

Étude par télédétection de la dispersion en mer des eaux estuariennes issues de la Gironde et du Pertuis de Maumusson

Hydrodynamique
Suspensions
Télédétection
Eaux côtières
Estuaire
Gironde
Hydrodynamic
Suspended sediments
Remote sensing
Coastal waters
Estuary
Gironde

P. Castaing ^a, G. P. Allen ^b, M. Houdart ^c, Y. Moign ^b

^a Laboratoire de Géologie et Océanographie, Université de Bordeaux-I, avenue des Facultés, 33405 Talence Cedex, France.

^b Unité Littoral, Centre océanologique de Bretagne, BP n° 337, 29273 Brest Cedex, France.

^c Centre national pour l'Exploitation des Océans, BP n° 107-16, 75763 Paris Cedex 16, France.

Reçu le 9/2/79, révisé le 21/5/79, accepté le 1/6/79.

RÉSUMÉ

L'étude effectuée dans la zone de l'embouchure de la Gironde vise à déterminer les modalités de la dispersion en mer des eaux estuariennes et des sédiments en suspension au cours d'une marée de grande vive-eau en période de crue fluviale. Dans la journée du 3 juin 1977, on a pu effectuer trois survols de la zone marine influencée par les eaux estuariennes: à mi-jusant, basse-mer, mi-flot. Le quatrième vol prévu à pleine-mer a dû être annulé par suite de conditions météorologiques défavorables. On dispose pour chaque vol d'une couverture infrarouge thermique et d'une couverture photo classique en noir et blanc. Les données de la télédétection sont étalonnées par des mesures *in situ*.

Le 3 juin, à l'embouchure de la Gironde et au large du Pertuis de Maumusson, on peut définir de façon relative quatre types d'eau: un type estuarien « très chaud et turbide »; un type estuarien « chaud et turbide »; un type côtier « froid et turbide »; un type marin « très chaud et non turbide ». Au cours de la marée, le noyau le plus chaud et le plus turbide se déplace vers l'Ouest puis vers le Nord, suivant ainsi l'évolution de l'orientation des courants de marée. Au large de Maumusson, une partie des eaux de la Gironde se mêle à celles de la Baie de Marennes-Oléron. Plus au Nord, au large de l'île d'Oléron, les nappes turbides mélangées, fragmentées et relativement dispersées sont transportées vers l'Ouest où elles sont progressivement reprises par les courants de dérive Nord-Sud. Après un temps plus ou moins long, fonction de l'agitation du milieu, elles se décantent dans une vase située au large de la Gironde.

Oceanol. Acta, 1979, 2, 4, 459-469.

ABSTRACT

Remote sensing study of the seaward dispersion of estuarine waters in the Gironde inlet and the Pertuis of Maumusson

The objective of this study, carried out in the Gironde estuary inlet, was to determine the nature of the seaward dispersion of estuarine water and suspended sediments during a spring tide and high river flow. On June 3, 1977, three flights were made over the inlet, at mid ebb, low tide and mid flood. The planned flight at high tide was cancelled due to adverse meteorological conditions. During each flight, thermal infrared coverage was obtained, together with black and white photographs. These data were correlated with concomitant ground measures of current velocity, salinity, temperature and suspended sediment concentration.

Four types of water masses were identified during the tidal cycle: estuarine "very warm and turbid" water; estuarine "cooler and turbid" water; coastal "cold and turbid" water; marine "very warm and non-turbid" water. The tidal movement and

dispersion of each of these water masses were analysed over the tidal cycle. The net tidal movement of the warm and turbid estuarine water is initially seaward to the West, then to the North, following the net coastal water drift. To the North of the Gironde inlet, the Gironde waters mix with those from the Marennes-Oleron Bay. Further North, the turbid plumes dispersed by fragmentation are transported seaward, where they are gradually entrained to the south in the offshore shelf drift. A considerable quantity of the seaward-expelled Gironde suspended sediments is deposited in a mud field on the inner and mid shelf adjacent to the estuary. The rates of mixing and dispersion of the estuarine waters on the shelf are relatively low. Dispersion, which appears to attain a maximum during mid ebb, is reduced at the beginning of flood tide, and the turbid plumes are preserved for a time without mixing.

Oceanol. Acta, 1979, 2, 4, 459-469.

INTRODUCTION

Le rejet en mer d'eaux estuariennes turbides à certains moments de la marée est un phénomène connu depuis longtemps. Déjà en 1882, Bouquet de La Grye décrivait la sortie des eaux foncées de la Gironde qui tranchaient sur les eaux océaniques plus claires. On a, depuis, observé ces rejets à l'embouchure d'un très grand nombre de fleuves sur l'ensemble du globe. Sur les côtes françaises, les auteurs se sont plus particulièrement intéressés à la Seine (Germaneau, 1969; Thomas, 1978), à la Loire (Berthois, 1956 et 1965; Desaubliaux *et al.*, 1978), à la Gironde (Verger, 1968; Allen *et al.*, 1971) et au Rhône (Blanc *et al.*, 1969; Pauc, 1970).

En général, les rejets s'étalent en mer sous forme d'un vaste nuage turbide, d'où la difficulté d'obtenir par les moyens nautiques classiques, une vision d'ensemble dans un laps de temps relativement court. C'est une lacune qui tend à se combler par suite du développement de la télédétection par avion et par satellite. Depuis 1972, avec le lancement des satellites « LANDSAT » puis « NOAA », on dispose d'excellents documents sur toutes les côtes françaises (Verger *et al.*, 1977, Thomas, 1978); mais, malheureusement trop dispersés dans le temps pour permettre d'établir une interprétation dynamique, à l'échelle de la marée, de l'expulsion des eaux estuariennes en mer. Si on veut appréhender la dynamique du processus, il est nécessaire de disposer d'une série « d'instantanés » pris à des intervalles de temps rapprochés et cela, seule la télédétection par avion semble pouvoir le permettre comme le confirme l'expérience décrite ici, effectuée en juin 1977 à l'embouchure de la Gironde et au large du Pertuis de Maumusson (fig. 1).

L'embouchure de la Gironde est constituée par un vaste plateau rocheux faiblement immergé entourant l'île de Cordouan et couvert d'une mince couche de sable. Ce plateau sépare la « passe Sud », profonde d'une dizaine de mètres au maximum, du chenal de navigation profond de 15 à 25 m en général. Au nord du chenal de navigation s'étendent le banc sableux de la Mauvaise en partie émergé à basse-mer et la flèche littorale de la Coubre qui limite l'ensemble des slikkes et schorres de la baie de Bonne Anse.

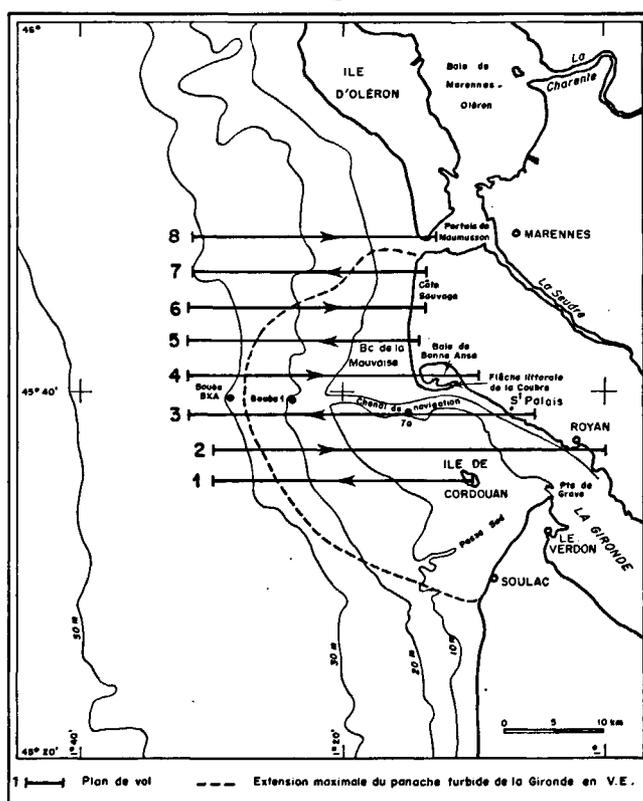
Le Pertuis de Maumusson enserré entre l'île d'Oléron et l'extrémité septentrionale de la Côte Sauvage est

étroit (1 km environ) et relativement profond (15 m en moyenne). Il constitue avec le pertuis d'Antioche au Nord, le principal exutoire de la baie de Marennes-Oleron dans laquelle se jettent la Seudre et la Charente.

MÉTHODE ET MATÉRIEL

Les opérations ont consisté essentiellement à survoler plusieurs fois le même jour cette région, afin d'obtenir au cours d'une marée, plusieurs couvertures photographiques et thermographiques de la zone marine influencée par les eaux estuariennes. Une campagne de mesures et de prélèvements hydrologiques synchronisée avec les survols a permis d'assurer la « vérité mer »

Figure 1
Localisation de la zone survolée le 3 juin 1977.
Location of the remote sensing study area on June 3, 1977.



c'est-à-dire l'étalonnage en turbidité et température des clichés recueillis.

L'expérience ne pouvait avoir lieu que si plusieurs conditions étaient simultanément remplies : un ciel dégagé, une mer relativement calme et une période de vives-eaux conjuguées à des forts débits fluviaux, car le panache turbide est alors particulièrement développé. Après plusieurs essais infructueux par suite des mauvaises conditions météorologiques, l'opération a pu se faire le 3 juin 1977. Dans le projet initial, quatre survols devaient être accomplis au cours de la marée de 12 h 25 mn : à mi-jusant, basse-mer (BM), mi-flot, pleine-mer (PM). Mais le dernier vol, celui de la pleine-mer a dû être annulé par suite d'une aggravation des conditions atmosphériques.

Le positionnement très précis du quadrimoteur B 17 « forteresse volante » de l'Institut géographique National a été assuré grâce à l'utilisation d'un système Doppler. A bord de l'avion se trouvaient, d'une part une caméra photo Wild RC 8 (champ angulaire 74°) chargée avec du film aviation panchromatique noir et blanc de format 24 × 24 cm; d'autre part, un capteur électromagnétique à balayage Daedalus travaillant dans l'infrarouge thermique (3 à 5 et 8 à 14 μm, bande utilisée pour cette étude). Le champ angulaire utilisable est de 77°. L'appareil Daedalus à enregistrement analogique comporte en outre deux sources de référence de température : l'une est réglée de façon à fournir un signal énergétique supérieur au signal maximal émis par le sol ou l'océan, l'autre un signal énergétique inférieur au signal minimal émis (le 3 juin : 8-18° pour le 1^{er} vol; 10-20° pour les deux autres vols). Ce mode d'utilisation permet, par interpolation, une mesure des différences de températures de radiance avec une précision de ± 0,1°C.

Pour répondre aux buts que l'on s'était fixés, chaque survol devait couvrir le maximum de superficie dans le moins de temps possible. Le champ angulaire des capteurs aéroportés étant limité, il fallait donc que l'avion vole haut, sans toutefois atteindre une altitude trop élevée afin d'obtenir des clichés à une échelle suffisamment grande pour être aisément analysables. On a donc recherché un compromis qui tienne compte de ces impératifs. Pour cela, au cours des trois vols, l'avion a volé à 3 760 m d'altitude; les clichés ainsi obtenus sont à l'échelle du 1/23 000 pour les photographies panchromatiques et du 1/100 000 pour les restitutions thermographiques.

A cette altitude, l'avion a dû effectuer une série d'aller-retour pour couvrir la plus grande partie de la zone à étudier. Chaque survol a débuté par le Sud afin de suivre l'onde de marée en provenance du Sud-Ouest. Le quadrimoteur a parcouru les huit trajectoires (numérotées de 1 à 8) en effectuant ses aller-retour à partir de l'île de Cordouan, l'espacement des trajectoires étant calculé de façon à assurer un léger recouvrement des prises de vue.

La « vérité-mer » devait être assurée par deux bateaux en station fixe pendant 13 heures dans le chenal de navigation de la Gironde aux bouées 7 a et BXA (fig. 1).

Le bateau ancré à la bouée 7 a a pu se maintenir durant toute la marée, mais par suite du fort clapot levé par le vent de Nord-Est, l'autre bateau n'a pu rester au mouillage à la bouée BXA. Il a alors effectué à basse-mer une série de prélèvements d'eau et de mesures de température et de salinité en surface selon une route Sud-Nord recoupant le panache turbide.

Les mesures de vitesse et de direction du courant ont été assurées à la bouée 7 a toutes les heures, sur toute la hauteur d'eau, à l'aide d'un courantomètre directionnel « Toho Dentan » à lecture directe. Les vitesses pouvant être mesurées avec cet appareil s'échelonnent de 0,1 à 3 m/s avec une précision de ± 0,05 m/s. Les directions sont données à 10° près.

Les salinités et températures ont été mesurées à l'aide d'un thermosalinomètre à lecture directe « Cambridge SA-MC 5 ». La précision est de 1/10 de degré pour la température et de 0,5‰ pour la salinité. Cet appareil avait été au préalable étalonné au laboratoire.

Les prélèvements d'eau à plusieurs niveaux ont été effectués à l'aide de bouteilles à renversement de type Nansen et la détermination des turbidités a été faite par filtration au laboratoire (appareillage et filtres calibrés Millipore).

RÉSULTATS

La station météorologique du sémaphore de la Coubre située à une dizaine de kilomètres du lieu des opérations, fournit des indications précises sur les conditions météorologiques au cours de la journée.

Le 3 juin 1977, la mer était peu agitée (force 3), mais le fort clapot levé par le vent du Nord-Est (40°N) et les courants de marée a contrarié, dans une certaine mesure, les opérations d'hydrologie. Les vents au niveau du sol étaient relativement faibles. Les vitesses moyennes relevées à la Coubre s'établissent entre 4 et 8 m/s. Le ciel est resté dégagé jusqu'à 17 h (TU + 2 heures) puisqu'il n'a été noté que quelques cirrus à très haute altitude. Après 16 h, en plus des cirrus, sont apparus des alto-cumulus à l'altitude moyenne de 2 500 m, ce qui a entraîné l'annulation du quatrième vol de la journée. Les températures de l'air relevées sous abri ont varié de 11°2 à 8 h, à 21°2 à 17 h. Il faut noter cependant que dans la zone des prélèvements, au niveau de l'eau, les températures étaient plus basses. A 11 h par exemple, on a relevé 14°7 au lieu de 16° à la Coubre.

Les données hydrologiques

Le 3 juin se situe au milieu d'une période de grande vive-eau (coef. 103-104), ce qui constitue une des conditions pour que le panache turbide ait une extension en mer maximale. Cette extension est évidemment favorisée par les forts débits fluviaux enregistrés durant tout le mois de mai. Au cours des 40 dernières années, la moyenne des débits de la Gironde au mois de mai a été de 800 à 850 m³/s (Allen, 1972). Celle du mois de mai 1977 est tout à fait exceptionnelle, de l'ordre de 1 600 m³/s, ce qui correspond au débit moyen enregistré au mois de janvier. Les crues ont été nombreuses

et fortes, particulièrement celle du 22 mai où on a mesuré 3 313 m³/s à la Réole pour la Garonne et 557 m³/s à Pessac-sur-Dordogne pour la Dordogne, ce qui donne un débit cumulé de 3 870 m³/s pour la Gironde.

D'après Migniot (1971), une crue de cette importance parvient à l'embouchure en une quinzaine de jours : c'est-à-dire dans le cas présent, dans les premiers jours du mois de juin. Les prévisions de Migniot ont été confirmées par la présence à la Pointe de Grave durant cette période, de nombreux troncs d'arbres et débris divers apportés de l'amont par la crue.

A l'embouchure de la Gironde, le 3 juin, jusant et flot ont eu une durée normale à mi-profondeur et au fond, malgré un décalage dans le temps de 1 h 30 mn à 2 heures par rapport au perdant et au montant. Par contre, en surface, le jusant a été anormalement long (7 heures) par rapport au flot (5 h 30 mn) et ceci revêt une grande importance pour l'interprétation des données de la télédétection. C'est pourquoi il semble nécessaire de décrire ici ce phénomène et d'en donner une explication.

Au moment de l'étalement de jusant, la vitesse s'annule à mi-profondeur et au fond et diminue jusqu'à 20 cm/s en surface. Puis le sens du courant s'inverse et le flot s'établit normalement dans la partie inférieure de l'écoulement. Mais près de la surface, on continue à observer du jusant pendant encore 1 heure et, chose surprenante, la vitesse recommence à augmenter en atteignant un maximum de 80 cm/s.

Cette double vidange est probablement imputable aux forts débits fluviaux. Lorsque les débits sont faibles ou moyens, les eaux sont peu stratifiées et toute la tranche d'eau a un comportement hydrodynamique homogène (Allen, 1972). L'onde de marée en provenance du Sud-Ouest suffit à contrebalancer le débit fluvial. A la Pointe de Grave où l'embouchure se resserre, le début du flot bloque la fin du jusant de l'estuaire et les eaux saumâtres turbides sont repoussées vers l'amont.

En période de forts débits fluviaux, les eaux de l'embouchure sont très stratifiées surtout en fin de jusant où, le 3 juin à la bouée 7 a, on a mesuré des salinités de 25,6 ‰ à 1 m du fond et 20,8 ‰ à 1 m de la surface pour une profondeur de 14,5 m.

Il existe donc une lame d'eau peu épaisse (2 à 5 m), fortement dessalée qui présente un comportement hydrodynamique différent de la masse d'eau plus salée sous-jacente. L'onde de flot pénètre dans l'embouchure de façon classique, c'est-à-dire préférentiellement par la partie inférieure de l'écoulement. Lorsqu'elle parvient à la Pointe de Grave, l'eau saumâtre du fond et de la mi-profondeur est repoussée vers l'amont. Mais le débit fluvial étant très élevé, il s'opère une sorte de mise en charge. Les eaux superficielles (2 à 5 m) qui s'écoulent encore vers l'aval sont un moment freinées; puis, assez brutalement, elles brisent le « barrage hydrodynamique » trop faible en surface. Les eaux saumâtres s'écoulent alors vers l'aval avec une vitesse accrue du fait de la mise en charge, en glissant à contre courant sur les eaux sous-jacentes. Il peut aussi se produire

un effet de déversoir, phénomène bien connu en hydraulique. Le front de salinité agirait comme un seuil mobile provoquant une perte de charge, d'où accélération des vitesses de courant.

Les données de la télédétection

Dans ce qui suit, nous ne donnerons que les résultats obtenus par thermographie, car la comparaison des thermographies et des photos classiques montre que d'une façon générale, il y a très peu de différences : les fronts thermiques correspondent aussi à des fronts de turbidité. Les eaux estuariennes sont remarquablement individualisées à la fois par leur température et leur turbidité.

Les enregistrements analogiques du Daedalus thermique ont été traités et restitués sous forme de photographies noir et blanc. Le lignage de l'image présent sur toutes les restitutions est dû au fait que la différence entre les températures de référence qui encadrent le signal était faible (10°). L'opérateur a dû forcer le gain des amplificateurs afin d'obtenir une différenciation en température visualisable sur l'image. Les huit bandes photographiques correspondant aux huit profils ont ensuite été montées afin d'obtenir la couverture au 1/100 000 sur laquelle on a travaillé. La numérisation des clichés n'ayant pas été réalisée, l'interprétation des restitutions photographiques n'a pu être que qualitative.

Les indications de température données par le Daedalus sont relatives et on sait que la teinte est d'autant plus foncée que la température est relativement plus élevée. Rappelons que les longueurs d'onde de l'infrarouge thermique sont peu pénétrantes et ne permettent d'obtenir des informations que sur les eaux tout à fait superficielles (Crepon, Deschamps, 1976). On s'est donc efforcé de caractériser les différentes masses d'eau en différenciant et comparant visuellement les teintes de gris. On est ainsi parvenu de façon relative à différencier quatre types d'eaux. On distingue :

- un estuarien « très chaud et turbide » : température, 15°5-15°8; turbidité, 20-55 mg/l;
- un estuarien « chaud et turbide » : température, 14-15°; turbidité, 10-20 mg/l;
- un côtier « froid et turbide » : température, 13°4-13°5; turbidité, 10-20 mg/l;
- un marin « très chaud et non turbide » : température, 15°5; turbidité, 5 mg/l.

Les indications qui se rapportent à la turbidité de l'eau ont évidemment été fournies par l'examen des photographies panchromatiques classiques et les résultats des prélèvements d'eau *in situ*.

Les températures en degrés Celsius ne sont données qu'à titre indicatif, car il est très difficile d'étendre des relevés ponctuels à l'ensemble de la zone. L'intervalle des températures est assez réduit (2, 4°), mais largement suffisant pour pouvoir parfaitement différencier les masses d'eau car, d'une part, elles sont bien individualisées du point de vue thermique et, d'autre part, le Daedalus a un pouvoir de résolution thermique de 0,1°C. Ne disposant pas de valeurs relevées *in situ*

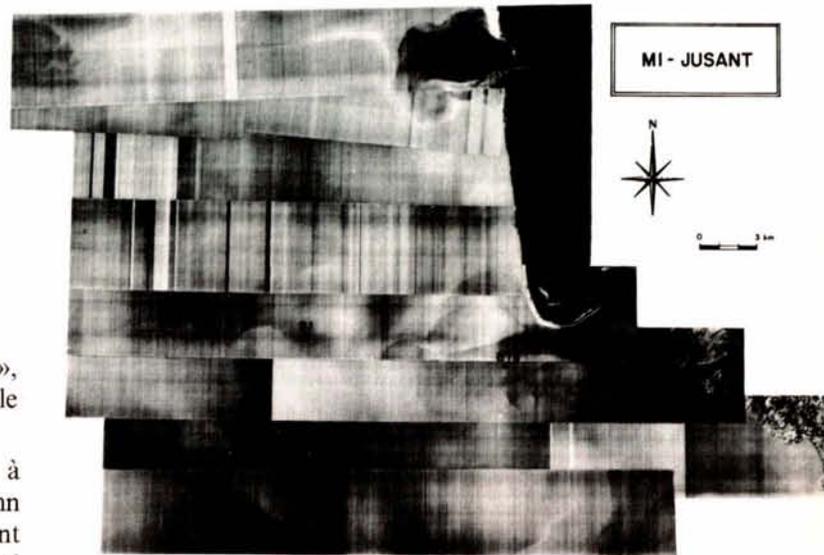


Figure 2a
Rejet en mer des eaux estuariennes à mi-jusant le 3 juin 1977.
Thermographie des eaux superficielles.
Seaward dispersion of estuarine water at mid ebb on June 3,
1977. Thermal imagery of the surface water.

pour caractériser le marin « très chaud et non turbide », on est parvenu à la température de 15°5 par simple comparaison des teintes de gris.

Enfin, la vitesse de l'avion étant peu élevée (145 à 200 km/h), chaque vol a eu une durée de 1 h 30 mn environ, si bien que les informations obtenues ne sont pas rigoureusement synchrones entre le Sud et le Nord de la zone survolée. Ainsi, le premier vol dénommé « mi-jusant » correspond en réalité *pour la surface* à PM + 1 h 30 mn près de Cordouan et vraisemblablement à PM + 3 heures près de Maumusson. Le deuxième vol dénommé « basse-mer » correspond pour la surface à PM + 4 h 30 mn près de Cordouan et vraisemblablement à PM + 6 heures près de Maumusson. Le troisième vol enfin, dénommé « mi-flot » correspond pour la surface à BM + 1 heure près de Cordouan et vraisemblablement à BM + 2 h 30 mn près de Maumusson. En toute rigueur les appellations « mi-jusant », « basse-mer », « mi-flot », ne sont donc valables que dans la zone de Maumusson. Dans la réalité, le décalage de 1 h 30 mn ne présente aucun inconvénient pour ce qui concerne l'interprétation, à condition, bien sûr, d'en tenir compte.

Thermographie à mi-jusant (fig. 2)

- A l'embouchure de la Gironde, le gradient de température amont-aval est net. Les eaux estuariennes « très chaudes et turbides » ne dépassent guère l'alignement Nord-Sud de la Côte Sauvage. On peut distinguer deux fronts qui représentent deux pulsations estuariennes distinctes. La vidange de la baie de Bonne Anse dans le chenal de navigation est canalisée le long de la flèche littorale de la Coubre. Plus en aval, les eaux estuariennes « chaudes et turbides » s'épanouissent en forme d'éventail centré sur le chenal de navigation et couvrant le banc de la Mauvaise au Nord et une partie des battures de Cordouan au Sud.

Au-delà de l'isobathe - 10 m, plusieurs fronts thermiques turbides représentent les restes des nappes estuariennes expulsées lors du jusant des marées précédentes. En effet, les résultats des mesures des vitesses de courant interdisent de les attribuer au jusant de la matinée du 3 juin et conduisent à leur fixer une ancienneté d'une ou plusieurs marées.

- Au Pertuis de Maumusson, les eaux estuariennes « très chaudes et turbides » sont très bien individualisées et le panache provoqué par l'effet de jet dessine un vortex lévoogyre. On retrouve plus à l'Ouest et probablement vers le Nord des eaux estuariennes « chaudes et turbides » représentant ici aussi une sortie antérieure.

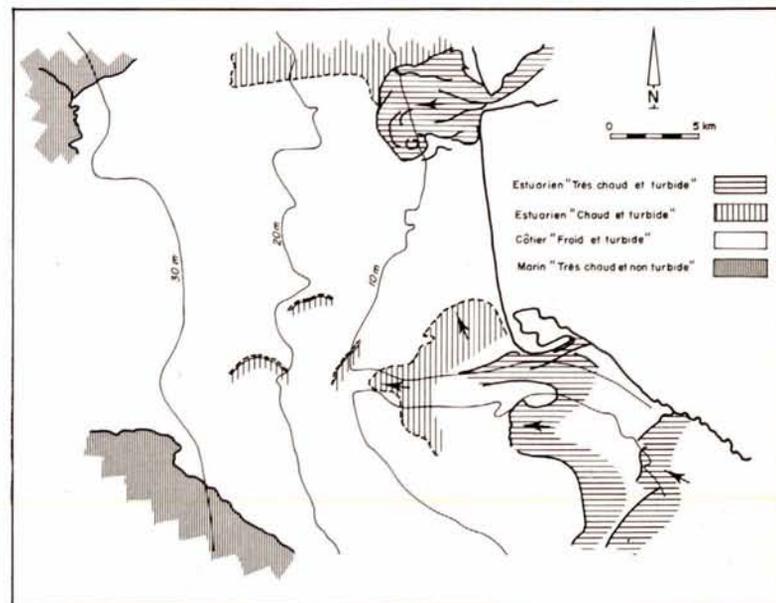


Figure 2b
Rejet en mer des eaux estuariennes à mi-jusant le 3 juin 1977.
Schéma interprétatif de la thermographie.
Seaward dispersion of estuarine water at mid ebb on June 3,
1977. Schematic interpretation of the thermal imagery.

Les eaux estuariennes de la Gironde et de Marennes-Oléron s'écoulent dans les eaux côtières « froides et turbides » qui constituent en quelque sorte le réceptacle des nappes d'advection.

- Les eaux marines « très chaudes et non turbides » sont localisées tout à fait au Nord-Ouest. La limite avec les eaux côtières est franche du fait de la différence de température importante.

Thermographie à basse-mer (fig. 3)

- A l'embouchure de la Gironde, l'aire de répartition

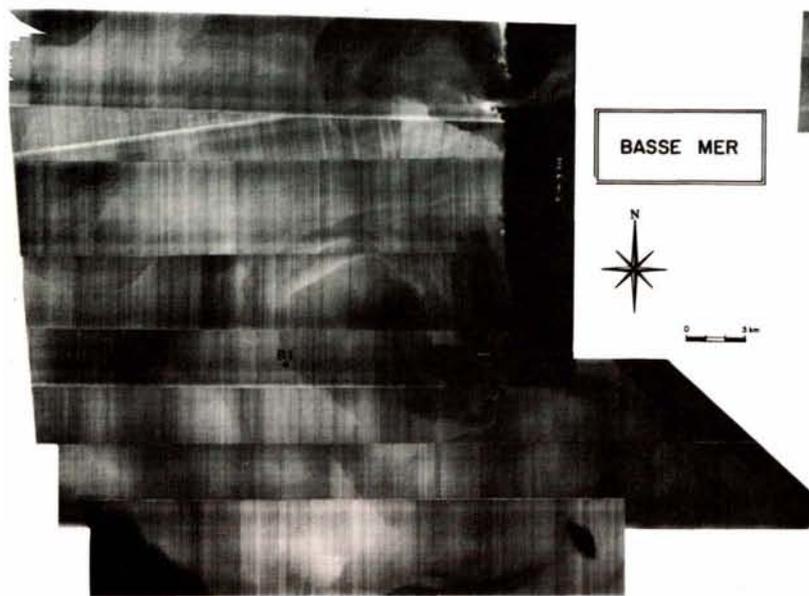


Figure 3a
Rejet en mer des eaux estuariennes à basse-mer le 3 juin 1977. Thermographie des eaux superficielles.
Seaward dispersion of estuarine water at low tide on June 3, 1977. Thermal imagery of the surface water.

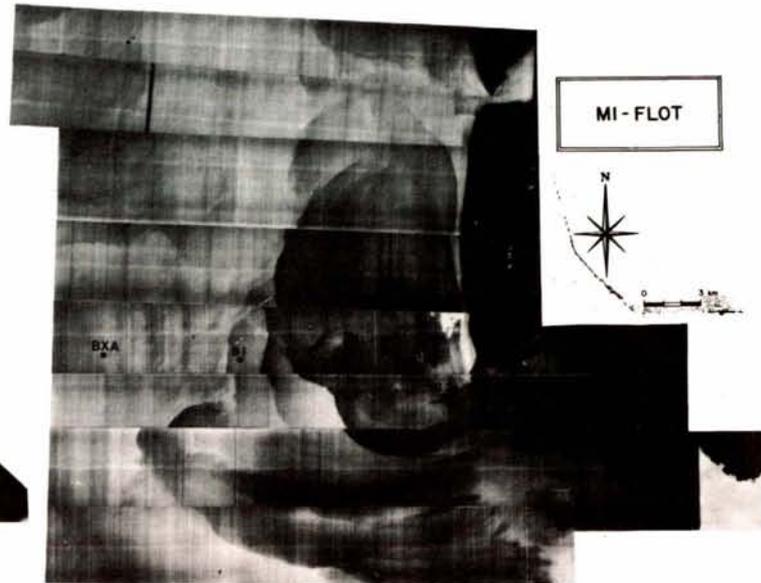


Figure 4a
Rejet en mer des eaux estuariennes à mi-flot le 3 juin 1977. Thermographie des eaux superficielles.
Seaward dispersion of estuarine water at mid flood on June 3, 1977. Thermal imagery of the surface water.

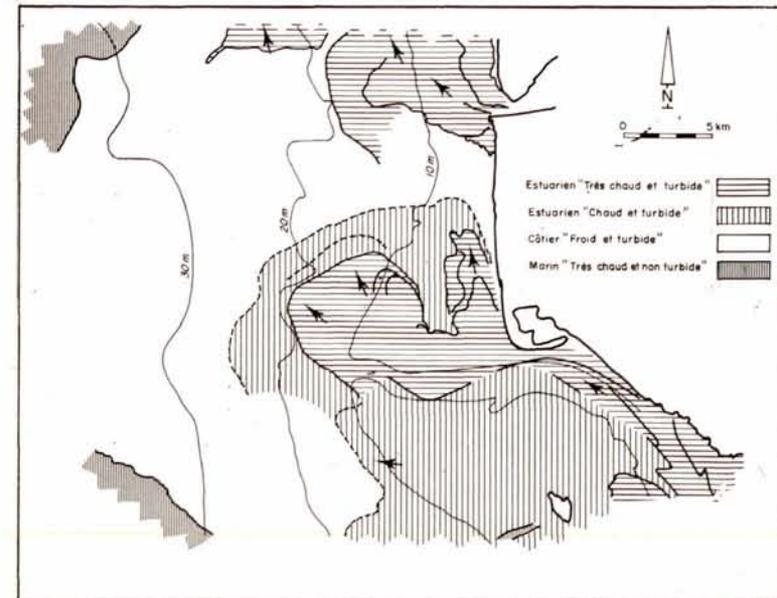


Figure 3b
Rejet en mer des eaux estuariennes à basse-mer le 3 juin 1977. Schéma interprétatif de la thermographie.
Seaward dispersion of estuarine water at low tide on June 3, 1977. Schematic interpretation of the thermal imagery.

des eaux estuariennes « très chaudes et turbides » est beaucoup plus vaste et s'est étendue vers le Nord et le Nord-Ouest. Cette extension affecte une forme en doigt de gant dont la position est guidée par la topographie du fond. Un des doigts orienté Sud-Nord longe la Côte Sauvage en empruntant un chenal peu profond (5 m), l'autre contournant le haut-fond sableux du banc de la Mauvaise en suivant pendant quelques kilomètres le chenal de navigation avant de s'épanouir en éventail vers le Nord-Ouest. De même, l'aire de répartition des eaux estuariennes « chaudes et turbides » s'est accrue dans toutes les directions au détriment des eaux côtières.

La vidange de Bonne Anse est achevée et on note au Sud-Ouest de l'île de Cordouan une langue d'eau plus chaude qui semble être en continuité avec les eaux

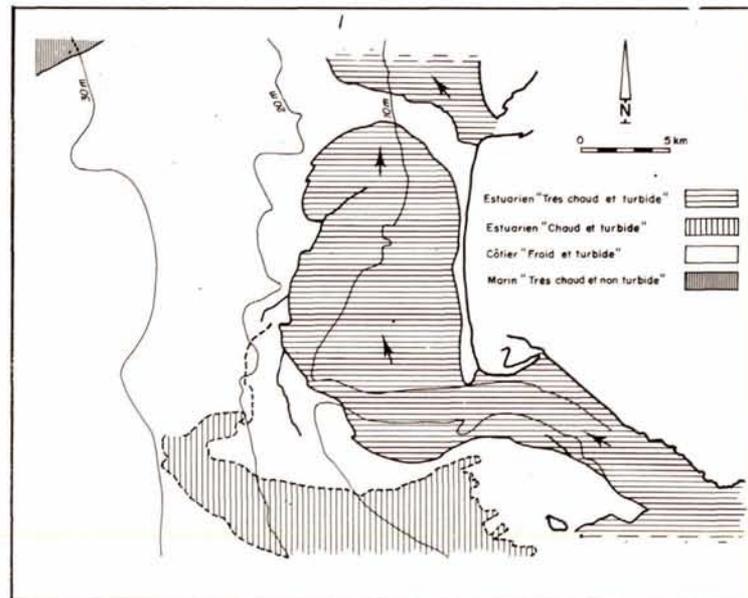


Figure 4b
Rejet en mer des eaux estuariennes à mi-flot le 3 juin 1977. Schéma interprétatif de la thermographie.
Seaward dispersion of estuarine water at mid flood on June 3, 1977. Schematic interpretation of the thermal imagery.

marines qui ont été un peu repoussées vers l'Ouest.

- Au Pertuis de Maumusson, le panache estuarien « très chaud et turbide » s'est lui aussi développé vers l'Ouest et le Nord-Ouest. On peut distinguer deux fronts thermiques qui correspondent à un changement de l'orientation du jet sous l'action des courants de marée.

Thermographie à mi-flot (fig. 4)

- A l'embouchure de la Gironde, les eaux estuariennes « très chaudes et turbides » sont remodelées par les courants de flot provenant du Sud-Ouest et rabattues contre la Côte Sauvage, laissant cependant près de la terre une étroite bande d'eau plus froide. Cette nappe mesure environ 20 km de long et 10 km de large.

Les décrochements observés sur la frange occidentale de la nappe, d'un aller de l'avion au retour suivant; ont une origine dynamique et sont décelables grâce au décalage des survols dans le temps (10 minutes environ d'un aller au retour suivant).

A l'Ouest de Cordouan, se trouve une zone d'eaux estuariennes « chaudes et turbides » très étendue vers l'Ouest puisqu'elle atteint l'isobathe - 30 m. La position de ces eaux à mi-flot, beaucoup plus au large par rapport à la BM n'a rien d'étonnant si l'on se reporte aux heures de survol. En effet, au cours du deuxième vol, l'avion est passé sur les battures de Cordouan entre 2 heures et 2 h 30 mn avant l'étalement de jusant en surface. La nappe s'est donc encore largement étendue vers l'Ouest. Au cours du troisième vol, l'avion est repassé au-dessus de Cordouan entre 1 heure et 1 h 30 mn seulement après le début du flot en surface. Sur la thermographie de mi-flot, la nappe occupe donc à peu près la position qui était la sienne à l'étalement de jusant en surface.

Les eaux estuariennes « très chaudes » et « chaudes » sont séparées par des eaux côtières « froides » amenées par le flot. Dans la zone de Cordouan, le flot repousse les eaux vers le Nord contre la Côte charentaise. Au bord du chenal de navigation, le contact eaux « très chaudes »-« eaux côtières » est franc. Par contre, à l'Ouest de Cordouan, le contact eaux « chaudes »-« eaux côtières » n'est pas net et on a l'impression que la nappe estuarienne a été déchirée par l'onde de flot provenant de la Passe Sud. Sur la Passe de l'Ouest (près de la bouée 1), on observe des fronts thermiques chauds qui marquent les emplacements successifs des eaux estuariennes depuis la basse-mer.

● Au Pertuis de Maumusson, la vidange des eaux estuariennes est terminée. La nappe « très chaude et turbide » est rabattue vers le Nord-Est contre l'île d'Oléron. Les eaux côtières « froides et peu turbides » amenées par le flot s'insinuent entre les eaux de la Gironde et celles issues de la baie de Marennes-Oléron. Il est remarquable de constater que, tout comme à l'embouchure de la Gironde, le flot pénètre dans le pertuis de Maumusson par le chenal de la rive méridionale. La force de Coriolis est vraisemblablement responsable de cet état de fait.

DISCUSSION

Le 3 juin 1977, les eaux estuariennes et marines présentaient des différences de température peu importantes (2,4° au maximum). Malgré ce handicap, le radiomètre Daedalus thermique, du fait de son excellent pouvoir de résolution a permis de les différencier aisément sans l'aide de la numérisation. Ce radiomètre est parfaitement adapté au type d'étude envisagé ici, mais pour éviter des erreurs dans la détermination des différentes masses d'eau, les informations thermiques doivent être complétées par des photos classiques noir et blanc.

Il n'est pas besoin d'insister sur la nécessité absolue de pouvoir étalonner les données de la télédétection grâce à une « vérité-mer » très complète. Elle doit comprendre des mesures de courant grâce à des moulinets ou mieux par des lachers de perches lestées, des

mesures de température, de salinité, de turbidité. La « vérité-mer » aide à retrouver les différents fronts thermiques et (ou) de turbidité d'un survol à un autre. Elle évite dans tous les cas grâce aux mesures hydrodynamiques et aux déterminations des turbidités, de confondre les diverses nappes d'eau à la suite, par exemple, d'un éclaircissement différent d'un moment à l'autre de la journée.

La synthèse des informations recueillies le 3 juin permet de tirer des conclusions concernant d'une part les caractéristiques hydrodynamiques à l'embouchure de la Gironde et au pertuis de Maumusson, et d'autre part leur influence sur la dispersion des sédiments en suspension. Ces conclusions sont évidemment largement étayées par les connaissances antérieures (Allen *et al.*, 1971; Allen *et al.*, 1972; Allen, Castaing, 1973).

Les propriétés dispersives du milieu

La connaissance des propriétés dispersives du milieu est fondamentale pour la prévision du comportement des polluants éventuels. A ce titre, on pense que les eaux estuariennes turbides de la Gironde constituent un excellent traceur et peuvent reproduire à peu près fidèlement les conditions d'une pollution accidentelle par les hydrocarbures à partir du port pétrolier du Verdon.

Ce que l'on appelle classiquement la dispersion correspond à la somme de plusieurs actions difficiles à étudier séparément. En premier lieu, il faut citer l'effet dispersif des gradients de vitesse verticaux et transversaux et aussi l'effet de turbulence propre au milieu.

A l'embouchure de la Gironde et au Pertuis de Maumusson, il convient d'ajouter l'effet de renverse des courants, l'effet de la topographie du fond (chenaux et bancs) et surtout l'effet de la stratification saline très marquée à basse mer. La prise en considération de tous ces paramètres sort du cadre de cette étude et on se bornera ici à donner quelques indications, davantage destinées à montrer les tendances qu'à fournir des valeurs absolues.

En général, les coefficients de dispersion sont calculés à partir d'expériences de rejets de colorants (le plus souvent de la rhodamine B) dans le milieu naturel. Les formules mises au point grâce à ces expériences impliquent toutes que l'injection du colorant soit ponctuelle, instantanée (fonction de Dirac) et effectuée à la surface de l'eau. Le Centre d'Études atomiques a procédé à une expérience de ce type à l'embouchure de la Gironde, les 17 et 18 février 1976. On a pu ainsi déterminer que même en vives-eaux dans la région du Verdon, les valeurs de D_x et D_y restent faibles en début de jusant : de 0,1 à 0,4 m²/s. Ensuite D_x augmente fortement (20 m²/s) lorsque les fonds remontent à l'engainement de la Passe Sud, pour décroître ensuite (Caillot *et al.*, 1976).

Si on veut maintenant déduire ces coefficients de dispersion de l'expérience de télédétection du 3 juin en utilisant les sédiments en suspension comme traceur, on se heurte à une difficulté majeure : le rejet n'est ni ponctuel, ni instantané, ni effectué en surface. Ceci

nous interdit d'utiliser par exemple une formule du type :

$$S = 2 \prod t \sqrt{K_x K_y}$$

qui donne les valeurs de la dispersion horizontale $K_x K_y$ par simple planimétrie des surfaces (S) des taches de colorant. On en est donc réduit à comparer la surface des nappes turbides à divers moments de la marée. On peut ainsi se faire une idée de la « dispersion horizontale ». En effectuant le quotient des valeurs des surfaces par le temps d'application des courants, on obtient la valeur absolue des variations des surfaces exprimées en mètres carrés par seconde. Le rapport des aires donne le taux de variation de ces surfaces. Les valeurs obtenues sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Les valeurs absolues des variations de surface évoluent dans le même sens au cours du jusant à l'embouchure de la Gironde et au Pertuis de Maumusson. Mais à Maumusson, pour un même moment de la marée, les valeurs sont inférieures de 50 à 80 % à celles de la Gironde, sauf entre PM et PM + 3 où elles sont supérieures de 10 % environ par suite de l'effet de jet provoqué par l'étroitesse du Pertuis. A l'embouchure de la Gironde, l'augmentation de surface est faible de PM à PM + 3, elle devient ensuite très importante de PM + 3 à BM. Les valeurs croissent aussi à Maumusson, mais dans de bien moindres proportions.

Les chiffres proposés peuvent paraître élevés, mais ils sont cohérents comme le montre le calcul des vitesses de courant nécessaires pour produire de telles variations. Dans le cas de l'embouchure de la Gironde, l'accroissement de 1 735 m²/s de PM à PM + 3 se répartit à PM sur un front de 10 km environ. Une vitesse de 0,20 m/s suffit à assurer un tel accroissement. Encore s'agit-il là d'une vitesse moyenne maximale, puisqu'au cours du jusant, le front de turbidité devient de plus en plus étendu et donc implique des vitesses de plus en plus faibles pour assurer cet accroissement. De même de PM + 3 à BM, le front initial étant long de 22 km, il faut une vitesse moyenne maximale de 0,50 m/s pour assurer un accroissement de 11 000 m²/s. Ceci est très inférieur aux vitesses effectivement mesurées à ce moment de la marée.

A Maumusson, le front initial à PM est très réduit (largeur du Pertuis : 1 km), ce qui implique théoriquement une vitesse moyenne maximale de 2 m/s. Mais, dès la sortie du Pertuis, le front s'élargit considérablement (3,5 km) et l'accroissement de 2 040 m²/s ne nécessite en fait que des vitesses très inférieures au calcul théorique (0,60 m/s en début de jusant et beaucoup moins ensuite).

L'examen du taux de variation des surfaces permet d'apprécier les fluctuations des aires turbides au cours de la marée.

A l'embouchure de la Gironde, la surface initiale turbide de 25,5 km² ne s'accroît qu'une fois et demi jusqu'à PM + 3. Mais ensuite, la surface à PM + 3 (38 km²) est multipliée par 4 et elle atteint 157 km² à BM. Le taux de variation moyen de la PM à la BM s'établit à 7,5.

Au Pertuis de Maumusson, à l'inverse de la Gironde, le taux est très fort en début du jusant. La surface initiale passe de 7 à 29 km² soit un taux de variation de 4. Ensuite, à partir de PM + 3 et, au contraire de la Gironde, les valeurs diminuent. Le taux de variation moyen de la PM à la BM s'établit à 12.

En résumé, si on compare l'embouchure de la Gironde et le Pertuis de Maumusson, on s'aperçoit que pendant le jusant, la « dispersion horizontale » moyenne semble être un peu meilleure à Maumusson (la surface initiale s'est accrue 12 fois au lieu de 7,5) bien que les valeurs absolues des variations de surface y soient nettement moins élevées. Le taux de variation des surfaces indique que c'est entre PM + 3 et BM à l'embouchure de la Gironde et entre PM et PM + 3 à Maumusson que la « dispersion » est la meilleure.

Le déplacement des nappes estuariennes au cours de la marée (fig. 5)

Le rejet des eaux estuariennes se fait par des pulsations périodiques réglées par le rythme des marées semi-diurnes. Une pulsation a lieu toutes les 12 h 25 mn en début de jusant pendant à peu près 6 heures. Le rejet n'est pas régulier et passe par un maximum à mi-jusant,

		Variations de surface par rapport				Temps d'application des courants (h)	Valeurs absolues des variations de surface (m ² /s)	Taux de variation des surfaces
Moment de la marée par rapport à Cordouan		Surfaces (km ²)	au moment précédent	à PM (km ²)				
Embouchure de la Gironde	PM	25,5	-	-	-	-	-	
	PM-PM + 3	38	+ 12,5	-	2	1 735	1,5	
	PM + 3-BM	157	+ 119	-	3	11.000	4	
	PM-BM	195	-	+ 169,5	5	9 420	7,5	
Pertuis de Maumusson	PM	7	-	-	-	-	-	
	PM-PM + 3	29	+ 22	-	3	2 040	4	
	PM + 3-BM	56,5	+ 27,5	-	3	2 545	2	
	PM-BM	85,5	-	+ 78,5	6	3 635	12	

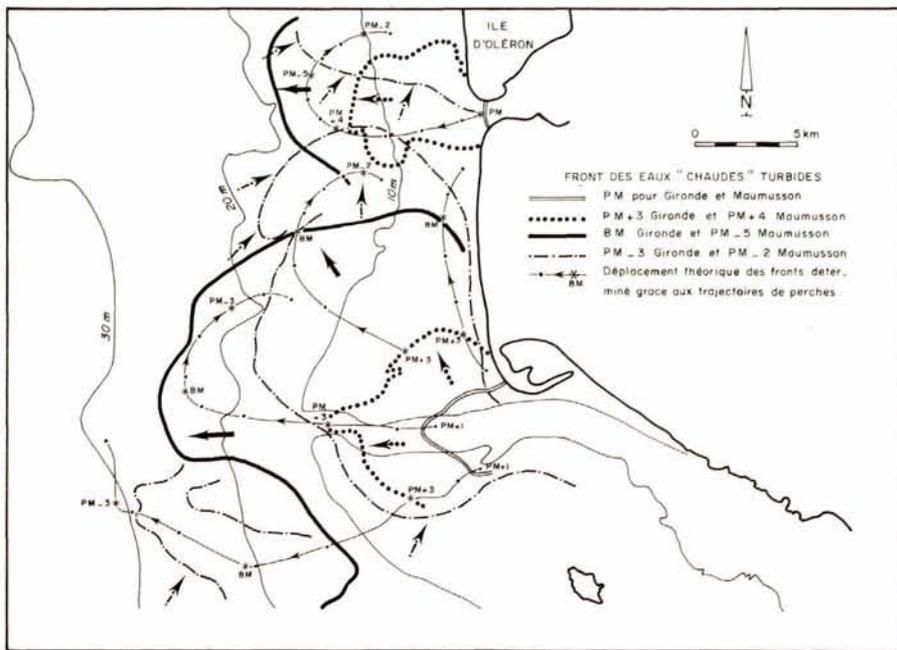


Figure 5
Mouvement des masses d'eau estuariennes à l'embouchure de la Gironde au cours d'une marée de vive-eau.
Movement of the estuarine water masses in the Gironde inlet during a spring tide.

car c'est à ce moment que les courants sont les plus rapides.

Au cours du jusant et jusqu'à la basse-mer, les eaux estuariennes forment une nappe d'advection qui s'élargit dès la sortie des embouchures et s'étale en éventail dans toutes les directions. Ceci est particulièrement démonstratif à Maumusson du fait de l'étréoussure du pertuis.

A l'embouchure de la Gironde, les photos-satellite (Martin, 1977) prouvent que les eaux turbides s'étalent en un demi-cercle dont la limite vers le large suit à peu près l'isobathe - 30 m. Mais les noyaux les plus chauds et les plus turbides sont centrés sur les chenaux : Passe Sud et surtout chenal de navigation. Dans ce dernier chenal, les eaux se déplacent vers l'Ouest presque jusqu'à la basse-mer, elles prennent ensuite au début du flot une orientation Nord puis franchement Nord-Est. Sur le banc de la Mauvaise, les directions sont Nord-Ouest en début de jusant, puis Nord et Nord-Est ensuite. Ainsi, au cours de la marée, le noyau le plus chaud et le plus turbide subit une translation vers l'Ouest, puis vers le Nord suivant ainsi l'évolution de l'orientation des courants. Au cours de cette translation, sa forme est remodelée et le noyau laisse derrière lui à l'Ouest les empreintes turbides des positions antérieures. Le même phénomène s'observe à la sortie de Maumusson où, à mi-flot et jusqu'à la pleine mer, la partie distale du panache de la Gironde se mélange à « l'empreinte » des suspensions de Marennes-Oléron restée à la position occupée à basse-mer.

Les lachers de perches lestées effectués depuis plus de 15 ans ont permis de retrouver la position supposée, à pleine mer, des fronts chauds et turbides observés à mi-jusant le 3 juin. Cette position est fixée avec une bonne précision, car ce jour là, les déplacements des eaux estuariennes sont étroitement calqués sur les

trajectoires de perches tant au point de vue des directions qu'au point de vue des vitesses.

Le devenir des sédiments en suspension

Sur la Côte Aquitaine comme sur toute la Côte Atlantique, on peut distinguer des « eaux côtières » et des « eaux du plateau ». Les premières sont légèrement dessalées et assez turbides (5 à 10 mg/l en moyenne), surtout à l'embouchure des fleuves. Par contre, les eaux du plateau présentent en général une salinité normale et une turbidité plus faible (1 à 5 mg/l sur le plateau interne au débouché des grands fleuves). Les eaux côtières sont soumises à l'action prépondérante des courants de marée, alors que les déplacements des eaux du plateau sont plutôt sous la dépendance des courants généraux de dérive.

Les études de ces courants superficiels par des flotteurs dérivants (Sitarz, 1955) et l'observation des photos satellite, montrent que dans cette région, la dérive est en général dirigée vers le Sud. Sur la restitution photo des données « LANDSAT » du 11 juillet 1973 à mi-flot, on observe le panache turbide de la Gironde et celui du pertuis de Maumusson (fig. 6). Plus au large, les suspensions solides issues depuis plusieurs marées de ces deux exutoires et du pertuis Breton, forment un nuage diffus qui est dispersé vers le Sud par les courants généraux de dérive.

A l'embouchure de la Gironde et au large de l'île d'Oléron, la limite externe de prépondérance des courants de marée se situe entre les isobathes - 30 et - 40 m. Les courants de dérive prennent le relais vers l'Ouest. A chaque jusant, deux nappes d'advection très bien individualisées par leur salinité, leur température et leur turbidité viennent se jeter dans les eaux côtières. A BM la partie distale de la nappe advective



Figure 6
Dispersion des eaux turbides superficielles sur le plateau continental nord-aquitain le 11 juillet 1973 à mi-flot. Image du satellite « LANDSAT 1 ».

Seaward dispersion of the surface turbid waters on the north aquitaine continental shelf on July 11, 1973. "LANDSAT 1" satellite imagery.

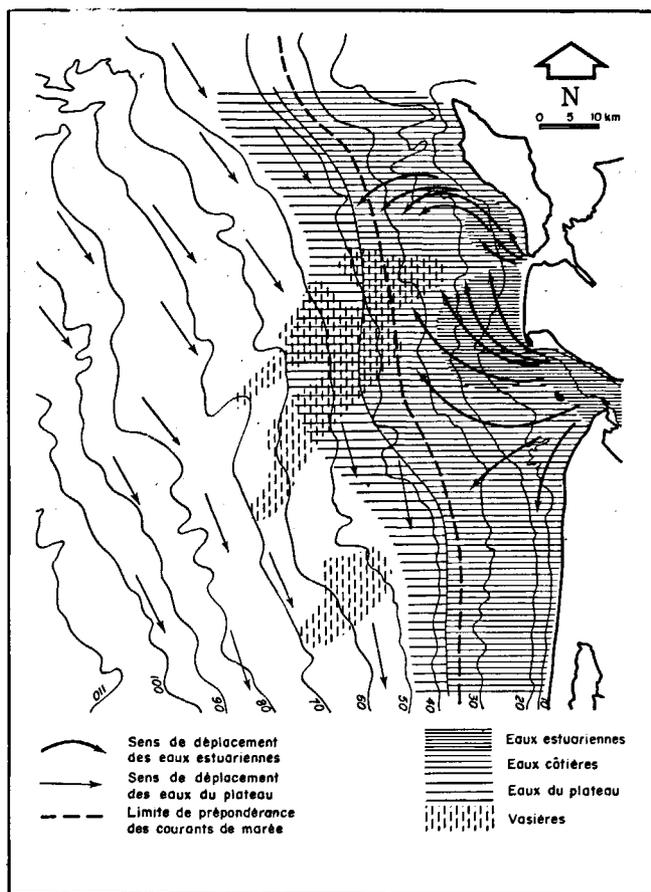


Figure 7

Répartition et déplacement des différentes masses d'eau sur le plateau continental au large de l'embouchure de la Gironde. *Distribution and movement of water masses on the North Aquitaine continental shelf.*

de la Gironde échappe à l'emprise des courants de marée et alimente directement la vasière située au large de l'embouchure. La décantation plus ou moins rapide est fonction de l'intensité des courants de dérive et de l'agitation due à la houle. La petite vasière située au large de la côte médocaine est alimentée de la même façon par une partie des suspensions issues de la Passe Sud (fig. 7).

Mais le noyau de la nappe de la Gironde reste, comme nous l'avons vu plus haut, sous l'influence des courants de marée qui assurent tout d'abord sa « dispersion » et son déplacement vers le Nord. La dispersion turbulente et la dilution dans les eaux côtières se font assez lentement puisqu'on retrouve des restes de nappes turbides sorties plusieurs marées auparavant. Au débouché de la Gironde et, dans une moindre mesure au débouché de Maumusson, la progression vers le Nord est d'abord rapide, puis elle se ralentit sur la côte Ouest d'Oléron où une partie des eaux de la Gironde se mêle à celles de la baie de Marennes-Oléron.

Au large d'Oléron, les nappes turbides mélangées, fragmentées et relativement dispersées sont progressivement déplacées vers l'Ouest par les courants de marée. Le changement de direction est provoqué par la présence d'un haut-fond rocheux, matérialisé par l'isobathe - 20 m, qui dévie les courants Sud-Nord vers l'Ouest. Les déplacements des suspensions sont alors progres-

sivement assurés par les courants de dérive. Les suspensions sont entraînées par ce mouvement très lent et se décantent peu à peu dans la vasière située au large de la Gironde.

Remerciements

Cette étude a été effectuée à la demande du Centre national pour l'Exploitation des Océans (CNEXO) par le Laboratoire d'Océanographie de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine (IGBA). Les survols et la mise en forme des données de la télédétection ont été assurés par l'Institut Géographique National (IGN) et le Groupement pour le Développement de la Télédétection aérospatiale (GDTA).

RÉFÉRENCES

- Allen G. P., 1972. Étude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde, *thèse de doct. ès-Sci.*, Univ. Bordeaux-I, 314 p.
- Allen G. P., Castaing P., 1973. Suspended sediment transport from the Gironde estuary (France) onto the adjacent continental shelf, *Mar. Geol.*, **14**, M 47-M 53.
- Allen G. P., Castaing P., Klingebiel A., 1972. Contribution à l'étude de la circulation des masses d'eau à l'embouchure de la Gironde, *C. R. Acad. Sci.*, **275**, 1972, 181-184.
- Allen G. P., Klingebiel A., Vigneaux M., 1971. Modalité de répartition des suspensions issues de l'estuaire de la Gironde sur le plateau continental atlantique, *C. R. Acad. Sci.*, **273**, 1971, 2211-2214.
- Berthois L., 1956. Turbidité des eaux à l'entrée de l'estuaire de la Loire, *C. R. Acad. Sc.*, **243**, 1956, 2113-2115.
- Berthois L., 1965. Essai de corrélation entre la sédimentation actuelle sur le bord externe des plate-formes continentales et la dynamique fluviale, in *Progress in Oceanography*, Pergamon Press, **3**, 49-62.
- Blanc F., Chamley H., Leveau M., 1969. Les minéraux en suspension, témoins de mélange des eaux fluviales en milieu marin. Exemple du Rhône, *C. R. Acad. Sci.*, **269**, 1969, 2509-2512.
- Caillot A., Massias J., Santos-Cottin H., Sauzay G., Ville B., 1976. Études des propriétés dispersives à l'embouchure de la Gironde, Rapport de contrat PAB-CEA, DCA/SARR/SAPRA. 76/09/S41/MCM, 7 p.
- Crepon M., Deschamps P. Y., 1976. La télédétection en Océanographie, Soc. Hydrotechnique de Fr., 14^e journées de l'hydraulique, Paris 1976, quest. 2, rapp. 6, 6 p.
- Desaubliaux G., Fablet A., Frenel P., Le Douarec P., Ottmann F., Quere J., 1978. Conditions de mélange des eaux douces et salées dans l'estuaire externe de la Loire. Conséquences pour la pollution bactérienne, *J. Rech. Océanogr.*, **3**, 2, 29-51.
- Germaneau J., 1969. Étude de la sédimentation dans l'estuaire de la Seine. Origine, déplacement et dépôt des suspensions, *Trav. du CREO*, **9**, 1-4.
- Martin J. M., 1977. Le milieu estuarien, *Recherche*, **8**, 78, 425.
- Migniot Cl., 1971. L'évolution de la Gironde au cours des temps, *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, **11**, 221-281.
- Pauc H., 1970. Contribution à l'étude dynamique et sédimentologique des suspensions solides au large de l'embouchure du Grand Rhône (Grau de Roustau), *thèse 3^e cycle*, inédite, Univ. Montpellier, 126 p.
- Sitarz J., 1955. Résultats de la détermination dans le Golfe de Gascogne et la Manche des courants superficiels par la méthode des flotteurs dérivants, *Bull. du CREO*, **11**, 8-9, 15 p.
- Thomas Y. F., 1978. Étude par télédétection de certaines zones côtières de la France, Lab. de Géographie, École Normale Supérieure, Montrouge, Contrat CNEXO 76/1580, 168 p.
- Verger F., 1968. Marais et wadden du littoral français, Biscaye Frères Imp., Bordeaux, 541 p.
- Verger F. *et al.*, 1977. Télédétection du littoral océanique de la France, Trav. équipe Fralit, Coll. École Normale Supérieure de jeunes filles, Montrouge, n° 11, 310 p.