

2

COURANTOLOGIE CALCULEE EN BAIE DE SEINE.

SALOMON J.C.*

1. Introduction

Le mouvement des particules d'eau, dans l'océan ou dans les mers littorales, peut être considéré comme résultant de la superposition de composantes élémentaires qui correspondent chacune à des mécanismes dynamiques distincts. Parmi celles-ci, la marée est un élément important.

En Baie de Seine, et plus généralement dans la Manche, les courants de marée, de l'ordre de 2 noeuds, constituent le signal dominant.

Malheureusement, les équations de l'hydrodynamique montrent que ces mouvements élémentaires sont couplés entre eux plus fortement en zone côtière que dans l'océan profond. Cette caractéristique est due à l'intensité des courants, à leurs gradients spatiaux, ainsi qu'à l'amplitude des dénivellations parfois comparable à la hauteur d'eau totale. Ceci complique fortement l'analyse des phénomènes : dans un tel secteur on ne peut étudier de processus dynamique sans le relier à la marée.

Mais la marée n'est pas seulement le phénomène alternatif, de moyenne nulle, qu'elle paraît être de prime abord. Elle induit elle-même une courantologie à long terme que l'on dénomme résiduelle de marée. Elle est généralement très faible par rapport au courant instantané, et donc difficile à mesurer par les moyens classiques peu adaptés à cet objectif. Elle est pourtant d'un très grand intérêt pour qui s'intéresse au déplacement des masses d'eau et de leur contenu en substances dissoutes polluantes ou non, aux organismes vivants, ainsi qu'à certains aspects de la sédimentologie.

On aura recours ici, à la technique du modèle mathématique qui fournit à très peu de frais, une couverture quasi continue de la région à étudier, et permet la transition entre la présentation eulérienne, et son équivalent lagrangien.

On sait que dans un tel secteur macrotidal les courants importants assurent une relative homogénéité verticale des masses d'eau et on a pu vérifier que les gradients horizontaux de température et de salinité influent assez peu sur les profils verticaux de vitesse (Thouvenin et al., 1984 ; Salomon et al., 1981). On se propose donc d'étudier ici par modèle mathématique bidimensionnel le champ de courants moyens sur la profondeur et de distinguer ensuite d'une façon qualitative la structure verticale des courants résiduels, par l'effet des variations de densité.

2. Le modèle numérique

Le modèle résoud les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement.

Après intégration sur la verticale, et en supposant la densité constante,

* Laboratoire d'Océanographie Physique, Université de Bretagne Occidentale,
29283 Brest Cedex.

il vient :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V + 2 \Omega \wedge V = -g \nabla \zeta - \frac{k V |V|}{\zeta - h_0} + \varepsilon \nabla^2 V$$

et

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot (\zeta - h_0) V = 0$$

V est le vecteur vitesse, Ω la vitesse angulaire de rotation terrestre, ζ la cote de la surface et h_0 la cote du fond, k est un coefficient de frottement de fond, ε est le coefficient de dispersion horizontale de la quantité de mouvement.

La technique de résolution en différences finies fait appel à un schéma de type Implicite en Directions Alternées, abondamment utilisé pour ce type de problème. Les détails du modèle ont été publiés par ailleurs (Salomon et al., 1981).

La morphologie de la Baie est décrite par environ 1000 mailles carrées de 2 km de côté. Le modèle reproduit donc des structures spatiales de dimension au moins égale à 10 km. L'estuaire intérieur de la Seine est représenté jusqu'à Poses, par un modèle à 1 dimension.

Les conditions aux limites ouvertes sont, à l'amont le débit fluvial, et sur la frontière marine une condition de niveau extraite des résultats de la plaque tournante de Grenoble (Chabert d'Hières et al., 1978).

La marée y est prédite pour toute situation passée ou future, par une méthode harmonique selon la formule :

$$\zeta(x,y,t) = \sum_i \gamma_i A_i(x,y) \cos(\omega_i t + (V_0 + u)_i - G_i(x,y))$$

ω est la pulsation de l'onde d'ordre i , A et G en sont l'amplitude et la phase, γ est le facteur de correction nodale et $(V_0 + u)$ la phase initiale de l'astre perturbateur. 29 ondes ont été utilisées depuis O_1 , jusqu'à $2MK_6$. Le niveau moyen a été supposé horizontal, de sorte que le modèle ne reproduit pas la circulation moyenne induite par des phénomènes extérieurs à la Baie.

3. Résultats

3.1. Courants instantanés

La figure 1 présente, sous la forme synthétique de courbes polaires, les vecteurs vitesse en marée de vive-eau (coefficient 95) et de débit fluvial moyen.

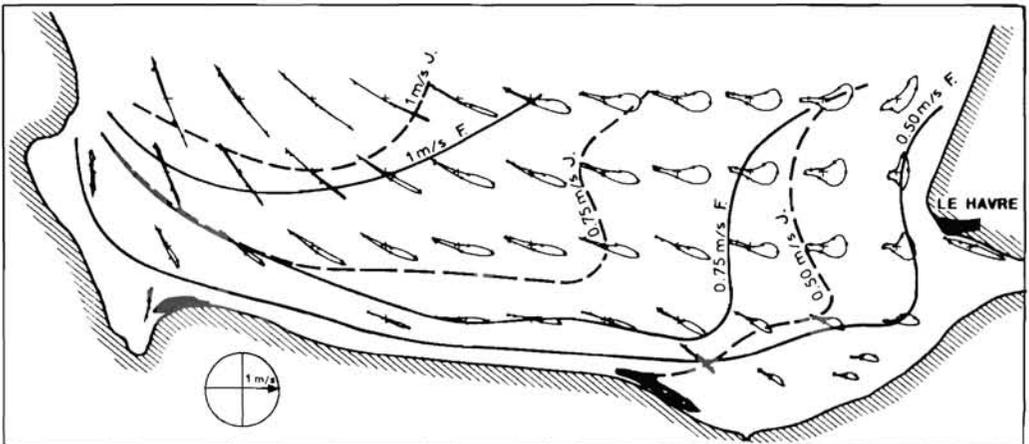


Fig.1.- Les courants de marée en Baie de Seine (vive eau moyenne). Les lignes isotaches correspondent au maximum de la vitesse.

On observe la déformation régulière des hodographes, essentiellement linéaires dans la région de Barfleur, puis présentant progressivement un dédoublement de la direction du flot lorsque l'on se déplace vers l'Est, et montrant 3 maxima à proximité de l'estuaire.

L'intensité du courant décroît d'Ouest en Est, depuis deux noeuds, jusqu'à un noeud, environ.

Il est important de noter que, à l'exception du voisinage immédiat de la côte du Calvados, et de la région de Barfleur, le courant dominant est le courant de flot. Cette particularité, jointe à la durée inégale des renverses de flot et de jusant donne à la marée dans la Baie un caractère que l'on rencontre habituellement en estuaire.

L'examen de champs de courants instantanés (tel que présenté sur la fig. 2) permet de mieux comprendre la circulation. On notera, par exemple, la divergence, au large du Havre de la composante de flot qui provoque le remplissage de l'estuaire (courant d'Est, intense seulement en début de flot) et la composante Nord du courant, dénommée Courant de Verhaule, qui correspond au mouvement général dans la Manche, à cet instant.

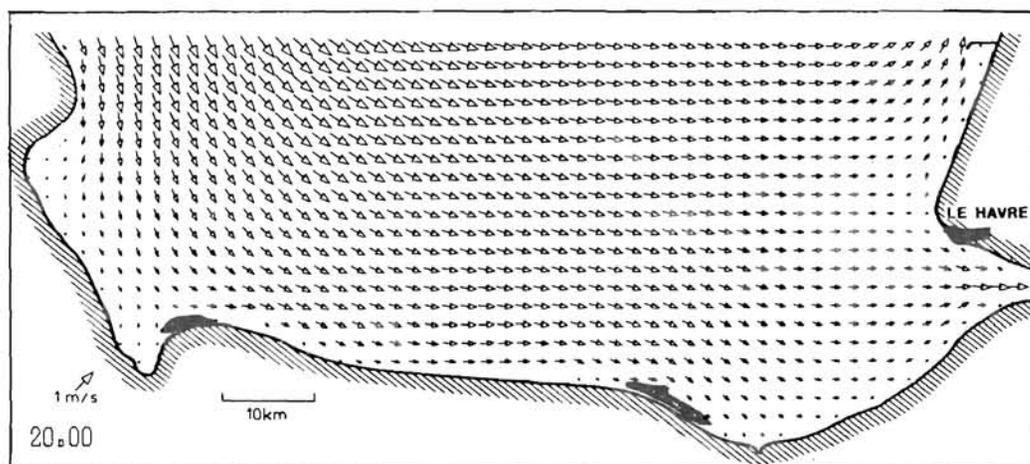


Fig. 2.- Exemple de champ de courants de flot lors de la pleine mer du Havre (vive-eau moyenne).

Cette représentation eulérienne, habituelle et commode, correspond assez mal au mouvement des particules liquides. Celles-ci se déplacent dans ces champs de vitesse en décrivant des trajectoires qui peuvent les entraîner assez loin de leur point de départ. A la condition de disposer d'une discrétisation de l'espace (c'est-à-dire la taille de la maille) petite par rapport à la dimension des trajectoires, ces champs de courants permettent de calculer les paramètres lagrangiens.

3.2. Trajectoires

Les déplacements de particules fictives qui se déplacent dans le domaine en respectant les champs de courants eulériens fournissent deux indications : l'excursion de marée et la résiduelle lagrangienne.

3.2.1. Excursions : La figure 3 regroupe les résultats obtenus dans toute la Baie pour la même marée de vive-eau. On notera le déplacement important (près de 20 km) et pratiquement linéaire dans la région de Barfleur, sa réduction près des côtes, et la rotation progressive qui se manifeste dans la partie Est de la Baie, où l'excursion n'est plus que de 6 à 8 km.

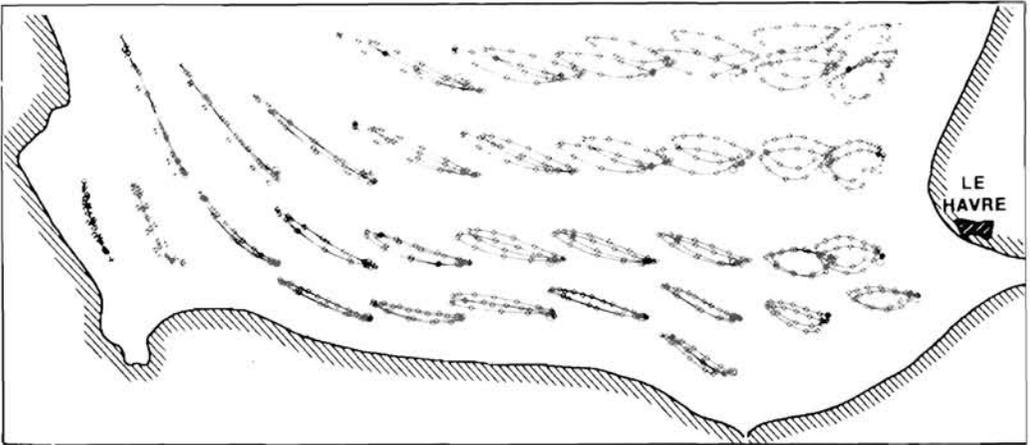


Fig. 3 : Trajectoires de particules fictives (Vive-Eau moyenne)

3.2.2. Résiduelles langrangiennes : On nomme ainsi la distance séparant le point de départ et le point d'arrivée d'une particule α , après son déplacement durant une marée. En divisant ce trajet résiduel par la période de la marée, on obtient la vitesse résiduelle lagrangienne $V_{\alpha r}$:

$$V_{\alpha r} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} V_{\alpha}(t) dt$$

Ce paramètre est le seul qui soit réellement significatif en terme de déplacement des masses d'eau. On le préférera à la notion de résiduelle d'Euler qui n'a pas de réalité physique, et qui dans le cas particulier de la Baie de Seine, se révèle parfois très différent.

Un tel champ de courant (résiduel de Lagrange) est présenté figure 4 pour la même situation de Vive-Eau.

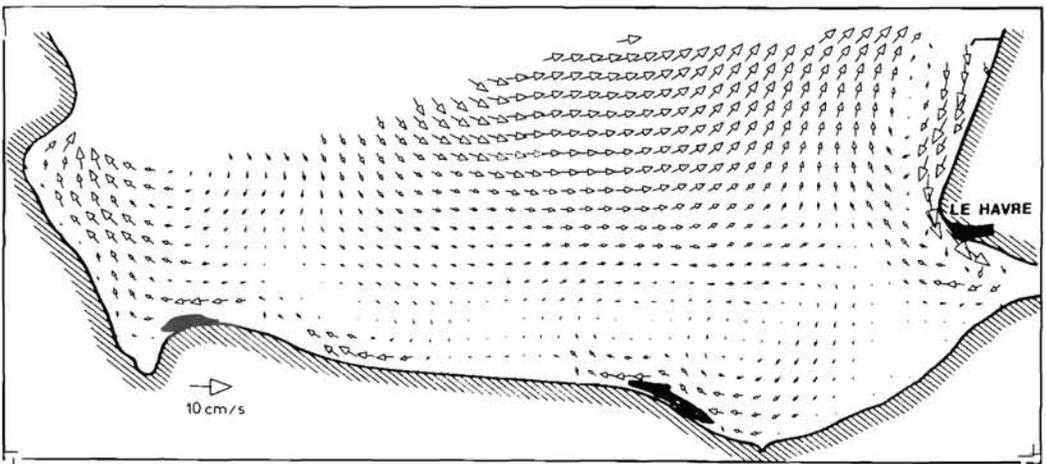


Fig. 4 : Courants résiduels de Lagrange (V.E. moyenne - Départ à la P.M. du Havre).

On remarquera la dérive générale des masses d'eau vers l'Est, particulièrement nette dans la partie Nord de la Baie, où elle atteint 6 à 7 cm/s, et l'existence de plusieurs tourbillons anticycloniques.

Le premier tourbillon, dénommé "tourbillon de Barfleur", correspond à une sortie des eaux sur une distance de 15 à 20 km de la côte. Les eaux de la Manche pénètrent plus à l'Est, sur 30 km environ, c'est-à-dire jusqu'au centre de la Baie. Une grande partie de ces eaux ressort dans la moitié Est, à l'exception du voisinage d'Antifer où un courant côtier entraîne une dérive vers le Sud, en direction du cap de la Hève et de l'estuaire.

Près de la côte du Calvados un contre-courant provoque un cheminement résiduel vers l'Ouest que la théorie permet d'interpréter comme un effet des petites profondeurs : la tendance à la conservation du rotationnel de la masse d'eau, et surtout la combinaison du frottement plus important à la côte et de la prédominance du flot tendent à provoquer une rotation anticyclonique, que l'on observe.

Les irrégularités des fonds et de la ligne de côte, telles que la pointe de la "Percée", ou les "Essarts" (près de Luc-sur-Mer), créent des circulations résiduelles perpendiculaires à la côte, associées à ce contre-courant elles forment des tourbillons. Ceci est d'une grande importance pour le temps d'évacuation vers le large d'éventuels rejets dans ces régions. L'ordre de grandeur moyen de ces courants est de 3 cm/s.

Cette description schématique est à moduler en fonction de deux paramètres dont il n'a pas été tenu compte plus haut :

- La succession de marées d'amplitude inégale modifie ces résultats sur une période de deux semaines. Plusieurs simulations ont été effectuées par le modèle, qui montrent que l'amplitude des vitesses change, mais que le schéma d'ensemble reste globalement semblable.

- L'instant de départ des particules au cours de la marée (paramètre t_0 de la formule précédente). Des particules issues du même point géographique, mais à des moments différents décrivent des trajectoires inégales et subissent un déplacement résiduel différent. Le champ de courant résiduel lagrangien n'est pas unique.

Ce facteur auquel on prête trop peu d'attention est illustré figure 5, pour une marée totalement sinusoïdale (réduite à M_2)

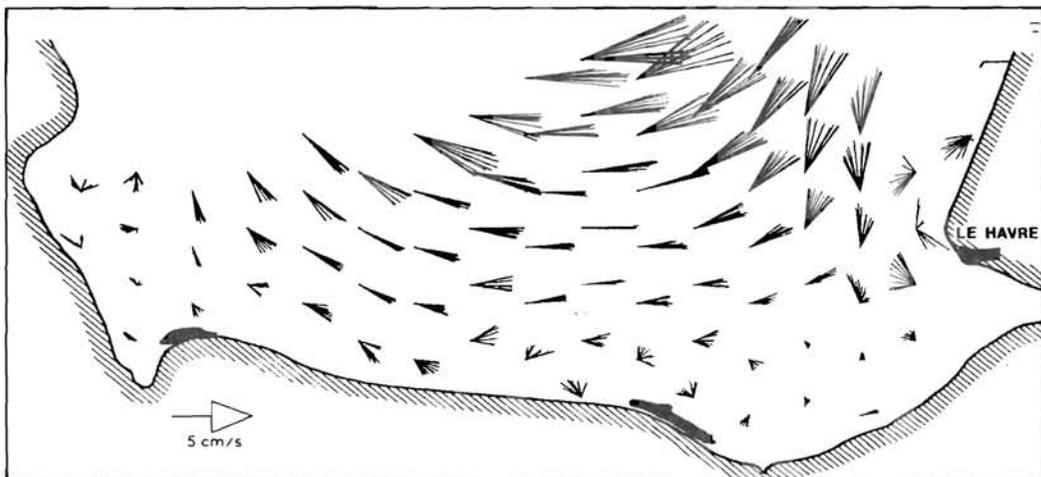


Fig. 5 : Courants résiduels de Lagrange représentés heure par heure (marée M_2).

On observe, par exemple, qu'aux environs du Havre, une particule peut avoir un déplacement résiduel dirigé soit vers le Nord, soit vers le Sud en direction de l'estuaire.

Dans la baie, à l'extérieur de l'estuaire, le début fluvial modifiera peu cette composante de la circulation résiduelle due à la marée, mais son influence se fera sentir par la composante quasi-géostrophique étudiée au paragraphe 4.3.

4. Vers un schéma de circulation résiduelle

Il a été signalé plus haut que, pour ce qui est de la vitesse résiduelle, le modèle ne fournirait qu'une réponse incomplète puisqu'il ne prenait en compte ni l'effet du vent, ni celui des gradients de densité, ni la pente du niveau moyen de la mer sur la limite extérieure.

On peut tout de même prolonger les résultats des calculs et parvenir à un schéma de circulation plus complet que celui qui est présenté figure 4, en superposant, au moins qualitativement, les circulations partielles dues aux termes qui ont été négligés dans les équations de départ.

4.1. L'effet du vent

On sait que certains événements météorologiques intenses (coups de vent) ont durant quelques heures ou quelques jours un effet considérable sur le déplacement des masses d'eau.

Mais le mouvement global doit s'apprécier à une échelle de temps qui soit en accord avec la longueur des trajets parcourus dans la Baie et la vitesse de ce déplacement. Pour une dimension caractéristique de 80 à 100 km, et une vitesse de l'ordre de 4 cm/s, conforme à ce qui a été dit plus haut, on déduit que le temps de résidence moyen dans la Baie doit être de 3 à 4 semaines. A cette échelle il est probable que la résultante des impulsions liées au vent qui ont un caractère irrégulier et, pour partie aléatoire, se trouve fortement diminuée. Ce point est abordé dans une autre communication (Le Hir et al., même ouvrage).

4.2. La pente du niveau moyen

Des modèles de circulation à l'échelle de la Manche indiquent une dépression locale du niveau moyen à proximité de Barfleur. Cela entraîne certainement une amplification du tourbillon de Barfleur par rapport à la réponse donnée par le modèle, et une légère diminution de la dérive vers l'Est.

4.3. Les gradients horizontaux de densité

Les gradients de densité, essentiellement liés à la dessalure des eaux à proximité de l'estuaire sont à l'origine d'une circulation résiduelle que l'on peut estimer de manière analytique.

En se situant dans un repère horizontal tel que l'axe Oy soit dirigé le long des isohalines, et l'axe Ox vers l'estuaire, on peut écrire les équations de l'hydrodynamique sous la forme simplifiée :

$$N \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -fv + g \frac{(\zeta - z)}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$$

$$N \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = fu$$

u et v sont ici les composantes de la vitesse selon Ox et Oy, N est le coefficient de viscosité turbulente verticale et f est le facteur de Coriolis.

Heaps (1972), puis Heathershaw et al. (1980), ont repris la solution obtenue par Nomitsu (1933), pour interpréter la structure verticale des courants observés dans la Baie de Liverpool, et celle de Swansea. Cette solution est complexe et ne respecte pas la condition de vitesse nulle au contact du fond.

On a résolu ici un système légèrement plus simplifié qui a l'avantage de respecter cette condition à la limite. En évaluant les ordres de grandeur de chacun des termes de la première équation, on constate que la force de Coriolis dans la direction Ox est faible par rapport aux termes de pression et de cisaillement verticaux. On écrira donc le système précédent, sans retenir la force de Coriolis dans la direction Ox.

Ce système est relativement simple à résoudre. Il vient :

$$u = \frac{f}{48} \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{H^3}{N} (8 \eta^3 - 9 \eta^2 + 1)$$

$$v = \frac{f}{320} \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{H^5}{N^2} \left(-\frac{8}{3} \eta^5 - 5 \eta^4 + \frac{10}{3} \eta^2 - 1 \right)$$

$$\text{où } \eta = 1 - \frac{z}{H}$$

Ces fonctions sont présentées graphiquement figure 6, pour les valeurs suivantes des paramètres :

$$H = 20 \text{ m} \quad \frac{\partial \rho}{\partial x} = 2.10^{-4} \quad N = 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

On constate la formation d'une spirale de type Ekman, très proche de la solution obtenue par Heaps :

Le courant de surface est dirigé quelques 60 degrés à gauche des isopycnes, avec une amplitude de 4 cm/s. Il tourne ensuite vers la droite, est dirigé le long de ces isopycnes, un peu au-dessus de la mi-profondeur, puis presque perpendiculaire à elles à partir de 4 m au-dessus du fond. La vitesse est à cet endroit de 2 cm/s.

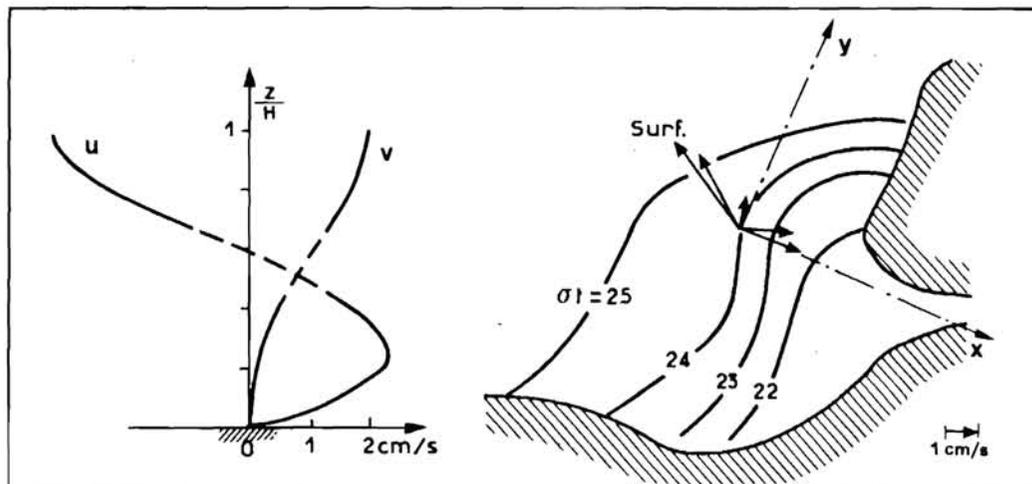


Fig. 6 : Courant résiduel de densité : structure verticale et positionnement géographique.

Ces indications théoriques simples permettent de moduler les résultats du modèle à proximité de l'estuaire comme suit :

- La veine de courant résiduel dirigé vers le Sud, le long du littoral d'Octeville est intensifiée près du fond, et fortement diminuée en surface.
- La sortie des eaux de la Seine vers le Nord Ouest est renforcée.
- La pénétration des eaux du large dans la partie Est de la Baie est accrue près du fond, et diminuée en surface.

La figure 7 rassemble ces indications.

Compte tenu des paramètres qui modifient ce schéma : coefficient de la marée, débit fluvial et facteurs météorologiques, l'intensité des courants n'a pas été notée. On considère qu'une vitesse de 5 cm/s constitue souvent une valeur relativement élevée.

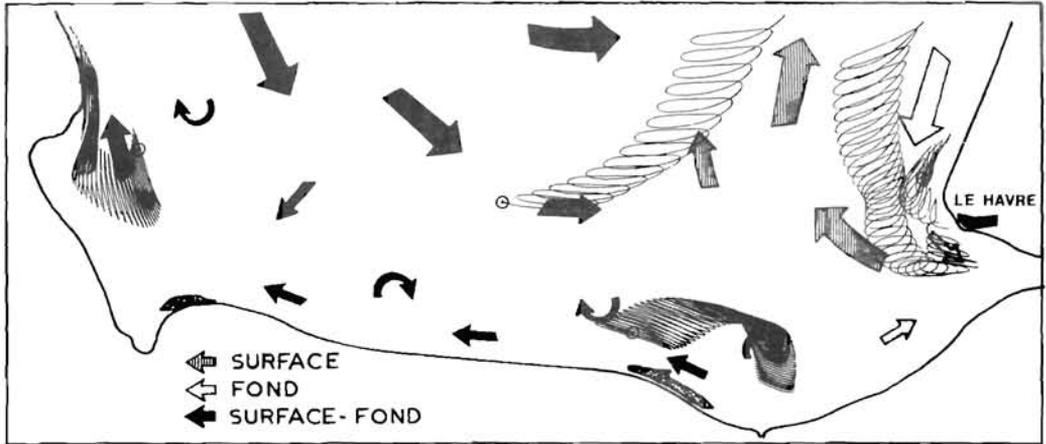


Fig. 7 : Schéma de circulation résiduelle.

5. Conclusion

Le modèle mathématique bidimensionnel a permis de mieux connaître la courantologie de marée dans la Baie. Il est aussi un outil de prédiction qui pourra à l'avenir être utilisé pour tirer un meilleur profit des observations faites en mer et préparer une meilleure stratégie de mesure. Cette procédure a déjà été employée lors de la dernière campagne à la mer du Greco Manche, au printemps 1984.

L'examen des résultats nous a conduit à faire un certain nombre de remarques sur la distribution des courants instantanés et résiduels, l'existence de contre-courants et de tourbillons.

On a écarté la présentation eulérienne, parfois source d'erreurs d'interprétation, et mis l'accent sur la circulation lagrangienne, en notant la multiplicité de ces champs de courant.

Le schéma de circulation résiduelle obtenu en complétant les résultats du modèle par des considérations théoriques est un apport important de ce travail à la connaissance du fonctionnement de l'écosystème de la Baie de Seine. On constatera (Le Hir et al., même ouvrage) qu'il semble correspondre aux indications fournies par les courantographes et la télédétection.

Anonyme (1978).- Baie de Seine, Campagne Thalia Mai 1978. Rapport interne COB/DELGMM.

Chabert d'Hières G. & Le Provost C. (1978).- Atlas des composantes harmoniques de la marée dans la Manche. *Annales Hydro.*, 46, 3 : 5-35.

Heaps N.S. (1972).- Estimation of density currents in the Liverpool bay area of the Irish Sea. *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, 30 : 415-432.

Heathershaw A.S. & Hamond F.D.C. (1980).- Tidal currents and residual circulation in the Swansea bay area of the Bristol channel. In : *Industrialised embayments and their environmental problems*. Pergamon Press, 123-156.

Officer C.B. (1976).- *Physical oceanography of estuaries and associated coastal waters*. John Wiley.

Salomon J.C. & Le Hir P. (1981).- Etude de l'estuaire de la Seine. Modélisation numérique des phénomènes physiques. Univ. de Bretagne Occidentale, 286 p.

Thouvenin B. & Salomon J.C. (1984).- Modèle tridimensionnel de circulation et de dispersion en zone côtière à marée. *Océanologica Acta*, Vol. 7, n° 4:417-429.