

APPROCHE DE LA CIRCULATION RESIDUELLE EN BAIE DE SEINE.

LE HIR P. *, SALOMON J.C. **, LE PROVOST C. ***, CHABERT D'HIERES G. ***,
MAUVAIS J.L. *.

INTRODUCTION

La dynamique de la baie de Seine est dominée par le courant de marée. Cependant, les excursions des particules au cours d'une marée sont bien inférieures aux dimensions de la baie, de telle sorte que l'étude du devenir des masses d'eau - et en particulier de la dilution du fleuve - exige la connaissance de l'hydrodynamique à échelle de temps supérieure à la période de marée, ce que nous appelons la circulation résiduelle.

Il est usuel de distinguer les courants résiduels "eulériens" qui sont des moyennes de vitesses en des points fixes et les courants résiduels "lagrangiens" qui désignent des vitesses réelles de déplacements. Les premiers sont utiles au sédimentologue ou au benthologue qui s'intéresse au courant que subit une particule ou un organisme qui se déplace peu, tandis que les seconds concernent les trajectoires effectives des masses d'eau et, dans une certaine mesure, celles des éléments en suspension. Dans notre travail, nous abordons principalement ce dernier aspect de la circulation résiduelle, en traitant séparément les différents phénomènes physiques concernés.

2. TEMPS DE STOCKAGE DE L'EAU DOUCE.

Pour évaluer l'importance du temps de résidence des eaux dans la baie on peut calculer le temps de stockage de l'eau douce obtenu en divisant le volume d'eau douce dans la baie par le débit de la Seine. Ce volume d'eau douce est estimé par rapport au volume total en fonction d'un déficit relatif en sel ($S_{ref}-S$)/ S_{ref} , où S est la salinité locale et S_{ref} la salinité de l'eau de mer "Pure".

Le calcul a été effectué pour des situations observées lors de quatre campagnes hydrologiques en Baie de Seine, et est reporté sur la figure 1. Une valeur moyenne de la salinité en Manche, 34,5‰, est prise comme salinité de référence. Il apparaît que le régime saisonnier n'est pas très marqué et que le volume d'eau douce reste de l'ordre de 3% du volume total de la baie, sauf pour la campagne d'octobre 83 qui a suivi une période d'étiage prolongée. Les temps de stockage obtenus varient entre 43 et 113 jours, avec un minimum en hiver qui correspond sans doute à une expulsion des eaux douces en surface induite par des courants de densité plus forts (cf. § 5). Ces temps de stockage relativement longs entraînent un temps de renouvellement global de la baie au moins aussi long. On peut déduire une vitesse résiduelle-type: une particule d'eau devant quitter la baie de Seine doit en moyenne parcourir 100 km en 50 jours, ce qui donne un courant de 2,3 cm/s.

* Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, 29273 Brest Cedex.

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

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

Ce dernier calcul néglige l'effet de la diffusion sur le déplacement à long terme des particules. Mais de nombreuses expériences ont montré que celui-ci devient faible vis-à-vis de l'effet de la convection dès que les courants résiduels dépassent le centimètre par seconde. Nous sommes dans ce cas.

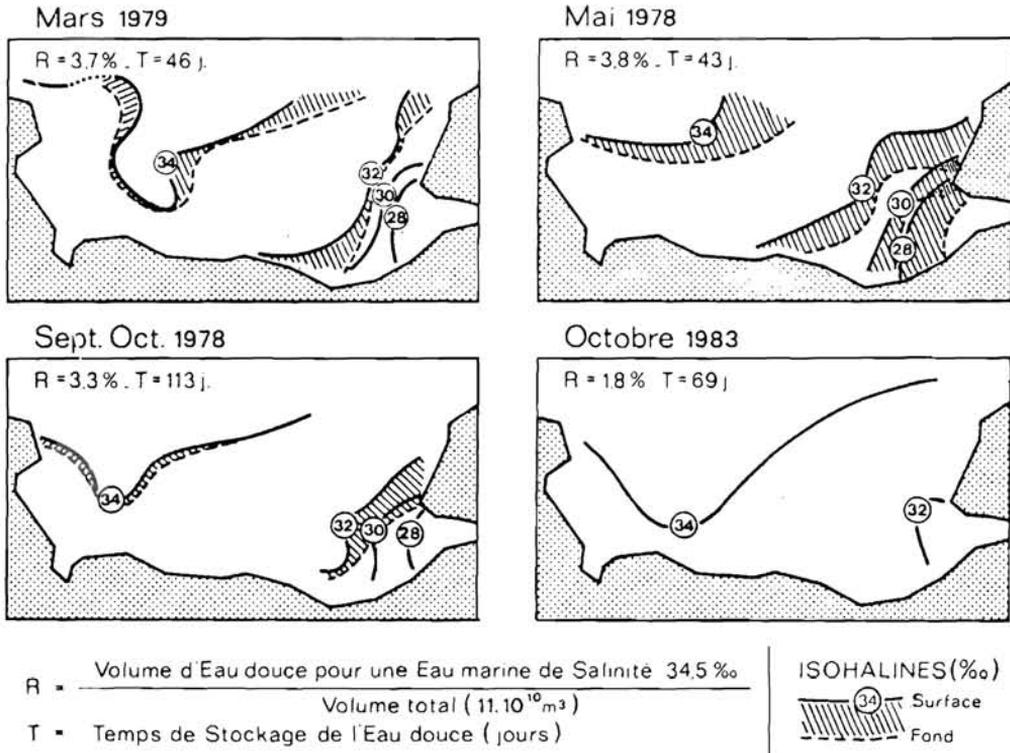


Fig. 1 : Structure haline en baie de Seine (Campagnes CNEOX)

3. LES SOURCES DE CIRCULATION RESIDUELLE.

Compte tenu de l'évaluation du temps de transit des masses d'eau en baie, on peut considérer que les vitesses résiduelles attendues en Baie de Seine sont de l'ordre de 0 à 5 cm/s, sauf cas d'exception. C'est ce qu'indiquent les moyennes des mesures (Le Hir et l'Yavanc, 1985). Plus généralement, on s'intéressera aux courants résiduels susceptibles de modifier notablement les caractéristiques du séjour des masses d'eau dans la baie, c'est-à-dire tels que le produit de leur vitesse par leur durée soit du même ordre que la dimension de la baie: ainsi un courant de 25 cm/s pendant 2 jours suffirait pour expulser les eaux de la Seine hors de la baie.

Selon ces caractéristiques de la circulation résiduelle, on peut distinguer trois principaux phénomènes sources :

- la marée qui n'est pas parfaitement sinusoïdale par le jeu des accélérations des topographies de fond et du frottement,
- les gradients de densité, dûs principalement au débouché de la Seine. On peut remarquer que le courant de continuité constitué par le débit du fleuve est négligeable, tandis que les mouvements induits par les gradients de salinité ne le sont pas.

- Les phénomènes météorologiques, surtout le vent. Mais le vent local n'est pas le seul facteur météorologique; la baie de Seine est reliée à la Manche qui a sa propre réponse aux vents et au champ de pression atmosphérique dans la région des îles Britanniques: il en résulte une pente de la surface et des courants principaux qui interviennent comme condition à la limite de la baie de Seine (Coeffe *et al.*, 1984).

La topographie du fond joue un rôle important car elle induit une déformation du champ de courant et donc des dérives "purement lagrangiennes". Cet effet est permanent et se manifeste principalement sur les courants instantanés qui sont les plus forts. La marée est donc la source la plus importante de dérive purement lagrangienne. Dans toute la suite, on admettra qu'il est possible de décrire les circulations résiduelles en superposant à la dérive lagrangienne de marée des courants résiduels eulériens induits par les autres facteurs cités précédemment.

4. CIRCULATION RESIDUELLE DE MAREE.

La figure 2 présente à titre d'exemples des champs de courant résiduel lagrangien obtenus par simulations numériques d'une marée-type de vive-eau (Salomon, 1985), pour des heures de départ différentes: il est important

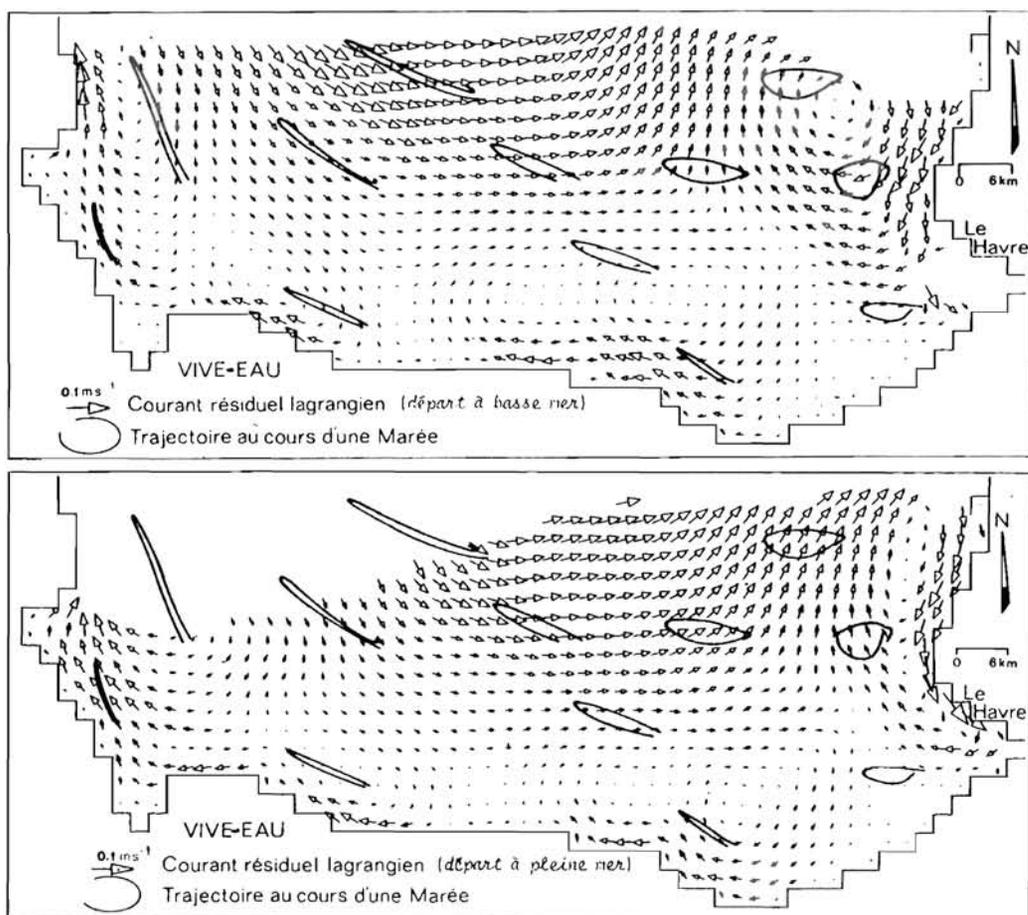


Fig. 2 Simulation bidimensionnelle du courant résiduel lagrangien

de rappeler que le devenir résiduel d'une particule après une marée dépend de la phase initiale de la marée. La différence est sensible dans les zones tourbillonnaires (car les centres des tourbillons se déplacent), en particulier devant la côte du Pays de Caux (à l'est): pour l'environnement le phénomène peut jouer un rôle considérable car un polluant rejeté devant le cap de la Hève pourra avoir un déplacement résiduel vers le nord ou vers le sud selon l'heure de lâcher et selon la proximité de la côte.

Les principales caractéristiques de la circulation résiduelle de marée sont les suivantes :

a) formation de tourbillons côtiers tels que celui de Barfleur induit par le Cotentin ou ceux d'Antifer et de la côte du Calvados. Ceux là sont liés à la compétition entre la vorticité positive créée par le frottement latéral pendant le jusant et la vorticité négative formée de la même manière pendant le flot; le flot étant plus fort que le jusant, il en résulte des tourbillons anticycloniques. Ces structures lagrangiennes mises en évidence par modèle ont des vitesses caractéristiques de 5 cm/s et sont en général confirmées par les mesures eulériennes; ainsi des mesures devant Luc-sur-Mer donnent une résiduelle nord de 6 cm/s compatible avec le tourbillon de Ouistreham indiqué par le modèle. En ce qui concerne le tourbillon de Barfleur, les mesures lui confèrent une importance plus grande que le modèle, probablement parce que la limite de ce dernier est trop proche. D'ailleurs les modèles numériques de la Manche donnent un tourbillon anticyclonique de grande emprise à l'est du Cotentin (Maddock et Pingree, 1977; Lomer, 1978; Le Provost et Fornerino, 1984). Les vitesses résiduelles observées dans ce secteur atteignent 10 à 20 cm/s (Le Hir et L'Yavanc, 1985).

Ces tourbillons entraînent des recyclages de masses d'eau et ainsi augmentent localement leur temps de séjour. Par exemple un calcul de trajectoires indique qu'une particule "lâchée" devant Luc-sur-Mer est retrouvée au large de Ouistreham après 20 jours de simulation (Salomon, 1985).

b) Dérive générale des masses d'eau vers l'est, particulièrement dans la partie nord de la baie où elle atteint 6 à 7 cm/s d'après modèle. Ce résultat n'apparaît pas dans les données eulériennes et n'a donc pas été vérifié; il peut être relié à la propagation vers l'est de l'onde marée. Sa valeur élevée mérite encore un examen plus approfondi qui ne pourra être conclu qu'à l'aide d'un modèle de plus grande emprise et de maille de calcul assez fine.

D'après la figure 2, cette dérive vers l'est concerne la moitié de la baie et entraîne les masses d'eau de l'ouest vers l'est en une vingtaine de jours. Ce schéma est tout à fait compatible avec les couvertures hydrologiques présentées en figure 1 ainsi qu'avec nombre d'images satellites.

Il faut noter que la marée a un effet barotrope et que les courants qui lui sont liés sont schématiquement semblables sur la verticale, sauf peut-être près du fond et des bords, à cause du frottement.

5. CIRCULATION HALINE.

Les apports d'eau douce par la Seine induisent des gradients de salinité et de température qui atteignent respectivement $4.10^{-4}\%$ m^{-1} et 2.10^{-4} $^{\circ}C.m^{-1}$ (fig. 1). Par conséquent, du point de vue hydrodynamique, les effets des gradients de salinité sont largement prédominants. Ces effets sont décrits schématiquement dans une autre communication du présent recueil (Salomon, 1985). Rappelons qu'un gradient horizontal de densité induit un courant giratoire de la surface vers le fond, dirigé au fond vers les eaux les moins denses et en surface vers le large avec une déviation sur la droite due à la géostrophie. Compte tenu de la disposition des isohalines dans la partie orientale de la baie, on y obtient des courants convergents vers l'estuaire

au fond et globalement vers le nord-ouest en surface. Une mesure de fond réalisée à 15 km de l'embouchure de la Seine pendant deux mois d'hiver donne effectivement une vitesse moyenne de 6 cm/s vers l'est.

Afin de prendre en compte les déplacements des isohalines au cours d'un cycle de marée, nous avons calculé la structure verticale des courants en résolvant numériquement les équations résultant de la soustraction des équations de Saint-Venant aux équations de Navier-Stokes (Le Hir, 1980). La distribution des salinités est calculée à l'aide d'un modèle bidimensionnel horizontal, et le profil de viscosité choisi parabolique. Les résultats présentés sur la figure 3 confirment le schéma de circulation haline décrit plus haut avec des vitesses de l'ordre de 5 cm/s pour un gradient horizontal de densité égal à $6.10^{-7} m^{-1}$. De plus l'effet de la topographie est évident: effectivement, dans les équations du mouvement, les termes de densité varient comme le carré de la profondeur.

6. CIRCULATION INDUITE PAR LE VENT.

Il est impossible de bien décrire la circulation liée à la météorologie sans prendre en compte la réponse de la Manche aux vents et gradients de pression atmosphérique à grande échelle. Cependant, une simulation locale permet de comprendre la manière dont la baie réagit à un vent type et d'évaluer la durée et l'échelle des vitesses induites. C'est dans cet esprit que nous avons utilisé le modèle à 3 dimensions décrit par ailleurs (Thouvenin et Salomon, 1984).

La condition limite adoptée est celle d'un régime permanent hypothétique: dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement écrite parallèlement à la limite nord, on suppose un équilibre entre la pente de la surface, les contraintes en surface et au fond et la force de Coriolis. De plus l'interaction avec la marée n'est pas prise en compte. Nous avons réalisé un test pour lequel la contrainte sur le fond intègre un effet de marée de vive eau: les résultats convergent plus rapidement, avec des écarts de dénivellations de surface de 10 à 20% et des vitesses 30 à 50% plus faibles, mais les schémas de circulation décrits plus loin restent sensiblement les mêmes. Il faut remarquer que l'étude de l'effet du vent réel couplé à la marée nécessite un nombre impressionnant de calculs qui sont rendus vains par la méconnaissance des conditions à la limite.

Les simulations présentées en figure 4 correspondent à des champs uniformes de vents atteignant 15 m/s en 3 heures et se stabilisant. Un régime quasi permanent est atteint après 7 à 10 heures, sauf pour les vents d'est où se manifeste une oscillation du bassin (probablement à cause de l'effet Coriolis à la limite nord, qui n'agit pas de façon symétrique par vent d'est et par vent d'ouest). Mais en moyenne on observe une réponse à peu près inverse de la baie à des vents de directions opposées.

Par ailleurs, des effets de topographie sont mis en évidence :

- accélération des courants par faible profondeur (côtes du Calvados et du

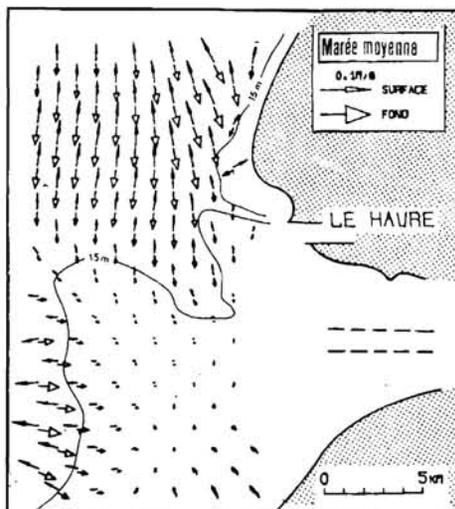


Fig. 3 : Simulation des fluctuations selon la verticale des courants de densité.

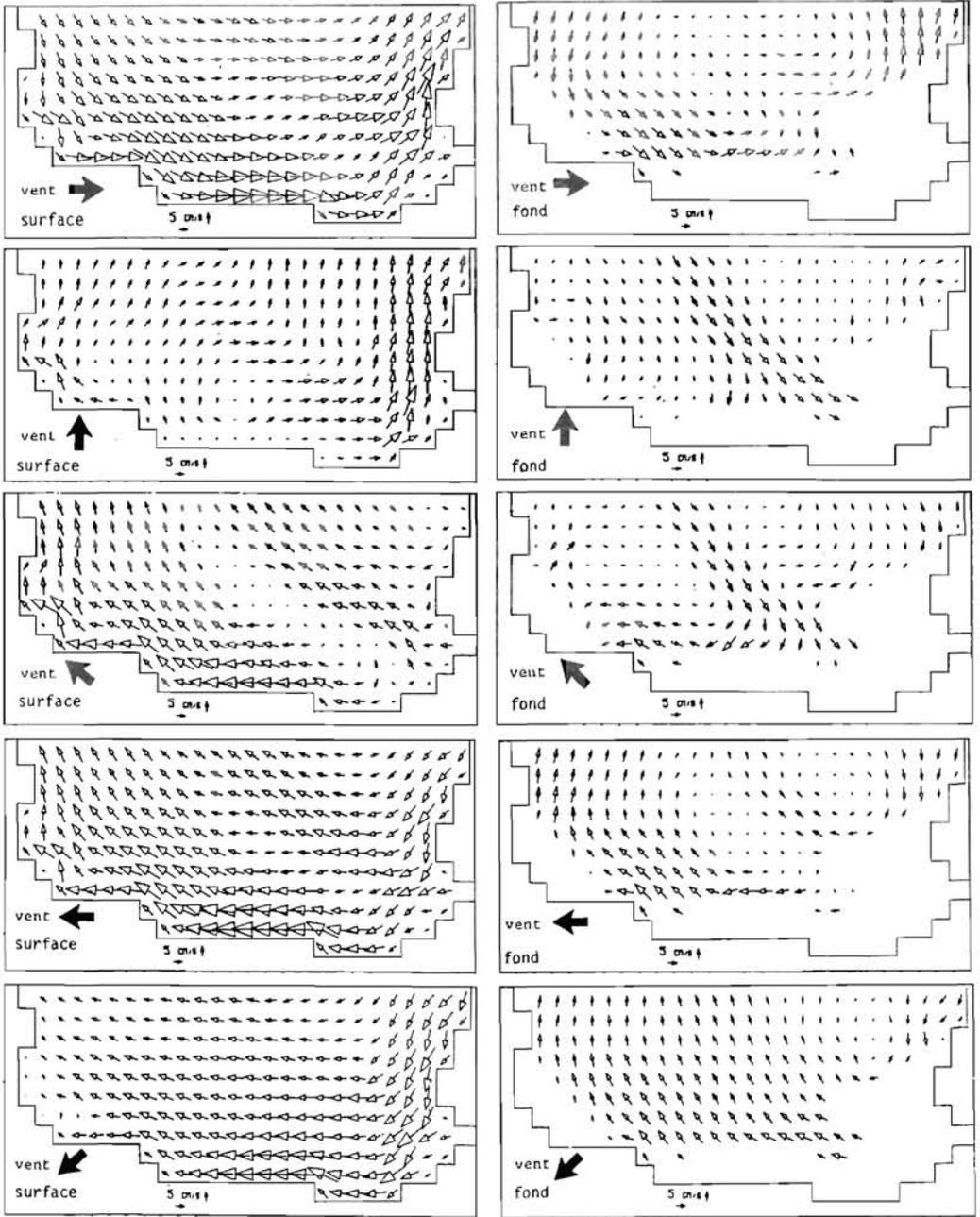


Fig. 4 : Simulations tridimensionnelles du vent en baie de Seine.

Pays de Caux): il en résulte une dissymétrie entre l'ouest et l'est où des vitesses très fortes sont atteintes (0,2 m/s pour un vent de 30 noeuds), - présence fréquente d'un courant de retour au fond de la paléovallée de la Seine accompagné en surface d'une réduction des vitesses (pour des vents S-W, W, N-W, N-E, E et S-E) ou d'une déviation par rapport au lit du vent (vents S et N).

Ces résultats sont en assez bon accord avec les mesures de courant. Les fluctuations de vitesses observées au fond de la paléovallée de la Seine sont opposées au vent (avec des vitesses de 3 cm/s pour des vents de 10 m/s) (fig. 5). De même les courants mesurés en surface devant le cap de la Hève (Le Hir et L'Yavanc, 1985) sont-ils forts (30 cm/s par vent de 10 m/s) et dirigés vers le N-NE pour des vents de secteur S, S-W, W, N-W et vers le S pour des vents N à E.

Les simulations autant que les mesures indiquent des vitesses induites par le vent souvent bien supérieures aux vitesses résiduelles moyennes (10 à 30 cm/s contre 5 cm/s): ainsi le vent peut avoir un effet important sur la circulation résiduelle alors qu'en moyenne sur une longue période il est presque nul. Par exemple, un vent d'ouest (fréquent) de 15 m/s peut transporter les eaux de surface de la Hève à Antifer en 1,5 j. et perturber considérablement les temps de séjour des eaux douces ou autres effluents.

7. SCHEMA GLOBAL DE LA CIRCULATION MOYENNE.

Nous avons représenté sur la figure 6 une solution de synthèse des résultats obtenus en termes de circulation résiduelle. Rappelons les principaux éléments du schéma de circulation :

- dérive vers l'est dans le centre nord de la baie, avec pénétration des eaux de la Manche par l'ouest et sortie vers nord-est,
- tourbillon anticyclonique devant Barfleur,
- courant côtier vers l'ouest devant la côte du Calvados.
- tourbillon anticyclonique devant le pays de Caux, favorisant la sortie de la Seine par le nord-ouest et la limitant près de la côte. La position géographique et l'intensité de cette sortie d'eau étant moins précisées que ne l'indique la figure 6, on a placé des points d'interrogations à cet endroit.
- dans la moitié est de la baie : convergence des eaux du fond vers l'estuaire de la Seine, et sortie des eaux douces principalement vers le nord ouest (mais aussi vers le nord et l'ouest). Ces masses d'eau viennent ensuite lécher la côte à partir d'Antifer.
- Perturbation de ce schéma à partir d'un vent de 5 m/s. En particulier de très fortes vitesses peuvent être observées en surface devant la côte entre la Hève et Antifer, et devant le plateau du Calvados. Enfin un contre courant de fond se forme assez fréquemment dans la paléovallée de la Seine.

Bien entendu, ces tendances de circulations moyennes qui parfois sont contraires doivent être modulées en fonction de paramètres représentatifs des phénomènes physiques à la source (coefficient pour la marée, débit de la Seine pour la circulation haline et force du vent pour les effets de la météorologie).

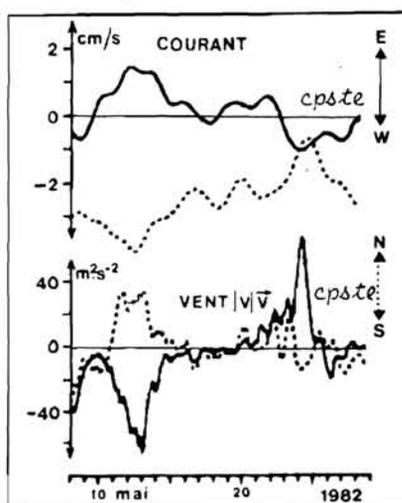


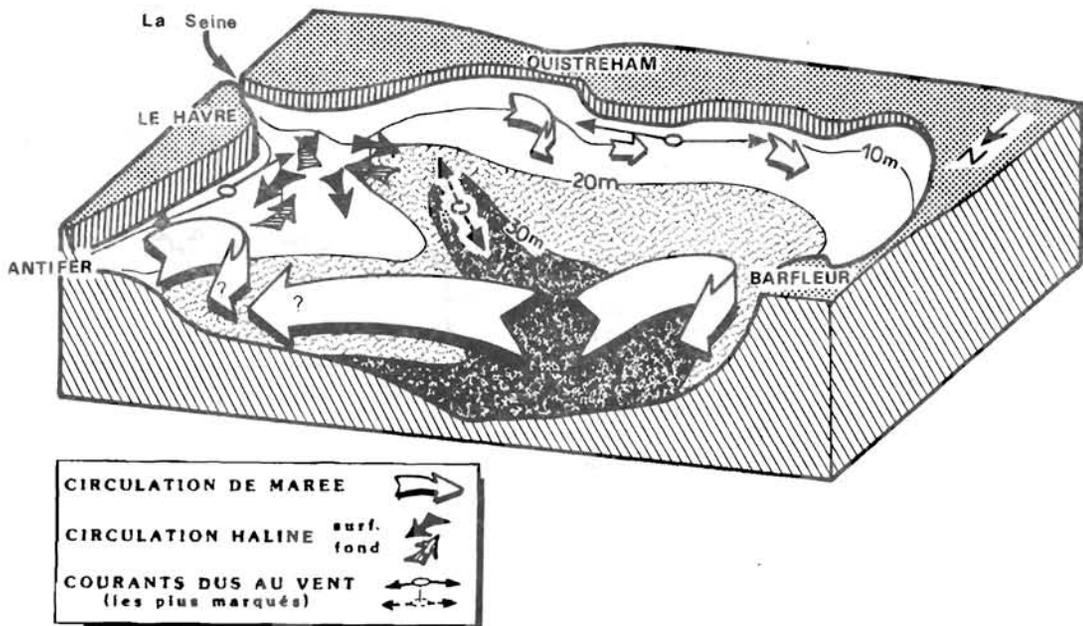
Fig. 5.- Evolution simultanée du vent et du courant résiduel mesuré au fond dans la paléovallée de la Seine.

8. CONCLUSION.

L'ensemble des études réalisées en Baie de Seine a permis d'établir un schéma des circulations résiduelles induites par trois phénomènes majeurs: la marée, les apports d'eau douce et les événements météorologiques. L'utilisation conjointe de divers moyens d'investigation (mesures courantologiques de longue durée, modèles numériques bi et tridimensionnels, calculs analytiques, hydrologie, télédétection) a donné des résultats en général cohérents et ainsi permet d'accorder une certaine confiance aux résultats présentés. Ces résultats sont en général en bon accord avec ceux des modèles de plus grande emprise cités dans la bibliographie. Ils les complètent et les précisent.

Cependant, il serait probablement opportun de confirmer certains aspects de la circulation lagrangienne à l'aide de quelques suivis de flotteurs pendant plusieurs jours: on peut citer la sortie des eaux de la Seine, la dérive vers l'est au centre de la baie et le recyclage éventuel des eaux au large de Ouistreham. De plus, il faut remarquer qu'un modèle numérique à mailles fines mais d'emprise plus grande que la baie permettrait de mieux préciser les échanges de masses d'eau avec la Manche orientale.

Fig. 6 BAIE DE SEINE SCHEMA DE CIRCULATION RESIDUELLE



Coeffe, Dalsecco, Esposito, Latteux (1984).- A finite element method for storm surge and tidal computations. 19th ICCE - Houston.

Le Hir P. (1980).- Calcul par modélisation numérique de la structure verticale des courants et application à la baie de Seine. Thèse de doct. Ing. Université de Bretagne Occidentale.

Le Hir P. & L'Yavanc (1985).- Observations de courant en Baie de Seine. Ce volume, N° 1.

- Le Provost C. & Fornerino M. (1984).- Les courants résiduels dans un modèle bidimensionnel de marées littorales. Société hydrotechnique de France. Compte Rendu XVIIIe Journées de l'Hydraulique. Marseille.sept. 84.
- Lomer F. (1978).- La dérive en mers à marée. Thèse de doct. Ing. Université P. & M. Curie, Paris VI.
- Maddock L. & Pingree R.D. (1977).- Tidal residuals in the English Channel. J. Mar. Biol. Ass. U.K. 57 (2) pp. 339-354.
- Salomon J.C. (1985).- Courantologie calculée en Baie de Seine. Ce volume, N°2.
- Thouvenin B. & Salomon J.C. (1984).- Modèle 3-D de circulation et de dispersion en zone côtière à marée. 1ers essais: cas schématique et Baie de Seine. Océanologica Acta 1985. Vol. 7 n° 4.

NOTE - Les données météorologiques utilisées pour la comparaison entre vent et courant ont été aimablement fournies par le Service de Climatologie Marine de la Direction de la Météorologie.