

Traceur fluorescent
Transports sédimentaires
Plages
Cotentin

Fluorescent sediment tracer
Sédiment transport
Beaches
Cotentin

Transports solides sur les plages macrotidales : traçage fluorescent et application à la côte ouest du Cotentin (France)

Franck LEVOY, Olivier MONFORT et Claude LARSONNEUR

Université de Caen, Centre Régional d'Etudes Côtières, 54, rue du Docteur Charcot, 14530 Luc-sur-Mer, France.

Reçu le 07/03/97, révisé le 20/06/97, accepté le 27/06/97.

RÉSUMÉ

Les traceurs fluorescents, souvent utilisés dans la zone de déferlement pour étudier les transports solides parallèles au trait de côte, sont ici appliqués aux déplacements multidirectionnels observés sur les estrans macrotidaux. Les transports sédimentaires y sont dominés par l'action de la houle ou celle de la marée, ou encore par l'interaction de ces deux agents. Leurs influences relatives varient d'ailleurs dans l'espace et dans le temps. Plusieurs techniques d'évaluation des concentrations en sables fluorescents, par comptages à la surface du lit sédimentaire ou dans le volume après prélèvement, sont utilisées et comparées. Un comptage automatique des grains fluorescents présents dans le volume remanié a également été testé et validé. Réalisée dans le cadre d'une expérience préalable, la comparaison des concentrations ainsi obtenues et des valeurs déduites de comptages visuels, est satisfaisante. Ces méthodes permettent, en particulier, de prendre en compte l'hétérogénéité granulométrique du stock sédimentaire.

La technique est ensuite appliquée à la côte ouest du Cotentin. L'influence relative de la houle et des courants sur les transports sédimentaires est étudiée pour deux climats hydrométéorologiques contrastés en différents points d'un estran macrotidal. L'influence de la houle, sur l'intensité et la direction des mouvements sédimentaires, est prépondérante sur la moyenne plage où les débits solides peuvent atteindre $25 \text{ kg.m}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ en tempête. Sur la basse plage, les effets de l'agitation, des courants de marée ou de la dynamique estuarienne varient avec les conditions hydrodynamiques. Les débits solides engendrés par les courants de marée n'y dépassent pas $0,2 \text{ kg.m}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Des valeurs dix fois supérieures peuvent être observées sous l'action des houles.

ABSTRACT

Solid transport on macrotidal beaches: fluorescent tracer application on the western coast of Cotentin (France).

Fluorescent tracers, often used to study longshore transports induced in the breaking zone, are here adapted to the multidirectional movements observed on macrotidal beaches, where sediment transports are dominated by wave or tide action or by the simultaneous action of both. The relative influences of these agents vary in space and time. Different techniques of quantifying fluorescent grain concentrations, by surficial or volumetric counting of samples are tested and compared. The automatic counting of fluorescent grains present in the mobile layer is also tested and validated. Comparisons, made during a preliminary experiment, between concentrations evaluated in this manner and values inferred from visual inventories are satisfactory. The different methods make it possible to take the granulometric heterogeneity of the sediment stock into account.

The technique is then applied to the western coast of Cotentin. The relative influence of waves and tidal currents on sediment mobility is studied for two contrasted hydrometeorological climates at different points on a macrotidal beach. Wave action on sediment movement intensity and direction is predominant on the middle foreshore, where transport rates can reach $25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ during stormy conditions. On the lower foreshore, the action of waves, tidal currents or estuary dynamics depends on hydrodynamic conditions. The transport rates induced by mean current action do not exceed $0.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. Values ten times larger can be observed under wind-wave action.

Oceanologica Acta, 1997, 20, 6, 811-822.

INTRODUCTION

La quantification des débits solides sur les plages est essentielle dans les études d'impact des projets d'aménagements (ouvrages portuaires, aménagements de protection contre la mer, dragages). Les traceurs fluorescents ont fourni, dans plusieurs études côtières (Ingle, 1966; Komar et Inman, 1970; White et Inman, 1989*a, b*), des renseignements utiles sur les mouvements sédimentaires observables à l'échelle de quelques jours. Essentiellement mise en œuvre le long des côtes microtidales, cette technique fût principalement adaptée à la quantification des transports sédimentaires, unidirectionnels et parallèles à la côte, qui se produisent sous l'action du déferlement (White et Inman, 1989*a, b*). Les méthodes proposées ne sont pas appropriées aux environnements méso- et macrotidaux souvent caractérisés par des flux sédimentaires multidirectionnels, induits par le balayage de l'estran dans la zone de déferlement au cours du cycle de marée et par les interactions entre les courants de marée et les houles non déferlantes (Levoy, 1994). Elles seront donc adaptées afin de prendre en compte :

- la spécificité des mouvements sédimentaires qui affectent ces estrans ;
- la nature souvent variée du stock sédimentaire qui les recouvre.

La méthode est ensuite appliquée à l'étude, sur la côte ouest du Cotentin, des actions respectives de la houle et des courants de marée sur les sédiments en différents points de l'estran et pour différentes conditions hydrodynamiques.

MÉTHODE

Principe

Après immersion et dispersion par les agents hydrodynamiques, les particules, rendues fluorescentes, sont repérables dans le milieu mais identiques au sable naturel par leurs caractéristiques géométriques et hydrodynamiques; leurs déplacements sont utilisés pour évaluer les débits sédimentaires. Ils sont déduits, dans l'approche lagrangienne basée sur un échantillonnage spatial, de la vitesse de déplacement du centre de gravité du traceur et de l'épaisseur estimée de la couche de sable mobile (Madsen, 1989). Sur les estrans macrotidaux, le retrait de la mer, qui peut figer le milieu pendant plusieurs

heures, permet un échantillonnage spatial efficace par un nombre restreint d'opérateurs.

Evaluation des concentrations

L'évaluation des concentrations en grains fluorescents, dans la couche sédimentaire remaniée par les agents hydrodynamiques, est un point essentiel de la méthode. Elle peut être réalisée par comptage des grains fluorescents à la surface du lit sédimentaire. Cette population est supposée représentative de la concentration dans le volume. La concentration en particules marquées contenues dans le volume mobilisé peut également être déduite directement de prélèvements localisés précisément dans le nuage fluorescent. Pour être valables ces prélèvements doivent être effectués sur la totalité de l'épaisseur du lit où des particules marquées sont présentes (L.C.H.F., 1978). Le dénombrement des grains marqués, dans une masse donnée, permet alors le calcul des concentrations. Les comptages en volume et en surface peuvent s'opérer visuellement (Zenkovitch, 1960; Ingle, 1966; White et Inman, 1989*a*) ou à l'aide d'un détecteur automatique (Teleki, *in*: Ingle, 1966; Crowson *et al.*, 1988; Corbau *et al.*, 1994). Dans le cadre de cette étude, et quelle que soit la méthode de comptage adoptée, la granulométrie des grains fluorescents sera supposée homogène sur toute la surface de la tache et identique à celle de l'échantillon injecté. Cette hypothèse, qui néglige le tri granulométrique, suppose en particulier, un déplacement du traceur sur de courtes distances.

Dans un premier temps, nous comparons ces différentes méthodes pour apprécier leur fiabilité.

A partir du comptage visuel des grains fluorescents contenus dans un volume de sédiments

Après prélèvement d'échantillons de sable dans le nuage fluorescent, rinçage et séchage, les grains marqués sont comptés sous un éclairage ultraviolet. Pour être significatif, ce comptage doit porter sur une masse suffisante pour renfermer un nombre représentatif de particules fluorescentes. Pour un échantillon contenant des particules de même nature et de même diamètre nominal, il y a évidemment proportionnalité entre la masse d'un échantillon et le nombre de grains qu'il contient. Pour des échantillons naturels, contenant des grains de même diamètre de refus D , la masse M d'un grain a également pu être reliée à ce diamètre. La relation peut être approchée,

avec une bonne précision, par une loi de la forme: $M = K \cdot D^\alpha$. Dans l'hypothèse de grains parfaitement sphériques, de densité $\rho_s = 2635 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, la masse en grammes d'une particule serait exprimée en fonction de son diamètre, en millimètres par

$$M = \rho \cdot V = \rho_s \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^3}{6} \right) \approx 1,38 \times 10^{-3} \cdot D^3.$$

Les résultats expérimentaux, obtenus par le L.C.H.F. (1978), fournissent une expression très voisine:

$$M = 1,25 \times 10^{-3} \cdot D^3 \quad (\text{Fig. 1}).$$

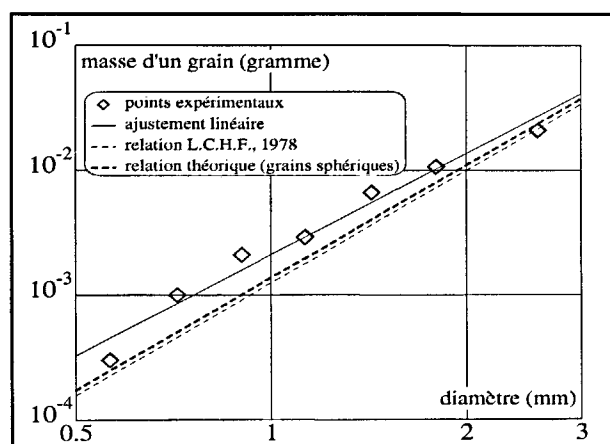


Figure 1

Relation entre la masse et le diamètre d'un grain.

Sediment particle mass as a function of diameter.

De nouveaux essais ont été réalisés avec des échantillons représentatifs des sédiments de la côte occidentale du Cotentin. Pour des échantillons contenant des grains de même diamètre de refus, D_i^R , l'évolution de la masse avec le nombre de grains a été étudiée. Ces relations permettent de vérifier la bonne proportionnalité entre les deux grandeurs. La pente des droites obtenues est ensuite reliée au diamètre D_i , supposé représentatif des grains contenus dans le tamis D_i^R , calculé par:

$$D_i = \frac{1}{2} \cdot (D_i^R + D_{i-1}^R) \quad (1)$$

D_{i-1}^R est le diamètre de refus du tamis situé immédiatement au-dessus du tamis D_i^R dans la colonne granulométrique.

La relation expérimentale obtenue (Fig. 1) peut être approchée par une fonction simple entre la masse d'une particule et son diamètre sous la forme

$$M = 2,1 \times 10^{-3} \cdot D^{2,7}. \quad (2)$$

Les différences de diamètre des grains contenus dans le même tamis, leur forme, qui n'est jamais rigoureusement

sphérique, et leur densité réelle expliquent les écarts observés entre les différentes relations.

La concentration C_V d'un échantillon de masse totale M_T contenant N_F particules marquées de masse moyenne M s'exprime par:

$$C_V = N_F \cdot \frac{M}{M_T}. \quad (3)$$

La fraction en masse P_i , des grains de diamètre de refus D_i^R contenus cet échantillon est exprimée par:

$$P_i = \frac{M_T^i}{\sum_i M_T^i}. \quad (4)$$

où M_T^i , la masse totale des N_i grains de diamètre D_i^R , s'exprime par $M_T^i = N_i \cdot M^i$. La sommation sur i est étendue à tous les tamis qui composent la colonne granulométrique. La masse M^i d'une particule de diamètre de refus D_i^R est donnée par la relation (2) pour le diamètre D_i déduit de D_i^R par la relation (1).

Le nombre total de particules contenues dans l'échantillon de masse $M_G = \sum_i M_T^i$ est donné par: $N = \sum_i N_i$. La masse moyenne M d'une particule de l'échantillon peut alors être exprimée par:

$$M = \frac{M_G}{N} = \frac{1}{\sum_i \frac{P_i}{M^i}}. \quad (5)$$

Finalement, la concentration en traceur fluorescent d'un échantillon de masse M_T est

$$C_V = \frac{N_F}{M_T} \cdot \frac{1}{\sum_i \frac{P_i}{M^i}}. \quad (6)$$

Cette nouvelle approche permet d'intégrer, dans le calcul des débits solides, la variété granulométrique du stock sédimentaire mobilisé.

A partir du comptage visuel des grains fluorescents à la surface du lit sédimentaire

Le nombre N_s de grains marqués sur une surface de comptage S est directement déterminé sur la plage et sous un éclairage ultraviolet. La surface de comptage adoptée, égale à 100 cm^2 , ou 10 cm^2 pour les très fortes concentrations, doit être suffisante pour contenir un nombre significatif de grains marqués. L'expression (5) de la masse moyenne M des particules contenues sur la surface de comptage permet de déduire la masse M_F du sable fluorescent présent dans la couche superficielle: $M_F = N_s \cdot M = \frac{N_s}{\sum_i \frac{P_i}{M^i}}$.

L'épaisseur de cette couche superficielle, est prise égale à D , diamètre caractéristique des particules du lit, calculé par: $D = \sum_i P_i \cdot D_i$. La répartition granulométrique $P_i(D_i)$ des particules de sable naturel, supposée homogène sur la surface de la tache fluorescente, est assimilée à celle

de l'échantillon de traceur utilisé. La couche superficielle, de volume $V = S \cdot D$, contient une masse totale de sable égale à $M_T = \rho \cdot S \cdot D$.

Finalement, la concentration en sable fluorescent de l'échantillon, assimilée à la concentration en surface, est donnée par

$$C_S = \frac{M^F}{M_T} = \frac{N_S}{\rho \cdot S \cdot D \cdot \sum_i \frac{P_i}{M_i}} \quad (7)$$

Utilisation d'un compteur automatique

Ces détecteurs automatiques sont sensibles à la surface lumineuse qui varie comme le carré du diamètre des grains, dans l'hypothèse de particules sphériques. Ce principe est *a priori* inexact (White et Inman, 1989a) puisque la masse d'un grain de sable est proportionnelle au cube de son diamètre dans le cas d'une forme sphérique. Toutefois, après étalonnage, l'utilisation de tels dispositifs, rend moins fastidieuses les opérations de comptage.

Le système, mis au point dans le cadre de la méthodologie présentée, comprend :

- une enceinte éclairée par des lampes à UV qui excitent la fluorescence des particules marquées ;
- une caméra CCD haute résolution (756 H × 581 V) munie d'un filtre interférentiel qui fait ressortir les particules fluorescentes et donne une réponse nulle pour un échantillon de sable naturel ;
- un dispositif électronique de comptage qui traduit l'information vidéo issue de la caméra en une donnée numérique.

La figure 2 présente la relation entre la réponse du système de détection et le nombre de grains fluorescents présents sur la surface de comptage pour différents diamètres de refus de tamis.

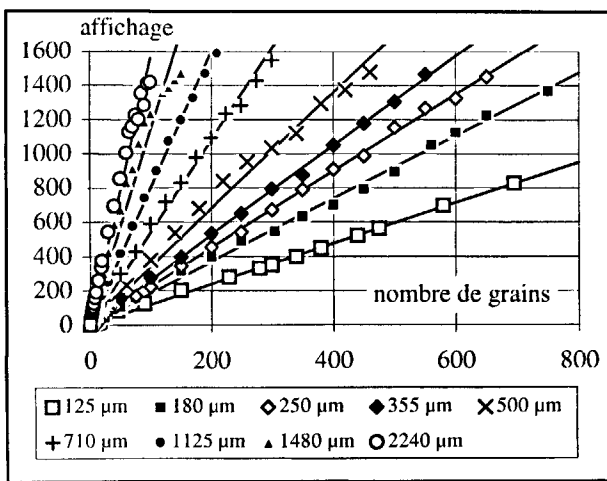


Figure 2 Réponse du détecteur de sable fluorescent en fonction du nombre de grains présents pour différents diamètres de refus.

Fluorescent grain counter response as a function of the number of dyed particles for different grain sieve diameters.

Une bonne proportionnalité est observée entre la réponse du détecteur automatique et le nombre de grains de mêmes diamètres de refus. Cette caractéristique est meilleure pour les grains les plus petits et disparaît lorsque la mesure devient voisine de 1500. La dissociation des grains devient impossible en raison de leur trop grand nombre. Au-delà de ce seuil, l'échantillon est préalablement dilué dans du sable naturel afin d'en diminuer la concentration qui sera ensuite ramenée à la valeur réelle.

La figure 2 permet d'établir, pour chaque diamètre de refus D_i , une relation entre la mesure A_i du détecteur et le nombre N_i de grains de la forme

$$A_i = K_i \cdot N_i. \quad (8)$$

L'évolution de la pente K_i de ces droites de régression linéaire avec le diamètre de refus des grains utilisés est présentée sur la Figure 3. La bonne linéarité entre la pente K_i et le diamètre de refus D_i , exprimé en millimètres, permet d'établir, dans le cas du prototype utilisé, la relation

$$K_i = 7,2 \cdot D_i. \quad (9)$$

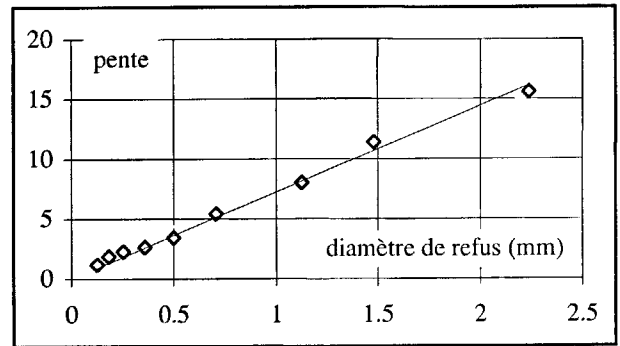


Figure 3 Pente de la droite de régression entre le nombre de grains fluorescents présents et la réponse du détecteur en fonction du diamètre de refus.

Slope of the linear regression relation between dyed grain number and counter response as a function of particle sieve diameter.

L'instrument mis au point permet ainsi de détecter et de dénombrer des grains de sable fluorescent dont le diamètre est compris entre 0,125 mm et 2,24 mm. Il est alors parfaitement adapté à la variété des sédiments présents sur les plages macrotidales (Wright *et al.*, 1982 ; Horn, 1993) et à sa prise en compte dans les calculs de débit solide.

La relation (8) établit la proportionnalité entre le nombre N_i de grains fluorescents de diamètre D_i présents sur la surface de comptage, et la mesure A_i du détecteur automatique, pour un traceur de granulométrie connue ; un raisonnement analogue à celui utilisé dans le cas de comptages visuels permet d'évaluer la concentration en fonction de la mesure du détecteur automatique

$$C_D = \frac{A}{\rho \cdot S \cdot D \cdot \sum_i \frac{K_i \cdot P_i}{M_i}} \quad (10)$$

Comparaison des différentes méthodes

La figure 4 présente la comparaison entre les concentrations C_S évaluées par comptage visuel en surface sur le terrain et les concentrations C_V , considérées comme valeurs de référence, déduites d'un comptage visuel dans le volume après prélèvements lors d'une expérience menée sur la plage macrotidale de Luc-sur-Mer (Calvados, France).

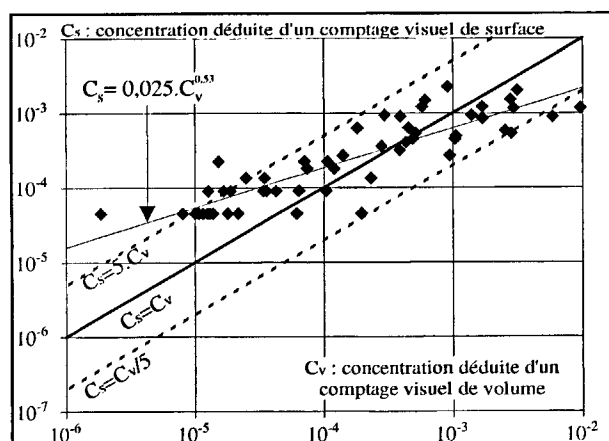


Figure 4

Comparaison entre les concentrations en particules fluorescentes déduites de comptages visuels effectués en surface et dans le volume.

Comparison between fluorescent particle concentrations computed from surface and volumetric countings.

Le rapport entre les deux valeurs est en général compris entre 5 et 1/5. Les comptages de surface semblent surestimer la concentration pour les valeurs les plus faibles et sous-estimer légèrement les concentrations supérieures à 10^{-3} .

La figure 5 présente la comparaison entre les concentrations déduites de comptages effectués dans le volume,

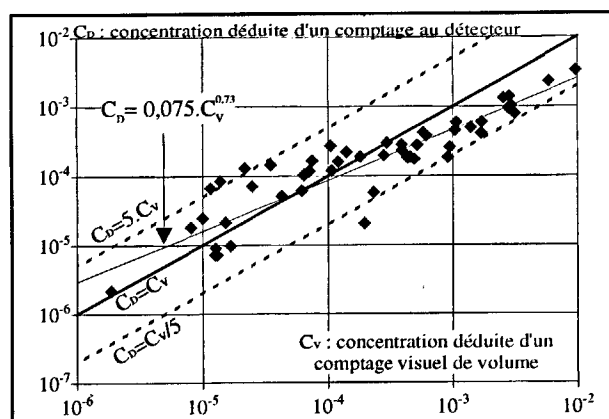


Figure 5

Comparaison entre les concentrations en particules fluorescentes déduites de comptages volumiques visuels et au détecteur automatique.

Comparison between fluorescent particle concentrations computed from visual volumetric counting or with an automatic counter.

visuellement et à l'aide du détecteur automatique. Le rapport entre les valeurs déterminées par les deux méthodes reste, le plus souvent, compris entre 5 et 1/5. Au regard de la droite de régression, l'accord entre les deux méthodes semble même ici meilleur que précédemment. Pour les valeurs les plus fortes, supérieures à 2×10^{-4} environ, l'utilisation du détecteur automatique a, cependant, pour effet de sous-estimer les concentrations.

Nous proposons donc de calculer les concentrations par comptage des grains fluorescents dans un volume de sédiment prélevé sur la totalité de la couche mobile définie par l'une des approches présentée par White et Inman (1989a). L'utilisation d'un détecteur compteur de grains fluorescents est un moyen de rendre moins fastidieux et plus fiables les travaux de comptage.

Calcul des débits solides

Hypothèses générales

Deux hypothèses principales sont admises pour évaluer les débits solides. Elles prennent un caractère particulier dans le cas des plages à fort marnage.

- Dans l'approche lagrangienne de la technique des traceurs fluorescents, le taux de transport sédimentaire est calculé comme le produit de la vitesse d'advection du centre de gravité du nuage de traceur par l'aire de la section droite du système de transport (Madsen, 1989). Une des contraintes principales dans l'utilisation de cette méthode est la possibilité de déterminer les frontières du système (Duane et James, 1980). Dans le cadre de cette étude, les profondeurs de remaniement sont supposées constantes sur toute la surface de chacune des taches. Elles sont assimilées à la profondeur maximale de pénétration du traceur, déterminée par prélèvements en plusieurs points des taches à proximité des points d'injection. Cette hypothèse suppose, en particulier, que le traceur ne quitte pas le domaine morphodynamique d'injection conformément aux observations de Wright *et al.* (1982).

- Dans les expériences de mesure de la dérive littorale dans la zone de déferlement (Komar et Inman, 1970; Horikawa, 1988), la vitesse d'advection V_a du centre de gravité du nuage fluorescent est calculée par $V_a = \frac{Y}{\Delta T}$ où Y est la distance parcourue parallèlement à la côte par le centre de gravité du nuage fluorescent et ΔT l'intervalle de temps qui sépare les instants d'injection et de détection du traceur. En zone intertidale, l'intervalle de temps à considérer n'est plus le temps total écoulé entre l'injection et la détection, mais la durée effective du transport entre ces deux instants. Elle est assimilée au temps d'immersion, déduit d'enregistrements marégraphiques, de l'estran à la cote du point d'injection du traceur.

Le calcul du taux de transport

La méthode de calcul adoptée pour quantifier les transports sableux sur les plages méso- et macrotidales s'inspire de la théorie développée par Madsen (1989) pour évaluer les transports sédimentaires *longshore* dans la zone de

déferlement. Dans ce cas, le taux de transport s'exprime en $m^3 \cdot s^{-1}$ par : $\vec{Q}_S = A \cdot \vec{V}_G$, où A est l'aire de la section droite de la zone remaniée. Par analogie, pour un déplacement multidirectionnel, le transport solide volumique par unité de longueur perpendiculaire à la direction de transport devient :

$$\vec{Q}_S = Z_o \cdot \vec{V}_G = Z_o \cdot \frac{G\vec{G}'}{\Delta t} \quad (11)$$

où Z_o est l'épaisseur de remaniement, G et G' sont les positions du centre de gravité en début et fin d'expérience, Δt est la durée d'immersion de l'estran à la cote du point G et \vec{V}_G est la vitesse horizontale de déplacement du centre de gravité du nuage fluorescent.

En coordonnées polaires (R, Ω) centrées sur le point G , bien adaptées au maillage de détection utilisé sur le terrain, la position (R_G, Ω_G) du centre de gravité G' de la tache fluorescente, s'exprime par :

$$\left. \begin{aligned} R_G &= \frac{\int \int_S R^2 \cdot C(R, \Omega) \cdot dRd\Omega}{\int \int_S R \cdot C(R, \Omega) \cdot dRd\Omega} = \frac{I_{2,0}}{I_{1,0}} \\ \Omega_G &= \frac{\int \int_S R \cdot \Omega \cdot C(R, \Omega) \cdot dRd\Omega}{\int \int_S R \cdot C(R, \Omega) \cdot dRd\Omega} = \frac{I_{1,1}}{I_{1,0}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

avec $I_{a,b} = \int \int_S R^a \Omega^b C(R, \Omega) dRd\Omega$.

L'intégration sur la surface horizontale de la tache, S , est calculée comme la somme des intégrales sur les secteurs disjoints, $S_{k,m}$, délimités par deux radiales consécutives Ω_k et Ω_{k+1} , et deux distances de prélèvement consécutives sur ces radiales, R_m et R_{m+1} (Fig. 6) :

$$(S_{k,m}) : \left\{ \begin{aligned} \Omega_k &\leq \Omega < \Omega_{k+1} \\ R_m &\leq R < R_{m+1} \end{aligned} \right.$$

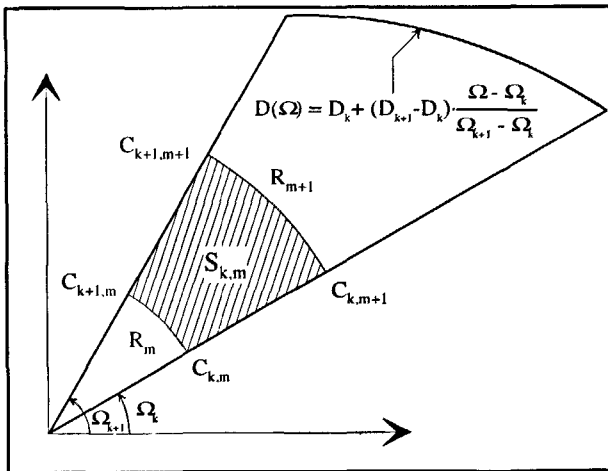


Figure 6
Secteur d'intégration.
Integration sector.

Sur $S_{k,m}$, la concentration $C^{k,m}(R, \Omega)$ en traceur fluorescent est évaluée, à partir de la donnée des concentrations $C_{k,m}, C_{k+1,m}, C_{k+1,m+1}$, qui définissent les constantes $K_{R,\Omega}^{k,m}, K_{\Omega}^{k,m}, K_R^{k,m}, K^{k,m}$, par :

$$C^{k,m}(R, \Omega) = K_{R,\Omega}^{k,m} \cdot R \cdot \Omega + K_{\Omega}^{k,m} \cdot \Omega + K_R^{k,m} \cdot R + K^{k,m} \quad (13)$$

L'intégrale $I_{a,b}$ devient :

$$I_{a,b} = \sum_k \sum_m \int \int_{S_{k,m}} R^a \Omega^b C^{k,m}(R, \Omega) \cdot dR \cdot d\Omega \quad (14)$$

La sommation sur k porte sur toutes les directions de prélèvement et la sommation sur m , sur tous les points de prélèvement des radiales Ω_k et Ω_{k+1} . Si la détection à la distance R_m n'a pas été réalisée sur l'une des radiales, celle-ci est complétée en supposant une variation linéaire de la concentration avec la distance entre les deux points de prélèvements de la radiale qui entourent R_m conformément à la relation (13).

Entre les radiales Ω_k et Ω_{k+1} la limite d'intégration est calculée par

$$D(\Omega) = D_k + (D_{k+1} - D_k) \frac{\Omega - \Omega_k}{\Omega_{k+1} - \Omega_k}$$

Le taux de transport sédimentaire massique par unité de longueur perpendiculaire est donné en norme Q_s et direction Ω_S par :

$$\left. \begin{aligned} Q_S &= \rho \cdot Z_o \cdot \frac{R_G}{\Delta t} \\ \Omega_S &= \Omega_G \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$\rho = (1 - p) \cdot \rho_s \approx 1600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ est la masse volumique du sable en place dans le cas d'un matériel de densité $\rho_s = 2635 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et de porosité $p = 40\%$ (Van Rijn, 1993).

L'évaluation du taux de récupération du traceur T_R , rapport de la masse M_R de traceur fluorescent présente au moment de la détection dans la zone de prélèvement à la masse M_o injectée, permet de s'assurer, par une valeur proche de 1, de la pertinence du taux de transport calculé. Il peut être calculé par :

$$T_R = \frac{M_R}{M_o} = \frac{1}{M_o} \cdot \int \int \int_V \rho \cdot C \cdot dV = \frac{\rho \cdot Z_o \cdot I_{1,0}}{M_o} \quad (16)$$

RÉSULTATS EN NATURE ET INTERPRÉTATION

Plusieurs campagnes de mesure des paramètres hydrodynamiques et de quantification des transports solides ont été menées sur les estrans macrotidaux de la côte occidentale

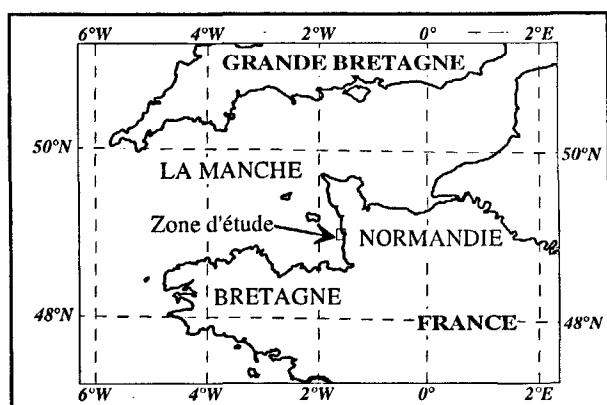


Figure 7

Localisation de la zone d'étude.

Location of the study area.

du Cotentin (Fig. 7) dans le cadre du programme ROMIS (Levoy, 1994). Les plages de ce littoral se caractérisent par des marées de très fortes amplitudes qui induisent des variations de la profondeur d'eau pouvant atteindre 14 m au cours du cycle tidal, et des courants moyens dépassant parfois 1 m.s^{-1} . L'estran est balayé deux fois par cycle tidal par la zone de déferlement et ses courants induits. Les agitations sont généralement modérées. Les hauteurs significatives annuelles par des fonds de 5 à 10 m varient entre 4,3 m et 2,8 m du Nord au Sud de la côte du Cotentin. La marée et l'agitation induisent des courants qui peuvent agir sur les fonds sédimentaires de façon plus ou moins dominante selon les parties de l'estran considérées, délimitées par des temps moyens d'immersion différents (Wright *et al.*, 1982). Les traceurs fluorescents permettent, sans perturber les écoulements, de quantifier les déplacements solides et d'identifier l'influence respective des courants de marée et de l'agitation pour différentes conjonctions hydrodynamiques.

Dans cette optique, deux campagnes de mesure se sont déroulées, sur les basses et moyennes plages, de part et d'autre du havre de Regnéville entre les communes de Hauteville-sur-Mer, au Sud, et de Agon-Coutainville, au Nord (Fig. 8).

La première a eu lieu entre le 13 et le 17 mai 1991 par des conditions de marée de vives-eaux moyennes de coefficients compris entre 98 et 89 (Fig. 9). L'agitation, mesurée au Sud de la zone (point A3, Fig. 8), est restée faible durant toute la durée d'investigation, associée à des vents modérés (Fig. 9). La hauteur significative maximale, au moment de la pleine mer, est toujours inférieure à 0,5 mètre. Les directions de provenance sont en général comprises entre le SO et le NO.

Trois injections de traceurs fluorescents ont été effectuées pour quantifier les débits solides (Fig. 8, 9 et 10).

Au point A1, le transport sédimentaire, mesuré sur sept cycles de marée, est faible, voisin de $100 \text{ g m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ (Tableau 1, Fig. 10). La vitesse du courant moyen nécessaire pour assurer la mise en mouvement des sédiments, évaluée par la méthode proposée par Van Rijn

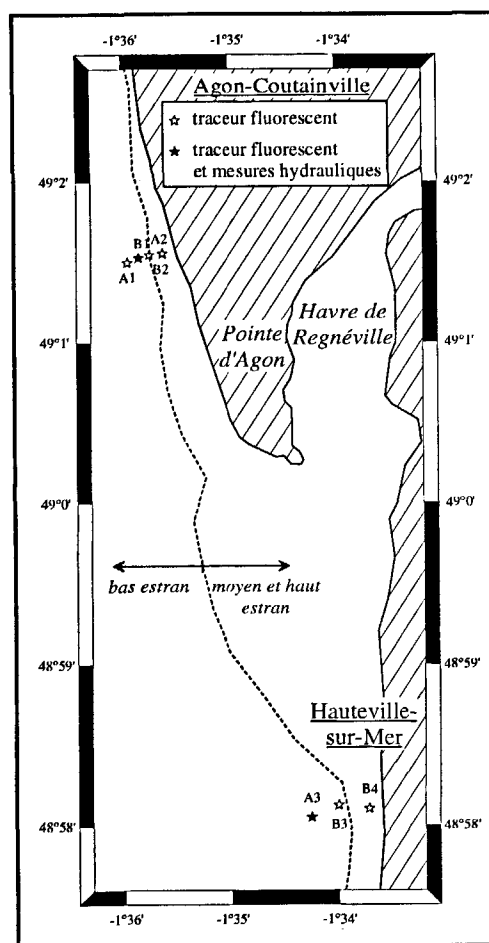


Figure 8

Localisation des points de mesure des paramètres hydrodynamiques et des transports sédimentaires.

Location of the hydrodynamic parameters and sediment transport rates measurements.

(1993), est dépassée pendant 3 h 30 à 4 h à chaque marée (Fig. 11). Cette phase potentielle de transport des sédiments est centrée autour de la pleine mer, alors que les courants moyens, dirigés vers le Nord, atteignent des vitesses de $0,7 \text{ m.s}^{-1}$. Le sens de déplacement du centre de gravité du traceur (Fig. 10) est à rapprocher de la direction de ces courants. La dynamique sédimentaire de basse plage, au Nord du havre de Regnéville, dans des conditions de beau temps et de vives-eaux, est donc dominée, sans équivoque, par l'influence des courants de marée.

Au point A2, situé sur la moyenne plage au Nord de la zone, l'intensité des transports sédimentaires, mesurés sur cinq cycles de marée, est voisine de $2 \text{ kg.m}^{-1} \text{ min}^{-1}$. Le centre de gravité du traceur s'est déplacé vers le SE, parallèlement au trait de côte (Fig. 10). Une composante secondaire de transport vers le Nord, qui contribue à un étalement du traceur sur une trentaine de mètres environ, apparaît également. Les courants moyens de pleine mer, dirigés vers le Nord, et dont la vitesse atteint $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ (Fig. 12), peuvent mobiliser les sédiments en place pendant 1 à 2 h à chaque marée et expliquer cette composante du transport. Leur action est cependant contrecarrée par celle des courants qui apparaissent dans

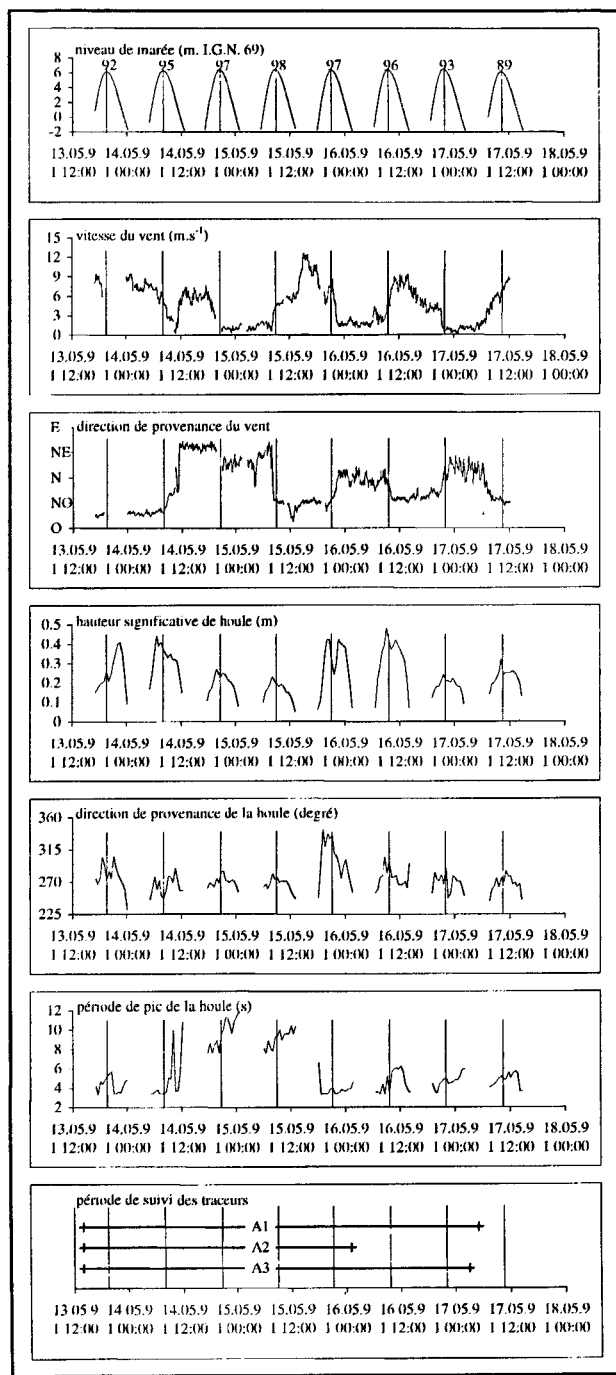


Figure 9

Caractéristiques du vent, mesurées à Agon-Coutainville, des marées et de l'agitation, mesurées au point A3, et Périodes de quantification des transports solides durant la première campagne.

Wind, measured at Agon-Coutainville; tidal and wave, measured at point A3; characteristics and sediment transport rate quantification periods during the first campaign.

les faibles tranches d'eau, en début et fin d'immersion. Les vitesses mesurées dépassent alors $0,8 \text{ m.s}^{-1}$ et sont capables de mobiliser fortement les sédiments de la plage vers le quadrant sud. Cette augmentation des courants moyens est principalement observée lors de la première et de la dernière marée subie par les traceurs, pour des houles de courtes périodes, environ 4 s, et de direction NO à NNO

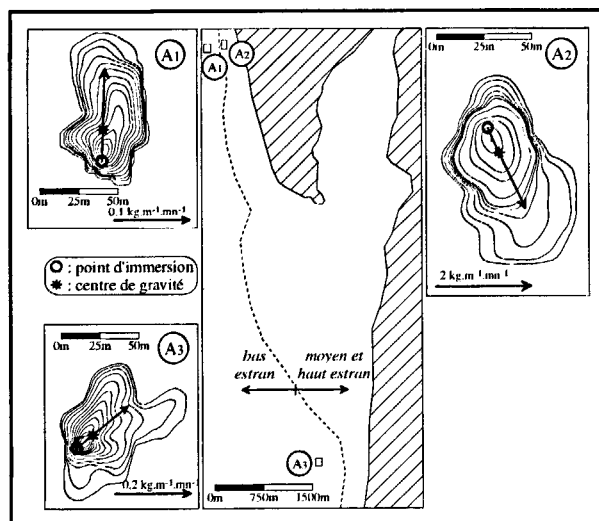


Figure 10

Dispersion du traceur fluorescent et transports sédimentaires mesurés durant la première campagne.

Fluorescent tracer dispersion and sediment transport measured during the first campaign.

Transports sédimentaires mesurés.

Sediment transport rates measured.

Point	Altitude du point d'immersion (m. I.G.N. 69)	Temps d'immersion (minute)	Déplacement du centre de gravité (mètre)	Débit solide ($\text{kg.m}^{-1}.\text{min}^{-1}$)	Direction de transport (degré)
A1	-2.0	3285	20	0,1	1,7
A2	+2.6	1347	14	1,9	155,0
A3	-2,1	3418	14	0,2	50,8
B1	-1.0	2631	42	2,1	125,5
B2	+0.9	1082	43	3,1	184,7
B3	-1.0	2631	10	0,4	46,7
B4	+2.6	523	38	25,6	8,1

associées directement à des vents de même provenance. Elle n'apparaît pas lorsque les houles de longues périodes proviennent de l'Ouest avec des vents faibles de NE (Fig. 9). Les conditions d'agitation, même modérées, sont alors essentielles pour expliquer le déplacement du centre de gravité du traceur vers le Sud. Les courants de marée n'ont qu'un rôle subordonné.

Au Sud du havre (point A3), la détection, effectuée après sept cycles de marée, révèle un transport modéré, d'intensité proche de $200 \text{ g. m}^{-1}.\text{min}^{-1}$, dirigé vers le Nord-Est. Les courants mesurés sont maximum au début du flot, environ 3 h avant la pleine mer (Fig. 13). Orientés vers le NE, ils induisent un net transport sédimentaire de même direction pendant une période de quelques minutes seulement. Ensuite, à pleine mer ou en fin de jusant, les vitesses, malgré leur reprise d'intensité, ne sont plus suffisantes pour mobiliser les sédiments en place. Sur ce site, par beau temps, les courants de flot des marées de

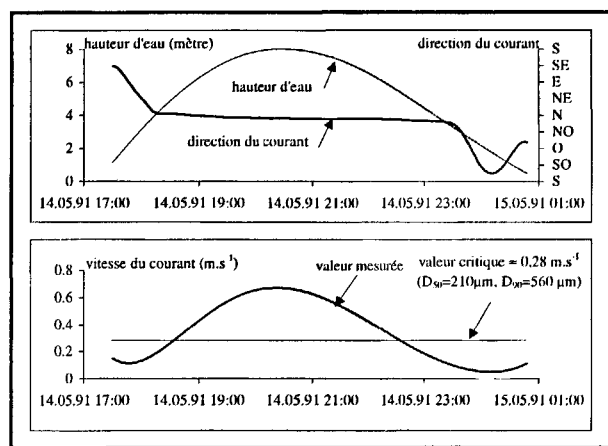


Figure 11

Profondeur d'eau et caractéristiques des courants moyens à 40 cm du fond mesurées au point A1.

Water depth and mean current characteristics 40 cm above the bed measured at point A1.

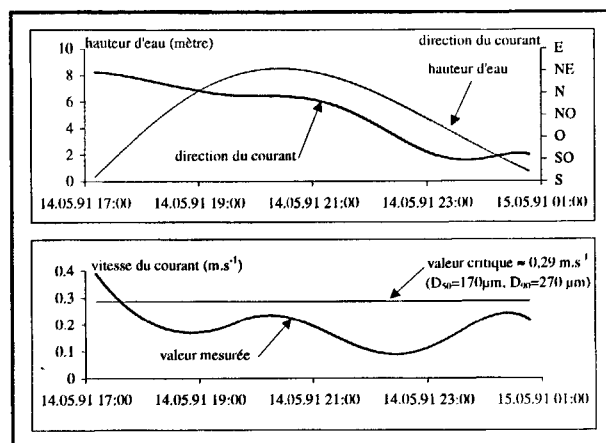


Figure 13

Profondeur d'eau et caractéristiques des courants moyens à 34 cm du fond mesurées au point A3.

Water depth and mean current characteristics 34 cm above the bed measured at point A3.

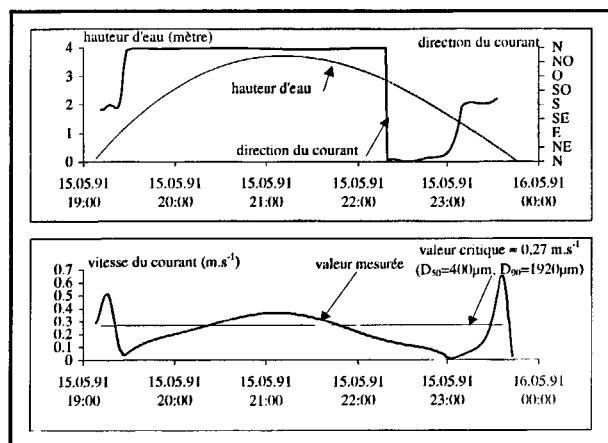


Figure 12

Profondeur d'eau et caractéristiques des courants moyens à 35 cm du fond mesurées au point A2.

Water depth and mean current characteristics 35 cm above the bed measured at point A2.

vives-eaux, qui participent au remplissage du havre de Regnéville, contrôlent la dynamique sédimentaire.

La deuxième campagne, menée sur la même zone au mois d'avril 1992 en marées de mortes-eaux moyennes puis de moyennes-eaux (Fig. 14), a été marquée par une tempête. Les vitesses du vent, faibles en début de campagne, ont augmenté rapidement pour atteindre un maximum voisin de 30 m.s^{-1} au moment de la pleine mer lors de la deuxième marée et décroître ensuite progressivement jusqu'à la fin de la campagne. La hauteur significative de la houle, mesurée sur le bas estran, (point B1) a suivi une évolution parallèle. La valeur maximale, supérieure à 1,1 m, a été enregistrée peu après que la vitesse maximale du vent a été atteinte. L'amplitude de la houle de pleine mer a diminué par la suite pour atteindre une valeur inférieure à 0,6 m en fin de campagne. La houle, qui provenait du secteur O-SO au

début de la deuxième marée, a tourné au secteur O-NO lors des trois cycles suivants avant de retrouver, en fin de période, son secteur de provenance initial. La direction O-NO est dominante sur la période de déplacement du traceur.

Au point B1, les transports sédimentaires, relativement élevés, atteignent $2,1 \text{ kg.m}^{-1}.\text{min}^{-1}$ (Tableau 1, Fig. 15). L'éventail de dispersion des sables est assez large, du NE au SSE, avec un déplacement du centre de gravité vers le SE. Les courants enregistrés dans des conditions de mortes-eaux (coefficient 43), sans forte agitation en début d'immersion, ne peuvent entraîner les sédiments dans cette zone. Par contre, le coup de vent de SO, survenu dans la nuit du 28 avril 1992, a fortement modifié la vitesse du courant moyen. Des valeurs supérieures au seuil d'entraînement sont mesurées pendant plus de 3 h, avec des pointes à $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ (Fig. 16). Ces courants compétents portent au Nord. Par la suite, la rotation des vents au NO et des houles à l'ONO, sur la plage, ainsi que l'augmentation du marnage vont modifier le régime de courants. Progressivement, les courants de marée deviennent compétents à pleine mer, pendant une à deux heures par cycle tidal. Ils portent également vers le N, parallèlement au trait de côte, et expliquent une des composantes du mouvement des sables mise en évidence par les traceurs. En début et fin d'immersion, les courants moyens au niveau du déferlement ne semblent pas compétents. Cependant, les vitesses instantanées dépassent parfois 1 m.s^{-1} , avec un éventail de dispersion très large dirigé vers le S et SE, sous l'effet de la rotation des vents à l'ONO et de l'agitation induite. Les modifications du régime hydrodynamique, intervenues au cours de la période d'investigation, rendent alors délicate l'interprétation des traceurs en terme de mobilité sédimentaire. Néanmoins, l'agitation de longue période, dans des conditions de post-tempête, semble déterminante sur la basse plage pour induire un transport résiduel vers le SE, malgré le coup de vent de SO et l'action éphémère des courants de marée.

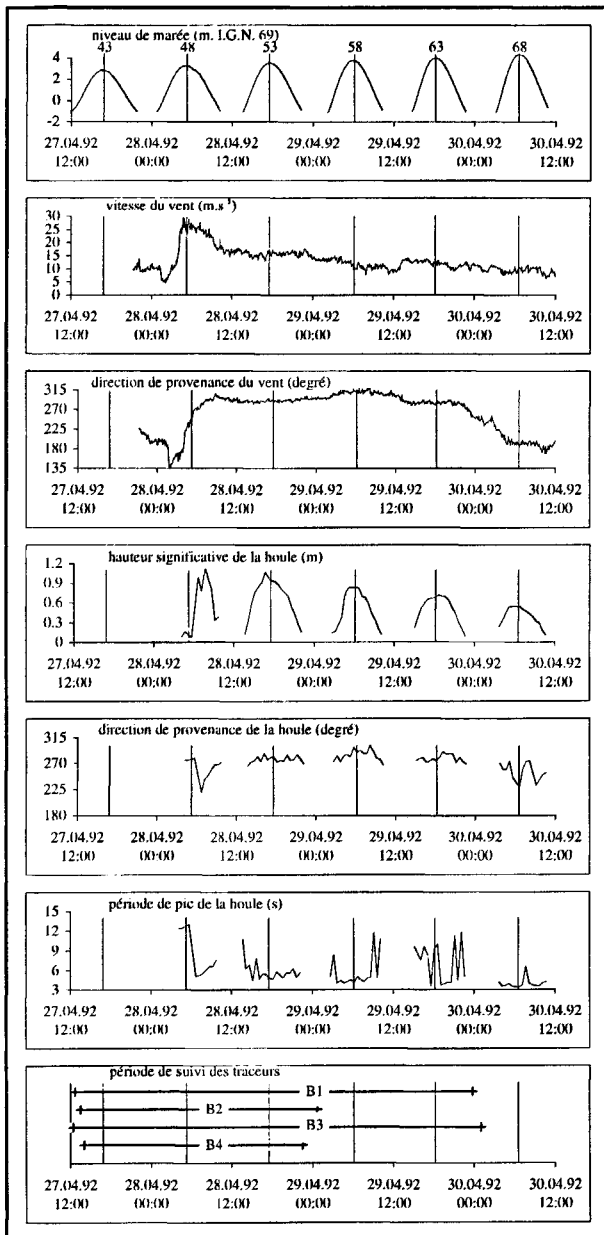


Figure 14

Caractéristiques du vent, mesurées à Agon-Coutainville, des marées et de l'agitation, mesurées au point B1, et périodes de quantification des transports solides durant la deuxième campagne de terrain.

Wind, measured at Agon-Coutainville; tidal and wave, measured at point B1; characteristics and sediment transport rate quantification periods during the second campaign.

Au point B2, situé au Nord de l'entrée du havre sur la moyenne plage, les transports résiduels sont de l'ordre de $3 \text{ kg.m}^{-1}.\text{min}^{-1}$ (Tableau 1, Fig. 15). Le transport est parallèle à l'orientation du trait de côte, avec une composante dominante vers le Sud et l'autre, secondaire, dirigée vers le Nord.

La granulométrie des matériaux voisins exclut la possibilité de mouvements sédimentaires à pleine mer sous l'influence des courants moyens (Fig. 17 et 18). Par contre, en début d'expérience, les houles d'Ouest de longue période induisent dans le déferlement, en début et fin d'immersion du point considéré, des courants moyens d'obliquité

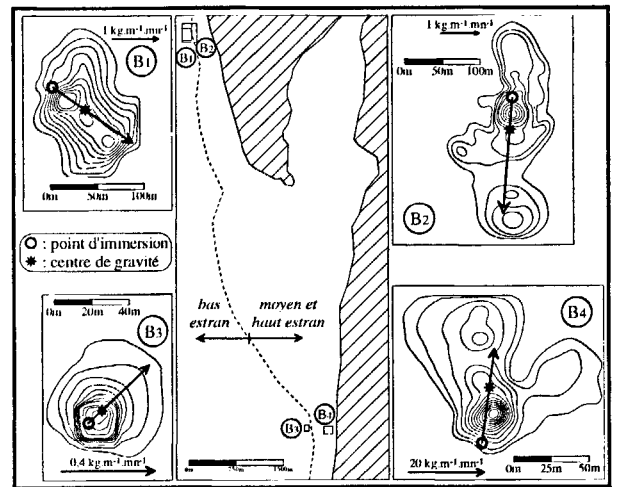


Figure 15

Dispersion du traceur fluorescent et transports sédimentaires mesurés durant la deuxième campagne.

Fluorescent tracer dispersion and sediment transport measured during the second campaign.

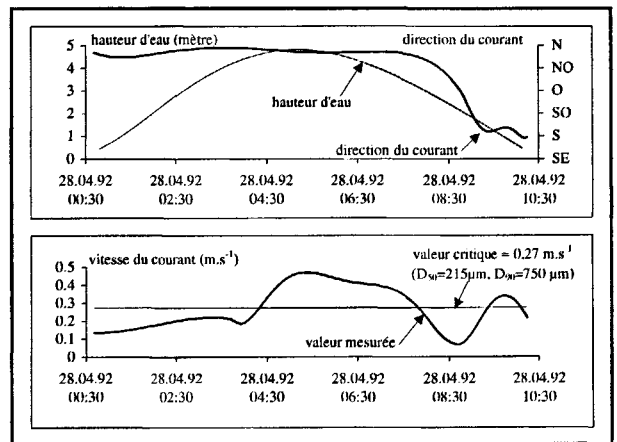


Figure 16

Profondeur d'eau et caractéristiques des courants moyens à 44 cm du fond mesurées au point B1.

Water depth and mean current characteristics 44 cm above the bed measured at point B1.

orientés vers le Sud (Fig. 17) responsables du déplacement du centre de gravité observé. Ces conditions se retrouveront en fin d'expérience, après la tempête. Au moment du coup de vent dépassant les 100 km.h^{-1} , à pleine mer vers 5 h le 28 avril, l'agitation de courte période, provient du SO, comme les vents. Les courants moyens, au préalable incompétents, atteignent alors $0,8 \text{ m.s}^{-1}$ et sont orientés au Nord (Fig. 18). Le seuil critique de mise en mouvement des sédiments est alors largement dépassé, expliquant la composante secondaire vers le Nord du transit sédimentaire.

Au point B3, les transports plus faibles, voisins de $0,4 \text{ kg.m}^{-1}.\text{min}^{-1}$, s'effectuent vers le NE (Fig. 15, Tableau 1). Les courants de pleine mer sont en général incompétents. Lors du coup de vent du 28 avril, la vitesse moyenne,

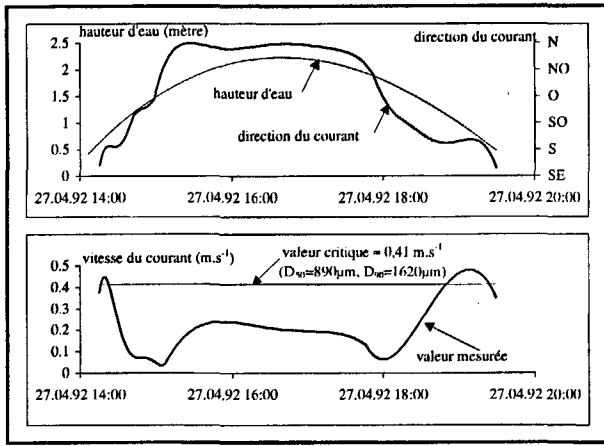


Figure 17

Profondeur d'eau et caractéristiques des courants moyens à 40 cm du fond mesurées au point B2 durant la première marée.

Water depth and mean current characteristics 40 cm above the bed measured at point B2 during the first tide.

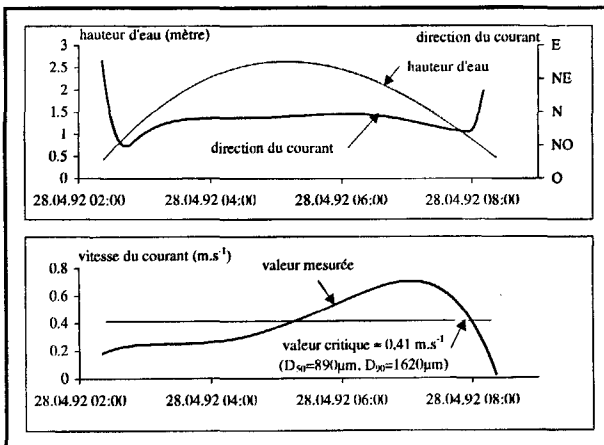


Figure 18

Profondeur d'eau et caractéristiques des courants moyens à 41 cm du fond mesurées au point B2 durant la deuxième marée.

Water depth and mean current characteristics 41 cm above the bed measured at point B2 during the second tide.

très bruitée, dépasse parfois la valeur critique de mise en mouvement des sédiments sous l'effet des courants orbitaux (Fig. 19). Sa direction, N-NNE, est voisine de la dispersion observée des traceurs. Le 28 avril au soir, une brève phase de transport peut également être mise en évidence en fin de marée. Les courants compétents portent alors entre l'OSO et le SO, dans une direction diamétralement opposée au sens de déplacement résiduel du traceur. Les courants de vidange du havre, renforcés par les fortes précipitations tombées les heures précédentes sur le bassin-versant de la Seine qui draine le havre de Regnéville, sont à l'origine de l'étalement de la tache fluorescente sur une vingtaine de mètres vers le SO, au-delà du point d'immersion. Enfin, les vitesses observées en début de cinquième cycle, atteignent tout juste le seuil de mobilité des sédiments. Orientées vers le N-NE, ces vitesses peuvent contribuer au déplacement

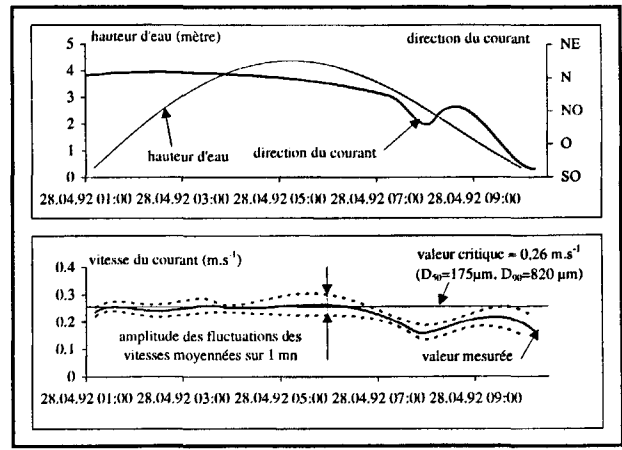


Figure 19

Profondeur d'eau et caractéristiques des courants moyens à 35 cm du fond mesurées au point B3.

Water depth and mean current characteristics 35 cm above the bed measured at point B3.

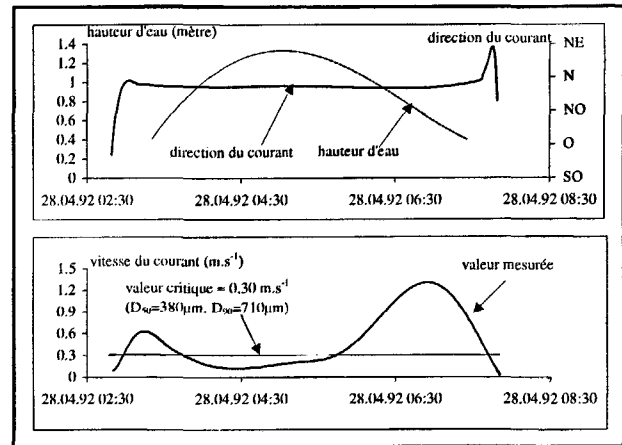


Figure 20

Profondeur d'eau et caractéristiques des courants moyens à 40 cm du fond mesurées au point B4.

Water depth and mean current characteristics 40 cm above the bed measured at point B4.

résiduel du traceur dans la même direction. Les conditions d'agitations redevenues clémentes, ces vitesses sont sans doute la conséquence d'un renforcement des courants de remplissage du havre, observé en phase de revif, associé aux houles longues résiduelles de fin de tempête, au début du cycle de marée.

Au point B4, les débits solides, particulièrement intenses, dépassent $25 \text{ kg.m}^{-1}.\text{min}^{-1}$, avec un net déplacement du centre de gravité du nuage vers le Nord (Fig. 15). Les courants de marée de pleine mer y sont incompétents (Fig. 20), ce qui confirme l'inefficacité des courants en morte-eau. Comme pour le point B2, le seuil de remise en suspension des sédiments n'est dépassé par les courants moyens qu'en début et fin d'immersion, lorsque la profondeur d'eau sur le point est faible (Fig. 20). La compétence de ces courants, portant au Nord, est cependant

assurée durant plus de trois heures. La forte intensité des débits solides s'explique par les houles déferlantes qui induisent des courants moyens dont la vitesse dépasse 1 m.s^{-1} .

L'opposition entre les directions de transport sur les moyennes plages de part et d'autre de l'entrée du havre est le reflet de la modification de l'angle d'approche des houles à la côte sous l'influence de la réfraction sur des structures sédimentaires en éventail (Komar, 1996), telles que les deltas de jusant des havres de la côte ouest du Cotentin.

CONCLUSION

La quantification des transports sédimentaires par l'approche lagrangienne de la méthode des traceurs fluorescents a pu être adaptée aux estrans macrotidaux et améliorée pour tenir compte en particulier de l'hétérogénéité du stock sédimentaire. L'émersion de la zone de transport durant une partie du cycle de marée permet à un nombre réduit de manipulateurs de réaliser un échantillonnage spatial efficace. Cette technique,

combinée à des mesures hydrodynamiques, se révèle être un outil utile pour déterminer la direction principale des transports et obtenir un ordre de grandeur des volumes mobilisés. Elle fournit une valeur des transports sableux sur les plages intégrée sur quelques cycles de marée pour différents domaines morphosédimentaires. Elle se présente donc comme une méthode intermédiaire entre les techniques qui, par mesure optique ou acoustique des concentrations et des vitesses de sédiments, fournissent des données ponctuelles dans le temps et l'espace et les autres méthodes de traçage, magnétique ou radioactif, qui permettent des suivis sur plusieurs mois.

Appliquée à la côte ouest du Cotentin, l'utilisation des traceurs fluorescents met en lumière l'importante variabilité spatio-temporelle des mouvements sédimentaires sur les plages macrotidales, notamment à proximité d'embouchures. Au cours d'un cycle tidal, les périodes de mise en mouvement des sédiments sableux s'avèrent très diversifiées et globalement assez courtes. Elles varient en fonction des conjonctions entre les caractéristiques marégraphiques, l'agitation et éventuellement l'influence des crues dans les embouchures.

RÉFÉRENCES

- Corbau C., H. Howa, B. Tessier, A. De Resseguier, H. Chamley** (1994). Evaluation du transport sédimentaire sur une plage macrotidale par traçage fluorescent, Dunkerque Est, France. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 319, série II, 1503-1509.
- Crowson R.A., W.A. Birkemeier, H.M. Klein, H.C. Miller** (1988). Superduck nearshore processes experiment: summary of studies CERC field research facility. Technical report CERC-88-12, 116 p.
- Duane D.B., W.R. James** (1980). Littoral transport in the surf zone elucidated by an Eulerian sediment tracer experiment. *J. sedim. Petrol.* **50**, 3, 929-942.
- Horikawa K.** (1988). *Nearshore dynamics and coastal processes. Theory, measurement, and predictive models.* University of Tokyo Press, Tokyo, 515 p.
- Horn D.P.** (1993). Sediment dynamics on a macrotidal beach: Isle of Man, U.K. *J. Coast. Res.* **9**, 1, 189-208.
- Ingle J.** (1966). The movement of beach sand. *Development in sedimentology*, 5, Elsevier Publishing Company, New York, 221 p.
- Komar P.D., D.L. Inman** (1970). Longshore transport on beaches. *J. Geophys. Res.* **75**, 30, 5914-5927.
- Komar P.D.** (1996). Tidal-inlet processes and morphology related to the transport of sediment. *J. Coast. Res.* Special Issue **23**, 23-45.
- Laboratoire Central d'Hydraulique de France** (1978). Contribution à l'étude des mouvements de sable sur les plages situées à l'Est de Zeebrugge à l'aide de traceurs fluorescents. 29 p et annexes.
- Levoy F.** (1994). Evolution et fonctionnement hydrosédimentaire des plages macrotidales - L'exemple de la côte ouest du Cotentin. Thèse de l'Université de Caen, 424 p et annexes.
- Madsen O.S.** (1989). Transport determination by tracers. A. Tracer theory. In: *Nearshore sediment transport*, R.J. Seymour éd. Plenum Press, New York, 103-114.
- Van Rijn L.C.** (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas.* Aqua Publications, Amsterdam, 673 p.
- White T.E., D.L. Inman** (1989a). Transport determination by tracers. B. Application of tracer theory to NSTS experiments. In: *Nearshore sediment transport*, R.J. Seymour éd. Plenum Press, New York, 115-128.
- White T.E., D.L. Inman** (1989b). Measuring longshore transport with tracers. In: *Nearshore sediment transport*, R.J. Seymour éd. Plenum Press, New York, 287-312.
- Wright L.D., P. Nielsen, A.D. Short, M.O. Green** (1982). Morphodynamics of a macrotidal beach. *Mar. Geol.* **50**, 97-128.
- Zenkovitch V.P.** (1960). Fluorescent substances as tracers for studying the movement of sand on the sea bed; experiments conducted in the U.S.S.R. *Dock and Harbour Authority* **40**, 280-283.