



République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ammar Thelidji - Laghouat

Faculté de génie Civil et d'Architecture
Département Génie Civil

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Mizat Tourkia, Nadjemi Med Abd elbasset

Domaine : Science et technologie

Filière : Hydraulique

Option : Ressources Hydrauliques

Thème

ETUDE EXPERIMENTALE DU TRANSPORT DES PARTICULES
PAR CHARRIAGE DANS UN CANAL EN REGIME PERMANENT

Jury de soutenance :

Mr :BOUACHE Mohamed

Président

Mr :CHETTIH Mohamed

Examineur

Mr :GUIDOUM Azeddine

Rapporteur

Promotion : septembre – 2018

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail ;

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur,
ma vie et mon bonheur ; **maman** que j'adore.*

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de
joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi
mon père **Ali***

*A mes frères : **Boumedién, Toumi, Nouredine, Madani, Ahmed***

*et ma sœur : **Khadidja***

Aux fils de mes frères :

Mohammed, Hicham, Amira, Lina, Fatima et Tamim

Aux filles des frères :

Khadra, Om Hani, Lamia

*A les familles : **MIZAT et AMAMRA***

Je voudrais également remercier mon collègue dans ce travail :

Mohammed Abd Elbasset

Et mes amis :

Khadidja, Nadja, Safia, Hanan, Halima, Ahlam, Hadda,

Yousra, Massouda, Lila, Om Elakhir,

Mounira, Basma, Roukaia, Souaad, Souhila, Meriam,

Fatoum, Zineb

Et tous mes amis et mes collègues :

Abdelghani, Braihoum, Mouhammed

Tourkia

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail en s'en de reconnaissance et de respect

*- A **ma mère** et **mon père** pour tous les sacrifices qu'ils ont Fait pour moi ;*

*- A mon frère : **Med Abdelmomen, Anes abdelhak***

*- A ma sœurs : **Maria, Yassira et Oum habiba***

*- A toute la famille ; **Nadjemi, Diregh***

*- A mon binôme **TOURKIA** et toute la famille **MIZAT***

- A mes amis et mes collègues :

***Abdelbari, Elhachemi, Hamada, Laid, Khadidja, Sallama, Hadjer, Yacin,
Bouamama, saida, Abdelghani, Med Braihoum, Massouda, Lila, Ahlam, Hadda,***

Yousra

*- Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit
possible, je vous dis merci.*

Mohammed Abdelbasset

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, Nous tenons à remercier le bon Dieu (Allah) le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience de mener à bien ce modeste travail,

*Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Professeur **GUIDOUM Azeddine**, nous le remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Tout d'abord, nous aimerions remercier les membres du jury, Professeur **BOUACHE Mohamed**, en tant que président et professeur **CHETTIH Mohamed** en tant que examinateur, qui ont examiné notre travail et ont accepté de le juger.*

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

*Enfin, nous remercions également toutes les personnes qui nous ont aidé et nous ont soutenus de près ou de loin, principalement à **M Bachir, M Said, M Yacin** et **Ms MBarka** qui travaillent en laboratoire de Génie Civil à l'Université Ammar Thelidji de Laghouat.*

TABLES DES MATIERES

Tables des matières	IV
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VII
Liste des abréviations	VIII
Résumé	IX
Introduction	1
Chapitre I : Transport des sédiments : processus physiques et mise en équation	
I-1 Régime de transport	3
I-1-1 Suspension	3
I-1-2 Saltation	3
I-1-3 Charriage	3
I-2 Mesure du transport au fond	3
I-3 Mise en équation	4
I-3 -1 Formulation de base et valeurs communes	5
I-3 -1-1 Paramètres adimensionnels	5
I-3 -1-2 Contrainte tangentielle sur le fond	6
I-3 -1-3 Force tractrice critique	8
I-3 -1-4 Rugosité du fond	9
I-3-2 Formulations de capacité de transport	10
Chapitre II : Protocole expérimental et les caractéristiques des sédiments	
II-1 Caractéristiques des sédiments utilisés	17
II-2 Représentation du fond	20
II-3 Formes de rugosité	20
II-4 Canal d'essais	21
II-5 Méthodologie	23
Chapitre III : Ajustement et le choix des équations de transport solide	
III-1 Expérimentations	25
III-1-1 Mesure des vitesses	25
III-1-2 Mesure de la hauteur d'eau et pesée des sédiments	27
III-2 Bilan des expérimentations et comparaison des résultats	28

III-3 Mise en forme des équations	40
III-4 Ajustement des coefficients	43
Conclusion	45
Références bibliographiques	47

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : modes de transport sédimentaire (Pinto Martins, 2008)	3
Figure 2 : nasse type Helley-Smith (Camenen et al., 2012)	4
Figure 3 : abaque de Schields	6
Figure 4 : résistance de flux dans chenaux avec de dunes	7
Figure 5 : classification des sédiments par taille selon l'échelle de Wentworth	18
Figure 6 : différents types de particules utilisées	18
Figure 7 : courbes d'analyse granulométrique.....	19
Figure 8 : rugosité artificielle placé en amont, en avale et au-dessus du fond sédimentaire	21
Figure 9 : canal expérimental avant la mise en place du dispositif d'essai	22
Figure 10 : nasse de récupération des sédiments.....	22
Figure 11 : niveau à bulle servant à vérifier l'horizontalité de la couche sédimentaire.	23
Figure 11 : décroissance logarithmique de la vitesse d'écoulement à proximité de la paroi	25
Figure 12 : principe et image de tube Pitot	26
Figure 13 : détermination de la vitesse moyenne sur la verticale	27
Figure 14 : disposition des règles graduées pour la mesure de la hauteur d'eau dans le canal	27
Figure 15 : balance de précision 0,1g	28
Figure 16 : composition granulométrique hétérogène du fond sédimentaire, effet de masquage	35
Figure 17 : écart Q_s estimé – Q_s mesuré	38
Figure 18 : relation entre quantités du charriage estimées et mesurées	40

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : diamètre caractéristique des sédiments choisis pour l'expérimentation	20
Tableau 2 : vitesses d'écoulement mesurées dans le canal	27
Tableau 3 : calcul de la quantité des sédiments transportés par l'équation de Yalin et ajustement de coefficient A	30
Tableau 4 : calcul de la quantité des sédiments transportés par l'équation d'Engelund-Hansen et ajustement de coefficient A	31
Tableau 5 : calcul de la quantité des sédiments transportés par l'équation d'Inglis-Lacey et ajustement de coefficient A	32
Tableau 6 : calcul de la quantité des sédiments transportés par l'équation d'Ackers-White et ajustement de coefficient m	33
Tableau 7 : calcul de la quantité des sédiments transportés par l'équation de Van Rijn et ajustement de coefficient A	34
Tableau 8 : coefficients ajustables de chaque type de fond	43

LISTE DES ABREVIATIONS

Symbole	signification	dimension	Unité
A	Coefficient empirique	$[-]$	-
C_f	Coefficient de frottement	$[-]$	-
D	Diamètre caractéristique du mélange sédimentaire ou diamètre (moyen) des particules	$[L]$	(mm)
D_{50}	Diamètre médian	$[L]$	(mm)
D_{90}	Diamètre de grain à 90% (90 % des particules ont une taille inférieure au D_{90})	$[L]$	(mm)
D_*	Diamètre de sédimentation (de particule)	$[L]$	(mm)
H	Hauteur d'eau	$[L]$	(m)
P_m	Périmètre mouillé du canal	$[L]$	(m)
$Q_s :$	Débit solide à l'équilibre	$[M T^{-1}]$	(kg/s)
R	Rayon hydraulique	$[L]$	(m)
Re_*	Reynolds du grain	$[-]$	-
R_h	Rayon hydraulique	$[L]$	(m)
S_e	Pente de ligne d'énergie	$[L L^{-1}]$	(m/m)
S_m	Surface mouillée du canal	$[L^2]$	(m ²)
T	Paramètre de transport	$[-]$	-
a	Coefficient représentant les conditions expérimentales et le sédiment modélisé	$[-]$	-
g	Gravité (Accélération de la pesanteur)	$[L T^{-2}]$	(m/s ²)
k_s	Rugosité équivalente ou coefficient de Nikuradse	$[-]$	-
p	Coefficient de viscosité	$[-]$	-
q_b	Capacité de transport sédimentaire du fluide par charriage uniquement	$[L^2 T^{-1}]$	(m ² /s)
q_s	Débit solide unitaire	$[L^3 T^{-1}]$	(m ³ /s)
q_t	Transport total	$[L^4 T^{-1}]$	(m ³ ·s ⁻¹ ·m ¹)
s	Densité relative	$[-]$	-
\bar{u}	Vitesse moyenne de l'écoulement	$[L T^{-1}]$	(m·s ⁻¹)
u_*	Vitesse de frottement	$[L T^{-1}]$	(m·s ⁻¹)
w_s	Vitesse de chute	$[L T^{-1}]$	(m·s ⁻¹)
z_0	Rugosité du fond	$[-]$	-
α et β	Coefficient déduits de la courbe de Shields	$[-]$	-
τ	Force tractrice (tension de frottement ou contrainte tangentielle) sur le fond	$[M L^{-1} T^{-2}]$	(N/m ²)
τ_{cr}	Tension critique de mise en mouvement des sédiments	$[M L^{-1} T^{-2}]$	(N/m ²)
ρ	Masse volumique de l'eau	$[M L^{-3}]$	(kg/m ³)
ρ_s	Masse volumique des grains	$[M L^{-3}]$	(kg/m ³)
ν	Viscosité cinématique	$[L^2 T^{-1}]$	(m ² ·s ⁻¹)
γ_s	Poids volumique du sédiment	$[M L^{-1} T^{-3}]$	(N·m ⁻³)
κ	Constante de Von Karman	$[-]$	-
μ	Viscosité dynamique	$[L^2 T^{-1}]$	(m ² ·s ⁻¹)
θ	Paramètre de mobilité du grain	$[-]$	-
θ_c	Paramètre de mobilité critique du sédiment	$[-]$	-

Résumé

Le transport solide par charriage a été étudié d'un point de vue expérimental. Nous avons utilisé un canal à flux continu, les particules sont représentées par des sédiments naturels et des billes d'une gamme variée de diamètres. De nombreuses séries d'expériences ont été faites à différents débits liquides et diamètres des particules. L'objectif est de déterminer l'influence des variables d'écoulement sur le transport en charriage des particules sphériques à différents diamètres et dispositions. Des séquences de 15 secondes à plus de 23 minutes ont été filmées pour déterminer les caractéristiques de l'écoulement comme vitesses des particules, leur état de mouvement et la hauteur d'eau. La confrontation des résultats expérimentaux et ceux des formulations empiriques sélectionnées a souligné l'effet du type de fond, de la taille des particules et de leur arrangement sur la quantité des sédiments transportées. Cette modélisation a mis en évidence une évolution du transport de fond qui ne correspond plus aux équations de capacité de transport choisies dans cette étude. Les résultats de calcul par les équations choisies sont éloignés des mesures expérimentales, seule l'équation de Van Rijn peut-être plus au moins considérer comme représentative de ces mesures.

Mots clés : Canal, charriage, flux, sédiments, écoulement, frottement

ملخص

لقد تم دراسة الحمولة الصلبة المنقولة عن طريق المياه تجريبيا، وذلك باستعمال قناة ذات تدفق متواصل. الحبيبات الصلبة المستعملة عبارة عن رواسب طبيعية أو كويرات زجاجية ذات أقطار متنوعة. لهذا الغرض أجريت العديد من التجارب اعتمادا على تغير التدفق المائي و أقطار الحبيبات. الهدف من هذه التجارب هو معرفة و تحديد تأثير متغيرات التدفق المائي على تنقل الحبيبات حسب أقطارها، ترتيبها و تصميم الطبقات المكونة منها. كما تم تصوير مقاطع فيديو تتراوح مدتها بين 15 ثانية و 23 دقيقة لملاحظة و تحديد مختلف التدفقات المائية و الصلبة كسرعة الحبيبات، حركتها و ارتفاع الماء في القناة. لقد أوضحت المقارنة بين النتائج التجريبية و الصيغ أو المعادلات الحسابية التي تم اختيارها في هذه الدراسة مدى تأثير نوع القاعدة الحاملة للحبيبات، قياسات أقطارها و كذا تصميم الطبقات المكونة منه اعلى كمية المواد الصلبة المنقولة. من خلال هذه النمذجة أتضح لنا أن النتائج المتحصل عليها تجريبيا لا تتوافق مع تلك المحسوبة بواسطة الصيغ الحاسبة المختارة في هذه الدراسة. كما تبين ان جميع نتائج الحساب بالمعادلات المختارة بعيدة عن القياسات التجريبية ما عدا صيغة فان رايجين التي يمكن اعتبارها قريبة من هذه القياسات و ممثلة لها.

الكلمات المفتاحية: قناة، جبر، تدفق، رواسب، صبيب، احتكاك.

Abstract

The bed-load discharge has been studied from an experimental point of view. We used open-channel a continuous stream, the particles are represented by natural sediments and balls of a varied diameter range. Many series of experiments have been made at different liquid flow rates and particle diameters. The aim is to determine the influence of flow variables on the bed-load of spherical particles in different diameters and arrangements. Sequences from 15 seconds to 23 minutes were filmed to determine the flow characteristics such as particle speeds, their state of motion and the water depth. The comparison of experimental results and selected empirical formulations highlighted the effect of bottom type, particle size and their arrangement on the amount of sediment transported. This modeling revealed an evolution of bed-load transport that no longer corresponds to the transport capacity equations chosen in this study. The calculation results by the chosen equations are far from the experimental measurements, only the equation of Van Rijn perhaps more or less as representative of these measures.

Keywords: Channel, bed-load, flux, sediment, flow, friction

Introduction

Le transport solide par charriage qui contrôle la morphologie et la dynamique du lit (Morgane, 2013) a fait l'objet de nombreuses études, il en résulte un nombre important de modèles à base physique représentant ce transport. De ce fait, une façon de compléter et d'approfondir les connaissances dans le domaine du transport solide par charriage est de s'intéresser à un système modèle expérimental (Jodeau, 2004). Du fait que, la prédiction théorique du flux de matière en charge de fond reste difficile (Turowski et al., 2010 in : Morgane, 2013). Les différents modèles empiriques ont été élaborés en fonction des caractéristiques physiques du mouvement d'une particule solide dans un fluide. Ils ont été ajustés cas par cas en fonction des besoins des utilisateurs. Nous devons donc ajuster les coefficients de ces équations de transport en fonction des conditions d'écoulement et des sédiments que nous souhaitons représenter. L'ajustement peut se faire, soit en fonction de mesures in-situ, soit en fonction des mesures en laboratoire.

En raison de la difficulté d'obtention des mesures in-situ, notre approche vise à réaliser une série d'expérimentations en canal de laboratoire, afin d'ajuster les coefficients d'une collection d'équations de transport empiriques à quelques cas particuliers.

L'étude va donc se composer des deux phases. Premièrement, des mesures de transport dans un canal de laboratoire à flux continu seront effectuées (sédiments non cohésifs uniformes ou multi-classes, fond lisse ou rigoureux et fond à une seule couche ou à multicouches de sédiment). Deuxièmement, Les résultats obtenus par le modèle sont ensuite comparés avec les mesures et les résultats analytiques (calcul direct avec les équations de transport). L'équation de transport, qui représente le mieux le transport, en comparant avec la quantité de sédiments mesurée, sera sélectionnée.

Afin de répondre aux objectifs de ce mémoire, après l'introduction, le travail a été organisé à partir des processus physiques de transport des sédiments (Chapitre I), ainsi qu'une description du protocole expérimental et les caractéristiques des sédiments qui vont être utilisées (Chapitre II). Le Chapitre III présente les résultats expérimentaux et leur analyse, l'ajustement et le choix des équations de transport solide. Enfin, la conclusion présente les principales constatations de l'étude détaillée des données expérimentales acquises au cours de ce mémoire.

**Chapitre I Transport des sédiments : processus
physiques et mise en équation**

Le transport solide est le phénomène qui permet le déplacement d'une masse solide composée d'éléments granulaires (sédiments fins, sables, galets,.....) sous l'action de l'écoulement de l'eau (Oliveros, 1996).

I-1 Régime de transport

Le transport solide s'effectue selon trois modes (mécanismes) différents, fonction de la taille et de la densité des particules :

I-1-1 suspension : C'est la fraction de particules qui reste en permanence en suspension dans la masse d'écoulement, sur de longues distances.

I-1-2 saltation : cette phase est constituée des particules qui, au cours du transport, passent alternativement entre la suspension et le charriage. Leur déplacement se fait par des bonds successifs.

I-1-3 charriage : c'est le transport des particules grossières qui restent en permanence au contact du fond. Leur mouvement se fait par roulement

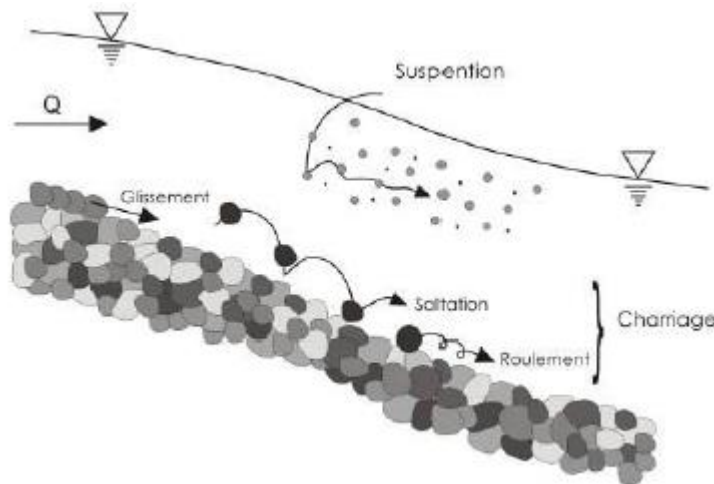


Figure 1 : modes de transport sédimentaire (Pinto Martins, 2008)

Notre contribution s'occupera particulièrement de ce dernier phénomène (le transport au fond ou charriage).

I-2 Mesure du transport au fond

La mesure de transport au fond (le charriage) qui s'opère depuis plus d'un siècle à la surface du globe a fait appel, à une panoplie de techniques dont les plus connues sont :

- Le piégeage des sédiments qui est la manière la plus simple. Elle consiste à mesurer les dépôts dans une fosse à sédiments avec un barrage filtrant en travers du lit

(Fao, 1993).

- L'évaluation du charriage au moyen de nasses qui est de loin l'idée la plus ancienne (Granier, 1983).



Figure 2 : nasse type Helley-Smith (Camenen et al., 2012)

Par ailleurs, compte tenu de la complexité de la physique mise en jeu, il est courant d'étudier expérimentalement le charriage en canal et transcrire les résultats obtenus en laboratoire vers le milieu naturel.

I-3 Mise en équation

Le transport des sédiments sur le fond est régi par des processus physiques dont la mise en équation est complexe.

Diverses approches sont possibles :

- la modélisation particulaire : Les éléments physiques (grains ou groupes de grains) sont modélisés individuellement et leurs déplacements sont calculés en fonction de l'écoulement environnant et de l'influence des autres particules.
- la modélisation diphasique : Les deux éléments, l'eau et le sédiment sont considérés comme les deux phases d'un fluide.
- la modélisation eulérienne. Elle fait appel à des équations représentant le transport moyen du sédiment par un fluide dans un volume donné.

Pour notre étude, nous avons choisi cette dernière solution pour sa simplicité et son efficacité. Toutefois, cette méthode présente certains inconvénients :

- une grande dispersion de leurs résultats selon le modèle physique utilisé.
- les équations sont empiriques, leur domaine d'utilisation est restreint et comportent des coefficients qui doivent être ajustés en fonction des conditions expérimentales spécifiques à chaque modèle.

Cinq équations de transport ont été choisies pour notre étude. Elles représentent différents types de formulation allant de la plus simple à la plus détaillée et ont été établies dans des conditions expérimentales proches de celles que nous avons adoptées.

I-3 -1 Formulation de base et valeurs communes

Comme nous l’avons déjà indiqué ci-dessus, le déplacement des grains dans un écoulement se fait de plusieurs façons (suspension, saltation et roulement) en fonction du diamètre apparent du grain et de la force du courant sur le fond. La saltation et le roulement du grain se situant près du fond, ils sont confondus en seul pour la modélisation (charriage). La distinction entre charriage et suspension ce fait en fonction de la vitesse de sédimentation ou de chute (w_s) et la vitesse de de frottement du courant (u_*) : si $u_* < w_s$, le transport prédominant se fait près du fond et le transport en suspension peut être négligé.

I-3 -1-1 Paramètres adimensionnels

Le transport et l’écoulement peuvent être définis à partir de 6 paramètres de bases :

$$f(\rho, \rho_s, \mu, D, H, g)=0$$

Ces six paramètres permettent de mettre en place d’autres paramètres adimensionnels :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Paramètre de mobilité du grain } \theta = \frac{u_*^2}{(s-1)gD} \\ \text{Nombre de Reynolds du grain } Re_* = \frac{u_* D}{\nu} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Densité } s = \frac{\rho_s}{\rho} \\ \text{Diamètre de sédimentation } D_* = D_{50} \left[\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3} \end{array} \right.$$

Seuil de transport $T = \frac{u_*^2 - u_{*cr}^2}{u_{*cr}^2}$ avec $u_* = \frac{\kappa \bar{u}}{\ln(h/z_0)}$ et $z_0 = 3D_{90}$

avec κ : la constante de Von Karman, ($\kappa = 0,41$)

La mise en mouvement d'un grain sur le fond dépend de plusieurs paramètres dont le diamètre adimensionnel (D_*) et la vitesse de frottement au fond (u_*). Selon Schields le paramètre de mobilité du grain (θ) permet de déterminer la vitesse limite de décollement du grain (Jodeau 2004). Plusieurs formulations du paramètre de mobilité (θ) en sont déduites en fonction du diamètre adimensionnel (figure 3) :

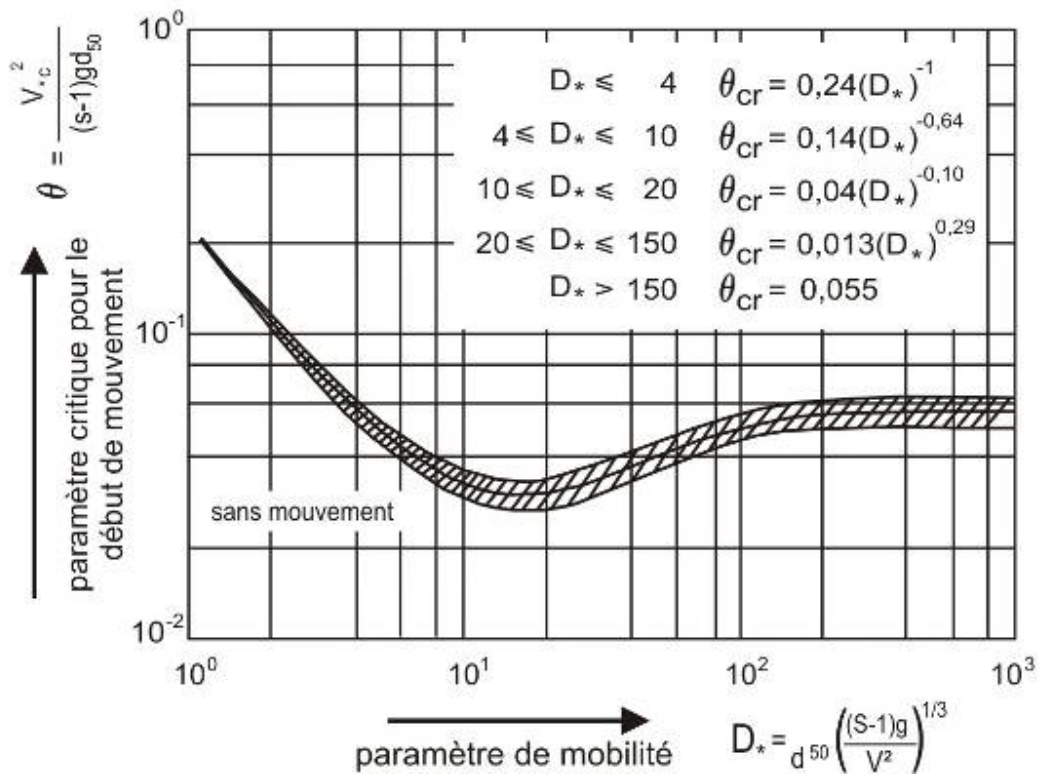


Figure 3 : abaque de Schields (Jodeau 2004)

I-3-1-2 Contrainte tangentielle sur le fond

La force tractrice ou contrainte tangentielle sur le fond peut être exprimée comme suit :

$$\tau = g \cdot \rho \cdot R_h \cdot S_e$$

-selon chézy $\tau = \rho \frac{g \bar{u}^2}{c^2}$ avec c (coefficient de chézy) $= \frac{\sqrt{g}}{k} \log(h/ez_0)$

-Selon Strickler $\tau = \rho \frac{g\bar{u}^2}{k^2 h^{1/3}}$ avec k (coefficient de Strickler) $= \frac{\sqrt{g}}{k h^{1/3}} \log(h/ez_0)$

Par ailleurs, la contrainte de frottement (τ) dans un chenal possédant des formes de lit et des sédiments en suspension est déterminée par la somme de trois composantes $\tau = \tau' + \tau'' + \tau'''$:

- (τ') force tractrice due à la résistance des particules (grain shear stress). Elle est responsable du transport (figure 4a).

- (τ'') force tractrice supplémentaire (bed form shear stress). Due à la résistance provoquée par les formes du lit (figure 4b).

- (τ''') c'est la composante associée à l'énergie dépensée pour maintenir les particules solides en suspension (figure 4c).

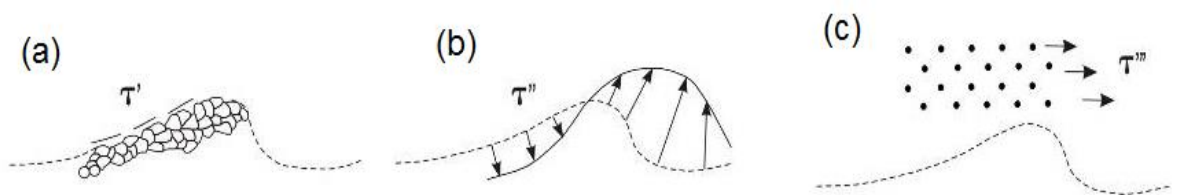


Figure 4 : la résistance de flux dans chenaux avec de dunes (Jodeau 2004)

Pour qu'un sédiment soit mis en mouvement, la contrainte au fond doit être supérieure à une contrainte critique. Les forces de résistance existantes dans le chenal peuvent être vaincues par la vitesse de frottement (u_*), qui est une mesure de l'effet de cisaillement sur le fond. Elle est définie par la relation suivante : $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$

I-3-1-3 Force tractrice critique

La force tractrice critique (τ_c) est celle qui est capable de mettre en mouvement les matériaux du fond. Pour certains auteurs, il s'agit du début de la mise en mouvement ; pour d'autres, la force tractrice critique correspond à la mise en mouvement de l'ensemble de la couche du lit. Lorsque la contrainte de cisaillement sur le fond est supérieure à la contrainte de cisaillement critique (début de l'entraînement), il se produit un mouvement des matériaux par charriage sur le fond dans le sens du courant.

La plupart des calculs de contrainte critique de mise en mouvement sont basés sur les travaux de Shields (1936). Le critère de Shields (1936) permet de calculer le frottement critique dans le cas d'un écoulement permanent, sur un fond plat horizontal.

Le paramètre de Shields, noté(θ), établit le rapport entre la force de frottement du fluide et la force du poids submergé des sédiments. Le frottement adimensionnel ou paramètre de Shields est défini par :

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot D}$$

Où τ est la contrainte de frottement exercée par l'écoulement sur le fond ; g est la pesanteur ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) ; ρ est la masse volumique de l'eau ($\rho=1000 \text{ kg/m}^3$) et ρ_s est la masse volumique des sédiments ($\rho_s=2650 \text{ kg/m}^3$ pour le sable quartzeux, par exemple).

Quand la contrainte de frottement devient critique, on doit définir le paramètre de Shields critique, noté par θ_c . Le Shields critique est défini par :

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot D}$$

Il peut être déterminé en fonction du diamètre adimensionnel D_* .

$$\text{Si } D_* \leq 4 \quad \text{alors } \theta_c = 0,24 \cdot D_*^{-1}$$

$$\text{Si } 4 < D_* \leq 10 \quad \text{alors } \theta_c = 0,14 \cdot D_*^{-0,64}$$

$$\text{Si } 10 < D_* \leq 20 \quad \text{alors } \theta_c = 0,04 \cdot D_*^{-0,1}$$

$$\text{Si } 20 < D_* \leq 150 \quad \text{alors } \theta_c = 0,24 \cdot D_*^{0,29}$$

$$\text{Si } 150 < D_* \quad \text{alors } \theta_c = 0,055$$

I-3-1-4 Rugosité du fond (z_0)

z_0 Dépend de la nature du fond :

Si le fond est lisse, les mouvements turbulents sont très faibles tout près de la paroi, et le frottement visqueux est dominant. On a alors: $\tau = u_*^2 = \nu \frac{\partial u}{\partial z}$, soit $\frac{u}{u_*} = \frac{zu_*}{\nu}$ qui est une distance adimensionnelle. Le profil de vitesse est linéaire en z dans une couche d'épaisseur $\sim \frac{5\nu}{u_*}$.

En présence de rugosités sur le fond, l'écoulement est turbulent à une distance du fond, et le profil de vitesse est logarithmique. La valeur du nombre de Reynolds de grain $k_s u_* / \nu$, permet de caractériser l'écoulement : turbulent lisse ou turbulent rugueux.

On a :

- si $k_s u_* / \nu < 5$, fond lisse (sous-couche laminaire, où le frottement est lié à la viscosité du fluide ν)

$$z_0 = 0,11 \frac{\nu}{u_*}, \text{ épaisseur de la couche laminaire } \sim \frac{5\nu}{u_*}$$

- si $k_s u_* / \nu > 70$, fond rugueux (pas de sous couche laminaire, parce que les grains, ou les rides, sont trop grands)

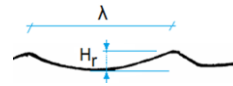
$$z_0 = 0,033 k_s = k_s / 30 \text{ (Nikuradse in Le Hir, 2008)}$$

Pour un lit constitué de grains sphériques serrés, k_s est le diamètre D de ces grains. Plus généralement, Nikuradse évalue une "rugosité équivalente" adaptée à la configuration du lit.

k_s (Rugosité équivalente ou coefficient de Nikuradse) est lié à la taille des grains ou des rides éventuelles.

→ fond sans ride : $k_s \approx 3D$ sable fins, $k_s \approx 1D$ sables grossiers (Van Rijn in Le Hir, 2008)

→ en présence de rides : $k_s \approx (8 \text{ à } 30) \frac{H_r^2}{\lambda}$



→ H_r et λ grands (dunes), $k_s = 1,1H_r \left(1 - e^{-\frac{25H_r}{\lambda}}\right)$

On retient généralement : $z_0 = k_s/30$ et $k_s \sim \left(\max 1D \text{ à } 3D, (8 \text{ à } 30) \frac{H_r^2}{\lambda}\right)$

→ en présence de macro-rugosités de hauteur H , de largeur d'exposition au courant S et caractérisées par un espacement λ :

$$z_0 = \frac{2,3H^2}{\lambda \left(\frac{H}{S}\right)^{0,3}}$$

Pour un régime de transition, soit $5 < k_s u_* / \nu < 70$, [Soulsby \(1997\)](#) recommande la formulation suivante :

$$z_0 = \frac{\nu}{9u_*} + \frac{k_s}{30} \left[1 - \exp\left(\frac{-u_* k_s}{27\nu}\right)\right]$$

I-3-2 Formulations de capacité de transport

Plusieurs formulations existent pour représenter le transport du sédiment par le courant sur le fond, mais elles sont toutes empiriques et ne sont applicables que dans des conditions où elles ont été établies. Nous présentons ici cinq formulations issues de la littérature et dont les conditions d'obtention sont proches des conditions expérimentales adoptées pour notre étude.

Les trois premières formulations ne font pas la différence entre la suspension et le charriage au fond. Elles sont globales et traitent un transport total. Les deux dernières présentent le calcul du transport sur le fond.

a- Engelund-Hansen (1967)

La formule d'Engelund-Hansen exprime le transport total mis sous sa forme adimensionnelle en fonction d'un coefficient de frottement C_f et du paramètre de Shields :

$$C_f \Phi = 0.1\theta^{5/2}$$

avec $C_f = 2 \frac{\bar{u}^2}{u_*^2}$, $\Phi = \frac{q}{\sqrt{(s-1)gD_{50}^3}}$, $\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gd_{50}}$

d'où la relation :

$$q_t(m^2 \cdot s^{-1}) = 0,05 \cdot \bar{u}^2 \cdot \sqrt{\frac{D_{50}}{(s-1) \cdot g}} \cdot \left(\frac{\tau}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot D_{50}} \right)^{\frac{3}{2}}$$

avec :

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot S \quad \text{ou} \quad \tau = \rho \cdot u_*^2$$

$$q_s(Kg/s) = \rho_s q_t(m^2 \cdot s^{-1})$$

Cette formulation donne le transport solide apparent total (q_t) pour des sédiments non cohésifs (charriage + saltation + suspension). Son domaine d'application (fond couvert de rides ou de dunes ; fraction en suspension non négligeable ; diamètre admis 150 μm à 4 mm) ne correspond pas tout à fait à nos conditions expérimentales, mais la formulation est recommandée pour sa simplicité et son efficacité.

b- Inglis-Lacey (1968)

La formule Inglis-Lacey relie le débit total des sédiments à la vitesse moyenne d'écoulement, en introduisant la taille moyenne et la vitesse de chute des sédiments du lit. La formule elle-même est dimensionnellement homogène et peut être utilisée avec n'importe quel ensemble cohérent d'unités. Elle est basée sur des données issues des expériences effectuées en canaux d'irrigation larges et stables. L'expression utilisée permet de prédire le transport solide total (q_t) et applicable à tous domaines :

$$q_t(kg/s/m) = 0,562 \cdot \frac{(v \cdot g)^{\frac{1}{3}} \bar{u}^5}{w_s \cdot g^2} \cdot h$$

Avec :

$$q_t = \frac{Q_t}{W} \quad \text{et} \quad v = \frac{\mu}{\rho}$$

Ci-dessous quelques valeurs de (v) de l'eau en fonction de la température.

Température (°C)	v ($m^2 \cdot s^{-1}$)
20	$1,007 \times 10^{-6}$
25	$0,884 \times 10^{-6}$
50	$0,556 \times 10^{-6}$

$$w_s = [(gD(\rho_s - \rho))/\rho]^{0,5}$$

c- Ackers-White (1973)

Une formulation basée sur l'analyse dimensionnelle et des considérations physiques, a été développée par Ackers et White en 1973 pour prédire le mouvement des sédiments non cohésifs. Ce type d'équation est largement utilisé pour calculer le transport des sédiments, détecter les changements morphologiques des canaux et dans la conception de modèles physiques. Les divers coefficients et paramètres ont été dérivés en les ajustant à une gamme de données observées provenant d'essais en canal. La formulation a été établie pour le calcul du transport total (q_t) . Elle est applicable pour un Froude < 0,8, diamètre des sédiments varié entre 50µm à 4mm et pas d'anti-dune (dune inverse par rapport au sens du courant) sur le fond :

$$q = K\bar{u} d_{35} \left(\frac{\bar{u}}{u^*}\right)^n \left(\frac{Y - Y_{cr}}{Y_{cr}}\right)^m$$

Avec :

$$Y = \frac{u_*^n}{[(s-1)gd_{35}]^{0.5}} \left(\frac{\bar{u}}{2,46 \ln\left(\frac{10h}{d_{35}}\right)}\right)^{1-n}$$

Pour les petits diamètres adimensionnels ($d_* < 60$) c'est-à-dire $D < 2.38mm$ avec:

$$D_* = D_{50} \cdot \left[\frac{(s-1)g}{v^2}\right]^{\frac{1}{3}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K = \exp[2,86 \cdot \ln(D_*) - 0,434 \cdot \ln^2(D_*) - 8,13] \\ Y_{cr} = \frac{0,23}{D_{35}^{0,5}} + 0,14 \\ n = 1 - 0,243 \cdot \ln(D_*) \\ m = \frac{9,66}{D_*} + 1,34 \end{array} \right.$$

Pour les grands diamètres adimensionnels ($D_* > 60$):

$$\begin{cases} K = 0,025 \\ Y_{cr} = 0,17 \\ n = 0 \\ m = 1,5 \end{cases}$$

d- Yalin (1963)

Yalin suppose que toutes les particules se déplacent en saltation, et que l'augmentation de la vitesse du courant allonge la distance à laquelle les grains se déplacent tandis que le nombre des particules en mouvement est proportionnel à l'excès de contrainte sur le fond (Cayocca, 1996). Sa formule permet le calcul du transport de fond (q_b) des sédiments de tous diamètres, en cas d'un fond plat et pour tous types d'écoulements, par l'intermédiaire de l'équation ci-après :

$$q_b(m^3/s/m) = \frac{0,5 \cdot \bar{u}[\tau - \tau_{cr}]}{\gamma_s}$$

avec $B = 0,5$

Cette formulation doit être complétée par un calcul de la phase en suspension q_s lorsque celle-ci existe $u_* > w_s$

e- Van Rijn (1984)

Van Rijn considère que le mouvement de la particule est déterminé par la force de la pesanteur, tandis que l'effet de la turbulence est secondaire. Selon lui, le transport de sédiments peut être estimé à partir de deux paramètres adimensionnels, qui sont le diamètre adimensionnel de la particule (D_*) et le paramètre de transport (T). Sa formulation est un développement semi-empirique, pour le calcul du charriage (q_b) des sédiments vérifiant ($180 \mu m < D < 2 mm$) pour tous types de fonds et d'écoulement.

$$q_b(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}) = 0,053 \cdot \sqrt{g \cdot (s - 1) D_{50}^3} \cdot \frac{T^{2,1}}{D_*^{0,3}}$$

avec

$$T = \frac{u_*^2 - u_{*c}^2}{u_{*c}^2} \quad (\text{pour } 0 < T < 25)$$

$$u_* = \sqrt{g} \cdot \frac{\bar{u}}{18 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot R}{D_{90}}\right)}$$

$$u_{*c}^2 = g \cdot (s - 1) \cdot D_{50} \cdot [\alpha \cdot D_*^\beta]$$

α et β : Coefficient déduits de la courbe de Shields

D_*	α	β
$D_* \leq 4$	0,24	-1
$4 < D_* \leq 10$	0,14	-0,64
$10 < D_* \leq 20$	0,04	-0,10
$20 < D_* \leq 150$	0,013	0,29
$150 < D_*$	0,055	0

θ_c : Paramètre de mobilité critique du sédiment

$$\theta_c = \frac{u_{*c}^2}{(s - 1) \cdot g \cdot D_{50}}$$

D_* : Diamètre de sédimentation (de particule)

$$D_* = D_{50} \cdot \left[\frac{(s - 1) \cdot g}{v^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

donc

Si $D_* \leq 4$ alors $\theta_c = 0,24 \cdot D_*^{-1}$

Si $4 < D_* \leq 10$ alors $\theta_c = 0,14 \cdot D_*^{-0,64}$

Si $10 < D_* \leq 20$ alors $\theta_c = 0,04 \cdot D_*^{-0,1}$

Si $20 < D_* \leq 150$ alors $\theta_c = 0,013 \cdot D_*^{0,29}$

Si $150 < D_*$ alors $\theta_c = 0,055$

Rayon hydraulique (m) : $R = \frac{S_m}{P_m}$

$$q_b (m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}) = 0,053 D_{50}^{3/2} \sqrt{g(s-1)} \frac{T^{2,1}}{D_*^{0,3}}$$

A cette expression vient s'ajouter le transport en suspension lorsque $u_* > w_s$.

Chapitre II Protocole expérimental et caractéristiques des sédiments

L'objectif de nos expérimentations est d'obtenir des mesures de quantités de sédiments transportés en fixant les conditions hydrauliques pour chaque variante d'essais. Néanmoins, le matériel disponible à notre laboratoire ne permet pas d'obtenir et de fixer ces conditions (débits, vitesses, hauteurs d'eau dans le canal,...) pour l'ensemble des essais. Nous avons donc choisi de recréer et d'adapter les conditions d'écoulement pour chaque expérience afin d'assurer le déplacement par charriage les sédiments souhaités.

II-1 Caractéristiques des sédiments utilisés

Le transport des sédiments s'effectue différemment selon la nature du sédiment et la taille du grain. Les sédiments peuvent être classés en sédiments cohésifs et non cohésifs :

- Les sédiments cohésifs sont ceux qui ont tendance à former des conglomérats dans lesquels les flocons sont liés entre eux par de fortes forces électrostatiques. La cohésion des sédiments résulte de la présence d'argile ([Benasla M., \(2015\)](#)).

- les sédiments non cohésifs sont des sédiments non soumis à des forces d'interactions et dont les mouvements dépendent uniquement des propriétés des particules (taille, forme, densité). Ces caractéristiques leur permettant de bouger indépendamment les uns des autres ([Benasla M., \(2015\)](#)). Le sable, les limons et les graviers sont des exemples de sédiments non-cohésives.

D'autre part et selon l'échelle de Wentworth. On peut distinguer 3 grands types de sédiments : galets et gravillons, sables et les limons et vases ([figure 5](#)).

Les sédiments utilisés pour la création d'un fond sédimentaire lors de nos expériences sont des billes en verre sphériques transparentes et des sédiments naturels à différents diamètres. La taille des sédiments est choisie de façon à ce que l'on puisse observer seulement le transport du fond (charriage) dans la gamme de débits liquide disponible.

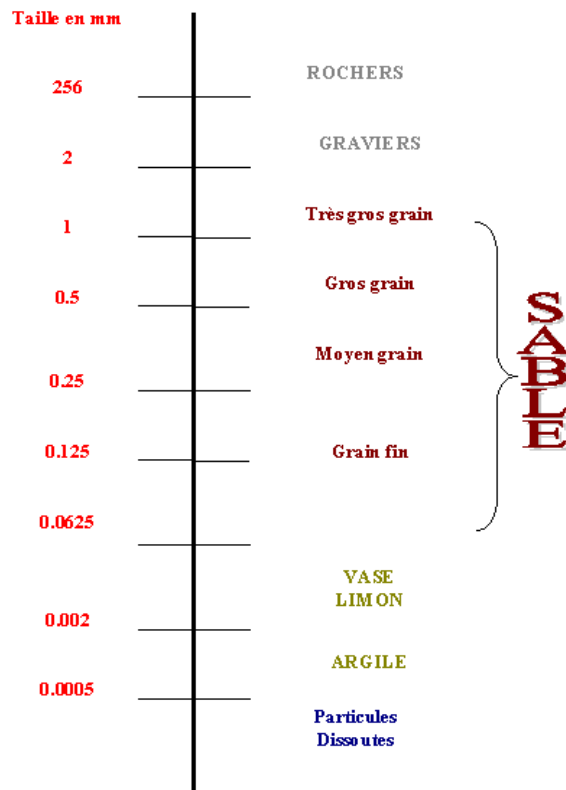


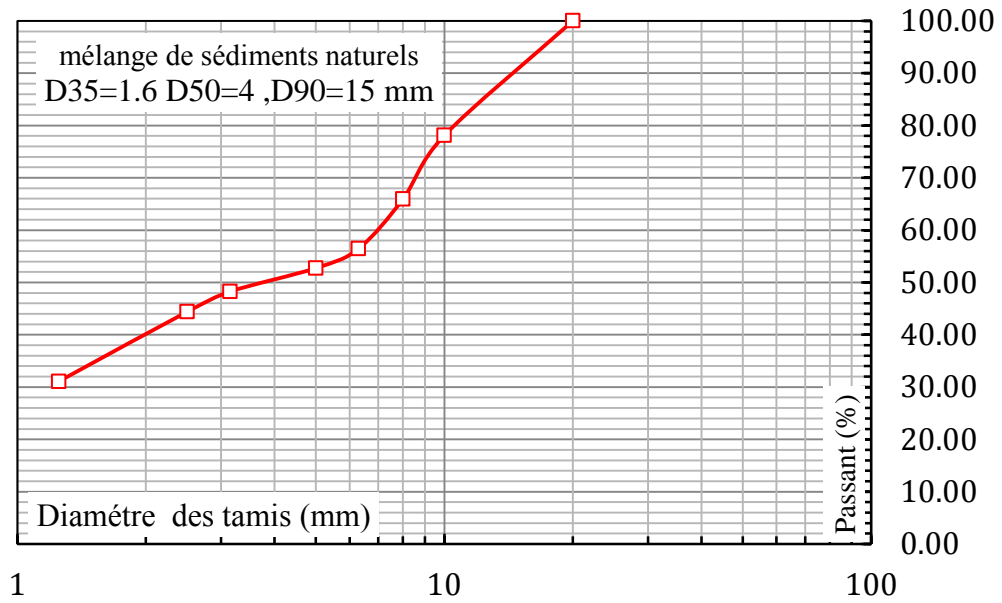
Figure 5 : classification des Sédiments par Taille selon l'échelle de Wentworth

(Source : <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0001/travaux/optsee/hym/17/transedi.htm>)

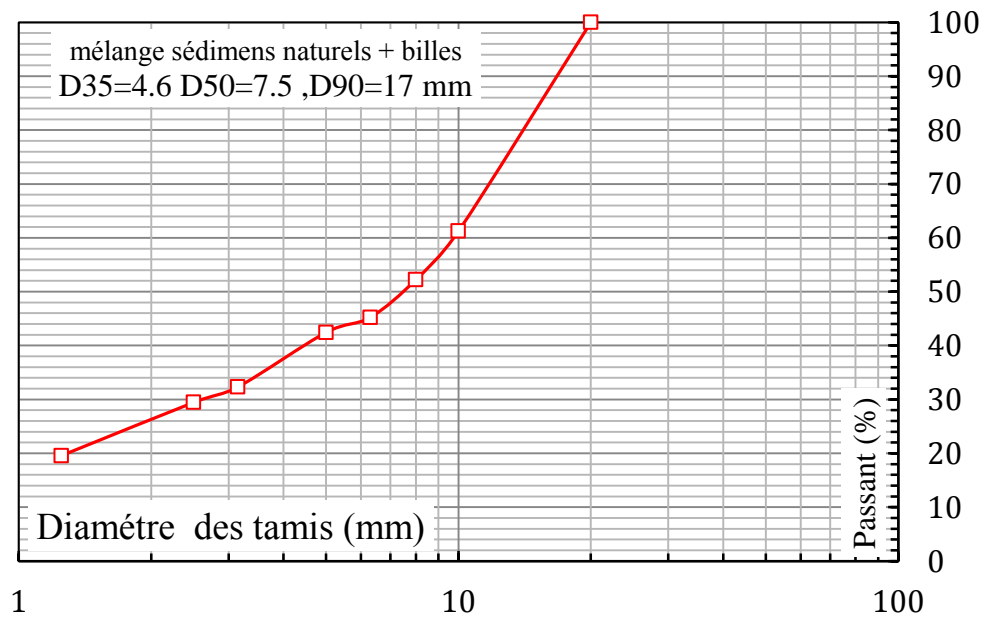
Les sédiments naturels utilisés lors des expériences au laboratoire sont tamisés afin d'obtenir une granulométrie resserrée (courbes granulométriques figure 7) autour des diamètres désirés. Deux diamètres de billes (4 et 15,7 mm) et trois types de sédiments non cohésifs, pratiquement sphériques et de masse volumique mesurée qui varie entre 2542,75 et 2998,09 kg/m^3 ont été choisis (figures 6).



Figure 6 : différents types de particules utilisées



a



b

Figure 7 : Courbes d'analyse granulométrique

Les diamètres caractéristiques principaux des sédiments choisie sont donnés ci-dessous (tableau 1) :

Tableau 1 : diamètre caractéristique des sédiments choisis pour l'expérimentation

n°	Type de sédiment	Diamètres caractéristique en cm			
		D_{10}	D_{35}	D_{50}	D_{90}
1	Billes en verre	0,4	0,4	0,4	0,40
2	Sédiments naturels (D=0,63cm)	-	0,21	0,63	1,58
3	Sédiments naturels (D=0,80 cm)	-	0,38	0,80	1,65
4	Sédiments naturels (D=1 cm)	-	0,49	1,00	1,83
5	Billes en verre	1,57	1,57	1,57	1,57
6	Mélange de sédiments naturels	-	0,16	0,4	1,5
7	Mélange sédiments naturels + billes	-	0,46	0,75	1,7

II-2 Représentation du fond

Le fond du canal est divisé en trois parties :

- Le fond sédimentaire est représenté sous la forme d'une ou plusieurs couches successives de particules. Ces couches sont caractérisées par leur épaisseur et le pourcentage de chacune des classes sédimentaires qu'elles contiennent (en cas d'un mélange comportant des sédiments de tailles différents). La distribution initiale des pourcentages de différentes classes est donnée dans le [tableau 3](#). Selon l'inclinaison du fond du canal, les sédiments ont plus ou moins de mal à être transportés par charriage.

- les deux partie en amont est en aval du fond sédimentaire dont dépend aussi le processus du charriage pour les essais que nous avant réalisés, car c'est sur ces deux parties que nous avons agi, en modifiant leur **rugosité**. Plusieurs variantes de cette méthodologie ont été étudiées ([tableau 3](#)).

II-3 Formes de rugosité

En plus du fond pratiquement lisse, nous avons utilisé deux types de rugosité :

Le premier type (**1**) est obtenue en concevant longitudinalement ou transversalement des ondulations de colle (hauteur moyenne de 1 mm et espacement de 1,5 mm) agencée sur une couche de plastique qu'en la fixant ensuite sur le fond du canal.

Pour le deuxième (2), il s'agit de macro-rugosités constituées de plots cylindriques verticaux en plastique de 0,9 cm de hauteur et d'une section circulaire de diamètre de 0,3 cm. Les plots étant disposés perpendiculairement à la ligne de pente du canal (**Figure 8**). Les lignes ainsi formées sont régulièrement espacées longitudinalement d'un pas de 2 cm. L'espacement transversal entre deux cylindres d'une même rangée et de 2,2 cm.

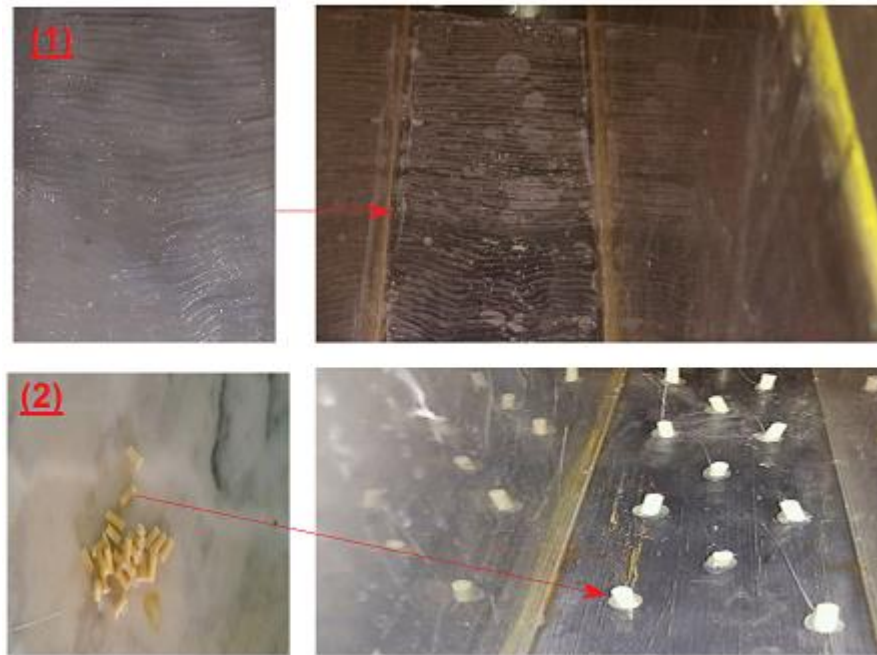


Figure 8 : Rugosité artificielle placée en amont, en aval et au-dessous du fond sédimentaire

(1) rugosité en ondulations de colle fixé sur une couche plastique

(2) macro-rugosités constituées de plots cylindriques verticaux en plastique

II-4 Canal d'essais

Les expérimentations seront conduites dans un canal à flux continu (disponible au laboratoire) pour emmener un courant constant dans une veine en plexiglas transparent permettant les visualisations et les mesures. D'une longueur de 5 m (largeur : 7,5 cm, hauteur : 15 cm), le canal est inclinable et alimenté par pompage (Pompe corps inox : 1.1 kW 2800 tr/min, débit réglable jusqu'à 2 litres / seconde). Un réservoir de pesée avec poutre de mesure de débit gravimétrique (Il est à noter que nous avons utilisé dans cette étude le dispositif « tube de Pitot » pour mesurer la vitesse d'écoulement). Une vanne de réglage du niveau d'eau, permet d'obtenir un écoulement uniforme. Un niveau à bulle qui sert à vérifier l'horizontalité de la couche sédimentaire. La zone amont du canal permet, avec le système de tranquillisation situé à l'extrémité, la stabilisation de l'écoulement. En aval à la sortie de l'écoulement le canal est équipé d'une nasse (construit par nous-mêmes)

qui sert de récupération, et afin d'éviter au sédiment de passer dans le circuit de la pompe. Un caméscope (progressive scan 13 mégapixel, flash photo HDR) pour filmer les essais et un chronomètre et qui sert à mesurer la durée de l'expérience.



a



b

Figure 9 : canal expérimental avant la mise en place du dispositif d'essai

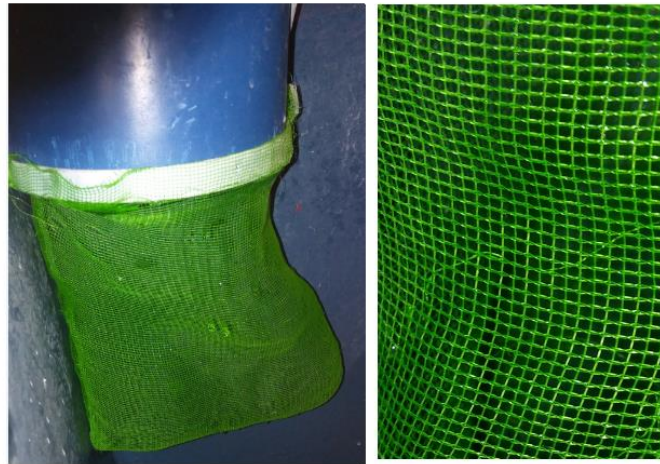


Figure 10 : nasse de récupération des sédiments

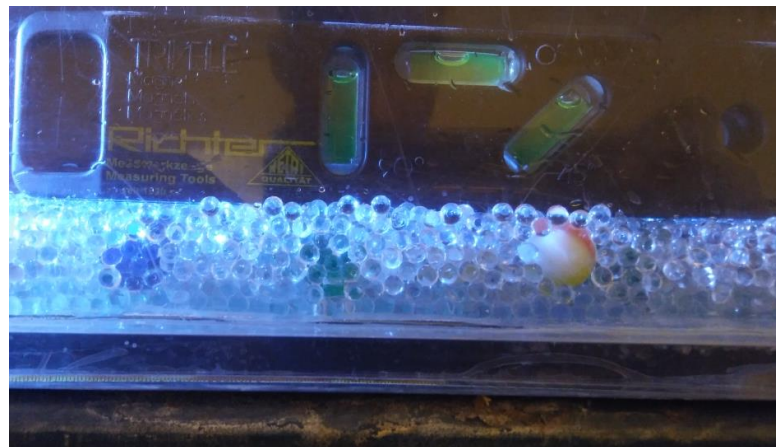


Figure 11 : niveau à bulle servant à vérifier l'horizontalité de la couche sédimentaire.

II-5 Méthodologie

Le but des expérimentations est de mesurer la quantité des sédiments transportée par un flux liquide en fonction de la vitesse de l'écoulement, du type (diamètre, arrangement) des sédiments transportés, et de la rugosité du fond.

Afin de procéder à ces mesures nous avons mis en place le protocole suivant :

- Augmentation progressive de la vitesse de l'écoulement jusqu'à l'observation d'un décollement généralisé des grains
- Détermination de la vitesse de décollement des grains.
- le fond sédimentaire est protégé par un film plastique pendant la mise en eau et le réglage de la vitesse d'écoulement
- enlèvement de la protection

- l'écoulement est maintenu à vitesse constante pendant un temps donné (mesuré) selon le déroulement de l'essai effectué.
- l'écoulement est stoppé et la quantité de sédiments récupérée par la nasse est pesée, afin de déterminer le débit solide charrié.
- Un nombre important d'essais sont effectués afin de mettre en relation les quantités de sédiments transportés, la vitesse d'écoulement, la rugosité et le type du fond sédimentaire.
- Sur l'ensemble des essais effectués, quelques essais sont filmés dans leur intégralité. Ces films faciliteront l'exploitation des expériences et la compréhension du phénomène du charriage. La prise en vue à l'aide d'un caméscope (placé en point fixe sur le côté de la zone d'essai) est facilitée par obscurisation de la zone d'essai.
- les tirants d'eau sont relevés à la main à l'aide d'une mire fixée sur une paroi du canal d'essai perpendiculairement au fond sédimentaire.

Chapitre III

Ajustement et le choix des équations de transport solide

Nous souhaitons mesurer la quantité de sédiments transportés par charriage et ajuster les coefficients des équations de transport choisies pour diverses variantes d'essais pour ces transports. Les variantes d'essais choisies ont pour but de recréer et de se rapprocher le plus possible des conditions d'écoulement et de transport représentatives d'un cours d'eau.

III-1 Expérimentations

III-1-1 Mesure des vitesses

Les formules de la capacité de transport choisies font intervenir la vitesse de frottement u_* . Cette vitesse n'est pas accessible à la mesure dans l'état actuel du matériel expérimental disponible. Elle doit donc être calculée en fonction de la vitesse d'écoulement au-dessus du fond. Dans un écoulement laminaire établi, la vitesse du fluide décroît en approchant de la paroi (figure 11). Cette décroissance se fait sous la forme d'une loi logarithmique (Nikuradse 1933). Au-delà de cette zone de décroissance de vitesse, dite loi log, la vitesse reste pratiquement constante.

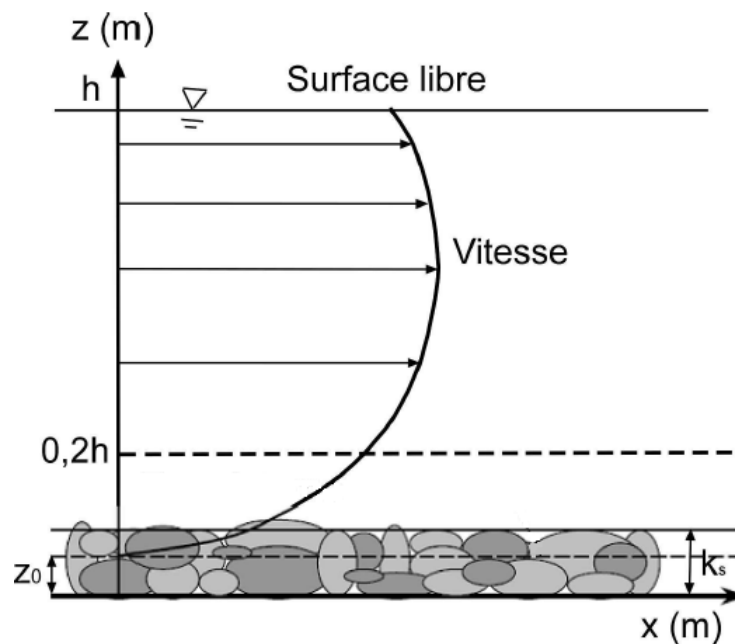


Figure 11 : décroissance logarithmique de la vitesse d'écoulement à proximité de la paroi
 k_s : Epaisseur de la rugosité z_0 : Hauteur de référence des rugosités de surface

En se plaçant dans la zone de décroissance de la vitesse, nous pouvons donc calculer la valeur de la vitesse de frottement u_* en fonction de la vitesse d'écoulement u et de la hauteur de mesure z par rapport au fond. Le profil de vitesse qui suit donc une loi logarithmique est donné par l'équation ci-dessous :

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

z_0 : Hauteur de référence des rugosités de surface

κ : constante de Von Karman, égale à 0,41

La rugosité du fond peut être estimée sous plusieurs formes plus ou moins complexes comme nous l'avons déjà abordé dans le premier chapitre. Ici, nous avons choisi une forme simplifiée $z_0 = 3D_{90}$

Selon Holmes et Garcia, (2002) cité par Gharbi M., (2016), Cette expression du profil des vitesses peut se retrouver théoriquement dans le domaine proche de la paroi, mais les données expérimentales indiquent qu'elle est approximativement valable sur toute la colonne d'eau.

Pour notre étude, la vitesse d'écoulement est mesurée en aval de la zone d'essais par « un tube Pitot », (figure 12). Il s'agit d'un dispositif extrêmement simple qui permet une mesure de la vitesse d'écoulement d'un fluide en appliquant l'équation de Bernoulli.

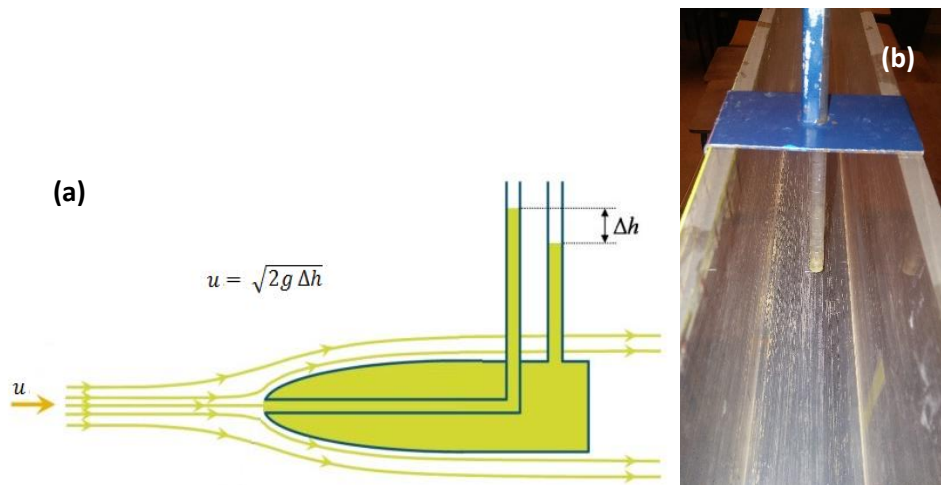


Figure 12 : principe et image de Tube Pitot

(a : source : http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_C_M02_G02/co/Contenu_26.html)

Les vitesses d'écoulement mesurées dans le canal pour les diverses variantes d'essais vont de 0,14 m/s à 0,65 m/s. pour ces vitesses, la hauteur d'eau dans la veine d'essais varie de 0,024 m à 0,057 m (tableau 2, figure 13).

Tableau 2 : vitesses d'écoulement mesurées dans le canal

		A proximité de la paroi gauche	Au milieu de canal	A proximité de la paroi droite
0,5 cm	h cm	0,2	0,3	0,2
	v m/s	0,19	0,24	0,19
1 cm	h cm	0,4	0,5	0,4
	v m/s	0,28	0,33	0,28
1,75 cm	h cm	0,8	1,2	0,8
	v m/s	0,39	0,48	0,39
2,5 cm	h cm	1	1,4	1
	v m/s	0,44	0,52	0,44

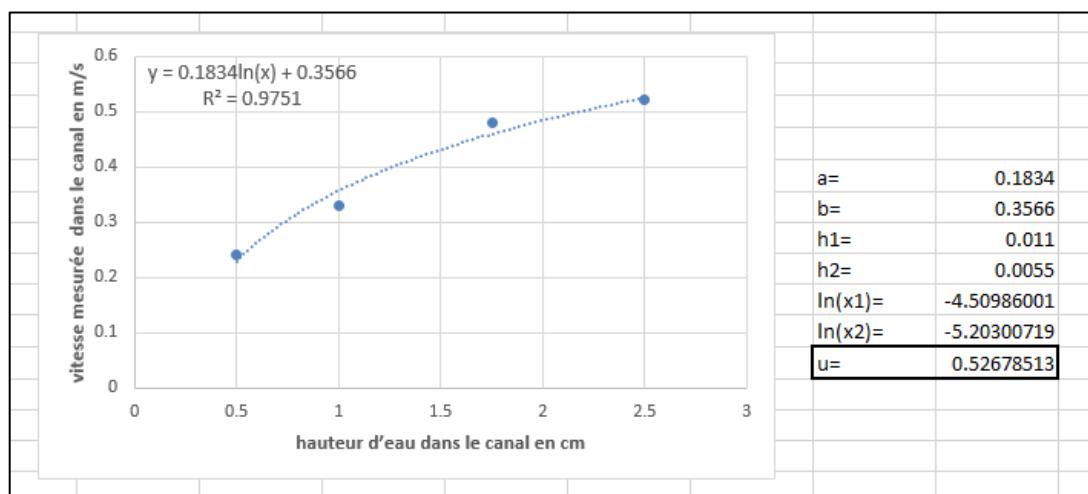


Figure 13 : détermination de la vitesse moyenne sur la verticale

III-1-2 Mesure de la hauteur d'eau et pesée des sédiments

La hauteur d'eau dans la veine d'essai qui varie entre 0,024 m à 0,057 m, est relevée à la main à l'aide d'une règle graduée installée verticalement sur l'un des deux parois latéraux du canal (figure 14).



Figure 14 : disposition de la règle graduée pour la mesure de la hauteur d'eau dans le canal

Les mesures de la quantité de sédiments transportée (récupéré) au cours des expériences se font par pesage en fin d'essai à l'aide d'une balance électronique de précision 0,1 g (figure 15) disponible au laboratoire. Les poids mesurés sont rapportés à la longueur de la zone d'essai et à la durée d'essai pour obtenir une quantité de sédiments transportée par unité de surface et par seconde (m^3/s par m^2).



Figure 15 : balance de précision 0,1 g

III-2 Bilan des expérimentations et comparaison des résultats

Un nombre important d'essais (54) sont effectués afin de repérer les paramètres les plus influents sur le transport des sédiments, notamment la vitesse d'écoulement ou de frottement et d'évaluer leurs effets. Cependant, en raison de la difficulté de rétablissement des conditions hydrodynamiques, notamment l'obtention d'une gamme de vitesses suffisantes pour chaque essai, nous avons essayé de faire un bilan et d'adopter une équation référencée qui représente et estime le charriage du fond pour des conditions expérimentales prédestinées. Les cinq équations de transport ont été établies dans des conditions plus au moins proches de celles que nous souhaitons représenter : faible profondeur, granulométrie entre 0,2 mm et plus de 2 cm, fond plat, la seule influence est le courant continu ...etc.

Les cinq équations sont résolues directement dans une feuille de calcul Excel et l'ensemble des résultats des expériences sont exposés dans les tableaux 3, 4, 5, 6 et 7.

Nos essais ont été menés en faisant varier la vitesse d'écoulement, le diamètre des particules et en modifiant les caractéristiques du fond est l'arrangement des particules.

Le fond sédimentaire est représenté sous forme d'une ou plusieurs couches successives de sédiments dont seule la couche supérieure dite couche active est en contact avec l'écoulement. Cette dernière est caractérisée par son épaisseur et le pourcentage de chacune des classes granulométriques qu'elle contient.

Plusieurs constatations ont été faites au cours des essais, nous allons discuter ici les principales :

Le fond s'érode de façon continue sans formation de structures fixes, les déformations ne sont pas semblables pour différent essai et la couche mobile possède une épaisseur variable.

En cas d'érosion, l'épaisseur initiale de la couche active est restituée par amaigrissement de la couche profonde sous-jacente.

Le pourcentage des classes granulométriques évolue dans les couches au cours du temps.

Pour un fond formé d'une seule couche et lorsque le sédiment comporte des particules non mobiles, celles-ci restent dans l'épaisseur de la couche et composer avec le temps l'intégralité de cette couche.

Le masquage des sédiments les uns par rapport aux autres joue un rôle très important en cas de présence de plusieurs classes de sédiments ([figure 16](#)) : le transport de chaque grain dépend de sa taille mais il dépend aussi de la taille des grains qui l'entourent (un petit grain peut-être protégé par la présence des plus gros grains autour de lui, mais un grain gros sur un lit fins est plus exposé et donc plus facilement remobilisable).

Tableau 3 : calcul de la quantité des sédiments transportés par l'équation de Yalin (1963) et ajustement de coefficient A

N°	fond du canal	rugosité	Fond sédimentaire	Nombre d'essais	% de sédiments					Poids initial (g)					poids des sédiments récupérés (g)					Durée de l'essai (s)	τ	τ _{cr}	Q solide Calculé (kg/s)	Q solide Mesurée (kg/s)	coefficient A							
					billes		Sédiments naturels			billes		Sédiments naturels			billes		Sédiments naturels									total	D=0,4	D=1,57	D=0,63	D=0,8	D=1,0	total
					D=0,4	D=1,57	D=0,63	D=0,8	D=1,0	D=0,4	D=1,57	D=0,63	D=0,8	D=1,0	D=0,4	D=1,57	D=0,63	D=0,8	D=1,0													
1			une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	152.7	-	-	-	-	152.7	152.7	-	-	-	-	152.7	20	135.9073777	8.082759836	8.89013E-05	0.007635	0.001460513					
					-	100	-	-	-	-	504.7	-	-	-	-	504.7	-	504.7	-	-	-	504.7	30	135.9073777	8.082759836	8.89013E-05	0.016823333	0.001065803				
2	Entièrement lisse		plusieurs couches de sédiments	5	100	-	-	-	-	451.3	-	-	-	-	451.3	451.3	-	-	-	-	451.3	81	135.9073777	6.240798831	0.000106332	0.005571605	0.003172452					
					-	100	-	-	-	-	1060	-	-	-	-	1060	-	1060	-	-	-	1060	40	135.9073777	6.240798831	0.000106332	0.0265	0.075				
					-	-	-	100	-	-	-	-	-	201.55	-	-	-	201.55	-	-	-	166.41	-	50	317.601733	6.674651156	0.000224333	0.0033282	0.000285443			
					-	-	100	-	-	-	-	-	-	318.62	-	-	-	318.62	-	-	-	252.63	-	75	317.601733	6.674651156	0.000224333	0.0033684	0.000288891			
					-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	304.27	304.27	-	-	-	284.67	-	258	317.601733	6.674651156	0.000224333	0.001103372	9.46307E-05			
3			mélange sédimentaire multi-classe	3	23.99	76.01	-	-	-	215	681	-	-	-	896	215	681	-	-	-	896	98	135.9073777	6.963104769	9.88013E-05	0.009142857	0.001733768					
					30.67	31.69	-	-	-	503.05	519.82	-	-	-	1640.72	501.93	514.82	-	-	-	590.09	-	1354	283.3478791	6.737584614	0.000210244	0.001186736	0.000107967				
					-	-	-	-	100	-	-	-	-	412.56	-	-	-	412.56	-	-	-	306.54	-	141	283.3478791	6.674651156	0.000211526	0.002174043	0.000197746			
4	Entièrement rugueux	longitudinale	une seule couche de sédiments	3	100	-	-	-	-	172.4	-	-	-	-	172.4	172.4	-	-	-	-	172.4	37	115.3723529	8.082759836	7.18729E-05	0.004659459	0.001102491					
					100	-	-	-	-	76	-	-	-	-	76	74	-	-	-	-	74	79	283.3478791	8.082759836	0.000181689	0.000936709	8.76762E-05					
					-	100	-	-	-	-	275	-	-	-	-	275	-	272	-	-	-	272	49	234.0223295	6.240798831	0.000182922	0.00555102	0.000608488				
5			plusieurs couches de sédiments	3	100	-	-	-	-	477.2	-	-	-	-	477.2	477.2	-	-	-	-	477.2	59	210.1425	8.082759836	0.000140531	0.008088136	0.000978768					
					100	-	-	-	-	257	-	-	-	-	257	254	-	-	-	-	254	167	283.3478791	8.082759836	0.000181689	0.001520958	0.000142362					
6			mélange sédimentaire multi-classe	1	60.58	39.42	-	-	-	749.12	487.39	-	-	-	1236.51	744.48	473.52	-	-	-	1218	425	197.3289329	6.963104769	0.000138431	0.002865882	0.00038788					
					-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
7			une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	137.5	-	-	-	-	137.5	135.5	-	-	-	-	135.5	20	210.1425	8.082759836	0.000140531	0.006775	0.000819862					
					-	100	-	-	-	-	506	-	-	-	-	506	-	506	-	-	-	506	28	178.3027273	6.240798831	0.000142316	0.010928571	0.001539766				
8		transversale	plusieurs couches de sédiments	5	100	-	-	-	-	443	-	-	-	-	443	440	-	-	-	-	440	124	210.1425	8.082759836	0.000141745	0.003548387	0.000425723					
					-	100	-	-	-	-	806	-	-	-	-	806	-	806	-	-	-	806	37	197.3289329	6.240798831	0.000154605	0.021783784	0.002825245				
					-	-	-	100	-	-	-	-	-	291.25	-	-	-	291.25	-	-	-	263.61	-	250	317.601733	6.674651156	0.000224333	0.00105444	9.04341E-05			
					-	-	100	-	-	-	-	-	-	272.94	-	-	-	272.94	-	-	-	248.45	-	248	317.601733	6.674651156	0.000224333	0.001001815	8.59206E-05			
					-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	401.82	401.82	-	-	-	341.25	-	84	317.601733	6.674651156	0.000224333	0.0040625	0.00034842			
9			mélange sédimentaire multi-classe	2	-	-	-	100	-	-	-	-	645.09	645.09	-	-	-	318.88	-	120	283.3478791	6.674651156	0.000211526	0.002657333	0.000241705							
					29.83	30.64	-	-	39.52	501.09	514.74	-	-	-	1679.88	499.81	507.63	-	-	-	650.9	-	1392	283.3478791	6.737584614	0.000210244	0.001191336	0.000108386				
10	Rugosité en amont	longitudinale	une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	102	-	-	-	-	102	98	-	-	-	-	98	130	215.098691	8.082759836	0.000144166	0.000753846	8.89252E-05					
					-	100	-	-	-	-	374	-	-	-	-	374	-	374	-	-	-	374	28	229.4216284	6.240798831	0.000187954	0.013357143	0.001424975				
					100	-	-	-	-	448	-	-	-	-	448	440	-	-	-	-	-	440	255	215.098691	8.082759836	0.000144166	0.001725449	0.000203542				
					-	100	-	-	-	-	742	-	-	-	-	742	-	742	-	-	-	742	33	229.4216284	6.240798831	0.000187954	0.022484848	0.002398743				
					-	100	-	-	-	-	556	206	-	-	-	-	762	550	206	-	-	-	756	555	229.4216284	6.963104769	0.000175053	0.001362162	0.000145791			
14		Macro-rugosité	plusieurs couches de sédiments	5	100	-	-	-	-	418	-	-	-	-	418	318	-	-	-	-	318	74	304.5424512	8.082759836	0.00020437	0.004297297	0.000357588					
					-	-	100	-	-	-	-	-	154	-	-	-	154	-	-	-	76	-	242	304.5424512	6.674651156	0.000232313	0.00031405	2.60093E-05				
					-	-	-	100	-	-	-	-	-	248	-	-	-	248	-	-	-	185	-	180	304.5424512	6.674651156	0.000232313	0.001027778	8.51195E-05			
					-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	287	287	-	-	-	26	-	15	304.5424512	6.674651156	0.000232313	0.001733333	0.000143553			
					-	100	-	-	-	-	-	-	823.58	-	-	-	823.58	-	786.42	-	-	-	786.42	85	283.3478791	6.240798831	0.000220794	0.009252	0.000840222			
15			mélange sédimentaire multi-classe	3	-	-	-	100	-	-	-	-	324	-	-	-	-	286	-	240	304.5424512	6.674651156	0.000232313	0.001191667	9.86926E-05							
					8.78	91.22	-	-	-	94.18	978.88	-	-	-	1073.06	86.88	931.51	-	-	-	1038.39	122	283.3478791	6.963104769	0.000205769	0.008511393	0.000774983					
					13.40	43.90	-	-	42.69	124.84	408.89	-	-	-	397.63	931.36	122.18	400.22	-	-	306.31	-	801	283.3478791	6.737584614	0.000210244	0.001034394	9.41256E-05				
16			une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	193.6	-	-	-	-	193.6	147.1	-	-	-	147.1	114	210.1425	8.082759836	0.000141745	0.001087701	0.000131208						
					-	100	-	-	-	-	448	-	-	-	-	448	-	440	-	-	-	440	73	193.8798879	6.240798831	0.000142316	0.000130886	0.000895221				
17		transversale	plusieurs couches de sédiments	5	100	-	-	-	-	465	-	-	-	-	465	442	-	-	-	-	442	160	210.1425	8.082759836	0.000141745	0.0027525	0.000331435					
					-	100	-	-	-	-	989.7	-	-	-	-	989.7	-	989.7	-	-	-	989.7	43	183.8798879	6.240798831	0.000143719	0.023016279	0.000211188				
					-	-	100	-	-	-	-	-	-	329	-	-	-	329	-	-	-	236	-	40	297.7016775	6.674651156	0.000233349	0.0009	0.000480402			
					-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	425	-	-	-	102	-	25	297.7016775	6.674651156	0.000233349	0.00908	0.000336463				
					-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	902	902	-	-	-	304	-	240	297.7016775	6.674651156	0.000233349	0.001137712	0.000101801			
18			mélange sédimentaire multi-classe	3	25.35	74.65	-	-	-	172.54	508.12	-	-	-	680.66	157.88	508.12	-	-	686	210	183.8798879	6.963104769	0.000137543	0.00371429	0.00044279						
					-	-	-	-	100	-	-	-	-	326.14	-	-	-	326.14	-	-	-	223.28	-	39	283.3478791	6.674651156	0.000211526	0.005766513	0.00022143			
19			une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	154	-	-	-	-	154	103	-	-	-	103	47	229.4216284	8.082759836	0.000187954	0.002311111	0.000248807						
					-	100	-	-	-	-	364	-	-	-	-	364	-	364	-	-	-	364	20	229.4216284	6.240798831	0.000187954	0.0182	0.001041624				
20			plusieurs couches de sédiments	2	100	-	-	-	-	407	-	-	-	-	407	382	-	-	-	382	173	229.4216284	8.082759836	0.000187954	0.001147147	0.000123399						
					-	100	-	-	-	-	742	-	-	-	-	742	-	742	-	-	-	742	34	229.4216284	6.240798831	0.000187954	0.021823529	0.002326163				
21			mélange sédimentaire multi-classe	1	31.13	68.87	-	-	-	442	978	-	-	-	1420	442	978	-	-	-	1420	24										

Tableau 4 : calcul de la quantité des sédiments transportés par l'équation d'Engelund-Hansen (1967) et ajustement de coefficient A

	fond du canal	rugosité	Fond sédimentaire	Nombre d'essais	% de sédiments					Poids initial (g)					poids des sédiments récupérés (g)					Durée de l'essai (s)	Vitesse moyenne (m/s)	τ	Q solide Calculé (kg/s)	Q solide Mesurée (kg/s)	coefficient A				
					billes		Sédiments naturels			billes		Sédiments naturels			billes		Sédiments naturels									total			
					D=0,4	D=1,57	D=0,63	D=0,8	D=1,0	D=0,4	D=1,57	D=0,63	D=0,8	D=1,0	D=0,4	D=1,57	D=0,63	D=0,8	D=1,0								total		
1			une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	152.7	-	-	-	152.7	152.7	-	-	-	-	152.7	20	0.545290257	135.9073777	0.058165203	0.007635	0.001951512			
					-	100	-	-	-	-	504.7	-	-	-	504.7	-	504.7	-	-	-	-	504.7	30	0.545290257	135.9073777	0.08274871	0.016823333	0.00302257	
2	Entièrement lisse		plusieurs couches de sédiments	5	100	-	-	-	-	451.3	-	-	-	451.3	451.3	-	-	-	-	451.3	81	0.545290257	135.9073777	0.058165203	0.005571605	0.001424107			
					-	100	-	-	-	-	1060	-	-	-	1060	-	1060	-	-	-	-	1060	40	0.545290257	135.9073777	0.08274871	0.0265	0.004761131	
					-	-	-	100	-	-	-	-	201.55	-	-	-	201.55	-	-	-	166.41	-	166.41	50	0.5	317.601733	0.226449279	0.0033282	0.000183717
					-	-	100	-	-	-	-	-	318.62	-	-	-	318.62	-	-	252.63	-	252.63	75	0.5	317.601733	0.226449279	0.0033684	0.000185936	
3			mélange sédimentaire multi-classe	3	23.99	76.01	-	-	-	215	681	-	-	-	896	215	681	-	-	896	98	0.545290257	135.9073777	0.071139301	0.009142857	0.001910723			
					30.67	31.69	-	-	-	503.05	519.82	-	-	-	617.85	1640.72	501.93	514.82	-	-	590.09	1354	0.52982554	283.3478791	0.211515994	0.001186736	7.87493E-05		
					-	-	-	100	-	-	-	-	412.56	-	-	-	412.56	-	-	-	306.54	-	306.54	141	0.52982554	283.3478791	0.214265558	0.002174043	0.000142414
4	Entièrement rugueux	longitudinale	une seule couche de sédiments	3	100	-	-	-	-	172.4	-	-	-	172.4	172.4	-	-	-	172.4	37	0.5252206	210.1425	0.103752261	0.004659459	0.000619429				
					100	-	-	-	-	76	-	-	-	76	74	-	-	-	-	74	79	0.5175	283.3478791	0.157704427	0.000936709	7.95337E-05			
5			plusieurs couches de sédiments	3	100	-	-	-	-	477.2	-	-	-	477.2	477.2	-	-	-	477.2	59	0.545290257	210.1425	0.111832889	0.008088136	0.001075237				
					100	-	-	-	-	257	-	-	-	257	254	-	-	-	-	254	167	0.5175	283.3478791	0.157704427	0.001520958	0.000129141			
6			mélange sédimentaire multi-classe	1	60.58	39.42	-	-	-	749.12	487.39	-	-	-	1236.51	744.48	473.52	-	-	1218	425	0.5175	197.3289329	0.104742413	0.002865882	0.000366376			
					100	-	-	-	-	137.5	-	-	-	137.5	135.5	-	-	-	-	135.5	20	0.545290257	210.1425	0.111832889	0.006775	0.000900669			
7			une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	506	-	-	-	506	-	506	-	-	506	28	0.55	178.3027273	0.126903798	0.010928571	0.001306638				
					-	100	-	-	-	-	443	-	-	-	443	440	-	-	-	-	440	124	0.55	210.1425	0.113773062	0.003548387	0.000471723		
8		transversale	plusieurs couches de sédiments	5	100	-	-	-	-	806	-	-	-	806	-	806	-	-	806	37	0.538	197.3289329	0.140926254	0.021783784	0.002237051				
					-	100	-	-	-	-	291.25	-	-	-	291.25	-	-	-	263.61	-	263.61	250	0.5	317.601733	0.226449279	0.00105444	5.82051E-05		
					-	-	100	-	-	-	-	272.94	-	-	-	272.94	-	-	248.45	-	248.45	248	0.5	317.601733	0.226449279	0.001001815	5.53602E-05		
					-	-	-	-	100	-	-	-	401.82	-	-	-	401.82	-	-	-	341.25	341.25	84	0.5	317.601733	0.226449279	0.0040625	0.00022425	
9			mélange sédimentaire multi-classe	2	29.83	30.64	-	-	-	501.09	514.74	-	-	-	645.09	1679.88	499.81	507.63	650.9	318.88	120	0.52982554	283.3478791	0.214265558	0.002657333	0.000174072			
					-	-	-	100	-	-	-	-	664.05	-	-	-	664.05	-	-	-	650.9	1658.34	1392	0.52982554	283.3478791	0.211515994	0.001191336	7.90546E-05	
10	Rugosité en amont	longitudinale	une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	102	-	-	-	102	98	-	-	-	98	130	0.546	215.098691	0.116114154	0.000753846	9.67727E-05				
					-	100	-	-	-	-	374	-	-	-	374	-	374	-	-	-	374	38	0.56	229.4216284	0.19141184	0.013357143	0.001094185		
11			plusieurs couches de sédiments	2	100	-	-	-	-	448	-	-	-	448	440	-	-	-	440	255	0.546	215.098691	0.116114154	0.00172549	0.000221305				
					-	100	-	-	-	-	742	-	-	-	72	-	742	-	-	-	742	33	0.56	229.4216284	0.19141184	0.022484848	0.001841905		
12			mélange sédimentaire multi-classe	1	72.97	27.03	-	-	-	556	206	-	-	-	762	550	206	-	-	756	555	0.56	229.4216284	0.153759977	0.001362162	0.000138909			
					100	-	-	-	-	418	-	-	-	418	-	418	-	-	-	318	74	0.540487261	304.5424512	0.191684021	0.004297297	0.000327454			
14		Macro-rugosité	plusieurs couches de sédiments	5	100	-	100	-	-	-	-	-	154	-	-	-	154	-	76	-	76	242	0.540487261	304.5424512	0.248455905	0.00031405	1.84625E-05		
					-	-	-	100	-	-	-	-	248	-	-	-	248	-	-	-	185	-	185	180	0.540487261	304.5424512	0.248455905	0.001027778	6.04214E-05
					-	-	-	-	100	-	-	-	287	-	-	-	287	-	-	-	26	-	26	15	0.540487261	304.5424512	0.248455905	0.001733333	0.0001019
					-	100	-	-	-	-	-	823.58	-	-	-	823.58	-	786.42	-	-	-	786.42	85	0.52982554	283.3478791	0.235172716	0.009252	0.000552185	
15			mélange sédimentaire multi-classe	3	8.78	93.22	-	-	-	94.18	978.88	-	-	-	1073.06	86.88	951.51	-	-	1038.39	122	0.52982554	283.3478791	0.188912825	0.008511393	0.000632375			
					13.40	43.90	-	-	-	42.69	124.84	408.89	-	-	-	397.63	931.36	122.18	400.22	-	-	306.31	828.71	801	0.52982554	283.3478791	0.211515994	0.001034594	6.86535E-05
16	Rugosité en aval	transversale	une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	448	-	-	-	448	448	-	-	-	448	73	0.538	197.3289329	0.140926254	0.006136986	0.000330665				
					-	100	-	-	-	-	403	-	-	-	403	442	-	-	-	-	442	160	0.53	210.1425	0.113773062	0.0029625	0.000367347		
17			plusieurs couches de sédiments	3	100	-	-	-	-	908.7	-	-	-	908.7	-	908.7	-	-	908.7	48	0.538	197.3289329	0.140926254	0.023016279	0.000627325				
					-	100	-	-	-	-	329	-	-	-	329	-	-	-	236	-	236	40	0.535658709	207.301875	0.23300212	0.0069	0.000358675		
					-	-	-	100	-	-	-	-	475	-	-	-	475	-	-	-	102	-	102	25	0.555658709	207.301875	0.23300212	0.00008	0.000248171
					-	-	-	-	100	-	-	-	582	-	-	-	582	-	-	-	302	-	302	246	0.555658709	207.301875	0.23300212	0.001233752	7.51673E-05
18			mélange sédimentaire multi-classe	3	28.33	74.68	-	-	-	172.34	308.12	-	-	-	680.66	157.88	308.12	-	-	696	210	0.538	197.3289329	0.140926254	0.001171429	0.00049073			
					28.39	30.13	-	-	-	100	-	-	-	336.14	-	-	336.14	-	-	-	233.28	39	0.52982554	283.3478791	0.214265558	0.005780513	0.00037664		
19			une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	104	-	-	-	104	104	-	-	-	104	45	0.56	229.4216284	0.153759977	0.003111311	0.000269337				
					-	100	-	-	-	-	364	-	-	-	364	-	364	-	-	-	364	30	0.56	229.4216284	0.153759977	0.0182	0.0013809		
20			plusieurs couches de sédiments	2	100	-	-	-	-	407	-	-	-	407	382	-	-	-	382	333	0.56	229.4216284	0.153759977	0.001187147	0.000133899				
					-	100	-	-	-	-	742	-	-	-	742	-	742	-	-	-	742	34	0.56	229.4216284	0.153759977	0.021823229	0.001787334		
21			mélange sédimentaire multi-classe	1	31.13	68.87	-	-	-	442	978	-	-	-	1420	442	978	-	-	1420	245	0.56	229.4216284	0.153759977	0.008705918	0.000991051			

Tableau 5 : calcul de la quantité des sédiments transportés par l'équation d'Ingilis-Lacey (1968) et ajustement de coefficient A

N°	fond du canal	rugosité	Fond sédimentaire	Nombre d'essais	% de sédiments					Poids initial (g)					poids des sédiments récupérés (g)					Durée de l'essai (s)	Vitesse moyenne (m/s)	w _s	Q solide Calculé (kg/s)	Q solide Mesurée (kg/s)	coefficient A					
					billes		Sédiments naturels			billes		Sédiments naturels			billes		Sédiments naturels									total				
					D=0,4	D=1,57	D=0,63	D=0,8	D=1,0	D=0,4	D=1,57	D=0,63	D=0,8	D=1,0	D=0,4	D=1,57	D=0,63	D=0,8	D=1,0											
1	Entièrement lisse	-	une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	152.7	-	-	-	-	152.7	152.7	-	-	-	152.7	20	0.545290257	0.38335267	6.02708E-05	0.007635	3.432237398				
2			plusieurs couches de sédiments	5	100	-	-	-	-	451.3	-	-	-	-	451.3	451.3	-	-	-	451.3	81	0.545290257	0.38335267	6.02708E-05	0.005571605	2.504658918				
					-	100	-	-	-	-	1060	-	-	-	-	1060	-	1060	-	-	-	40	0.545290257	0.336851703	5.81735E-05	0.0265	12.34228041			
					-	-	-	100	-	-	-	-	201.55	-	-	-	-	201.55	-	-	166.41	-	50	0.5	0.348363738	0.000127412	0.0033282	0.458759426		
					-	-	100	-	-	-	-	-	-	318.62	-	-	-	-	318.62	-	-	252.63	-	75	0.5	0.348363738	0.000127412	0.0033684	0.464300598	
					-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	304.27	-	-	304.27	-	-	284.67	-	258	0.5	0.348363738	0.000127412	0.001103372	0.152088921	
3			mélange sédimentaire multi-classe	3	23.99	76.01	-	-	-	215	681	-	-	-	896	215	681	-	-	-	896	98	0.545290257	0.355811614	5.73966E-05	0.009142857	4.315892623			
					30.67	31.69	-	-	-	503.05	519.82	-	-	-	1640.72	501.93	514.82	-	-	-	1606.84	1354	0.52982554	0.350002198	0.000139704	0.001186736	0.199317018			
					-	-	-	100	-	-	-	-	-	412.56	-	-	-	-	412.56	-	-	306.54	-	141	0.52982554	0.348363738	0.000140362	0.002174043	0.363429873	
4	Entièrement rugueux	longitudinale	une seule couche de sédiments	3	100	-	-	-	-	172.4	-	-	-	-	172.4	172.4	-	-	-	172.4	37	0.5252206	0.38335267	8.81757E-05	0.004659459	1.186947423				
					-	100	-	-	-	76	-	-	-	-	76	74	-	-	-	74	79	0.5175	0.38335267	0.000128283	0.000936709	0.15230844				
5	longitudinale	plusieurs couches de sédiments	3	100	-	-	-	-	477.2	-	-	-	-	477.2	477.2	-	-	-	477.2	59	0.545290257	0.38335267	0.000107873	0.00555102	1.255750142					
				-	100	-	-	-	257	-	-	-	-	257	254	-	-	-	254	167	0.5175	0.38335267	0.000128283	0.001520958	0.247307101					
6			mélange sédimentaire multi-classe	1	60.58	39.42	-	-	-	749.12	487.39	-	-	-	1236.51	744.48	473.52	-	-	-	425	0.5175	0.355811614	7.14798E-05	0.002865882	0.836302284				
7	Rugosité en amont	-	une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	137.5	-	-	-	-	137.5	137.5	-	-	-	137.5	20	0.545290257	0.38335267	0.00010636	0.006775	1.725838731				
8			transversale	plusieurs couches de sédiments	5	-	100	-	-	-	-	306	-	-	-	306	-	306	-	-	306	28	0.55	0.336851703	8.57359E-05	0.010928571	3.605376385			
						100	-	-	-	-	443	-	-	-	-	443	440	-	-	-	440	124	0.55	0.38335267	0.000111033	0.003548387	0.903913631			
						-	100	-	-	-	-	806	-	-	-	806	-	806	-	-	-	806	37	0.538	0.336851703	8.79796E-05	0.021783784	6.271899351		
						-	-	-	100	-	-	-	-	291.25	-	-	-	-	291.25	-	-	263.61	-	250	0.5	0.348363738	0.000127412	0.00105444	0.145344117	
						-	-	100	-	-	-	-	-	272.94	-	-	-	-	272.94	-	-	248.45	-	248	0.5	0.348363738	0.000127412	0.001001815	0.138090215	
9					mélange sédimentaire multi-classe	2	-	-	-	100	-	-	-	-	645.09	-	-	-	-	318.88	318.88	120	0.52982554	0.348363738	0.000140362	0.002657333	0.444220521			
10					une seule couche de sédiments	2	29.83	30.64	-	-	39.52	501.09	514.74	-	-	-	1679.88	499.81	507.63	-	-	650.9	1658.34	1392	0.52982554	0.348363738	0.000139704	0.001191336	0.200089709	
11					plusieurs couches de sédiments	2	100	-	-	-	-	102	-	-	-	-	102	98	-	-	-	98	130	0.546	0.38335267	0.00010623	0.000753846	0.185339586		
12			mélange sédimentaire multi-classe	1	-	100	-	-	-	374	-	-	-	-	374	-	374	-	-	374	28	0.56	0.336851703	0.00013291	0.013357143	3.110520803				
13			une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	448	-	-	-	-	448	440	-	-	-	440	255	0.546	0.38335267	0.00010623	0.00172549	0.425371121				
14			plusieurs couches de sédiments	5	-	100	-	-	-	742	-	-	-	-	742	-	742	-	-	742	33	0.56	0.336851703	0.00013291	0.022484848	5.23611896				
15			mélange sédimentaire multi-classe	3	72.97	27.03	-	-	-	556	206	-	-	-	762	550	206	-	-	756	553	0.56	0.355811614	0.000125827	0.001362162	0.335065509				
16	Rugosité en aval	-	une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	418	-	-	-	-	418	318	-	-	-	318	74	0.540487261	0.38335267	0.000179772	0.004297297	0.619636126				
17			transversale	plusieurs couches de sédiments	5	-	-	100	-	-	-	-	-	154	-	-	-	76	-	-	76	242	0.540487261	0.348363738	0.000174859	0.00031405	0.046555693			
						-	-	-	100	-	-	-	-	-	248	-	-	-	185	-	-	185	180	0.540487261	0.348363738	0.000174859	0.001027778	0.152360993		
						-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	287	-	-	-	-	26	-	26	15	0.540487261	0.348363738	0.000174859	0.001733333	0.256954755	
						-	100	-	-	-	-	823.58	-	-	-	-	823.58	-	-	-	786.42	-	-	786.42	85	0.52982554	0.348363738	0.000174859	0.009252	0.176656394
						-	-	-	-	100	-	-	-	-	324	-	-	-	-	-	286	-	-	286	240	0.540487261	0.336851703	0.000139284	0.001191667	1.558605565
18					mélange sédimentaire multi-classe	3	8.78	91.22	-	-	-	94.18	978.88	-	-	-	1073.06	86.88	951.51	-	-	1038.39	122	0.52982554	0.355811614	0.000137423	0.008511393	1.453250319		
19					une seule couche de sédiments	2	13.40	43.90	-	-	42.69	124.84	408.80	-	-	-	931.36	122.18	480.22	-	-	828.71	801	0.52982554	0.350002198	0.000139704	0.001034594	0.173764268		
20					plusieurs couches de sédiments	5	100	-	-	-	-	191.8	-	-	-	-	191.8	147.1	-	-	-	147.1	134	0.55	0.38335267	0.000111033	0.001097761	0.279843914		
21			mélange sédimentaire multi-classe	3	-	100	-	-	-	465	-	-	-	-	465	442	-	-	-	442	160	0.55	0.38335267	0.000111033	0.0027025	0.303717395				
22			une seule couche de sédiments	2	-	100	-	-	-	989.7	-	-	-	-	989.7	-	989.7	-	-	989.7	43	0.338	0.336851703	7.99814E-05	0.023010279	7.289420976				
23			plusieurs couches de sédiments	5	-	-	100	-	-	-	-	-	328	-	-	-	238	-	238	48	0.555608709	0.348363738	0.00019234	0.0089	0.908033846					
24			mélange sédimentaire multi-classe	3	-	-	-	100	-	-	-	-	-	582	-	-	-	-	582	304	0.555608709	0.348363738	0.00019234	0.001259772	0.190178808					
25			une seule couche de sédiments	2	25.35	34.65	-	-	-	172.84	508.12	-	-	-	680.96	157.88	508.12	-	-	668	219	0.538	0.355811614	7.89133E-05	0.001714379	1.048611173				
26			plusieurs couches de sédiments	2	-	-	-	100	-	-	-	-	-	176.14	-	-	-	-	221.88	99	0.52982554	0.348363738	0.000140362	0.005740913	0.9596088					
27			mélange sédimentaire multi-classe	1	28.39	30.15	-	-	41.48	484.37	514.03	-	-	-	1798.69	480.37	514.03	-	-	654.68	1548	0.52982554	0.350002198	0.000139704	0.001225534	0.208797308				
28	Rugosité en aval	-	une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	104	-	-	-	-	104	104	-	-	-	104	45	0.56	0.38335267	0.000177703	0.002311111	0.518868509				
19			longitudinale	plusieurs couches de sédiments	2	-	100	-	-	-	487	-	-	-	-	487	382	-	-	-	382	339	0.56	0.336851703	0.00013291	0.001147143	4.23693037			
						-	-	100	-	-	-	742	-	-	-	-	742	-	742	-	-	742	34	0.56	0.336851703	0.00013291	0.011824599	5.082113681		
20			mélange sédimentaire multi-classe	1	31.13	68.87	-	-	-	442	978	-	-	-	1420	442	978	-	-	1420	248	0.56	0.355811614	0.000131135	0.005799918	1.367988823				

Tableau 6 : calcul de la quantité des sédiments transportés par l'équation d'Ackers-White (1973) et ajustement de coefficient m

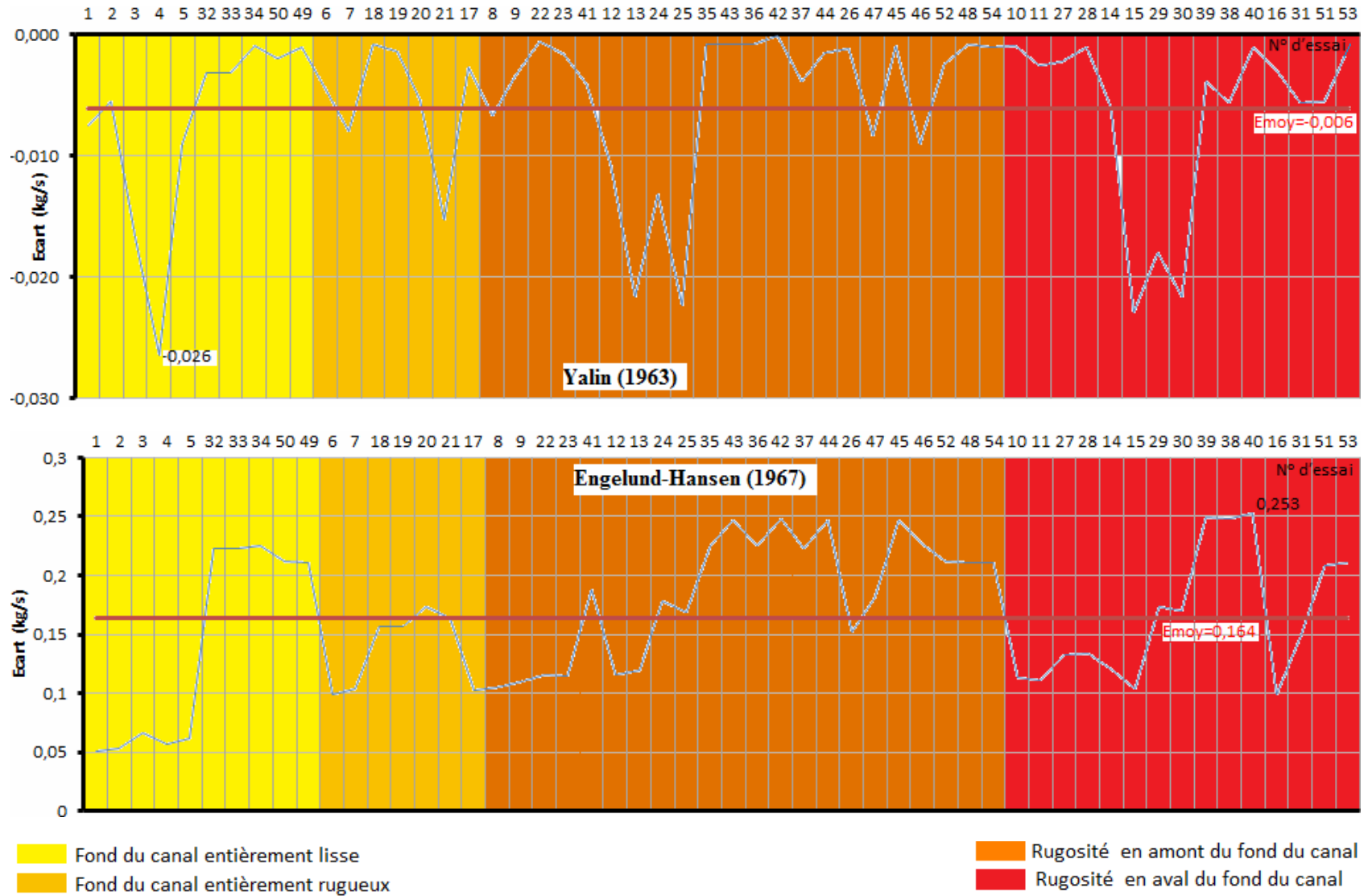
N°	fond du canal	rugosité	Fond sédimentaire	Nombre d'essais	% de sédiments					Poids initial (g)					poids des sédiments récupérés (g)					Durée de l'essai (s)	u _*	Y	Q solide Calculé (kg/s)	Q solide Mesurée (kg/s)	coefficient m				
					billes		Sédiments naturels			billes		Sédiments naturels			billes		Sédiments naturels									total			
					D=0,4	D=1,57	D=0,63	D=0,8	D=1,0	D=0,4	D=1,57	D=0,63	D=0,8	D=1,0	D=0,4	D=1,57	D=0,63	D=0,8	D=1,0										
1			une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	152.7	-	-	-	-	152.7	152.7	-	-	-	-	152.7	20	0.545290257	0.204535961	0.001291117	0.007635	-1.8978		
2	Entièrement lisse	-	plusieurs couches de sédiments	5	-	100	-	-	-	504.7	-	-	-	-	504.7	-	504.7	-	-	-	504.7	30	0.545290257	0.232771294	0.003163732	0.016823333	-3.9356		
100					-	-	-	-	451.3	-	-	-	451.3	451.3	-	-	-	-	-	-	-	451.3	81	0.545290257	0.204535961	0.001291117	0.005571605	-1.8978	
-					100	-	-	-	-	1060	-	-	-	1060	-	1060	-	-	-	-	-	1060	40	0.545290257	0.232771294	0.003163732	0.0265	-3.9356	
-					-	-	100	-	-	-	-	201.55	-	201.55	-	-	-	166.41	-	166.41	-	-	166.41	50	0.5642	0.174424526	6.12581E-05	0.0033282	0.0158
-					-	100	-	-	100	-	-	318.62	-	318.62	-	-	252.63	-	252.63	-	-	252.63	75	0.5642	0.174424526	6.12581E-05	0.0033684	0.0158	
3			mélange sédimentaire multi-classe	3	23.99	76.01	-	-	-	215	681	-	-	-	896	215	681	-	-	-	896	98	0.545290257	0.220367755	0.002273982	0.009142857	-2.9519		
					30.67	31.69	-	-	37.66	503.05	519.82	-	-	617.85	1640.72	501.93	514.82	-	-	590.09	1606.84	1354	0.603293255	0.193377162	0.000795512	0.001186736	-1.2295		
					-	-	-	100	-	-	-	-	412.56	412.56	-	-	-	-	306.54	306.54	141	0.603293255	0.194286673	0.000842386	0.002174043	-1.2831			
4	Entièrement rugueux	longitudinale	une seule couche de sédiments	3	100	-	-	-	-	172.4	-	-	-	-	172.4	172.4	-	-	-	-	172.4	37	0.5252206	0.170223649	6.48072E-07	0.004659459	0.6836		
100					-	-	-	-	76	-	-	-	76	74	-	-	-	74	79	0.5875	0.171932058	1.84064E-05	0.000936709	0.2904					
-			100	-	-	-	-	275	-	-	-	272	-	-	-	272	49	0.534	0.189951627	0.000555187	0.00555102	-1.0277							
100			-	-	-	-	477.2	-	-	-	477.2	477.2	-	-	-	477.2	59	0.545290257	0.176728212	0.000111022	0.008088136	-0.1769							
100			-	-	-	-	257	-	-	-	257	254	-	-	-	254	167	0.5875	0.171932058	1.84064E-05	0.001520958	0.2904							
5			plusieurs couches de sédiments	3	-	100	-	-	-	1202	-	-	-	1202	-	1202	-	-	-	1202	78	0.534	0.189951627	0.000555187	0.015410256	-1.0277			
6			mélange sédimentaire multi-classe	1	60.58	39.42	-	-	-	749.12	487.39	-	-	-	1236.51	744.48	473.52	-	-	-	1218	425	0.5875	0.209510194	0.001702166	0.002865882	-2.2112		
7	Rugosité en amont	transversale	une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	137.5	-	-	-	-	137.5	135.5	-	-	-	-	135.5	20	0.545290257	0.176728212	0.000111022	0.006775	-0.1769		
-					100	-	-	-	-	806	-	-	-	806	-	806	-	-	-	-	-	806	28	0.55	0.214308747	0.001892463	0.010928571	-2.5275	
100			-	-	-	-	443	-	-	-	443	440	-	-	-	440	124	0.55	0.178254636	0.000152174	0.003548387	-0.2902							
-			100	-	-	-	806	-	-	-	806	-	806	-	-	806	37	0.538	0.202656686	0.001171307	0.021783784	-1.7826							
-			-	100	-	-	-	291.25	-	-	291.25	-	291.25	-	-	263.61	-	263.61	-	-	263.61	250	0.5642	0.174424526	6.12581E-05	0.00105444	0.0158		
8			plusieurs couches de sédiments	5	-	-	100	-	-	-	-	-	272.94	-	-	-	-	248.45	-	248.45	248	0.5642	0.174424526	6.12581E-05	0.001001815	0.0158			
9			mélange sédimentaire multi-classe	2	-	-	-	100	-	-	-	-	645.09	645.09	-	-	-	-	318.88	318.88	120	0.603293255	0.194286673	0.000842386	0.002657333	-1.2831			
					29.83	30.64	-	-	39.52	501.09	514.74	-	-	664.05	1679.88	499.81	507.63	-	-	650.9	1658.34	1392	0.603293255	0.193377162	0.000795512	0.001191336	-1.2295		
10	Rugosité en aval	longitudinale	une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	102	-	-	-	-	102	98	-	-	-	-	98	130	0.546	0.175380159	8.3964E-05	0.000733846	-0.0851		
-					100	-	-	-	-	374	-	-	-	374	-	-	-	374	28	0.56	0.200542172	0.001102728	0.013357143	-1.6546					
100			-	-	-	-	448	-	-	-	448	440	-	-	-	440	255	0.546	0.175380159	8.3964E-05	0.00172549	-0.0851							
-			100	-	-	-	-	742	-	-	-	72	-	-	-	742	33	0.56	0.200542172	0.001102728	0.022484848	-1.6546							
72.97			27.03	-	-	-	556	206	-	-	-	762	550	206	-	-	-	756	555	0.56	0.189856006	0.000578038	0.001362162	-1.0220					
11			plusieurs couches de sédiments	2	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
12			mélange sédimentaire multi-classe	1	72.97	27.03	-	-	-	556	206	-	-	-	762	550	206	-	-	-	756	555	0.56	0.189856006	0.000578038	0.001362162	-1.0220		
13			une seule couche de sédiments	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
14	Macro-rugosité		plusieurs couches de sédiments	5	100	-	-	-	-	418	-	-	-	-	418	318	-	-	-	-	318	74	0.598473934	0.170710615	4.18242E-06	0.004297297	0.5113		
-					-	100	-	-	-	-	-	154	-	-	-	-	154	-	-	76	-	76	242	0.598473934	0.187856436	0.000526827	0.00031405	-0.9032	
-					-	-	100	-	-	-	-	248	-	248	-	-	248	-	-	185	-	185	180	0.598473934	0.187856436	0.000526827	0.001027778	-0.9032	
-					-	-	100	-	-	-	-	287	-	287	-	-	287	-	-	26	-	26	15	0.598473934	0.187856436	0.000526827	0.001733333	-0.9032	
-					100	-	-	-	-	823.58	-	-	-	823.58	-	-	786.42	-	786.42	-	-	786.42	85	0.603293255	0.200926494	0.001210472	0.009252	-1.6777	
15			mélange sédimentaire multi-classe	3	-	-	-	100	-	-	-	-	324	324	-	-	-	286	286	240	0.598473934	0.187856436	0.000526827	0.001191667	-0.9032				
					8.78	91.22	-	-	-	94.18	978.88	-	-	-	1073.06	86.88	951.51	-	-	1038.39	122	0.603293255	0.19021985	0.00063992	0.008511393	-1.0435			
					13.40	43.90	-	-	42.69	124.84	408.89	-	-	397.63	931.36	123.18	400.22	-	-	306.31	838.71	801	0.603293255	0.193377162	0.000795512	0.001034594	-1.2295		
16	Rugosité en aval	transversale	une seule couche de sédiments	2	100	-	-	-	-	130.6	-	-	-	-	130.6	127.1	-	-	-	-	127.1	134	0.55	0.178254636	0.000152174	0.001097761	-0.2902		
-					100	-	-	-	-	448	-	-	-	448	-	-	-	448	75	0.538	0.207491051	0.001440801	0.006136886	-2.0824					
100			-	-	-	-	465	-	-	-	465	442	-	-	-	442	160	0.55	0.178254636	0.000152174	0.0027825	-0.2902							
-			100	-	-	-	-	989.7	-	-	-	989.7	-	989.7	-	-	989.7	43	0.538	0.207491051	0.001440801	0.023016279	-2.0824						
-			-	100	-	-	-	329	-	-	-	329	-	-	238	-	238	46	0.555658709	0.175842013	9.1534E-05	0.0095	-0.1066						
17			plusieurs couches de sédiments	5	-	-	-	100	-	-	-	-	475	-	475	-	-	102	-	102	45	0.555658709	0.175842013	9.1534E-05	0.0095	-0.1066			
					-	-	-	100	-	-	-	-	982	-	982	-	-	304	-	304	246	0.555658709	0.175842013	9.1534E-05	0.001255772	-0.1066			
18			mélange sédimentaire multi-classe	3	25.35	74.65	-	-	-	172.54	508.13	-	-	-	680.66	157.88	508.13	-	-	666	210	0.538	0.198434685	0.000833845	0.005171829	-1.2098			
					-	-	-	100	-	-	-	-	376.14	376.14	-	-	-	223.28	223.28	39	0.603293255	0.194286673	0.000842386	0.007308113	-1.2831				
					28.39	38.13	-	-	41.48	488.37	514.07	-	-	707.68	1706.09	480.37	514.07	-	-	654.08	1688.52	1348	0.603293255	0.193377162	0.000795512	0.001222938	-1.2295		
19</																													



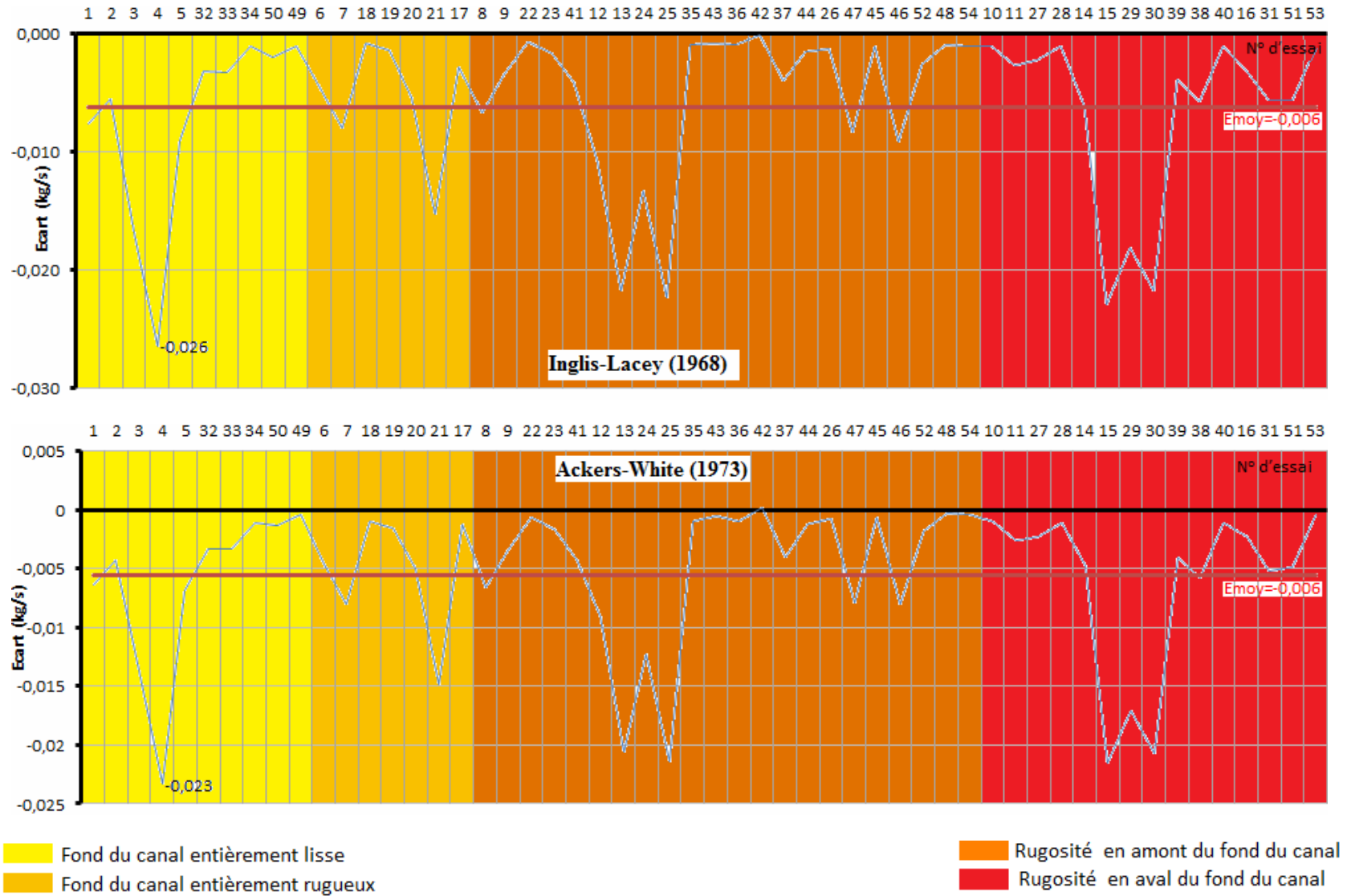
Figure 16 : composition granulométrique hétérogène du fond sédimentaire, effet de masquage

Les valeurs du charriage estimées par les formules de capacité de transport et celles mesurées ainsi que l'écart entre elles, sont reportées sur des graphes (figures 17), ces valeurs nous a permet de faire les constatations suivantes :

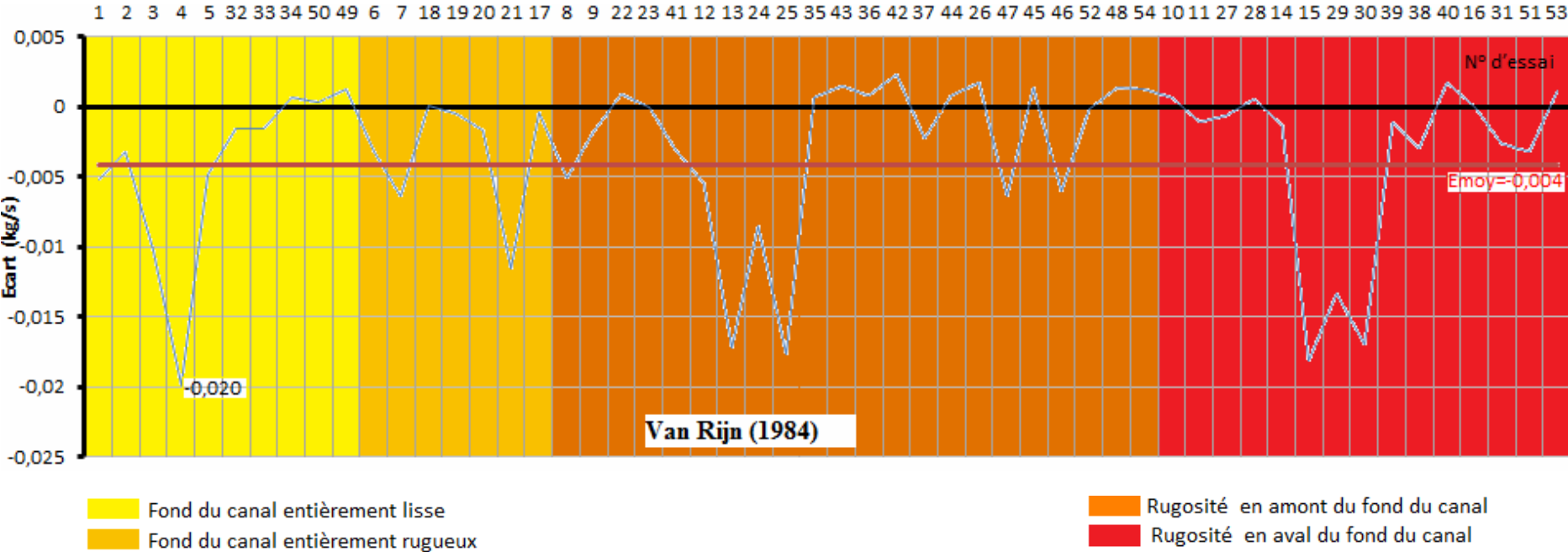
- L'écart moyen (en kg/s) entre les valeurs mesurées et estimées est important : 0,00055 (Ackers-White), 0,000027 (Inglis-Lacey), 0,000038 (Yalin) et 0,00108 (Van Rijn). Il est marquant pour la formule d'Engelund-Hansen (0,0516). Le max est de 0,1125 (Engelund-Hansen), 0,00246 (Ackers-White), 0,000070 (Inglis-Lacey), 0,00011 (Yalin) et 0,0037 (Van Rijn)
- Toutes les courbes représentatives de l'écart entre le charriage mesuré et estimé (figures 17) montrant plus au moins l'influence du type de fond du canal (fond sédimentaire, partie amont et partie aval) sont semblables à l'exception de celle relative à la formulation d'Engelund-Hansen.
- Cette dernière surestime évidemment la quantité des sédiments charriés. Ceci nous permet de penser que la formule d'Engelund-Hansen n'est pas adaptée au changement de ses conditions d'applications (fond couvert de rides ou de dunes, la fraction en suspension non négligeable) que nous avons effectué.
- Bien qu'il n'y ait pas de corrélation évidente (Yalin $R^2=0,01$, Engelund-Hansen 0,08, Inglis-Lacey 0,17 et Ackers-White 0,40) entre les quantités de sédiments transportés, mesurées et estimées, l'existence de cette relation et particulièrement approuvable pour la formule de Van Rijn ($R^2=0,52$), (figure 17). Nous constatons aussi, que l'écart le plus faible est celui relative à la formulation de Van Rijn 0,004 kg/s. De ce fait, on peut affirmer dire que cette dernière donne une approximation tolérable et susceptible d'approcher l'ensemble des points de mesure.



(a)



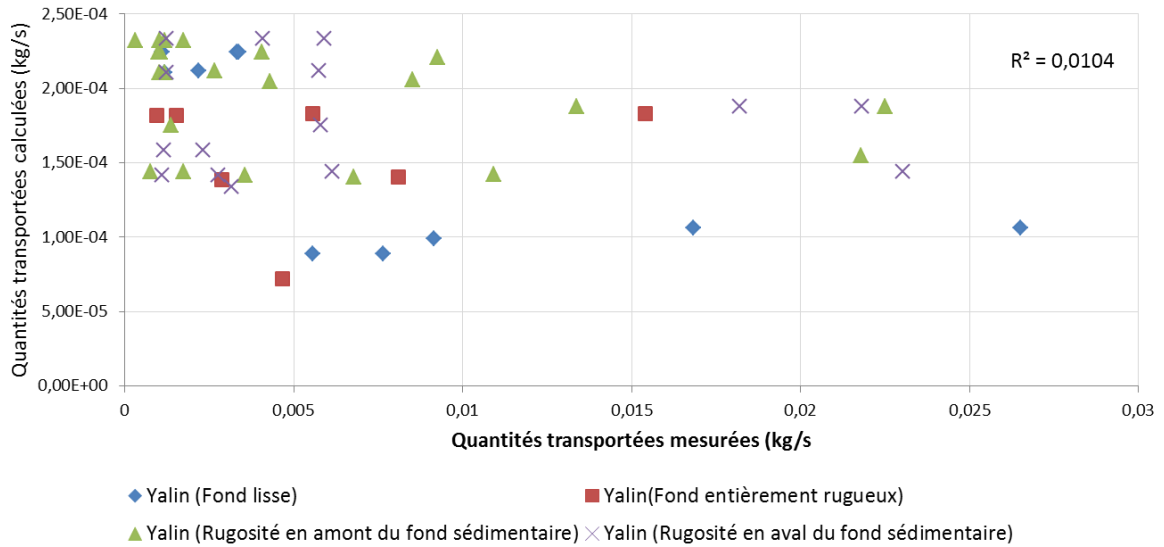
(b)



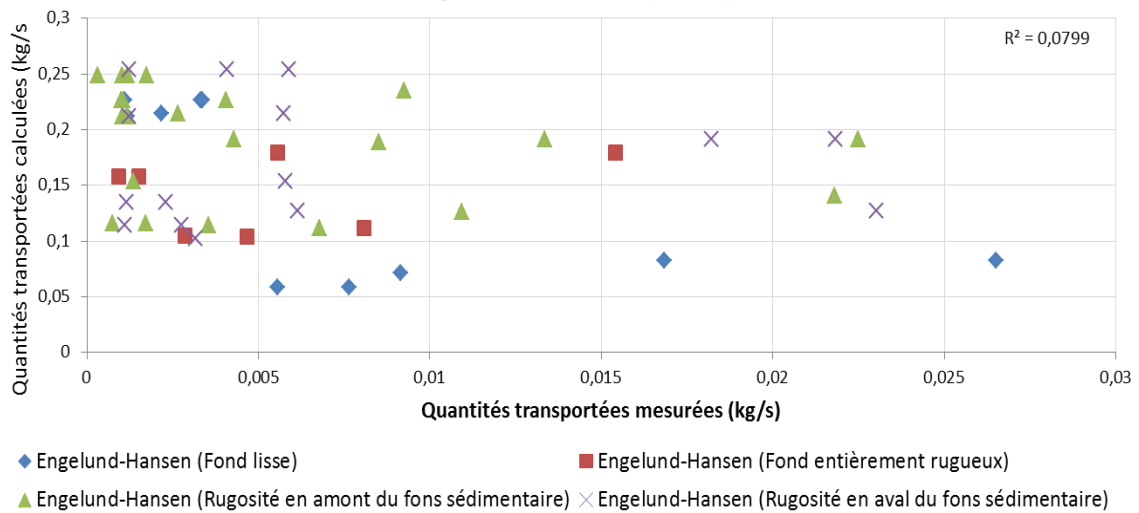
(c)

Figure 17 : écart Q_s estimé – Q_s mesuré (kg/s)

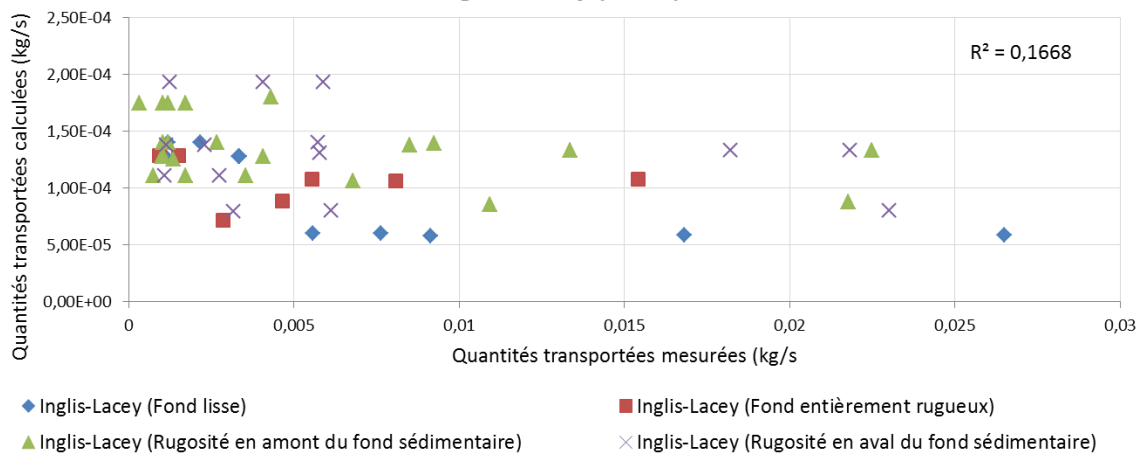
Yalin (1963)



Engelund-Hansen (1967)



Inglis-Lacey (1968)



(a)

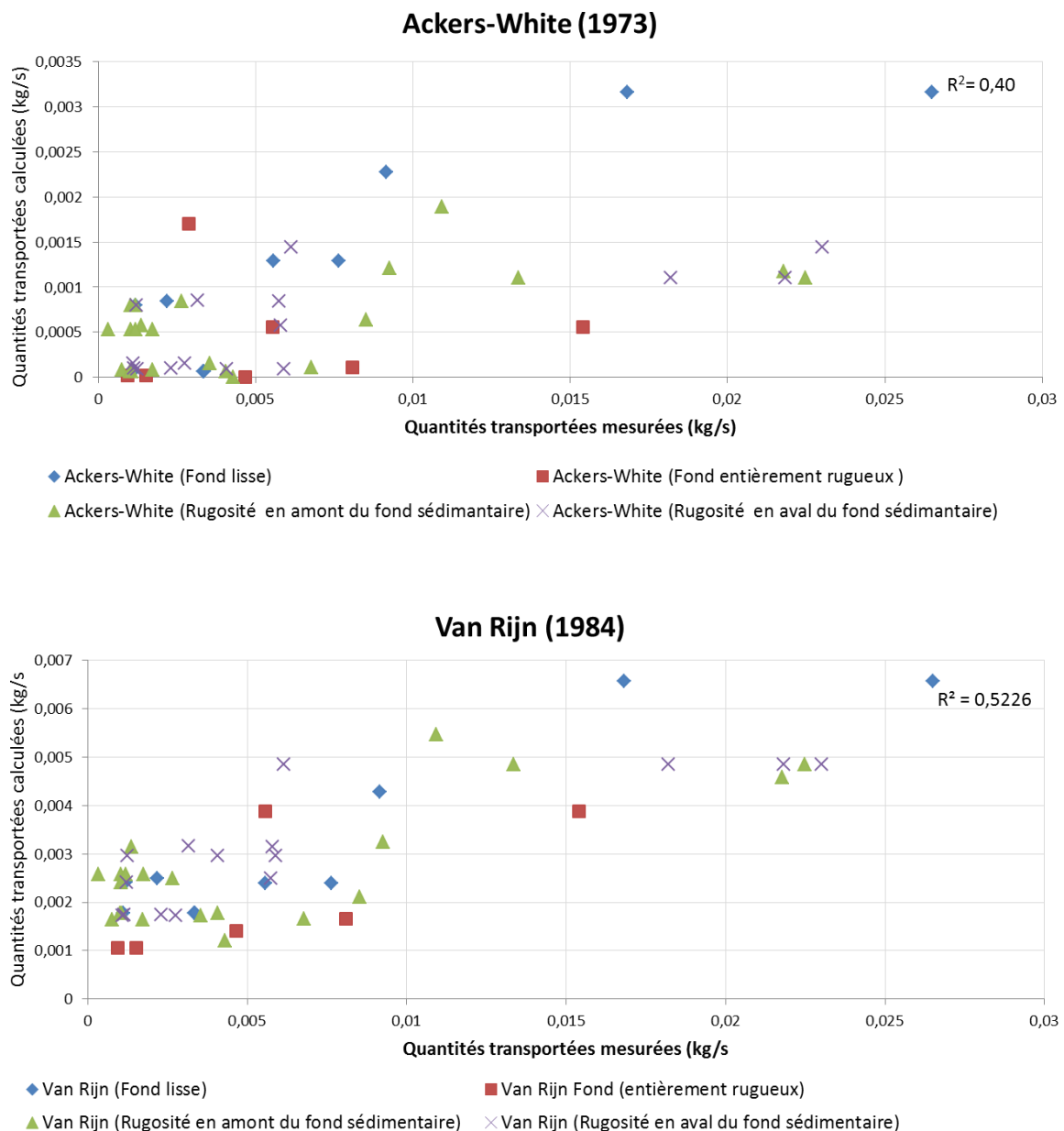


Figure 18 : relation entre Quantités du charriage estimées et mesurées

Les mesures effectuées des quantités de sédiments transportées vont donc nous permettre d'ajuster les coefficients des cinq équations de capacité de transport.

III-3 Mise en forme des équations

Les cinq modèles empiriques ont été établis en fonction des caractéristiques physiques du mouvement d'une particule solide dans un fluide (l'eau). Ils ont été ajustés cas par cas en fonction des besoins d'utilisateurs. Afin donc de modéliser le charriage en utilisant le dispositif expérimental choisi pour cette étude, nous devons donc ajuster les coefficients de

ces équations de capacité de transport en fonction des conditions d'écoulement et des caractéristiques du fond sédimentaire que nous souhaitons représenter.

Les équations de transport peuvent être mises sous la forme :

$$q = A a f(u) \dots \dots \dots (1)$$

Nous présentons ci-après les changements effectués sur les équations de transport afin d'obtenir cette forme simplifiée (1).

a- Yalin (1963)

$$q_b (kg/s/m) = \frac{\beta \cdot \bar{u} [\tau - \tau_{cr}]}{\gamma_s}$$

Avec $\beta = 0,5$

En remplaçant τ et τ_{cr} par leur valeur en fonction de la vitesse, cette formulation peut se mettre sans problème sous la forme :

$$q = A a u_*^3 - A b u_*$$

avec A : Coefficient à déterminer en fonction de nos conditions ;

a et b : Coefficients fixes dépendant des sédiments étudiés.

b- Engelund-Hansen (1967)

$$q = 0,05 \bar{u}^2 \sqrt{\frac{d_{50}}{(s-1)g}} \left(\frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gd_{50}} \right)^{2/3}$$

Cette équation demande quelques modifications pour s'adapter à la forme choisie (1)

On a $u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$ et $\frac{\rho_s - \rho}{\rho} = s - 1$

D'où $q = 0,05 \bar{u}^2 \sqrt{\frac{d_{50}}{(s-1)g}} \left(\frac{u_*^2}{(s-1)gd_{50}} \right)^{3/2}$

Ce qui peut s'écrire sous la forme :

$$q = A a u_*^5$$

avec $a = 0,05$

c- Inglis-Lacey (1968)

$$q = 0,562 \frac{(v g)^{1/3} \bar{u}^5}{w_s g^2 h}$$

Cette fois encore la simplification est immédiate et l'on obtient la formulation :

$$q = A a \bar{u}^5$$

avec A : Coefficient à déterminer en fonction de nos conditions expérimentales

$$\text{et } a = \frac{(v g)^{1/3}}{w_s g^2 h}$$

Cette équation est de la même forme que l'équation d'Engelund-Hansen, seuls les coefficients finaux sont différents.

d- Ackers-White (1973)

Nous présentons ici les principaux termes de la formulation d'Ackers-White, les détails sont donnés dans le chapitre I

$$q_t(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^1) = K \cdot \bar{u} \cdot D_{35} \cdot \left(\frac{\bar{u}}{u_*}\right)^n \cdot \left(\frac{Y - Y_{cr}}{Y_{cr}}\right)^m$$

avec

$$Y = \frac{u_*^n}{[(s-1) \cdot g \cdot D_{35}]^{0,5}} \cdot \left(\frac{\bar{u}}{2,46 \cdot \ln\left(\frac{10 \cdot h}{D_{35}}\right)}\right)^{1-n}$$

La formulation est un peu complexe et nous devons faire des choix quant au paramètre à faire varier. De ce fait, la valeur de n est fixé égale à 0 selon les conditions d'Ackers-White (1973) et seul le paramètre m était à déterminer.

Les équations sont alors mises sous la forme :

$$q_t(m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^1) = A \cdot u_* (B \cdot u_* - 1)^m$$

$$A = \frac{K \cdot D_{35}}{\left(\frac{K}{\ln\left(\frac{h}{Z_0}\right)}\right)^{n+1}}$$

$$B = ((s-1) \cdot g \cdot D_{35})^{-0,5} \left(2,46 \cdot \ln\left(\frac{10 \cdot h}{D_{35}}\right) \cdot \frac{K}{\ln\left(\frac{h}{Z_0}\right)}\right)^{(n-1)} \cdot Y_{cr}^{-1}$$

Avec $Z_0 = 3D_{90}$

e- Van Rijn (1984)

$$q_b = 0,053 D_{50}^{3/2} \sqrt{g(s-1)} \frac{T^{2,1}}{D_*^{0,3}}$$

Le paramètre T s'écrit en fonction des vitesses de frottements critiques (u_{*cr}) :

$$T = \frac{u_*^2 - u_{*cr}^2}{u_{*cr}^2}$$

En intégrant cette expression dans la formulation ci-dessus nous obtenons :

$$q = Aa \left(\frac{u_*^2}{u_{*cr}^2} - 1 \right)^b$$

Où A : paramètre que nous devons ajuster et a et b sont des coefficients fixes dépendant du sable étudié ($a = 0,053$ et $b = 2,1$ d'après Van Rijn).

III-4 Ajustement des coefficients

Pour chaque expérience (54 essais au total), on a calculé le ou les coefficients ajustables en fonction des points de mesures. Le calcul est effectué pour les quatre types de fond (entièrement lisse, entièrement rugueux, rugosité en amont et rugosité en aval). Ensuite, les coefficients sont comparés afin de permettre l'établissement d'une formulation moyenne susceptible d'approcher l'ensemble des points de mesures. Les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 8 : les coefficients ajustables de chaque type de fond

Type de fond	Coefficients ajustables				
	Yalin	Engelund-Hansen	Inglis-Lacey	Ackers-White	Van Rijn
Fond du canal entièrement lisse	0,0083	0,0014	3,21	-1,708	0,11
Fond du canal entièrement rugueux	0,00071	0,00056	1,32	-0,454	0,13
Rugosité en amont du fond sédimentaire	0,0006	0,00049	1,26	-0,854	0,096
Rugosité en aval du fond sédimentaire	0,00079	0,00065	1,71	-0,906	0,099

Les coefficients obtenus pour chaque formulation sont relativement proches les uns des autres pour les formules surtout ceux des équations d'Engelund-Hansen et Van Rijn, avec un écart à la moyenne qui varie entre 0,0000048 et 0,00406 pour la formulation d'Engelund-Hansen, 0,00254 et 0,1544 pour la formulation de Van Rijn, 0,000158 et 0,0729 pour Yalin et 0,0262 et 10,59 pour Inglis-Lacey. Mais ces coefficients diffèrent fortement par rapport aux coefficients d'origine, relatives à chaque équation.

Conclusion

Les caractéristiques du transport solide dépendent de plusieurs paramètres : débit liquide, hauteur d'eau, nature des particules. Le canal à flux continu disponible à notre laboratoire permet d'étudier les mécanismes de transport solide par charriage de façon plus au moins modélisée.

Des séries d'expériences ont été menées dans un canal expérimental dans le but de repérer les paramètres les plus influents sur le transport des sédiments et d'évaluer leurs effets. Ces essais ont été menés en faisant varier la vitesse d'écoulement, le diamètre des particules et en modifiant les caractéristiques du fond et l'arrangement des particules, au total 54 expériences distinctes ont été effectuées.

Les essais sont effectués à vitesse constante et sur une durée variable. Ces expériences nous a permis, dans un premier temps, de comparer les mesures expérimentales avec les résultats de calcul issue des formulations empiriques, mais surtout de mettre en évidence la différence des caractéristiques de variations. La comparaison souligne surtout les spécificités de nos dispositifs expérimentaux. Un essai préliminaire est effectuée en vitesse croissante afin d'identifier la vitesse de décollement et la taille du plus gros grain transportable dans le canal.

Les équations choisies donnent des approximations relativement semblables mais éloignées des mesures expérimentales. En effet, et malgré les erreurs commises lors des essais notamment les mesures de vitesse, l'équation de Van Rijn ajuste plus au moins les valeurs de quantités de sédiments mesurés. Par ailleurs la formule d'Inglis-Lacey visiblement très sensible au changement des conditions expérimentales, notamment la taille des sédiments et disposition du fond sédimentaire, a été écartées.

Les écarts entre les coefficients ajustables calculés pour les cinq formulations en tenant compte des mesures effectuées, sont dus au changement des conditions expérimentales d'un essai à l'autre.

Cette étude devra être complétée et améliorée pour une adaptation de la mise en équation aux caractéristiques d'un cours d'eau naturel telles que le masquage et l'hétérogénéité du fond sédimentaire, influençant considérablement la vitesse de décollement des sédiments.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Ackers p., White W. R. (1973) Sediment transport : a new approach and analysis. Journal of hydraulics division : 99 (HY11), ASCE, p : 2041-2060.

Benasla M., (2015) Caractéristique de la vase de dragage du barrage de l'Oued Fodda et valorisation tant que matériau de construction. Thèse de Doctorat LMD en Génie des Procédés, Université Mohamed BOUDIAF- Oran, 139 p.

Cayocca F., 1996 Modélisation morpho-dynamique d'une embouchure tidale : application aux passes d'entrée du bassin d'Arcachon. Thèse de doctorat en Océanographie, Université Bordeaux 1, 426 p.

Engelund F., Hansen E., (1967) A monograph on sediment transport in alluvial streams. Technisk Vorlag, Copenhagen, Demark, 62 p.

FAO (1993) Mesure sur terrain de l'érosion du sol et du ruissellement, Hudson N.W., Bulletin des sols, 68, FAO, Rome.

Gharbi M., (2016) Etude des crues et du transport sédimentaire associée - application au bassin versant de la Medjerda. Thèse de doctorat en Hydrologie, Hydrochimie, Sols, Environnement, Université de Toulouse, France, 191 p.

Granier J P (1983) La mesure in situ du débit solide des cours d'eau. Mémoire d'ingénieur diplômé ESGT, ORSTOM, 115 p.

Holmes, R; Garcia, M H. (2002). Velocity and Sediment Concentration Measurements over Bedforms in Sand-Bed Rivers., in Proceedings of the American Society of Civil Engineers Hydraulic Measurements and Experimental Methods Conference:1: pp.1-9.

Inglis-Lacey (1968) Discussion of "systematic evolution of river regime". Journal of the Water Ways and Harbor Div WWL: 94, ASCE, p 109-114.

Jodeau M., (2004) Etude expérimentale des mécanismes de transport solide par charriage torrentiel. Mémoire DEA, CEMAGREF Grenoble, division ETNA, 50 p.

Morgane H., (2013) Étude expérimentale du transport en rivière par charriage d'un sédiment bimodal : vers un modèle général du transport à plusieurs tailles de grains. Géomorphologie. Institut de physique du globe de paris - IPGP, 178 p.

Nikuradse J., (1933). Lois de l'écoulement dans les tuyaux rugueux, traduction dans le Comité consultatif national pour l'aéronautique (en anglais), note technique 1292, NACA, Washington 1950, 62 p.

[Oliveros C \(1996\)](#) Transport solides : modèle et conditions d'application en région PACA. Rapport BRGM/ R39474, 38 p.

[Pinto Martins D \(2008\)](#) Aménagements hydroélectriques et impacts sur la dynamique des flux d'eau et de sédiments. Le cas du haut Paraná, Brésil. Thèse de doctorat de Géographie, Aménagement et Urbanisme, Université Lumière Lyon 2, 243p.

[Shields A \(1936\)](#) Application de la mécanique de similarité et recherche sur la turbulence au mouvement du charriage... Traduit de : Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung (en allemand), Institut de recherche en ingénierie hydraulique, Berlin, 47 p.

[Turowski, J. M., D. Rickenmann, and S. J. Dadson, \(2010\)](#) The partitioning of the total sediment load of a river into suspended load and bedload: a review of empirical data, *Sedimentology*.

[Van Rijn L. C., \(1984\)](#) Sediment transport part I: bed load transport. *J. Hydr. Engi:* 110 (10), ASCE, p 1431 – 1456.

[Yalin M.S., \(1963\)](#) *Rivers Mechanics*. Pergmon press, 220 p.

Titre du mémoire : Etude expérimentale du transport des particules sphériques par charriage dans un canal à flux continu

Nom : Mizat / Nadjemi **Prénom :** Tourkia / Med Abd elbasset **Encadreur :** Guidoum Azeddine

Résumé : Le transport solide par charriage a été étudié d'un point de vue expérimental. Nous avons utilisé un canal à flux continu, les particules sont représentées par des sédiments naturels et des billes d'une gamme variée de diamètres. De nombreuses séries d'expériences ont été faites à différents débits liquides et diamètres des particules. L'objectif est de déterminer l'influence des variables d'écoulement sur le transport en charriage des particules sphériques à différents diamètres et dispositions. Des séquences de 15 secondes à plus de 23 minutes ont été filmées pour déterminer les caractéristiques de l'écoulement comme vitesses des particules, leur état de mouvement et la hauteur d'eau. La confrontation des résultats expérimentaux et ceux des formulations empiriques sélectionnées a souligné l'effet du type de fond, de la taille des particules et de leur arrangement sur la quantité des sédiments transportées. Cette modélisation a mis en évidence une évolution du transport de fond qui ne correspond plus aux équations de capacité de transport choisies dans cette étude. Les résultats de calcul par les équations choisies sont éloignés des mesures expérimentales, seule l'équation de Van Rijn peut-être plus au moins considérer comme représentative de ces mesures.

Mots clés : Canal, charriage, flux, sédiments, écoulement, frottement

عنوان المذكرة: دراسة تجريبية لنقل الجسيمات الكروية عن طريق الدفع في قناة تدفق مستمر
اللقب: ميزات / ناجمي **الاسم:** تركية / محمد عبد الباسط **المؤطر:** قيوم عز الدين
ملخص: لقد تم دراسة الحمولة الصلبة المنقولة عن طريق المياه تجريبيا، وذلك باستعمال قناة ذات تدفق متواصل. الحبيبات الصلبة المستعملة عبارة عن رواسب طبيعية أو كريات زجاجية ذات أقطار متنوعة. لهذا الغرض أجريت العديد من التجارب اعتمادا على تغير التدفق المائي و أقطار الحبيبات. الهدف من هذه التجارب هو معرفة و تحديد تأثير متغيرات التدفق المائي على تنقل الحبيبات حسب أقطارها، ترتيبها و تصميم الطبقات المكونة منها. كما تم تصوير مقاطع فيديو تتراوح مدتها بين 15 ثانية و 23 دقيقة لملاحظة و تحديد مختلف التدفقات المائية و الصلبة كسرعة الحبيبات، حركتها و ارتفاع الماء في القناة. لقد أوضحت المقارنة بين النتائج التجريبية و الصيغ أو المعادلات الحسابية التي تم اختيارها في هذه الدراسة مدى تأثير نوع القاعدة الحاملة للحبيبات، قياسات أقطارها و كذا تصميم الطبقات المكونة منه اعلى كمية المواد الصلبة المنقولة. من خلال هذه النمذجة أتضح لنا أن النتائج المتحصل عليها تجريبيا لا تتوافق مع تلك المحسوبة بواسطة الصيغ الحاسبة المختارة في هذه الدراسة. كما تبين ان جميع نتائج الحساب بالمعادلات المختارة بعيدة عن القياسات التجريبية ما عدا صيغة فان رايجين التي يمكن اعتبارها قريبة من هذه القياسات و ممثلة لها.

الكلمات المفتاحية: قناة، جر، تدفق، رواسب، صبيب، احتكاك.

Memory title: Experimental study of the transport of spherical particles by thrusting in a continuous flow channel

Name: Mizat / Nadjemi **first name :** Tourkia / Med Abd elbasset **directed by :** Guidoum Azeddine

Abstract: The bed-load discharge has been studied from an experimental point of view. We used open-channel a continuous stream, the particles are represented by natural sediments and balls of a varied diameter range. Many series of experiments have been made at different liquid flow rates and particle diameters. The aim is to determine the influence of flow variables on the bed-load of spherical particles in different diameters and arrangements. Sequences from 15 seconds to 23 minutes were filmed to determine the flow characteristics such as particle speeds, their state of motion and the water depth. The comparison of experimental results and selected empirical formulations highlighted the effect of bottom type, particle size and their arrangement on the amount of sediment transported. This modeling revealed an evolution of bed-load transport that no longer corresponds to the transport capacity equations chosen in this study. The calculation results by the chosen equations are far from the experimental measurements, only the equation of Van Rijn perhaps more or less as representative of these measures.

Keywords: Channel, bed-load, flux, sediment, flow, friction