



ACTION DES POLLUANTS SUR LES ORGANISMES

ET LES PEUPELEMENTS MARINS

-:-

Un document traitant de la pollution bactérienne sera diffusé ultérieurement.

INSTITUT SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

DES PECHES MARITIMES

1977

ACTION DES POLLUANTS SUR LES ORGANISMES

ET LES PEUPEMENTS MARINS

F. SOUDAN

ACTION DES POLLUANTS SUR LES ORGANISMES
ET LES PEUPEMENTS MARINS

-:-

— Polluer la mer paraît un comble lorsqu'on a en esprit l'immensité de la mer et l'énormité des volumes d'eau qui la constitue. Cependant des observations irréfutables montrent qu'en de nombreux endroits le milieu marin a subi, ou subit encore, des modifications qui changent les équilibres physiques aussi bien que les équilibres vitaux. Or l'homme conçoit qu'en pareille matière, les changements peuvent avoir des conséquences démesurées, allant parfois jusqu'à menacer sa vie et il s'inquiète. —

Des recherches très actives ont donc été entreprises au cours des 15 dernières années dans les pays ayant une tradition maritime, en particulier en Europe, au Canada, aux Etats-Unis et au Japon, afin d'étudier les conséquences des pollutions sur les organismes marins.

Ces études sont soit des campagnes d'observations ou des enquêtes, soit des expérimentations montées en laboratoire ou in situ. Elles ont apporté quelques réponses aux questions qui se posaient avec le plus d'acuité. Beaucoup reste à faire.

Avant d'aborder les effets des polluants sur les organismes marins, il est bon de rappeler quelques notions sur l'hydrologie et sur les peuplements marins.

PARTICULARITES DU MILIEU MARIN

1/ Le milieu marin est hétérogène

Cette hétérogénéité tient à son immensité même. On y observe des différences de température selon les latitudes et le relief sous-marin, des différences de salinité selon l'évaporation ou les apports d'eau douce dus aux fleuves et aux pluies. De ce fait, la mer est constituée par des masses d'eau juxtaposées ayant des caractéristiques différentes qui se déplacent sans cesse les unes par rapport aux autres sous l'impulsion des vents et de la rotation de la terre, en se mélangeant fort peu.

Ces phénomènes sont bien connus lorsqu'il s'agit de grands courants océaniques : Gulf-stream, Kouro-shivo, courant de Humboldt, mais ils se manifestent à plus petite échelle chaque fois que des différences de température, de salinité ou de pression s'établissent dans des masses d'eau voisines.

Un cas particulièrement intéressant est celui des côtes plates bordées d'un plateau sous-marin relativement étroit et peu profond où se constituent à la saison chaude des nappes chaudes nettement différenciées de celles qui sont en profondeur au large qui demeurent froides. Une frange intermédiaire entre ces deux types d'eau, dite "thermocline", s'installe ainsi chaque été selon un profil dont l'allure dépend du climat général de l'année.

Les flux d'eau douce provenant des fleuves, moins denses et généralement plus chauds que la mer, sont autant de cause d'hétérogénéité dans la zone littorale. Ils restent individualisés sur des distances parfois considérables. Ainsi la Rance (débit moyen 5,6 m³/sec) se manifeste encore aux abords du Cap Fréhel, la Loire en face Concarneau, le Rhône au niveau du Cap Creuz (fig. 1)

Un fleuve d'apparence modeste comme l'Adour, mais qui a en fait un débit moyen comparable à celui de la Seine, (débit moyen de l'estuaire 360 m³/sec), affecte l'hydrologie de tout le fond du golfe de Gascogne.

On pourrait imaginer que là où elles existent les marées assurent un brassage suffisant pour homogénéiser le milieu, mais il n'en est rien : les masses d'eau glissent les unes sur les autres dans un mouvement horizontal, tandis que les mouvements verticaux sont fort limités.

Des études récentes faites en zone littorale avec des traceurs colorés ou marqués par éléments radioactifs de courte période (Gironde, Baie de Seine) montrent qu'un rejet se dilue dans le milieu mais diffuse peu.

2/ Le milieu marin est variable

Les courants qui s'établissent par apport d'eau douce sont variables dans l'espace et le temps, c'est presque une évidence puisque le débit des fleuves varie parfois considérablement suivant les saisons (en Loire le débit passe de 89 m³/sec. à + de 1 000 m³/sec à Montjean). Aux variations de débit s'ajoutent des différences d'orientation car ces eaux légères sont sous l'emprise du vent, de sorte que dans une baie elles peuvent fort bien être complètement déportées d'une rive à l'autre suivant les conditions de débit, de marée et de vent du moment.

Ces variations s'étendent bien au-delà de ce que l'on imaginerait à première vue, comme le montre l'étude hydrologique détaillée de la région comprise entre l'île de Ré et la côte Vendéenne (fig. 2a, b, c, d, e). Les mesures de température et de salinité faites mensuellement montrent que les eaux de surface s'étendent tantôt au nord-ouest vers le pertuis Breton, tantôt au sud vers le pertuis d'Antioche, bien que le pertuis Breton soit constamment plus salé que le pertuis d'Antioche qui est soumis à l'influence de la Gironde. On remarquera qu'un gradient de quelques décigrammes de sel par litre suffit à différencier des masses d'eau qui restent distinctes.

Si donc, un volume notable d'eau douce polluée était rejeté dans cette région, il s'étendrait plus ou moins largement, suivant les caractéristiques momentanées du milieu et en tout cas atteindrait successivement, au cours des saisons, environ les 3/4 du littoral de la baie. Notons qu'il s'agit là cependant d'une sorte de bassin ne recevant aucun fleuve. La situation serait plus compliquée s'il recevait directement un apport notable d'eau douce.

La situation est particulièrement complexe dans les estuaires où s'affrontent un flux d'eau douce à débit variable, et la marée dont l'amplitude varie également dans un large intervalle.

La résultante des forces en présence donne lieu à des courants variables en intensité et en direction au cours du temps. Ordinairement, le chenal du flot diffère du chenal du jusant, et les vitesses de courant y sont différentes tant au flot qu'au jusant.

Les phénomènes sont sous la dépendance d'un nombre de facteurs tels qu'ils ne peuvent être connus que par l'observation dans chaque cas particulier. Mais quelles que soient les modalités particulières, il y a toujours une sorte de balancement des eaux dans l'estuaire.

En dehors des périodes de crue, où le débit d'eau douce est parfois si fort qu'il contient la marée hors de l'estuaire, chaque marée apporte un certain volume d'eau salée qui pénètre par le fond. Au jusant, les forces du jusant et des eaux fluviales se conjuguent, le volume d'eau écoulé est largement supérieur à celui qui est entré. Mais, lorsque la marée se renverse, la force du flot excède celle du fleuve et la marée montante refoule dans l'estuaire une partie des eaux qui viennent d'en sortir. Ainsi se constitue à l'embouchure une sorte de bouchon d'eau saumâtre, dont le volume varie selon les forces en présence, et qui abandonne à chaque marée une partie de sa substance. Ceci s'effectue par un mouvement alternatif imprimé aux molécules constitutives. Ainsi, en Loire, BERTHOIS a pu montrer que les molécules d'eau du "bouchon" décrivent à chaque marée 17 500 m pour parcourir 3 900 m.

Le mouvement de va et vient affecte l'estuaire souvent sur plusieurs dizaines de kilomètres. En Loire par exemple, on estime qu'une molécule d'eau met près de 15 jours pour parcourir les 55 kilomètres qui séparent Nantes de Saint-Nazaire.

L'ensemble des phénomènes que nous venons d'évoquer concoure à maintenir les flux polluants dans la zone littorale pendant un temps bien plus long que ne le laisserait supposer leur débit et démultiplie leur action biologique potentielle.

DIVERSITE DES PEUPEMENTS

Personne n'ignore que le milieu aquatique est peuplé par des représentants du règne végétal aussi bien que du règne animal, que celui-ci, de loin le plus riche, comprend des mammifères, des poissons et une profusion d'invertébrés : crustacés, mollusques, et autres dont quelques uns ne sont pas même identifiés à l'heure présente. Tous ces organismes vivent en communauté, dont la composition et la densité varient selon l'habitat. Chacun a son régime alimentaire propre, son mode de reproduction, ses habitudes de vie qui l'exposent plus ou moins à l'action des polluants.

La densité et la diversité de peuplement sont d'ordinaire concomitantes, car elles dépendent de la capacité du milieu à produire la nourriture.

Un milieu riche en sels nutritifs suscite une croissance luxuriante de phytoplancton, d'algues libres ou fixées, ou d'herbes marines. La présence des végétaux permet aux populations végétariennes tels que mollusques filtreurs ou gastéropodes de se développer. Ces populations servent à leur tour de nourriture à d'autres. D'où l'interdépendance des espèces constituant ce qu'on appelle une biocénose. Une espèce peut disparaître parce que celle qui était sa nourriture préférée a disparu. Ainsi observe-t-on que l'huître s'engraisse mal si les algues monocellulaires, dont elle se nourrit, n'ont pas les caractéristiques et l'abondance nécessaires dans le milieu. Inversement, une espèce se multiplie à l'excès parce que son prédateur habituel n'existe plus. Ainsi, les algues ont plusieurs fois envahi les fonds littoraux à la suite d'un affilage de pétrole qui a fait succomber les bigorneaux, les ormeaux ou d'autres gastéropodes herbivores. Ces exemples vécus laissent penser que la destruction d'un animal inconnu, par exemple dans la faune sessile, c'est-à-dire parmi les organismes fouisseurs qui vivent dans la couche superficielle des sédiments est préjudiciable à l'équilibre du milieu, même si on ne sait pas précisément dans quelle chaîne biologique s'insère l'organisme détruit.

D'une manière générale, la densité de peuplement est plus élevée sur le littoral qu'en haute mer.

En effet, la photosynthèse qui est un phénomène capital de la vie puisqu'il produit des molécules organiques comme les glucides en partant du gaz carbonique de l'air et de l'eau, est sous la dépendance étroite du rayonnement lumineux. Or, les radiations actives ne pénètrent guère au-delà de 50 m dans la mer. La productivité primaire est donc concentrée dans la couche superficielle de l'eau qui est riche en O_2 et parfaitement éclairée. Déjà au-delà du premier demi-mètre, on constate une diminution marquée de la photosynthèse. Il s'ensuit que le plateau continental qui s'enfonce en pente douce sous la mer, tout au long de notre côte atlantique, est bien plus riche que le littoral bordant la Côte d'azur où le continent s'enfonce à pic dans la Méditerranée.

De plus, les eaux littorales sont normalement relativement riches en sels nutritifs qui sont nécessaires au développement des végétaux. Elles sont donc nettement plus peuplées que la haute mer.

La productivité est particulièrement élevée dans les mers qui reçoivent de grands fleuves drainant un vaste bassin. Ainsi le sud de la Mer du Nord qui reçoit la Lys, l'Escaut, la Meuse, le Rhin et la Tamise est une région de très haute productivité tandis que la Méditerranée orientale, qui ne reçoit aucun fleuve de quelque importance en dehors du Nil dont les eaux sont maintenant retenues, est une mer pauvre. A titre indicatif, la production de matières organiques vivantes par photosynthèse atteint 3 g/m²/j en zone littorale contre 0,5 g en moyenne dans les océans. Ces rendements sont comparables à ceux des prairies de montagne et du désert.

A l'échelle mondiale, on estime que plus de 90 % de la pêche s'effectuent entre 0 et 200 m de profondeur, c'est-à-dire dans une zone qui représente seulement 7 % de l'étendue des mers.

Dans les régions hautement productives, le peuplement est étroitement lié à la nature du fond : un fond un peu vaseux est plus riche qu'un fond de sable, lui-même plus riche qu'un fond de graviers. Une côte rocheuse le long de laquelle l'eau est normalement limpide recèle des espèces tout autres qu'un estuaire toujours plus ou moins chargé de matières en suspension.

A chaque biotope sont associés des caractères particuliers de la faune qui y vit.

Ainsi, dans les eaux littorales se rencontrent de nombreux organismes fixés (huîtres, moules, coraux) ou à peine mobiles : bivalves fouisseurs comme les palourdes, les coques, les couteaux. Un peu plus loin du rivage se rencontrent les pectens (coquilles Saint-Jacques), les praires, les crevettes, les poissons plats. Dans ces eaux, se rencontrent aussi des poissons pélagiques qui, eux, se déplacent vite, mais qui, comme la sardine, recherchent des eaux un peu moins salées que la haute mer. C'est là également que se situent les frayères de très nombreuses espèces.

Au large et dans les eaux profondes se trouvent les grands céphalopodes et les poissons démersaux ; grondins, rascasses, raies tandis qu'à la surface évoluent les grands pélagiques : thons, espadons, squales. Les uns et les autres sont des carnivores.

Les mammifères marins pour leur part vivent en haute mer à quelque distance du continent et se nourrissent soit de poissons (phoques, dauphins), soit de petits crustacés (baleines).

La diversité des peuplements et du comportement des espèces a pour conséquence une susceptibilité variable aux divers polluants que nous allons examiner maintenant.

LES POLLUANTS ET LEURS VOIES DE PENETRATION

Selon le Conseil international de la langue française, la pollution est "l'introduction ou la présence d'un altérage dans un milieu déterminé et le résultat de son action". Littéralement cela veut dire qu'il y a pollution dès qu'un changement intervient dans le milieu, avec ou sans l'homme. Nous nous en tiendrons à une appréciation plus restrictive, qui implique la notion de dommage causé aux ressources biologiques, de danger potentiel pour la santé humaine ou d'une restriction quelconque dans les usages légitimes de la mer.

Définition de la pollution des eaux de la mer par les experts du GESAMP (Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution).

"L'introduction par l'homme dans le milieu marin, y compris les estuaires, directement ou indirectement, de substances ou d'énergie pouvant entraîner des effets délétères tels que : dommages aux ressources biologiques, danger pour la santé humaine, entrave aux activités maritimes, y compris la pêche, diminution de la qualité de l'eau de mer du point de vue de son utilisation et réduction des possibilités offertes dans le domaine des loisirs".

Il est presque évident que les perturbations causées par un polluant seront d'autant moindres que la concentration de celui-ci dans l'eau sera plus vite abaissée par dilution, diffusion, précipitation ou évaporation. Il convient donc de se préoccuper du devenir des polluants selon leurs voies de pénétration dans le milieu et selon les particularités du milieu marin qui ont été rappelés dans les pages précédentes.

Voies de pénétration

La pollution parvient à la mer :

1° - par accident

nauffrage, glissement de pontées mal arrimées, fuite des dispositifs d'exploitation minière off-shore ;

2° - par jet délibéré

rejet d'eaux usées urbaines ou d'effluents industriels par des exutoires en bordure de côte ou des émissaires ayant généralement quelques centaines de m, rarement quelques km ;

immersion, à partir d'un navire, de matières en vrac : boues de dragage, boues résiduares de fabrication industrielle ;

immersion de matières spécialement conditionnées en conteneurs ;

matières de rebut provenant de la navigation et de la pêche : vieux filets, cordages, fûts, pièces enlevées aux embarcations ;

3° - par les fleuves

substances dissoutes ou matières en suspension provenant de ce qui est rejeté volontairement et du drainage des terres. Notons qu'au cours du transfert vers la mer, des échanges se produisent : adsorption, floculation, sédimentation ou inversement, lessivage de certaines matières, liquéfaction ;

4° - par précipitations atmosphériques

qui lavent l'atmosphère des gaz, fumées, poussières résultant de l'activité humaine et entraînés par les vents sous forme d'aérosols. Ainsi trouve-t-on dans les océans de l'hémisphère nord des doses croissantes de Pb qui atteignent presque 5 fois celles trouvées dans l'hémisphère sud, l'origine étant le plomb tétraéthyle des essences. En matière d'insecticides organochlorés, les experts estiment que 40 à 60 % de la production mondiale revient à la mer, principalement par la voie des airs.

L'importance de ces apports par voie aérienne peut-être estimée d'après les quantités de sels métalliques trouvées dans les neiges de l'antarctique, notamment de ceux qui sont pratiquement absents des mers comme le Ni. A titre indicatif, on estime à 160 000 T la retombée des

poussières extra-terrestres sur le globe.

Notons qu'il pleut relativement moins sur la mer qu'au-dessus des terres, mais la mer reçoit indirectement une partie de ce qui retombe sur les terres par voie pluviale.

Au total, les pollutions qui parviennent à l'océan ne cessent d'augmenter puisqu'elles sont toutes fonction de la population du globe qui est en accroissement constant. Cependant, leur poids relatif pour la vie maritime n'est pas le même suivant la voie de pénétration. Celles qui parviennent par voie aérienne ont quelque chance d'être réparties à peu près proportionnellement à la surface des mers et de se trouver à des doses relatives si petites que, à quelques exceptions près, les substances ainsi introduites rentreront facilement dans le cycle des éléments : carbone, azote, soufre, etc, ou même éléments électropositifs.

Il n'en va pas de même des polluants qui parviennent à la mer par jet direct ou par les eaux fluviales englobés sous le nom de pollution tellurique. Ces polluants sont rejetés en quantité massive dans des espaces restreints par une population qui croît proportionnellement plus vite que la population du monde, en raison de la tendance à se fixer au bord de la mer, au moins pendant la belle saison.

D'après le recensement de 1968, la population résidente dans les communes littorales représente 10,3 % de la population française, alors que ces communes occupent seulement 3,8 % de la superficie nationale ; la densité au km² est 2,7 fois la moyenne du pays. En été, la population est 5, 10, parfois 20 fois plus nombreuse. La densité de l'habitat est 3, 5 fois plus grande que la moyenne nationale et la construction croît trois fois plus vite que dans le pays en général.

Les polluants d'origine tellurique demeurent relativement longtemps en bordure de côte avant de se diluer au large. Enfin, ce sont ceux sur lesquels nous avons relativement le plus de prise.

Nocivité relative des polluants

On peut classer les polluants de bien des façons, suivant le point de vue qui retient davantage l'attention : mode d'action physique, chimique, biologique, importance quantitative, provenance, persistance dans le milieu, degré de toxicité.

Tout en nous attachant spécialement aux polluants, dont l'importance quantitative est la plus grande dans notre pays, à savoir : les eaux usées et les hydrocarbures, nous retiendrons le classement selon la toxicité relative à l'égard des organismes marins.

Les études de toxicité sur animaux marins se sont développées seulement depuis une dizaine d'années, de sorte que les informations en la matière sont encore très fragmentaires. Celles relatives aux animaux aquatiques en général, qui ne sont d'ailleurs pas extrapolables directement au monde marin, ne sont pas plus avancées.

Elles visent à déterminer d'une part la toxicité aiguë, d'autre part la toxicité à long terme. L'évaluation de la toxicité aiguë d'après la mortalité de 50 % de la population en essai, à une température connue et pendant un temps qui n'excède pas 96 h, est facile à mettre en oeuvre. Mais dès qu'on veut dépasser ce test élémentaire, l'expérimentation présente de sérieuses difficultés. Il faut reproduire les conditions naturelles de sol, de qualité d'eau, d'éclairement, de température, parfois simuler les conditions de marée. Il faut trouver des organismes s'accommodant de la vie en captivité, leur fournir en quantité suffisante la nourriture variée qui est la leur en mer.

La production de cette nourriture met en oeuvre de tels volumes que les essais dits à long terme s'étendent difficilement au-delà de quelques mois et ne peuvent par conséquent couvrir la phase capitale de la reproduction, à moins de s'adresser à des organismes très élémentaires.

En pratique, on s'en tient à quelques organismes commodes pour l'expérimentation qui ne sont pas forcément les plus représentatifs du milieu, ni ceux d'importance économique, et on limite la durée des essais à quelques semaines.

Néanmoins, l'expérimentation a mis en évidence, comme on pouvait s'y attendre, des différences considérables dans la sensibilité des organismes aux divers polluants suivant les classes zoologiques, mais aussi suivant le stade de développement de l'organisme : oeuf, larve, alevin, adulte.

De plus, l'ordre dans lequel se rangent les différentes classes zoologiques en fonction de leur sensibilité change suivant les produits. Ainsi les poissons se montrent généralement très sensibles aux détergents tandis que les crustacés résistent bien et que les mollusques bivalves ont des sensibilités intermédiaires.

Vis-à-vis des insecticides organochlorés, ce sont les crustacés qui sont extrêmement sensibles tandis que les poissons et les mollusques supportent des concentrations qui sont souvent 100 fois plus élevées.

Un polluant rejeté à une concentration donnée risque donc d'exercer une sélection parmi les espèces présentes au lieu considéré. Ce risque fait partie des effets secondaires que l'expérimentation en laboratoire présage très mal.

Néanmoins l'analyse des résultats de l'expérimentation en laboratoire reste la voie la plus instructive pour évaluer les dommages causés par les polluants et pour tenter d'y remédier.

Nous distinguerons les polluants qui sont nocifs sans être toxiques, ceux dont la nocivité disparaît très rapidement dans le milieu marin, ceux dont la nocivité décroît au cours du temps, ceux dont la nocivité croît avec le temps.

POLLUANTS N'AYANT PAS DE TOXICITE PROPRE

Nous trouvons ici la pollution due aux agents physiques : chaleur, turbidité, matière inerte.

A/ Pollution thermique

On appelle pollution thermique celle causée par une élévation rapide et anormale de la température. Elle est due aux eaux de refroidissement émanant d'industries telles que les distilleries, les tréfileries, les centrales électriques. Le débit de ces eaux va de quelques dizaines de m³/sec dans les distilleries à quelques centaines dans les centrales nucléaires. Dans ce cas l'aspiration est telle que les organismes de grande taille risquent d'être plaqués sur les grilles d'entrée tandis que les plus petits ($\phi = 3$ à 4 mm) transitent dans les circuits de refroidissement.

La pollution thermique peut prendre plusieurs formes. Lorsque l'eau passe rapidement dans des circuits de refroidissement comme ceux des condenseurs des centrales électriques, le flux se trouve porté en quelques secondes à 10° ou 20° C au-dessus de la température initiale. Les organismes qui s'y trouvent supportent ce qu'on appelle un "choc thermique". Certains ont prétendu que le choc mécanique du passage serait également meurtrier ; les essais qui ont été effectués au laboratoire ne confirment pas ce point de vue.

Ce flux rejeté dans le milieu naturel est évidemment moins dense que celui-ci, il s'étale donc en surface en une sorte de panache allongé souvent appelé "plume". Ce flux d'eau relativement chaud reste individualisé parfois sur un parcours assez long. Dans les mers à marée, la "plume" est repoussée alternativement dans deux directions opposées de sorte que des organismes peu mobiles, qui sont dans le milieu sous-jacent, sont soumis deux fois par jour à des alternances de réchauffement et de refroidissement de quelques degrés C.

Enfin, le flux d'eau chaude s'appauvrit en O_2 , s'enrichit en sels métalliques divers dissous à partir des tubulaires (à moins qu'elles ne soient inoxydables), transporte éventuellement des produits chimiques provenant des fabrications (alcools, hydrocarbures) ou ceux qui sont additionnés comme le chlore, en vue d'empêcher la fixation des bivalves dans les installations.

Des travaux considérables se poursuivent pour étudier soit sur le terrain, soit en laboratoire les effets de la pollution thermique.

Pour ce qui est du choc thermique, il faut savoir que l'intervalle de température dans lequel la communauté aquatique se développe est relativement étroit. La température létale varie selon l'espèce et selon la température à laquelle l'individu est accoutumé, mais elle s'élève peu au-dessus de $30^\circ C$. L'aptitude à supporter des températures extrêmes diffère d'ailleurs selon les espèces ; les échinodermes par exemple s'adaptent mal, tandis que les moules s'acclimatent fort bien. Il en est de même des organismes vivants sur l'estran qui supportent normalement des fluctuations bi-quotidiennes de température assez importantes. Généralement les espèces supportent mieux un changement de température en hausse qu'une chute de température.

Si l'individu a été habitué progressivement à vivre à une température supérieure à la normale de son habitat, la température létale augmente peu.

A titre d'exemple, des salmonidés habitués à vivre à $14^\circ C$ supportent mal une élévation de température de 5 à 6° (VIVIER). D'après des essais de laboratoire, les espèces fragiles des climats tempérés, comme les salmonidés ne supportent pas plus de $26^\circ C$, les plus résistantes $31^\circ C$, les espèces tropicales $35^\circ C$, rarement $42^\circ C$.

Une étude en cours à l'ISTPM démontre que la diatomée Phaeodactylum tricornutum est perturbée dans sa croissance dès que le choc thermique porte la température au-dessus de 32° C. Selon BADER & col. (in COUTANT & PEUDERER), la température limite se situe pour les algues benthiques entre 31° et 33° C pour les crevettes et les crabes, entre 31° et 37° C, pour les oeufs et larves vers 31° C.

Ces valeurs limites semblent être confirmées par les observations dans le milieu bien que d'ordinaire, pour une espèce donnée, la tolérance soit plus faible dans la nature qu'au laboratoire. Dans une espèce, la tolérance diffère chez les adultes, les alevins et les oeufs sans qu'il y ait une règle de variations bien définie.

Notons que la vie à une température anormale pour l'espèce peut se traduire chez les végétaux par une modification de la composition (2 à 5 fois plus de polysaccharides à 25° C qu'à 40° C chez l'algue bleue Anacystis nidulans qui pourtant croît mieux à 40° qu'à 25° C).

En général, l'élévation de température accélère le métabolisme de sorte que, en-dessous de la zone létale, la productivité primaire diffère peu : une diminution éventuelle du nombre des cellules est compensée par une rotation plus rapide de la matière organique.

Si la température devient excessive, on voit pulluler les algues bleues comme en cas d'eutrophisation.

Dans l'espace affecté par le rejet, le flux d'eau chaude est susceptible de soumettre des oeufs, larves et autres organismes dépourvus de mobilité propre qui se trouveraient en surface à des fluctuations de températures nocives. Aussi, bien que l'écart soit seulement 2 à 3° C dès qu'on s'éloigne de quelques centaines de mètres de l'exutoire, veille-t-on à implanter les centrales dans des sites sans frayères.

En fait, si la température naturelle est inférieure à l'optimum pour le peuplement local, celui-ci est accru par le rejet tout au moins si la quantité de nourriture est suffisante. Ainsi observe-t-on sur la côte de Floride, en hiver, à proximité des rejets chauds, des communautés benthiques plus fournies ainsi que des poissons plus nombreux et d'espèces plus variées qu'en été. Les britanniques et les japonais ont même mis à profit l'échauffement artificiel des eaux côtières pour y développer des élevages en enrichissant au besoin le milieu en nourriture. Les uns s'en tiennent aux

poissons plats : soles, plies ou aux coquillages (clams) (NASH & SHELBOURNE, RICHARDSON), les autres ont entrepris ou envisagent des cultures plus diversifiées : algues, crevettes, sérioles, anguilles.

Le problème est alors d'éviter un refroidissement brusque dû à l'arrêt subit de la centrale.

Pour éviter ce risque les centrales comprennent ordinairement plusieurs unités, ce qui permet de les arrêter successivement lors des révisions nécessaires à l'entretien. On s'est préoccupé aussi de l'accroissement de la population bactérienne dans la zone réchauffée, mais on n'a pas jusqu'alors signalé d'inconvénients au sujet de la perte d'oxygène par élévation de température, il apparaît que sur une eau propre elle est négligeable en raison de la brièveté du passage et de la réoxygénation qui se fait dans le courant de sortie, mais dans une eau chargée en matières organiques, l'échauffement accélère la consommation de O_2 et peut faire tomber la teneur en-dessous de la limite admissible.

Pour ce qui est des produits antifouling ajoutés, généralement du chlore, la question n'est pas spécifique des rejets thermiques puisque le chlore est le désinfectant le plus utilisé pour aseptiser les effluents des stations de traitement des eaux usées. La seule originalité est l'importance des volumes en cause : une chloration à 1 ppm telle qu'elle est pratiquée correspond pour un rejet de 200 m³/sec, à l'emploi de 17 T de chlore/jour. Ce chlore se combine d'ailleurs presque instantanément avec NH_3 et les matières organiques dissoutes dans l'eau, de sorte que le chlore libre restant est environ 1/10 de la dose initiale. On s'interroge pour savoir quelle est la stabilité des composés ainsi formés et quelle est la probabilité qu'ils aient une action sur le peuplement, par exemple en s'accumulant.

De même des études en cours doivent déterminer si l'effet thermique renforce l'action des polluants, spécialement les polluants rémanents puisque l'accélération du métabolisme peut modifier l'équilibre dans le sens de l'accumulation aussi bien que de l'élimination.

Enfin il n'est pas impossible que les centrales aient un effet secondaire pour la mise en mouvement des sédiments fins : aspiration d'un côté, dépôt plus ou moins dispersé et peu prévisible a priori dans la zone de rejet.

B/ Matières inertes

Les matières en suspension, responsables de la turbidité, deviennent nocives lorsqu'elles sont abondantes. D'une part, elles limitent la pénétration de la lumière dans le milieu, d'autre part elles entravent des processus physiologiques essentiels : respiration et nutrition. Par exemple, des rejets d'amiante sont nocifs si les fibres en suspension sont assez nombreuses pour colmater les branchies.

Un autre exemple est celui des boues dites "phosphogypse" qui sont le résidu de la fabrication de l'acide phosphorique par attaque sulfurique des phosphates naturels. Ces boues troublent la colonne d'eau dans laquelle elles sont immergées. Mais, formées à 95 % de sulfate de calcium précipité, elles se dissolvent et laissent seulement une sorte de sable insoluble qui tombe sur le fond. Malgré le volume des rejets qui se chiffre couramment par plusieurs milliers de T/j, l'apport d'ions SO_4^- et Ca^{++} n'est pas significatif au regard de la quantité existant dans la mer, tout au moins dans les lieux où le renouvellement de l'eau est suffisant. Dans ce cas, le seul risque est le colmatage du fond par les insolubles, avec destruction de la microfaune benthique dans l'espace considéré. Pour éviter que pareille chose n'arrive, il convient de choisir le lieu de rejet pour que les insolubles se dispersent comme le sable provenant de l'érosion normale des terres.

Un autre exemple est celui de l'hydrate ferrique qui se forme par hydrolyse et oxydation du sulfate ferreux résultant de la fabrication de l'oxyde de titane. S'il est très abondant, il peut colmater les branchies des organismes. En quantité plus modérée, il provoque une réaction de l'organisme. Ainsi WINTER a observé en aquarium que l'addition d'hydrate ferrique dans la nourriture des moules entraîne une émission pléthorique de fécès et pseudofécès. Cette élimination s'accompagne d'une forte perte de nourriture et de la production d'une grande quantité de mucus qui aboutit en définitive à un épuisement de l'animal. On constate une usure de l'épithélium intestinal dû à l'excrétion de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ et une mortalité en corrélation avec l'absorption d'hydrate ferrique. Reste à savoir si de telles conditions sont susceptibles d'exister dans le milieu. Selon les observations faites dans les lieux où existent des rejets de cette nature, cela est peu vraisemblable.

Des chercheurs de l'Université américaine de Woods Hole observent que du zooplancton mis dans la zone du rejet s'immobilise 1 à 2 mn puis recouvre sa mobilité. S'il charge son intestin d'hydrate, il se dégage aisément lorsqu'il est remis en eau propre. De même, les larves de crevettes dont la mue semblait être contrariée par l'hydrate ne sont gênées en fait que si elles sont maintenues systématiquement dans l'ambiance qui se produit au moment du rejet (LASSUS), éventualité des plus improbables dans le milieu. La photosynthèse ne semble pas modifiée (BERGE & Col) non plus que la faune benthique.

Les boues sont gênantes surtout par leur état physique, mais elles peuvent aussi accroître momentanément la charge polluante du milieu par remise en suspension des matières sédimentées. Ainsi en est-il des boues de dragage des ports. Ayant a priori la même composition que les sédiments voisins, elles ne devraient apporter qu'une turbidité passagère dans le milieu. Mais en fait ces boues retiennent des produits chimiques variés, résidus de l'activité portuaire, et une flore bactérienne environ 10 fois plus nombreuse que celle du large. On y trouve en particulier diverses espèces de Clostridia : Cl. Welchii, Cl. Botulinum type B, plus rarement type E qui témoignent des conditions anaérobies qui y règnent (CANN & col). On y trouve aussi, naturellement, des sulfures et de l'acide sulfhydrique libre. Leur remise en suspension, lors du dragage et du rejet, contamine donc le milieu, réduit sa teneur en oxygène dissous et gêne localement la vie aquatique.

Parmi les matières inertes, mention doit être faite des matières plastiques qui sont de plus en plus fréquentes dans les épaves. Ces matières sont dépecées par les grands poissons comme s'il s'agissait d'une proie et sont trouvées en quantité croissante dans les contenus stomacaux des poissons comme les thons : à peine représentées en 1968, elles constituaient 20 % de ces contenus en 1971 dans un même secteur marin. Il est très vraisemblable que ces matières lèsent les organes au passage et nuisent par conséquent à la vie de l'espèce.

POLLUANTS DONT LA NOCIVITE DISPARAIT TRES RAPIDEMENT DANS LE MILIEU

Divers effluents, qui seraient tout à fait impropres à la vie aquatique dans l'état où ils sortent des usines, perdent en fait leur nocivité après une dilution qui peut-être acquise en pratique à quelques centaines de mètres du point de rejet en mer. Il en est ainsi des solutions acide, alcaline ou saline contenant seulement des ions qui existent en grande quantité dans la mer : ions chlorures, sulfates, sodium, calcium ou magnésium.

Les saumures de tels sels ne sont nocives que si elles sont fortement hypertoniques par rapport aux organismes. Elles pourraient nuire si elles restaient sur le fond du fait de leur densité, mais en veillant à obtenir une dilution quasi instantanée elles sont rejetées sans problème.

Les solutions d'acides et de bases seraient très nocives si leur pH n'était ramené très rapidement dans l'intervalle supportable par la faune aquatique 6,0 à 9,0. Ceci est obtenu en mer relativement plus facilement qu'en eau douce grâce au pouvoir tampon de l'eau de mer, du côté acide en raison de sa teneur en carbonates et borates, du côté alcalin à cause des ions, magnésium et calcium. Une eau de mer dont la salinité est 35 ‰ a une basicité de 2,5 milliéquivalent/l. De ce fait, un effluent sulfurique de pH 0,9 dilué au 1/1000 dans l'eau de mer passe à pH 6,0 seulement. De même un effluent alcalin pH 12-13 est neutralisé aisément, substitution de Na^+ par Mg^{++} donnant au sel insoluble, comme il arrive avec les résidus de fabrication de l'alumine (*).

L'acidité et la basicité sont donc le plus souvent de très courte durée dans la mer. Leurs répercussions sur l'écologie marine sont d'ordinaire négligeables au-delà d'un secteur très limité. Mais très souvent elles sont nécessaires dans l'effluent pour maintenir en solution des produits qui précipiteraient en milieu neutre. Ainsi le problème posé par des rejets comme ceux résultant de la fabrication de l'alumine, de l'oxyde de titane ou de l'acide alginique n'est pas tant celui de leur pH que celui de la charge solide qu'ils transportent visiblement ou en puissance.

(*) Le calcul montre que 1 l SO_4H_2 concentré du commerce (d = 1,84) est neutralisé par 8 m3 d'eau atlantique, 1 l HCl concentré (d = 1,19) par 4 m3 de la même eau.

PRODUITS DONT LA NOCIVITE DECROIT AVEC LE TEMPS

De très nombreux polluants entrent dans cette catégorie. Les dommages qu'ils causent aux ressources marines sont fonction de la sensibilité des organismes marins au polluant considéré et de la vitesse de dégradation de celui-ci mais aussi des conditions de diffusion et dilution qui existent au point de rejet. En pratique, ces polluants interviennent essentiellement dans la frange littorale puisqu'ils sont dégradés ou dilués au-delà du seuil toxique lorsqu'ils atteignent le large.

A/ Eaux usées urbaines

L'exemple type est celui des eaux usées urbaines. La composition de ces eaux varie suivant la nature et l'importance de la collectivité humaine dont elles sont issues, mais elles sont toujours riches en microorganismes, en matières organiques (250 mg DBO 5 par litre en moyenne) et en constituants divers provenant de l'activité journalière de chacun.

La flore microbienne des eaux usées urbaines n'est pas une menace pour les organismes marins mais par l'intermédiaire de ceux-ci, elle peut revenir à l'homme. En effet, les organismes filtreurs, comme les mollusques bivalves tels que les huîtres et les moules, sont capables d'accumuler en grand nombre les microorganismes qui se trouvent en suspension dans l'eau. On sait que diverses maladies humaines : les typhoïdes, le choléra, les dysenteries, l'hépatite virale se propagent préférentiellement par l'eau. Les germes vecteurs de ces maladies se trouvent dans les effluents urbains lorsque la population comprend des malades ou des porteurs de germes. Sachant que les coquillages filtrent couramment plusieurs litres d'eau par heure, on conçoit que, s'ils vivent en zone contaminée, ils accumulent des germes en nombre supérieur à la dose infectante et deviennent un agent de transmission des maladies précitées surtout s'ils sont mangés crus. Pour réduire le risque, les producteurs de coquillages sont astreints à diverses précautions durant l'élevage et surtout au moment de l'expédition.

Les matières organiques des eaux usées sont pour la plupart d'origine biologique. Elles se dégradent par action physico-chimique et sous l'effet des bactéries, en consommant des quantités importantes d'oxygène. Prenons l'exemple du lactose, qui se trouve à raison de 45 g/l en moyenne dans les lactosérums de fromagerie. Il faut 1,12 g d'oxygène pour oxyder 1 g de lactose en $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Dans une eau de mer à 10° C saturée en oxygène, il y a

9 mg O_2 /l. C'est dire que l'oxydation du lactose d'1 l de lactosérum épuise l'oxygène de 5,6 m³ d'eau de mer. L'apport massif de matières organiques peut donc à brève échéance gêner la vie des organismes en réduisant la quantité d' O_2 disponible pour leur respiration.

Lorsque la matière organique est dégradée, aussi bien lentement en milieu naturel que en quelques heures dans les stations de traitement des eaux usées, elle donne de l'ammoniaque, des nitrates et des phosphates qui viennent s'ajouter à ceux contenus dans les eaux vannes et aux phosphates ajoutés systématiquement dans les lessives (25 à 50 % selon les marques). Ces sels nutritifs assimilés par les végétaux, rentrent dans le cycle de la matière vivante et, s'ils ne sont pas trop abondants, sont plutôt bénéfiques pour le milieu.

Mais si ces apports sont excessifs, ils provoquent une efflorescence de vie végétale, suivie d'une prolifération animale intense. Lorsqu'à la nuit la photosynthèse s'arrête, cette vie exubérante peut s'arrêter tout à coup faute d' O_2 et les organismes asphyxiés entrent en putréfaction dans le milieu. Ce phénomène dit "eutrophisation" bien connu dans les lacs, est heureusement rare en milieu marin, mais il sévit de temps à autre dans nos étangs languedociens sous le nom de "malaigue". Les pertes qui en résultent s'il y a des élevages dans la zone atteinte se chiffrent par centaines de millions.

Sans aller jusqu'à ce stade, la richesse excessive en sels nutritifs induit parfois le développement d'algues rouges planctoniques appartenant à la famille des Dinoflagellés dont l'abondance est telle qu'elles colorent l'eau d'où le nom "d'eaux rouges". Parmi ces espèces, se trouve Gonyaulax tamarensis qui synthétise la mytilotoxine, produit extrêmement toxique ainsi nommé parce qu'il nous atteint d'ordinaire via les moules qui se sont nourries de Gonyaulax. Il y a là un exemple de pollution biologique à l'égard duquel il convient d'être très vigilant car ses conséquences sont mortelles pour l'homme.

Sans arriver jusqu'à de tels accidents, les déversements d'eaux usées urbaines peuvent détériorer le milieu. Divers auteurs dont BELLAN et VACELET ont montré que les abords d'un exutoire d'eaux urbaines sont abiotiques et qu'il faut s'écarter sensiblement pour retrouver un peuplement normal après être passé par des biocénoses appauvries en nombre et déséquilibrées en variété. La production potentielle de la région est réduite d'autant (TORPEY). SELLECK a observé que le nombre des poissons et leur variété dans les zones

soumises à pollution sont en relation avec la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les matières organiques : tant que celles-ci est inférieure à 22 kg par ha/j, la population n'est que faiblement réduite ; si la demande en oxygène est comprise entre 22 et 148 kg/ha/j elle est fortement réduite ; au-delà de 148 kg/ha/j, la saturation en oxygène dissous est inférieure à 25 % et on voit se développer les espèces anaérobies.

En dehors des relations de cause à effet bien établies, imputables aux eaux usées, il faut signaler les faits non encore prouvés mais vraisemblables comme la fréquence du parasitisme ou des maladies observées chez les poissons pêchés dans des régions qui reçoivent des décharges importantes. C'est ainsi que nos pêcheurs artisans de la Mer du Nord se plaignent depuis plusieurs années des nécroses qui affectent une partie de leur pêche.

Selon la bibliographie, ces nécroses dont l'agent causal n'est pas bien déterminé, pourraient être favorisées par la pollution du milieu.

B/ Les détergents

Produits d'utilisation courante présents dans tous les rejets urbains, les détergents sont généralement considérés comme très toxiques. En fait, selon leur catégorie et leur formule chimique, les doses létales pour une même espèce de poisson peuvent varier de 1 à 1000 (MARCHETTI).

L'action des détergents paraît due essentiellement à leurs propriétés tensio-actives qui modifient la perméabilité cellulaire d'où les atteintes aux organes chimio-récepteurs (bourgeon gustatif, épithélium nasal), à l'épithélium branchial avec hypersecretion muqueuse corrélative, enfin aux épithéliums qui interviennent dans les équilibres salins et le métabolisme de l'urée. Des effets sur la reproduction (retard à l'ovulation et à l'évolution des oeufs) ont été observés chez un polychète maintenu assez longtemps (plus de 50 j) en présence d'un polyéthylèneglycol cependant peu toxique (BELLAN).

Les végétaux aquatiques sont particulièrement sensibles, les poissons également, tandis que les crustacés sont plus résistants. Chez les mollusques, un organisme comme la patelle dont le muscle est largement dénudé est fort sensible alors que les bivalves le sont moins et les bigorneaux beaucoup moins (MAGGI & COSSA). Généralement les larves sont plus sensibles que les adultes.

La toxicité aiguë croît avec la température. Elle varie très peu avec le pH dans l'intervalle qui nous occupe.

La toxicité aiguë des cationiques est habituellement trouvée plus forte que celle des anioniques, catégorie la plus employée : les alkylaryl-sulfonates à eux seuls représentent plus de la moitié des détergents utilisés pour les lavages ménagers. Leur toxicité est modifiée par les ions Ca^{++} qui l'augmentent ou la diminuent probablement selon la solubilité du sel formé. En milieu marin, elle croît avec la salinité (MANN).

Les observations concernant les détergents anioniques sont assez concordantes, celles relatives aux non ioniques beaucoup moins.

A noter une évolution continue des fabrications. Aux anioniques primitifs formés d'oxyde d'éthylène, d'alcool, de phénol se sont ajoutés les copolymères d'oxyde d'éthylène et de propylène avec le glycol et le glycérol ainsi que les esters d'acides gras et de sucres. Les produits commerciaux sont souvent des mélanges de détergents anioniques et non ioniques, associés à des produits ayant des propriétés oxydantes pour le blanchiment ou à des germicides.

Les détergents ont particulièrement préoccupés les écologistes en raison de leur grande stabilité, d'où l'incitation à fabriquer des produits biodégradables à l'état dilué et après adaptation de la flore microbienne * Mais les formules assurant l'aptitude à la dégradation ne coïncident pas toujours avec celles de la moindre toxicité (DURAND). Celle-ci étant fonction, par exemple pour les ABS, de la longueur des chaînes carbonées, de leur ramification, de la position relative des cycles et des fonctions hydrophyles, n'est pas réduite systématiquement par la dégradation (COSSA). La biodégradation ne résout donc que partiellement le problème posé aux écologistes par les détergents.

* En France, le décret n° 70 872 du 25 septembre 1970 "relatif à l'interdiction du déversement de certains produits détergents dans les eaux superficielles, souterraines et de la mer dans les limites territoriales et à la réglementation de la mise en vente et de la diffusion de ces détergents dans les produits de lavage et de nettoyage", exige que les produits de lavage ou de nettoyage contenant des détergents anioniques, cationiques, ampholytes ou non ioniques soient biodégradables au moins à 80 %.

C/ Les produits pétroliers

La pollution de la mer par les produits pétroliers est l'une de celles qui suscite le plus d'attention parce qu'elle est particulièrement visible, relativement fréquente, et fort dispendieuse pour ceux qui entreprennent d'en corriger les effets. Ses causes sont diverses : rejet chronique d'effluent de raffineries, déballastage, perte au déchargement ou au transfert, fuite à partir de forage sous-marin, échouage de cargos.

Par ailleurs, même si on exclut les produits de synthèse qui en dérivent, qui ont d'autres propriétés et d'autres voies de pénétration en mer, les produits pétroliers ont en dépit de leur parenté chimique des propriétés physicochimiques variant dans un large intervalle et, par voie de conséquence, des toxicités également variables.

1) leur diversité

Les pétroles bruts sont constitués par des mélanges d'hydrocarbures ayant de 1 à 60 C, liés par des liaisons simples ou double en chaînes droites ou ramifiées aussi bien qu'en cycles. Chaque gisement se caractérise par les proportions relatives des hydrocarbures aliphatiques (chaîne saturée), naphténiques (cycle saturé) et aromatiques (au moins un cycle benzénique). Par raffinage, on obtient des produits ayant d'autres caractéristiques : essence, kérosène, gas-oil, fuel dans lesquels se trouvent des oléfines à double ou triple liaison et qui sont relativement faciles à oxyder tandis que les huiles lourdes, les huiles de graissage ou les bruts du Mexique ($d = 0,988$ à 16°C) qui comportent jusqu'à 40 C par molécule sont très résistants. Pour donner une idée des différences existantes entre produits pétroliers, citons la viscosité cinétique (à 21°C) de 2 pétroles bruts : celle d'un algérien léger ($d = 0,818$ à 16°C), 3,34 cSt, celle d'un vénézuélien lourd ($d = 0,896$ à 16°C) 25,0 cSt.

Lorsque ces produits sont répandus en mer, ils s'étalent plus ou moins selon leur viscosité ; seuls les plus fluides s'étendent en film approchant le film monomoléculaire ; certains forment des émulsions. Il s'ensuit une évaporation ou une codistillation des constituants légers (comportant moins de 14 C) et une dissolution partielle, notamment des aromatiques. On estime que 1/3 de la cargaison du Torrey Canyon (117 000 T) a été volatilisé dans l'atmosphère. Puis l'oxydation catalysée par la lumière ou celle opérée par les microorganismes marins produit des radicaux libres

entraînant la formation d'hydroperoxydes, d'alcools, de cétones, d'acides organiques, tous composés plus solubles que les hydrocarbures et aptes à être insérés dans la matière vivante. De ce fait, les nappes huileuses dérivant sur la mer n'ont ni la même composition, ni la même toxicité que les produits d'origine. Au fur et à mesure de son vieillissement, la nappe devient plus visqueuse mais aussi moins toxique comme nous allons le voir.

Avant d'étudier les effets de pétroles sur les organismes marins, il est bon de noter que les hydrocarbures font partie des constituants normaux de la matière vivante. Ceux formés par les organismes sont dits "biogènes" pour les distinguer des produits fossiles dans lesquels ils se sont transformés au cours des temps géologiques. Synthétisés surtout par les végétaux, ils sont spécifiques de l'espèce et moins variés que ceux rencontrés dans les produits pétroliers. Ce sont surtout des paraffines et des oléfines non toxiques. Chez les algues phytoplanctoniques, les teneurs peuvent atteindre 100 à 2000 ppm du poids sec ; les teneurs les plus élevées se rencontrent dans les tissus jeunes à croissance rapide (YOUNG-BLOOD & BLUMER in MICHEL). On trouve couramment dans les tissus végétatifs des paraffines à nombre impair de C (5 dans les algues brunes, 7 dans les rouges), alors que la grande majorité des chaînes carbonées des tissus animaux comprend un nombre pair de C. La présence de ces hydrocarbures biogènes révèle l'existence de processus physiologiques capables de traiter les hydrocarbures donc, le cas échéant, ceux des pétroles avec le risque que ceux-ci venant se substituer aux biogènes ne perturbent les mécanismes normaux de l'organisme.

2) effets observés en laboratoire

Pour évaluer les effets des pétroles sur les organismes marins, nous considérerons successivement les résultats obtenus en laboratoire et ceux observés in situ sur les végétaux, sur les invertébrés (crustacés et mollusques) et sur les poissons.

Au laboratoire, on observe que l'addition de produits pétroliers dans les milieux de culture d'Acinetobacter sp provoque l'apparition de cellules géantes et une modification de la distribution des lipides (FINNERTY & col.). Sur le phytoplancton, par exemple Asterionella japonica, on note un ralentissement de la photosynthèse. On observe également un ralentissement de la division cellulaire, donc de la vitesse de croissance en présence de concentration allant de 0,01 à 100 ppm selon la composition des produits.

La sensibilité est très variable selon les espèces. Ainsi certaines diatomées (Ditylum, Coscinodiscus, Chaetoceros) sont détruites en 24 h en présence de 0,1 ml fuel/l d'eau, tandis que d'autres (Melosira et Grammatophora) en supportent plus de 1 %. GORDON & PROUSE en utilisant 14 C montrent que la photosynthèse d'espèces phytoplanctoniques isolées de l'Atlantique NO est inhibée par le fuel n° 2 (*) plus que par des produits plus lourds. Ceux-ci se classent par ordre dégressif : fuel n° 2, fuel n° 6, brut Venezuela ou fuel n° 2, huile de hors-bord, brut de Louisiane, brut de Koweït.

Les expériences sur l'algue géante Macrocystis pyrifera mettent en évidence une réduction de la photosynthèse par un film d'huile diesel de 20 μ à la surface de l'eau ; 0,1 % dans l'eau l'inhibe complètement. Les jeunes pousses sont les plus fragiles. Les dommages qui leur sont causés sont irréversibles après 6 h de contact bien qu'ils ne soient apparents que plus tard : après 3 ou 7 j selon que la teneur en huile est de 0,1 % ou 0,01 %. Il semble que les hydrocarbures s'infiltrèrent dans le cytoplasme par l'intermédiaire des lipides.

A l'égard des plantes, la toxicité croît de l'hexane, au cyclohexane, au benzène ; dans la série aromatique, elle croît avec le nombre de radicaux méthyl substitués (benzène < toluène < xylène < triméthylbenzène) comme si ces radicaux facilitaient la pénétration dans les tissus. La toxicité semble être en relation avec la solubilité dans l'eau. Elle paraît être maximum pour les produits dont le point d'ébullition est compris entre 150° C et 275° C (BUTLER & col).

Le zooplancton est également fort sensible. Des oeufs de turbot meurent en 2 j en présence d'une émulsion de brut Russe à 0,1 μ l/l (LC 50) des larves de copépodes avec 1 μ l/l. Des larves de berniques ou de crabes (Pachygrapsus marmoratus) ont un développement anormal lorsque l'eau contient 10 à 100 μ l de pétrole/l. Les larves d'oursins sont particulièrement sensibles. Il faut dire que d'ordinaire, les concentrations létales pour les larves sont 100 ou 1 000 fois plus faibles que pour les adultes. Ainsi les berniques

(*) Le fuel n° 2 américain est un produit léger tandis que le fuel n° 2 européen est un produit lourd.

adultes supportent jusqu'à 10 à 100 ml/l. Les huîtres et les moules supportent 1 à 10 ml/fuel/l mais meurent si l'addition de fuel atteint 20 à 30 mg/l. Bien avant d'être incommodés dans leur physiologie (cils branchiaux souillés, vitesse de pompage et synthèse du glycogène ralenties), ces mollusques filtreurs acquièrent un goût qui les rend immangeables : 0,01 ppm de pétrole dans l'eau suffit à donner à C. virginica un goût qui persiste pendant 6 mois, même après retour en eau propre.

Une expérience effectuée à la suite d'un naufrage sur nos côtes a permis de confirmer la persistance d'un mauvais goût pendant plus de 4 mois chez des moules qui s'étaient trouvées souillées par du fuel.

Les poissons sont gênés par les produits pétroliers qui viennent au contact de leurs branchies ou d'autres organes et ils réagissent en sécrétant du mucus en abondance. Des expériences systématiques sur juvéniles de truites ou d'aloses ont montré que les produits légers, type essence ou kérosène sont bien plus toxiques que les produits lourds. A nombre de carbone égal, les paraffines sont moins toxiques que les oléfines, elles-mêmes moins toxiques que les aromatiques, d'où des différences marquées entre les effets des bruts de différentes origines expérimentés à la même concentration. La sensibilité des poissons est également variable suivant l'espèce

Variation de la toxicité pour plusieurs espèces marines
d'après (NELSON-SMITH) in "Report and Studies n° 6 1977 FAO"

Organisme	Produit toxique	Doses létales	Durée	Référence
Diatomées				
<u>Ditylum brightwellii</u>	Kérosène et fuel oil	100 µl/l	24 h	Mironov and Lanskaya (1967)
<u>Coscinodiscus granii</u>				
<u>Chaetoceros ourvisetus</u>				
Microalgue marine	Kérosène	188 µl/l	plusieurs jours	Aubert, Chaira and Malara (1969)
Copepodes				
<u>Acartia clausii</u>	Pétrole	1 µl/l	3 - 4 j.	Mironov (1968)
<u>Oithona nana</u>				
<u>Acartia</u>	Pétrole	100 µl/l	24 h	Mironov (1972a)
<u>Calanus</u>				

Oeufs et larves de hareng	: hydrocarbures : dissous de : pétrole brut:	5 ppm	: 3 - 4 j	: Kühnholdt (1969)
<u>Rhombus maeoticus</u> oeufs	: pétrole brut:	0,1 µl/l	: 50 % : mort : en 2 j.	: Mironov (1972a)
	: <u>Niveau moyen de tolérance</u>			
Alose	: essence : gas-oil : bunker	: 91 mg/l : 167 mg/l : 1952 mg/l	: 48 h : 48 h : 96 h	: Tagatz (1961)
Truite	: essence : gas-oil : fuel-oil : huile de : lubrification	: 60-180 mg/l : 300-4000 mg/l : 1000-150 000 mg/l : 3000-180 000 ⁺ mg/l		: Zahner (1962)
<u>Lepomis macrochirus</u>	: kérosène	: 2820-2990 ppm		: Turnbull, Demara : and Weston (1954)
Toadfish				
<u>Opsanus tau</u>	: pétrole brut:	10 ml/l 1 ml/l	: 1 j : 10 j	: Chipman and : Galtsoff (1949)
Mummichog	: pétrole brut:	LC50) 18 ml/l : 16.5 ml/l	: 24 h : 48 - 96h	: Laroche, Eisler : and Tarzwell (1970)
Sunfish	: acides naph- : theniques	: 4.6-7.2 ppm	: 96 h	: Cairns and Scheier : (1962)
Minnows	: idem	: 5.0 ppm	: 72 h	: U.S. Public : Health Service : (1939)
<u>Phoxinus phoxinus</u>	: idem : issus du pé- : trole	: 29 - 36 ppm	: 48 h	: Malacea, Cure and : Weiner (1964)
Bitterling - <u>Rhodeus sericeus</u>	: idem	: 92 - 118 ppm	: 24 h	: Malacea, Cure and : Weiner (1964)
Huitres				
<u>Ostrea edulis</u>				
<u>Crassostrea angulata</u>	: fuel oil	: 30 - 40 ml/l	: <7 j.	: Leenhardt (1925)
Moules				
<u>Mytilus galloprovincialis</u>				
<u>Gibbula divaricata</u>	: pétrole brut: : de Russie	: 1.0 ml/l	: 6-18 j.	: Mironov (1967, : 1970)
Needleshell				
<u>Brittium reticulatum</u>	: pétrole brut:	: 1.0 ml/l	: 6-18 j	: Mironov (1967, : 1972a)
<u>Rissoa euxinica</u>	: idem	: 1.0 ml/l	: 3-5 j.	
Pond Snail	: acides naph- : theniques	: LC50 6.6-15.6 ppm	: ?	: Cairns and Scheier : (1962)
<u>Physa heterostropha</u>				
Hydroid				
<u>Tubularia crocea</u>	: pétrole brut:	: 50 ml/l	: 24 h	: Chipman and : Galtsoff (1949)

3) effet en milieu naturel

En milieu naturel, il faut distinguer la pollution chronique et la pollution accidentelle.

La pollution chronique diffuse a l'inconvénient de conférer aux organismes un goût de pétrole tout à fait inacceptable. Les produits pétroliers dissous ou émulsionnés à faible dose dans l'eau pénètrent dans l'organisme et se fixent dans les tissus adipeux. Les espèces carnivores à métabolisme très actif comme le mullet, le bar, le thon, ou les nécrophages comme les crevettes et les crabes ont tôt fait d'acquérir un goût inacceptable pour le consommateur. Le seuil de perception paraît voisin de 1 ppm, il peut être acquis dans une eau contenant 10 µl de pétrole par litre.

Ce pétrole diffus agit comme solvant à l'égard des autres substances liposolubles qui se trouvent dans les eaux superficielles soit normalement, soit du fait de pollutions. Ainsi lui prête-t-on un effet sur les télé-médiateurs, substances mal connues qui régleraient certains comportements des animaux aquatiques. De façon plus certaine, il solubilise les organochlorés qui, moins denses que l'eau, restent comme lui en surface. On a constaté par exemple en baie de Biscayne (Floride), où existent des fuites de pétrole, que la concentration en dieldrine est 10 000 fois plus forte dans l'huile extraite des eaux superficielles que dans l'eau sous jacente. Le pétrole peut donc être le véhicule des organohalogénés dans les organismes vivants ; ce fait est confirmé par les mesures qui ont été faites, notamment sur nos côtes (ALZIEU, MICHEL).

Par ailleurs, des produits pétroliers paraissent avoir un effet narcotique, par exemple sur les protozoaires par adsorption sur la membrane, d'autres comme le kérosène attirent les homards. Enfin, en réduisant la pénétration de la lumière dans le milieu, les pétroles apportent une gêne au prédateur en quête de nourriture.

La pollution chronique par les pétroles perturbent donc certainement de plusieurs manières les mécanismes qui règlent la vie dans les océans, mais dans le même temps elle enrichit le milieu en matières organiques utilisables et peut même, dans un milieu fermé, contribuer à l'eutrophisation.

Aussi constate-t-on dans les eaux qui en sont affectées une prolifération de microorganismes ou de petites algues brunes aptes à dégrader

les produits pétroliers et à s'en nourrir. Plus de 100 espèces des eaux saumâtres ont été reconnues capables parmi lesquelles presque tous les Pseudomonas, germes prédominants dans la flore microbienne marine, certains champignons des moisissures (*Candida*), des protozoaires. La vitesse d'utilisation dépend de la dispersion des produits et de la température : elle paraît maximale entre 25° et 37° C, ZOBELL estime entre 30 et 40 % le taux de conversion des produits pétroliers en matière vivante.

La dégradation biologique des pétroles est efficace parce que les organismes mettent en oeuvre des processus divers : aérobies en surface, anaérobies au fond, en utilisant les nitrates et les sulfates comme donateurs d'oxygène. Elle est particulièrement active lorsque le milieu est suffisamment pourvu d'azote et de phosphore. Elle est aussi relativement spécifique, chaque espèce attaque préférentiellement une structure particulière. Il est généralement admis que les aromatiques disparaissent plus vite que les paraffines.

On estime que l'oxydation bactérienne est 10 fois plus rapide que l'autoxydation. On a même songé à la promouvoir pour obtenir une destruction rapide du pétrole en mer. L'oxydation par les microorganismes se chiffre entre 100 et 960 mg/m³/j soit 36 à 350 g/m³ an. Elle consomme 100 à 1250g O₂ (ZOBELL). Comme la teneur en oxygène de l'eau de mer diminue rapidement en s'éloignant de la surface où déjà elle ne dépasse qu'exceptionnellement 10 mg/l, l'oxygène est le facteur limitant de la dégradation des pétroles en mer. BUTTLER a calculé qu'il faut 400 m³ d'eau de mer saturée en oxygène à 15° C pour détruire 1 l de pétrole brut.

La pollution accidentelle se présente tout autrement. Le flux subit d'un milieu tout à fait impropre à la vie aquatique a pour premier effet de provoquer la fuite des organismes suffisamment mobiles. Dans les observations faites lors des trop nombreux naufrages de pétroliers, on n'a jamais signalé de mortalités spectaculaires de poissons, ce qui laisse penser qu'ils ont fui soit vers le fond, soit en dehors de la nappe dérivante. On imaginerait facilement que les oiseaux s'éloigneraient également mais l'expérience montre qu'ils cherchent à se poser et si leur plumage est souillé ils sont perdus, car ils cessent alors d'être protégés du refroidissement par l'eau. De même les jeunes mammifères sont exposés au refroidissement lorsque leurs poils sont collés par le pétrole, tandis que leurs aînés sont mieux isolés par la

graisse et plus aptes à s'enfuir. On signale cependant qu'ils souffrent s'ils sont atteints aux yeux. Ainsi un troupeau de phoques qui s'était réfugié à terre pour fuir un naufrage en Nouvelle Écosse, complètement aveuglés, ne trouvait plus son chemin vers la mer.

Les organismes fixés ou peu mobiles vivant dans les eaux littorales subissent eux des dommages importants. Les gros crustacés par exemple, qui vivent dans le creux des rochers, sont tués dès que leurs branchies sont souillées, même partiellement ; toutefois, s'ils sont remis très rapidement dans une eau propre, ils ont quelques chances de se nettoyer et de survivre.

Les mollusques bivalves sont épargnés s'ils parviennent à maintenir leurs coquilles assez bien fermées et si la submersion est brève, sinon ils sont détruits. Au mieux, ils se chargent de produits pétroliers qui persistent longtemps dans leurs tissus. Des moules ayant retenu du gas-oil à raison de 500 mg/kg de chair humide ont mis 5 mois pour revenir à leur teneur usuelle en hydrocarbure (MICHEL).

Les gastéropodes (bigorneaux, buccins, ormeaux) ne survivent guère au contact du pétrole qui souille leur pied et ne leur permet plus de rester fixés ; ils sont roulés et emportés par la vague.

Les invertébrés benthiques sont particulièrement exposés. Ils sont détruits faute de pouvoir respirer dans un sol englué de pétrole ou de pouvoir rejeter les gouttelettes de pétrole qui obstruent leur tube digestif (exemple "Princess Irène"). Ceux qui habitent les mangroves subissent le même sort. Les récifs coraliens semblent demeurer indemnes dans leur partie immergée, alors que la partie émergée est fortement détériorée.

Les végétaux fixés sont ordinairement très abimés par le pétrole surtout s'ils sont atteints plusieurs fois à peu d'intervalle. Dans les herbiers où le feuillage doit fournir l'oxygène à une masse immergée importante (mangrove), la destruction des feuilles entraîne des dommages bien plus importants. La souillure au niveau du collet des racines est particulièrement nocive tandis que si la racine est épargnée, les tiges et les feuilles croissent à nouveau après élimination du pétrole. Il en est de même des algues dont la fronde est régénérée si le stipe a été épargné.

Les effets décrits ci-dessus sont plus ou moins marqués selon la composition du pétrole. Ainsi les produits légers frais sont-ils bien plus nocifs que ceux qui ont dérivé assez longtemps sur la mer pour ne plus contenir les fractions de faible poids moléculaire.

Quoi qu'il en soit la question se pose chaque fois de savoir si la destruction des organismes marins dans un site atteint par le pétrole est définitive. L'expérience montre que le peuplement s'est toujours reconstitué en commençant par les larves les plus mobiles. Mais le repeuplement qui débute en quelques mois n'est pas toujours complet après plusieurs années et n'est pas toujours identique : des organismes se développent au détriment d'autres, des espèces rares ne sont plus retrouvées, les déséquilibres passagers sont fréquents (développement excessif d'algues faute des oursins ou des ormeaux qui les mangent, faible peuplement de moules faute d'oeufs des espèces précédentes dont elles se nourrissent).

4) Pétroles et produits anti-pétroles

Depuis le naufrage du Torrey Canyon (mars 1967) on a entrepris de traiter les nappes de pétrole dérivantes ou affalées à la côte afin d'accélérer leur disparition. Trois types de produits ont été proposés pour ce faire : les agglomérants destinés à faciliter le ramassage en surface, les précipitants qui envoient les pétroles au fond, les émulsifiants qui visent à faciliter l'oxydation physicochimique ou biologique. Le traitement utilisé dépend des circonstances. Par exemple, la précipitation est acceptable seulement si le fond est pauvre. Mais quel qu'il soit, le traitement introduit, dans le milieu, des produits qui sont a priori nuisibles.

Les produits les plus employés, de loin, sont les émulsionnants. Ce sont généralement des mélanges de solvants et de surfactants additionnés d'un stabilisant tel que la diéthanolamide. Dans un premier temps, on s'est préoccupé surtout d'efficacité et il est vite apparu qu'aucun produit ne serait apte à traiter toute la gamme des produits pétroliers existants. On a donc recherché des formules d'émulsionnants adaptées aux différents types afin d'obtenir une émulsion stable contenant de 30 à 70 % d'huile aux températures ordinaires de la mer. Les émulsions contenant trop d'eau consomment trop d'émulsionnants, sont moins stables et, augmentant le volume de la nappe, augmentent le risque de souiller de larges étendues.

Parallèlement on s'est inquiété de la toxicité et on a écarté toutes sortes de substances qui avaient été utilisées primitivement telles que les solvants chlorés ou aromatiques, ou les produits phénoliques. De même on a substitué aux surfactants anioniques des non-ioniques biodégradables. Cette sélection systématique des constituants a fourni des émulsionnants qui sont à la fois plus efficaces et infiniment moins toxiques que ceux dont on disposait au moment du Torrey Canyon. Pour fixer les idées, la LD 50/48⁺⁺ est passée de quelques dizaines de ppm à quelques milliers à l'égard de mêmes organismes tests (PERKINS & col.). A noter que la toxicité de ces produits diminue sensiblement 1 ou 2 jours après leur emploi du fait de l'évaporation du solvant (LACAZE).

Il faut aussi remarquer que généralement l'émulsion formée avec le pétrole est beaucoup plus toxique que le pétrole lui-même tant à l'égard des végétaux que des animaux, probablement parce qu'elle pénètre plus aisément dans les tissus. Toutes ces constatations ont suscité une vive émulation entre les fabricants pour mettre au point des produits aptes à traiter le pétrole et de faible toxicité. Les services officiels pour leur part se préoccupent de définir un cahier des charges des performances que les produits doivent accomplir pour être admis à l'emploi en cas de sinistre.

5) hydrocarbures cancérogènes

Avant de conclure sur les hydrocarbures, il convient de mentionner que certains d'entre eux polycycliques comme le 3-4 benzopyrène sont cancérigènes. Le benzopyrène existe dans divers bruts à des doses dépassant 100 ug/100 ml ; il se produit aussi par combustion aux températures comprises entre 400° C et 1 200° C, en particulier dans les moteurs à explosion et ceci fut une source d'inquiétude. Le benzopyrène peut s'accumuler dans la chaîne alimentaire. Des cas de cancer ont été signalés chez des poissons vivant à proximité des raffineries. Cependant les risques de provoquer un cancer chez l'homme par le benzopyrène qui se trouve occasionnellement dans les animaux marins paraissent de très loin inférieurs à ceux auxquels il s'expose en fumant ou en respirant les gaz de combustion des voitures (PERDRIAU).

Des recherches plus poussées montrèrent :

- 1°) que le benzopyrène est synthétisé normalement par de nombreux végétaux allant des bactéries anaérobies (Clostridium) aux végétaux supérieurs, aussi bien à terre qu'en milieu aquatique,

2°) que des nombreuses bactéries marines (Bacillus) sont capables de dégrader le benzopyrène à une vitesse comparable à celle des biosynthèses signalées ci-dessus.

En définitive, le risque benzopyrène apparaît mineur, à moins de cas très particulier (coquillages vivant sur des épaves goudronnées).

POLLUANTS DONT LA NOCIVITE AUGMENTE AVEC LE TEMPS

Les produits fabriqués spécialement pour résister à l'usure du temps tels que les insecticides chlorés ou les chlorures de polyvinyle présentent un risque particulier parce qu'étant très difficilement dégradables par les processus physiologiques, ils s'accumulent dans les organismes et atteignent tôt ou tard la dose létale pour l'organisme où ils se trouvent. Le risque est particulièrement grand lorsque le produit en cause est capable de bloquer un enzyme indispensable à la respiration cellulaire ou plus généralement des radicaux essentiels aux transferts d'énergie.

Il en est ainsi également des métaux dits "lourds", soit qu'ils n'entrent jamais dans la constitution normale des tissus vivants comme Hg, Cd ou Pb, soit qu'ils y entrent en quantité si faible qu'un excès dérègle les processus vitaux. Les physiologistes qui ont découvert le rôle des "oligo-éléments" ont très vite trouvé qu'un excès de ces éléments cause des maladies spécifiques, l'excès étant parfois très près du minimum indispensable.

Ce type de polluant, fixé par les organismes les plus élémentaires, se transmet au long des chaînes trophiques par la voie digestive de telle sorte que leur concentration, après passage par plusieurs hôtes intermédiaires, atteint un facteur souvent supérieur 10^5 .

A) les produits organohalogénés

Ce sont surtout les organochlorés qui sont apparus les premiers sur le marché, et sont encore les plus employés. Beaucoup servent comme insecticides à des fins agricoles, ou pour l'hygiène publique, d'autres sont plutôt à usage industriel : chlorure de polyvinyle, diphénylpolychlorés (DPC ou en anglais PCB). Les D P C sont employés comme lubrifiants, comme plastifiants dans les peintures, les vernis et les matières plastiques et comme

isolants et fluides caloporteurs dans l'industrie électrique (transformateurs, radiateurs à huile). Leurs propriétés varient selon leur teneur en Cl (30 à 80 %) ; la solubilité dans l'eau notamment diminue quand la teneur en Cl augmente.

Le prototype des insecticides est le D D T qui, avec ses métabolites D D D et D D E, a fait l'objet de la majeure partie des études. Bien qu'interdit dans de nombreux pays, il est encore produit à raison de 3 millions T/an. On estime à 10 T/an la quantité revenant à l'océan par les retombées atmosphériques. Les insecticides organochlorés qui ont été les plus employés en France dans la dernière décade sont l'aldrine, l'hexachlorocyclohexane, le lindane, le D D T puis viennent, l'heptachlore, la telodrine, le chlordane, l'aramite, le kelthane, le léthane, le méthoxychlore.

Tous ces produits sont très peu solubles dans l'eau (0,001 à 10 ppm), très stables chimiquement, et ils persistent longtemps dans l'eau de mer. BUTLER estime la persistance du D D T à plus de 10 ans. Selon WERNER & WALDICHUK, la persistance des hexachlorocyclohexanes serait plus brève, mais excéderait néanmoins 1 an.

Les plus fréquents détectés dans le milieu marin sont les D P C, la dieldrine, le D D T et ses métabolites. Les D P C sont détectés dans toutes les eaux de surface, tant en Atlantique qu'en Méditerranée ou en Mer du Nord. Les teneurs voisines de 1 mg/l en haute mer sont nettement plus élevées à proximité des côtes (ELDER & VILLENEUVE 19 mg/l en Méditerranée) ; elles atteignent 1 à 10 mg/kg dans les sédiments littoraux des régions industrialisées.

D'après les expériences de YOSHIDA & coll. avec D P C marqués au ^{14}C , la fixation chez le poisson (carpe) a lieu à partir de la nourriture plus que par voie respiratoire.

Les organochlorés sont liposolubles. Ils s'accumulent par conséquent dans les tissus adipeux. C'est ainsi que chez un poisson maigre comme la morue, la teneur dans le foie peut être 1 000 fois plus forte que dans le muscle (VOLDUM-CLAUSEN & ROBIN). Chez un poisson gras, (hareng, sardine), la teneur dans le muscle est systématiquement plus élevée que celle trouvée dans le muscle de poisson maigre fréquentant les mêmes eaux (ALZIEU). Chez les truites, la teneur dans la graisse est supérieure à celle du foie.

Se trouvant concentrés dans les réserves lipidiques, les organochlorés sont susceptibles de causer des accidents y compris chez l'homme lors d'un amaigrissement rapide qui mobilise ces réserves en très peu de temps.

Le facteur de concentration par rapport à l'eau varie bien entendu suivant l'organisme, mais aussi suivant la formule du produit. Ainsi les D P C de faible poids moléculaire sont-ils retenus plus intensément que les plus lourds : les valeurs expérimentales sont souvent plus fortes que celles observées dans le milieu.

Le facteur de concentration du DDT par une diatomée a été trouvé de 265 (de LAVAUUR), celui du HCH par des algues pluricellulaires de 16 et 38 selon qu'il s'agit de l'isomère γ ou α . Le facteur de concentration chez les poissons semble se situer entre 100 et 1 000. Chez un mollusque filtreur comme la moule RISEBROUGH & coll trouvent en milieu naturel (Méditerranée) jusqu'à 690 000 aussi bien pour le DDT que pour les DPC. Des valeurs 10 fois moindres sont données chez Crassostrea virginica malgré l'aptitude de l'huître à retenir les organochlorés qui se trouvent dans l'eau (50 % de la quantité présente dans un aquarium en 6 H selon BUTLER). Chez les oiseaux pisciphages, le facteur peut aller jusqu'à 10^8 .

Du fait de l'accroissement du facteur d'accumulation chez les êtres les plus évolués, les teneurs en organochlorés dans les organismes constituant une biocénose vont en augmentant du phytoplancton au zooplancton, aux mollusques, aux crustacés, aux poissons et aux oiseaux.

Les teneurs trouvées actuellement dans les organismes marins varient d'une région à l'autre selon la contamination du milieu. Par exemple, elles sont 50 fois plus fortes dans les oeufs des oiseaux pisciphages de l'Arctique que dans ceux de l'Antarctique (TATTON & RUZICKA), elles sont 5 à 20 fois plus fortes en Méditerranée que dans l'Atlantique chez la même espèce. A proximité des côtes européennes, les teneurs en D P C sont ordinairement plus fortes que celles du (DDT + dieldrine) dans le même organe (jusqu'à 100 fois) (ALZIEU). Cependant les enquêtes les plus récentes témoignent plutôt d'une tendance à la régression de la contamination du milieu marin par les insecticides organochlorés.

Si les organismes contaminés sont replacés dans une eau propre, ils se décontaminent très lentement : par exemple, la teneur en DDT et en endrine de poissons persiste 16 mois après la disparition des insecticides dans l'eau ambiante (FAUST & SUFFET). A l'égard du DPC, les mammifères semblent mieux armés que les poissons puisqu'ils paraissent aptes à dégrader les moins chargés en Cl ($< 50\%$).

CONCENTRATION DE DERIVES ORGANOCHLORES PAR DES ORGANISMES A PARTIR D'UN MEME MILIEU

	D.D.T. et ses dérivés				Dieldrine	D P C	
	HICKEY 1966 lac Michigan	BUTLER 1967	KNEIP 1970 Hudson Riv.	FAUST 1966 Yellowston river	RAMADE	RAMADE	INSERM
Eau		1 à 5 ppb	1 ppb	10 ppb	indosable	0,27 ppm	0,1 à 30 ppb
Sédiments	14 ppb					0,49 ppm	3 à 10 ppm
Phytoplancton		70 ppb		80 ppb	1 ppb		0,01 à 0,04 ppm
Zooplancton			1 à 7,5 ppm		15 à 20 ppb		
Amphépodes	410 ppb						
Mollusques bivalves			1,5 à 5 ppm			2 à 3 ppm	
Crustacés					300 ppb	1,5 à 2,5 ppm	
Poissons	3,35 à 5,6 ppm	15 à 40 ppm	5 à 50 ppm	3,8 ppm		6 à 12 ppm	
Poissons de fond					100 à 200 ppb		
Oiseaux piscivores							
muscles			50 à 150ppm		1 à 2 ppm		24 ppm
cerveaux	21						
graisse	2 441						
Mammifères							
muscle							
graisse		880 ppm					

La toxicité des organochlorés varie beaucoup selon leur formule et d'une famille biologique à l'autre. Par exemple 0,05 ppm DDT inhibe la croissance de larves de clams alors que 5 ppm de lindane la favorise plutôt du fait que ce produit empêche le développement de microorganismes. La toxicité dépend beaucoup de la température ; celle du DDT est plus forte quand la température est plus basse.

Chez les végétaux, les dérivés organochlorés réduisent la photosynthèse et la productivité primaire : 50 ppb de DDT réduisent la photosynthèse de 30 à 60 % selon l'espèce phytoplanctonique, 1 ppm d'organochloré réduit la productivité primaire en 48 h de 50 à 95 % (Heptachlore 95 %, Chlordane 91 %, Dieldrine 85 %, DDT 77 %, aldrine, toxaphène, lindane 29 % (RAMADE)). Les DPC modifient l'utilisation des nutriments et surtout de Si O₂. Les espèces à matrice siliceuse plus sensibles que les autres sont inhibées dès que la concentration dépasse 10 ppb.

Chez les animaux, les insecticides organochlorés agissent sur le système nerveux et bloquent divers enzymes parmi lesquelles l'ATPase. On observe par exemple chez les salmonidés une réduction de la sensibilité de la ligne latérale et de l'activité locomotrice. Les DPC sont relativement moins toxiques.

Les larves sont infiniment plus sensibles que les adultes : la dose létale passe parfois de 1 à 100 d'un stade à l'autre, comme chez l'huître. 20 ppm du DPC Aroclor 1254 tue toutes les larves de mollusques.

Les crustacés qui sont des arthropodes comme les insectes pour la destruction desquels ont été inventés bon nombre d'organochlorés, se montrent particulièrement sensibles : 0,1 ppb DDT suffit à inhiber le passage au stade adulte de nauplii d'un copépode, 0,2 ppb détruit *Paeneus* sp. à 100 % en 30 j. La LC 50 sur la crevette est de 0,3 à 1,2 ppb selon la substance (heptachlore, endrine, lindane 0,3 à 0,4 ppb, DDT, chlordane, toxaphène, dieldrine 1,2 ppb) ; le carabe est un peu plus résistant que les crevettes.

A dose sub létale, les organochlorés réduisent de façon significative la croissance des coquilles d'huîtres : réduction de 20 % sur *C. virginica* par 1 ppb Aroclor 1254, réduction supérieure à 50 % par exposition de 96 h à des concentrations allant de 7 à 500 ppb selon les produits ; mais si l'huître est remise en eau propre, elle retrouve sa croissance normale. L'huître et la moule adulte ne sont pas affectées par 1 ppb de DDT, 2 d'aldrine, 5 de dieldrine, 50 de toxaphène.

Les gastéropodes supportent sans mal des concentrations plus fortes que les bivalves qui sont eux-mêmes plus résistants que les insectes.

Chez les poissons (mulet, corégone) la LC 50, 48 H se situe approximativement entre 100ppb et 1 ppm (BUTLER).

Les oiseaux paraissent assez résistants à une exposition directe, mais ils s'intoxiquent facilement en consommant des graines traitées, des crabes ou des poissons chargés en produits toxiques. A noter que l'action de certains organochlorés (DDE) sur le métabolisme du calcium entraîne une fragilité des coquilles d'oeufs telles que bon nombre sont détruites avant l'éclosion.

Du fait de la forte toxicité de la plupart des produits organochlorés, leur emploi est assez strictement réglementé sur le plan national aussi bien qu'international. A l'heure actuelle, seul le lindane reste autorisé en France. Diverses conventions internationales interdisent l'introduction dans les eaux de la mer par immersion ou rejet de ceux qui ne sont pas dégradables.

La destruction de ces produits à l'état de déchets ou de résidus de fabrication pose également un problème. La meilleure solution actuellement paraît être de les brûler dans des fours chauffés au fuel à une température supérieure à 1 300°C. Si les débits d'injection des organochlorés, du fuel et de l'air sont convenablement réglés pour maintenir la température, le taux d'incinération est de 99,9 %. La quantité H Cl produit (20 à 60 g/m³ de gaz brûlé) selon le produit comburé implique l'éloignement de l'installation de toute habitation. Aussi a-t-on monté de tels fours sur des bateaux spécialisés qui vont opérer assez loin des côtes, Dans ces conditions, le panache de fumée se disperse et se dissout en mer sans affecter le milieu de façon mesurable (retombée proche estimée à 15 g H Cl/m²).

LES BIOCIDES HYDROLYSABLES.

i - les organophosphorés.

Ces produits synthétisés pour servir d'insecticides sont des anti-cholinestérases. Un grand nombre de formules ont été réalisées pour atteindre une certaine spécificité dans l'action. Ils tendent à supplanter les organochlorés dont nous venons de voir les inconvénients. Beaucoup sont violemment toxiques pour l'homme, les poissons, les crustacés, nettement moins pour les batraciens. Ils sont à la fois hydrosolubles et liposolubles. Réputés faciles à hydrolyser, ils persistent néanmoins dans le milieu assez longtemps pour avoir

des effets secondaires : certains ont une durée de vie dépassant 1 000 j à 10°C.

Les informations relatives à leur toxicité sur les différentes espèces aquatiques sont beaucoup plus rares que celles concernant les organochlorés. Leur toxicité ne semble pas dépendre des caractéristiques de l'eau (pH, dureté). Certains ont des toxicités comparables à celles des organochlorés les plus actifs, d'autres sont bien supportés. Les organophosphorés agissent peu sur les algues.

Une mention spéciale doit être faite pour les organophosphorés employés comme démoussicants.

En raison de la gêne et du risque pour la santé que constitue une trop grande abondance de moustiques, il a paru nécessaire, depuis une trentaine d'années, de détruire les populations culicidiennes trop abondantes. La lutte commencée par épandage aérien de DDT a dû rapidement être abandonnée en raison de son manque de spécificité et de la persistance du DDT.

On substitua alors au DDT, des organophosphorés : d'abord le parathion, puis le fénitrothion, puis l'abate ; de plus on s'attaqua directement aux gîtes (mares et marais) à l'époque de l'éclosion des larves.

Les études que ALZIEU et MAGGI ont faites tant au laboratoire que sur le terrain montrent que :

- la durée de demi-vie sur le terrain du fénitrothion et de l'abate est sensiblement la même : respectivement 10 H 25 et 14 H à une température de 22° à 25°C.

- la dose larvicide est 5 fois plus forte pour le fénitrothion que pour l'abate.

- les dérivés de dégradation du fénitrothion sont encore toxiques alors que ceux de l'abate sont inoffensifs.

- la toxicité diminue très nettement dans l'ordre parathion, fénitrothion, abate.

Comparé au fénitrothion, l'abate est donc également persistant, efficace, à dose 5 fois moindre et moins toxique.

Un autre exemple de lutte insecticide où une étude systématique a permis de mettre au point une technique efficace et respectueuse de l'environnement est celui de la lutte contre la chenille processionnaire, véritable fléau des arbres feuillus. Après avoir employé à l'encontre de cette chenille divers produits chimiques, on a découvert qu'elle mourrait d'hémorragie si elle venait à être contaminée par un certain bacille Bacillus thuringensis.

On employa donc pour traiter les forêts des cultures de ce bacille répandues par voie aérienne. Puis on s'avisa d'isoler des cultures bactériennes, le principe actif, et après avoir vérifié sa spécificité, on l'utilisa seul, ce qui est beaucoup plus satisfaisant que de répandre des cultures bactériennes.

ii - Les herbicides : carbamates, triazines et dérivés de l'urée.

Les carbamates moins solubles que les organophosphorés sont comme eux des insecticides et parfois des herbicides. Ils s'hydrolysent lentement aussi bien en milieu acide que basique. Les chances de rétention par les organismes marins sont faibles. Leur toxicité est très faible pour l'homme ainsi que pour les poissons et les mollusques mais non négligeable pour les crustacés.

Les autres herbicides sont réputés peu toxiques pour les animaux aquatiques. Cependant les analyses en cours mettent en évidence une toxicité très réelle de certains de ces composés. Ici, comme dans beaucoup d'autres cas, les doses limites des divers produits de la même famille s'inscrivent dans un large intervalle.

MERCURE.

i - métaux non "biologiques".

Des accidents spectaculaires dans différentes parties du Monde, en particulier au Japon ont fait apparaître la faculté qu'a la faune marine d'accumuler des produits hautement toxiques comme les dérivés organiques du mercure, tout particulièrement les alkylmercures. La toxicité pour l'homme du méthylmercure, plus toxique que l'éthyl et le propylmercure, est environ 10 fois plus forte que celle des sels mercuriques.

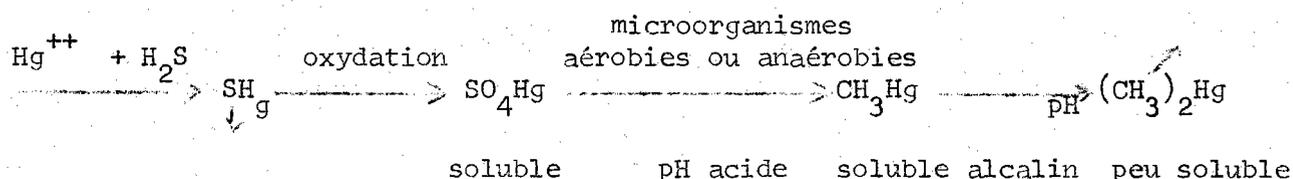
Le mercure existe naturellement dans de nombreux minéraux, notamment les combustibles fossiles et les minerais sulfurés. Il parvient à la mer de multiples manières :

Par voie aérienne, vient celui émanant des volcans, celui des fumées de combustion des combustibles fossiles (*) et du gaz issu du grillage des pyrites, chalcopyrites, blende, galène et surtout cinable. On estime à 80 000 T la quantité résidant dans l'atmosphère.

Par les eaux douces ou de ruissellement, arrive celui résultant de ses usages dans l'industrie : électrode circulante, contacteurs, peinture, catalyseur, ou dans l'agriculture : produits phyto-sanitaires. Dans ce dernier cas, il est plus souvent sous forme de dérivés organiques. Un apport par les éruptions volcaniques sous-marines n'est pas exclu.

(*) Teneur en mercure du charbon 10 à 8 530 ppb, dans les naphtes de Californie 1 900 à 21 000 ppb. Production mondiale en 1971 = 10 700 T.

Le mercure qui parvient en milieu aquatique s'adsorbe sur les argiles et les sédiments et peut être piégé sous forme SH_g si $3 < \text{pH} < 6$. Dans ces conditions de pH, il peut être méthylé en CH_3Hg par les microorganismes aérobies s'il est à l'état Hg^{++} , anaérobie s'il est à l'état Hg , le donneur de méthyl étant la cobalamine (vit. B 12). CH_3Hg est très soluble dans l'eau et volatil. Si le milieu est alcalin (ce qui est le cas en mer) il passe à l'état de $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ peu soluble, instable et volatil.



Il y a donc là une voie de transfert du mercure vers l'atmosphère, mais la méthylation est très lente et le temps de résidence dans les sédiments est vraisemblablement de l'ordre du siècle. Résultant d'une action microbienne, elle est favorisée par la présence de matières organiques qui facilite le développement des bactéries. D'après les études faites sur la calotte glaciaire antarctique, la pollution par le mercure de notre globe croît, mais ne paraît pas en relation étroite avec l'avènement de l'ère industrielle. Des études plus localisées témoignent pourtant d'une augmentation sensible depuis le début du siècle : doublement pendant les 50 premières années, nouveau doublement dans les 20 suivantes (YOUNG & coll.).

La teneur du mercure des sédiments marins en zone non polluée est de l'ordre de 20 à 200 ppb. Dans l'eau de mer du large, les teneurs sont normalement de 0,01 à 0,1 ppb.

Le mercure présent dans l'eau est fixé par les bactéries, les virus, le phytoplancton, les algues. Il pénètre ainsi dans la chaîne alimentaire par voie digestive, mais il peut aussi être absorbé directement à partir de l'eau aussi bien par les mollusques que par les poissons.

La vitesse d'accumulation dépend de la forme sous laquelle il se trouve : organique ou inorganique.

D'après les expériences de MIETTINEN avec Hg marqué, le méthylmercure est retenu beaucoup plus efficacement que Hg^{++} par le poisson mais moins bien par les mollusques.

A noter que les poissons et les mammifères marins semblent être capables de transformer le mercure ingéré en méthylmercure, car le taux de méthylmercure dans leurs tissus est fréquemment élevé : 91 % (82 à 100 %) dans le muscle de germon atlantique, 67 % (49 à 100 %) dans celui du thon rouge méditerranéen (CUMONT), 13 % à 100 % dans des muscles de mammifères marins (THIBAUD).

On peut penser que la méthylation, au moins chez les mammifères marins, fait partie du processus d'élimination car le pourcentage de méthylmercure est particulièrement élevé quand la teneur totale est faible.

Distribution Hg dans les organes selon la forme sur laquelle il est ingéré (MIETTINEN & coll. 1970)			Distribution Hg trouvée dans deux mammifères échoués. (THIBAUD)				
B r o c h e t			Dauphin de RISSO		Dauphin bleu & blanc		
	Hg	CH_3Hg	Hg	CH_3Hg	Hg	CH_3Hg	
muscle blanc	6,4	7,4	muscle	16,0	3,4	23,8	3,0
branchies	8,5	14,7	lard	1,7	1,2	5,1	1,3
pseudobranchies	48,7	68,2	coeur	33,0	3,9		
cerveau	7,4	9,0					
intestin	41,4	82,5					
foie	37,0	75,5	foie	905,0	13,2	344	7,5
rein	23,9	30,6	rein	6,0	3,8	39,2	1
			rate	272,0	6,0	529	8,2

Chez un même individu, le taux de fixation varie d'un organe à l'autre, notamment selon leur richesse en radicaux sulfhydriles, mais la répartition dans un organe déterminé paraît homogène. Chez les mollusques, le mercure se fixe préférentiellement dans les branchies et les viscères, chez les vertébrés dans tous les organes riches en sang : rate, foie, rein, estomac, coeur. Chez le thon, la teneur du muscle rouge est toujours plus élevée que celle du muscle blanc. La teneur dans le cerveau est relativement

faible, celle des tissus adipeux plus encore malgré la solubilité de CH_3Hg dans les lipides. Le mercure est donc bien fixé sur les protéines.

Le processus apte à rompre cette liaison protéique et à mobiliser le mercure pour l'éliminer est très peu efficace de sorte que le temps d'élimination après retour en ambiance non polluée est très long, même si dans les premiers jours qui suivent l'ingestion le taux de mercure décroît rapidement. Le temps pour éliminer 50 % de mercure, déterminé par MIETTINEN à l'aide de Hg marqué, ingéré "per os", va de 100 à 1 000 jours selon les espèces. Il est à peu près le même quelle que soit la forme sous laquelle le mercure se trouve, mais si celui-ci est absorbé par la chaîne alimentaire il s'élimine beaucoup plus difficilement surtout s'il est à l'état inorganique.

De ce fait, les teneurs en mercure sont relativement faibles dans les espèces végétariennes (clupéidés) ou microphages (poissons plats) tandis qu'elles sont particulièrement élevées chez les poissons de fond et chez les grands carnivores : grondins, bars, muges, congres, raies, requins, thons, espadons, poulpes.

On observe généralement des teneurs en mercure d'autant plus fortes que la taille est plus grande dans une espèce donnée (thon, morue, plie, truite).

Les oiseaux pisciphages et les mammifères qui consomment beaucoup de céphalopodes atteignent des teneurs encore plus élevées.

Dans une espèce donnée et à taille égale, les teneurs varient selon les lieux de pêche. Ainsi les teneurs en Méditerranée sont systématiquement plus fortes que dans l'Atlantique. A ce sujet, on peut remarquer que le bassin occidental de la Méditerranée recèle les mines de cinabre les plus importantes connues et produit environ la moitié du mercure extrait annuellement dans le monde.

Lorsque des dérivés du mercure sont rejetés dans un milieu aquatique, la contamination de la biocénose reste très localisée. Ainsi en s'éloignant d'un port où les coques de bateaux peintes avec des peintures à base de Hg ont cédé du mercure à la faune sédentaire pendant des années, trouve-t-on un gradient très rapide des teneurs. Si les apports de mercure cessent, la contamination diminue très lentement comme si une sorte de cycle sédiment/eau/matière vivante s'était instaurée sur place.

Le taux de mercure atteint dans les tissus dépend bien entendu de la résistance à l'intoxication propre à l'espèce. Celle-ci paraît fort inégale : les crustacés (crabes et crevettes) et les huîtres plates qui sont particulièrement sensibles, paraissent même menacés dans leur vie, car la dose létale pour leurs larves semble être la concentration habituelle de l'eau de mer non polluée. Les concentrations létales avancées pour les adultes sont nettement plus élevées (CONNOR) : crabe Carcinus maenas 1,2 mg/l d'eau de mer à 15° C en 48 h, crevette grise Crangon crangon qui est plus résistante que Pandalus montagui 5,7 mg/l, huître Ostrea edulis 4,2 mg/l dans les mêmes conditions. Les concentrations létales semblent être du même ordre de grandeur chez les poissons : 0,1 mg/l selon IDYLL, 15 mg/kg de poids corporel chez la truite et le brochet selon MIETTINEN et coll. Elles sont très supérieures aux concentrations trouvées dans l'eau de mer habituellement. De plus, elles ont été obtenues en aquarium. Or, devant les teneurs très élevées rencontrées parfois chez des animaux marins sans que ceux-ci paraissent en souffrir, on suppose des effets antidotes de certains éléments tels que le selenium mais ceci n'est pas absolument démontré.

Chez l'homme, le méthylmercure est un toxique du système nerveux qui peut avoir des conséquences fatales si l'ingestion est répétée pendant assez longtemps. Le temps de demi-vie paraît être de 70 j. La présence de Hg peut être recherchée par l'analyse des cheveux et surtout du sang. Une enquête faite par Mme Astier DUMAS sur la teneur en Hg des cheveux d'un échantillon de la population judicieusement réparti dans toute la France confirme que cette teneur est en relation avec la consommation habituelle d'animaux marins par les sujets, mais ne révèle aucun risque d'intoxication comme l'avait d'ailleurs démontré les calculs faits d'après la consommation connue en France et la teneur des poissons et autres animaux marins de diverses origines qui sont mis sur le marché.

Certains ont cherché à définir la dose limite admissible journalièrement par l'homme : celle-ci a été estimée par la Commission suédoise à 300 µg/j sous forme de méthylmercure et par l'OMS à 3 mg Hg total par semaine ou 2 mg CH₃Hg. Notons que les accidents spectaculaires qui ont ému l'opinion ont toujours été suscité par un emploi ou un rejet direct d'alkylmercure et non par celui qui est éventuellement synthétisé par la faune aquatique.

C A D M I U M

Bien que les informations sur le cadmium soient beaucoup moins nombreuses que celles relatives au mercure, ce métal paraît à craindre car lorsqu'il est ingéré par l'homme, il semble n'être excrété que très lentement. Il est normalement associé à Zn dans les déchets miniers. Il est fort employé en métallurgie ainsi qu'en peinture et pour la décoration des céramiques, de sorte qu'on le retrouve en quantité non négligeable dans l'eau des rivières, les effluents urbains et industriels, ainsi que dans les boues municipales.

La teneur habituelle dans une eau de mer non polluée est de 0,01 à 0,02 ppb.

Le cadmium paraît se fixer sur le phytoplancton essentiellement par adsorption, avec un facteur de concentration de l'ordre de 10 000. Selon COSSA travaillant sur Phaeodactylum tricornutum, Cd^{++} se fixe sans saturer tous les sites possibles et s'élimine ensuite assez facilement avec les matières organiques excrétées par la cellule (cystéine).

Selon PRESTON, le facteur de concentration, à partir d'une même eau, serait en moyenne de 100 pour les poissons, 1 000 pour les crustacés, 1 000 à 100 000 pour les mollusques, 100 000 pour le plancton. Chez les poissons, on n'observe pas de différences significatives entre ceux qui vivent en eau saumâtre, sur le littoral ou au large. Le foie et le rein, éventuellement la rate contiendraient respectivement 10 et 30 à 80 fois plus de cadmium que le muscle (JAAKOLA et coll.). On n'a pas mis en évidence, dans la matière vivante de dérivés alkyles volatiles et plus toxiques que la forme inorganique.

Dans un même tissu Cd se fixe beaucoup plus intensément sur la fraction protéique que sur les lipides bien qu'il semble intervenir dans la phosphorylation de ceux-ci (BOUDENE).

Une certaine sélectivité se manifeste dans la fixation. Ainsi les huîtres, les gonades de crabe et surtout les coquilles Saint-Jacques et les patelles contiennent habituellement des teneurs en Cd relativement élevées comparativement à celles des autres organismes vivant au même lieu comme l'indique le tableau ci-après.

Noms d'espèces	MER	NG	Min.	Max.	Moy.
<u>Mytilus edulis</u> - moules	N	6	0,17	0,42	0,31
<u>Ostrea edulis</u> - h. plates	Atl.	8	0,27	0,75	0,43
<u>Crassostrea gigas</u> - h. creuses	"	2	0,80	0,40	0,35
<u>Venus verrucosa</u> - praires	"	5	0,17	0,38	0,28
<u>Tapes decussatus</u> - palourdes	"	2	0,16	0,32	0,24
<u>Pecten maximus</u> - coquilles St Jacques	"	6	0,90	2,85	1,98
<u>Clupea harengus</u> - hareng	N		0,03	0,12	0,05
<u>Gadus morhua</u> - morue	"		0,03		0,08
<u>Gadus aeglefinus</u>			0,03		
<u>Pleuronectes platessa</u> - plie	M		0,03		0,10

La toxicité directe a été déterminée pour quelques espèces communes. La concentration létale 50 % en 96 h a été trouvée pour la moule Mytilus edulis 25,0 mg/l ; la Mye Mya arenaria : 2,2 ; le Bernard l'Hermitte Pagurus longicarpus 0,32 mg/l ; la crevette Crangon septemspinosa 0,32. Les valeurs indiquées pour les poissons sont du même ordre de grandeur, mais elles tombent au voisinage de 0,01 mg/l lorsque les tests sont prolongés 8 jours (168 h) au lieu de 4. La mort survient chez les crevettes alors que la teneur en cadmium des tissus est nettement plus faible que celle qu'on aurait avec le mercure (WILSON et CONNOR).

Bien que les enquêtes soient actuellement beaucoup moins développées que sur le mercure, il ne semble pas que les teneurs trouvées chez les animaux marins comestibles constituent dans nos régions un risque pour le consommateur. (dose hebdomadaire admissible d'après les experts FAO/OMS : 400 à 500 ug/personne).

Quant au danger pour la faune elle-même, il se présente dans les mêmes termes que dans le cas du mercure.

P L O M B

La teneur naturelle du plomb dans l'eau de mer est très basse. Les auteurs britanniques qui suivent cette question depuis fort longtemps constatent un accroissement constant du plomb dans le milieu naturel, en particulier depuis l'addition de plomb tétraéthyle aux essences, qui remonte à

une quarantaine d'années. La concentration dans les océans est plus forte à la surface qu'au fond : respectivement 0,2 µg/l et 0,03 µg/l dans l'Atlantique. L'introduction annuelle de Pb dans les océans est estimée à 200 000 t.

Les concentrations sont sensiblement plus élevées dans les mers bordant des régions industrielles du fait du très large emploi qui est fait du plomb. Il en est de même des teneurs relatives trouvées dans les animaux marins. Les boues extraites des stations d'eaux usées en contiennent jusqu'à 1 g/kg de poids sec.

Les données que nous possédons sur le plomb en milieu marin sont très fragmentaires. Elles laissent supposer une analogie avec le cadmium. Le plomb n'existe pas normalement parmi les constituants biologiques, mais il est susceptible de s'accumuler dans les tissus animaux. Les teneurs trouvées dans les organismes marins sont très faibles, elles sont habituellement plus élevées chez les crustacés et les mollusques que chez les poissons du même lieu. Elles diminuent en s'éloignant de la côte. Les valeurs données vont de 0,2 à 1,2 mg/kg exceptionnellement 6 chez les poissons, 0,2 à 4 mg/kg chez les crustacés, 0,2 à 0,8 mg/kg chez les mollusques.

Dans une région donnée, la teneur en plomb d'un poisson gras comme le hareng est plus élevée et plus variable que celle de poissons maigres comme la plie, l'églefin, la morue (TOPPING). Cette teneur augmente avec le poids chez la morue et chez la plie cependant elle diminue chez la plie âgée sans doute par suite de malnutrition ou d'un changement de milieu (PORTMANN). Chez les crabes, le plomb se trouve surtout dans l'hépatopancréas chez les crevettes dans la carapace. Globalement le facteur de concentration est voisin de 10^5 chez les poissons, 10^4 chez les crustacés, il est plus élevé chez les moules que chez les autres mollusques.

Lorsque Pb s'est accumulé dans les tissus, son élimination est très lente.

La toxicité aiguë estimée par la LC 50/96 h est observée chez les animaux marins pour des concentrations de 1 à 10 µg/l eau de mer ; elle croît en présence de Zn ou Hg. Elle est beaucoup plus élevée pour les larves de bivalves que pour les sujets adultes (LC 50 à l'égard des moules 1 mg en 129 j à l'égard des larves de *C.virginica* 2,45 µg/l). Les effets à long terme sont assez mal connus en dehors de l'anémie chez les poissons, une réduction de la croissance et de la faculté de reproduction. On a observé une certaine destruction des globules rouges chez les loups de mer.

ii - Les oligoélémentsZ I N C

Le zinc est un élément qui entre dans la composition de diverses porphyrines et d'une bonne dizaine d'enzymes parmi lesquels surtout des déhydrogénases. Il est donc normalement présent dans les tissus vivants mais un excès de zinc dans le milieu peut néanmoins être nocif. La teneur ordinaire dans l'eau de mer du large est 3 µg/l, celle des eaux littorales est évidemment bien plus élevée surtout au voisinage des aires industrielles puisque le zinc est un métal d'emploi très courant. La teneur dans les sédiments littoraux est fréquemment de plusieurs centaines de mg/kg.

Le zinc est concentré par les algues ainsi que par la faune marine mais de façon très variable suivant l'espèce. Les facteurs de concentration connus vont de 500 à 100 000, les poissons se signalant par une faible rétention, les huîtres au contraire par une accumulation très forte.

En fait, les résultats relatifs à l'accumulation du zinc sont passablement discordants, ce qui semble indiquer la multiplicité des mécanismes en jeu. On peut cependant constater que la teneur en Zn des animaux marins est très comparable à celle des tissus animaux en général.

Les sels de zinc semblent nuisibles surtout par voie digestive. Un excès provoque des lésions des branchies. Il y a synergie avec les sels de plomb et de mercure.

La toxicité aiguë à l'égard des animaux marins se manifeste à des concentrations de 1 à 10 mg/l. Chez la crevette Palaemon serratus, les premiers troubles apparaissent avec 1 mg/l, la mort est très rapide avec 10 mg Zn/l.

Les larves sont beaucoup plus sensibles au zinc que les adultes. Voici par exemple la LC 50/96 h pour deux espèces d'huîtres :

	<u>adulte</u>	<u>larve</u>
<u>Ostrea edulis</u>	100 mg/l	0,1 mg/l
<u>Crassostrea</u>	5,3 mg/l	0,3 mg/l
		0,006 mg/l pour un oursin

CUIVRE

Le cuivre est connu comme élément indispensable à la vie, en particulier pour les invertébrés où il constitue l'élément actif du pigment respiratoire l'hémocyanine. Mais, sous forme ionisée, c'est aussi un agent très efficace pour détruire les microorganismes ou les larves. La concentration dans les eaux du large est de 1 à 2 µg/l, et dans les eaux côtières elle peut être bien plus élevée. Des maxima de 12 µg/l ont été signalés en Atlantique Nord, 15 dans le golfe du Mexique, 26 en Mer du Nord (BOUGIS).

Dans une eau contenant des ions cuivre, les animaux marins ont tendance à le fixer, mais l'accumulation est très variable selon les organismes. Certains végétaux parmi lesquels des algues, comme les fucus, les entéromorphes ou les blidingia ont un facteur d'accumulation proche de 20 000. Aussi dans les milieux contenant du cuivre, les poissons qui se nourrissent de phytoplancton ont-ils des teneurs en Cu relativement plus élevées et variant dans un intervalle plus large que les autres. Néanmoins, l'accumulation du cuivre est peu importante chez les poissons. Selon PORTMANN & NEAL, la teneur en Cu reste à peu près constante chez les poissons maigres comme la morue et la plie pendant les premières années de leur vie ; elle croît seulement après plusieurs années. Ceci semble indiquer que l'organisme des poissons est apte à répondre à une surcharge de Cu au moins momentanément et dans certaines limites.

Il n'en est pas de même chez les mollusques bivalves et les polychètes. Le facteur d'accumulation chez l'huître peut atteindre 1 000 ; il est nettement moindre chez la moule ou la coquille Saint-Jacques. Des teneurs de 100 mg/kg chair fraîche ont été signalées chez Ostrea, 10,5 à 24,7 mg dans Crassostrea du Tage, 21 à 22 mg dans celles du Sado, 75 mg dans des moules. Les huîtres chargées en Cu prennent une teinte jaune-vert caractéristique et un goût âcre déplaisant. Le cuivre s'accumule aussi facilement chez le crabe. Il se fixe préférentiellement dans le foie et le rein. L'élimination du cuivre par séjour en eau propre est extrêmement lente chez les huîtres.

Un excès de cuivre affecte la croissance des algues et la photosynthèse.

Cu^{++} inhibe l'activité ciliaire chez les moules ; 0,15 mg/l réduit la filtration de 50 % ; 0,28 mg/l détruit 50 % des spécimens en 96 h.

La sensibilité des animaux marins varie dans un large intervalle suivant les espèces et leur stade de développement. Les larves sont normalement plus sensibles que les adultes : ainsi CONNOR trouve que les LC 50/48 h respectives de l'adulte et de la larve sont dans le rapport de 182 chez le crabe Carcinus maenas, 89 chez la crevette Crangon crangon ; la concentration létale pour l'oursin serait de 0,01 ppm alors qu'elle est de 48 µg/l pour le petit saumon.

ETAIN - CHROME

De nombreux dérivés alkylés et arylés de l'étain ont été synthétisés. Ils sont doués de propriétés fongicides et sont très toxiques pour les mammifères. Il ne semble pas que leurs effets sur les organismes aquatiques aient été déterminés au cas où ils seraient substitués aux alkylmercure.

Certains auteurs se préoccupent de la pollution par le chrome. Celui-ci est effectivement nocif sous forme hexavalente, mais en milieu marin, il est rapidement ramené à la forme trivalente.

C O N C L U S I O N

La pollution des eaux marines est devenue depuis une dizaine d'années un sujet de préoccupation pour beaucoup de gens, mais elle existe depuis bien longtemps, car elle est liée à l'activité humaine.

Bien qu'elle atteigne la mer du fait des activités de navigation ou par voie aérienne, elle est plus souvent la conséquence directe des activités sur le littoral et dans le proche arrière pays.

Dans la majeure partie des cas elle reste cantonnée aux abords immédiats de la côte, mais c'est justement la partie la plus riche de la mer et la plus intéressante pour nous. Il faut donc s'efforcer de réduire la pollution, soit en limitant les quantités de produits nocifs rejetés, soit en aménageant les rejets de telle sorte qu'ils ne causent pas de dégâts.

La difficulté est d'apprécier correctement les dommages potentiels d'un déversement. En effet, la toxicologie des animaux aquatiques est à peine ébauchée. On a quelques données sur la toxicité de certaines substances mais il est très osé d'extrapoler ces connaissances, car la toxicité d'un même produit varie beaucoup selon l'espèce qui s'y trouve exposée et selon le stade de l'existence auquel l'exposition survient. Il n'y a pas d'ordre constant dans la sensibilité aux polluants entre mâle et femelle, larve et adulte, crustacés, mollusques ou poissons.

Dans un groupe de substances chimiques ayant les mêmes propriétés chimiques, physiques ou biologiques (détergents, hydrocarbures, pesticides, métaux lourds), la toxicité peut varier dans un intervalle considérable : un intervalle de 1 à 10 000 n'est pas rare entre le moins toxique et le plus toxique du groupe.

De plus les évaluations qui peuvent être faites en laboratoire correspondent plus ou moins à ce qui se passe dans la nature : elles sont sujettes aux artéfacts, elles peuvent amplifier indûment certaines réactions qui seraient normalement contrebalancées dans la nature ou ignorer

des phénomènes qui surviendraient certainement si le milieu n'était pas maintenu artificiellement dans des conditions idéales pour la vie de l'espèce étudiée et à l'abri des interférences entre pollutions.

Mais si l'on s'en tient aux observations in situ, la perspicacité la plus fine ne peut distinguer les effets à long terme des polluants et ceux dus aux variations naturelles saisonnières ou autres, sans une observation prolongée et approfondie. On risque donc de se trouver devant une situation irréversible lorsque les effets sont apparents.

Pourtant, nous ne sommes pas complètement désarmés devant la pollution. Lorsque les polluants sont aisément dégradables, ils peuvent être traités avant rejet ou rejetés dans des conditions telles qu'ils n'altèrent pas sensiblement le milieu.

Si les produits utiles ou nécessaires pour notre activité ne sont pas aisément dégradables, une meilleure sélection parmi ceux existants, ou des études appropriées aboutissent plus ou moins vite à trouver des produits ayant la propriété utile et de moindres inconvénients. Ainsi a-t-on réduit d'un facteur de 1000 en 10 ans la toxicité des produits employés pour disperser les nappes d'hydrocarbures en mer. On peut aussi améliorer la spécificité des produits, notamment dans le cas des pesticides de manière à toucher seulement l'espèce visée sans toucher aux autres.

On s'est aussi préoccupé d'empêcher la dispersion dans la nature de déchets polluants et, le cas échéant, de les détruire sans qu'ils nuisent.

Rappelons à cet égard l'effort de réglementation considérable qui a été fait en France depuis la publication de la loi du 16 décembre 1964 relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution. Un effort assez comparable a été entrepris ces dernières années sur le plan communautaire ; plusieurs directives ont été publiées ou sont préparées dans ce sens. Sur le plan international, les conventions destinées à prévenir la pollution des mers se sont multipliées. Citons celle de Londres sur les hydrocarbures (12 mai 1954), celle d'Oslo

sur les immersions par navires et aéronefs (15 février 1972), celle de Londres sur l'immersion des déchets (29 décembre 1972), celle de Paris sur les pollutions marines d'origine tellurique (4 juin 1974), enfin celle de Barcelone sur la pollution en Méditerranée (février 1976).

En définitive, s'il est commode de réunir sous le vocable de pollution, les atteintes à l'intégrité du milieu marin, il faut garder dans l'esprit que leur multiplicité même donne le moyen de les combattre. Il n'y a pas de solution passe partout : chaque cas est à examiner, mais il est rare qu'une étude suffisante n'amène pas à palier plus ou moins complètement les nuisances qui étaient apparues à l'origine inévitables.

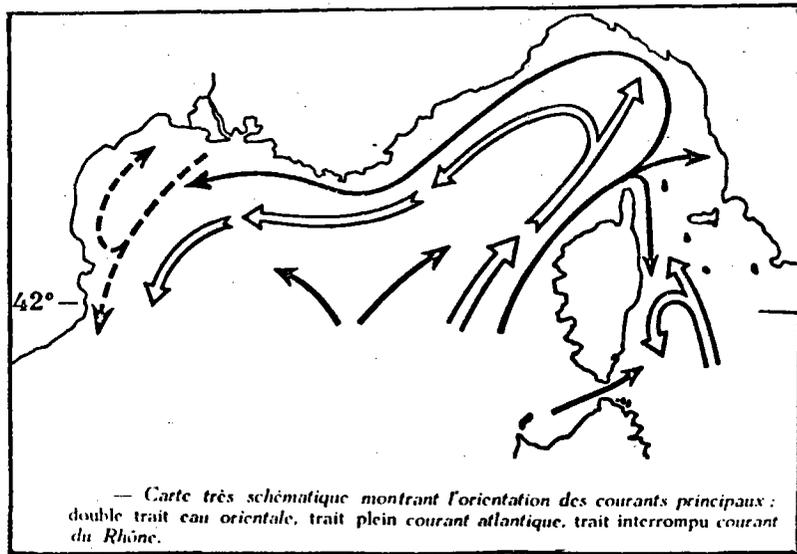
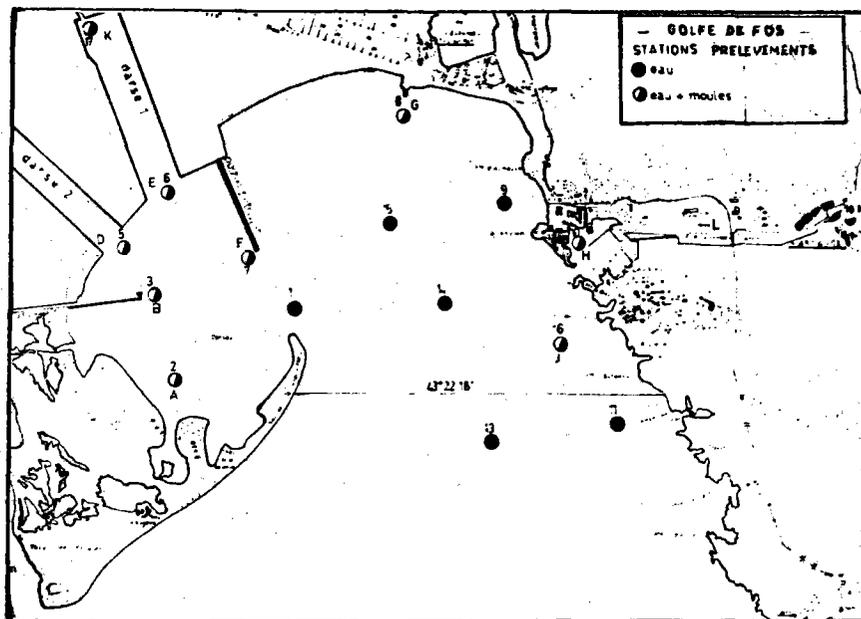
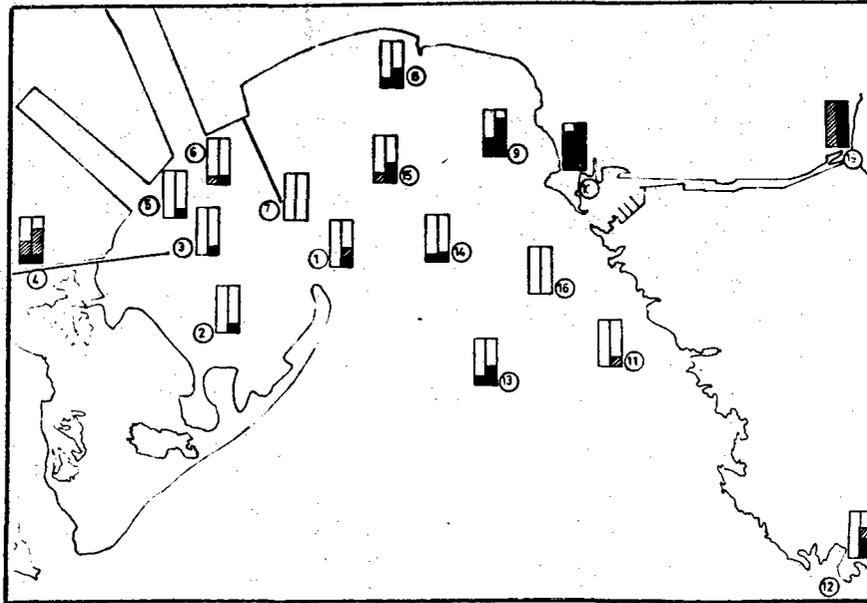
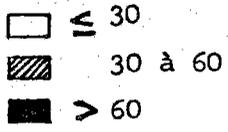


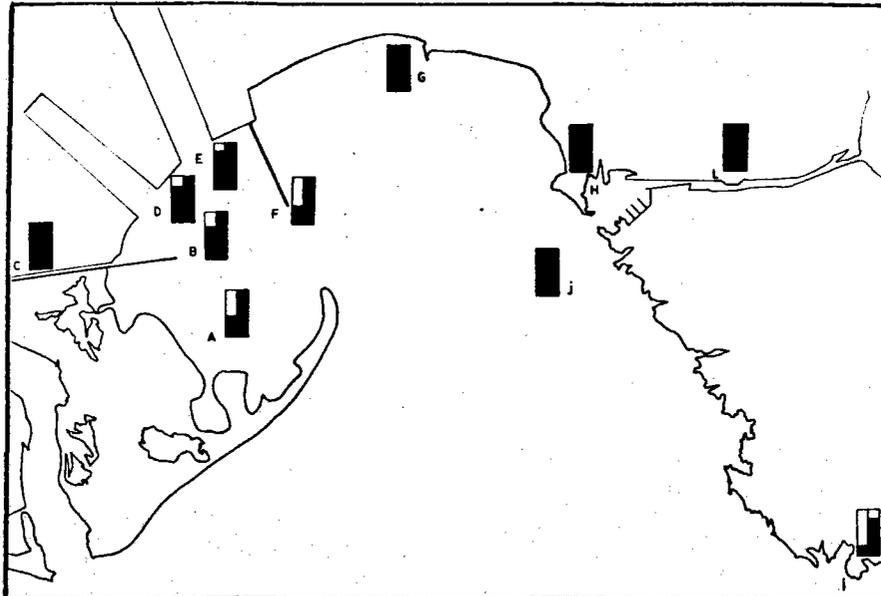
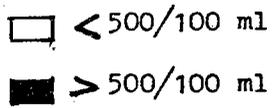
figure 1



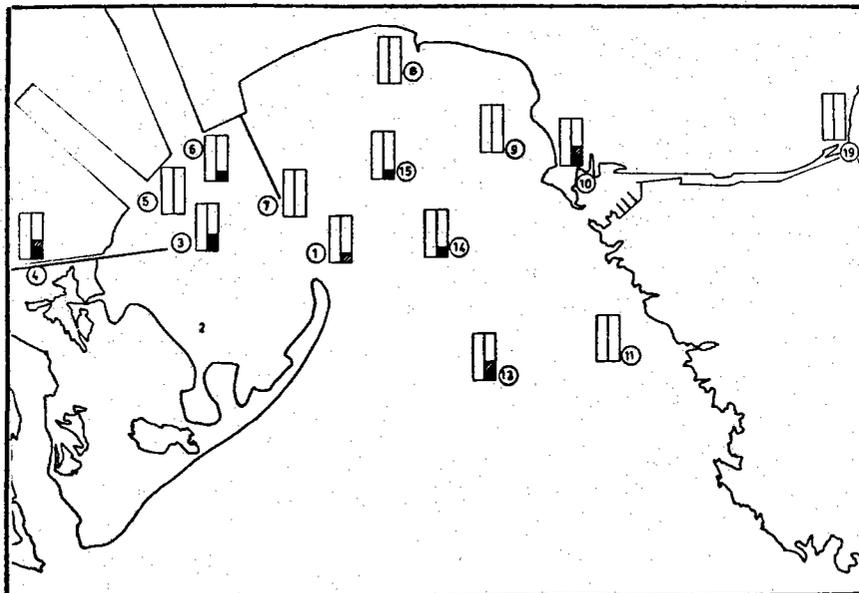
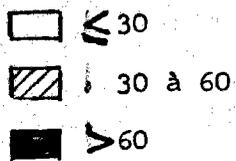
FREQUENCE RELATIVE DES TENEURS ET GERMES FECAUX
 colonne gauche : E.coli - colonne droite : Streptocoques



Eau de surface



Moules

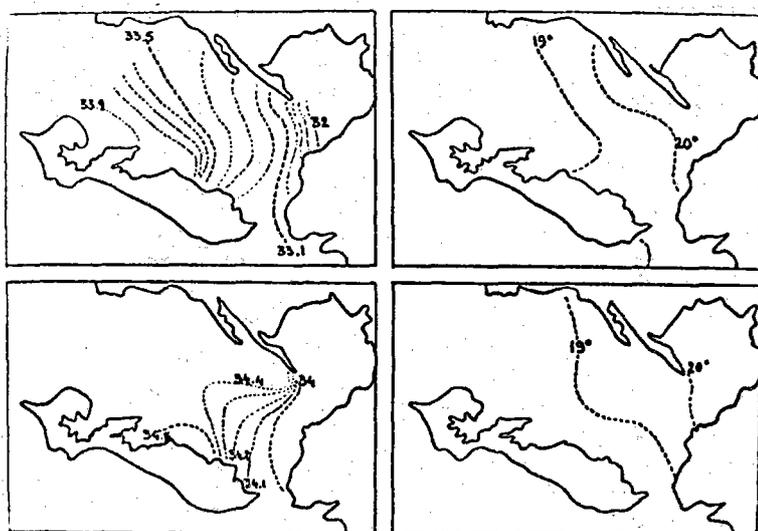
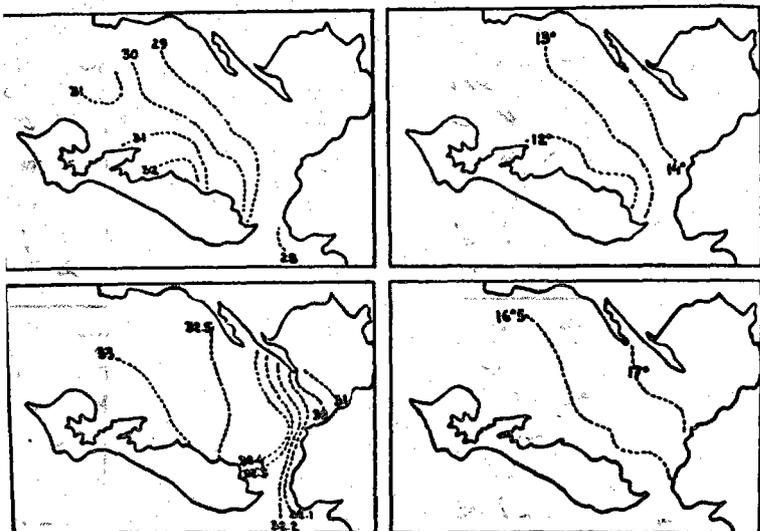


Eau de fond

TEMPERATURE ET SALINITE DES EAUX DANS LE PERTUIS BRETON
(1951 - 1952)

2a

2b

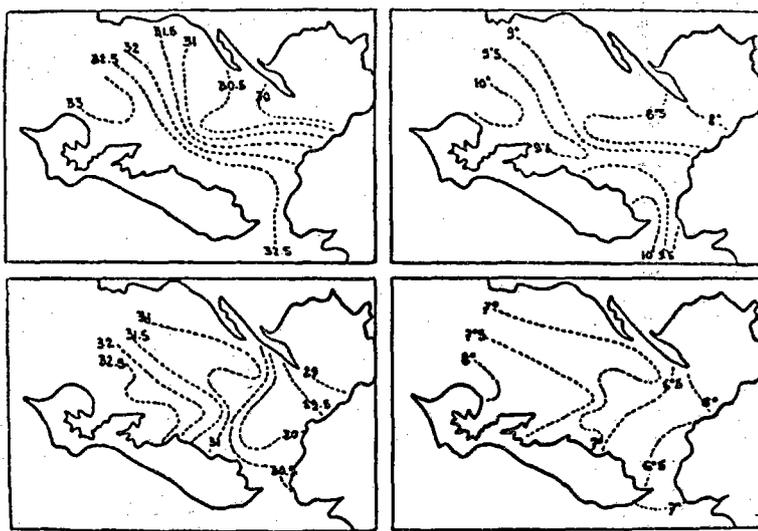
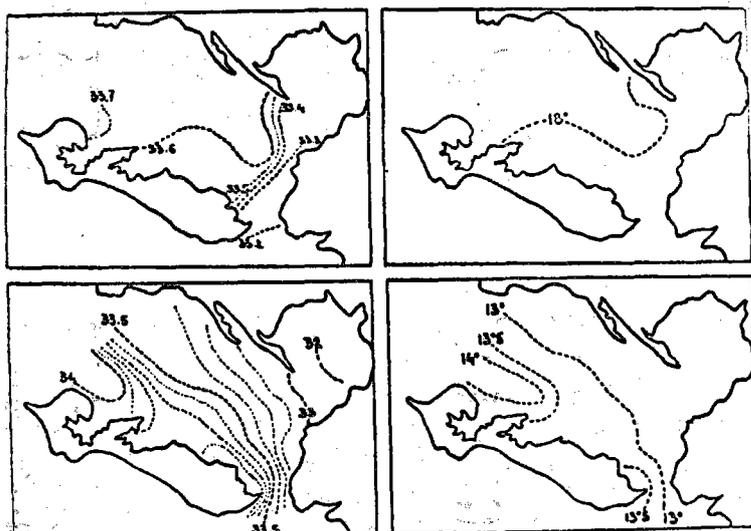


AVRIL, JUIN

JUILLET, AOUT

2c

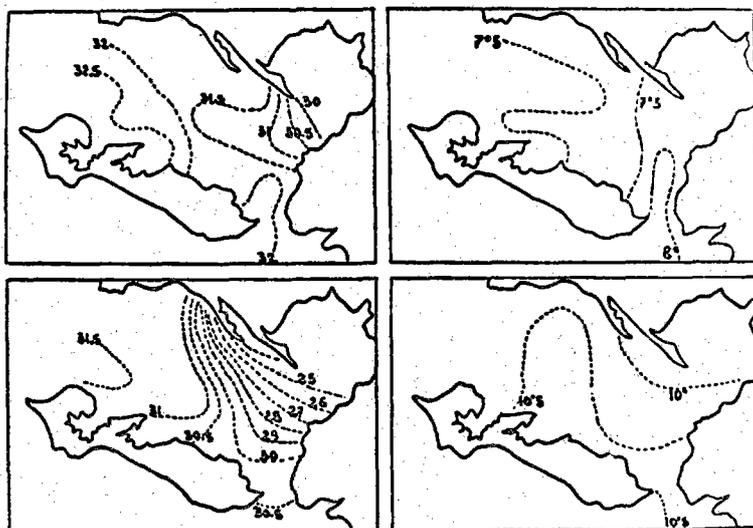
2d



OCTOBRE, NOVEMBRE

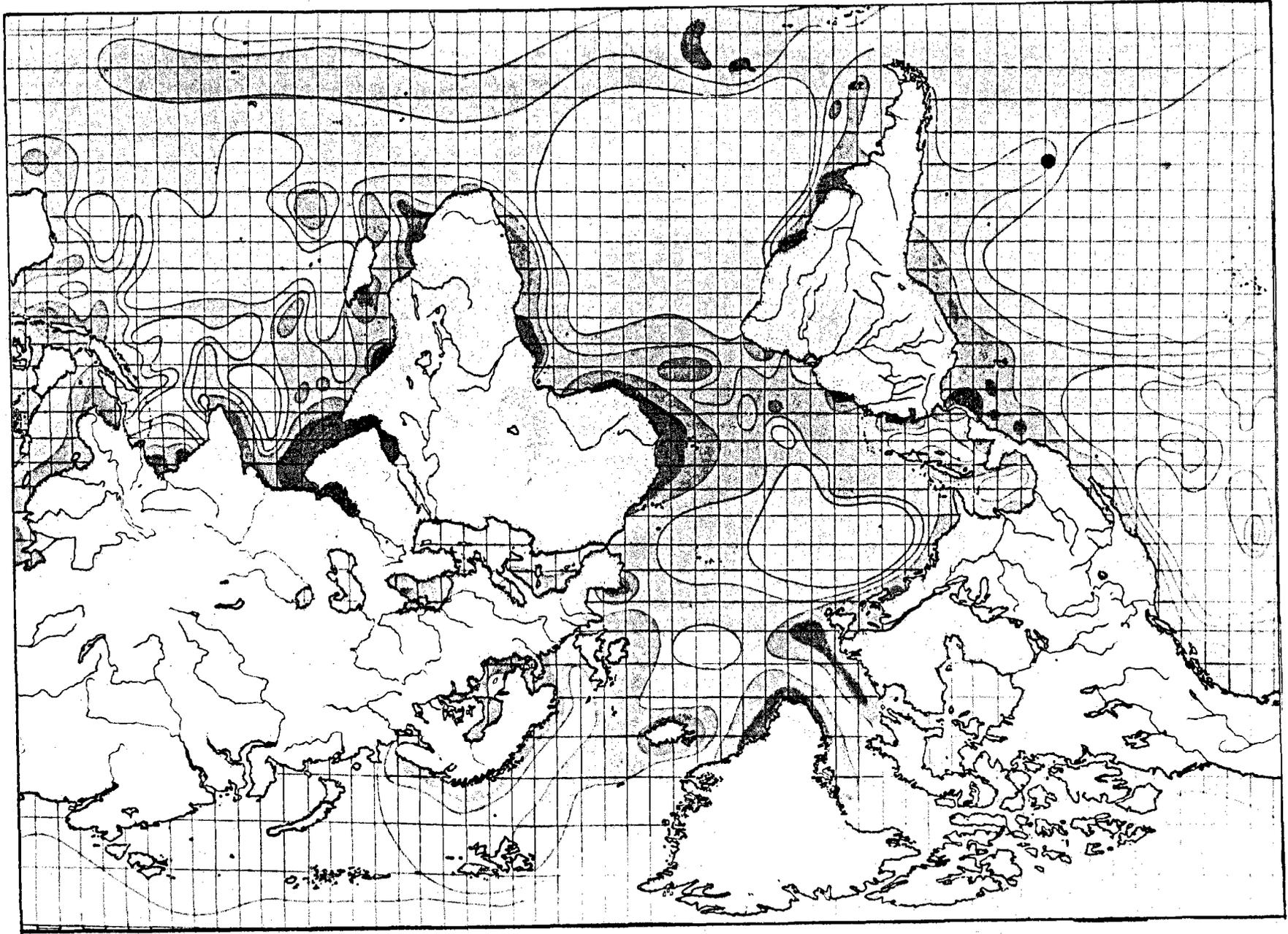
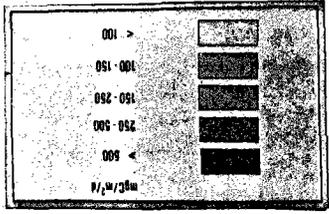
DECEMBRE, JANVIER

2e

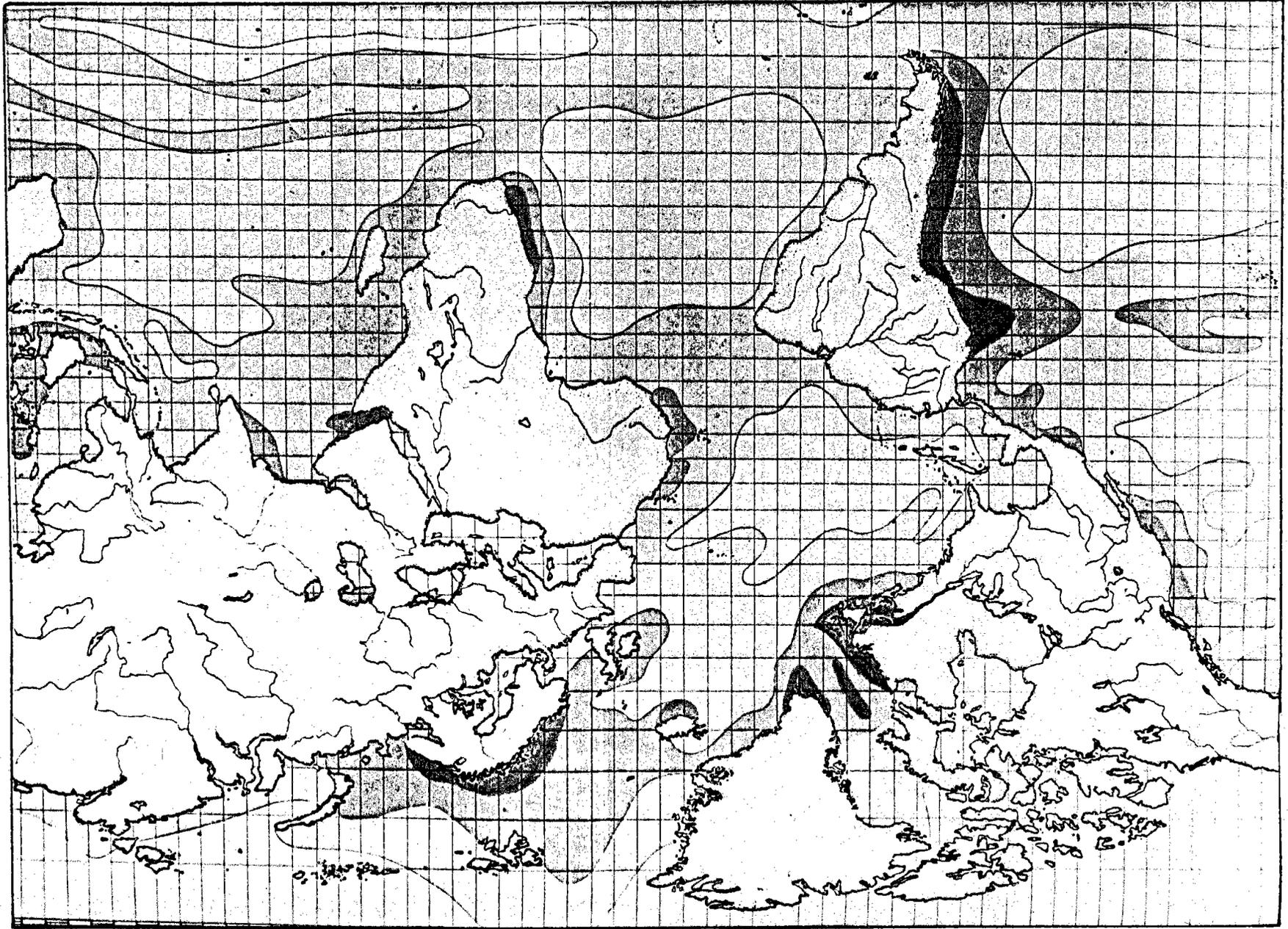
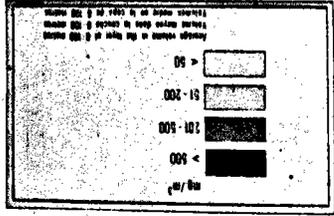


FEVRIER, MARS

PRODUCTION DE PHYTOPLANKTON



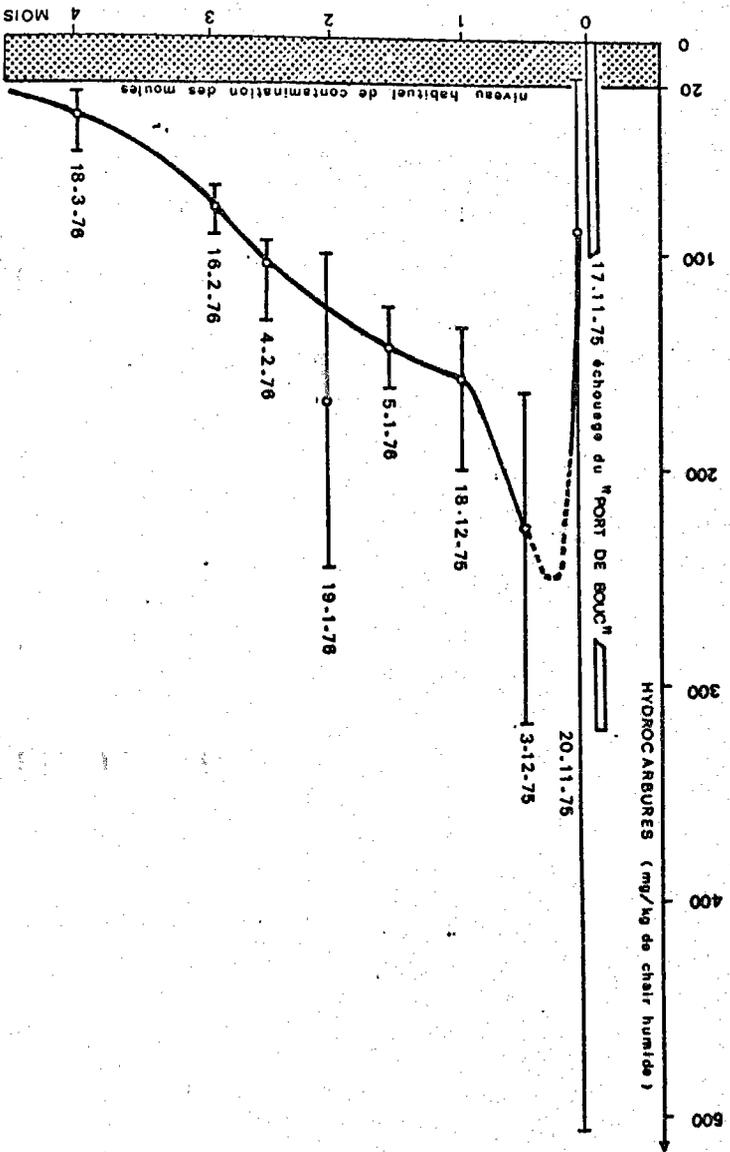
REPARTION DU ZOOPLANKTON SA SELON SA DENSITE



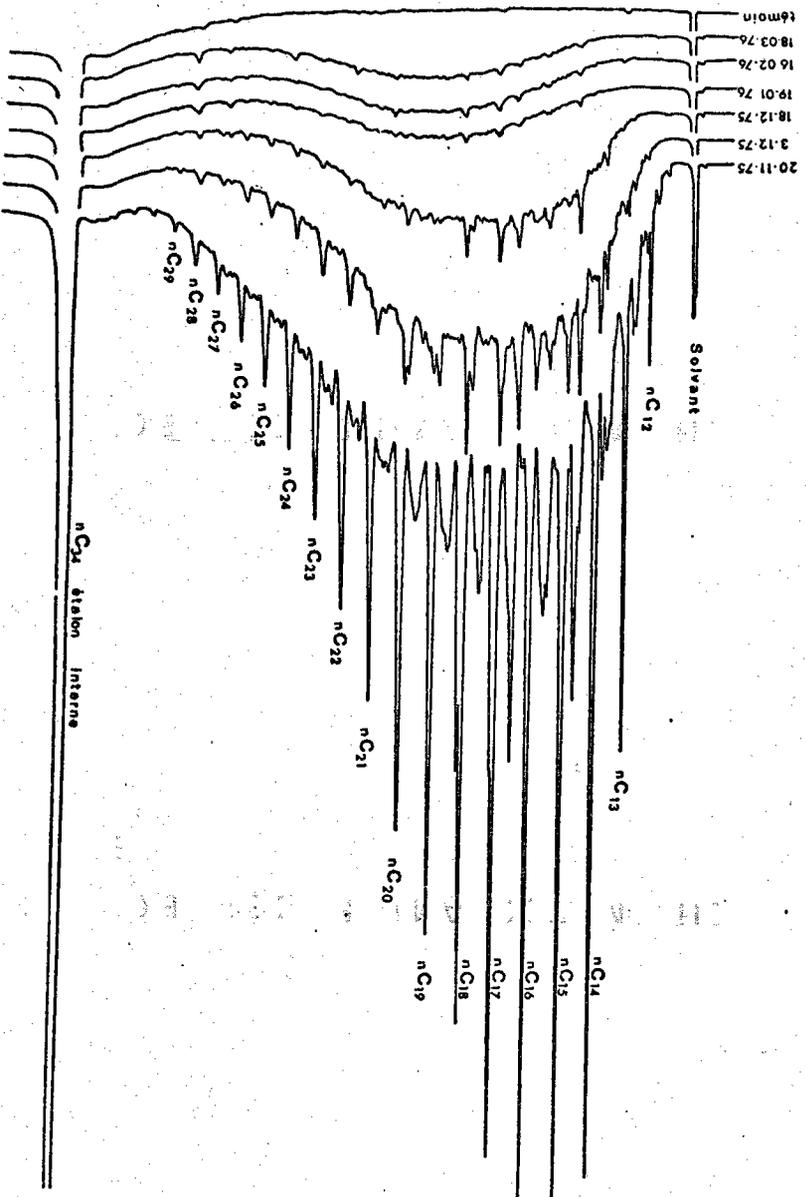


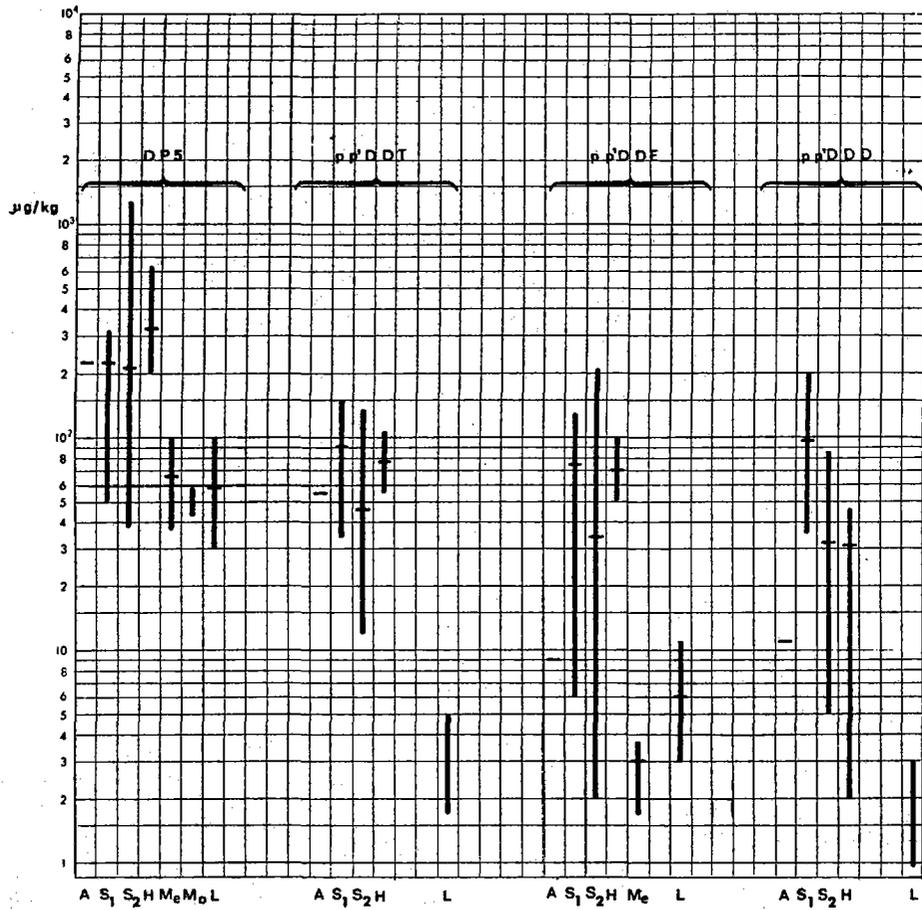
Coquillages remontés à la côte après échouage d'une nappe de pétrole traitée par détergents
(explosion du "PRINCESS IRENE" à Saint-Nazaire)

CINETIQUE D'EPURATION DES MOULES

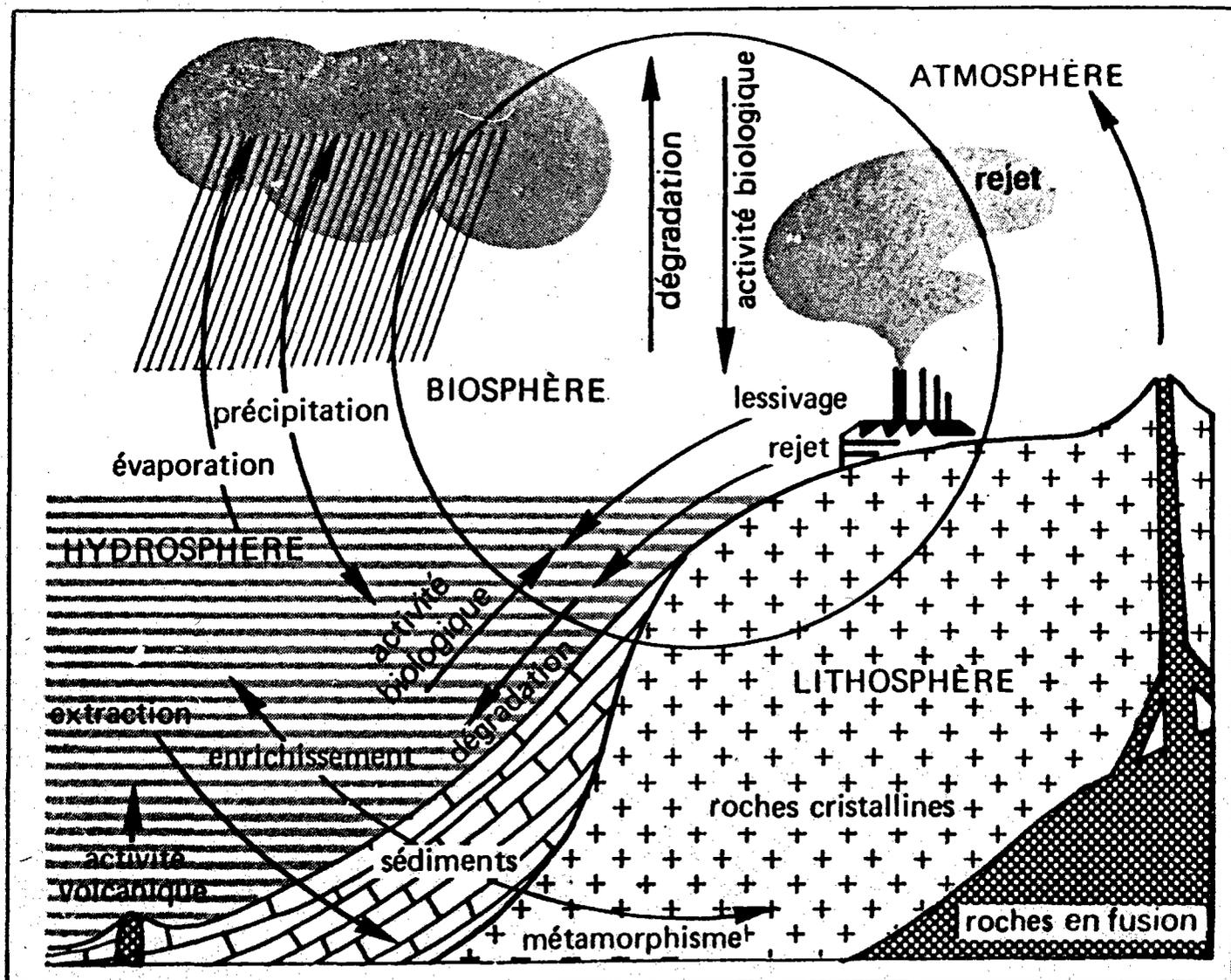


CHROMATOGRAMMES DES EXTRAITS SUCCESSIFS

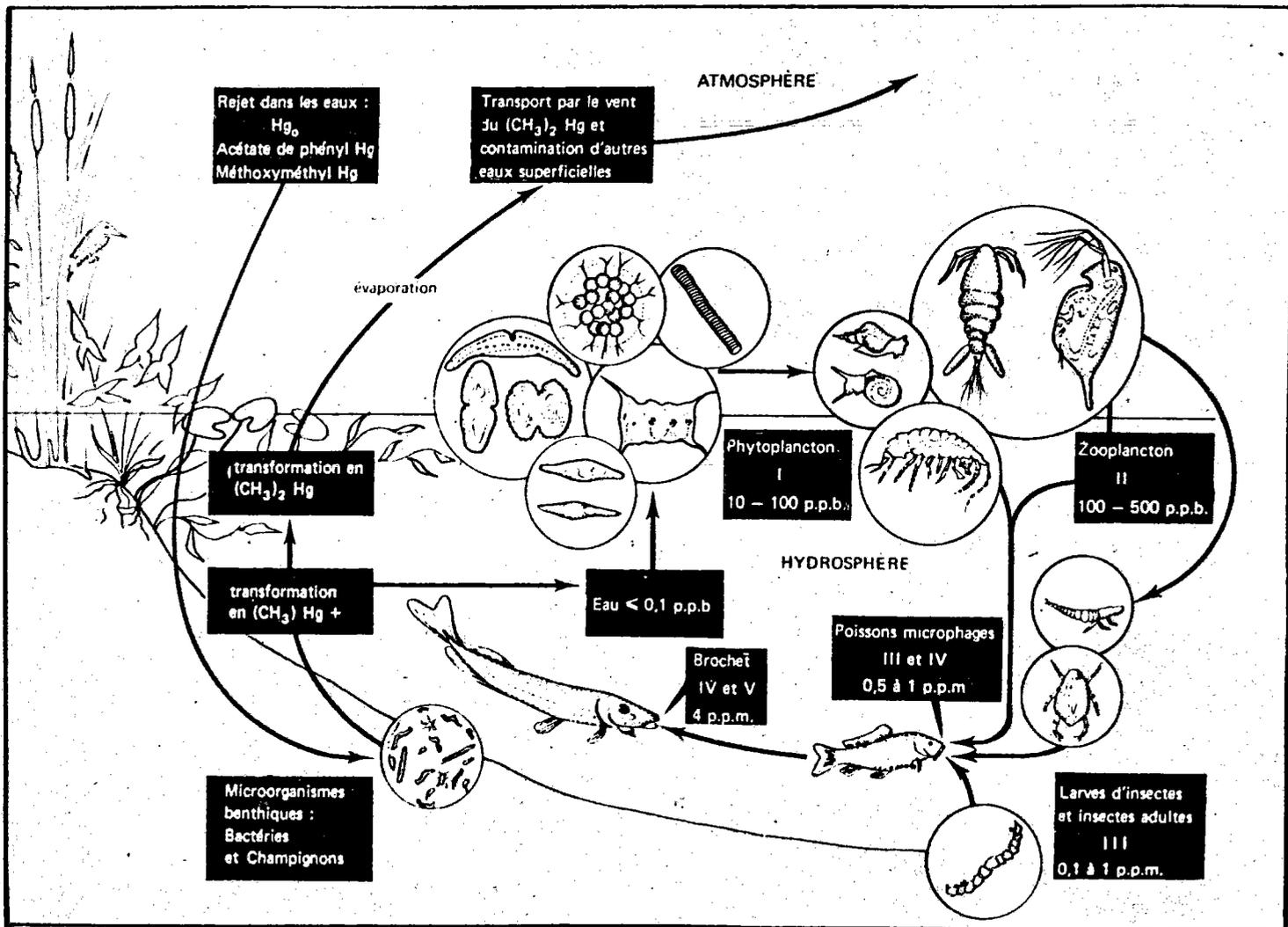




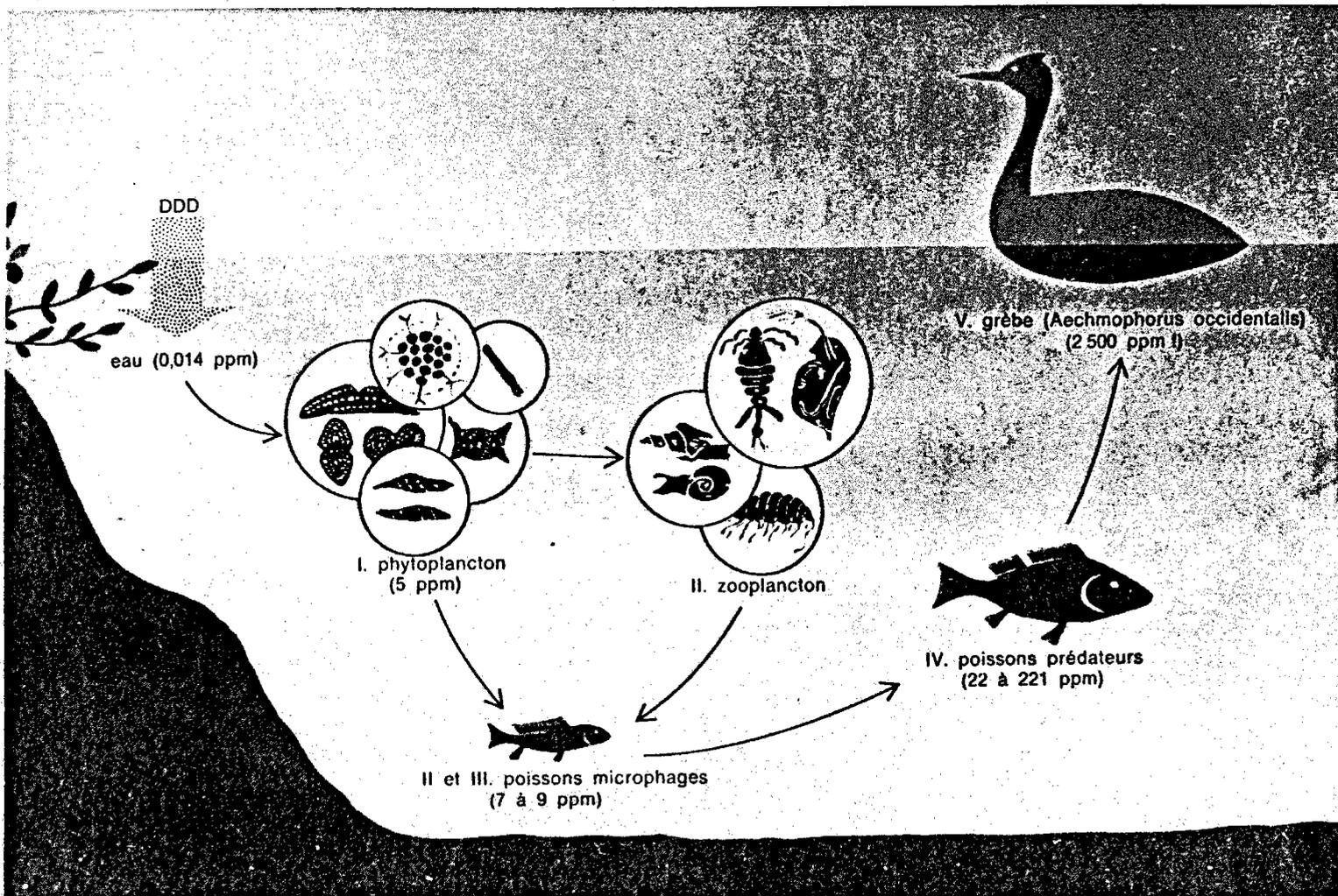
— Répartition, suivant une échelle logarithmique, des teneurs en organochlorés autour de la valeur moyenne pour : les anchois (A), les sardines (S¹ et S²), les harengs (H), les merlans (Me), les morues (Mo) et les limandes (L.).



CYCLE DU MERCURE



CYCLE BIOLOGIQUE DU MERCURE



CYCLE BIOLOGIQUE DU DDD
(identique au DDT)

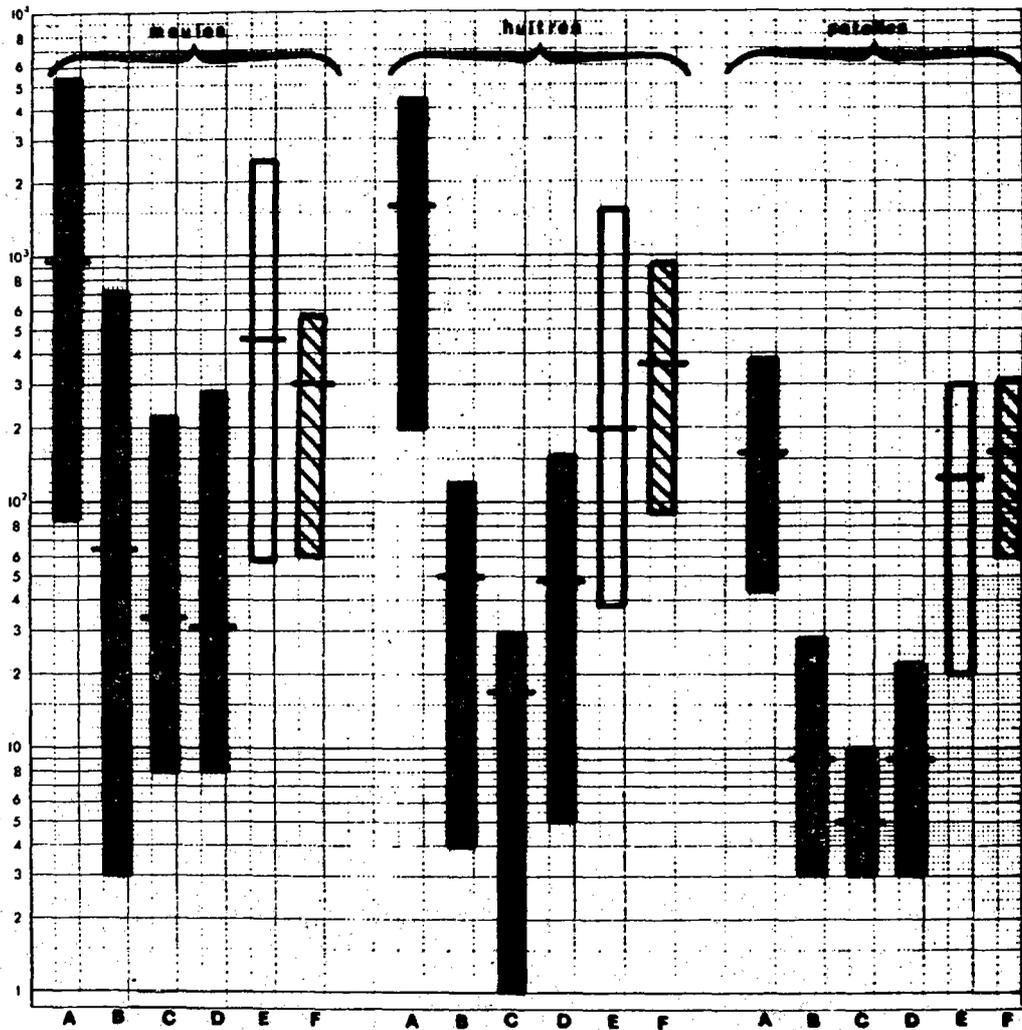


FIG. 2. — Répartition chez les moules, les huîtres et les palottes et suivant une échelle logarithmique, des teneurs en PCB (A), DDT (B), DDE (C), DDD (D), Hg (F) exprimées en $\mu\text{g}/\text{kg}$ de résidu sec, et hydrocarbures totaux (E) exprimées en mg/kg de résidu sec.