

Modélisation des dépôts sédimentaires à l'aval de la station d'épuration d'Achères

Laurent Martin (Centre d'Informatique Géologique, Fontainebleau)
Stéphanie Even (Centre d'Informatique Géologique, Fontainebleau)
Michel Poulin (Centre d'Informatique Géologique, Fontainebleau)
Mustafa Guesmia (Electricité de France, Chatou)

Tout au long de l'année 2000, un travail important a été consacré dans le thème 6 du programme Piren-Seine pour fournir une image des flux et temps de séjour des matières en suspensions sur l'ensemble du bassin. Un volet global a cherché à connaître les flux de suspension en fonction de l'usage des sols dans le bassin, de leur lithologie notamment. Une approche plus locale a aussi été mise en œuvre pour étudier les processus qui régissent le transport particulaire dans des zones atelières caractéristiques d'environnements différents à l'intérieur du bassin. C'est dans ce cadre que se situe l'étude du devenir des matières en suspension à l'aval de la station d'épuration d'Achères.

Les évolutions longitudinales des matières en suspension dans la partie aval de la Seine sont très faibles, on observe même fréquemment des augmentations d'amont en aval à l'étiage. Puisque les vitesses relativement faibles de l'écoulement ne peuvent expliquer ce maintien des particules dans la colonne d'eau, puisqu'il n'existe aucun apport important de matières en suspension entre Herblay et Poses, un processus à identifier doit contribuer à remettre en suspension les particules qui se déposent.

Bien des campagnes de terrain ont été effectuées depuis de nombreuses années et mettent en évidence que les turbulences générées par le passage des bateaux dans le chenal de navigation sont très intenses et que ces turbulences sont susceptibles d'éroder des quantités importantes de matériel particulaire facilement re-mobilisables (c'est à dire encore très peu compactés du fait de leur sédimentation récente). Nous avons choisi d'interpréter ces premiers résultats en modélisant de façon précise les effets érosifs conjugués générés par la circulation fluviale.

Courant de retour, tirants d'eau des péniches en fonction de leur tonnage et jets d'hélices ont été introduits dans le modèle SUBIEF 2D d'Electricité de France afin de quantifier la part de la navigation dans la remise en suspension des particules. Ces phénomènes hydrauliques, associés à une formulation énergétique des processus de dépôt/érosion fondée sur la capacité de transport d'un écoulement (même formulation que ProSe), nous permettent de simuler correctement les concentrations en MES mesurées dans la colonne d'eau sur l'ensemble du domaine lors de la campagne tri-dimensionnelle de juillet 1999. Nous en tirons des informations sur la quantité de particules sédimentées dans le bief Herblay-Andrézy en période d'étiage, la localisation des dépôts récents et l'âge moyen des particules qui transitent dans ce secteur.

1. Phénomènes hydrauliques liés au passage des bateaux

Le passage des bateaux dans le chenal de navigation d'une rivière modifie sensiblement l'écoulement, particulièrement en période de faible débit. Ces modifications se répercutent sur le fond et les berges de la rivière en augmentant notamment l'action érosive de la rivière. Lors de la progression d'un bateau sur un plan d'eau, on peut distinguer trois formes d'actions érosives agissant simultanément (figure 1.1) :

- Tout d'abord, le courant de retour, qui résulte de l'écoulement, vers l'arrière du bateau, du volume d'eau chassé à l'avant par sa progression.
- Cet écoulement est opposé à la direction du navire et augmente le frottement au fond. Ce frottement exerce une force de traînée sur l'eau dans la direction du bateau. Pour

compenser ce frottement « artificiel », le niveau de l'eau en avant du bateau doit être plus haut que le niveau arrière (Kolkman, 1978). Cet abaissement du plan d'eau, au droit du bateau se répercute sur la berge par une succession d'ondes de batillage susceptibles d'éroder localement les berges, principalement au voisinage de la surface libre.

- Le troisième mode d'érosion a pour origine le jet du système propulsif du bateau qui agit principalement sur le fond de la rivière.

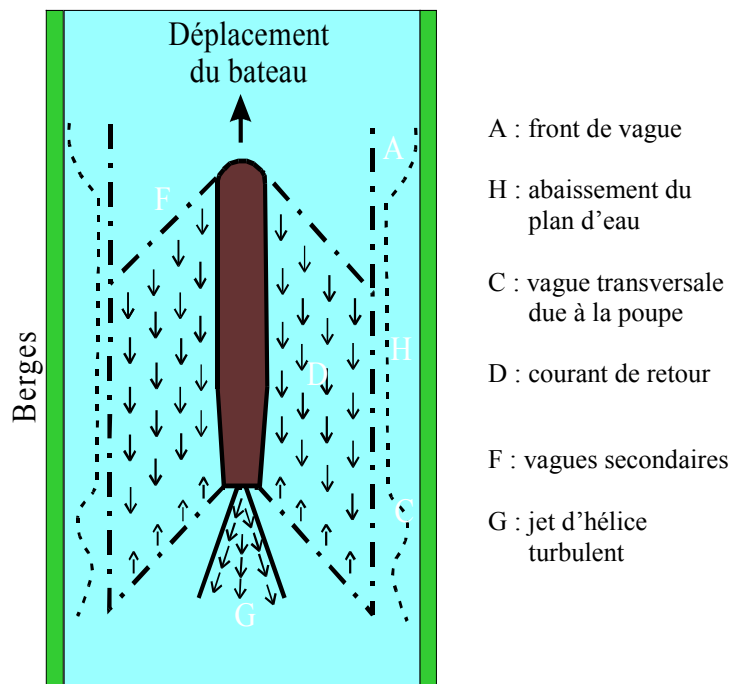


Figure 1.1. *Modifications hydrauliques liées au passage d'un bateau.*

1.1. Le courant de retour

Historiquement, on a cherché à déterminer ses caractéristiques, non pas en vue de quantifier son action érosive sur le fond et les berges, mais plutôt pour voir son influence sur les performances des navires.

La référence majeure dans ce domaine est celle de Schijf (Schijf, 1949 ; Schijf & Jansen, 1953), qui a établi, moyennant certaines hypothèses, les équations donnant la vitesse du courant de retour et l'abaissement du plan d'eau en fonction de la vitesse du bateau et des caractéristiques géométriques de la rivière. Le courant de retour se fait sentir sur toute la longueur du bateau : il est maximum au milieu du bateau et à mi-distance entre le bateau et la berge. Toutefois, si la largeur du plan d'eau est assez grande, on constate une certaine uniformisation, d'où la prise en compte possible d'une vitesse moyenne (S.C.T. Ministère de l'Équipement, 1976).

1.1.1. Dénivellation du plan d'eau et vitesse moyenne du courant de retour.

Les calculs peuvent être effectués classiquement à partir des hypothèses de Schijf (ancien directeur du Waterstaat néerlandais) :

- Le bateau se déplace à vitesse constante le long d'un canal rectangulaire de profondeur et de largeur constante.
- Le canal est supposé rectiligne de longueur infinie.

- La section immergée du bateau est uniforme sur toute sa longueur et les effets de bord sont ignorés.
- La vitesse de l'eau est supposée uniforme dans toute la section.
- Les effets des vagues secondaires sont ignorés.
- Le bateau s'abaisse avec le plan d'eau.
- Le courant de retour est distribué uniformément sur la section de la rivière .
- On néglige le frottement le long des talus du canal et sur la coque.
- On néglige la turbulence autour de la proue du bateau.

En utilisant le théorème de Bernouilli et le concept simple de continuité du débit entre deux sections, on peut calculer le courant de retour moyen et l'abaissement du plan d'eau lorsqu'un bateau se déplace dans un canal (Tothill, 1967 ; S.C.T. Ministère de l'Equipement, 1976).

Nous pouvons ainsi calculer précisément ces valeurs, supposées uniformes sur la section de la rivière considérée, pour un bateau dans un canal.

En réalité, il y a un décalage dans le temps entre l'abaissement du plan d'eau au niveau du bateau et celui qui intervient au niveau des berges. De plus, cet abaissement du niveau de l'eau tend à être plus grand au niveau de la péniche que sur les berges. Le bateau génère donc un système de vague qui modifie le niveau de l'eau. Cependant, en première approximation, cet effet secondaire peut être négligé.

Sous ces hypothèses, on considère un bateau se déplaçant dans le chenal à la vitesse V . On suppose que le bateau est stationnaire et l'on compare le champ de vitesse dans deux sections, l'une à l'amont immédiat du bateau , l'autre au droit du bateau (figure 1.1.1.1) .

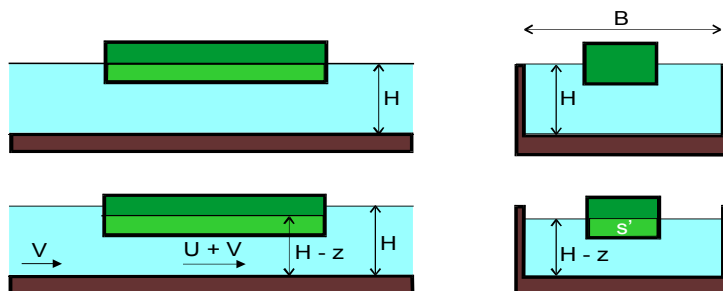


Figure 1.1.1.1. *Mouvement d'un bateau et abaissement du plan d'eau.*

Les deux équations fondamentales de l'hydrodynamique s'écrivent :

$$\text{Equation de continuité : } V S = (V+U) (S - s' - B z) \quad (1)$$

$$\text{Equation dynamique (Bernouilli) : } \frac{V^2}{2g} = \frac{(V+U)^2}{2g} - z \quad (2)$$

Avec :

V	vitesse moyenne de l'écoulement à l'amont du bateau supposé fixe.	(m.s ⁻¹)
U	vitesse moyenne du courant de retour.	(m.s ⁻¹)
S	section propre de la rivière à l'aval du bateau.	(m ²)
s'	section immergée du bateau.	(m ²)
z	abaissement du plan d'eau.	(m)

Ce système à deux équations et deux inconnues (si on connaît V) se résout par exemple en posant $X = 1+U/V$ et en éliminant z entre (1) et (2). On obtient alors une équation du 3^{ème} degré en X, qui s'écrit :

$$X^3 - [1 + 2gH/V^2(1-1/n)] X + 2gH/V^2 = 0 \quad (3)$$

où $H = S/B$ est la profondeur moyenne de la section et n le rapport S/s.

L'équation (2) donne la hauteur d'abaissement du plan d'eau, z :

$$z = \frac{V^2}{g} \left\{ \frac{U}{V} + \frac{1}{2} \left(\frac{U}{V} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

1.1.2. Calcul de la vitesse critique du bateau

En remplaçant U dans (2) par son expression issue de (1), on obtient une équation du type $V=f(z)$ fonction des paramètres H et n. Cette équation met en évidence l'existence d'une vitesse limite du navire telle que $\frac{\partial V}{\partial z} = 0$. Cette équation est résolue numériquement. Cette vitesse limite est très importante :

- Elle est égale à la vitesse de propagation de la vague générée à coté du bateau (Kolkman , 1978).
- Lorsqu'un bateau circule à la vitesse limite, il apparaît une sorte de mascaret juste à l'arrière du bateau, dans la zone de décélération des vitesses. Au-delà de cette vitesse limite, la résistance à la progression du bateau augmente fortement corrélativement à l'abaissement du plan d'eau (Schofield, 1974).

Le calcul de la vitesse limite a souvent été démontré dans la littérature et son existence a été corroborée par des expériences sur modèles réduits (Schijf et al., 1953 ;Mc Nown, 1976).

Le tableau suivant donne la valeur de cette vitesse en fonction de n :

n	2	3	4	5	7	10	∞
$\frac{V_{lim}}{\sqrt{g \cdot H}}$	0.20	0.33	0.42	0.47	0.55	0.62	1

Tableau 1.1.2.1. Valeurs de V_{lim} en fonction de n et de la profondeur moyenne. Tiré de (S.C.T Ministère de l'Équipement, 1976).

Pour une hauteur d'eau moyenne dans le chenal de navigation de 5 mètres et un n supérieur ou égal à 10 (cas des péniches dans notre zone d'étude), la vitesse limite estimée pour la navigation est comprise entre 4.4 m.s^{-1} (15.8 km.h^{-1}) et 7.0 m.s^{-1} (25.2 km.h^{-1}).

(Tothill, 1967) a comparé ce calcul théorique avec des essais sur modèles réduits au 1/48^{ième}, pour deux types de bateaux, l'un de 219 mètres de long et l'autre de 180 mètres naviguant dans un canal à fond plat de largeur 70 mètres et de section 570 m². En utilisant les dimensions principales des bateaux et la section du canal, il montre que la théorie fournit une approximation adéquate de l'abaissement du plan d'eau ainsi que du courant de retour moyen.

Nous avons donc cherché à évaluer la valeur moyenne du courant de retour dans le cas de la Seine afin de pouvoir la comparer, tout d'abord à la vitesse moyenne de l'écoulement à l'étiage et ensuite aux valeurs des vitesses de jet d'hélices des différentes péniches naviguant dans le secteur. Ce calcul de la vitesse U ainsi que de l'abaissement du plan d'eau z a été réalisé à l'aide du logiciel Mathematica pour différentes valeurs de n et de V . Les résultats sont donnés dans la figure 1.1.2.1.

Dans notre zone d'étude la section moyenne de la rivière est évaluée à 500 m^2 et la section mouillée de la plus grosse des péniches pleines circulant dans le chenal est de l'ordre de 50 m^2 (convoi moderne constitué d'un pousseur et de barges de $11,40 \text{ m}$ de large pour une hauteur d'enfoncement de 4 m). Si l'on considère une hauteur d'eau de 5 mètres et une vitesse moyenne des bateaux de 10 km.h^{-1} , nous constatons que le courant de retour moyen sur la section est de 0.35 m.s^{-1} (figure 1.1.2.1), c'est à dire $1,75$ fois la valeur moyenne de l'écoulement (estimée à $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ à l'étiage). (Mazumder et al., 1993) ont montré qu'au centre du chenal, mais aussi dans les zones bordant le chenal et vers les berges, les variations de vitesse peuvent atteindre des valeurs de 3 à 10 fois les vitesses moyennes normales, et elles peuvent durer jusqu'à une dizaine de minutes au niveau des berges, avant de revenir à des conditions normales.

Nous verrons dans la suite de ce chapitre que la valeur calculée ici est inférieure mais du même ordre de grandeur que les vitesses générées au fond de la Seine par les jets d'hélice.

Afin de modéliser correctement les remises en suspension des vases générées par le passage des bateaux dans le bief, nous prendrons en compte ce courant de retour pour calculer la part de l'énergie cinétique turbulente qui sert à remettre en suspension le matériel particulaire.

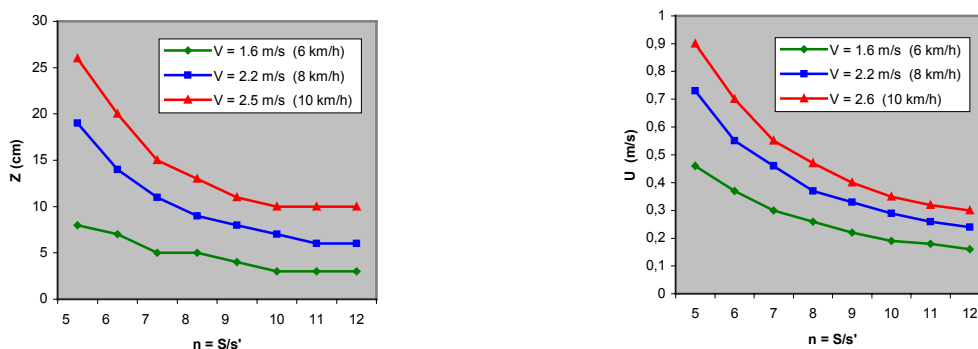


Figure 1.1.2.1. Courant de retour (m.s^{-1}) et abaissement du plan d'eau (cm) en fonction de la vitesse du bateau et du rapport entre la section de la rivière et la section immergée du bateau. Cas de la Seine à l'étiage.

1.2. Le batillage

L'abaissement du plan d'eau le long du bateau est suivi d'un relèvement, à l'arrière, soit par vagues déferlantes si la vitesse du navire est très élevée, soit par une sorte de ressaut ondulé se déplaçant avec le bateau. Mais le phénomène le plus dangereux pour les berges est l'abaissement du niveau de l'eau, car il se produit dans un délai très court et crée un courant déstabilisant pour celles-ci. Le batillage est ainsi responsable de l'essentiel des dégradations des berges, principalement au niveau de la surface libre.

Dans notre modèle, nous ne prenons pas en compte les effets du batillage car leurs actions érosives ont lieu principalement au niveau des berges. Le maillage que nous avons réalisé nous permet de calculer les caractéristiques de l'écoulement jusqu'à une dizaine de mètres au plus près des berges. L'action des vagues déferlantes à ce niveau est négligeable. De plus, les ondes de batillage génèrent un flux d'érosion vertical et, en l'absence de vitesse longitudinale (près du bord), les particules ont tendance à se redéposer à l'endroit où elles ont été soulevées. Le flux d'érosion engendré par le

batillage ne rentre pas en jeu dans notre modélisation des processus de transport par l'écoulement des vases fraîchement déposées.

Courant de retour et batillage demeurent les phénomènes dimensionnants pour les tronçons des voies navigables. Néanmoins, l'augmentation de la puissance des navires et le développement de nouveaux modes de propulsion, permettant une plus grande manœuvrabilité ont entraîné l'apparition d'érosions localisées, mais parfois très intenses. En exemple, on peut citer la rupture d'un pont autoroutier en Belgique imputée au déchaussement d'une pile sous l'action des jets d'hélice des bateaux manœuvrant à son voisinage. L'action des jets hélice a une influence déterminante sur la remise en suspension des particules fines très légères et facilement re mobilisables.

1.3. Effets érosifs des jets d'hélices de bateaux sur les fonds des voies navigables.

1.3.1. Présentation du problème

Les jets d'hélice ont leur intensité maximale lorsque le bateau est à l'arrêt et qu'il utilise toute sa puissance pour démarrer ou manœuvrer ; les érosions des matériaux les plus grossiers se rencontreront donc à proximité des écluses (notamment au raccordement du radier de l'écluse avec le fond), le long des quais ou d'appontement et dans les courbes. Cependant, concernant la remise en suspension des particules qui nous intéressent, nous devons tenir compte de la circulation des péniches dans le chenal de navigation qui génère des turbulences au fond susceptibles d'éroder la couche de surface d'une épaisseur variant de quelques millimètres à quelques centimètres.

La description des effets des jets hélice sur le fond fait intervenir un nombre de paramètres important (hauteur d'eau, enfoncement, diamètre et nombre des hélices, vitesse de rotation, puissance développée etc...) auxquelles s'ajoutent les caractéristiques des matériaux érodables. Face à un tel nombre de paramètres, les études antérieures se sont orientées dans deux directions : d'une part des simulations sur modèles réduits, représentant exactement le lieu concerné et un bateau donné, choisi comme référence ; et d'autre part, des tentatives de modélisation des phénomènes s'appuyant sur des mesures expérimentales qui présentent une portée plus générales mais sont forcément aussi plus schématiques.

Dans ce dernier type de démarche, qui est la plus intéressante pour une utilisation pratique sur une zone d'étude donnée, on peut distinguer trois étapes de modélisation.

- La modélisation du système propulsif qui permet de passer de ses caractéristiques de fonctionnement (poussée, vitesse de rotation d'hélice) à la vitesse de l'eau éjectée en sortie hélice.
- La modélisation du champ de vitesses qui permet de passer de la vitesse derrière l'hélice à la vitesse au voisinage du fond ou de la berge.
- La modélisation du phénomène d'érosion qui permet de passer de la vitesse érosive au flux d'érosion engendré.

Notre démarche a été de suivre ces trois étapes en s'appuyant sur des études théoriques et expérimentales afin de dégager une méthodologie applicable, d'une part, à notre zone d'étude et, d'autre part, au modèle mathématique que nous utilisons pour décrire les processus de transport des particules cohésives.

1.3.2. Modélisation du système propulsif.

La modélisation la plus simple suppose une répartition uniforme de la vitesse à peu de distance de l'hélice. Un calcul est présenté par Blaauw et al., (1978) : on utilise le théorème de la quantité de mouvement sur un tube de courant soumis à l'action de l'hélice pour calculer la poussée totale sur le système propulsif. Puis la relation de Bernoulli successivement entre C et B et B' et A pour calculer la différence de pression de part et d'autre de l'hélice (figure 1.3.2.1).

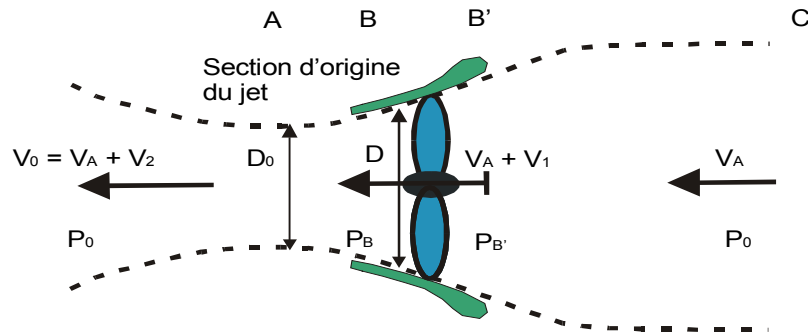


Figure 1.3.2.1. Tube de courant dans l'axe de l'hélice.

On en déduit une vitesse V_2 à la sortie du système propulsif dépendant du diamètre de l'hélice D , du nombre de tour n , de la vitesse d'avancée du bateau V_A , du supplément de vitesse au niveau de l'hélice V_1 et des coefficients de poussée déterminés par le constructeur K_h et K_t :

$$V_2 = 1.6 n D \sqrt{K_h} \left(1 + \frac{2 V_A}{V_2}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\left(\frac{D_0}{D}\right) = \sqrt{\frac{V_A + V_1}{V_A + V_2}}$$

avec :

$$V_A + V_1 = \frac{4 K_t n^2 D^2}{\pi V_2}$$

D	Diamètre de l'hélice	(m)
D_0	Diamètre à l'origine du jet	(m)
K_h, K_t	Coefficients de poussée	()
V_0	Vitesse à l'origine du jet	($m \cdot s^{-1}$)
V_1	Supplément de vitesse au niveau de l'hélice	($m \cdot s^{-1}$)
V_2	Supplément de vitesse à l'origine du jet	($m \cdot s^{-1}$)
V_A	Vitesse d'avancée du bateau	($m \cdot s^{-1}$)
n	Vitesse de rotation de l'hélice	(tours. s^{-1})

Lorsque les coefficients de poussée ne sont pas connus, la formule suivante est proposée par Fuehrer et al., (1977) qui relie la vitesse en sortie d'hélice au diamètre de cette dernière et à son nombre de rotation par seconde :

$$V_0 = 0.95 n D \quad (6)$$

Balanin et al., (1981) développent un modèle plus complexe partant d'une répartition parabolique des vitesses en sortie de la tuyère, la répartition étant définie par une vitesse nulle au centre (au niveau du moyeu) et une vitesse moyenne V définie par (6). En fait, la difficulté de réaliser des mesures de vitesse sur modèle réduit ou en nature dans la zone proche de l'hélice permet difficilement de justifier une telle répartition (Bouchard, 1982).

Nous utiliserons donc l'équation (6) pour calculer les vitesses en sortie d'hélice des différents types de bateaux qui circulent dans notre bief.

1.3.3. Modélisation du jet diffusif

Toutes les analyses du problème rencontrées dans les différentes études utilisent le modèle du jet diffusif.

Nous estimons à partir de cette théorie (Hug., 1975) les vitesses produites en tout point du maillage par une hélice de diamètre et de vitesse de rotation données. Nous distinguons une zone d'établissement où la vitesse dans l'axe du jet ne change pas et une zone de jet établi, diffusif, dans laquelle la vitesse décroît. Dans la zone établie, on suppose l'autosimilarité des profils de vitesse et une variation radiale de cette vitesse suivant une loi de Gauss (figure 1.3.3.1).

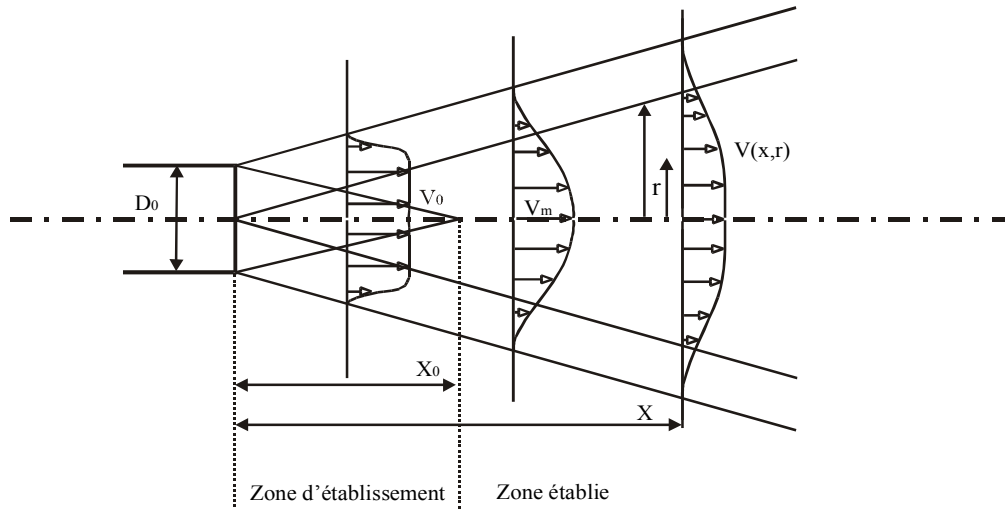


Figure 1.3.3.1. *Modèle du jet diffusif.*

Moyennant ces hypothèses, on démontre que la vitesse s'exprime selon les expressions suivantes où le paramètre c (coefficient de contraction) est le seul inconnu et doit être déterminé expérimentalement :

Zone d'établissement, $X < X_0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} V(r,x) = V_0 \quad \left(r < \frac{D_0}{2} - c x \right) \\ V(r,x) = V_0 \exp \left[-\frac{\left(r + c x - \frac{D_0}{2} \right)^2}{2 c^2 x^2} \right] \end{array} \right. \quad (7)$$

Zone établie, $X > X_0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{V_m}{V_0} = \frac{1}{2c} \frac{D_0}{x} \\ V(r,x) = V_m \exp \left[-\frac{r^2}{2 c^2 x^2} \right] \end{array} \right. \quad (8)$$

Pour un jet d'orifice, donc sans torsion, on retient 0.08 pour valeur de c , ce qui donne une longueur d'établissement du jet $X_0 \cong 6.2 D_0$. Mais, le jet d'hélice comporte une torsion et des hétérogénéités des vitesses qui lui donne un comportement différent ; la turbulence y est plus intense

que dans le jet classique et de ce fait, il diffuse plus rapidement. Les valeurs du paramètre c déterminées derrière l'hélice diffèrent donc sensiblement du jet sans torsion. Blaauw et al., (1978) ont obtenu sur des modèles de bateau au $1/80^{\text{ème}}$ et au $1/25^{\text{ème}}$ un coefficient c de 0.18 et une longueur d'établissement $X_0 = 2.8 D_0$.

1.3.4. Influence du confinement

La prise en compte de limites à l'extension du jet (surface de l'eau, fond ou talus) nécessite l'intervention de nombreux paramètres. Blaauw et al., (1978), constatant sur les mesures de vitesse que le confinement du jet induit par le fond et la surface libre n'introduit pas un écart important avec la vitesse calculée par la formule du jet libre préfèrent négliger cet effet.

2. Méthodologie et développements dans SUBIEF 2D

Pour intégrer dans le modèle SUBIEF 2D les processus de remises en suspensions locaux générés par la navigation, nous avons introduit une formulation énergétique des processus de dépôt/érosion fondée sur la théorie de la capacité de transport d'un écoulement (Bagnold, 1966 ; Celik & Rodi, 1991) : on suppose qu'une fraction η , sensiblement constante, de la puissance hydraulique est utilisée pour maintenir en suspension les particules de la colonne d'eau. La puissance hydraulique calculée en chaque nœud du maillage et à chaque pas de temps est décomposé en deux termes :

Un terme produit par l'écoulement propre de la rivière :

$$\overline{P_1} = \frac{\overline{\tau_1} \overline{U_1}}{H_1} \quad (9)$$

avec:

$\overline{\tau_1}$ contrainte de cisaillement moyennée sur la hauteur d'eau.

$$\overline{\tau_1} = \rho G \frac{\overline{U_1}^2}{K_2 H_1^{1/3}} \quad (10)$$

1) $\overline{U_1}$ Vitesse de l'écoulement moyennée sur la hauteur d'eau (m.s⁻¹)

H_1 Hauteur d'eau (m)

ρ Masse volumique de l'eau (kg.m⁻³)

2) G Gravité (m.s⁻²)

K Coefficient de Strickler (m^{1/3}.s⁻¹)

Un terme exprimant la puissance moyenne générée par le passage d'une péniche, par le jet d'hélice d'une part et le courant de retour d'autre part :

$$\overline{P_2} = \frac{\tau_2 \overline{U_2}}{H} \quad (12)$$

avec:

τ_2 : contrainte de cisaillement générée par le jet et le courant de retour. Nous n'exprimons pas cette contrainte de la même façon que la contrainte de cisaillement propre à l'écoulement car cette dernière fait intervenir un coefficient de Strickler. Or ce coefficient dépend fortement du champ de vitesse de la masse d'eau. Les vitesses de jet étant bien supérieures à celle de l'écoulement, il nous est apparu essentiel de revenir à une formulation classique de la contrainte de cisaillement faisant intervenir un coefficient de traînée C_f (Hervouet & Van Haren, 1994) :

$$\tau_2 = \frac{1}{2} \rho C_f U_2^2 \quad (13)$$

- 1) $\overline{U_2}$ Vitesse moyennée sur la hauteur d'eau du jet et du courant de retour (m.s⁻¹)
- 1) U_2 Vitesse au fond générée par l'hélice et le courant de retour (m.s⁻¹)
- H_2 Hauteur du jet (m)
- C_f Coefficient de traînée

Nous arrivons à l'expression suivante de la puissance totale dissipée en un nœud et à chaque pas de temps :

$$P = P_1 + P_2$$

soit :

$$P = \rho G \frac{U_1^3}{K^2 H^{4/3}} + \frac{1}{2} \rho C_f \frac{\overline{U_2}}{H} U_2^2 \quad (14)$$

2.1. Calcul du flux d'érosion.

Le flux d'érosion d'une variable i dans la vase est calculé en chaque nœud et à chaque pas de temps comme le produit de la fraction massique de cette variable et de la fraction de la puissance hydraulique.

$$F_{\text{éro}}(\text{vari}) = \frac{\text{masse}(\text{vari})}{\text{masse totale vase}} \eta P \quad (15)$$

Remarque : Des développements antérieurs ont été réalisés concernant le module benthique de SUBIEF 2D. Désormais, nous calculons la variation de masse dans la vase des différentes variables présentes dans l'eau et qui sédimentent : apport par sédimentation de la même variable dans la colonne d'eau, perte par érosion et processus biologique dans la crème de vase. Dans cette crème de vase de porosité supposée constante, nous distinguons aussi les variables dissoutes des variables particulières (Martin et al., 1999).

La formulation de la puissance apportée à la rivière par la navigation (P_2) introduit un paramètre empirique C_f qui peut varier fortement d'un milieu à l'autre et d'un régime à un autre (laminaire, turbulent). Ne connaissant pas sa valeur pour la Seine à l'étiage, ce coefficient rentre dans la procédure de calage de la fraction d'énergie dissipée pour maintenir les suspensions dans la colonne d'eau. Nous écrivons alors :

$$F_{\text{éro}}(\text{vari}) = \frac{\text{masse}(\text{vari})}{\text{masse totale vase}} \left(\eta P_1 + \xi \frac{P_2}{C_f} \right) \quad (16)$$

avec :

$$\xi = \eta C_f$$

2.2. Données nécessaires à la modélisation

Les développements réalisés dans SUBIEF 2D permettent de faire circuler l'ensemble des péniches ayant effectivement traversé notre zone d'étude pendant la période considérée. Pour cela, nous avons dû récolter toutes les informations concernant les caractéristiques des bateaux.

2.2.1. Vitesse de circulation et heures d'entrée dans le bief

La zone d'étude est limitée par deux écluses : Andrésy en aval du domaine et Pontoise sur l'Oise. Nous avons recueilli les heures de passage des différentes péniches à ces écluses afin de connaître leur heure d'entrée dans le bief. Nous distinguons les péniches avalantes (Herblay → Andrésy) et les péniches montantes (Andrésy → Herblay). Nous supposons que tous les bateaux circulent à la vitesse moyenne de 10 km.h⁻¹. Grâce à l'ensemble de ces données, nous avons accès aux vitesses générées au fond de la rivière par le passage des bateaux, pour chaque nœud du maillage.

2.2.2. Classification des péniches

Pour ce dernier point, nous avons décidé, en accord avec des chercheurs du CETMEF, de considérer trois catégories de péniches. Pour chaque catégorie, nous calculons la vitesse V_0 de l'eau au voisinage de l'hélice à partir de (6). Les valeurs obtenues sont confrontées à un calcul où l'on prend en compte non plus le diamètre de l'hélice mais le pas moyen fourni par les constructeurs :

$$V_0' = p n \quad (17)$$

avec :

p	pas moyen de l'hélice	(m)
n	nombre de tours d'hélice	(tours.s ⁻¹)

Le tableau 2.2.2.1 résume l'ensemble des données fournies par les constructeurs de péniches et d'hélices et le Service de la Navigation de la Seine, données qui vont permettre de calculer en chaque nœud du maillage influencé par le passage des bateaux les vitesses générées par le jet d'hélice et le courant de retour au fond de la rivière.

Type	Dénomination	Tonnage moyen (tonnes)	Longueur moyenne (m)	Tirant d'eau moyen en charge (m)	Diamètre Hélice (m)	Pas (m)	Nombre de tours (tours/s)	V_0 (6) (m/s)	V_0' (17) (m/s)
A	Freycinet	350	38.50	2.0	0.9	0.8	10.0	8.5	8.0
B	Auto-moteurs et Chalands de Seine	1500	75	3.0	1.5	1.3	8.3	11.8	10.8
C	Convoi moderne : Pousseur + barges	3500	170	4.0	2.2	2.0	6.6	14.0	13.2

Tableau 2.2.2.1. *Données des constructeurs concernant les caractéristiques des péniches circulant en Seine et calcul selon (6) et (9) de la vitesse de l'eau en sortie d'hélice.*

Connaissant désormais, pour chaque type de péniches, la vitesse de l'eau au voisinage de l'hélice, nous pouvons calculer les vitesses générées en chaque nœud du maillage en appliquant le modèle du jet diffusif. Seule la vitesse au fond de la rivière nous intéresse car c'est elle qui engendre les turbulences susceptibles de remettre en suspension les particules fraîchement déposées. Le champ de vitesse sur le lit de la rivière est calculé comme étant l'intersection du cône diffusif avec la bathymétrie de la zone étudiée.

2.3. Description du chenal de navigation en fonction du maillage

Grâce à la carte du Service de la navigation de la Seine, nous avons repéré et indicé les nœuds du maillage qui se situent dans le chenal de navigation. Nous faisons alors circuler les péniches sur ces

nœuds. Cependant, nous ne connaissons pas les trajectoires précises de chaque péniche à l'intérieur du chenal. Nous émettons donc l'hypothèse que les bateaux du type C (pousseur + barges) circulent toujours au centre du chenal, leur tirant d'eau ne leur permettant pas de s'en éloigner. Pour les autres catégories, nous les faisons circuler, en fonction de leur heures d'entrée dans le bief d'un bord à l'autre du chenal.

2.4. Résultats types sur un canal

Nous avons tout d'abord testé notre module d'érosion sur un canal à fond plat afin de visualiser les vitesses générées au fond par le jet d'hélice. Nous nous plaçons dans des conditions hydrauliques proches de celles de la Seine à l'étiage : hauteur d'eau de 5 m, débit de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ qui nous permet d'avoir des vitesses d'écoulement de l'ordre de $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Dans ces conditions nous faisons circuler successivement trois péniches de différentes catégories (A, B et C) et nous observons les vitesses longitudinales générées au fond par le jet d'hélice (figure 2.4.1). Ces vitesses varient fortement en fonction du type de bateau. Elles peuvent atteindre $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pour un bateau de type A et $1.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pour un bateau de type C. Elles sont bien supérieures à la vitesse moyenne de l'écoulement et entraîneront donc des érosions locales très intenses.

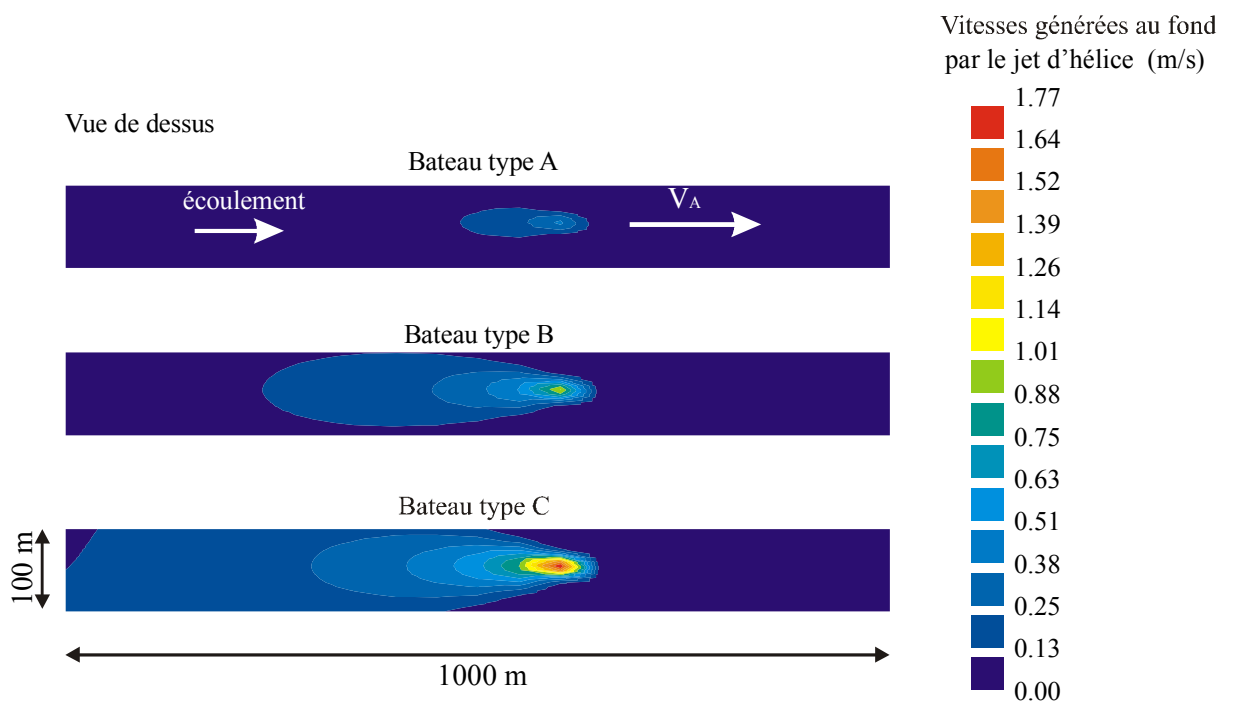


Figure 2.4.1. *Champ de vitesses générée par le jet d'hélice des trois types de péniches sur le fond plat d'un canal de profondeur 5 m.*

Dans ce modèle, nous ne simulons que les modifications longitudinales de la vitesse au fond. C'est en effet l'impact le plus évident du passage d'un bateau. Sazik et al., (1996) ont systématiquement observé une augmentation de la vitesse (comptée positivement vers l'aval) dans le cas du passage des bateaux montants, et une diminution pouvant aller jusqu'à une inversion dans le cas des bateaux avalants. Au cours de leurs mesures, à l'aide du mini-MFES, de l'effet du passage des bateaux, ils ont enregistré des variations maximales de vitesse de l'ordre de $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pour les bateaux de type A et B, nous obtenons des vitesses au fond du même ordre de grandeur. Par contre, pour les gros convois chargés, qui circulent d'ailleurs généralement la nuit, nous atteignons des vitesses beaucoup plus grandes au centre du chenal.

3. Simulation du 21 et 22 juillet 1999 : données expérimentales et calage des coefficients η et ζ .

Nous avons mis en œuvre ce modèle de transport de MES sur la Seine à l'aval de la station d'épuration d'Achères pour la période du 20 au 22 Juillet 1999. Les données nécessaires à la réalisation de la simulation sont décrites puis nous présentons les résultats.

3.1. Suivi des matières en suspension pour la période considérée.

Une cartographie tridimensionnelle du panache des effluents d'Achères a été réalisée à l'initiative du CEREVE (E.N.P.C) et du C.I.G. (E.N.P). Pour cela, nous avons utilisé un GPS différentiel et une sonde multi-paramètres YSI-6920 qui donne la profondeur, la température, la conductivité, l'oxygène dissous et la turbidité (Martin et al., 1999). Pour douze profils transversaux, nous avons effectué une série de profils verticaux (environ dix profils pour chaque section). Sur les figures 3.1.1 et 3.1.2, nous avons reporté les différentes sections qui ont été échantillonnées. Nous regarderons les résultats de la simulation au niveau de ces sections. Notre modèle étant bi-dimensionnel horizontal, nous avons moyenné sur la verticale les concentrations des différents éléments mesurés. Ces données vont nous servir à caler les coefficients η et ζ du modèle de transport.

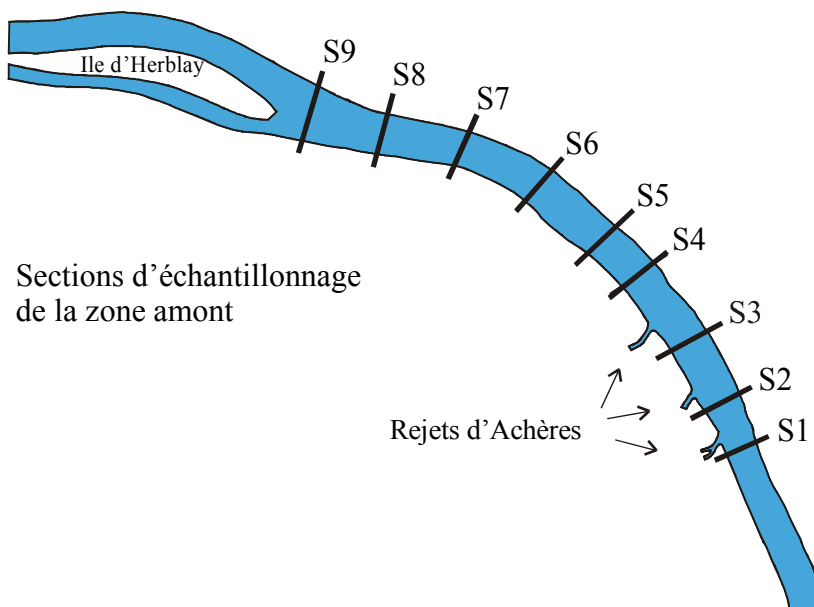


Figure 3.1.1. Sections transversales de la zone amont échantillonnées lors de la campagne du 22 juillet 1999.

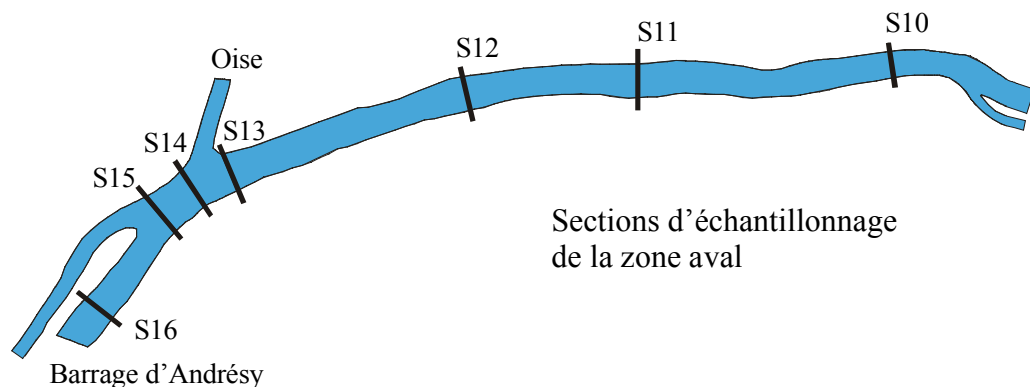


Figure 3.1.2. *Sections transversales de la zone amont échantillonnées lors de la campagne du 22 juillet 1999.*

3.2. Conditions aux limites pour les rejets et l'amont du domaine.

Le service technique de la station d'épuration d'Achères nous a fourni les concentrations en matières en suspension dans les canaux de rejet. La subdivision pollution de Bougival nous a renseigné sur les concentrations en Seine à l'amont du domaine pour les jours précédents la simulation (le 19 et 20 juillet). La condition limite amont pour les MES le 21 juillet est fournie par nos mesures.

Le débit de la Seine pour ces trois jours est de $135 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, celui de l'Oise est de $35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et celui des rejets de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Les concentrations en MES varient de 21 à $25 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ à l'amont, de 26 à $35 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ pour les rejets et une valeur de $10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ a été mesurée pour l'Oise.

Nous effectuons une simulation permanente de l'hydraulique et nous faisons varier les concentrations en MES dans le domaine pour les trois jours d'étiage.

3.3. Conditions initiales pour l'épaisseur de dépôt.

Nous ne possédons aucune information concernant les hauteurs de dépôts présents sur le site pour la période considérée. Par contre nous savons que, dans ce bief, en période d'étiage, il se dépose plus de matières en suspension qu'il ne s'en érode (Chesterikoff et al., 1991). A l'état initial, nous supposons donc que le stock déjà présent sur le lit de la rivière, constitué de particules plus ou moins compactées ne sera pas érodé : seules les particules qui transitent dans la zone pendant la période de simulation sont susceptibles d'être remises en suspension. Notre condition initiale est donc de mettre un stock nul de vase. Cette condition initiale ne sert que pour caler les coefficients η et ξ . Lorsque ces coefficients auront été déterminés, nous pourrons simuler toute une période d'étiage en démarrant le calcul juste après la dernière crue, là où la condition initiale "stock nul" est cette fois ci vérifiée.

3.4. Résultats

Connaissant les heures pour lesquelles ont été mesurées les différents profils transversaux, nous regardons ce que donnent les résultats de la simulation dans un intervalle de 30 minutes autour de ces horaires. Les trajectoires précises des péniches n'étant pas connues, nous admettons une erreur de 30 minutes sur le passage d'un bateau à un endroit donné. Des simulations antérieures avec le modèle Prose (Even et al., 1996) ont permis d'évaluer le coefficient η à $1 \cdot 10^{-4}$ pour la Seine à l'étiage. Cette valeur se trouve dans la gamme de celles estimées par Vélikanov dans le cas d'une approche énergétique de l'érosion (Maldiney, 1994). L'érosion alors engendrée remet en suspension une faible quantité de particules fraîchement déposées qui ne suffit pas à maintenir les concentrations en M.E.S au niveau de celles mesurées pendant la campagne, si nous adoptons des vitesses de chute réaliste de l'ordre de $1 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ (Tangérino, 1994). Nous ajustons donc le second paramètre ξ afin de reproduire les variations longitudinales et transversales des matières en suspension aux points de mesures et en particulier à l'aval du domaine. Les résultats de cette simulation sont présentés sur les figures 3.4.1 et 3.4.2. Un coefficient ξ de $2 \cdot 10^{-4}$ permet d'obtenir une bonne adéquation entre mesures et simulation.

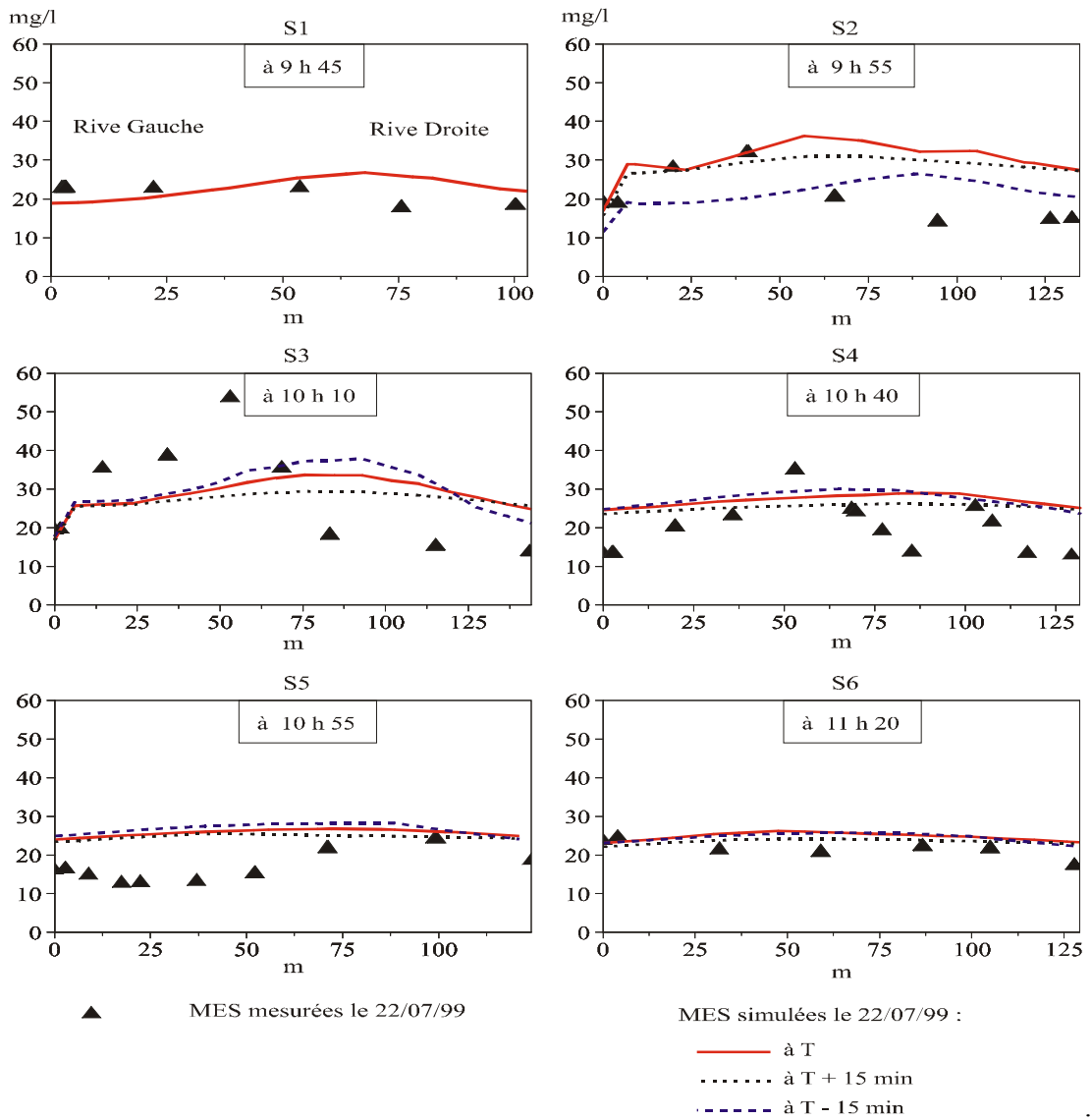


Figure 3.4.1. Comparaison des MES mesurées et simulées le 22 juillet 1999 pour les sections S1 à S6. $\eta = 1.10^{-4}$; $\xi = 2.10^{-4}$.

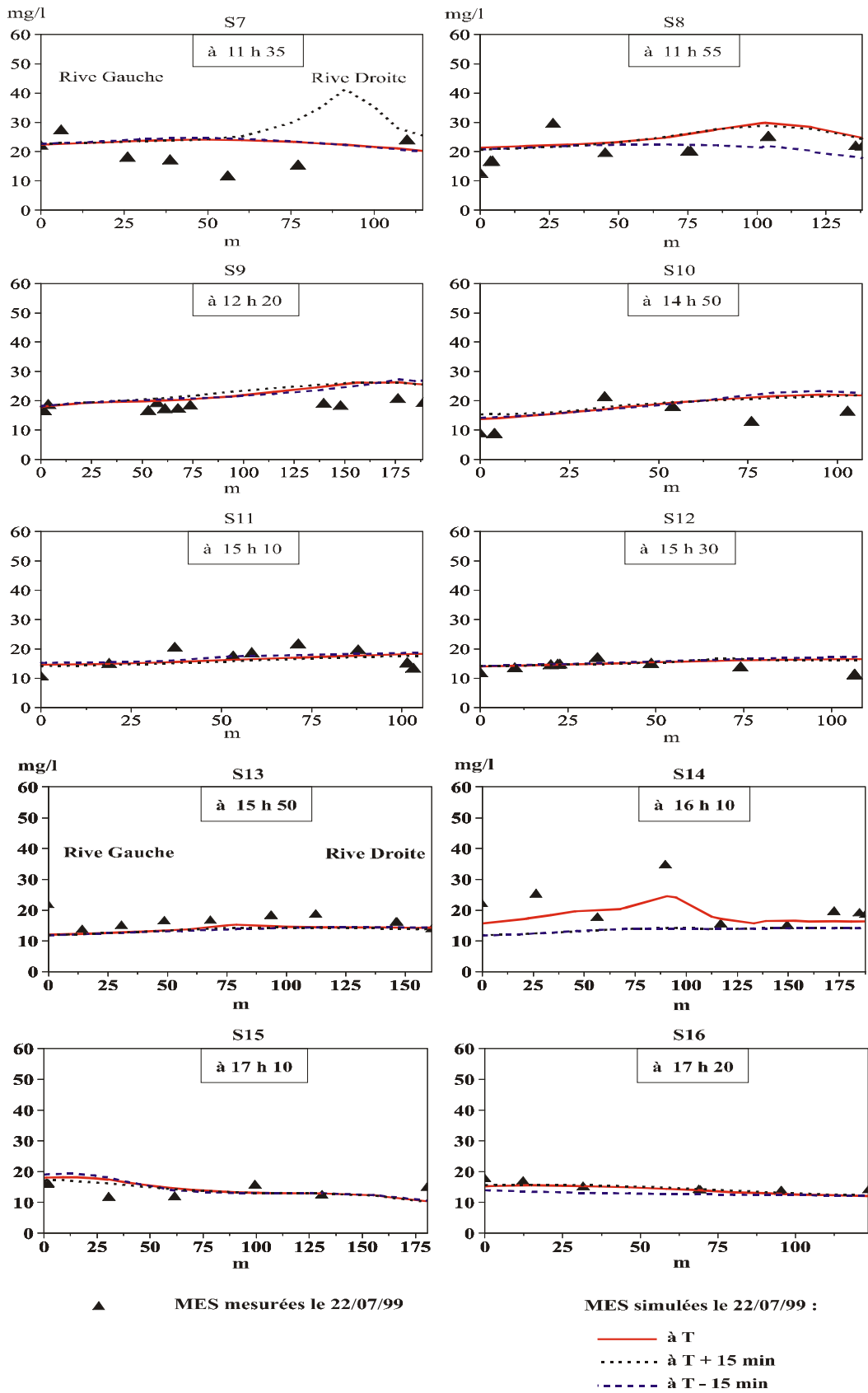


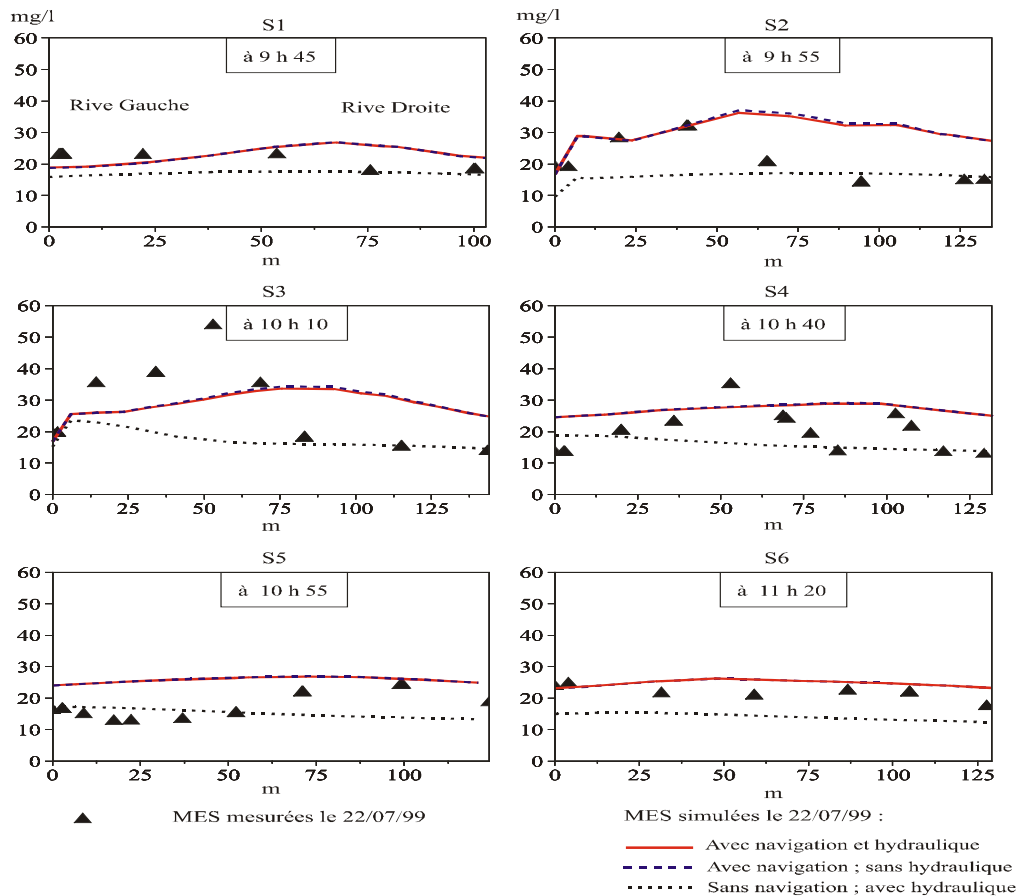
Figure 3.4.2. Comparaison des MES mesurées et simulées le 22 juillet 1999 pour les sections S7 à S16. $\eta = 1.10^{-4}$; $\xi = 2.10^{-4}$.

4. Impact de la navigation sur le transport solide pour la Seine à l'étiage

4.1. Simulations avec et sans navigation

Les résultats de cette étude montre que la circulation fluviale joue un rôle primordial dans le transfert des particules provenant de l'amont. En l'absence de péniches, les concentrations en particules atteignent des niveaux très bas à l'aval du domaine de l'ordre de 5 mg.l⁻¹. La figure 4.1.1 regroupe les résultats de simulations dans lesquelles on a enlevé tour à tour un des processus érosif. Deux enseignements peuvent être tirés de ces résultats :

- tout d'abord, en l'absence de navigation (pointillé noir) la concentration en MES dans la colonne d'eau chute très rapidement. Entre 20 et 15 mg.l⁻¹ de S1 à S6, elle passe à 10 mg.l⁻¹ au niveau de l'île d'Herblay malgré l'apport des rejets d'Achères, pour se stabiliser à 5 mg.l⁻¹ au niveau d'Andrésy. Les dépôts sont très intenses dans le premier tiers du domaine, notamment à l'aval immédiat des rejets. La simulation montre que les dépôts se situent aussi bien sur les bords qu'au centre du chenal. Même aux endroits où l'écoulement est le plus rapide les particules s'accumulent sur le lit. La puissance hydraulique de la rivière ne parvient pas à remobiliser l'ensemble des particules qui sédimentent.
- Les résultats correspondant aux traits pointillés bleus sont issus d'une simulation où l'on a supposé que seule la navigation influençait l'érosion ($\eta = 0$). Les résultats sont quasiment identiques à ceux calculés avec les deux processus d'érosion simultanés. A l'étiage, ce sont les remises en suspension locales mais très intenses due à la navigation qui contribuent à maintenir le niveau de MES mesuré dans la colonne d'eau.



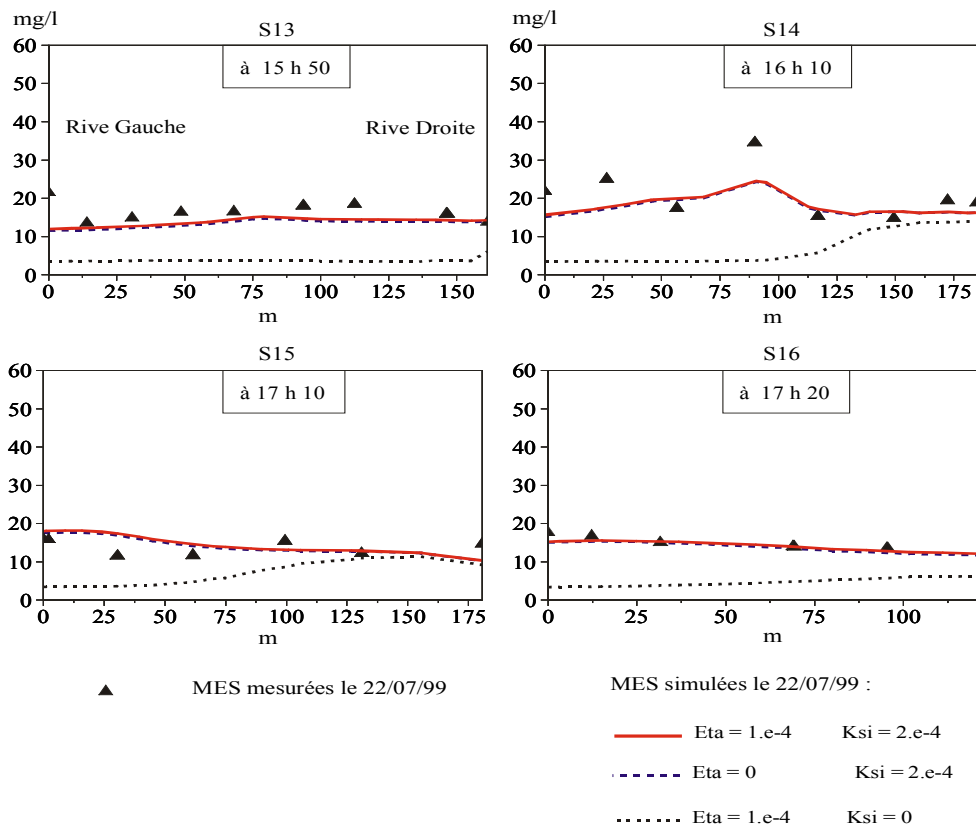


Figure 4.1.1. *profils transversaux des MES mesurées et simulées pour la journée du 22 juillet 1999. — érosion par la navigation et l'écoulement ; - - - - - érosion par la navigation seule ; érosion par l'écoulement seul. Profils S1 à S16.*

4.2. Localisation des dépôts à l'étiage

La figure 4.2.1 résume les zones de forte accumulation de particules dans le bief à l'étiage. Nous pouvons distinguer 3 zones de piégeage des particules :

- à l'aval immédiat des rejets. Même si l'écoulement dans ce secteur est perturbé par l'arrivée des eaux d'Achères avec une légère augmentation des vitesses dans les 500 premiers mètres (Martin et al., 1998), il n'en reste pas moins que cet endroit est propice à la sédimentation. Une large bande de sédiments frais s'étend sur une centaine de mètres de long et est délimitée en largeur d'une part par le chenal de navigation et, d'autre part, par la dispersion du panache polluant des effluents. Il est intéressant de constater que l'étude de la localisation des bancs de vases réalisée par l'école des Ponts et Chaussées de Blois à l'aide d'un échosondeur latéral avait déjà mis en évidence la présence de ces bancs vaseux à l'aval des rejets, en rive gauche (Martin et al., 1999). L'évolution de la hauteur de dépôt dans cette zone est estimée par le modèle à 2 mm/jour. En 3 mois d'étiage, il peut donc se former un dépôt d'une vingtaine de centimètres. Lorsque nous avons effectué des carottages dans ce secteur avec l'équipe du LSCE, nous avons pu constater que la hauteur de vase non tassée atteignait pratiquement toujours ces valeurs (Sogon, 2000 ; dans ce rapport).
- Dans le bras gauche de l'île d'Herblay. Cette zone, aux faibles vitesses d'écoulement et non sujette à la navigation, est elle aussi propice à la sédimentation. Les hauteurs de dépôts sont plus faibles, de l'ordre de 1 mm/jour. En effet, le flux de particules en suspension arrivant à cet endroit est moins important qu'à l'aval immédiat des rejets car une partie des MES a déjà sédimentée et le panache est déjà beaucoup plus dispersé. Mais, alors que la navigation diminue la sédimentation dans le chenal, elle joue un rôle opposé dans ce secteur. En remettant en suspension les particules sédimentées à l'amont, elle augmente le flux de matières en suspension entrant dans le bras gauche et ainsi le dépôt dans ce bras. Ce résultat est montré dans la figure 4.2.2 pour le graphe D.

- Dans le bras droit de Dénouval. Ici encore, les faibles vitesses d'écoulement permettent une sédimentation importante qui n'est pas gênée par la circulation fluviale. Le type de particules sédimentées n'est pas le même que pour les autres zones : ce sont essentiellement les matières en suspension provenant de l'Oise qui se déposent dans ce secteur. On peut estimer l'évolution de la hauteur de dépôt à 1 mm/jour dans ce secteur.

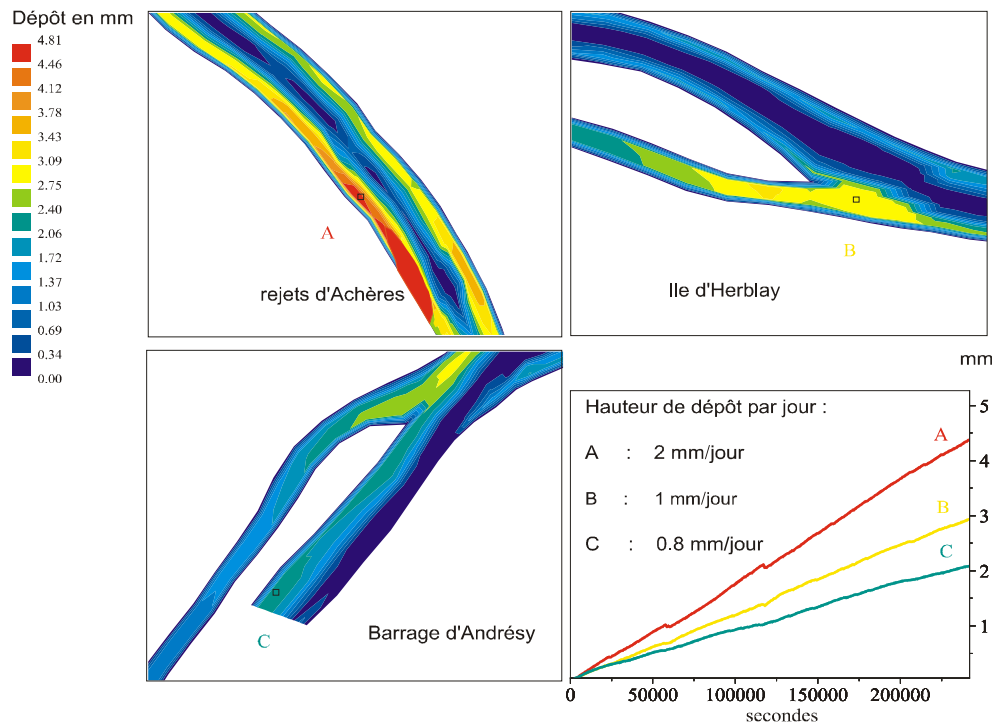


Figure 4.2.1. Localisation des dépôts à l'étiage au bout de Trois jours de simulation.

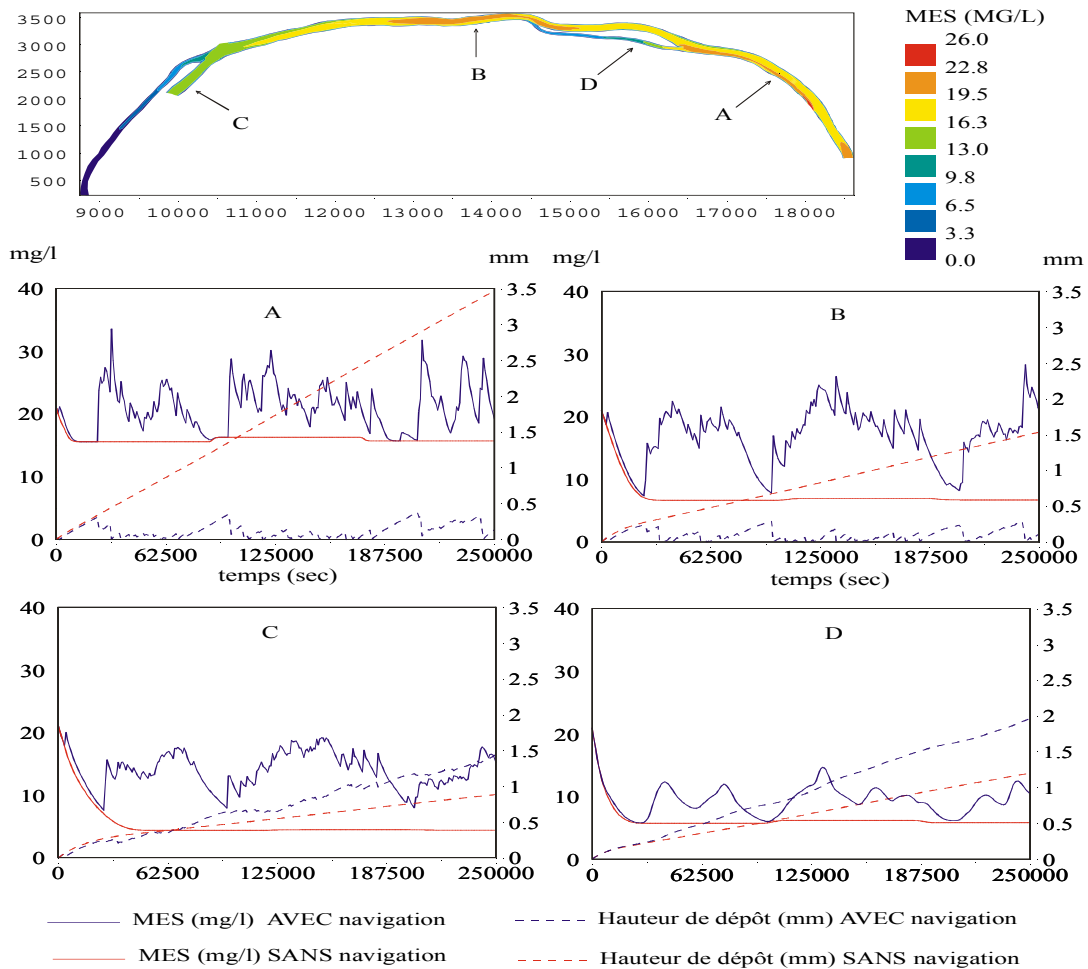


Figure 4.2.2. Evolution temporelle des MES et des dépôts en 4 points du bief

4.3. Fonctionnement particulier des bras non navigables

Il est intéressant de constater que le bras gauche de l'île d'Herblay ainsi que le bras de Dénouval ont un comportement radicalement différent du reste de la zone d'étude. En n'étant pas soumis au passage des bateaux et du fait que les vitesses d'écoulement y sont deux fois plus faibles que dans le reste du domaine (0.1 m.s^{-1} contre 0.2 m.s^{-1}), ils se comportent comme des « pièges » à particules. Les particules entrant dans ces bras se déposent dans les premiers mètres et ne seront remises en suspension qu'à la crue suivante. Respectivement 15 % et 18 % des particules totales qui ont sédimentées pendant deux jours d'étiage se trouvent dans le bras gauche de l'île d'Herblay et dans le bras de Dénouval, qui ne représentent en superficie que 3 % et 8 % du domaine. De plus, les rejets d'Achères étant situés en rive gauche, l'essentiel des particules fortement polluées est piégé dans le bras gauche d'Herblay.

4.4. Bilan de MES pour une situation d'étiage : influence de la navigation et des flux d'entrées.

Nous avons cherché à estimer la masse de particules qui sédimentent dans le bief en fonction d'une part de la navigation et d'autre part, du flux de particules en suspension entrant dans le domaine. La figure 4.4.1 indique le pourcentage de MES dans les différents compartiments (sédiments et colonne d'eau), selon que l'on a pris en compte la navigation ou non. Les résultats sont très différents. Pour une période de 3 jours, alors que 72 % de la masse totale se déposerait dans le domaine sans la navigation, 31 % seulement des particules sont piégées lorsque l'ont en tient compte. Pour 1150 tonnes de MES ayant transitées dans le bief, 620 tonnes sortent du domaine au bout de trois jours et 350 se déposent, si l'on tient compte de la navigation. Sans son influence, 244 tonnes sortent et 830 se déposent. Ces chiffres ne valent que si le flux d'entrée des MES dans le bief est compris entre 2 et 2.5

kg/s. En effet, en faisant varier les flux de MES entrant dans une gamme de 2 à 8 kg/s (qui correspond à des concentrations à l'amont de 10 à 70 mg/l), nous avons constaté que ces pourcentages variaient fortement. La figure 4.4.2 montre les résultats de ce test de sensibilité aux flux entrants : plus le flux est important, plus le pourcentage de particules déposées est grand avec un pourcentage limite de dépôt de l'ordre de 60 %. Ce résultat n'est pas trivial. On pourrait s'attendre en effet à ce que le rapport entre masse déposée et masse sortie reste sensiblement constant quel que soit les flux et pour une situation de débit et de circulation fluviale donnée. Le résultat que nous obtenons peut être expliqué par le fait que la puissance érosive générée par la navigation permet de remettre en suspension une certaine quantité de particules fraîchement déposées. Lorsque cette quantité n'est pas atteinte (parce que les flux amonts sont trop faibles), seule une partie de la puissance érosive est utilisée pour remettre en suspension les particules. A l'inverse, dès que le flux de sédimentation est suffisant, le rapport entre masse déposée et masse dans la colonne d'eau atteint son maximum. Pour la Seine à l'étiage, nous ne sommes pas dans cette dernière situation : avec des flux d'entrée pouvant varier de 2 à 4 kg/s, Les quantités déposées ne mobilisent pas toute l'énergie dissipée par la circulation fluviale pour les remettre en suspension et le pourcentage de matériel particulaire déposé varie entre 25 et 40 % de la masse totale entrée dans le bief pour la période de simulation considérée (figure 4.4.1).

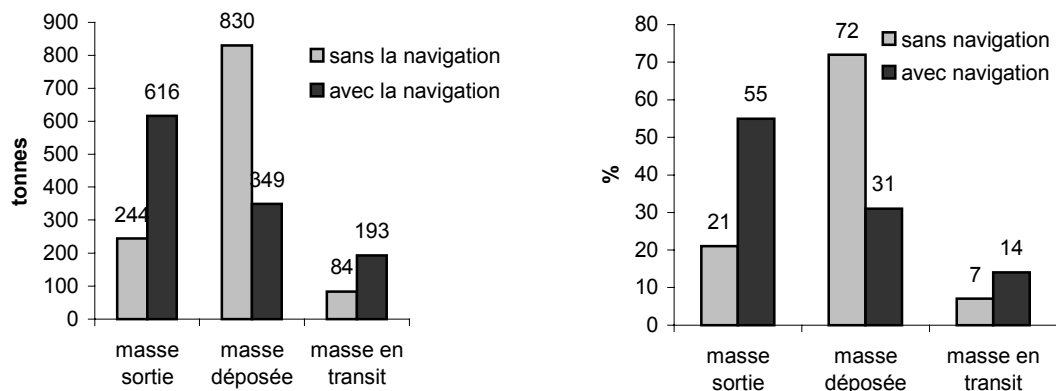


Figure 4.4.1. Masse sortie et déposée en tonnes et en pourcentage de la masse totale entrée. Comparaison de simulations avec et sans navigation.

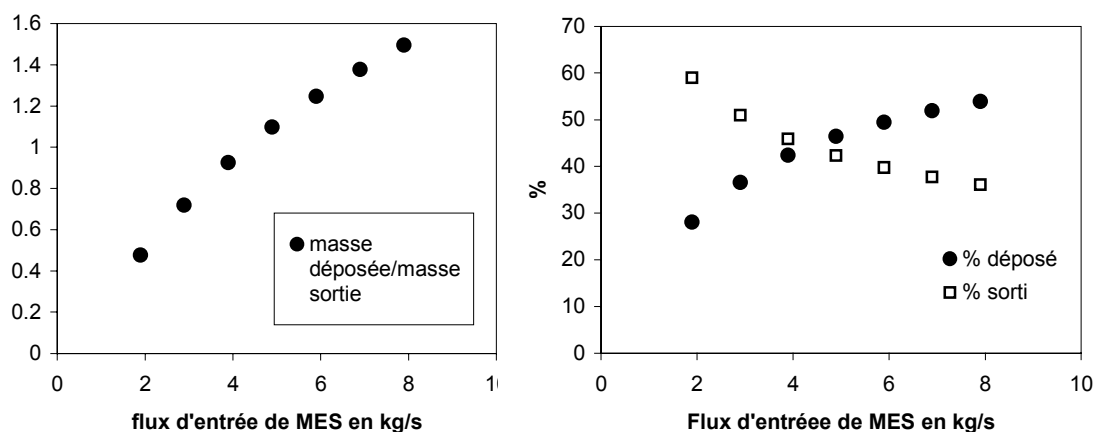


Figure 4.4.2. Rapport entre la masse déposée et la masse sortie ainsi que pourcentage, pour différents flux d'entrée de MES à l'amont.

4.5. Estimation de l'âge moyen des particules.

En période d'étiage, le temps de transit des particules en suspension dans les rivières est plus grand que celui de l'eau. En effet, leur transport résulte d'une alternance de sédimentations et de remises en suspension. Les particules en suspension tout au long du cours d'eau auront donc des âges différents, provenant du mélange des particules du stock facilement re-mobilisable et de celles en transit (Bonté et al., 1999).

La méthodologie développée dans le modèle SUBIEF 2D nous permet d'avoir accès à l'âge moyen des particules qui transitent dans le bief Herblay-Andrésy, notamment celles qui proviennent des rejets de la station d'épuration d'Achères. Nous pouvons distinguer deux catégories de particules, non pas par leur propriétés physico-chimiques, mais par le trajet qu'elles ont le long du tronçon. En effet, les particules qui se trouvent proches des berges, comme celles qui passent par les bras non navigables vont sédimenter et rester au fond pendant toute la période d'étiage ; elles ne sont pas remises en suspension par les turbulences liées à la navigation qui se manifestent le plus intensément dans le chenal de navigation. A l'inverse, les autres vont être constamment érodées par le passage des bateaux. Ces deux catégories sont évidemment en relation. Une particule ou un floc sédimentant dans le chenal quand il n'y a pas de bateau peut se retrouver, lors de sa remise en suspension et par les phénomènes de dispersion, éloignée de ce chenal. Elle rentre ainsi dans la deuxième catégorie et alimente le stock de particules piégées au fond pendant la période d'étiage. Cette relation entre les deux catégories n'est symétrique : une particule sédimentée près des berges ne pourra que rarement alimenter le stock de celles qui transitent au gré des dépôts/remise en suspension.

Pour estimer l'âge moyen des particules qui traversent le bief, nous avons simulé un pic de MES sortant à T0 des rejets ou de l'amont du domaine, les deux cas ayant été effectués (figure 4.5.1). Afin de conserver des concentrations homogènes et réaliste dans la colonne d'eau, nous simulons aussi une deuxième variable (MES₂), qui elle est constante en concentration, sauf pendant le pic de la première variable où elle diminue de la même façon mais à l'inverse du pic triangulaire (figure 4.5.1).

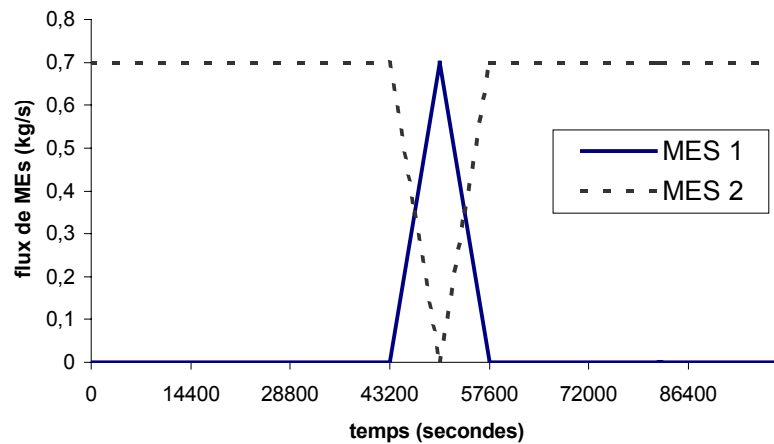


Figure 4.5.1. Conditions limites amont pour les deux variables simulées.

Nous cherchons à estimer l'âge moyen des particules MES₁ qui sont sorties du bief pendant la simulation. Cet âge moyen est calculé par la formule suivante :

$$\text{âge moyen} = \frac{1}{M_{tot}^{sortie}} \int_{\text{temps}_i} m_i^{sortie} t_i dt$$

avec :

M_{tot}^{sortie} (kg) masse de MES₁ totale sortie du bief

M_i^{sortie}
(kg)

masse de MES_1 sortie au temps t_i

Afin de vérifier que le temps de transit de ces particules ne dépend pas du flux d'entrée, nous avons effectué cette simulation avec différentes valeurs de concentration pour MES_1 et MES_2 , à savoir 20, 30, 40 et 50 $mg.l^{-1}$.

La réponse du modèle est donnée sur la figure 4.5.2 où nous regardons les flux sortis pour un pic provenant de l'amont (a) et un pic provenant des rejets (b).

Les quantités déposées et sorties pour ces simulation sont résumées dans le tableau 4.5.1. Nous constatons que, quel que soit le flux entrant, le temps de transit des particules qui sortent est le même alors que leur pourcentage par rapport à la masse totale entrée dans le bief varie. Les particules ne sortant pas du tronçon pendant la simulation sont celles qui ne sont pas ou plus influencées par les turbulences générées par les péniches. On ne peut pas estimer leur temps de transit moyen car il dépend de processus que nous ne modélisons pas : il faudrait introduire dans le modèle des lois de tassement fonction du flux de sédimentation et de la granulométrie, puis modéliser une période de haut débit pour estimer la proportion du stock de ces particules qui est susceptible d'être remis en suspension.

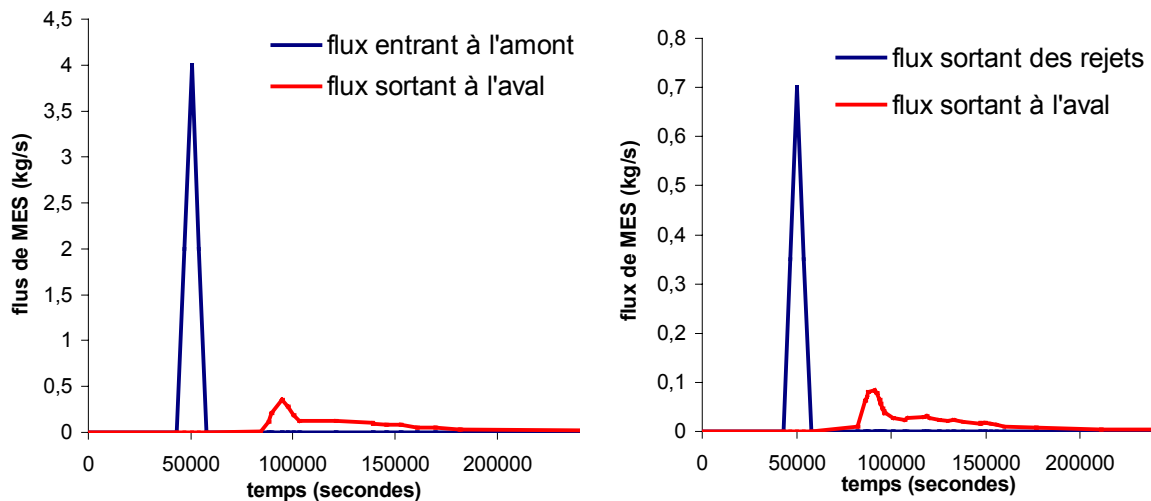


Figure 4.5.2. Réponse du modèle à un pic de pollution provenant : (a) de l'amont ; (b) des rejets.

	Masse entrée A l'amont tonnes	Masse sortie tonnes	Masse déposée tonnes	Age moyen des particules sorties heures	Erreur sur la masse %
Pic amont 20 $mg.l^{-1}$	19.4	10.8	8.1	36.0	3
Pic amont 30 $mg.l^{-1}$	29.1	12.5	15.8	36.1	3
Pic amont 40 $mg.l^{-1}$	38.8	13.8	23.2	36.1	4
Pic amont	48.5	14.8	31.9	36.0	4

50 mg.l ⁻¹					
Pic rejet 20 mg.l ⁻¹	3.3	2.2	1.0	34.0	3
Pic rejet 30 mg.l ⁻¹	5.0	2.7	2.1	34.2	4
Pic rejet 40 mg.l ⁻¹	6.6	3.0	3.4	34.2	4
Pic rejet 50 mg.l ⁻¹	8.3	3.3	4.7	34.2	4

Tableau 4.5.1. *Influence des flux entrants : age moyen, masses déposées et sorties des particules issues d'un pic de pollution provenant de l'amont ou des rejets.*

5. Conclusion

De nombreuses observations de terrain, mais également les résultats de modélisation, que ce soit avec ProSe ou avec Télémac/Subief 2D nous ont confirmé que le transport des particules dans la Seine à l'aval de Paris ne peut être bien rendu sans prendre en compte simultanément les processus de déposition et de remise en suspension par la navigation à l'étiage. L'analyse comparée de simulations avec et sans navigation montre à quel point ce phénomène est prépondérant dans le transit des MES à l'étiage, aussi bien en terme de bilan que de temps de résidence dans le bief. La prise en compte de la circulation fluviale permet de maintenir un niveau réaliste de particules en suspension en utilisant des vitesses de chutes cohérentes avec les mesures expérimentales. La localisation des dépôts récents dans ce bief est très hétérogène : les hauteurs de dépôt sont quasi nulles dans le chenal de navigation, le trafic fluvial étant trop intense pour permettre une accumulation de sédiments. Ce processus accentue le rôle de piège à particules des bras non navigables. Leur fonctionnement hydrosédimentaire est réellement très différent du chenal principal. Le bras gauche de l'île d'Herblay notamment reçoit les particules polluées des rejets qui sédimentent et restent vraisemblablement dans ce secteur pendant toute la durée de l'étiage.

L'étape suivante de cette étude permettra d'estimer l'impact de ces dépôts riches en matière organique et en bactéries sur les déficits en oxygène observés à l'aval des rejets. La dégradation de la matière organique dans les vases, processus majeur dans le bilan d'oxygénation des rivières, tout particulièrement à l'aval de rejets urbains, pourra être étudiée très finement. La connaissance acquise sur ce secteur pourra ensuite être utilisée pour la compréhension de l'impact sur un cours d'eau des rejets de temps de pluie.

6. Références

- Bagnold, R. (1966). "An approach to the sediment transport problem from general physics. Physiographic and hydraulics studies of rivers". Geological Survey Professional paper 422-I.
- Balanin, V., Bykov, L., Zernov, D., Metelytsina, G. and Natal-Chishin, G. (1981). "Means of protecting waterways slopes and beds from streams and waves including ship effect". Congrès AIPCN, Edimbourg 1981.
- Blaauw, H.G, Van de Kaa, E.J. (1978). "Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manoeuvring ships". Delft Hydraulics Laboratory, N° 202. 1978.
- Bonté, P., Thomas, A., Mouchel, J.M., Sogon, S. et Tessier, L. (1999). « Temps de transit des particules dans le réseau hydrographique : l'apport des traceurs isotopiques naturels ». Rapport d'activité 1999. Programme Piren-Seine. Thème 6. pp 56-76.
- Bouchard, J.P. (1982). "Effets érosifs des jets d'hélices de bateaux sur les fonds et les talus des voies navigables. Etude bibliographique, Laboratoire National d'Hydraulique. ER.VN, N° 85.1. Novembre 1985.

Celik, I. & Rodi, W. (1991). "Suspended sediment-transport capacity for open-channel flow". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 117 : 191-204.

Chesterikoff, A., Garban, B. & Ollivon, D. (1991). « Qualité et dynamique des matières en suspension et des sédiments en aval de Paris, en relation avec la station d'épuration d'Achères ». Rapport technique, PIREN-Seine, 1991.

Even, S., Mouchel, J.M. et Poulin, M. (1996). « Améliorations apportées au modèle ProSe relatives au transport de particules ». Rapport Piren-Seine 96/IV, thème axe fluvial. Deuxième partie. pp 1-14.

Fuehrer, M., Römisch, K. (1977). „Effect of modern ship traffic on Inland and Ocean waterways and their structure”. Congrès AIPCN, Leningrad. 1977.

Hervouet, J.M., Van Haren, L. (1995). Telemac 2D Version 3.0. Principle note. EDF, Direction des Etudes et Recherches, HE-43/94/052/B.

Hug., M. (1975). « Mécanique des fluides appliquée aux problèmes d'aménagement et d'énergétique ». Cours de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, p. 267. Editions Eyrolles.

Kolkman, P.A. (1978) : Ships meeting and generating currents. In Symposium vol. 1: "Aspects of navigability of constraint waterways, including harbour entrances". *DELFT*, the Netherlands, april 24-27, 1978.

Maldiney, M.A. (1994). "Caractéristiques physiques des particules en suspension dans un fleuve canalise, exemple de la Seine ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse. 348 pp.

Martin, L., Guesmia, M., Even, S., Poulin, M. et Péron, S. (1998). « La Seine à l'aval de la station d'épuration d'Achères : modélisation bi-dimensionnelle du comportement hydraulique et du transport par convection diffusion ». Rapport d'activité 1998, programme Piren-Seine. Thème 6. pp 21-36.

Martin, L., Even, S., Mouchel, J.M., Guesmia, M. et Poulin, M. (1999). « Dynamique des particules et qualité de l'eau à l'aval de la station d'épuration d'Achères : données expérimentales et modélisation ». Rapport d'activité 1999, programme Piren-Seine. Thème 6. pp 1-40.

Mazumder, B.S., Bhowmik, N.G., Soong, T.W. (1993). "Turbulence in Rivers due to Navigation Traffic". *Journal of Hydraulic engineering*, 120: pp. 406-412.

Mc Nown, J.S., (1976). "Sinkage and Resistance for Ships in Channels". *Proc. ASCE, WW3*, pp. 287-300.

Sakiz, M., Naulet R., O'Riordan, C. et Mouchel, J.M. (1997). « Flocculation, érosion et sédimentation des particules dans la Seine. Evaluation théorique de la flocculation et expérimentations concernant l'érosion ». Rapport Piren-Seine 96/IV, thème axe fluvial. Troisième partie. pp 1-24.

Schijf, J.B. (1949). XVIIth International Navigation Congress, Lisbon 1949.

Schijf, J.B. and Jansen, P.P. (1953). Dutch paper of the 18th Int. Nav. Congress., Sect. I, paper 1, pp. 175-197.

Schofield, R.B. (1974). "Speed of Ships in Restricted Navigation Channels". *Proc. ASCE, WW2*, May 1974, paper 10539.

SCT, Ministère de l'équipement (1976). « Phénomènes hydrauliques liés au passage des bateaux ». Service Central Technique, Ministère de l'Equipement, Direction des Ports Maritimes et des Voies Navigables. Rapp. SI/V3/BR.

Tangérimo, C. (1994). « Mesure de vitesse de chute des matières en suspension, du carbone organique total et des bactéries en Seine ». Mémoire de DEA Sciences et Techniques de l'Environnement. Ecole Nationale des ponts et Chaussées.

Tohill, J.T. (1967) : "Ships in restricted channels. A correlation of model tests, field measurements, and theory". Meeting of the Eastern Canadian Section of the Society of Naval Architects and Marine Engineers.