

# Modélisation du transport et dépôt de particules dans PROSE, version 4.1 : développement d'un module de compaction

Stéphanie EVEN, [Stephanie.Even@ensmp.fr](mailto:Stephanie.Even@ensmp.fr)  
*Centre de Géosciences,  
Groupe Hydrodynamique et réactions,  
École des Mines de Paris,  
35 rue Saint-Honoré, 77 305 FONTAINEBLEAU cedex*

Février 2006

1. Introduction	1
2. Le modèle de compaction	2
2.1. Rappel sur le modèle sédimentaire mono-couche de ProSe	2
2.1.1. Les variables particulières	2
2.1.2. Les variables dissoutes	2
2.2. Le modèle sédimentaire bi-couche	3
2.3. Le modèle diagénétique VENICE	3
2.3.1. Les concepts	3
2.3.2. Les équations	4
3. Résultats	4
3.1. Comparaison des modèles mono-couche et bi-couche	4
3.2. Influence du seuil critique d'érosion	6
3.3. Cartographie	6
4. Conclusion	14

## 1. Introduction

Le schéma conceptuel de ProSe prévoit le transport de particules dans l'ensemble du réseau hydrographique comme conséquence des processus d'érosion et de sédimentation (Even et al. 1998). Le modèle de transport de particules intègre également l'effet de la navigation, des études réalisées dans le cadre du PIREN Seine ayant montré l'importance de ce phénomène sur les remises en suspension à bas débit (Even, Martin, Poulin, et Mouchel 2004). Couplée à une description précise de la bathymétrie du système, cette représentation permet de calculer les stocks sédimentaires résultants des hétérogénéités spatiales et temporelles (variation des débits).

Les stocks sédimentaires au fond sont actuellement représentés sous forme d'une seule couche homogène. Or dans certains secteurs (aval de rejets), des stocks importants de sédiments sont susceptibles d'être piégés pour de longues périodes. Ils subissent alors un processus de compaction, qui a pour effet de réduire leur mobilité. C'est l'impact de ce phénomène sur la qualité des remises en suspension et donc les échanges entre la colonne d'eau que nous nous proposons d'étudier.

Ce processus a été introduit dans le modèle ProSe et une analyse de sensibilité est présentée.

## 2. Le modèle de compaction

### 2.1. Rappel sur le modèle sédimentaire mono-couche de ProSe

Dans ProSe, toutes les variables biologiques décrites dans le modèle biogéochimique RIVE sont représentées et évoluent tant dans la colonne d'eau que dans la couche de vase, quand elle se développe.

Dans la version 3.5/4.0, un seul stock sédimentaire, parfaitement homogène, est considéré.

#### 2.1.1. Les variables particulières

Pour chaque variable particulière, le modèle ProSe représente explicitement les flux de sédimentation et de remise en suspension. La formulation classique  $\frac{V_{sed}}{h} C$  pour exprimer le terme de sédimentation est retenue où  $V_{sed}$  est la vitesse de chute,  $h$  est la hauteur d'eau et  $C$  est la concentration d'un constituant particulier. En l'absence d'une connaissance et d'une quantification précise des facteurs agissant sur le dépôt ou non des particules, on suppose que toute particule qui sédimente se dépose au fond.

Le calcul de l'érosion est basé sur un modèle énergétique, faisant intervenir la capacité de transport de l'écoulement (Bagnold 1966). Une des hypothèses de ce concept consiste à considérer qu'une partie infime  $\zeta$  de la puissance dissipée par l'écoulement est utilisée pour maintenir en suspension des particules qui ont par ailleurs tendance à chuter du fait de leur excès de poids dans l'eau :

$$\zeta P_{hyd} = C_A V_{sed, Ag} \frac{\rho_A - \rho_{eau}}{\rho_A}$$

où l'indice  $A$  fait référence aux agrégats qui sédimentent.  $P_{hyd}$  s'exprime simplement en utilisant la formulation de STRICKLER (Celik et Rodi 1988)  $P_{hyd} = \rho g J U = \rho g \frac{U^3}{K^2 R_H^{4/3}}$

Un terme énergétique supplémentaire, correspondant à la production d'énergie par la navigation a été introduit :

$$P_{tot} = P_{hyd} + P_{navig}$$

. La navigation est représentée comme un phénomène continu et moyen ( $\zeta P_{navig}$  est un paramètre de calage du modèle).

Cette théorie conduit à considérer un état d'équilibre, pour lequel la concentration de matière en suspension dans l'eau est stable et les flux de sédimentation et d'érosion sont stables. L'expression de cette situation pour un modèle multiclasse et avec comme hypothèse supplémentaire la simultanéité de la sédimentation et de l'érosion, conduit à l'expression suivante du flux de remise en suspension pour chaque constituant particulière  $i$  (Maldiney 1994) :

$$F_{ero} = \zeta A \frac{P_{tot}}{g}, A = \frac{1}{\sum_i \chi_i \frac{\rho_i - \rho_{eau}}{\rho_i}}$$

On suppose alors que l'expression du flux d'érosion, calculée pour une situation d'équilibre est également valable en situation transitoire.

#### 2.1.2. Les variables dissoutes

Pour les espèces dissoutes, le flux échangés entre la phase aqueuse des sédiments et la colonne d'eau prend en compte un terme de diffusion proportionnel au gradient de concentration entre l'eau interstitielle dans la couche déposée et l'eau surnageante

$$D_s (C_{vase} - C_{eau})$$

suivant la théorie du transfert de masse (Christy et Thibodeaux 1982; Boudreau 1997), qui exprime le fait que la diffusion à la couche limite est la phase limitante de la diffusion à l'interface eau-sédiment.

$D_s$  est alors homogène à  $\frac{D}{\delta}$  où  $\delta$  est l'épaisseur de la couche limite laminaire, fonction des caractéristiques de l'écoulement et notamment du degré de turbulence exprimé à travers la variable  $u_*$ . La formulation suivante a été adoptée pour  $D_s$  :

$$D_s = Au_*Sc^n$$

où  $A$  et  $n$  sont des paramètres à déterminer. Les calculs théoriques donnent des valeurs allant de 0.0889 à 0.114 pour  $A$ , 0.67 à 0.71 pour l'exposant  $n$  (Christy et Thibodeaux 1982; Boudreau 1997).

## 2.2. Le modèle sédimentaire bi-couche

La couche de vase est maintenant divisée en deux stocks :

- un premier stock de vase « fluide » non compactée échangeant avec la colonne d'eau et ayant un seuil critique d'érosion nul ;
- une couche de vase compactée échangeant avec la couche de vase superficielle. Dans la mesure où les sédiments en Seine ont un contenu en matière organique important, cette vase est considérée comme cohésive et a un seuil critique d'érosion non nul.

Cette classification s'inspire des résultats de Mehta et al. (1995) qui considère trois types de sédiments : i) les **sédiments fluides**, soumis à l'action permanente de la houle et de cohésion nulle. Nous considérons que l'action permanente des bateaux a un effet similaire et entretient donc un stock superficiel de vase fluide ; ii) les **sédiments non consolidés** correspondant ayant une cohésion non nulle. Une cohésion non nulle apparaît dès que les sédiments ont un âge proche de un jour ; iii) les **sédiments consolidés** correspondant aux sédiments très anciens.

Notre schéma conceptuel considère donc que tout stock de sédiment d'âge supérieur ou égal à 24 h migre depuis la couche de vase fluide superficielle vers la couche de vase compactée.

A chaque instant le flux d'érosion échangé avec la colonne d'eau remet en suspension d'abord des sédiments de la vase superficielle fluide, puis les sédiments compactés, en fonction des stocks disponibles et d'un seuil critique d'érosion pour le deuxième couche.

La couche de vase compactée est couplée à un modèle diagénétique, le modèle VENICE (Billen 1982; Billen et al. 1988).

## 2.3. Le modèle diagénétique VENICE

### 2.3.1. Les concepts

Les équations du modèle sont établies à partir des équations diagénétiques (Berner 1980; Billen 1982; Billen et al. 1988) à l'équilibre (

$$\frac{\partial[C]}{\partial t} = 0$$

) pour les différentes espèces intervenant dans le modèle RIVE (matière organique particulaire, oxygène, nitrates, ammoniac, phosphore).

$$\frac{\partial[C]}{\partial t} = 0 = D \frac{\partial^2[C]}{\partial z^2} - w \frac{\partial[C]}{\partial z} - r(z) \quad (1)$$

avec

$C$  : Concentration à la profondeur  $z$  de l'espèce considérée ;

$D$  : Coefficient de diffusion en phase solide ( $D_s$ ) ou aqueuse ( $D_i$ ) selon le cas.

$r(z)$  : Taux de disparition à la profondeur  $z$ .

$w$  : Vitesse d'accrétion dépendant du flux de matière ayant sédimenté.

### 2.3.2. Les équations

**La matière organique** Les réactions de biodégradation sont exprimées sous forme de cinétiques du premier ordre, pour les deux classe de matière organique biodégradable :

$$r(z) = KC_I CO_I(z) + KC_{II} CO_{II}(z)$$

où  $CO_i$  est la concentration en carbone organique de classe  $i$  et  $KC_i$  sont les constantes de dégradation. La résolution de l'équation 1 conduit à une expression simple du profil de carbone organique en fonction de la profondeur  $z$  dans les sédiments ,

$$CO_i(z) = CO_i^0 e^{(-\beta_i z)}$$

où  $\beta_i$  dépend des paramètres  $D_s$ ,  $KC_i$  et  $w$  ;  $CO_i^0$  est la concentration à l'interface.

**L'oxygène** La consommation d'oxygène dépend de la biodégradation de la matière organique. Compte tenu d'un certain nombre de conditions limites telles que  $O_2(z_n) = 0$  et  $Flux(O_2)_{z_n} = 0$ ,  $z_n$  étant la profondeur de la couche aérobie, la résolution de l'équation 1 permet de déterminer la concentration en oxygène à toute profondeur  $z$ .

Une fois connue la relation  $O_2(z)$ , le flux d'oxygène échangé à l'interface eau-sédiment est calculé par

$$Flux(O_2) = \left( \frac{\partial O_2(z)}{\partial z} \right)_{z=0}$$

**Phosphore** Le phosphore est reminéralisé lors de la dégradation de la matière organique. L'équation diagenétique pour les orthophosphates fait intervenir une phase adsorbée en phase aérobie (coefficient de mélange apparent  $\frac{D_i}{1+K_P}$ , où  $K_P$  est le coefficient d'adsorption du phosphore).

**L'ammoniaque** La biodégradation de la matière organique produit de l'ammoniaque. Dans la couche aérobie, une fraction de l'ammoniaque est nitrifiée.

Pour  $NH_4$  une phase adsorbée est également considérée.

**Les nitrates** Les nitrates sont produits par l'ammonification et la dénitrification.

Connaissant les réactions régissant la production/consommation des espèces à différentes profondeurs et compte tenu de relation de continuité pour les flux à la profondeur  $z_n$ , la résolution de l'équation 1 en régime stationnaire permet de connaître la loi  $C(z)$  pour les trois espèces  $NH_4$ ,  $NO_3$  et  $PO_4$ . Les flux échangés à l'interface eau-sédiment sont alors égaux à

$$FluxC = \left( \frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=0}$$

Les paramètres adoptés sont reportés dans le tableau 1.

## 3. Résultats

### 3.1. Comparaison des modèles mono-couche et bi-couche

Une simulation a été réalisée sur une année hydrologie avec un stock de MES et deux traceurs passifs particuliers. Les traceurs particuliers sont injectés dans les rejets de la station d'épuration Seine Aval (Achères). Un traçage en temps sec et en temps de pluie ont été réalisés. Les MES sont le constituant principal du stock sédimentaire. Les traceurs sont considérés comme liés aux MES. C'est leur teneur dans les différents stock et leur dispersion que nous étudions.

Le seuil critique d'érosion pour la couche compactée est nul et nous essaierons d'analyser l'effet de la création de deux stocks de vase.

Les évolutions longitudinales des trois variables pour une situation estivale après un évènement pluvieux, sont présentées sur les figures 1, 2 et 3. Les résultats comparés entre la version mono-couche et

Tableaux 1: Valeurs des paramètres adoptées pour le modèle diagénétique ; tirées de Billen et al. (1988).

Paramètre	Unité	Définition	Valeur
$K_{C_I}$	$h^{-1}$	Vitesse de dégradation de $CO_I$	0,005 (20°C)
$K_{C_{II}}$	$h^{-1}$	Vitesse de dégradation de $CO_{II}$	0,00025
$K_{P_I}$	$h^{-1}$	Vitesse de reminéralisation de $P_{org,I}$	0,05 (20°C)
$K_{P_{II}}$	$h^{-1}$	Vitesse de reminéralisation de $P_{org,II}$	0,0025
$K_P$	ss dim	Constante d'adsorption du phosphore	35
$K_N$	ss dim	Constante d'adsorption de l'ammoniaque	6
$D_S$	$mg/m^2$	Coefficient de diffusion en phase solide	$1,8 \cdot 10^6$
$D_I$	$mg/m^2$	Coefficient de diffusion en phase dissoute	$1,8 \cdot 10^5$
$\alpha$	ss dim	Coeff. stœchio. de consommation de $O_2$	$\frac{1300}{12}$
$\gamma$	ss dim	Fraction d'ammoniaque nitrifiée	0,8
$\tau$	$mmolNO_3/gC$	Coeff. stœchio. de consommation de $NO_3$	66

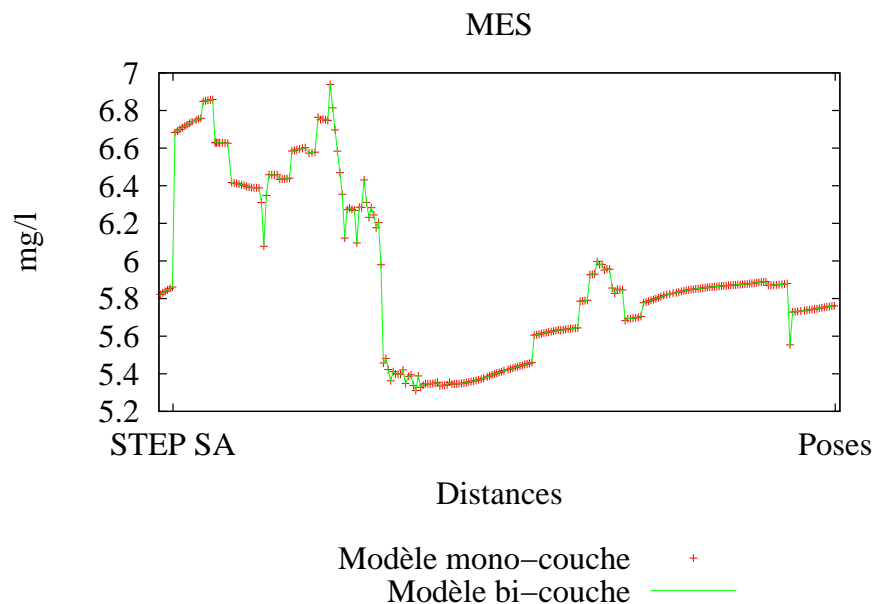


Figure 1: Évolution longitudinale des MES fictives simulées dans le secteur STEP Seine Aval/Poses en période estivale. Comparaison des résultats de simulation avec modèle mono-couche ou bi-couche.

la version bi-couche pour les MES montrent une identité des profils. Nous vérifions ainsi que les bilans sédimentaires sont identiques dans les deux versions.

Pour le traceur du rejet de temps sec on simule une augmentation des concentrations dans l'eau plus importante pour le modèle avec compaction (bi-couche) que pour le modèle mono-couche.

L'évolution des deux traceurs particuliers ne sont par contre pas identiques entre les deux versions d'une part. D'autre part, on remarque une différence de comportement entre le traceur du rejet de temps sec (figure 2) et le traceur des rejets de temps de pluie (figure 3).

Les évolutions en fonction du temps des différents stocks de vase, en un site situé en aval de la STEP, pour la vase constitutive totale, sont identiques entre les deux versions de modèle (figure 4). La décomposition de ce stock de vase total entre un stock de vase fluide et un stock de vase compactée pour la version bi-couche est présenté sur la figure 5. On simule en ce site situé sur un bras non navigué de l'île d'Andrésey/Dénouval, une compaction importante de la vase, avec, à certaines périodes de l'année, une disparition complète de la vase fluide.

En ce même site, les teneurs en traceur du rejet de temps sec dans l'eau sont légèrement plus importantes pour le modèle bi-couche que pour le modèle mono-couche, principalement pendant la période estivale (figure 6). En ce site, on simule, pour le modèle bi-couche, une couche de vase fluide superficielle, très riche du fait des échanges intensifs avec la colonne d'eau. Les teneurs dans cette couche superficielles sont alors proches de celles de l'eau (figure 6). La couche compactée, moins en contact avec l'eau et alimentée essentiellement lors des épisodes hivernaux, est plus pauvre en traceur. Finalement, les teneurs dans le stock de vase total sont plus importantes pour le modèle mono-couche que pour le modèle bi-couche.

Les évolutions en fonction du temps des teneurs en quatre sites en aval de la STEP Seine Aval au droit d'Andrésey, Méricourt, Port Mort et Poses, pour le traceur du rejet de temps et du traceur du rejet de temps de pluie montrent des évolutions contrastées pour les deux modèles.

Pour le traceur de temps sec on simule des teneurs plus importantes en été avec le modèle bi-couche, en lien avec l'enrichissement plus important de la couche fluide de surface (figure 8). Lors des crues, l'érosion de la couche compactée plus pauvre correspond à des teneurs moins importantes.

Pour le traceur des rejets de temps de pluie, nous simulons l'effet inverse avec une disparition plus importante et plus rapide du traceur contenu dans l'eau (figure 9).

### **3.2. Influence du seuil critique d'érosion**

A titre d'exemple, une valeur du seuil critique d'érosion a été fixée à la valeur de la tension critique moyenne estivale sur la Seine. Les résultats de la simulation sont comparés à la situation avec un seuil critique nul.

La valeur du seuil testée ne modifie que très peu le comportement des MES (figure 10). Par contre en période de crue, les évolutions des teneurs en traceur dans la colonne sont très différentes entre les deux situations avec des remises en suspension retardées et des pics plus importants (augmentations jusqu'à +50 %) (figures 11 et 12).

### **3.3. Cartographie**

La figure 13 reproduit une carte des stocks sédimentaires pour une période estivale en Seine. Cette carte montre d'une part l'importance des stocks de sédiments anciens qui se forment, essentiellement dans Paris où existent de nombreux rejets urbains de temps de pluie et à l'aval de la STEP Seine Aval.

Le zoom sur Paris montre plusieurs types de sédiments :

- des secteurs où vase fluide et vase compacte existent simultanément ;
- des secteurs où la couche de vase fluide a disparu et ne subsistent que des sédiments plus anciens, sans doute issus de rejets transitoires ;
- des secteurs où n'existe qu'une couche de vase fluide, zone de sédimentation très temporaire.

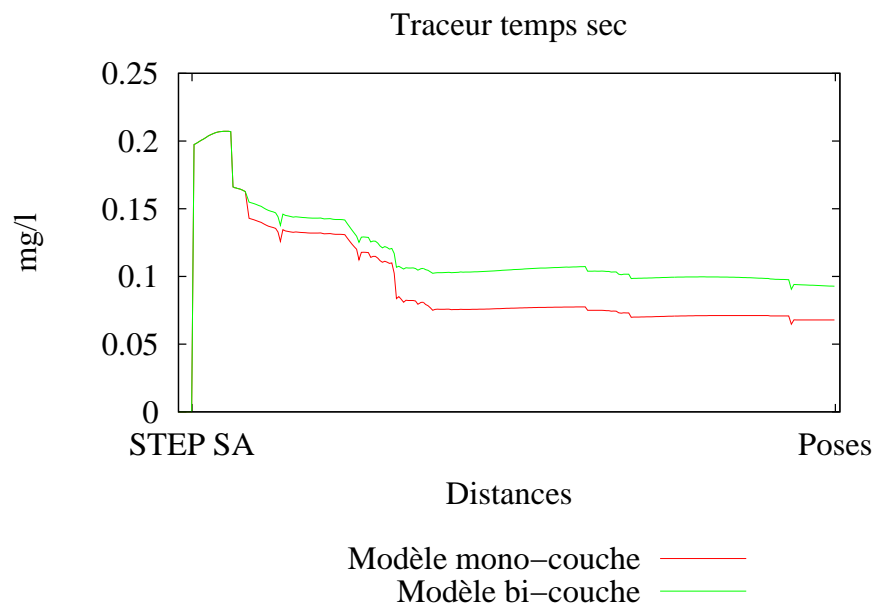


Figure 2: Évolution longitudinale d'un traceur particulaire dans le rejet de temps sec de la STEP Seine Aval en période estivale. Comparaison des résultats de simulation avec modèles mono-couche ou bi-couche

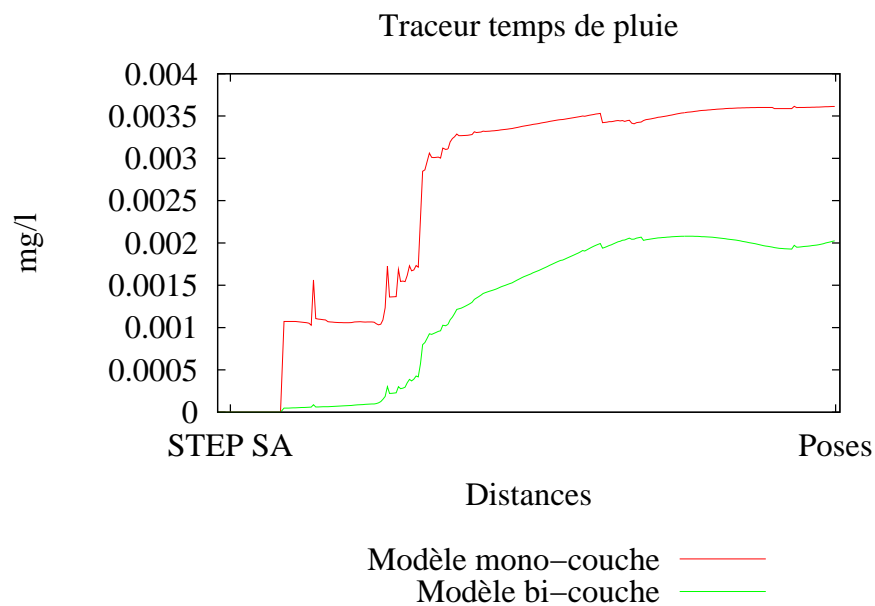


Figure 3: Évolution longitudinale d'un traceur particulaire dans le rejet de temps de pluie de la STEP Seine Aval après une pluie estivale. Profil tracé à la même date que les deux précédents graphiques. Comparaison des résultats de simulation avec modèles mono-couche ou bi-couche

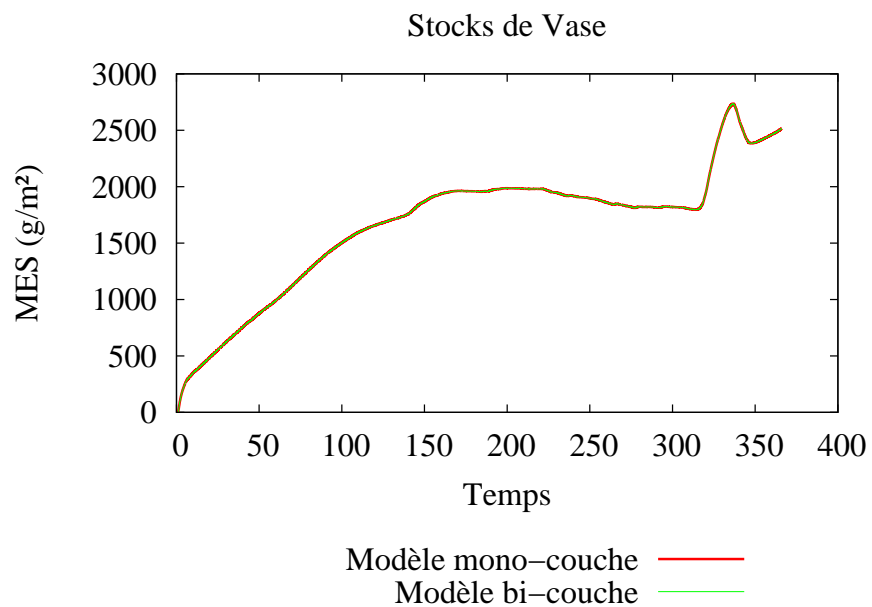


Figure 4: Évolution temporelle du stock de vase constitutive (MES) en un site en aval de la STEP Seine Aval. Comparaison du stock total pour les deux versions de modèle (mono-couche ou bi-couche).

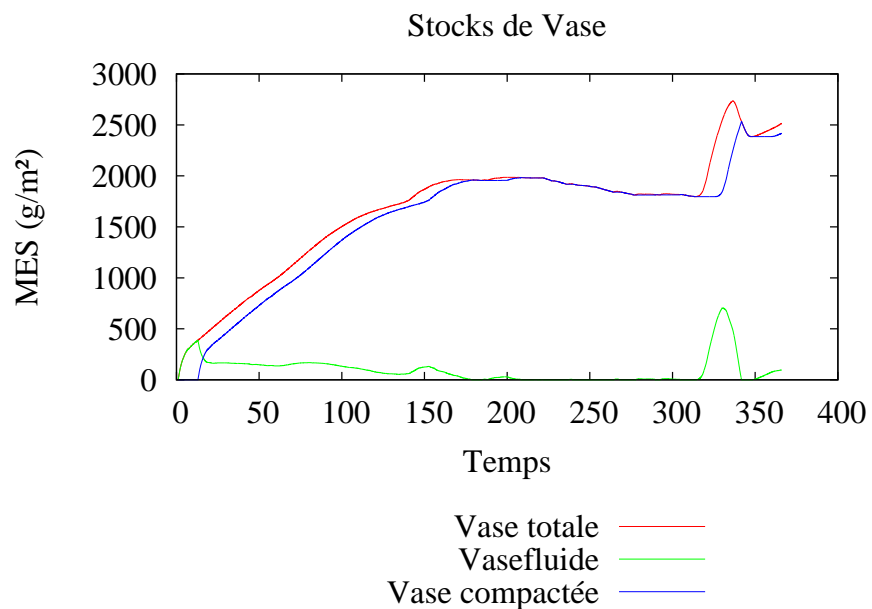


Figure 5: Évolution temporelle du stock de vase constitutive (MES) en un site en aval de la STEP Seine Aval. Comparaison des différents stocks de vase pour la version bi-couche.



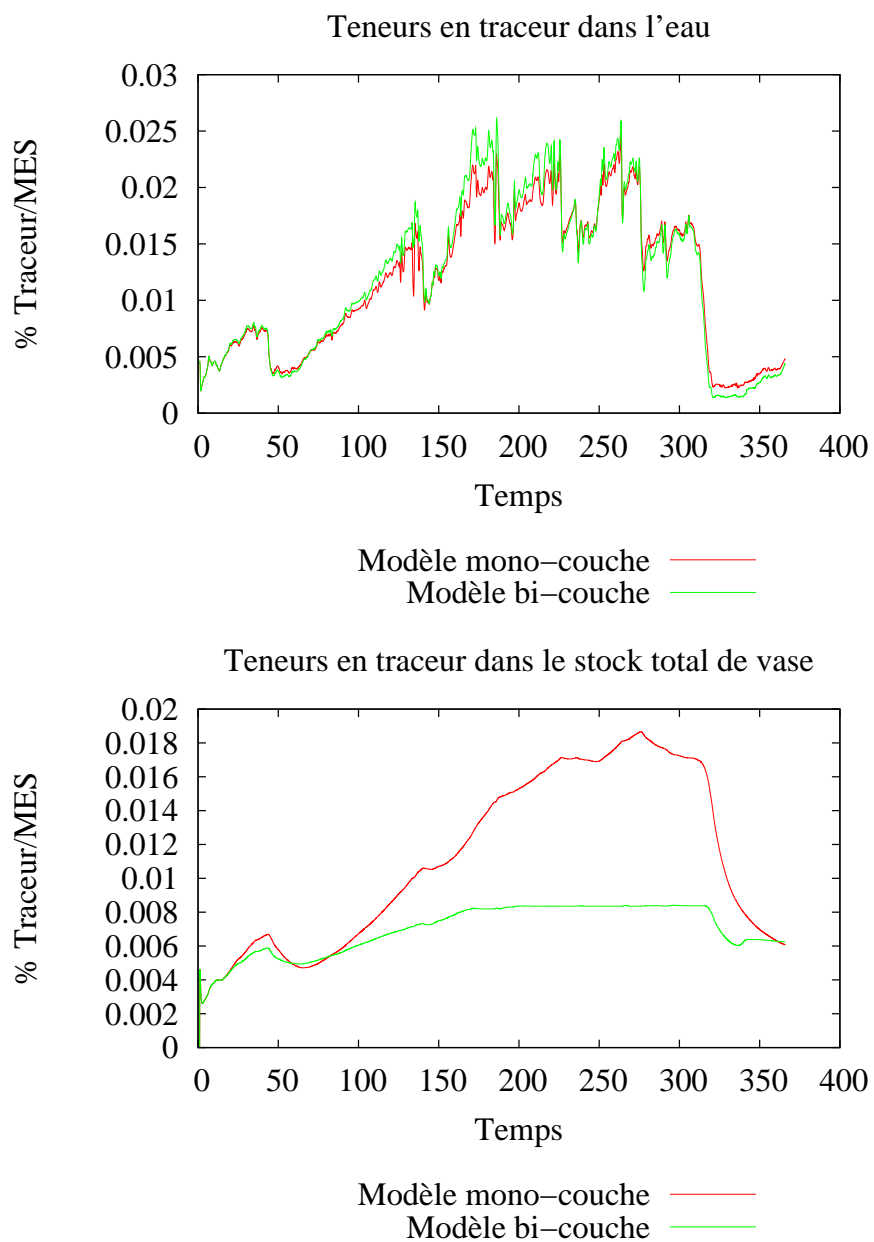


Figure 6: Évolution temporelle des teneurs en traceur du rejets de temps dans les MES en un site en aval de la STEP Seine Aval. Comparaison des différentes teneurs dans l'eau et dans la vase pour les deux versions de modèle (mono-couche ou bi-couche).

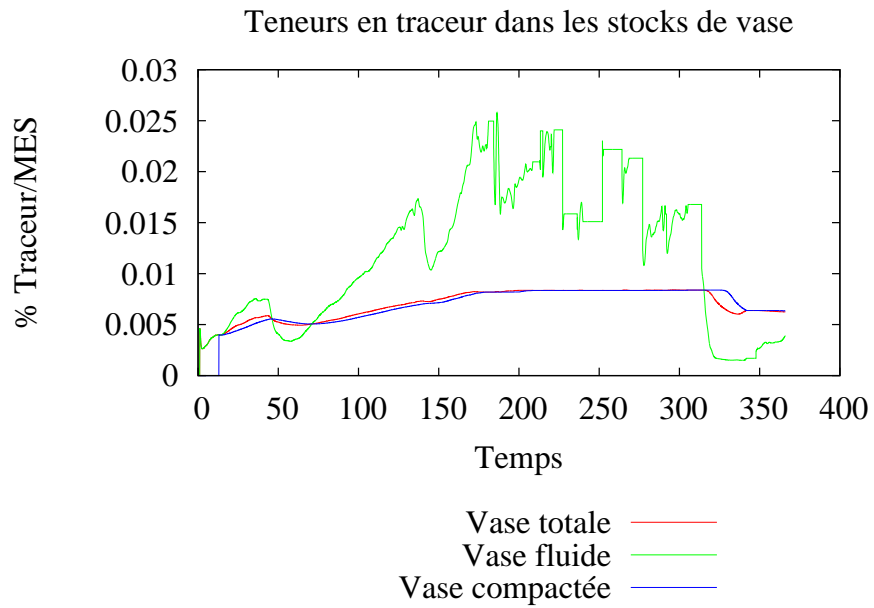


Figure 7: Évolution temporelle des teneurs en traceur du rejet de temps sec dans les MES en un site en aval de la STEP Seine Aval. Comparaison des différentes teneurs dans l'eau dans les différents stocks de vase.

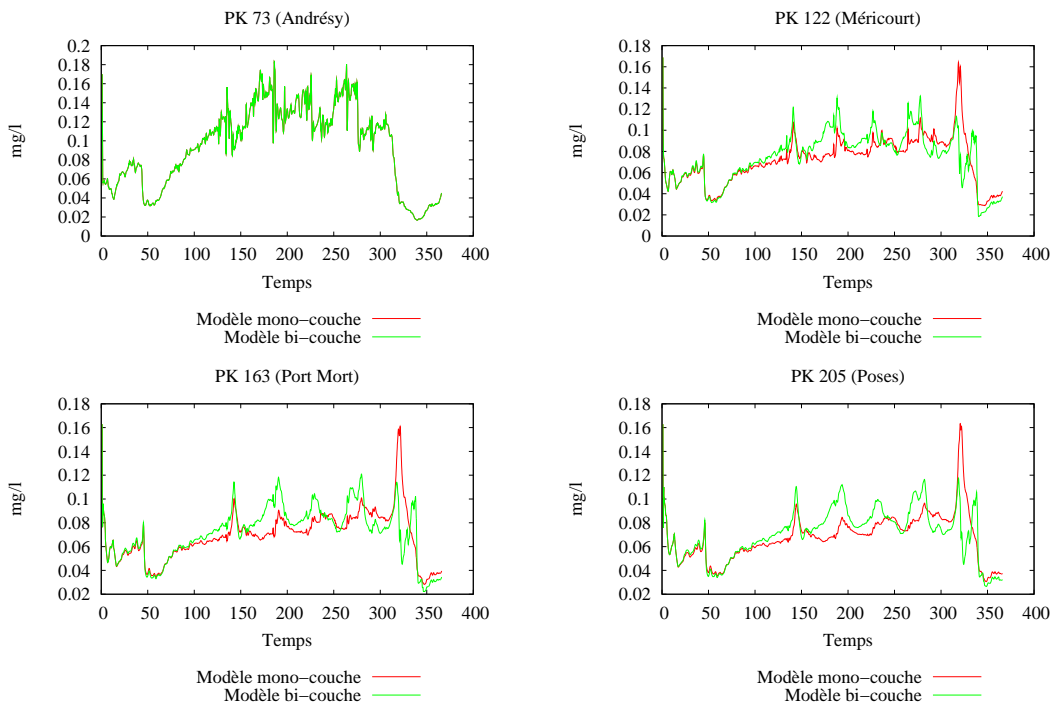


Figure 8: Évolution temporelle des teneurs en traceur du rejets de temps sec dans les MES dans la colonne d'eau en quatre sites en aval de la STEP Seine Aval. Comparaison des différentes teneurs dans l'eau pour les deux versions de modèle (mono-couche ou bi-couche).

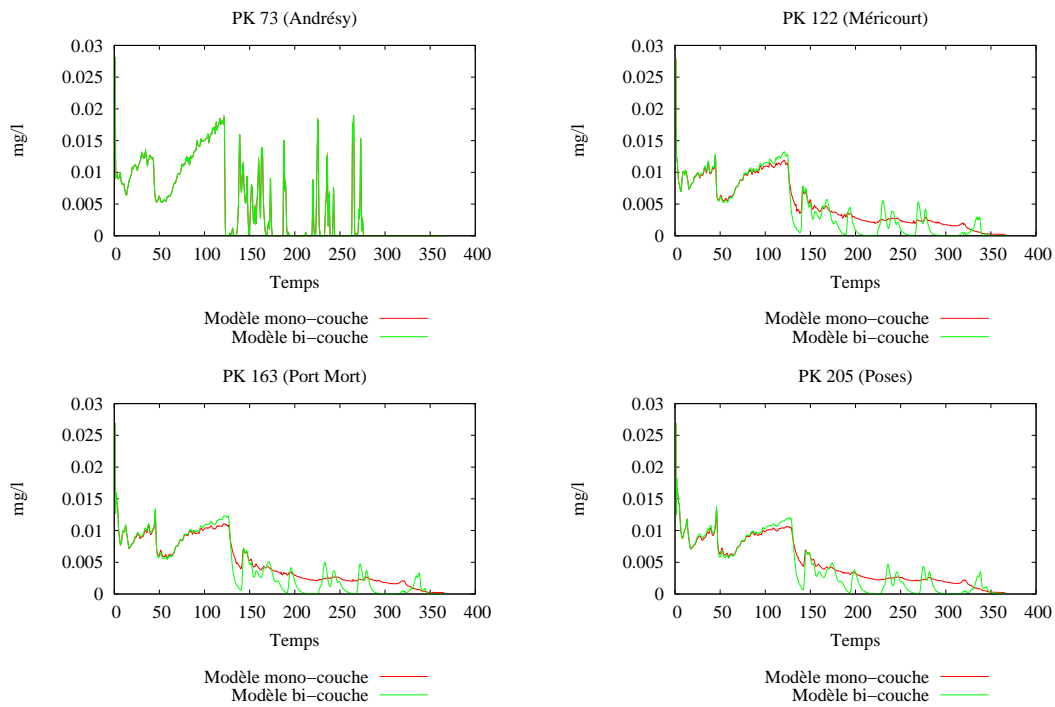


Figure 9: Évolution temporelle des teneurs en traceur du rejets de temps de pluie dans les MES dans la colonne d'eau en quatre sites en aval de la STEP Seine Aval. Comparaison des différentes teneurs dans l'eau pour les deux versions de modèle (mono-couche ou bi-couche).

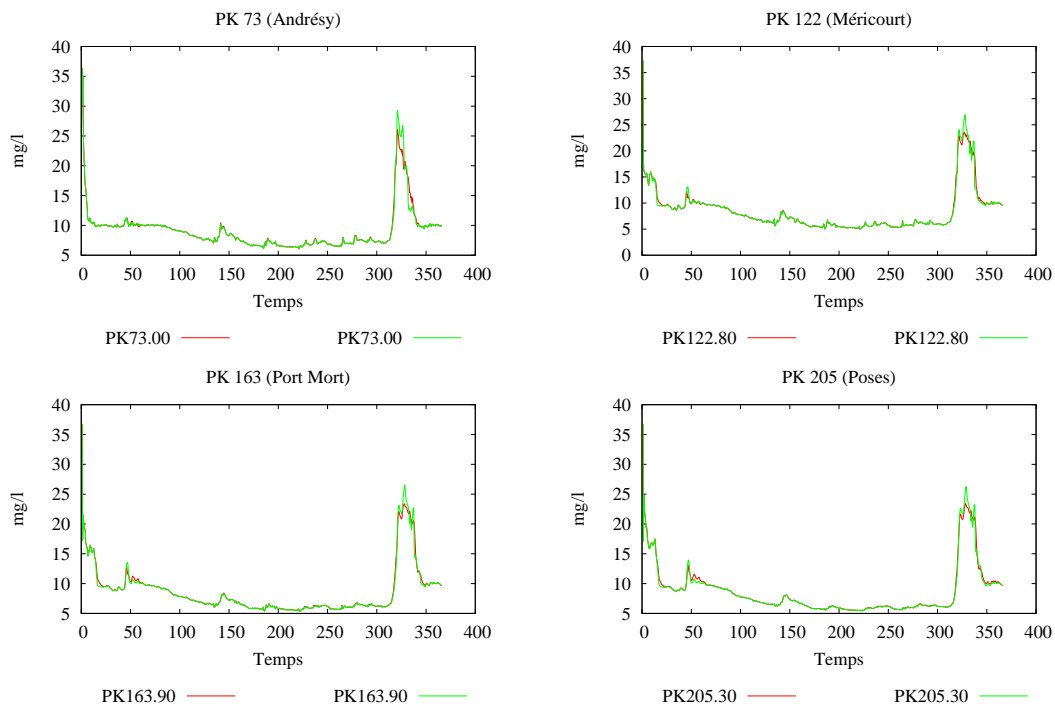


Figure 10: Évolution temporelle des concentrations en MES dans la colonne d'eau en quatre sites en aval de la STEP Seine Aval. Comparaison des différentes teneurs dans l'eau pour deux valeurs de seuil critique d'érosion.

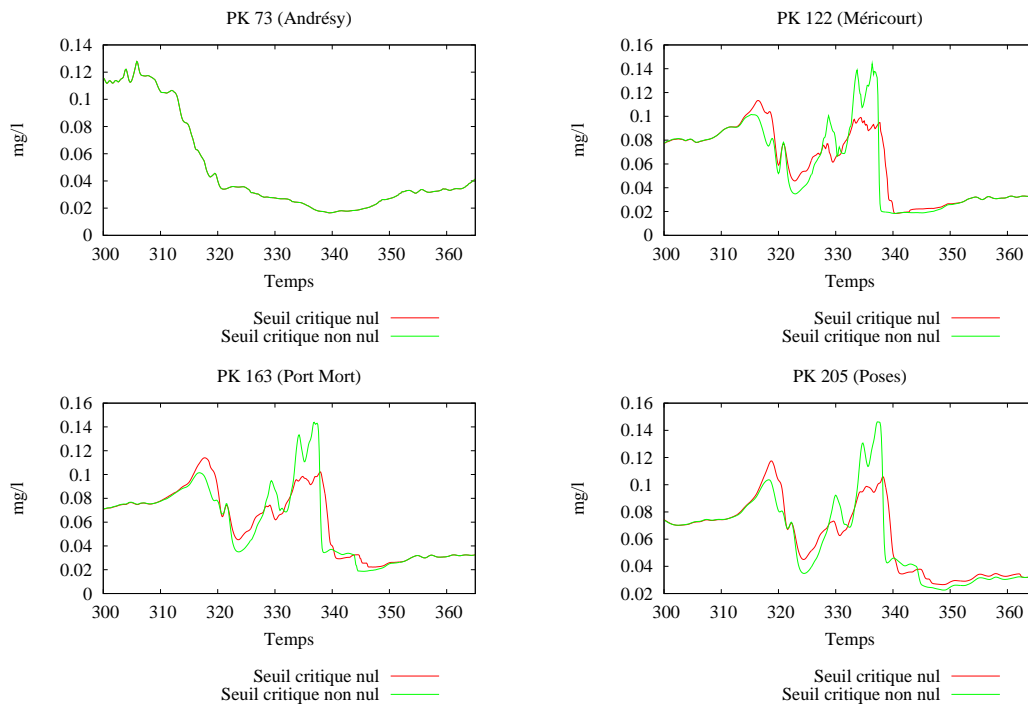


Figure 11: Évolution temporelle des teneurs en traceur du rejets de temps sec dans les MES dans la colonne d'eau en quatre sites en aval de la STEP Seine Aval. Comparaison des différentes teneurs dans l'eau pour deux valeurs de seuil critique d'érosion.

1a

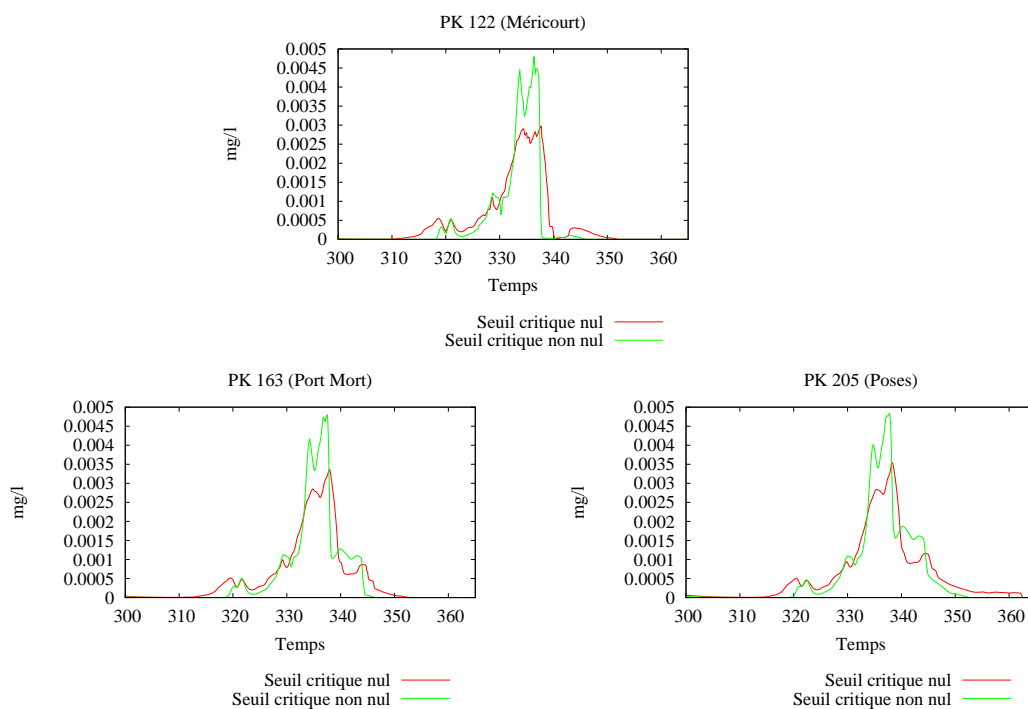


Figure 12: Évolution temporelle des teneurs en traceur du rejets de temps de pluie dans les MES dans la colonne d'eau en quatre sites en aval de la STEP Seine Aval. Comparaison des différentes teneurs dans l'eau pour deux valeurs de seuil critique d'érosion.

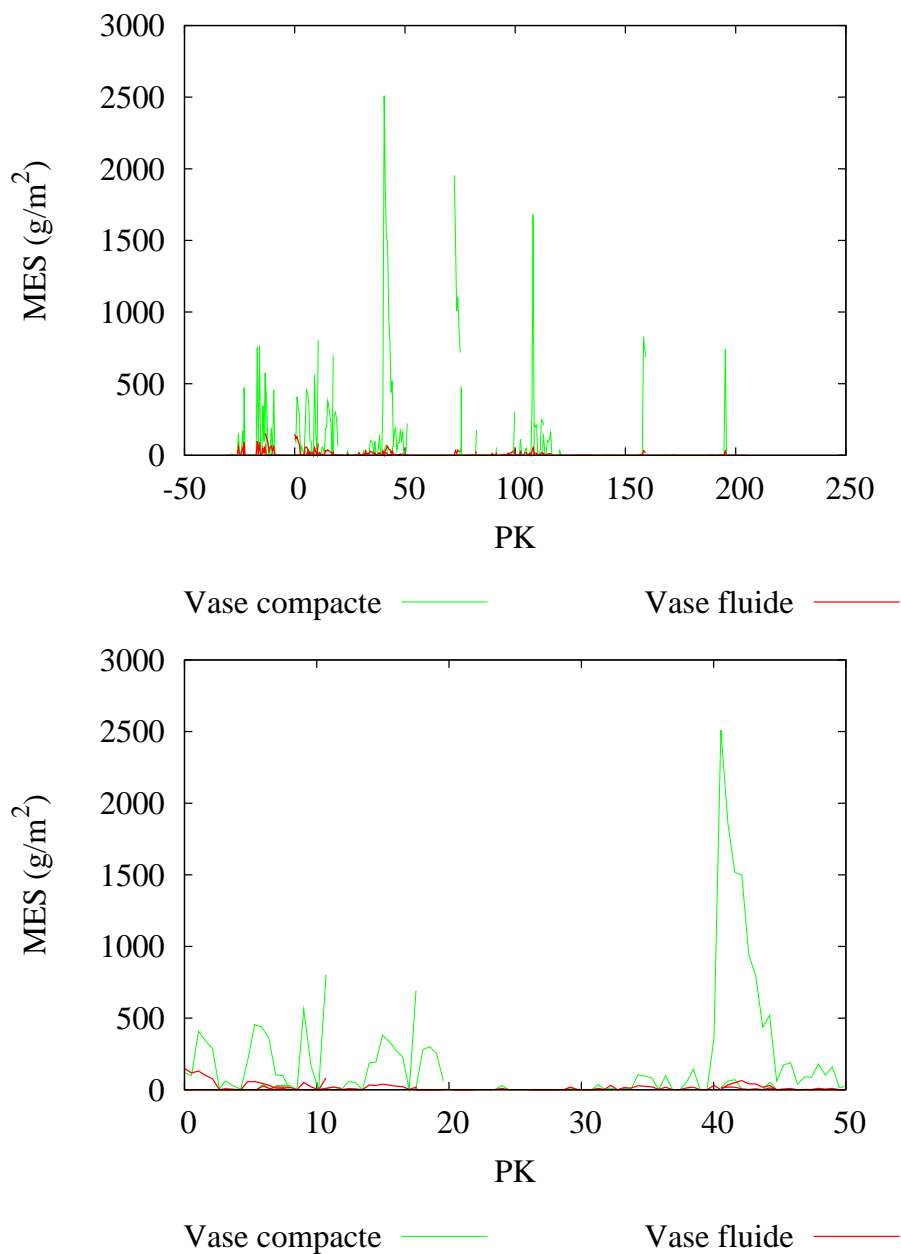


Figure 13: Stocks de vase fluide et compactée dans la Seine de Choisy à Poses (figure du haut) ou dans Paris (figure du bas) en période estivale.

## 4. Conclusion

Un modèle de compaction couplé à un modèle de diagénèse précoce ont été développés dans le logiciel ProSe afin d'améliorer la représentation du comportement des constituants particuliers. Dans la version mono-couche, le stock de sédiment est représenté par une seule couche homogène. Dans la version bi-couche, une fraction des sédiments plus âgés est régulièrement échangée avec une couche plus compacte.

Une étude de sensibilité a été réalisée à partir de traceurs particuliers de rejets de temps sec ou de temps de pluie. Nous mettons évidence l'effet sensible d'une ségrégation de la vase entre une couche fluide, de faible épaisseur mais de composition proche de celle de la colonne d'eau compte tenu de son âge faible et une couche compactée plus ancienne et de composition sensiblement différente de celle de la colonne d'eau.

Pour les pollutions contenues dans des rejets de temps sec, l'effet simulé est dans une alimentation de la colonne d'eau plus importante en période de bas débit et une réduction des pics de pollution en période de crue.

Pour les pollutions particulières associées aux rejets urbains de temps on assiste à une disparition de la colonne d'eau beaucoup plus importante.

Le module de compaction/modèle diagénétique introduit de nouveaux paramètres et modifie le comportement du système. Ces modifications ont un effet majeur sur certaines variables de qualité d'eau. De nouvelles validation seront nécessaires qui aideront à mieux définir les valeurs de paramètres.

## Bibliographie

- Bagnold, R., 1966. An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics. Physiographic and Hydraulic Studies of Rivers. Rapport technique, Geological Survey Professional paper 422-I.
- Berner, R. A., 1980. Early diagenesis, a theoretical approach. Princeton University press.
- Billen, G., 1982. Modelling the processes of organic matter degradation and nutrients recycling in sedimentary systems. Dans *Sediment Microbiology*, pp. 15–52. Academic press.
- Billen, G., E. DeBecker, P. Servais, C. Lancelot, V. Rousseau, E. Stainer, et A. Anzil, 1988. Modèle mathématique de l'estuaire de l'Escault. Rapport final. Rapport technique, Groupe de Microbiologie des Milieux Aquatiques. Université Libre de Bruxelles.
- Boudreau, B. P., 1997. *Diagenetic Models and their Implementation*. Springer.
- Celik, I. et W. Rodi, 1988. Modeling Suspended Sediment Transport in Nonequilibrium Situations. *J. Hyd. Eng.* **114**(10): 1157–1191.
- Christy, P. et L. Thibodeaux, 1982. Spill of Soluble High-Density Immiscible Chemicals on Water. *Environmental Progress* **1**(2): 126–129.
- Even, S., L. Martin, M. Poulin, et J. M. Mouchel, 2004. Influence of navigation on sediment transport in the Seine (France). *Aquatic Science*. In review.
- Even, S., J.-M. Mouchel, et M. Poulin, 1998. Améliorations apportées au modèle ProSe relatives au transport de particules. Rapport technique, PIREN Seine.
- Maldiney, M.-A., 1994. Caractéristiques physiques des particules en suspension dans un fleuve canalisé, exemple de la Seine. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Ponts et Chaussées, CERGRENE.
- Mehta, A. J., D. J. Williams, P. R. Williams, et J. Feng, 1995. Tracking Dynamical Changes in Mud Bed due to Waves. *J. Hyd. Eng.* **121**(6): 504–506.