

DYNAMIQUE DES EAUX : SYNTHÈSE DES DISCUSSIONS

CHABERT D'HIERES G. \*

La discussion qui a suivi les exposés du thème n° 1 "Dynamique des eaux" a été brève. Le sujet était centré sur la connaissance des déplacements des masses d'eau à long terme (plusieurs jours, à quelques mois) sous les effets des mouvements de marée le long des limites et dans le domaine de la baie de Seine, de l'intrusion des eaux douces et turbides de la Seine et des vents. Toute question relative à ce thème nécessitait un développement scientifique très long qui ne pouvait être traité convenablement dans le temps disponible. Cinq interventions doivent être mentionnées ici, les autres se rapportant au sujet ayant été faites lors de la discussion des thèmes II et III. Ceci montre l'intérêt porté par les chercheurs des autres disciplines envers la connaissance de la dynamique du milieu. MM. J.C. Salomon et C. Le Provost ont apporté un complément d'explication qui illustre les notions de dérivées eulérienne et lagrangienne lors de l'expression des courants résiduels. Nous reproduisons ici in extenso le texte que ces auteurs ont proposé.

Complément par M. J.C. Salomon

(Communication "Courantologie calculée en Baie de Seine")

Des analyses complémentaires de la circulation résiduelle en Baie de Seine, présentées oralement, et une discussion abondante avec l'assistance du colloque, ont amené l'auteur de la communication à rappeler quelques définitions et à développer les arguments suivants :

- on appelle vitesse résiduelle d'Euler ( $\vec{V}_{rE}$ ), la moyenne des vitesses mesurées (ou calculées) au point fixe, durant une période de temps longue :

$$\vec{V}_{rE}(x_0, y_0) = \frac{1}{T} \int \vec{V}(x_0, y_0, t) dt \quad (1)$$

- on appelle vitesse résiduelle de Lagrange ( $\vec{V}_{rL}$ ), la moyenne des vitesses mesurées (ou calculées) d'une particule d'eau au cours de son déplacement, durant une période de temps longue :

$$\vec{V}_{rL}(\alpha) = \frac{1}{T} \int \vec{V}(t) dt \quad (2)$$

$\alpha$  : désigne la particule qui a été choisie.

$\vec{V}_{rE}$  est une entité mathématique qui n'a pas de réalité physique, tandis que  $\vec{V}_{rL}$  représente réellement le déplacement des particules d'eau, à long terme, c'est-à-dire la circulation.

La méthode habituelle de mesure des courants à l'aide de courantmètres disposés au point fixe, ne permet pas d'accéder à cette quantité lagrangienne, d'où parfois la tentation de confondre les deux grandeurs (Euler et Lagrange), ce qui est la source d'erreurs d'interprétation.

La différence entre  $V_E$  et  $V_L$  s'appelle la vitesse de Stokes.

Un raisonnement mathématique simple permet d'évaluer l'ordre de grandeur de ce terme. Par un développement de Taylor au premier ordre on peut écrire l'expression approchée suivante :

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

$$V_{rL} \simeq V_{rE} + \int_T \left[ \begin{array}{l} t' \\ t_0 \end{array} \vec{V}(x_0, y_0, t'') dt'' \cdot \vec{\nabla} \vec{V}(x_0, y_0, t') \right] dt \quad (3)$$

terme de Stokes

On constate que le terme de Stokes fait intervenir l'intensité du courant instantané (c'est-à-dire la dimension de l'excursion de marée) et l'intensité du gradient horizontal des vitesses instantanées. Ces deux grandeurs sont *importantes en milieu côtier*, il importe donc de ne pas confondre  $V_{rE}$  et  $V_{rL}$ , et de ne pas employer l'expression "circulation résiduelle d'Euler" qui est dépourvue de sens.

Au prix d'hypothèses supplémentaires sur les caractéristiques des champs de vitesses instantanées, on peut évaluer la composante de Stokes dans quelques cas particuliers à l'aide de la formule 3 :

Supposons, par exemple, que le module de  $\vec{V}$  soit constant et que les champs de courants eulériens ne traduisent que la différence de phase due à la propagation d'une onde progressive; on déduit :

$$V_{rStokes} = V_0^2 / 2C$$

où  $V_0$  est le module du courant instantané  
 $C$  est la célérité de l'onde  $\simeq \sqrt{gH}$

Pour des ordres de grandeur caractéristiques des littoraux de la Manche ( $V_0 = 1$  m/s et  $H = 10$  m), la vitesse résiduelle de Stokes vaut 5 cm/s.

Cette valeur apparaît comme une sorte de nombre d'or en matière de circulation résiduelle de marée en zone côtière. Elle signifie que, lorsque les hypothèses simplificatrices qui ont été énoncées plus haut s'appliquent, la vitesse résiduelle lagrangienne se déduit de la vitesse résiduelle eulérienne en ajoutant un vecteur de 5 cm/s dirigé dans le sens de propagation de l'onde de marée. Quiconque a étudié la circulation résiduelle en divers points de nos littoraux reconnaîtra la réalité physique de cette quantité que l'on retrouve comme une sorte d'invariant physique.

Ces considérations théoriques sont générales, mais leur application correspond à des hypothèses simplificatrices qu'il convient de confronter aux réalités locales. On essaiera donc, chaque fois que possible, d'employer la relation n° 2 et non pas la relation n° 3.

On pourra procéder de deux manières :

- expérimentalement, en utilisant des flotteurs drogués qui suivent les déplacements de la masse d'eau. Il convient d'en utiliser un assez grand nombre pour obtenir un champ de circulations qui soit représentatif, ce qui revient à effectuer des mesures nombreuses et coûteuses.

- Par le calcul, on simulera la trajectoire de particules d'eau fictives à partir des champs de vitesses d'Euler, tels qu'ils sont donnés par les modèles mathématiques.

Une évaluation convenable de ces trajectoires à partir de modèles qui fournissent l'information sous forme "discrète" nécessite que l'excursion de marée soit définie par un nombre de points assez important (5 semble être un minimum). Cela signifie que *seuls les modèles mathématiques à maille fine peuvent fournir la circulation à long terme* des masses d'eau et par voie de conséquence, permettre de traiter les problèmes d'advection/dispersion de substances dissoutes.

Dans le cas de la baie de Seine, où les excursions de marée sont de l'ordre de 10 km, une maille de calcul de 2 km est la limite au-dessus de laquelle il n'est plus envisageable d'obtenir un schéma de circulation lagrangien (tel que celui qui est présenté dans la communication de l'auteur, fig. 4) qui soit correct.

La figure suivante montre une carte des composantes de Stokes ainsi obtenue, où la circulation vers l'est apparaît particulièrement nette :

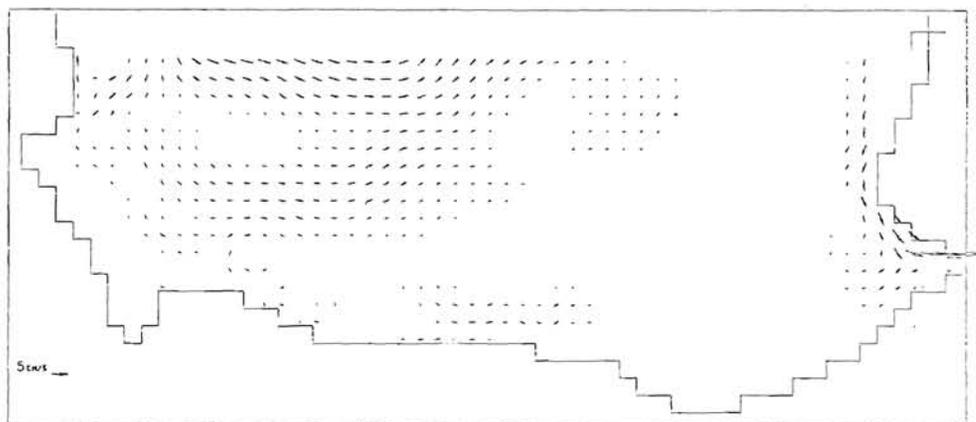


Figure 1.- Courants résiduels de Stokes.

On conçoit bien que ce champ de vecteurs de Stokes, ajouté à un champ de courants résiduels eulériens tel qu'il est présenté dans la communication de Le Hir et l'Yavanc, fig. 6, conduisent à une circulation des masses d'eau fortement différente du champ d'Euler. Le grand tourbillon anticyclonique eulérien qui affecte la moitié (environ) de la baie de Seine, se trouve réduit en terme de circulation de Lagrange par un facteur 2 ou 3, et limité à la partie la plus occidentale de la baie, ce qui est représenté fig. 7 de la communication sur la courantologie calculée en Baie de Seine.

Ainsi se trouve levée l'apparente contradiction présentée par les schémas de courants eulériens et la répartition de traceurs conservatifs (fig. 2, d'Aminot, Le Guellec et Mauvais), qui montrent une pénétration des eaux marines préférentiellement à proximité du Cotentin.

La fig. 6 de la communication de Le Hir, Salomon *et al.* propose un schéma de circulation conforme à ces indications.

En conclusion, l'auteur souhaite que l'exemple de la baie de Seine contribue à convaincre les chercheurs qui travaillent en milieu côtier de ne pas se laisser abuser par des champs de courants résiduels d'Euler, mais au contraire de rechercher systématiquement des circulations de Lagrange.

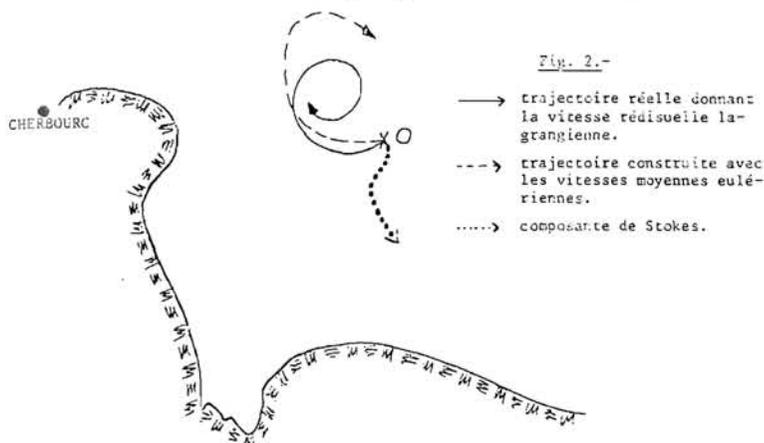
#### Complément par M. C. Le Provost

Pour illustrer les différences pouvant exister entre dérives "eulériennes" et dérives "lagrangiennes", nous avons réalisé une expérience utilisant les résultats de notre simulation de 1 mois de marée sur la Manche. Les résultats ne sont certes qu'indicatifs, car ils ont été obtenus à partir des informations fournies par notre modèle de maille de 10 km, insuffisante donc pour garantir quantitativement les résultats ci-dessus.

A partir d'un point, à l'origine dans le tourbillon de Barfleur, nous avons lâché une particule et suivi sa trajectoire au cours du temps sur 25 jours. Sur la figure 2, nous avons reporté cette excursion (trait continu), correspondant à la dérive lagrangienne (dans ce graphique, la variabilité à l'échelle de chaque marée a été éliminée du tracé afin de ne pas surcharger la figure et nous n'avons pointé la position de la particule qu'une fois par marée, périodiquement).

Dans cette zone, nous connaissions a priori, par analyse des résultats de notre simulation, le champ moyen de la dérive eulérienne résiduelle. Nous avons tracé la trajectoire d'une particule qui aurait transité dans ce champ (fig. 2, dérive eulérienne). Enfin, nous avons reporté sur le schéma

la dérive de Stokes, que subirait la particule lâchée au même point, dans le champ de courant instantané calculé, mais duquel on a retranché a priori la composante résiduelle eulérienne. (fig. 2, dérive de Stokes).



On constate sur cet exemple que la dérive de Stokes est à  $90^\circ$  de celle d'Euler et que la dérive lagrangienne "réelle" conduit en conséquence à un mouvement tourbillonnaire nettement plus réduit que le tourbillon eulérien de Barfleur (donné par notre modèle) ne le laisse penser a priori.

#### Commentaire :

L'intervention de J.C. Salomon met bien en évidence la notion de vitesse de Stokes qu'utilise C. Le Provost. Ce dernier montre bien le résultat après 25 jours de fonctionnement du système. L'exemple de calcul appliqué donné par J.C. Salomon donne un ordre de grandeur de la vitesse résiduelle accompagnant une onde longue cylindrique et progressive par 10 m de fond. Mais il serait préférable de prendre une onde partiellement stationnaire oscillant sur des fonds de 35 m. L'ordre de grandeur trouvé serait alors différent. Il serait par contre bon de rajouter la prise en compte des effets des frottements latéraux engendrant une vorticité qui elle-même engendre le tourbillon de Barfleur. Le sujet devient très complexe.

Les autres interventions portent :

- sur la cohérence de tous les résultats (P. Le Hir) (mesures *in situ* et modèle) tendant à prouver l'existence du tourbillon de Barfleur.
- Sur la mesure des courants résidentiels lagrangiens à l'aide de flotteurs (C. Latouche). Cette mesure pourrait-elle apporter des éléments de réponse à la controverse Lagrange-Euler? On doit employer simultanément un grand nombre de flotteurs, et par moyennes statistiques, mesurer le déplacement le plus probable pour éliminer les effets de la turbulence de l'écoulement de marée. Cette mesure est donc complexe, mais elle peut donner la valeur de l'erreur que l'on fait en considérant les courants eulériens à la place des courants lagrangiens.
- Sur l'application de ces notions aux phénomènes de diffusion (M. Bélorgey). La notion de vitesse d'Euler est plus commode, mais la notion exacte est celle de Lagrange matérialisée par variation de distance de deux flotteurs représentant celle de deux particules d'eau. La distance initiale des deux flotteurs fixe l'échelle de la turbulence que l'on prend en compte.

Il s'agit là de la prise en compte des effets de la turbulence. Les équipes du GRECO Manche se sont plutôt attachées à éliminer ces effets en effectuant les lissages appropriés. Mais il est bien entendu que la part de la dispersion dans le phénomène de transport à long terme des masses d'eau est aussi à prendre en compte. La connaissance des courants résidentiels est toutefois primordiale.

Les interventions faites aux cours des discussions des autres thèmes ont toujours été axées sur l'existence et la position géographique des sorties des eaux de la baie entraînant les eaux de la Seine dans la région et au-delà d'Antifer. Les avis sont encore partagés. Seule une modélisation numérique fine et exacte du système pourra permettre de conclure.

A ces champs de courants résiduels, supposés connus, il faudra rajouter, suivant les avis de MM. Khalanski, Migniot, Caillot, Bélorgey, Temperville et Chabert d'Hières, les effets des houles, des conditions météorologiques et fluviales, moyennes et exceptionnelles.

Les recherches sur la houle et plus généralement sur les modèles de transport en zone côtière sont à développer. Les études de couche limite et de turbulence sous la houle sont abordées à l'Institut de Mécanique de Grenoble et à l'Université du Havre. Il est nécessaire d'y rajouter les études :

- de courants engendrés par la houle,
- de modifications apportées par les courants à la houle et notamment les effets de décambrure et de cambrure suivant que le courant est de même sens ou de sens opposé à la direction de propagation de la houle,
- de la contribution de ces effets du courant lui-même (variation du coefficient de frottement), à la turbulence et à la vitesse instantanée du courant sur le fond.

Les problèmes de fronts latéraux de la veine turbide des eaux de la Seine sont importants mais n'ont pas été largement abordés.

sont rapportés dans les communications présentées à ce colloque, je m'efforcerais d'en dégager l'essentiel en soulignant les acquis majeurs et en indiquant les questions qui restent posées. Les différents points abordés concernent les apports fluviaux, la dynamique estuarienne et le régime hydrosédimentaire de la baie de Seine sachant que les relations de cette dernière avec le domaine ouvert de la Manche ont été peu étudiées sur le plan de la dynamique des suspensions et des dépôts.

## 1. LES APPORTS FLUVIAUX

Seule la Seine a fait l'objet d'études récentes et quantifiées à ce sujet. L'intéressante synthèse présentée par Avoine mériterait d'être complétée par des données comparables sur les rivières de la Calvados afin d'établir le bilan de tous les apports à la baie de Seine.

Les résultats rapportés par Avoine se basent sur les mesures effectuées à Poses; c'est-à-dire à 160 kilomètres en amont de l'embouchure de la Seine. Pour la période 1960-1984, le débit moyen annuel du fleuve fut de 435 m<sup>3</sup>/s avec pour extrêmes 240 m<sup>3</sup>/s en 1964 et 625 m<sup>3</sup>/s en 1983; les débits instantanés variant de 100 m<sup>3</sup>/s à 2000 m<sup>3</sup>/s environ.

La charge solide transportée en suspension est fonction du débit fluvial mais il apparaît que les plus fortes concentrations se rencontrent lors de la première crue après une longue période de faibles débits. De plus, les eaux sont plus turbides durant la phase ascendante des crues qu'au maximum de débit ou que durant la phase descendante. Les 3 courbes présentées à titre d'exemple par Avoine (ce colloque) illustrent clairement ces relations sachant que l'intervalle entre les crues influe également sur les concentrations relevées. Des résultats comparables ont été obtenus en Loire, en Gironde; ils semblent caractéristiques des rivières de régions tempérées. Dans ces conditions, les teneurs en matières en suspension (M.E.S.) varient sur une très large gamme, de 3,3 mg/l à 267 mg/l et les apports solides durant la phase ascendante des crues représentent à eux seuls, en 20 jours, 50% des apports annuels qui s'élevaient en moyenne à 500 000 tonnes, l'éventail des valeurs moyennes étant compris entre 200 000 et 1 000 000 tonnes. C'est un bilan fort modeste qui correspond à un taux d'érosion de 7,5 tonnes/km<sup>2</sup>, soit un arasement du bassin versant de l'ordre de 4 mm/millénaire. La Seine est donc une rivière sénile. Signalons ici que les apports annuels de l'Orne sont de 10 000 à 25 000 tonnes (Dubrulle, 1982).

Les apports en métaux, à l'état dissous et particulaire, ont été calculés à partir des analyses effectuées depuis 1976 à la Bouille, 100 km en amont de l'embouchure, par la Cellule anti-pollution du Service de Navigation de la Seine. Les apports moyens annuels en métaux dissous ont été évalués sur la base du débit fluvial moyen de 435 m<sup>3</sup>/s. Les résultats fournis par Avoine indiquent pour la Seine des teneurs relativement élevées en Zn, Pb, Cu et surtout Ni et Cd. Les apports à l'état particulaire ont également été chiffrés, ils révèlent une contribution anthropique importante de l'ordre de 95% pour Hg, Cu, Cd, Zn, de 85% pour Ni, Pb, Cr, de 70% pour Mn, Co, V, moins de 50% pour Fe et Ti sachant que les teneurs naturelles sont très basses dans le bassin sédimentaire de la Seine. Il ressort également que la phase particulaire associée au matériel en suspension est largement dominante pour de nombreux métaux à l'exception de Ni et surtout de Hg et de Pb dont la nocivité est bien connue. De tels résultats quantitatifs manquent pour les autres rivières tributaires de la baie. On sait cependant que les apports de l'Orne sont relativement chargés en Fe, Mn, Zn, Cu, Cr et Ni tandis que ceux des rivières de la baie des Veys sont peu élevés dans l'ensemble et marqués par Ni et Cd (Dubrulle, 1982; Dubrulle et Larssonneur, 1984).

## 2. LA DYNAMIQUE ESTUARIEENNE

Avant de parvenir à la mer les apports des rivières sont soumis à une dynamique estuarienne de régime macrotidal qui contrôle le mouvement des masses d'eau et des sédiments, régit les processus de dépôt et de remise en suspension, induit des modifications physico-chimiques du matériel transporté. Aux importantes études réalisées sur l'estuaire de la Seine depuis 1978 (Avoine, 1981 et 1982; Avoine *et al.*, 1981) sont venus s'ajouter des travaux récents sur l'estuaire de l'Orne (Dubrulle, 1982) et sur le couple estuarien de la baie des Veys (Dubrulle et Larssonneur, 1984). Une synthèse des résultats est présentée à ce colloque par Avoine, Dubrulle et Larssonneur dans le but de dégager les principaux caractères du fonctionnement estuarien en milieu macrotidal.

Le marnage en baie de Seine varie en effet de 3 m à 7,5 m et les marées jouent un rôle déterminant sur la dynamique estuarienne. Suite au frottement sur les petits fonds de la baie, l'onde sinusoïdale de marée se déforme et devient asymétrique dans les couloirs estuariens. La durée du montant est alors plus courte que la durée du perdant et une tenue du plein de 2 h à 2 h 30 apparaît autour de la pleine mer. Cette altération de la courbe de marée s'accroît vers l'amont et s'accompagne d'une asymétrie des courbes de vitesses de courant : le flot dure moins longtemps mais s'installe plus brutalement que le jusant. De plus, ce dernier se concentre dans le chenal principal, de telle sorte que les calculs de vitesses résiduelles font généralement apparaître là un mouvement vers l'aval à toutes profondeurs. La circulation étagée avec courants résiduels vers l'amont au fond et vers l'aval en surface ne prend place que dans les embouchures. Ainsi, le point nodal de circulation se situe-t-il très en aval de la limite de l'intrusion saline. Ce schéma diffère de celui des estuaires microtidaux où la circulation résiduelle induite par les courants de densité s'observe dans toute l'étendue de l'intrusion saline. Dans les chenaux secondaires (Seine) et sur les berges, l'influence dominante du flot détermine, par contre, des résultantes dirigées vers l'amont.

Ces actions hydrodynamiques contrôlées par le jeu des marées et particulièrement bien marquées en vive-eau et en étiage jouent un rôle déterminant sur les processus de remise en suspension, de transport et de dépôt des sédiments. Le *bouchon vaseux*, souvent très turbide, résulte essentiellement de remises en suspension au flot et au jusant; les décantations qui se produisent à l'échelle de pleine mer le font presque entièrement disparaître. Ces alternances de gonflement-dégonflement, particulièrement bien développées en vives-eaux, s'accompagnent d'un mouvement de va-et-vient au cours de la marée, de 10 à 20 km selon la dimension des estuaires. Ce modèle d'évolution du bouchon vaseux en régime macrotidal diffère nettement de celui qui s'observe dans les estuaires microtidaux où la masse de matières en suspension varie peu au cours du cycle de marée. On relève en outre dans ces derniers, ceux de la côte Est des Etats-Unis notamment, un important gradient de turbidité de la surface au fond, alors que les fortes turbulences du régime macrotidal tendent à homogénéiser les eaux.

Les cycles lunaires, vives-eaux-mortes-eaux, se traduisent par des variations importantes des vitesses de courants et par conséquent des possibilités de remise en suspension des sédiments. En vives eaux, les charges en M.E.S. peuvent être 20 fois supérieures à ce qu'elles sont en mortes-eaux. C'est également là une particularité des estuaires macrotidaux; ces variations cycliques des teneurs en M.E.S. ne se rencontrent pas en régime microtidal. Il convient de souligner que la crème de vase, identifiée dans certains estuaires macrotidaux comme la Gironde (Allen *et al.*, 1975) ou la Loire (Galenne, 1974), n'a pas été rencontrée en baie de Seine. Cela résulte probablement de la nature relativement grossière, silto-sableuse, du matériel transporté en suspension dans les estuaires considérés.

En outre, la position et la concentration du bouchon vaseux sont influencées par le débit fluvial. En étiage, sous l'influence prépondérante du flot, le matériel fin remonte vers l'amont et la masse des sédiments en suspension dans le bouchon vaseux est maximale. En crue par contre, le jusant renforcé du courant fluvial déplace le bouchon vaseux vers l'aval jusqu'à son expulsion partielle en mer. Il en résulte une diminution de la quantité de M.E.S. stockée dans l'estuaire. Ce mode de fonctionnement se distingue là encore de celui des milieux microtidaux où le bouchon vaseux cantonné dans la partie amont est d'autant mieux développé que le débit fluvial est élevé.

Dans ces conditions, des *envasements* importants se produisent à l'intérieur de l'estuaire en étiage, notamment dans la partie amont. L'origine marine des sédiments est alors prouvée par certains oligoéléments métalliques utilisés comme traceurs, les radionucléides notamment comme le soulgneit Auffret *et al.* dans le cas de l'Orne (ce colloque). Ces longues périodes de faibles débits sont également favorables aux apports sablo-silteux dans la partie inférieure de l'estuaire sous l'action conjuguée des houles et des courants de marée. En crue, les envasements intéressent les zones d'embouchures et le proche horizon marin: avant-port de Caen-Ouistreham, port du Havre et ses abords, banc du Ratier par exemple. Il reste que le bilan sédimentaire des milieux considérés est positif, les estuaires de la baie de Seine se colmatent. Celui de l'Orne, ceux de la baie des Veys sont presque entièrement comblés. Bien que considérablement réduit, celui de la Seine est encore le moins évolué (Auffret et d'Ozouville, ce colloque).

Compte tenu du degré de colmatage des estuaires, des endiguements existants et de la dynamique du bouchon vaseux en fonction du débit fluvial, le *temps de résidence* des eaux douces est très court en période de crue (de quelques heures à quelques jours selon la dimension des estuaires), alors qu'en étiage il peut atteindre plusieurs semaines voire quelques mois. Dans ces conditions de faibles débits, il est classique d'observer un enrichissement de la phase dissoute pour de nombreux métaux au niveau du bouchon vaseux résultant du remaniement des fonds sous l'action des courants de marés (Boust, 1981). En crue, les courts temps de résidence expliquent la relative homogénéité de la fraction dissoute dans l'ensemble de l'estuaire. En ce qui concerne le temps de résidence du matériel particulaire, un problème se pose, celui du stockage sur les aires de sédimentation dans les estuaires, temporaire ou définitif. Dans l'état actuel des connaissances, on peut seulement comparer les apports fluviaux au matériel présent en suspension dans le bouchon vaseux. Ce dernier représente pour la Seine 0,4 à 2 ans des apports annuels (Avoine *et al.*, 1984). Il faut toutefois souligner que le renouvellement du stock peut être très rapide (5 jours en crue en 1983), alors qu'il atteint plusieurs mois en étiage. Cette différence dans les temps de renouvellement ou de résidence du matériel sédimentaire dans l'estuaire est fondamentale à considérer pour rendre compte des échanges qui se produisent à la transition eau douce-eau salée. Ces derniers ne sont pas encore suffisamment connus pour établir des bilans complets d'exportation entre les estuaires et le large. Il apparaît toutefois qu'il s'agit plus de zones de transit que de stockage, ce rôle ayant été accentué par les aménagements (Avoine *et al.*, 1981 et 1984). Enfin, le caractère macrotidal des milieux considérés, par les turbulences et le brassage qui lui sont associés, conduit à des taux de pollution relativement modérés dans l'ensemble, malgré des apports assez élevés pour diverses substances (Avoine, Dubrulle et Larssonneur; Guéguénat, Boust *et al.*, ce colloque).

### 3.- LE REGIME HYDROSEDIMENTAIRE DE LA BAIE DE SEINE

La baie de Seine se trouve à l'interface entre une mer à très forte énergie, la Manche et un bassin versant assez vaste, drainé par plusieurs rivières, principalement la Seine, qui rassemblent des eaux chargées de polluants

d'origine industrielle, agricole et urbaine et qui possèdent un estuaire. Les mouvements des masses d'eau y sont importants dans un cadre morphologique simple de telle sorte que nous avons là un domaine marin exemplaire, susceptible d'éclairer à l'échelle mondiale les processus physiques, chimiques, biologiques qui s'exercent en milieu à hydrodynamisme élevé. L'un des principaux objectifs du programme baie de Seine fut de s'attacher à son fonctionnement hydrosédimentaire, sachant que la partie orientale qui reçoit la Seine, l'Orne, la Dives et la Touques fut étudiée en priorité. Les résultats les plus nombreux concernent aujourd'hui cette zone.

### 3.1. L'influence des apports fluviaux en Baie de Seine :

L'impact des eaux douces se manifeste surtout dans la partie orientale de la baie où débouchent les principales rivières. Partant de là, les eaux dessalées s'écoulent d'une part vers l'Ouest, d'autre part vers le Nord déterminant une stratification de densité particulièrement marquée en crue. Il en résulte une circulation résiduelle inverse en surface et en profondeur mise en évidence par modèle numérique (Thouvenin et Salomon; Le Hir *et al.*, ce colloque) et vérifiée en nature (Le Hir et L. Yavanc; Avoine et Crevel, ce colloque). Quant à la partie occidentale de la baie où pénètrent les eaux de la Manche, elle présente un caractère franchement marin (Le Hir *et al.*, ce colloque).

Nous avons vu ci-dessus que des suspensions sont expulsées en Baie de Seine en période de crue, principalement à basse-mer. Il en résulte des *panaches turbides* visibles sur images satellites (Thomas, ce colloque) et cartographiés par mesures directes (Avoine et Crevel, ce colloque). Il apparaît que le panache de la Seine peut s'avancer jusqu'au Parfond et il est probable qu'une partie des suspensions s'échappe de la baie par le Nord. Le matériel transporté en suspension se répartit sur toute la tranche d'eau mais dans la partie orientale de la baie, le calcul des flux résiduels par Avoine et Crevel montre des inversions entre surface et fond avec évacuation vers le large en surface et mouvement opposé en profondeur, déterminant notamment un transit vers l'estuaire de la Seine. C'est en étiage que ces mouvements inverses sont les plus marqués. En crue, l'expulsion du matériel en suspension vers le domaine marin est largement dominante. Cet impact des apports solides d'origine estuarienne sur la sédimentation vaseuse de la baie de Seine est mis en évidence par certains oligoéléments métalliques qui constituent des marqueurs. Ainsi, Avoine et Crevel montrent que l'influence de la Seine s'exerce principalement dans l'embouchure et vers le Nord sur la frange côtière du Pays de Caux. De même, le nickel permet par exemple de cerner la zone d'impact de l'Orne sur le milieu marin (Avoine, Dubrulle et Larsonneur, ce colloque). En baie des Veys, ces mêmes auteurs montrent que ces expulsions de matériel fin, plus ou moins contaminé, sont cause d'envasements dans les parcs ostréicoles et occasionnent des problèmes de salubrité.

L'imagerie obtenue par le capteur Coastal Zone Color Scanner (CZCS) opérant sur le Satellite Nimbus 7 a permis à Thomas (ce colloque) de caractériser la distribution des matières en suspension des eaux de surface sur une grande partie de la Manche durant l'année 1981. 16 scènes ont été acquises conduisant à la sélection de 7 images qui forment une chronique convenablement répartie dans le temps. Pour chaque image une carte des concentrations en M.E.S. des eaux de surface a été réalisée sur la base de mesure faites *in situ*. Ces documents instantanés mettent en relief les variations spatiales des teneurs en M.E.S. et leurs évolutions temporelles sous l'effet conjugué des débits fluviaux, des courants de marée et de la houle. Les fronts estuariens apparaissent particulièrement bien en crue (image du 01/02/81 avec un débit de 1 100 m<sup>3</sup>/s pour la Seine), tandis qu'en étiage (06/09/81) ils s'estompent presque totalement. Les autres images illustrent des situations intermédiaires. On relève également une frange de turbidités côtières plus ou

moins élevées selon la turbulence du milieu. Les images du 14/02/81 et du 22/06/81 montrent enfin une structure relativement turbide à l'Est du Cotentin qui localise selon Thomas le tourbillon de Barfleur décelé par modélisation numérique des courants de marée (Salomon, ce colloque). Ce vaste mouvement anticyclonique qui se rapporte à la circulation résiduelle trouve donc dans certaines conditions météorologiques une expression instantanée sous forme de concentrations relativement plus fortes en matières en suspension.

### 3.2. L'étude des matières en suspension :

Les particules en suspension dans les eaux de la baie de Seine et des estuaires qui en sont tributaires sont d'une grande diversité qualitative et texturale qui se traduit par des comportements dynamiques variés. Lafite, Dupont et Lamboy (ce colloque) ont mis au point une stratégie d'étude de ce matériel comportant notamment :

- une granulométrie en nombre et en volume des particules,
- un traitement statistique de ces résultats par la méthode des classifications ascendantes hiérarchisées,
- l'analyse factorielle des données granulométriques,
- la quantification des fractions organiques et minérales,
- des observations au microscope électronique à balayage.

L'application de cette méthode à la campagne Elie de décembre 1983, par exemple, fait apparaître pour la partie orientale de la baie de Seine une distinction nette entre des silts fins issus de l'estuaire et le matériel marin composé de gros éléments planctoniques. Par ailleurs, le pôle marin faiblement concentré, le pôle estuarien au contraire fortement concentré et une zone de transition plus ou moins développée se dégagent clairement du diagramme bivarié d'interprétation construit à partir d'un millier d'échantillons.

Après cette contribution à caractère méthodologique, Dupont, Lafite et Lamboy apportent une série de résultats sur le matériel particulaire de l'estuaire de la Seine et de la baie de Seine orientale. En estuaire, la partie amont est caractérisée par des silts moyens à spectre étalé: les silts fins dominant très largement dans la zone du bouchon vaseux et se retrouvent dans le panache turbide de l'embouchure où ils s'associent progressivement à des silts grossiers, voire à des sablons de nature organique. Les spectres granulométriques sont beaucoup plus homogènes en Baie de Seine, mais les principales composantes du matériel en suspension ont pu être mises en évidence par analyse factorielle. On retrouve notamment la fraction silteuse fine caractéristique du bouchon vaseux et dont la répartition suit les isohalines, tandis que le matériel biologique devient prépondérant vers le large notamment aux abords d'Antifer. L'ensemble de ces résultats sur les suspensions conduit les auteurs à proposer une interprétation schématique dans laquelle ils définissent des *fronts* entre les masses d'eau. Ainsi existe-t-il un front entre les eaux estuariennes et marines. Pour illustrer ce phénomène au contact duquel les échanges sont encore mal connus, les auteurs font part de leurs observations le long du littoral crayeux du Pays de Caux. Là se rencontre un contact relativement brutal entre les eaux côtières très chargées en coccolites issues de la craie et les eaux du large peu concentrées. Cet exemple particulièrement bien tranché pourrait servir de modèle à l'étude des échanges au niveau des fronts.

La *fraction organique*, vivante et inerte, joue un rôle très important dans les suspensions de la baie de Seine, elle fait l'objet de la communication de Dupont et Lafite illustrée par une série de photos au microscope électronique à balayage (M.E.B.).

Le matériel organique vivant est très riche en diatomées qui, par le mucus qu'elles secrètent, sont parfois à l'origine d'agrégats organo-minéraux. Dans l'ensemble, les populations planctoniques qui sont soumises à des cycles sai-

sonniers caractérisent souvent certaines classes du spectre granulométrique des suspensions et conditionnent leur comportement hydrodynamique. On reconnaît également des pelotes fécales de forme ovoïde, plus ou moins allongées et des pseudofécès ne présentant aucune structure organisée. Les Copépodes sont à l'origine de nombreuses pelotes.

La fraction inerte renferme divers éléments figurés identifiés au M.E.B.: tissus vasculaires d'origine végétale, fibres de cellulose, particules carbonées correspondant à des résidus de combustion industrielle. Elle contient également des structures organo-minérales variées: agrégats, flocons, voiles... Des dosages d'hydrocarbures ont en outre été effectués dans les eaux de surface de la partie orientale de la baie de Seine, ils montrent des teneurs relativement élevées à l'embouchure de la Seine et au Nord du dépôt de dragage d'Octeville qui constitue probablement une source secondaire. Quant aux teneurs en matière organique totale, elles intègrent à la fois le matériel vivant et inerte de telle sorte qu'elles ne sont pas obligatoirement liées aux charges en suspension.

Les spectres granulométriques de suspensions ont également été étudiés par Brun-Cottan et Ben Brahim lors de la campagne Elie de décembre 1983 qui se déroula, rappelons le, en étiage. Les 200 échantillons analysés ont permis aux auteurs de calculer le *flux de sédimentation*, qui varia de 0,3 à 4 mg/m<sup>2</sup> / heure. Dans ces conditions, la quantité de matière déposée sur le fond au cours d'un cycle de marée était de l'ordre de 20 g/m<sup>2</sup> aux points F3 et F4 situés respectivement au large du cap d'Antifer et du cap de la Hève, alors que la quantité totale de matières, intégrée sur la colonne d'eau, était de 80 à 150 g. En admettant un régime de sédimentation - remise en suspension équilibré pendant plusieurs marées, -les valeurs obtenues impliquent que les particules en suspension résident en moyenne 70 à 80% de leur temps dans l'eau et 20 à 30% dans le sédiment sur le fond. Ces résultats ne sont évidemment valables que pour les conditions de la mission considérée, en période de crue ou après tempête les bilans sont probablement très différents.

### 3.3. Éléments de dynamique sédimentaire en baie de Seine.

#### 3.3.1. Envasements - désenvasements :

L'expulsion du bouchon vaseux durant les crues conduit, nous l'avons vu, à des envasements dans les zones d'embouchure. Le suivi sédimentologique de ces zones (Avoine et Crevel, ce colloque) montre que ces dépôts sont souvent temporaires suite au remaniement de matériel fin par les courants de marée et les houles. Ainsi observe-t-on en Baie des Veys, dans la région de Grandcamp, le désenvasement progressif des parcs à huîtres après des envasements hivernaux souvent soudains (Avoine, Dubrulle et Larsonneur, ce colloque). Les matières remises en suspension sont soit réintroduites en estuaire, soit dispersées plus au large où elles peuvent produire de nouveaux envasements, également temporaires (Crevel, Avoine, ce colloque). Les observations les plus précises à ce sujet ont été faites entre la région havraise et le port d'Antifer. Au SW du port du Havre, les deux stations de suivi régulier des peuplements benthiques (Gentil *et al.*; Avoine et Crevel, ce colloque) montrent d'importantes variations des teneurs en pélites au cours du temps. Des envasements se produisent en période d'étiage, des désenvasements l'hiver mais les informations sont encore trop fragmentaires pour rendre compte des processus qui contrôlent ces alternances envasements-désenvasements. Entre la Hève et Antifer, grâce à 4 campagnes successives de prélèvements, de février à septembre 1982, et à une étude statistique des données par analyse factorielle des correspondances, des variations de la couverture de dépôts meubles ont été mises en évidence par Crevel (1983, ce colloque) entre - 13 et - 20 m. Nous sommes là dans une zone fortement influencée par les apports sur le dépôt de dragage d'Octeville. Des envasements se produisent en pério-

de de calme hydrodynamique tandis que le matériel fin est remobilisé durant les tempêtes laissant la place à des sédiments plus sableux. Le rôle des fortes houles sur la sédimentation semble d'ailleurs fort important, il est encore malheureusement très mal connu. Outre quelques observations portant sur la nature des fonds après tempêtes on dispose d'un profil de turbidités réalisé en crue devant l'embouchure de la Seine par Avoine (Avoine *et al.*, 1984) dans des conditions de morte-eau et mer agitée (fig.). On constate que les teneurs en M.E.S. sont alors élevées dans toute la colonne d'eau, et dans l'ensemble, supérieures à celles relevées en période de vive-eau, par mer calme. Quant aux travaux de Crevel (ce colloque), ils montrent en outre que les fluctuations de la couverture de dépôts meubles ne se marquent plus au-dessous de -20 m et que le matériel fin issu du dépôt de dragage d'Octeville se déplace vers le Nord confirmant en cela les résultats acquis par traceurs radioactifs (Tola, 1984; Avoine *et al.*, ce colloque); ils peuvent ainsi contribuer à l'envasement du port d'Antifer. La comparaison de levés bathymétriques réalisés en 1978 et en 1982 dans cette enceinte portuaire a permis à Crevel de chiffrer le bilan sédimentaire pour 4 ans. L'exhaussement moyen annuel est d'environ 5 cm sachant que les envasements se situent préférentiellement dans la partie nord, le long des ouvrages, et aux abords du port de service. Les volumes accumulés représentent environ 10 à 12% des largages effectués sur le site d'Octeville. Ils sont toutefois sous-estimés dans la mesure où une frange de 200 m environ, bordant la digue, n'a pas fait l'objet des levés bathymétriques de comparaison. Malgré cette réserve, il semble que les atterrissements enregistrés dans le port d'Antifer soient légèrement inférieurs aux prévisions qui étaient de 17 cm/an. Considérant par ailleurs les connaissances acquises en dynamique sédimentaire et les coûts de transports, l'emplacement retenu pour les dépôts de dragages du port du Havre représente un compromis acceptable.

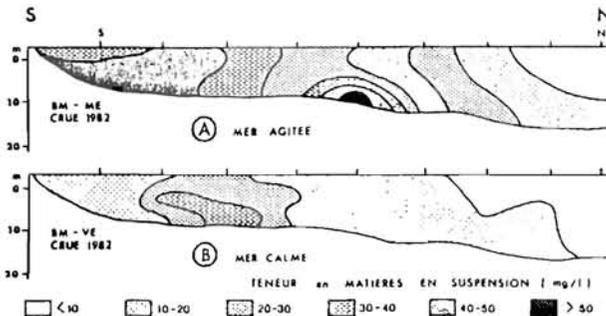


Fig. Influence de la houle sur la turbidité des eaux de la baie de Seine.

Les fluctuations de la couverture sédimentaire ont également été observées par enregistrements au sonar à balayage latéral. Auffret et d'Ozouville ont en effet enregistré des structures permanentes ou temporaires interprétées comme issues de la reprise de dépôts fins cohésifs sous l'action des agents hydrodynamiques. Ces structures représentent des formes d'érosion en sillons ou en taches et des rubans temporaires de vase dont la variabilité, selon les types de conditions météorologiques, a été constatée.

D'après l'ensemble des résultats acquis dans la partie orientale de la baie de Seine, le bilan sédimentaire s'établit à partir des processus suivants. Il existe des apports issus de la Seine en crue, non chiffrés, mais probablement fort modestes en comparaison des importants volumes déversés sur le dépôt de dragage d'Octeville, en moyenne 2,4 millions de m<sup>3</sup>/an (Chauvin *et al.*, ce colloque); 30% de ces apports anthropiques, hétérogènes, restent sur place. Une partie du matériel évacué vers le Nord se répartit, temporairement au moins, sur les fonds. La fraction piégée par la digue du port d'Antifer

représente environ 15%, tandis que, le système n'étant pas clos, du matériel fin peut être progressivement dispersé plus loin pour sortir de la baie. Nous n'avons à présent qu'une seule donnée sur les flux de matières entre la baie de Seine et la Manche orientale. Située au Nord d'Antifer, elle indique un flux résiduel vers l'Est en surface et vers le SSW au fond (Avoine, communication orale).

### 3.3.2. Les apports du sonar à balayage latéral et de la sismique réflexion à haute définition :

La couverture de la baie de Seine au sonar à balayage latéral par Auffret et d'Ozouville met en évidence une série de structures sédimentaires et fournit des précisions sur la répartition superficielle des dépôts. Les principaux apports nouveaux à ce sujet concernent l'existence de longs rubans sableux ornés de mégarides et de trainées sableuses qui se superposent à un environnement graveleux résiduel dans les parties centrale et occidentale de la baie. Le sable constitue alors une phase mobile organisée en structures sédimentaires longitudinales et transversales qui indiquent une direction de transit vers le Sud-Est, c'est-à-dire vers l'estuaire de la Seine. Le domaine occidental situé à l'intérieur d'une ligne Barfleur-Grandcamp montre au contraire des transits sédimentaires vers le Nord-Ouest de telle sorte que les mouvements s'effectuent en sens opposé sur les deux flancs des bancs de Saint-Marcouf et du Cardonnet.

Plusieurs irrégularités morphologiques (paléovallée, plateaux rocheux) sont à l'origine de trainées ou de rubans sableux en baie de Seine centrale. Il y a peu de structures observables en baie de Seine orientale, probablement à cause de la finesse et de la cohésion des dépôts. Cependant, comme nous l'avons signalé ci-dessus, des formes d'érosion de sédiments vaseux ont été mises en évidence comportant notamment des formes lichénoïdes localisées sur les deltas de jusant et des réseaux de sillons ramifiés, de profondeur métrique, subperpendiculaires au littoral, et situés entre l'Orne et la Touques. Il y a là une source de matériel qui contribue au colmatage des estuaires.

Le *prisme sédimentaire* de la baie de Seine orientale a été cartographié par sismique réflexion à haute définition par Auffret et d'Ozouville. Ce prisme forme une couverture continue, d'épaisseur modeste, ne dépassant 10 m que sous 1/5 de sa surface, à savoir aux extrémités ouest et est. Il se compose de sédiments fluvi-marins à marins mis en place durant la transgression holocène. Les principales unités sédimentaires en présence sont le banc de Seine et les deltas de marée de la Seine et des rivières du Calvados. La zone située entre la paléovallée de la Seine et la côte du Calvados est très monotone et masque un réseau de chenaux de 4 à 6 m de profondeur représentant le modelé de la surface préholocène avec les anciennes rivières du Calvados. En dehors de ces dépressions comblées par la transgression holocène, la couverture sédimentaire est mince, voire inexistante, laissant affleurer des formations argilo-tourbeuses postglaciaires identifiées par Avoine (1981) et localement en voie d'érosion. Nous sommes donc là en présence d'une zone à bilan sédimentaire nul à négatif.

Le banc de Seine est accroché au versant septentrional de la paléovallée de la Seine et porte de nombreuses structures sédimentaires observées au sonar latéral (Auffret et d'Ozouville, ce colloque): rubans, mégarides, ridins. Ces dernières indiquent des transports vers le Nord-Est sur le flanc sud et vers le Sud-Ouest sur le flanc nord. Ces convergences de transit témoignent de l'activité sédimentaire actuelle du banc construit par les courants de marée. Les auteurs font intervenir principalement l'action du flot chenalisé par la paléovallée de la Seine et associée à une surverse qui chasse les sédiments latéralement, puis l'action du jusant, guidé par un effet de sillage créé par le cap de la Hève au débouché de la Seine.

Les deltas de marée constituent des protubérances sédimentaires d'une dizaine de mètres d'épaisseur devant les embouchures. Ils proviennent principalement d'une accumulation de sables déplacés par les houles dominantes de secteur ouest et renforcées par les courants de flot. Les apports vaseux d'origine estuarienne peuvent également s'y déposer, mais ils sont soumis à remaniements et leur contribution au bilan global, si elle reste à quantifier, semble mineure en raison des fortes énergies qui règnent aux faibles profondeurs considérées. L'évolution de ces constructions sédimentaires conduit à l'émergence d'une barrière côtière, coiffée de dunes, comme celle qui se développe aux embouchures de l'Orne et de la Dives et qui favorise le colmatage interne des basses vallées. Dès lors, il apparaît que l'évolution des corps sédimentaires de l'embouchure de la Seine est moins avancée. Cependant, la masse principale du delta de jusant commence à déborder le cap de la Hève, progressant vers l'Ouest en direction du banc de Seine. Cette évolution doit conduire à l'émergence d'une barrière d'embouchure qui favorisera le comblement déjà fort avancé de la Seine (Auffret et d'Ozouville, ce colloque).

### 3.3.3. Les apports des expériences par traceurs radioactifs:

Plusieurs expériences avec traceurs radioactifs ont été réalisées dans la partie orientale de la baie de Seine afin de caractériser les mouvements sédimentaires en intégrant l'effet combiné des houles et des courants de marée. Ces études, menées par le service d'application des radio éléments du C. E.A., avaient pour but, les unes de déterminer le transport en charriage des sables, les autres d'apprécier les possibilités de remise en suspension de sédiments vaseux plus ou moins concentrés. Une synthèse des résultats est présentée ici par Avoine *et al.*

Les sites étudiés dans la partie sud, de Ouistreham à Honfleur, montrent que la résultante des transits sédimentaires par charriage, observée sur plusieurs mois, est dirigée vers l'Est, c'est-à-dire vers l'estuaire de la Seine. Ce transfert est dû à l'action des courants de flot dominants. Près du rivage, au-dessus de l'isobathe -6 m environ, les fortes houles de secteur ouest à nord-ouest provoquent en outre un déplacement des sables vers la côte accompagné d'une dérive littorale d'autant plus importante que la tranche d'eau est mince.

En extrapolant à toute la largeur de l'embouchure (12 km) les débits solides calculés dans les marquages effectués au Nord de Deauville, le volume annuel introduit en charriage dans l'estuaire serait de 65 000 m<sup>3</sup>. Les résultats montrent également que les sédiments fins de la baie sont aisément remis en suspension par les courants de marée, même les plus faibles. Dans l'estuaire de la Seine, près d'Honfleur, des vitesses de l'ordre de 1m/s près du fond, fréquemment atteintes, remobilisent la totalité du matériel déposé, en l'occurrence des sables fins à très fins (grain moyen compris entre 0,175 et 0,26mm).

Quant aux expériences réalisées entre Le Havre et Antifer, elles permettent de conclure à un mouvement général des sédiments vers le Nord-Est par des fonds inférieurs à -15 m, tant en charriage qu'en suspension. Ce résultat est en accord avec les observations faites dans la zone de dépôt de dragage d'Octeville et rappelés ci-dessus (Crevel, ce colloque). Les schémas de circulation résiduels présentés par Salomon et Le Hir *et al.* (ce colloque) font par contre apparaître des mouvements Nord-Sud le long du littoral cauchois entre Antifer et le cap de la Hève. Il y a là matière à discussion en notant que dans cette zone les conditions de circulation en surface diffèrent assez nettement de celles qui s'exercent au fond (Le Hir et l'Yavanc; Thouvenin et Salomon; Avoine et Crevel, ce colloque) et que ces conditions subissent l'influence des débits et des vents (Le Hir *et al.*, ce colloque). En l'occurrence, les modèles bidimensionnels nous paraissent inadaptes.

### 3.3.4. Sur les bilans sédimentaires en baie de Seine orientale:

Avoine *et al.* (ce colloque) abordent pour conclure leur article le problème des bilans sédimentaires dans la partie orientale de la baie de Seine. Comme nous l'avons vu, les apports annuels de la Seine sont au maximum de 0,7 millions de m<sup>3</sup> alors que les atterrissements dans l'estuaire et dans le port du Havre sont chaque année de l'ordre de 5 millions de m<sup>3</sup>. Il faut donc admettre une importante alimentation en provenance de la mer. Celle-ci est prouvée par différentes observations, celles basées sur les oligoéléments métalliques notamment, stables (Avoine, Dubrulle et Larsonneur, ce colloque) et radioactifs (Auffret *et al.*, ce colloque). Dans ces apports marins, l'érosion côtière ne contribue que pour 200 000 à 300 000 m<sup>3</sup>/an; l'essentiel des transits sédimentaires s'effectue donc en domaine subtidal. D'après les expériences faites avec traceurs radioactifs, les volumes charriés sur le fond sont évalués à 65 000 m<sup>3</sup>. Même si cette valeur est sous estimée, c'est probablement en suspension qu'est introduite dans l'estuaire la majeure partie du matériel sédimentaire qui participe à son comblement. Quelle en est l'origine ? Dès 1929 Volmat suggérait un abaissement des fonds de la baie de Seine orientale. Cette hypothèse est plausible d'autant plus que des érosions ont été observées au sonar latéral par Auffret et d'Ozouville (ce colloque) devant les côtes du Calvados, mais cela n'exclut pas une origine plus lointaine. Des radionucléides issus des rejets de l'usine de la Hague se retrouvent dans les dépôts estuariens et les structures sédimentaires enregistrées en baie de Seine occidentale à centrale témoignent de transits résultants vers le Sud-Est (ce colloque). Mais à quelle vitesse se déplacent les sédiments sableux sur le fond ? Quelle est la part du matériel d'origine proximale et du matériel d'origine distale dans les constructions sédimentaires de la baie ? Ce sont des questions auxquelles il n'est pas possible de répondre précisément aujourd'hui. Il reste qu'au cours de la transgression holocène, par remaniements de formations continentales antérieures et production de bioclastes marins, des sédiments sableux à vaseux se sont accumulés dans les extrémités de la baie sous l'action de conditions hydrodynamiques dominées par les courants de marée (Larsonneur *et al.*, 1982). Le prisme sédimentaire adossé à la côte se prolonge dans les estuaires dont le comblement s'est accéléré depuis 2 siècles du fait des aménagements. Un transfert de matériel a donc dû s'opérer d'aval en amont entraînant probablement un appauvrissement du stock sédimentaire subtidal à intertidal. En Baie de Seine orientale, de la Seine à l'Orne, c'est au rythme de 5 millions de m<sup>3</sup>/an que les estuaires accumulent le matériel venu de la mer (Avoine *et al.*, ce colloque). Comme le montrent Auffret et d'Ozouville cette évolution conduit à l'émersion d'une barrière côtière abritant un estuaire sénile, souvent aménagé; c'est le cas des rivières du Calvados. L'embouchure de la Seine n'est pas encore parvenue à ce stade, mais le calibre de l'estuaire s'est fortement réduit depuis un siècle et demi et sa surface est passée de 130 km<sup>2</sup> à 30 km<sup>2</sup> (Avoine, 1981); son oblitération quasi complète est proche. Qu'advient-il après ? Compte-tenu des faibles apports fluviaux et des fortes énergies en présence dans ce domaine macrotidal, l'évolution vers la structure delta est exclue. C'est vers une côte régularisée, bordée de dunes, aux exutoires étroits que nous allons dans la mesure où les conditions climatiques et la position du niveau marin se maintiendront.

Dans ce cadre, les apports fluviaux bien que réduits, se déverseront directement à la mer, principalement en crue; plus de zones estuariennes tampon susceptibles de stocker et de transformer certains polluants associés aux sédiments. Quant aux chenaux de navigation, leur tendance sera évidemment au comblement accéléré, leur entretien deviendra de plus en plus difficile.

## CONCLUSION .

Les différentes communications présentées montrent que les acquis dans le domaine de la dynamique sédimentaire sont nombreux et importants. Sur le plan méthodologique d'abord je relève tout particulièrement la mise au point d'une stratégie d'étude des suspensions par Lafite *et al.* et l'utilisation de moyens d'investigation modernes comme la télédétection (Thomas) et le sonar à balayage latéral (Auffret et d'Ozouville). L'imagerie et les enregistrements recueillis se trouvent valorisés par les mesures *in situ* et les modélisations effectuées parallèlement. La confrontation de toutes les données et leur discussion accroissent encore la richesse des interprétations.

Les apports fluviaux de la Seine ont été quantifiés par Avoine, il conviendrait d'acquérir des renseignements équivalents sur les rivières du Calvados. Il ressort principalement que dans nos régions, la première crue est responsable des apports les plus importants, tant en matière en suspension qu'en métaux-traces. Par ailleurs, la dynamique estuarienne a été définie en soulignant ses particularités en milieu macrotidal (Avoine, Dubrulle et Larssonneur). Ce caractère joue un rôle essentiel en baie de Seine, tant dans la remise en mouvement et le transfert du matériel sédimentaire, que dans la circulation et le brassage des eaux. Il en résulte d'intenses remaniements, un bouchon vaseux tantôt volumineux et concentré, tantôt presque inexistant, des échanges sur toute la colonne d'eau, une forte dilution des polluants, une vaste dispersion du matériel. Ainsi, par exemple, les acidités élevées provoquées par les rejets de l'usine Thann et Mulhouse n'engendrent pas de répercussions majeures sur le milieu vivant (Proniewski, ce colloque). Ce régime que l'on qualifie même parfois d'hypertidal, tant l'effet des marées y est déterminant, assure le maintien d'un degré de pollution modéré en baie de Seine bien que les apports soient relativement élevés en différentes substances nocives (Avoine; Aminot *et al.*; Guéguéniat, Boust *et al.*, Sylvestre *et al.*; Merlin *et al.*; Noël *et al.*; Gentil *et al.*, ce colloque). Des problèmes demeurent cependant, qu'il s'agisse des déversements de phosphogypses (Aminot *et al.*, Proniewski), de certaines pollutions métalliques : Hg, Cu, Cd, Zn, Pb, Ni, Cr, Ag (Avoine; Guéguéniat, Boust *et al.*; Chassard-Bouchaud *et al.*), de teneurs élevées en sels nutritifs favorisant les eaux colorées (Aminot *et al.*; Paulmier et Joly), de doses importantes en micropolluants comme les P.C.B. (Abarnou et Simon, ce colloque). En matière d'impact sur le milieu vivant, il ressort que les envasements constituent l'un des effets les plus marquants (Gentil *et al.*; Proniewski). Des apports brutaux déterminés par une crue subite peuvent entraîner l'asphyxie des organismes et conduire à la modification des peuplements. Inversement, ces derniers se reconstituent suite à des désenvasements (Desprez et Dupont). Ces fluctuations envasements-désenvasements ont été mises en évidence en plusieurs régions de la baie de Seine tant par suivi direct de la nature des fonds (Avoine et Crevel; Avoine, Dubrulle et Larssonneur; Crevel) que par la reconnaissance au sonar à balayage latéral (Auffret et d'Ozouville). C'est l'un des résultats importants du programme, mais il reste à en définir précisément les modalités en fonction de la profondeur et du cadre morphologique et hydrodynamique. Le caractère soudain ou progressif de ces fluctuations est important à considérer en matière de dynamique des peuplements benthiques. Or, peu de données existent à ce sujet. Le rôle des houles notamment est très mal connu. Les progrès attendus proviendront de suivis concentrés dans le temps et surtout de mesures en continu, *in situ*, par station autonome. Il convient également de noter que ces processus qui mettent souvent en jeu l'action conjuguée des courants de marée et des houles s'exercent par faibles profondeurs, entre 0 et -10 m principalement. Or, cette frange côtière est dans l'ensemble insuffisamment étudiée; elle est pourtant très importante à connaître sur le plan de ses relations avec les zones intertidales, sachant qu'elle est également le siège de riches nourriceries

(Duval, ce colloque). Un effort particulier devra porter sur cette frange côtière à l'avenir, il sera favorisé en baie de Seine par le lancement du N.O. "Côte de Normandie".

La mobilité des fonds sédimentaires a été bien perçue sur les enregistrements de sonar à balayage latéral (Auffret et d'Ozouville); c'est là un outil remarquable dont l'utilisation devra être intensifiée afin de resserrer la maille des observations et de les répéter dans des conditions météorologiques différentes. La quantification des volumes en mouvement sur le fond reste à faire. D'après les conclusions des expériences par traceurs radioactifs (Avoine *et al.*), les débits solides résultants sont probablement faibles. En ce qui concerne les problèmes de remise en suspension, une origine n'a pas été étudiée, celle provenant des processus de bioturbation. Il y a là encore un champ de recherches important, surtout quand on connaît la densité de certains peuplements benthiques (Gentil *et al.*, ce colloque).

L'étude du fonctionnement hydrosédimentaire de la baie de Seine figurait parmi nos objectifs, les acquis sont nombreux, des interrogations demeurent, certains aspects sont à développer et à approfondir. Parmi les acquis je relèverai ce qui concerne la dynamique des suspensions à l'interface estuaires-baie de Seine. Des évacuations en mer ont lieu en période de crue avec envasements dans les embouchures et aux abords. Puis des désenvasements progressifs se produisent ultérieurement, engendrant une dispersion du matériel avec envasement de nouvelles zones un peu plus profondes ou réintroduction de particules sédimentaires en estuaires, très en amont parfois, en période d'étiage (Avoine, Dubrulle et Larssonneur; Avoine *et al.*; Guéguéniat, Boust *et al.* 2). Le bilan est en faveur du comblement de ces exutoires fortement aménagés depuis le siècle dernier. Les zones naturelles de dépôt ont peu à peu disparu de telle sorte qu'à présent, les estuaires de la baie de Seine sont davantage des milieux de transit que de stockage. L'impact des pollutions sur le proche horizon marin se trouve renforcé. C'est le cas par exemple en baie des Veys pour les récentes installations conchylicoles de la région de Grandcamp. En l'occurrence, il est certain que la poldérisation quasi complète des couloirs estuariens, en supprimant les vasières correspondantes, a engendré le glissement des champs vaseux vers l'aval, ce qui défavorise aujourd'hui le développement des activités ostréicoles surtout (Avoine, Dubrulle et Larssonneur). Il est essentiel de préserver le plus longtemps possible les zones naturelles de marais qui demeurent encore en estuaires.

Parmi les questions incomplètement solutionnées, il y a celle des mouvements sédimentaires en suspension soumis à une circulation étagée des eaux par effet de densité. Cette situation se présente aux abords des embouchures importantes de la baie de Seine orientale et donne lieu à des résultats qui ne sont pas tous rigoureusement concordants (Le Hir et l'Yavanc; Salomon; Thouvenin et Salomon; Le Hir *et al.*; Crevel; Avoine et Crevel; Avoine *et al.*, ce colloque). Le problème est à trois dimensions et se trouve compliqué par les fluctuations du débit et l'influence des vents. Nul doute qu'il y a encore là matière à recherches dont l'intérêt se trouve renforcé par les incidences pratiques : envasements des installations portuaires, devenir des rejets de dragages.

Parmi les problèmes qui n'ont été que peu abordés figurent ceux des relations entre baie de Seine occidentale et baie de Seine centrale-orientale d'une part, entre baie de Seine et Manche orientale d'autre part. Les études de dynamique des eaux (Le Hir *et al.*), de mouvements sableux sur les fonds (Auffret et d'Ozouville) permettent de distinguer très nettement la partie occidentale à l'intérieur d'une ligne Barfleur-Pointe de la Percée, du reste de la baie de Seine. Mais y a-t-il des échanges entre ces 2 zones ? à quelle vitesse ? Cette dualité de fonctionnement à l'intérieur même de la baie n'a

été que peu étudiée. Une première réponse provient cependant de l'étude du fluorure (Aminot *et al.*, ce colloque). Quant aux rapports entre la baie de Seine et la Manche orientale au niveau d'une ligne Barfleur-Antifer, ils mériteraient d'être approfondis partant des acquis suivants développés dans ce mémoire :

- les eaux marines entrent par le Nord-Ouest et des sorties s'effectuent au Nord-Est (Le Hir *et al.*);
- des particules en suspension marquées par des radionucléides rejetés au cap de la Hague pénètrent en baie de Seine (Auffret *et al.*);
- le temps de stockage en baie de Seine a été estimé, il est compris entre 43 et 113 jours (Le Hir *et al.*; Aminot *et al.*).

Le flux de matières évacué au large d'Antifer n'est notamment pas connu, pas plus que les flux d'entrées.

En abordant le programme de recherches sur la baie de Seine nous avons, au travers du schéma de distribution de ses dépôts superficiels une vision figée de ses caractères sédimentologiques. Nos divers travaux montrent qu'il y a mouvements, échanges, apports et érosions. Une dynamique active donc, dans un milieu de haute énergie et dont nous commençons aujourd'hui à comprendre le fonctionnement.

- 
- ALLEN G.P., SAUZAY G., CASTAING P. & JOUANNEAU J.M. (1975).- Transport and deposition of suspended sediment in the Gironde estuary, France. In: Estuarine processes, t. 2, Academie Press, New York, p. 63-79.
- AUFFRET J.P. & LARSONNEUR C. (1977).- Paléovallées et bancs sableux entre l'estuaire de la Seine et le Nord-Cotentin. Bull. Soc. géol. Norm., t. IXIV, 4, p. 21-33.
- AUFFRET J.P., ALDUC D., LARSONNEUR C. & SMITH A.J. (1980).- Cartographie du réseau de paléovallées et de l'épaisseur des formations superficielles meubles de la Manche orientale. Ann. Inst. océanogr., NS, t. 56, p. 21-35.
- AVOINE J. (1981).- L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse de 3ème cycle, Caen, 236 p.
- AVOINE J. (1982).- Mécanismes contrôlant la dynamique des sédiments en suspension dans l'estuaire de la Seine. Mém. Soc. géol. Fr., NS., n° 144, p. 17-25.
- AVOINE J., ALLEN G., NICHOLS M., SALOMON J.C. & LARSONNEUR C. (1981).- Suspended-sediment transport in the Seine estuary, France: effect of man - made modifications on estuary-shelf sedimentology. Mar. geol., 40, p. 119-137.
- AVOINE J., BOUST D. & GUILLAUD J.F. (1984).- Flux et comportement des contaminants dissous et particuliers dans l'estuaire de la Seine (France). Proc. Symp. on contaminant Fluxes through the coastal zone, Nantes. sous presse.
- BOUST D. (1981).- Les métaux-traces dans l'estuaire de la Seine et ses abords. Thèse de 3ème cycle, Caen, 186 p.
- CREVEL L. (1983).- Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans la partie nord-orientale de la baie de Seine. Thèse de 3ème cycle, Paris IX, 185 p.
- DUBRULLE L. (1982).- Etude hydrosédimentaire de l'estuaire de l'Orne et de ses abords. Thèse 3ème cycle, Caen, 394 p.

- DUBRULLE L. & LARSONNEUR C. (1984).- La baie des Veys : étude hydrosédimentaire. Rap. ronéot., 115 p.
- GALENNE B. (1974).- Les accumulations turbides de l'estuaire de la Loire. Etude de la crème de vase. Thèse de 3ème cycle, Nantes, 323 p.
- LARSONNEUR C. (1971).- Manche centrale et baie de Seine, géologie du substratum et des dépôts meubles. Thèse Caen, 394 p.
- LARSONNEUR C., BOUYSSÉ P. & AUFFRET J.P. (1982).- The superficial sediments of the English Channel and its Western approaches. Sedimentology, t. 29. p. 851-864.
- SCHEMA D'APTITUDE ET D'UTILISATION DE LA MER POUR L'ESTUAIRE DE LA SEINE (1977-1980) - Rapports inédits, Cent. Nat. Exp. Océans, Mission Et. Bas. Seine et Mission Amén. Bass. Norm.
- TOLA F. (1984).- Etude du rejet de produits de dragage à l'aide de traceurs radioactifs, transfert et dispersion des fines particules en suspension et évolution dans le temps des sédiments déposés sur le fond. XVIIIe journées de l'Hydraulique, Marseille, I.15.1.-I.15.8.
- VOLMAT M. (1929).- Les érosions du littoral du Calvados et les atterrissements de l'estuaire de la Seine. 22e Cah. Rech. Hydr. sur le régime des côtes, Paris, Imp. Nat., 39 p.