

## Chapitre IV

### Validation expérimentale du modèle Un exemple : la circulation résiduelle et la caractérisation des masses d'eau dans la zone côtière belge

par

O. BECKERS, R. WOLLAST et Jacques C.J. NIHOUL

#### 1.- Introduction

Le modèle mathématique interdisciplinaire général donne naissance à toute une hiérarchie de modèles partiels, orientés vers l'investigation de problèmes spécifiques ou la solution de questions de gestion particulières : prédiction des marées et des tempêtes, détermination de la circulation résiduelle, du transport des sédiments ou de l'érosion des fonds, calcul de la dispersion des nutriments et des polluants, des échanges entre matières dissoutes et matières particulaires, identification des interactions écologiques et description dynamique des écosystèmes, évaluation des taux de transfert et des facteurs d'accumulation dans les chaînes alimentaires, estimation des taux de contamination des produits de la mer, etc.

Une surveillance expérimentale continue, associée à la poursuite des recherches ou au contrôle des mesures de gestion, est indispensable et les résultats, prédictions et recommandations des modèles doivent

être confrontés en permanence avec les observations de manière à maintenir un dialogue systématique entre les modélisateurs, les expérimentateurs et les utilisateurs et à garantir le réalisme des modèles et leur adaptation aux situations changeantes du système.

Cette interaction entre la théorie, l'application et l'expérience est la *validation du modèle*.

A titre d'illustration, on considère ici le modèle de la circulation résiduelle et ses implications sur le mouvement et les caractéristiques des masses d'eau et la distribution des sédiments.

## 2.- Les modèles classiques de circulation résiduelle

Les modèles classiques de circulation résiduelle en mer du Nord peuvent être groupés en trois catégories :

### i) Modèles semi-empiriques

Ici le modèle est utilisé seulement pour calculer le courant de marée qui est alors soustrait du courant observé. La différence est prise comme le courant résiduel au point d'observation.

Considérant le champ de vitesses résiduelles ainsi obtenu, comme un état stationnaire, des lignes de courants sont tracées par des techniques d'interpolation classiques et le dessin des lignes de courants est considéré comme la représentation de la circulation résiduelle.

Les courants résiduels obtenus par des modèles semi-empiriques de ce type contiennent évidemment des composantes transitoires associées par exemple aux actions du vent et on comprend mal l'hypothèse de stationnarité et l'introduction des "fonctions de courants" par lesquelles les lignes de courants sont établies.

### ii) Modèles des résidus non-linéaires

Ces modèles se contentent de résoudre les équations hydrodynamiques transitoires et déduisent les courants résiduels en prenant la moyenne des résultats sur une période de temps choisie.

Ces modèles ne sont pas complètement sans intérêt puisque les interactions non-linéaires assurent qu'après avoir effectué la moyenne, il y ait, de fait, un résidu.

Ce résidu ne peut cependant représenter la véritable circulation résiduelle qu'avec une erreur de 100 % car, les courants transitoires de marées et de tempêtes étant au moins 10 fois plus grands que les courants résiduels, la moyenne des solutions est du même ordre de grandeur que l'erreur inévitable sur la solution elle-même [Nihoul et Ronday (1976)].

### iii) Modèles des courants nord-Atlantiques

Ces modèles recherchent une solution stationnaire des équations hydrodynamiques qui satisfait aux conditions aux limites imposées par la pénétration aux frontières en mer ouverte de deux branches du courant nord-Atlantique. Ils sont, dans un sens, complémentaires des modèles précédents (ii) en ceci qu'ils prennent en compte ce que ces derniers négligent et ignorent ce qu'ils mettent en évidence : le résidu non-linéaire des ondes longues.

Ces modèles se révèlent capables de reproduire la tendance générale de la circulation résiduelle mais ils ne parviennent pas à reproduire des écoulements secondaires dont l'existence est étayée par de longues séries d'observations et qui influencent de façon appréciable le temps de résidence des nutriments, des polluants, ..., dans certaines régions.

La figure 24 donne une représentation grossière du mouvement résiduel des masses d'eaux induite des observations. Les figures 25, 26 et 27 montrent la circulation résiduelle calculée à partir respectivement d'un modèle semi-empirique [Otto (1970)], d'un modèle de résidu non-linéaire [Hansen (1966)] et d'un modèle import-export classique [Ronday (1975)].

Ces modèles, s'ils reproduisent parfois la tendance générale de la circulation résiduelle, ne rendent pas compte de façon suffisamment détaillée des observations. On note, en particulier, qu'ils prédisent tous un courant littoral dirigé vers le nord-est le long de la côte

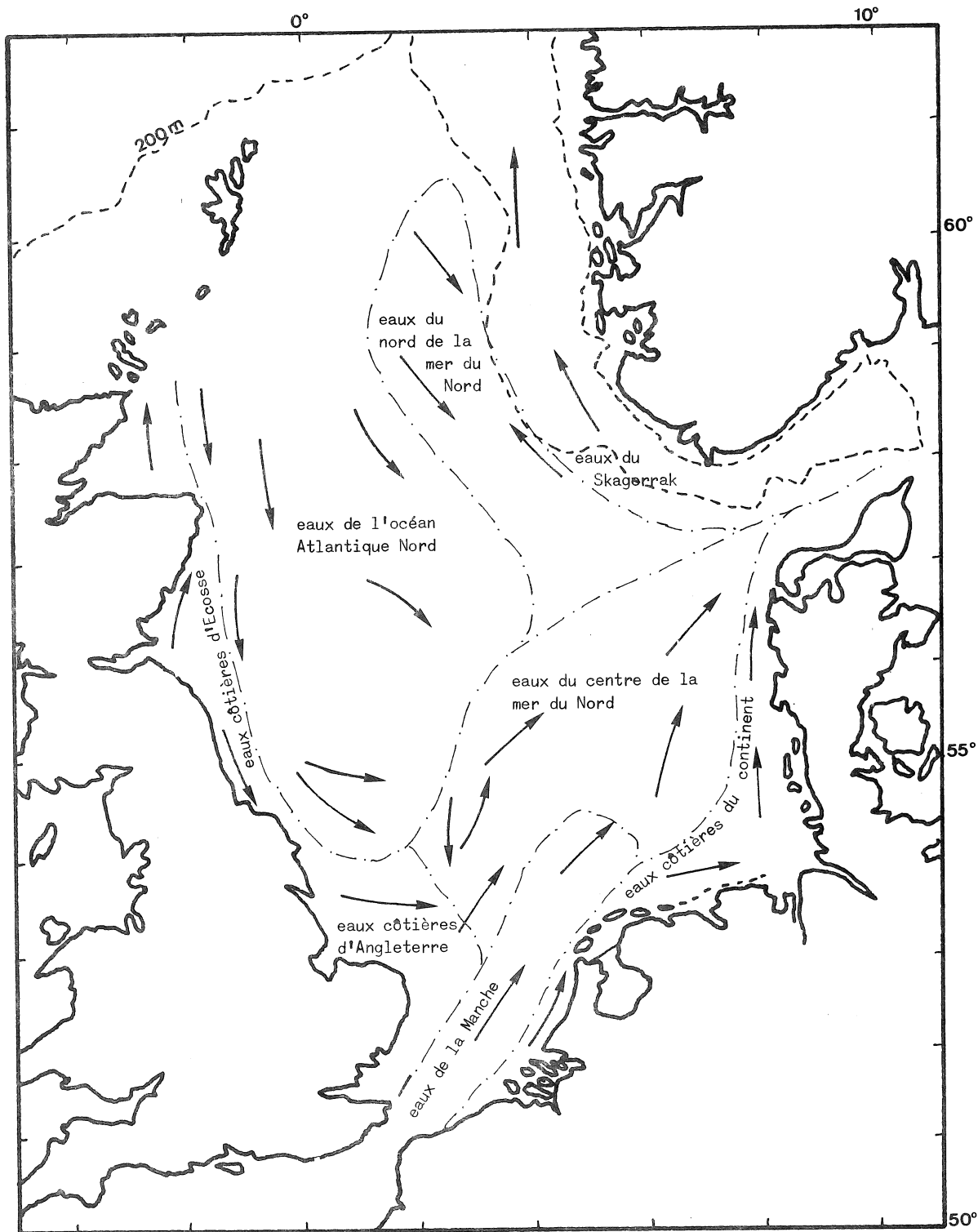


fig. 24.

Déplacement des masses d'eau en mer du Nord déduit des observations et figurant grossièrement la circulation résiduelle.

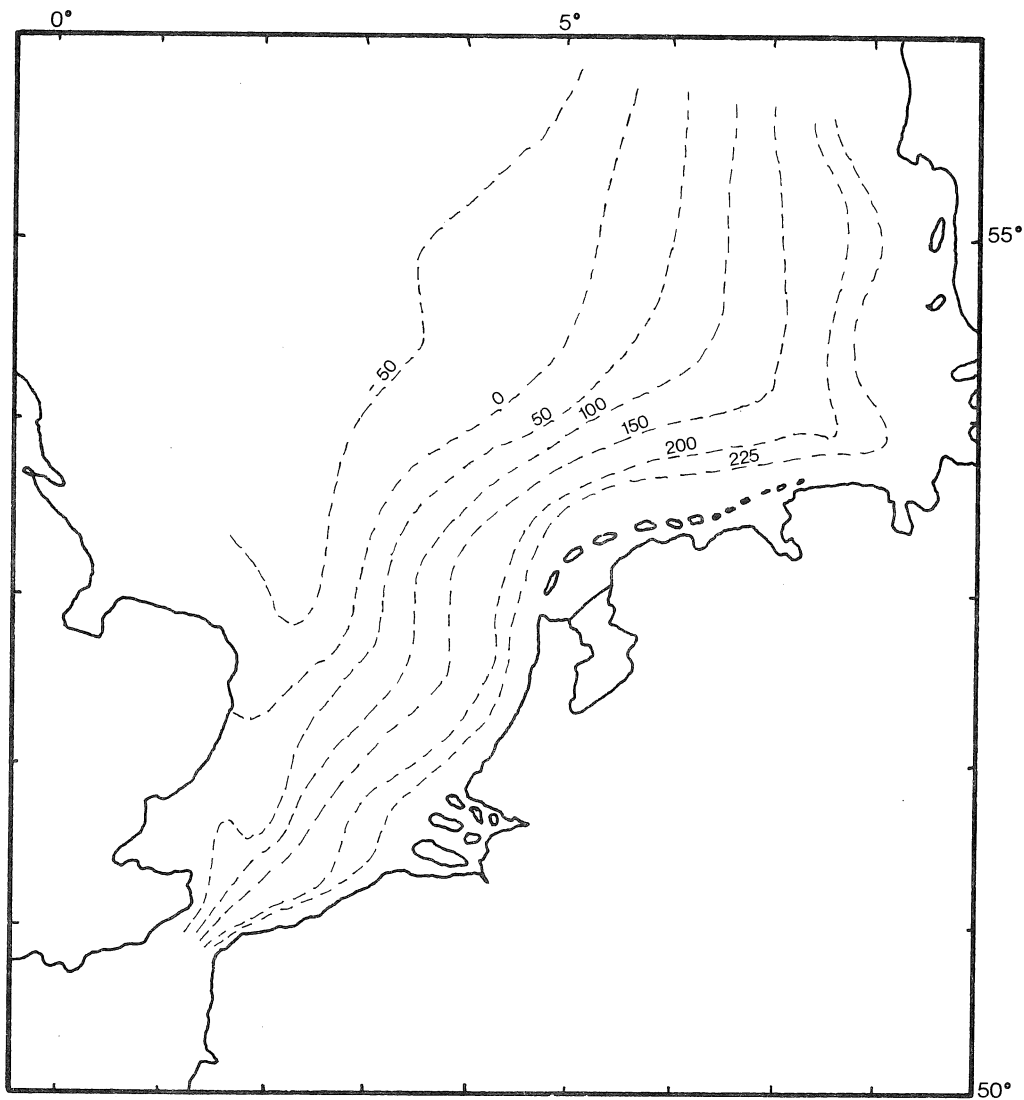


fig. 25.

Circulation résiduelle en mer du Nord calculée par un modèle semi-empirique (fonction de courant  $\psi = c^{te}$  en  $10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

belge entre Ostende et la frontière hollandaise alors que les observations révèlent à cet endroit un courant moyen dirigé vers le sud-ouest et tournant au large approximativement à la hauteur d'Ostende (on note également sur la figure 26 un courant dirigé vers le sud dans le Pas de Calais en opposition avec l'expérience et le bon sens).

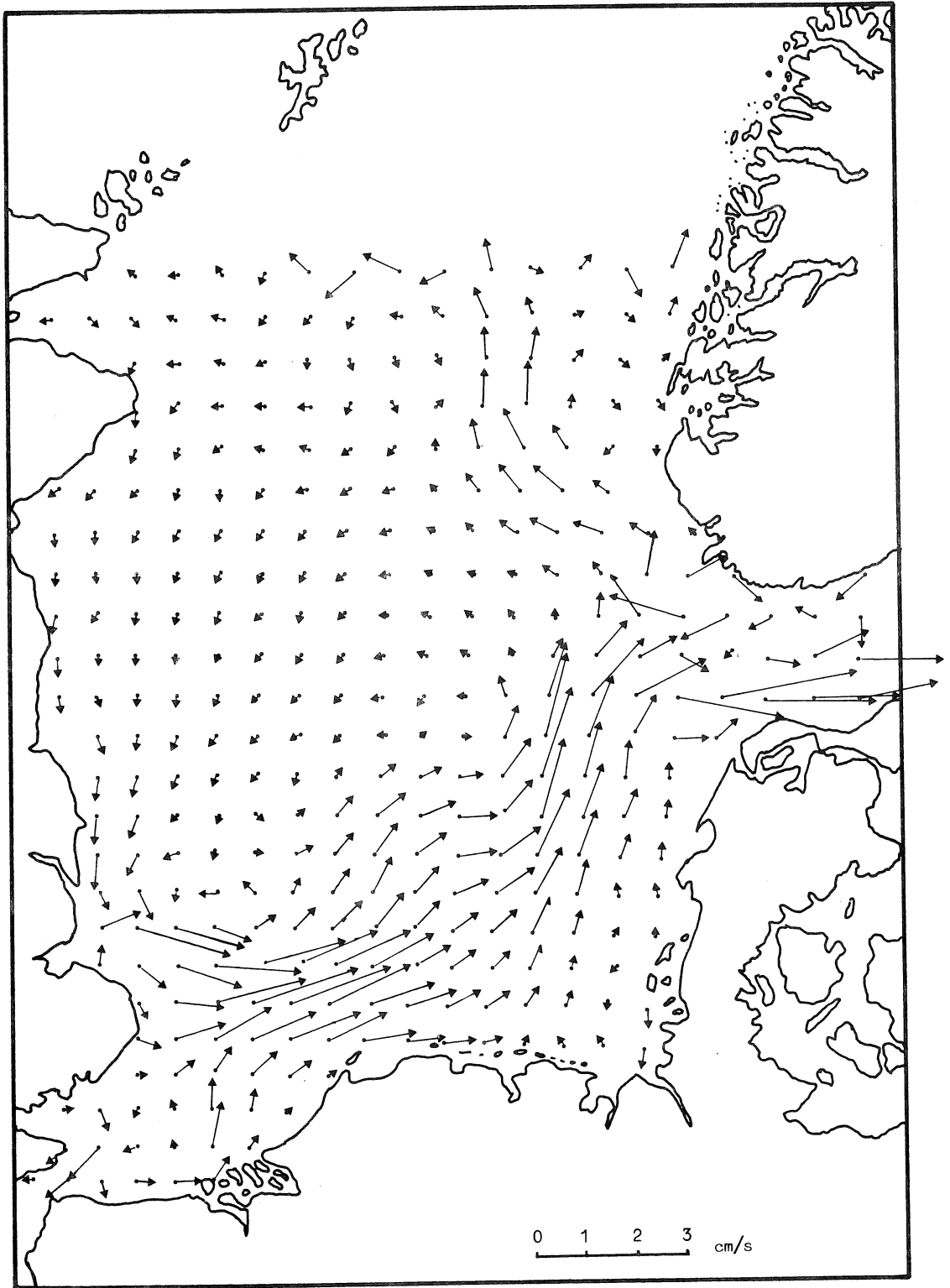


fig. 26.

Circulation résiduelle en mer du Nord calculée par un modèle de résidus non-linéaires

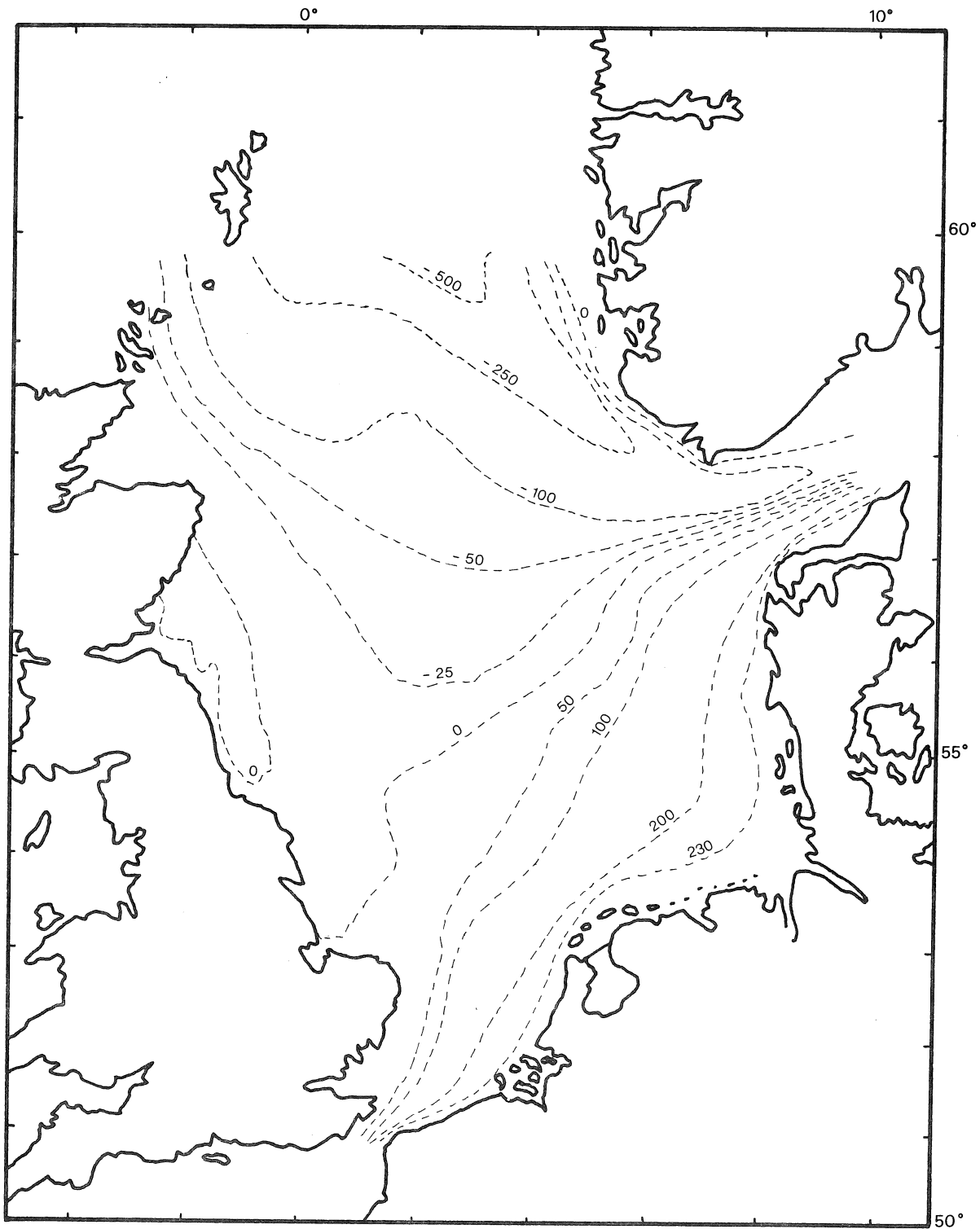


fig. 27.

Circulation résiduelle en mer du Nord calculée par un modèle des courants nord-atlantiques (lignes de courant  $\psi = c^{te}$  en  $10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

### 3.- Le modèle des équations résiduelles

Afin de mieux cerner la réalité, un modèle nouveau a été mis au point [Nihoul et Runday (1975)].

Dans ce modèle qui sera décrit en détail dans le volume 3 de cette série, la circulation résiduelle est obtenue en résolvant, avec des conditions aux frontières appropriées au transport par les courants nord-Atlantiques, des *équations moyennes* où l'effet résiduel non-linéaire des mouvements transitoires semi-organisés (marées, tempêtes) est pris *explicitement* en compte sous forme d'une force additionnelle appelée "tension de marée".

La figure 28 [Runday (1975)] montre la circulation résiduelle en mer du Nord calculée par ce modèle.

On observe la présence d'écoulements secondaires en forme de gyres (indiqués par des lignes de courant fermées) que les modèles classiques n'avaient pas su mettre en évidence.

En particulier, en face de la partie nord-est de la côte belge, un gyre crée un courant littoral dirigé vers le sud-ouest, tournant au large aux environs d'Ostende pour être repris par le courant nord-Atlantique issu du Pas de Calais et dirigé vers le nord-est. Ce gyre apparaît encore plus nettement sur la figure 29 où les courants résiduels dans le Southern Bight sont représentés de façon plus détaillée [Nihoul (1975b), Nihoul et Runday (1975)].

L'expérience montre que la zone côtière à la frange du gyre est une zone privilégiée d'accumulation de vases (fig. 30).

La vase est typiquement absente du Southern Bight où les courants et la turbulence permettent au plus une décantation temporaire mais pas de dépôt définitif.

On retrouve naturellement aux embouchures des fleuves (Meuse, Rhin, Escaut, Yser) la marque dans les sédiments de l'apport fluvial de matières en suspension mais il était impossible d'expliquer cet envasement considérable en face de la partie nord-est de la côte belge à partir des schémas classiques des courants résiduels (par exemple, fig. 25, 26 et 27).



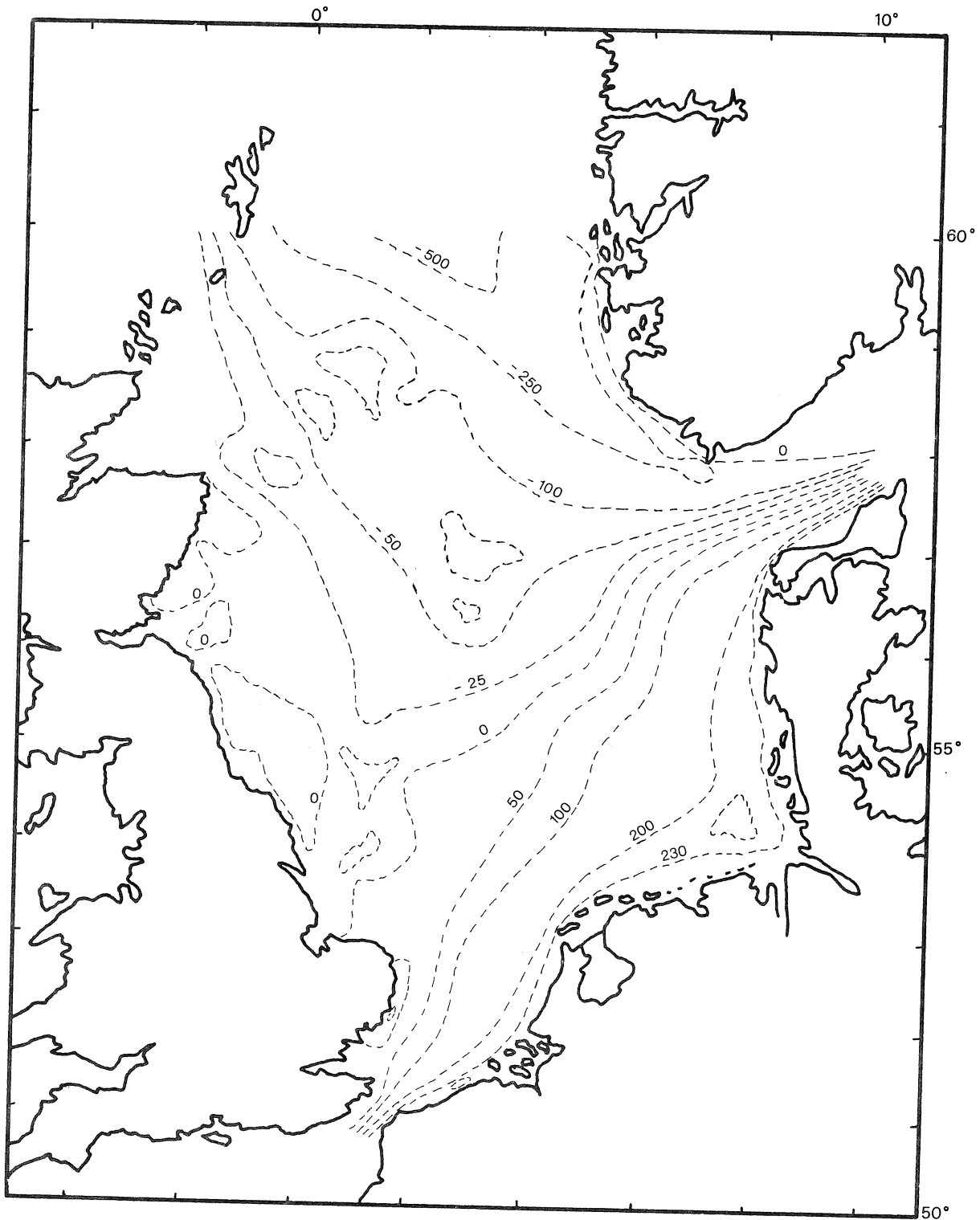


fig. 28.

Circulation résiduelle en mer du Nord calculée par le modèle des équations résiduelles combinant les transports aux frontières et les accélérations résiduelles produites par les interactions non-linéaires des mouvements transitoires partiellement structurés (marées et tempêtes). [Lignes de courant  $\psi = C^{te}$  en  $10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ ].

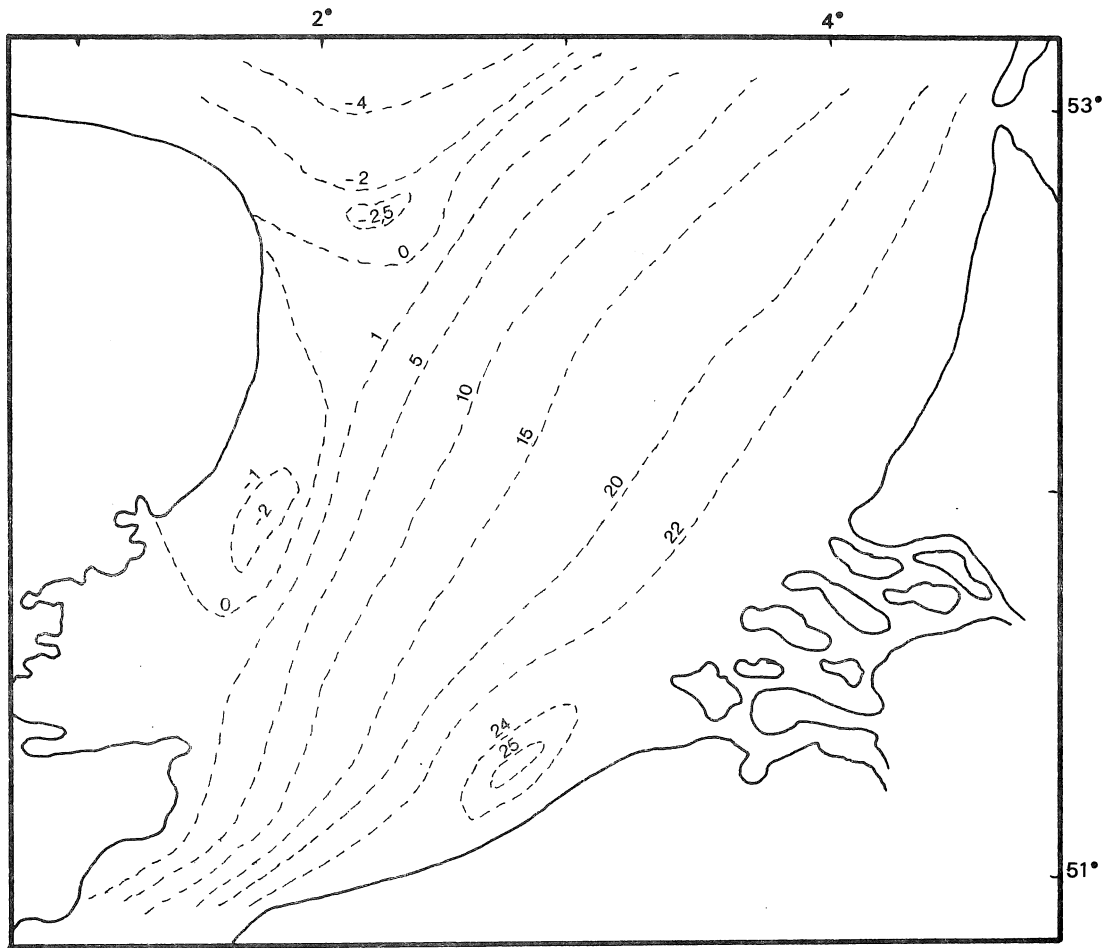


fig. 29.

Circulation résiduelle dans le Southern Bight calculée par le modèle des équations résiduelles [Lignes de courant  $\psi = C^{te}$  (en  $10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ )].

Le nouveau modèle, au contraire, en décelant l'existence du gyre et du courant littoral qu'il entraîne vers le sud-ouest le long de la côte, explique parfaitement les observations.

Le gyre est responsable d'un entraînement partiel vers le sud-ouest des eaux extrêmement turbides de l'Escaut. Un îlot de très grande turbidité ( $> 10 \text{ mg/l}$ ) est observé dans la région du gyre et les informations fournies par les satellites (ERTS-A) montrent sans ambiguïté une énorme plume de suspensions s'étendant de l'Escaut à toute la région en face de la partie nord-est de la côte belge.

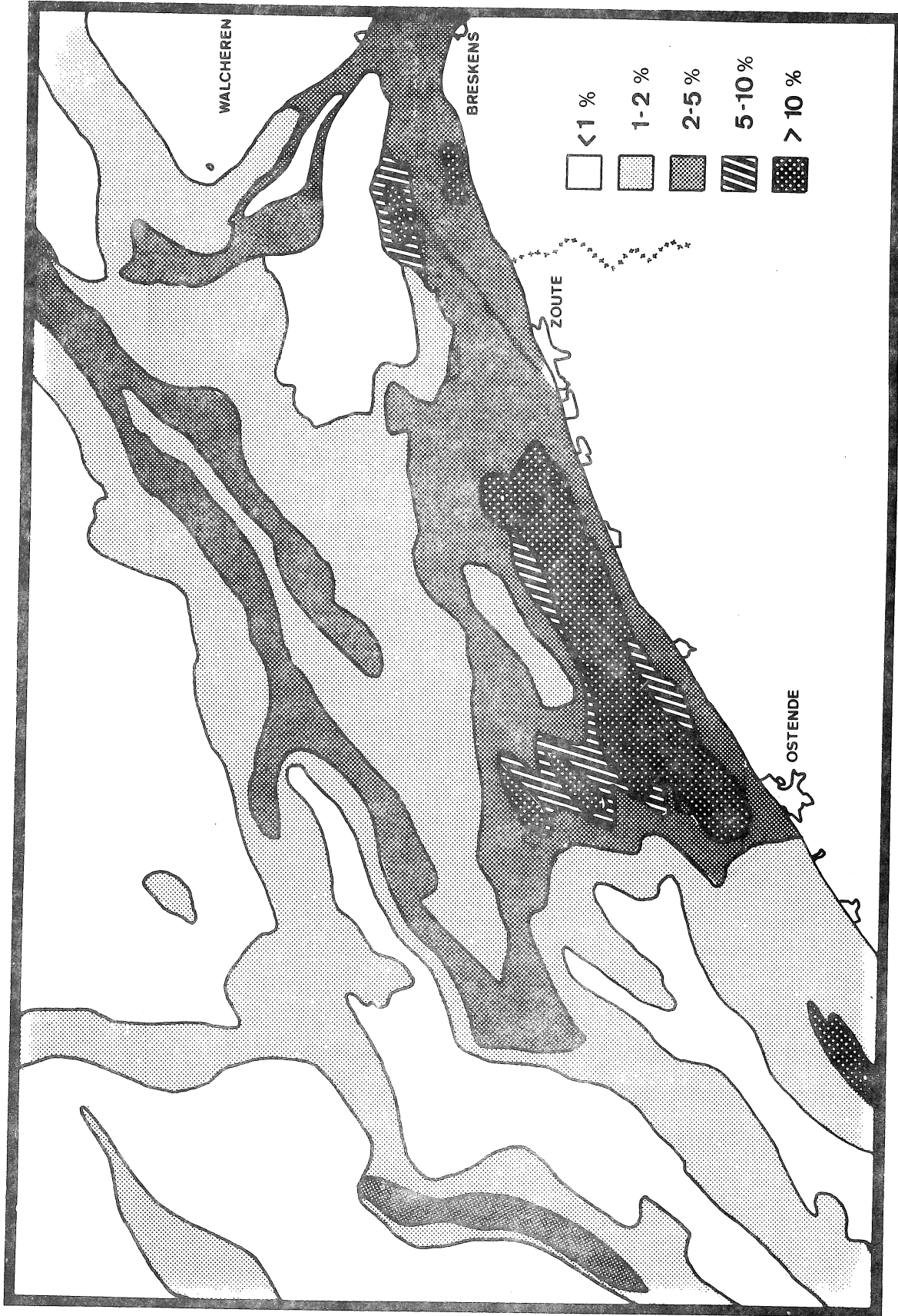


fig. 30.

Carte de la distribution des vases, basée sur les mesures de perte au feu à 550 °C. des sédiments de surface. La perte au feu correspond à la combustion des matières organiques et à la déshydratation des constituants des argiles, composés caractéristiques des vases.

Augmentant, par ailleurs, le temps de résidence des masses d'eau dans la région, le gyre crée, derrière la crête pré littorale, les conditions d'un *lagon extérieur* où l'excès des matières en suspension tend à être préservé par la disposition des courants, est précipité par floculation, agrégé par l'activité biologique et forme un sédiment vaseux protégé de l'érosion [Gullentops (1974), Nihoul (1975c)].

#### 4.- Caractéristiques physiques et chimiques des masses d'eau

On utilise classiquement les diagrammes température-salinité afin de caractériser les masses d'eau de l'océan et de suivre leur cheminement. Pour les eaux de surface et pour les zones côtières, le paramètre température est souvent affecté de manière importante par les échanges avec l'atmosphère et ne peut pas être considéré comme suffisamment conservatif. On a donc intérêt à définir la masse d'eau par d'autres paramètres, tels que des paramètres chimiques par exemple. De même, lorsque des masses d'eau d'origines multiples se mélangent, il est indispensable de faire appel à un nombre plus élevé de paramètres caractéristiques. Broecker (1974) a montré que dans le cas des masses d'eau profondes, la silice dissoute et l'azote total (ou plus exactement l'azote minéral total corrigé par un facteur dépendant de l'oxygène dissous, pour tenir compte de la dégradation possible de la matière organique) pouvaient constituer des paramètres caractéristiques intéressants. Il faut remarquer à ce sujet que les grandeurs chimiques qui peuvent être envisagées, sont celles dont la variation est importante, ce qui implique qu'elles soient soumises à des processus de consommation ou de production importants (en général d'origine biologique). Il s'agit donc de vérifier préalablement si la vitesse de ces processus est suffisamment faible par rapport au phénomène de mélange des masses d'eau, pour pouvoir considérer la grandeur comme paramètre conservatif dans le phénomène étudié.

Dans le cas de la zone côtière qui nous intéresse, l'estuaire de l'Escaut fournit une source d'eau dont les caractéristiques chimiques

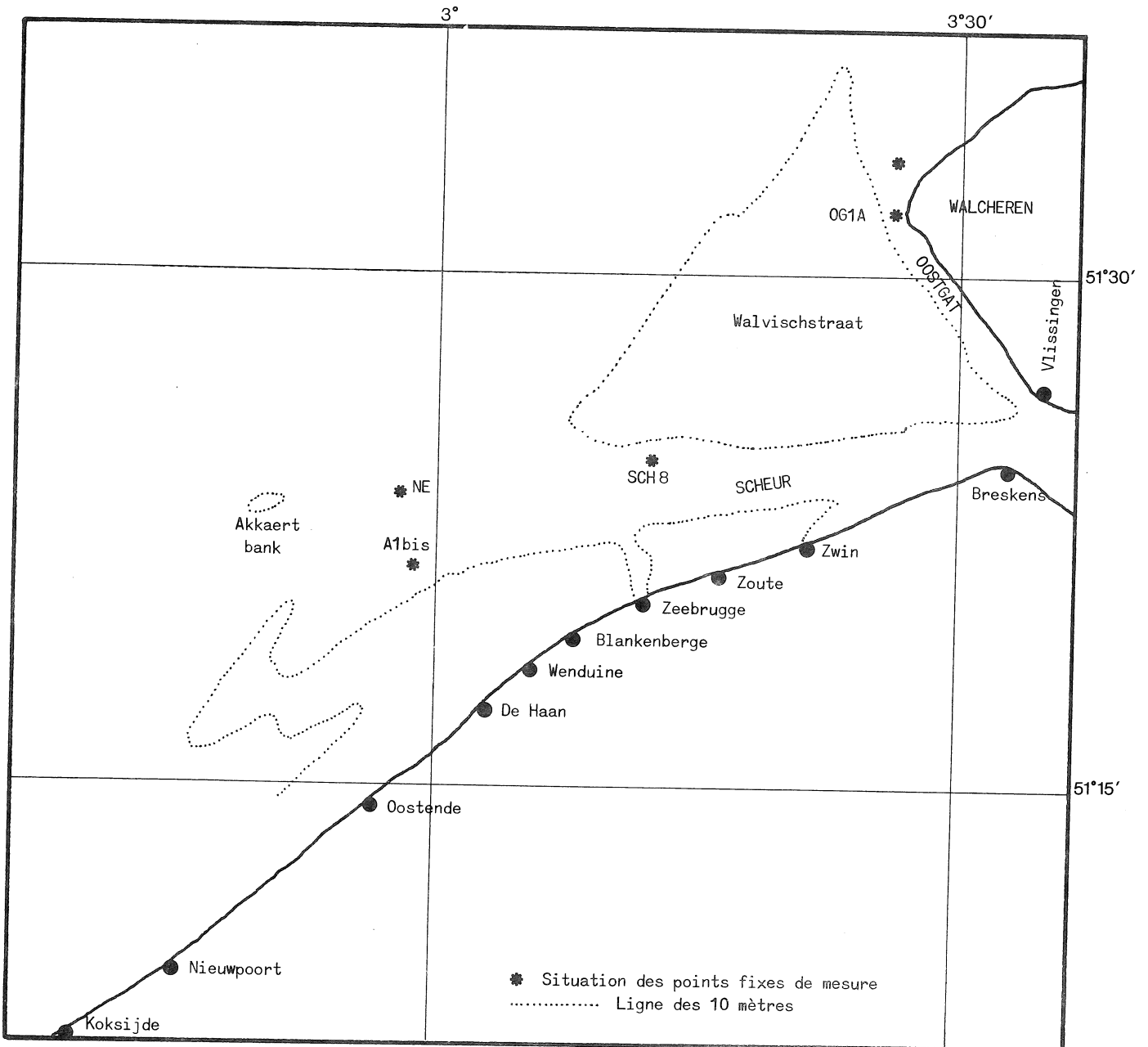


fig. 31.  
Carte topographique de la région de l'embouchure de l'Escaut

à l'embouchure sont très différentes de l'eau de mer : faible salinité, forte concentration en nutriments (Si , N , P), turbidité élevée, etc. Durant la période hivernale (d'octobre à avril), la consommation de ces substances par les organismes est faible et on peut envisager d'utiliser ces variables comme paramètres conservatifs.

Notons encore que le déplacement des masses d'eau au cours d'une marée n'est pas négligeable à l'échelle de la zone côtière qui nous intéresse et il en résulte que l'on observe des déplacements périodiques des masses d'eau qui se superposent à une situation moyenne résultant des courants résiduels. Toutefois, la distribution des sédiments intègre ces variations périodiques et permet de dégager les circulations principales et résiduelles dans la zone considérée (*e.g.* fig. 30).

#### 5.- Circulation des masses d'eau de surface issues de l'Escaut

Il est important de définir précisément le cheminement des masses d'eau provenant de l'estuaire de l'Escaut; ces eaux sont en effet fortement chargées en matières polluantes et, comme nous le verrons plus loin, elles affectent, par suite de l'existence du gyre, une grande partie de la côte belge.

La topographie de la zone marine adjacente à l'embouchure (fig. 31) montre l'existence de deux chenaux prolongeant l'estuaire :

- l'Oostgat, chenal étroit orienté vers le nord-ouest longeant Walcheren;
- le Scheur, beaucoup plus large et longeant la côte belge jusqu'à Zeebrugge.

La figure 32 montre les prolongements du profil en silice dissoute des eaux de l'estuaire dans ces deux chenaux, relevés au mois d'avril dans des conditions où la silice n'est pratiquement pas consommée. On constate que les eaux de l'estuaire se prolongent très préférentiellement dans le Scheur et manifestent leur influence jusqu'au niveau de Zeebrugge. Dans l'Oostgat, la décroissance de l'influence des eaux de l'estuaire est très brutale.

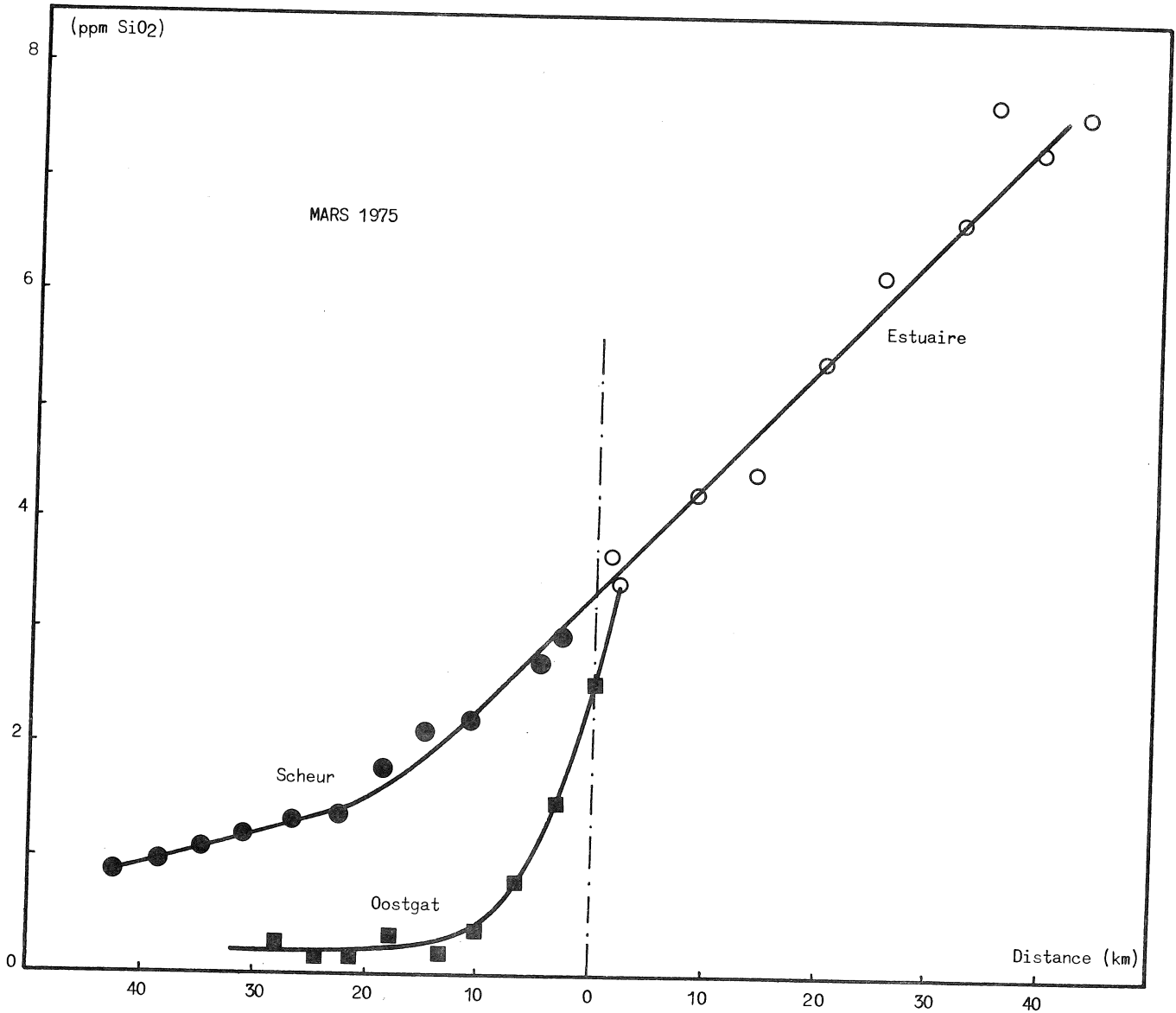


fig. 32.

Profil de concentration en silice dissoute dans la partie intérieure de l'estuaire, dans le Scheur et dans l'Oostgat, à l'étale de marée basse. Le kilomètre zéro correspond au point de référence généralement utilisé pour caractériser la position de l'embouchure sur la ligne Breskens-Terneuzen.

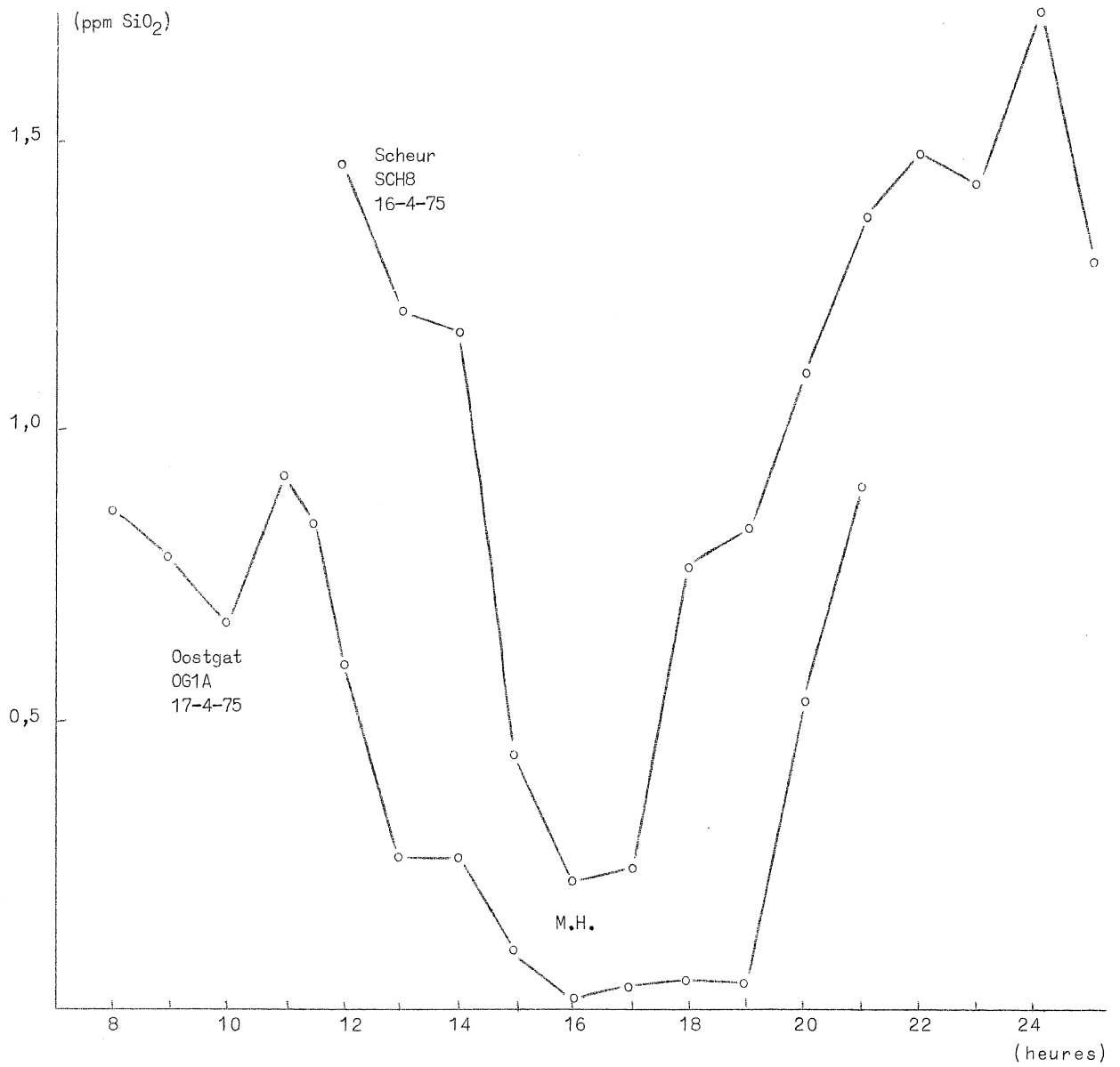


fig. 33.

Evolution de la silice dissoute au cours d'une marée dans le Scheur et dans l'Oostgat. On remarque que l'Oostgat constitue une voie d'accès d'eau de mer du large caractérisée par une teneur en silice faible (< 0,1 ppm) pendant la plus grande partie du flot, alors que le Scheur véhicule principalement de l'eau de l'Escaut faiblement diluée.



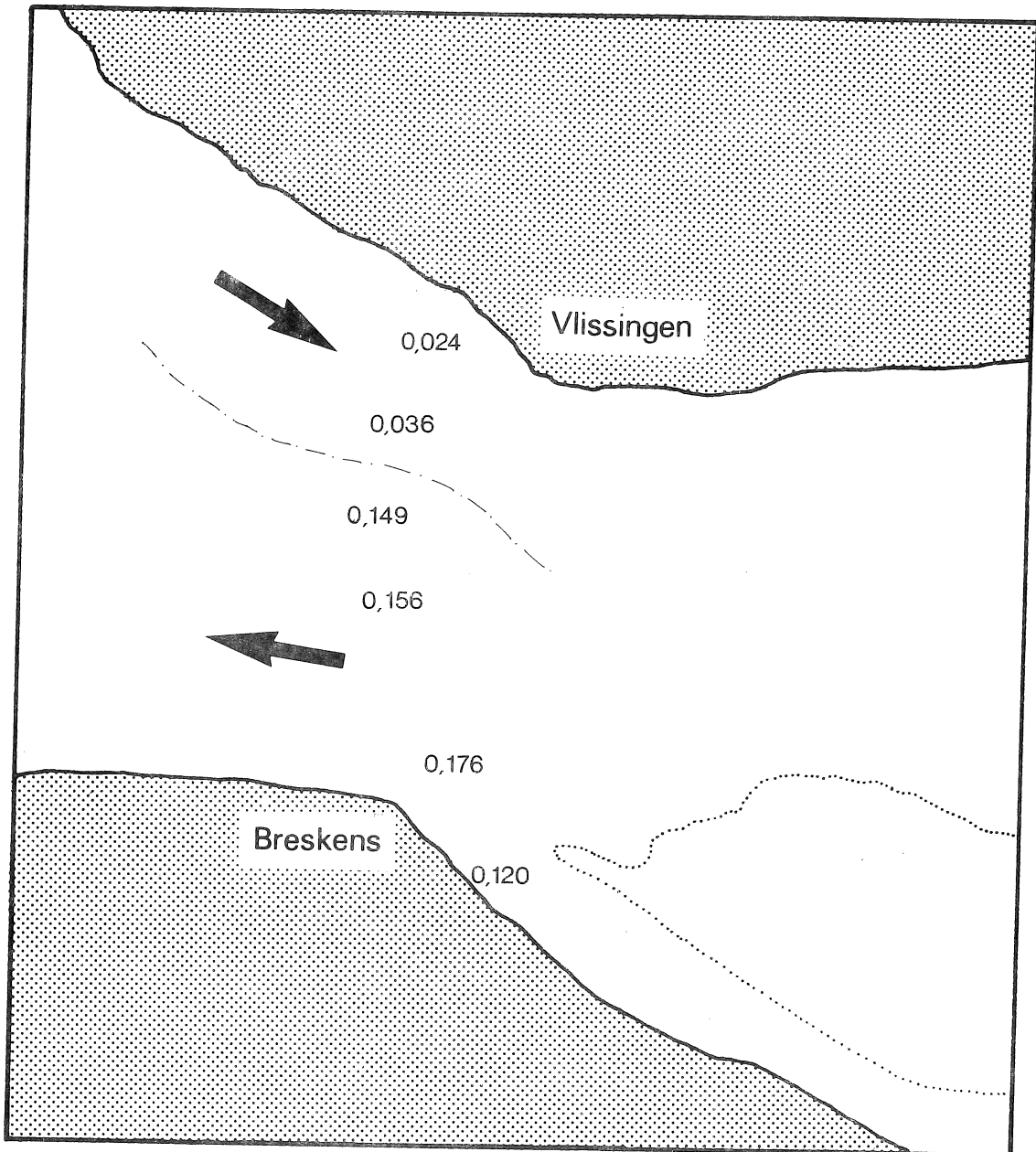
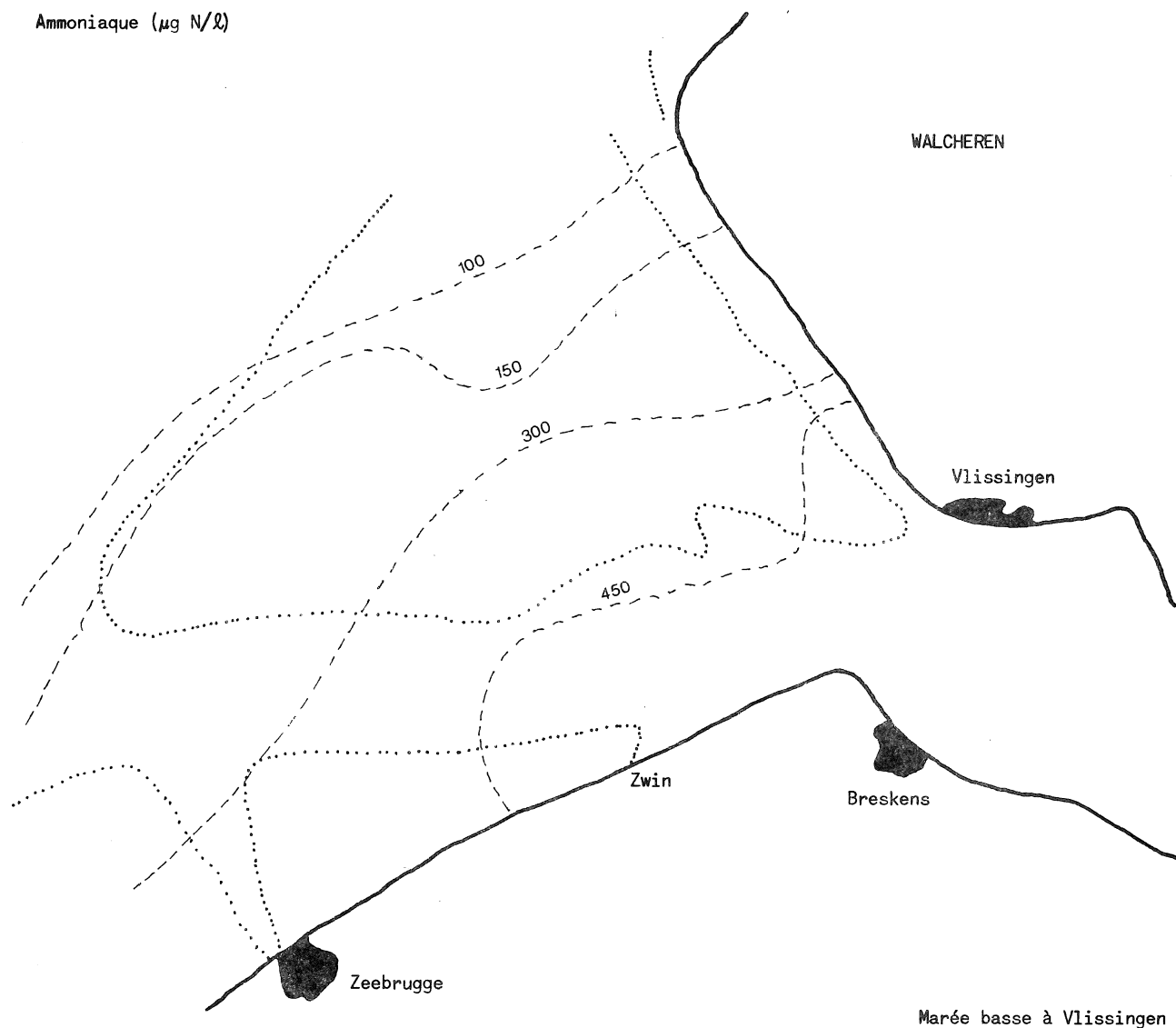


fig. 34.

Distribution de la silice dissoute (ppm  $\text{SiO}_2$ ) sur la ligne Breskens-Vlissingen, à l'étale de marée haute. On observe la rentrée d'eau de mer du large, transitant par l'Oostgat le long de la rive droite, alors que l'eau de l'estuaire sort déjà vers le Scheur le long de la rive gauche.

Ammoniaque ( $\mu\text{g N}/\ell$ )



Marée basse à Vlissingen

fig. 35a.

Distribution de l'ammoniaque à la sortie de l'embouchure de l'Escaut aux étales de marée haute et de marée basse au mois de mars 1974. Les courbes d'isoconcentration traduisent le cheminement préférentiel des eaux de l'Escaut parallèlement à la côte belge.

Si l'on examine, d'autre part, l'évolution de la silice dissoute au cours d'une marée en des points fixes situés dans les deux chenaux (fig. 33) ainsi qu'un profil Flessingue-Breskens (fig. 34), on met nettement en évidence le fait que l'Oostgat est principalement un

Ammoniaque ( $\mu\text{g N/l}$ )

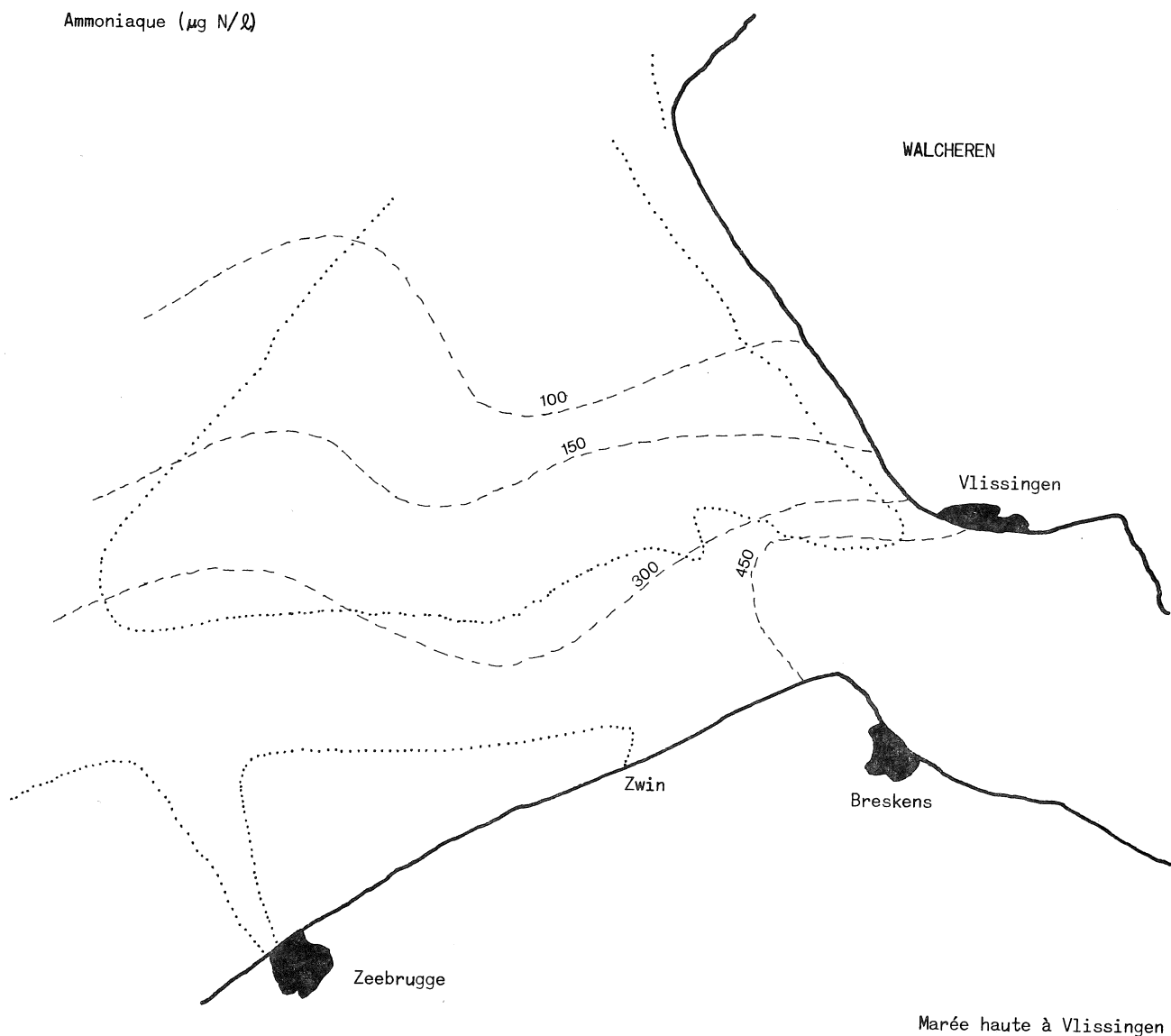


fig. 35b

chenal de flot permettant l'intrusion dans l'estuaire d'eau de mer peu affectée par la présence de l'Escaut, alors que le Scheur constitue le chenal de jusant où les eaux de l'Escaut ont tendance à s'accumuler. Un examen des cartes de répartition de l'ammoniaque relevée à la même époque de l'année (fig. 35) aux étales de marée basse et de marée haute, confirme remarquablement le cheminement préférentiel des masses d'eau de l'estuaire le long de la côte belge et l'étendue de son influence.

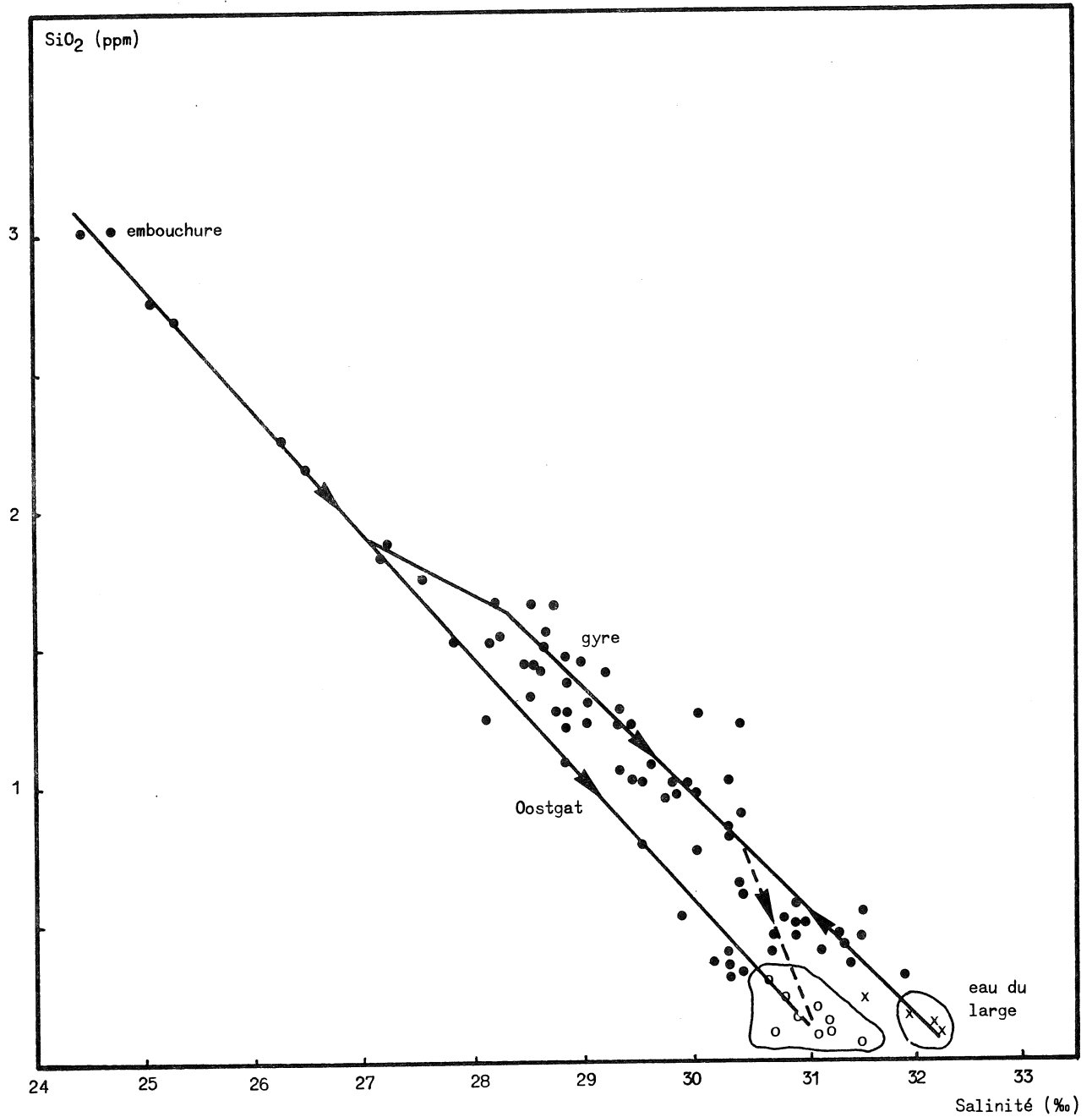


fig. 36a.

Diagramme salinité - silice dissoute, relevé en avril 1975, dans la zone définie à la figure 30. Les ○ indiquent la composition des eaux du large au nord de l'Oostgat; les x indiquent la composition des eaux du large en provenance du Pas-de-Calais. Les flèches sur les droites de mélange indiquent le sens de propagation des masses d'eau, prévu par le modèle mathématique des courants résiduels.

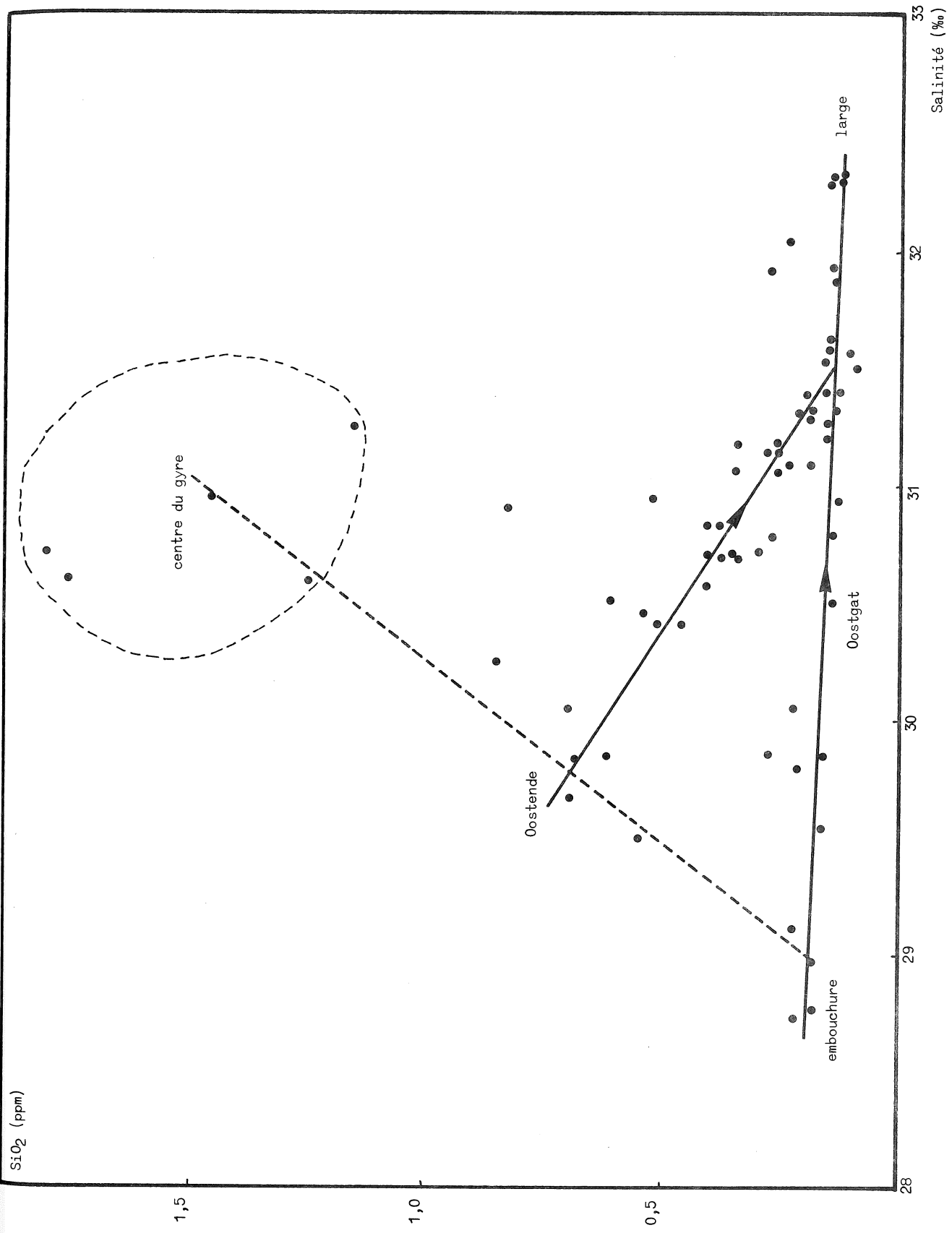


fig. 36b.  
 Diagramme salinité - silice dissoute, au mois de juin 1975. Les eaux du centre du gyre manifestent une individualité propre et indiquent un mélange limité, tant avec les eaux du large qu'avec les eaux de l'estuaire.

## 6.- Caractérisation des masses d'eau dans la région du gyre

Une série de campagnes de mesures ont été effectuées dans une région couvrant largement le gyre. L'objectif de ces mesures était de préciser la nature et les caractéristiques physico-chimiques des masses d'eau impliquées dans ce processus et l'étendue de leur influence. Les campagnes ont été plus précisément centrées sur les mois de mars et d'avril correspondant à un état résultant d'une activité biologique minimum, et sur le mois de juin traduisant l'état de la situation après une période d'intense activité photosynthétique.

Les diagrammes salinité-silice dissoute correspondant à ces deux périodes sont représentés dans la figure 36. Après la période hivernale, la tendance principale qui se dégage du diagramme est celle du mélange des eaux de l'Escaut avec les eaux du large. Toutefois, les eaux du gyre (correspondant à la zone côtière comprise entre Ostende et Zeebrugge) se distinguent de cette droite de mélange par des valeurs systématiquement plus élevées en silice dissoute. Cette distinction est largement confirmée par les mesures effectuées en juin, après la période de développement du phytoplancton. La silice dissoute est en effet consommée dans la partie estuarienne de l'Escaut et son apport en mer du Nord par le fleuve devient négligeable. Dans ces conditions, l'accroissement de la concentration de silice dissoute dans le gyre est particulièrement bien mis en évidence et l'on peut, sans aucun doute, définir la masse d'eau du gyre par des paramètres chimiques caractéristiques.

Les diagrammes salinité-phosphate et salinité-température présentent la même allure générale (fig. 37 et 38). On peut définir :

- une droite de dilution des eaux de l'Escaut par l'eau du large dans l'Oostgat;
- une droite de dilution de l'eau de l'Escaut avec l'eau du gyre;
- une droite de dilution de l'eau du gyre avec le large.

Sans entrer dans les détails, il nous paraît intéressant d'aborder l'origine de ces excédents de substances nutritives dans la zone du gyre. Les mécanismes de ces processus sont décrits dans les

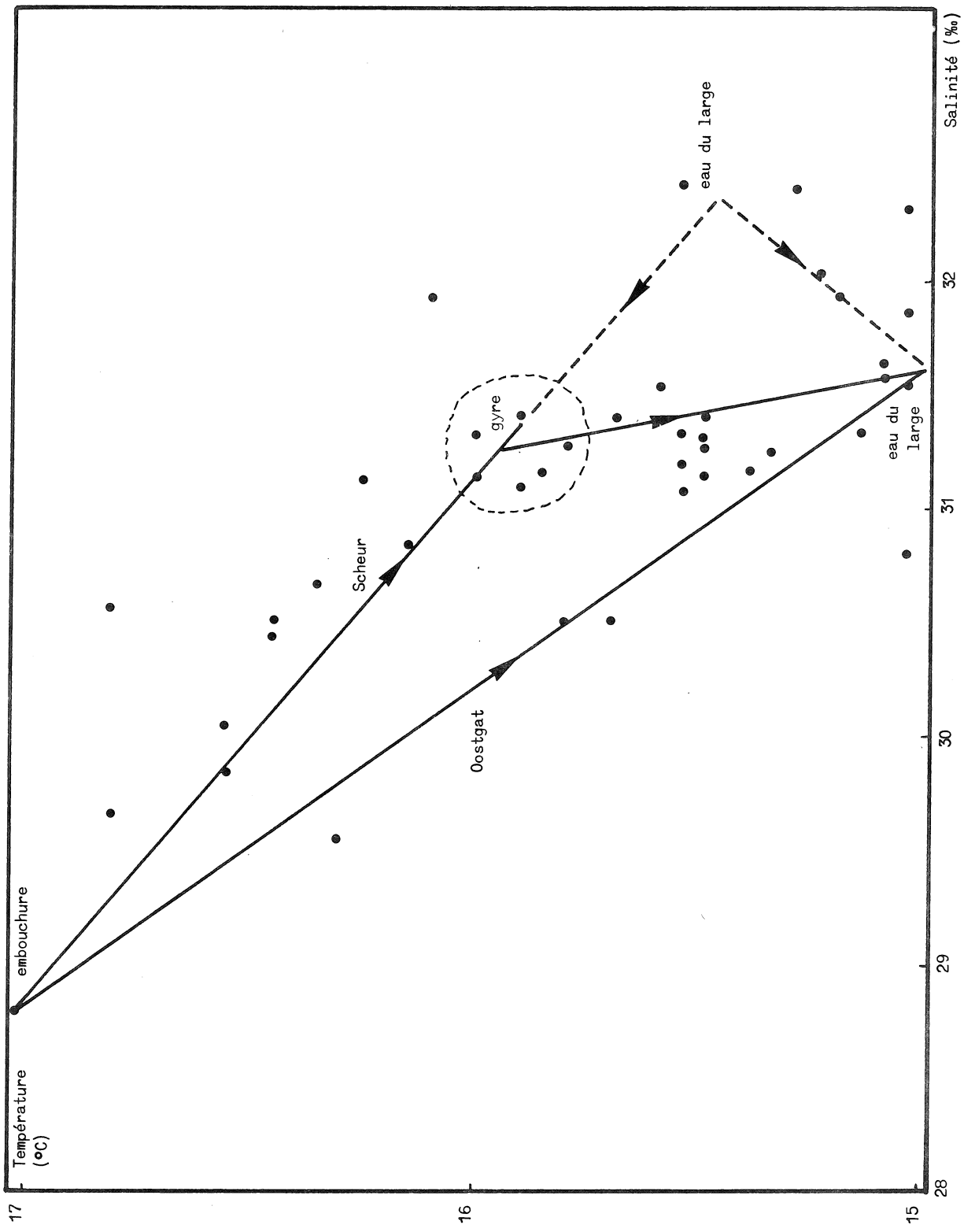


fig. 37.

Diagramme température—salinité dans la région du gyre, au mois de juin 1975.  
 Les flèches indiquent le sens de propagation des masses d'eau.

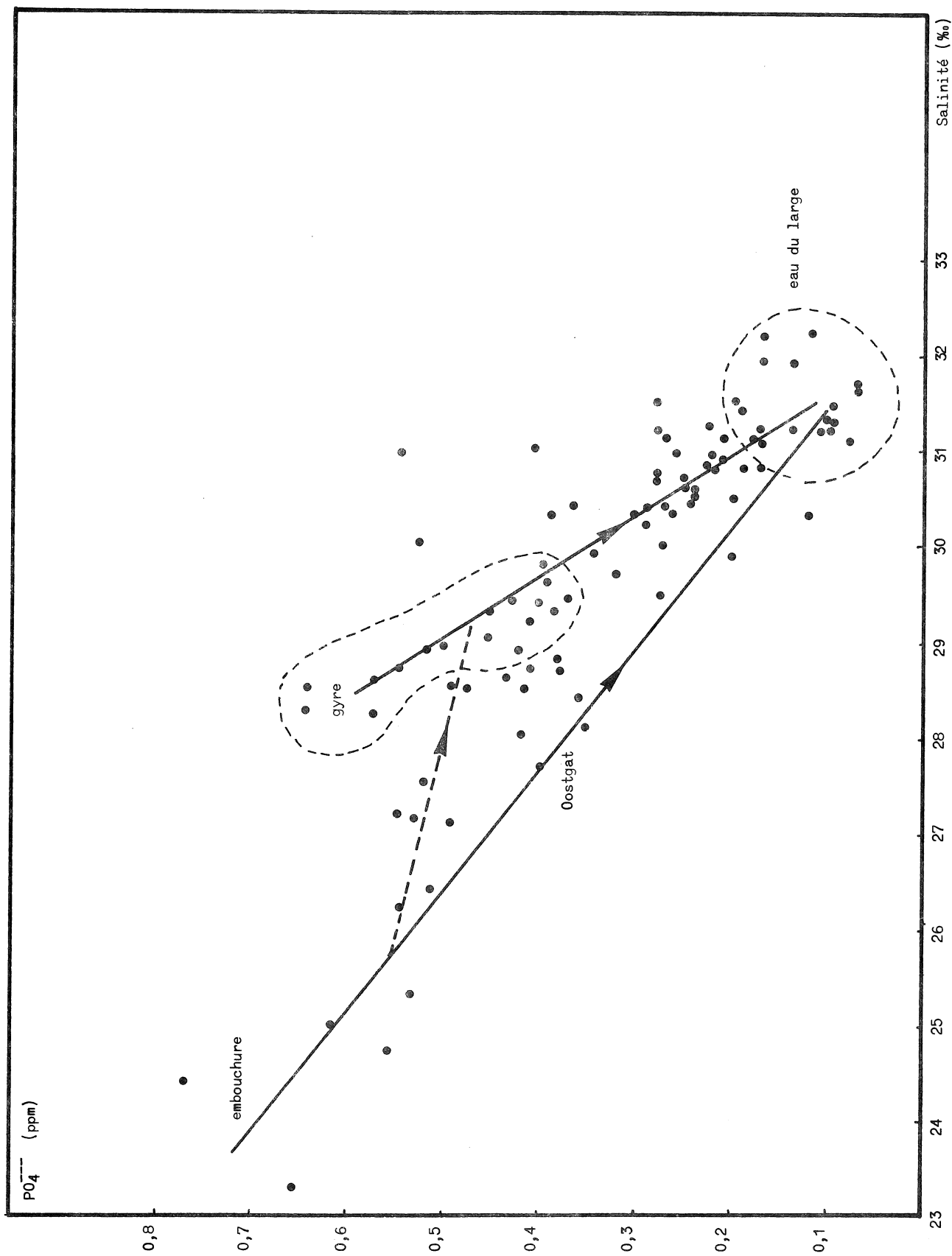


fig. 38.  
 Diagramme salinité-phosphates au mois d'avril 1975



volumes ultérieurs de manière plus détaillée. Il existe certes quelques sources continentales (canaux, émissaires) mais leur débit n'est pas de nature à expliquer l'accroissement observé. Par contre, le gyre constitue une zone d'accumulation privilégiée en particulier des matières en suspension riches en matières organiques issues notamment de l'estuaire (Moens, volume 4). Les mesures de demande biologique en oxygène effectuées dans le réseau (fig. 39) mettent clairement en évidence que le phénomène de la dégradation de la matière organique y est maximum, correspondant simultanément à une production intense de matières nutritives dissoutes. Enfin, la contribution des sédiments au recyclage des substances nutritives est particulièrement importante dans les zones peu profondes où s'accumulent les vases qui sont d'autre part soumises à des perturbations d'ordre hydrodynamique favorisant le transfert des nutriments vers les eaux de surface (le phénomène est décrit de manière détaillée dans le volume 4).

Après avoir justifié l'utilisation des paramètres chimiques en tant qu'indicateurs des masses d'eau, nous avons tracé les cartes représentant leur distribution dans la région qui nous intéresse. Les figures 40, 41 et 42 représentent, à titre d'exemple, les répartitions des masses d'eau telles qu'elles apparaissent à partir des mesures de salinité, de silice dissoute et de phosphates. La carte de répartition de la salinité montre essentiellement l'influence de l'apport d'eau douce par l'Escaut et son entraînement par le gyre au niveau d'Ostende. La carte de répartition de la silice dissoute de la figure 41 (et il en va de même pour les phosphates, fig. 42) permet d'affiner le modèle de circulation et de préciser la localisation du gyre. On y distingue notamment l'intrusion d'eau du large en provenance du nord dans l'Oostgat et sur les hauts fonds de Walvischstaart. La carte de répartition de silice pour juin 1975 présente une zone beaucoup plus concentrée au centre du gyre, conformément aux indications fournies par le diagramme salinité-silice dissoute (fig. 43). La figure 44 montre l'évolution de la silice dissoute au cours de la marée pour un point situé en bordure du gyre (Akkaert Bank NE) et un point plus au

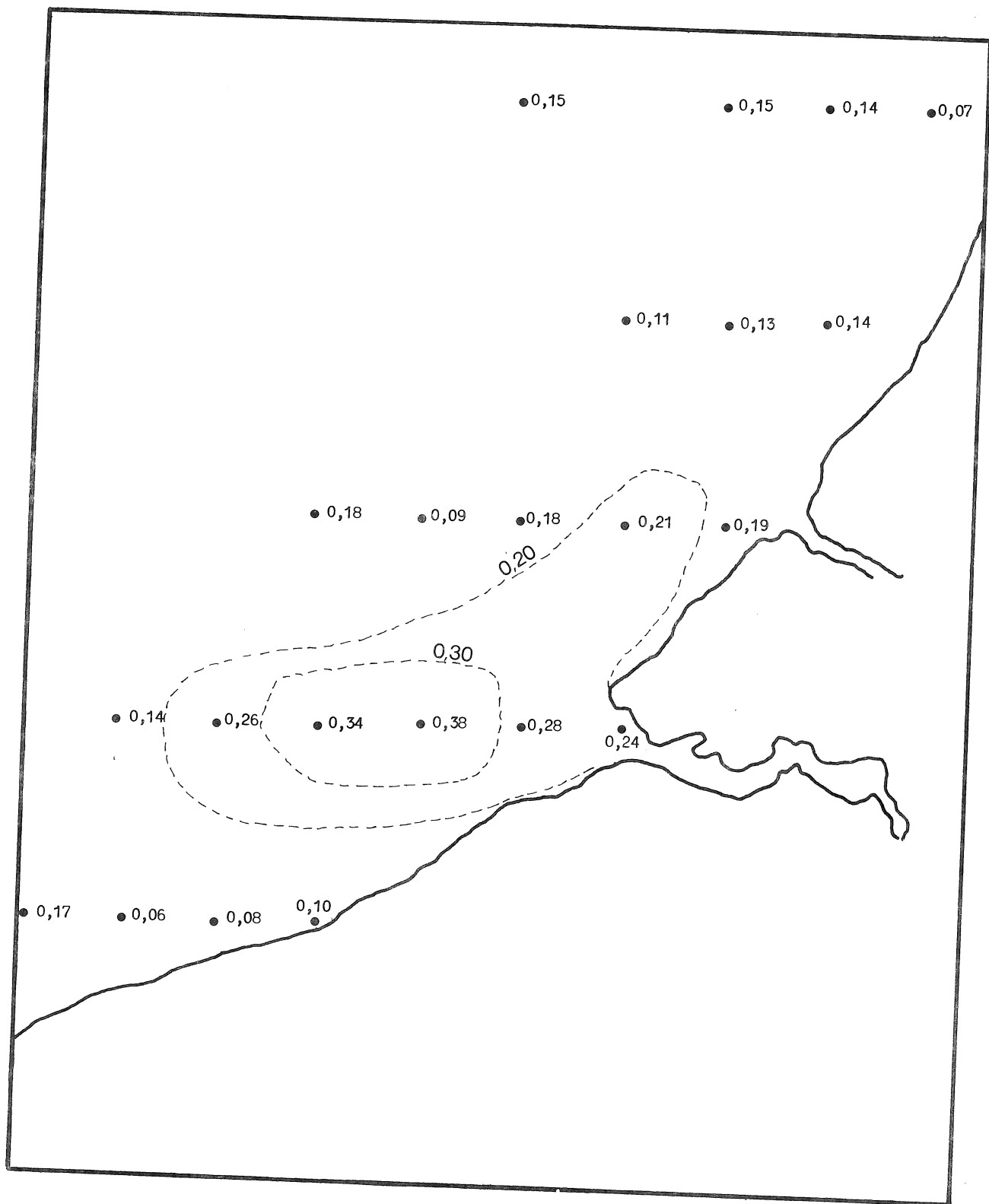


fig. 39.  
Répartition de la demande biologique d'oxygène (en mM O<sub>2</sub> consommé) pour la période d'avril à mai 1973

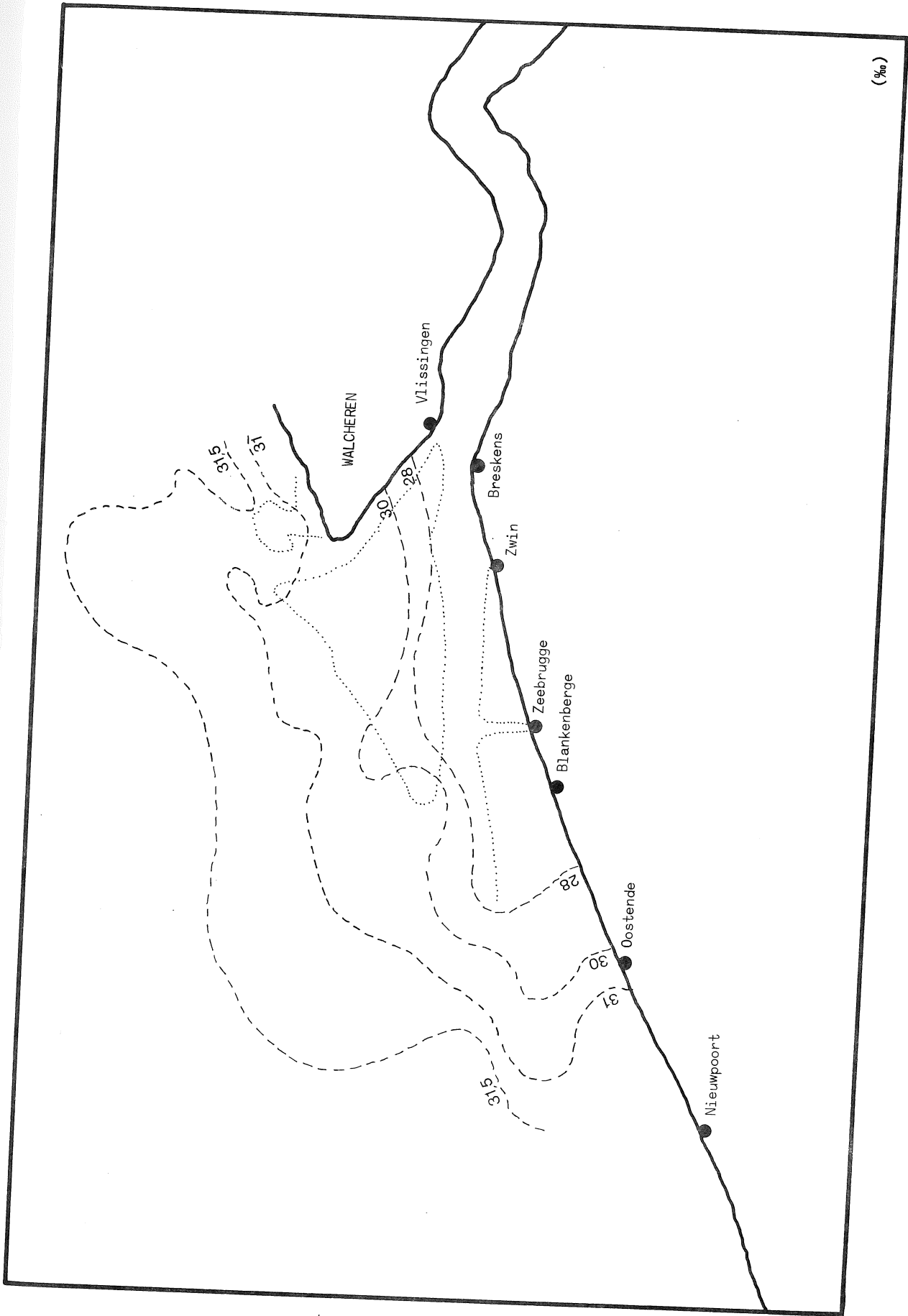


fig. 40.  
Carte de distribution de la salinité dans la région du gyre, au mois d'avril 1975

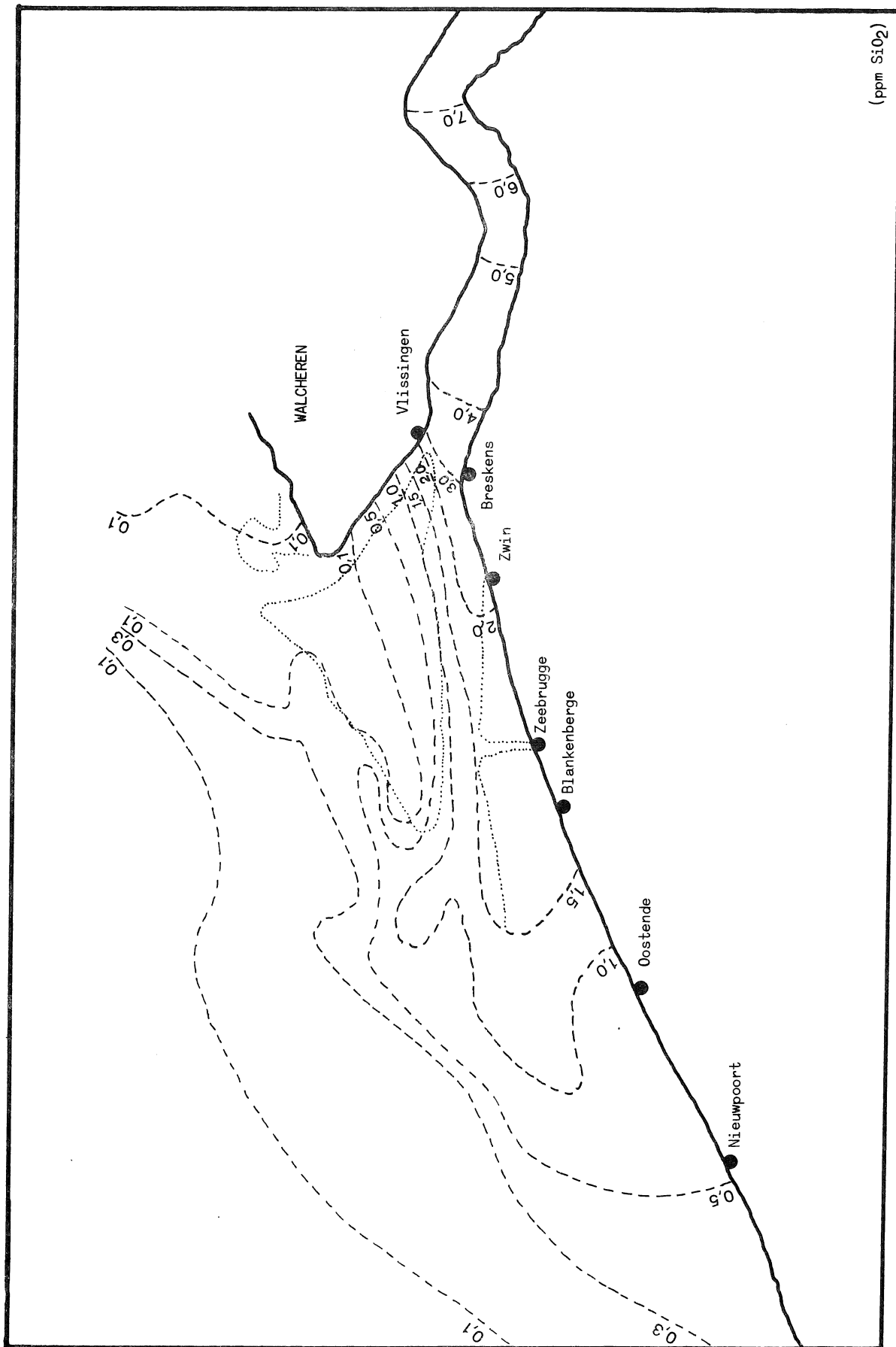


fig. 41.

Carte de distribution de la silice dissoute dans la région du gyre, au mois d'avril 1975

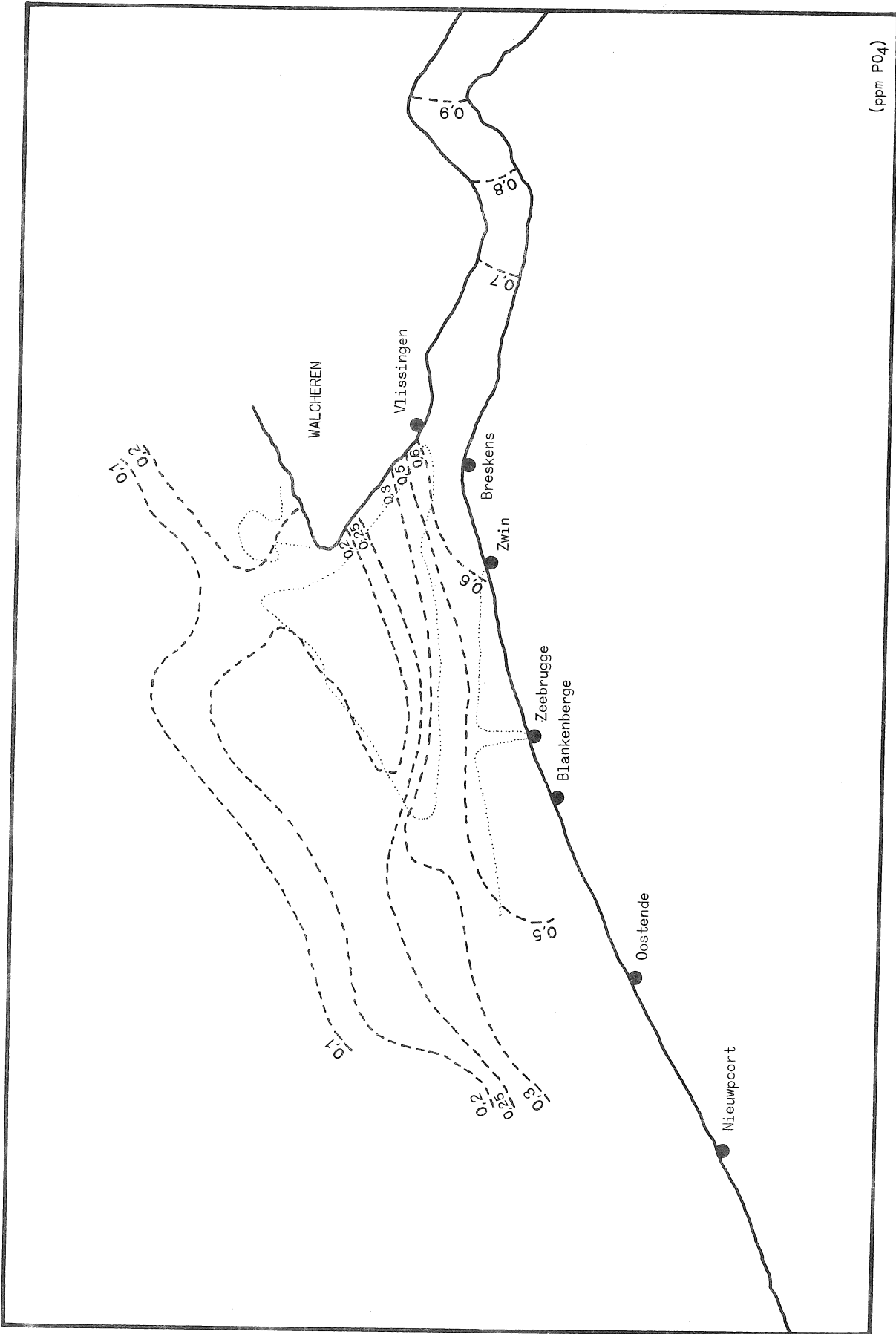


fig. 42.

Carte de distribution des phosphates dans la région du gyre, au mois d'avril 1975

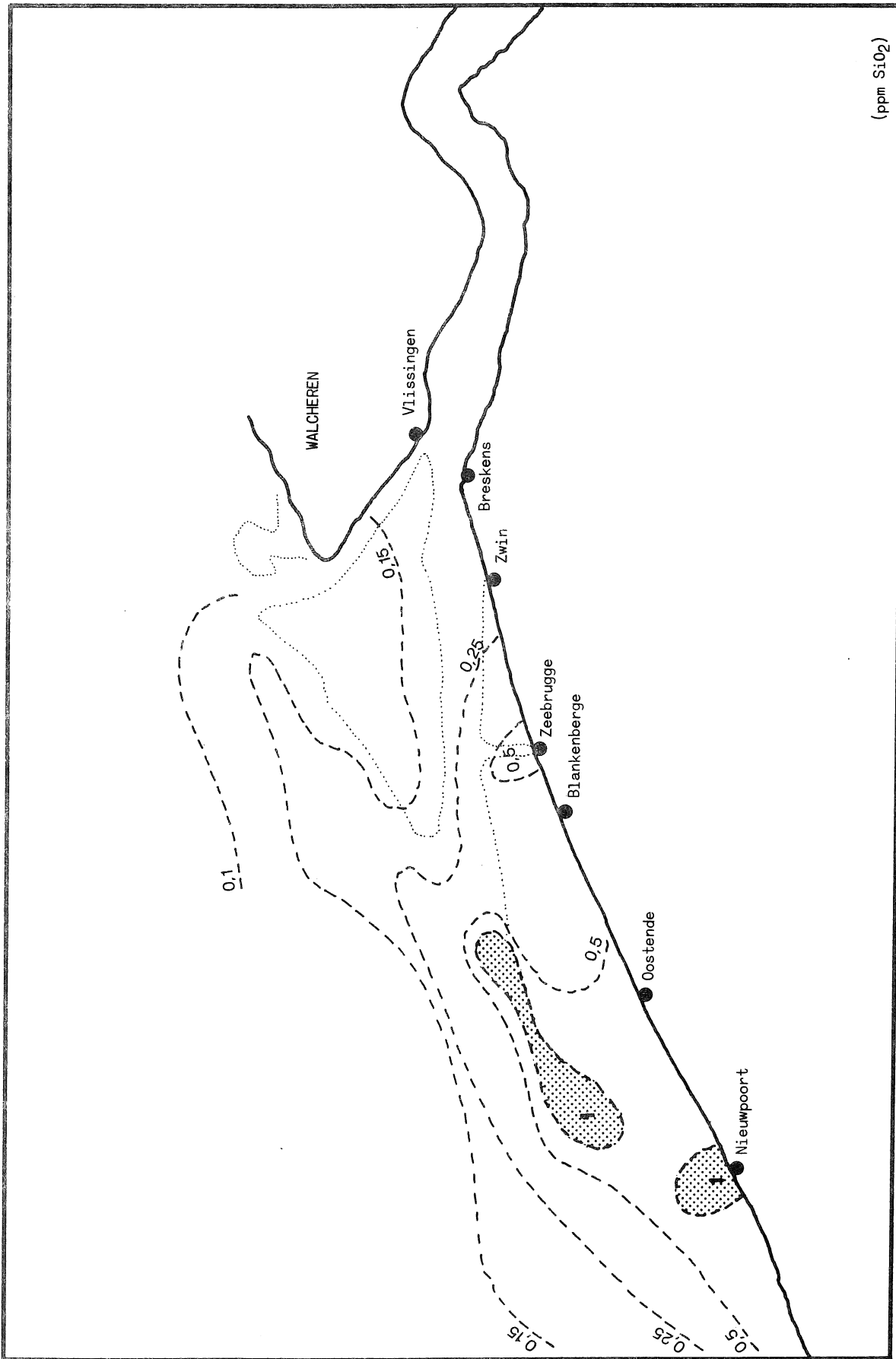


fig. 43.

Carte de distribution de la silice dissoute dans la région du gyre, au mois de juin 1975

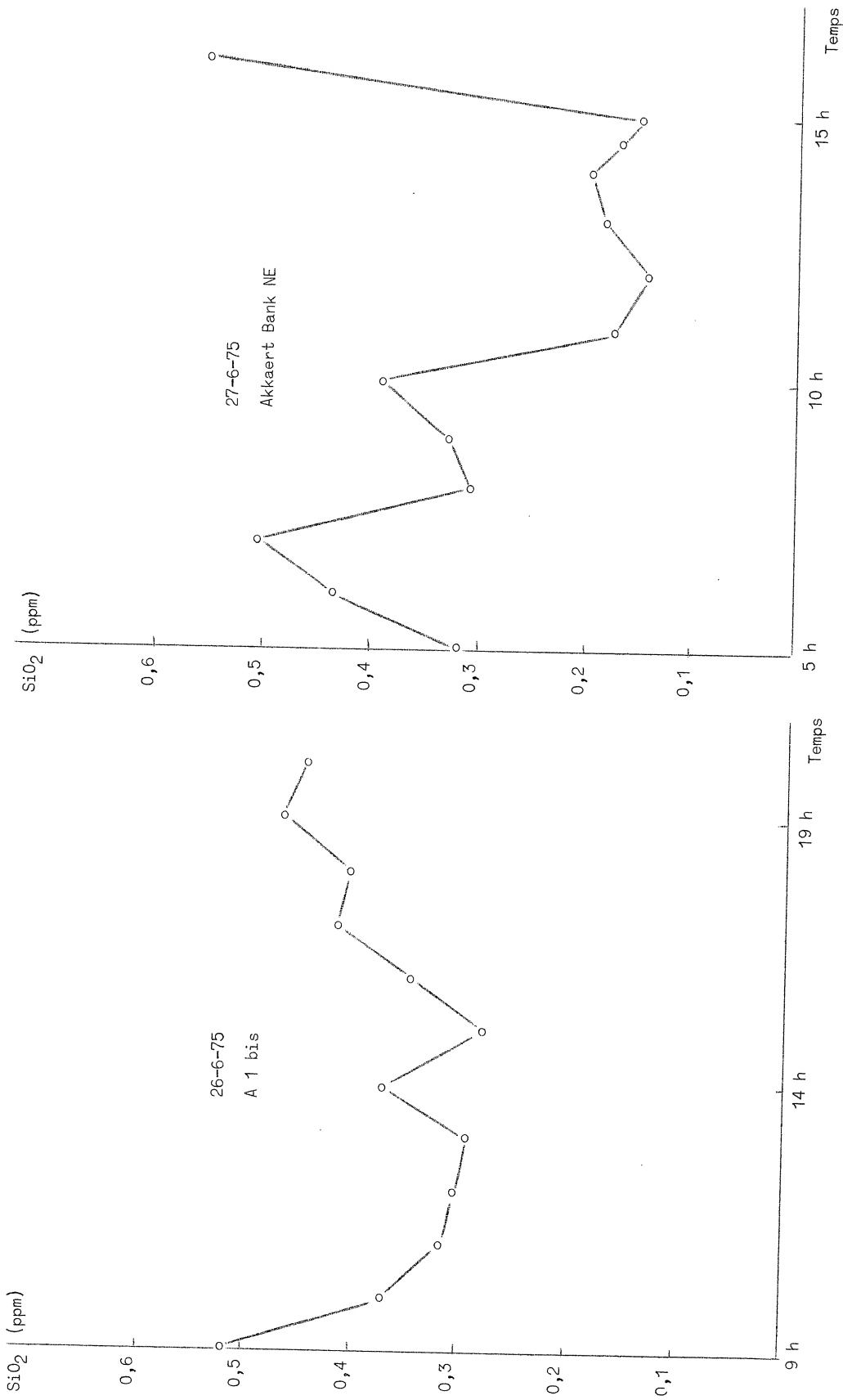


fig. 44.

Evolution de la silice dissoute (a) à l'intérieur et (b) à la limite du gyre, au cours d'une marée en juin 1975

centre du gyre (Albis). La remontée brutale de la concentration en silice, observée au cours du flot pour le premier point, indique la délimitation très nette entre les eaux du gyre plus concentrées en silice et les eaux du large, alors qu'à l'intérieur du gyre, les fluctuations de concentration sont plus faibles. Enfin, la carte des sédiments établie en tenant compte de la topographie du fond, montre de manière remarquable l'existence entre Ostende et Zeebrugge, d'une zone d'intense accumulation de vases (fig. 30). Elle permet aussi de suivre le cheminement préférentiel des sédiments apportés par l'Escaut qui longe la côte belge jusqu'à Ostende pour remonter ensuite vers le nord-est sous l'influence des courants résiduels du large.

7.- Distribution verticale des masses d'eau

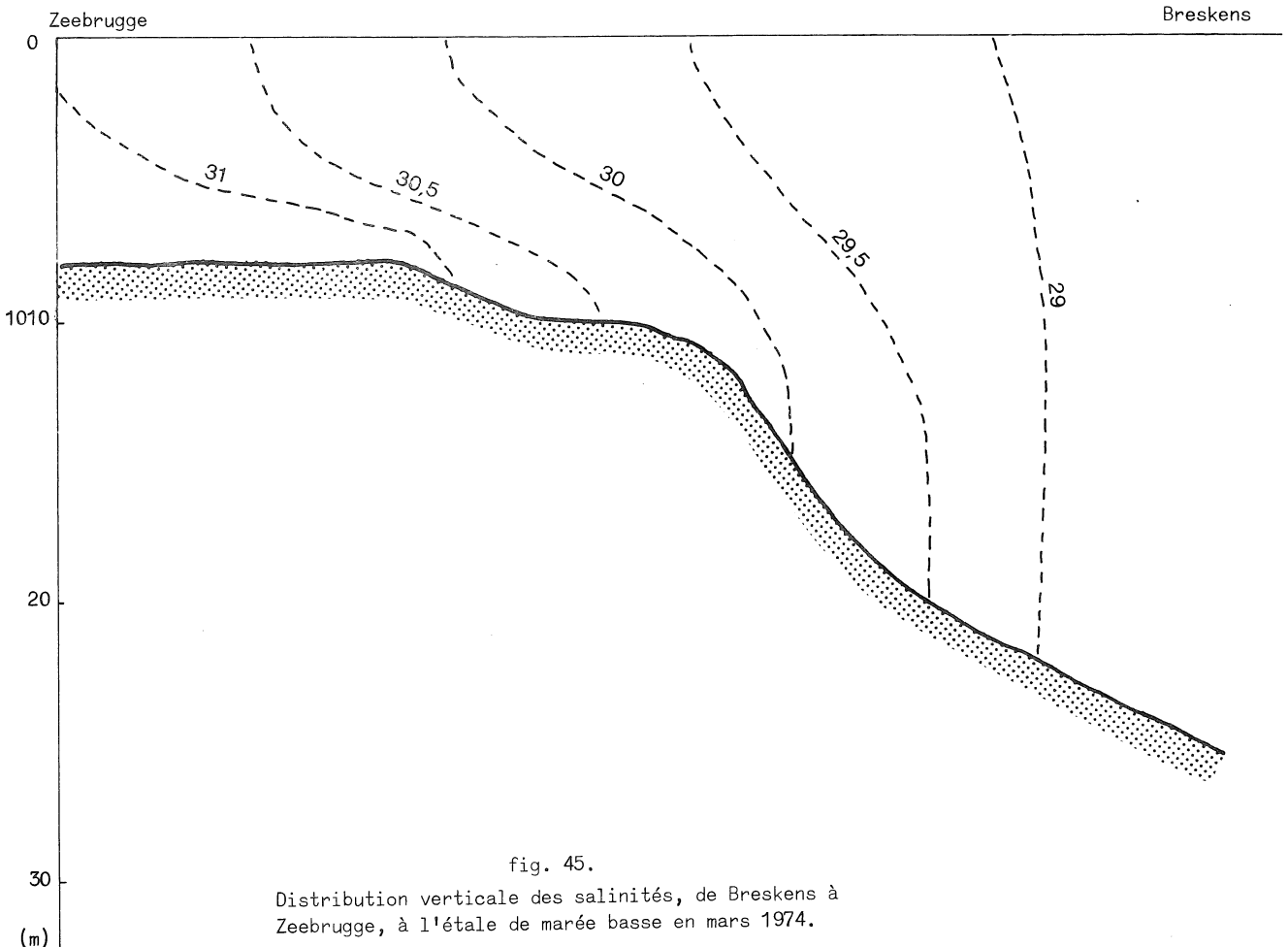


fig. 45.

Distribution verticale des salinités, de Breskens à Zeebrugge, à l'étale de marée basse en mars 1974.



L'existence de masses d'eau de salinité variable entraîne l'apparition d'une stratification verticale due aux différences de densité des eaux, dont l'importance dépend de l'intensité de la dispersion turbulente verticale.

L'existence d'une stratification verticale des masses d'eau a été vérifiée au cours d'une campagne effectuée en mars 1974. Les figures 45 et 46 représentent à titre d'exemple une coupe verticale effectuée respectivement sur une radiale allant de Breskens à Zeebrugge et de Breskens vers le large (point M06 du réseau) au travers du Walvischstaart.

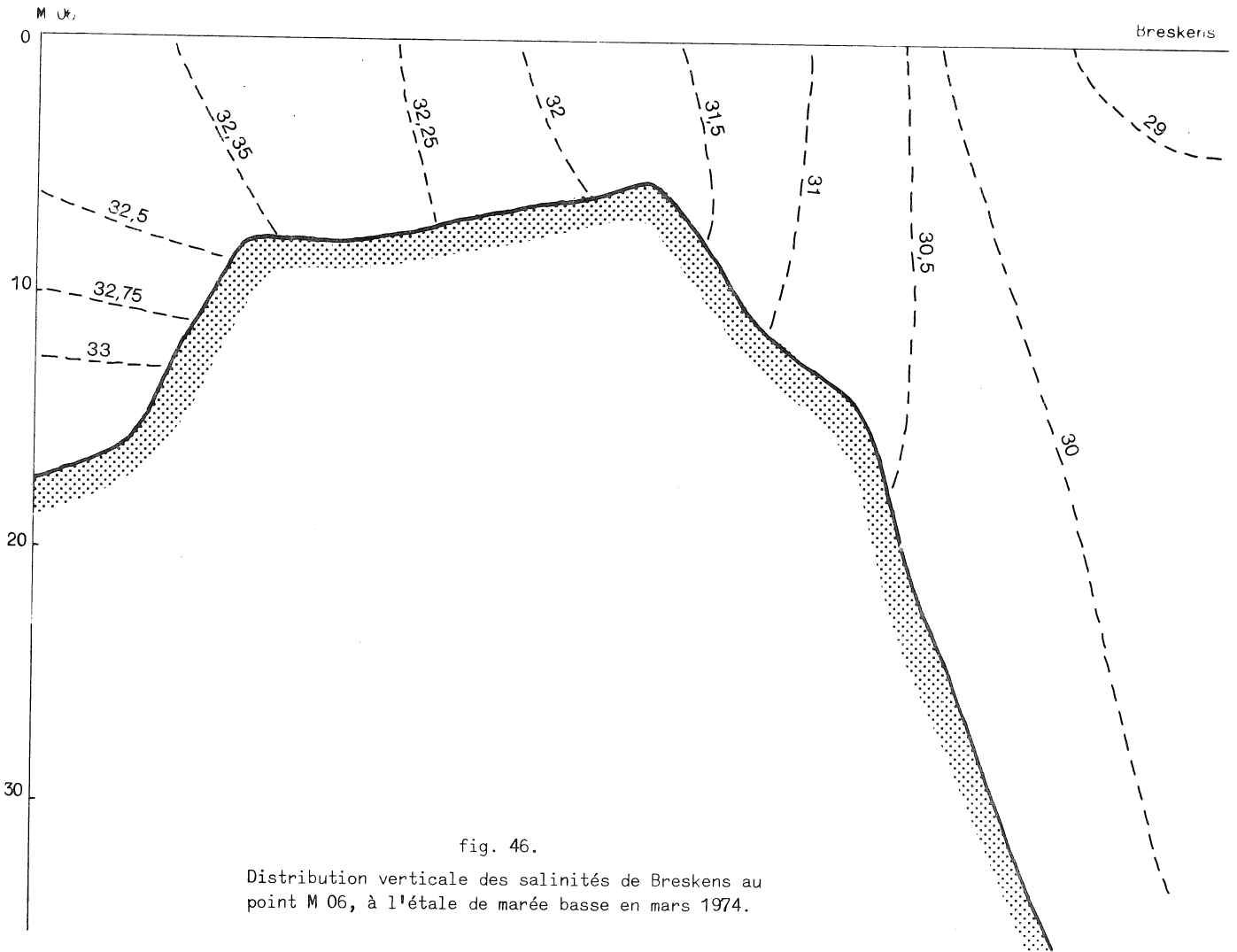


fig. 46.

Distribution verticale des salinités de Breskens au point M 06, à l'étale de marée basse en mars 1974.

On constate que la stratification verticale est relativement faible au voisinage de l'embouchure. Elle est importante dans le gyre au voisinage de Zeebrugge, où l'on peut observer des variations de salinité de 1 ‰ sur une profondeur de 10 mètres. La stratification verticale persiste remarquablement au point MO6, où elle atteint 0,7 ‰ sur une profondeur de 15 mètres. Rappelons que ce point correspond à la zone d'entraînement de l'eau du gyre vers le nord-est. Enfin, les eaux sont bien mélangées verticalement dans les zones peu profondes du Walvischstaart.

Les distributions des masses d'eau que l'on observe dans la région côtière sont caractéristiques des zones marines à circulation restreinte, du type estuarien que l'on rencontre dans les baies et les golfes alimentés par une source d'eau douce, et les fjords.

#### 8.- Conclusions

Les caractéristiques physiques et chimiques des eaux ainsi que la répartition des sédiments de la zone côtière, confirment l'existence d'un gyre dont le centre se trouve situé en moyenne entre Zeebrugge et Ostende. Les eaux de ce gyre sont alimentées par les eaux de l'estuaire de l'Escaut qui cheminent préférentiellement par le Scheur et par de l'eau du large provenant du Pas de Calais. Par contre, les eaux du large entrant dans l'estuaire de l'Escaut proviennent surtout d'une zone située plus au nord-est en empruntant le chenal constitué par l'Oostgat. Les eaux du gyre sont partiellement entraînées par le courant résiduel du large orienté vers le nord-est.

Il faut remarquer que ces eaux riches en substances nutritives, mais aussi en polluants divers provenant de l'Escaut et des émissaires côtiers, ont un temps de séjour très élevé dans la zone du gyre, ainsi que le montre par exemple les faibles salinités qui y sont enregistrées. Celles qui sont entraînées par le courant résiduel passent ensuite à une certaine distance de Walcheren, en se dispersant assez rapidement. Il en résulte qu'au cours d'une marée, on observe, assez

paradoxalement, en moyenne, des eaux relativement pures et salines à la pointe de Walcheren, alors que plus au large circulent des eaux de l'estuaire plus ou moins diluées, ayant transité par le gyre. Cette configuration est de nature à expliquer les anomalies biologiques et les inversions des paramètres chimiques observés aux points 5 et 6 du réseau de mesure du modèle et qui seront décrites ultérieurement.

Le gyre subit évidemment des déplacements liés aux marées et aux variations des vents locaux dominants. Par suite de la faible salinité des eaux du gyre, il s'y superpose d'autre part des courants de densité analogues à ceux que l'on observe dans les estuaires. Elles conduisent à l'établissement d'une stratification verticale d'autant plus importante que le gradient horizontal de salinité est élevé. Le phénomène d'intrusion en profondeur d'eau salée dans le gyre se manifeste principalement à la limite de celui-ci. Ce phénomène est important pour la compréhension des effets écologiques sur les populations des brise-lames le long de nos côtes.

#### Références

- BROEKER, W., (1974). *Chemical Oceanography*, Harcourt Brace Jovanovitch Inc., N.Y., U.S.A.
- GULLENTOPS, F., (1974). Detrital sedimentology in the Southern Bight of the North Sea, *in* Math. Modelsea, I.C.E.S. Hydrography Committee, *CM 1974/C* : 1.
- HANSEN, W., (1966). The reproduction of the motion in the sea means of hydrodynamical-numerical methods, *Tech. Rep. n° 25, N.A.T.O.*, Subcommittee on Oceanographic Research.
- NIHOUL, J.C.J., (1975a). *Modelling of Marine Systems*, Elsevier Publ., Amsterdam.
- NIHOUL, J.C.J., (1975b). Mesoscale secondary flows and the dynamics of ecosystems in the Southern Bight of the North Sea, *Mém. Soc. Sc. Liège*, 7, 83, [Proc. Sixth Liège Coll. on Ocean Hydrodynamics, May 1974].
- NIHOUL, J.C.J., (1975c). Effect of the "tidal stress" on residual circulation and mud deposition in the Southern Bight of the North Sea, *Pure and Applied Geophysics*, 113, 577.

- NIHOUL, J.C.J. and RONDAY, F.C., (1975). The influence of the tidal stress on the residual circulation, *Tellus*, **27**, 5.
- NIHOUL, J.C.J. and RONDAY, F.C., (1976). Hydrodynamic Models of the North Sea, *Mém. Soc. Sc. Liège*, **2** [Proc. 7th Liège Coll. on Ocean Hydrodynamics, May, 1975].
- OTTO, L., (1970). The mean residual transport pattern in the Southern North Sea, I.C.E.S. Hydrography Committee, *CM 1970/C* : 21.
- RONDAY, F.C., (1975). Mesoscale effects of the tidal stress on the residual circulation of the North Sea, *Mém. Soc. Sc. Liège*, **7**, 273, [Proc 6th Liège Coll. on Ocean Hydrodynamics, May 1974].