

Comparaison croisée de différentes approches pour le transport sédimentaire par charriage et suspension

Catherine Villaret, Jean-Michel Hervouet
Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement.
Electricité De France, R & D.

Résumé

Différentes approches de complexité croissante sont ici comparées pour calculer l'évolution d'une dune constituée de sable fin, sous l'action d'un courant permanent. Les simulations ont été réalisées en utilisant le code morphodynamique Sisyphe du système Telemac et le module hydrodynamique Telemac-2D. Dans une première approche simplifiée, le taux de transport sédimentaire total (charriage + suspension) a été calculé par une formule semi-empirique. Dans un second calcul, la suspension est calculée en résolvant une équation de transport-diffusion. Une comparaison de ces différentes approches nous a conduit à modifier le champ convecteur pour le calcul de la concentration en suspension, afin de tenir compte du profil vertical de vitesse et de concentration. Si l'estimation du taux de transport total reste globalement équivalente (différence d'environ 10% entre les diverses méthodes), l'approche simplifiée donne des résultats qualitativement différents. Dans l'approche couplée (charriage/suspension), la prise en compte d'un champ convecteur plus réaliste conduit à une diminution du transport en suspension.

Abstract

The evolution of a sand dune under the effect of a steady flow is studied with different approaches, in the framework of the Telemac system, with the morphological module Sisyphe and the hydrodynamic module Telemac-2D. First a semi-empirical formula of total transport is tested, then, in a second approach, suspension is treated apart with a depth-averaged advection-diffusion equation. The advection field is then adapted to the concentration profile on the vertical, which leads to a reduction of the suspended transport rate.

Mots-clefs

hydrodynamique, morphodynamique, charriage, suspension.

1. Introduction

Le cadre de ces travaux est le système Telemac d'EDF R&D, avec ses deux modules hydrodynamiques Telemac-2D (équations de Saint-Venant en dimension 2) et Telemac-3D (équations de Navier-Stokes tridimensionnelles à surface libre), et son module sédimentaire Sisyphe (co-propriété CETMEF, UTC, EDF,

SOGREAH) qui résout l'équation d'évolution des fonds avec différentes formules de transport (cf. réf. [5]). Les progrès les plus récents proviennent d'une approche intégrée, les logiciels hydrodynamique et morphodynamique échangeant leurs résultats à chaque pas de temps. Cette méthode dite de couplage 'interne' permet la réactualisation des fonds à chaque pas de temps, et assure une meilleure stabilité des calculs (cf. réf. [4]).

Au-delà de cette faisabilité technique se pose rapidement la question de la fiabilité des résultats et de la stratégie de modélisation à adopter. La comparaison avec des mesures et des situations réelles restera toujours bien entendu le critère principal, mais la comparaison croisée de différentes approches est aussi pleine d'enseignements.

Nous étudions ici le cas du mouvement d'une dune sous l'action d'un courant, afin de comparer les deux approches suivantes :

(1) couplage de Telemac-2D avec Sisyphe, avec une formule de transport total, incluant charriage et suspension (formule de Engelund-Hansen ou formule de Bijker),

(2) couplage de Telemac-2D avec Sisyphe avec traitement différent pour le charriage et la suspension : le transport par charriage est calculé par la formule de Bijker, tandis qu'on résout une équation de transport-diffusion, bi-dimensionnelle, pour calculer la suspension.

Nous présentons ensuite une modification de l'approche (2), dans laquelle le champ convecteur est modifié pour tenir compte du gradient de vitesse et de concentration sur la verticale. Les effets du couplage charriage/suspension et de la prise en compte du champ convecteur sont discutés sur le cas test considéré.

2. Présentation du cas test

Nous étudions l'évolution d'une dune bi-dimensionnelle, en reprenant le cas test présenté dans le manuel de validation de Sisyphe (cf. réf. [6]). Le domaine de modélisation est un canal rectangulaire, de longueur 16 m pour une largeur de 1,10 m, représenté par un maillage triangulaire de 1600 éléments réguliers, de dimension 0,10 m x 0,20 m.

A l'instant initial, la dune a une hauteur de 10 cm pour 8 m de longueur. Elle est constituée d'un sable fin de diamètre uniforme $D_{50} = 0,150$ mm. Le coefficient de frottement est constant et correspond à un coefficient de Strickler de $50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. La simulation dure 10 heures, soit 36000 pas de temps de 1 s.

Dans Telemac-2D et Sisyphe, la contrainte de frottement exercée par l'écoulement sur le fond, notée τ_0 , est reliée au courant moyen U par le biais d'un coefficient de frottement quadratique, noté C_D :

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \rho C_D U^2 \quad (1)$$

ρ est la masse volumique de l'eau. C_D peut être relié au coefficient de Strickler S_t par la relation :

$$C_D = \frac{2g}{S_t^2} \frac{1}{h^{1/3}} \quad (2)$$

avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ l'accélération de la pesanteur et h la hauteur d'eau.

Le débit liquide imposé à l'entrée est $Q=0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une hauteur d'eau imposée en sortie de $0,6 \text{ m}$. Le frottement, calculé par Telemac-2D, varie de $0,65 \text{ N/m}^2$ dans les parties planes, à l'amont et à l'aval, pour atteindre une valeur maximale de $1,05 \text{ N/m}^2$, au-dessus de la crête.

Pour le calcul sédimentaire, le transport solide à l'entrée du canal est calculé en supposant des conditions d'équilibre, tandis que l'évolution est imposée à zéro.

3. Approche simplifiée - Formule de transport total

L'approche la plus simple consiste à utiliser une formule semi-empirique de la littérature pour calculer le taux de transport total (charriage + suspension), noté Q_s . L'équation d'évolution des fonds s'écrit :

$$(1-n) \frac{\partial Z_f}{\partial t} + \text{div} \left(\vec{Q}_s \right) = 0 \quad (3)$$

avec $n = 0,4$ la porosité du lit, et Z_f la cote du fond.

Un premier calcul a été réalisé avec la formule de Engelund-Hansen, notée EH recommandée pour des sables fins (cf. réf. [2]). Un second calcul a été réalisé en utilisant la formule de Bijker (cf. ref [1]). La valeur du coefficient semi-empirique b est prise égale à 2.

Ces deux formules permettent de calculer le taux de transport total, par charriage et en suspension, en fonction du paramètre de Shields, défini par :

$$\theta = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho)gD} \quad (4)$$

avec ρ_s la densité du sédiment.

Dans ces deux formules, la contrainte de frottement doit être corrigée pour tenir compte de la présence éventuelle de formes de fond. La contrainte de frottement de peau est ensuite reliée à la contrainte totale par le biais d'un coefficient de correction ($\theta_p = \mu\theta$, avec $\mu < 1$), μ est calculé en fonction de la rugosité de peau ($k_{sp} = 3D_{50}$), en suivant la méthode proposée par Bijker (cf. ref [1]).

Les taux de transport calculés par ces deux formules sont comparés sur la figure 1.a., et les valeurs caractéristiques obtenus au niveau de la crête et du creux sont indiquées dans le tableau 1.

Dans les parties amont et aval de la dune, pour des valeurs modérées du frottement, les valeurs obtenues par les formules de Bijker et EH sont quasiment égales. Sur le sommet de la dune, la formule de Bijker surestime le taux de transport total (de 10% environ) par rapport à la formule EH.

La formule de Bijker formule présente l'intérêt de pouvoir estimer indépendamment les deux composantes du transport, par charriage Q_{sc} et en

suspension Q_{ss} . Une comparaison des deux composantes montre que la suspension est ici le mode de transport dominant ($Q_{ss} > Q_{sc}$).

Les évolutions calculées par ces deux formules sont illustrées sur la figure 1.b. La vitesse de propagation de la dune, proportionnelle à la différence de taux de transport entre la crête et le creux, est plus faible lorsqu'on utilise la formule EH que celle de Bijker. Pour ces deux formules, on obtient qualitativement les mêmes résultats : la dune se raidit au fur et à mesure de son déplacement. Sa hauteur se maintient quasi-constante, tandis que l'on observe un raidissement du front sur la face aval.

	(a) Crête	$\theta_{max}=0.44$	(b) Creux	$\theta_{min}=0.27$
EH	Q_s	$8.7 \cdot 10^{-6}$	Q_s	$3.1 \cdot 10^{-6}$
Bijker (b=2)	Q_s	$9.8 \cdot 10^{-6}$	Q_s	$3.0 \cdot 10^{-6}$
	charriage	$2.4 \cdot 10^{-6}$	charriage	$9.5 \cdot 10^{-7}$
	suspension	$7.5 \cdot 10^{-6}$	suspension	$2.1 \cdot 10^{-6}$

Tableau 1: comparaison des formules de transport total (unités : m^2/s)

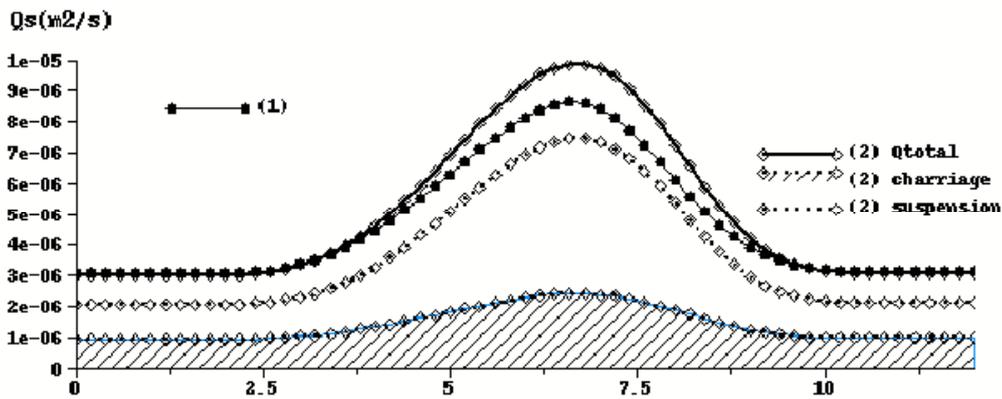


Figure 1.a : variation du taux de transport total calculé par les formules de transport total : (1) EH et (2) Bijker.

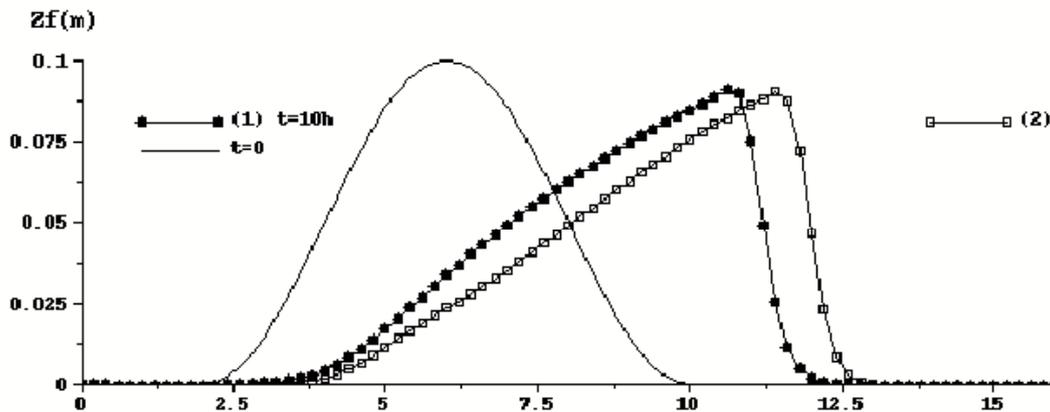


Figure 1.b : évolution de la dune calculée par Sisyphe avec les formules de transport total : (1) EH et (2) Bijker.

4. Couplage de Telemac-2D et Sisyphe, charriage et suspension distincts

4.1. Equation de transport-diffusion pour la concentration

On considère classiquement que les sédiments en suspension se comportent comme un traceur qui suit l'écoulement moyen et turbulent, en tenant compte d'une composante additionnelle verticale qui est égale à la vitesse de chute des particules (notée W_c). L'équation de transport-diffusion, résolue par Sisyphe, est obtenue en intégrant sur la verticale l'équation de transport-diffusion tri-dimensionnelle. Elle s'écrit :

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_t \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma_t \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right) + \frac{(E - D)_{z=a}}{h} \quad (5)$$

\bar{C} est ici la concentration moyenne sur la verticale, \bar{U} et \bar{V} sont les deux composantes de la vitesse moyenne. γ_t est le coefficient de diffusivité turbulente horizontale, qui intègre ici aussi un terme de dispersion dû à l'effet de moyenne sur la verticale. E et D sont les flux d'érosion et de dépôt, calculés à une hauteur de référence, notée a, située à l'interface entre la couche de charriage et la suspension. L'équation d'évolution des fonds doit tenir compte de ces deux termes supplémentaires et s'écrit :

$$(1 - n) \frac{\partial Z_f}{\partial t} + \text{div}(Q_c) + (E - D)_{z=a} = 0 \quad (6)$$

avec Z_f , la cote du fond, n la porosité et Q_c le taux de transport par charriage.

4.2. Flux à l'interface

Le terme d'échange à l'interface s'exprime en fonction d'une concentration d'équilibre, notée C_{eq} , qui est, par définition, la concentration au niveau de référence, en $z=a$, lorsque l'équilibre est atteint ($E-D=0$). On écrit :

$$(E-D)_{z=a} = W_c (C_{eq} - C_{z=a}).$$

La concentration au fond est extrapolée à partir de la concentration moyenne \bar{C} , en supposant que les concentrations suivent un profil de Rouse. Lorsque l'équilibre est atteint ($C_{z=a} = C_{eq}$), seul le taux de transport par charriage participe alors aux évolutions du fond.

La concentration à l'équilibre est calculée ici en utilisant la formule semi-empirique de Zyserman et Fredsoe [6], le niveau de référence étant pris à la hauteur de la rugosité de peau ($a = 3D_{50}$).

$$C_{eq} = \frac{0.331(\theta_p - \theta_c)^{1.75}}{1 + 0.72(\theta_p - \theta_c)^{1.75}} \quad (7)$$

θ_c représente ici la contrainte critique d'entraînement, et θ_p la contrainte de peau adimensionnelle calculée en utilisant la méthode de correction décrite au paragraphe 3.

5. Modification du champ convecteur pour le calcul de la suspension

Le champ convecteur était jusqu'à maintenant le champ de vitesse moyen sur la verticale. Cette approche est valable pour des traceurs homogènes sur la verticale, ce qui n'est pas le cas du sédiment en suspension, et il faut examiner de façon plus approfondie l'opération de moyenne sur la verticale de l'équation de transport tridimensionnelle, écrite ci-après sous forme conservative :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{div}[C\vec{U}] = 0 \quad (8)$$

Cette intégration se fait entre $z = a$ (avec $a \ll h$) jusqu'à $z = h$. On aboutit alors en utilisant l'équation de continuité de Saint-Venant à l'équation suivante pour la concentration moyenne, les valeurs moyennées étant signalées par une barre :

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \text{div}[\bar{C}\bar{\vec{U}}] = 0 \quad (9)$$

Cette équation n'apparaît comme une équation de convection de la concentration moyenne \bar{C} que si on l'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \text{div}\left[\frac{\bar{C}\bar{\vec{U}}}{\bar{C}}\bar{C}\right] = 0 \quad (10)$$

En toute rigueur le champ de convection n'est donc pas la vitesse moyenne sur la verticale, mais une vitesse moyenne pondérée par la concentration. On résoudra finalement l'équation complète suivante :

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + U_{conv} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + V_{conv} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_t \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma_t \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right) + \frac{(E-D)_{z=a}}{h} \quad (11)$$

$$\text{avec : } U_{conv} = \frac{\int_a^h U(z)C(z) dz}{\int_a^h C(z) dz} \quad \text{et} \quad V_{conv} = \frac{\int_a^h V(z)C(z) dz}{\int_a^h C(z) dz}.$$

Le rapport entre cette nouvelle vitesse moyenne et la moyenne sur la verticale est a priori inconnu dans un calcul bidimensionnel. Nous l'évaluons en supposant un profil logarithmique sur les vitesses et un profil de Rouse sur les concentrations.

6. Effet de la suspension sur le calcul de l'évolution de la dune

Nous reprenons ici le cas test de l'évolution de la dune, avec prise en compte du couplage charriage/suspension. Le transport par charriage est comme dans le cas précédent calculé par la formule de Bijker. La figure 2.a montre la variation des deux composantes du transport le long de la dune. Dans un premier calcul, le champ convecteur est le champ de vitesse moyenne, dans le second calcul, le champ convecteur est corrigé en suivant la méthode décrite dans le paragraphe précédent. Dans cet exemple, qui correspond à un frottement intense et un sable fin, la composante du transport en suspension est dominante. La correction du champ convecteur aboutit à une réduction du taux de transport en suspension.

Les valeurs obtenues pour le transport total sont globalement en accord avec celles obtenues par la formule de transport total EH.

Nous comparons sur la figure 2.b, les évolutions de la dune calculées par la méthode couplée charriage/suspension avec et sans prise en compte de la correction sur le champ convecteur. On observe une diminution de la hauteur de la dune par rapport au cas avec transport total. La modification du champ convecteur a dans le cas présent assez peu d'effet : la propagation est ralentie et le front est plus raide que pour une convection par les vitesses moyennes.

7. Conclusion

Nous comparons ici plusieurs méthodes de calcul de l'évolution d'une dune sous l'effet d'un courant permanent. L'utilisation d'une formule de transport total ne permet pas de tenir compte de l'effet de la suspension qui conduit ici à une réduction de la hauteur de la dune. Les résultats de l'approche couplée charriage/suspension sont considérés comme plus réalistes, en accord qualitativement avec la littérature (cf. [3]).

Les tests de sensibilité doivent être approfondis (choix de la hauteur de référence et de la formule pour le calcul de la concentration de référence). Une comparaison avec des mesures détaillées serait par ailleurs souhaitable pour préciser ces nouveaux degrés de liberté. Une comparaison avec le modèle de transport en suspension (sans charriage) développé à l'Ifremer et appliqué par Waeles [7] sur un cas test similaire mais avec des dimensions plus réalistes est par ailleurs envisagée.

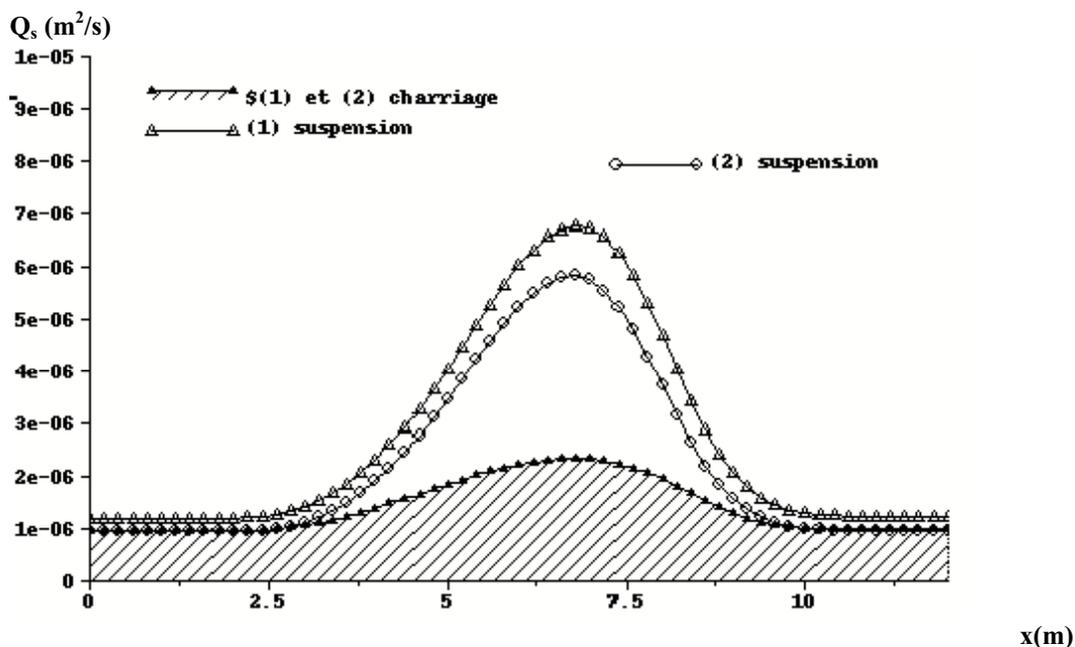


Figure 2.a : Effet de la correction des vitesses de convection sur le calcul de la variation du taux de transport par charriage et suspension le long de la dune (calculs (1) et (2), avec ou sans correction du champ convecteur)

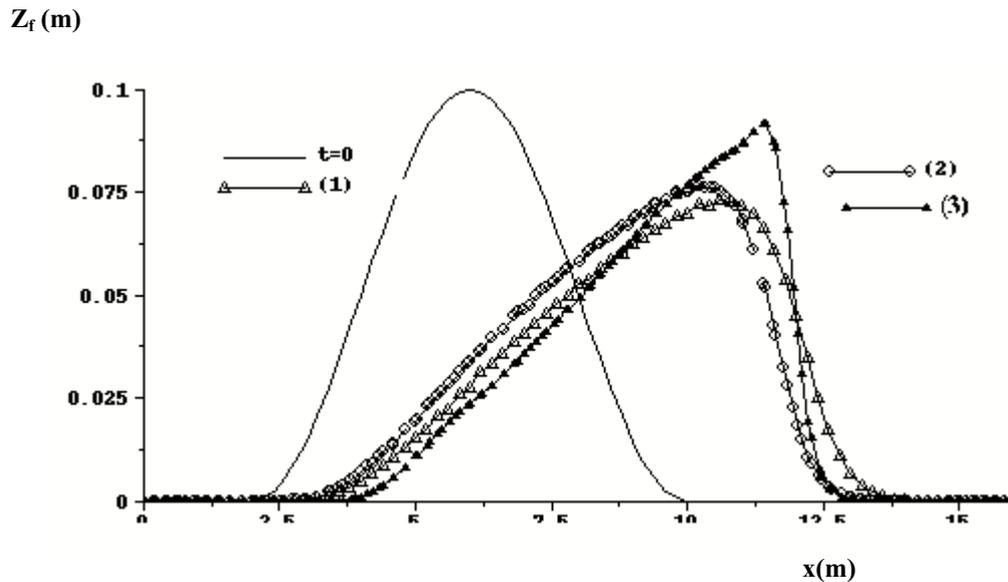


Figure 2.b : Comparaison des approches couplées charriage/suspension (calculs (1) et (2) avec ou sans correction du champ convecteur) avec l'approche simplifiée (3) : formule de Bijker)

Références

- [1] Bijker, E.W. : Mechanics of sediment transport by the combination of waves and current. Design and Reliability of Coastal Structures, 23rd Int. Conf. On Coastal Engineering, 147-173. 1992
- [2] Engelund F., Hansen E. : A monograph on sediment transport in sediment streams. 3ième edition Techn. Univers. Of Denmark, Copenhagen, Danemark. 1967.
- [3] Fredsoe J., Deigaard, R., Mechanics of coastal sediment transport, Vol 3, Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific 1992/
- [4] Hervouet, J.-M. et Villaret, C. : Simulation numérique des évolutions sédimentaires, importance d'une approche intégrée. VIIIèmes journées nationales Génie côtier Génie civil. Compiègne. 2004
- [5] Villaret, C. : Sisyphe Realease 5.5, User manual. EDF Report HP-76/05/009/A. 2005.
- [6] Villaret, C. et Gonzales de Linares, M. : Dossier de validation de Sisyphe version 5.5, Rapport EDF HP-76/05/014. 2005
- [7] Waeles, B., 2005: Modélisation morphodynamique de l'embouchure de la Seine; Thèse de Doctorat, Université de Caen Basse-Normandie.
- [8] Zyserman, JA, Fredsoe, J. : Data analysis of bed concentration of suspended sediment, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, N°9, pp 1021-1042. 1994