

Utilisation du modèle de Thomann pour l'interprétation des concentrations en mercure des poissons de l'Atlantique

 Yves Thibaud

IFREMER Centre de Nantes, B.P. 1049, 44037 Nantes Cedex 01, France.

Reçu le 24 mai 1991; accepté le 17 janvier 1992.

Use of the Thomann model for interpretation of mercury concentrations in Atlantic fishes.

Thibaud Y. *Aquat. Living Resour.*, 1992, 5, 57-80.

Abstract

Mercury contents in several species of fish are explained using a model previously presented by Thomann (1981) and based on the transport of contaminants in the marine environment and on their transfer through aquatic food chains. It is shown in particular that environmental factors linked to the mercury methylation process occurring in the water column and on the surface of sediments, may be responsible for particularly high contents in certain species. This unique interpretation of mercury contents found in numerous fish species captured in the Atlantic Ocean between 1971 and 1980 is accompanied by a presentation of "reference concentrations" which may prove useful to establish comparisons with other values such as contents found in fishes captured at different times or in other areas.

Keywords : Mercury, methylmercury, fish, marine environment, bioaccumulation, Atlantic.

Résumé

Les teneurs en mercure de plusieurs espèces de poissons sont expliquées en utilisant un modèle présenté antérieurement par Thomann (1981), basé sur le transport des contaminants en milieu marin et leur transfert à travers les chaînes alimentaires aquatiques. Il est montré en particulier que les facteurs environnementaux liés au processus de méthylation du mercure qui se déroule dans la colonne d'eau et à la surface des sédiments, peuvent être responsables des teneurs particulièrement élevées de certaines espèces. Notre interprétation originale de teneurs en mercure de nombreuses espèces de poissons de l'Atlantique pêchés entre 1971 et 1980, est accompagnée de la présentation de « concentrations de référence » qui peuvent être d'utilité pour établir des comparaisons avec d'autres valeurs comme par exemple les teneurs d'autres poissons capturés à une autre époque ou dans d'autres régions.

Mots-clés : Mercure, méthylmercure, poissons, milieu marin, bioaccumulation, atlantique.

INTRODUCTION

Les différences de niveaux de présence en mercure observées chez les poissons, en particulier le fait qu'il a été constaté des teneurs plus élevées chez les espèces de la Méditerranée que dans celles de l'Atlantique, méritent une explication.

Le problème a été considéré par Aston et Fowler (1985), à partir d'un ensemble de mesures analytiques

effectuées à la fois sur l'eau de mer et sur les organismes marins. Ces auteurs ont particulièrement souligné le rôle des formes chimiques du mercure, les formes alkylées et les formes inorganiques, ainsi que le rôle de facteurs écologiques liés à la croissance des organismes et à leur régime alimentaire. Plus récemment encore, Bacci (1989) a évoqué une action combinée de la température et de la lumière agissant sur le processus de méthylation microbologique

(méthylation-déméthylation du mercure) qui se déroule dans la colonne d'eau et à la surface des sédiments, pour tenter d'expliquer les teneurs en mercure relativement élevées des poissons de la Méditerranée.

Nous avons nous-mêmes apporté à cela des éléments de réponse en utilisant le modèle de Thomann (1981) pour interpréter les teneurs en mercure inorganique et en mercure méthylé de coquillages et de poissons originaires de la Méditerranée (Thibaud et Noël, 1991).

Ici nous présentons des résultats qui concernent différentes espèces de poissons collectés dans plusieurs régions de l'Atlantique au cours des années 1971-1973. Là encore, nos observations sont en bon accord avec les conceptions relativement récentes sur le transport des contaminants en milieu marin et les modèles qui décrivent leur transfert à travers la biomasse marine et dont l'aboutissement en particulier dans le cas du mercure est sa bioaccumulation. Elles mettent notamment en évidence l'importance des conditions de milieu sur la distribution du mercure. Les facteurs environnementaux intervenant au moment de la méthylation microbiologique, modifient en effet les proportions relatives des formes chimiques du mercure les plus stables, quelles soient dissoutes (Hg^{2+} et CH_3Hg^+) ou volatiles (Hg^0 et $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$).

La bonne correspondance entre nos propres résultats et ceux de la littérature pour les mêmes espèces d'organismes ayant des origines comparables nous a permis par ailleurs de délimiter des niveaux de présence, utilisables comme concentrations de référence, pour beaucoup d'espèces de poissons de la mer du Nord et de l'Atlantique prélevés entre 1971 et 1980.

MÉTHODE

Le milieu marin et le mercure

Le milieu marin constitue un système fonctionnel au sens propre de l'écologie. L'eau de mer, la matière particulaire, les sédiments, le milieu abiotique en général ainsi que le peuplement marin ou biomasse, ne sont que ses composants. Il reçoit, utilise et restitue de la matière et de l'énergie. Les processus de la photosynthèse, de la respiration, de la digestion, dépendants eux-mêmes de synthèses biologiques et dans lesquels sont impliqués des échanges permanents, correspondent à des fonctions de l'écosystème marin (Duvigneaud, 1974).

Beaucoup d'éléments chimiques, les métaux traces, en particulier le mercure, sont alors échangés en continu en milieu marin, étant tour à tour dissous dans l'eau de mer, adsorbés ou fixés aux particules et aux organismes. Ils parcourent de la sorte leur propre cycle de circulation dans un écosystème dont les échanges de matière ou flux sont globalement équilibrés dans un « état permanent ».

Dans le cas du mercure, on sait maintenant, que des modifications de ses formes chimiques aux interfaces entre l'eau et les particules en suspension et entre l'eau et les sédiments, qui sont liées aux caractéristiques de sorption vis-à-vis des composés du mercure et de ses ions, aux conditions physico-chimiques du milieu et à la présence de microorganismes, accompagnent son cheminement (fig. 1). Il est bien connu aussi que le mercure est fixé, sous sa forme inorganique (Hg^{2+}) ou sous sa forme organique (CH_3Hg^+) par les diverses espèces qui composent le peuplement marin soit à partir de l'eau de mer soit à partir de

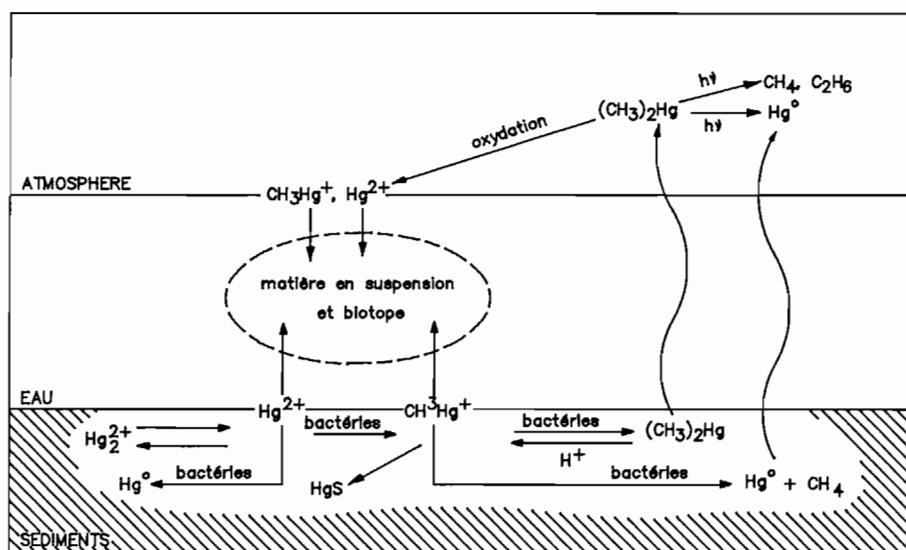


Figure 1. — Représentation des transformations chimiques du mercure aux interfaces aquatiques.

Representation of chemical transformations of mercury at aquatic interfaces.

leur nourriture et qu'il emprunte en quelque sorte la voie des chaînes alimentaires marines (Thibaud, 1990).

Bioaccumulation par les organismes

L'existence de concentrations en mercure beaucoup plus élevées dans les organismes marins que dans l'eau de mer elle-même est une observation relativement ancienne. Stock et Cucuel (1934) ont publié des teneurs dans les poissons de la mer du Nord, allant de 0,025 à 0,15 mg.kg⁻¹ de chair humide, très différentes de la concentration de l'eau qui était évaluée par ces auteurs à quelques dizaines de ng.L⁻¹. Le phénomène est appelé communément « bioaccumulation ».

Fagerstrom (1977) présente une théorie de la bioaccumulation basée sur l'hypothèse que le métabolisme du métal est confondu avec le métabolisme des aliments. Une relation simple doit alors exister entre la quantité de métal fixé et le poids des organismes. Norström *et al.* (1976) se fondent aussi sur l'existence des échanges permanents entre l'eau de mer, les organismes et leur nourriture pour expliquer les relations qu'ils ont observées entre la concentration en contaminant et le poids des organismes. Ces théories reposent sur la conception du « poisson adsorbant » suivant laquelle les tissus des organismes se comportent comme des « supports chimiques » qui peuvent admettre des fixations et des éliminations successives du métal sous ses formes solubles, présentes dans l'eau et les aliments. Dans le cas particulier du mercure, la rétention est gouvernée par les interactions avec les systèmes biologiques de ses deux formes chimiques stables en solution : Hg²⁺ et CH₃Hg⁺.

Plusieurs auteurs (Moore, 1981; Kågi et Hapke, 1984; Viarengo, 1985) ont décrit les processus biochimiques concernés et le déplacement des métaux, notamment du mercure, au niveau cellulaire. La forte affinité de Hg²⁺ et de CH₃Hg⁺ pour le soufre des composés biochimiques, présent dans les enzymes, dans certaines protéines comme les métallothionéines ou encore la cystéine et le glutathion, favorise la formation de biocomplexes dans les fluides et les cellules et permet de ce fait la traversée des membranes biologiques.

Pour que la théorie soit applicable dans le cas du mercure, il faut que les formes chimiques Hg²⁺ et CH₃Hg⁺ restent stables tout au long de leur cheminement à travers les espèces marines; c'est-à-dire qu'il n'y ait ni interconversion, méthylation-déméthylation, ni formation de composés volatils : Hg⁰ et (CH₃)₂Hg. Il est très vraisemblable qu'il en soit ainsi :

- la méthylation de Hg²⁺ pour donner CH₃Hg⁺ ou (CH₃)₂Hg suppose des conditions particulières, inexistantes dans les tissus des organismes, notamment l'intervention de bactéries. Chez les animaux, la méthylation n'a été montrée que dans la flore intestinale du poulet (Kurmae *et al.*, 1969);

- la déméthylation de CH₃Hg⁺ pour donner Hg²⁺ implique l'existence chez les poissons d'un processus particulier de détoxication qui n'apparaît que lorsque leur niveau de mercure méthylé est anormalement élevé (Thibaud, 1978).

Modélisation du cheminement du mercure à travers la biomasse

Des modèles décrivant le cheminement du mercure et permettant d'estimer les niveaux de contaminants dans les organismes aquatiques, ont été élaborés à partir de la conception du « poisson adsorbant ».

Certains auteurs ont appliqué ou adapté à l'environnement naturel les résultats d'expérimentations antérieures conduites en laboratoire soit dans le cas d'espèces particulières soit dans le cas de contaminants particuliers (Aoyama *et al.*, 1978; Buffoni *et al.*, 1982; Barber *et al.*, 1991). D'autres auteurs, notamment Thomann (1981), ont construit leur modèle sur des concepts écologiques. La biomasse qui constitue un tout dans l'écosystème est subdivisée en compartiments représentatifs de niveaux trophiques tels que phytoplancton, zooplancton, petits poissons et gros poissons (*fig. 2*).

La quantité de contaminant d'un organisme dans un « état permanent » résulte alors d'une adsorption-désorption vis-à-vis de l'eau environnante et d'une adsorption-désorption du fait de sa nourriture. De cela-même découle une définition claire des facteurs de concentration : N_w et N ; N_w étant le rapport de la concentration en contaminant de l'organisme [ng.kg⁻¹ (poids humide)] et de la concentration en contaminant de l'eau (ng.L⁻¹) du seul fait des échanges entre l'eau et l'organisme, et N étant le rapport de la concentration en contaminant [ng.kg⁻¹ (poids humide)] et de la concentration en contaminant de l'eau (ng.L⁻¹) du fait des échanges entre l'eau et l'organisme et du fait de la nourriture de l'organisme.

Si N/N_w est égal à 1, il n'y a pas de transfert de contaminant par la chaîne alimentaire et si N/N_w est plus grand que 1, il y a bien un transfert de contaminant par la chaîne alimentaire. Les deux types de contamination l'une à partir de l'eau et l'autre à partir de la nourriture sont également admises par Barber *et al.*, 1991; elles sont appelées par ces auteurs « bioconcentration » dans le premier cas et « bioaccumulation » dans le deuxième cas.

Le modèle développé par Thomann (1981) et correspondant à la représentation donnée sur la *figure 2*, conduit à écrire des équations « balance de masse » pour le flux du contaminant dans des compartiments successifs, en employant les symboles que Thomann a lui-même définis (*tabl. 1*).

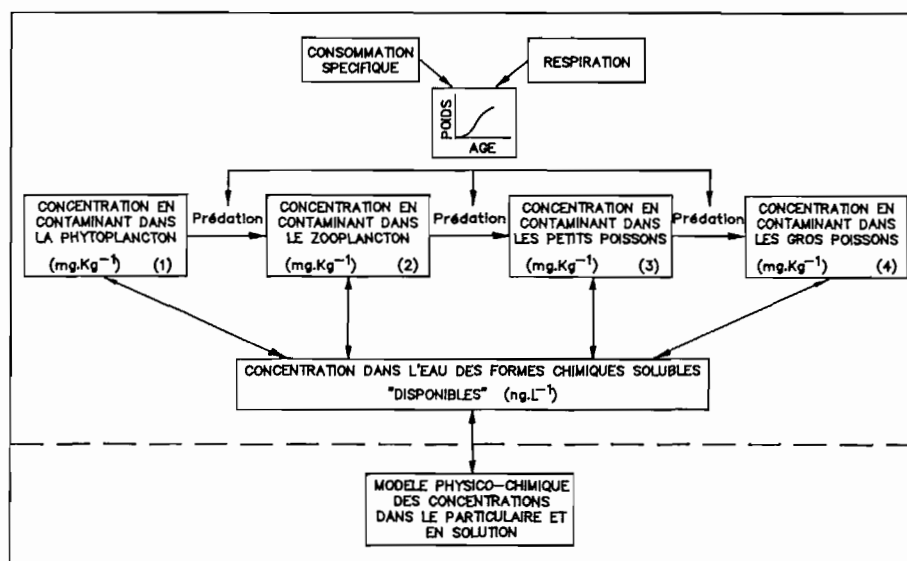


Figure 2. — Représentation schématique d'une chaîne alimentaire aquatique de quatre compartiments, suivant Thomann (1981).

Schematic representation of a 4-compartment aquatic food chain, according to Thomann (1981),

Tableau 1. — Symboles utilisés dans le modèle de Thomann (1981).

Symbols used in the Thomann model (1981).

Symboles	Signification
c	concentration dans l'eau ($\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$)
v_1	concentration dans le phytoplancton ($\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ poids humide)*
v_i	concentration dans l'organisme de niveau i ($\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ poids humide)*
k_{ui}, k_{ui}	taux de sorption du phytoplancton, de l'organisme de niveau i
K, K_1, K_i	taux de désorption, du phytoplancton, de l'organisme de niveau i
$\alpha_i, \alpha_{i,i-1}$	efficacité d'assimilation du contaminant dans l'organisme prédateur de niveau i , en consommant la proie de niveau $i-1$
$C, C_{i,i-1}$	consommation, de l'organisme de niveau i en organisme proie de niveau $i-1$ (g par jour)
$a_{i,i-1}$	efficacité d'assimilation de l'organisme prédateur de niveau i en organisme proie de niveau $i-1$
W, W_i	poids de l'organisme, de niveau i (g)
r_i	perte en poids de l'organisme de niveau i due à l'excrétion et au métabolisme (g par jour)
N_n	facteur de concentration au compartiment n
N_{nw}	facteur de concentration au compartiment n dû uniquement à l'entrée de l'eau
$G_i = \frac{dW_i}{W_i} / dt$ $= a_{i,i-1} C_{i,i-1} - r_i$ $K'_i = G_i + K_i$	Taux de croissance de l'organisme de niveau i , par jour

* la concentration dans les organismes est habituellement exprimée en $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \approx 10^6 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Nous avons alors dans le cas du phytoplancton :

$$\frac{dv_1}{dt} = k_{u1} c - K_1 v_1 \quad (1)$$

et dans le cas d'un organisme de niveau i :

$$\frac{dv_i}{dt} = k_{ui} c + \alpha_{i,i-1} C_{i,i-1} v_{i-1} - K'_i v_i.$$

Cela conduit à l'expression suivante de la concentration d'un organisme de niveau i , dans les conditions d'équilibre,

$$v_i = \frac{k_{ui} c}{K'_i} + \frac{\alpha_{i,i-1} C_{i,i-1} v_{i-1}}{K'_i}. \quad (3)$$

Les taux k et K du mercure inorganique (Hg^{2+}) et du mercure méthylé (CH_3Hg^+) et les paramètres α_i , G_i , r_i et a_i sont donnés (tabl. 2).

L'équation [3] peut aussi, en introduisant le facteur de concentration :

$$\frac{v_i}{c} = N_n \quad (n, \text{numéro du compartiment}),$$

être écrite de la manière suivante :

$$N_n = N_{nw} + \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{\alpha_j C_j}{K'_j} \right)^{n-j} \cdot N_{jw}. \quad (4)$$

Le terme $\alpha_i C_i / K'_i$ est le facteur de transfert par chaîne alimentaire.

Tableau 2. — Valeurs des taux de fixation et d'élimination du mercure, du taux de croissance et d'autres paramètres utiles pour appliquer la modélisation de Thomann (1981) à des organismes marins.

Values of mercury uptake and excretion rates, of growth rates and other parameters useful in the application of Thomann's modelling (1981) to marine organisms.

Paramètres		Valeur	Référence
• Taux de fixation pour un organisme de poids W	k (Hg^{2+})	$14,6 W^{-0,19} \text{ j}^{-1}$	Pentreath (1976 a)
	(Hg méthylé)	$49,6 W^{-0,43} \text{ j}^{-1}$	Pentreath (1976 b)
• Taux d'élimination pour un organisme de poids W	K (Hg^{2+})	$0,014 W^{-0,22} \text{ j}^{-1}$	Pentreath (1976 a)
	(Hg méthylé)	$0,03 W^{-0,58} \text{ j}^{-1}$	Norstrom <i>et al.</i> (1976)
• Facteur de concentration pour du phytoplancton	N_{1w} (Hg^{2+})	$10^{3,3}$	Fowler (1985)
	(Hg méthylé)	$10^{4,08}$	Fowler (1985)
• Efficacité d'assimilation du contaminant	α_i	0,9	Thomann (1981)
• Croissance de l'organisme	G_i	$0,01 W^{-0,22} (25^\circ\text{C}) \text{ j}^{-1}$	Thomann (1981)
		W en g	
• Perte en poids de l'organisme due à l'excrétion et au métabolisme	r_i	$0,036 W^{-0,2} (25^\circ\text{C}) \text{ j}^{-1}$	Thomann (1981)
		W en g	
• Efficacité d'assimilation de la nourriture	a	0,8	Thomann (1981)

Il s'agit finalement d'une relation entre la concentration en contaminant des organismes et les niveaux trophiques, eux-mêmes associés à d'autres variables, les taux de fixation et d'élimination (k et K), les paramètres bioénergétiques et de croissance (G_i , r_i), dépendantes du poids W_i des individus (tabl. 1 et 2). Toute tentative visant, à partir de telles bases théoriques, à interpréter des résultats d'analyses de mercure concernant des poissons, notamment à les relier avec l'espèce et le poids des individus, est amplement justifiée.

L'application du modèle à différentes espèces implique évidemment une certaine homogénéité entre les zones de pêche pour ce qui est de la concentration en mercure de l'eau et de la proportion relative de ses formes chimiques dissoutes, Hg^{2+} et CH_3Hg^+ .

Données des campagnes océanographiques

Échantillonnage et techniques analytiques

Des échantillons de poissons au nombre de 528, ont été prélevés au cours des campagnes effectuées par les navires de l'ISTPM (IFREMER) de 1971 à 1973. Les zones de pêche concernées sont indiquées sur les figures 3, 4 et 5. Le tableau 3 regroupe : le mode d'échantillonnage, les espèces de poissons, les lieux de pêche, le nombre d'individus ainsi que leurs poids et leurs longueurs.

Les poissons ont été éviscérés puis congelés à bord des navires. Ils ont été placés en chambre froide et conservés à l'état congelé à -20°C en attendant les analyses. Au laboratoire ensuite, les poissons ont été découpés; les parties musculaires correspondant à chaque individu ont été séparées puis homogénéisées à l'aide d'un « mixeur ». Une fraction de la chair broyée, 1 à 2 g pesée exactement, a été ensuite prélevée.

Les déterminations du mercure total ont été réalisées par spectrophotométrie d'absorption atomi-

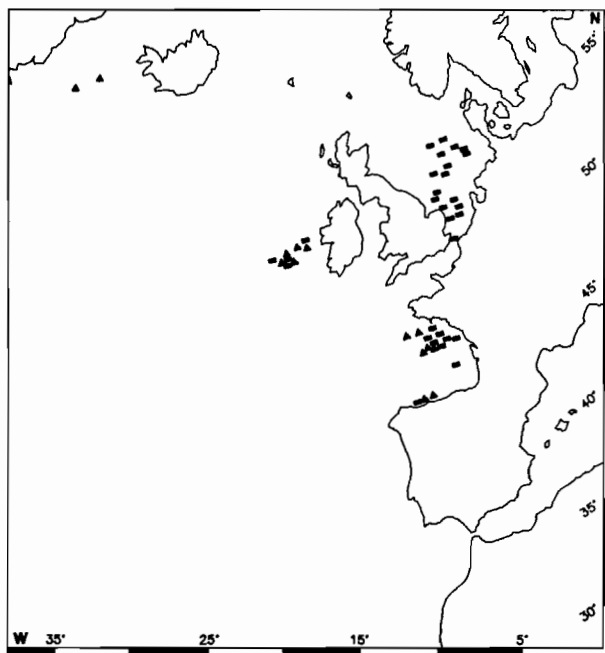


Figure 3. — Zones de pêche de plusieurs espèces de poissons : aiguillat, roussette, émissole (▲) et cardine, limande, plie, sole (—).

Fishing areas for several fish species: dogfish, smooth dogfish, smooth hound (▲) and megrim, dab, plaice, sole (—).

que sans flamme selon une technique précédemment décrite (Thibaud, 1971). La minéralisation de la chair a été effectuée en chauffant à 60°C avec un mélange 1/1 d'acide nitrique et d'acide sulfurique puis en ajoutant à froid une solution de permanganate de potassium. Après dilution et filtration, Hg^{2+} a été réduit à l'état de Hg^0 par du chlorure stanneux et son absorption simultanément mesurée dans l'ultra-violet à 254 nm. Nous avons participé à des exercices d'intercalibration des méthodes d'analyses des métaux lourds dans les tissus biologiques afin de nous assurer

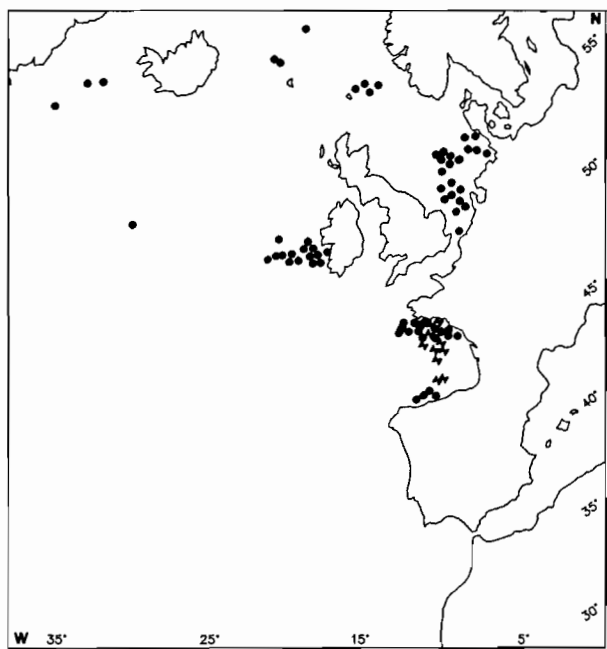


Figure 4. — Zones de pêche de plusieurs espèces de poissons : sardine (▶◀) et merlu, églefin, merlan, morue, lieu, lingue (●).

Fishing areas for several fish species: sardine (▶◀) and hake, haddock, whiting, cod, pollack, saithe, ling (●).

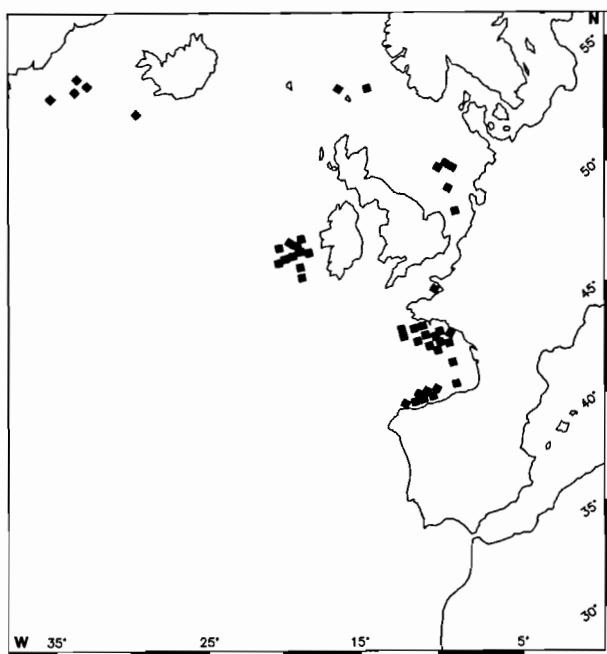


Figure 5. — Zones de pêche de plusieurs espèces de poissons : sébaste, grondin (◆) et chinchard, dorade, maquereau (■).

Fishing areas for several fish species: redfish, red bream, gurnard (◆) and horse mackerel, sea bream, mackerel (■).

de la validité de nos mesures; le tableau 4 présente les résultats obtenus par notre laboratoire dans le cas du mercure, de 1972 à 1975.

RÉSULTATS

Résultats de nos analyses (campagnes océanographiques)

Les résultats des analyses, 528 déterminations de mercure total sont regroupés sur le tableau 5. Ils concernent uniquement le muscle et ils sont exprimés en mg.kg^{-1} de tissu frais. Ils sont aussi présentés graphiquement sur la figure 6 pour chacune des espèces dans l'ordre croissant de leur moyenne et sur la figure 7 pour chacune des zones de pêche.

La première constatation qui se dégage et qui a été antérieurement très souvent rapportée est celle d'un niveau de concentration beaucoup plus élevé dans les poissons que dans l'eau elle-même. Il correspond à un facteur de concentration (poids humide) allant de 55 000 pour la sardine à 590 000 pour l'aiguillat en supposant une concentration dans l'eau de l'Atlantique voisine de 1 ng Hg.L^{-1} (Cossa, 1990).

Les différences de niveaux entre les échantillons sont imputables à divers facteurs dont les influences restent mélangées, la région de pêche, l'espèce ou plus précisément le niveau trophique et le poids des individus.

S'agissant des zones de pêche, les résultats présentés graphiquement sur la figure 7 ne démontrent pas de façon certaine que les différences observées doivent être attribuées au seul facteur géographique. L'échantillonnage n'est pas constitué pour toutes les zones, d'espèces identiques ni d'individus de même poids. Toutefois il semble bien, lorsqu'on soumet l'ensemble des résultats à une analyse de variance après avoir effectué une transformation logarithmique qui est une opération appropriée pour rendre normale les distributions (Uthe *et al.*, 1981), que les groupes OI(2) ouest Irlande et AC(6) côte cantabrique se séparent d'un ensemble homogène comprenant AN(1) Atlantique Nord, MN(3) mer du Nord et AF(4 et 5) côtes françaises de l'Atlantique, côtes bretonnes et golfe de Gascogne (tabl. 6). Cela apparaît encore quand on considère les résultats pour les mêmes espèces (tabl. 6) d'une part pour les côtes françaises de l'Atlantique (180 individus) et l'ouest de l'Irlande (88 individus) et d'autre part pour les côtes françaises de l'Atlantique (112 individus) et la côte cantabrique (65 individus). Il est donc vraisemblable que les deux niveaux relativement élevés, l'un pour les échantillons prélevés à l'ouest de l'Irlande et l'autre pour les échantillons prélevés près de la côte cantabrique, doivent être imputés aux zones de pêche elles-mêmes.

S'agissant des facteurs liés à l'espèce, le niveau trophique et le poids des individus, ils peuvent apparaître en effectuant une analyse de variance sur l'ensemble homogène vis-à-vis du facteur « zone de pêche », formé par les groupes AN(1), MN(3) et AF(4 et 5). Les teneurs moyennes, qui ont été dans ce cas calculées pour chacune des espèces dont le nombre d'échantillons est supérieur à 6, sont représen-

Tableau 3. — Poissons collectés au cours des années 1971, 1972 et 1973 et leurs caractéristiques.
 Fish collected in years 1971, 1972 and 1973 and their characteristics.

Espèce	Nombre d'individus	Origine (nombre d'individus)				Poids moyen (g)	Longueur moyenne (cm)
		AN	OI	MN	AF	AC	
Requins							
aiguillat <i>Squalus acanthias</i>	12		4		8		71 (58-90)
roussette <i>Scyliorhinus canicula</i>		4		2		2	45 (36-54)
émissole <i>Mustelus asterias</i>	6				2	4	63 (55-70)
Raies							
raies <i>Raja</i> sp.	37	4	6		17	10	42 (20-58)
Poissons osseux							
(Clupeiformes)							
sardine <i>Sardina pilchardus</i>	36				36		18 (14-23)
(Lophiiformes)							
baudroie <i>Lophius piscatorius</i>	18		6		12		33 (21-52)
(Gadiformes)							
merlu <i>Merluccius merluccius</i>	34		6		20	8	50 (36-75)
églefin <i>Melanogrammus aeglefinus</i>	28		17	5	6		43 (36-56)
merlan <i>Merlangius merlangius</i>	56		4	38	14		37 (27-44)
morue <i>Gadus morhua</i>	28	5		23			60 (42-72)
lieu <i>Pollachius</i> sp.	7		6	1			58 (39-71)
lingue <i>Molva molva</i>	14	2	2	2	6	2	105 (76-131)
(Zeiformes)							
saint-Pierre <i>Zeus faber</i>	11		2		7	2	29 (21-38)
(Scorpaeniformes)							
sébaste <i>Sebastes viviparus</i>	11	9		2			26 (17-33)
sébaste chèvre <i>Helicolenus dactylopterus</i>	8					8	24 (27,5-20)
grondin <i>Trigla</i> sp.	43		10	7	18	8	30 (18-38)
(Perciformes)							
chinchard <i>Trachurus trachurus</i>	22		2		14	6	25 (17-32)
dorade <i>Pagellus</i> sp.	35		4		16	16	34 (29-40)
maquereau <i>Scomber scombrus</i>	34		14	3	17		28 (21-29)
(Pleuronectiformes)							
cardine <i>Lepidorhombus whiffiagonis</i>	23		2	1	12	8	31 (26-42)
limande <i>Limanda limanda</i>	30		4	20	6		22 (17-29)
plie <i>Pleuronectes platessa</i>	22			22			28 (22-37)
sole <i>Solea vulgaris</i>	8		3		5		25 (20-32)

AN; Atlantique Nord, OI : ouest Irlande, MN : mer du Nord, AF; Atlantique, côtes françaises, AC : Atlantique, côte cantabrique.

Tableau 4. — Comparaisons des teneurs en mercure ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de matière sèche) obtenues à des exercices d'intercalibration.
Mercury concentrations ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ dry m.) obtained by our laboratory in intercalibration exercises.

Année de l'exercice	Référence et type d'échantillon	Teneurs en mercure les laboratoires participants			Notre laboratoire	Références bibliographiques
		n	m	ds		
1972	ICES farine de poisson	12	0,16	0,05	0,17	Anonyme, 1974
1973	ICES 2/TM/BT farine de poisson	8	0,69	0,07	0,75	Topping, 1975
1975	ICES 3/TM/BT farine de poisson	16	0,88	0,12	0,90	Topping et Holden, 1980
1975	IAEA UNEP/FAO (CGPM) Ma-M-I tissu lyophilisé huître	10	0,22	0,03	0,26	IAEA, 1977

n : nombre de laboratoires participants, m : moyenne, sd : écart-type.

Tableau 5. — Teneurs en mercure total dans tous les échantillons de poissons.

Total mercury contents in all fish samples.

Espèce	Concentration en mercure ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de chair humide)			Moyenne des concentrations (Log)	Code espèce
	n	m	sd		
Requins					
aiguillat	12	0,590	0,451	-0,528	33
roussette	4	0,197	0,051	-1,622	42
émissole	6	0,405	0,235	-0,904	37
Raies					
raies	37	0,189	0,187	-1,666	25
Poissons osseux (Clupéiformes)					
sardine	36	0,055	0,027	-2,895	1
(Lophiiformes)					
baudroie	18	0,115	0,065	-2,163	11
(Gadiformes)					
merlu	34	0,086	0,050	-2,456	6
églefin	28	0,092	0,057	-2,385	5
merlan	56	0,144	0,101	-1,938	22
morue	28	0,069	0,041	-2,675	2
lieu	7	0,188	0,179	-1,609	7
lingue	14	0,148	0,030	-1,912	16
(Zéiformes)					
saint-Pierre	11	0,148	0,219	-1,910	18
(Scorpaeniformes)					
sébaste	19	0,251	0,232	-1,380	20
grondin	43	0,273	0,192	-1,297	23
(Perciformes)					
chinchard	22	0,123	0,090	-2,098	32
dorade	36	0,292	0,239	-1,199	27
maquereau	34	0,117	0,089	-2,143	9
(Pleuronectiformes)					
cardine	23	0,148	0,110	-1,905	19
limande	30	0,093	0,071	-2,323	10
plie	22	0,094	0,043	-2,364	14
sole	8	0,125	0,065	-2,079	26

n : nombre d'échantillons, m : moyenne, sd : écart-type.

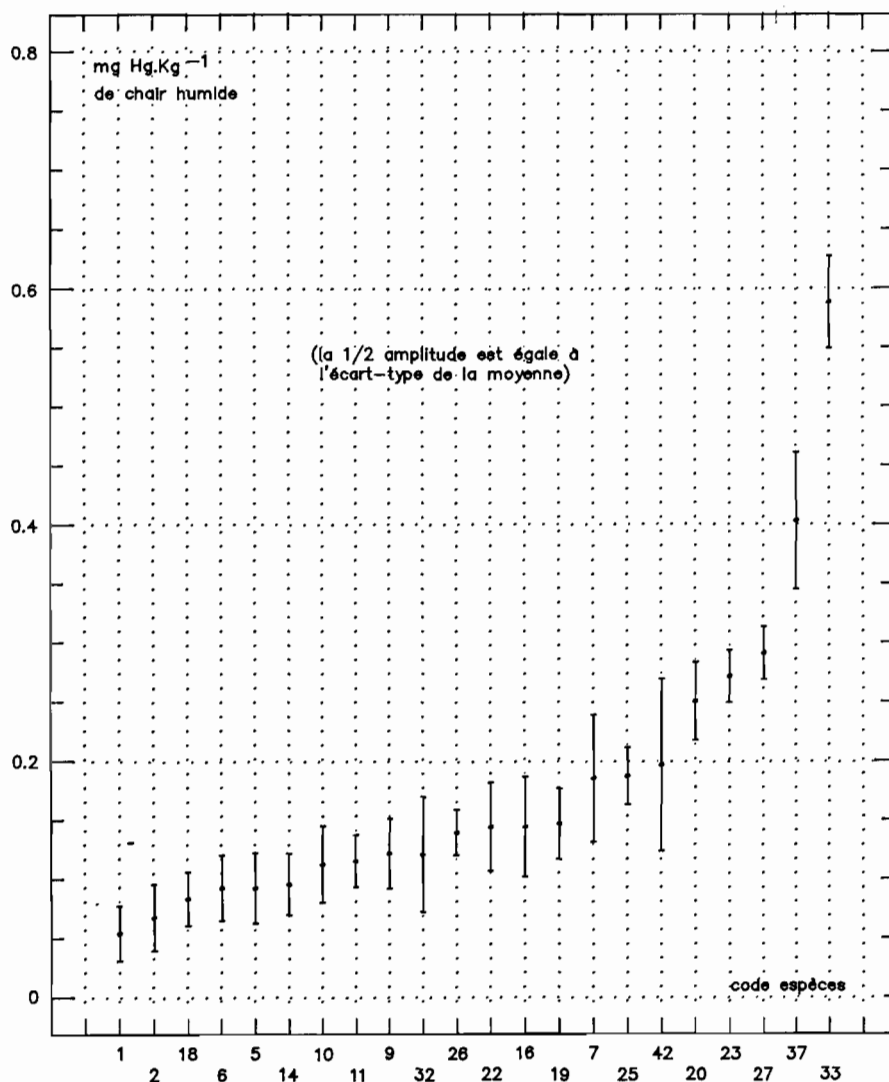


Figure 6. — Teneurs en mercure total dans les différentes espèces de poissons indiquées sur le tableau 5, présentées dans l'ordre croissant des valeurs moyennes.

Total mercury contents in the various fish species shown on table 5, presented in increasing order of mean values.

tées sur le tableau 7 et sur la figure 8. L'augmentation des concentrations est alors liée de toute évidence à la progression des niveaux trophiques et du poids des individus. Ainsi la sardine, un Clupéiforme, petit poisson pélagique dont la nourriture est constituée essentiellement de zooplancton possède des teneurs en mercure plus faibles que le maquereau, un Perciforme se nourrissant d'organismes planctoniques et de petits poissons. Ce dernier possède par contre des teneurs plus faibles que les raies, poissons cartilagineux dont le mode de vie est plus sédimentaire et qui sont des carnassiers se nourrissant de crustacés, de mollusques et de petits poissons (fig. 8).

Un regroupement des espèces qui est basé sur leur biologie, traduisant des similitudes dans leur mode de

vie et donc leur appartenance à des niveaux trophiques, est certainement approprié. Le tableau 8 présente les teneurs qui correspondent au classement habituel des poissons de mer (Quéro, 1984), notamment en Clupéiformes, Gadiformes, Pleuronectiformes, Perciformes, Scorpaeniformes et poissons cartilagineux. Les moyennes sont relativement faibles dans les espèces des premiers groupes, les Clupéiformes et les Gadiformes, plus élevées dans celles des Perciformes et des Scorpaeniformes et nettement élevées dans les poissons cartilagineux.

Données provenant de la littérature

De nombreux résultats d'analyses en mercure total concernant des poissons de mer, sont disponibles dans

Tableau 6. — Analyse de variances des régions multiples (intervalle de confiance 95 %). AF : côtes atlantiques françaises (zone 4 côtes bretonnes, 5 golfe de Gascogne); AC : côte cantabrique (6); AN : Atlantique Nord (1); MN : mer du Nord (3); OI : ouest Irlande (2).

ANOVA, multiple range analysis (95% confidence limits). AF: Atlantic French coast (area 4 Brittany coasts, 5 Bay of Biscay); AC: Cantabria coast (6); AN: North Atlantic (1); MN: North Sea (3); OI: Western Ireland (2).

Zones	Nombre de valeurs	Moyenne (Log)	Groupes homogènes
Tous les échantillons.			
5	81	-2,494 163	* AF
3	125	-2,430 602	* MN
4	136	-2,402 338	* AF
1	20	-2,340 236	** AN
2	94	-2,021 945	* OI
6	72	-1,587 162	* AC
Échantillons des côtes françaises de l'Atlantique (AF) et de l'ouest Irlande (OI) comprenant les espèces pour les deux zones.			
4	180	-2,330 602	* AF
2	88	-2,032 477	* OI
Échantillons des côtes françaises de l'Atlantique (AF) et de la côte cantabrique (AC) comprenant les mêmes espèces pour les deux zones.			
4	112	-2,406 345	* AF
6	64	-1,653 899	* AC

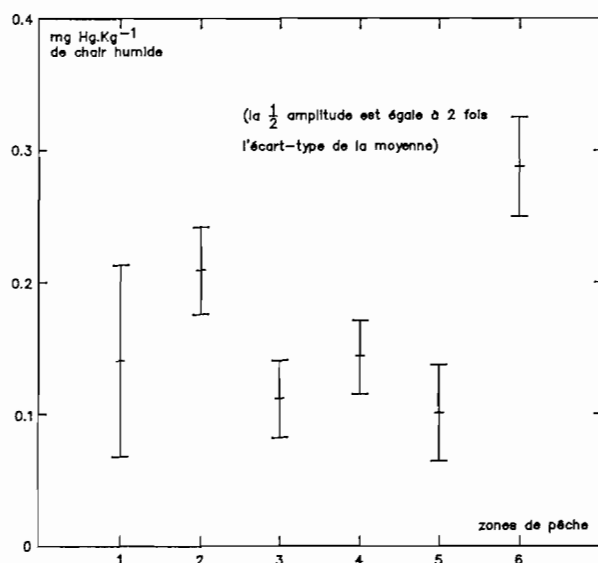


Figure 7. — Teneurs en mercure total dans les échantillons de poissons en fonction de leur origine: 1 : Atlantique Nord, 2 : Ouest Irlande, 3 : mer du Nord, 4 : côtes bretonnes, 5 : golfe de Gascogne, 6 : côte cantabrique.

Total mercury contents in fish samples according to their origin: 1: North Atlantic, 2: Western Ireland, 3: North Sea, 4: Brittany coasts, 5: Bay of Biscay, 6: Cantabria coast.

Tableau 7. — Teneurs en mercure dans les espèces de poissons originaires de l'Atlantique Nord (AN), de la mer du Nord (MN) et des côtes françaises de l'Atlantique (AF).

Mercury contents in fish species from the North Atlantic (AN) North Sea (MN) and French Atlantic coasts (AF).

Espèce	Code	Concentration en mercure (mg.kg ⁻¹ de chair humide)		
		n	m	sd
Requins				
aiguillat	33	8	0,464	0,082
Raies				
raies	25	21	0,200	0,041
Poissons osseux				
(Clupéiformes)				
sardine	1	36	0,055	0,027
(Lophiiformes)				
baudroie	11	12	0,107	0,063
(Gadiformes)				
merlu	6	20	0,063	0,033
églefin	5	11	0,083	0,073
merlan	22	52	0,125	0,066
morue	2	28	0,069	0,041
lingue	16	10	0,135	0,041
(Scorpaeniformes)				
sébaste	20	11	0,114	0,102
grondin	23	25	0,218	0,163
(Perciformes)				
chinchard	32	14	0,094	0,058
dorade	27	16	0,199	0,149
maquereau	9	20	0,124	0,103
(Pleuronectiformes)				
cardine	19	13	0,088	0,036
plie	14	22	0,094	0,043
limande	10	26	0,105	0,073

n : nombre d'échantillons, m : moyenne, sd : écart-type.

la littérature. Le tableau 9 présente des teneurs moyennes de poissons capturés au cours des années 1971 à 1980, en mer Baltique, en mer du Nord, en Manche et dans diverses régions de l'Atlantique. Elles concernent 4797 échantillons et ont été regroupées par espèce quelle que soit la zone de pêche et sans connaître les valeurs individuelles qui auraient permis d'effectuer une analyse de variance. Une représentation graphique de ces teneurs est donnée par la figure 9, sur échelle logarithmique, pour chacune des espèces dans l'ordre croissant de leur moyenne.

Il apparaît alors que les teneurs publiées sont assez similaires aux nôtres (fig. 8 et 10). Les Clupéiformes et les Gadiformes ont en particulier des teneurs relativement faibles, tandis que les Perciformes et les poissons cartilagineux ont des teneurs relativement élevées. Les différences qui apparaissent entre les résultats publiés et nos propres résultats sont vraisemblablement dues à l'échantillonnage; les échantillons ne sont pas constitués dans les deux cas des mêmes espèces, ni d'individus de mêmes poids.

Tous les résultats présentés ci-dessus : ceux que nous avons obtenus (tabl. 8, fig. 8) et ceux de la

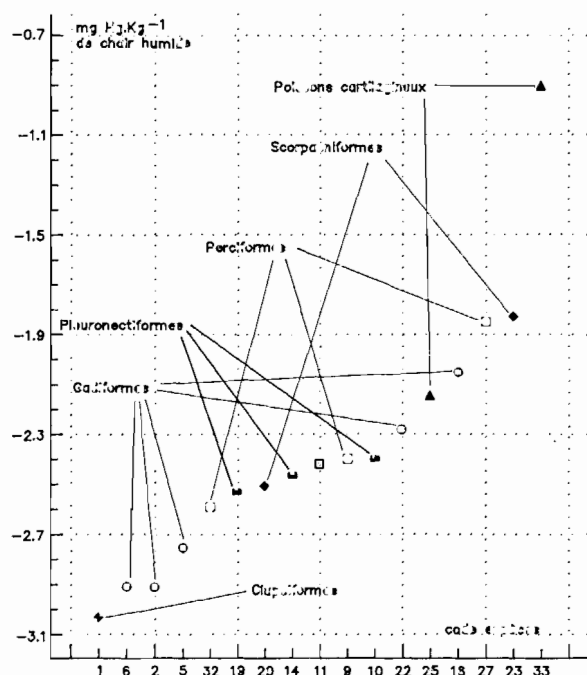


Figure 8. — Teneurs en mercure du tableau 7 présentées sur échelle logarithmique, dans l'ordre croissant des valeurs moyennes et concernant des poissons de l'Atlantique Nord (AN), de la mer du Nord (MN) et des côtes françaises de l'Atlantique (AF).

Mercury contents from table 7 presented on a logarithmic scale, in increasing order of mean values, for fishes from North Atlantic (NA), North Sea (NS) and French Atlantic coasts (FA).

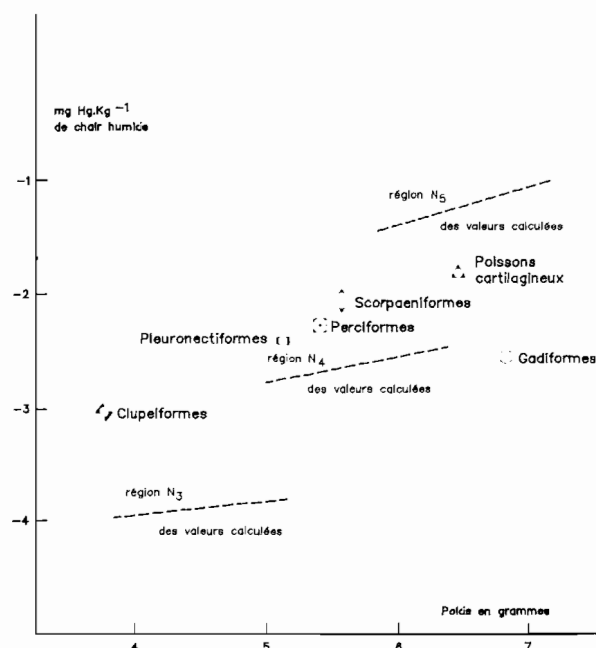


Figure 9. — Corrélation entre les teneurs en mercure de groupes d'espèces et le poids moyen des individus, sur échelles logarithmiques.

Correlation between mercury contents of species groups and average weight of individuals, on logarithmic scales.

Tableau 3. — Teneurs en mercure total par groupes d'espèces.

Total mercury contents in grouped species.

Espèces	Nombre individus		Concentration moyenne (mg.kg ⁻¹ de chair humide)	Poids moyen (g)
	Par espèce	Par groupe d'espèces		
Clupéiformes				
sardine		35	0,055	44,2
Gadiformes				
merlu	20			
morue	28			
élefan	11			
merlan	52			
lingue	10	121	0,039	952,4
Pleuronectiformes				
cardine	13			
plie	22			
limande	25	61	0,097	180,0
Perciformes				
chinchard	14			
maquereau	20			
dorade	16	50	0,140	225,8
Scorpaeniformes				
sébasté	11			
grondin	25	35	0,185	255,3
Poissons cartilagineux				
raies	21			
aiguillat	8	29	0,273	643,5

Tableau 9. — Teneurs en mercure total de poissons pêchés en mer Baltique, en mer du Nord, en Manche et en Atlantique, provenant de la littérature (n : nombre d'échantillons, m : moyenne, sd : écart-type).

Total mercury contents of fishes captured in the Baltic Sea, North Sea, English Channel and Atlantic Ocean, from literature (n: number of samples, m: mean, sd: standard deviation).

Espèce	Code espèce	Date et lieu de pêche	Concentration en mercure (mg. kg ⁻¹ de chair humide)			Références bibliographiques	Nombre total échantillons	Concentration moyenne par espèce
			n	m	sd			
Requins aiguillat <i>Squalus acanthias</i>		1972-1975 mer du Nord côtes du Danemark	9	0,187	(0,19-0,29)	Danish Isotope Centre, 1978		
		1972-1975 Atlantique avant 1932	10	0,254	(0,07-0,64)	Cumont <i>et al.</i> , 1975		
		mer d'Irlande	20	0,64	0,35	Guns <i>et al.</i> , 1985		
		mer Celtique	20	0,25	0,15	Guns <i>et al.</i> , 1985		
		mer du Nord centrale	20	0,26	0,14	Guns <i>et al.</i> , 1975		
	33	mer du Nord méridionale	20	0,57	0,26	Guns <i>et al.</i> , 1975	99	0,390
		1971-1974 Atlantique côtes d'Islande	14	1,60	(1,00-2,90)	Arnesen, 1975		
		1972-1975 mer du Nord côtes du Danemark	13	1,378	0,591	Danish Isotope Centre, 1978		
	40	1972-1975 Atlantique	470	0,647	(0,04-3,94)	Cumont <i>et al.</i> , 1975	497	0,693
		1972-1975 Atlantique	2	0,335	(0,30-0,37)	Cumont <i>et al.</i> , 1975		
rousette <i>Scyliorhinus canicula</i>		avant 1932 mer d'Irlande	20	0,82	0,40	Guns <i>et al.</i> , 1985		
		mer Celtique	20	0,59	0,26	Guns <i>et al.</i> , 1985		
		Manche	20	0,94	0,53	Guns <i>et al.</i> , 1985		
		mer du Nord centrale	20	0,90	0,61	Guns <i>et al.</i> , 1985		
	42	mer du Nord méridionale	20	1,01	0,58	Guns <i>et al.</i> , 1985	102	0,842
	38	1972-1975 Atlantique	149	0,511	(0,09-1,91)	Cumont <i>et al.</i> , 1975	149	0,511
	36	1972-1975 Atlantique	14	0,530	(0,15-1,47)	Cumont <i>et al.</i> , 1975	14	0,530
Raies raies <i>Raja</i> sp.		1972 Atlantique côtes du Canada	10	0,204	(0,12-0,41)	Freeman <i>et al.</i> , 1974		
	22	1972-1975 Atlantique	9	0,388	(0,04-1,40)	Cumont <i>et al.</i> , 1975	19	0,291
Poissons osseux (Apodes) congre <i>Conger conger</i>	30	1972-1975 Atlantique	28	0,315	(0,12-0,45)	Cumont <i>et al.</i> , 1975	28	0,315
		1971-1974 Atlantique côtes d'Islande	12	0,04	(0,03-0,06)	Arnesen, 1975		

Tableau 2 (suite)

sardine <i>Sardina pilchardus</i>	1972 Atlantique côtes du Canada	10	0,09	0,02	Freeman <i>et al.</i> , 1974		
	1972-1975 mer du Nord côtes du Danemark	30	0,04	(0,027-0,052)	Danish Isotope Centre, 1978		
	1972-1975 Atlantique	85	0,091	(0,03-0,22)	Cumont <i>et al.</i> , 1975		
	1975 mer du Nord et Manche	50	0,04	0,02	Vanderstappen <i>et al.</i> , 1978		
	1980 mer Baltique	4	0,02	0,04	May <i>et al.</i> , 1987	191	0,055
	1972 Atlantique côtes d'Espagne golfe de Cadix	7	0,07		Establier, 1973		
	1972-1975 Atlantique	14	0,052	(0,02-0,15)	Cumont <i>et al.</i> , 1975		
	1976 Atlantique Gibraltar	28	0,03	(0,005-0,050)	Stoeppler <i>et al.</i> , 1979	49	0,042
	1972-1975 Atlantique	16	0,059	(0,022-0,055)	Cumont <i>et al.</i> , 1975	16	0,059
	1971-1975 Atlantique côtes d'Islande	170	0,10	(0,04-0,45)	Anesen, 1975		
(Lophiiformes) baudroie <i>Lophius piscatorius</i>	1972-1975 Atlantique	19	0,18	(0,01-0,61)	Cumont <i>et al.</i> , 1975	189	0,103
(Gadiformes) églefin <i>Melanogrammus aeglefinus</i>	1971-1974 Atlantique côtes d'Islande	11	0,05	(0,02-0,07)	Arnesen, 1975		
merlan <i>Merlangius merlangius</i>	1972 Atlantique côtes du Canada	10	0,12	0,04	Freeman <i>et al.</i> , 1974		
	1972-1975 mer du Nord côtes du Danemark	17	0,05	0,05	Danish Isotope Centre, 1978	38	0,055
	1972-1975 Atlantique	17	0,079	(0,03-0,23)	Cumont <i>et al.</i> , 1975		
	1972-1978 mer du Nord et Manche	517	0,19	0,09	Wyncke <i>et al.</i> , 1981		
	1980 mer Baltique	8	0,03	0,01	May <i>et al.</i> , 1987	542	0,184
	1971-1974 Atlantique côtes d'Islande	323	0,020	(0,01-0,11)	Arnesen, 1975		
	1972 Atlantique côtes du Canada	19	0,19	0,05	Freeman <i>et al.</i> , 1974		
	1972 mer du Nord côtes de Norvège	63	0,09	0,01	Clafsen <i>et al.</i> , 1973		
	1971-1974 Atlantique côtes d'Islande	11	0,05	(0,02-0,07)	Arnesen, 1975		
	1972 Atlantique côtes du Canada	10	0,12	0,04	Freeman <i>et al.</i> , 1974		
morue <i>Gadus morhua</i>	1972-1975 mer du Nord côtes du Danemark	17	0,05	0,05	Danish Isotope Centre, 1978	38	0,055

Tableau 9 (suite)

lieu <i>Pollachius</i> sp.		1972-1975 mer du Nord côtes du Danemark	46	0,092	(0,024-0,411)	Danish Isotope Centre, 1978		
		1972-1975 Atlantique	56	0,088	(0,02-0,29)	Cumont <i>et al.</i> , 1975		
		1974-1976 mer Baltique	273	0,041	0,05	Protasowicki, 1980		
		1978-1982 mer du Nord et Manche	80	0,15	0,088	De Clerck <i>et al.</i> , 1984		
	1	1980 mer Baltique	5	0,028	0,04	May <i>et al.</i> , 1987	870	0,056
		1971-1974 Atlantique côtes d'Islande	5	0,05	(0,03-0,07)	Arnesen, 1975		
		1972 Atlantique côtes du Canada	10	0,08	0,03	Freeman <i>et al.</i> , 1974		
		1972-1975 mer du Nord côtes du Danemark	15	0,088	(0,04-0,37)	Danish Isotope Centre, 1978		
	8	1972-1975 Atlantique	14	0,063	(0,02-0,17)	Cumont <i>et al.</i> , 1975	44	0,074
	23	1975-1977 mer du Nord	20	0,17	0,05	De Clerck <i>et al.</i> , 1979	20	0,17
tacaud <i>Trisopterus luscus</i>	18	1972 Atlantique côtes du Canada	10	0,122	(0,09-0,15)	Freeman <i>et al.</i> , 1974	10	0,122
brosme <i>Erosme brosme</i>								
(Atheriniformes) orpie <i>Delone belone</i>	9	1972-1975 mer du Nord côtes du Danemark	41	0,092	(0,019-0,349)	Danish Isotope Centre, 1978	41	0,092
(Scorpaeniformes) sébastie <i>Sebastes marinus</i>		1971-1974 Atlantique côte d'Islande	11	0,06	(0,02-0,38)	Arnesen, 1975		
	15	1972 Atlantique côte du Canada	10	0,13	0,02	Freeman <i>et al.</i> , 1974	21	0,093
grondin <i>Trigla</i> sp.		1972-1975 Atlantique	30	0,129	(0,02-0,37)	Cumont <i>et al.</i> , 1975		
	21	1975-1977 mer du Nord	20	0,11	0,03	De Clerck <i>et al.</i> , 1979	50	0,121
(Perciformes) bar <i>Morone labrax</i>	31	1972-1975 Atlantique	47	0,326	(0,05-1,10)	Cumont <i>et al.</i> , 1975	47	0,326
chinchard <i>Trachurus trachurus</i>		1975-1977 mer du Nord	20	0,73	0,30	De Clerck <i>et al.</i> , 1979		
	28	1977 Atlantique côtes du Sénégal	1	0,13		Gras et Mondain, 1978	21	0,701
dorade <i>Pagellus</i> sp.	25	1972-1975 Atlantique	20	0,166	(0,03-0,39)	Cumont <i>et al.</i> , 1975	20	0,166
rouget barbet <i>Mullus</i> sp.		1972 Atlantique côtes d'Espagne golfe de Cadix	3	0,08		Establier, 1973		

Tableau 9 (suite)

		1972-1975 Atlantique	11	0,13	(0,04-0,37)	Cumont <i>et al.</i> , 1975		
		1975-1977 mer du Nord	20	0,07	0,02	De Clerck <i>et al.</i> , 1979		
	16	1976 Atlantique Gibraltar	10	0,28	(0,05-0,615)	Stoeppler <i>et al.</i> , 1979	44	0,133
mulet <i>Mugil cephalus</i>	26	1972-1975 Atlantique	8	0,202	(0,10-0,30)	Cumont <i>et al.</i> , 1975	8	0,202
maquereau <i>Scomber scombrus</i>		1971-1974 Atlantique côtes d'Islande	4	0,04	(0,02-0,06)	Arnesen, 1975		
		1972 Atlantique côtes d'Espagne golfe de Cadix	3	0,10		Establier, 1973		
		1972 Atlantique côtes du Canada	10	0,084	0,05	Freeman <i>et al.</i> , 1974		
		1972-1975 mer du Nord côtes du Danemark	26	0,079	(0,029-0,303)	Danish Isotope Centre, 1978		
		1972-1975 Atlantique	39	0,081	(0,027-0,26)	Cumont <i>et al.</i> , 1975		
	10	1977 Atlantique côtes du Sénégal	17	0,13	(0,02-0,23)	Gras et Mondain, 1978	99	0,088
thon rouge <i>Thunnus thynnus</i>	37	1972-1975 Atlantique	344	0,47	(0,15-1,15)	Cumont <i>et al.</i> , 1975	344	0,47
albacore <i>Thunnus albacares</i>	32	1972 Atlantique côtes d'Afrique	37	0,33	0,12	Aldrin <i>et al.</i> , 1973	37	0,33
patudo <i>Thunnus obesus</i>	34	1972 Atlantique côtes d'Afrique	32	0,43	0,14	Aldrin <i>et al.</i> , 1973	32	0,43
bonite <i>Sarda sarda</i>	35	1976 Atlantique Gibraltar	10	0,46	(0,18-0,815)	Stoeppler <i>et al.</i> , 1979	10	0,45
espadon <i>Xiphias gladius</i>	41	1972 Atlantique côtes d'Afrique	15	0,78	0,33	Aldrin <i>et al.</i> , 1973	15	0,78
espadon voilier <i>Makaira sp.</i>	39	1977 Atlantique côtes du Sénégal	8	0,67	(0,51-0,80)	Gras Mondain, 1978	8	0,67
loup de l'Atlantique <i>Anarhichas lupus</i>		1971-1974 Atlantique côtes d'Islande	9	0,04	(0,03-0,03)	Arnesen, 1975		
		1972 Atlantique côtes du Canada	6	0,17	0,11	Freeman <i>et al.</i> , 1974		
	13	1972-1975 mer du Nord côtes du Danemark	16	0,167	(0,047-0,538)	Danish Isotope Centre, 1978	31	0,130

TABLEAU 9 (suite)

(Pleuronectiformes)								
flet <i>Platichthys flesus</i>		1972-1975 mer du Nord côtes du Danemark	13	0,071	(0,016-0,15)	Danish Isotope Centre, 1978		
	29	1978-1982 mer du Nord et Manche	80	0,32	0,185	De Clerck <i>et al.</i> , 1984	93	0,285
flétan <i>Hippoglossus hippoglossus</i>		1971-1974 Atlantique côtes d'Islande	17	0,16	(0,03-0,39)	Arnesen, 1975		
		1972 Atlantique côtes du Canada	4	0,20	0,03	Freeman <i>et al.</i> , 1974		
	14	1972-1975 mer du Nord côtes du Danemark	10	0,106	(0,021-0,754)	Danish Isotope Centre, 1978	31	0,148
limande <i>Limanda limanda</i>		1971-1974 Atlantique côtes d'Islande	17	0,09	(0,02-0,43)	Arnesen, 1975		
		1972-1975 mer du Nord côtes du Danemark	7	0,073	0,033	Danish Isotope Centre, 1978		
		1972-1975 Atlantique	4	0,08	(0,06-0,13)	Cumont <i>et al.</i> , 1975		
	11	1972-1975 mer du Nord	20	0,11	0,03	De Clerck <i>et al.</i> , 1979	48	0,095
plie <i>Pleuronectes platessa</i>		1971-1974 Atlantique côtes d'Islande	2	0,02		Arnesen, 1975		
		1972 Atlantique côtes du Canada	2	0,14		Freeman <i>et al.</i> , 1974		
		1972-1975 mer du Nord côtes du Danemark	86	0,048	(0,090-0,133)	Danish Isotope Centre, 1978		
	19	1972-1978 mer du Nord Manche	483	0,15	0,081	Vyncke <i>et al.</i> , 1981	573	0,134
sole <i>Solea solea</i>		1972 Atlantique côtes d'Espagne golfe de Cadix	2	0,065		Establier, 1973		
		1972-1975 Atlantique	20	0,117	(0,02-0,42)	Cumont <i>et al.</i> , 1975		
		1973-1977 mer du Nord						
		1973	125	0,23	0,164			
		1974	50	0,21	0,184			
		1975	50	0,22	0,157			
		1976	50	0,32	0,253			
	27	1977	50	0,29	0,209	Vyncke <i>et al.</i> , 1979	347	0,240

littérature (tabl. 9, fig. 10), sont discutés ci-après en utilisant le modèle qui a été précédemment exposé.

INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

Les considérations théoriques et la modélisation du cheminement des contaminants en milieu marin ont conduit à une expression (4) des facteurs de concentration N_n , organismes marins/eau de mer.

Nous avons calculé les valeurs de ces facteurs N_n , puis ensuite les concentrations correspondantes dans les organismes. Pour cela nous avons utilisé les taux de fixation et d'élimination et les paramètres bioénergétiques et de croissance : k , K , α_i , G_i , r_i , a , ainsi que le facteur de concentration N_{1w} correspondant au 1^{er} compartiment, à la fois pour le mercure inorganique et pour le mercure méthylé, qui sont indiqués sur le tableau 2. Nous avons supposé une concentration en mercure total dans l'eau de mer de 1 ng.L^{-1} dont 5 % serait sous la forme méthylée. Une hypothèse tout à fait raisonnable si l'on se réfère à Cossa *et al.* (1990) qui ont trouvé des teneurs assez comparables en Atlantique Nord et à Mason et Fitzgerald (1990) qui rapportent des concentrations assez voisines de mercure monométhylé dans l'océan Pacifique. Pour ce qui est du nombre des niveaux trophiques nous sommes inspirés des travaux de Ryther (1969) qui semblent bien montrer que les Clupéiformes appartiennent au 3^e niveau ($n=3$), et que les poissons cartilagineux, des carnivores, appartiennent au 5^e niveau ($n=5$).

L'expression du facteur de concentration par exemple pour les Clupéiformes s'écrit :

$$N_3 = N_{3w} + \frac{\alpha_{32} C_{32}}{K'_3} N_{2w} + \frac{\alpha_{32} C_{32} \alpha_{21} C_{21}}{K'_3 K'_2} N_{1w}$$

avec

$$N_{3w} = N_{2w} = \frac{k}{K}, \quad \alpha_{32} = \alpha_{21} = \alpha_i,$$

$$C_{32} = C_{21} = C_i = \frac{G_i + r_i}{a}.$$

Elle conduit, après remplacement des valeurs correspondantes du tableau 2, pour un individu de 50 g, à $N_3 = 10^{5.12}$ pour Hg méthylé et à $N_3 = 10^{4.14}$ pour Hg inorganique, et finalement à une concentration dans le poisson de 0,019 de Hg total dont 0,006 de Hg méthylé en mg Hg.kg^{-1} de poids humide.

Les résultats des calculs sont présentés sur le tableau 10; les teneurs des Clupéiformes au 3^e compartiment, celles des Gadiformes et des Pleuronectiformes au 4^e compartiment et celles des Perciformes et des poissons cartilagineux au 5^e compartiment.

Les valeurs calculées sont alors relativement proches à la fois de celles que nous avons obtenues

(tabl. 7 et 8) et de celles qui proviennent de la littérature (tabl. 9). De plus, il est remarquable que la proportion de mercure méthylé calculée pour les tissus des organismes, en supposant 5 % de mercure méthylé par rapport au mercure total dans l'eau de mer, soit très voisine de celle habituellement rencontrée dans les poissons eux-mêmes (Thibaud, 1990).

La correspondance entre les valeurs calculées et celles qui ont été effectivement obtenues apparaît sur la figure 9 où nous avons délimité les régions de concentrations correspondantes aux valeurs calculées pour la 3^e, 4^e et 5^e compartiment puis ensuite positionné les teneurs moyennes correspondantes aux groupes d'espèces que nous avons collectées.

Ainsi l'effet de chaîne alimentaire se superpose en quelque sorte à l'influence du poids des individus qui a été souvent constatée (Bache *et al.*, 1971; Aldrin *et al.*, 1973; Topping et Graham, 1978; Takeda et Ueda, 1978; Baldi *et al.*, 1978; Thibaud, 1986; Capelli *et al.*, 1987). Ici il est commode de mettre en évidence cet effet particulier en isolant de nos calculs le rapport N/N_w et le coefficient de transfert de transfert $\alpha_i C_i / K'_i$. Pour une espèce appartenant par exemple au 4^e niveau trophique et pesant 800 g, les valeurs de N_4/N_{4w} sont de 28 (Hg inorganique) et 240 (Hg méthylé), beaucoup plus élevées que 1, et les valeurs des facteurs de transfert sont respectivement de 2,30 et de 4,35.

L'observation particulière que le transfert par chaîne alimentaire soit relativement plus élevé pour le mercure méthylé que pour le mercure inorganique et cela pour les espèces des plus hauts niveaux s'accorde très bien avec les résultats obtenus.

Les espèces des groupes Clupéiformes et Gadiformes qui appartiennent aux premiers niveaux, subissent peu l'influence du facteur « poids des individus » (tabl. 10). Leurs teneurs sont comparables entre elles (fig. 8 et 10); elles vont de 0,042 à 0,184 mg.kg^{-1} de chair humide dans les espèces suivantes : hareng, sardine, anchois, merlu, églefin, merlan, morue lieu, lingue, tacaud et brosme. Tandis que les espèces du groupe des Perciformes qui appartiennent à des niveaux trophiques assez élevés et qui subissent beaucoup l'influence du facteur « poids » (tabl. 10), en particulier quand elles comprennent des individus de grande taille comme les thons et les espadons, possèdent des teneurs assez différentes entre elles (fig. 8 et 10) elles sont proches ou éloignées de celles des poissons cartilagineux. Leurs valeurs vont de 0,094 à 0,78 mg.kg^{-1} de chair humide dans les espèces suivantes : bar, chinchard, dorade, rouget-barbet, mulot, maquereau, thon rouge, albacore, patudo, bonite et espadon.

Nous avons d'autre part utilisé le modèle de Thomann (1981) pour simuler des variations de concentration dans l'eau de mer et montrer leur influence sur les concentrations dans les organismes marins. Le tableau 11 donne des résultats de calculs pour des concentrations en eau de mer de 0,75 et de

Tableau 10. — Teneurs en mercure dans des poissons calculées en appliquant le modèle de Thomann et en supposant une concentration en mercure total dans l'eau de mer de $1 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ dont $0,05 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ (5 %) en mercure méthylé (CH_3Hg^+).

Mercury contents in fishes, calculated by applying Thomann model and assuming a total mercury concentration in seawater of $1 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, including $0,05 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ (5%) methylated mercury (CH_3Hg^+).

Compartiment	Poids (g)	Facteur de concentration N_n	Concentration dans les poissons en ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) de poids humide		Proportion Hg méthylé/Hg total dans les poissons	Teneurs rencontrées dans plusieurs groupes d'espèces (tabl. 8)
			Hg méthylé (log)	Hg inorganique (log)		
1		N_1				Phytoplancton
3	50	N_3	5,12	4,14	0,006	Clupéiformes 0,055
	1 000		5,43	4,17	0,013	
	1 000		5,50	4,18	0,016	
4	150	N_3	5,79	4,52	0,031	Gadiformes 0,098
	1 000		6,08	4,55	0,60	
	2 000		6,19	4,56	0,077	
5	250	N_5	6,45	4,90	0,141	Pleuronectiformes 0,097
	1 000		6,70	4,92	0,251	
	2 000		6,88	4,94	0,379	
						Perciformes 0,140
						Scorpaeniformes 0,186
						Poissons cartilagineux 0,273

$1,25 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ de mercure total dont 5 % en Hg méthylé et aussi pour différentes proportions de Hg méthylé/Hg total lorsque la concentration en Hg total est maintenue constante à $1 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$.

L'influence de petites variations dans l'eau de mer est alors évidente, en particulier pour les espèces appartenant au dernier compartiment. Il est notamment remarquable que la proportion de mercure méthylé qui passerait de 5 à 10 % entraînerait une variation de concentration allant de 0,46 à $0,83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de tissu frais dans les poissons cartilagineux. De telles variations pourraient très bien résulter de certaines conditions de milieu, en particulier celles qui favorisent le processus de méthylation-déméthylation qui se déroule à la surface des sédiments.

La bonne concordance entre les concentrations existantes dans l'eau de mer et celles qui ont été effectivement trouvées dans les poissons en utilisant le modèle de Thomann (1981), explique bien désormais pourquoi le facteur de concentration N est particulièrement élevé. Cela tient principalement au fait que les taux de fixation k dans le cas du mercure inorganique (Hg^{2+}) et surtout dans le cas du mercure organique (CH_3Hg^+) sont particulièrement élevés et que les taux d'élimination K dans le cas du mercure inorganique (Hg^{2+}) et surtout dans le cas du mercure organique (CH_3Hg^+) sont particulièrement faibles. Il n'y a pas lieu d'invoquer l'interconversion des formes chimiques du mercure au cours de son transfert à travers les chaînes alimentaires marines.

Les teneurs dans les poissons reflétant en quelque sorte la présence du mercure dans le milieu marin, permettent très bien d'accéder aux concentrations dans l'eau de mer et à la proportion relative des deux

formes chimiques dissoutes : Hg^{2+} et CH_3Hg^+ . Si, en effet, on connaît la concentration en mercure total et la proportion de mercure méthylé dans les poissons ainsi que le poids de ces poissons et le compartiment correspondant à leur niveau trophique, il est commode avec le modèle de Thomann utilisé ici de calculer les facteurs de concentration N_n de Hg^{2+} et de CH_3Hg^+ et partant de là d'obtenir les concentrations de ces deux formes chimiques dans l'eau de mer elle-même. Cela bien entendu pour une zone marine considérée.

Le tableau 12 présente des concentrations en mercure de l'eau de mer calculées à partir des teneurs moyennes trouvées dans les poissons de 3 régions, AF (côtes françaises de l'Atlantique, côtes bretonnes et golfe de Gascogne), OI (ouest Irlande) et AC (côte cantabrique) (tabl. 5 et 6); elles ont été obtenues en supposant que les Clupéiformes, les Gadiformes et les Pleuronectiformes appartenaient au 4^e compartiment et possédaient 65 % de mercure sous la forme méthylée et que les Perciformes et les poissons cartilagineux appartenaient au 5^e compartiment et possédaient 70 % de mercure sous la forme méthylée. Des différences de concentrations relativement importantes chez les poissons correspondent à des différences de concentrations particulièrement faibles dans l'eau de mer elle-même.

Concentration en mercure des poissons de l'Atlantique

Il nous a semblé intéressant de regrouper ensemble les résultats que nous avons obtenus et ceux de la littérature afin de délimiter des niveaux de présence dans les espèces de la Mer du Nord et de l'Atlantique pour les années 1971-1980. Ces niveaux doivent per-

Tableau 11. — Variations de teneurs en mercure total dans les poissons en mg.kg^{-1} de chair humide en fonction de différentes concentrations dans l'eau de mer, puis en fonction de différentes proportions mercure méthylé/mercure total existantes dans l'eau de mer, calculées en appliquant le modèle de Thomann.

Variations in mercury contents in various fishes expressed in mg.kg^{-1} of wet flesh as a function of various concentrations in seawater, and then as a function of various methylated mercury/total mercury ratios existing in seawater, calculated by applying Thomann model.

Teneurs en mercure total dans les poissons									
Compartiment	Poids en g	en fonction des concentrations croissantes dans l'eau de mer en Hg total dont 5 % en Hg méthylé			en fonction de la proportion de Hg méthylé/Hg total en eau de mer et pour une concentration de 1 ng Hg . L ⁻¹				Groupe d'espèces
		0,75 ng . L ⁻¹	1 ng . L ⁻¹	1,25 ng . L ⁻¹	2,5 %	5 %	7,5 %	10 %	
3	50	0,015	(0,019)	0,024	0,016	(0,019)	0,023	0,025	Clupéiformes
	1 000	0,021	(0,027)	0,035	0,021	(0,027)	0,034	0,042	
	2 000	0,023	(0,30)	0,038	0,023	(0,030)	0,038	0,047	
4	150	0,047	(0,062)	0,078	0,047	(0,062)	0,077	0,092	Gadiformes
	1 000	0,070	(0,094)	0,117	0,065	(0,094)	0,123	0,152	Pleuronectiformes
	2 000	0,084	(0,111)	0,140	0,074	(0,111)	0,150	0,188	Perciformes
5	250	0,163	(0,216)	0,270	0,147	(0,216)	0,284	0,353	Scorpaeniformes
	1 000	0,247	(0,330)	0,412	0,206	(0,330)	0,453	0,576	Poissons
	2 000	0,346	(0,462)	0,577	0,275	(0,462)	0,650	0,837	cartilagineux

Tableau 12. — Concentrations en mercure total de l'eau de mer calculées à partir des teneurs trouvées dans les poissons, pour différentes régions marines, en appliquant le modèle de Thomann.

Total mercury concentrations in seawater calculated on the basis of contents found in fishes, for different marine areas, by applying Thomann model.

Régions marines		Concentrations trouvées dans les poissons (mg.kg^{-1} de chair humide)			Concentrations calculées pour l'eau de mer (ng.L^{-1})		
		n	m	sd	m	sd	
Côtes françaises de l'Atlantique	AF	217	0,128	0,138	0,78	0,35	dont 6 % comme CH_3Hg^+
Ouest Irlande	OI	94	0,209	0,249	1,04	0,59	dont 5,6 % comme CH_3Hg^+
Côte cantabrique	AC	72	0,287	0,214	1,25	0,62	dont 5,6 % comme CH_3Hg^+

Il a été supposé que les Clupéiformes, les Gadiformes et les Pleuronectiformes appartenaient au 4^e compartiment et possédaient 65 % de mercure sous la forme méthylée et que les Perciformes et les poissons cartilagineux appartenaient au 5^e compartiment et possédaient 70 % de mercure sous la forme méthylée.

n = nombre d'échantillons, m = moyenne, sd = écart-type.

mettre d'effectuer des comparaisons et donc d'interpréter d'autres valeurs comme par exemple les teneurs d'autres poissons capturés à une autre époque ou dans une autre région.

Les résultats de nos calculs, des teneurs en mg Hg.kg^{-1} de chair humide qui concernent 5162 échantillons et 42 espèces, sont présentés pour chacune des espèces (tabl. 13). Une représentation graphique de ces résultats est aussi donnée sur la figure 11 en respectant l'ordre croissant des valeurs moyennes de chacune des espèces et le numéro d'ordre indiqué sur le tableau 13.

Les espèces des groupes Clupéiformes et Gadiformes appartiennent aux premiers niveaux trophiques; ils ont des valeurs relativement faibles qui sont assez bien localisées, dans la région 0,05 à

0,18 mg.kg^{-1} de chair humide. Les espèces des groupes Pleuronectiformes et Scorpaeniformes occupent un niveau trophique plus élevé; ils ont des teneurs plus élevées qui sont aussi plus dispersées, allant de 0,10 à 0,33 environ, en mg.kg^{-1} de chair humide. Les espèces des groupes Perciformes et poissons cartilagineux appartiennent à des niveaux trophiques élevés; ils ont des teneurs relativement élevées qui sont aussi relativement dispersées, allant de 0,10 à 0,82 environ, en mg.kg^{-1} de chair humide.

L'ensemble des résultats, des teneurs moyennes en mercure de nombreuses espèces, obtenues à partir de nos propres données et de celles de la littérature, s'accorde parfaitement avec le modèle de Thomann utilisé ici. L'interprétation précédemment présentée donne en définitive à ces valeurs toute leur cohérence.

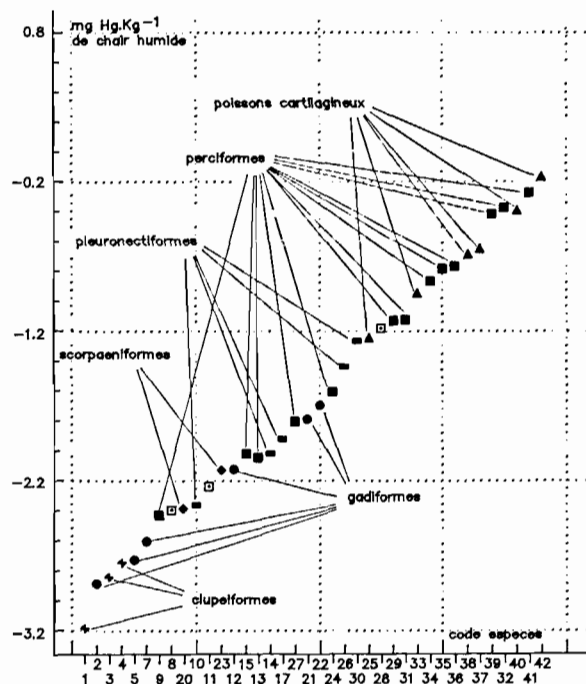


Figure 10. — Teneurs en mercure du tableau 9 représentées sur échelle logarithmique dans l'ordre croissant des valeurs moyennes et concernant des poissons de la mer Baltique, de la mer du Nord, de la Manche et de l'Atlantique.

Mercury contents from table 9 presented on a logarithmic scale in increasing order of mean values for fishes from the Baltic Sea, the North Sea, the English Channel and the Atlantic Ocean.

CONCLUSION

Les résultats des analyses en mercure total obtenus dans notre laboratoire pour des échantillons de poissons pêchés en mer du Nord et dans différentes régions de l'Atlantique de 1971 à 1973 (528 données) ainsi que beaucoup d'autre résultats provenant de la littérature et concernant des échantillons de poissons capturés dans les régions marines comparables de 1971 à 1980 (4 797 données), confirment les conceptions actuellement admises sur le transport du mercure en milieu marin. Ils ont été interprétés en utilisant le modèle de Thomann (1981).

Les teneurs moyennes en mercure total de différentes espèces appartenant à différents niveaux trophiques, quoique très différentes, allant de 0,02 à 0,046 mg Hg.kg⁻¹ de chair humide, deviennent cohérentes entre elles et s'accordent avec la concentration vraisemblable en mercure dissous qui existe dans l'eau de mer elle-même, 1 ng Hg.L⁻¹ dont 5% en Hg méthylé (tabl. 10).

La simulation des concentrations à la fois en mercure inorganique (Hg²⁺) et en mercure organique (CH₃Hg⁺), soit de l'eau de mer, soit des organismes, en utilisant le modèle de Thomann (1981), est particulièrement instructive. Ainsi une légère augmentation

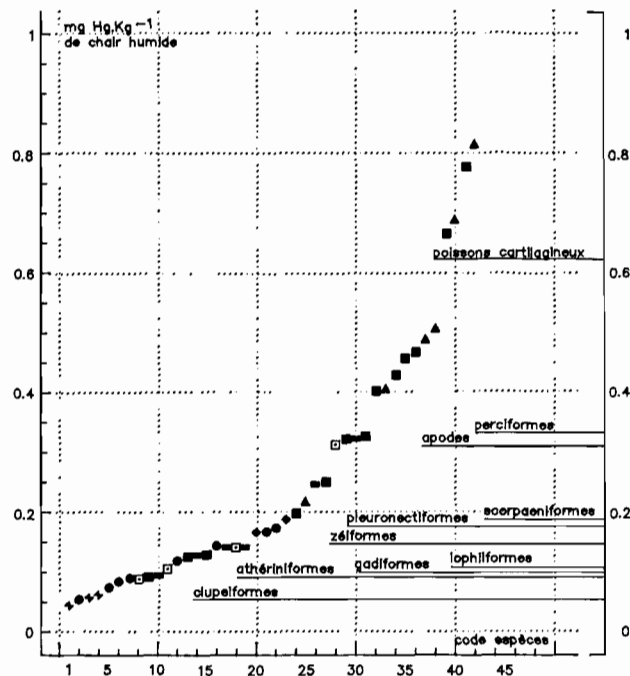


Figure 11. — Teneurs en mercure total de diverses espèces de poissons de la mer du Nord et de l'Atlantique capturés de 1971 à 1980 (tabl. 13) dont les moyennes sont représentatives de niveaux de présence.

Total mercury contents of various fish species from the North Sea and the Atlantic Ocean captured between 1971 and 1980 (table 13), with mean values representative of presence levels.

dans l'eau de mer de la proportion de Hg méthylé/Hg total de 5 à 10% pour 1 ng Hg.L⁻¹, correspond à une augmentation relativement importante des teneurs dans les poissons de niveau trophique élevé, de 0,46 à 0,84 mg Hg.kg⁻² de poids humide (tabl. 11). De même une augmentation des teneurs moyennes dans les poissons, toutes espèces confondues, passant de 0,128 à 0,287 mg Hg.kg⁻¹ de chair humide, correspondant à une augmentation relativement faible des concentrations dans l'eau de mer, de 0,78 à 1,25 ng Hg.L⁻¹ avec 6% environ de Hg méthylé (tabl. 12).

Cela conduit à penser que tout facteur qui influence le processus de méthylation du mercure qui se déroule dans la colonne d'eau et à la surface des sédiments peut entraîner des différences de teneurs dans les poissons relativement importantes. L'influence du facteur « température » sur ce processus, selon l'hypothèse de Bacci (1989), pour expliquer les teneurs relativement élevées constatées dans les poissons de la Méditerranée, semble par là-même tout à fait vraisemblable. Afin de mettre ceci en évidence et compte tenu des résultats récents de Mason et Fitzgerald (1990), les alkyl-mercure devraient être recherchés de préférence dans les zones de faible oxygénation de la Méditerranée, c'est-à-dire autour de 400 m (Packard

Tableau 13. — Teneurs en mercure total de 5162 échantillons de poissons pêchés en mer Baltique, en mer du Nord, en Manche et en Atlantique, de 1971 à 1980, nos résultats et ceux de la littérature, classées dans l'ordre croissant des valeurs moyennes de chacune des espèces (n : nombre d'échantillons).

Total mercury contents of fishes captured in the Baltic Sea, North Sea, English Channel and Atlantic Ocean from 1971 to 1980, showing our results along with published results classified in an increasing order of mean values for each species (n: number of samples).

Espèce	Code	n	Concentration en mercure (mg.kg ⁻¹ de chair humide)		Groupes d'espèces
			moyenne	écart-type de la moyenne (*)	
sardine	1	85	0,047 6	0,004	Clupéiformes
<i>Sardina pilchardus</i>					
morue	2	898	0,056 3	0,008	Gadiformes
<i>Gadus morhua</i>					
anchois	3	16	0,059 0		Clupéiformes
<i>Engraulis encrasicolus</i>					
hareng	4	191	0,064 9		Clupéiformes
<i>Clupea harengus</i>					
églefin	5	49	0,077 3	0,011	Gadiformes
<i>Melanogrammus aeglefinus</i>					
merlu	6	34	0,085 8	0,007	Gadiformes
<i>Merluccius merluccius</i>					
lieu	7	45	0,091 3	0,009	Gadiformes
<i>Pollachius</i> sp.					
orphie	8	41	0,092 2		Athériniformes
<i>Eelone belone</i>					
maquereau	9	119	0,095 6	0,013	Perciformes
<i>Scomber scombrus</i>					
limande	10	74	0,097 8	0,013	Pleuronectiformes
<i>Limanda limanda</i>					
baudroie	11	201	0,103 6	0,015	Lophiiformes
<i>Lophius piscatorius</i>					
brosme	12	10	0,122 0		Gadiformes
<i>Erosme brosme</i>					
loup de l'Atlantique	13	31	0,130 4		Perciformes
<i>Anarhichas lupus</i>					
plie	14	595	0,132 7	0,009	Pleuronectiformes
<i>Pleuronectes platessa</i>					
rouget barbet	15	44	0,133 4		Perciformes
<i>Mullus</i> sp.					
lingue	16	10	0,147 8	0,013	Gadiformes
<i>Molva molva</i>					
flétan	17	31	0,147 9		Pleuronectiformes
<i>Hippoglossus hippoglossus</i>					
saint-Pierre	18	7	0,143 1	0,012	Zéiformes
<i>Zeus fater</i>					
cardine	19	13	0,143 6	0,010	Pleuronectiformes
<i>Lepidionomus whiffiagonis</i>					
sébaste	20	32	0,163 4	0,031	Scorpaeniformes
<i>Sebastes viviparus</i>					
taccaud	21	20	0,170 0		Gadiformes
<i>Trisopterus luscus</i>					
merlan	22	594	0,179 8	0,009	Gadiformes
<i>Merlangius merlangius</i>					
grondin	23	75	0,191 6	0,029	Scorpaeniformes
<i>Trigla</i> sp.					
mulet	24	8	0,202 0		Perciformes
<i>Mugil cephalus</i>					
raies	25	40	0,223 6	0,027	poissons cartilagineux
<i>Raja</i> sp.					
sole	26	355	0,251 8	0,023	Pleuronectiformes
<i>Solea solea</i>					
dorade	27	45	0,252 9	0,037	Perciformes
<i>Pagellus</i> sp.					
congre	28	23	0,315		Apodes
<i>Conger conger</i>					

Tableau 13 (suite)

bar	29	47	0,326		Perciformes
<i>Morone labrax</i>					
flet	30	93	0,326 7		Pleuronectoformes
<i>Platichthys flesus</i>					
albacore	31	37	0,330 0		Perciformes
<i>Thunnus albacares</i>					
chinchard	32	35	0,400 6	0,015	Perciformes
<i>Trachurus trachurus</i>					
aiguillat	33	107	0,411 6	0,101	poissons cartilagineux
<i>Squalus acanthias</i>					
patudo	34	32	0,430 0		Perciformes
<i>Thunnus obesus</i>					
bonite	35	10	0,460 0		Perciformes
<i>Sarda sarda</i>					
thon rouge	36	344	0,470 0		Perciformes
<i>Thunnus thynnus</i>					
émissole	37	16	0,492 5	0,015	poissons cartilagineux
<i>Mustelus</i>					
requin hô	38	149	0,511 0		poissons cartilagineux
<i>Galeorhinus galeus</i>					
espadon voilier	39	8	0,670 0		Perciformes
<i>Makaira</i> sp.					
requin taupe	40	497	0,692 9		poissons cartilagineux
<i>Lamna</i> sp.					
espadon	41	15	0,780 0		Perciformes
<i>Xiphias gladius</i>					
roussette	42	104	0,817 4	0,025	poissons cartilagineux
<i>Scyliorhinus canicula</i>					

* valeur calculée à partir de nos propres résultats.

et al., 1988) où Cossa et Martin (1991) ont montré un maximum dans la distribution verticale du mercure total.

Il ressort d'autre part de nos propres résultats en particulier, que deux zones de l'Atlantique, l'ouest de l'Irlande et la côte cantabrique, présentent des niveaux en mercure légèrement plus élevés que celui des autres zones regroupées ensemble, l'Atlantique Nord, la mer du Nord et les côtes françaises de l'Atlantique.

Au terme de ce travail, les teneurs moyennes en mercure total d'une quarantaine d'espèces de poissons de la mer du Nord et de l'Atlantique pêchés entre 1971 et 1980, (tabl. 13 et fig. 11) sont proposées comme concentrations de référence. Elles doivent permettre d'interpréter d'autres valeurs, comme par exemple les teneurs d'autres poissons capturés à une autre époque ou dans d'autres régions.

RÉFÉRENCES

- Aldrin J. F., P. Lemaître, A. Fonteneau, 1973. Teneur en mercure du Thon Albacore (*Thunnus albacares*). *Rev. Méd. Vét.*, **149**, 779-792.
- Anonyme, 1974. Report of the Working Group for the International Study of the Pollution of the North Sea and its Effects on Living Resources and their Exploitation, *Int. Coun. Explor. Sea, Coop. Res. Rep.*, **39**, 91.
- Arnesen G., 1975. Mercury and other trace metals in Icelandic seafoods. 6 th WEFTA-meeting, 8-10 Sept. Ostende, Belgium.
- Aston S. R., S. W. Fowler, 1985. Mercury in the open Mediterranean: evidence of contamination? *Sci. Total Environ.*, **43**, 13-26.
- Bacci E., 1989. Mercury in the Mediterranean. *Mar. Poll. Bull.*, **20**, 59-63.
- Bache C. A., W. H. Gutenmann, D. J. Lisk, 1971. Residues of Total Mercury and Methylmercuric Salts in Lake Trout as a Function of Age. *Science*, **172**, 951-952.
- Baldi F., Renzoni, M. Bernhard 1978. Mercury concentrations in pelagic fishes (anchovy, mackerel and sardine) from the Italian coast and Strait of Gibraltar. *J. Étud. Poll. CIESM, Antalya*, 251-254.
- Barber M. C., L. A. Suarez, R. R. Lassiter 1991. Modelling Bioaccumulation of Organic Pollutants in Fish with an Application to PCBs in Lake Ontario Salmonids. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **48**, 318-337.
- Buffoni G., M. Bernhard, A. Ranzoni, 1982. Mercury in the Mediterranean tuna. Why is their level higher than in Atlantic tuna? A model. *Thalassia Jugoslavia*, **18**, 231-243.
- Capelli R., V. Minganti, M. Bernhard, 1987. Total mercury, organic mercury, copper, manganese, selenium and zinc in *Sarda sarda* from the Gulf of Genoa. *Sci. Total Environ.*, **63**, 83-89.
- Cossa D., 1990. Biogéochimie, 11-52. In : Le mercure en milieu marin, biogéochimie et écotoxicologie. Cossa, D., Y. Thibaud, M. Roméo et M. Gnassia-Barelli, *Rapp. scient. techn. IFREMER*, **19**, 130 p.
- Cossa D., J. M. Martin, 1990. Mercury in the Rhone estuary and the Gulf of Lions. International Conference

- on Mercury as an Environmental Pollutant, 5, 11-13 June, Gävle Sweden.
- Cumont G., G. Gilles, F. Bernard, M. B. Briand, G. Stephan, G. Ramonda, G. Guillou, 1975, Bilan de la contamination des poissons de mer par le mercure. *Ann. Hyg. L. Fr. — Méd. et Nutr.*, **11**, 17-25.
- Danish Isotope Centre, 1978. Mercury in fish 1972-75. In: Danish Marine Monitoring, Methods and Data, Part V. National Agency of Environmental Protection, Copenhagen (DK), 51 p.
- De Clerck, R., R. Vanderstappen, W. Wyncke, P. Van Hoeyweghen, 1979. La teneur en métaux lourds dans les organismes marins provenant de la capture accessoire de la pêche côtière belge. *Rev. Agricult.*, **32**, 793-801.
- De Clerck R., M. Guns, W. Vyncke, P. Van Hoeyweghen, 1984. La teneur en métaux lourds dans le cabillaud, le flet et la crevette des eaux côtières belges. *Rev. Agricult.*, **37**, 1079-1086.
- Duvigneaud P., 1974. La synthèse écologique. Doin, Paris, 296 p.
- Establier R., 1973. New data on the mercury contents in fish, shell-fish and crustaceans of west African coast and Gulf of Cadiz. *Inv. Pesq.*, **37**, 107-114.
- Fagerstrom T., 1977. Body weight, metabolic rate and trace substance turnover in animals. *Oecologia (Berl.)*, **29**, 99-104.
- Fowler S. W., 1985, Heavy metal and radionuclide transfer and transport by marine organisms. Symp. Biologica Hungarica, **29**, 191-206.
- Freeman H. C., D. A. Horne, B. McTague, M. McMenemy, 1974. Mercury in some Canadian atlantic coast fish and shellfish. *J. Fish. Res. Board Can.*, **31**, 369-372.
- Gras G., J. Mondain, 1978. Teneur en mercure de quelques espèces de poissons pêchés sur les côtes du Sénégal. *Rev. Int. Océanogr. Méd.*, **51-52**, 83-88.
- Guns M., W. Vyncke, R. De Clerck, R. Moermans, 1985. Teneurs en mercure des roussettes et des aiguillats provenant des lieux de capture de la pêche maritime belge. *Rev. Agricult.*, **38**, 253-259.
- IAEA, 1977. Progress Report on Intercalibration measurements for pilot projects under the coordinated Pollution Monitoring and Research Programmes. Mid-Term consultation of the Joint FAO(GFCM)/UNEP coordinated Project on Pollution in the Mediterranean, 2-13 May, Dubrovnik.
- Kägi J. H. R., H. J. Hapke, 1984, Biochemical interactions of Mercury, cadmium and lead, 237-250. In: Changing metal cycles and human health. Nriagu J. O. ed., Springer-Verlag, Berlin. 445 p.
- Kurmae A., A. Swensson, U. Ulfvarson, G. Westoo 1969, Methylmercury compounds in eggs from hens after oral administration of mercury compounds. *J. Agr. Food Chem.*, **17**, 1014-1017.
- Mason R. P., W. F. Fitzgerald, 1990, Alkylmercury species in the equatorial Pacific. *Nature*, **347**, 457-459.
- May K., M. Stoeppler, K. Reisinger, 1987. Studies in the Ratio total Mercury/Methylmercury in the Aquatic Food Chain. *Toxicol. Environ. Chem.*, **13**, 153-159.
- Moore M. N., 1981. Elemental accumulation in organisms and food chains, 535-569. In: Analysis of marine ecosystems. Longhurst A. R. ed., Academic Press, London. 741 p.
- Norstrom R. J., A. E. McKinnon, A. S. W. Defreitas, 1979. A bioenergetics-based model for pollutant accumulation by fish. Simulation of PCB and Methylmercury residue levels in Ottawa River yellow perch (*Perca flavescens*). *J. Fish. Res. Board Can.*, **33**, 248-267.
- Olafsen J. A., N. Losnegard, K. Bakken, 1973. Analyse av kvikksolv i skrei og vartorsk ved flammelos atomabsorpsjon. *Rep. Technol. Res. Norwegian Fish Industry*, **5**, 9-13.
- Packard T. T., H. J. Minas, B. Coste, R. Martinez, M. C. Bonin, J. Gostan, P. Garfield, J. Christensen, Q. Dorth, M. Ninas, G. Copin-Montegut, C. Copin-Montegut, 1988. Formation of the Alboran oxygen minimum zone. *Deep-Sea Res.*, **35**, 111-1118.
- Penthrath R. J., 1976 a. The accumulation of inorganic mercury from sea water by the plaice, *Pleuronectes platessa* L. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **24**, 103-109.
- Penthrath R. J., 1976 b. The accumulation of inorganic mercury from sea water by the plaice, *Pleuronectes platessa* L. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **24**, 121-132.
- Protasowicki M., 1980. Mercury content in commercial fish species caught by Polish vessels over 1974-1976. *Zeszyty naukowe akademii rolniczej w szczecinie*, **82**, 183-199.
- Quéro J. C., 1984. Les poissons de mer des pêches françaises. Granger J. ed., Paris, 394 p.
- Ryther J. H., 1969. Photosynthesis and Fish Production in the Sea. *Science*, **166**, 72-76.
- Stock A., F. Cucuel, 1934. Aufnahme und Verteilung des Quecksilbers im organismus. *Angew. Chemie*, **47**, 801-806.
- Stoeppler M., M. Bernhard, F. Backhaus, E. Schulte, 1979, Comparative studies on trace metal levels in marine biota-I. Mercury in marine organisms from western Italian coast, The Strait of Gibraltar and the North Sea. *Sci. Total Environ.*, **13**, 209-223.
- Takeda M., T. Ueda 1978. On mercury and selenium in tuna fish tissues — VI. mercury level in liver and spleen of tuna and marlin from east Indian Ocean. *J. Shimono-seki Univ. Fish.*, **26**, 251-279.
- Thibaud Y., 1971. Teneurs en mercure dans quelques poissons de consommation courante. *Science et Pêche, Bull. Inst. Pêches marit.*, **209**, 1-10.
- Thibaud Y., 1978. Présence simultanée de mercure et de sélénium chez le dauphin *Stenella coeruleoalba* et le thon *Thunnus thynnus* de Méditerranée. *Journ. Etud. Pollut. CIESM, Antalya*, 193-196.
- Thibaud Y., 1986. The role of biochemical processes in the accumulation of mercury by marine organisms. In: The biochemical cycle of mercury in the Mediterranean. FAO Fish. Rep. 325 (FIRI/R 325 Suppl.).
- Thibaud Y., 1990, Bioaccumulation, 53-83. In: Le mercure en milieu marin, biogéochimie et écotoxicologie. Cossa, D., Y. Thibaud, M. Roméo et M. Gnassia-Barelli, *Rapp. scient. techn. IFREMER*, **19**, 130 p.
- Thibaud Y., J. Noël, 1991. Évaluation des teneurs en mercure, méthylmercure en sélénium dans les poissons et coquillages des côtes françaises de la Méditerranée. In: PNUE/FAO : Rapports finaux sur les projets de

- recherche traitant du mercure, de la toxicité et des techniques analytiques. MAP Techn. Rep. Ser., 51. UNEP, Athens.
- Thoman R. V., 1981. Equilibrium model of fate of micro-contaminants in diverse aquatic food chains. *Can. J. Aquat. Sci.*, **33**, 280-296.
- Topping G., 1975. A appraisal of the 1973 ICES trace metal intercalibration exercise, Int. Counc. Explor. Sea, C.M. 1975/E, 36.
- Topping G., W. C. Graham, 1878. Mercury levels un ling (*Molva molva*), dogfish (*Squalus acanthias*) and blue whiting (*Micromesistius poutassou*) in relation to age, length, weight and sampling area. Int. Counc. Explor. Sea, Mar. C.M. 1978/E, 34.
- Topping G., A. V. Holden, 1980. Report on intercalibration analyses in ICES North Sea and North Atlantic Baselines Studies, *Int. Counc. Explor. Sea, Coop. Res. Rep.*, **53**, 53 p.
- Utne J. F., C. L. Chou, D. P. Scott, 1981, The State of art of environmental pollution level monitoring using resident biota populations. Meeting of ICES Working Group on marine chemistry, 23-26 February, Nantes.
- Vanderstappen R., R. De Clerck, W. Vyncke, R. Moersman, 1978. Les teneurs en mercure, zinc, cuivre, plomb et cadmium dans le hareng. *Rev. Agricult.*, **31**, 331-336.
- Viarengo A., 1985. Biochemical effects of trace metals. *Mar. Poll. Bull.*, **15**, 153-158.
- Vyncke W., R. Vanderstappen, R. De Clerck, R. Moermans, P. Van Hoeyweghen, 1979. L'évolution de la teneur en mercure dans les soles pêchées en mer du Nord et en mer d'Irlande. *Rev. Agricult.*, **32**, 955-964.
- Vyncke W., R. Vanderstappen, R. De Clerck, R. Moermans, P. Van Hoeyweghen, 1981, L'évolution de la teneur en métaux lourds dans la plie, le merlan, le sprat et les crevettes pêchés dans les eaux côtières belges. *Rev. Agricult.*, **34**, 1351-1365.