

DESS Ingénierie des Hydrosystèmes Continentaux en Europe

Les communautés animales d'intérêt économique
dans les estuaires face à l'anthropisation.

Etude des estuaires de la Seine, de la Loire et du Rhin.



Projet individuel réalisé par Aurélie CARRIERE et Nadège LERMOYER

Sous la tutelle de Jean-Pierre BERTON, Professeur.

Remerciements

Nous tenons à remercier le professeur Jean-Pierre BERTON pour nous avoir permis d'étudier un sujet passionnant. L'ampleur de ce thème nous a cependant contraintes à restreindre notre travail. Nous tenons également à le remercier pour les précieux contacts qu'il nous a communiqués.

Un très grand merci à Peter PAALVAST, d'Ecoconsult aux Pays-Bas, pour ses divers renseignements.

Nos remerciements vont également à Stéphanie AUMEUNIER, de la Cellule de Mesures et de Bilan de l'estuaire de la Loire, pour nous avoir transmis de nombreuses informations.

Enfin nous remercions la DIREN Ile de France de nous avoir ouvert les portes de sa bibliothèque.

Résumé

L'estuaire se situe à l'interface entre le milieu continental et le milieu marin. Il constitue une zone de transit et de stockage, caractérisée par une multitude de facteurs qui évoluent en interdépendance étroite et qui sont sous l'influence de la marée. La Seine, dont le bassin versant est très industrialisé présente un estuaire marqué par une forte pollution métallique et organique d'origine anthropique. Afin de connaître l'impact de cette pollution sur l'homme, le devenir des polluants au sein des réseaux trophiques a été étudié. Seuls les mollusques (organismes filtreurs des premiers maillons trophiques) interviennent dans les problèmes de santé publique. L'estuaire de la Loire, quant à lui, montre une augmentation de plus en plus importante de la charge sédimentaire du bouchon vaseux. Celui-ci, tout en étant un piège pour la pollution est aussi un milieu très anoxique. Il constitue un barrage à la circulation des espèces de poissons migrateurs. Par ailleurs, la région deltaïque du Rhin fut fortement modifiée par le Plan delta à la suite de graves inondations dans le nord des Pays Bas. La pollution historique du fleuve cumulée à ces aménagements a induit de graves perturbations pour les communautés animales. La forte mobilisation des défenseurs de l'environnement a cependant permis une certaine renaissance écologique rhénane. Les trois embouchures présentées, sont donc chacune victimes de perturbations induites ou non par l'homme ce qui entraîne une baisse de la biodiversité animale. L'homme prend aujourd'hui conscience de son rôle à jouer afin de préserver ces milieux et tente d'agir à travers des actions de sensibilisation et l'adoption de législation.

Abstract

Estuaries could be compared with a bottleneck between continental and marine environments. They are a transit and storage area defined by numerous elements all narrow dependants from each other and under the power of tides. The very industrialized catchments area of the Seine offers an estuary prone to a heavy anthropogenic metallic and organic pollution. The development of such pollutants among trophic networks has been the subject of analysis in order to show the impact of pollution on human beings. Molluscs are the only organisms that interfere in public health issues, being the filter feeders of the first trophic links. As for the estuary of the Loire, it shows the growing presence of sediment loads in the silt plug. This means that this estuary is both a trap to pollution and a very anoxic area. Hence, it is a barrier to the free-moving of species of migratory fishes. Besides, the deltaic region of the Rhine was heavily modified by the Delta Plan project after the important floods in the North of the Netherlands. The accumulated pollution of the river added to these land settlements generated serious disturbances for animal communities. However, some renewal of the ecology of the Rhineland was enabled thanks to the mobilisation of preservationists. The three river mouths here studied have all suffered from disturbances, be they caused or not by human beings, which led to the decline of animal biodiversity. Human beings have become aware of its role to protect these midships and attempt to react through the setting up of legislation and through consciousness raising.

Sommaire

Remerciements	2
Résumé	3
Abstract	4
Introduction	7
I) L'estuaire un habitat particulier	8
A- <u>Qu'est ce qu'un estuaire ?</u>	9
B- <u>La dynamique estuarienne</u>	11
1) Fonctionnement hydrologique	11
a- <i>Marée dynamique</i>	11
b- <i>Marée de salinité</i>	15
2) Fonctionnement hydrosédimentaire	17
a- <i>Oscillation des particules en suspension</i>	17
b- <i>Dépôt et remise en suspension des sédiments</i>	17
c- <i>Crème de vase</i>	18
C- <u>Les espèces d'intérêt économique et leur habitat</u>	20
1) La faune estuarienne	20
2) Description des principales espèces d'intérêt économique	22
3) Description des milieux	30
II) La Seine, un estuaire parmi les plus pollués d'Europe	31
A- <u>Présentation du fleuve et de son estuaire</u>	32
1) Généralités	32
2) L'impact de l'homme sur la faune et ses habitats	33
B- <u>Les espèces d'intérêt économique et les polluants</u>	34
1) Les métaux	34
a- <i>Transfert de contaminants dans les réseaux trophiques</i>	35
b- <i>Distribution spatiale de la contamination des organismes vivants</i>	36
2) Les composés organiques	37
a- <i>Les polychlorobiphényles (PCB)</i>	38
b- <i>Dioxines et furanes : Toxicité extrême</i>	40
c- <i>Les PCB dans les poissons de l'estuaire</i>	41
C- <u>Les autres perturbations pour la faune</u>	43
1) Contamination virale et bactérienne	43
2) Le bouchon vaseux	45
3) Les aménagements de l'estuaire	46
D- <u>Quelles solutions ?</u>	48

III) La Loire, un estuaire qui présente un important bouchon vaseux	50
A- <u>Présentation du fleuve et de son estuaire</u>	51
1) Cadre géographique	51
2) Climat et géologie des facteurs influençant la répartition de la faune	51
B- <u>Les espèces d'intérêt économique et le bouchon vaseux</u>	53
1) Description du bouchon vaseux	53
2) L'impact du bouchon vaseux sur la faune	54
C- <u>Les autres perturbations pour la faune</u>	59
1) Les activités urbaines, industrielles et agricoles	59
a- <i>Cas des microéléments métalliques et des oligoéléments</i>	60
b- <i>Les pesticides</i>	61
c- <i>Les polychlorobiphényles (PCB) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)</i>	62
2) Les aménagements	63
D- <u>Quelles solutions ?</u>	66
 IV) Le Rhin, un exutoire fortement aménagé	
A- <u>Présentation du fleuve et de son Delta</u>	70
1) Généralités	70
2) L'importance du Rhin aux Pays bas	71
B- <u>Les espèces d'intérêt économique et le Plan Delta</u>	72
1) L'aménagement des Pays Bas face aux eaux	72
2) Description du Plan Delta	73
3) L'impact du Plan Delta	75
C- <u>La pollution un impact de mieux en mieux maîtrisé</u>	82
1) La pollution du Rhin	82
2) Le repeuplement du Rhin	84
 Discussion	
 Conclusions	87
Liste des figures et tableaux	88
Bibliographie	91

Introduction

Un estuaire est le lieu de rencontre des eaux fluviales et des eaux marines ; les eaux estuariennes possèdent donc à la fois des caractéristiques fluviales et océaniques dont l'interaction entraîne des propriétés physiques et chimiques particulières. Celles-ci vont avoir une influence sur les fonctionnalités biologiques et écologiques générales au niveau des peuplements animaux et végétaux.

Par leurs spécificités physiques, les estuaires sont le réceptacle des eaux du bassin versant, et sont donc particulièrement vulnérables aux différentes activités anthropiques. Ces dernières sont à l'origine du rejet d'un grand nombre de substances dans le milieu naturel, qu'elles soient liées aux activités industrielles, domestiques, agricoles (métaux, molécules organiques de synthèse...) ou à la présence humaine directement (germes microbiologiques). Beaucoup de ces substances sont rencontrées en faible quantité mais présentent une toxicité pour l'ensemble de l'écosystème et donc pour l'homme.

Certains estuaires sont aussi fortement marqués par la présence d'un bouchon vaseux. Celui-ci résulte lors de la marée descendante de la violence du courant qui remet en suspension la plus grande partie du dépôt sédimentaire. Riche en matières organiques, il nourrit de nombreuses bactéries qui consomment tout l'oxygène disponible. Ce manque d'oxygène est alors fatal aux poissons migrateurs qui doivent traverser ce bouchon vaseux pour aller frayer en mer.

D'autre part, l'aménagement progressif des estuaires a engendré des modifications de leur état et de leur fonctionnement tant au niveau physique que biologique. Ainsi les communautés animales se trouvent confrontées à une disparition partielle voire totale de leur habitat et à des obstacles en travers de leurs voies de migration.

Afin de pouvoir présenter successivement ces différents problèmes, nous étudierons trois estuaires, chacun étant marqué par l'une de ces perturbations. Après avoir défini le milieu estuarien et exposé les principales espèces d'intérêt économique y résidant, nous développerons successivement les cas de la Seine, de la Loire et du Rhin. Tout d'abord, nous

présenterons l'embouchure de la Seine qui est l'une des plus polluées au monde, tant par les métaux que par les composés organiques, ce qui perturbe fortement la faune estuarienne. Puis, nous étudierons l'exutoire de la Loire, dont le bouchon vaseux très important, déséquilibre l'écosystème. Enfin, nous décrirons la zone deltaïque du Rhin, dont l'aménagement par le Plan Delta, a fortement modifié les habitats de la faune locale. Et nous terminerons par une analyse comparée afin de mettre en évidence les spécificités mais aussi les similitudes entre les trois cas étudiés.

I) L'estuaire un habitat particulier



Source : seine-aval.crihan.fr/estuaires/estuaire_seine/

A- Qu'est ce qu'un estuaire ?

Le terme estuaire vient du mot latin *aetus* qui signifie marée.

Deux phénomènes caractéristiques différencient un estuaire de la plupart des cours d'eau :

- Les eaux coulent vers l'amont deux fois par jour
- A certaines périodes, les eaux deviennent extrêmement turbides au point que si l'on y plonge sa main elle disparaît sous quelques centimètres d'eau. Et étant donné qu'il y a des eaux plus claires à quelques dizaines de kilomètres en amont, ce limon n'est pas apporté par les crues.

Ces deux phénomènes, en fait liés entre eux, révèlent les caractéristiques fondamentales de la présence d'un estuaire macrotidal.

D'après Donald W. Pritchard (1967), un estuaire est constitué par une masse d'eau confinée ayant une connexion libre avec la mer ouverte et à l'intérieur duquel l'eau de mer est diluée d'une façon mesurable avec de l'eau douce issue du drainage du bassin versant.

Le moteur principal du fonctionnement de l'estuaire est assuré par la marée. C'est l'énergie introduite par cette dernière qui façonne l'intérieur de l'estuaire le rendant évasé. En effet, dans tous les estuaires qui n'ont pas été aménagés par l'homme, la section mouillée croît d'une façon exponentielle de l'amont vers l'aval. La pénétration de la marée dynamique fixe la limite amont de l'estuaire qui peut être de 100 à 200 km dans les grands estuaires français, ou de quelques dizaines de kilomètres pour les petits. Au-delà, on retrouve les eaux issues du drainage du bassin versant. Ce sont ces eaux qui définiront la qualité des eaux estuariennes. Et c'est la dispersion introduite par le mouvement périodique des eaux vers l'amont et vers l'aval qui fait que « l'eau de mer est diluée d'une façon mesurable avec de l'eau douce » (Romaña, 1994).

La France présente sur ses façades ouest, Atlantique et Manche, un très grand nombre d'estuaires ou de systèmes estuariens. La notion d'estuaire concerne uniquement ces façades soumises à des marées importantes ; les fleuves Méditerranéens forment, quant à eux, des deltas.

La France possède donc trois estuaires (figure n°1, page ci-contre) de grande taille qui sont, par ordre décroissant :

- La Gironde d'une surface de 625 km²
- La Loire d'une surface de 60 km²
- Et la Seine d'une surface de 50 km².

L'ampleur et les caractéristiques morpho-dynamiques de chaque estuaire dépendent d'un certain nombre de facteurs comme son bassin versant (taille, qualité hydrologique et géologique), la zone géologique de son implantation, ou les aménagements effectués (ports, digues, barrages, dragages, entretiens des chenaux), etc. De ce fait, chaque estuaire présente des caractéristiques qui lui sont propres.

A l'interface continent-océan, le milieu estuarien constitue le lieu de déversement des déchets de la plupart des activités anthropiques. La présence, d'une part, de ce « goulot d'étranglement » des apports contaminants vers la mer, l'existence, d'autre part, de caractéristiques hydrosédimentologiques et biologiques de stockage des contaminants, rendent ce système particulièrement vulnérable et nécessite de développer une gestion qui lui soit spécifique.

L'historique de chacun des estuaires français leur confère alors des caractères propres :

- La Gironde, dont le bassin versant est relativement peu peuplé et peu industrialisé, a conservé un équilibre naturel qui se manifeste par un « climax » géomorphologique bien établi et une faible pollution.
- L'estuaire de la Seine est le point d'arrivée en mer des eaux d'un bassin versant où demeure 30 % de la population française (dont l'agglomération parisienne) et 40 % de l'activité économique nationale. Il se trouve confronté à de sérieux problèmes de pollution. Par ailleurs, l'importance de son rôle en voie de communication a été la cause d'innombrables aménagements qui l'ont transformé en un estuaire complètement endigué. Il a radicalement perdu sa forme « évasée ».
- La Loire draine un bassin versant plus développé et plus riche, ce qui a conduit à aménager son estuaire, en particulier, en vue de faciliter le passage des grands navires ou d'extraire en amont les sables et les graviers. La morphologie de l'estuaire a changé, en provoquant une progression vers l'amont des eaux marines (Romaña, 1994).

B- La dynamique estuarienne

Le fonctionnement d'un estuaire résulte d'une composante hydrologique et d'une composante hydrosédimentaire.

1) Fonctionnement hydrologique

La pénétration de l'eau de mer au sein de l'estuaire se traduit par deux phénomènes : la marée dynamique et la marée de salinité.

a- Marée dynamique

La pénétration de l'onde de marée dans l'estuaire se traduit par une variation de la hauteur d'eau, le marnage. L'intrusion de la marée deux fois par jour entraîne alors un recouvrement puis un découvrement d'une partie des rives de l'estuaire. Ces surfaces ainsi en eau puis hors d'eau sont dites intertidales ou marnantes. Elles interviennent dans le fonctionnement de l'estuaire de trois façons :

- mécanique : elles opposent aux eaux de marée des frottements liés à leur extension et à leur « rugosité », et contribuent de ce fait à atténuer les courants le long des rives et à épuiser l'énergie de l'onde de marée durant sa progression.
- écologique : ce sont des zones de production de matière vivante (le benthos) ; la distribution des espèces, à la frontière entre le domaine terrestre et le domaine aquatique, est en grande partie fonction de la fréquence de recouvrements-découvrements.
- sédimentaire : les surfaces marnantes sont des pièges à sédiments témoignant sur le long terme du colmatage de l'estuaire dû à l'exhaussement du niveau marin (figure n°2, page suivante). A l'échelle de l'année, ces surfaces participent au bilan sédimentaire de l'estuaire : engraissement au printemps et en été à partir des sédiments fins du système crème de vase/bouchon vaseux, et érosion hivernale de tout ou partie de ces dépôts. Ainsi, les surfaces soumises à marée sont des zones de stockage temporaire de sédiments – et des polluants adsorbés à la surface des particules minérales – dont la granulométrie est fonction des courants (Le Square Deshoulières, 2004).

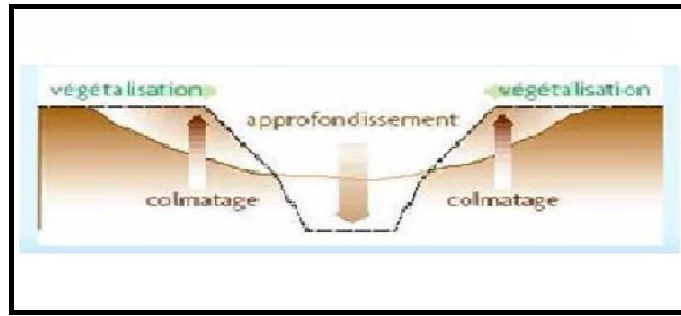


Figure n°2 : Chenalisation et autocalibrage d'un estuaire (d'après Le Square Deshoulières, 2004).

Les surfaces marnantes dans l'estuaire sont de différents types selon leur localisation et leur position par rapport au fleuve (figure n°3, page ci-contre). Elles abritent alors des communautés animales différentes.

Il y a donc une variation de la hauteur d'eau lorsque l'onde de marée pénètre dans l'estuaire.

En ce qui concerne l'estuaire de la Loire, pour une marée de vives-eaux de coefficient 95, le marnage à l'embouchure a une valeur d'environ 5 m alors que pour une marée de mortes-eaux de coefficient 45, cette valeur est de 2,3 m. Les hauteurs d'eau dans l'estuaire sont comprises entre 5,8 m (pleine mer de VE à Chantenay) et 0,6 m (basse mer de VE à Saint Nazaire) au-dessus du 0 des cartes marines (figures n°3 et n°4).



Figure n°4 : Localisation des villes de l'estuaire de la Loire (d'après <http://www.viamichelin.fr>).

Les lieux géométriques des pleines mers (respectivement basses mers) sont les courbes passant par les cotes maximales (respectivement minimales) atteintes par la surface libre en chaque section de l'estuaire. Pour l'estuaire de la Seine (figures n°5), la figure n°6 (page ci-contre) montre qu'en étiage le niveau des pleines mers reste à peu près constant entre Honfleur et Poses, en vive-eau comme en morte-eau.

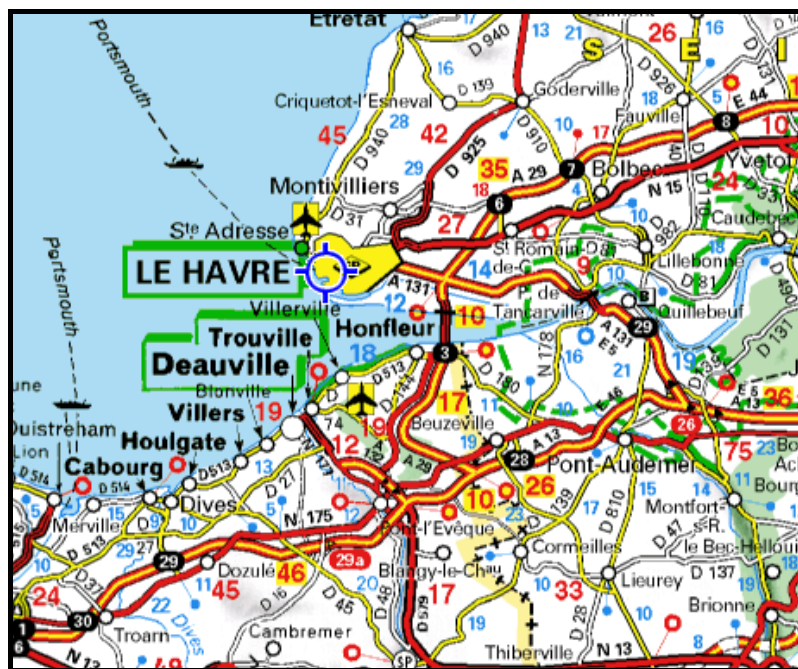


Figure n°5 : Localisation des villes de l'estuaire de la Seine (d'après <http://www.viamichelin.fr>).

Par contre, naturellement, les basses mers remontent vers l'amont, pour assurer l'écoulement fluvial. Il est frappant de constater qu'en amont le niveau de basse mer de morte-eau est inférieur à celui de vive-eau, d'environ 50 centimètres. Cet écart entraîne un niveau moyen plus élevé en vive-eau qu'en morte-eau et se traduit par un stockage moyen d'eau dans la partie amont de l'estuaire en période de vive-eau. L'intersection des niveaux de basses mers en vive-eau et en morte-eau est appelée « point caractéristique » et se situe entre Caudebec-en-Caux et Heurteauville (pk 298) en condition d'étiage. Lorsque le débit amont de la Seine augmente, le niveau des basses mers et, dans une moindre mesure, celui des pleines mers augmente aussi, pour permettre l'évacuation des eaux du fleuve (figure n°7, page ci-contre).

Globalement, l'onde de marée s'atténue dans l'estuaire puis disparaît, l'intensité du marnage diminue donc de l'aval vers l'amont. Pour une même marée le marnage sera donc

différent en tout point de l'estuaire ; il sera plus faible à Ancenis qu'à Nantes pour le cas de l'estuaire de la Loire. De plus, plus on remonte dans l'estuaire, plus la marée est dissymétrique, avec une prolongation du temps de jusant, c'est-à-dire de la marée descendante (lorsque les hauteurs d'eau diminuent).

L'asymétrie de l'onde de marée se traduit par une asymétrie des courants : l'intervalle de temps entre la basse mer et la pleine mer suivante se réduisant au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'amont, le courant de flot (courant de la marée montante) est de plus en plus court (pour l'estuaire de la Seine, environ 5 h à Honfleur et 4 h à Rouen, pour une marée de 12h20 min). Au niveau de la Seine, en crue (figure n°7, page précédente), courants et hauteurs d'eau diffèrent essentiellement dans la partie amont mais, même à Quillebeuf, le niveau de basse mer monte de 20 cm et les vitesses de jusant augmentent de 10 cm.s⁻¹. En amont de Rouen, la crue a pour effet de surélever notablement le niveau moyen (1,20 m à Rouen, 2 à 3 m à Poses) et modifie les courants au point de faire disparaître le flot.

Le point de remontée maximale de l'onde de marée va varier en fonction du coefficient de marée et du débit du fleuve, le point atteint par la marée reculant de 30 km environ lorsque l'on passe d'un débit d'étiage (elle atteint alors le PK 95) à un débit de crue de 4000 m³/s pour l'estuaire de la Loire.

En ce qui concerne l'estuaire de la Seine, l'onde de marée se propage dans l'estuaire avec une célérité de l'ordre de 8,9 m.s⁻¹, ce qui donne un temps de propagation moyen de 4h42 min pour parcourir les 150 km séparant Honfleur et le barrage de Poses (limite amont de pénétration de la marée). Ainsi, la basse mer met pratiquement 6 heures à se propager de Honfleur à Poses car des hauteurs d'eau en moyenne plus faibles lui correspondent. La propagation de la pleine mer est plus rapide mais plus difficile à contrôler car, si la double pleine mer de Honfleur disparaît progressivement vers l'amont, il reste délicat d'attribuer une heure précise à la pleine mer en aval.

Cette différence de vitesse de propagation selon la phase de la marée, liée à une variation de la hauteur d'eau moyenne, est classique en estuaire. Elle a pour conséquence un certain « rattrapage » de la pleine mer sur la basse mer qui précède et donc un raidissement de l'onde de marée en flot. Avant les aménagements à l'aval de l'estuaire de la Seine, ce raidissement de l'onde de marée était accentué, conduisant dans certaines conditions d'étiage de vive-eau à la formation d'un mur d'eau se propageant vers l'amont : le célèbre mascaret de la Seine.

A la force du fleuve s'oppose ou se conjugue, au cours de la marée, la puissance du flot (marée montante) ou du jusant (marée descendante). Au flot, la pénétration de l'eau de mer provoque un courant d'aval en amont et refoule l'eau douce vers l'amont jusqu'à un point où l'on retrouve un courant fluvial dirigé vers l'aval. Puis il y a un changement de sens de l'écoulement des eaux, qui vont donc couler d'amont en aval, lorsqu'au jusant, les eaux marines se retirent avec les eaux douces accumulées ; le volume total de ces eaux est beaucoup plus grand que lors du flot et donne lieu à des courants plus forts appelés courants de décharge.

Cette quantité d'eau, appelée volume oscillant, qui pénètre et ressort de l'estuaire à chaque marée, dépend du coefficient de la marée et du débit du fleuve. Pour un débit de crue de $2000 \text{ m}^3/\text{s}$, les apports liquides de la Loire sont de 90 millions de m^3 , alors que les volumes d'eau oscillants à Saint Nazaire varient entre 140 millions de m^3 (mortes eaux) et 250 millions de m^3 (vives eaux).

L'onde de marée pénètre plus loin que les volumes oscillants et se fait encore sentir en amont du point de l'estuaire où les courants de la marée et ceux du fleuve s'annulent.

De plus, un phénomène particulier se produit en estuaire, c'est le décalage de la renverse de courant par rapport à la variation de la hauteur d'eau : le courant peut toujours être dirigé vers l'aval alors que le niveau de l'eau augmente, le courant changera de sens, l'eau coulera vers l'amont, quand la pente sera inversée entre l'aval et l'amont.

b- Marée de salinité

L'incursion de l'eau de mer dans l'estuaire se traduit par une diminution générale de la salinité vers l'amont. Le passage des eaux saumâtres aux eaux douces correspondant par convention à la salinité 0,5‰.

La limite supérieure de la remontée d'eau salée, que l'on appelle front de salinité se situe généralement à mi-distance de la remontée de la marée dynamique.

En plus des déplacements journaliers au gré des marées qui accompagnent la pénétration de la masse d'eau marine, la remontée du front de salinité dans l'estuaire va varier suivant les conjuguaisons entre le coefficient de la marée et le débit du fleuve.

Dans l'estuaire de la Seine, l'intrusion saline s'étend sur environ 50 kilomètres en aval de Vieux-Port, à proximité de l'embouchure. Du fait des aménagements de l'estuaire (canalisation de l'écoulement fluvial) et de son comblement progressif (diminution du volume oscillant), la limite de l'intrusion saline a migré de plus de 50 kilomètres vers l'aval entre

1955 et 1978. Cette tendance est arrêtée voire inversée depuis 1979. Ceci semble lié à une modification de la section d'écoulement par la présence d'aménagements, ce qui aurait fait varier le régime hydrologique de la Seine.

La limite de la remontée saline en Loire peut atteindre l'amont de la ville de Nantes en étiage sévère. En période de débits moyens le front de salinité se situe entre Cordemais et le Pellerin, tandis qu'en crue il est repoussé en aval de Cordemais voire même en aval de Donges lors de fortes crues (figure n°4).

En outre, la dilution de ces eaux salées par les eaux douces n'est généralement pas homogène sur toute la hauteur de la colonne d'eau. L'eau de mer au fond, plus dense, progresse sous l'eau douce en surface, ce qui forme une zone salée. Le mélange des eaux est quasi inexistant ; l'estuaire est dit stratifié. Lorsqu'il existe un mélange, l'estuaire est dit « mélangé », ou « bien mélangé » lorsque le mélange est intense. Les variations de salinité n'évoluent que longitudinalement. Dans les estuaires de la Seine et de la Loire, on rencontre les différents cas successivement en fonction du coefficient et du débit. D'autres facteurs, notamment météorologiques peuvent influencer sur le mélange des eaux. D'une part le vent peut perturber la circulation initiale pour des vitesses pas forcément élevées mais constantes et également créer des vagues qui favorisent le mouvement vertical de l'eau. D'autre part la température augmente la stratification lorsqu'elle est élevée, notamment en été, et favorise ainsi la circulation résiduelle.

La traversée de ce gradient de salinité va avoir un impact sur la répartition de la faune au sein de l'estuaire. En effet, des espèces vivent uniquement en eau douce, d'autres seulement en eau salée et d'autres encore vivent selon leur période biologique, aussi bien en eau salée qu'en eau douce (voir partie I.C).

2) **Fonctionnement hydrosédimentaire**

La dynamique sédimentaire d'un estuaire se caractérise d'une part par l'oscillation des particules au sein de l'estuaire et d'autre part par un dépôt et une remise en suspension des sédiments. La crème de vase est un témoin de l'accumulation de la matière en suspension au sein de l'estuaire.

a- Oscillation des particules au sein de l'estuaire

L'alternance flot/jusant entraîne une oscillation des particules amont/aval et vice versa, au gré du courant, avec une avancée résiduelle vers l'aval. La durée de cette oscillation est liée à la vitesse de l'eau dans l'estuaire. Elle est liée à ce que l'on appelle le temps de renouvellement des eaux. Seule une crue qui annule le flot permet une sortie directe d'une particule de l'estuaire.

C'est une notion importante non seulement pour les problèmes de salinité mais aussi pour les problèmes biologiques et de micropollution puisque ce paramètre influe directement sur le temps de résidence des particules dans l'estuaire (figure n°8).

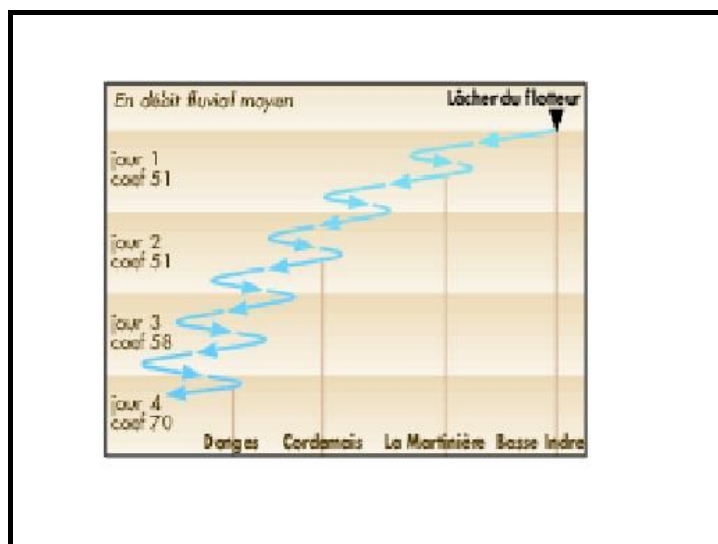


Figure n°8 : Schéma de l'oscillation des particules dans l'estuaire de la Loire (d'après <http://www.loire-estuaire.org>).

b- Dépôt et remise en suspension des sédiments

En arrivant dans l'estuaire, les matières en suspension (MES) vont rencontrer des courants qui diminuent d'intensité jusqu'au point nodal, lieu d'annulation des courants liés à la marée et au fleuve, où les vitesses sont quasi-nulles. Du fait de cette diminution des courants (pente, marée), les sédiments vont être déposés progressivement, les plus gros d'abord en amont (sables), puis les plus fins, les vases, qui vont plutôt se déposer en aval, préférentiellement dans la zone du point nodal. En effet, à cet endroit où la vitesse est quasi-nulle, les particules sédimentaires (notamment les argiles et colloïdes) jusque là maintenues en suspension, s'agglomèrent sous forme de flocons (floculation) lorsqu'elles rencontrent

l'eau salée, sous l'action de phénomènes physicochimiques, comme l'augmentation de salinité et de pH, et tombent sur le fond sous l'effet de la gravité (figure n°9).

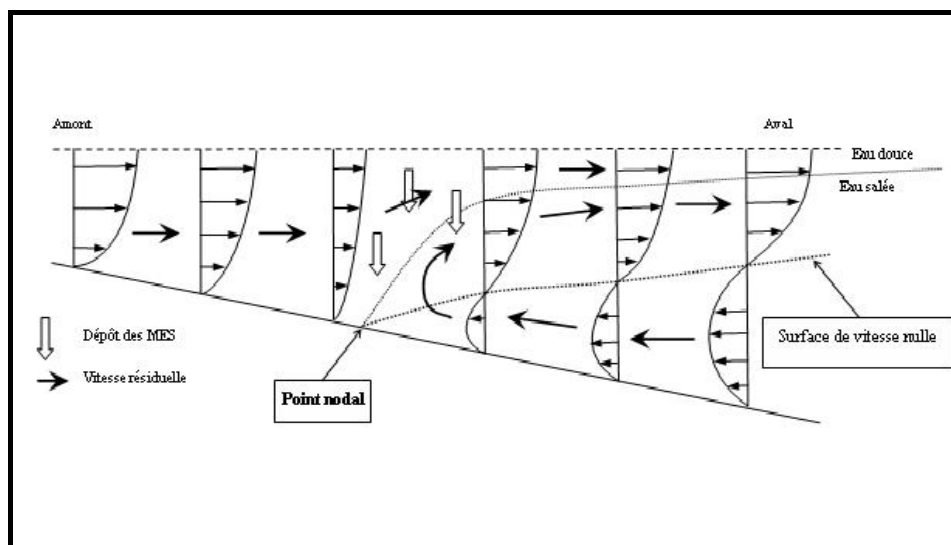


Figure n°9 : Schéma des courants résiduels de fond et de surface avec localisation du point nodal (d'après C.S.E.E.L., 1984 et Sanchez & Grovel, 1994, Romaña, 1992).

Dans tous les estuaires à marée, au point nodal, zone où les mouvements de l'eau sont limités, il existe donc une zone de concentration de la matière en suspension. La masse de sédiments piégés, dans l'estuaire de la Loire, serait de 0,5 à 1,5 million de tonnes. Cette matière en suspension s'accumule et induit la formation d'une zone de turbidité plus forte sous deux formes : le bouchon vaseux (que l'on décrira de manière plus approfondie dans la partie III) et la crème de vase. Ces deux phénomènes sont particulièrement importants dans l'estuaire de la Loire.

c- Crème de vase

En mortes eaux, les courants atténués et la durée accrue des étales favorisent le dépôt des sédiments vaseux. Une grande partie se dépose au fond et forme une couche ou lentille sédimentaire appelée crème de vase. A cet endroit la concentration en MES peut être élevée, jusqu'à 300 g/l sur 2 à 3 m d'épaisseur, et s'étendre sur 20 km pour l'estuaire de la Loire.

Ainsi, l'alternance vives eaux / mortes eaux entraîne des fluctuations cycliques des capacités de transport. Celles-ci se traduisent par l'alternance de :

- phases de remise en suspension et/ou d'érosion (en vives eaux) lorsque la vitesse dépasse le seuil de la vitesse critique d'érosion ;

- et de phases de décantation / sédimentation (en mortes eaux) lorsque l'énergie est insuffisante pour supporter le matériel en suspension. La vitesse est alors inférieure à la vitesse critique de sédimentation.

C'est pourquoi le stock en suspension augmente et diminue (gonflement/dégonflement du bouchon vaseux) en fonction du cycle lunaire de la marée (figure n°10).

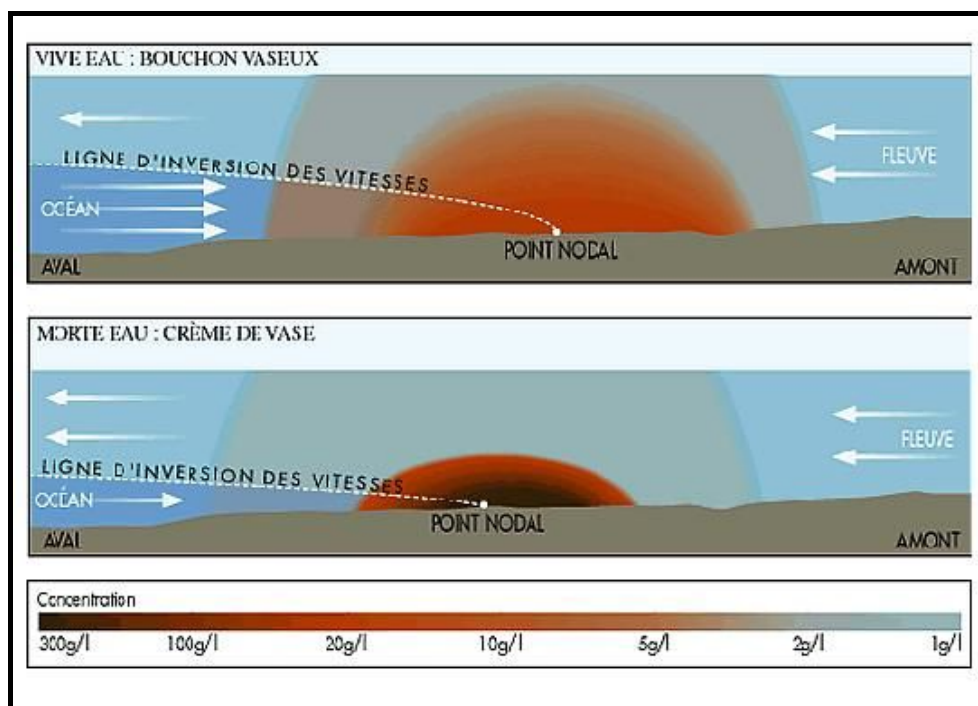


Figure n°10 : Schéma du bouchon vaseux et de la crème de vase.
(d'après <http://www.loire-estuaire.org>).

L'érosion de la crème de vase, dans l'estuaire de la Loire, commence pour des coefficients de marée de 70 et cette dernière est totalement érodée au dessus de 80.

Cependant, du fait de la compaction qui a lieu au fond dans la crème de vase, une partie seulement de celle-ci pourra être remise en suspension avec les vives eaux. Une partie des particules reste en place, au cours du temps il y a donc un envasement de l'estuaire, avec stockage des polluants associés aux particules. Ceci portera donc préjudice à la faune estuarienne y résidant.

C- Les espèces d'intérêt économique et leur habitat

Les estuaires présentent des habitats particuliers au peuplement spécifique. La répartition des espèces est guidée par le gradient de salinité.

1) La faune estuarienne

Les caractéristiques de l'estuaire, qui confèrent un environnement très fluctuant concernant l'hydrologie et hydrodynamique déterminent un grand nombre d'espèces qui peuplent ce milieu :

- Tout d'abord, on rencontre des espèces très bien adaptées à ces conditions instables : ce sont les espèces autochtones ou endémiques. Pour celles-ci, l'estuaire est un lieu d'habitat permanent où elles effectuent l'ensemble de leur cycle biologique. Seulement peu d'espèces sont adaptées à ces conditions changeantes, c'est-à-dire supportant des variations de salinité ou de température importantes. Ces espèces autochtones sont donc en petit nombre et sont peu diversifiées tout le long du gradient halin.
- On trouve ensuite des espèces plutôt marines ou plutôt d'eau douce qui n'utilisent le milieu estuarien qu'à certains moments de leur cycle biologique. Elles peuvent alors l'utiliser comme aire trophique ou de nurseries dans les périodes hydrologiques calmes ou alors utiliser les courants et marées lors des migrations. Ces espèces peuvent donc supporter des variations écologiques relativement importantes.

D'une façon générale, la productivité dans les estuaires y est plus élevée que dans la plupart des zones océaniques. Les espèces qui s'accommodent de telles conditions écologiques vont trouver une source abondante de nourriture et seront donc caractérisées par de très fortes densités.

Par suite des variations physico-chimiques importantes auxquelles ils sont naturellement soumis, et de la pauvreté en oxygène qui peut exister en estuaire, de nombreux organismes vivent près de la limite de leur niveau de tolérance. De ce fait, tout apport, même

faible, en produit toxique sera particulièrement ressenti par ces organismes, notamment par les formes juvéniles qui existent en grande proportion dans les estuaires.

La faune estuarienne peut être découpée en trois catégories :

- Le plancton : on distingue le plancton végétal, constitué d'algues unicellulaires, de diatomées,... et le plancton animal, principalement constitué de crustacés (copépodes, mysidacés) ou de stades larvaires de certaines espèces. Le plancton fluvial meurt au contact de l'eau salée et est remplacé par des espèces marines, alors que le plancton marin peut pénétrer dans l'estuaire avec le flot.

- La macrofaune benthique : elle correspond aux espèces vivant sur le fond, sur ou dans le substrat jusqu'à une vingtaine de centimètres de profondeur, d'une taille de plus de 1 mm. Elle ne comprend qu'un nombre limité d'espèces qui se sont adaptées aux jeux des marées et à la nature du substratum qu'elles colonisent.

- Sur les fond rocheux on retrouve : des hydraires, des bryozoaires encroûtant, des lamellibranches (dont certaines moules), des crustacés, et autour on retrouve des crabes, des gammares, des gastéropodes, des vers,
- Les fonds vaseux sont les fonds les plus riches en benthos : on y retrouve les annélides oligochètes (vers de vase « nus ») ou polychètes, de nombreux mollusques et crustacés dont la crevette grise.

- Les espèces benthodémersales : il s'agit des espèces, pour la plupart poissons ou crustacés, vivant en liaison trophique avec le fond. Ces espèces peuvent venir effectuer une partie de leur cycle en estuaire. On retrouve :

- Des espèces qui supportent assez bien les variations de salinité et de température. C'est le cas des bars par exemple.
- Les espèces endémiques qui y résident d'ordinaire et y réalisent l'ensemble de leur cycle. C'est le cas du flet.
- Les espèces amphihalines pour lesquelles le fleuve est un lieu de migration, de colonisation ou de préparation physiologique. Le cas le plus connu étant celui du saumon.

2) Description des principales espèces d'intérêt économique

Etant donné l'importance du nombre d'espèces d'intérêt économique présentes au sein des estuaires, nous nous limiterons dans cette partie à la description de la faune estuarienne rencontrée au cours de ce rapport.

Le flet

Classe : Actynoptériens

Ordre : Pleuronectiformes

Famille : Pleuronectidae

Pleuronectes flesus



Il entre dans les estuaires (où il peut devenir un prédateur important des peuplements de coques) parfois même en eau douce. On le retrouve du nord de la Norvège à la méditerranée, également en baltique. Le Flet vit sur des fonds couverts de sédiments. Il se nourrit de petits poissons benthiques et de coquillages. Son activité est essentiellement nocturne. La forme aplatie des membres de la famille des pleuronectidae correspond à une adaptation à la vie en milieu benthique (<http://veterinaria.unex.es>).

Le bar commun

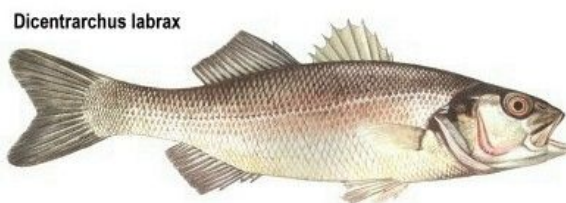
Classe : Actynoptériens

Ordre : Perciformes

Famille : Moronidés

Dicentrarchus labrax

Habitué des eaux saumâtres, le bar fréquente aussi les eaux superficielles mais ne dédaigne pas de vivre sur les fonds. Il s'aventure très près des côtes. On le rencontre aussi caché sous les algues, dans les zones ostréicoles, dans les estuaires ; et remonte parfois des portions de cours d'eau. On le retrouve dans la Manche, en Atlantique et en Méditerranée. C'est un carnassier, qui vit et chasse le plus souvent en bancs. Il se nourrit de sardines ou d'anchois dont il suit la migration, mais aussi de petits mullets, de calmars, de crabes, de crevettes et de crustacés en tout genre (<http://www.echosmouche.com>).



La truite de mer

Classe : Ostéichthyens

Ordre : Salmoniformes

Famille : Salmonidés

Salmo trutta trutta



La truite de mer vit à proximité du plateau continental et dans les estuaires. Elle se nourrit essentiellement la nuit. En eau douce, son régime alimentaire est principalement composé d'invertébrés, de crustacés et de petits poissons. En mer, elle se nourrit de crevettes, de crustacés, de vers et occasionnellement d'insectes terrestres. On la retrouve dans les fleuves côtiers de la Manche, de l'Atlantique, la mer du Nord et du Danemark (<http://www.echosmouche.com>).

Le saumon atlantique

Classe : Ostéichthyens

Ordre : Salmoniformes

Famille : Salmonidés

Salmo salar

Le saumon atlantique vit dans les eaux côtières ou en haute mer. Son habitat est très étendu. On le retrouve en mer du Nord, en Manche sur les côtes du Cotentin et de la Bretagne, sur les côtes de l'atlantique Nord tant du côté européen qu'américain. Les tacons et les saumoneaux se nourrissent de larves, de nymphes, d'insectes aquatiques et terrestres. Les saumons adultes sont friands de petits poissons, de harengs, d'éperlans, de lançons et de crustacés (<http://www.echosmouche.com>).



L'esturgeon

Classe : Actynoptériens

Ordre : Acipenseriformes

Famille : Acipenseridae

Acipenser sp.



L'Esturgeon est le plus grand poisson migrateur fréquentant les rivières et les fleuves français. Aujourd'hui, il ne subsiste plus qu'une seule population d'esturgeons européens, présente dans le bassin de la Gironde-Garonne-Dordogne. Il possède des organes spécialisés comme, en particulier, une bouche ventrale et des barbillons développés en relation avec son régime alimentaire composé en grande majorité d'animaux benthiques. Ses caractéristiques biologiques écologiques sont encore très mal connues ce qui rend particulièrement difficile la protection de cette espèce, et en particulier la mise en place de mesures de gestion efficaces pour sa survie (<http://rdb.eaurmc.fr>).

L'éperlan

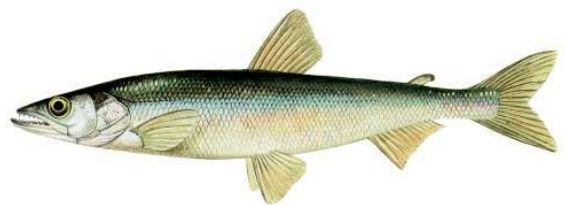
Classe : Ostéichthyens

Ordre : Salmoniformes

Famille : Osméridés

Osmerus eperlanus

C'est un poisson fin au dos gris-vert et aux flancs argentés. La tête est longue, le museau pointu, et la mâchoire inférieure est proéminente. Les deux mâchoires sont garnies d'une forte dentition. Taille : de 10 à 30 cm. L'éperlan fréquente les eaux littorales et l'embouchure des fleuves. De mars à mai les populations anadromes remontent en eau douce pour frayer. Après l'éclosion les alevins descendent vers la mer. L'éperlan fréquente nos côtes de la Mer du Nord au Golfe de Gascogne (<http://blaw.free.fr/POISSONS/eperlan.htm>).



La lamproie

Classe : Cyclostomes

Ordre : Petromyzontiformes

Famille : Pétromyzonidés

Lampetra fluviatilis



Les adultes remontent les rivières en Automne. La reproduction a lieu le printemps suivant (avril-mai). Les ovules sont déposés dans des nids en eaux profondes et courantes sur fond de graviers. L'incubation dure 15 jours; les ammocètes vivent 3 à 5 ans dans la vase des fleuves et migrent en mer après la métamorphose. Les adultes se fixent sur les poissons, sucent le sang et consomment la chair; les larves filtrent des microorganismes. Cette espèce est susceptible de bénéficier de mesures de protection prise dans le cadre d'un arrêté de biotope -arrêté du 8/12/88- (http://blaw.free.fr/POISSONS/lamproie_riviere.htm).

L'anguille

Classe : Actynoptériens

Ordre : Anguilliformes

Famille : Anguillidés

Anguilla anguilla

L'anguille est une espèce commune en rivière mais assez rare en étang. Nocturne, elle vit le jour dans les anfractuosités des rochers ou s'immerge dans la vase. Elle sort la nuit à la recherche de vers et de petits poissons. En étang, des petites anguilles sont alevinées pour atteindre leur taille commerciale au bout de 4 à 5 ans. Toutes les anguilles migrent pour la reproduction vers la mer des Sargasses au large de l'Amérique du nord. Les civelles (larves d'anguilles) reviennent ensuite peupler les cours d'eau. Carnivore, elle se nourrit dans son jeune âge de petits crustacés et insectes aquatiques puis de poissons (<http://flac.chez.tiscali.fr/anguille.html>).



Le gardon

Classe : Actynoptériens

Ordre : Clupéiformes

Famille : Cyprinidés

Rutilus rutilus

Gardon



© R. Swainston/ANIMA 2001 - tous droits de reproduction interdits

Le gardon, cyprinidé le plus répandu dans les zones lenticques et aval des cours d'eau, est une espèce grégaire pouvant former de grands bancs. Il est eurytherme et euryhalin et se rencontre même dans les estuaires et quelques mers intérieures. Le gardon peut s'hybrider avec beaucoup d'espèces de cyprinidés : brème, brème bordelière, rotengle et secondairement ablette, chevaine, hotu. La stérilité des descendants est au moins relative. C'est un poisson polyphage à tendance phytophage pour les adultes. Les espèces compétitrices sont par ordre d'importance : le rotengle, le chevaine, le hotu et la perche. C'est l'espèce la plus recherchée pour la pêche au coup (<http://www.csp.environnement.gouv.fr>).

L'aloise

Classe : Actinopterygiens

Ordre : Clupéiformes

Famille : Clupéidés

Alosa alosa

Littoral européen de la Norvège à la Méditerranée. Cette espèce se rencontre dans les estuaires et les cours inférieurs des fleuves. Sur la côte atlantique, la grande alose remonte l'Adour, la Garonne, la Loire, la Seine ; rare dans le Rhône. Elle remontait autrefois le Rhin jusqu'à Bâle, et même le Main. Se nourrit de larves d'insectes aquatiques, petits mollusques et occasionnellement des alevins de poissons. Les grandes aloses passent la plus grande partie de leur vie en mer, où elles mènent une vie pélagique (<http://mrw.wallonie.be>).



()

Le mulot

Classe : Ostéichthyens

Ordre : Mugiliformes

Famille : Mugilidés

Mugil sp.



Le mulot est un poisson présent dans toutes les régions aussi bien en mer qu'en fleuve ou en rivière. Il aime nager en eaux libres et dans le courant. Toujours proche de la surface, et sur les remontées au large, il se déplace en banc serré de plusieurs dizaines d'individus de même taille, probablement pour des raisons de sécurité. Ce sont des limnivores, c'est à dire qu'ils avalent la vase pour en extraire les particules organiques. Ils broutent également les algues et les petits organismes sur les fonds rocheux. Sa résistance aux variations de salinité est impressionnante et selon les endroits, il passe le plus clair de son temps en eau saumâtre où il trouve une nourriture abondante. Mais la reproduction a toujours lieu en mer (<http://www.chasse-sous-marine.com>).

La crevette grise

Classe : Crustacés

Ordre : Décapodes

Famille : Crangonidés

Crangon crangon

La crevette grise se caractérise d'abord par sa petite taille qui atteint habituellement 5 à 6 cm. Son corps translucide, comprimé latéralement, est gris ou brunâtre ; une coloration qui la rend d'autant plus difficile à voir dans l'eau qu'elle évolue sur des fonds sableux et pratique l'homochromie. Habitat : Zones sableuses et sablo-vaseuses à proximité des secteurs où l'on observe des apports plus ou moins réguliers d'eau douce (proche des estuaires), lagunes littorales... Se retrouve sur toutes les côtes européennes. Espèce omnivore (<http://www.sea-river-news.com>).



L'huître plate

Classe : Mollusques

Ordre : Lammelibranches

Famille : Ostréidés

Ostrea edulis



L'huître plate se rencontre sur n'importe quel type de substrats (roche, sable, vase, etc...) entre 0 et 40 m. Elle se nourrit en filtrant l'eau. La quantité d'eau filtrée par une huître peut être très importante (jusqu'à 250 l/jour). On la retrouve de la mer de Norvège à la Péninsule Ibérique, côtes atlantiques du Maroc, Méditerranée et mer Noire. Son intérêt économique est considérable. A fait l'objet d'une culture intense. En Zélande, les populations naturelles ont été décimées par l'hiver de 1963. La culture d'*Ostrea edulis* est de plus en plus remplacée par celle de *Crassostrea gigas*, cette espèce ayant en effet une croissance plus rapide et une moins grande sensibilité au froid

(<http://perso.wanadoo.fr/lostrea/lostrea/biologie-reproduction.htm>).

L'huître zélandaise

Classe : Mollusques

Ordre : Lammelibranches

Famille : Ostréidés

Crassostrea gigas

Il s'agit de l'huître la plus cultivée et la plus consommée. On la retrouve sur les mêmes types de substrat qu'*Ostrea edulis* et son aire de répartition est sensiblement la même (<http://perso.wanadoo.fr/lostrea/lostrea/biologie-reproduction.htm>).



La moule

Classe : Mollusques

Ordre : Lammelibranches

Famille : Mytilidés

Mytilus edulis



Elle vit le long des côtes. La moule se retrouve dans deux types de milieux : un milieu rocheux et un milieu meuble. La moule se retrouve dans l'eau salée à une température d'environ quatre degrés Celcius et vit en colonies ou moulières. La moule se nourrit de plancton. La méthode de nutrition se fait par filtration (<http://www.clg.qc.ca>).

La palourde

Classe : Mollusques

Ordre : Lammelibranches

Famille : Spondylidés

Tapes decussatus

Elle s'enfonce de 20 à 30 cm dans le sol. La palourde possède un long organe tubulaire à orifices d'entrée et de sortie séparés qui va jusqu'en surface pour pomper l'eau riche en éléments nutritifs du plancton. C'est un coquillage comestible très recherché (<http://www.fnh.org>).



3) Description des milieux

Parmi les habitats estuariens les plus importants, on distingue :

- Les vasières :

Les vasières peu profondes, en zone intertidale ou non, sont des zones de dépôt des sédiments fins. Ces sédiments sont à la fois véhicules et fixateurs de pollution ce qui rend les vasières des zones de piégeage de cette pollution. Elles sont surtout recouvertes par les eaux douces du fleuve et sont donc plus touchées par les polluants venant du continent. Ces dépôts étant récents, ils peuvent être remis en suspension et participer ainsi aux échanges avec le bouchon vaseux.

Les fonds vaseux ont une grande importance pour le fonctionnement biologique de l'estuaire car ils constituent un réservoir à éléments nutritifs. Les principales chaînes alimentaires de l'estuaire y prennent leur source, à partir de la matière détritique, surtout sur le bas des zones intertidales.

Un estran vaseux comprend le secteur inondé à chaque marée, la slikke (du néerlandais *slijk* ou boue) et la partie plus "terrestre" de la vasière, le schorre (du néerlandais *schor* ou pré salé).

- Les zones marginales :

Ces secteurs sont le lieu du début de colonisation par les plantes aériennes. Ces zones sont inondées plus ou moins régulièrement en fonction de leur connection avec le fleuve et des conditions hydrologiques. Elles jouent un rôle de poumon et de rein de l'estuaire :

- un rôle de poumon car la photosynthèse y est forte, liée aux plantes supérieures, et permet la réoxygénation du courant de flot et de jusant quand ils arrivent ou quittent cette zone.
- un rôle de rein car cette zone piège les polluants en étant concentrés par certains organismes et par la flore.

II) La Seine, un estuaire parmi les plus pollués d'Europe



Source : <http://www.comestuaire.com/presentation.html>

A- Présentation du fleuve et de son estuaire

L'étude de l'estuaire de la Seine se justifie par l'importance du port du Havre, port de dimension européenne, ayant un fort impact sur les écosystèmes. Par ailleurs, le bassin versant très industrialisé en fait l'exutoire le plus pollué d'Europe.

1) Généralités

La Seine prend sa source sur le plateau de Langres et se jette dans la Manche au niveau du Havre dans le département de la Seine Maritime. Elle présente un bassin versant de 790 000 km² ce qui représente 14 % de la superficie française. Il est peuplé par 16 millions d'habitants, soit 26 % de la population française, dont 80 % vivent en zone urbaine. Le bassin concentre 40 % de l'activité économique française, 50 % du trafic fluvial et 60 % du bassin est occupé par des terres labourables. Le fleuve est long de 776 km, son débit moyen au barrage de Poses est de 410 m³.s⁻¹ et de 2000 m³.s⁻¹ en crue au même point. A l'étiage il est de 80 m³.s⁻¹ (Guézennec L. & al. 1999).

L'estuaire de la Seine est très aménagé et industrialisé. La partie de l'estuaire en aval de Rouen est entièrement endiguée et seuls quelques secteurs en amont de l'agglomération rouennaise présentent encore des berges « naturelles ».

A la hauteur du Havre, se situe la plus grande raffinerie pétrolière d'Europe gérée par les groupes EXXON et MOBIL. Celle-ci est classée site industriel SEVESO 2. La directive SEVESO 2, adoptée par l'Union européenne le 9 décembre 1996, vise les établissements potentiellement dangereux au travers d'une liste d'activités et de substances associées à des seuils de classement (<http://www.industrie-hn.org/fr/2/securite/01.htm>). Ainsi, ce secteur à l'extrémité aval du fleuve présente de hauts risques environnementaux et est une source majeure de pollutions.

Pour faciliter la compréhension, l'estuaire de la Seine est hiérarchisé en trois secteurs (figure n°11):

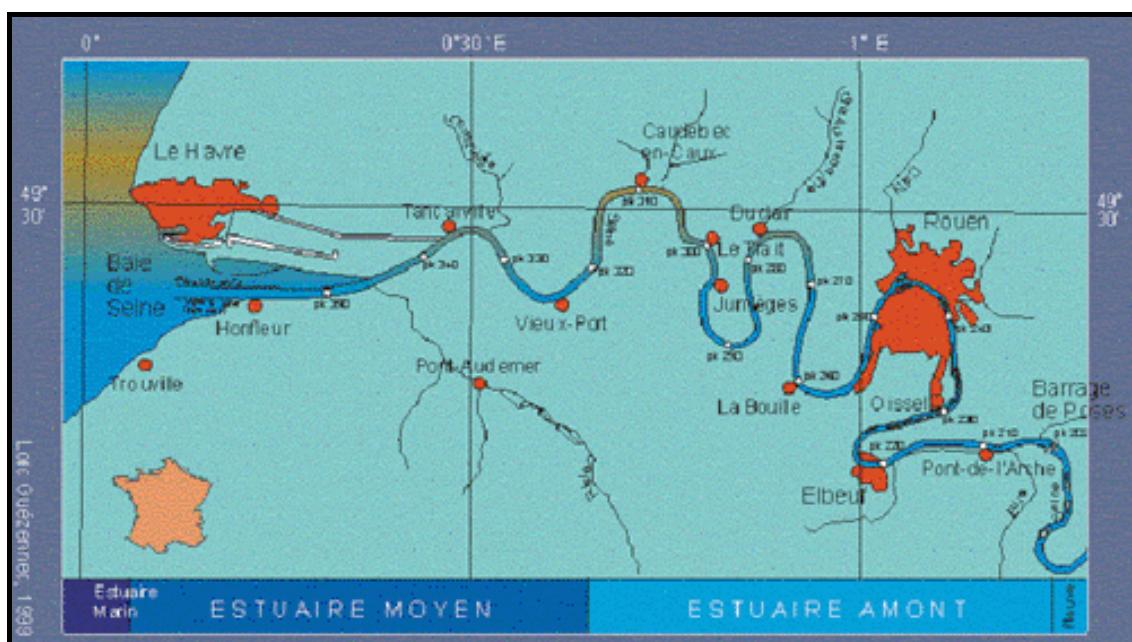


Figure n°11 : L'estuaire de la Seine (d'après Guézennec L. & al., 1999).

- Le bas estuaire marin. Il s'étend de la limite est de la baie de Seine à l'aval de Honfleur.
- L'estuaire moyen correspond à la zone de mélange entre eaux douces et eaux salées. Cette zone s'étend de l'aval de Honfleur aux environs de Vieux-Port. Cette limite varie en fonction des conditions de marée et des conditions hydrologiques. L'estuaire moyen est le siège du bouchon vaseux.
- Le haut estuaire (estuaire fluvial ou estuaire amont) est composé d'eau douce mais est soumis aux oscillations de la marée. L'amont de ce secteur est matérialisé par le barrage de Poses, limite artificielle à la propagation de la marée. En aval, ce secteur s'étend jusqu'à la limite de l'intrusion saline, c'est-à-dire jusqu'à la limite amont de l'estuaire moyen (Guézennec L. & al., 1999).

2) L'impact de l'homme sur la faune et ses habitats

Les milieux estuariens sont en perpétuelle évolution, que celle-ci soit naturelle ou provoquée par l'homme. L'estuaire de la Seine en est le parfait exemple français. Son état

actuel de dégradation résulte, essentiellement, de l'interaction de deux phénomènes majeurs liés au développement économique du pays :

- l'augmentation des populations, un rapide développement de l'agriculture et de l'industrie sont à l'origine d'un accroissement des flux de contaminants arrivant à l'estuaire. Ces flux font de l'estuaire de la Seine l'un des estuaires les plus contaminés d'Europe, c'est pourquoi, nous avons choisi de développer ce problème.
- son rôle de voie de communication a été la cause de nombreux aménagements (chenalisation, approfondissement,...). Ceci a fortement contribué au comblement naturel de l'estuaire, ce qui a conduit à la diminution de la surface estuarienne, et de ce fait, à la diminution des sites biologiques utiles (Guézennec L. & *al.*, 1999).

Afin de comprendre et de quantifier ces flux de polluants et de connaître leur impact sur les habitats de l'estuaire, de nombreuses études ont été menées ; parmi celles-ci notamment le programme Piren-Seine (1989) relayé ensuite par le Programme Seine-Aval (1995), qui s'est exclusivement consacré à l'estuaire au sens large, depuis le barrage de Poses jusqu'à la partie orientale de la baie de Seine (figure n° 12, page ci-contre).

B- Les espèces d'intérêt économique et les polluants

Dans le cadre de notre projet, nous avons voulu connaître l'impact des polluants métalliques et organiques (les plus importants pour la baie de Seine) sur des espèces d'intérêt économique telles que le flet (*Platichthys flesus*) et le bar (*Dicentrarchus labrax*) qui sont des poissons relativement abondants dans l'estuaire mais aussi très pêchés pour la qualité de leur chair. De plus ces poissons sont carnivores, donc situés au sommet des réseaux trophiques et consomment d'autres espèces d'intérêt économique telles que les crevettes, les coques,...elles mêmes contaminées. Ainsi il sera intéressant de voir à quels risques s'expose l'homme en consommant ces différentes espèces.

1) Les métaux

Les métaux que nous connaissons tous (le fer, l'aluminium, le cuivre, le plomb, le zinc, l'argent et l'or...) sont des corps simples, doués d'un éclat particulier (l'éclat métallique), bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité. Ils sont abondamment utilisés par l'homme depuis l'Antiquité, d'abord pour sa survie, puis son confort et ses loisirs. Si les métaux sont souvent indispensables au métabolisme des êtres vivants (oligo-éléments), nombre d'entre eux sont cependant toxiques lorsque leur concentration dépasse un seuil, lui-même fonction de l'état physico-chimique de l'élément considéré (Chiffolleau J-F., 1999).

L'estuaire de la Seine, réceptacle ultime avant la mer des eaux drainant un bassin très industrialisé (40 % de l'activité économique française), urbanisé (16 millions d'habitants dont 80 % en zone urbaine) et ayant une activité agricole importante et diversifiée (60 000 km², soit 80 % du bassin), est un environnement fortement concerné par la contamination métallique. Tout ceci en fait l'un des estuaires les plus pollués du monde (figure n°13, page ci-contre).

Afin de mieux évaluer les risques courus par l'homme à travers la consommation de différentes espèces contaminées, nous nous sommes intéressées aux processus de contamination de quatre métaux traces : cadmium, plomb, cuivre et zinc (tableau n°1) au sein des réseaux trophiques pélagiques et benthiques de l'estuaire. Pour cela, nous nous sommes aidées des études de Miramand *et al.* (1998).

<p>Le cadmium</p> <p>Le cadmium est principalement associé au zinc dans les minerais de zinc (0,01 à 0,05 %) et donc sous-produit de la métallurgie du zinc qui donne en moyenne 3 kg de cadmium par tonne de zinc. Sa production est donc proportionnelle à celle du zinc. Il n'existe pas de minerai de cadmium en quantités exploitables. Le cadmium est également présent dans des minerais de plomb et de cuivre ainsi que dans des phosphates naturels (30 mg/kg pour les phosphates jordaniens, 400 mg/kg pour les phosphates tunisiens). La production mondiale était de 18 882 t en 1994. Depuis 1993, les producteurs font, en grande partie, traiter leurs matières premières premières cadmières hors de France. La production française était de 92 t en 1996. Par contre, la France produit, à partir principalement des accumulateurs Ni-Cd et des soudures, environ 1 000 t/an de cadmium recyclé (près de la moitié des besoins français en cadmium). La consommation mondiale était de 16 780 t/an en 1994 (en France, 1 860 t/an en 1996), les principaux secteurs d'utilisation étant les batteries Cd-Ni (70 %), les pigments (13 %), la galvanoplastie (8 %), les stabilisants (7 %). Les activités métallurgiques, la combustion de produits pétroliers et de charbon et l'incinération d'ordures ménagères sont à l'origine de la contamination de l'atmosphère puis des sols et des eaux continentales, de même que la fabrication et l'épandage d'engrais phosphatés. Les apports de cadmium au milieu marin sont liés à l'industrie du zinc, à la combustion du charbon, à la sidérurgie et à la fabrication et l'utilisation des engrais phosphatés. Le cadmium ne présente pas de toxicité aiguë pour les organismes marins à des concentrations susceptibles d'être rencontrées dans le milieu. Au niveau subléthal, des concentrations de 0,05 à 1,2 µg/l peuvent provoquer des effets physiologiques pour les larves de crustacés (respiration, stimulation enzymatique) et des inhibitions de croissance pour le phytoplancton. Le cadmium présente des risques chez le consommateur humain. Même à de faibles concentrations, il tend à s'accumuler dans le cortex rénal sur de très longues périodes (50 ans) où il entraîne une perte anormale de protéines par les urines (protéinurie) et provoque des dysfonctionnements urinaires chez les personnes âgées.</p>
<p>Le plomb</p> <p>Le plomb est très souvent associé au zinc dans les minerais mais aussi à de nombreux autres éléments : Fe, Cu, Cd, Bi, Sb, Ge, As, Ag, Au, qui sont en grande partie (sauf Fe) récupérés lors des opérations métallurgiques. Les minerais mixtes Pb-Zn représentent 70 % de la production minière de plomb, les minerais de plomb en représentent 20 % et 10 % de la production de plomb proviennent d'une coproduction lors du traitement de minerais de cuivre, de zinc ou d'autres métaux. Le principal minerai de plomb est la galène (PbS), très souvent associée à la blende et la pyrite. On trouve aussi de la cérusite (PbCO₃) provenant de l'oxydation de PbS et présente dans les parties supérieures des gisements de galène. La production mondiale était de 3 millions de tonnes en 1994. Depuis décembre 1991, il n'y a plus de production minière de plomb en France. Par contre, en France, plus de 90 % du plomb utilisé dans les batteries sont récupérés. La consommation mondiale était de 6 millions de tonnes par an en 1996 (en France, 255 000 t/an en 1996), les principaux secteurs d'utilisation étant les accumulateurs (67 %), les oxydes et la chimie (12 %), les demi-produits (9 %), les revêtements de câbles (5 %), les munitions (4 %). La consommation de plomb tétraéthyle (utilisé comme antidétonant dans l'essence) a beaucoup évolué. Dans le monde occidental, elle a atteint son maximum en 1972 : 370 000 tonnes. En 1988, elle était de 96 000 t ; elle devrait certainement s'annuler avec la généralisation de la consommation d'essence sans plomb utilisée à l'origine pour éviter d'empoisonner les catalyseurs à base de platine présents dans les pots catalytiques. La part de ce carburant est aux États-Unis et au Japon de 100 %, dans l'Union européenne de 66 %, en France de 56 % (34 % en 1992). Les apports de plomb à l'océan se font majoritairement par voie atmosphérique, la source principale étant encore à l'heure actuelle la combustion des carburants automobiles. Bien que les seuils toxiques du plomb inorganique en milieu aquatique semblent nettement supérieurs aux concentrations habituellement rencontrées dans l'environnement, on peut cependant observer un retard de croissance chez le phytoplancton à partir de 0,5 microgramme par litre. De plus, les niveaux de bioaccumulation* dans les produits marins, mollusques en particulier, sont à prendre en considération pour la santé des consommateurs. Incorporés dans l'organisme, les ions Pb²⁺ entrent en compétition avec Ca²⁺ dans la formation des os (saturnisme) et peuvent aussi bloquer plusieurs enzymes.</p>
<p>Le cuivre</p> <p>Le cuivre est extrait d'une grande variété de minerais (165) d'une teneur de 0,7 à 2 %, atteignant exceptionnellement huit pour cent. Les minerais sulfurés (chalcopryrite, chalcosine) forment 80 % de la production mondiale mais les minerais oxydés (malachite, azurite) sont aussi très utilisés. De nombreux autres éléments métalliques (Fe, Ni, Zn, Pb, Co, Mo, Ge, Au, Ag) sont souvent associés au cuivre. La production mondiale était de 11 millions de tonnes en 1996. Il n'y a pas de production minière en France et l'industrie métallurgique est peu développée. Les réserves sont très faibles. Il n'existe qu'une seule usine de raffinage qui traite du cuivre recyclé et du blister (cuivre noir à plus de 98 % de cuivre) importé. Sa production était de 60 000 t en 1996. La consommation mondiale était de 12 millions tonnes par an en 1996, sans compter la part du cuivre recyclé dans la consommation du monde occidental, de l'ordre de 35 à 40 % (en France, 512 000 t/an en 1996), les principaux secteurs d'utilisation étant l'industrie électrique (>50%) et le bâtiment (30 %). L'industrie électrique apporte de grandes quantités de cuivre aux rivières et à l'atmosphère, le réceptacle final étant l'océan. L'utilisation d'oxyde de cuivre comme matière active des peintures anti-salissures constitue une source importante de cuivre en zone portuaire. La toxicité vis-à-vis des organismes marins dépend de la forme chimique du cuivre et de son état d'oxydation. En particulier, la concentration létale en 48 h pour 50 % des larves d'huîtres plates (CL₅₀ ; 48 h) serait de 1 à 3 µg/l et des inhibitions de croissance du phytoplancton se produisent à partir de 4 microgrammes par litre.</p>
<p>Le zinc</p> <p>Le zinc est très souvent associé au plomb et au cadmium dans les minerais, avec une teneur variant de 4 à 20 pour cent. Le minerai principal est la blende, sulfure de zinc (ZnS). Il y a actuellement 338 mines en exploitation dans le monde. La production mondiale était de 7 millions de tonnes en 1996. En France, les deux mines exploitées aux Malines (30) et à Saint-Salvy (81) ont fermé respectivement en décembre 1991 et en décembre 1993. En 1994, la France importait 300 000 t de zinc contenu dans des concentrés. La consommation mondiale est du même ordre que la production (en France, 248 000 t/an en 1996), les principaux secteurs d'utilisation étant la couverture de bâtiments (40 %), les barres et profilés (20 %), la chimie, notamment du caoutchouc (12 %). L'apport de zinc au milieu marin est essentiellement imputable à la métallurgie et à la combustion des bois et des charbons. Dans les zones portuaires, le zinc est introduit à partir de la dissolution des anodes destinées à la protection des coques de bateaux contre la corrosion. De plus, le zinc est contenu dans certaines peintures antisalissures. Les sels de zinc sont moins toxiques que ceux du cuivre ou du cadmium et présentent la particularité d'être moins nocifs pour les organismes marins que pour ceux des eaux douces, en raison de l'action protectrice des ions calcium. Les besoins pour l'organisme humain sont de 15 mg/j, nécessaires à l'activité d'enzymes. L'organisme d'un homme de 70 kg contient de 2 à 3 g de zinc. Sa déficience entraîne le nanisme.</p>

Tableau n°1 : Description des quatre métaux étudiés (d'après Chiffolleau J-F., 1999).

Le flet et le bar sont deux poissons qui présentent une alimentation diversifiée qui évolue avec leur taille. Très sommairement, il apparaît que les bars consomment surtout des crustacés. Les juvéniles consomment principalement des copépodes (petits crustacés) et des mysidacés (crustacés supérieurs). Les bars d'une taille de 15 à 20 cm consomment des crevettes et des petits crabes, les plus gros individus y ajoutent des poissons et en hiver des annélides. Les jeunes flets consomment principalement des copépodes et quelques crevettes qu'ils trouvent dans la colonne d'eau et des annélides qu'ils cherchent sur les vasières. Les individus de 16 à 22 cm consomment également des annélides et de nombreux bivalves, principalement *Abra alba*, alors que les individus de plus grande taille consomment surtout des bivalves mais également des annélides, des crevettes et quelques petits poissons. De ce fait, le réseau trophique de ces poissons fait intervenir une dizaine d'espèces principales, appartenant à la fois aux compartiments benthique et pélagique de l'estuaire. Les principales espèces constituant le réseau trophique de ces deux poissons ainsi que leurs concentrations métalliques ont été portées sur les figures 14 (page ci-contre) et 15 (page suivante). De façon simplifiée, ce réseau trophique peut être décrit de la manière suivante : il est constitué à sa base par le phytoplancton, essentiellement des diatomées, et les détritiques organiques. Un premier échelon trophique est représenté principalement par les copépodes dans le domaine pélagique et par les organismes microphages suspensivores et dépositivores dans le domaine benthique. Viennent ensuite les petits poissons et les crevettes, ces dernières pouvant également se nourrir directement de détritiques organiques (Chiffolleau J-F., 1999).

a- transfert de contaminants dans les réseaux trophiques

D'une manière générale, pour les quatre métaux étudiés, les concentrations diminuent de la base du réseau trophique, représentée par les débris organiques et le phytoplancton jusqu'au bar ou au flet (figures n°14 et 15). Il n'y a pas de phénomène de bioamplification des concentrations métalliques le long du réseau trophique, c'est-à-dire d'augmentation des concentrations au fur et à mesure que l'on passe d'un maillon trophique au maillon trophique supérieur. Ainsi, les concentrations diminuent depuis le phytoplancton jusqu'aux carnivores situés au sommet de la pyramide alimentaire. Ces derniers ont les concentrations métalliques les plus faibles (à l'exception du cuivre chez les crevettes du fait de la physiologie de ce groupe qui utilise le cuivre comme hème pour son pigment respiratoire, l'hémocyanine). Ainsi, les petits poissons gobiidés (*Pomatoschistus microps*) récoltés dans la zone oligohaline

de l'estuaire concentrent dans leur tissu environ 200 fois moins le cadmium, 40 fois moins le cuivre et le plomb et 5 fois moins le zinc que les diatomées et 80 fois moins le cadmium, 20 à 25 fois moins le cuivre et le plomb et 4 fois moins le zinc que les copépodes. Globalement, les bars et les flets de même classe de taille présentent dans leurs tissus des concentrations métalliques proches. Ces concentrations sont dans la gamme, du moins dans le même ordre de grandeur que celles mesurées dans les tissus de poissons pêchés dans différentes régions du monde. En tout état de cause, les muscles des bars et des flets pêchés en baie de Seine (parties consommées) présentent des concentrations métalliques extrêmement faibles, qui sont celles communément rencontrées chez les poissons pêchés le long des côtes de France. Parmi les organismes prélevés, les bivalves présentent les plus fortes concentrations métalliques.

Par exemple, pour les coques *Cerastoderma edule* et pour *Macoma balthica* (petit bivalve vivant enfoui dans les zones envasées), les concentrations mesurées sont de 2 à 3 (plomb, zinc, cuivre) voire à 7 (cadmium) fois plus élevées en baie de Seine qu'en baie de Somme, zone non directement soumise à des apports de polluants métalliques. Les concentrations en plomb, cuivre et zinc d'*Abra alba* (mollusque lamellibranche) collectées dans les vasières immergées de l'estuaire sont également très élevées et peuvent être mises en relation avec le régime alimentaire de ces bivalves qui se nourrissent principalement des particules déposées à la surface des sédiments. Il faut noter la forte contamination des bivalves de l'estuaire par le cadmium aussi bien en zones intertidale que subtidale. En effet, les concentrations en cadmium mesurées dans les coques prélevées sur les vasières de l'estuaire de la Seine sont identiques à celles trouvées pour des individus récoltés dans l'estuaire de la Gironde, site soumis à de forts apports de cadmium et où toute consommation de coquillages est interdite du fait de la présence de ce métal (Chiffolleau J-F., 1999).

b- Distribution spatiale de la contamination des organismes vivants

Pour les mêmes espèces ou pour des espèces proches, on peut observer des différences importantes des teneurs métalliques le long du gradient de salinité dans l'estuaire (figure n°16). D'une manière générale, en zones oligohaline ($0,5 < \text{salinité} < 10$) et mésohaline ($10 < \text{salinité} < 20$) de l'estuaire, les concentrations en cadmium, cuivre et zinc trouvées dans les échantillons constituant la base du réseau trophique (détritus organiques de diatomées) sont supérieures à celles trouvées en zone haline (salinité > 30). Par exemple, les concentrations dans les diatomées de l'estuaire sont environ 65 fois (cadmium), 10 fois (cuivre) et 7 fois (zinc) plus fortes que celles observées dans les diatomées marines. Ces observations montrent

bien une biodisponibilité plus grande de ces trois métaux dans la zone de dessalure de l'estuaire, vraisemblablement due à leur passage sous forme dissoute le long du gradient de salinité. La même tendance existe pour le cadmium et le cuivre chez les organismes de niveaux trophiques supérieurs, copépodes et mysidacés. Les copépodes sont ainsi 6 fois (cadmium) et 3 fois (cuivre) plus contaminés dans l'estuaire qu'en mer. Pour les quatre métaux étudiés, les concentrations mesurées dans les copépodes prélevés en zones oligohaline et mésohaline de l'estuaire de la Seine sont, en outre, toujours supérieures à celles mesurées dans des copépodes prélevés dans diverses zones océaniques ou estuariennes. En revanche, pour les espèces de plus haut niveau trophique, les concentrations métalliques restent homogènes, quelle que soit la salinité du milieu où vivent les individus. Pour les crevettes et les petits poissons, les concentrations mesurées en cadmium, en cuivre et en plomb sont proches de celles trouvées chez des espèces comparables prélevées sur les côtes françaises. Pour le zinc, les concentrations restent dans la fourchette supérieure pour les crevettes de la zone estuarienne de la Seine (Chiffolleau J-F., 1999).

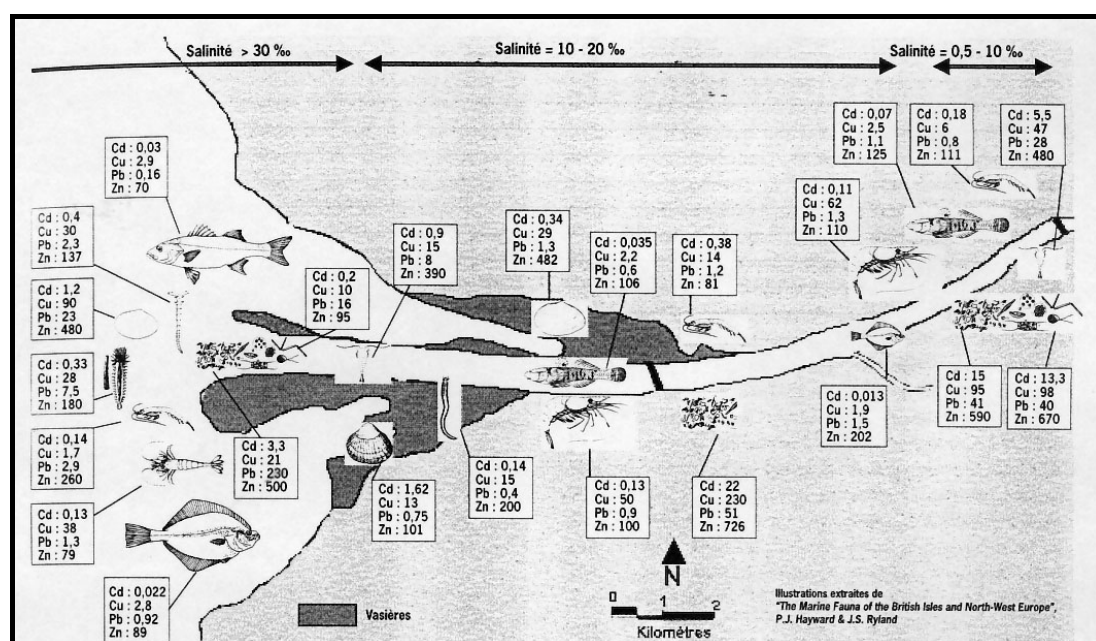


Figure n°16 : Concentration métallique mesurée dans les échantillons prélevés le long du gradient de salinité dans l'estuaire de la Seine (d'après Chiffolleau J-F., 1999).

Nous pouvons donc conclure, qu'il n'y a pas plus de danger pour l'homme de consommer les poissons de l'estuaire de la Seine que ceux d'autres estuaires. En effet, nous avons vu que la teneur en métaux des organismes du haut de la chaîne trophique était similaire à la teneur dans ces mêmes organismes pour d'autres estuaires. Cependant,

concernant les crustacés et les mollusques bivalves il est nécessaire d'être vigilant sur ces teneurs, car ces niveaux trophiques sont beaucoup plus sensibles à la contamination des eaux. C'est pourquoi, il est parfois interdit de les pêcher car les mesures effectuées révèlent des concentrations en contaminants métalliques trop hautes, qui seraient dangereuses pour l'homme.

2) Les composés organiques

Les contaminants organiques sont des composés chimiques d'origine anthropique, présents en milieu marin, à de très faibles concentrations, dites à l'état de traces, mais capables d'induire des effets biologiques néfastes pour la flore et la faune marines (Abarnou A. & *al.*, 2000).

Ceux-ci englobent une très grande diversité de composés chimiques introduits dans l'environnement, principalement ou exclusivement par suite des activités humaines. Ce sont donc aussi bien des composés d'origine naturelle (hydrocarbures fossiles du pétrole brut par exemple) que des substances issues uniquement des synthèses chimiques tels de nombreux pesticides. Les dioxines font aussi partie de ces composés organiques (Tableau n°2).

Liste des polluants organiques persistants définis par la Commission européenne économique des Nations unies (CEE-NU) et par le Programme des Nations unies pour l'environnement (Pnue, composés en caractères gras).		
Voir site : www.chem.unep.ch/pops		
Pesticides	Produits industriels	Sous-produits involontaires des processus industriels et de combustion
Aldrine	Hexabromobiphényle	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
Chlordane	Polychlorobiphényles (PCB)	Polychlorodibenzo- <i>p</i> -dioxines (PCDD)
Chlordecone		Polychlorodibenzofuranes (PCDF)
DDT		
Dieldrine		
Endrine		
Heptachlor		
Hexachlorobenzène (HCB)		
Hexachlorocyclohexane (HCH)		
Mirex		
Toxaphène		

Tableau n°2 : Liste des polluants organiques (d'après Abarnou A. & *al.*, 2000).

La dispersion de ces substances dans l'environnement pose des problèmes quant à leur détection et à la compréhension de leurs devenir biogéochimiques à diverses échelles géographiques, mais également par rapport à leurs effets sur les êtres vivants et sur l'ensemble des écosystèmes. La contamination chimique de l'estuaire de la Seine par les

composés organiques persistants et toxiques a été abordée dans le cadre du programme Seine-Aval au travers d'études visant à une meilleure connaissance de leurs sources, de leur comportement et de leur devenir biogéochimiques ainsi que des effets biologiques que cette contamination peut provoquer. En utilisant l'exemple de la Seine, on souhaite également fournir un aperçu plus global des résultats des recherches océanographiques consacrées aux problèmes de la contamination de l'environnement marin par les composés organiques (Abarnou A. & *al.*, 2000).

Nous développerons dans ce projet le cas des PCB, des PCDD et des PCDF.

a- Les polychlorobiphényles (PCB)

Ils n'existent pas naturellement. Ce sont des produits obtenus industriellement. Pour limiter leur dissémination dans l'environnement, l'utilisation des mélanges techniques de PCB a fait l'objet de réglementations très restrictives à partir des années soixante-dix dans la plupart des pays industrialisés, allant jusqu'à l'arrêt total de leur fabrication, en 1987, pour ce qui concerne la France. Les congénères de PCB sont communément désignés par CB suivi d'un numéro correspondant à leur structure selon la nomenclature proposée par Ballschmiter & Zell (1980). Le nombre et la position relative des atomes de chlore dans la molécule déterminent les propriétés fondamentales de ces composés et leur activité biologique. Par exemple, la solubilité de ces composés dans l'eau est très faible et diminue avec le nombre d'atomes de chlore dans la molécule. Elle est de 40 µg/l (0,18 µmol/l) pour le CB52 (2,2',5,5'- tétrachlorobiphényle), elle n'est plus que de 2,8 µg/l (0,008 µmol/l) pour le CB153 (2,2',4,4',5,5'-hexachlorobiphényle). Or, un composé peu soluble dans l'eau est soluble dans les lipides, on dit qu'il est hydrophobe. Cette caractéristique est essentielle quand on s'intéresse aux contaminants organiques dans les organismes. Plus un composé est liposoluble, plus il aura tendance à s'accumuler dans les tissus biologiques les plus riches en graisse. La persistance d'un composé dans l'environnement désigne sa résistance aux processus de dégradation physique, chimique ou métabolique. Dans le cas des PCB, elle s'explique aussi par la position des atomes de chlore sur la molécule. L'absence de paires d'atomes de carbone voisins non substitués rend ces composés plus persistants ; c'est le cas des molécules chlorées en positions 2,4,5 -2,3,4 -2,3,4,5 comme, par exemple, le CB153 (2,2',4,4',5,5'-hexachlorobiphényle) qui est le composé le plus persistant. Un composé persistant, même présent en faible concentration, aura des effets à long terme et pourra se révéler plus dangereux qu'une substance dégradable (figure n°17, page suivante ; Abarnou A.

& al, 2000).

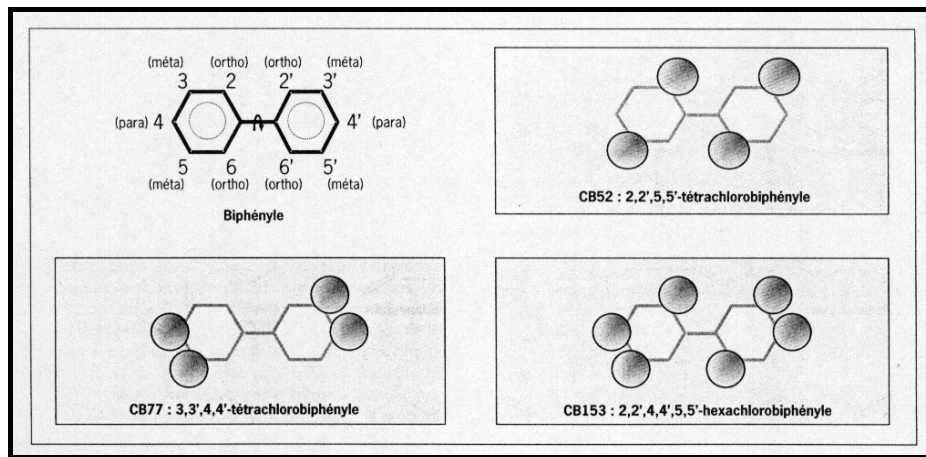


Figure n°17 : Composition chimique des PCB
(d'après Abarnou A. & al, 2000.).

b- Dioxines et furanes : toxicité extrême

Les polychlorodibenzo-*p*-dioxines (PCDD) et les polychlorodibenzofuranes (PCDF), regroupés sous le terme général de dioxines et furanes, sont des composés aromatiques chlorés qui regroupent respectivement un ensemble de 75 et 135 congénères différant par leur nombre d'atomes de chlore et la position qu'ils occupent (figure 18).

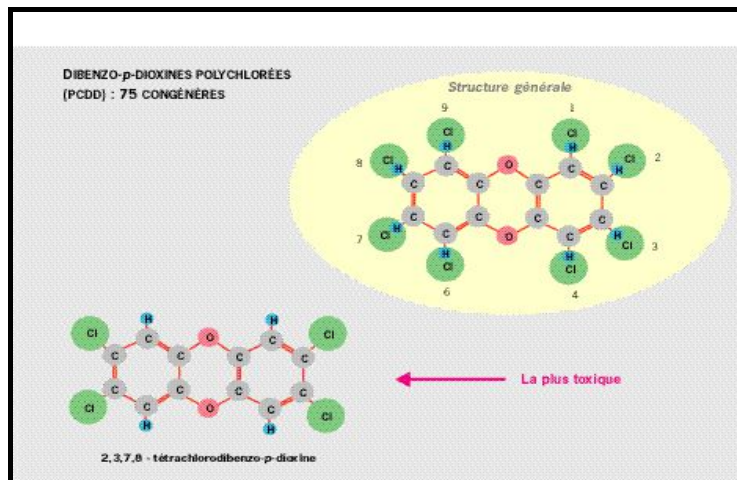


Figure n°18 : Composition chimique des dioxines (d'après Abarnou A. & al., 2000.).

Ces substances sont des molécules planes qui se caractérisent par une toxicité extrêmement élevée vis-à-vis des organismes vivants, y compris l'homme. Le congénère le plus toxique est la 2,3,7,8 - tétrachlorodibenzo-*p*-dioxine (souvent dénommée « la » dioxine) qui présente une toxicité plus de 10 000 fois supérieure à celle du congénère à huit atomes de chlore et 200 fois supérieure à celle du congénère de PCB le plus toxique (CB126)

comparaison basée sur les facteurs d'équivalents toxiques (TEFs*) chez le poisson. Cette substance est considérée comme étant l'une des plus toxiques jamais créées par l'homme. Les dioxines et furanes ne sont pas produits volontairement mais sont formés lors de la combustion de matériaux contenant des composés organiques chlorés. Les émissions atmosphériques de dioxines et furanes sont liées aux activités industrielles et domestiques, parmi lesquelles on compte essentiellement l'incinération de déchets solides, dont celle des ordures ménagères représente plus de 40 % des émissions, et la métallurgie (agglomération de minerai de fer, aciéries électriques). La combustion résidentielle de bois (17 % des émissions), le trafic automobile, l'incinération de déchets hospitaliers constituent également des sources d'émission à l'atmosphère. On estime que les émissions atmosphériques totales de PCDD/PCDF en France étaient de 873g I-TEQ** (entre 674 et 2737 g I-TEQ) pour l'année 1995, représentant 15 % des émissions en Europe. L'Europe contribue à plus de 50 % des émissions globales. Parmi les autres sources aux milieux aquatiques ou aux sols, on peut citer la production et l'utilisation de certains herbicides à base d'acide phénoxyacétique comme le 2,4,5-T (« agent orange » utilisé lors de la guerre du Viêt-nam) et l'industrie de la pâte à papier (Abarnou A., & *al.*, 1999).

*TEFs: Le concept de facteur d'équivalent toxique (TEF) a été développé afin d'unifier l'évaluation des risques posés par les PCDD, PCDF et autres molécules présentant des similarités de structures telles que certains PCB. Le concept repose sur le mode d'action des molécules avec un type donné de récepteur cellulaire. Il fournit une échelle permettant de classer la toxicité des molécules entre elles. Un facteur égal à 1 est attribué à la 2,3,7,8-TCDD, les autres facteurs étant exprimés en relatif par rapport à cette référence.

**TEQ = TEF multiplié par la concentration d'un congénère.

c- Les PCB dans les poissons de l'estuaire

Parmi les différentes espèces de poisson prélevées, le gardon a été suivi dans la partie amont de l'estuaire entre Poses et l'aval de Rouen. La contamination par les PCB mesurée dans la chair des gardons est faible (15 à 60 ng/g PS pour le CB153) par rapport à celle mesurée dans les flets, qui varie entre 80 et 500 nano grammes par gramme. Les empreintes de PCB ont été comparées dans le flet et le gardon (figure. 19, page ci-contre). Il s'agit de deux espèces omnivores. Le flet se nourrit essentiellement d'espèces benthiques comme les petits mollusques bivalves, les vers (annélides) et supra benthiques (crustacés, petits poissons) alors que l'alimentation du gardon a une composante végétale complétée par de petits insectes et des mollusques. Cette différence de régime alimentaire peut expliquer chez le gardon la

prédominance des constituants les plus légers, moins chlorés, partiellement dégradables. De telles différences d'empreintes de PCB entre espèces dulcicoles et espèces marines, observées par ailleurs, pourraient aussi s'expliquer par des physiologies différentes, notamment des phénomènes d'équilibre osmotique (Sanchez *et al.*, 1993). Le flet est une des rares espèces rencontrées sur l'ensemble de l'estuaire (bas estuaire, estuaire moyen et haut estuaire). Une distribution très hétérogène des différentes classes d'âge y est observée. Les mesures de PCB dans la chair de ces poissons montrent, en général, une contamination élevée (figure n° 20, page ci-contre). Un échantillonnage de flets plus important a pu être réalisé dans le secteur aval de l'estuaire. Dans une même classe d'âge, la variabilité de la contamination reste encore importante, en relation probable avec le comportement trophique opportuniste de cette espèce au gré de ses déplacements dans l'estuaire et même dans l'ensemble de la baie de Seine (Abarnou A., & *al.*, 2000).

En raison de leur caractère hydrophobe, ces contaminants (PCB, dioxines et furanes) entrent dans la chaîne alimentaire en s'accumulant dans les tissus des espèces prédatrices. À la différence de la bioconcentration qui dépend essentiellement des caractéristiques chimiques des substances, la bioaccumulation est déterminée par les processus biologiques qui sont propres aux espèces et qui, de plus, varient dans le temps selon les conditions du milieu. Le modèle de bioaccumulation des PCB, développé et validé dans le cas du réseau trophique des poissons de l'estuaire, a démontré la prépondérance de l'alimentation comme principale voie d'exposition des espèces prédatrices aux contaminants hydrophobes. Pour l'homme, c'est bien évidemment la consommation de coquillages ou de poissons contaminés qui représente la seule voie d'exposition aux toxiques. En ce qui concerne les PCB dans l'estuaire de la Seine, sur la base de la toxicité équivalente dioxine, la dose journalière admissible promulguée par l'Organisation mondiale de la santé serait atteinte par la consommation journalière de quelques moules. Même si les niveaux de contamination présentent une tendance à la baisse, ils sont encore bien trop élevés et, dans ce cas, la protection du consommateur impose l'interdiction de la consommation de certains produits provenant de la proximité immédiate de l'estuaire (Tronczyński J. & *al.*, 1999).

Ainsi cette contamination place la Seine parmi les plus contaminés d'Europe. Ceci est un gros problème en matière de santé publique. En effet, la plupart de ces composés ont des propriétés génotoxiques et cancérigènes sur les espèces sauvages. C'est pourquoi un mauvais fonctionnement de l'estuaire a été observé : une relative pauvreté biologique de l'ensemble de

l'estuaire et aussi des déséquilibres biologiques se traduisant par une faune piscicole rare et peu diversifiée. Par ailleurs, de nombreuses pathologies telles que les cancers et en particuliers les leucémies, les naissances d'enfants malformés, des sex. ratio biaisés en faveur des femmes, etc....sont observées dans la population lorsque des contaminations à la dioxine ont eu lieu. Ces produits sont donc très dangereux pour les communautés animales, et leur transmission à l'homme pose de graves problèmes.

C- Les autres perturbations pour la faune

Les perturbations de l'écosystème estuarien de la Seine sont aussi caractérisées par une contamination virale et bactérienne, la présence d'un bouchon vaseux ainsi qu'un fort aménagement de la section aval du fleuve.

1) Contamination virale et bactérienne

Les eaux de surface véhiculent de nombreux microorganismes comme des bactéries, des virus, des protozoaires, des algues. Ainsi, les eaux de l'estuaire de la Seine hébergent entre 5 et 20 millions de bactéries par millilitre d'eau. Une grande partie de ces bactéries sont naturellement présentes dans le milieu aquatique où elles se multiplient. Ces bactéries appelées autochtones jouent un rôle considérable dans les cycles biogéochimiques de divers éléments constitutifs de la matière vivante comme le carbone, l'oxygène, l'azote ou le soufre. À l'opposé, certaines bactéries dites allochtones sont apportées dans les milieux aquatiques alors que ceux-ci ne constituent pas leur environnement habituel. Il en est ainsi des bactéries d'origine fécale présentes dans les eaux usées et les rejets de stations d'épuration, et des bactéries telluriques (présentes dans les sols) apportées par les eaux de ruissellement. Alors que les bactéries autochtones sont adaptées à la vie dans l'estuaire, les bactéries allochtones auront un temps de survie variable selon l'espèce et les conditions du milieu. Parmi les microorganismes allochtones susceptibles d'être présents dans les milieux aquatiques naturels, les bactéries d'origine fécale ont une importance sanitaire et épidémiologique car elles sont responsables de diverses maladies chez l'homme. Pendant plusieurs siècles, les maladies bactériennes d'origine hydrique ont été responsables dans nos pays de vastes épidémies de dysenterie, fièvre typhoïde, choléra. Le tableau 3 reprend quelques bactéries pathogènes responsables d'infections d'origine hydrique.

Bactéries	Infections
<i>Salmonella</i> sp.	Fièvres typhoïdes et paratyphoïdes, gastroentérites aiguës
<i>Shigella</i> sp.	Dysenteries, gastroentérites
<i>Escherichia coli</i>	Gastroentérites, diarrhées
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Gastroentérites
<i>Vibrio cholerae</i>	Choléra, diarrhées

Tableau n°3 : Les bactéries de l'estuaire de la Seine (d'après Servais P. & al., 1999).

Parmi ces bactéries, les plus connues sont les espèces du genre *Salmonella* qui sont presque toutes pathogènes (responsables de fièvres typhoïdes et paratyphoïdes ainsi que de gastroentérites) et les *Escherichia coli* dont certaines souches sont responsables de redoutables gastroentérites et diarrhées. Ces bactéries pathogènes, qui sont principalement amenées vers les eaux de surface par les rejets d'eaux usées domestiques et les rejets d'élevage, peuvent contaminer l'homme soit par consommation directe d'eau, soit lors d'un bain ou d'un contact avec des eaux à usage récréatif, soit par consommation d'aliments contaminés par l'eau. Cette dernière voie de transmission semble avoir une importance croissante ; les produits de la mer, tels que fruits de mer et poissons, récoltés dans des zones microbiologiquement contaminées sont souvent mis en cause (tableau n°3 ; Servais P. & al., 1999).

Les virus impliqués sont appelés « virus entériques ». Ils appartiennent à des groupes taxonomiques (familles et genres) distincts. Malgré leur grande diversité, ces virus ont en commun une étape obligatoire de leur cycle de multiplication, l'intestin de l'hôte, avec pour conséquence l'existence d'un cycle de transmission féco-oral impliquant l'homme ou les animaux et leur environnement hydrique. Ces virus se caractérisent aussi par une certaine stabilité dans le milieu naturel et une résistance à de nombreux agents de dénaturation physicochimiques. Les virus entériques sont responsables de diverses manifestations cliniques (gastroentérites, entéroviroses, hépatites) parfois graves. Les mieux connus sont les entérovirus, les virus des gastroentérites (rotavirus, astrovirus, virus de Norwalk et calicivirus apparentés), les virus des hépatites, les adénovirus. Bien que la transmission directe de personne à personne soit la plus fréquente pour l'ensemble de ces virus, la transmission indirecte par consommation ou contact avec de l'eau est de plus en plus incriminée. Leur infectivité est élevée puisque l'ingestion de 10 à 100 particules suffit à provoquer l'infection. Plus de 150 espèces virales pathogènes transmises par voie féco-orale peuvent être incriminées dans les infections virales. Aujourd'hui, on admet que le nombre réel d'infections est sous-estimé puisque la plupart sont asymptomatiques (tableau n°4, page suivante ; Servais P. & al., 1999).

Genres	Espèces (sérotypes)	Taille	Type de génome	Infections
Entérovirus	Poliovirus (3)	2-30 nm	ARN	P, M, F
	Coxsackie A (23)			MR, M, F
	Coxsackie B (6)			MR, M, F
	Échovirus (32)			M, MR, F, GE
	Entérovirus 68-71 (4)			M, E, MR, F, CH
Hépatovirus	Hépatite A (1)	27-28 nm	ARN	H
Réovirus	Réovirus humains			Non établie
Rotavirus	Rotavirus humains	70-80 nm	ARN	GE, D
Calicivirus	Virus de Norwalk	26-32 nm	ARN	GE, V, D, F
	Petits virus ronds (SRV)	30-38 nm	ARN	GE, V, D
	Virus de l'hépatite E	27-34 nm	ARN	H
Astrovirus	Astrovirus humains (7)	28 nm	ARN	GE
Coronavirus	Coronavirus humains	120 nm	ARN	GE
Mastadénovirus	Adénovirus humains	70-80 nm	ADN	MR, C, GE

Abréviations : F : fièvre, M : méningite, D : diarrhée, GE : gastroentérite, P : paralysie, MR : maladie respiratoire, E : encéphalite, C : conjonctivite, CH : conjonctivite hémorragique, V : vomissement, H : hépatite.

Tableau n°4 : Les virus de l'estuaire de la Seine (d'après Servais P. & *al.*, 1999).

Cette contamination n'affecte pas principalement la faune, mais surtout l'homme au travers de contact direct avec l'eau (baignade). Cependant, certains organismes, essentiellement les mollusques, peuvent être vecteurs de certains de ces agents pathogènes. L'homme s'expose alors à un certain danger au travers de leur consommation.

2) Le bouchon vaseux

Au cours d'une marée de vive eau et en période de crue de la Seine, le déplacement du bouchon vaseux est de l'ordre de 20 km. En période de morte eau et en crue, il est de l'ordre de 10 km tandis qu'il est presque nul en morte eau et en étiage.

L'analyse de la charge solide moyenne de la Seine montre que :

- dans la partie fluviale, elle est normalement de 0,0020 g/l en période d'étiage (cette valeur dépasse 0,1 g/l en période de crue)
- dans l'estuaire, au niveau du bouchon vaseux, la charge en sédiments fins atteint 0,5 à 10 g/l,
- plus vers le large, les teneurs diminuent rapidement et passent à 0,005 - 0,010 g/l dans la Baie de Seine orientale. Le bouchon vaseux est bien développé dans la partie aval du chenal endigué, là où les vitesses de courants sont maximales. En crue, le bouchon vaseux est moins développé qu'en étiage, en effet une partie du nuage turbide est expulsée en mer hors de l'estuaire aux alentours de la basse mer (<http://www.univ-lehavre.fr>) (figure.n°21, page suivante).

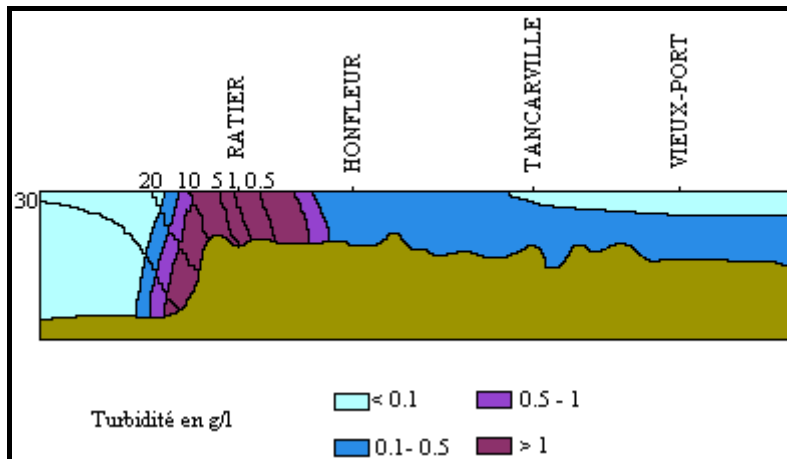


Figure n°21 : Le bouchon vaseux de la Seine (d'après <http://www.univ-lehavre.fr>).

Le bouchon vaseux, riche en matière organique, nourrit de nombreuses bactéries qui consomment tout l'oxygène disponible. L'eau y est donc dépourvue de dioxygène. Lors de leurs migrations en fin d'été les poissons doivent traverser le bouchon vaseux pour aller frayer en mer. Le manque d'oxygène leur est fatal et produit des hécatombes surtout lorsque le débit du fleuve est faible et sa température élevée. Ce phénomène était moins marqué lorsque le bouchon vaseux résidait plus en aval car la zone anoxique ne faisait que quelques kilomètres de long (voir partie III).

3) Les aménagements de l'estuaire

Avant son aménagement au milieu du XIXe siècle, la Seine était un fleuve large et peu profond. La pente de son écoulement, extrêmement faible (1 m pour 10 km), a déterminé et entretenu un régime aux typiques méandres libres. De nombreuses îles divisaient alors son cours en plusieurs bras. Les difficultés de navigation sur un tel fleuve, alors comparable à l'actuelle Loire en amont de Nantes, ont conduit, à partir de 1846, à des aménagements de grande ampleur (Joubert *et al.*, 1994 ; figure n°22, page ci-contre).

L'estuaire peu aménagé en amont de Rouen

La partie amont de la zone d'étude est le domaine géographique le moins modifié par l'homme. Cette partie de l'estuaire n'est actuellement empruntée que par des péniches. Les tracés ont été toutefois modifiés par certains aménagements : rectifications de chenaux, raccordements d'îles, endiguements ponctuels. Du point de vue environnemental, cette zone

amont préserve encore des espaces privilégiés pour la vie végétale et animale. Il y existe encore de nombreux abris, avec une ripisylve là où les rives ne sont pas protégées.

L'estuaire «chenalisé» de Rouen à Quillebeuf-sur-Seine

À partir de Rouen, la Seine est un chenal unique et profond, endigué sur l'essentiel de sa longueur. Les dernières digues insubmersibles protégeant les berges en amont de Tancarville ont été aménagées au milieu du XXe siècle. Dans l'ensemble de cette zone, la largeur du chenal est variable. D'une largeur nominale de 120 m, certains méandres atteignent une largeur de 150 mètres. Le fond du chenal n'est pas lisse mais au contraire généralement chaotique. Il est marqué de dépressions naturelles (fosses) et de hauts-fonds indurés qui, au cours de l'aménagement du chenal, ont fait l'objet de dragages mécaniques qui se poursuivent encore ponctuellement pour l'amélioration des accès. Ces dragages ont éliminés les espèces vivant dans ces infractuosités naturelles du plafond du chenal.

L'estuaire salin en aval de Quillebeuf-sur-Seine

L'évolution morphologique de cette partie de l'estuaire, la plus sensible à la dynamique marine, fut de tout temps la plus active. Les graves problèmes concernant la navigation ont conduit, depuis la fin du XIXe siècle, à y implanter les aménagements les plus élaborés du cours de la Seine. Au XXe siècle, il s'est ajouté à cette problématique propre au port de Rouen un besoin d'accroissement de l'espace du port du Havre (gain des terres sur l'espace estuarien aval).

Les divers aménagements de la Seine au cours de son histoire ont largement modifié le cours naturel du fleuve et de son embouchure. Les habitats ont ainsi été gravement touchés entraînant ainsi la disparition des espèces y résidant.

D- Quelles solutions ?

Concernant les polluants, l'estuaire de la Seine constitue un site pilote particulièrement adapté au développement de nouvelles méthodologies en milieu contaminé. Un ensemble d'indicateurs a été expérimenté dans le cadre d'une étude d'épidémiologie écologique afin d'évaluer un stress environnemental en zone estuarienne. Ce stress a été plus particulièrement étudié chez le flet et la dreissène à partir d'indicateurs biologiques et chimiques. Un premier bilan de la qualité de l'écosystème a permis d'identifier des zones vulnérables aux effets des polluants dans le cas d'expositions chroniques.

Ces méthodologies ont été récemment développées dans les rivières et les estuaires européens, canadiens ou américains. Face à la complexité du milieu naturel, elles mettent en évidence l'intérêt d'appliquer une batterie d'indicateurs chimiques et biologiques pour un même diagnostic de la qualité de l'environnement. L'étude d'épidémiologie écologique réalisée dans l'estuaire de la Seine a permis d'identifier des symptômes précoces et des pathologies caractérisant l'état d'exposition chronique des organismes aux polluants. Cependant, la capacité de prédiction d'un risque futur sur les populations à l'aide d'un tel outil est encore très limitée dans un estuaire.

Le pire n'est pas forcément à venir, sur le plan environnemental. Il faut donc se garder de tout catastrophisme, bien que les menaces sur l'estuaire ne soient pas à négliger. Elles viennent d'ailleurs de la nature (par exemple le comblement se fait par apport des sédiments marins véhiculés par le courant de flot) autant que de l'homme, bien plus conscient aujourd'hui de la fragilité des systèmes estuariens :

- La création du parc naturel régional de Brotonne, en 1974, a permis de freiner l'urbanisation rampante dans la vallée de la Seine, entre Rouen et Le Havre et de protéger les zones humides. Malheureusement, les années suivantes, les lotissements pavillonnaires se multiplient sur les plateaux environnants, de même que les mises en cultures intensives, aggravant les risques de ruissellement...On a donc un peu l'impression de défaire d'un côté ce qu'on construit de l'autre...
- On a donc tout intérêt à faire de l'aménagement global de territoire, ce qu'on appelle de la gestion intégrée (ici le bassin versant et le littoral estuarien).

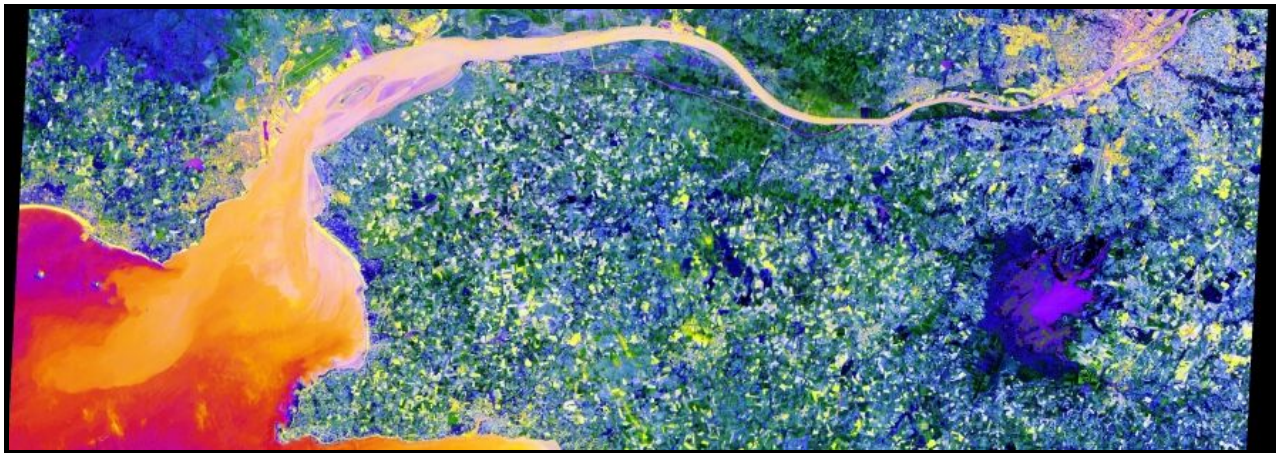
Vers une gestion intégrée : un exemple, Port 2000

L'objectif des partenaires intervenant dans le projet Port 2000 est de concilier essor économique et préservation de l'estuaire de la Seine.

- Dans le cadre de la loi Barnier (1995), des débats et des échanges (novembre 1997 à Mars 1998) autour du projet ont entraîné des études d'impact et clarifié les enjeux du débat sur la protection de l'estuaire. Des solutions ont été proposées, afin de limiter au mieux les dégâts occasionnés par la construction du port.
- Tout le monde s'est mis d'accord sur l'urgente nécessité de protéger les vasières et de remplacer celles qui seront détruites par le projet Port 2000 : une vasière de 200 ha sera implantée au sud du linéaire de quais du futur port.
- L'ensemble de la partie Est de la zone industrialo-portuaire est classée en réserve naturelle (prairies humides, schorre à roselière, vasières et bancs de sable) sur la rive droite du pont de Normandie au pont de Tancarville.
- Une réhabilitation est mise en œuvre, fragile.

Les Images satellitaires, les Systèmes d'Informations Géographiques, qui permettent des bilans rapides d'évolutions du littoral devraient s'imposer dans les prochaines années comme l'outil indispensable d'information grand public, à condition de les rendre accessibles au plus grand nombre. Le jeu d'échelles est aussi un outil de gestion intégrée de territoires, le seul outil à même d'assurer à terme un développement durable. En effet une scène de 60 km par 60 km permet de saisir pour partie les problèmes de bassin versant, alors qu'une scène de 10 km par 10 km permet de se rendre compte des mesures de protection qu'il faudrait prendre (<http://www.educnet.education.fr>).

III) La Loire, **un estuaire qui présente un important bouchon vaseux**



Source : www.sciences.univ-nantes.fr/scnat/

A- Présentation du fleuve et de son estuaire

L'estuaire de la Loire présente des risques industriels moins importants que celui de la Seine, son écosystème est toutefois perturbé par la présence d'un bouchon vaseux important relevant des caractéristiques propres à son bassin versant.

1) Cadre géographique

La Loire, le plus long fleuve de France, parcourt 1012 kilomètres de sa source au Mont Gerbier de Jonc jusqu'à son embouchure au niveau de Saint Nazaire dans l'océan Atlantique. Son bassin, étendu sur 118000 km², occupe plus d'un cinquième du territoire français.

L'estuaire de la Loire se situe donc sur la façade Ouest Atlantique de la France dans le département de Loire Atlantique en région des Pays de la Loire.

L'onde de marée s'amortit à Ancenis, à 95 km de l'embouchure, tandis que le sel dépasse rarement Nantes (www.loire-estuaire.org). L'estuaire comprend ainsi plusieurs régions : une zone d'influence maritime allant de l'embouchure jusqu'à Ancenis et une zone strictement fluviale en amont d'Ancenis jusqu'à Angers. Au sein de la zone d'influence maritime, l'estuaire est découpé en 3 sections : son embouchure avec Saint Nazaire est appelé estuaire externe ; la partie localisée entre Saint Nazaire et Nantes est appelée estuaire interne et la section en amont de Nantes correspond à la zone fluvio-maritime (figure n°23, page ci-contre).

2) Climat et géologie des facteurs influençant la répartition de la faune

L'estuaire de la Loire est sous l'influence d'un climat océanique ; les précipitations sont de 700 mm/an en moyenne et les isothermes sont de 11 et 12°C avec des amplitudes thermiques faibles. La température de l'eau, sous l'influence conjointe de la marée et de l'apport d'eau du fleuve, varie en général entre 4 et 23°C.

Les vents dominants sont de secteur W-SW et NE avec une vitesse supérieure à 4 m/s ; l'action de ces vents ainsi que la pression atmosphérique peut avoir une influence sur les phénomènes hydrodynamiques, provoquant des surcotes ou des décotes du marnage dans l'estuaire (www.loire-estuaire.org).

Jusqu'à la mer, sur 140 km, la Loire coule à la surface d'une plaine sédimentaire constituée d'alluvions qui ont colmaté son ancien lit rocheux sur des épaisseurs croissantes vers l'aval : 8 m à Angers, 27 m à Nantes, 50 m devant Saint Nazaire.

La majeure partie, déposée au cours de l'holocène, est constituée de sables et de « jalles », alternance de lits de sables et d'argiles, qui sont issus de différentes phases de submersion de la vallée. La présence de zones humides atteste du caractère encore submersible d'une partie de la vallée alluviale. Celle-ci n'est pas plane, elle présente une légère déclivité, du bourrelet de rive au pied de coteau. Cette déclivité est la résultante du dépôt des sédiments apportés par le fleuve en crue dans la partie à proximité directe du lit mineur (www.loire-estuaire.org).

Franchissant les différents reliefs d'orientation sud armoricaine, la Loire se fraie un chemin vers l'océan. Ces lignes de relief déterminent des goulots d'étranglement qui séparent les différentes zones de l'estuaire. Chacune de ces zones a un fonctionnement bien différencié. Ainsi l'estuaire externe, au-delà de Saint Nazaire – Mindin, est exclusivement marin. C'est une zone d'épandage sédimentaire depuis la remontée du niveau océanique à la fin de la dernière glaciation. L'estuaire moyen, compris entre Nantes et Saint Nazaire – Mindin est la principale zone de rencontre entre les eaux douces et limoneuses du fleuve et l'eau salée. En amont de Nantes, l'estuaire interne, autrefois purement fluvial, connaît périodiquement des remontées d'eau salée qui en perturbe le fonctionnement.

L'interaction des propriétés physiques et chimiques propres au fleuve et à la mer, source d'importantes contraintes environnementales, se traduit par des fonctionnements biologiques et écologiques spécifiques aux estuaires. Elle a ainsi une incidence directe sur la composition des communautés animales. La faune présente au sein de l'estuaire de la Loire se trouve ainsi confrontée à de nombreuses perturbations quelles soient d'origine anthropique ou non. Nous verrons ainsi successivement l'un des problèmes les plus importants pour les communautés animales en ce qui concerne cet estuaire : l'impact du bouchon vaseux ; puis nous aborderons les autres perturbations pour la faune telles que les aménagements ou la pollution.

Les espèces d'intérêt économique et le bouchon vaseux

Face à l'importance et l'augmentation du bouchon vaseux de l'estuaire de la Loire, les espèces migratrices sont fortement freinées dans les déplacements de leur cycle biologique. A travers cette étude nous avons voulu mettre en évidence et évaluer l'impact réel de cette charge sédimentaire sur la faune estuarienne.

1) Description du bouchon vaseux

L'estuaire de la Loire est un estuaire, tout comme celui de la Gironde, fortement marqué par la présence d'un stock sédimentaire, désigné par le terme de « bouchon vaseux » ou « maximum de turbidité ».

Un million de mètres cube de sédiments sont en mouvement à chaque marée. A l'étalement de haute mer, l'eau est calme pendant quelques dizaines de minutes. La vase se dépose donc au fond de l'estuaire. Cette floculation est particulièrement importante là où les cations de l'eau de mer (Sodium, Magnésium, Calcium) permettent l'agrégation des particules chargées négativement. Dans cette zone de rencontre entre l'eau salée et l'eau douce on estime que chaque marée apporte neuf centimètres de « crème de vase ».

Lors de la marée descendante, la violence du courant remet en suspension la plus grande partie de ce dépôt et occasionne alors le phénomène du bouchon vaseux. Ainsi huit centimètres des dépôts précédents sont remis en suspension deux fois par jour. Cette remise en suspension s'effectue principalement dans le chenal (figure n°24, page suivante). Elle n'a pas lieu dans les zones calmes. La floculation des argiles est ainsi directement responsable du colmatage très rapide des bras morts dans l'estuaire moyen (<http://www.educnet.education.fr>).

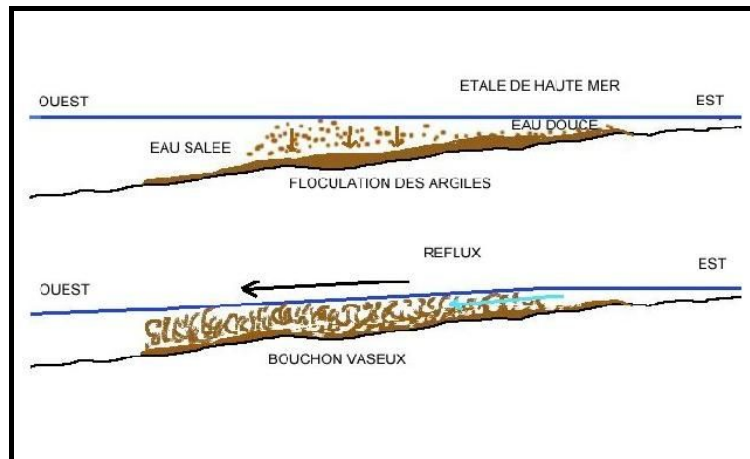


Figure n°24 : Schématisation du dépôt et de la remise en suspension des particules argileuses dans l'estuaire (d'après <http://www.educnet.education.fr>).

Les concentrations de matières en suspension rencontrées au sein du bouchon vaseux sont de 100 à 500 fois plus importantes que celles que l'on peut trouver dans le cours d'eau ou en mer : la masse sédimentaire du bouchon varie de 800 000 à 1 000 000 tonnes pour l'estuaire de la Loire. Elle peut représenter de 1 à 3 ans d'apports de sédiments par le fleuve.

L'accumulation turbide en matière en suspension oscille dans l'estuaire au gré des forces fluviales et maritimes : la position de son centre de gravité est dictée par le débit de la Loire et son gradient de concentration (bouchon vaseux/crème de vase) est déterminé par les coefficients de marée (<http://www.loire-estuaire.org>). Le bouchon vaseux se déplace ainsi d'amont en aval suivant le débit du fleuve et le moment de la marée (flot ou jusant). Quant au stock en suspension, il augmente et diminue en fonction du cycle lunaire de la marée. La partie déposée porte le nom de crème de vase, et elle est maximale en période de mortes eaux. Ce stock, où la concentration des sédiments est très forte (jusqu'à 300g/l dans la crème de vase), joue probablement un rôle fondamental dans une éventuelle dégradation de la qualité du milieu (Romaña, 1994).

Le faible débit du fleuve permet la remontée de l'eau salée jusqu'à Nantes. En conséquence le bouchon vaseux est situé dans la partie la plus étroite de l'estuaire moyen et s'étend longitudinalement sur près de 40 km (<http://www.educnet.education.fr>). Il se situe entre Nantes et Paimboeuf en étiage, oscille entre Cordemais et Saint Nazaire (en fonction des coefficients de marée) en débit moyen et peut être expulsé dans l'estuaire externe en période de crue (pour des débits supérieurs à 5000 m³/s). Pour la moitié du temps (débits compris entre 500 et 1000 m³/s) il est centré entre Donges et Cordemais, et s'étend de Saint-Nazaire à Couëron.

Les conséquences sanitaires, biologiques, écologiques, sédimentaires et économiques de cette situation sont importantes.

2) L'impact du bouchon vaseux sur la faune

Le bouchon vaseux joue un rôle fondamental dans la dégradation de la qualité du milieu. En effet, parmi d'autres conséquences :

- les micropolluants adsorbés sur les sédiments viennent s'accumuler dans le bouchon vaseux ;
- le bouchon vaseux accumule les bactéries d'origine animale ou humaine ;
- sa forte turbidité limite considérablement la pénétration lumineuse, et réduit, par conséquent, la production primaire ;
- l'oxydation du stock important de matière organique particulaire biodégradable accumulé dans le bouchon vaseux peut conduire à un sérieux déficit en oxygène dissous en période estivale (Romaña, 1994).

Ce dernier point s'avère être très ennuyeux pour le bien être de la faune (figure n°25).

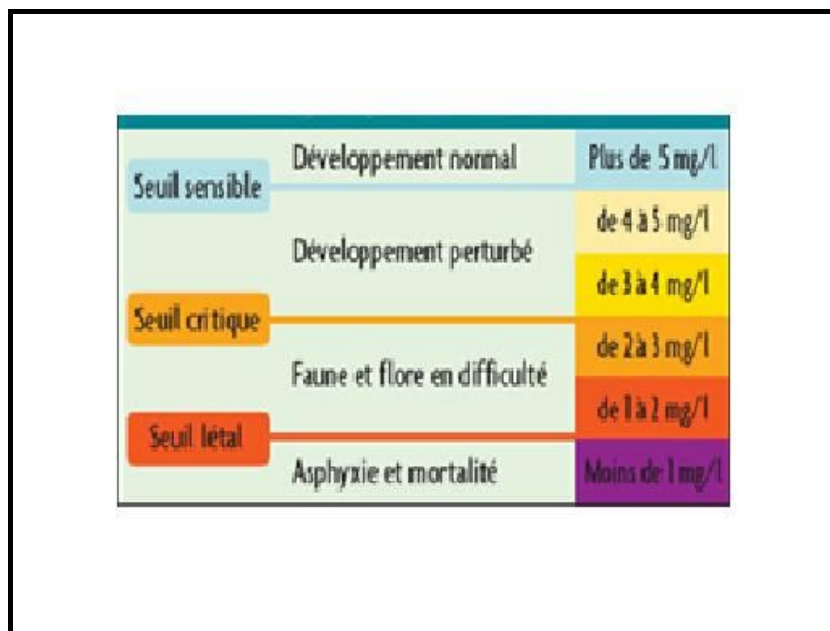


Figure n°25 : vie aquatique et besoins en O₂ (d'après Hubiche, 2002).

En effet, le bouchon vaseux, riche en matière organique, nourrit de nombreuses bactéries qui consomment tout l'oxygène disponible. L'eau est donc dépourvue de dioxygène.

Les concentrations en oxygène connaissent une grande variabilité liée à la position géographique de l'aval vers l'amont, et au cycle saisonnier. Deux périodes se distinguent chaque année :

- en période hivernale, de Saint Nazaire aux Ponts-de-Cé, les eaux sont bien oxygénées : les concentrations se situent au dessus du seuil de 5 mg/l sans entrave pour le développement normal de la vie aquatique. C'est la saison où le vent, la houle en aval et les débits élevés de la Loire fluviale favorisent l'agitation et limitent les élévations de température.
- en période estivale, au contraire, à l'aval de Basse-Indre, les concentrations descendent au-dessous du seuil de 5 mg/l durant 4 à 7 mois suivant les années, avec des périodes d'hypoxie forte, pouvant affecter des sections du fleuve sur 20 à 40 km. Les conditions s'améliorent en amont (figure n°26). Au-dessus de Sainte-Luce aucun déficit n'est enregistré (Hubiche, 2002).

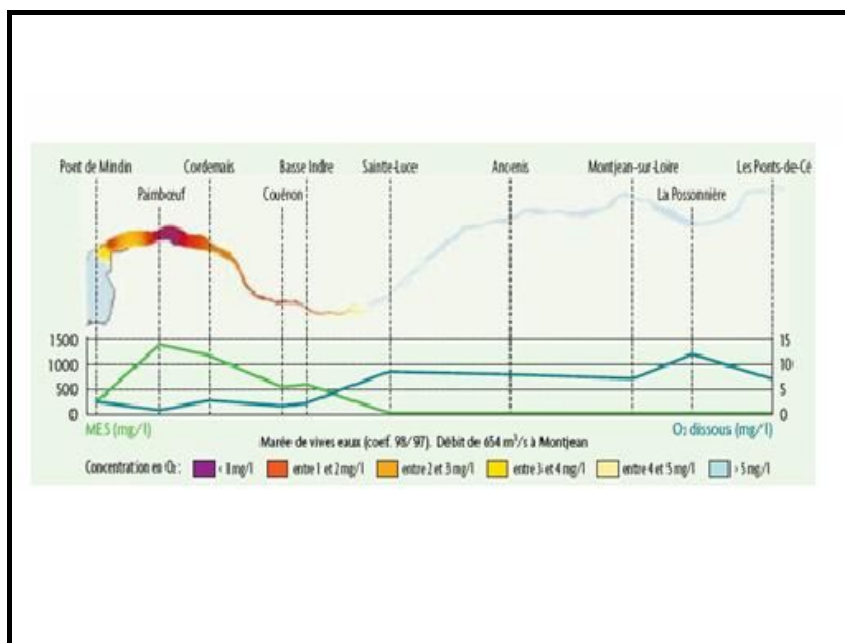


Figure n°26 : Répartition de l'oxygène et influence des matières en suspension (d'après Hubiche, 2002).

Lors de leurs migrations en fin d'été les poissons et en particulier les mulots doivent traverser le bouchon vaseux pour aller frayer en mer. Le manque d'oxygène leur est fatal et produit des hécatombes surtout lorsque le débit du fleuve est faible et sa température élevée. Ce phénomène était moins marqué lorsque le bouchon vaseux résidait en aval de Paimboeuf car la zone anoxique ne faisait que quelques kilomètres de long. Depuis sa remontée elle

s'étend sur près de 40 km lors des grandes marées à la fin de l'été (<http://www.educnet.education.fr>).

Des amplitudes de variations d'oxygène peuvent s'observer dans la partie intermédiaire de l'estuaire et sont moins prononcées en surface qu'à mi-profondeur où se rencontrent les déficits extrêmes (figure n°27, page ci-contre). Elles sont maximales à Cordemais (de 2 à 9 mg/l). Les mouvements des masses d'eau et les processus internes au bouchon vaseux expliquent ces fluctuations. Les eaux de surface sont toujours mieux oxygénées d'une part par le contact direct de la tranche d'eau avec l'oxygène atmosphérique et d'autre part par les apports d'eau fluviaux de l'amont ou marins de l'aval. A mi-profondeur, la consommation en oxygène est plus forte car le bouchon vaseux avec ses matières organiques consommatrices d'oxygène est plus dense. Les niveaux peuvent être en dessous des seuils d'hypoxie ($O_2 < 3$ mg/l).

Ainsi, un taux d'oxygène favorable en surface peut masquer un déficit en profondeur. Les animaux du fond peuvent être perturbés et parfois même privés d'oxygène, que ce soit les invertébrés ou les jeunes poissons utilisant l'estuaire comme nurserie. Ils vont s'adapter en opérant des déplacements saisonniers à l'intérieur de l'estuaire, en fonction des conditions offertes d'oxygénation du fond.

Les principales espèces touchées par l'existence de ce bouchon vaseux sont les anguilles, les aloses, les lamproies, la truite de mer, les éperlans, les bars, les plies communes, les flets, les mullets et les saumons. Mise à part pour ce dernier qui est maintenant interdit de capture en Loire, on observe depuis quelques années, et notamment depuis 1999, une forte diminution des prises des espèces précédentes (Riegert, 2003). Il en est de même pour les captures de crustacés et de céphalopodes (figure n°28, page suivante). Ce déclin est en partie dû à la présence de ce bouchon vaseux.

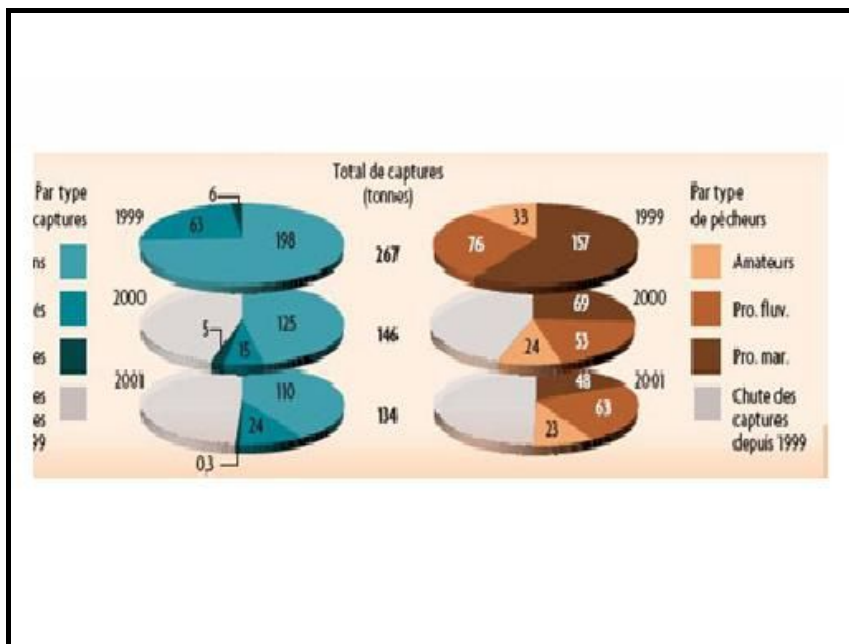


Figure n°28 : structure générale des captures, 1999, 2000, 2001 (D'après Riegert, 2003).

Cependant la présence du bouchon vaseux est loin d'être le seul facteur perturbant pour les communautés animales. L'implantation humaine par ses aménagements et sa pollution créé un obstacle au bon développement de la faune vivant dans l'estuaire de la Loire.

B- Les autres perturbations pour la faune

L'anthropisation au cours des siècles a engendré des modifications de l'état et du fonctionnement de l'estuaire de la Loire, tant au niveau physique que chimique et biologique.

1) Les activités urbaines, industrielles et agricoles

La vallée de la Loire, entre les Ponts-de-Cé et Saint Nazaire, est très marquée par la présence de l'Homme. Cette forte implantation se caractérise d'abord par de grandes agglomérations (Angers, Nantes, Saint-Nazaire), qui, à l'aval, s'entourent de pôles industriels. De plus le trafic portuaire y est important avec 4 sites principaux : Saint Nazaire, Montoire-de-Bretagne, Donges, Nantes et aval de Nantes. Pour faciliter la remontée des navires, le creusement du chenal a été réalisé jusqu'à Nantes ; le Port Autonome de Nantes - Saint Nazaire effectue des dragages d'entretien des profondeurs dans le chenal principalement à Donges afin de maintenir l'accès des navires aux terminaux portuaires.

Cette implantation anthropique est à l'origine d'un flux de pollution et notamment de micropolluants. On distingue les rejets urbains des rejets industriels parce qu'ils représentent des pollutions de nature différente.

Les rejets urbains, à travers l'assainissement collectif, sont source de matière en suspension, de matières oxydables, de nutriments (azote, phosphore...) et de microorganismes ; l'essentiel des apports se trouve au niveau des agglomérations.

Les rejets industriels sont de nature différente ; même si l'on trouve les matières oxydables, les MES, les nutriments, les industries produisent aussi des métaux, des hydrocarbures, des graisses, des pollutions liées à la température, et d'autres substances toxiques.

Les rejets de dragage peuvent aussi être à l'origine d'une contamination.

A l'inverse de l'estuaire de la Seine, il existe en Loire des zones peu industrialisées où l'activité agricole a pu se développer.

La richesse du sol de la plaine alluviale, et l'endiguement protégeant les inondations a permis le développement des cultures maraîchères dans la partie amont de Nantes, comme

dans une grande partie de la vallée de la Loire moyenne ; ce type de culture utilise beaucoup d'intrants (engrais, pesticides) qui sont retrouvés dans les eaux du fleuve, sous l'effet du ruissellement.

Dans la partie aval de Nantes, l'absence d'endiguement n'a pas permis l'établissement de ce type de culture dans les zones basses de la vallée. Cette portion d'estuaire est donc le lieu d'un flux de micropolluants beaucoup moins important que dans la partie amont puisque le type d'agriculture qui y est développé nécessite beaucoup moins de produits phytosanitaires et d'engrais que les cultures maraîchères.

Non seulement l'estuaire lui-même est le lieu de contamination biologique et chimique liée aux activités industrielles et domestiques, mais il est aussi le réceptacle d'une pollution apportée, puisque la majeure partie des flux de micropolluants d'origine agricole qui entrent dans l'estuaire est liée aux apports du bassin versant de la Loire. En effet, ce bassin a plutôt une vocation agricole, la pollution est donc plus liée aux produits phytosanitaires, aux engrais et donc à la matière organique générée par l'eutrophisation des eaux de la Loire moyenne. La population du bassin versant qui s'élève à 11,5 millions d'habitants, c'est-à-dire 19 % de la population française, est aussi à l'origine d'un flux de micropolluants d'origine industrielle ou domestique.

a- Cas des microéléments métalliques et des oligoéléments

Les oligoéléments sont indispensables, à faible teneur, au bon déroulement des processus biologiques. Cependant, certains deviennent toxiques dès qu'ils peuvent pénétrer dans les organismes de manière trop importante et dépassent certains seuils ; des effets néfastes sur l'organisme se font alors ressentir.

Les métaux sous forme dissoute sont directement biodisponibles ; les changements des conditions environnementales en estuaire entraînant le passage sous forme dissoute d'une partie des métaux liés au sédiment augmenteront l'exposition des organismes. C'est pourquoi, pour Martin et *al.* (1976), à l'exception des organismes filtrants et détritivores, les sédiments et MES en réduisant la biodisponibilité, auront plutôt tendance à jouer un effet antagoniste sur la toxicité des éléments métalliques. De ce point de vue, les fortes turbidités de l'estuaire leur sont sans doute bénéfiques. Cependant, cette théorie de « l'ion libre » comme seul toxique n'est valable que dans le milieu externe, car dans le tube digestif, l'action de la digestion sur

les particules contaminées libère la fraction potentiellement biodisponible de ces derniers et expose donc directement les filtreurs et mangeurs de sédiment à ces substances.

Parmi les métaux, les plus toxiques sont le mercure, le cadmium et le plomb. Au niveau de l'impact sur la faune, on observe les mêmes résultats que ceux décrits pour l'estuaire de la Seine. En effet, la bioaccumulation se manifeste pour les bivalves et non pour les poissons. Par ailleurs, pour ces derniers et les crevettes de la zone estuarienne, les concentrations mesurées en cadmium (Cd) et cuivre (Cu) sont comparables à celles des espèces prélevées en divers points des côtes françaises, mais celles en zinc (Zn) et plomb (Pb) apparaissent un peu plus importantes.

Certains métaux lourds ne sont pas bioamplifiés dans l'écosystème aquatique parce que plusieurs espèces des réseaux alimentaires ont la capacité de métaboliser, de contrôler les teneurs corporelles ou d'excréter ces contaminants, c'est le cas notamment de plusieurs espèces de crustacés, d'annélides et de poissons.

Des concentrations élevées en Cd peuvent provoquer des effets physiologiques pour les larves de crustacés (respiration, stimulation enzymatique) et des inhibitions de croissance pour le phytoplancton. Quant au cuivre, de fortes concentrations peuvent entraîner la mort des larves d'huîtres plates alors qu'il existe une régulation du Cu chez les moules. Moins nocifs d'une manière générale que les sels de Cu, les sels de Zn ont aussi la particularité d'être moins nocifs pour les organismes marins que ceux des eaux douces, en raison de l'action protectrice des ions calcium. L'embryogenèse des mollusques benthiques n'est altérée qu'au dessus de 75 µg/l, la survie des palourdes est affectée au-dessus de 820 µg/l et les crustacés et les poissons y sont peu sensibles. En ce qui concerne le Pb inorganique, de fortes concentrations entraînent des anomalies dans le développement embryonnaire des bivalves. Incorporés dans l'organisme, les ions Pb^{2+} entrent en compétition avec Ca^{2+} dans la formation des os (saturnisme) et peuvent aussi bloquer plusieurs enzymes. Il peut alors provoquer anémies et lésions du système nerveux.

b- Les pesticides

Ces molécules peuvent présenter, en sus de leurs effets intentionnels sur les parasites et organismes visés, des dangers pour l'ensemble de l'écosystème, ayant un impact immédiat ou sur le long terme, qui sont très variables en quantité et en nature des préjudices.

Ces molécules sont caractérisées souvent par une persistance et une capacité à s'accumuler dans les organismes animaux et le long des chaînes alimentaires, c'est le cas des organohalogénés, notamment du groupe DDT et composés voisins, et du HCH.

c- Les polychlorobiphényles (PCB) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Du fait de leur caractère hydrophobe et de leur grande stabilité chimique, les PCB sont bioaccumulés. Le nombre d'atomes de chlore et leur position sur le noyau déterminent leurs propriétés physico-chimiques, l'importance de la bioaccumulation et la toxicité vis-à-vis des organismes (voir partie II).

La nourriture représente la principale voie de transfert vers les organismes, la diffusion passive étant limitée pour les grosses molécules hydrophobes. Les PCB sont très peu métabolisés et stockés dans les tissus de réserve riches en lipides. Ils sont transférés par l'alimentation aux organismes de rang trophique plus élevé.

Les niveaux de contamination augmentent le long de la chaîne trophique : 15 ng/g de poids sec dans le phytoplancton, pour 400 ng/g dans les flets pour le CB153 (voir partie II). Pour une même espèce, les niveaux de contamination sont très homogènes. Ils le sont un peu moins pour les espèces opportunistes qui se déplacent dans l'estuaire et ont une alimentation plus ou moins contaminée comme le flet par exemple.

Les HAP sont des substances dont la structure chimique est constituée de plusieurs noyaux aromatiques, c'est-à-dire des cycles de 6 atomes de carbone avec double liaison, ayant en commun plus d'un atome de carbone (figure n°29).

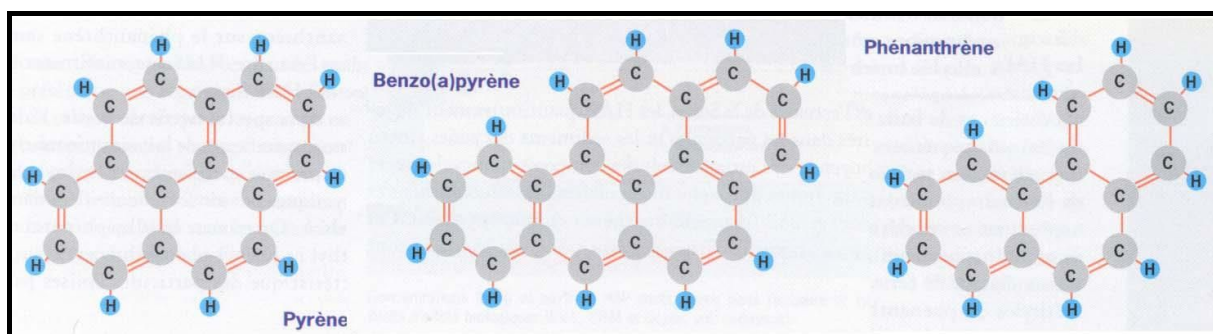


Figure n°29: 3 molécules de HAP (d'après Tronczyński J. & al., 1999).

Les HAP présents dans l'environnement résultent de différents processus :

- les pertes à partir du transport et de l'utilisation des carburants fossiles, charbons, pétroles. Les HAP sont présents en faible quantité dans les bruts pétroliers (HAP pétrogéniques), d'origine naturelle, caractérisée par une forte proportion d'HA ramifiés. Les rejets pétroliers, notamment lors des marées noires (échouages de cargaison) contribuent en partie aux apports de HAP.
- La pyrolyse des matières organiques à haute température, feu de forêt, combustion des charbons et pétroles. Ce dernier processus est la voie la plus importante d'apports à l'environnement, notamment avec la combustion des essences qui est source d'introduction dans l'atmosphère. Les activités industrielles, telles qu'usines de production d'aluminium et raffineries de pétrole, ainsi que les rejets urbains contribuent de manière importante aux apports atmosphériques et aquatiques (ce sont les HAP pyrogéniques).

Comme les PCB, les HAP prennent une part importante dans l'intoxication des organismes par voie alimentaire. Les vertébrés tels que les poissons et les mammifères peuvent métaboliser les HAP et aussi les éliminer efficacement de leurs tissus ou les dégrader en diverses substances (métabolites). Les HAP s'accumulent dans les mollusques et autres organismes benthiques. Les teneurs dans les tissus des moules ne sont pas directement corrélées à celles des mêmes composés dans les sédiments au même endroit. Les teneurs dans ce mollusque ont tendance à s'accroître rapidement quand celles du sédiment dépassent 3 $\mu\text{g/g}$.

D'une manière générale, on observe une diminution globale des teneurs en HAP le long de la chaîne trophique (du flet), ce qui confirme un caractère moins bioaccumulable que les PCB. La moule dreissene bioaccumule 3,5 fois plus d'HAP que le flet. La toxicité aiguë varie dans de très grandes proportions suivant la substance et l'espèce considérée. Ce sont surtout les effets à long terme et particulièrement leurs aspects cancérogènes et mutagènes qui présentent les risques écologiques les plus importants. Le caractère mutagène des HAP provoque notamment des tumeurs dans les foies du flet.

Les activités urbaines, industrielles et agricoles sont ainsi à l'origine du rejet d'un grand nombre de substances dans le milieu naturel au niveau de l'estuaire de la Loire et développent alors de graves perturbations au sein des communautés animales.

2) Les aménagements

Sur la Loire, les premières protections des cultures contre les crues, sous forme de petites digues, les « turcies », ont été élevées à partir du Xe siècle, en amont de Nantes. L'essor de la batellerie dès le Moyen Age entraîne le renforcement de ces turcies qui deviennent des « levées » et permettent ainsi d'améliorer la navigabilité du fleuve. Les travaux d'aménagement portuaire ont débuté dès le XVIIIe siècle. Ils se sont amplifiés par la suite pour s'adapter au développement des échanges commerciaux et à l'accroissement de la taille des navires (Kouadio- Kouadio, 1997). Le début du XXe siècle verra ainsi se réaliser des travaux considérables pour faciliter la navigation qui vont transformer la géométrie du fleuve en supprimant tout ce qui pouvait entraver la pénétration de la marée. En amont de Nantes, des épis sont mis en place afin de capter les sables et de concentrer les eaux en été en un lit unique ; en aval de Nantes, cette première partie du XXe siècle est marquée par de grands travaux d'aménagements liés au développement du port de Nantes – St Nazaire, endiguements, enlèvements des îles, des bancs et faux-bras, ouverture des chenaux de navigation, création du grand bassin de marée à l'amont de Nantes ; au cours de la période 1978 – 1980, des creusements encore plus importants ont été réalisés dans le lit mineur. Tous ces aménagements ont eu des conséquences majeures sur le fonctionnement hydrosédimentaire de l'estuaire :

- Pénétration vers l'amont des eaux saumâtres sur près de 25 km en amont de Nantes
- Abaissement de la ligne d'eau d'étiage de plusieurs mètres (4,4m à Bellevue),
- Accroissement des courants oscillants et des débits du fleuve à marée basse, d'où érosion importante des berges, élargissement des chenaux et du fond,
- Réduction des échanges hydrauliques latéraux,
- Création de fosses importantes à l'aval de plusieurs ponts entre Nantes et Ancenis,
- Accroissement considérable du marnage à Nantes de 1900 à 1970, dû à la croissance des volumes oscillants,
- Extension du bouchon vaseux, et envasement du lit du fleuve et des systèmes hydrauliques associés : canaux, étiers, marais, suite à la disparition des vasières latérales (surtout en rive droite).

L'ensemble de ces phénomènes a considérablement réduit les capacités d'autoépuration naturelle de l'estuaire tandis que les rejets d'eaux usées industrielles et urbaines n'ont fait qu'augmenter (<http://www.eau-loire-bretagne.fr>). Ainsi, l'évolution du fonctionnement de l'estuaire a-t-elle fragilisé de nombreuses zones d'un grand intérêt écologique.

Tous ces aménagements ont ainsi réduit les zones de frai, de nourrissage ou d'abri des poissons de l'estuaire et, avec l'extension du bouchon vaseux, augmenté la mortalité piscicole.

Les aménagements portuaires peuvent non seulement modifier le littoral, les paysages, la circulation des courants, des sédiments et les milieux (herbiers, zone de reproduction de la faune) mais ils peuvent aussi, par les bateaux et les machines qui y sont, créer de fortes perturbations. Les navires et engins de plaisance, eux-mêmes interviennent sur les milieux naturels : bruits, sillages, déchets, rejets éventuels et impact des mouillages notamment sur ancre. En concentrant les navires, les ports et mouillages concentrent aussi les nuisances (déchets, eaux usées, hydrocarbures, détergents, etc...). Leur capacité croissante augmente aussi la pression sur les sites protégés. D'autre part, la construction d'un port ou son extension a des impacts sur le milieu. Ces impacts sont soit limités à la période de construction, soit permanents du fait même de la présence du port et de son fonctionnement (<http://www.bretagne-environnement.org>).

Par ailleurs, comme dans le reste de la France, à partir du milieu du XIXe siècle, les effectifs bretons de poissons migrateurs ont largement décliné suite à l'apparition de barrages hydroélectriques ou de retenues d'eau potable, pour la plupart infranchissables (<http://www.bretagne-environnement.org>).

C'est une des causes invoquées de la quasi-disparition du saumon atlantique (*Salmo salar*) avec la rupture des accès aux frayères par la construction d'ouvrages infranchissables. En effet, cette espèce potamotocue est en fort déclin depuis 1950 ; ce fut un objectif prioritaire du Plan Loire Grandeur Nature de 1994 repris par le Programme Interrégional Loire Grandeur Nature en 2000. Il y a donc interdiction de sa capture en amont de la limite de la mer (Mindin – St Nazaire) depuis 1994 et l'abandon de sa pêche en estuaire externe où les marins pêcheurs en prélevaient encore 200 en 1990 et seulement 40 en 1993 (Hubiche, 2002).

La grande alose est aussi fortement touchée par ces barrages ; elle est actuellement en situation précaire (Hubiche, 2002).

Les activités anthropiques, que ce soit les activités industrielles, agricoles, ou urbaines, ont fortement perturbé les habitats des communautés animales par l'apport de substances toxiques, la participation à l'extension du bouchon vaseux et la construction d'obstacles infranchissables pour les poissons migrateurs.

C- Quelles solutions ?

Aujourd'hui la valeur écologique de l'estuaire de la Loire est reconnue. Et, avec la nouvelle prise en compte de la protection de l'environnement dans les politiques d'aménagement, on assiste de moins en moins à des aménagements « sauvages ».

Des aménagements importants peuvent se révéler nécessaires pour répondre aux objectifs d'amélioration du fonctionnement du fleuve, en particulier pour la remontée de la ligne d'eau d'étiage et pour la préservation des habitats naturels et de la biodiversité des zones humides. Dans ce contexte, les choix relatifs à l'aménagement, la protection et la mise en valeur de la Loire estuarienne tout en garantissant l'écoulement des crues et la pérennité de l'activité portuaire, devront chercher à relever significativement les lignes d'eau d'étiage dans l'agglomération nantaise et en amont. Ces choix seront précédés d'une concertation entre l'Etat, les collectivités territoriales, les acteurs socio-économiques et associatifs concernés (<http://www.loire-atlantique.pref.gouv.fr>).

Une démarche environnementale a été engagée dans les ports. Les pouvoirs publics et les gestionnaires des ports ont mis en place une charte de qualité des ports de plaisance au niveau de la Bretagne. Définie par le Conseil Régional et l'association des ports de plaisance en Bretagne, suivis par les conseils généraux, cette charte de qualité a notamment pour but d'offrir un meilleur environnement en maîtrisant les pollutions et nuisances et en intégrant les aspects urbains et paysagers. Le plan qualité des ports bretons du Conseil Régional prévoit et offre des possibilités de financement aux « diagnostics qualité » et incite les collectivités territoriales et les concessionnaires à mettre en place des aménagements et des actions de sensibilisation des usagers pour des bonnes pratiques dans les ports (installation d'aires de carénage non polluantes, récupération des batteries usagées, utilisation des poubelles, des sanitaires du port, du tri sélectif, précautions d'approvisionnement, etc....). Des aides financières existent aussi au niveau départemental (<http://www.bretagne-environnement.org>).

Un suivi des pollutions est aussi réalisé dans les ports. Les eaux et sédiments de certains ports sont surveillés par le réseau national de surveillance des ports maritimes (Repom) organisé depuis 1997. Son objectif est d'évaluer et de suivre l'évolution de la qualité des eaux (suivi bactériologique) et des sédiments (métaux et hydrocarbures) des bassins portuaires. Par ailleurs, les ports de plaisance, comme les autres ports, sont concernés par la

Directive européenne 2000/59/CE. Elle interdit les rejets en mer et oblige les ports à se doter d'équipements pour réceptionner les résidus d'exploitation des bateaux. Parmi les actions anti-pollution dans les ports de plaisance, figure la mise en place d'aires de carénage permettant de collecter les eaux contaminées par les produits employés pour l'entretien des bateaux, et plus généralement le recueil des déchets (bidon d'huile, de peinture, huile de vidange, déchets ménagers, déchets fécaux, etc.). Pour ce qui est plus particulièrement des peintures anti-salissures, depuis 1982, la réglementation interdit en France l'emploi des produits à base de tributylétain (TBT) pour les bateaux de moins de 25 mètres de long, ce qui concerne donc une grande partie des bateaux de plaisance (<http://www.bretagne-environnement.org>).

Il faut, en effet, essayer d'agir à la source responsable de la menace de la disparition de plusieurs espèces animales en tentant de limiter les rejets de substances toxiques et d'évaluer tout impact écologique avant de construire un aménagement quelconque. Mais il est possible d'agir aussi directement.

Des récifs artificiels ont été immergés dans le nord et dans le sud de la Loire afin de contrer le chalutage illégal et de régénérer les stocks de poissons. Des larves se sont alors fixées sur les surfaces de béton. Une faune d'espèces pionnières s'est installée : des organismes filtreurs (vers tubicoles calcaires, bivalves anonias) et de petits crustacés comme des balanes. Il y a alors fixation d'espèces situées en début de chaîne alimentaire. Les biologistes du bureau d'étude In Vivo qui ont plongé sur les jeunes récifs en juin et en juillet ont vu des étoiles de mer, des oursins, des araignées, des étrilles, des crabes dormeurs et surtout des tacauds, juvéniles et matures, qui présagent de la venue de prédateurs plus nobles, bar, lieu jaune, dorade, congre ou homard. Des espèces à forte valeur marchande. Mais ce programme mobilise 1,2 million d'euros sur 3 ans (De La Casinière, 2004). « C'est de l'aménagement du territoire » explique Régis Pajot, directeur technique du Syndicat mixte pour le développement de l'aquaculture et de la pêche, « mais c'est encore très expérimental, il n'y a pas de modèle reproductible d'un site à un autre. Il faut des résultats pour envisager une suite à plus grande échelle et un compromis entre qualité biologique et coût global ».

Et face au déclin des effectifs de poissons migrateurs dû en partie à l'apparition de barrages ou de retenue d'eau potable, un programme « milieux aquatiques et poissons migrateurs » a été mis en place en 1994 pour favoriser l'accueil de ces grands voyageurs dans nos rivières et stabiliser leurs effectifs (<http://www.bretagne-environnement.org>). Un projet de repeuplement du saumon atlantique (*Salmo salar*) dans le bassin de la Loire a ainsi démarré

en mars 2001 avec la création d'une salmoniculture installée au cœur de l'Auvergne. P. Martin, le directeur de la salmoniculture, souligne que ces installations sont les plus grandes d'Europe et s'inscrivent dans une démarche de qualité, visant à produire des poissons aptes à s'adapter à une vie sauvage, à parcourir plusieurs milliers de kilomètres et à venir se reproduire sur leur lieu d'introduction. Les conditions d'élevage offrent 8 fois plus d'espace aux poissons que dans les piscicultures à vocation commerciale. Par ailleurs, afin de conserver le patrimoine génétique de l'espèce, l'organisme s'appuie sur des géniteurs sauvages et leur première génération de descendants. L'objectif de ce programme est d'atteindre, en 2008, avec la deuxième génération, 2400 adultes. Pour y parvenir, 350 000 alevins, 220 000 smots et 500 000 œufs sont déversés chaque année.

Pour restituer les effectifs des différentes communautés animales au sein de l'estuaire de la Loire, il faut donc non seulement limiter voire interdire la pêche de certaines espèces menacées mais aussi leur redonner un habitat le plus sain et le moins déformé possible.

IV) Le Rhin, un exutoire fortement aménagé



A- Présentation du fleuve et de son delta

Notre sujet traite des communautés animales dans les estuaires. Un cas européen devait être étudié. L'étude du delta du Rhin, dans le cadre de ce rapport sur les estuaires, se justifie par l'impact sur la faune, des aménagements de l'embouchure du fleuve.

1) Généralités

Le Rhin supérieur naît dans les Alpes des Grisons de la réunion du Rhin antérieur (Vorderrhein), émissaire du lac Toma (massif du Saint-Gothard) à 2341 m d'altitude, et du Rhin postérieur (Hinterrhein), qui sort du glacier du Rheinwaldhorn (massif de l'Adula) à 2216 m d'altitude. A son entrée en plaine d'Alsace, le Rhin dispose d'un bassin versant de 37000 km², situé dans la zone montagneuse des alpes suisses. Au niveau de Strasbourg, la crue moyenne (juin-juillet) s'élève à 5000 m³/s et l'étiage (novembre-janvier) peut atteindre 600 m³, pour un débit moyen de 1100 m³/s. La superficie du bassin Rhin-Meuse représente 5,6 % de la superficie totale de la France. La principale couverture du bassin est l'agriculture : 1540000 hectares dont 740000 ha de terres labourées et 725000 ha de surfaces toujours en herbe (<http://www.rivernet.org>). En Allemagne, le Rhin traverse notamment la Rhénanie-du-Nord-Westphalie, la plus grosse région du pays, qui est peuplée d'environ 17 millions d'habitants et qui concentre le tiers de la production industrielle du pays. Après Cologne, le fleuve entre dans la plaine de l'Europe du Nord. Il arrose Düsseldorf et Duisbourg. En bordure de la Ruhr, à la hauteur d'un petit affluent sur la rive Est du Rhin, se trouve l'une des plus grandes concentrations d'activités industrielles du monde. À la frontière des Pays-Bas, la largeur du Rhin atteint environ 650 m. Le fleuve qui coule ici à nouveau vers l'Ouest se divise en plusieurs bras, le Vieux Rhin, l'Ijssel, qui se jette dans l'Ijsselmeer, le Lek, prolongé à Rotterdam par un canal accessible aux gros navires, et le Waal, le bras principal, qui rejoint la Meuse. Il traverse une large plaine marécageuse et se jette, par un grand delta, dans la mer du Nord. Son débit est en moyenne de 2 200 m³/s (<http://a.gouge.free.fr/les%20grands%20fleuves/rhin.htm> ; figure n°30, page suivante).

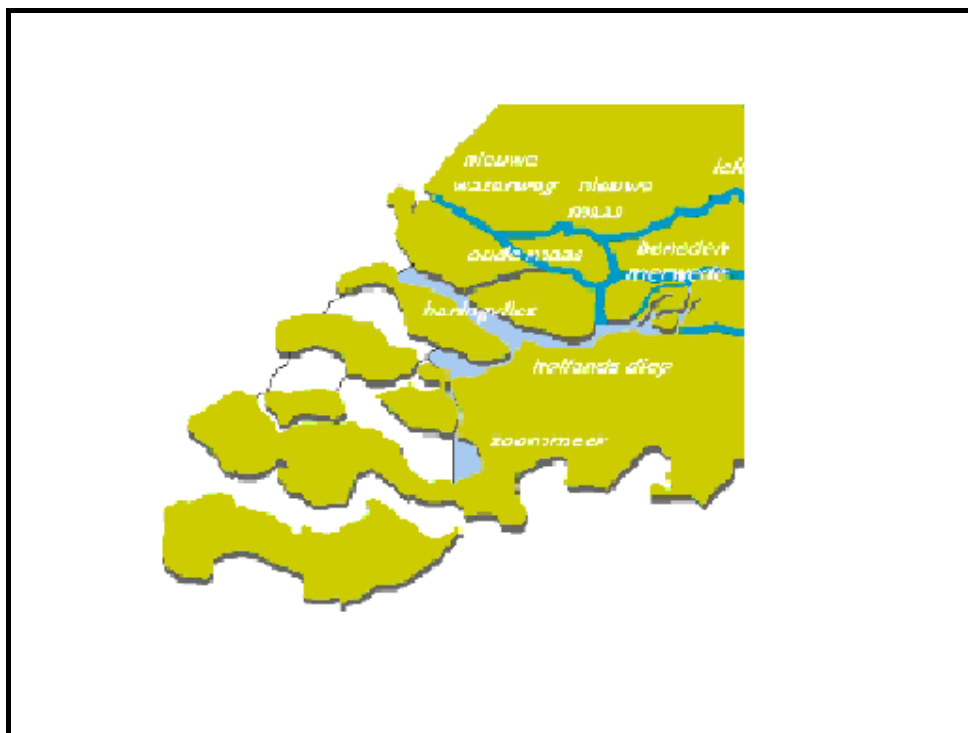


Figure n°30 : Le delta du Rhin (d'après <http://www.rivernet.org>).

2) L'importance du Rhin aux Pays Bas

Le Rhin est navigable depuis son embouchure jusqu'à Bâle, à 800 km en amont, par les gros remorqueurs. De nombreux cours d'eau, dont la Seine, l'Elbe, le Rhône, la Saône et le Danube, lui sont reliés par canaux, ainsi que certains affluents, dont le Neckar, la Moselle et le Main. L'aménagement du canal Rhin-Rhône reste en projet. Le Rhin draine d'importantes régions industrielles et agricoles. Charbon, minerai de fer, céréales, potasse, pétrole, fer, acier, bois sont transportés sur le fleuve. Son trafic total qui a presque quintuplé en cinquante ans atteignait près de 300 millions de tonnes en 1990. Il alimente les grands ports maritimes de Rotterdam, d'Anvers et d'Amsterdam. De nombreux barrages hydroélectriques ont été construits (<http://a.gouge.free.fr/les%20grands%20fleuves/rhin.htm>).

B- Les espèces d'intérêt économiques et le Plan Delta

En 1953, de violentes inondations venant de la mer ont coûté la vie à 1800 personnes. A la suite de cette catastrophe les néerlandais créèrent immédiatement une commission destinée à étudier les problèmes de sécurité du delta. Celle-ci a abouti en 1958 au vote par le parlement de la loi sur les travaux du delta. Ce projet fut la plus grande entreprise de génie civil jamais envisagée au monde. Il a coûté près de 40 milliards de francs aux Pays Bas. Mais qu'en est-il pour l'environnement ? Les communautés animales et leurs habitats ont largement souffert de cet aménagement du delta (barrières physiques pour les poissons migrateurs, désalinisation de certains bras, sédimentation importante, ...) C'est pourquoi, nous avons décidé de traiter de cet impact écologique.

1) L'aménagement des Pays Bas face aux eaux

Les Pays Bas, comme leur nom l'indique ont une altitude très peu élevée, tellement basse, que 30 % de la surface du pays se trouve au dessous du niveau de la mer. Les habitants de cette région ont donc souvent été confrontés à des problèmes d'inondation et ont sans cesse cherché à s'en défendre. Par ailleurs il a fallu assécher des terres pour faire face à l'avancée de la mer sur le territoire (figure n°31, page ci-contre).

Dès l'Empire romain, l'homme a construit des tertres (réhaussement de terres) pour faire face aux eaux, tant de la mer, que des fleuves. A cette époque il s'agit surtout de se protéger, plutôt que de gagner des terres. Par la suite il a commencé à creuser des fossés d'évacuation mais l'eau revenait sans cesse. Les techniques de digues et barrages se sont alors développées.

Au début du Moyen Age, la mer gagnant du terrain sur les terres, l'homme commença à essayer d'assécher certaines zones afin de les exploiter pour l'agriculture ; c'est ainsi qu'il commença à construire des moulins afin de pomper l'eau retenue par les digues (figure n°32). Ce fut le début de la polderisation, c'est-à-dire la formation de polders. Cette technique fut facilitée par l'arrivée de la machine à vapeur au 19^{ème} siècle, qui permit la construction de véritables stations de pompage (figure n°32, page suivante). C'est lors de cette période que l'homme fit les plus grandes avancées sur la mer.

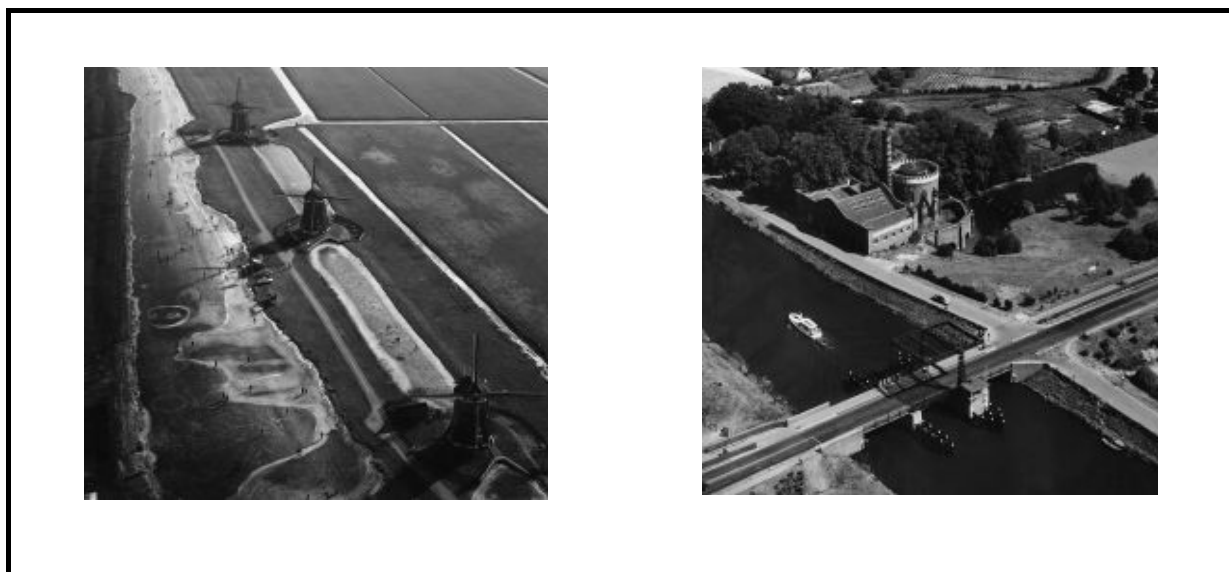


Figure n°32 : Chaîne de moulin permettant le pompage et la poldérisation, puis station de pompage à la vapeur (Paalvast. P. ; communication personnelle).

Au 20^{ème} siècle, après de catastrophiques inondations venant de la mer, l'Homme décide d'aménager toute la partie deltaïque du pays. Le Plan Delta est alors voté et le plus grand chantier de génie civil du monde se met en place.

Il est intéressant de noter que l'Homme a pris beaucoup de terre à la mer, mais en a également beaucoup perdu. Par ailleurs, si tous les aménagements du pays étaient aujourd'hui supprimés, les Pays Bas perdraient 50% de leur superficie.

2) Description du Plan Delta

A l'origine, le Plan Delta prévoyait la fermeture des estuaires des fleuves du sud-ouest des Pays-Bas à l'exception du Nieuwe Waterweg et de l'Escaut occidental, voies d'accès aux ports de Rotterdam et d'Anvers, pour créer un vaste lac d'eau douce.

Devant les pressions exercées au début des années 70 par les écologistes, très attachés à la préservation du milieu naturel de l'Escaut oriental, le gouvernement décida de modifier le Plan Delta.

Le Plan Delta, aujourd'hui achevé, diffère donc sur trois grands points des projets originaux :

- l'estuaire de l'Escaut oriental est fermé par un barrage anti-tempête à vannes et non par un barrage d'un seul tenant ; ceci pour préserver les intérêts de l'environnement et de la pêche, tout en garantissant la sécurité des populations
- de ce fait, deux barrages secondaires ont dû être construits dans la partie orientale du Delta (le Philipsdam et l'Oesterdam) pour permettre la formation de réservoirs d'eau douce ;
- dans le Nieuwe Waterweg, le canal qui relie le port de Rotterdam à la mer du Nord, un barrage anti-tempête a été construit en complément du renforcement des digues (IDG Newsletter, 1999).

Le barrage anti-tempête de l'Escaut oriental, est un ouvrage hydraulique impressionnant comptant 62 vannes d'acier coulissant entre 656 piliers de béton. En temps normal les vannes sont levées et le mouvement des marées préservé. Ce n'est qu'en cas de marée de tempête que les vannes seront abaissées (figure n°33).



Figure n°33 : Le barrage anti tempête de l'Escaut
(d'après <http://www.chez.com/bruzesepia/pageplandelta.html>).

Le Plan Delta comprend au total 9 barrages, dont 4 barrages **principaux** et 5 secondaires en arrière. Ces travaux gigantesques, d'une dimension jamais réalisée au monde, ont duré 32 ans et ont coûté 36 milliards de francs. Les travaux se sont terminés le 4 octobre 1986 et ont nécessité de multiples innovations technologiques.

Chronologie des travaux (figure n°34, page ci-contre)

- 1958: barrage mobile du Hollandse IJssel
- 1960: barrage de Zandkreek
- 1961: **barrage du Veerse Gat**
- 1965: barrage du Grevelingen
- 1970: barrage du Volkerak
- 1971: **barrage du Haringvliet**
- 1972: **barrage de Brouwersdam**
- 1985: **barrage anti-tempête de l'Escaut**
- 1985: barrage de Philipsdam

3) **L'impact du Plan Delta**

Lorsque le Plan Delta fut mis en place, tout le monde n'avait qu'un seul objectif en tête : accroître le plus rapidement la sécurité de la région. Par ailleurs, le plan Delta présentait un certain nombre d'avantages tels que l'amélioration des liaisons routières, une salinisation moindre des terres agricoles, la possibilité de créer de vastes réservoirs d'eau douce et le développement de loisirs en plein air.

Cependant, un certain nombre d'inconvénients, en particulier pour l'environnement et la pêche furent soulevés par les écologistes. Au début, ceux-ci ne furent pas beaucoup écoutés. Mais dès 1972, il y eut une prise de conscience sur la grande richesse et la diversité biologique de la région du delta, depuis toujours lieu de rencontre entre la terre et l'eau, la mer et les fleuves, l'eau salée et l'eau douce (Paalvast. P. ; communication personnelle).

Parmi les plus graves désagréments causés à l'environnement, on observe :

- Une réduction du mouvement des marées de 1,8 m à 0,3 m avec une perte de 90% de la zone intertidale.
- La présence d'eau saumâtre dans les bras de mer.
- Une accumulation de sédiments pollués.

Le résultat de ces profonds changements sur la région, fut une perte presque totale de l'écosystème estuarien dans la partie nord du delta. En effet, la quasi-totalité des nurseries furent détruites. De plus les différents ouvrages, représentaient des barrières infranchissables

pour les différentes espèces de poisson migrateur. C'est ainsi que l'on perdit le saumon dans le Rhin.

C'est pourquoi, en 1974, on décida d'intervenir en faveur de la protection de la nature et de l'environnement. Les lacs de Grevelingen et de Veere, deux bras de mer fermés de deux côtés par des barrages, sont redevenus salés par l'adduction d'eau de mer, mais sans être soumis au mouvement des marées, alors que le Plan Delta prévoyait à l'origine l'adoucissement progressif de leurs eaux (figure n°35 ; IDG Newsletter, 1999).

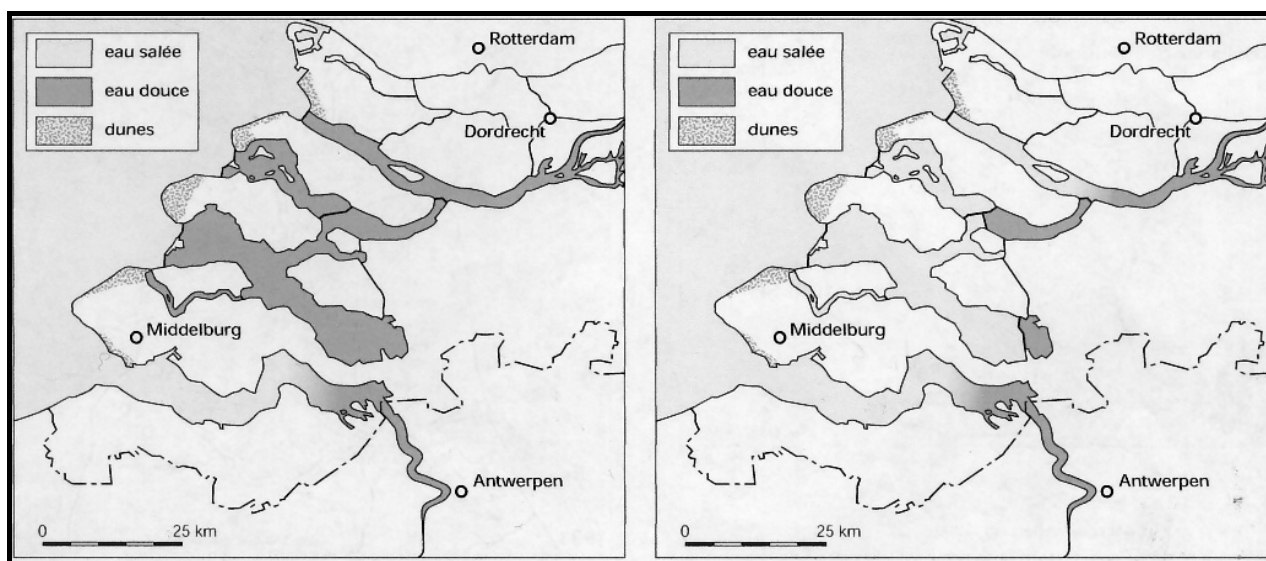


Figure n°35 : Répartition des zones d'eau douce et d'eau salée dans le delta, selon le plan initial puis selon la situation actuelle (d'après IDG Newsletter, 1999).

Pendant des siècles le Grevelingen a été un estuaire faisant la jonction entre la mer du Nord et les bassins de l'Escaut, de la Meuse et du Rhin. Le projet initial prévoyait une fermeture, un dessalement et un assèchement du Grevelingen pour gagner des terres cultivables et d'élevage. Heureusement, le projet initial fut abandonné au profit de la création d'un grand lac salé de plus de 100 km². Ces changements ont entraîné un bouleversement écologique : les espèces animales dépendantes du courant sont amenées à totalement disparaître au profit d'une vie fixée plus intense. L'apport, au travers des écluses, de l'eau riche en oxygène venant de la mer du Nord a permis l'éclosion, jusqu'à -15m, d'importantes colonies d'Ascidie et de nombreuses anémones encroûtantes blanches et brunes. Dans les chenaux profonds, sous le thermocline, là où l'influence bénéfique de l'eau riche en oxygène

ne se fait plus sentir, s'est développé un milieu anoxique peu propice à la vie (<http://www.ping.be>).

A l'origine le Veerse Meer était un bras actif de l'Escaut séparant les îles de Nord et Zuid-Beveland. Entre 1960 et 1961 la Veerse Meer fut totalement fermé pour devenir le lac d'eau douce que nous connaissons actuellement. Cette fermeture a été assurée par la construction des barrages de Zandkreek et du Veerse Gat. La construction du barrage du Veerse Gat inaugure une technique de pointe pour l'époque, celle des caissons à vannes. Ces caissons sont immergés les uns après les autres à marée basse lors de la phase de fermeture, puis remplis de sable ; ce qui évite, par rapport à la technique classique, des courants trop violents causés par la réduction de section du bras de mer à fermer. Le dessalement de l'eau de mer a eu des conséquences terribles sur la faune et la flore. Seules les espèces supportant une eau de moins en moins salée ont survécu. La faune est surtout composée de moules et d'anguilles (<http://www.ping.be>).

Par ailleurs, ces deux lacs étaient à l'origine très utilisés pour la mytiliculture et l'ostréiculture. Le lac de Veerse n'a pu garder que la mytiliculture, car son eau est devenue plus douce et seules les moules ont pu supporter ce changement. Quant au lac de Grevelingen, sa production d'huîtres est restée très importante. La température de l'eau, la salinité retrouvée, la nature du fond, la pureté de l'eau et la situation protégée de cette zone en font un endroit parfait pour élever des huîtres. 25% de la production d'huîtres aux Pays bas se fait dans le lac de Grevelingen. Deux sortes d'huîtres y sont cultivées : l'huître zélandaise (*Crassostrea gigas*), également appelée « huître creuse », et l'huître plate (*Ostrea edulis*). L'huître plate est plus rare que l'huître de Zélande. Sa rareté est due au fait qu'elle se reproduit plus difficilement. En outre, l'huître plate est sensible au Bonamiasis (maladie venue du Japon), ce qui fragilise sa population. C'est la raison pour laquelle la production des huîtres plates requiert plus d'attention de la part de l'ostréiculteur (<http://www.ping.be>).

Plus tard, le barrage de Haringvliet a suscité un nouveau débat. Normalement, les 17 écluses de décharges de ce barrage, achevées en 1971, sont fermées. Ce n'est que lorsque le niveau des eaux des fleuves atteint la côte d'alerte qu'on les ouvre pour évacuer les eaux excédentaires dans la mer du Nord. Le Haringvliet est ainsi devenu peu à peu une zone d'eau douce et sans marnage (figure n°36, page suivante ; Paalvast. P. ; communication personnelle).

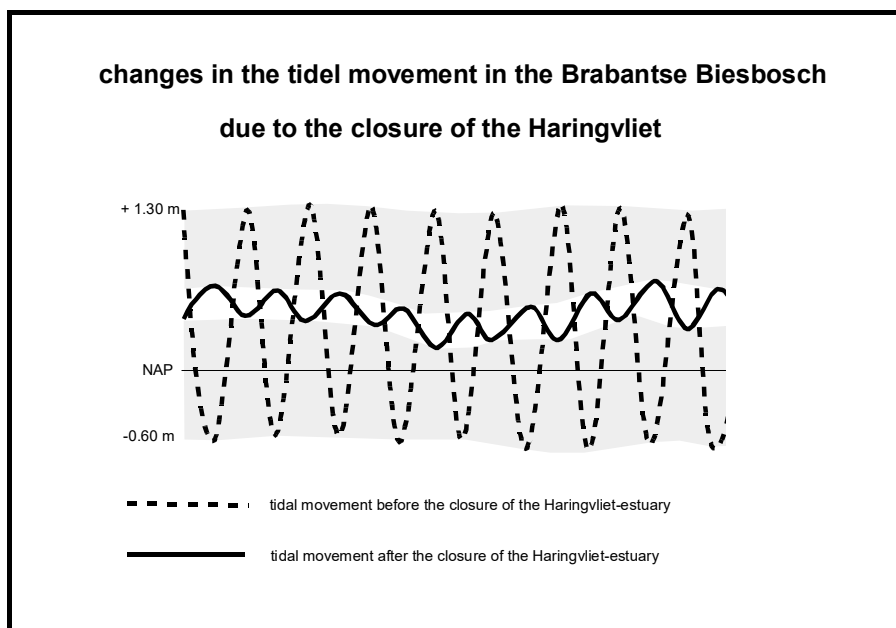


Figure n°36 : Impact de la construction du barrage de Haringvliet sur le marnage (Paalvast. P. ; communication personnelle).

Un des effets en a été que le Biesdoch, une zone unique entre Rotterdam et Breda, a perdu son caractère naturel. C'est pourquoi on a envisagé d'inverser totalement la fonction des écluses du Haringvliet : ouverte en temps normal, elles ne seraient fermées qu'en cas de danger d'inondation venant de la mer. Le barrage du Haringvliet deviendrait ainsi un barrage anti tempête comme celui qui a été construit dans l'Escault oriental, et le Haringvliet redeviendrait un bras de mer soumis aux mouvements des marées.

Une étude sur l'environnement a été menée afin de connaître la meilleure utilisation du barrage de Haringvliet, quant à son impact sur les différentes communautés animales de cette zone. Différentes populations d'invertébrés et d'oiseaux ont été étudiées selon les différents modes d'ouverture du barrage. Les quatre alternatives concernant le barrage sont : une fermeture totale des écluses, une ouverture des écluses permettant un faible marnage, une ouverture des écluses permettant un contrôle du marnage et enfin l'ouverture des écluses tel un barrage anti tempête permettant un marnage normal.

D'après les résultats de l'étude sur les invertébrés benthiques (figure n°37, page suivante), on remarque que leur répartition est très différente selon l'alternative d'ouverture du barrage considérée. Dans un premier temps, le fait que les écluses soient totalement fermées ou que le barrage permette un faible marnage n'influe presque pas sur la répartition des individus de chacune des espèces considérées. En revanche, dès que l'on envisage un barrage qui permet de contrôler le marnage ou à un barrage anti tempête, l'impact se voit très nettement. En effet les différentes espèces retrouvent des aires de répartition beaucoup plus

étendues. *Nereis diversicolor* et *Dreissena polymorpha* sont les deux espèces les plus sensibles à l'ouverture du barrage (Paalvast. P. ; communication personnelle).

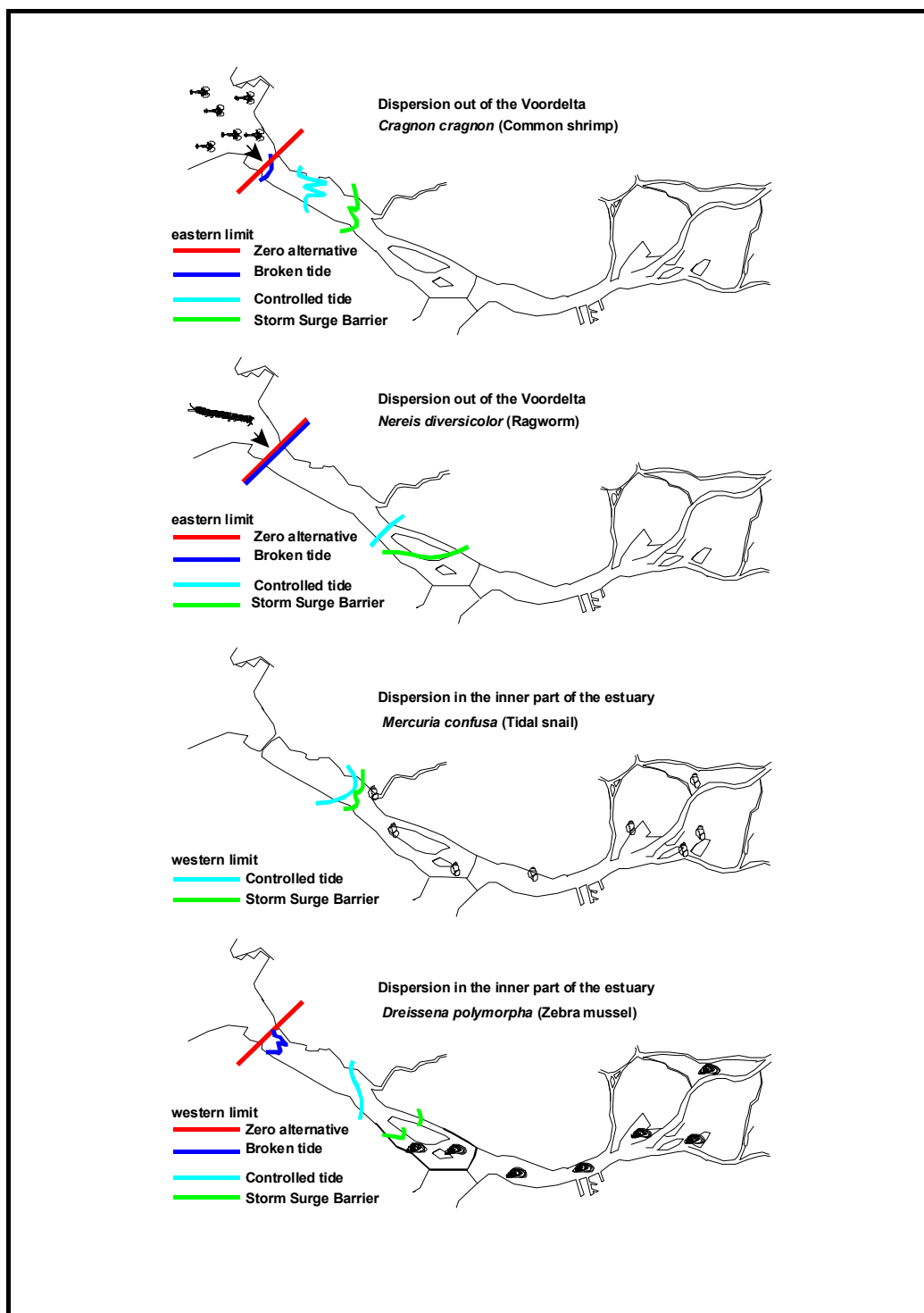


Figure n°37 : Impact du barrage de Harvingliet sur les populations de *Crangon crangon*, *Nereis diversicolor*, *Mercuria confusa* et *Dreissena polymorpha* (Paalvast. P. ; communication personnelle).

Les résultats de cette expérience sont résumés dans le tableau n°5.


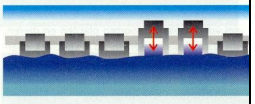
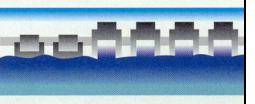

Alternatives	La « non-intervention » 	La « marée cassée » 	La « marée domestiquée » 	Barrage anti tempête 
Marnage à Haringvliet (m)	0,3	0,35	0,65	0,9
Marnage à Biesbosch (m)	0,3	0,4	1	1,3
Ecotopes estuariens (nbre)	3	9	25	25
Zone intertidale (ha)	350	500	1500	2250
Ecotope salin (ha)	0	950	3450	4750
faune	*	-/+	++	++
Conclusions	*	-/+	+	++

Tableau n°5 : Résultats de l'expérience (Paalvast. P. ; communication personnelle).

La meilleure solution serait donc de prévoir un barrage anti tempête. Cependant, le coût à envisager est largement supérieur aux autres possibilités et reste disproportionné au regard des bénéfices qu'une telle solution apporterait. Si on considère donc le coût et les restaurations d'habitats conséquentes, la meilleure solution est celle où la marée est « domestiquée ». Avec de telles mesures, on envisage donc de retrouver : une marée d'une amplitude de 1m, une zone de transition entre l'eau de mer et l'eau douce, une zone intertidale plus importante, une migration libre pour les poissons, le rétablissement des nurseries, une restauration de la faune et la flore, des zones intertidales d'eau douce et d'eau salée.

Le Plan Delta résulte aujourd'hui d'un compromis entre ce que prévoyait la loi à l'origine et ce que les défenseurs de l'environnement ont réussi à imposer. Ainsi les écosystèmes sont mieux préservés malgré l'ampleur de l'aménagement.

C- La pollution, un impact de mieux en mieux maîtrisé

L'exutoire d'un fleuve est fortement influencé par la pollution amont, le cas du Rhin nous a paru intéressant à développer. En effet sa pollution chimique historique et célèbre a été parfaitement régulée au cours des trente dernières années. Nous avons voulu étudier par quels moyens le retour de ce bon état écologique a été mené.

1) La pollution du Rhin

Le Rhin a pendant longtemps été le fleuve le plus pollué d'Europe. Cette pollution a été accrue par les aménagements du delta ainsi que par la catastrophe de l'usine de Sandoz en 1986. Par ailleurs, de puissants complexes industriels, sont établis dans les villes riveraines : Ludwigshafen-Mannheim, Cologne, Düsseldorf,... Bien que le Rhin écoule 60 milliards de m³ d'eau par an, la pollution reste un problème crucial sur le cours inférieur du fleuve qui sert de réceptacle aux eaux usées. Celles-ci proviennent de tous les centres industriels et miniers du bassin ainsi que des agglomérations urbaines riveraines de l'une des régions les plus densément peuplées au monde (<http://www.rivernet.org>).

La pollution a été fortement accrue à la suite des aménagements du Plan-Delta. En effet ces aménagements ont eu un impact considérable sur la qualité physico chimique du fleuve. Et cette pollution est en totalité déversée dans la Mer du Nord, perturbant ainsi fortement l'exutoire du fleuve.

Au dix-neuvième et vingtième siècle, le fleuve a beaucoup changé. Des barrages ont été construits sur un grand nombre de ses affluents, des vannes et des écluses ont été installées sur le fleuve lui-même. Trois de ses quatre exutoires vers la mer ont été fermés lors du plan Delta, rendant les zones de frai difficiles à atteindre. Les conséquences de ces aménagements ont été, une augmentation de la température du fleuve (assez faible) et un changement chimique considérable de l'environnement du fleuve. Dans sa période la plus perturbée, dans les années 1970, le taux d'oxygène a baissé à un niveau d'environ 50% de saturation et de nombreux polluants chimiques y ont été déversés. La baisse du taux d'oxygène a eu un impact

très important sur la biodiversité (figure n°38). En effet seul 25% des espèces ont subsisté. Aujourd'hui le taux d'oxygène est redevenu quasi optimal et les espèces sont presque toutes de retour (CIPR, 1998).

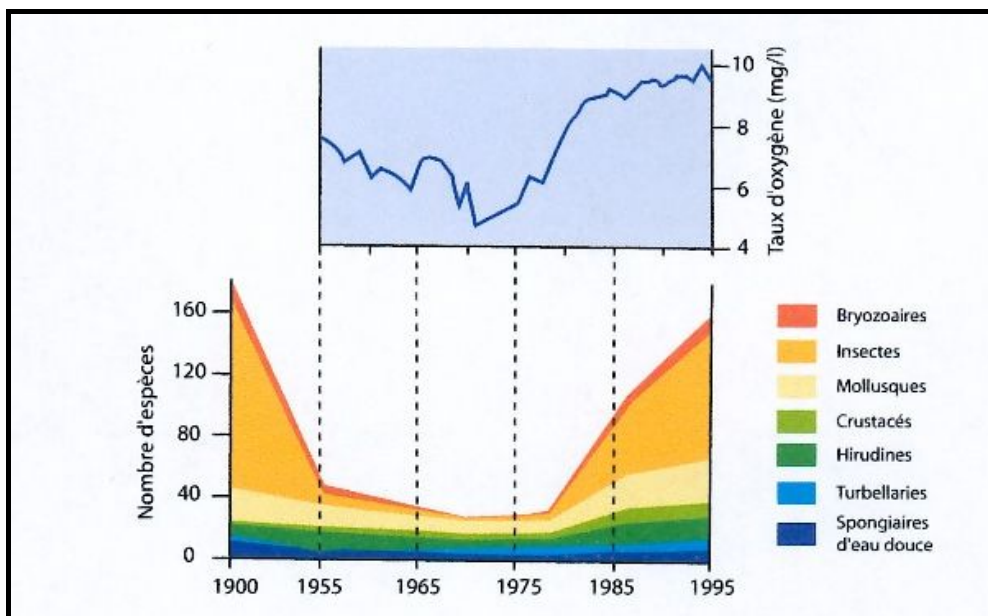


Figure n°38 : Corrélation entre le taux d'oxygène dissous et la biodiversité dans le Rhin de 1900 à 1995 (d'après CIPR, 1998).

Toutes ces modifications du fleuve ont eu pour terrible conséquence la disparition définitive des grands migrateurs d'intérêt économique important tels que le saumon, les truites de mer, les aloses, mais aussi les esturgeons. Seuls les poissons locaux ont été préservés grâce à des dispositifs facilitant le passage des barrages des aménagements du Rhin. Parmi ces aménagements, on retrouve les écluses à poissons permettant leur remontée par cycles de 2 h, ou encore les tubes garnis de fagots de bois pour les anguilles.

En 1986, l'incendie de l'usine chimique de Sandoz (société d'industrie suisse située à Bâle) fut un véritable désastre écologique. Le Rhin déjà très pollué alors se vit recueillir des tonnes de déchets toxiques anéantissant ainsi toute vie piscicole. Ceci fut un véritable électrochoc et la Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR) a fixé un programme d'actions visant à restaurer l'écosystème rhénan, avec pour mission principale et surtout symbolique, le retour du saumon. Cependant, l'essentiel était d'améliorer la qualité de l'eau, afin d'offrir des conditions d'habitat idéales, mais aussi de permettre la remontée du fleuve et de ses affluents par les migrateurs afin de les mener vers la reproduction. Ceci devait être facilité par la construction de grandes passes à poissons.

2) Le repeuplement du Rhin

Le repeuplement du Rhin par les migrateurs a été mené de plusieurs façons :

- tout d'abord, divers aménagements ont été réalisés afin de faciliter leur migration pour la reproduction (<http://www.aufildurhin.com>).

Les passes ou échelles à poissons

Construite au barrage de Kembs, une passe à poissons constituée d'une succession de bassins, permet aux poissons de gravir facilement la dénivellation de près de 12 m entre le Rhin et le Grand Canal d'Alsace. Son action est renforcée grâce à l'attrait créé par le turbinage du débit réservé au Rhin naturel, qui débouche à l'entrée de cette passe. Une échelle similaire équipe les barrages agricoles ou les seuils fixes, mais sans groupe de turbinage.

Ces futures ou déjà existantes passes à poissons sont un exemple de solutions visant à ne pas barrer la route vers les frayères. 6 hectares de frayères et 115 hectares de zones de croissance des alevins ont été recensés par le Conseil Supérieur de la Pêche sur le Vieux-Rhin.

Les grandes passes à poissons

Dans le cadre du programme européen Saumon 2000, la plus grande passe à poissons construite en Europe a été mise en service au printemps 2000 à la centrale d'Iffezheim. Les producteurs d'électricité, EDF et EnBW, participent grandement à ces projets aux côtés de la France et de l'Allemagne au travers des études, de la réalisation et du financement.

C'est un ouvrage en béton à ciel ouvert ayant une pente d'un peu moins de 4° (1 m d'élévation pour 15 m). La longueur de la partie amont est d'environ 200 m. Elle est constituée de 37 bassins successifs reliés entre eux par des fentes verticales. Ainsi, après franchissement de chaque fente, les poissons peuvent se reposer dans le bassin. Un débit d'attrait important (11 à 15 m³/s) est nécessaire pour signaler les entrées de la passe aux poissons. Après avoir été turbiné par un petit groupe de type « bulbe », ce débit s'ajoute à celui de la passe (1,2 m³/s) dans le bassin situé juste en amont des entrées.

Le local d'observation

Dans la zone de sortie des poissons, des installations permettent aux experts piscicoles français (Conseil Supérieur de la Pêche, Saumon-Rhin) et allemands d'identifier, de compter, de peser et d'enregistrer tous les poissons qui empruntent le dispositif. En deux ans et demi de suivi des migrations, ce sont 34 espèces de poissons dont 6 espèces de grands migrateurs qui ont franchi la passe d'Iffezheim.

A la suite de ces mesures le retour symbolique du saumon par remontée naturelle du fleuve a été noté en juillet 1995 marquant ainsi le succès de l'opération « Saumon 2000 ». Par ailleurs, 34 espèces ont été identifiées dans le local d'observation. Parmi elles, on retrouve outre le saumon, la truite de mer, les barbeaux, de nombreuses anguilles, des aloses, des lamproies marines,...Seul l'esturgeon reste malheureusement encore absent.

- Par ailleurs, une procédure est en cours d'étude, il s'agit du piégeage et transport des poissons. Ceci est mené par EDF en liaison avec les experts de l'administration française sur la remontée du saumon. Cette méthode, déjà éprouvée en France sur la Garonne et en Amérique du Nord, est efficace et de mise en œuvre rapide (<http://www.aufildurhin.com>).
- Enfin, et surtout, des œufs de poissons ont été élevés puis réintroduit en masse dans le fleuve afin de le repeupler de façon artificielle. Ce sont en particulier, des stocks de *Salmo salar* en provenance d'Irlande ou de France (notamment la souche Loire-Allier) qui ont été réimplantés (<http://www.rivernet.org>).

Le succès fut aussi marqué par la remonté de 43 saumons adultes en mer pour la fraie. La reproduction naturelle a été attestée.

Mise à part la disparition des poissons migrateurs, il est à noter que les mammifères et les amphibiens ont également largement souffert des aménagements du Plan Delta ainsi que de la pollution du fleuve.

Aujourd'hui, tous les problèmes de pollution n'ont pas disparu, mais on considère que le Rhin est le fleuve le plus propre d'Europe. L'un des plus graves problèmes subsistant est celui des boues draguées du port de Rotterdam qui sont déversées dans l'estuaire. Par ailleurs, certains dépôts de sédiments toxiques dans les sédiments du fleuve ne s'éliminent que très lentement. On peut encore noter que le fleuve est considéré comme propre en terme de physico-chimie mais il ne respecte pas les normes bactériologiques. Le Rhin a donc retrouvé une certaine vie, mais reste encore largement fragilisé par les aménagements, aussi bien par le Plan Delta que le long du fleuve.

Discussion

Dans les exutoires de fleuve, les communautés animales sont fortement soumises à la pression anthropique. Ce travail de recherche bibliographique nous a permis de confronter les différentes formes de pollutions rencontrées et d'en étudier les impacts sur les différentes espèces estuariennes. Afin de mener à bien cette étude, nous avons choisi d'analyser les embouchures de deux fleuves français, la Seine et la Loire, et d'un fleuve européen, le Rhin. Bien que doté d'une morphologie plus deltaïque qu'estuarienne, le choix de l'exutoire du Rhin se justifie par l'importance des aménagements effectués au cours de ce dernier siècle et perturbant les communautés animales présentes. En effet ce delta présente la particularité d'être marqué tant par les marées dynamiques que par les marées de salinité. C'est pourquoi, devant la nécessité de protéger les populations contre les inondations venant de la mer, les divers bras de cette embouchure ont été aménagés affectant ainsi la faune locale.

L'impact des aménagements des embouchures pour les communautés animales

Face aux activités industrielles et agricoles, les cours d'eau ont beaucoup souffert de la mise en place d'infrastructures. Cette anthropisation est de plus en plus marquée vers l'aval. Ceci peut s'expliquer aussi par la montée du commerce international favorisant l'émergence de grands ports. Celui de Rotterdam, qui se situe dans l'un des bras du delta rhénan, est le plus grand du monde, celui du Havre se situe au 13^{ème} rang européen et celui de Saint Nazaire présente une activité et une construction navales de grande ampleur. De plus, pour faciliter les déplacements des navires marchands jusque dans les hauts estuaires (Nantes, Rouen), la chenalisation s'est accentuée, entraînant ainsi une transformation de la géométrie du fleuve en supprimant tout ce qui pouvait entraver la circulation des bateaux. La morphologie des fleuves a été aussi modifiée par des travaux d'endiguement, de raccordement d'îles ou encore de dragage.

Tous ces aménagements ont eu des conséquences majeures sur le fonctionnement hydrologique et hydrosédimentaire des estuaires et donc sur les communautés animales. En effet, pour les cas de la Loire et de la Seine, les milieux ont fortement été dégradés du fait de

la pénétration vers l'amont d'eaux saumâtres, de l'abaissement de la ligne d'étiage, de l'extension du bouchon vaseux et de l'envasement du lit du fleuve. Ces phénomènes ont ainsi diminué le potentiel écologique des estuaires, réduisant les zones de frai, de nourrissage ou d'abri des poissons et avec l'extension du bouchon vaseux augmenté la mortalité piscicole. Concernant le Rhin, les principaux problèmes proviennent essentiellement des barrages aménagés sur les bras du delta qui ont entraîné de graves perturbations du marnage, la présence d'eaux saumâtres dans les bras de mer et une accumulation de sédiments pollués. De ce fait, la quasi-totalité des nurseries furent détruites. Ainsi on observe que pour des aménagements différents et ne provoquant pas les mêmes perturbations, les conséquences sur la faune estuarienne sont semblables.

Par ailleurs les diverses formes de barrages réalisées sur le cours des fleuves sont de lourds obstacles à la migration de certaines espèces piscicoles induisant ainsi un nouveau déclin des populations. C'est pour cette raison que le peuplement de saumon a totalement disparu du Rhin et connaît une sérieuse régression aujourd'hui sur la Loire.

Devant les conflits d'intérêts opposant les acteurs du Plan Delta et les protecteurs de l'environnement, des mesures ont été prises quant à la réhabilitation du Rhin. De nombreux aménagements ont été réalisés permettant le retour des poissons migrateurs. De la même façon la gestion des barrages du delta a été revue afin de restaurer les habitats ainsi que leur peuplement.

Les aménagements des exutoires ne sont pas les seuls dangers pour les communautés animales. Le commerce international maritime étant très dense, les grands ports accueillent des navires transportant des substances dangereuses pour les écosystèmes. Les estuaires, deltas et littoraux sont donc soumis à de hauts risques de pollution telles que les marées noires.

L'impact de la pollution par les métaux et les composés organiques des embouchures sur les communautés animales

Les pollutions métalliques et chimiques des exutoires résultent des activités agricoles et industrielles du bassin versant du fleuve. C'est pourquoi les différentes catégories de

pollution ne sont pas rencontrées dans les mêmes proportions pour les trois embouchures. La Seine draine un bassin versant très urbanisé et industrialisé (Paris, Rouen, Le Havre) ce qui lui confère des teneurs en métaux et composés organiques très élevées. La Loire, quant à elle, présente un bassin versant beaucoup plus dominé par une activité agricole, faisant ruisseler ainsi de nombreux pesticides et augmentant les teneurs en composés organiques de l'estuaire. Cependant, certaines molécules présentes en basse Seine, telles que la dioxine, sont presque inexistantes au niveau de la Loire. De plus, les apports de molécules organiques sont d'origines très distinctes : pour la Seine, la raffinerie de Notre Dame de Gravanchon en est responsable en grande partie alors que pour la Loire, du fait de l'importance de l'activité agricole dans le bassin, les pesticides sont une forte source de contamination. Les installations urbaines du bassin de la Seine sont, quant à elles, responsables de la forte teneur en métaux (cadmium, plomb, cuivre, zinc, nickel).

Contrairement aux deux autres fleuves et malgré la traversée de la Ruhr, le Rhin est aujourd'hui le fleuve le plus propre d'Europe. En effet après l'accident de Sandoz, il a connu une longue période d'autoépuration et des normes de rejets drastiques ont été imposées aux industries de la Ruhr. Cette forte prise de conscience du danger que la pollution pouvait occasionner, aussi bien sur les écosystèmes que pour l'Homme, a permis de restaurer un meilleur état écologique du fleuve.

Ces fortes teneurs en polluants, mesurées au travers d'études sur les réseaux trophiques induisent de graves conséquences tant sur l'écosystème que sur la santé publique (consommation des produits de la mer, baignade,...). En effet, les dioxines peuvent avoir des effets sur les organismes de l'estuaire mais ont surtout un fort pouvoir cancérigène sur les populations humaines. De plus la bioaccumulation de certains des composés organiques (PCB) dans les organismes de l'estuaire peut rendre dangereuse la consommation de ceux-ci. De la même façon, la contamination métallique se bioaccumule uniquement dans les mollusques les rendant impropres à la consommation mais épargnant les poissons. Les métaux ont, ainsi, de graves impacts sur de nombreuses espèces de crustacés et de mollusques : le cadmium perturbe la respiration et la stimulation enzymatique de certaines larves de crustacés et le plomb provoque des anomalies dans le développement embryonnaire des bivalves. Les populations sont de plus en plus sensibles aux problèmes de pollution au sein des embouchures, ce qui pourrait être un réel facteur contribuant à la restauration du bon état écologique des eaux.

Cependant, les aménagements et la pollution ne sont pas les seuls obstacles au bon déroulement de la vie estuarienne. L'anthropisation grandissante des exutoires ne fait qu'aggraver l'importance du bouchon vaseux.

L'impact du bouchon vaseux des embouchures sur les communautés animales

Les estuaires sont soumis à des mouvements hydrosédimentaires permanents. Ces comportements sont expliqués en détail dans le rapport du projet individuel IUP 3 de Thomas Lecarpentier (2005). Etant donné l'impact problématique du bouchon vaseux sur les communautés animales, nous avons voulu traiter tout particulièrement ce point là.

Le bouchon vaseux est une région de l'estuaire où les sédiments fins en suspension sont fortement concentrés. C'est donc une zone de turbidité maximale comprise entre des eaux douces peu chargées en suspension à l'amont et les eaux salées marines en aval. Sa situation spatiale n'est pas stable. Elle évolue au gré des conditions hydrologiques (débits, cycles de marée ...).

Le bouchon vaseux repose sur le fond de l'estuaire et c'est pendant les périodes d'étiage qu'il est le plus dense et le plus volumineux. On explique son existence par l'obstacle que représente la circulation résiduelle au fond de l'estuaire, liée à l'intrusion saline, pour les sédiments transportés en suspension dans la tranche inférieure de l'eau douce qui vient de l'amont.

Le bouchon vaseux ne concentre pas que des particules minérales. A celles-ci sont associés, depuis que les estuaires font l'objet d'aménagements urbains, portuaires et industriels, des polluants chimiques et bactériologiques.

Le stock de matières en suspension dans le bouchon vaseux est de 100 à 500 fois plus important que celui que l'on peut trouver dans le cours d'eau ou en mer.

La masse sédimentaire piégée du bouchon vaseux en Seine est évaluée en poids sec à 400 000 tonnes alors que pour l'estuaire de la Loire, elle varie de 800 000 à 1 000 000 tonnes. L'estuaire de la Loire présente alors un bouchon vaseux beaucoup plus important et plus préoccupant que l'embouchure de la Seine qui est, elle, surtout touchée par la pollution. L'importance de ce stock sédimentaire entraîne de graves conséquences écologiques et sanitaires.

La présence du bouchon vaseux dégrade fortement l'état écologique des estuaires. En effet, de nombreuses bactéries se nourrissent de la matière organique présente au sein de cette masse sédimentaire. Elles consomment alors tout l'oxygène disponible indispensable à la faune et la flore aquatique entraînant alors la disparition de ces derniers. Par ailleurs, ce bouchon vaseux concentre les polluants métalliques (fixés sur les vases en suspension) contaminant ainsi les communautés animales locales. Il constitue alors une barrière physico-chimique gênant le transit des poissons migrateurs. Il s'ensuit alors un déficit important de la population de poissons migrateurs dans le fleuve et l'estuaire.

Ces trois exutoires présentent des caractéristiques qui leur sont propres ; c'est pourquoi nous avons préféré les étudier au cas par cas. Même si les pressions anthropiques restent les mêmes, elles sont plus ou moins importantes selon le bassin versant du fleuve. Les communautés animales des estuaires sont alors fortement perturbées par le bouchon vaseux ainsi que la pollution et les aménagements qui n'ont cessé de se développer. La faune estuarienne est surtout touchée, au niveau de l'embouchure de la Seine, par la pollution des métaux et des composés organiques. L'exutoire de la Loire présente, quant à lui un écosystème très déséquilibré par l'importance du bouchon vaseux. Et la zone deltaïque du Rhin a été extrêmement modifiée, au cours de ces dernières années, par les divers aménagements du Plan Delta, ce qui n'a pas été sans préjudice pour la faune locale.

Conclusion

Cette recherche bibliographique nous a permis d'étudier l'évolution et l'état actuel des communautés animales au sein de trois estuaires européens. L'estuaire représente un habitat particulier au niveau morphologique, physico-chimique et écologique. Il est donc plus vulnérable face aux différentes pressions engendrées par l'activité humaine.

La forte pollution de l'estuaire de la Seine le place parmi les plus contaminés d'Europe. Ceci perturbe fortement la faune et il devient important de limiter la consommation de certains organismes comme les mollusques bivalves. En effet, au contraire des poissons, ils ont tendance à accumuler les polluants tels que les métaux et les composés organiques. Il peut en résulter un fort problème de santé publique.

En ce qui concerne l'embouchure de la Loire, l'augmentation du bouchon vaseux a largement handicapé la migration de nombreuses espèces de poissons en raison d'un déficit en oxygène. Ainsi, une diminution des captures a été observée depuis 1999 affectant ainsi l'économie de la pêche (professionnelle et de loisir).

Enfin, les problèmes causés par la mise en place du Plan Delta pour l'exutoire du Rhin semblent moindres au regard de ce qu'ils pouvaient être. En effet la forte mobilisation des écologistes rhénans a permis de remettre en question l'impact environnemental d'un tel projet. Un compromis a alors été mis en place ce qui a poussé le fleuve vers un état biologique satisfaisant : le Rhin est redevenu le fleuve le plus propre d'Europe au niveau physico-chimique. Cependant il n'entre pas dans les normes bactériologiques et il reste encore fragile face à de nombreux aménagements.

Face à toutes ces perturbations, les estuaires représentent un enjeu écologique réel. Des mesures ont déjà été prises face à ce problème, la principale étant l'application de la « loi littoral de 1986 » aux estuaires. Celle-ci est relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral. Elle représente donc un premier pas vers la protection de ces milieux.

Liste des figures et tableaux

- Figure n°1 : Les principaux estuaires français (d'après Romaña, 1994).
- Figure n°2 : Chenalisation et autocalibrage d'un estuaire (d'après Le Square Deshoulières, 2004).
- Figure n°3 : Principaux types de surfaces marnantes au niveau de l'estuaire de la Loire (d'après Le Square Deshoulières, 2004).
- Figure n°4 : Localisation des villes de l'estuaire de la Loire (d'après <http://www.viamichelin.fr>).
- Figure n°5 : Localisation des villes de l'estuaire de la Seine (d'après <http://www.viamichelin.fr>).
- Figure 6 : Niveaux de pleine mer et de basse mer en vives-eaux (—○— pleine mer, —●— basse mer) et en mortes-eaux (—Δ— pleine mer, —▲— basse mer) dans l'estuaire de la Seine pour un débit d'étiage (coefficients 113 et 46, respectivement, pour un débit du fleuve au barrage de Poses de 300 m³.s⁻¹ (d'après Guézennec, 1999).
- Figure n°7 : Niveaux de pleine mer et de basse mer pour trois marées de coefficients 61-62 et dans des conditions de débit à Poses de 1 163 m³.s⁻¹ (—□— pleine mer, —■— basse mer), de 641 m³.s⁻¹ (—○— pleine mer, —●— basse mer) et de 294 m³.s⁻¹ (—Δ— pleine mer, —▲— basse mer) (d'après Guézennec, 1999).
- Figure n°8 : Schéma de l'oscillation des particules dans l'estuaire de la Loire (d'après <http://www.loire-estuaire.org>).
- Figure n°9 : Schéma des courants résiduels de fond et de surface avec localisation du point nodal (d'après C.S.E.E.L., 1984 et Sanchez & Grovel, 1994, Romaña, 1992).
- Figure n°10 : Schéma du bouchon vaseux et de la crème de vase (d'après <http://www.loire-estuaire.org>).
- Figure n°11 : L'estuaire de la Seine (d'après Guézennec L. & al., 1999).
- Figure n°12 : Organigramme du programme Seine-Aval, (d'après AESN).
- Figure n°13 : Comparaison de la contamination métallique de la seine avec celle d'autres estuaires et deltas à travers le monde (d'après Chiffolleau J-F., 1999).
- Figure n°14 : Concentrations métalliques (mg/kg de poids sec) dans les principaux maillons du réseau trophique du bar (*Dicentrarchus labrax*) en baie de Seine (d'après P.J. Hayward & J.S. Ryland, 1995).
- Figure n°15 : Concentrations métalliques (mg/kg de poids sec) dans les tissus du flet (*Platichthys flesus*) en baie de Seine (d'après Chiffolleau J-F., 1999).

- Figure n°16 : Concentration métallique mesurée dans les échantillons prélevés le long du gradient de salinité dans l'estuaire de la Seine (d'après Chiffoleau J-F., 1999).
- Figure n°17 : Composition chimique des PCB (d'après Abarnou A. & *al.*, 2000).
- Figure n°18 : Composition chimique des dioxines (d'après Abarnou A. & *al.*, 2000).
- Figure n°19 : Comparaison des empreintes de PCB dans le flet et le gardon. Les teneurs en PCB sont rapportées à celles du CB153 et exprimées en pour cent (d'après Sanchez *et al.*, 1993).
- Figure n°20 : Niveaux de contamination dans les flets de l'estuaire (CB153 en ng/g PS) (d'après Abarnou A. & *al.*, 2000).
- Figure n°21 : Le bouchon vaseux de la Seine (d'après <http://www.univ-lehavre.fr>).
- Figure n°22 : Chronologie des principaux aménagements en baie de Seine depuis le XIX^{ème} siècle (d'après Lesueur P. & *al.*, 1999).
- Figure n°23 : localisation de l'estuaire en Europe et en France et découpage des sections (d'après www.loire-estuaire.org).
- Figure n°24 : Schématisation du dépôt et de la remise en suspension des particules argileuses dans l'estuaire (d'après <http://www.educnet.education.fr>).
- Figure n°25 : vie aquatique et besoins en O₂ (d'après Hubiche, 2002).
- Figure n°26 : Répartition de l'oxygène et influence des matières en suspension (d'après Hubiche, 2002).
- Figure n°27 : Répartition instantanée de l'oxygène le 13 Octobre 2000. (D'après Hubiche, 2002).
- Figure n°28 : Structure générale des captures, 1999, 2000, 2001 (d'après Riegert, 2003).
- Figure n°29 : 3 molécules de HAP (d'après Tronczyński J. & *al.*, 1999).
- Figure n°30 : Le delta du Rhin (d'après <http://www.rivernet.org>).
- Figure n°31 : Evolution de la géographie des Pays Bas depuis l'Empire Romain à nos jours (Paalvast. P., communication personnelle).
- Figure n°32 : Chaîne de moulin permettant le pompage et la poldérisation, puis station de pompage à la vapeur (Paalvast. P., communication personnelle).
- Figure n°33 : Le barrage anti tempête de l'Escault (d'après <http://www.chez.com/bruzesepia/pageplandelta.html>).

- Figure n°34 : Chronologie des travaux du Plan Delta (d'après Petite géographie des Pays Bas, IDG, 1999).
 - Figure n°35 : Répartition des zones d'eau douce et d'eau salée dans le delta, selon le plan initial puis selon la situation actuelle (d'après IDG Newsletter, 1999).
 - Figure n°36 : Impact de la construction du barrage de Haringvliet sur le marnage (Paalvast. P., communication personnelle).
 - Figure n°37 : Impact du barrage de Harvingliet sur les populations de *Crangon crangon*, *Nereis diversicolor*, *Mercuria confusa* et *Dreissena polymorpha* (Paalvast. P., communication personnelle).
 - Figure n°38 : Corrélation entre le taux d'oxygène dissous et la biodiversité dans le Rhin de 1900 à 1995 (d'après CIPR, 1998).
-
- Tableau n°1 : Description des quatre métaux étudiés (d'après Chiffolleau J-F., 1999).
 - Tableau n°2 : Liste des polluants organiques (d'après Abarnou A. & al., 2000).
 - Tableau n°3 : Les bactéries de l'estuaire de la Seine (d'après Servais P. & al., 1999).
 - Tableau n°4 : Les virus de l'estuaire de la Seine (d'après Servais P. & al., 1999).
 - Tableau n°5 : Résultats de l'expérience. (Paalvast. P., communication personnelle).

Bibliographie

Abarnou A., Burgeot T., Chevreuil M., Leboulenger F., Loizeau V., Madoulet-Jaouen A., Minier C., 2000. Contaminants organiques : quels risques pour le monde vivant / Programme scientifique Seine-Aval. - IFREMER, Fascicule thématique 13, 36 p.

Ballschmiter K., Zell M., 1980. Analysis of PCB by glass capillary gas chromatography. *resenius J. Anal. Chem.*, 302 p.

Chiffolleau J-F., 1999. Contamination métallique / Programme scientifique Seine-Aval. - IFREMER, Fascicule thématique 8, 40 p.

CIPR, 1998. Le Rhin, un fleuve renoue le contact.

Convention sur la conservation des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage, deuxième réunion du Conseil scientifique de la CMS, 2004. L'importance des obstacles artificiels aux migrations à travers les frontières internationales. 5 p.

Gantzer C.F., Lucena L., Schwartzbrod L., Jofre J., 1998. Indicateurs de contamination virale du milieu hydrique : mythe ou réalité ? *Virologie*, 2, 117-125.

Guézennec L., 1999. Hydrodynamique et transport en suspension du matériel particulaire fin dans la zone fluviale d'un estuaire macrotidal: l'exemple de l'estuaire de la Seine (France). Thèse de l'université de Rouen, agence de l'Eau Seine-Normandie (éd.), 240 p.

Guézennec L., Romaña L-A., Goujon R., Meyer R., 1999. Seine-Aval : Un estuaire et ses problèmes / Programme scientifique Seine-Aval. - IFREMER, Fascicule thématique 1, 37 p.

Hayward P.J., Ryland J.S., 1995. The Marine Fauna of the British Isles and North-West Europe

Hayward P.J., Nelson-Smith T., Shields C. Guide des bords de mer. Delachaux et Niestlé, 1998.

IDG Newsletter, 1999. Les Pays-Bas de 1964 à 1999. Trente cinq années d'information par l'IDG. 8 p.

Joubert A., Lemoine M.-H., Rousselet D., 1994. La Seine : mémoire d'un fleuve. SER (éd.) - Parc naturel régional de Brotonne, 305 p.

Le Hir P., Silva Jacinto R., 1999. Courants vagues et marées, les mouvements de l'eau / Programme scientifique Seine-Aval. - IFREMER, Fascicule thématique 2, 32 p.

Lesueur P., Lesourd S., 1999. Sables, chenaux, vasières ... : dynamique des sédiments et évolution morphologique / Programme scientifique Seine-Aval. - IFREMER, Fascicule thématique 3, 40 p.

Migniot C., 1991. Les estuaires : étude comparative des caractéristiques géométriques, hydrauliques et sédimentologiques. Rapport LCHF-Sogreah, 160 p.

Miramand P., Fichet D., Bentley D., Guary J.-C., Caurant F., 1998. Concentrations en métaux lourds (Cd, Cu, Pb, Zn) observées le long du gradient de salinité dans le réseau trophique pélagique de l'estuaire de la Seine. C.R. Acad. Sci. Ser. IIA, 327, 259-264.

Netherlands Journal of Sea Reserch, 1984. Lake Grevelingen: from an estuary to a saline lake. Structure and functioning of an evolving marine ecosystem. J.W. De Blok. Volum 18. 528 p.

Nicand E., Teyssou R., Buisson Y., 1998. Le risque fécal viral en 1998. Virologie, 2, 103-116.

Porcher M., 1977. Lithostratigraphie des alluvions fluviales holocènes de la basse vallée de la Seine. L'estuaire de la Seine au Quaternaire. Bull. Soc. Géol. Normandie et des amis du muséum du Havre, XIV, 4, 181-201.

Rapport de l'Académie des Sciences, 1994. La dioxine et ses analogues. Rapport Cadas, 4, 117 p.

Sanchez J., Solé M., Albaigès J., 1993. A comparison of distributions of PCB congeners and other chlorinated compounds in fishes from coastal areas and remote lakes. *In*: Environmental analytical chemistry of PCBs. Albaigès (ed.), Gordon & Breach Science Publ. Current topics in Environmental and Toxicological Chemistry, vol. 16.

Servais P., Castignolles N., Petit F., George I., Buffet-Janvresse C., Ficht A., 1999. Contaminations bactérienne et virale / Programme scientifique Seine-Aval. – IFREMER. Fascicule thématique 6, 28 p.

Schwartzbrod L., 1991. Virologie des milieux hydriques. Lavoisier (éd.), L. Schwartzbrod (coord.), 303 p.

Tronczynski J., Munsch C., Moisan K. 1999. Seine-Aval : Les contaminants organiques qui laissent des traces : sources, transport et devenir / Programme scientifique Seine-Aval. - IFREMER, Fascicule thématique 12, 40 p

Sites Internet

- Agence de l'Eau Loire – Bretagne : <http://www.eau-loire-bretagne.fr>
- Au fil du Rhin : <http://www.aufildurhin.com>
- Cartes michelin : <http://www.viamichelin.fr>
- Chasse sous marine : <http://www.chasse-sous-marine.com>
- Conseil Supérieur de la Pêche : <http://www.csp.environnement.gouv.fr>
- DRIRE-INSEE-Normandie Développement : <http://www.industrie-hn.org>

- Echosmouche – lettre mensuelle des pêcheurs à la mouche : <http://www.echosmouche.com>
- Facultés vétérinaires d’Espagne : <http://veterinaria.unex.es>
- Filière Lorraine d’Aquaculture Continentale : <http://flac.chez.tiscali.fr>
- <http://a.gouge.free.fr/les%20grands%20fleuves/rhin.htm>
- <http://perso.wanadoo.fr/lostrea/lostrea/biologie-reproduction.htm>
- <http://www.chez.com/bruzesepia/pageplandelta.html>
- <http://www.ping.be>
- La Pêche dans le Puy de Dôme : <http://blaw.free.fr>
- Loire Estuaire - Cellule de Mesures et de Bilans : <http://www.loire-estuaire.org>
- Portail de la fondation Nicolas Hulot pour la nature et l’homme : <http://www.fnh.org>
- Portail de la Wallonie : <http://mrw.wallonie.be>
- Portail des rivières vivantes de European Rivers Network : <http://www.rivernet.org>
- Préfecture de la Loire Atlantique : <http://www.loire-atlantique.pref.gouv.fr>
- Réseau de Bassin Rhône – Méditerranée – Corse : <http://rdb.eaurmc.fr>
- Réseau d’Information Bretagne Environnement : <http://www.bretagne-environnement.org>
- Sea-river : <http://www.sea-river-news.com>
- Technologies de l’Information et de la Communication pour l’Education : <http://www.educnet.education.fr>
- Université du Havre : <http://www.univ-lehavre.fr>

DESS Ingénierie des Hydrosystèmes Continentaux en Europe

Les communautés animales d'intérêt économique
dans les estuaires face à l'anthropisation.

Etude des estuaires de la Seine, de la Loire et du Rhin.



Projet individuel réalisé par Aurélie CARRIERE et Nadège LERMOYER

Sous la tutelle de Jean-Pierre BERTON, Professeur.

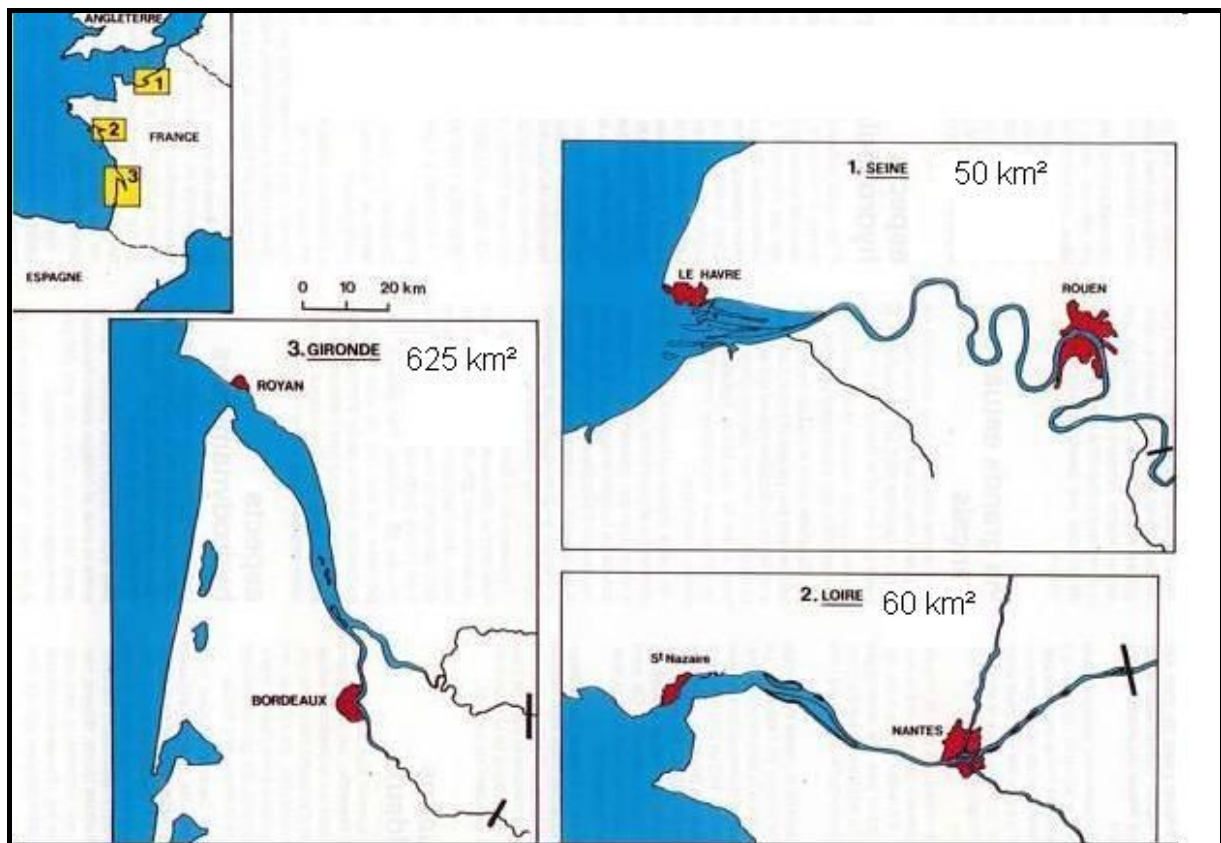


Figure n°1: Les principaux estuaires français (d'après Romaña, 1994).

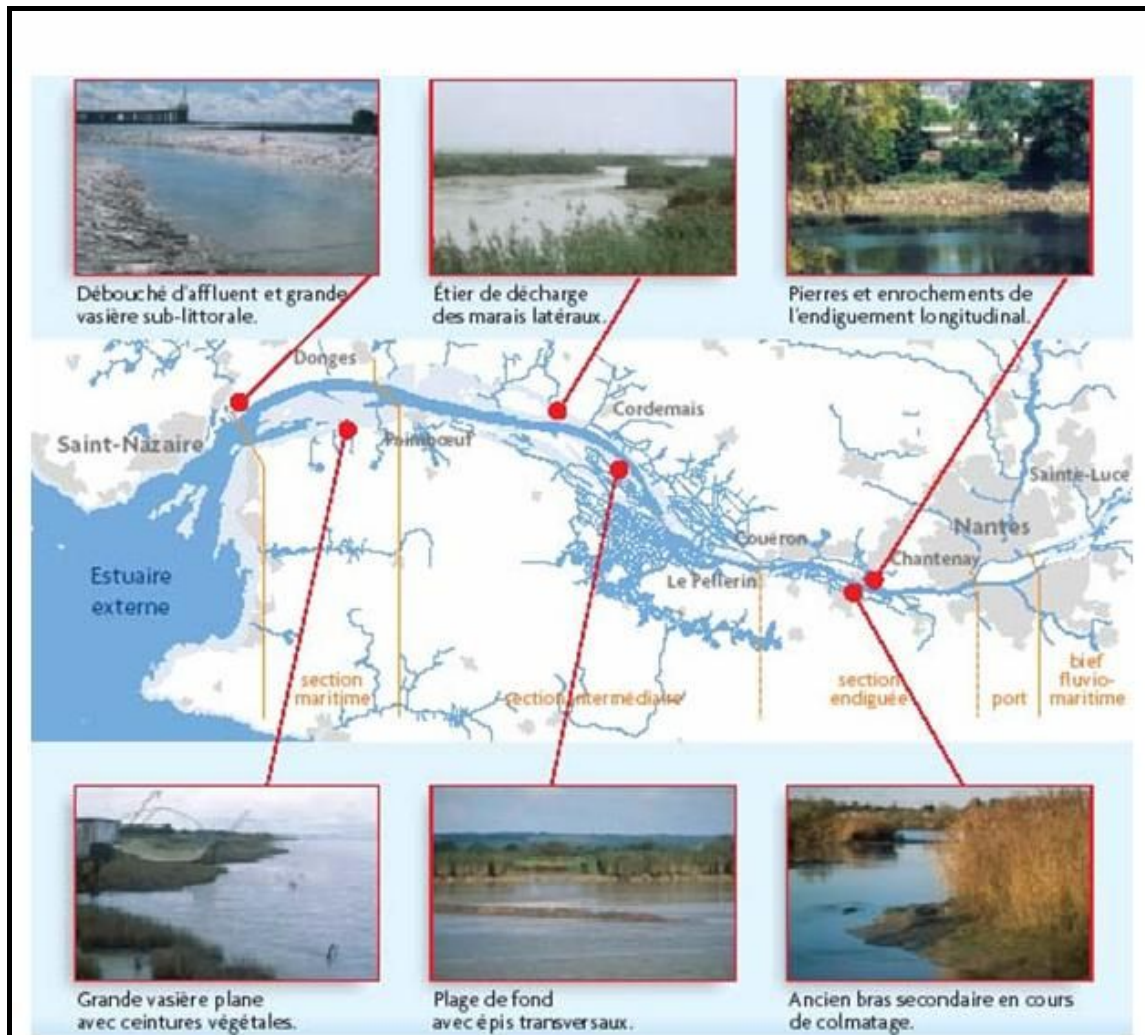


Figure n°3 : Principaux types de surfaces marnantes au niveau de l'estuaire de la Loire (d'après Le Square Deshoulières, 2004).

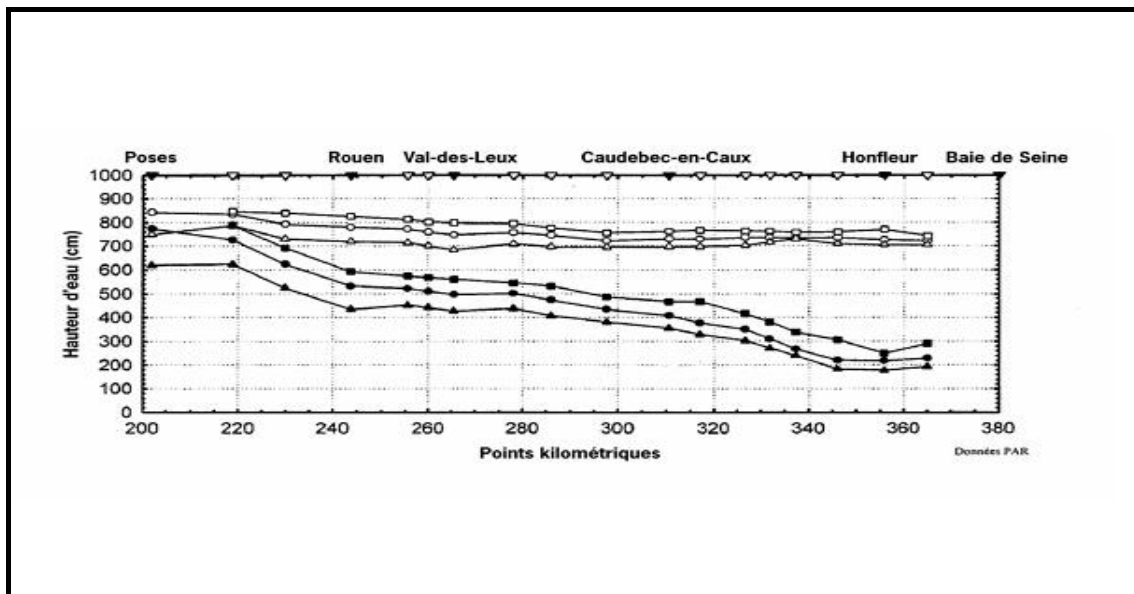


Figure 6 : Niveaux de pleine mer et de basse mer en vives-eaux (—○— pleine mer, —●— basse mer) et en mortes-eaux (—△— pleine mer, —▲— basse mer) dans l'estuaire de la Seine pour un débit d'étiage (coefficients 113 et 46, respectivement, pour un débit du fleuve au barrage de Poses de $300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (d'après Guézennec, 1999).

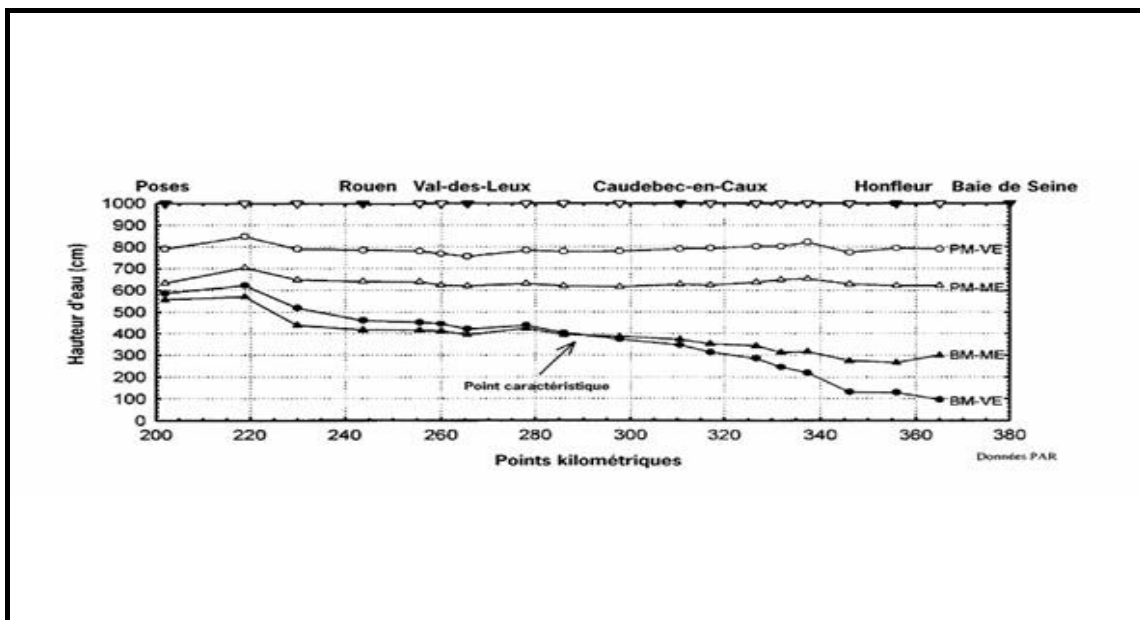


Figure n°7 : Niveaux de pleine mer et de basse mer pour trois marées de coefficients 61-62 et dans des conditions de débit à Poses de $1\,163 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (—□— pleine mer, —■— basse mer), de $641 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (—○— pleine mer, —●— basse mer) et de $294 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (—△— pleine mer, —▲— basse mer) (d'après Guézennec, 1999).

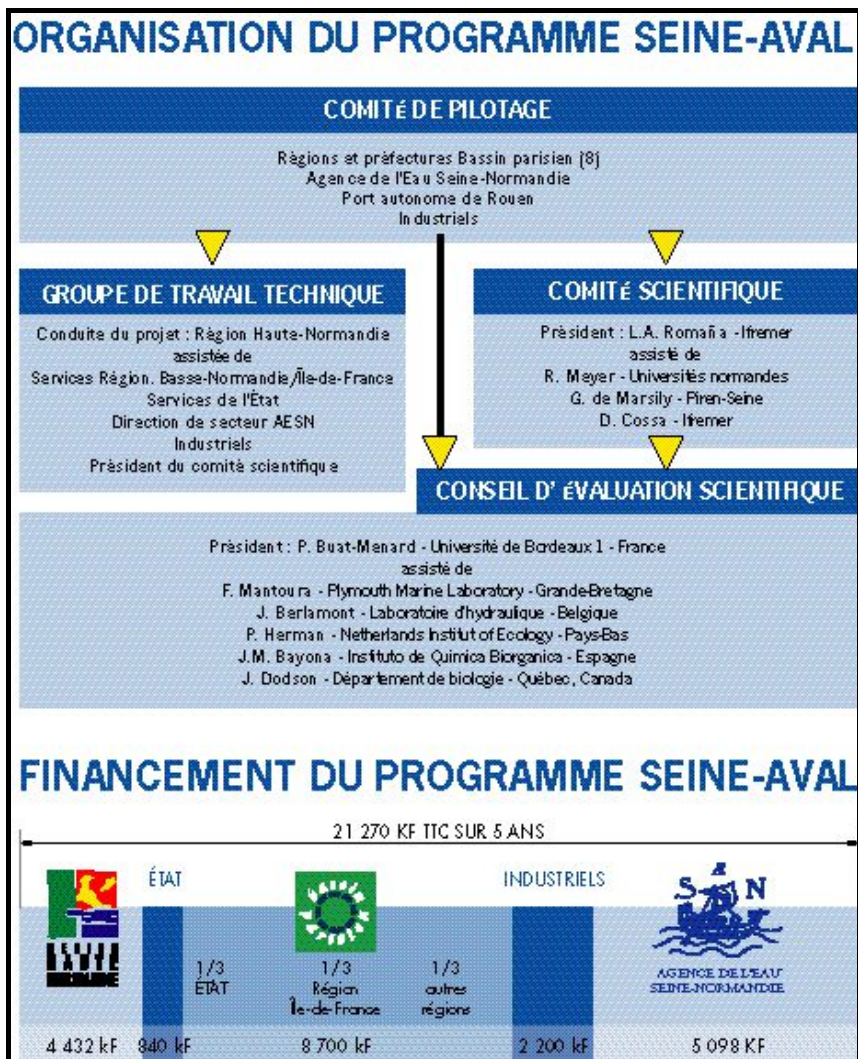


Figure n°12: Organigramme du programme Seine-Aval, (d'après AESN).

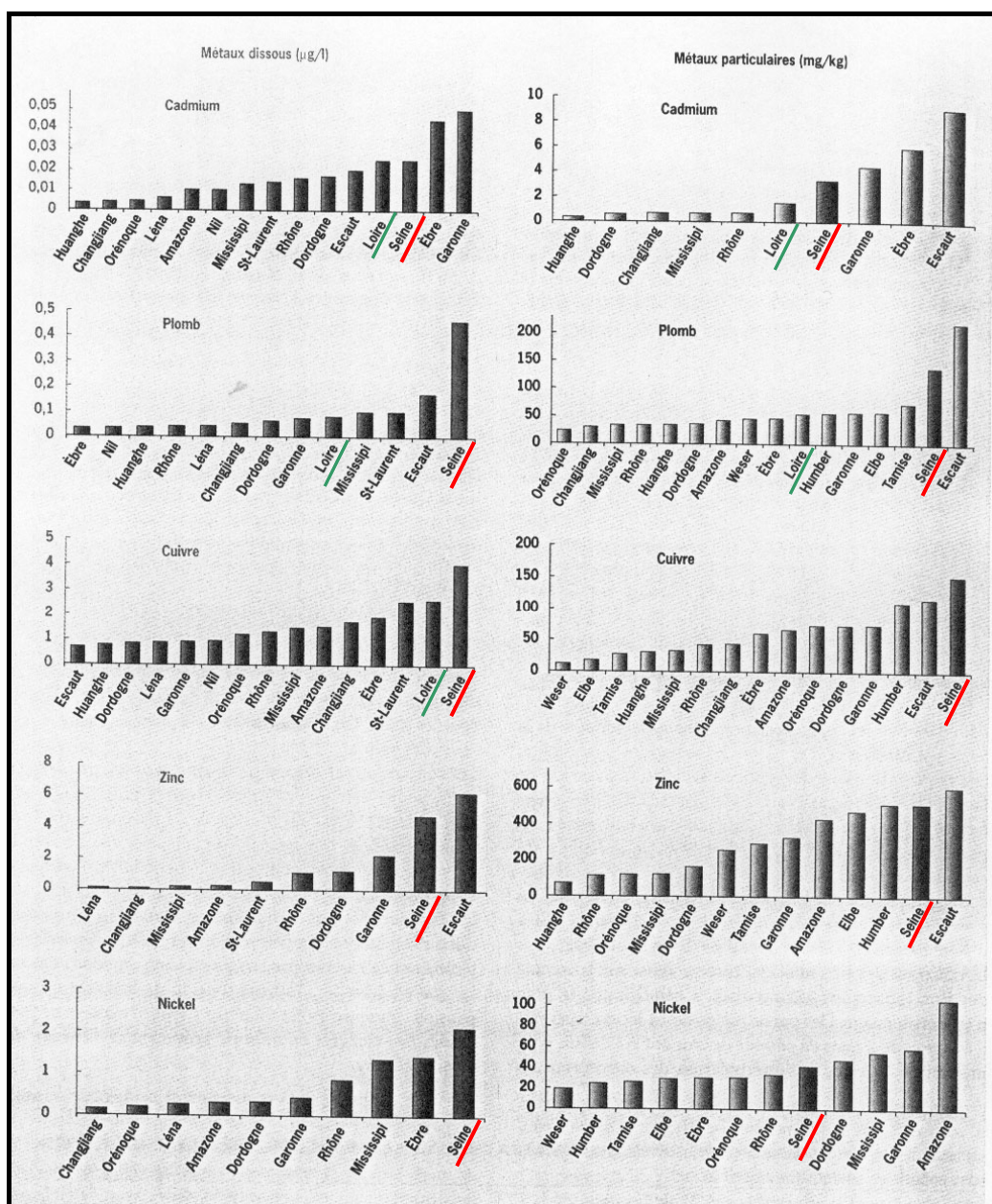


Figure n°13: Comparaison de la contamination métallique de la seine avec celle d'autres estuaires et deltas à travers le monde (d'après Chiffoleau J-F., 1999).

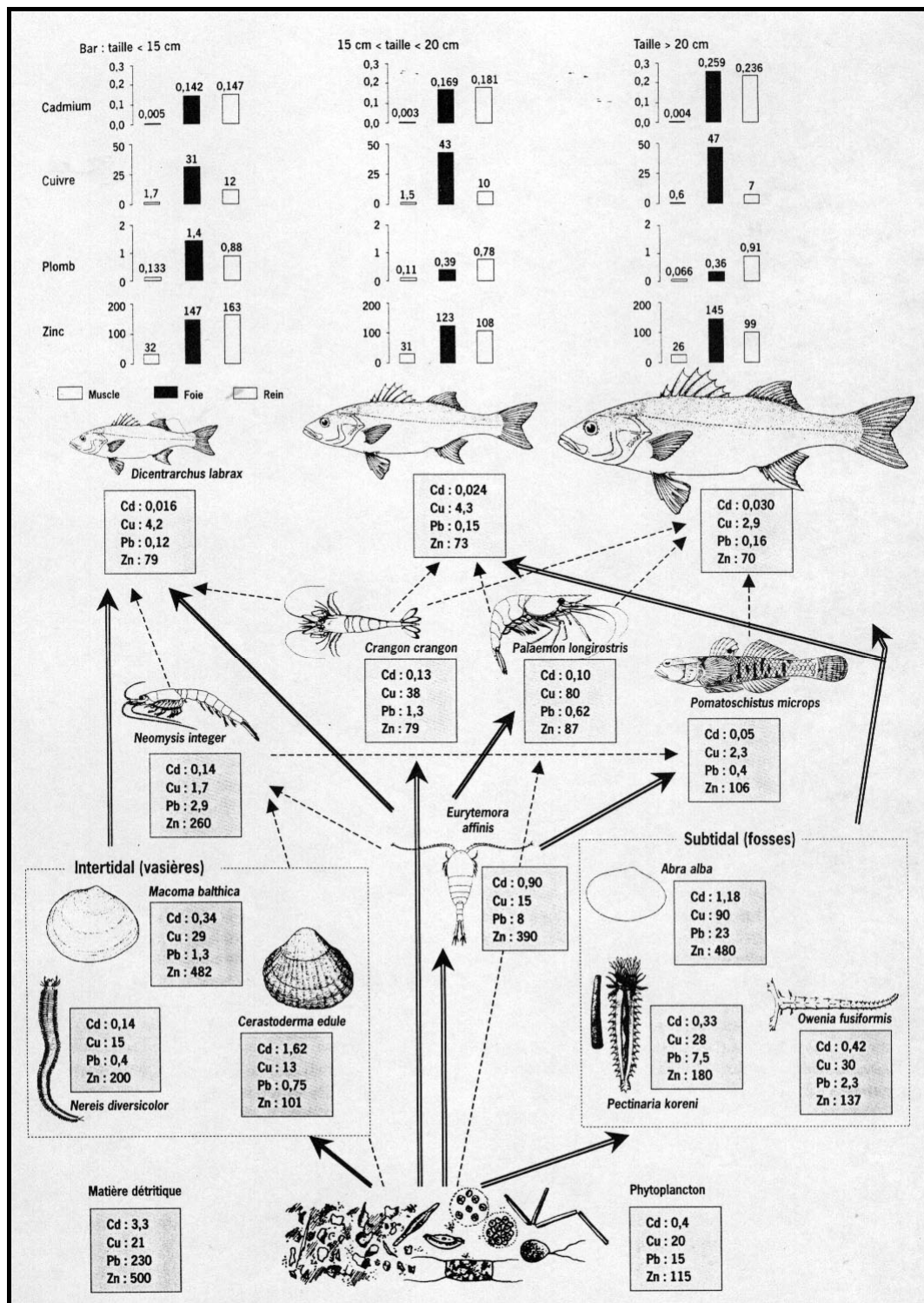


Figure n° 14 : Concentrations métalliques (mg/kg de poids sec) dans les principaux maillons du réseau trophique du bar (*Dicentrarchus labrax*) en baie de Seine (d'après P.J. Hayward & J.S. Ryland, 1995).

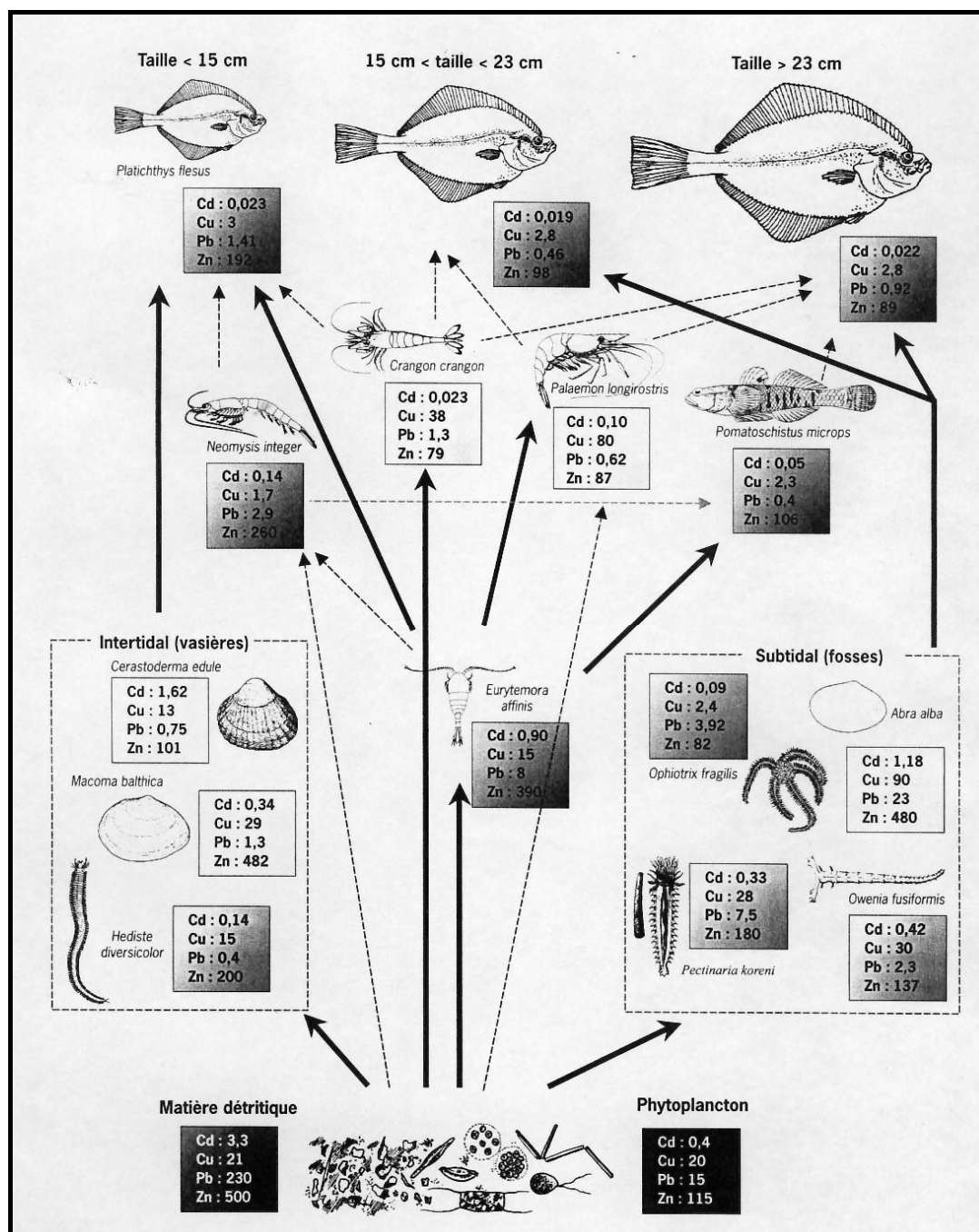


Figure n°15: Concentrations métalliques (mg/kg de poids sec) dans les tissus du flet (*Platichthys flesus*) en baie de Seine (d'après Chiffolleau J-F., 1999).

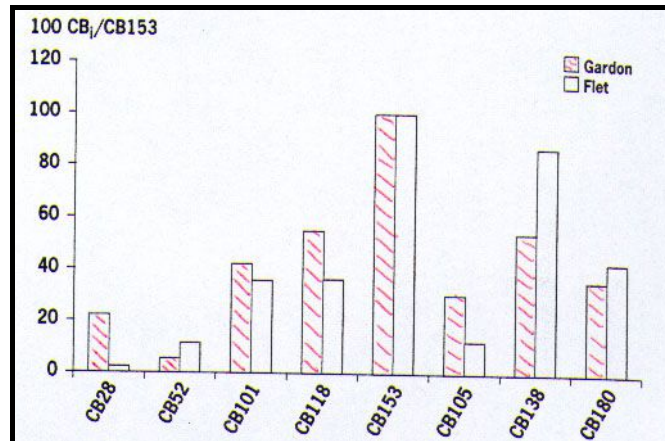


Figure n°19 : Comparaison des empreintes de PCB dans le flet et le garçon. Les teneurs en PCB sont rapportées à celles du CB153 et exprimées en pour cent (d'après Sanchez *et al.*, 1993.).

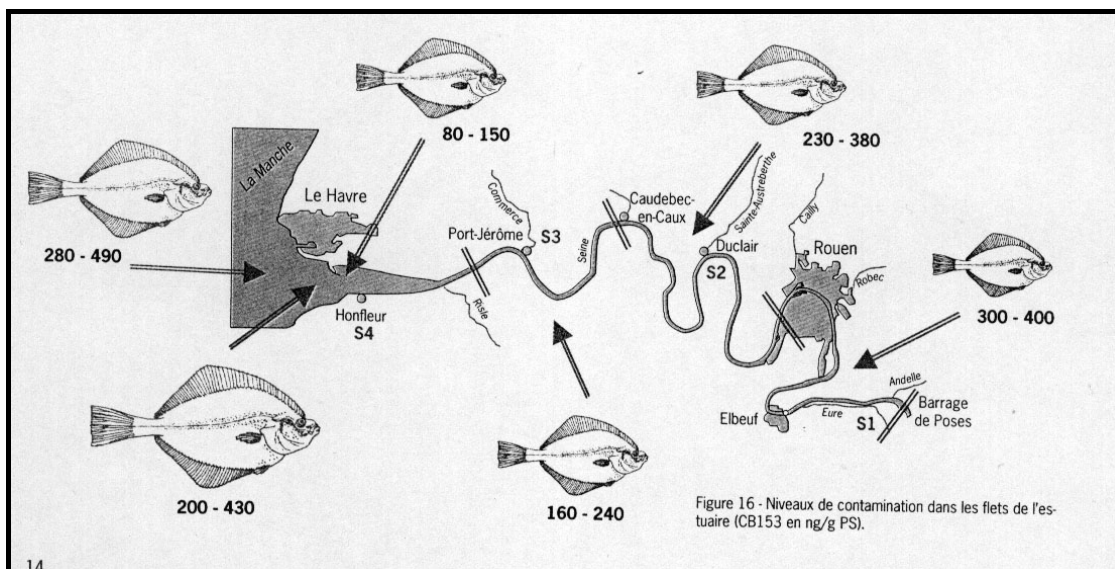
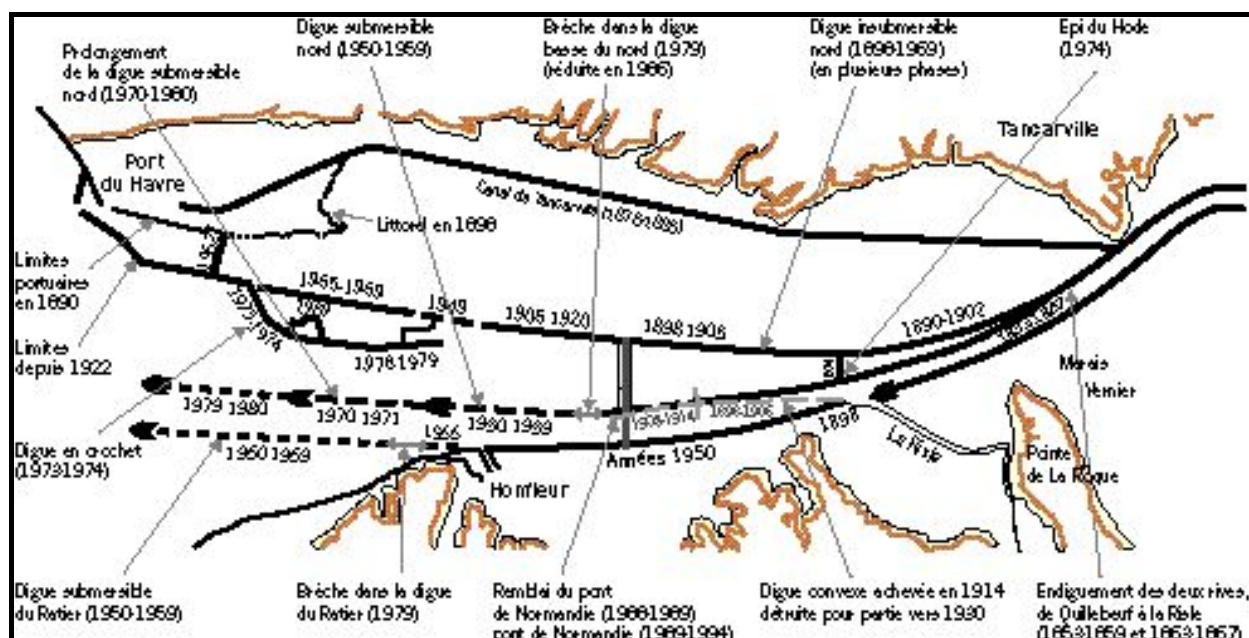


Figure n°20 : Niveaux de contamination dans les flets de l'estuaire (CB153 en ng/g PS) (d'après Abarnou A. & *al.*, 2000).



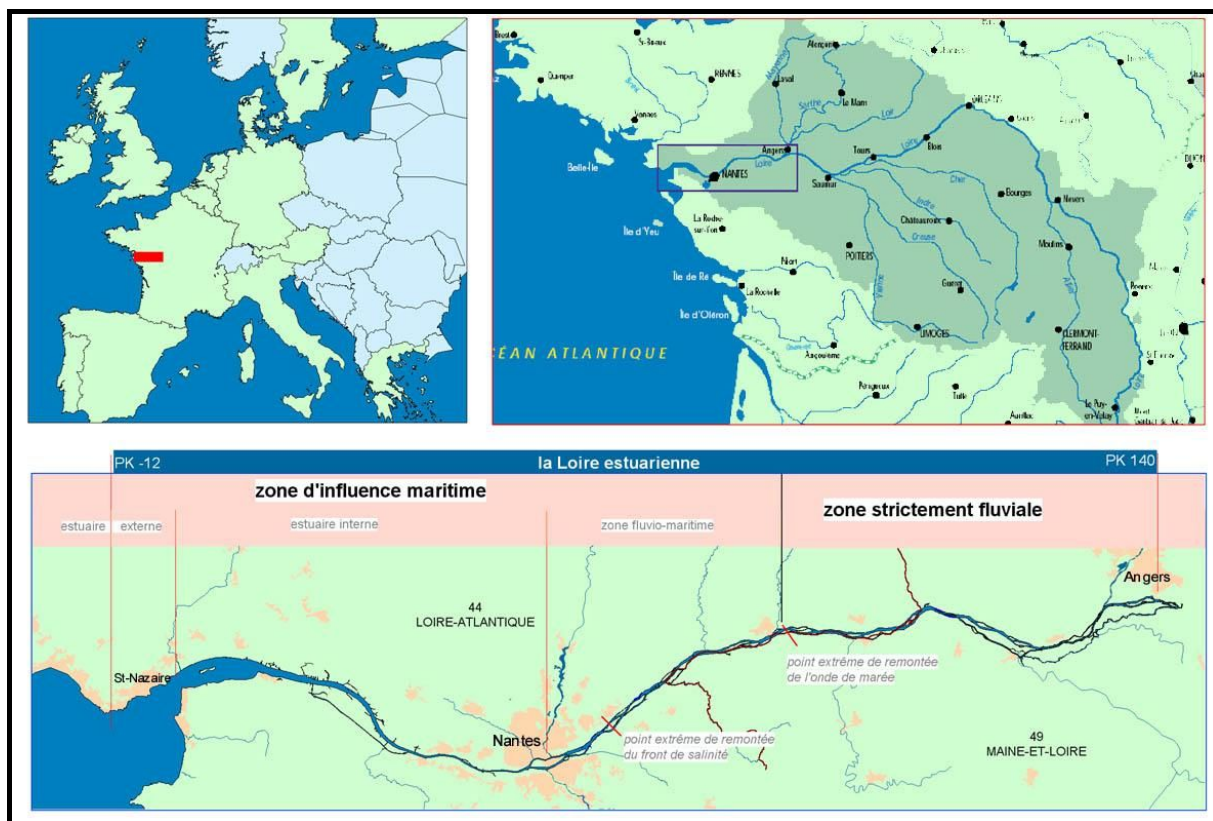


Figure n°23: Localisation de l'estuaire en Europe et en France et découpage des sections (d'après www.loire-estuaire.org).

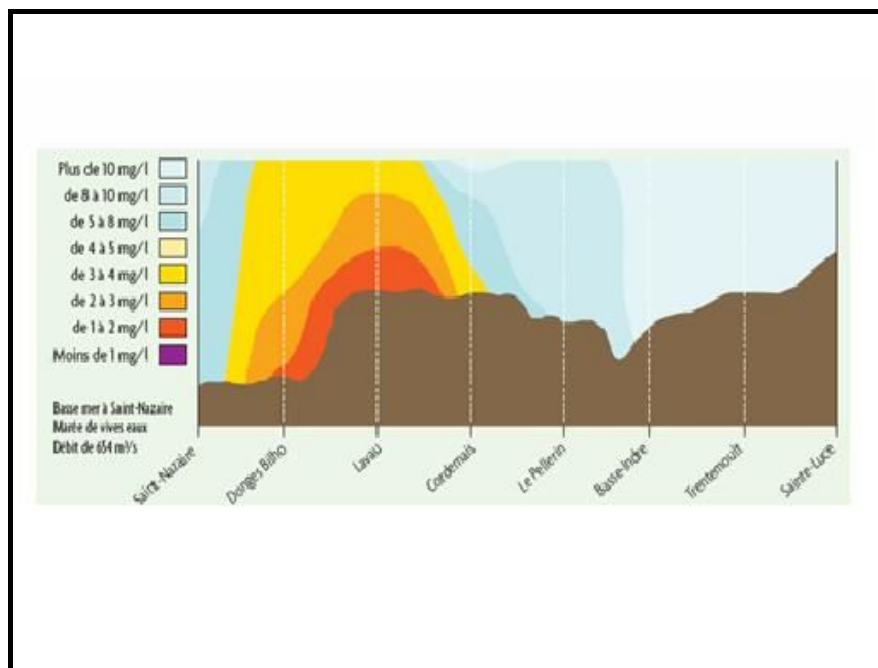


Figure n°27 : Répartition instantanée de l'oxygène le 13 Octobre 2000 au niveau de l'estuaire de la Loire(d'après Hubiche, 2002).

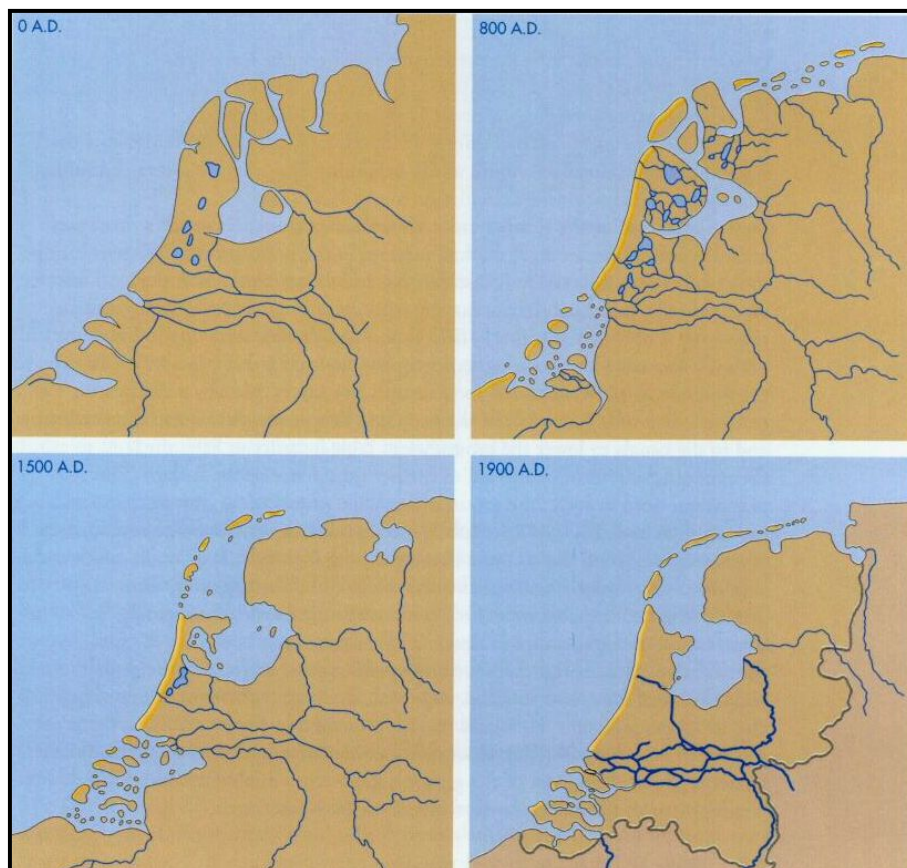


Figure n°31 : Evolution de la géographie des Pays Bas depuis l'Empire Romain à nos jours (Paalvast. P., communication personnelle).

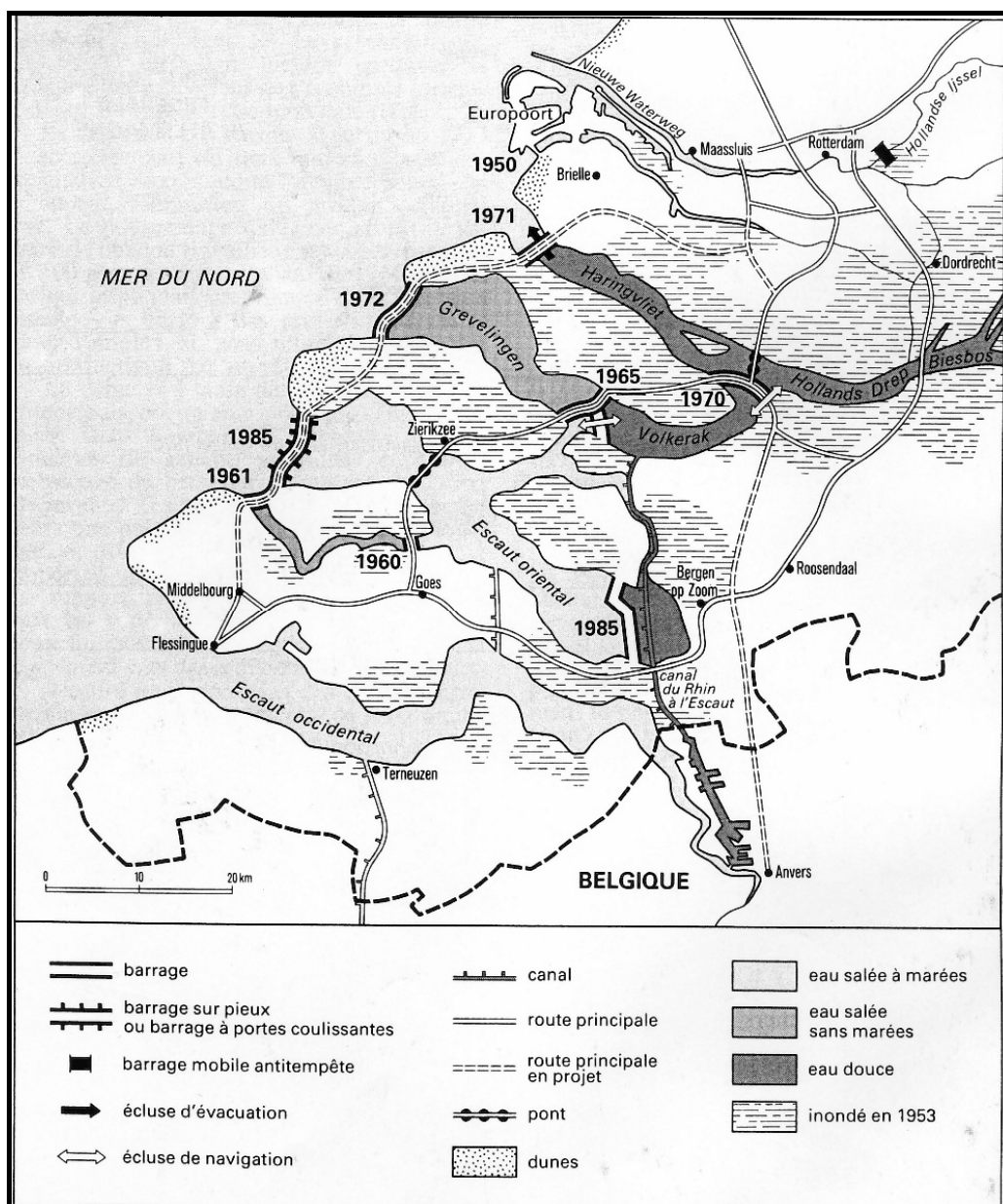


Figure n°34 : Chronologie des travaux du Plan Delta
(d'après Petite géographie des Pays Bas, IDG, 1999).