

LA CIRCULATION DES EAUX EN BAIE DE SEINE

CHABERT D'HIERES G.*

Durant ces dernières années, les dynamiciens de l'Université de Bretagne Occidentale (U.B.O.), du Centre Océanographique de Bretagne (C.O.B.), de l'Institut de Mécanique de Grenoble (I.M.G.), aidés du Laboratoire de Sondage Electromagnétique de l'Environnement Terrestre de l'Université de Toulon (L.S.E.E.T.) ont coordonné leurs efforts, et mis en commun leurs moyens pour rechercher des résultats cohérents sur les mouvements des masses d'eau en Baie de Seine. L'axe principal de ces recherches a été la mesure et le calcul des courants instantanés dans tout le domaine avec la prise en compte précise de leurs variations spatiales et temporelles de façon à améliorer bien entendu la connaissance de ces courants eux-mêmes, mais surtout de déterminer le devenir, s'il y en a un, des masses d'eau à plus ou moins long terme.

On aurait bien voulu nous voir donner un champ régulier et permanent de déplacements des masses d'eau. Malheureusement, le problème est plus complexe; leurs mouvements sont soumis à un ensemble de causes perturbatrices aléatoires qui peuvent masquer les tendances que nous avons voulu établir. La dispersion turbulente de ces écoulements vient compliquer considérablement ce problème.

L'intérêt porté aux mouvements des masses d'eau en Baie de Seine ne date pas de la constitution du GRECO Manche. En 1980, les lois de variations de niveau dues à la marée astronomique étaient supposées connues; les courants l'étaient moins, et les dérives à long terme étaient pratiquement ignorées. Il serait trop long de faire le point des connaissances hydrodynamiques de la baie de Seine avant la constitution du GRECO. Mais on ne peut passer sous silence la grande activité du Service Hydrodynamique et Océanographique de la Marine (S.H.O.M.), de l'Université de Bretagne occidentale (U.B.O.), du Laboratoire National d'Hydraulique (L.N.H.), de la Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques (S.O.G.R.E.A.H.), du Laboratoire Central d'Hydraulique de France (L.C.H.F.), des Services des Ponts et Chaussées, des Directions Départementales de l'Équipement, des Cellules antipollutions, des Commissions de Contrôles et de tous les organismes s'intéressant à l'hydrodynamique, à la sédimentologie, à la géochimie, à la biologie, qui se sont regroupés sous l'étiquette de GRECO. L'IFREMER a apporté une aide déterminante à cette opération; que tous ses collaborateurs soient ici remerciés.

La synthèse des résultats obtenus au cours du programme Baie de Seine est résumée dans la communication de P. Le Hir, J.C. Salomon, C. Le Provost, G. Chabert d'Hières et J.L. Mauvais, rédigée par P. Le Hir, et on se contentera donc ici de commenter ou de préciser les notions qui en ont été dégagées.

Nous nous sommes limités à l'étude de la baie de Seine à l'exclusion de celle de l'estuaire. On doit insister sur les diverses connexions qu'il y a eu entre les équipes de recherches :

- détermination des objectifs des mesures et des paramètres à respecter lors de leur exécution;

- dépouillement des mesures faites par le C.O.B., par les équipes de Grenoble;

* Institut de Mécanique de Grenoble, B.P. 68, 38402 Saint Martin d'Hères.

- utilisation par le C.O.B. des modèles numériques établis par l'U.B.O.
- Interprétation en commun des résultats des modèles à partir des mesures *in situ*;
- exploitation des mesures de courants différentiels entre le fond et la surface pour critiquer les résultats des modèles tridimensionnels;
- utilisation des résultats d'une équipe pour établir les conditions aux limites des modèles des autres. Citons par exemple les données du modèle physique de la Manche construit sur la plaque tournante de Grenoble, utilisées pour avoir les dénivellations instantanées le long de la limite Barfleur-Antifer. (cf. dans ce volume Poster P.1).

Les mesures *in situ* des courants dans la masse décrites dans la communication de P. Le Hir et J. L'Yavanc ont fourni des résultats remarquables. Les travaux d'analyse de C. Le Provost montrent que leurs résultats sont exploitables. Ils ont permis de faire une bonne prédiction des courants de marée et le champ des vitesses moyennes obtenues est cohérent.

Les mesures au radar exécutées par P. Broche *et al.* ont le grand avantage de donner les courants de surface et des champs instantanés avec une bonne résolution spatiale et temporelle. Elles ont l'inconvénient de demander un dépouillement complexe et de donner la composante radiale et tangentielle en des points différents du plan, ce qui impose des interpolations supplémentaires pour avoir le vecteur vitesse en chaque point du plan à chaque instant. Ce sont des mesures de surface: leur comparaison avec les résultats des modèles montre que le procédé est valable et encourage le montage de nouvelles expériences.

L'ensemble de ces mesures a permis de confirmer les résultats obtenus sur le modèle réduit de la Manche construit sur la plaque tournante de Grenoble (Chabert d'Hières et Le Provost, 1979). Elles ont également permis de contrôler les modèles numériques conçus par C. Le Provost et J.C. Salomon, dont les conditions aux limites ont été précisées par les résultats du modèle physique.

On a donc là des outils capables de donner des solutions précises des courants de marée en Baie de Seine.

1. CARACTERISTIQUES DES DEPLACEMENTS DES MASSES D'EAU A MOYEN ET LONG TERME.

Le calcul et la prédiction des dérives de masses d'eau à une échelle des temps supérieure à la marée est un problème du second ordre. Elles sont petites par rapport au courant de marée et du même ordre de grandeur que l'amplitude de ses instabilités. Leur détermination reste donc un problème difficile.

Comment tout d'abord caractériser ces déplacements de masse d'eau ? On appelle courant résiduel, le courant qui subsiste lorsque l'on retranche des courants mesurés, le courant engendré par la marée astronomique et radiationnelle, c'est-à-dire la marée dont l'image peut être une superposition de composantes sinusoïdales. On extrait donc, des signaux mesurés, toutes les composantes dont les fréquences sont issues du spectre de marée; le reste est le courant résiduel. Il est composé des courants permanents provoqués par la marée elle-même, par l'intermédiaire des phénomènes non linéaires dus à l'inertie (petits fonds) et aux frottements. Il est aussi composé des courants dus au vent local, des courants parcourant toute la Manche, des courants dus aux variations du niveau moyen le long de la limite ouverte de la baie de Seine: chacune de ces dernières causes motrices provoque un champ de courant bien particulier et chacun de ces champs, pris isolément a une forte interaction avec la marée. Aucun ne peut donc être étudié indépendamment de la marée, mais chacun d'eux peut être étudié indépendamment des autres, car on peut supposer qu'ils n'ont pas d'interaction entre eux.

Les modèles ont jusqu'à présent négligé l'action générale des conditions

météorologiques. Ils n'en ont donné que des réponses particulières; ainsi, le modèle tridimensionnel de B. Thouvenin et J.C. Salomon utilisé par P. Le Hir s'est limité à des vents locaux. Il est donc difficile d'en extraire des résultats statistiques valables. Il donne toutefois une précieuse indication sur l'ordre de grandeur des courants superficiels et montre la grande complexité des champs de courants, lesquels présentent notamment une distribution au fond très différente de celle de surface. Ce modèle mériterait d'être appliqué avec plus de précision à des situations météorologiques réelles.

Par contre, les modèles qui ont calculé les champs résiduels dûs aux autres causes (marées, distribution du niveau moyen le long de la limite ouverte, avec bien entendu la meilleure distribution du frottement, de l'effet des côtes et des fonds) donnent des résultats dignes de confiance.

On doit insister sur deux difficultés de natures différentes: l'une, liée à la définition des courants moyens, et l'autre à l'application des conditions aux limites.

1.1. Définition des courants de dérive

En matière de courant moyen, les notions peuvent être très variées, suivant la façon dont on prend les moyennes et la durée sur laquelle elles portent.

Tout d'abord, il faut bien voir qu'en général on parle de courant intégré sur toute la hauteur de l'eau, c'est-à-dire qu'à chaque instant, on définit la vitesse moyenne au point (x, y) comme étant la valeur

$$\frac{1}{h} \int_0^h V(x, y, z, t) dz$$

ou le débit par unité de surface

$$q = \int_0^{h+\zeta} V(x, y, z, t) dz$$

$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\}$

$h =$ profondeur moyenne

$\zeta =$ dénivellation de marée

On peut déduire de ce débit une vitesse intégrée sur la hauteur, en le divisant par la hauteur totale à chaque instant.

Nous utiliserons aussi dans certains cas la notion de courant de fond et de courant de surface. Il s'agit des mêmes notions que précédemment, mais intégrées sur des hauteurs de quelques mètres seulement à partir du fond ou de la surface, sans que cette notion n'ait reçu pour l'instant de définition plus précise.

Les courants qui en résultent sont noyés dans le va-et-vient continu des courants de marée qui oscillent suivant la superposition de mouvements sinusoidaux de périodes différentes. Il en résulte une modulation journalière, semi-mensuelle, saisonnière et des variations aléatoires dues aux tempêtes, aux crues exceptionnelles des fleuves et à la turbulence.

Le choix de l'échelle des temps pour exécuter les moyennes est donc délicat. On peut la prendre d'un ordre de grandeur égal au temps de résidence des masses d'eau dans la baie. Cette définition, prise dans la communication de Le Hir, Salomon *et al.* (ce colloque) n'est pas parfaite, mais elle conduit à une durée de l'ordre de un à deux mois, c'est-à-dire deux à quatre cycles semi-mensuels de marée.

Les mesures de ces vitesses en un point (x, y) conduisent au champ eulérien de vitesse moyenne et il convient ici de montrer la notion qui le sépare du champ lagrangien des vitesses qui animent le déplacement à long terme de flotteurs et donc des masses d'eau.

L'écoulement instantané n'est pas uniforme en plan: la trajectoire d'une colonne d'eau que l'on suppose rester verticale ne peut être confondue ni avec

On peut montrer cette même difficulté d'une autre façon : le calcul ne prend en compte, le long de la limite ouverte, que des dénivellations. On voit par ailleurs que dans le domaine, celles-ci sont chargées de composantes harmoniques; et la ligne Barfleur-Antifer passe dans le voisinage des points nodaux des amphidromies que constituent ces composantes (M_4 ou M_6). A cet endroit, l'amplitude de ces composantes est faible, une faible erreur sur leur amplitude va entraîner une erreur plus importante relativement à la marée M_2 , sur la valeur de ces composantes à l'intérieur du domaine, ainsi que celle des ondes d'interaction. Les courants moyens peuvent être affectés par ces erreurs.

Il faut d'ailleurs se souvenir que l'intensité de ces courants résiduels est du même ordre de grandeur que celle des erreurs que l'on constate dans la mesure des champs de courants instantanés (2 à 5 cm/s). Il faut donc que la distribution des roses de courants données par les modèles soient très représentatives des courants naturels pour que les résultats sur les courants résiduels soient exacts. On voit donc par là qu'il n'est pas étonnant de constater des écarts importants entre les résultats de modèles d'auteurs différents. Et les résultats d'un modèle local ne peuvent être adaptés que s'ils sont confirmés par ceux d'un modèle de plus grande emprise évitant ces difficultés de limites.

Quoi qu'il en soit, l'ensemble des modèles et des mesures a donné les grandes caractéristiques de courants résiduels en Baie de Seine.

2. RESULTATS : CIRCULATIONS EN BAIE DE SEINE

2.1. Description générale et succincte des marées dans la baie de Seine :

Le marnage croît de 25% lorsque l'on se déplace d'ouest en est depuis Barfleur jusqu'au Havre. La marée se charge d'harmoniques: les composantes M_4 et M_6 croissent d'ouest en est plus vite que l'amplitude de la marée elle-même. Par contre, l'intensité maximale des courants diminue d'ouest en est. Elle varie très vite de 1,8 m/s à 0,8 m/s lorsqu'on s'éloigne de Barfleur, puis graduellement de 0,8 à 0,5 m/s lorsqu'on va du milieu à l'est de la baie. Vers l'est le courant de flot l'emporte sur le courant de jusant, mais il dure moins longtemps.

Nous rappelons maintenant les principaux résultats obtenus après la confrontation de l'ensemble des recherches.

2.2. Résultats généraux :

Les mesures nature donnent des résultats cohérents capables de déboucher sur une prédiction valable des courants à chaque instant omettant les effets météorologiques, les gradients de densité et les détails des indentures de la côte.

Les modèles bidimensionnels représentent très convenablement, à la précision des mesures près, les champs instantés des courants de marée. Ils permettent donc une très bonne interpolation entre les mesures précédentes.

Les modèles tridimensionnels montrent des divergences intéressantes entre les courants de fond, dans la masse et en surface. Les champs de vitesse dûs au vent donnent des indications précieuses sur les ordres de grandeur des courants qui en résultent. On a pu voir que le temps de résidence moyen correspondant au courant résiduel est de quelques semaines à quelques mois. Par contre, des situations de vent particulières le réduisent à quelques jours. Les eaux de la baie de Seine orientale seraient ainsi balayées par

une tempête. Mais ces eaux peuvent revenir après. L'influence réelle des conditions météorologiques sur le temps de résidence reste à étudier. Les champs de vitesse dus à la circulation haline sont parfaitement conformes à la notion qu'on pouvait s'en faire a priori. Mais les calculs numériques ont permis de les reproduire et les mesures nature ont permis de les connaître en quelques points.

2.3. Circulations :

Quant au schéma de circulation moyenne, un certain nombre de traits généraux sont dégagés (fig. 6) de la communication de Le Hir, Salomon *et al.*).

Une grande circulation anticyclonique bidimensionnelle déplace les masses d'eau dans une zone de 60 km de diamètre environ centrée à 30 km à l'est de Barfleur. Elle fait entrer les masses d'eau vers le tiers ou le milieu de la ligne Barfleur-Antifer et les fait ressortir près de Barfleur. Il est même probable que les eaux de cette partie de la baie soient recyclées plusieurs fois. Cette circulation semble établie puisque répondant à un effet vraisemblable de la pointe de Barfleur sur les frottements latéraux, les modèles à grande échelle physiques et numériques, le modèle de la baie de Seine, les mesures eulériennes *in situ* et les photos satellites, la font ressortir. Seuls la dimension et l'intensité de ce tourbillon sont imprécis et animent encore quelques discussions parmi les hydrodynamiciens.

Le tourbillon anticyclonique de Barfleur repousse la circulation générale en Manche vers le nord, de telle sorte que la part principale des eaux ayant baigné la côte nord du Cotentin se dirige vers le nord-est.

Il existe des entrées et des sorties près d'Antifer. Le modèle de la baie de Seine a montré à cet endroit également un tourbillon anticyclonique. Mais des mesures sur le modèle physique ont montré une composante sud-nord du déplacement des masses d'eau le long de la côte, repoussant un peu plus à l'ouest ce tourbillon anticyclonique. Les modèles à grande emprise montrent dans cette zone un courant quasi uniforme nord-sud. Mais la maille est trop grande pour permettre de déceler une structure aussi restreinte. Il peut y avoir le long de la limite Barfleur-Antifer un défaut du modèle de la baie de Seine qui nous interdit d'affirmer la place exacte de ce tourbillon anticyclonique : il nous semble qu'il peut se situer un peu plus au large, laissant la place à une échappée vers le nord des masses d'eau collées à la côte du Pays de Caux. Ce dernier courant côtier serait en bon accord avec les observations des sédimentologues et des biologistes. Dupont *et al.* trouvent que, au nord de la zone de dépôts de dragage d'Octeville, les matières organiques en suspension viennent du nord. Il peut s'agir là d'un phénomène dû à la dispersion. Thomas, par contre, à l'aide d'images satellitaires, montre que, par temps calme et en période de crue, les eaux turbides de la Seine longent la côte vers le nord, puis le nord-est. Les vents sud et sud-ouest viennent renforcer en surface ce courant côtier. Mais il n'est pas évident qu'il en soit de même au fond.

Des circulations anticycloniques peu intenses existent près de la côte du Calvados, au nord de Caen, d'Arromanches et de Grandcamp. Elles engendrent un courant côtier moyen dirigé vers l'ouest. On en trouve une explication dans le texte de Salomon. Il en résulte des veines de courant sud-nord évidemment extrêmement importantes pour les problèmes de décontamination de la côte. Le modèle physique a aussi montré des courants portant vers le nord à partir de cette même côte suivant des veines bien délimitées. Mais il serait souhaitable de préciser ce phénomène par des études spécialisées et si possible par des mesures nature, car le phénomène de pompage d'Ekman s'oppose à ce schéma.

2.4. Remarques sur l'effet de dispersion côtière :

A ce point, nous devons rappeler l'action extrêmement importante que peut avoir la dispersion turbulente sur la migration le long de la côte des éléments marqués, et noter que la migration des particules d'eau marquées, celles des particules dissoutes et le charriage sont des grandeurs différentes dont l'interdépendance n'est pas déterminée a priori.

A titre d'exemple, une source de contaminant placée à la côte, en présence d'un courant alternatif de marée superposé à un courant côtier dirigé vers l'ouest, marquera les sédiments à l'est par simple phénomène de dispersion. Et ceci peut être très important près de la côte car c'est à cet endroit que les gradients de vitesse sont les plus forts, c'est-à-dire que les masses d'eau voisines à un instant donné se séparent le plus. C'est là aussi que l'agitation turbulente et la houle peuvent remettre en suspension le plus de particules, et les disperser à cause des gradients cités précédemment.

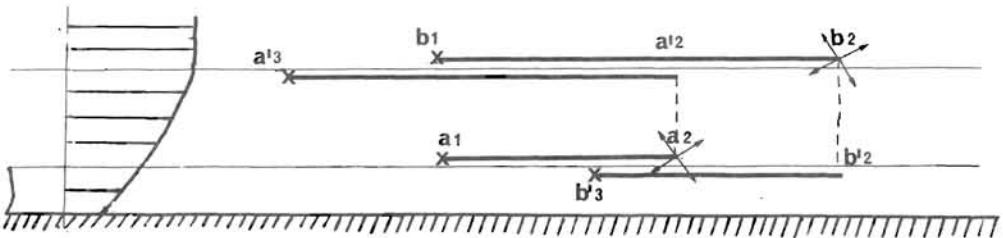


Fig. 2.- Schéma de dispersion côtière.

La figure 2 montre comment les particules a et b se déplaçant au cours d'une demi-excursion de marée se dispersent avec des possibilités d'échange de trajectoire; certains de leurs éléments peuvent ainsi venir en a'2 et b'2, et se retrouver après la demi-excursion suivante en a'3 et b'3, avec un écart très grand par rapport à l'écart initial. On peut expliquer par là une migration rapide des éléments le long d'une côte et même un déplacement du marqueur en sens inverse du courant lorsque la côte est irrégulière à l'échelle des excursions des particules dues à la marée.

Il faut rajouter que les particules fines fixent relativement plus les substances que les grosses. Elles sont tenues en suspension dans des zones plus éloignées. Par conséquent, le transport moyen et dispersif de certains éléments peut se trouver accru à une certaine distance de la côte. C'est là peut-être l'explication de la concentration d'activités dans la zone des 13 mètres de fond signalée par Le Gal et décrite dans le texte de Crevel. Ce phénomène peut même affecter le courant côtier du Calvados trouvé par Salomon. Il avait été observé sur le modèle physique et certaines données physico-chimiques le montrent aussi.

2.5. Circulation haline :

Une circulation haline différentielle entre le fond et la surface, provoquée par la salure des eaux de la Seine existe à l'ouvert de l'estuaire de la Seine. Quelques mesures et de nombreuses études sur modèles, montrent ce phénomène. La direction de cet écoulement peut être fortement influencée par la rotation terrestre. Il serait souhaitable d'entreprendre des études détaillées des flux respectifs de ces courants en fonction du débit de la Seine et des courants de marée.

2.6. Incertitudes :

La dérive vers l'est des masses d'eau le long de la limite Barfleur-Antifer n'est montrée directement par aucune mesure *in situ*. Elle fait partie de la dérive générale des masses d'eau en Manche. Il nous semble toutefois que les courants donnés sur la fig. 6 de Le Hir, Salomon *et al.* sont trop forts et sont le résultat d'un effet de limite du modèle de la baie de Seine.

Les eaux de la Seine, ayant tendance à rester en surface, sortent principalement par le nord, mais la totalité du flux n'est pas collée à la côte. Une mesure de courant eulérienne montre une forte évansion des masses d'eau au nord d'Ouistreham, sur la ligne Barfleur-Antifer. Enfin des mesures de salinités montrent aussi qu'à certaines époques, des masses d'eau de la Seine vont vers l'ouest. Le champ de dérives résiduelles est donc à réétudier avec des modèles plus fins et de plus grande emprise pour déterminer les flux dans la région d'Antifer. Des modèles tridimensionnels locaux sont à mettre en oeuvre en de nombreuses circonstances.

3.- CONCLUSION

La recherche du déplacement des masses d'eau à l'échelle de quelques semaines ou mois a fait des progrès considérables vers une solution complexe mais cohérente. Les études méritent d'être poursuivies afin de mieux déterminer le devenir des eaux de la Seine, les zones d'entrée dans la baie, les courants côtiers et leur recirculation au large.

De nouvelles mesures *in situ*, et notamment des suivis de flotteurs lagrangiens, sont souhaitables. Mais là de nombreuses expériences seront probablement nécessaires. L'analyse de leur trajectoire compliquera sans doute la réponse au problème des courants résiduels. Ils seront tributaires des courants de marée de circulation haline et du vent, mais aussi de la dispersion turbulente. Il faudra prendre en considération les effets de la durée et des débits des crues de la Seine, mais aussi tenir compte des années sèches et des années humides puisque les débits moyens peuvent varier de 400 à 600 m³/s. On a pu déplorer, lors de ce travail, l'absence de la mesure détaillée de l'impact de la houle. On prépare la correction de cette lacune, mais il faudra prendre en compte la forte interaction de la houle et du courant, et de sa résultante sur le fond, qui est sans doute nettement orientée. On a cherché des schémas de circulation moyenne, mais il faut toujours avoir présent à l'esprit que, vis-à-vis de certaines disciplines, les transports en situation exceptionnelle sont souvent prépondérants. Les sédimentologues le savent bien. Les modèles météorologiques sont donc à développer.

On pourrait en définitive séparer la baie de Seine en deux zones :

- l'une où les phénomènes à long terme l'emportent, c'est la partie ouest et le centre, où l'on trouvera les courants intéressants le transport de marqueurs dissous,

- l'autre constituée par les zones côtières et par la partie est de la baie, où les accidents météorologiques, les houles venant du large et les crues de la Seine, l'emportent. Là, un travail d'analyse quantitative reste à faire.

Chabert d'Hières G. & Le Provost C., (1979).-Atlas des composantes harmoniques de la marée dans la Manche. Ann. Hydrog., vol. 6, Fasc. 3, pp. 5-36.

Miche M. (1944).- Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante. Ann. Ponts et Chauss., 114^e année, pp. 25-61.