

AMÉNAGEMENT DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE

Rejets de gypse en conduite

par **L. Barailler**

Chef du Service Maritime Fluvial et Hydrologique
de SOGREAH

Introduction

Les rejets de gypse à point fixe par tuyau dans l'estuaire de la Seine soulèvent différents problèmes. Ils ont été étudiés à la demande de la Compagnie Française de l'Azote qui a bien voulu donner son accord pour l'exposé des résultats obtenus. On s'intéressera de façon limitative aux études relatives à la convection du produit solubilisé.

Etant donné la localisation du point de rejet, on se trouve à la fois dans le cas unidimensionnel et bidimensionnel. Après la revue des moyens d'étude, on examinera chacun de ces cas.

Moyens d'étude

Le calcul et le modèle réduit constituent les deux moyens d'étude de ces problèmes de convection.

Dans le cas du schéma unidimensionnel, le calcul offre des avantages de délai et de coût; il offre également la possibilité de représenter une succession de marées observées dans la nature, par suite de la commodité d'introduction des conditions aux limites.

Dans le cas du schéma bidimensionnel, les deux méthodes doivent actuellement se limiter à l'étude d'une marée type, par suite de la nécessité d'introduire des débits comme condition à la limite au large et des coûts élevés d'exploitation.

Pour l'estuaire de la Seine, les deux moyens d'investigation existaient. Le modèle réduit représente tout le domaine de La Hève jusqu'à Poses; au contraire, les calculs traitent séparément la partie de l'estuaire en aval de La Roque et celle en amont de Honfleur.

Il était donc logique d'utiliser le modèle physique et de réserver au calcul l'étude de points particuliers qu'il pouvait le mieux résoudre.

Les problèmes de convection ont été examinés sur modèle réduit à partir des trajectoires de flotteurs de surface et de l'observation d'un traceur simple, en l'occurrence du chlorure de sodium.

Dans le calcul, on suit le déplacement d'une tranche d'eau sur une marée ou une succession de marées.

Dans les problèmes de convection diffusion, la dérive résultante des courants près de la limite côté large des estuaires peut jouer un rôle important alors que sa détermination précise échappe le plus souvent aux investigations.

Cas bidimensionnel

Seront regroupés sous cette rubrique les résultats du modèle réduit : échelles 1/100°, 1/1 000°.

Trajectoires de flotteurs de surface

Huit positions de rejet ont été explorées. Pour chacune on suivait, sur une marée complète, les trajectoires de quatre flotteurs lâchés simultanément à des phases successives de la marée séparées par un intervalle de temps de deux heures : pleine mer, 2 heures après pleine mer, etc. Tous les essais ont été effectués pour la marée type de coefficient 95.

La présence de plusieurs chenaux, de bancs découvrant à marée basse et des digues basses de calibrage de l'estuaire conduit à des trajectoires très variables suivant le point et le temps de départ. Le tracé de l'enveloppe des trajectoires donne une représentation schématique plus maniable.

Les eaux issues d'un même point, à des instants successifs, se dispersent sur des superficies importantes de l'ordre de la centaine de kilomètres carrés. Un effluent, injecté à point fixe dans un estuaire, se répartit sous le jeu des courants de marée dans un volume de plusieurs centaines de millions de mètres cubes. La dispersion par les courants de marée favorise donc la dilution de l'effluent.

Le mouvement alternatif des eaux entraîne naturellement un recyclage ; l'équilibre moyen, qui s'établit autour du point de rejet, dépend de la convection résultante associée à la dérive des masses d'eau sur une marée et de la diffusion. Le rôle de celle-ci ne peut être analysé à la suite des essais présentement décrits.

La convection résultante, sur une marée, des eaux superficielles atteint plusieurs kilomètres. Son orientation dépend de la localisation du point de rejet et de l'instant de l'injection. Vu la complexité des trajectoires, il n'est pas possible d'énoncer des règles générales sur cette question. Trois facteurs ont une incidence assez marquée sur la convection résultante :

- le débit propre de la rivière
- la canalisation préférentielle des eaux par les digues de calibrage
- l'influence de la marée en Manche sur les courants du large de l'estuaire.

L'excursion des masses d'eau croît de l'aval vers l'amont où elle dépasse une vingtaine de kilomètres. Le calcul des trajectoires, en amont de Honfleur, a permis de recouper les valeurs observées sur le modèle physique.

Dispersion d'un traceur

L'essai entrepris, avec du chlorure de sodium comme traceur, visait à préciser les effets de la recirculation des eaux.

La salinité était enregistrée en six points de l'estuaire et les essais ont été effectués avec diverses positions du point de rejet pour un coefficient de marée constant et pour quelques valeurs du débit de la Seine et de l'effluent.

La remontée du traceur en direction de la prise d'eau de Norville constituait l'objet principal de ces essais. Les investigations entreprises ne visaient donc pas l'obtention de données permettant de décrire complètement les phénomènes. Quelques informations de caractère général seront dégagées des résultats d'essais.

Avec un débit de la Seine de 200 m³/s, la concentration croît d'amont en aval, du méridien 16 au méridien 10, le rejet se situant au méridien 13. Lorsque la diffusion est négligée, la concentration maximale se situerait à la limite de l'excursion aval des masses d'eau issues du méridien 13, soit vers le méridien 3, et atteindrait la concentration de dilution rapportée au débit propre de la rivière. Avec un apport de 1 500 t par marée, cette concentration s'établirait à 0,19 g/l. Trois kilomètres en aval de la prise, la concentration mesurée est de l'ordre de 0,1 g/l.

Une succession de quarante marées avait été prévue au départ pour être sûr d'obtenir un état stationnaire. L'expérience a montré que celui-ci se réalisait en moins de dix marées. Cette valeur semble correspondre au nombre de cycles de marée nécessaires pour que les différentes tranches d'eau de l'estuaire, qui se déplacent devant le point d'injection, atteignent une concentration stationnaire.

Lorsque le débit propre de la rivière a été supprimé, un état stationnaire n'était pas atteint au bout de trente marées ; la concentration en amont croissait régulièrement sous l'effet de la diffusion.

La diffusion qui existe sur le modèle ne représente qu'imparfaitement celle de la nature ; en particulier, le coefficient de diffusion longitudinal se trouve sensiblement majoré par la distorsion des échelles. La pénétration du traceur vers l'amont s'en trouve amplifiée et accélérée.

Cas unidimensionnel

La variation des coefficients de marée change les volumes d'eau stockés dans l'estuaire ; il était intuitivement supposé que le revif réduisait la dérive vers l'aval des masses d'eau, consécutive au débit propre de la rivière.

Pour analyser ce phénomène, des calculs de propagation de marée entre Honfleur, PK 357, et le barrage de Poses, PK 202, ont été effectués avec comme conditions aux limites :

- à l'aval, les niveaux enregistrés à Honfleur du 18 au 25 septembre 1972 ;
- à l'amont, un débit de 150 m³/s. Pendant la période considérée, le coefficient de la marée passait de 31 à 110.

Les trajectoires des masses d'eau ont été calculées en prenant un point de départ au méridien 13, PK 354,7, à l'instant de la renverse du jusant au flot.

Le point extrême amont, atteint par la tranche d'eau considérée, se décale en général vers l'aval d'une marée à la suivante. A cause de la proximité de la limite aval du modèle de calcul et du point de départ des trajectoires, 2,3 km, il n'était pas possible de suivre le déplacement sur plus de deux marées.

Le décalage vers l'aval de l'extrémité amont de la trajectoire d'une marée à la suivante est indiqué dans le tableau suivant :

CYCLE DE MARÉE	DÉRIVE (en km)
2	0,6
3	—
4	— 0,3
5	0,6
6	0,3
7	0,9
8	0,8
9	1,6
10	0,9
11	2
12	0,7
13	1,4
14	1,9

Le signe négatif correspond à une dérive vers l'amont.

La dérive, sur un cycle engendré par le débit propre de la rivière de 150 m³/s, peut être estimée à 1,2 km. L'accroissement des coefficients de marée réduit cette valeur, surtout au cours des premiers cycles, mais alors l'excursion des masses d'eau est plus faible qu'à l'époque des vives eaux.

L'inégalité diurne, qui influence surtout les niveaux des basses mers, a un effet sensible sur la dérive moyenne des eaux.

L'intégration numérique des équations de la marée pourrait, dans certains cas, affecter les résultats d'une telle étude alors qu'aucune anomalie n'apparaîtrait sur la déter-

mination des niveaux et des débits instantanés. Parmi les causes possibles d'imperfection des résultats on peut citer : l'extinction de l'état initial pendant les premiers cycles des marées calculées et l'expression de l'équation de continuité dans le cas où les largeurs varient rapidement en fonction des niveaux.

Les études entreprises n'avaient pas un caractère général et systématique. Les résultats présentés restent donc un peu fragmentaires. La description de quelques aspects importants des phénomènes de convection dans les estuaires à marée et des remarques sur les méthodes d'investigation formaient l'objet du présent exposé.

Discussion

Président : M. J. CHAPON

Après avoir félicité les deux conférenciers pour leur exposé fort clair sur deux aspects différents d'un même problème, M. le Président ouvre la discussion.

M. l'Inspecteur Général LARRAS apporte quelques précisions sur le problème évoqué par M. BARAILLER dans une intéressante intervention qu'il a bien voulu résumer comme suit :

L'étude présentée a permis de serrer le problème des diffusions dans l'Estuaire de la Seine de plus près et rendra, de ce fait, grand service pour l'organisation future des rejets en baie de Seine. Mais, dans le cas particulier des phosphogypses, il s'agit de matériaux lentement solubles qui comportent toujours un certain résidu insoluble (de l'ordre de quelques centaines de tonnes par jour) et on ne peut les rejeter qu'à 6 m au moins au-dessus du fond si l'on veut éviter tout engorgement de canalisation (et ceci à toute heure du jour dans n'importe quel cas de marée). D'autres contraintes interviennent (action du gypse sur les bétons, zones d'ancrage des navires, faune et flore sous-marines), de sorte qu'on s'est beaucoup éloigné des indications du modèle pour fixer les points de rejet des phosphogypses. Mais l'étude faite sera d'une grande utilité pour les rejets de matériaux déjà complètement dissous dans la conduite de rejet.

M. TIXERONT pose à M. KÉRISEL trois questions :

1° Quels sont les fonds dans l'estuaire à l'extrémité de l'endiguement (digue du Ratier) ?

2° L'aménagement de l'estuaire aura-t-il des répercussions sur les accès au port de Honfleur ?

3° Les travaux exécutés ont-ils eu une influence sur les dragages d'entretien et sur les volumes dragués annuellement ?

Je répondrais d'abord à la deuxième question qui est la plus simple, dit M. KÉRISEL.

Je pense que les profondeurs dans le chenal d'accès au port de Rouen sont nettement surabondantes pour le port de Honfleur, lequel ne peut recevoir que des bateaux de 4 000 ou 5 000 tonnes de port en lourd, tandis qu'actuellement, à Rouen, on peut recevoir des navires de 30 000 tonnes.

L'approfondissement du chenal d'accès du port de Rouen n'a pas entraîné de changement pour le port de Honfleur dont les possibilités sont limitées, non par le chenal d'accès mais par la cote du radier des différentes écluses.

Est-ce que les travaux d'approfondissement ont une importance ou non sur les dragages d'entretien, avez-vous demandé ?

En volume, l'importance des travaux d'entretien est restée pratiquement la même, mais au lieu d'être obligé de draguer en plusieurs points distincts dans la zone aval de l'estuaire, on n'a plus à draguer que sur un emplacement unique qui est la barre d'embouchure. Cela réduit les distances de transport et facilite le travail des dragues.

Répondant à la première question de M. TIXERONT, M. KÉRISEL précise qu'à l'extrémité de la digue du Ratier on se trouve assez proche des grands fonds de l'estuaire et les fonds passent rapide-

ment à -7 et -8 m ; l'engainement du chenal a donc été dragué à -6 m (cotes marines du Havre dont le zéro est au niveau des basses mers).

Se référant aux diapositives projetées par M. KÉRISEL, M. MAQUET (Directeur des Accès au Port Autonome de Nantes-Saint-Nazaire) demande :

1° Les fosses de flot qui subsistent au nord et au sud du chenal ont-elles tendance à se combler ou à se creuser ?

2° Les matériaux enlevés par le fleuve endigué ont été transportés vers l'aval ; leur zone de dépôt a-t-elle été gênante ?

Une première fosse, répond M. KÉRISEL, se situe au sud de la digue du Ratier. Au cours de nos divers essais, elle a particulièrement retenu notre attention car elle avoisine des plages — Deauville et Trouville ne sont pas très loin de l'estuaire — qu'il importait de conserver mais sans les engraisser indûment.

On peut dire que la fosse qui est au Sud de la digue du Ratier est restée stable aussi bien au cours des travaux de 1956 à 1963 qu'au cours des travaux de 1970 à 1971.

Il y a, en outre, une zone comprise entre la digue basse Nord et la digue haute qui a tendance à s'engraisser naturellement. C'est un phénomène favorable que nous avons cherché à accentuer puisqu'il est prévu de remblayer ultérieurement cette zone (entre digue basse Nord et digue haute Nord) pour l'extension de la zone industrielle du Havre.

Ceci nous a conduit à éliminer certains aménagements, comme par exemple un rehaussement au-dessus des cotes de pleine mer de la digue basse Nord, car cela aurait arrêté tout engraissement de la zone Nord.

En ce qui concerne la deuxième question, portant sur la destination des matériaux mis en mouvement à la suite de la création de la digue basse Nord, je peux dire que ces matériaux se sont lentement décalés vers l'aval. Il a fallu quelques mois pour que le creusement se fasse et, par conséquent, quelques mois pour que les sédiments soient expulsés vers l'aval.

En définitive, les sédiments en question ont été acheminés vers l'aval vers la zone des grands fonds.

Comment détermine-t-on l'échelle de temps dans un modèle physique ? demande M. VALADOU (Agence Financière de Bassin Loire-Bretagne).

Les résultats donnés par le modèle sont-ils confrontés à la réalité uniquement dans l'espace, ou simultanément, dans l'espace et dans le temps ?

Lorsqu'on a simulé l'historique de l'estuaire de la Seine depuis 1860 (?), fait-on des recalages chaque année pour réintroduire de nouvelles conditions initiales, ou laisse-t-on tourner le modèle pendant « 50 ans » ?

C'est à partir des essais « historiques », répond M. le Président, que l'on détermine le rapport entre le « temps modèle » et le « temps nature ».

Dans les « essais historiques », on cherche à reproduire ce qui s'est passé dans la nature. Pour l'estuaire de la Seine, on a constaté que pour la bonne correspondance entre ce qui se passait dans la nature et ce qui se passait sur le modèle, conduisait à considérer qu'un an « nature » correspondait à 50 marées « modèle ».

Ce choix, précise M. BARAILLER, n'est pas arbitraire, mais le résultat auquel on arrive dépend en grande partie de la schématisation adoptée pour le phénomène.

Pour l'estuaire de la Seine, on avait commencé à soumettre le modèle à une succession de marées de coefficients variables. Puis, on s'est aperçu que c'étaient les marées de vive eau qui avaient le plus d'effet sur les fonds et qu'on pouvait schématiser le phénomène en se limitant à la reproduction des marées de coefficients 95 et au-delà.

Il est certain que le nombre de marées qui correspond à une évolution « nature » est fonction du type de schématisation.

Depuis près d'un siècle, poursuit M. le Président, le Service du Port de Rouen établit chaque année une carte qui donne la situation de l'estuaire dans l'année considérée. Cette carte correspond, en fait, à la situation de l'estuaire à une certaine époque, mais les déplacements des fonds sont quelquefois importants. On choisit cependant la situation correspondant à la période où l'évolution a été la moins rapide; de plus, pendant cette période, les fonds peuvent varier dans le détail mais le tracé général des bancs de sable reste le même.

Finalement, la comparaison qui se faisait entre le modèle et la nature permettait de tester en quelque sorte le phénomène sur le modèle en fonction de ce que l'on constatait dans la nature.

Dans la première série d'essais qui a été faite, on est parti des années 1860 et l'on est arrivé à la situation de 1953 en vérifiant année par année. C'est une série continue de relevés qui a été faite; on vous a projeté la photo des fonds de 1911; on aurait pu tout aussi bien vous montrer la photo d'une autre année!

Les modifications du lit, apportées par les dragages et autres travaux, étaient réalisées sur le modèle à la date homologuée de celle de leur réalisation réelle mais sans modification du lit obtenu, comme il a été dit plus haut, en vue de le « recalculer » sur les observations contemporaines faites en nature. Une telle procédure aurait conduit à des délais et à des frais prohibitifs car si huit heures de fonctionnement du modèle représentaient 54 marées, le remodelage à la main des fonds du modèle exigeait huit jours de travail.

M. COUPRIE (Cie Française d'Entreprises) intervient en ces termes :

On vient de rappeler que l'enlèvement de l'estuaire de la Seine se fait à partir de sables du large; l'aménagement progressif de celui-ci aboutit maintenant à un comblement presque total de la basse vallée de la Seine. Les études faites donnent-elles des indications sur l'évolution future des mouvements du sable du large?

M. KÉRISEL répond :

Quand ils ne sont pas à une profondeur trop importante, les sables de la baie, situés au large de l'endigement, sont remis en suspension par la houle et sont entraînés vers l'estuaire par le courant de flot.

On peut estimer le rythme d'engraissement de l'estuaire puisqu'on possède les plans de sondage depuis près d'un siècle; il est de l'ordre de 4 millions de mètres cubes par an. Il a été plus fort dans le passé; il a plutôt tendance à se ralentir maintenant.

Or, d'une part, il reste d'importantes surfaces à remblayer et, d'autre part, les essais exécutés portant sur une période de 40 ans, montrent que, pendant toute cette période, la partie Nord continuera à se remblayer.

Il est certain, qu'en endiguant de plus en plus le chenal vers l'aval, on va arriver bientôt à une fosse relativement profonde (à la cote — 8 ou — 9). Quand on arrivera à ces grands fonds, des sables pourront être mis en mouvement dans certaines zones mais leur flux global annuel sera beaucoup moindre qu'aujourd'hui.

Sur une question d'un auditeur, M. KÉRISEL précise :

Les produits de dragage sont « clapés ». On aurait intérêt à les « claper » assez loin de l'estuaire pour éviter qu'ils ne reviennent sur le site de cet estuaire; mais cela augmenterait le temps de transport et diminuerait le rendement des dragues. On est donc obligé de trouver un optimum.

Il est certain qu'une partie des matériaux dragués revient dans le site; mais on s'arrange pour que ces matériaux en retour se déposent à l'endroit le moins gênant. On « clape » dans la partie Nord de l'estuaire pour que les matériaux clapés viennent engraisser cette zone et mettre éventuellement hors d'eau.

Il n'y a aucun rapport, observe M. le Président, entre la quantité des matériaux dragués et l'engraissement annuel parce que celui-ci concerne tout l'estuaire, tandis que les produits dragués sont enlevés à l'endroit gênant pour les mettre à un endroit où ils le sont moins, mais toujours à l'intérieur de l'estuaire; ils ne participent donc pas au bilan.

Si l'on ne draguait pas du tout, je ne crois pas que l'engraissement annuel serait beaucoup modifié. Il en serait de même si l'on draguait énormément dans le chenal (toujours en rejetant les produits dragués dans l'estuaire).

Vue d'avion, la drague qui travaille dans le chenal représente quelque chose de très petit par rapport à l'ensemble de l'estuaire. L'action de dragage ne paraît pas « à l'échelle » de l'ampleur de phénomènes qui conditionnent l'évolution de l'estuaire et son remblaiement progressif.

En raison des exigences de l'horaire, M. le Président clôt la discussion en remerciant vivement toutes les personnes qui l'ont animée. Il donne ensuite la parole à M. LESPINE pour l'exposé de sa communication.