

6e JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

24, 25, 26 février 1997 - Nantes

EXPERIMENTATION EN BASSIN D'UN PIÈGE A SEDIMENT EN SUSPENSION MONO-DIRECTIONNEL

G. Chapalain, H. Smaoui
Laboratoire de Sédimentologie et Géodynamique,
Université des Sciences et Technologies de Lille, Bâtiment SN5,
59655 Villeneuve d'Ascq

M. Répécaud, P. Rodier et A. Depuydt
IFREMER, Centre de Boulogne-sur-Mer, 150, quai Gambetta, BP699,
62321 Boulogne-sur-Mer

Résumé

La présente étude est consacrée à des expérimentations en bassin destinées à évaluer les caractéristiques hydrodynamiques et les capacités de piégeage d'un nouveau piège mono-directionnel ponctuel développé pour mesurer le transport horizontal de sédiment en suspension. Des visualisations à l'aide de colorant en solution ont permis d'établir les grands traits de l'hydrodynamique à l'intérieur du piège. Des tests d'évaluation des capacités de piégeage ont été entrepris avec des particules sédimentaires de tailles différentes pour diverses vitesses d'écoulement. Associés à une estimation numérique des différences entre le comportement hydrodynamique des particules sous les conditions expérimentales et naturelles, ces tests ont permis de conclure à une efficacité de piégeage quasi-parfaite : 99.1% jusqu'à une vitesse d'écoulement de 1.38 m/s pour des sables de diamètre supérieur à 125 μm et 97.6% jusqu'à une vitesse d'écoulement de 1.06 m/s pour des sables de diamètre compris entre 100 et 125 μm .

Summary

The present study deals with water channel experiments carried out to evaluate the hydraulic and sand-trapping characteristics of a new mono-directional point-integrating trap developed for measuring the horizontal transport rate of sand in suspension. Flow visualization tests involving fluorescent dye were used to obtain qualitative informations about flow characteristics inside the trap. Sand-trapping capability tests with sedimentary particles of different sizes for different flow speeds were performed. Combined with a numerical estimation of differences between particle hydrodynamics under experimental and natural conditions, these tests allow us to claim to an almost nominal trapping efficiency: 99.1% for ambient flow velocities up to 1.38 m/s for particles larger than 125 μm and 97.6% for ambient flow velocities up to 1.06 m/s for particles of diameter ranging between 100 and 125 μm .

1. Introduction

L'étude des processus régissant le transport sédimentaire est essentielle en hydraulique fluviale et maritime pour appréhender les problèmes aussi vastes et cruciaux que l'évolution morphodynamique du fond et du trait de côte. Etant donnée la complexité des processus élémentaires mis en jeu, l'amélioration des connaissances dans ce domaine passe par la réalisation de mesures de terrain de qualité.

Au cours des deux dernières décennies, divers systèmes de mesure indirecte du transport sédimentaire fondés sur un large spectre de techniques (acoustique, optique, électrique, nucléaire et mécanique) ont été développés (Huntley, 1982; Horikawa, 1988). Ils ont permis une exploration à haute fréquence des processus hydro-sédimentaires. Malheureusement, leur réponse à des paramètres sédimentologiques tels que la distribution de tailles ou la composition, ainsi qu'aux matières organiques dissoutes et particulaires demeure mal maîtrisée. Une alternative est offerte par les pièges à sédiment dont on recense plusieurs modèles fonctionnant soit sur le principe de la sédimentation, soit sur celui de l'entravement à l'aide de grilles, filets ou filtres (Huntley, 1982; Horikawa, 1988). L'utilisation des pièges existants dans des écoulements non-permanents et multi-directionnels comme les environnements côtiers dominés par la marée pose toutefois des difficultés. En effet, aucun d'entre-eux ne satisfait aux contraintes élémentaires imposées par ce type de milieu extrême, à savoir essentiellement :

- (i) la mono-directionnalité,
- (ii) l'efficacité totale pour le maximum de courant enregistré durant la phase de mise en oeuvre, car il est *a posteriori* impossible de discriminer les contributions successives de transport sédimentaire à la masse totale de sédiment piégée.

A la suite de ce constat, un nouveau piège à sédiment en suspension tendant à mieux répondre aux spécifications précédentes a été développé (Chapalain, en préparation). Le présent article est consacré à l'expérimentation en bassin de ce dispositif. Il débute par une brève description du piège (Section 2) et se poursuit par la description de l'installation expérimentale (Section 3). Deux types d'expérimentations sur un prototype en vraie grandeur sont exposés à la Section 4. Il s'agit premièrement d'une visualisation à l'aide de colorant et deuxièmement de tests d'efficacité du piégeage de particules sédimentaires. Dans le but de préciser les conditions d'applicabilité de ces résultats en mode opérationnel, l'hydrodynamique de particules injectées et entrant en suspension dans le nez du piège est examinée sur la base d'un modèle numérique (Section 5). L'article se termine par une synthèse des résultats (Section 6).

2. Description du piège à sédiment

Les essais décrits par la suite concernent la mise au point d'un piège à sédiment en suspension fonctionnant sur le double principe d'une sédimentation activée et d'un piégeage des particules solides par une cellule de recirculation et une zone de quasi-stagnation (Chapalain, en préparation). Les principaux éléments de ce dispositif (Figure 1) sont :

- un nez
- un divergent
- un corps
- une évacuation.

Le nez qui constitue l'entrée du piège, a une section carrée de 0.02 m de côté et mesure 0.17 m de long. Il sert essentiellement à déporter la prise d'écoulement en amont du piège pour la sortir du champ des perturbations occasionnées par celui-ci.

Le divergent dans lequel débouche le nez mesure 0.2 m de long. Il s'ouvre dans un corps de section rectangulaire (0.2 m x 0.14 m) de 0.9 m de long. Dans le plan horizontal, il est symétrique et possède un grand angle d'ouverture (48.5°). Dans le plan vertical, il est asymétrique et se caractérise par un demi-divergent inférieur à forte pente (1/2) et un demi-divergent supérieur à faible pente (1/10). En plus de la réduction classique de vitesse dans la veine centrale par transformation d'énergie cinétique en énergie de pression, le dispositif hydrodynamique constitué du divergent et du corps est destiné à produire dans la partie inférieure du corps une cellule de recirculation verticale suivie d'une zone de quasi-stagnation. Le demi-divergent supérieur à faible pente est conçu pour ralentir progressivement l'écoulement tout en minimisant le développement de turbulence néfaste à la sédimentation des particules solides. La partie inférieure du corps fait office de réceptacle pour les particules piégées.

L'évacuation consiste en un plan incliné à 45° qui guide l'écoulement vers un échappement de section rectangulaire (0.02 m x 0.2 m) disposé à l'arrière du toit du piège. Cette configuration ferme le piège sur l'arrière, retient les particules ayant sédimenté et assure la mono-directionnalité du piège en présence d'un courant opposé. Une directrice est disposée au centre de l'échappement afin d'empêcher sous l'action d'un courant opposé le développement d'une mini-bulle de décollement susceptible de collecter des particules advectées par ce courant et donc d'altérer la mono-directionnalité du piège.

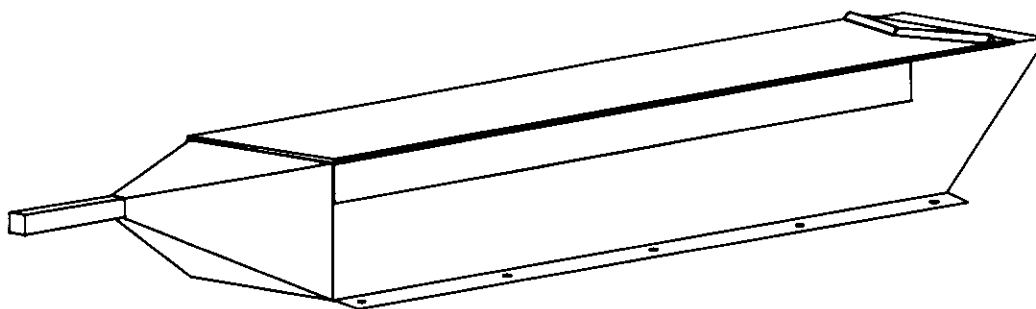


Figure 1. Piège à sédiment en suspension.

3. Présentation de l'installation expérimentale

Les expérimentations sont réalisées dans le bassin d'essais du Centre IFREMER de Boulogne-sur-Mer. Cette installation consiste en une boucle verticale à circulation d'eau et surface libre de section rectangulaire. La veine expérimentale située dans la partie supérieure de la boucle mesure 18 m de long, 4 m de large et 2 m de profondeur. Un vitrage latéral de 8 m de long et 2 m de haut permet l'observation de la veine.

Les 700 m³ d'eau remplissant le bassin sont entraînés par deux pompes à hélice de 250 kW chacune qui assurent une vitesse moyenne de l'écoulement dans la veine pouvant atteindre 2 m/s. L'écoulement est régularisé par deux grilles en nid d'abeilles et une grille. Des mesures réalisées par vélocimétrie laser Doppler ont conclu à un écart-type des vitesses moyennes dans une section transversale de la veine de mesure de l'ordre de 2 à 3%. Les fluctuations temporelles de vitesse sont du même ordre de grandeur et les composantes radiales de la vitesse demeurent inférieures à 1%.

Le bassin est équipé d'une passerelle de mise à l'eau comportant des bras verticaux destinés au positionnement, voire au remorquage des prototypes et des maquettes. La résolution et la répétabilité du positionnement de ces bras sont de l'ordre du millimètre.

Les caractéristiques techniques du bassin d'essais permettent d'envisager des expérimentations sur un modèle en vraie grandeur du piège à sédiment pour une large gamme de vitesses correspondant à celle rencontrée dans la nature. De cette façon, on évite les difficultés inhérentes au respect des conditions de similitude éprouvées lors d'essais sur des modèles réduits ou maquettes dans des installations sous-dimensionnées.

Pour effectuer les visualisations du mouvement des particules fluides et solides à l'intérieur du prototype est construit en matière transparente Altuglass. Les visualisations impliquent la mise en oeuvre d'une caméra vidéo, d'une rampe de lumière blanche et d'une nappe de lumière cohérente de 0.5 mm d'épaisseur et de 40° de divergence délivrées par une source laser Argon d'une puissance nominale de 5 W émettant dans la gamme des longueurs d'onde 480-515 nm. Etant donnée la disposition centrale du mât de suspension et de son embase, le plan laser vertical est décalé de 0.05 m par rapport à l'axe du prototype. Afin d'observer le plan horizontal, un système de miroirs inclinés à 45° est installé sur le toit du prototype.

4. Expérimentations

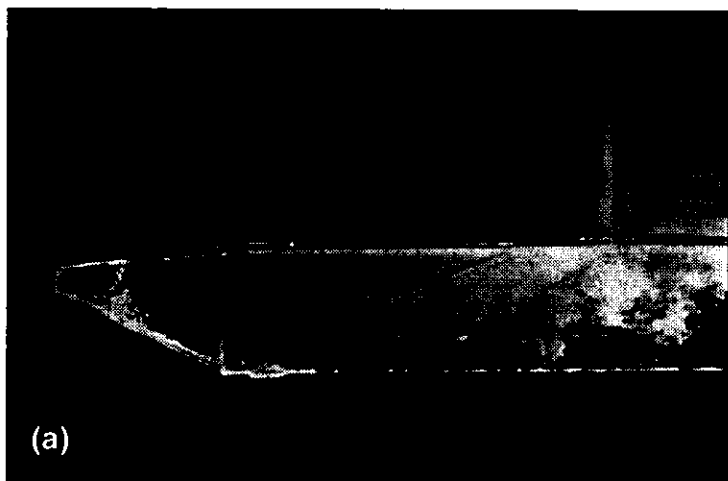
4.1 Visualisation de l'écoulement à l'aide de colorant

La visualisation consiste à injecter de la fluorescéine en solution d'une part massivement dans le nez du piège et d'autre part localement en une série de points à l'intérieur du piège. L'injection dans le nez s'effectue à l'aide d'un cathéter connecté à une seringue faisant office de réserve de colorant et débouchant de l'autre dans le nez par un orifice circulaire de 6 mm de diamètre. Les injections locales sont réalisées à l'aide d'une seringue branchée sur un cathéter de 6 mm de diamètre intérieur dont l'extrémité est connectée sur une pipette Pasteur.

Les essais de visualisation avec injection massive de colorant dans le nez sont entrepris pour trois vitesses d'écoulement ambiant ($U = 0.6, 1$ et 1.4 m/s) sous éclairage laser permettant une focalisation sur un plan vertical. Compte tenu de la diffusion turbulente, les essais de visualisation par injection locale concernent uniquement la vitesse d'écoulement ambiant de 0.6 m/s. Ces dernières visualisations visent à étendre l'observation à la dimension horizontale nécessitent l'utilisation des miroirs inclinés et sont effectuées sous lumière blanche.

Une image prise immédiatement après l'injection massive de colorant dans le nez pour la vitesse d'écoulement ambiant de 0.6 m/s est présentée à la Figure 2a. Elle met en évidence l'écoulement supérieur et la couche cisailée dont l'épaisseur croît d'amont en aval jusqu'au point de contact avec le fond du piège à $0.7-0.8$ m de l'entrée du divergent. La couche cisailée est le siège de tourbillons dont la dimension croît jusqu'à atteindre plusieurs centimètres à l'approche de ce point de rattachement avec la paroi. Un entraînement à contre-courant de colorant se produit à la base de la couche cisailée. Les expériences réalisées pour des vitesses d'écoulement ambiant de 1 et 1.4 m/s révèlent des schémas d'écoulement similaires au précédent. La longueur de cellule de recirculation est de l'ordre de six à huit fois la hauteur du seuil quelque soit la vitesse d'écoulement ambiant. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus sur des seuils bi-dimensionnels (Eaton et Johnston, 1981; Allen, 1984; Broker, 1985).

L'évolution d'une colonne de colorant injectée à 0.38 m de l'entrée du divergent met à nouveau en évidence la cellule de recirculation verticale en montrant l'écoulement supérieur et la couche cisailée caractérisées par une advection vers l'aval et une forte dispersion et l'écoulement de retour plus lent et moins turbulent se développant dans la partie inférieure du piège (Figure 2b). L'existence de l'écoulement de retour est confirmée par l'injection locale à 0.02 m du fond (Figure 2c). L'analyse du déplacement du colorant permet d'estimer à 0.17 m/s la vitesse dans la veine supérieure et à respectivement 0.063 et 0.083 m/s la vitesse de l'écoulement de retour à 0.02 et 0.04 m du fond. Ainsi, la vitesse de l'écoulement de retour atteint 40 à 50% de celle de l'écoulement supérieur. Ces résultats sont en accord avec ceux relatifs à des seuils bi-dimensionnels (Chandrsuda, 1975; Eaton et Johnston, 1980; 1981; Allen, 1984; Broker, 1985). L'injection locale à 0.02 m du fond et 0.88 m de l'entrée du divergent révèle enfin l'existence d'une zone de quasi-stagnation à l'arrière du piège similaire à celle observée sur des seuils bi-dimensionnels (Figure 2d).



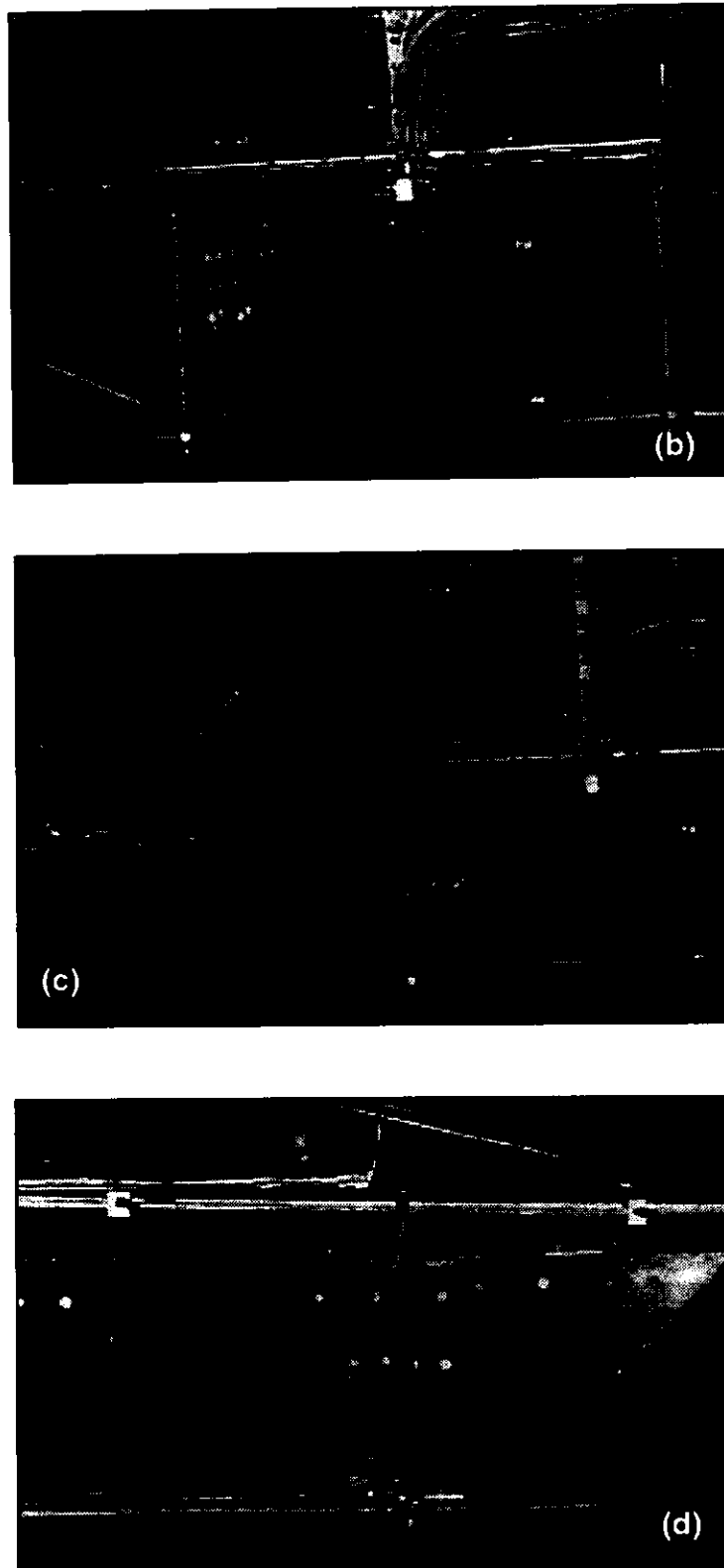


Figure 2. Visualisations à l'aide de fluorescéine en solution pour la vitesse d'écoulement ambiant $U = 0.6$ m/s (a) injection massive dans le nez, (b) injection d'une colonne de colorant à travers la cellule de recirculation, (c) injection locale dans la partie inférieure de la cellule de recirculation, (d) injection locale dans la région de rattachement/quasi-stagnation.

4.2 Tests d'efficacité du piégeage de particules sédimentaires

Après avoir examiné les caractéristiques de l'écoulement par visualisation à l'aide de colorant, nous procédons à des tests d'efficacité du piège avec des particules sédimentaires.

La technique habituellement utilisée pour déterminer l'efficacité des pièges à sédiment consiste à les immerger dans un bassin où règne un écoulement chargé de particules en suspension. Cette procédure impose de connaître le flux de particules entrant dans le piège. La mesure de cette quantité s'avère problématique, notamment en ce qui concerne la mesure de concentration de particules en suspension. Ajoutons que cette méthode requiert d'importantes quantités de sédiment dont il est difficile de maîtriser les caractéristiques, en particulier la distribution granulométrique.

Afin de nous affranchir des difficultés précédentes, nous proposons une procédure expérimentale différente qui consiste à injecter progressivement une quantité connue de sédiment dans l'entrée du piège, puis à en mesurer la fraction piégée pour en déduire l'efficacité du dispositif. Selon ce protocole, il n'est pas nécessaire de mesurer le flux entrant. De plus, la masse utilisée étant limitée, il est possible de travailler avec des particules dont les caractéristiques sont connues précisément. Dans la présente étude, on utilise les refus d'une série de tamis à mailles carrées de 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500 et 630 μm (Norme AFNOR) d'un sable naturel prélevé le long du littoral Dunkerquois. Les refus de tamis inférieurs à 500 μm ont été décarbonatés à l'acide chlorhydrique pour éliminer les fractions coquillières dont le comportement hydrodynamique est très différent de celui des particules quartzueuses majoritaires.

Le dispositif d'injection consiste en une réserve de 100 ml fixée sur l'avant du nez du piège et débouchant dans celui-ci par un orifice circulaire de 6 mm de diamètre obturé par un cavalier en forme de U renversé disposé à l'intérieur du nez. L'injection est déclenchée par le retrait à distance de ce cavalier lorsque l'écoulement dans le piège est parfaitement établi.

Les essais d'efficacité du piège ont été conduits pour quatre vitesses d'écoulement ambiant ($U = 0.6, 1, 1.4$ et 1.8 m/s). Pour chaque vitesse, on examine le piégeage d'une masse injectée (m_i) de 100 g de particules provenant des divers refus de tamis, réduite à 50 g pour le refus supérieur à 100 μm . De manière générale, l'injection des 100 g de sédiment est régulière et dure environ une minute.

Après sédimentation des particules injectées, on constate très naturellement que l'extension horizontale du dépôt au fond du piège décroît avec la taille des particules et croît avec la vitesse de l'écoulement ambiant. L'épaisseur du dépôt décroît progressivement vers l'aval du piège. On note également qu'il n'y a dépôt sur le plan incliné arrière que pour les particules de diamètre compris entre 100 et 125 μm et la vitesse d'écoulement ambiant de 1.8 m/s. Ajoutons que pour cette dernière vitesse, deux lobes quasi-symétriques exempts de particules se forment au fond du piège à une quinzaine de centimètres en aval de la sortie du divergent. La longueur et la largeur de ces lobes valent respectivement 0.25 et 0.05 m. Ils semblent associés au développement de deux cellules de recirculation latérales. Au cours des essais aux vitesses d'écoulement ambiant supérieures ou égales à 1 m/s, on observe également le développement épisodique de micro-tourbillons d'axe vertical en forme de trombe qui remettent en suspension des bouffées de particules qui très vite resédimentent.

A l'issue de chaque test, la masse de particules piégée (m_p) et l'éventuelle masse résiduelle (m_r) demeurant dans la réserve sont récupérées, séchées et pesées pour déterminer le coefficient d'efficacité ϵ du piège exprimé en % par :

$$\epsilon = 100 \frac{m_p}{(m_i - m_r)} \quad (1)$$

Pour les vitesses d'écoulement ambiant de 1 et 1.4 m/s et les classes granulométriques comprises entre 125 et 400 μm , on procède à trois replicats pour estimer la dispersion des résultats expérimentaux quantifiée à l'aide du coefficient de variation défini comme le rapport de l'écart-type à la moyenne. Ces résultats sont synthétisés dans les Tableaux 1 et 2. Ils révèlent un coefficient de variation toujours inférieur à 0.25%. L'ensemble des résultats sont regroupés dans le Tableau 3. Pour les vitesses d'écoulement ambiant de 1 et 1.4 m/s, les valeurs moyennes sont retenues. On note que le coefficient d'efficacité de piégeage est supérieur à 99% jusqu'à une vitesse d'écoulement de 1.8 m/s pour des particules de diamètre supérieur à 125 μm . Les essais effectués avec des particules de diamètre compris entre 100 et 125 μm montrent des efficacités de piégeage tombant respectivement à 98.3, 97.6 et 92% pour les vitesses d'écoulement ambiant de 1, 1.4 et 1.8 m/s. Ces résultats suggèrent que le piège est efficace sous les conditions expérimentales jusqu'à une vitesse d'écoulement ambiant de 1.8 m/s pour des particules de diamètre supérieur à 125 μm avec une erreur maximale de 1% et jusqu'à une vitesse d'écoulement ambiant de 1.4 m/s pour des particules de diamètre compris entre 100 et 125 μm avec une erreur maximale de 3%.

Gamme de taille (μm)	Efficacité de piégeage (%)				
	1 ^{ère} série	2 ^{ème} série	3 ^{ème} série	Moyenne	Coef. Variation (%)
125-160	99.2	99.7	99.2	99.4	0.24
160-200	99.4	99.8	99.4	99.5	0.19
200-250	99.5	99.6	99.4	99.5	0.08
250-315	99.7	99.9	99.7	99.8	0.10
315-400	99.8	99.7	99.7	99.7	0.05
400-500	99.8	99.8	99.7	99.8	0.05

Tableau 1. Replicats des tests d'efficacité du piège pour des sables de différents diamètres pour une vitesse d'écoulement ambiant de 1 m/s.

Gamme de taille (μm)	Efficacité de piégeage (%)				
	1 ^{ère} série	2 ^{ème} série	3 ^{ème} série	Moyenne	Coef. Variation (%)
125-160	99.2	98.8	99.1	99.0	0.17
160-200	99.6	99.6	99.6	99.6	0.00
200-250	99.3	99.7	99.6	99.5	0.17
250-315	99.8	99.7	99.7	99.7	0.05
315-400	99.9	99.6	99.9	99.8	0.14
400-500	99.8	99.8	99.9	99.8	0.05

Tableau 2. Replicats des tests d'efficacité du piège pour des sables de différents diamètres pour une vitesse d'écoulement ambiant de 1.4 m/s.

Gamme de taille (μm)	Efficacité de piégeage (%)			
	U=0.6 m/s	U=1.0 m/s	U=1.4 m/s	U=1.8 m/s
100-125		98.3	97.6	92.0
125-160	99.6	99.4	99.0	99.1
160-200	99.8	99.5	99.6	99.6
200-250	99.7	99.5	99.5	99.7
250-315	99.7	99.8	99.7	99.8
315-400	99.9	99.7	99.8	99.8
400-500	99.7	99.8	99.8	99.8
500-630		99.6	99.7	99.8
630-800		99.9	99.7	99.7

Tableau 3. Efficacité du piège mesurée pour des particules sédimentaires de diamètre variant de 100 à 800 μm et pour des vitesses d'écoulement ambiant U = 0,6, 1, 1,4 et 1.8 m/s.

5. Conditions d'applicabilité en mode opérationnel

Les conditions expérimentales précédentes diffèrent de celles rencontrées en mode opérationnel sur le terrain. Ces dernières se caractérisent par un profil quasi-uniforme (à l'échelle de l'entrée du nez) de concentration de particules sédimentaires en suspension. Ces particules se déplacent avec une vitesse horizontale égale à celle du fluide et une vitesse verticale égale à leur vitesse de chute terminale en écoulement stationnaire et uniforme. Une alternative expérimentale aurait pu consister à injecter des particules au coeur du nez. Malheureusement, ce protocole délicat qui ne garantit pas un profil parfait de concentration de particules en suspension, risque de provoquer des perturbations hydrodynamiques. L'applicabilité de la présente technique qui évite ce type de problème est examinée sur la base d'une étude numérique du mouvement d'une particule sphérique de quartz dans le nez du piège.

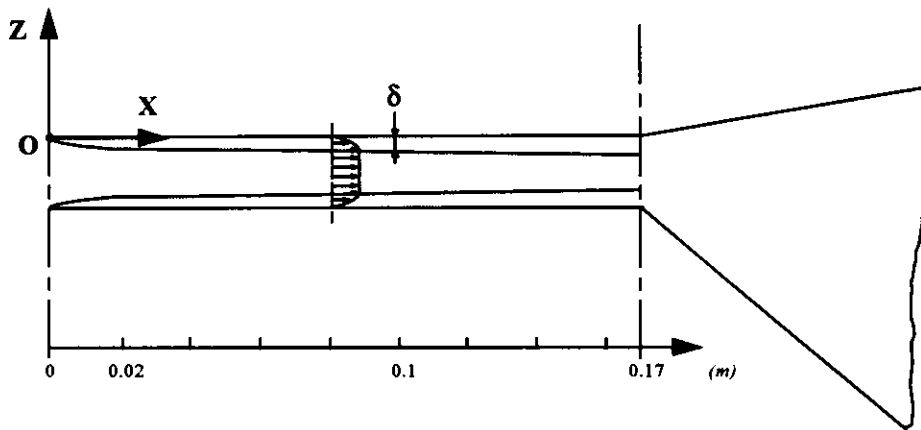


Figure 3. Schéma de définition du mouvement d'une particule sédimentaire dans le nez du piège.

Dans un repère tel que l'origine soit située au centre du bord d'attaque du nez, l'axe horizontal soit orienté dans le sens de l'écoulement et l'axe vertical soit ascendant (Figure 3), l'équation du mouvement d'une particule sphérique de quartz (Maxey et Riley, 1983; Auton et al., 1988; Hunt et al., 1988; Yvergniaux et Chollet, 1989) s'écrit :

$$(s+C_A) \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = (s-1)\mathbf{g} + (1-C_A) \frac{D\mathbf{u}}{Dt} + \frac{3}{4} \frac{C_D}{d} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}_p\| (\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) - \frac{3}{2} C_H \frac{\sqrt{\nu}}{d\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{d(\mathbf{u}_p - \mathbf{u})/dt}{\sqrt{t-t'}} dt' + C_L (\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) \wedge (\nabla \wedge \mathbf{u}) \quad (2)$$

où $\mathbf{g} = (0, 0, -g)$ est l'accélération de la gravité, $\mathbf{u}_p = (u_p, 0, w_p)$ et $\mathbf{u} = (u, 0, 0)$ sont, respectivement, la vitesse de la particule et la vitesse du fluide en l'absence de particule, d est le diamètre de la particule, s est la densité relative de la particule égale à 2.65, ν est la viscosité cinématique du fluide, C_D est le coefficient de frottement, $C_A = 0.5$ est le coefficient de masse ajoutée, $C_H = 6$ est le coefficient de Basset et $C_L = 0.5$ est le coefficient de lift. Les dérivations d/dt et D/Dt représentent la dérivée temporelle en suivant respectivement la particule solide et la particule fluide.

Le coefficient de frottement C_D dépend du nombre de Reynolds de particule $Re = \frac{\|u - u_p\| d}{\nu}$ selon la formule de Schiller et Naumann (1933)

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + a Re^b) \quad (3)$$

dans laquelle a et b sont des constantes expérimentales respectivement égales à 0.15 et 0.687.

Le profil de vitesse dans le nez (Schlichting, 1968; Williams et Elder, 1989) est supposé de la forme

$$\begin{aligned} u &= U \left(-\frac{z}{\delta} \right)^{1/7} & -\delta < z < 0 \\ u &= U & -h_n + \delta < z < -\delta \\ u &= U \left(\frac{h_n + z}{\delta} \right)^{1/7} & -h_n < z < -h_n + \delta \end{aligned} \quad (4)$$

où U est la vitesse de l'écoulement ambiant, h_n est la hauteur du nez et δ est l'épaisseur de la couche limite estimée par

$$\delta = 0.37 \nu^{1/5} U^{-1/5} x^{4/5} \quad (5)$$

Après substitution de l'Equation (3) dans l'Equation (2), il en résulte

$$\frac{du_p}{dt} = C_2 u \frac{\partial u}{\partial x} + C_3 \left(1 + a \frac{\|u - u_p\|^b}{\nu^b} d^b \right) (u - u_p) + C_4 \int_0^t \frac{d(u_p - u)/dt}{\sqrt{t-t'}} dt' + C_5 w_p \frac{\partial u}{\partial z} \quad (6a)$$

$$\frac{dw_p}{dt} = -C_1 g - C_3 \left(1 + a \frac{\|u - u_p\|^b}{\nu^b} d^b \right) w_p + C_4 \int_0^t \frac{dw_p/dt}{\sqrt{t-t'}} dt' + C_5 (u - u_p) \frac{\partial u}{\partial z} \quad (6b)$$

où

$$C_1 = \frac{s-1}{s+C_A}, \quad C_2 = \frac{1+C_A}{s+C_A}, \quad C_3 = \frac{18\nu}{d^2(s+C_A)}, \quad C_4 = -\frac{3}{2} \frac{C_H \sqrt{\nu}}{d \sqrt{\pi}(s+C_A)}, \quad C_5 = \frac{C_L}{s+C_A}.$$

La fermeture du problème requiert de connaître la position instantanée de la particule $\mathbf{x}_p = (x_p, 0, z_p)$ donnée par

$$\frac{dx_p}{dt} = u_p \quad (7a)$$

$$\frac{dz_p}{dt} = w_p \quad (7b)$$

La méthode utilisée par résoudre le jeu d'Equations différentielles (6) et (7) est une méthode d'Euler au premier ordre avec calcul des termes de Basset par la méthode des trapèzes.

Les expériences numériques ont été réalisées pour les deux vitesses d'écoulement ambiant $U = 1.4$ et 1.8 m/s définissant les limites d'applicabilité du piège pour des particules de diamètre supérieur à 100 et $125 \mu\text{m}$, respectivement. Pour chaque taille jusqu'à $200 \mu\text{m}$, nous examinons le mouvement d'une particule injectée à la position ($x = 0.02$ m, $z = 0$) avec une vitesse descendante initiale estimée comme le rapport de la hauteur de sédiment dans la réserve (0.1 m) sur le temps de vidange (60 s), soit 0.0017 m/s et (ii) une série de particules en suspension entrant dans le nez à différentes positions verticales équidistantes de 2 mm avec une vitesse horizontale égale à la vitesse de l'écoulement ambiant U et une vitesse descendante w_{ps} satisfaisant la version stationnaire en écoulement uniforme de l'Equation (6b), à savoir

$$\left(1 + \frac{a d^b}{\nu^b} |w_{ps}|^b\right) w_{ps} + \frac{s-1}{18\nu} g d^2 = 0 \quad (8)$$

Les tableaux 4 et 5 regroupent les composantes horizontales et verticales de la vitesse des particules et leurs positions verticales à la sortie du nez ($x = 0.17$ m). Pour l'ensemble des tests, nous remarquons que les composantes horizontales et les modules des composantes verticales de la vitesse des particules injectées sont plus faibles que ceux des particules entrant en suspension dans le nez. Pour chaque taille de particules, les positions finales des particules initialement en suspension sont plus basses que celle de la particule injectée, sauf pour $U = 1.4$ m/s la particule de $100 \mu\text{m}$ et pour $U = 1.8$ m/s les particules de 100 et $125 \mu\text{m}$ entrant en suspension dans le nez au voisinage de la paroi supérieure. De manière générale, les plus faibles valeurs du module de la composante verticale de vitesse des particules injectées par rapport à celles des particules initialement en suspension tendent à rendre les conditions expérimentales plus drastiques que les conditions naturelles. Au contraire, les plus faibles valeurs de la composante horizontale de vitesse des particules injectées par rapport à celles des particules initialement en suspension impliquent des conditions plus favorables de piégeage des particules injectées par rapport aux particules initialement en suspension. Compte tenu du caractère antagoniste des deux conclusions précédentes, aucune conclusion générale concernant le piégeage ne peut être formulée *a priori*. Etant donnée la complexité des processus en jeu, nous ne nous engageons pas dans une analyse numérique des modalités du piégeage. Nous décidons simplement de définir avec une marge de sécurité les limites d'applicabilité du piège en conditions naturelles. Pour ce faire, nous substituons aux vitesses expérimentales d'écoulement ambiant $U = 1.4$ et 1.8 m/s les vitesses horizontales des particules injectées de 100 et $125 \mu\text{m}$ calculées à la sortie du nez pour ces vitesses d'écoulement ambiant respectives, à savoir $U = 1.06$ et 1.38 m/s. La Figure 5 présente les composantes horizontales et les modules de la composante verticale de la vitesse des particules initialement en suspension et leurs positions verticales calculées à la sortie du nez pour des vitesses d'écoulement adaptées aux conditions de terrain définissant les limites d'applicabilité du piège pour des particules de diamètre supérieur à 100 et $125 \mu\text{m}$, ainsi que les résultats des calculs relatifs aux particules de mêmes diamètres injectées sous les conditions expérimentales correspondantes. Quelles que soient leurs positions initiales, les composantes horizontales et les modules des composantes verticales de la vitesse des particules initialement en suspension sont plus faibles que ceux des particules injectées. En combinaison avec les résultats expérimentaux, ces résultats numériques assurent avec une marge de sécurité raisonnable un piégeage "total" des particules considérées jusqu'aux vitesses d'écoulement adaptées aux conditions de terrain.

	z_i (m)	$d = 100 \mu\text{m}$			$d = 125 \mu\text{m}$			$d = 160 \mu\text{m}$			$d = 200 \mu\text{m}$		
		z_f (m)	U_p (m/s)	W_p (m/s)	z_f (m)	U_p (m/s)	W_p (m/s)	z_f (m)	U_p (m/s)	W_p (m/s)	z_f (m)	U_p (m/s)	W_p (m/s)
injectées	0.000	-0.00104	1.056	-0.00619	-0.00138	1.092	-0.00864	-0.00186	1.129	-0.01230	-0.00241	1.163	-0.01669
en suspension	0.000	-0.00101	1.122	-0.00717	-0.00149	1.185	-0.01081	-0.00226	1.254	-0.01680	-0.00324	1.315	-0.02438
"	-0.002	-0.00304	1.296	-0.00795	-0.00352	1.322	-0.01174	-0.00424	1.355	-0.01761	-0.00512	1.388	-0.02474
"	-0.004	-0.00502	1.380	-0.00777	-0.00549	1.400	-0.01175	-0.00622	1.400	-0.01763	-0.00711	1.400	-0.02480
"	-0.006	-0.00702	1.400	-0.00797	-0.00749	1.400	-0.01175	-0.00822	1.400	-0.01763	-0.00911	1.400	-0.02480
"	-0.008	-0.00902	1.400	-0.00797	-0.00949	1.400	-0.01175	-0.01022	1.400	-0.01763	-0.01111	1.400	-0.02480
"	-0.010	-0.01102	1.400	-0.00797	-0.01149	1.400	-0.01175	-0.01422	1.400	-0.01763	-0.01311	1.400	-0.02480
"	-0.012	-0.01302	1.400	-0.00797	-0.01349	1.400	-0.01175	-0.01622	1.400	-0.01763	-0.01511	1.363	-0.02417
"	-0.014	-0.01502	1.800	-0.00759	-0.01549	1.352	-0.01111	-0.01828	1.317	-0.01672	-0.01713	1.265	-0.02367
"	-0.016	-0.01702	1.678	-0.00779	-0.01751	1.251	-0.01151	-0.01993	1.184	-0.01725	-0.01930	1.022	-0.02309
"	-0.018	-0.01911	1.463	-0.00794	-0.01970	0.910	-0.01079						

Tableau 4. Composantes horizontales et verticales des vitesses et positions verticales initiales (z_i) et finales (z_f) des particules injectées et en suspension de diamètre compris entre 100 , 125 , 160 et $200 \mu\text{m}$ calculées à la sortie du nez du piège pour une vitesse d'écoulement ambiant expérimental de 1.4 m/s.

	d = 100 μm				d = 125 μm			d = 160 μm			d = 200 μm		
	z_i (m)	z_f (m)	UP (m/s)	WP (m/s)	z_i (m)	UP (m/s)	WP (m/s)	z_i (m)	UP (m/s)	WP (m/s)	z_i (m)	UP (m/s)	WP (m/s)
Injectée	0.000	-0.00088	1.332	-0.00608	-0.00115	1.375	-0.00840	-0.00153	1.420	-0.01182	-0.00197	1.460	-0.01588
en suspension	0.000	-0.00062	1.362	-0.00652	-0.00103	1.461	-0.00996	-0.00164	1.557	-0.01570	-0.00244	1.642	-0.02341
*	-0.002	-0.00282	1.660	-0.00793	-0.00319	1.688	-0.01173	-0.00376	1.725	-0.01759	-0.00445	1.762	-0.02467
*	-0.004	-0.00480	1.775	-0.00766	-0.00517	1.800	-0.01175	-0.00575	1.800	-0.01763	-0.00644	1.800	-0.02480
*	-0.006	-0.00680	1.800	-0.00797	-0.00717	1.800	-0.01175	-0.00775	1.800	-0.01763	-0.00844	1.800	-0.02480
*	-0.008	-0.00880	1.800	-0.00797	-0.00917	1.800	-0.01175	-0.00975	1.800	-0.01763	-0.01044	1.800	-0.02480
*	-0.010	-0.01080	1.800	-0.00797	-0.01117	1.800	-0.01175	-0.01175	1.800	-0.01763	-0.01244	1.800	-0.02480
*	-0.012	-0.01280	1.800	-0.00797	-0.01317	1.800	-0.01175	-0.01375	1.800	-0.01763	-0.01444	1.800	-0.02480
*	-0.014	-0.01480	1.800	-0.00797	-0.01517	1.770	-0.01126	-0.01574	1.733	-0.01638	-0.01644	1.687	-0.02309
*	-0.016	-0.01680	1.678	-0.00760	-0.01717	1.648	-0.01125	-0.01776	1.593	-0.01699	-0.01850	1.501	-0.02396
*	-0.018	-0.01886	1.463	-0.00788	-0.01928	1.366	-0.01174						

Tableau 5. Composantes horizontales et verticales des vitesses et positions verticales initiales (z_i) et finales (z_f) des particules injectées et en suspension de diamètre compris entre 100, 125, 160 et 200 μm calculées à la sortie du nez du piège pour une vitesse d'écoulement ambiant expérimental de 1.8 m/s.

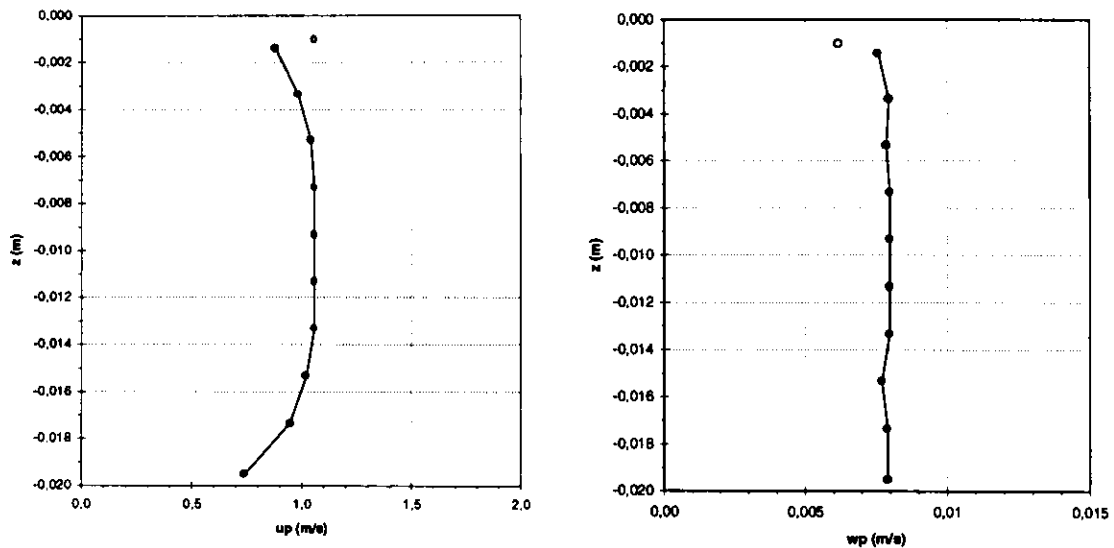


Figure 4. Calculs des composantes horizontales et des modules des composantes verticales des vitesses des particules en suspension (\bullet) d'un diamètre de 100 μm en fonction de leurs positions verticales à la sortie du nez du piège pour une vitesse d'écoulement ambiant adaptée aux conditions de terrain de 1.06 m/s. Ces résultats sont comparés avec les calculs de la composante horizontale et du module de la composante verticale de la vitesse d'une particule injectée (\circ) de même diamètre en fonction de sa position verticale à la sortie du nez du piège pour une vitesse d'écoulement ambiant expérimental de 1.4 m/s.

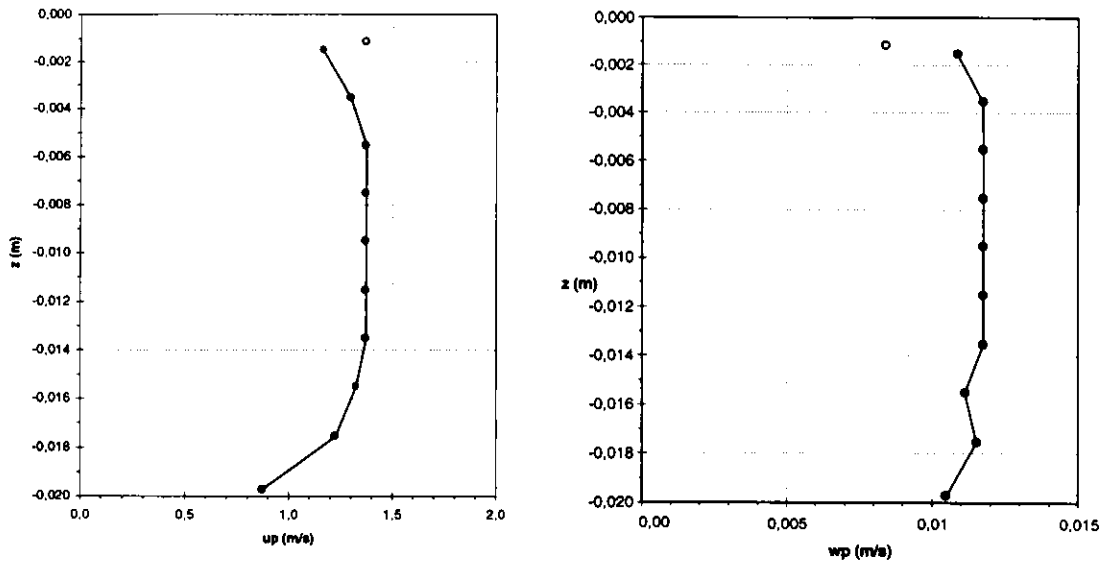


Figure 5. Calculs des composantes horizontales et des modules des composantes verticales des vitesses des particules en suspension (\bullet) d'un diamètre de $125\ \mu\text{m}$ en fonction de leurs positions verticales à la sortie du nez du piège pour une vitesse d'écoulement ambiante adaptée aux conditions de terrain de $1.38\ \text{m/s}$. Ces résultats sont comparés avec les calculs de la composante horizontale et du module de la composante verticale de la vitesse d'une particule injectée (\circ) de même diamètre en fonction de sa position verticale à la sortie du nez du piège pour une vitesse d'écoulement ambiante expérimental de $1.8\ \text{m/s}$.

6. Discussion et conclusions

Des expérimentations en bassin d'essais à circulation ont été entreprises pour valider un nouveau piège à sédiment en suspension mono-directionnel.

Des visualisations à l'aide de fluorescéine en solution confirment les comportements hydrodynamiques pressentis, à savoir le ralentissement progressif des vitesses horizontales des particules fluides, le développement d'une large cellule de recirculation verticale dans la partie inférieure du piège et l'établissement d'une zone de quasi-stagnation à l'arrière du piège.

Une procédure expérimentale impliquant des particules sédimentaires non-cohésives révèle les capacités de piégeage du dispositif. Cette démarche conduit à déterminer avec précision le coefficient d'efficacité du piégeage pour diverses vitesses d'écoulement ambiante et tailles de particules. Associés à une estimation numérique des différences entre le comportement hydrodynamique des particules en conditions expérimentales et naturelles, ces tests ont permis de conclure à une efficacité de piégeage quasi-parfaite (respectivement 99.1 et 97.6%) jusqu'à une vitesse d'écoulement naturel de $1.38\ \text{m/s}$ pour des sables de diamètre supérieur à $125\ \mu\text{m}$ et jusqu'à une vitesse d'écoulement naturel de $1.06\ \text{m/s}$ pour des sables très fins de diamètre compris entre 100 et $125\ \mu\text{m}$. Ces résultats laissent augurer d'une utilisation du piège pour mesurer avec précision les flux des particules en question dans des écoulements non-permanents atteignant ces vitesses maximales. Dans la pratique, ces gammes d'applicabilité couvrent une grande partie des environnements marins.

7. Références bibliographiques

- Allen, J.R. (1984) *Sedimentary structures, their character and physical basis*. Developments in Sedimentology 30, unabridged one-volume edition, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Auton, T.R., Hunt, J.C.R. et Prud'homme, M. (1988) The force exerted on a body in inviscid unsteady non-uniform rotational flow. *Journal of Fluid Mechanics*, vol.197, 241-257.
- Broker, I.H. (1985) *Waves generated ripples and resulting sediment transport in waves*. Series paper N° 36, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, ISVA, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 133 p.
- Chandrsuda, C. (1975) *A reattaching turbulent shear layer in incompressible flow*. Ph.D. Thesis, Department of Aeronautics, Imperial College of Science and Technology.
- Chapalain, G. *A simple monodirectional trap for measuring horizontal transport rates of suspended sediment* (in preparation).
- Eaton, J.K. et Johnston, J.P. (1981) A review of research on subsonic turbulent flow reattachment. *AIAA Journal*, vol. 19, N° 9, 1093-1100.
- Horikawa, K. (Ed.) (1988) *Nearshore dynamics and coastal processes. Theory, measurement and predictive models*. University of Tokyo Press, Tokyo, Japan, 522 p.
- Hunt, J.C.R., Auton, T.R., Sene, K., Thomas, N.H. et Kowe, R. (1988) Bubble motions in large eddies and turbulent flows. *Proceedings of the Conference on Transient Phenomena in Multiphase Flow* (Ed. N.H. Afgan), Hemisphere, Bristol, Pa., U.S.A.
- Huntley, D.A. (1982) *In situ sediment monitoring techniques. A survey of the state of the art in U.S.A.*. Canadian Coastal Sediment Study, Report C2S2-1, NRC, Ottawa, Canada, 35 p.
- Maxey, M.R. et Riley, J.J. (1983) Equation of the motion of a small rigid sphere in a non-uniform flow. *Physics of Fluids*, vol. 26, 883-889.
- Schiller, L. et Naumann, A (1933) *Über die grundlegenden berechnungen bei der schwerkraftbereitung*. *Zeit. Verein Deutscher Ing.*, Vol. 77.
- Schlichting, H. (1968) *Boundary-layer theory*. McGraw-Hill, New York, U.S.A., 747 p.
- Williams, J. et Elder, S.A. (1989) *Fluid physics for oceanographers and physicists, an introduction to incompressible flow*. Pergamon Press, Oxford, U.K., 300 p.
- Yvergniaux, Ph. et Chollet, J.-P. (1989) Particle trajectories modelling based on a lagrangian memory effect. *Proceedings of the XXIII Congress*, Ottawa, Canada.

