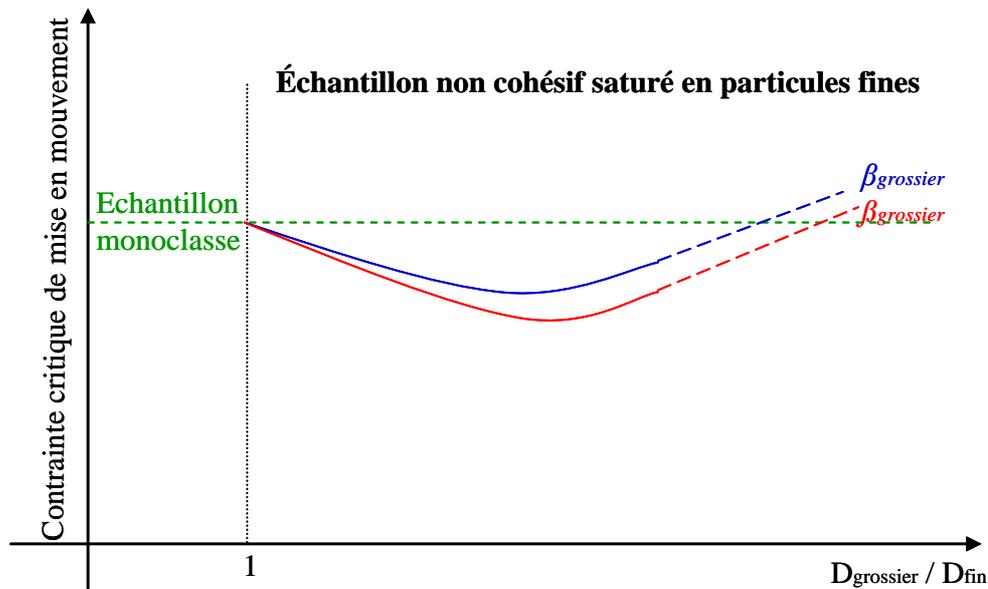


Figure 8. Schématisation conceptuelle issue de l'observation de l'évolution du seuil de mise en mouvement de la classe grossière d'un mélange dans le cas d'un échantillon non pavé en fonction du rapport des tailles pour deux proportions de particules grossières ( $\beta_{grossier} > \beta'_{grossier}$ ).

Dans un mélange saturé en fines, les grains les plus fins semblent peu affectés par la présence de grains de taille plus importante et ceci indépendamment du rapport  $D_{grossier}/D_{fin}$  ou de la proportion d'une classe par rapport à l'autre. L'absence d'observation d'un phénomène de masquage est peut être dû à la méthode de détermination du seuil : la contrainte critique est relevée lorsque l'on observe les premiers grains bouger de manière continue. Or, ces premiers grains sont sans doute ceux qui ne subissent pas de masquage. Une fois ceux-ci évacués, les autres particules de la même classe nécessiteront sans doute une contrainte plus importante pour être mises en mouvement. Cette hypothèse peut être vérifiée simplement en effectuant un test de durée plus longue à cette même tension de cisaillement.

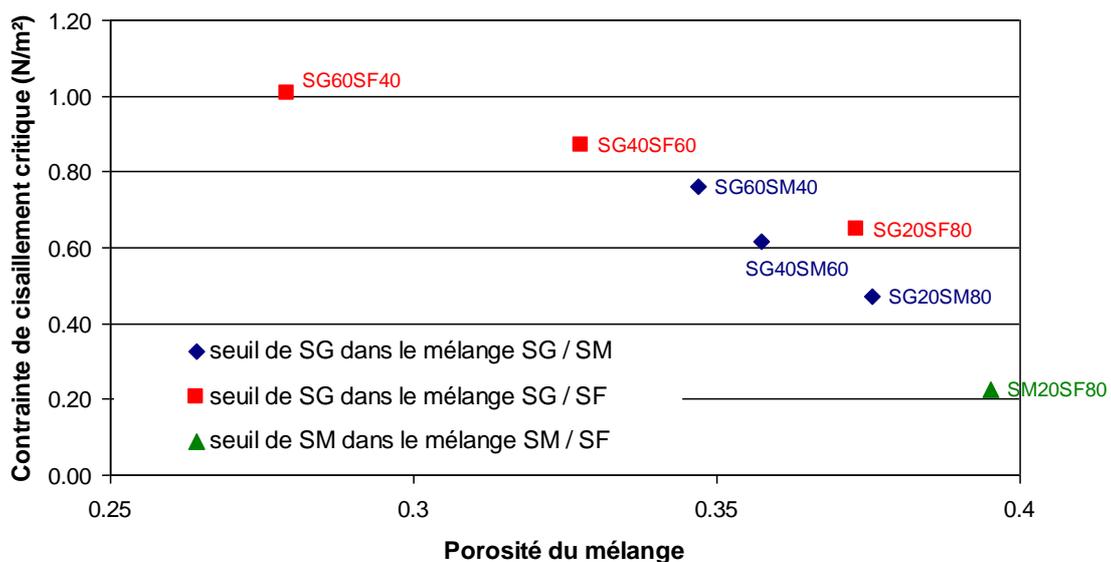


Figure 9. Évolution de la contrainte critique de la classe la plus grossière d'un mélange saturé en fines en fonction de la porosité.

## 4.2 Echantillon non saturé en fines

Dans le cas d'un échantillon non saturé en fines (pavé) (figure 4C et 4D), les particules les plus grossières forment une matrice dont les interstices sont partiellement remplis de grains de taille plus petite. Ces grains fins ne sont pas présents en surface, ils se sont infiltrés en profondeur (phénomène de pavage). Leur seuil de mise en mouvement dépend alors de la mobilité des grains grossiers qui les surplombent : quand la contrainte est suffisante pour mettre ceux-ci en mouvement, les grains fins qui se retrouvent en surface sont entraînés. Parker et Toro-Escobar [29] ont qualifié ce phénomène d'équimobilité.

Les grains de taille plus importante d'un mélange pavé présentent un frottement critique supérieur à celui nécessaire pour faire bouger un échantillon unimodal. Ces grains ne sont pas plus exposés au fluide que quand les petites particules sont absentes. Au contraire, les contacts entre les grains sont plus nombreux ce qui augmente la force de friction et retarde le début du mouvement. Ce phénomène semble indépendant du rapport de taille entre les populations de grains. Le paramètre sensible est l'épaisseur de la couche de pavage (ou la capacité d'infiltration des particules les plus fines) qui est liée à la porosité et à la proportion relative de chaque classe.

## 5 Conclusion

La série de tests d'érodabilité a permis de mettre en évidence quelques processus particuliers du transport sédimentaire multiclasse dans un courant continu.

La contrainte critique de mise en mouvement a été mesurée pour les différentes populations de particules composant les mélanges. Une forte dépendance de cette contrainte à la proportion relative des différentes populations et au rapport de tailles des grains a été mise en évidence. Des comportements spécifiques à l'érosion ont été distingués en fonction de la porosité et du taux de saturation du substrat. Des essais complémentaires sont nécessaires pour déterminer précisément le rôle de ces paramètres dans la modulation de la contrainte de frottement critique.

Les comparaisons mesures/formules ont mis en évidence la difficulté de prédire le seuil de mise en mouvement des particules d'un mélange hétérométrique. Par conséquent, l'incertitude sur la granulométrie transportée s'accroît lorsque le frottement est proche du frottement critique d'une certaine classe de taille. Dans ce cas, plusieurs auteurs ont vu l'intérêt d'introduire une approche stochastique pour définir l'initiation du mouvement, le transport prédit est alors plus réaliste en terme de granulométrie.

Ces essais ont aussi été l'occasion d'approcher des phénomènes difficilement observables en nature. La figure 10 présente par exemple le scénario de la formation d'une couche de pavage par lessivage des particules les plus fines en surface.

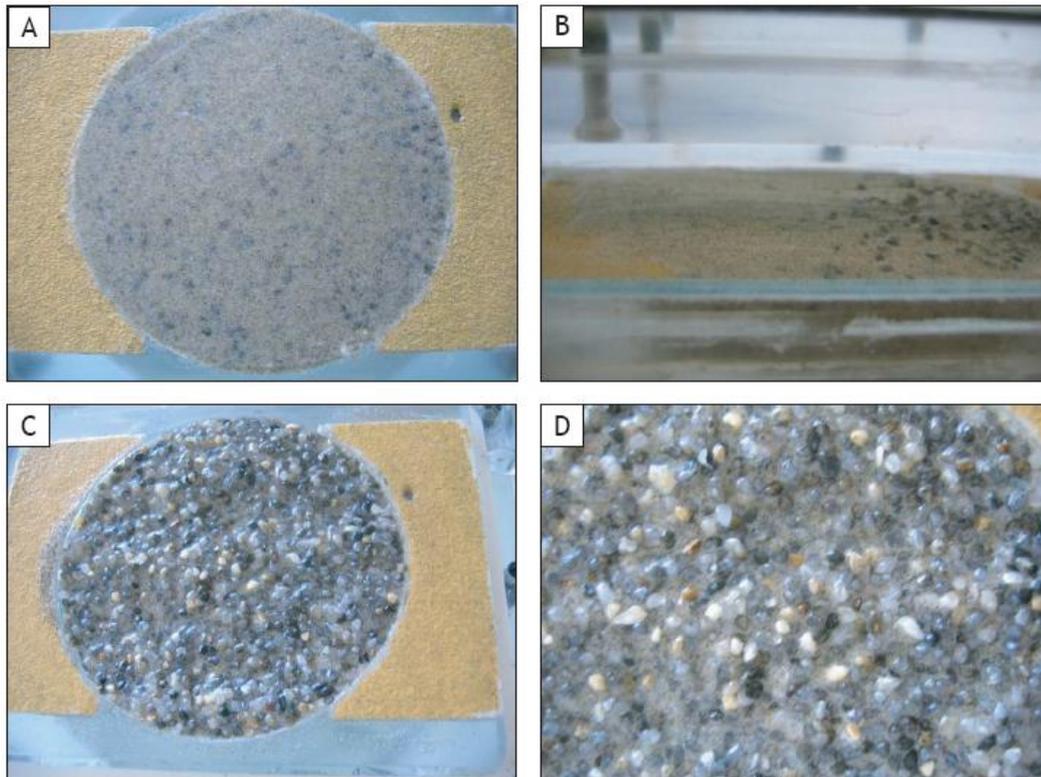


Figure 10. Formation d'une couche de pavage suite au lessivage des particules fines de surface. A : Echantillon avant le test. B : Echantillon pendant le test. C et D : Echantillon en fin de test.

## Références

- [1] L.C. Van Rijn, Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Amsterdam: Aqua publications, 1993.
- [2] L.G. Straub, Some observations of sorting of river sediments. Transactions: American Geophysical Union Annual Meeting, 16 (1935).
- [3] A. Shields, Application of similarity principles and turbulence research to bedload movement. (Traduction anglaise du manuscrit d'origine en Allemand). Hydrodynamics Laboratory, California Institute of Technology, 1936.
- [4] K. Black, D. M. Paterson, Measurement of the erosion potential of cohesive marine sediment: a review of current in situ technology. Journal of Marine Environmental Engineering 4 (1997) 43-83.
- [5] T.J. Tolhurst, K.S. Black, D.M. Paterson, H.J. Mitchener, G.R. Termaat, S.A. Shayler, A comparison and measurement standardisation of four in situ devices for determining the erosion shear stress of intertidal sediments. Continental Shelf Research 20 (2000) 1937-1418
- [6] C.L. Amos, A. Bergamasco, G. Umgiesser, S. Cappucci, D. Cloutier, L. DeNat, M. Flindt, M. Bonardi, S. Cristante, The stability of tidal flats in Venice lagoon - The results of in-situ measurements using two benthic, annular flumes. Journal of Marine Systems 51 (2004) 211-241.
- [7] C.L. Amos, J. Grant, G.R. Daborn, K. Black, Sea Carousel - a benthic, annular flume. Estuarine, Coastal and Shelf Science 34 (1992)
- [8] J. Aberle, V. Nikora, R. Walters, Effects of bed material properties on cohesive sediment erosion. Marine Geology, 207 (2004)
- [9] C.H. Tsai, W. Lick, A portable device for measuring sediment resuspension. Journal of Great Lakes Research 12 (1986) 314 - 321.

- [10] E. Schaaff, C. Grenz, C. Pinazo, Erosion of particulate inorganic and organic matter in the Gulf of Lion. *Compte Rendu Geosciences* 334 (2002) 1071-1077.
- [11] P. Le Hir, P. Cann, H. Jestin, P. Bassoullet, "Instrumentation légère pour la mesure de l'érodabilité des sédiments vaseux ou sablo-vaseux." IX<sup>ème</sup> Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, Brest, 2006, 539 - 546.
- [12] P. Le Hir, P. Cann, B. Waeles, H. Jestin, P. Bassoullet, Erodibility of natural sediments: experiments on sand/mud mixtures from laboratory and field erosion tests. In: *Sediment and Ecohydraulics: INTERCOH 2005* (Ed. by T. Kusuda, H. Y., J. Spearman and J.Z. Gailani (Eds)), 2008, pp. 137 - 153.
- [13] I.V. Egiazaroff, Calculation of nonuniform sediment concentrations. *Journal of Hydraulic Division, ASCE* 91 (1965) 225 - 247.
- [14] W. Wu, S. S. Y. Wang, Y. Jia, Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Research* 38 (2000) 427 - 434.
- [15] J.M. Buffington, D.R. Montgomery, A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. *Water Resources Research* (1997) 33.
- [16] O. Blanpain, Dynamique sédimentaire multiclasse : de l'étude des processus à la modélisation en Manche. Thèse de doctorat de l'Université de Rouen, 2009
- [17] P. Van der Scheer, J.S. Ribberink, A. Blom, Transport formulas for graded sediment - Behaviour of transport formulas and verification with data. Enschede: Civil Engineering University of Twente, The Netherlands, 2002
- [18] P.R. Wilcock, J.C. Crowe, Surface-based transport model for mixed-size sediment. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE* 129 (2003) 120-128.
- [19] P. Ackers, W.R. White, Sediment transport: new approach and analysis. *Journal of the Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineering* 99 (1973) 2041 - 2060.
- [20] L.C. Van Rijn, Sediment transport, part 1: bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering* 110 (1984) 1431 - 1456.
- [21] E. Meyer-Peter, R. Müller, Formulas for bed load transport. In: *Second International IAHR Congress*. Stockholm, Sweden, 1948.
- [22] P.R. Wilcock, B.W. Mc Ardell, Surface-based fractional transport rates : Mobilization thresholds and partial transport of a sand-gravel sediment *Water Resources Research* 29 (1993) 1297-1312.
- [23] P.R. Wilcock, S.T. Kenworthy, J.C. Crowe, Experimental study of the transport of mixed sand and gravel. *Water Resources Research* 37 (2001) 3349-3358.
- [24] P.R. Wilcock, S.T. Kenworthy, A two-fraction model for the transport of sand/gravel mixtures. *Water Resources Research* 38 12 (2002).
- [25] T.J. Day, A study of the transport of graded sediments. HRS Wallingford, 1980.
- [26] M. Houssais, E. Lajeunesse, Bedload transport of a bimodal sediment bed. *Journal of Geophysical Research* 117 (2012)
- [27] W. Jacobs, P. Le Hir, W. Van Kesteren, P. Cann, Erosion threshold of sand-mud mixtures. *Continental Shelf Research*, 31, (2011), S14-S25.
- [28] J. Roberts, R. Jepsen, D. Gotthard, W. Lick, Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles. *Journal of Hydraulic Engineering* 124 (1998) 1261-1267.
- [29] G. Parker, C.M. Toro-Escobar, Equal mobility of gravel in streams: the remains of the day. *Water Resources Research* 38 (2002).