



Approche bidimensionnelle des transports sédimentaires à partir des variations granulométriques des sédiments superficiels : Exemple de la partie occidentale de la baie du Mont Saint-Michel

A. Ehrhold^a, J.P. Auffret^a
^a Laboratoire de Géologie Marine, Université de CAEN

Abstract

Grain size trends in relation to net sediment transport pathways are examined, using some commonly-used grain size parameters. The results of the model are compared with the net sediment transport pathways established on the basis of the bedform asymmetry. The 3 types of trends are calculated using an increasing characteristic distance and different grids of seabed sediment samples. It is shown that : (1) the characteristic distance defined by Gao et Collins (maximum spatial sampling interval) changes with these two factors to a maximal value; (2) in an heterogeneous sedimentary environment, the correlations between calculated vectors and observed transport pathways are better by using sand size distributions and (3) the residual pattern rises to sixty percent of correlation with the bedforms asymmetry.

1. Introduction

La détermination par des critères granulométriques de la direction et du sens des transits sédimentaires reste encore basée sur l'observation de gradients granulométriques. L'utilisation de ces gradients (Bourcart et Boillot, 1960), des indices ponctuels ou globaux (Galichon, 1984) et des courbes granulométriques (Middleton, 1976) a longtemps été le meilleur moyen d'appréhender les mouvements sédimentaires responsables de la zonéographie des faciès et de caractériser les environnements de dépôt. Ces méthodes donnent une représentation statique du sédiment alors que ses caractéristiques sont héritées de processus dynamiques. Pour connaître par la mesure, les directions et les sens de transport sédimentaire en domaine subtidal, il faut déployer une instrumentation lourde et coûteuse (sonar à balayage latéral, traceurs fluorescents ou radioactifs).

La diversité des structures sédimentaires observées en imagerie acoustique sur le plateau continentale (Kenyon, 1970) témoigne de la complexité des processus de transport sédimentaire rencontrés par faible profondeur. Récemment de nombreuses études (McLaren et Bowles, 1985; Lanckneus, 1992; Gao et al., 1994; Ehrhold, 1994) ont utilisé un modèle de transport sédimentaire semi-quantitatif dont les principes émis par McLaren (1981) reposent sur la comparaison entre échantillons de trois paramètres sédimentologiques les plus usuels ; la moyenne, l'indice d'asymétrie ("Sorting") et l'indice de dispersion ("Skewness"). L'originalité réside dans l'utilisation simultanée de ces trois paramètres statistiques dans la procédure de traitement analytique des données pour mettre en évidence les filiations entre les échantillons prélevés selon une maille à pas régulier, et les exprimer ensuite sous la forme de vecteurs de transport sédimentaire.

Nous nous proposons dans cet article d'utiliser cette méthode (Gao et Collins, 1992), pour étudier les transports résiduels des sables coquilliers, en traction sur le fond dans la partie occidentale de la baie du Mont Saint-Michel (fig.1).

2. Méthodologie

2.1 Principe de la méthode

D'abord intuitive (McLaren, 1981), puis fondée sur des observations empiriques (McLaren et Bowles, 1985), la méthode proposée par ces auteurs est basée sur la comparaison de 3 paramètres statistiques entre deux prélèvements. Par comparaison de n paramètres, $2n$ cas possibles peuvent apparaître. Avec les paramètres moyenne (μ), classement (σ) et asymétrie (S_k), le nombre de cas est de sites pris en compte pour le calcul sur un point.

Or les différentes applications en nature ont mené les deux auteurs à ne considérer comme significatif d'un transport sédimentaire deux cas possibles (cas III-1 et III-2) qui correspondent respectivement à une fonction de haute et de basse énergie. Pour chacun des deux cas, le tri s'améliore dans la direction du transport. Le cas III-1 signifie que le dépôt résultant du transport est plus grossier, mieux classé et d'asymétrie plus positive. Le cas III-2 correspond à un dépôt plus fin, mieux trié et d'asymétrie plus négative. Une combinaison de ces cas peut donner de nouvelles possibilités. L'association du cas III-1 avec le cas III-2 a été utilisée avec succès (Gao et al., 1994) dans l'étude du banc de Kwinte en mer du Nord.

Gao et Collins (1991,1992), sur le même principe de base ont transformé le caractère uni-dimensionnel (étude en ligne) de la méthode de Mc Laren en caractère bi-dimensionnel. Pour ne conserver que les cas significatifs d'un transport réel, ils pratiquent une technique semi-quantitative de filtrage du bruit de fond, dont la procédure analytique est décrite ci-dessous.

2.2 Procédure analytique : Gao et Collins (1991)

Premièrement, les paramètres d'un échantillon sont comparés avec ceux des sites environnants tels que la distance entre les deux points soit inférieure ou égale à une Distance Critique d'échantillonnage (D_{cr}) qui correspond à la distance maximum séparant deux points adjacents. Un vecteur de grandeur unitaire ou vecteur de tendance $\vec{r}(x,y)$ est dessiné à chaque fois que l'un des 3 cas choisis (III-1, III-2 ou III-1/III-2) est observé entre 2 points.

Deuxièmement, si un point d'échantillonnage génère plusieurs vecteurs, une sommation finale est faite de manière à obtenir un vecteur unique résultant tel que :

$$\vec{R}(x,y) = \sum_1^n \vec{r}(x,y) \quad (1)$$

Enfin, une opération de filtrage est appliquée pour réduire une nouvelle fois le bruit causé par les vecteurs dont les directions sont éloignées de la direction générale du modèle. Les vecteurs sommation de chaque point sont additionnés au vecteur des points voisins situés toujours à une distance comprise dans D_{cr} . Les vecteurs de transport ainsi définies, s'écrivent :

$$\vec{R}_{av}(x,y) = \frac{1}{k+1} \left[\vec{R}(x,y) + \sum_1^k \vec{R}_j \right] \quad (2)$$

\vec{R}_j est le vecteur sommation obtenu sur la base de l'équation (1) et k le nombre total de sites pris en compte pour le calcul sur un point.

2.3 Évaluation du modèle

Pour valider les résultats calculés à l'aide du modèle présenté dans le paragraphe précédent, nous avons comparé les directions des vecteurs calculés avec celles

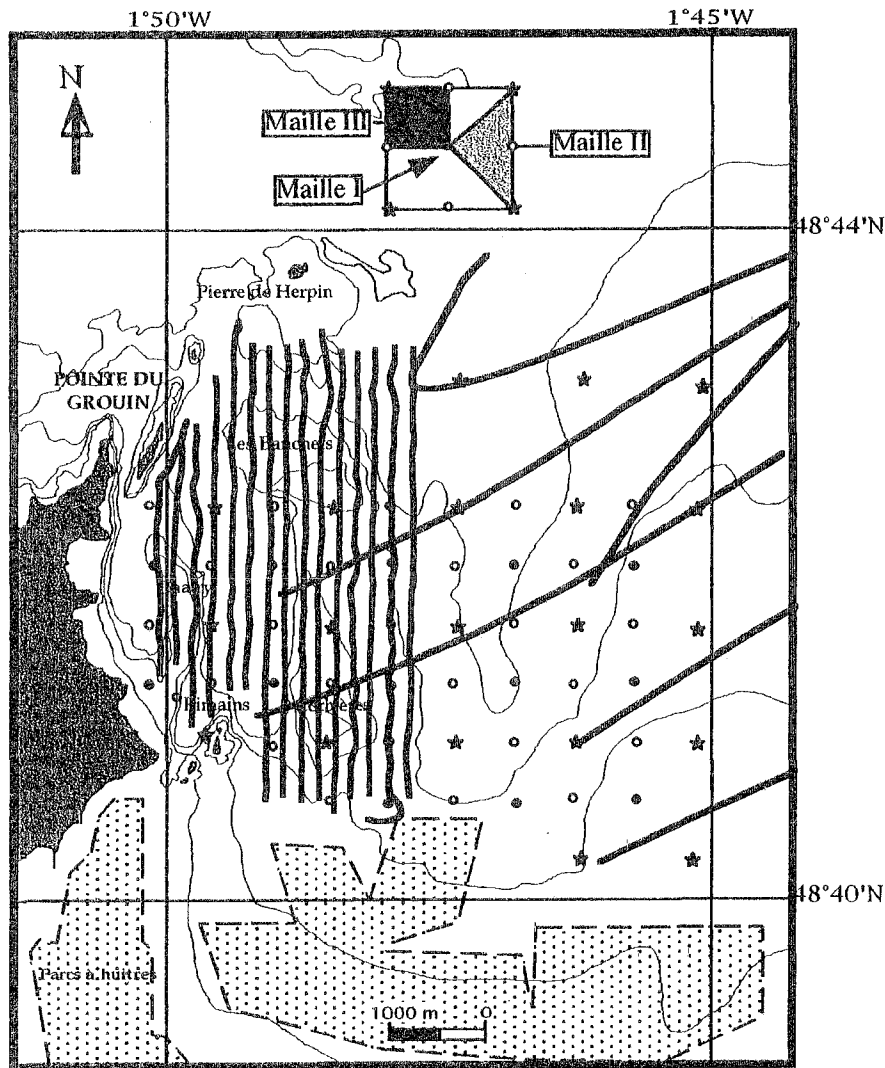


Fig. 1 : Morphologie du fond marin du secteur d'étude et position des données sédimentologiques (●) et sonares (—)

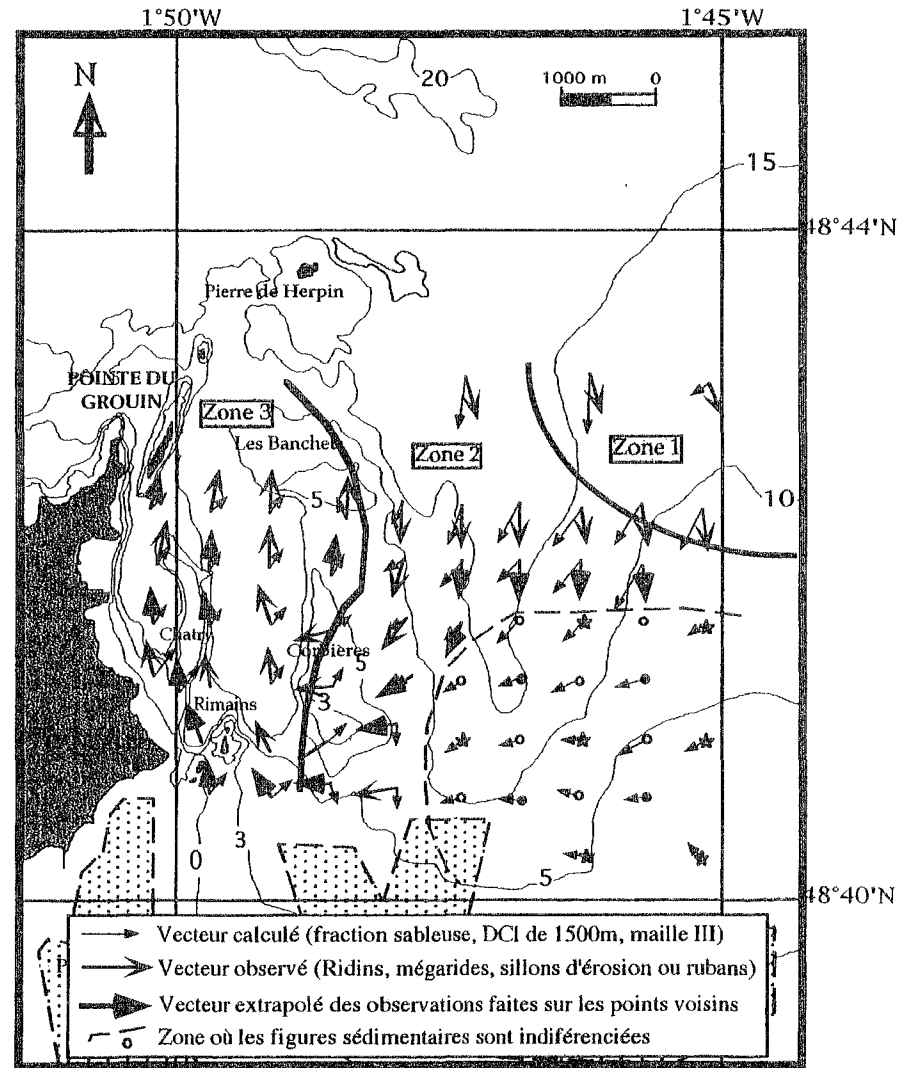


Fig. 2 : Comparaison entre les vecteurs de transport résiduel calculés par le modèle pour le cas III-2 et ceux résultant de l'analyse acoustique des fonds.

déduites des structures sédimentaires modelant le fond et observées au sonar latéral (fig. 2). Lorsque l'angle entre les deux directions est inférieur à 30° , nous avons considéré que la direction calculée était cohérente à la direction et au sens de transport observés. Nous avons effectué le comptage sur les trois quarts des points d'échantillonnage et pour chacun des 3 cas étudiés (III-1, III-2, III-1/III-2). Nous avons fait évoluer 2 facteurs :

- la Distance de Calcul (DCI) à partir d'un point de prélèvement. La Distance Critique d'échantillonnage (DCr) utilisée jusqu'à maintenant par les différents auteurs ne correspond qu'à la maille d'échantillonnage arbitraire dont ils ont disposé. Nous avons cherché à définir le poids de ce facteur dans la fiabilité du résultat obtenu. En augmentant DCI, les filiations inter-granulaires se renforcent-elles où s'estompent-elles ?

- le Nombre d'échantillons (NBe) sous la forme de 3 mailles. Le calcul des vecteurs de transport a été effectué selon ces 3 mailles de forme carrée (Fig. 1 et Tab. 2). Une partie des prélèvements n'a pas été prise en compte du fait de la difficulté à déterminer une direction et surtout un sens de transport dans la partie SE de la grille. Gao et Collins (1992) ont montré que la distance d'échantillonnage était un facteur primordial dans l'analyse, la maille de prélèvements devant être déterminée par l'échelle des structures hydro-sédimentaires.

Enfin la couverture sédimentaire superficielle dans cette partie occidentale de la Baie du Mont Saint-Michel est très hétérogène. Les limites de cette technique dans ce type d'environnement variable sur de courtes distances avaient été suggérées par Gao et Collins (1992). Aussi, en isolant la fraction sédimentaire mobile (fraction sableuse et argileuse) de la fraction résiduelle de l'échantillon (fraction graveleuse), nous avons cherché à diminuer le bruit de fond introduit par les particules ne participant pas directement au transport sédimentaire actuel.

3. Application

3.1 Caractéristiques hydrodynamiques du secteur d'étude

Les conditions tidales en baie du Mont Saint-Michel sont extrêmes (marnage exceptionnel voisin de 15 m en grandes vives eaux) et la force des courants de marée est responsable du modelé du fond sous-marin. Les courants de marée orientés NW/SE au nord de la pointe du Grouin ont une vitesse supérieure à 1 m/s au moment du flot (pour un coef. 72), les vitesses correspondante de jusant atteignant 0,75 m/s. En baie de Cancale, les courants de marée deviennent giratoires à rotation anti-horaire et les vitesses enregistrées ne dépassent pas 0,6 m/s en vives eaux moyennes. Les expériences de lâché de flotteurs montrent un déplacement résiduel des masses d'eau de 1 à 3 km vers l'ouest au cours d'un cycle de marée (Nikodic, 1981). La Pointe du Grouin se prolonge vers le nord-est par un relief sous-marin imposant. Il génère un important tourbillon résiduel latéral (Orbi, 1986) à l'est de la pointe, qui entraîne une séparation des lignes de courants entre flot et jusant. Les vitesses résiduelles calculées sont de l'ordre de 4 km/jour en direction de Cancale, et se rapprochent des observations faites sur le terrain (Nikodic, 1981).

3.2 Plan d'échantillonnage

Au printemps 1995, 61 échantillons ont été prélevés à l'aide d'une benne, dans une grille à pas régulier et à maille carrée (fig. 1). L'épaisseur d'échantillonnage varie entre 5 et 10 cm en fonction de la nature lithologique du dépôt. L'analyse granulométrique a été réalisée sur la totalité du sédiment recueilli, non décarbonaté, à travers une colonne de tamis à maille de progression $\sqrt{2}$. La moyenne (μ), le

classement (σ) et l'asymétrie (S_k) ont été calculés en unité phi par la méthode des moments statistiques (Rivière, 1977).

Les profils au sonar latéral sont espacés de 250 m avec une acquisition latérale de 150 m.

3.3 Étude des structures sédimentaires

Le prisme sédimentaire entre la Pointe de Champeaux à l'est et Cancale à l'ouest est continu (Auffret in Larsonneur, 1989). Le modelé de la couverture sédimentaire s'estompe progressivement vers le sud en relation avec l'intensité des courants de marée. À l'est de la Pointe du Grouin, s'appuyant sur la roche, s'édifie un champ très localisé de grandes dunes hydrauliques sableuses rectilignes (les Banchets), d'amplitude et de longueur d'onde modestes (amplitude moyenne de l'ordre de 4 m). L'asymétrie des structures rencontrées indique la direction du courant dominant. La partie est est construite par les courants de flot et la frange ouest, par les courants de jusant. Ce champ prolonge vers le nord le banc de Corbières de petite taille mais fortement asymétrique vers l'ouest. Son flanc long est parcouru par des petites dunes hydrauliques (mégarides) à vergence ouest.

En résumé, 3 zones se différencient (fig. 2) :

- Zone I : les points situés le plus à l'ouest traduisent une dynamique en direction du sud-est. Il s'agit de rubans sableux et coquilliers de type B (Kenyon, 1970), peu épais, de largeur variant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres. Ils sont constitués de débris bioclastiques bien classés sur un substrat grossier graveleux. Ils échappent au phénomène de tourbillon généré par la Pointe du Grouin. L'origine de ces rubans dépasse le cadre géographique de cette étude puisqu'ils proviennent pour certains du domaine marin profond entre la pointe du Grouin et l'Archipel des îles Chausey.

- Zone II : La partie est du champ des Banchets et le flanc long du banc de Corbières sont dominés par les courants de flot. Les sédiments remontent la bordure ouest du chenal en direction de la crête du banc. Les variations des directions de crêtes des structures secondaires modelant le banc sont semblables à celles observées en Mer du nord (Caston, 1972). D'abord perpendiculaires au pied du banc, les crêtes des mégarides deviennent parallèles au sommet de celui-ci avec une polarité toujours orientée vers l'ouest. Cette convergence des apports vers le sommet de la structure participe à la stabilisation du corps sédimentaire en équilibre avec les conditions hydrodynamiques actuelles.

- Zone III : le chenal côtier, partant de l'île des Rimains, le cordon du Chatry et la partie ouest du champ des Banchets, sont soumis à l'action prépondérante du jusant. Dans ce couloir côtier, la pointe des sillons graveleux incisant la couverture sablo-vaseuse indique un transport orienté vers le nord.

4. Les vecteurs de transport déduits du modèle d'évolution granulométrique

Pour chacun des 3 cas étudiés (III-1, III-2, III-1/III-2), la différence d'angle entre le vecteur calculé par la méthode (équ. 2) et le vecteur observé au sonar a été comparée. Ainsi la figure 3 illustre en pourcentage, le nombre de vecteurs respectant cette condition. Pour tous les diagrammes, nous avons fait varier en abscisse la distance de calcul (DCI) et en ordonnées le type de maille, c'est à dire le nombre d'échantillons.

Les résultats sont améliorés de 20 à 30 % en ne considérant que la fraction sableuse (fig. 3.2) par rapport à la composition totale du prélèvement (fig. 3.1). Les valeurs de DCI maximales pour lesquelles le modèle reflète le mieux la vérité de terrain sont

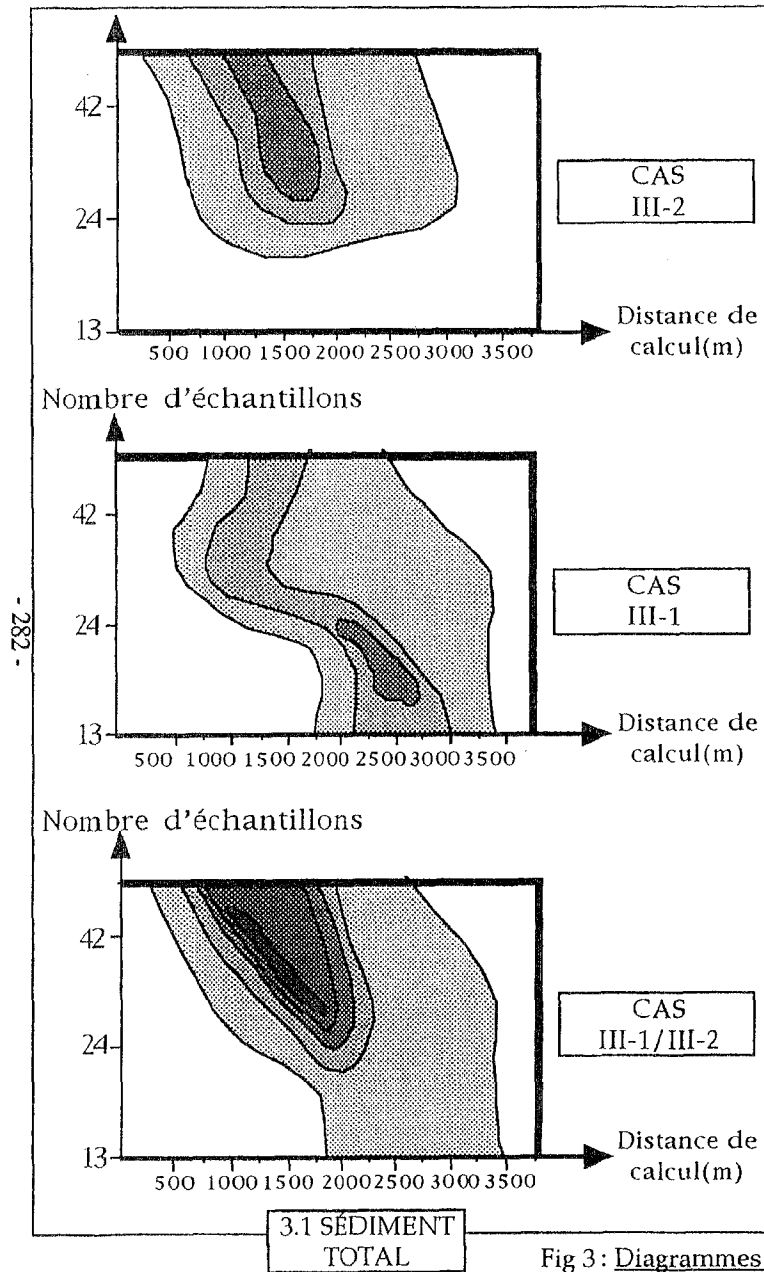
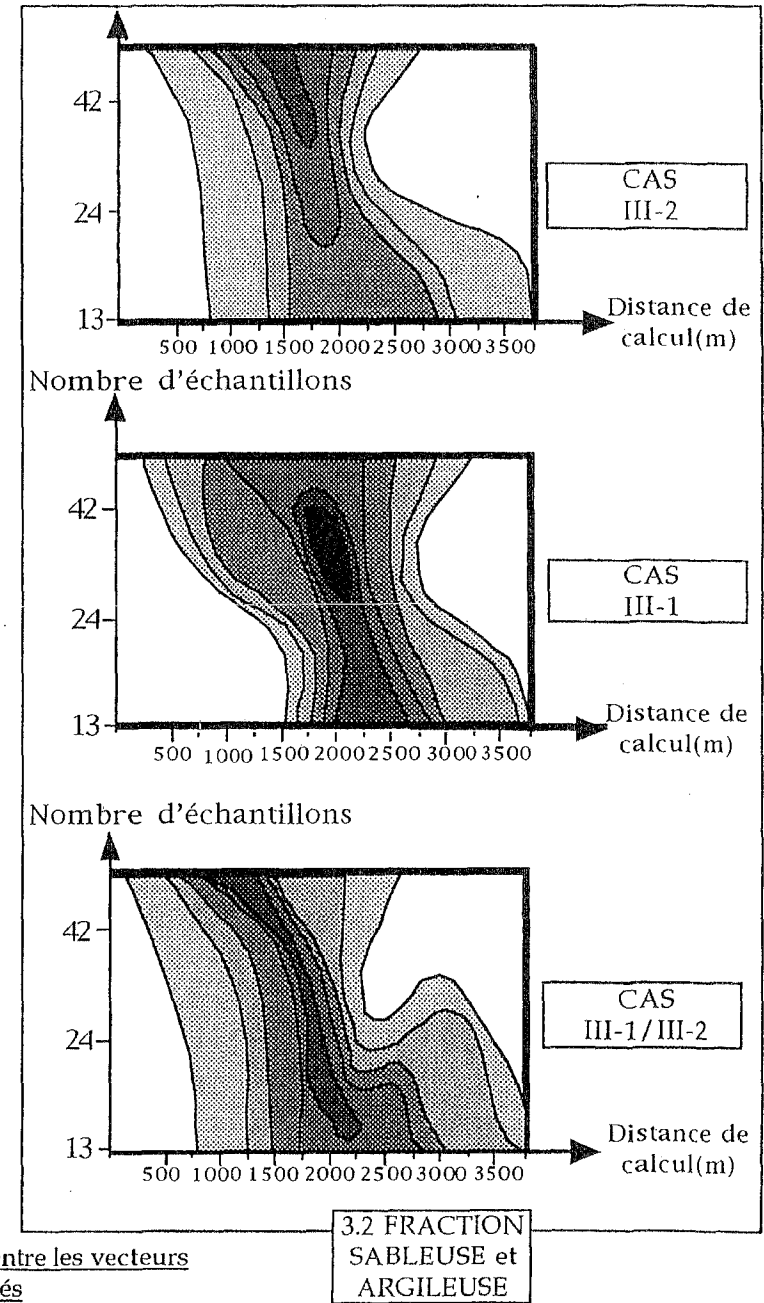


Fig 3 : Diagrammes des fréquences de corrélation entre les vecteurs calculés et les vecteurs observés



supérieures de 9 à 49% à celle de DCr (tab. 3). En d'autres termes, il existe donc une valeur limite de calcul qui est indépendante du nombre d'échantillons et de la distance maximale séparant deux points voisins. Cette valeur limite diminue lorsque le nombre d'échantillons augmente (Tab. 3). D'une manière générale, on atteint plus rapidement des taux importants de corrélation pour la troisième maille qui comprend 42 échantillons. Néanmoins l'augmentation du nombre de prélèvements n'est pas toujours significative pour l'amélioration de la qualité du modèle, ceci est d'autant plus vrai pour les cas traités avec la fraction sableuse (fig. 3.2).

En ce qui concerne le cas combiné III-1/III-2, nous observons comme Gao (1994) une meilleure définition de la part du modèle, surtout lorsque l'on travaille sur la composition totale du prélèvement. Cette amélioration n'est plus aussi sensible dans l'étude de la fraction sableuse et argileuse où les résultats pour les trois cas sont très proches.

5. Conclusion

L'ouest de la baie du Mont Saint-Michel est le siège d'une dynamique sédimentaire active. L'utilisation combinée des paramètres statistiques les plus couramment utilisés (moyenne, indice d'asymétrie et indice de dispersion) à travers une procédure vectorielle donne des résultats satisfaisants, s'approchant de la qualité des informations fournies par le sonar à balayage latéral. Dans ce milieu où les faciès sont très hétérogènes, la Distance Critique d'échantillonnage telle qu'elle a été définie par les auteurs (Gao et Collins, 1991 et 1992), n'a pas de rôle significatif. Les résultats sont meilleurs lorsque l'on s'attache à ne travailler que sur le cas combiné III-1/III-2 ou sur les cas concernant la fraction sableuse. Il semble donc que le bruit de fond modifiant l'allure générale des directions résiduelles diminue en resserrant la fenêtre granulométrique aux classes participant aux transports. Dans le meilleur des cas, nous obtenons 60 % de corrélation (fig. 2) entre les vecteurs calculés et observés. Plusieurs facteurs influencent le résultat final tels que l'effet de bordure ou la régularité de la maille. Dans le premier cas, certains auteurs préconisent de faire abstraction des points situés en bordure de la maille, puisqu'ils ne peuvent être comparés dans toutes les directions. Dans le second cas, l'irrégularité de la maille et sa disposition sur le secteur étudié (Lanckneus, 1992) joue sur la méthode de sommation vectorielle. Enfin, la maîtrise de l'échelle de temps pour ce type d'environnement est délicate, et ne peut s'obtenir qu'avec l'aide de méthodes complémentaires. Cette nouvelle technique suscite un grand intérêt par son accessibilité et son utilisation peu coûteuse. Ces premiers résultats sur un petit secteur complexe de la baie du Mont Saint-Michel, permettent d'envisager une étude plus globale des déplacements sédimentaires à l'échelle de toute la baie.

Les auteurs tiennent à remercier les équipages des navires océanographiques de l'I.N.S.U. pour leur collaboration à la récolte des échantillons, la section Sédimentologique dirigée par Mr. T. Garlan de l'E.P.S.H.O.M. à Brest pour son soutien technique et Mr. R. Pedreros du C.R.E.S.O. pour les modifications apportées au logiciel de traitement des données.

Références

- Bourcart, J., et Boillot, G., 1960. La répartition des sédiments dans la baie du Mont saint-Michel. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, (2), vol. III, fasc. 4 : 189-199.
- Caston, V.N.D., 1972. Linear sand banks in the southern North Sea. *Sedimentology*, 18 : 63-78.

- Ehrhold A., 1993. Cartographie et dynamique des sédiments meubles de la baie de Seine Occidentale, mém. DEA, Univ. Lille I, 92 p.
- Galichon, P., 1984. Hydrodynamique sédimentaire des flèches littorales sableuses : cas de la Pointe D'Arcay. Thèse, Univ. Orsay, 213 p.
- Gao, S. and Collins, M., 1992. Net sediments transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors". *Sedimentary Geology*, 80 : 47-60.
- Gao, S., Collins, M.B., Lanckneus, J., De Moor, G. and Van Lancker, V., 1994. Grain size trends associated with net sediment transport patterns : An example from the Belgian continental shelf. *Marine Geology*, 121: 171-185.
- Kenyon N.H., 1970. Sand ribbons of european tidal seas. *Marine geology*, 9 : 25-39.
- Lanckneus J., 1992. Residual sediment transport directions on a tidal sand bank (Kwinte Bank), *Bulletin de la Société belge de Géologie*, vol. 2, p. 425-446.
- Larsonneur, C., 1989. La Baie du Mont Saint-Michel, un modèle de sédimentation en zone tempérée. *Bull. Inst. Géol. Bassin Aquitaine*, 46 : 5-74
- McLaren, P., 1981. An interpretation of trends in grain size measures. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51(2) : 611-624.
- McLaren, P. and Bowles, D., 1985. The effects of sediment transport on grain-size distributions. *Journal of Sedimentary Petrology*, 55(4) : 457-470.
- Middleton, G.V., 1976. Hydraulic interpretation of sand size distributions. *Journal of Geology*, 84 : 405-426.
- Nikodic, J. 1981. Dynamique sédimentaire dans la partie occidentale de la baie du Mont Saint-Michel. Thèse, Univ. Nantes.
- Orbi, A., 1986. Circulation de marée dans le Golfe Normand-Breton. Thèse, Université de Bretagne Occidentale, 163 p.
- Rivière A. 1977. Méthodes granulométriques, techniques et interprétation. Masson ed.

Cas	Définition	Maille	DCr	DCl(m)	Nb de prél.
III-1	$\mu_1 \geq \mu_2, \sigma_1 \geq \sigma_2$ et $S_{k1} \leq S_{k2}$	I	1900	1500 à 3500	13
III-2	$\mu_1 \leq \mu_2, \sigma_1 \geq \sigma_2$ et $S_{k1} \geq S_{k2}$	II	900	1000 à 3000	24
III-3	$\mu_1 \geq \mu_2, \sigma_1 \geq \sigma_2$ et $S_{k1} \geq S_{k2}$	III	900	750 à 2000	42
III-4	$\mu_1 \leq \mu_2, \sigma_1 \geq \sigma_2$ et $S_{k1} \leq S_{k2}$				
III-5	$\mu_1 \geq \mu_2, \sigma_1 \leq \sigma_2$ et $S_{k1} \leq S_{k2}$				
III-6	$\mu_1 \leq \mu_2, \sigma_1 \leq \sigma_2$ et $S_{k1} \geq S_{k2}$				
III-7	$\mu_1 \geq \mu_2, \sigma_1 \leq \sigma_2$ et $S_{k1} \geq S_{k2}$				
III-8	$\mu_1 \leq \mu_2, \sigma_1 \leq \sigma_2$ et $S_{k1} \leq S_{k2}$				

Tableau 1

Différentes cas obtenus par comparaison entre deux points, en utilisant la combinaison de trois paramètres statistiques (la moyenne (μ), le classement (σ) et l'asymétrie (S_k)) groupe III (unité phi).

Tableau 2

Différents types de mailles (fig. 1) testées pour le calcul des vecteurs de transport.

Maille	DCr	valeur moyenne de DCI max
I	1900	2080 m
II	900	1830 m
III	900	1500 m

Tableau 3

Différentes valeurs de DCI pour les 3 mailles utilisées et pour lesquelles le modèle donne les meilleurs résultats.