
Calcul des évolutions sédimentaires : le traitement des fonds rigides

Jean-Michel Hervouet — Cécile Machet — Catherine Villaret

Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement

Electricité de France

6 Quai Watier, F-78401 Chatou cedex

{j-m.hervouet, cecile.machet, catherine.villaret}@edf.fr

RÉSUMÉ. On propose dans cet article une nouvelle méthode pour le traitement des fonds rigides dans les codes de calcul d'évolution morphodynamique. Les évolutions du fond sont dues à la divergence du transport solide, et la méthode proposée consiste à assurer, par une limitation de ce transport solide, une valeur de sa divergence qui interdise une érosion des fonds rigides. Les détails de la technique sont présentés dans le cadre de la méthode des éléments finis.

ABSTRACT. In this paper a new method is proposed for the treatment of rigid beds in morphodynamic models. The divergence of the sand transport rate is responsible for the evolution of bed elevation, and the proposed method consists of limiting the transport in order to reduce its divergence so that the rigid bed is not eroded. The technique is detailed in the framework of the finite element theory.

MOTS-CLÉS : transport saturé, sédiments, fonds rigides, éléments finis.

KEYWORDS: saturated transport, bedload transport, rigid bed, finite elements.

1. Introduction

Les formules classiques de transport sédimentaire habituellement mises en œuvre dans les codes de morphodynamique représentent le transport saturé, c'est-à-dire le débit solide que peut transporter un écoulement turbulent à l'équilibre (sans érosion ni dépôt), avec un lit sédimentaire. Prenons l'exemple de la formule de Meyer-Peter et Müller, elle donne le débit solide linéique Q_s sous la forme :

$$Q_s = 0 \text{ si } \theta < \theta_c$$

$$Q_s = 8 \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} g d^3 (\theta - \theta_c)^{3/2}} \text{ si } \theta > \theta_c$$

ρ_s est la masse volumique du sédiment, ρ celle de l'eau, g l'accélération de la pesanteur, d le diamètre des grains. θ est le paramètre de Shields, contrainte de cisaillement sans dimension définie par $\theta = \frac{\rho u_*^2}{(\rho_s - \rho)gd}$, où u_* est la vitesse de frottement. θ_c est le nombre de Shields critique, contrainte limite de début d'entraînement, donnée par la courbe de Shields et dépendant du nombre de Reynolds $\frac{u_* d}{\nu}$. Selon la formule de Meyer-Peter et Müller, il y a donc charriage sur le fond dès lors que le courant est suffisant pour que la contrainte θ dépasse θ_c , or cette formule de transport solide ne prend pas en compte l'épaisseur locale de sédiment, et suppose simplement, c'est la notion de transport saturé, qu'il existe toujours et partout des sédiments mobilisables en quantité infinie. Or la présence de zones dites non érodables, constituées soit de socles rocheux, soit d'ouvrages submersibles, limite à l'évidence le stock de sédiments disponibles et requiert un traitement particulier. Les solutions consistant à limiter la valeur du transport saturé Q_s lorsque le socle rigide est atteint sont simples à mettre en œuvre mais souffrent cependant de plusieurs défauts : l'érosion du fond rigide reste possible si la valeur de la divergence de Q_s n'est pas contrôlée, et la discontinuité du transport solide entraîne des oscillations ou des instabilités numériques. Citons cependant la méthode de Malcherek (1997), avec laquelle le fond rigide n'est pas érodé, au prix d'itérations du processus de correction de Q_s . La méthode proposée ici est de mise en œuvre plus complexe et ne peut faire l'économie d'un examen précis de la méthode de résolution de l'équation de transport du sédiment, elle sera présentée dans le cadre de la théorie des éléments finis mais rien ne s'oppose à son extension à un formalisme de volumes finis. On s'attachera à assurer les propriétés essentielles que doit présenter un transport de sédiments au-dessus d'un fond rigide : pas d'érosion du fond rigide, pas de blocage du sédiment provenant de l'amont au passage au-dessus d'un fond rigide, conservation rigoureuse de la masse totale de sédiment et, dans la mesure du possible, pas d'oscillations ni d'instabilités numériques.

2. Principe général de la méthode

On souhaite donc résoudre l'équation de l'évolution sédimentaire :

$$\frac{\partial Z_f}{\partial t} + \text{div}(Q_s) = 0 \quad [1]$$

en assurant que la cote du fond Z_f ne descendra pas en dessous d'une cote des fonds non-érodables Z_r . Q_s tient compte ici d'un coefficient de porosité $K = \frac{1}{1-p}$, où p est la porosité du lit.

La première idée est de multiplier le terme $\text{div}(Q_s)$ par un coefficient correcteur f variable en espace et en temps et compris entre 0 et 1 pour limiter les évolutions de Z_f . Par exemple, si les fonds rigides sont à découvert, la fonction f vaudra 0, et s'il n'y a aucun risque d'érosion du socle, elle vaudra 1. Cependant, si l'on résout directement l'équation $\frac{\partial Z_f}{\partial t} + f \text{div}(Q_s) = 0$, on ne peut plus assurer la conservation de la masse de traceur. L'idée du limiteur f va cependant être conservée, mais réalisée différemment. La conservation de la masse est en effet mathématiquement assurée si l'on modifie Q_s à l'intérieur de la divergence.

La deuxième idée consiste donc à modifier la valeur de Q_s en multipliant chacune des valeurs du débit saturé par un coefficient g , variable lui aussi en temps et en espace, tel que $\text{div}(Q_s)$ soit multiplié par un coefficient inférieur ou égal au limiteur f souhaité. On va donc résoudre : $\frac{\partial Z_f}{\partial t} + \text{div}(gQ_s) = 0$, ce qui assure bien la conservation de la masse de sédiment. Il faudra vérifier que la valeur de g obtenue n'est pas abusivement petite, ce qui risquerait de bloquer le transport à mauvais escient.

L'algorithme va ainsi se faire en deux étapes :

1. Calcul du coefficient f minimum à apporter à la divergence.
2. Calcul du coefficient g à apporter au débit solide pour obtenir au minimum un coefficient f sur la divergence.

Ces deux étapes exigent de rentrer dans le détail de la résolution numérique.

3. Calcul du coefficient f minimum de correction de la divergence du transport solide saturé

La difficulté d'une correction locale est que la modification du débit solide d'un point d'un maillage change la valeur de la divergence de ce même débit pour les

points voisins. Les corrections locales induisent ainsi des variations de fond dans leur voisinage, et c'est d'ailleurs l'origine des défauts des méthodes simples mentionnées dans l'introduction. L'idée est de calculer la décote maximum de sédiment que pourra donner n'importe quelle correction, c'est-à-dire n'importe quel jeu de coefficients g compris entre 0 et 1. On anticipe ainsi sur les corrections qui seront appliquées aux débits solides, en prévoyant le cas le plus défavorable pour l'érosion. Si cette décote maximum est supérieure à la couche de réserve, on corrigera alors les débits des points responsables de la décote, appelés points érodants. Or la variation de cote en un point est due à une somme de flux entrants et de flux sortants. Le cas le plus défavorable est ainsi que les flux entrants soient multipliés par une fonction g nulle, et les flux sortants soient inchangés. En limitant la divergence du débit solide en fonction de cette décote maximum possible, on pourra assurer que le fond Z_f reste toujours supérieur à Z_r .

Nous considérons désormais la formulation variationnelle de l'équation de transport en éléments finis de Galerkin, avec des fonctions de base égales aux fonctions tests et notées ψ_i pour chaque point du maillage d'indice i . Si Δt est le pas de temps, la discrétisation de $\frac{\partial Z_f}{\partial t}$ s'écrit $\frac{Z_f^{n+1} - Z_f^n}{\Delta t}$, ou, pour simplifier : $\frac{\Delta Z_f}{\Delta t}$. La formulation variationnelle donne pour tout degré de liberté i :

$$\int_{\Omega} \frac{\Delta Z_f}{\Delta t} \psi_i d\Omega + \int_{\Omega} \psi_i \operatorname{div}(\vec{Q}) d\Omega = 0 \quad [2]$$

où Ω est le domaine de calcul. La matrice de masse issue du terme contenant la dérivée en temps peut être ensuite « lumpée » pour obtenir :

$$\frac{\Delta Z_f}{\Delta t} \int_{\Omega} \psi_i d\Omega + \int_{\Omega} \psi_i \operatorname{div}(\vec{Q}) d\Omega = 0 \quad [3]$$

et donc enfin :

$$\Delta Z_f = -\Delta t \frac{\int_{\Omega} \psi_i \operatorname{div}(\vec{Q}) d\Omega}{\int_{\Omega} \psi_i d\Omega} \quad [4]$$

On vérifie que les divergences positives, c'est-à-dire les flux sortants, font bien décroître Z_f .

Pour obtenir le calcul le plus pessimiste de $\int_{\Omega} \psi_i \operatorname{div}(\vec{Q}) d\Omega$, il faut regarder son calcul au niveau élémentaire, sur un triangle avec des points indexés 1, 2 et 3, afin

de faire apparaître les flux entrant et sortant de ce triangle. En posant X_1, X_2 et X_3 les abscisses des 3 points du triangle et Y_1, Y_2, Y_3 leurs ordonnées, ainsi que $\vec{Q}_1 \begin{pmatrix} QX1 \\ QY1 \end{pmatrix}$ débit solide du point 1, $\vec{Q}_2 \begin{pmatrix} QX2 \\ QY2 \end{pmatrix}$ débit solide du point 2, $\vec{Q}_3 \begin{pmatrix} QX3 \\ QY3 \end{pmatrix}$ débit solide du point 3, on trouve :

$$\int_{\Omega} \psi_1 \operatorname{div}(\vec{Q}) d\Omega = \int_{\Omega} \psi_2 \operatorname{div}(\vec{Q}) d\Omega = \int_{\Omega} \psi_3 \operatorname{div}(\vec{Q}) d\Omega =$$

$$\left((Y_2 - Y_3) * QX1 + (X_3 - X_2) * QY1 \right.$$

$$+ (Y_3 - Y_1) * QX2 + (X_1 - X_3) * QY2$$

$$\left. + (Y_1 - Y_2) * QX3 + (X_2 - X_1) * QY3 \right) / 6$$

On trouve ainsi des flux de la forme : $\frac{\vec{Q}_1 \cdot \vec{n}_1 + \vec{Q}_2 \cdot \vec{n}_2 + \vec{Q}_3 \cdot \vec{n}_3}{6}$ avec :

$\vec{n}_1 \begin{pmatrix} Y_2 - Y_3 \\ X_3 - X_2 \end{pmatrix}$ vecteur normal au segment des points 2 et 3, et de même longueur que ce segment. Et de même : $\vec{n}_2 \begin{pmatrix} Y_3 - Y_1 \\ X_1 - X_3 \end{pmatrix}$ et $\vec{n}_3 \begin{pmatrix} Y_1 - Y_2 \\ X_2 - X_1 \end{pmatrix}$ (voir schéma ci-dessous).

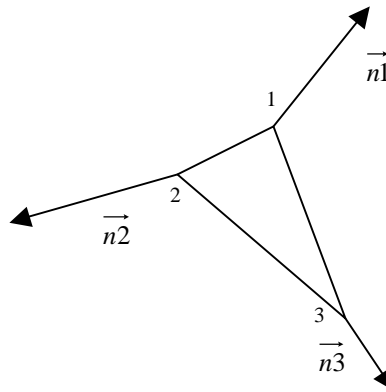


Schéma 1. Normales extérieures au triangle

Il suffit donc d'éliminer les flux négatifs (correspondant à un sédiment entrant car les normales, ici, sont extérieures au triangle) pour avoir une divergence pessimiste. Afin de se garantir contre toute correction de Q_s qui risquerait d'induire

une érosion du fond rigide, on calculera donc une divergence dite pessimiste, égale à :

$$\frac{\max(\bar{Q}_1, \bar{n}_1, 0) + \max(\bar{Q}_2, \bar{n}_2, 0) + \max(\bar{Q}_3, \bar{n}_3, 0)}{6}$$

Ce calcul est cependant très pessimiste pour un point intérieur au domaine car son propre débit solide ne contribue pas à la divergence (il ne dépend que du débit aux frontières de sa fonction de base). On peut donc l'annuler dans le calcul élémentaire, car il le sera lors de l'assemblage de tous les éléments entourant le point. Si l'on dispose d'un marqueur B égal à 0 pour un point intérieur au domaine et à 1 pour un point de bord, on peut affirmer que le terme de divergence sera encore pessimiste avec les valeurs :

$$\int_{\Omega} \psi_1 \operatorname{div}(\bar{Q}) d\Omega = \frac{B1 * \max(\bar{Q}_1, \bar{n}_1, 0) + \max(\bar{Q}_2, \bar{n}_2, 0) + \max(\bar{Q}_3, \bar{n}_3, 0)}{6} \text{ (contribution au point 1)}$$

$$\int_{\Omega} \psi_2 \operatorname{div}(\bar{Q}) d\Omega = \frac{\max(\bar{Q}_1, \bar{n}_1, 0) + B2 * \max(\bar{Q}_2, \bar{n}_2, 0) + \max(\bar{Q}_3, \bar{n}_3, 0)}{6} \text{ (contribution au point 2)}$$

$$\int_{\Omega} \psi_3 \operatorname{div}(\bar{Q}) d\Omega = \frac{\max(\bar{Q}_1, \bar{n}_1, 0) + \max(\bar{Q}_2, \bar{n}_2, 0) + B3 * \max(\bar{Q}_3, \bar{n}_3, 0)}{6} \text{ (contribution au point 3)}$$

B1, B2 et B3 sont les valeurs du marqueur B pour les points 1, 2 et 3 du triangle. Ce calcul modifié de la divergence donne directement l'évolution maximale quelle

que soit la correction de Q_s qui sera appliquée :
$$\Delta Z_{\max} = -\Delta t \frac{\left(\int_{\Omega} \psi_i \operatorname{div}(\bar{Q}) d\Omega \right)_{\text{pessimiste}}}{\int_{\Omega} \psi_i d\Omega}.$$

Cette valeur est évidemment dépendante de Δt , un pas de temps trop grand conduira donc à une limitation artificielle du débit solide. On calcule ensuite la variation maximum admissible en tenant compte des fonds rigides, c'est-à-dire en fait l'épaisseur du lit : $Z_f - Z_r$

Un coefficient f multiplicateur de la divergence peut être par exemple : $f = \frac{\min(Z_f - Z_r, \Delta Z_{\max})}{\Delta Z_{\max}}$. f vaut 1 s'il n'y a pas de fonds rigides, f est comprise entre 0 et 1 si l'épaisseur du lit n'est pas suffisante.

4. Calcul du coefficient g minimum à apporter au débit solide

Nous avons trouvé une limitation à apporter au terme de divergence, et nous voulons maintenant assurer cette limitation en ne jouant que sur une correction de Q_s . Si f était constant en espace, il suffirait par exemple de prendre $g = f$. Lorsque f est variable en espace, on peut se limiter à multiplier par f uniquement les débits solides des voisins d'un point qui contribuent à son érosion (y compris le point lui-même si l'on est au bord). Si j est un voisin avec débit qui érode i , c'est-à-dire si $\vec{Q}_j \cdot \vec{n}_j$ est positif, on aura ainsi $g(j) = f(i)$. Mais j peut être érodant pour plusieurs de ses points voisins, il faut donc choisir la condition la plus contraignante, initialiser les fonctions g à 1, et faire : $g(j) = \min(g(j) , f(i))$. Cette opération est faite dans une boucle sur tous les éléments, et la notion de point érodant un autre, fondée sur un test de positivité de $\vec{Q}_j \cdot \vec{n}_j$, est relative à un élément. Pour éviter une limitation trop contraignante des flux (g très petit), on peut utiliser la première valeur de g obtenue comme il vient d'être expliqué, et raffiner le raisonnement. Dans le calcul pessimiste de la divergence, les apports de sédiment sont annulés, pour ne conserver que l'érosion. On couvre ainsi le risque qu'un apport soit annulé par une fonction g égale à 0. Or quand on connaît g , on peut recommencer un calcul de divergence en considérant qu'un apport ne sera pas multiplié par une fonction inférieure au premier g calculé (en effet une évaluation moins pessimiste de la divergence fera augmenter les fonctions g). On peut donc itérer sur le calcul de g en recommençant plusieurs fois le calcul de la divergence. Ceci donne par exemple pour le calcul pessimiste de $\int_{\Omega} \psi_1 \text{div}(\vec{Q}) d\Omega$ la valeur suivante :

$$\frac{B1 * \max(\vec{Q}_1 \cdot \vec{n}_1, 0) + \max(\vec{Q}_2 \cdot \vec{n}_2, 0) + \max(\vec{Q}_3 \cdot \vec{n}_3, 0)}{6} + \frac{B1 * G1 * \min(\vec{Q}_1 \cdot \vec{n}_1, 0) + G2 * \min(\vec{Q}_2 \cdot \vec{n}_2, 0) + G3 * \min(\vec{Q}_3 \cdot \vec{n}_3, 0)}{6}$$

où $G1$, $G2$ et $G3$ sont les valeurs de la fonction g trouvées à l'itération précédente pour les points 1, 2 et 3 du triangle.

Même avec des itérations, la méthode pour calculer g conduit à des cas où du sédiment reste bloqué en un point isolé, dont un des voisins n'a plus de sédiment : ce point hérite alors d'une fonction g nulle car la fonction f du voisin est nulle. Une solution consiste à répartir localement le sédiment, ce qui a pour effet de remettre une hauteur de sédiment sur tous les voisins, et donc de leur donner une fonction f qui n'est plus nulle. L'algorithme se fait en deux temps :

- détection des cas de blocage : cas où il y a du sédiment mais où $g = 0$;
- les « tas » de sédiments bloqués sont retirés du fond, lissés en conservant leur masse, puis ajoutés au fond.

En pratique on construit une fonction T qui vaut $Z_f - Z_r$ dans un cas de blocage et 0 sinon. Puis on enchaîne les opérations suivantes :

- Z_f remplacé par $Z_r - T$.
- Lissage de T.
- Z_f remplacé par $Z_r + T$.

Le lissage de T se fait en remplaçant le vecteur des valeurs de T par $\frac{MT}{D}$, où M est la matrice de masse (terme général $\int_{\Omega} \psi_i \psi_j d\Omega$) et D la matrice de masse lumpée (terme diagonal $\int_{\Omega} \psi_i d\Omega$ et les autres nuls). Ce lissage ne change pas la somme de la fonction lissée et conserve donc la masse totale de sédiment.

5. Résultats

La méthode qui vient d'être décrite a été mise en œuvre dans le logiciel Sisyphé, qui est une copropriété entre EDF, SOGREAH, le CETMEF, et l'Université de Compiègne. Sisyphé est un module du système Telemac et peut utiliser l'hydrodynamique calculée avec les équations de Saint-Venant (code Telemac-2D). Nous illustrerons les performances de la nouvelle méthode avec deux cas. Le premier est très schématique, il est en fait unidimensionnel, et montre les trois premières propriétés annoncées dans l'introduction : fonds rigides respectés, conservation de la masse de sédiment, et transit possible de sédiment au-dessus d'un fond rigide. Le second cas est plus proche d'une application pratique et comporte des gradients de fond importants.

Cas 1 : décapage d'une cuvette contenant du sédiment

La figure 1 illustre la géométrie et les conditions hydrodynamiques du test. Le domaine est rectangulaire, de longueur 16 m et de largeur 1,1 m, et il est discrétisé par 1 600 éléments triangulaires issus d'un maillage régulier de 800 quadrilatères découpés en deux. Les fonds rigides sont à la cote 0, sauf dans une cuvette de 4,50 m de long, centrée sur l'abscisse $x = 8$ m, et où la cote des fonds rigides est de -10 cm. Seule la cuvette est remplie de sédiment jusqu'à la cote 0.

L'hydrodynamique est maintenue artificiellement constante en temps. La vitesse du courant est orientée de la gauche vers la droite, avec une valeur qui croît linéairement de 0 à 10 m²/s entre l'abscisse $x = 0$ et l'abscisse $x = 8$ m, et qui décroît ensuite de la même façon pour retrouver une valeur nulle à l'abscisse $x = 16$ m. En utilisant la formule de transport de Engelund-Hansen, on assure ainsi que toute la cuvette de sédiment sera érodée. A cause de la décroissance linéaire de la vitesse, le transport plus à l'aval sera ralenti.

Le diamètre du sédiment est de $D_{50} = 0,3$ mm et le coefficient de porosité est de 1,6. La figure 2 montre des profils dans l'axe longitudinal du canal. En haut, la cote du fond après 3 000 s d'évolution, et en bas la même cote après 50 000 s. Dans cette simulation, l'effet de pente n'est pas pris en compte, ce qui explique la forme finale assez pointue du tas de sédiment. A l'issue du calcul, le débit solide est partout inférieur à 510^{-5} et il n'y a plus aucun mouvement de sédiment. Le fond rigide est entièrement à découvert dans la cuvette. La conservation de la masse est de l'ordre de la précision de la machine.

Il est à noter que les techniques simples mentionnées dans l'introduction et consistant à annuler le débit solide sur les fonds rigides découverts donnaient sur ce cas-test des résultats très mauvais, avec un creux artificiel de 75 cm, qui appelle un commentaire. L'annulation locale du débit solide pour un point intérieur au domaine n'annule pas la divergence de ce point (nous l'avons vu, elle la laisse inchangée) mais peut faire croître la divergence du débit solide pour un voisin : on risque de donner à ce point une divergence pessimiste proche de ce que nous calculons dans l'algorithme de la nouvelle méthode. Il se forme ainsi un front de creusement totalement artificiel en bordure de zone érodée.

Cas 2 : érosion autour d'un parallélépipède en béton

Ayant démontré sur le cas précédent les trois propriétés principales de la méthode, l'objectif est maintenant de contrôler la régularité des solutions, en présence de fortes pentes. Le domaine est rectangulaire, de longueur 2 000 m et de largeur 400 m, modélisé avec 6 450 triangles découpés dans un maillage régulier. Le parallélépipède est limité par les abscisses $x = 600$ m et $x = 1000$ m, et les ordonnées $y = 100$ m et $y = 300$ m. La cote du fond rigide est fixée à - 2 m au sommet du parallélépipède et à - 2,2 m ailleurs. Ces données sont résumées sur la figure 3. La cote initiale des fonds est fixée à - 1,99 m.

L'écoulement est uniforme et permanent, orienté suivant x , avec un débit linéique de $5,05$ m²/s. La hauteur d'eau initiale varie entre 6,99 m et 7,10 m en raison d'un coefficient de frottement de Strickler de 50 m^{1/3}/s.

Le diamètre du sédiment est de $D_{50} = 0,3$ mm et le coefficient de porosité est de 1,6. On utilise ici la formule de transport de Engelund-Hansen.

Le pas de temps est de 50 s et on fait deux itérations pour le calcul de la fonction g . Une évolution nulle est imposée à l'entrée.

La figure 4 montre une vue de dessus et un profil des cotes du fond dans le canal, après $2,5 \cdot 10^7$ s et après $5 \cdot 10^7$ s. Après une phase d'érosion qui découvre le parallélépipède, il y a un transit permanent de sédiment en provenance de l'amont. Les trois propriétés principales de la méthode sont toujours vérifiées mais on constate l'apparition de rides dues au gradient de pente du fond rigide sur les bords du parallélépipède. L'évolution de ces rides en aval et en amont est ensuite due à l'algorithme d'actualisation des vitesses qui tient compte des variations de hauteur d'eau et suppose un débit local constant, et qui a pour effet une propagation des

dunes qui est un comportement physique. La figure 5 est la même expérience mais avec des pentes latérales qui limitent les gradients de fond autour du parallépipède. On constate alors que l'amplitude des rides est plus faible.

6. Conclusion

Dans le cadre d'un formalisme d'éléments finis, la méthode de traitement des fonds rigides proposée ici respecte les propriétés suivantes :

- pas d'érosion des fonds rigides,
- pas de blocage du transit de sédiment au-dessus des fonds rigides,
- masse totale de sédiment rigoureusement conservée.

Le problème d'oscillations ou d'instabilités subsiste dans les cas de variations brutales des fonds ou du débit solide d'un point à un autre du maillage, entre une zone sableuse et une zone rigide. Il est donc conseillé d'éviter de telles variations par un raffinement adéquat autour des zones rigides. Les oscillations sont liées aussi au mode d'actualisation des vitesses en fonction des variations du fond, et des calculs mettant en œuvre un couplage strict avec l'hydrodynamique amélioreraient sans doute les résultats.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'une convention entre EDF-LNHE et le Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF) du ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement. Ils ont fait l'objet d'un financement de la Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques (DRAST) au travers du contrat 99-DST-13.

7. Bibliographie

- Engelund-Hansen, *A monograph on sediment transport in alluvial streams*, 3rd edition, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark, 1967.
- Malcherek A., « Application of bed evolution models over loose and rigid areas », *International Journal of Sediment Research*, vol. 12, n° 2, 1997.
- Meyer-Peter & Müller, « Formulas for bed load transport », *Sect. Int. IARH congress*, Stockholm, Sweden, 1948.

Fonds non érodables : décapage d'une cuvette de sédiments

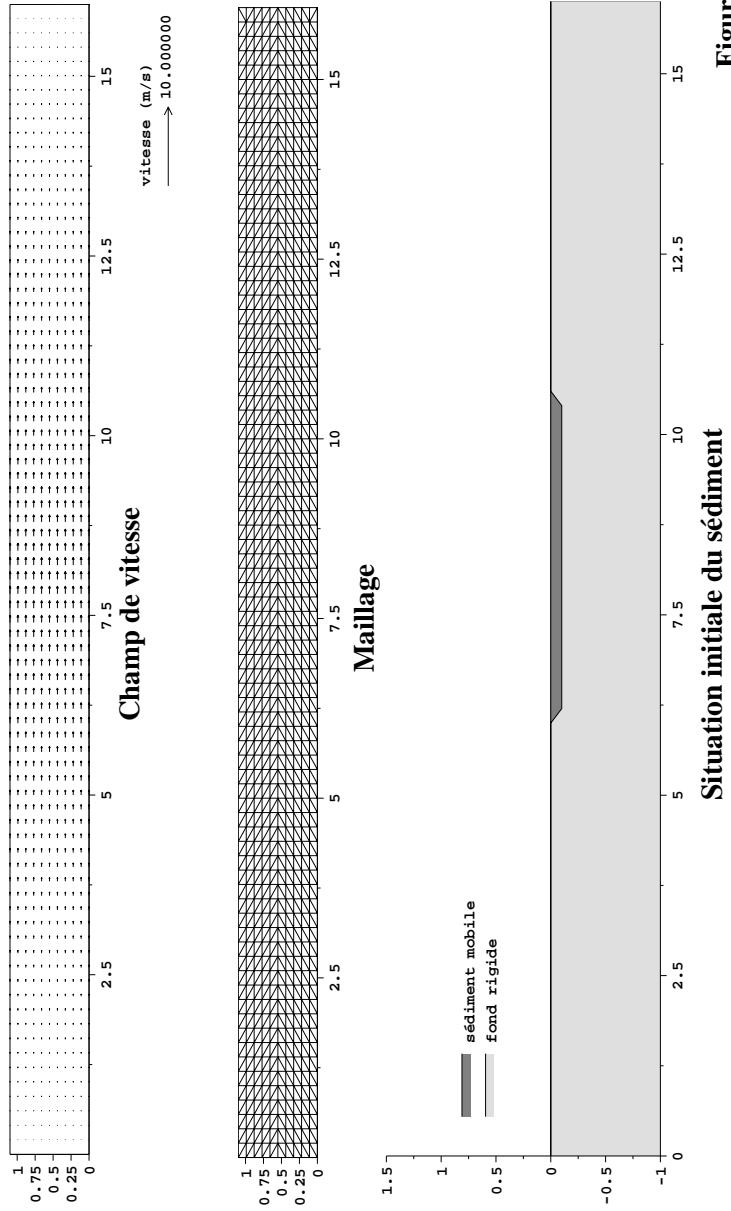


Figure 1

Fonds non érodables : décapage d'une cuvette de sédiments

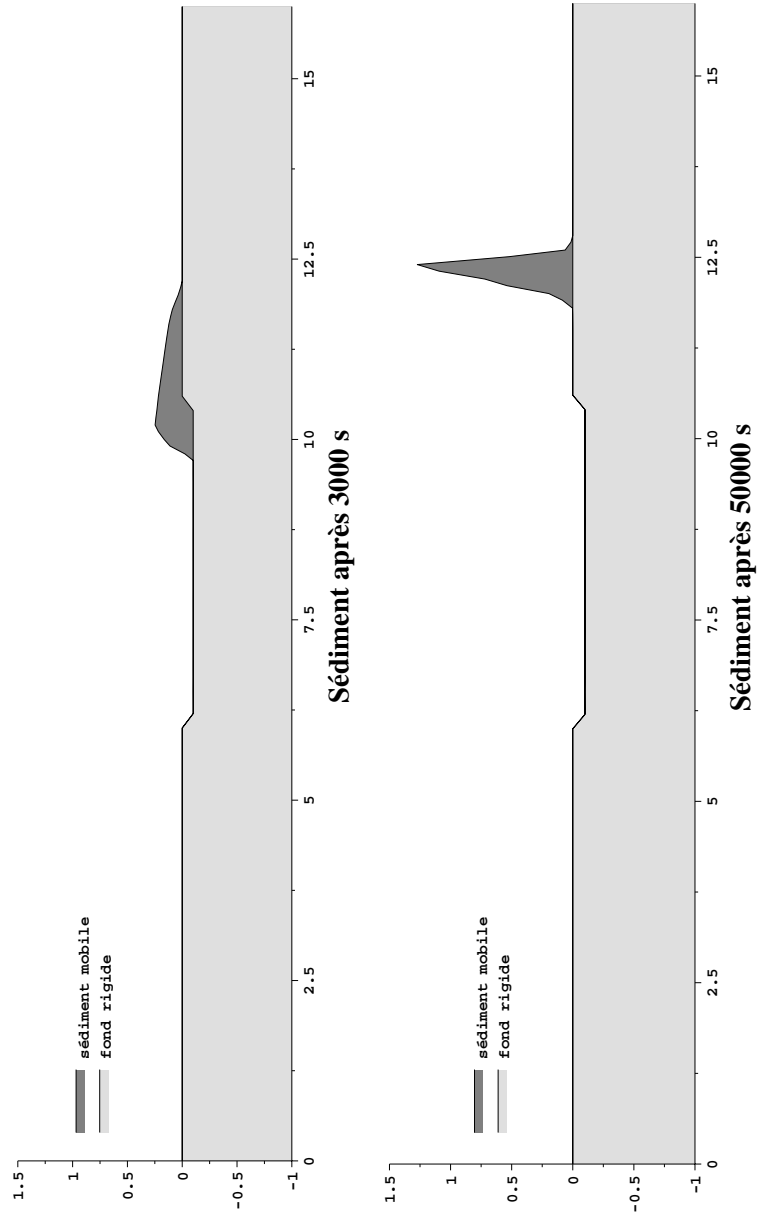


Figure 2

Fonds non érodables : érosion autour d'un parallélépipède de béton

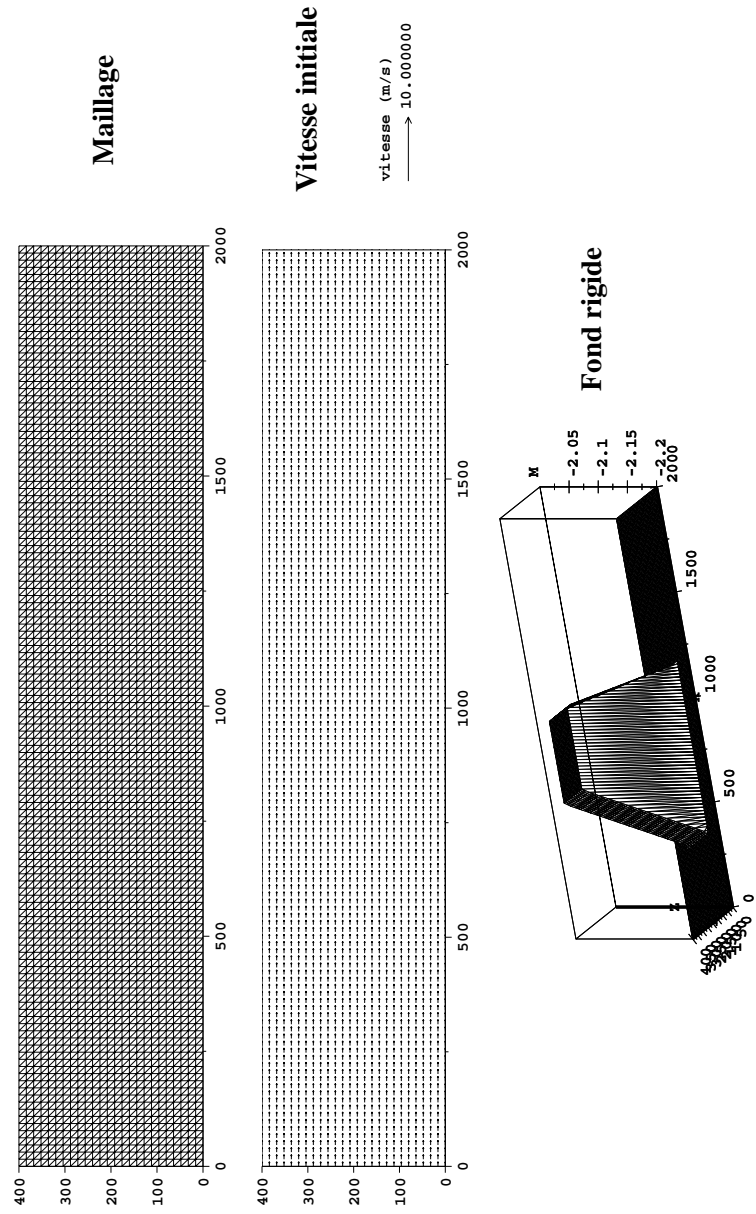


Figure 3

Fonds non érodables : érosion autour d'un parallélépipède de béton

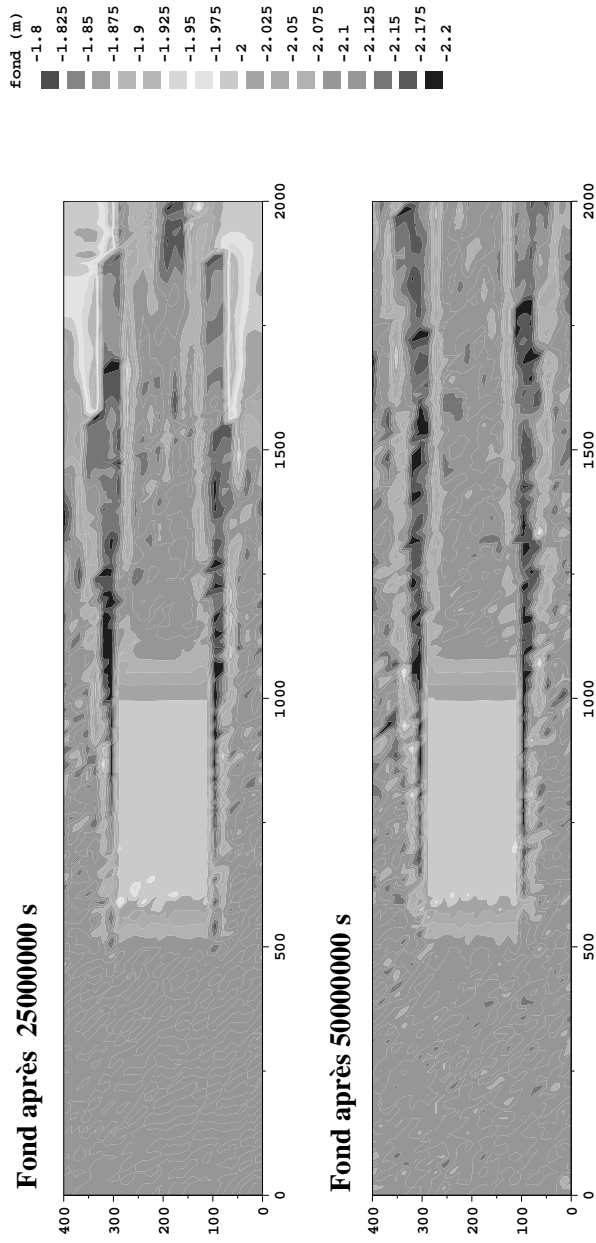


Figure 4