

Chapitre I

Impératifs d'une gestion de la mer et nécessité d'un modèle mathématique

par

Jacques C.J. NIHOUL

1.- Introduction

Cinq années de campagnes interdisciplinaires de mesures intensives, de 1971 à 1976, ont permis de dresser un inventaire détaillé des propriétés du Southern Bight dans le sud de la mer du Nord (*e.g.* fig. 1).

Ces campagnes s'inscrivaient le plus souvent dans le cadre d'exercices internationaux couvrant l'ensemble de la mer du Nord, la Manche et, en général, les mers côtières nord-européennes jusqu'à la limite du plateau continental (*e.g.* fig. 2 et 3).

Les résultats du Programme National Belge ont pu ainsi être intégrés dans un réseau plus vaste et être exploités dans le cadre d'une collaboration internationale (Conseil International pour l'Exploration de la Mer; "Joint North Sea Information System", "Joint North Sea Modelling Group", ...).

2.- Le problème de la contamination des produits de la mer

Dans le cadre du programme, des échantillons de poissons vendus sur le marché belge ont été analysés périodiquement afin de déterminer leur contenu en métaux lourds, pesticides et autres polluants.

L'analyse révèle que les variations d'une zone de pêche à une autre pour une espèce donnée sont moins importantes que les variations entre espèces provenant de la même région.

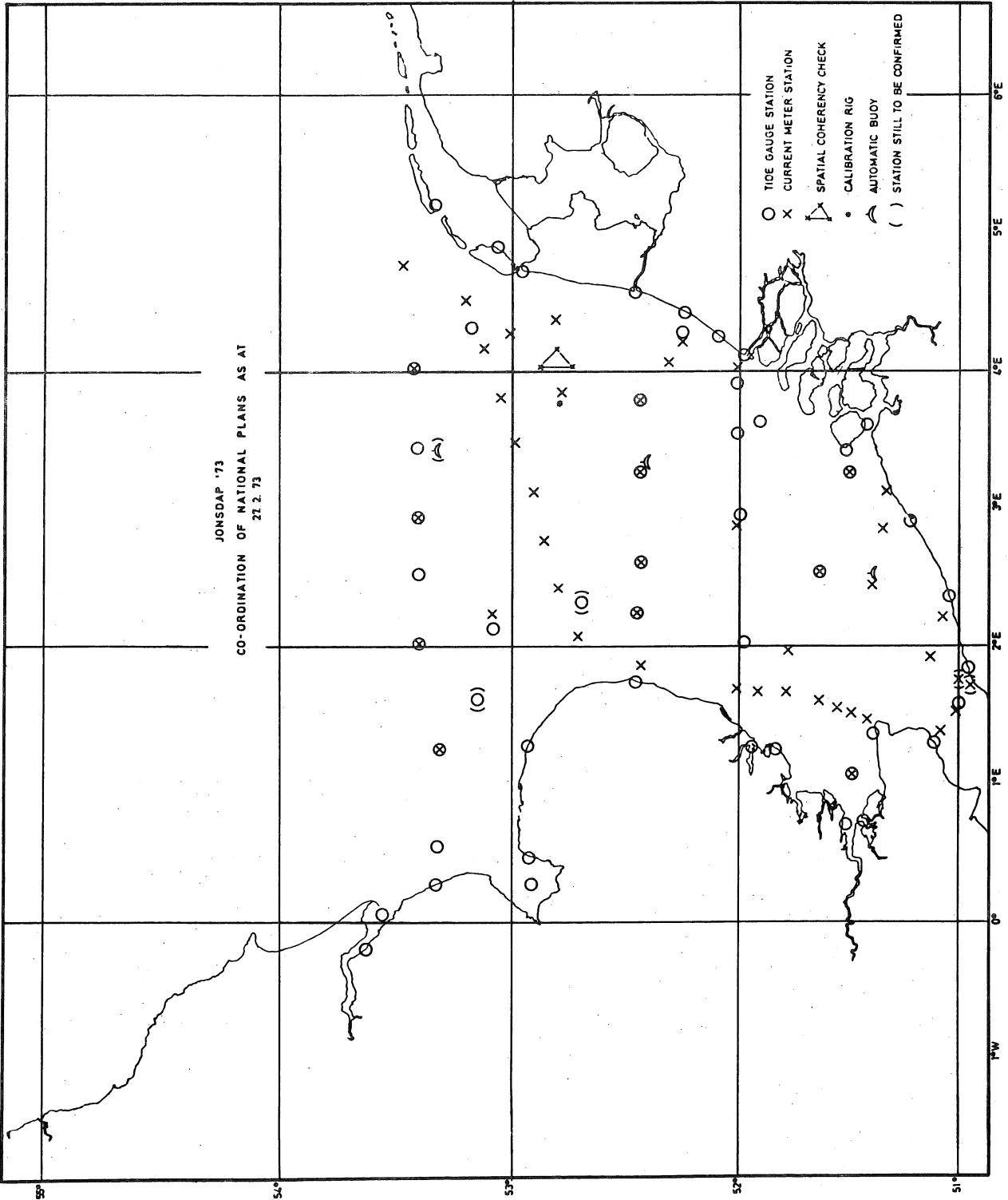


fig. 1.
Déploiement des stations de mesures des paramètres physiques
lors de la campagne "Jonsdap 73" dans le Southern Bight.

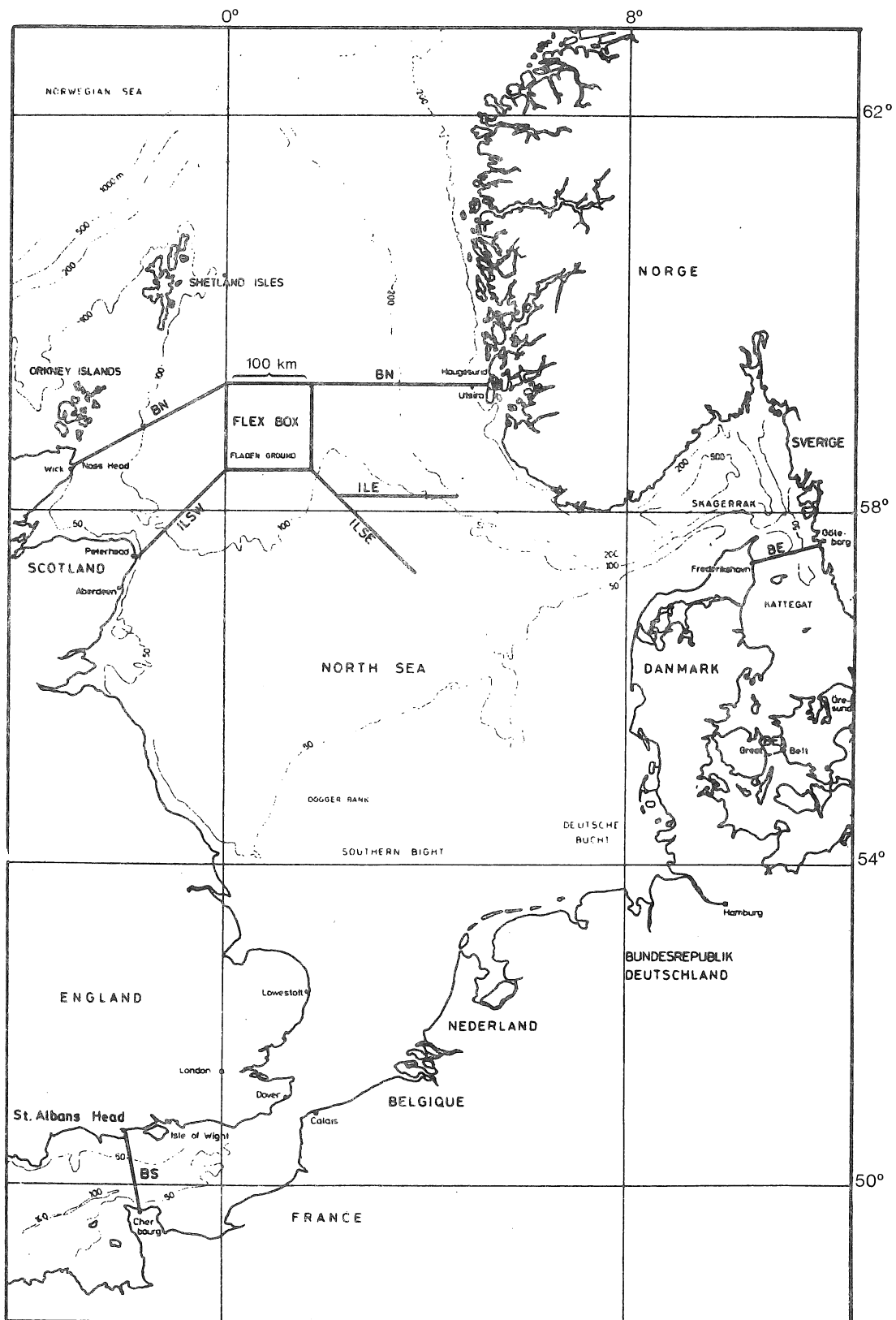


fig. 2.

Frontières (BN, BS, BE) de l'expérience "Jonsdap 76" en mer du Nord. Un réseau de mesures hydrodynamiques couvre l'ensemble de la région avec une concentration particulière le long des lignes (ILSW, ILE, ILSE) entourant un carré de 100 km de côté où des mesures physiques, chimiques et biologiques sont faites simultanément.

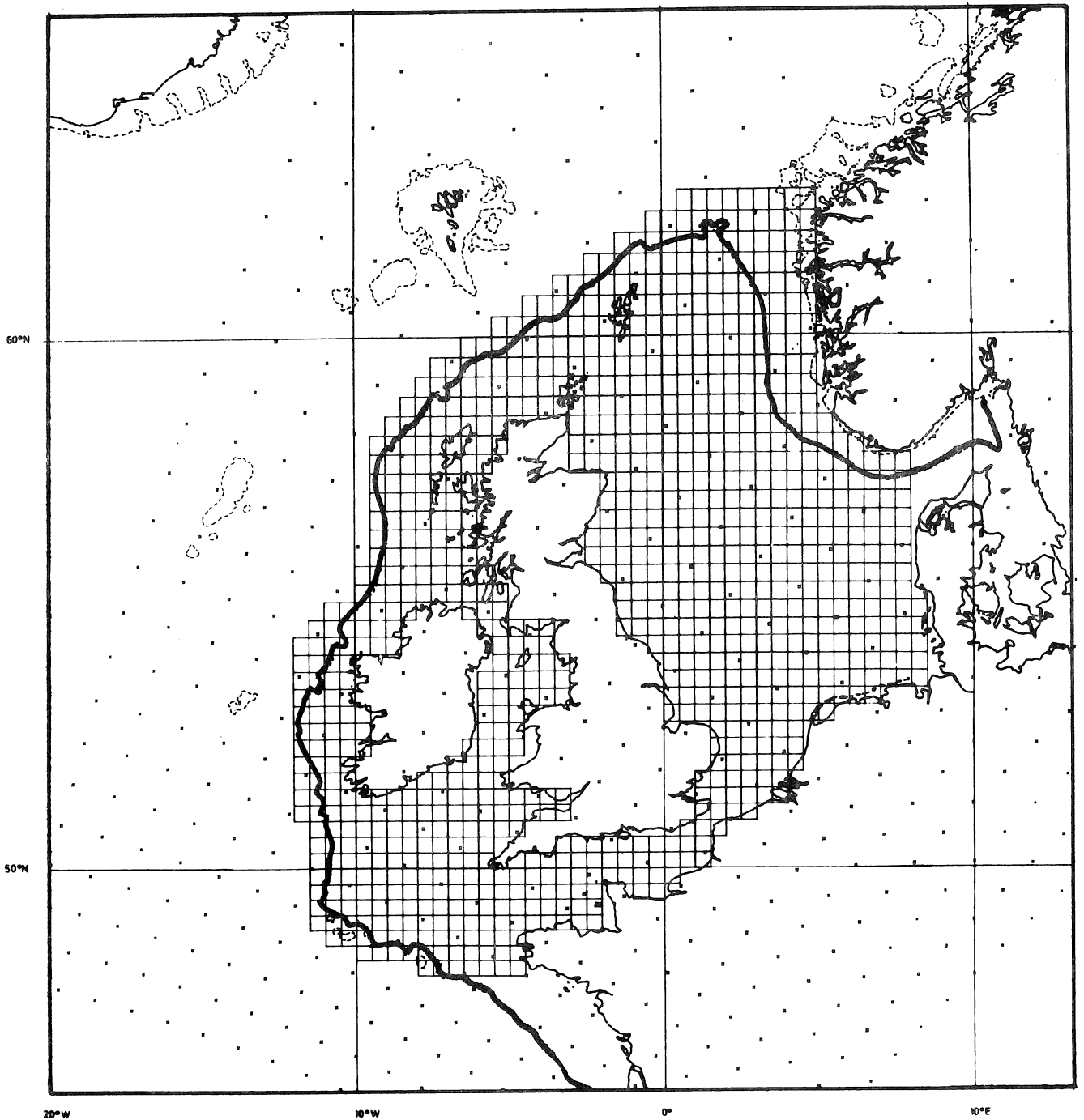


fig. 3.

Limite de la zone continentale nord-européenne (associée à l'isobathe de 100 brasses). Les points sont ceux du réseau des données météorologiques. La grille est celle d'un modèle mathématique de tempêtes.

Tableau 1

Concentrations de quatre métaux lourds dans les poissons (ppm dans les filets)				
A.- Métaux lourds dans les plies provenant de trois zones de pêche différentes				
	Hg	Cu	Pb	Zn
Zone côtière belge	0,2 ± 0,2	0,8 ± 0,3	0,3 ± 0,1	6,4 ± 1,6
Mer d'Irlande	0,4 ± 0,3	0,8 ± 0,4	0,4 ± 0,5	6,0 ± 1,7
Mer du Nord	0,2 ± 0,15	0,6 ± 0,2	0,4 ± 0,6	6,4 ± 2,6
B.- Métaux lourds dans quatre espèces de poissons pêchés en 1972 dans la zone côtière belge (ppm dans les filets)				
	Hg	Cu	Pb	Zn
Plie	0,2 ± 0,2	0,8 ± 0,3	0,3 ± 0,1	6,4 ± 1,6
Merlan	0,2 ± 0,2	1,1 ± 0,4	1,0 ± 1,0	10,6 ± 8,8
Morue	0,2 ± 0,2	0,7 ± 0,4	0,3 ± 0,1	5,1 ± 1,4
Sprat	0,15 ± 0,05	1,3 ± 0,5	1,7 ± 1,4	24,3 ± 5,7

Le tableau 1 donne en illustration les concentrations, dans quelques espèces importantes de poissons, de quatre métaux toxiques : mercure (Hg), cuivre (Cu), plomb (Pb) et zinc (Zn).

A chaque endroit du tableau, le premier chiffre représente la concentration moyenne, le second chiffre une estimation de la dispersion autour de cette moyenne due à la distribution statistique au sein des échantillons, aux variations saisonnières, etc.

La dispersion est importante, encore que les valeurs excessives comme celle des teneurs en plomb de la plie reflètent probablement des réactions physiologiques spécifiques d'une espèce particulière. Les teneurs en plomb dans les soles, par exemple, sont en moyenne de 0,4 ppm dans les trois régions tests avec une dispersion de 0,1 à 0,2 ppm au maximum.

Dans le cas du mercure, une attention particulière doit être portée aux composés méthylmercurés extrêmement toxiques. Dans tous les échantillons analysés, on observe que la proportion de méthylmercure

décroît lorsqu'augmente la teneur totale en mercure : les poissons faiblement contaminés contiennent proportionnellement plus de méthylmercure (par exemple, une plie d'une teneur de 0,1 ppm de mercure total contient presque 0,1 ppm de méthylmercure, tandis qu'une plie d'une teneur de 0,5 ppm de mercure total contient seulement 0,2 ppm de méthylmercure). Il s'ensuit que la concentration moyenne en méthylmercure n'est pas très différente de la concentration moyenne totale (0,16 ppm, par exemple, au lieu de 0,2 ppm) mais que la dispersion des concentrations en méthylmercure est beaucoup plus petite.

Il semble par conséquent qu'un chiffre de 0,2 ppm de mercure dans les filets peut être pris comme représentatif de la contamination au mercure des poissons de la zone côtière belge. La concentration moyenne de mercure dans la colonne d'eau, dans la même région, étant de l'ordre de 0,2 ppb, on voit apparaître ainsi un facteur de concentration de 10^3 entre les teneurs dans l'eau et les teneurs dans les poissons.

Des expériences de laboratoire réalisées avec des poissons exposés à des eaux de plus en plus contaminées, montrent que -- bien que le taux d'accumulation croisse moins rapidement aux fortes doses, indiquant un léger effet de saturation -- il n'y a apparemment aucune concentration limite au-delà de laquelle le poisson ne peut survivre.

La figure 4 montre par exemple le taux d'accumulation du mercure dans les anguilles. Des anguilles intoxiquées par du mercure à des doses subléthales accumulent des quantités considérables de mercure et deviennent résistantes à des concentrations qui auraient autrement entraîné la mort [Math. Modelsea (1975)].

Cet effet peut être associé à la formation dans différents organes de l'anguille de protéines du type "methallothionein". Ces protéines de faible poids moléculaire contiennent de nombreux groupes SH possédant une très grande affinité pour les métaux lourds. Elles sont normalement présentes dans les poissons où elles contrôlent les teneurs

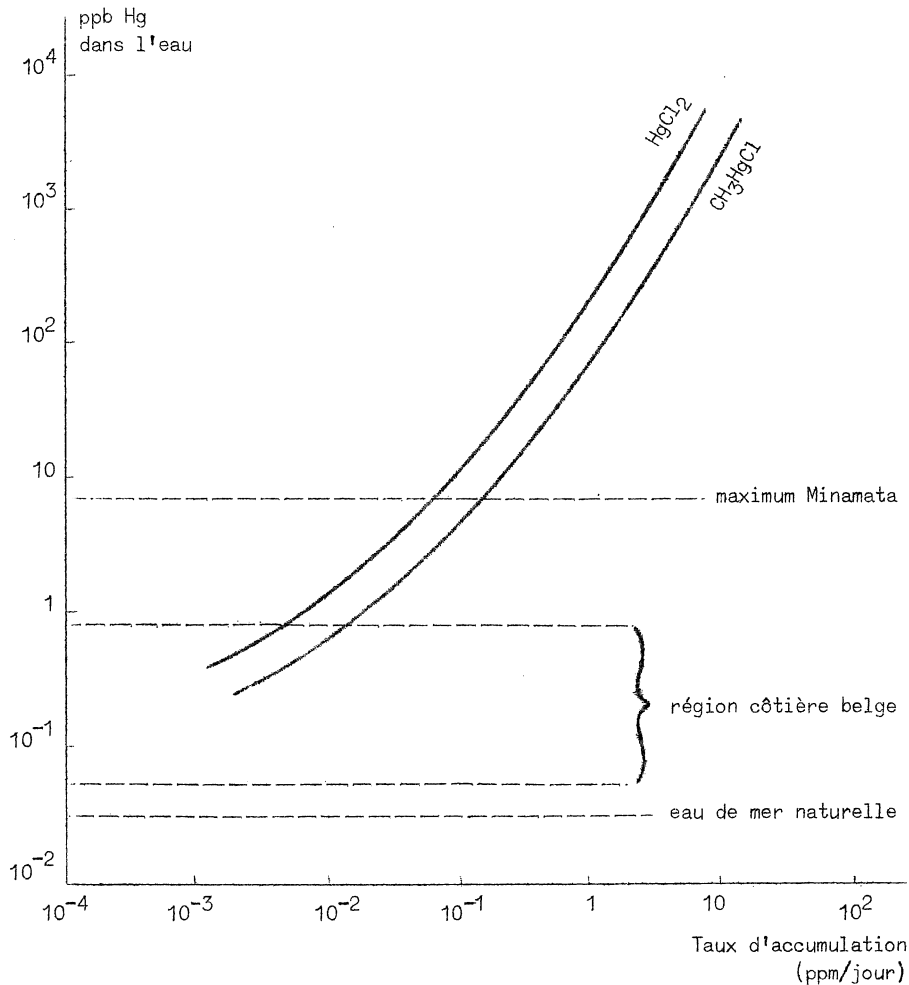


fig. 4.

Taux d'accumulation du mercure dans l'anguille en fonction de la concentration dans l'eau (expérience de laboratoire, J.M. Bouquéniau, Dissertation doctorale, Université de Liège, 1975)

cellulaires en métaux essentiels tels que le zinc et le cuivre. Leur synthèse est accélérée lorsque le poisson est exposé à des eaux contaminées en métaux lourds.

On peut prédire que — les décharges industrielles augmentant de façon continue la pollution de la mer — les métaux lourds vont s'accumuler dans les poissons, mollusques et crustacés à un point tel que les produits de la mer deviendront impropres à la consommation par l'homme.

Il est impérieux de protéger les ressources énormes en nourriture qu'offre la mer. Des limites de tolérance doivent être fixées et une action doit être entreprise pour organiser les déversements à la côte et au large et empêcher la contamination irrévocable des produits marins.

Cette action n'est rien d'autre que la *gestion* de la mer réclamée par tous.

3.- Impacts de l'homme sur le système marin

Les résidus des activités industrielles, agricoles et urbaines échouent invariablement à la mer. Certains y sont déversés directement de façon accidentelle (naufnage, par exemple) ou organisée. D'autres cheminent par les eaux souterraines, les rivières, les canaux et les égouts côtiers. Certains enfin sont apportés par l'atmosphère.

La pollution des eaux côtières ne cesse d'augmenter entraînant une contamination progressive du réceptacle océanique.

Avant de pouvoir songer cependant à imposer des contraintes aux rejets d'origines multiples, il est indispensable d'en faire l'inventaire et de déterminer leurs rôles respectifs dans la détérioration du milieu.

La figure 5 montre par exemple la région côtière belge étudiée particulièrement soigneusement dans le cadre du Programme National.

Le long de la côte belge, un relevé constant est effectué des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des fleuves, rivières et canaux (flèches droites) ainsi que des principaux égouts et émissaires (flèches ondulées) à Nieupoort (N), Ostende (O), Blankenberge (B), Zeebrugge (Z), Heist (H) et à l'embouchure de l'estuaire de l'Escaut.

La frontière ouest est prise le long d'une ligne de courant résiduel déterminée par les modèles hydrodynamiques et séparant la zone du large — caractérisée par l'écoulement régulier vers le nord d'une branche du courant nord Atlantique venant de la Manche — de la zone

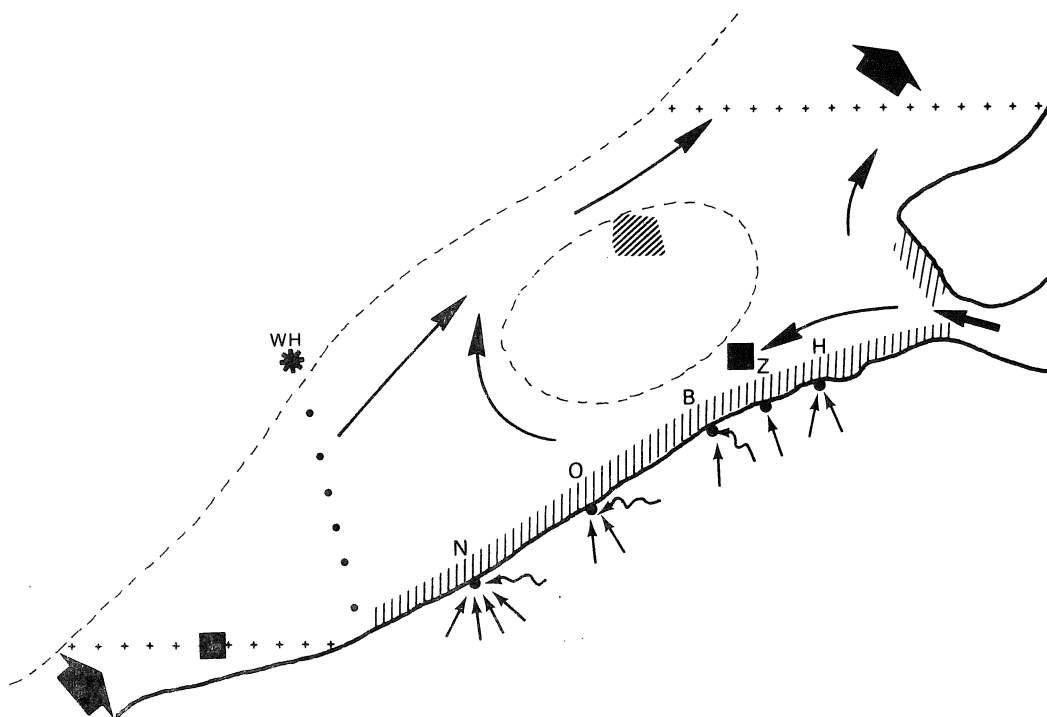


fig. 5.

Région côtière belge, indiquant les principaux apports de polluants et le réseau de surveillance des frontières.

côtière marquée par la présence d'un gyre résiduel (indiqué par la ligne de courant fermée sur la figure) créant dans cette région les conditions d'un "lagon extérieur". Les données relatives aux frontières en mer ouverte sont fournies par le bateau-phare West Hinder (WH), les croisières de mesure à bord des bateaux de la Force Navale, ainsi que trois bouées complètement équipées transmettant les informations à un centre informatique de compilation et de traitement à Ostende. L'aire hachurée au nord-ouest du gyre représente un important site de déversements sous surveillance constante. Les carrés noirs au large de Zeebrugge et sur la frontière sud sont des plateformes permanentes destinées à des mesures automatiques aussi bien qu'à des prélèvements manuels suivis d'analyse. Une ligne de courantomètres est maintenue entre le West Hinder et la côte (ligne pointillée) et est étendue

jusqu'à Lowestoft sur la côte anglaise chaque fois que des campagnes de mesures internationales le demandent.

L'évaluation des échanges entre la colonne d'eau et l'atmosphère d'une part, les sédiments du fond d'autre part, constitue une partie indispensable du programme de surveillance. En particulier, le gyre résiduel est responsable de l'entraînement vers le sud des eaux très turbides de l'Escaut et de l'accumulation progressive de vases près de la côte au nord d'Ostende. Ces vases, extrêmement riches en polluants tels que les métaux lourds, peuvent être remises en circulation par les tempêtes et constituent un dangereux stock de substances contaminantes.

La gestion de la zone côtière belge exige le maintien d'un réseau de surveillance des sources tant côtières qu'atmosphériques ou marines et l'établissement de contraintes sur les rejets afin d'assurer la qualité souhaitée des eaux en combinant les impératifs d'une société moderne industrielle et la nécessité de préserver les ressources naturelles irremplaçables.

4.- Fonction de transfert et modèle mathématique

Les deux sections précédentes illustrent bien la difficulté fondamentale de la gestion marine : tandis que l'homme définit des *critères de qualité* pour les *produits* de la mer, il ne peut imposer des *contraintes* que sur la localisation et l'ampleur des *sources* industrielles et urbaines de pollution. La *gestion* du système marin apparaît ainsi comme un problème de *commande optimale* visant à satisfaire à des *critères* imposés à la *sortie* du système en imposant des *contraintes* à l'*entrée* de celui-ci.

Pour pouvoir mettre sur pied un programme de gestion marine, il est par conséquent indispensable de déterminer la *fonction de transfert* qui relie les entrées aux sorties. Ceci requiert l'*identification des chemins de la pollution* à travers le système marin, la détermination des processus physiques, chimiques et écologiques fondamentaux qui interagissent et gouvernent la dynamique du système et finalement l'*évaluation*

des flux (de nutriments, de polluants, ...) à travers le système (fig. 6).

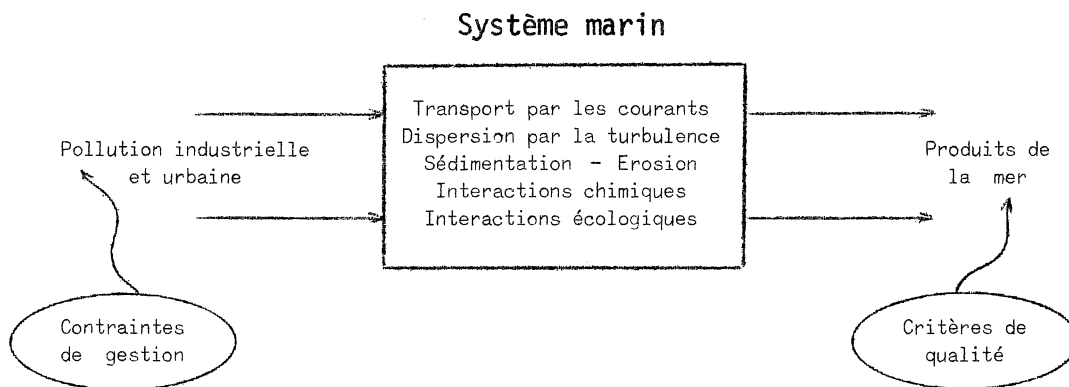


fig. 6.

Cette *compréhension prédictive* du système marin est précisément l'objectif du *modèle mathématique*.

En identifiant qualitativement et quantitativement les processus physiques qui président au transport et à la dispersion des nutriments et des polluants, les interactions chimiques et écologiques qui commandent leur flux à travers les chaînes trophiques, le modèle mathématique détermine la fonction de transfert qui relie la localisation et l'intensité des sources de pollution, les concentrations subséquentes dans l'eau et les sédiments et la contamination résultante de la chaîne alimentaire. Fournissant une évaluation de la quantité prévisible de poissons et de leur niveau de pollution, le modèle peut assister les décisions de Santé Publique. Travaillant en sens inverse et partant des normes de Santé Publique, le modèle définit pour le gestionnaire le problème de l'optimisation dans le cadre des impératifs économiques, de l'ampleur et de la localisation des sources de pollution, rejets côtiers et déversements en mer.

Références

- MATH. MODELSEA, (1975). I.C.E.S. Hydrography Committee and Fisheries Improvement Committee, *C 21*.
- NIHOUL, J.C.J., (1975). *Modelling of Marine Systems*, Elsevier Publ., Amsterdam.
- NIHOUL, J.C.J., (1976). An interdisciplinary mathematical model applied to the Southern Bight of the North Sea, *Ecological Modelling*, **2**, 1.