

ouu'

EXCLU DU PRÉT

RAPPORT FINAL

du

Comité

Scientifique pour

l' Environnement de

l' Estuaire de

la Loire



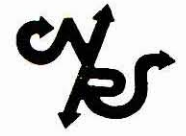
ISSN 0339-2899



Centre National pour l'exploitation des Océans



Centre National pour
l'Exploitation des Océans



Centre National de
la Recherche Scientifique

EXCLU DU PRÊT

AVERTISSEMENT

L'ampleur et l'intérêt des travaux conduits par le C.S.E.E.L, ont attiré l'attention d'organismes concernés par l'environnement estuarien ; il s'agit particulièrement du C.N.R.S., chargé de la mise en oeuvre du Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement (P.I.R.E.N.), et du C.N.E.X.O. Ces deux organismes ont accepté d'accorder leur patronage au C.S.E.E.L. et c'est la raison pour laquelle le présent rapport paraît dans la série des Rapports scientifiques et techniques du C.N.E.X.O.

BND0 / DOCUMENTATION
BIBLIOTHÈQUE
C.O.B.
B.P. 337 - 29273 BREST CÉDEX

SOMMAIRE

(voir Table des matières détaillée à la fin de l'ouvrage)

PAGES

Introduction.

Première partie : Les aspects hydraulique et sédimentaire de l'estuaire de la Loire.

Introduction	13
Chapitre I - Aspect hydraulique de l'estuaire de la Loire	15
Chapitre II - Aspect sédimentologique de l'estuaire de la Loire	27
Chapitre III - Influence des aménagements sur l'hydraulique, la salinité et l'envasement Le devenir de l'estuaire à la fin du siècle	37
Chapitre IV - L'utilisation de l'estuaire de la Loire pour certains aménagements industriels et urbains	55

Deuxième partie : La qualité des eaux et le milieu vivant de l'estuaire de la Loire.

Introduction	63
Chapitre I - Les rejets et la qualité des eaux dans l'estuaire de la Loire	65
Chapitre II - Les caractéristiques des peuplements planctoniques	77
Chapitre III - Les peuplements benthiques de l'estuaire	81
Chapitre IV - Les ressources benthodémersales de l'estuaire	89

Troisième partie : La gestion des zones humides de la rive nord de l'estuaire de la Loire.

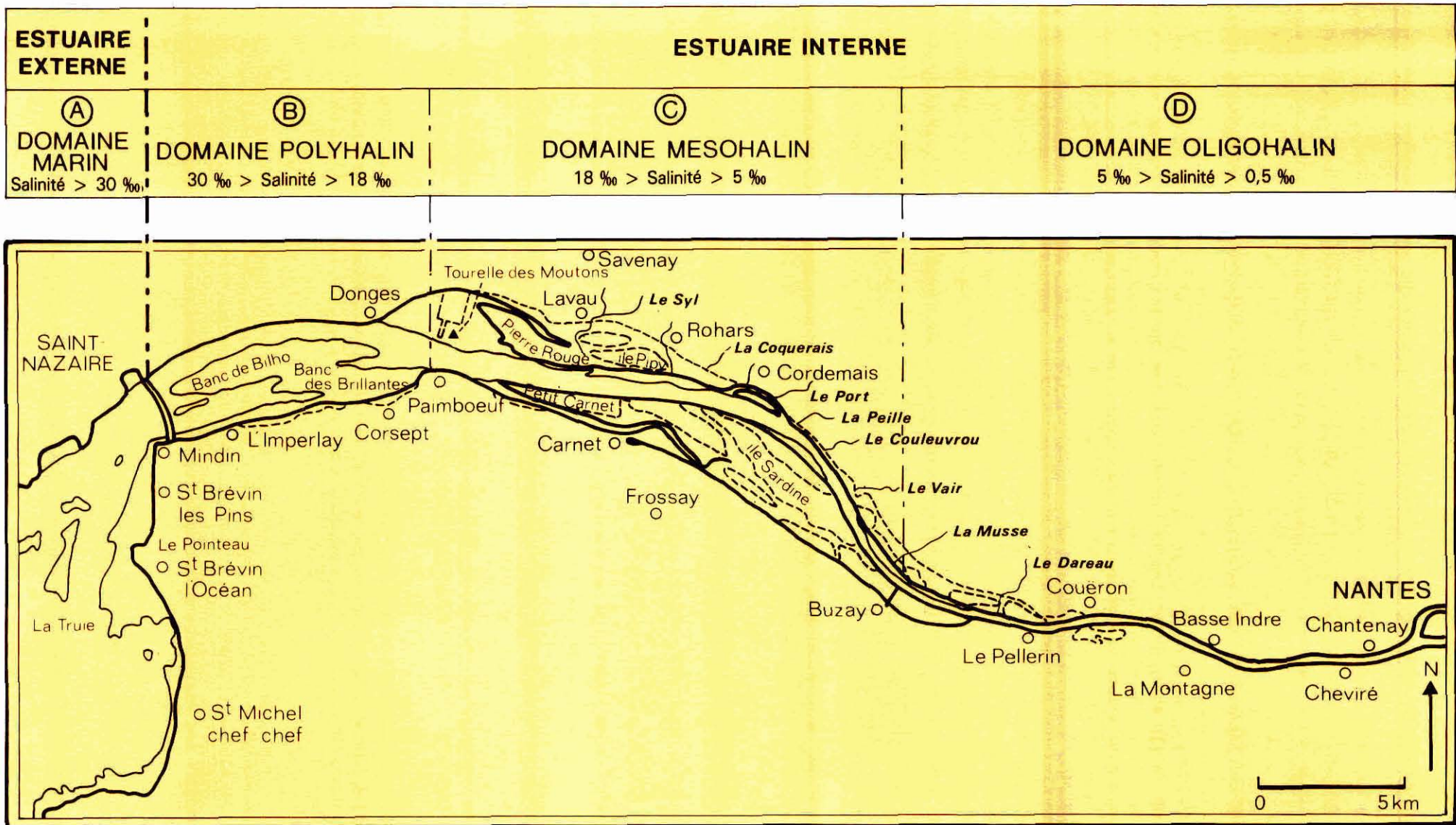
Introduction	103
Chapitre I - La signification des zones humides dans le contexte estuarien	109
Chapitre II - La maîtrise de l'eau	115
Chapitre III - La couverture végétale des zones humides - Élevage et cultures dans les marais	123

Quatrième partie : Conclusions et recommandations.

Chapitre I - Le bilan des connaissances	133
Chapitre II - Les recommandations	137

Annexes.

Annexe 1 - Glossaire	145
Annexe 2 - Liste des contrats et leur financement	149
Annexe 3 - Liste des rapports C.S.E.E.L.	151





INTRODUCTION

Le Conseil d'Administration du Port Autonome de Nantes St Nazaire (PANSN) a décidé dans sa séance du **21 mars 1980** de créer un **Comité Scientifique pour l'Environnement de l'Estuaire de la Loire (CSEEL)**, en le chargeant de définir un programme d'études et d'en suivre l'exécution, dans le but de **préciser les conditions de compatibilité entre la poursuite du développement économique de l'estuaire, y compris sous les formes agricoles, et la conservation de son environnement naturel et particulièrement de ses ressources biologiques.**

La composition du CSEEL correspond aux **trois grands domaines** couverts par ses études, consacrées respectivement aux **problèmes hydrauliques et sédimentaires (thème 1)**, à la **qualité des eaux et au milieu vivant (thème 2)**, aux **zones humides (thème 3)**. Les membres du Comité sont des personnalités d'une valeur reconnue dans les disciplines concernées par le programme à mettre en oeuvre. Il s'agit de : M. Claude MIGNIOT, Directeur des études de Sédimentologie au Laboratoire Central d'Hydraulique de France (L.C.H.F.), pour le thème 1 ; M. André VINCENT, Chef du Département "Environnement et Ecosystèmes" de l'Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes (ISTPM), pour le thème 2 ; M. Le Professeur André VIGARIE, de l'Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes (I.G.A.R.U.N.). Il est présidé par l'Ingénieur général de l'Armement (hydrographe) Jean BOURGOIN, directeur du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (S.H.O.M.), auquel le CNEXO avait confié la responsabilité du Groupe de Travail "estuaires, deltas" (rapport scientifique et technique n° 34 1977 du CNEXO). Le comité a en outre bénéficié du concours de M. Jean-François GUILLAUD, du Département "Environnement littoral et gestion du milieu marin" (E.L.G.M.M.) du Centre Océanologique de Bretagne (C.O.B.) pour la coordination scientifique entre les différents thèmes.

Le C.S.E.E.L. a été installé officiellement le 25 juin 1980 par M. REGENT, alors Président du Conseil d'Administration du P.A.N.S.N. Il a tenu **15 réunions** de travail et **deux colloques scientifiques** (les 24 juin 1981 et 12.13 juillet 1983). Outre ses membres, MM. C. BROSSARD, Directeur des Accès et de l'environnement maritime du PANSN, A.DAVID et B. GALLENNE, Ingénieurs au PANSN ont pris part régulièrement aux travaux du comité.

Les **organismes participant au programme du C.S.E.E.L.** sont localisés à Nantes ou ont l'habitude de travailler dans l'estuaire de la Loire. Les principaux d'entre eux sont : **l'Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes (I.S.T.P.M.) ; l'Université de Nantes, avec l'Institut de Géographie, le Laboratoire de Biologie Marine, le Laboratoire de Géologie Marine et Appliquée, le Laboratoire d'Ecologie et de Phytogéographie ; le Laboratoire Départemental d'Hygiène ; l'Ecole Vétérinaire de Nantes ; le Laboratoire Central d'Hydraulique de France ; le Port Autonome de Nantes St-Nazaire.**

Le bilan des études faites sur le milieu naturel de l'estuaire de la Loire et la mise au point d'un programme scientifique intégré dans ses objectifs et optimisé dans ses moyens ont occupé la première année, de sorte que les travaux sur le terrain ont effectivement commencé dans le courant du 2^e semestre 1981. La plupart des phénomènes étudiés ayant un caractère saisonnier, les mesures et prélèvements sur le terrain ont largement couvert et souvent dépassé une année. Le traitement des informations et la mise au net des résultats se sont étalés encore sur une année. Les rapports finaux ont donc été disponibles dans leur ensemble au cours du 2^e semestre de l'année 1983.

L'exécution du programme a donné lieu à l'établissement de **18 contrats (voir Annexe 2)**, dont 2 sont en cours. L'ensemble des résultats des études a été publié en **trois étapes**, correspondant à

trois niveaux d'analyse et de synthèse : **16 rapports (Annexe 3)** dont 2 thèses rassemblant et présentant l'ensemble des informations recueillies, sous la signature des responsables directs des diverses parties du programme ; **3 rapports des Chefs de thème** correspondant à chacun des thèmes ; le **présent rapport** enfin, établi à partir des précédents et qui présente une synthèse tirée des rapports des Chefs de thème.

Le **financement des travaux du C.S.E.E.L.** a représenté plus de **4 millions de francs (voir Annexe 2)** partagés entre des sources régionales (**Établissements Publics Régional et Départemental de la Loire Atlantique, Port Autonome de Nantes/St-Nazaire**) et centrales (**Ministère de la Mer, de l'Environnement, Électricité de France**).

Le présent rapport est divisé en **quatre parties** concernant respectivement : **les aspects hydrauliques et sédimentaires, la qualité des eaux et le milieu vivant, la gestion des zones humides, les conclusions et recommandations.** Chacune des trois premières parties comprend ses propres conclusions, mais elles sont reprises, intégrées et développées dans la **dernière partie** qui en fait un **bilan sommaire**, et formule des recommandations qui peuvent être considérées comme un **guide de gestion de l'estuaire**. Le Rapport forme un tout et sa lecture se suffit à elle-même pour une bonne compréhension des phénomènes décrits et des problèmes posés. **Le lecteur pressé pourra se contenter de prendre connaissance de la quatrième partie (conclusions et recommandations)** en sachant que chaque proposition trouve son argumentation dans l'une ou l'autre des trois parties précédentes.

Les **travaux du C.S.E.E.L.** peuvent être **exploités** sous **trois formes complémentaires.**

- Ils établissent, pour l'environnement de l'estuaire, un **état de référence** correspondant aux années 1981-1982. De nombreuses campagnes de mesures avaient eu lieu dans l'estuaire de la Loire depuis le siècle dernier,

mais aucune n'avait rassemblé de façon quasi simultanée, et pour une année entière, les paramètres hydro-dynamiques, sédimentaires, biologiques et chimiques. Les travaux du Comité, sans aucune interprétation particulière, permettent donc de dresser un "état zéro" (années de références 1981-1982) auquel il sera toujours possible et souvent recommandé de se référer pour effectuer des comparaisons.

- Ils mettent l'accent sur les **principaux points sensibles concernant l'environnement de l'estuaire** et les **recommandations propres à prévenir les conséquences nuisibles des activités dont il est le siège**. Il s'agit là du message essentiel du C.S.E.E.L. qui s'appuie sur une analyse détaillée des phénomènes et de leurs interactions. Dans la **quatrième partie** intitulée "conclusions et recommandations", se trouvent regroupés le **bilan global** des connaissances - y compris les **tendances évolutives** constatées dans la situation présente - et les **recommandations** faites par notre Comité. Les principales d'entre elles concernent :

- la **protection absolue des vasières telles qu'elles existent aujourd'hui**, car elles ont une valeur irremplaçable pour l'ensemble du milieu vivant dont la richesse est directement liée à la surface globale qu'elles occupent au niveau intertidal ;

- le **renforcement du programme de lutte contre l'eutrophisation** et la fixation d'une **norme minimale de concentration en oxygène dissous de l'ordre de 3 mg/l** ;

- l'**urgence d'un recours réglementaire pour concrétiser la notion d'écharpe verte**.

- le besoin de **réglementer et de contrôler la pêche dans l'estuaire interne** ;

- les précautions à prendre pour **prévenir toute augmentation de la turbidité lors des aménagements futurs** ;

- la nécessité absolue de **ne pas surcreuser le lit du fleuve en amont de Nantes** pour ne pas accroître les risques de remontée du sel et du bouchon vaseux.

- **Les travaux du C.S.E.E.L. permettent** enfin, grâce à l'abondance des informations d'ordres physique, chimique, biologique, recueillies et traitées, **d'apporter les éléments de réponse au problème posé par les conséquences sur l'environnement de tel ou tel aménagement non exactement défini aujourd'hui**. Fallait-il, en effet, orienter le programme vers les réponses à des questions urgentes impliquant l'environnement de l'estuaire, et ce faisant, satisfaire l'attente à court terme des décideurs concernés, ou bien au contraire acquérir une connaissance suffisamment générale de l'estuaire intégrant les interactions entre les phénomènes hydrauliques, sédimentologiques et biologiques, dans une optique plus globale et plus à long terme ? **Le C.S.E.E.L. a franchement opté pour cette seconde voie mais n'a pas négligé** pour autant de jeter un regard et **formuler un avis sur les principaux aménagements en cours ou projetés**. C'est ainsi qu'ont été examinés les problèmes posés par **les centrales thermiques, les prises d'eau douce, l'extraction des sables, le futur port de Mindin**, etc. On peut imaginer ainsi que **les travaux du C.S.E.E.L. serviront à mieux poser les problèmes d'aménagement** que dans le passé et **permettront de dégrossir les réponses** aux questions qu'ils posent concernant l'environnement.

La qualité scientifique des mesures sur le terrain et des analyses en laboratoire reflète la valeur et la motivation des équipes engagées. Est-il utile de souligner que **le travail en commun** de personnels de niveaux, de spécialités et appartenant à des organismes différents n'a soulevé aucune difficulté mais a, au contraire, **stimulé l'esprit d'équipe et permis d'économiser les moyens** ? Compte tenu des intérêts économiques en jeu, **une des préoccupations majeures du Comité a été l'objectivité scientifique** ; la structure même du C.S.E.E.L. a été élaborée en tenant le plus grand compte de ce facteur. Le lecteur sceptique se persuaderait rapidement en prenant connaissance des documents du C.S.E.E.L. que la collecte et le trai-

tement des informations ne laissent aucune place à l'interprétation tendancieuse. Il reste que les mesures en nature n'ont pas toujours été faites dans les conditions souhaitées et que l'interprétation qu'en a donné le C.S.E.E.L. peut toujours être remise en cause par d'autres scientifiques : c'est le cas de tous les programmes scientifiques. Le recours systématique à des équipes universitaires nantaises apportait par ailleurs les meilleures garanties de qualité et d'objectivité.

Pour toutes ces raisons, nous souhaitons rendre un hommage chaleureux aux principaux responsables scientifiques des travaux : le Professeur P. DUPONT, Directeur du Laboratoire d'Ecologie et de Phytogéographie ; le Professeur J. GRAS, responsable scientifique à l'Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes (I.G.A.R. U.N.) ; Monsieur J.F. GUILLAUD, du Département Environnement littoral et Gestion du Milieu Marin (E.L.G.M.M.) du Centre Océanologique de Bretagne (C.O.B.) ; Madame MARCHAND, du Laboratoire de Biologie Marine ; Monsieur C. MIGNIOT, Directeur des études de sédimentologie au Laboratoire Central d'Hydraulique de France (L.C.H.F.) ; le Professeur OTTMANN, Directeur du Laboratoire de Géologie Marine et appliquée ; Madame QUERE, Directrice du Laboratoire Départemental d'Hygiène ; Mademoiselle Danielle RAPETTI, de l'I.G.A.R. U.N. ; Monsieur RINCE, du laboratoire de Biologie Marine ; le Professeur André VIGARIE, de l'Institut des Sciences humaines de la mer ; Monsieur André VINCENT, Chef du Département 'Environnement et Ecosystèmes' de l'Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes (I.S.T.P.M.).

Malgré les travaux réalisés et les sommes dépensées, nous ne considérons pas, et de loin, avoir abouti à une compréhension complète des phénomènes en jeu dans l'estuaire. **Le C.S.E.E.L. a été obligé d'écarter un certain nombre de sujets** qui s'accrochaient mal de l'enveloppe finan-

cière et/ou des moyens disponibles et dont l'étude paraissait subordonnée à une meilleure connaissance générale de l'estuaire. Il s'agit des principaux problèmes suivants :

- **l'étude de la microbiologie dans l'estuaire de la Loire** avec des objectifs à la fois généraux et appliqués tels que : le rôle du bouchon vaseux, les relations bactériologiques entre les estuaires interne et externe, le rôle des apports ligériens dans la pollution des plages, l'optimisation des prises d'eau pour la consommation et les maraîchages, etc. ;

- **l'étude des échanges sédimentaires entre les estuaires interne et externe**, des circulations résiduelles dans l'estuaire externe, des temps de résidence des vases dans l'estuaire interne. Ces études n'ont été qu'amorcées par la mesure du transit solide sur la radiale Mindin - St Nazaire dans des conditions moyennes de débit fluvial, mais elles ont une importance certaine pour une meilleure appréhension de la pêche et de l'aquaculture dans l'estuaire externe ;

- **la pêche**, dont l'étude approfondie n'a pas été entreprise, faute des structures d'information appropriées. Il s'agit essentiellement de **l'étude du groupe socio. professionnel des pêcheurs, des techniques** (embarcations et engins) et du calendrier des différentes pêches pratiquées, ainsi que la **valeur économique de la pêche** ;

- **un modèle de la concentration en oxygène dissous** dont l'importance est fondamentale pour la maîtrise de l'eutrophisation et donc la conservation du milieu vivant ;

- **l'étude approfondie de la productivité des vasières** dont le rôle capital dans la chaîne trophique a cependant été clairement mis en évidence ;

- **l'étude de l'écologie de la phase estuarienne des espèces pélagiques** qui a été laissée de côté au profit de l'étude des espèces benthodémersales.

- **l'étude de la faune circulante** entre la Loire et les zones

humides, en cours, et dont les résultats ne sont pas encore connus.

Cet aperçu montre clairement, qu'en marge d'études appliquées, consacrées à des problèmes particuliers d'aménagement, un important programme d'études générales reste à accomplir. Nous pensons cependant que **les travaux du C.S.E.E.L. sont une étape décisive dans la prise en compte des problèmes d'environnement dans l'estuaire de la Loire**. Outre les résultats propres qu'ils apportent, ils font la preuve, par l'importance des efforts et des financements qu'ils ont mobilisés, que **les Autorités responsables** n'entendent pas se contenter de traiter les problèmes d'environnement au coup par coup mais **veulent acquérir une réelle vue d'ensemble afin de promouvoir une politique à long terme** dans ce domaine. Ils aideront à la prise de conscience de l'importance de l'environnement dans les futurs projets d'aménagements.

Jean Bourgoïn

Président du C.S.E.E.L.

REMERCIEMENTS

La mise au point d'un programme d'une certaine envergure et son financement et le choix d'une équipe de qualité pour l'exécuter, ne sont pas suffisants pour assurer le succès de l'opération. Il faut aussi bénéficier de la confiance et des encouragements bienveillants des Autorités de tutelle des organismes finançant le programme et/ou ayant assuré les prestations. Bien des difficultés, qui se seraient traduites par des retards ou une perte de qualité dans le travail, ont été évitées grâce à l'excellent climat qui a régné tout au long des travaux du C.S.E.E.L. avec ces hautes autorités. Nous tenons tout particulièrement à remercier :

M. BARON Président de la Chambre d'Agriculture de Loire Atlantique

M. CHAMBOLLE Directeur de la Prévention des Pollutions au Secrétariat d'Etat à l'Environnement

M. CHAPON Vice-Président du Conseil Général des Ponts et Chaussées

M. CORDELLE Electricité de France - Equipement Tours

MM. COUZIER et BAUDEQUIN Préfets de la Région des Pays de la Loire

M. DAVIGO Ingénieur en Chef du GREF - Chef du Service Régional de l'Aménagement des Eaux

M. DE BAUDINIÈRE Premier Vice-Président du Conseil Général de Loire-Atlantique

M. DE COSSE BRISSAC Président du Conseil Général de Loire-Atlantique

MM. DESBAZEILLE et DEBAYLES Ingénieurs Généraux des Ponts et Chaussées. Commissaires du Gouvernement auprès du Port Autonome

M. FOUCAUD Ingénieur général chargé du service de la Loire

MM. GORGET, KERFANT, CHEVILLARD et KERGADALLAN Administrateurs en chef des Affaires Maritimes de Nantes et Saint Nazaire

M. GUICHARD Président de l'Etablissement Public des Pays de la Loire

M. JUBINEAU Président de la Chambre de Commerce de Nantes

MM. MANDIL et ROCHE Ingénieurs en Chef des Mines - Direction Régionale de l'Industrie

MM. MAURIN et TROADEC Directeurs de l'I.S.T.P.M.

MM. MILLIAT et CAUDRON Electricité de France - Région Equipement Paris

M. NUNGESSER Ingénieur en chef du GREF - Directeur départemental de l'Agriculture

MM. OLIVIER et BROSSIER Directeurs des Ports et de la Navigation Maritimes

M. PASQUET Ingénieur Général - Président de la Mission déléguée de Bassin Loire-Bretagne Vice-Président du Conseil Général des Ponts et Chaussées

MM. REGENT et LAMBOURG Président du Port Autonome de Nantes Saint-Nazaire.

M. SMAGGHE Directeur du Port Autonome de Nantes Saint Nazaire

M. VICARIOT Directeur du Centre Océanologique de Bretagne

M. VILAINE Président de l'Université de Nantes

M. VOLKOFF Président de la Chambre de Commerce de Saint-Nazaire

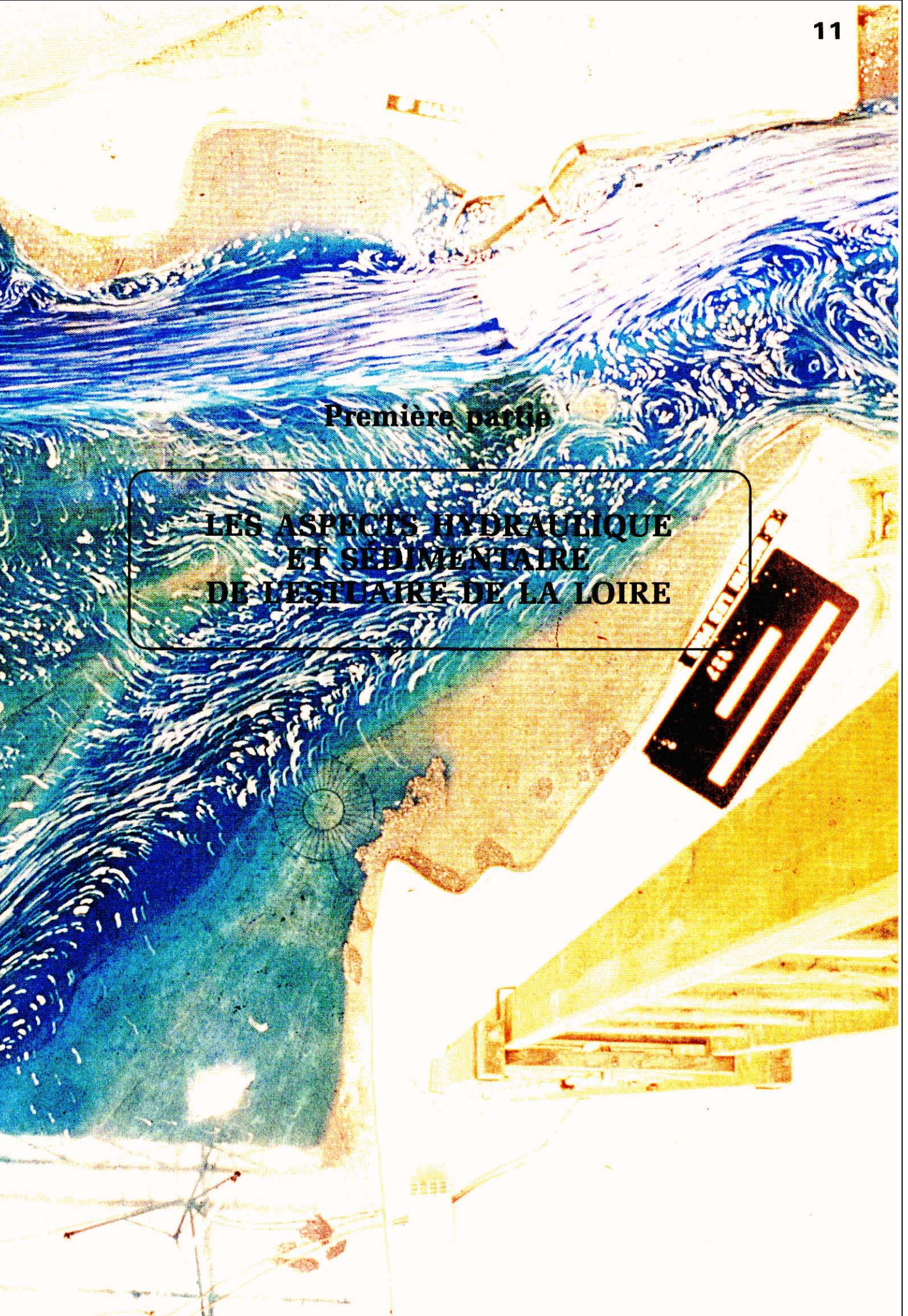
MM. les Maires et Conseillers Généraux des communes et cantons riverains de l'estuaire

MM. les Présidents des Syndicats de marais riverains.

Jean Bourgoin
Président du C.S.E.E.L.

Première partie

**LES ASPECTS HYDRAULIQUE
ET SEDIMENTAIRE
DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE**



INTRODUCTION

Depuis de nombreuses années, des efforts ont porté sur l'estuaire de la Loire pour comprendre et prévoir les phénomènes hydrauliques et sédimentaires. Les études faites dans ce domaine par le Port Autonome de Nantes/St-Nazaire (P.A.N.S.N.) et les recherches entreprises par les universitaires de Nantes et les Laboratoires d'Hydraulique français montrent l'intérêt qui a été porté à la Loire maritime.

La mise en place, il y a un peu plus de quatre ans, du Comité Scientifique pour l'Environnement de l'Estuaire de la Loire (C.S.E.E.L.) a permis de franchir un nouveau pas en réunissant des disciplines complémentaires qui travaillaient quelquefois en ordre dispersé, d'intégrer l'ensemble des problèmes qui peuvent se poser dans un estuaire et de tenter de rattacher différents facteurs biologiques, benthiques, piscicoles, botaniques, géographiques ou humains aux phénomènes hydrauliques et sédimentologiques qui font partie intégrante de la vie d'un estuaire.

Dans le domaine des études hydrosédimentaires les programmes établis par le C.S.E.E.L. pour compléter les connaissances sur l'estuaire de la Loire concernent

plus particulièrement les quatre points suivants :

- la mesure des apports solides de la Loire à Montjean, en amont du bief fluvio-maritime, cette étude ayant été confiée au Laboratoire de Géologie Marine et Appliquée de l'Université de Nantes,
- la mesure de la masse turbide dans l'estuaire de la Loire, cette étude ayant été confiée au Laboratoire Central d'Hydraulique de France (L.C.H.F.),
- l'étude des échanges sédimentaires entre l'estuaire interne (limité à l'amont de St Nazaire) et externe, cette étude ayant été confiée, comme la précédente, au L.C.H.F. avec une participation pour les mesures, du P.A.N.S.N., du C.O.B., et du Laboratoire de Géologie Marine ;
- l'étude en modèle réduit physique de l'évolution à long terme des fonds de l'estuaire de la Loire, cette étude étant faite sur le modèle d'ensemble existant au L.C.H.F.

Parallèlement, de nombreuses recherches hydrauliques et sédimentologiques étaient réalisées pour le compte du Port Autonome de Nantes-St Nazaire, tant en nature que sur des modèles physiques et mathématiques, pour examiner les répercussions

possibles des différents aménagements portuaires ou industriels envisageables au cours des prochaines décennies.

La présente synthèse générale des études hydrosédimentaires de l'estuaire de la Loire a pour but d'analyser et de regrouper les différents résultats obtenus par le C.S.E.E.L., le P.A.N.S.N. ou différentes entités industrielles, urbaines ou agricoles, afin d'avoir une vue d'ensemble des problèmes qui ont pu, peuvent ou pourront se poser à court et moyen termes.

Dans cette synthèse, nous examinerons successivement :

- l'état actuel de l'estuaire (avant 1983) et l'évolution des paramètres hydrauliques (débits fluviaux, marées, courants, salinité) et sédimentologiques (apports fluviaux, nature et mouvement des sédiments, masse turbide dans l'estuaire et échange avec le large) au cours des dernières années ;
- le devenir de l'estuaire à la fin du siècle ;
- l'influence après 1983 des aménagements de l'estuaire (approfondissement du chenal de navigation), prises d'eau urbaines ou agricoles, Centrales de

l'E.D.F., extractions d'agrégats, aménagements de plaisance, ponts sur l'estuaire...) sur l'hydraulique (lignes d'eau, vitesses et salinités) et la sédimentation (chenal et zones limitrophes);

Dans les conclusions de cette synthèse hydrosédimentaire, on essaiera de dégager les paramètres hydrauliques et sédimentologiques principaux susceptibles d'être pris en considération pour l'environnement de l'estuaire et de formuler un certain nombre de recommandations sur les perspectives de développement de l'estuaire de la Loire.

Pendant plusieurs siècles, l'estuaire de la Loire a été encombré par de multiples îles, bancs et faux bras qui rendaient la navigation difficile malgré les très faibles tirants d'eau des navires.

Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, des travaux ont permis de remédier à cet état par un endiguement réalisé sur 15 km de Nantes à la Martinière, et au début du XX^e siècle, la section intermé-

diaire la Martinière-Paimbœuf était aménagée sur 22 km (Loi de 1903). Les travaux déclarés d'utilité publique en 1933 allaient permettre en 1940 l'ouverture du chenal Nord entre Donges et St-Nazaire (—5,75 m jusqu'en 1953; —9,50 m jusqu'en 1976) qui reste le chenal de navigation actuel et que les travaux de 1980 ont fait passer à une profondeur de —13,25 m sous le zéro hydrographique avec une largeur au plafond de 300 m permettant l'accès aux installations de Donges et de Montoir des bâtiments de grand tonnage.

Parallèlement, le chenal extérieur était approfondi, permettant de relier St Nazaire à la mer et de faire passer les profondeurs de —5,50 à —6 m en 1934, à —10 m en 1969 et à —13,25 m en 1980. De même, à la suite d'un envahissement considérable du port de Nantes par les vases au cours des années sèches de 1906 et 1907, des travaux d'aménagements de la Loire en amont de Nantes (Loi de Juillet 1913) ont

conduit à augmenter le volume des marées en réalisant des dragages importants dans le lit du fleuve et en canalisant le lit mineur par des digues et des épis pour augmenter l'action des courants. Les extractions d'agrégats, qui ont été intensifiées entre 1970 et 1980 en amont de Nantes, allaient quadrupler les sections de l'estuaire dans ce secteur entraînant une suppression des apports de sable dans l'estuaire maritime et un surdimensionnement du bassin de marées.

Ces transformations ont entraîné une avancée de la propagation de la marée, une modification de l'intrusion saline, un rééquilibrage des sections avec creusement des chenaux de navigation et colmatage progressif des zones latérales.

Après avoir rappelé brièvement les caractéristiques géométriques de la Loire dans son état de 1976-1977, les aspects hydrauliques et sédimentologiques et leur évolution au cours des dernières années seront examinés.

Chapitre I
ASPECT HYDRAULIQUE
DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE

1 - Rappel des caractéristiques géométriques de l'estuaire de la Loire.

1-1 Longueur du bief fluvio-maritime.

La longueur du bief fluvio-maritime, que l'on caractérise par la limite extrême de la remontée de la marée dynamique, atteint près de 95 km de longueur, Nantes étant à 55 km de la mer. Elle a fortement augmenté au cours des dernières décennies puisque la limite de la propagation de la marée se situait à 15 km seulement en amont de Nantes en 1903.

1-2 Largeur et sections de l'estuaire.
(fig. 1).

La largeur de l'estuaire atteint 3000 à 3500 m au voisinage de son embouchure et seulement 225 m à Cheviré immédiatement à l'aval de Nantes.

Les sections moyennes (voir figure 1) varient de l'aval vers l'amont de l'estuaire suivant une loi exponentielle décroissante :

$$S_x = S_0 e^{-Kx}$$

x étant la distance à l'embouchure et S_0 la section moyenne à cet emplacement et K un facteur voisin de 0,06. Ces sections étaient en 1976 de l'ordre de 20 000 m² à St-Nazaire, 10 000 m² à Donges, 2 000 m² au Pellerin. Les travaux d'approfondissement du chenal de navigation réalisés en 1980 pour donner des profondeurs à -13,25 m au lieu de -9,50 m entre Donges et St-Nazaire - avec une largeur au plafond de 300 m - n'ont entraîné une modification des sections aval que de l'ordre de 7 à 10 %. Par contre, les approfondissements pour les extractions d'agrégats en amont de Nantes ont fait passer les sections de 300 m² en 1942 et environ 1 200 à 1 500 m² en 1980.

Il faut également noter que les grands travaux d'aménagement de l'estuaire de la Loire, réalisés en 1940, ont eu surtout pour objet de faire passer le chenal de la rive gauche à la rive droite de l'estuaire et que progres-

sivement les sections moyennes se sont rétablies avec colmatage de l'ancien chenal.

De même, il faut rappeler qu'au cours du XIX^e siècle, les surfaces entre rives de l'estuaire de la Loire n'ont cessé de diminuer passant de 10 000 hectares en 1821 à 9 000 hectares en 1891, le phénomène se poursuivant au cours du XX^e siècle montrant que l'estuaire de la Loire, comme tous les estuaires, a tendance à se canaliser naturellement.

2 - Apports liquides de la Loire
(fig. 2)

Au total, les apports liquides moyens de la Loire atteignent 25 milliards de m³ par an soit le 1/6 du volume total annuel qui pénètre et sort de l'estuaire sous l'action de la marée.

Le débit moyen annuel (ou module moyen) mesuré à Montjean à partir d'une loi hauteur/débit est de 825 m³/s pour la période de 1866-1965 ; il a été de 915 m³/s pour la période de 1966-1981.

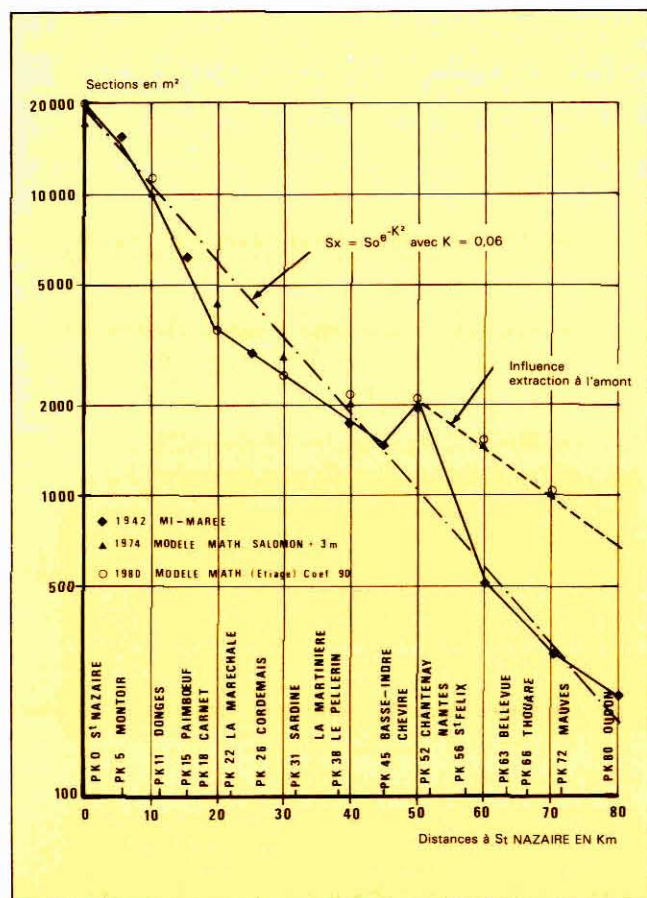


Fig. 1 - Estuaire de la Loire. Variation des sections moyennes à mi-marée.

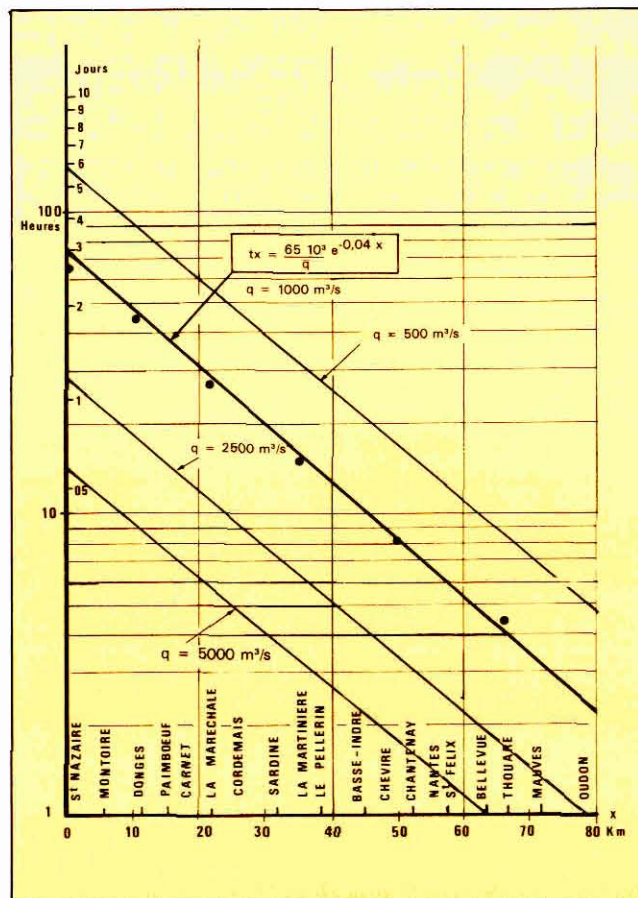


Fig. 2 - Estuaire de la Loire. Durée théorique de propagation des eaux douces dans l'estuaire de Montjean à l'embouchure.

L'étude de la répartition des débits journaliers de la Loire à Montjean, au cours du dernier siècle, montre que le débit maximum peut atteindre 1 jour tous les 100 ans 7 700 m³/s, 6 600 m³/s tous les 10 ans et 5 200 m³/s tous les ans. De même, on constate que les débits minimaux d'étiage atteignaient 1 jour par an 77 m³/s, 1 jour tous les 10 ans 60 m³/s et 1 jour tous les 100 ans 50 m³/s.

Les débits dépassés respectivement 10 jours (DCM), 1 - 3 - 6 et 9 mois par an (DC¹ à DC⁹) et 355 jours par an (DCE) sont donnés dans le tableau 1.

La répartition des modules moyens mois par mois fait apparaître un maximum d'apport de Décembre à Avril et un minimum en Août et Septembre.

Le temps d'écoulement des eaux fluviales (fig. 2) peut être représenté par la formule :

$$t = \frac{65 \times 10^3}{q} e^{-0,004 x}$$

(t en heures, q en m³/s, x en km)

dans laquelle q est le débit fluvial et x la distance à l'embouchure.

Pour un débit de 1000 m³/s, les eaux douces de Montjean mettraient 3 jours pour atteindre St Nazaire et près d'un mois pour un débit d'étiage de 100 m³/s.

3 - La marée, sa propagation, ses modifications.

3-1 Généralités

Dans l'estuaire de la Loire, la marée est du type semi-diurne avec une légère inégalité diurne.

Quelques hauteurs d'eau des pleines et basses mers de morte eau et vive eau rapportées au niveau des plus basses mers à St Nazaire sont données dans le tableau 2.

3-2 Propagation de la marée en étiage (fig. 3, 4, 5).

Au cours de la remontée dans l'estuaire, la courbe de marée se déforme et devient de plus en plus dissymétrique, la durée du flot étant de plus en plus courte et la durée du jusant de plus en plus longue (fig. 3). Ce phénomène est d'autant plus sensible que l'amplitude de la marée est grande et la profondeur moyenne de l'estuaire est faible. En Loire, la dissymétrie entre le flot et le jusant est très sensible en vives-eaux d'étiage, le flot ne durait à Nantes que 4 h 40 mn et le jusant 7 h 50 mn. Les basses-mers sont décalées de 2 h environ entre St Nazaire et Sardine (30 km) et de près de 5 h entre St Nazaire et Thouaré, c'est-à-dire sur 65 km environ.

Les profils instantanés de la marée qui donnent les cotes

d'eau à un instant donné (fig. 4) font apparaître que la pente moyenne de la ligne d'eau est de l'ordre de 5 cm par kilomètre dans la partie médiane de l'estuaire mais peut atteindre 20 cm/km en amont de Nantes.

En mortes-eaux, l'effet de convergence des rives est supérieur à celui de frottement et l'on constate un léger abaissement du lieu des basses-mers entre St Nazaire et Nantes se traduisant par une amplification de la marée vers l'amont (fig. 5).

Précisons que l'on admet que l'estuaire est hypersynchrone* en moyenne entre St-Nazaire et La Maréchale, synchrone entre La Maréchale et Basse-Indre, et hyposynchrone en amont de Nantes.

3-3 Propagation de la marée en crue. (fig. 6).

Le débit fluvial modifie la propagation de la marée et entraîne, en particulier, une surélévation très importante du lieu géométrique des basses-mers dans la partie amont, ce qui a pour effet, lorsque le débit fluvial augmente, de rapprocher de l'embouchure le point atteint par la marée, de réduire son amplitude et de diminuer sa vitesse de propagation.

* Rappelons que :

- un estuaire hypersynchrone est un estuaire où l'effet de rétrécissement des largeurs (et des profondeurs) est supérieur à celui du frottement sur les fonds : l'amplitude de la marée augmente de l'aval vers l'amont de l'estuaire avant de se dissiper à l'amont ;
- un estuaire est synchrone lorsque les phénomènes dus au rétrécissement sont égaux à ceux dus au frottement : l'amplitude de la marée reste constante dans l'estuaire ;
- un estuaire est hyposynchrone lorsque les phénomènes dus au rétrécissement sont inférieurs à ceux dus au frottement : l'amplitude de la marée décroît dans l'estuaire.

PROBABILITÉ	DCM	DC ¹	DC ³	DC ⁶	DC ⁹	DCE	MODULE
DÉBITS m ³ /s	2970	2040	1120	565	296	117	825

Tableau 1.

	Pleines mers		Niveau mi-marée	Basses mers	
	V.E.	M.E.		M.E.	V.E.
St-Nazaire	5,5	4,2	3,1	1,9	0,6
Paimbœuf	5,6	4,3	"	1,8	0,9
Le Pellerin	5,8	4,5	"	1,8	1,5
Nantes					
Chantenay	5,8	4,6	"	1,9	1,5

Tabl. 2 - Hauteur dans les marées moyennes (en m).

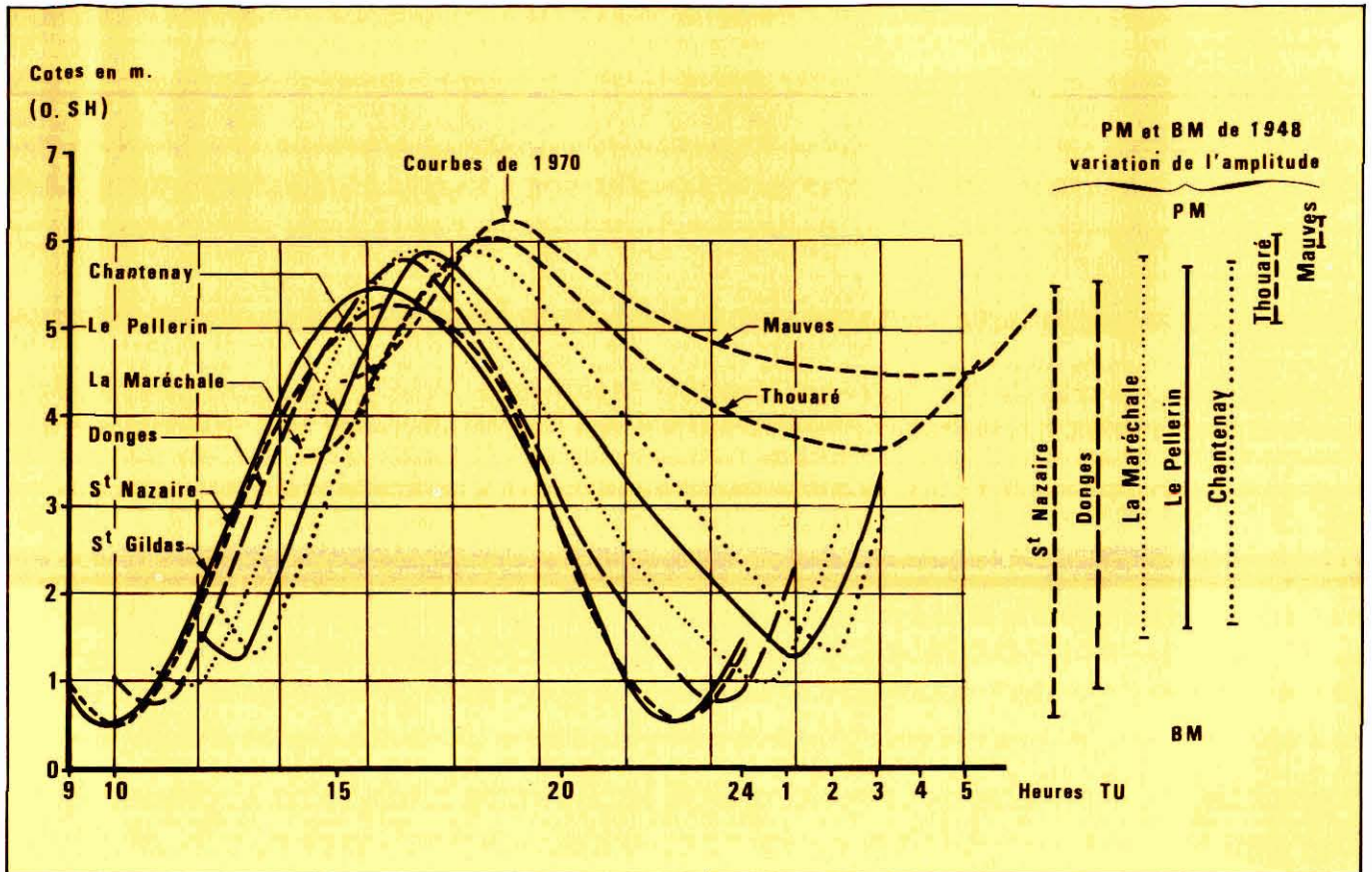


Fig. 3 - Propagation d'une marée de coefficient 95 en étiage (1970).

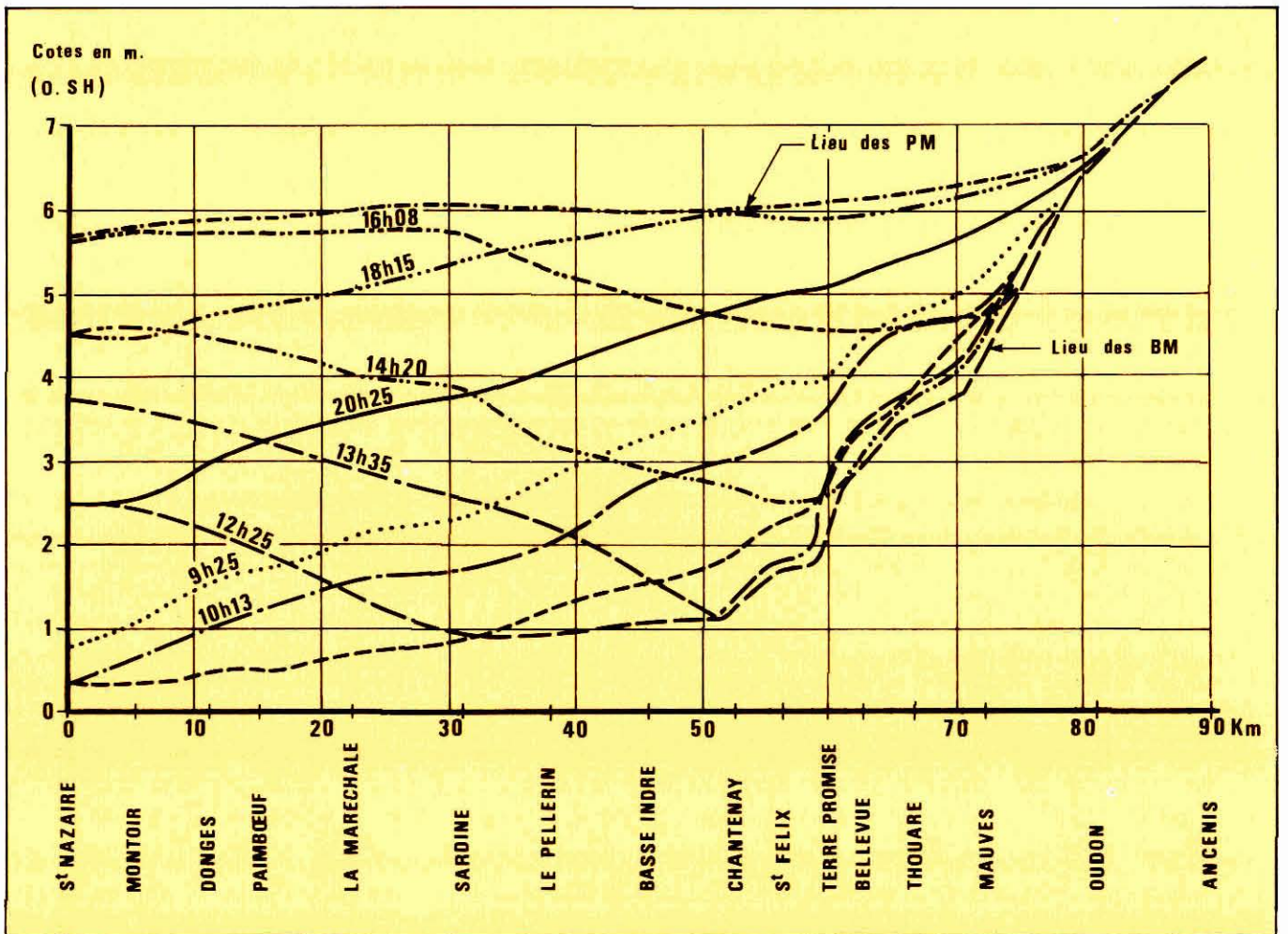


Fig. 4 - Profils instantanés de marée de V.E. (1970) en étiage.

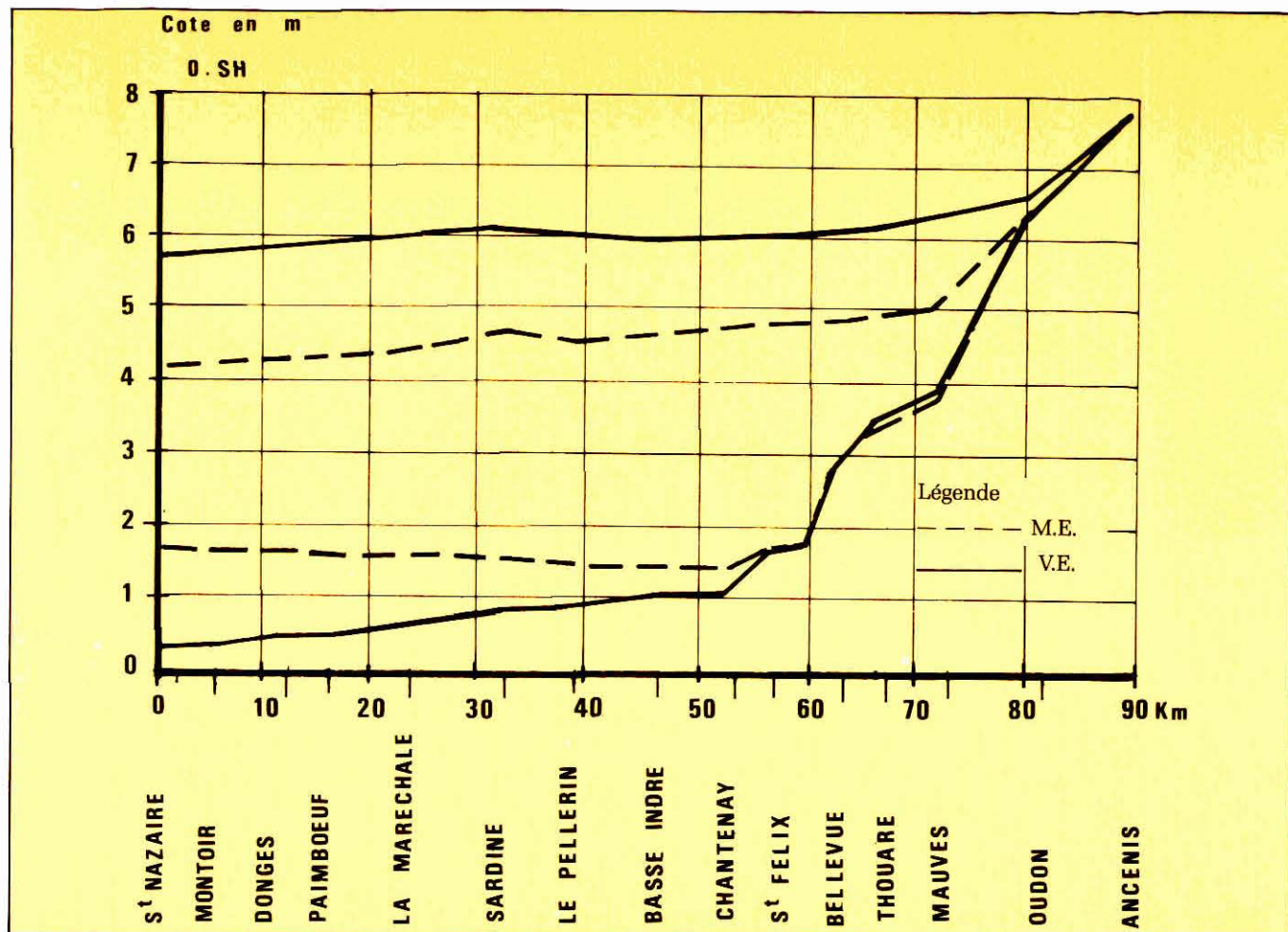


Fig. 5 - Variation des lieux géométriques des BM et PM en vives eaux et mortes eaux en étiage (1971).

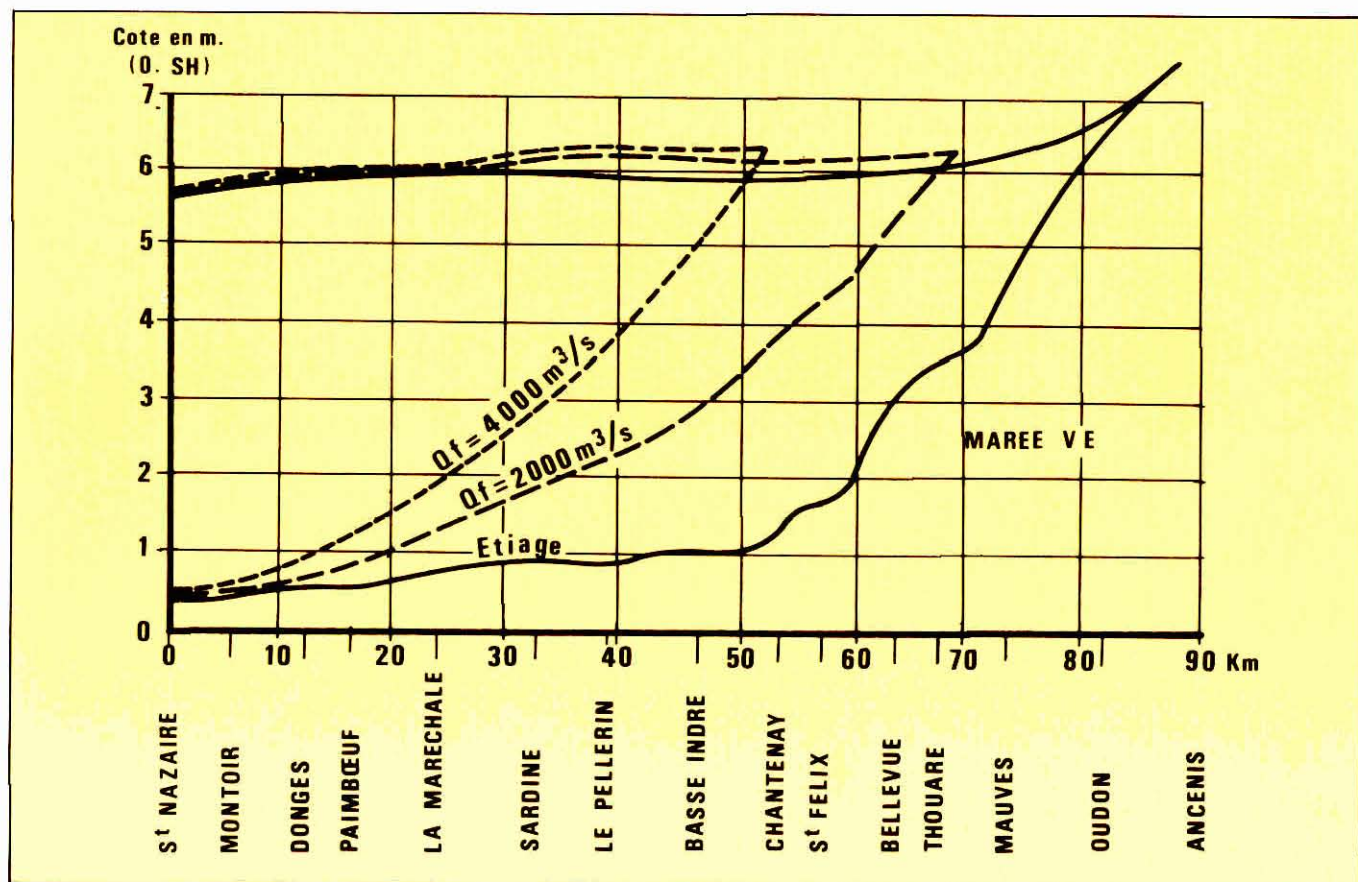


Fig. 6 - Propagation de la marée en crue. Variation des lieux géométriques des PM et BM en V.E. en fonction du débit de la Loire (1976).

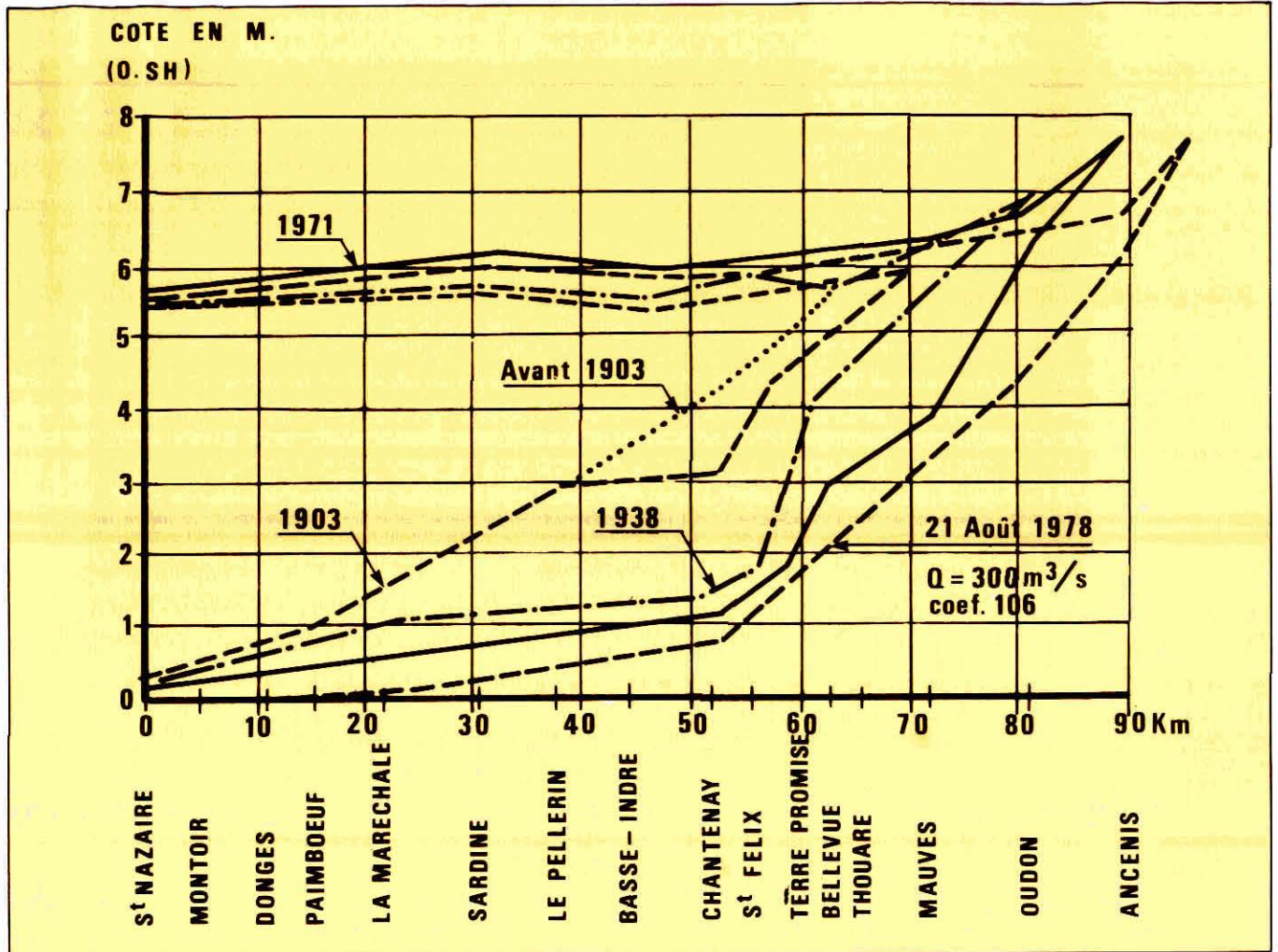


Fig. 7 - Évolution des lieux géométriques des BM et PM de 1903 à 1978. Marée de vive eau, étiage.

1903 - 1938 : approfondissement et calibrage section intermédiaire Paimbœuf-Le Pellerin, Bassin de marée en amont de Nantes.
1938 - 1971 : Ouverture nouveau chenal de navigation St-Nazaire-Donges (-5,75 m à -9 m) ; rectification des Brillantes.

Approfondissement du chenal de Nantes (-3,75 m à -5,5 m).

1975 - 1978 : Extraction d'agrégats en amont de Nantes (entretien des profondeurs à l'aval).

La figure 6 illustre la variation du lieu des basses-mers et des pleines-mers en fonction du débit de la Loire et montre qu'en 1976 et en marée de vives-eaux, le point atteint par la marée recule de 30 km environ lorsque l'on passe d'un débit d'étiage à un débit de crue de 4 000 m³/s.

3-4 Modifications de la marée au cours du temps.

L'examen des lieux géométriques des pleines-mers et des basses-mers de 1903 à 1978 (fig. 7) permet d'apprécier l'influence des différents aménagements de l'estuaire sur la propagation de la marée.

On constate une pénétration de plus en plus importante de la marée par suite, en particulier, d'un abaissement des basses-mers. La limite de propagation de la marée se localisait en vives-

eaux et en étiage vers Bellevue avant 1903, Mauves en 1903, Oudon en 1938, Ancenis en 1971 et à l'amont de ce secteur en 1978. En 75 ans, la marée a remonté de plus de 30 km, la dernière remontée étant due à l'inauguration du bassin de marée en amont de Nantes par suite du surcreusement artificiel des fonds.

Les études faites sur modèles physique et mathématique confirment le gonflement de l'amplitude à l'aval, résultant de la réflexion de l'onde marée sur le bassin surcreusé en amont de Nantes.

A Nantes, les amplitudes de marées sont passées en vives-eaux d'étiage de 2 m environ en 1876 à 4,90 m en 1971. On peut dire que dans l'état actuel l'amplitude de la marée à Nantes est, en étiage, très peu différente de celle que l'on peut mesurer à l'embouchure.

4 - Les volumes d'eau oscillants et les courants dans l'estuaire.

4-1 - Les volumes d'eau oscillants. (fig. 8 et 9).

Les volumes d'eau qui pénètrent et sortent de l'estuaire à chaque marée (en 1980) atteignaient en période d'étiage, 250 millions de m³ d'eau à St Nazaire pour une marée de vives-eaux exceptionnelle (coefficient 106), 200 millions de m³ pour une marée moyenne et 140 millions de m³ pour une marée de mortes-eaux (coefficient 44). Au total, il pénétrerait et sortirait de l'estuaire - en absence de tout débit propre de la Loire - 140 milliards de m³ d'eau par an.

Comme pour les largeurs et les sections, les volumes d'eau

oscillants varient en aval de Nantes suivant une loi exponentielle (fig. 8).

En amont de Nantes, on constate une modification de cette loi, ce qui caractérise le passage de l'estuaire à dominante maritime à un estuaire à dominante fluviale.

Le débit instantané Q_{max} , dû uniquement à la marée, atteint en vives-eaux environ 20 000 m³/s à St Nazaire, 6 000 m³/s à Cordemais, 2 500 m³/s à Cheviré et seulement 800 m³/s à Thouaré (fig. 9). Plus on remonte dans l'estuaire, plus le rapport débit instantané de la marée/débit fluvial diminue, montrant à partir de Nantes et dans l'état de 1976, une prédominance du régime fluvial sur le régime maritime. A l'embouchure, le rapport de 2,2 entre le volume d'eau oscillant en vives-eaux sous l'effet de la marée (200 à 250 millions de m³) et le volume d'eau apporté par une crue annuelle (5 200 m³/s) au cours d'une demi-marée classe la Loire comme un estuaire ayant une dynamique fluvio-maritime.

4.2 Les courants (fig. 10 et 11).

La dissymétrie constatée dans les courbes de marée entraîne, en étiage, une dissymétrie dans les courbes de vitesses des courants, le flot s'effectuant en général avec une durée plus courte que le jusant et des vitesses moyennes supérieures. Au contraire, en crue, les vitesses de jusant deviendront toujours plus fortes que les vitesses de flot, ce phénomène étant d'autant plus sensible que l'on se situe plus en amont de l'estuaire et que le débit fluvial est plus fort.

A cette dissymétrie des vitesses, en fonction de la distance à l'embouchure et du débit fluvial, se superposera une variation des vitesses sur la verticale qui, en l'absence d'un coin salé ou d'un gradient important de turbidité, suivra une loi logarithmique, les vitesses étant plus faibles au fond qu'en surface. La présence d'une stratification dans les eaux accentuera cette dissymétrie dans les courants, pouvant se traduire dans certains cas par une masse

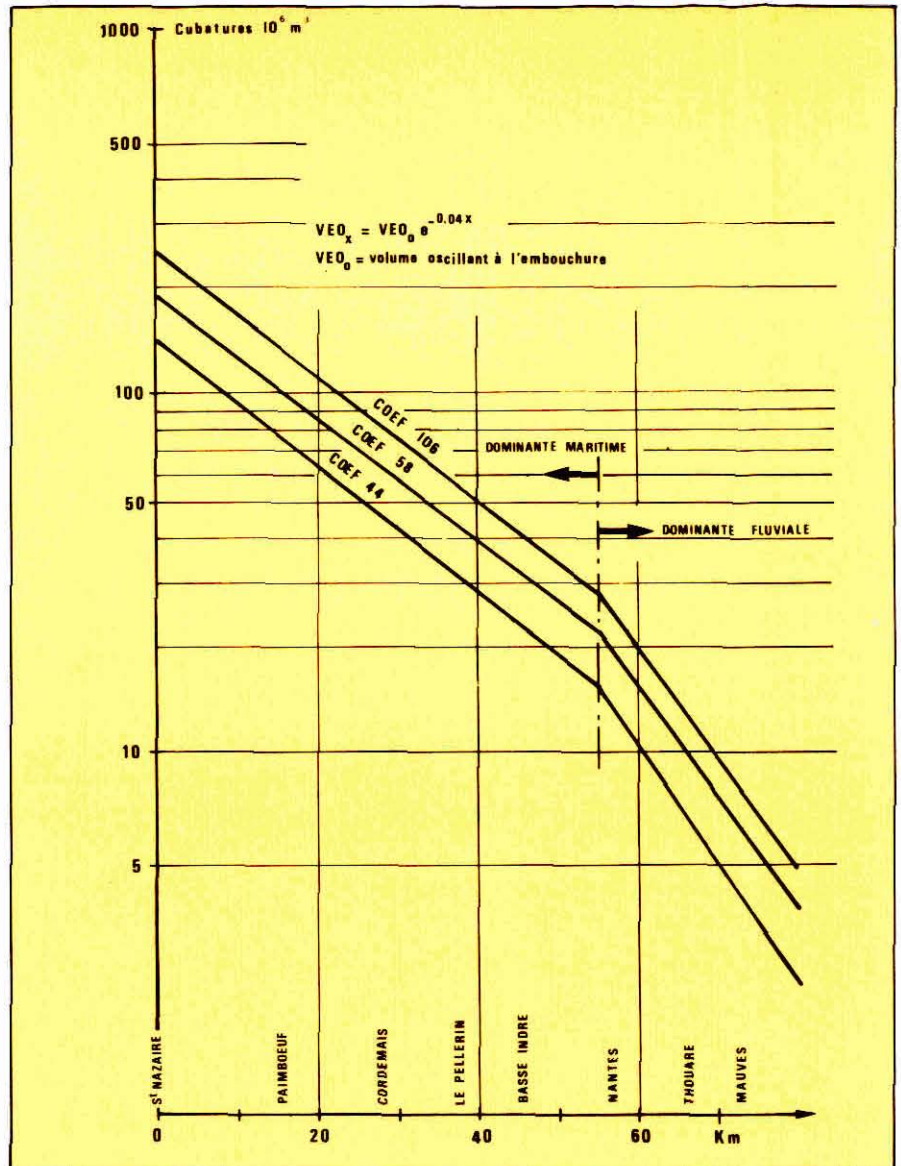


Fig. 8 - Variation du volume d'eau oscillant (1976) dans l'estuaire de la Loire.

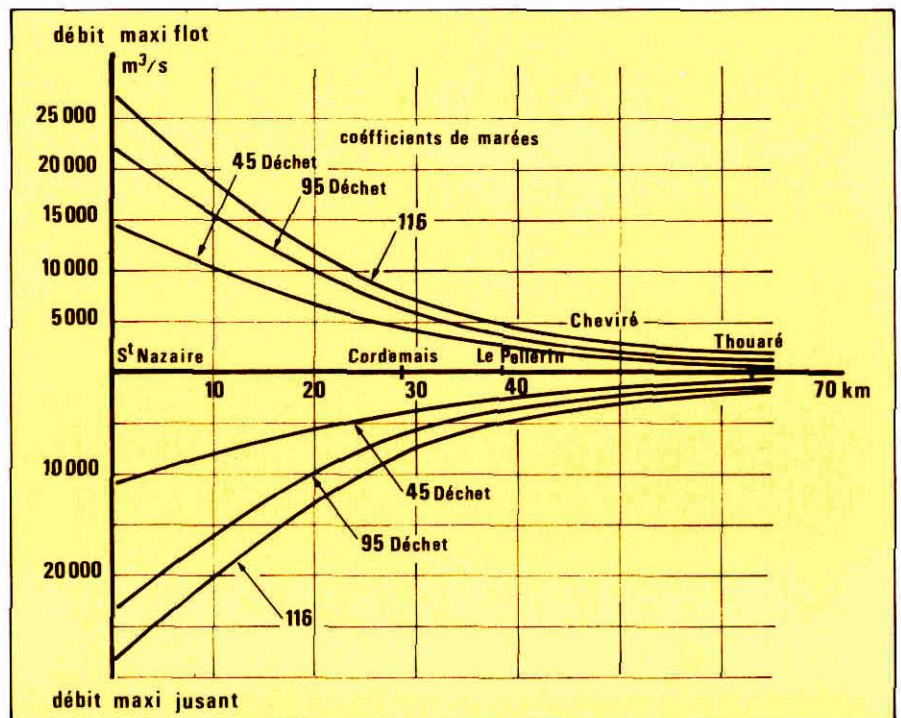


Fig. 9 - Répartition des débits instantanés. Étiage : $q = 80$ m³/s.

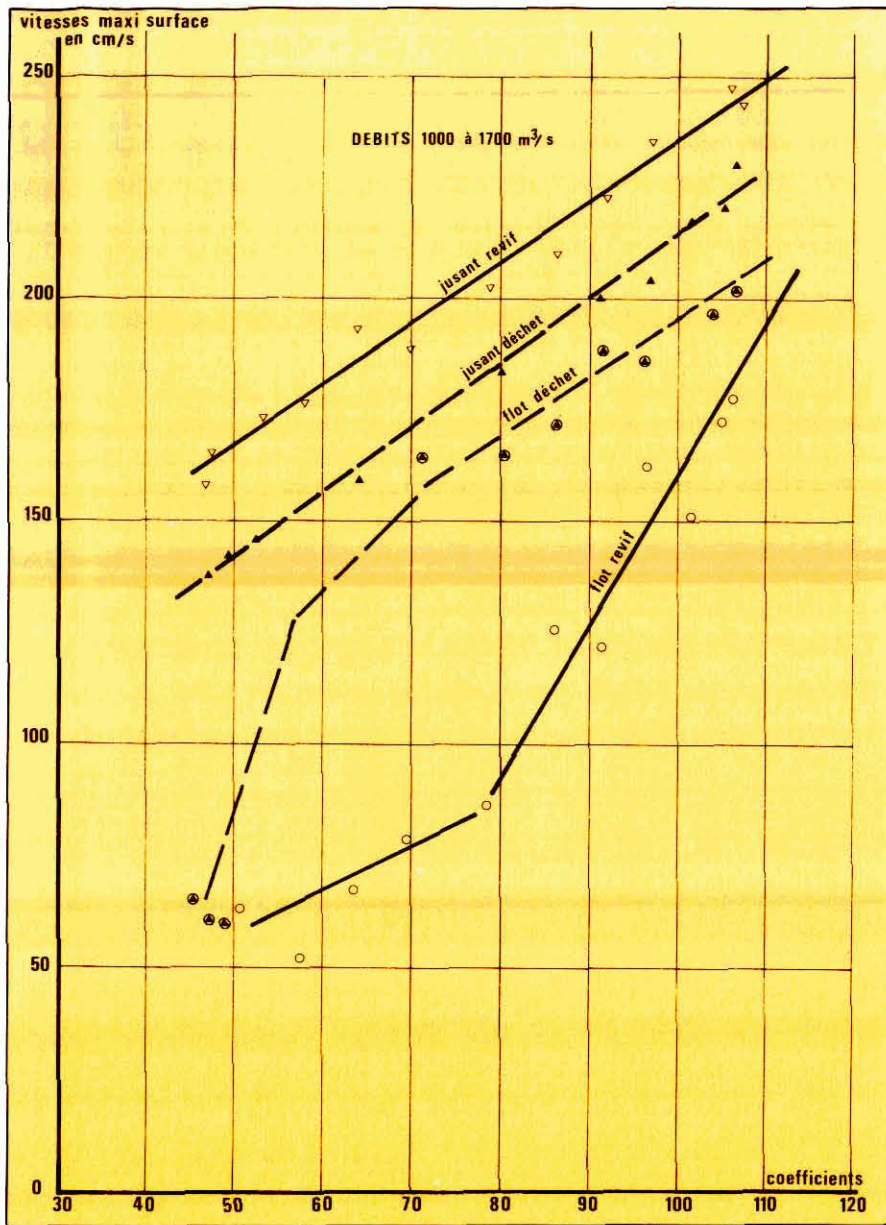


Fig. 10 - Vitesses maximales. Donges (PK 10,3) - 1977.

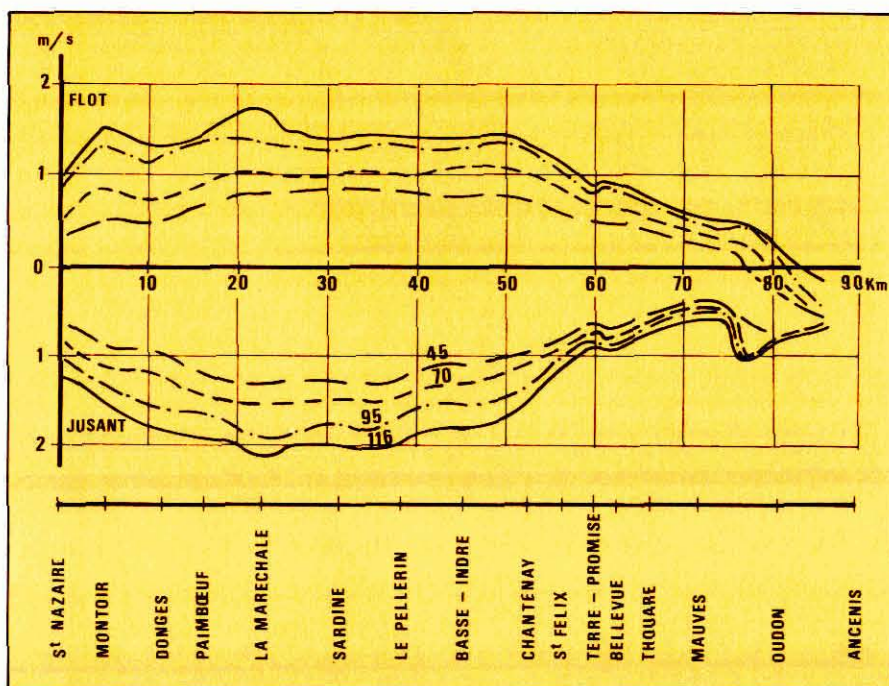


Fig. 11 - Répartition des vitesses maximales de surface. Étiage (80 m³/s) 1976.

d'eau immobile sur les fonds ou même des inversions de courants. En vives-eaux et en étiage, le rapport entre les vitesses maximales mesurées près du fond (à 1 m) et en surface était voisin de 0,6 en moyenne ; ce rapport est inférieur en mortes-eaux et pour des débits de la Loire appréciables, il est légèrement supérieur en flot (0,70) qu'en jusant (0,55 à 0,65).

De même, des variations appréciables des vitesses peuvent apparaître suivant l'axe transversal de l'estuaire ou du chenal de navigation, les vitesses étant, par exemple, supérieures en jusant sur la rive droite du chenal entre Donges et St Nazaire que sur la rive gauche. Les vitesses, en un même point, pour un même débit et pour un même coefficient de marée, peuvent également être différentes en revif et en déchet de la marée.

La figure 10 illustre ces observations pour le poste de mesure de Donges (PK 10,3) et montre, d'une part, la variation des vitesses maximales de surface en fonction du coefficient de marée, d'autre part, les différences entre flot et jusant, revif et déchet.

L'étude de la répartition des vitesses, en étiage ($Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$), tout le long de l'estuaire (fig. 11) permet d'avoir une vue d'ensemble de l'influence des coefficients de marée et de la dissymétrie flot-jusant. Les vitesses maximales de surface diminuent en flot lorsque le débit augmente tandis que les vitesses de jusant augmentent dans les mêmes conditions. Ce phénomène est d'autant plus sensible que l'on se rapproche de l'amont, la différence étant plus importante pour le flot que pour le jusant.

A Cheviré, immédiatement en aval de Nantes, par exemple, le tableau 3 donne les ordres de grandeur des vitesses pour des débits de la Loire compris entre 80 et 8 000 m³/s (débit centennal) et montre que les vitesses peuvent atteindre 3,7 m/s en crue exceptionnelle.

Débit en m ³ /s	80	500	1 400	2 000	3 000	5 000	8 000
Maxi	1,4	1,6	1,65	1,75	2,0	2,65	3,7
Mini (ou flot)	-1,45	-1,2	-0,8	-0,25	0,8	2,1	3,5

Tabl. 3 - Vitesse des courants en m/s - Marée coefficient 95 - état 1976.

A partir d'un débit de 2 000 m³/s, il n'y a pratiquement plus de renverse du courant à Cheviré.

Notons également que sous l'action des courants de marée, les masses d'eau subiront en étiage des déplacements alternatifs dans l'estuaire maritime atteignant 20 km au cours des marées de vives-eaux et environ la moitié au cours des marées de mortes-eaux. A ces mouvements alternatifs d'étiage, pourront se superposer les déplacements des masses d'eau en crue avec une résultante vers l'aval d'autant plus importante que le débit fluvial sera élevé.

5. La salinité : sa répartition et ses modifications dans le temps sous l'action du débit fluvial et de la propagation de la marée.

La limite supérieure de remontée des eaux salées dans un estuaire est très différente de celle qui peut être atteinte par la limite de propagation de la marée. En général, on constate qu'en étiage, la limite supérieure de la remontée saline se situe à mi-distance de la remontée de la marée. En Loire la remontée saline se situe au voisinage de Nantes, c'est-à-dire au PK 50 alors que la marée remonte en amont d'Ancenis à plus de 95 km de l'embouchure.

Lorsque l'on modifie la propagation de la marée, il est donc normal que la limite amont de la salinité se trouve modifiée. En fait, la remontée saline sera tributaire de nombreux paramètres dont certains très importants comme le débit fluvial, le coefficient de la marée et la rugosité des fonds, d'autres moins sensibles a priori mais cependant appréciables comme l'historique du débit flu-

vial, la succession des marées (on peut mesurer des décalages du front de salinité à 0,5‰ de 10 à 15 km suivant que l'on est en revif ou en déchet pour un même coefficient de marée et un même débit fluvial), la surélévation météorologique du niveau moyen de l'eau à l'embouchure, etc.

5-1 Mélange vertical des eaux douces et des eaux salées. (fig. 12).

L'intrusion saline dans un estuaire peut se produire de trois façons différentes :

- sous la forme d'un coin salé bien différencié si aucun mélange notable n'apparaît,
- par stratification si un mélange partiel de l'eau de mer et de l'eau douce s'effectue,
- sans stratification ou avec une faible variation verticale de la salinité si les mélanges sont intenses, les variations de salinité n'évoluent alors que longitudinalement.

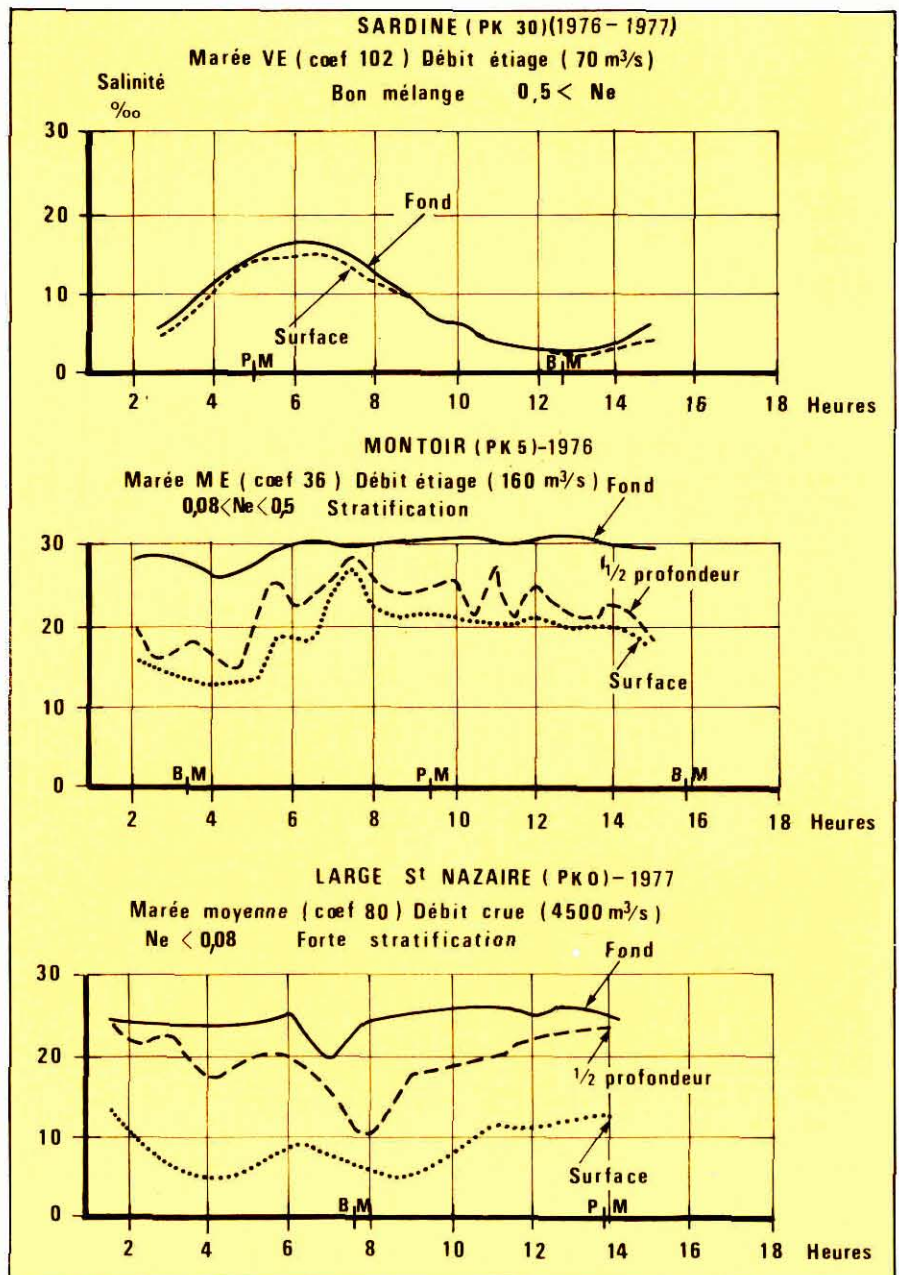


Fig. 12 - Répartition des salinités.

La connaissance de cette intrusion saline est importante à connaître dans l'estuaire de la LOIRE tant pour les prélèvements d'eau douce que pour la répartition des vitesses des courants et les mouvements sédimentaires.

Pour définir les caractéristiques de mélange d'un estuaire, on peut faire appel à la notion du nombre d'estuaire "Ne" caractérisé par l'expression :

$$Ne = \frac{VEO_0 \times V_0^2}{g d_0 Q_f T}$$

VEO₀ = volume oscillant du flot à l'embouchure (m³).

V₀ = vitesse maximum du flot à l'embouchure (m/s).

d₀ = profondeur (m)

g = accélération de la pesanteur (m/s²).

Q_f = débit de la rivière (m³/s)

T = période de la marée (s).

D'une façon générale, si le nombre d'estuaire "Ne" croît, le mélange croît :

La figure 12 donne quelques exemples de la répartition des salinités au cours de différentes marées de vives-eaux et de mortes-eaux et pour différents débits de la Loire :

- les eaux sont bien mélangées pour une marée de vives-eaux et un débit d'étiage,
- il y a stratification pour une marée de mortes-eaux et un débit d'étiage,
- il y a très forte stratification ou coin salé pour une marée moyenne avec un fort débit de crue, les eaux douces glissant en surface sur les eaux salées de fond.

La salinité entre les eaux de surface et les eaux de fond peut donc être très différente en un même point de l'estuaire suivant les caractéristiques de la marée et du débit fluvial, les eaux de surface étant pratiquement toujours plus douces que les eaux de fond.

5-2 Influence du coefficient de marée. (fig. 13).

L'intrusion saline pénètre d'autant plus loin dans l'estuaire que l'amplitude de la marée est importante. Par ailleurs, le mélange entre les eaux de surface et de fond varie en fonction du coefficient de marée, les eaux étant, à débit fluvial égal, mieux mélangées en marées de vives-eaux qu'en marées de mortes-eaux (stratification).

Pour l'état des fonds de 1976, on pouvait estimer, en étiage que le front de salinité compris entre 0,5 et 5‰ se situait à 10 km plus en amont en vives-eaux qu'en mortes-eaux. Il faut également noter que pour un même coefficient et un même débit, il pourra exister un phénomène d'hystérésis dans la variation de la salinité, les salinités maximales étant plus fortes en déchet qu'en revif.

5-3 Influence du débit fluvial. (fig. 14 et 15).

Le débit fluvial a une très grande influence sur la position du front de salinité. La figure 14 donne, en fonction de la distance à l'embouchure, les courbes enveloppes des salinités maximales (de fond) et minimales (de surface) qui caractérisent l'intrusion saline dans l'estuaire pour une configuration géométrique (1976) et des débits fluviaux donnés. La figure 15 donnant la limite du front salé en fonction du débit montre qu'il suffit d'une très faible variation des débits d'étiage pour faire varier ce front de salinité de plusieurs kilomètres. Pour lutter contre la progression de la salinité dans l'estuaire, le soutien d'étiage apparaît en conséquence, le meilleur moyen.

5-4 Variation de la salinité dans le temps. (fig. 16).

Les différentes modifications de la géométrie de l'estuaire ont entraîné de 1903 à 1976, comme il a été dit précédemment, d'importantes variations de la propagation de la marée puisque cette dernière est remontée de plus de 30 km en 75 ans.

Ne	Ne < 0,08	0,08 < Ne < 0,5	Ne > 0,5
Mélange	Coin salé	Estuaire stratifié	Estuaire mélangé

Tabl. 4

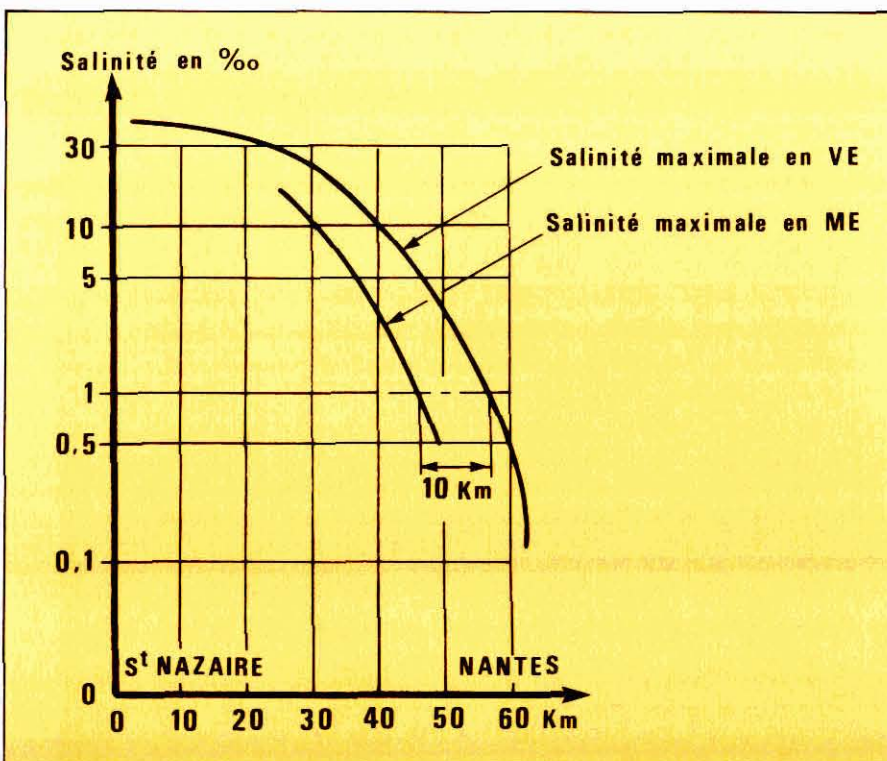


Fig. 13 - Influence du coefficient de la marée sur la salinité. Étiage, août 1976.

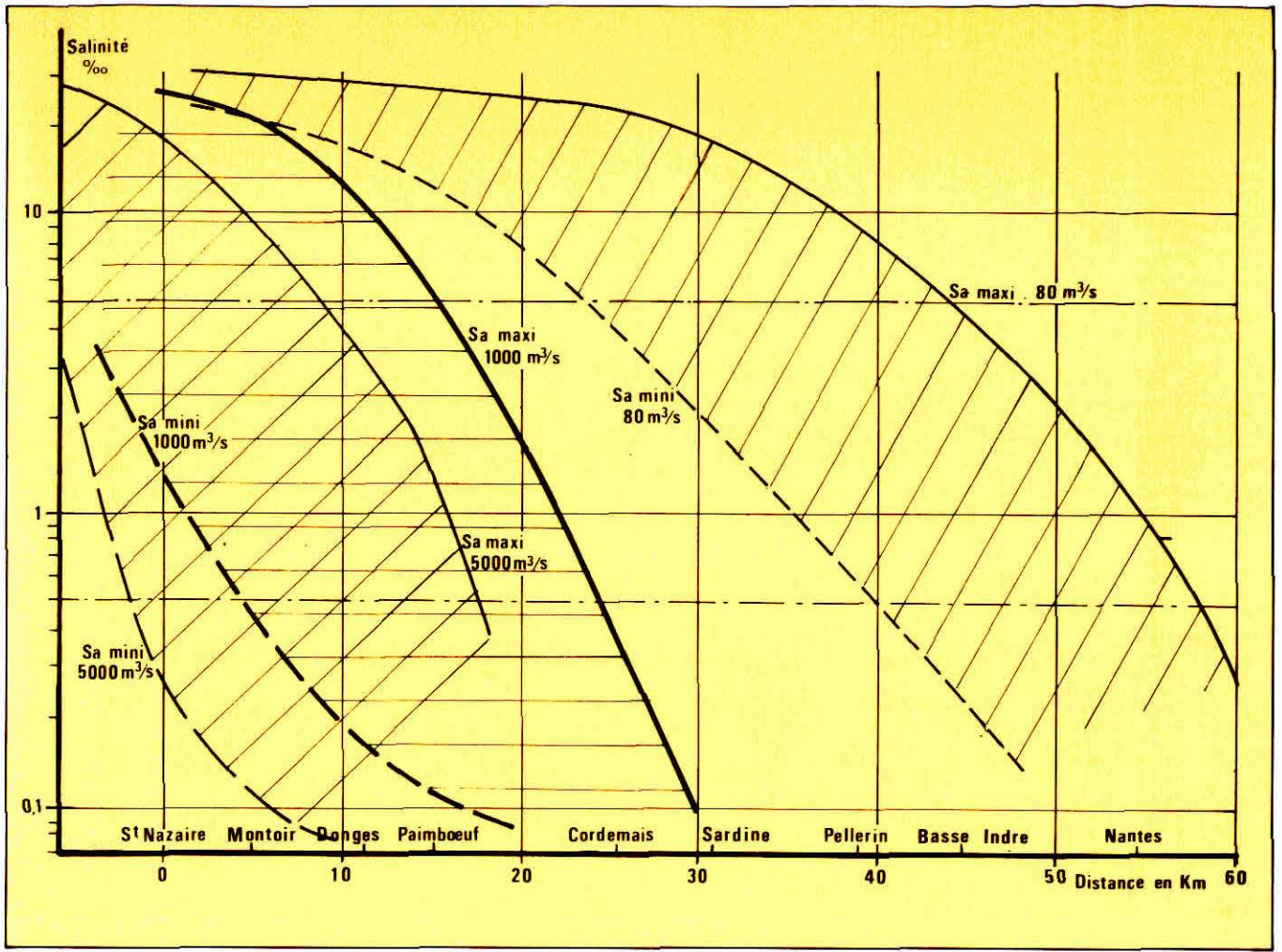


Fig. 14 - Évolution des salinités maximales et minimales 1976.

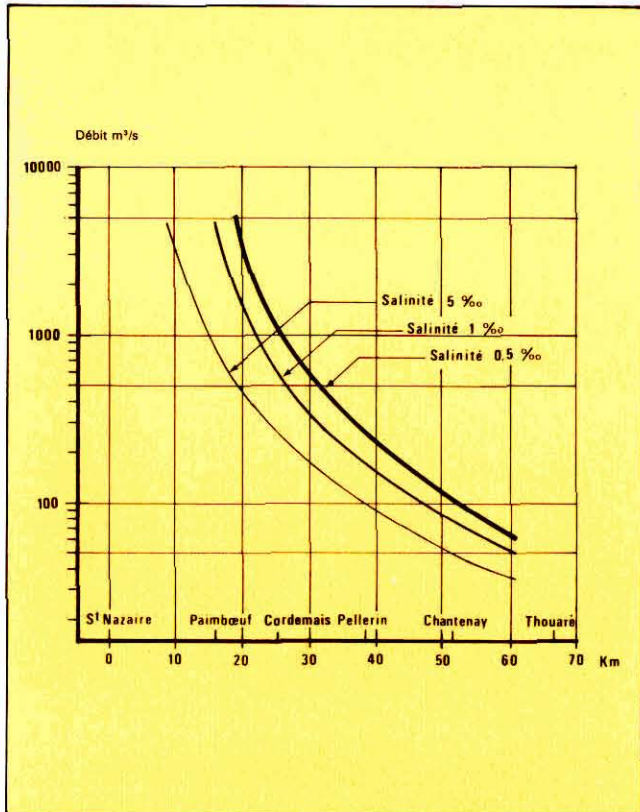


Fig. 15 - Limite du front salé (salinité maximale) en fonction du débit (1976-1977).

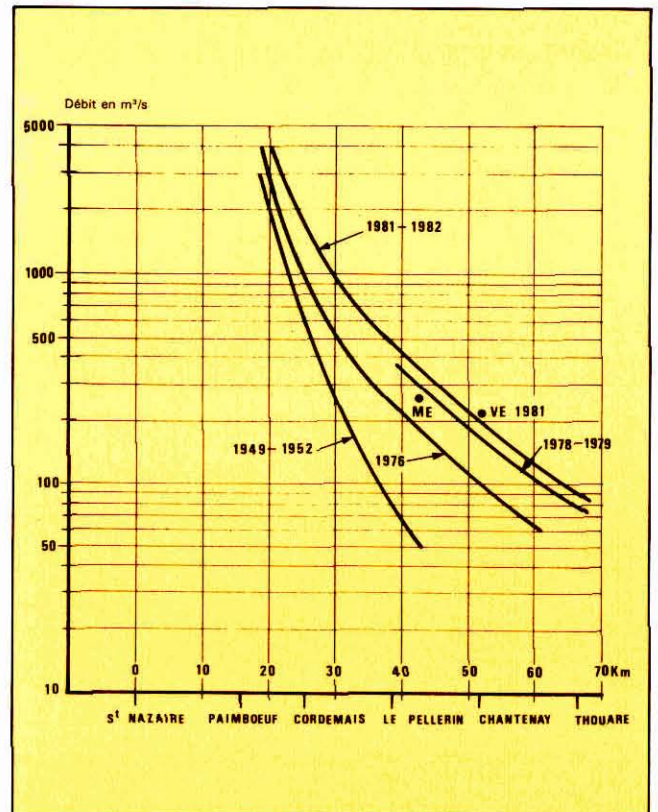


Fig. 16 - Variation de la salinité dans le temps (Front de salinité maximale à 5‰ en V.E.).

Le même phénomène se retrouve dans l'intrusion saline qui a progressé vers l'amont après le surcreusement du bassin de marée en amont de Nantes.

La remontée de la limite de salinité maximale à 0,5‰ aurait été de 16 km environ entre 1949/52 et 1976 pour un débit d'étiage de 100 m³/s et des marées de vives-eaux (fig. 16). Entre 1976 et 1978/79, par suite du surcreusement des fonds en amont de Nantes, une nouvelle progression de la limite de salinité à 0,5‰ est constatée et a pu atteindre 8 à 9 km pour un débit de 100 m³/s. Par contre, les nouvelles mesures faites pour le C.S.E.E.L. en 1981/82, après l'approfondissement à -13,25 m de la partie aval de l'estuaire n'auraient fait apparaître qu'une progression de 2 km environ du front de salinité, comme il sera démontré dans l'étude de l'influence des aménagements.

Les mesures faites sur les modèles réduits physiques ou mathématiques confirment ces valeurs et montrent également que l'intrusion saline est particulièrement sensible au surcreusement du bassin de marée à l'amont de Nantes, les approfondissements du chenal de navigation entre St Nazaire et Donges ayant une influence beaucoup plus faible.

5-5 Renouvellement des eaux dans l'estuaire (fig. 17).

Le temps de renouvellement des eaux dans l'estuaire est une notion importante non seulement pour les problèmes de salinité, mais pour les problèmes biologiques et de pollution. Ce temps de renouvellement est évalué en divisant le volume d'eau douce con-

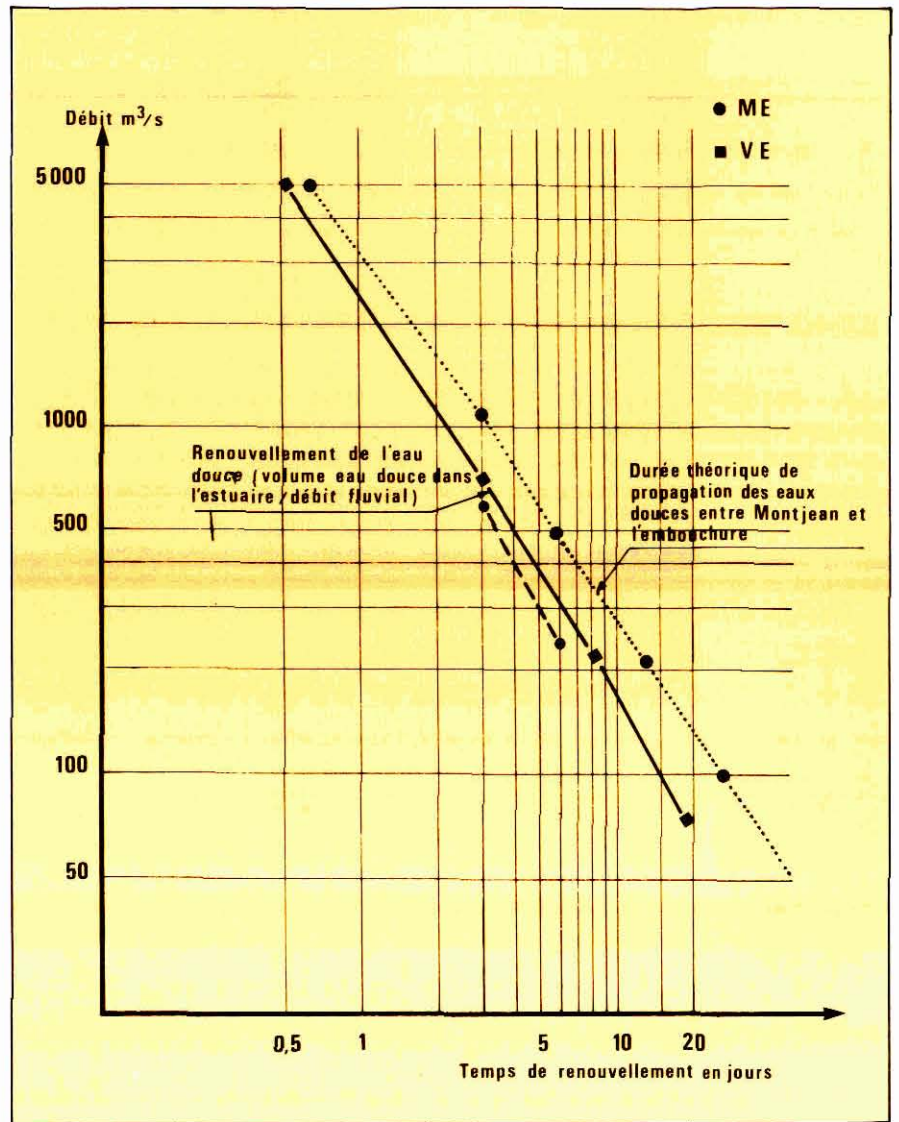


Fig. 17 - Temps de renouvellement de l'eau douce dans l'estuaire de la Loire.

tenu dans l'estuaire entre Chantenay (PK51) et St.Nazaire (PK4) par le débit fluvial au même moment, le volume d'eau douce étant estimé à partir des salinités minimales et maximales mesurées tout le long de l'estuaire. Les calculs faits à partir des mesures en nature pour différents débits en 1976-1977 et 1980 donnent l'ordre de grandeur des phénomènes. La

figure 17 donne le temps de renouvellement en jours de l'estuaire de la Loire pour différents débits fluviaux; il passe de 0,5 jours en crue (5 000 m³/s) à près de 20 jours en étiage (70 m³/s). Précisons qu'il est très voisin du temps de propagation des eaux douces dans l'estuaire de la Loire entre St Nazaire et Montjean (fig. 2).

Chapitre II
ASPECT SÉDIMENTOLOGIQUE
DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE

1 - Nature des sédiments des fonds de l'estuaire. Les vases et leurs propriétés physiques.

La répartition des sédiments superficiels de l'estuaire est le reflet des actions hydrodynamiques subies par les matériaux, les particules fines ayant tendance à se déposer dans les zones de faibles vitesses et de faible agitation et les sédiments plus grossiers, se retrouvant dans des secteurs où les vitesses sont élevées.

Une grande partie de ces matériaux a été refoulée en dehors de l'estuaire au cours des siècles, formant les grands atterrissements de vases de la Baie de Bourgneuf tandis qu'une autre se déposait sur les berges permettant leur exhaussement progressif. Tous ces mouvements sédimentaires sont tributaires des actions antagonistes entre les débits fluviaux et la marée ; une partie des sédiments fins déposés en aval de St-Nazaire-Mindin pourra d'ailleurs être reprise par les flots de vives-eaux, en particulier lorsqu'ils se conjuguent avec de fortes agitations au large, et revenir dans l'estuaire interne.

Lorsque l'on descend l'estuaire maritime depuis Ancenis jusqu'à la mer, on rencontre en général des sables en grande quantité dans le bief à dominante fluviale situé en amont de Nantes, ce qui a conduit à des extractions importantes de ces matériaux au cours de la dernière décennie. A Nantes, les fonds sont vaseux en période d'étiage mais l'on peut retrouver des atterrissements sableux en crue après balayage de la "crème de vase" qui recouvre les fonds.

La région aval comporte une fraction importante de sables mélangés à des vases dans la section de Cheviré. Entre la Maréchale et la Martinière, on trouve aussi bien sur les berges que dans le chenal des sédiments contenant plus de 70 % d'éléments inférieurs à 40 microns du type vase.

Dans le secteur aval, de Donges-Paimbœuf à St-Nazaire-Mindin, les fonds étaient en 1976 plus diversifiés. Le chenal navigable comporte toujours une dominante de vase - les particules sableuses très fines ne représentant que 10 à 15 % - ainsi que les zones riveraines situées entre Mindin et l'Imperlay et St Nicolas et Corsept. Les sables se rencontrent plus spécialement dans la partie Sud du Banc des Brillantes et aux abords du Banc de Bilho.

Dans l'estuaire externe, le pourcentage de vase diminue, les fonds devenant sableux sauf dans le chenal de la Truie et entre ce chenal et la côte ainsi que dans le chenal de navigation à l'aval de la Pointe de l'Aiguillon et au Nord de ce chenal.

Les vases de l'estuaire de la Loire - qui, dans l'état actuel, participent à la majeure partie des mouvements sédimentaires - ont en général un diamètre moyen de 1,5 micron et contiennent 5 à 15% seulement d'éléments supérieurs à 40 microns.

La vitesse de chute de ces particules à l'état élémentaire est négligeable ; par contre, à l'état floculé (il suffit de 5 à 15% d'eau de mer pour que cette floculation soit totale), les vitesses de chute des flocons atteignent 0,1 à 0,5 mm/s en eau parfaitement calme et 1 à 2 mm/s lorsqu'il existe une légère turbulence des eaux favorable à une macro-floculation. Dans l'estuaire de la Loire, cette macrofloculation apparaît pour des vitesses moyennes inférieure à 0,4 ou 0,5 m/s, les vases se décantant alors rapidement sur les fonds. Déposées sur le fond, ces vases subissent un tassement progressif avec élimination des eaux interstitielles, la concentration moyenne des dépôts pouvant être d'une centaine de grammes au cours des premières heures pour atteindre 250 g/l après quelques jours et près de 400 g/l après plusieurs

semaines. A l'intérieur des dépôts, il existera d'ailleurs un gradient de concentration entre la surface et le fond, les vases étant d'autant plus concentrées que l'on se rapproche du fond. Le rapport des concentrations entre la surface et le fond varie comme le logarithme de la profondeur, la concentration pouvant être sur une épaisseur de 2 m, 1,5 à 2 fois plus forte au fond qu'en surface.

La rigidité initiale \mathcal{T}_y des dépôts varie comme la 4^e ou 5^e puissance de la concentration (tabl. 1) :

$$\mathcal{T}_y = 10^{-11} T_s^{4,7}$$

si T_s est la concentration en g/l et \mathcal{T}_y exprimé en N/m².

Il peut exister en surface des vases parfaitement fluides qui ne constituent pas réellement une discontinuité entre un fluide pur et un sol mais un état intermédiaire plus ou moins visqueux dans lequel un bateau peut s'enfoncer facilement. Cet état des fonds rend très difficile l'appréciation d'une profondeur "navigable" que l'on prend en général par sécurité inférieure à la profondeur réelle.

En fonction de l'état de tassement des vases de Loire, ou plus exactement de leur rigidité, les pentes des fonds pourront, en l'absence de tous courants, prendre des valeurs très différentes qui seront rattachées à la rigidité \mathcal{T}_y par l'expression :

Talus émergés :

$$tg \alpha = 0,007 \mathcal{T}_y \text{ (en N/m}^2\text{)}$$

Talus immergés ;

$$tg \alpha' = 0,025 \mathcal{T}_y \text{ (en N/m}^2\text{)}$$

Sous l'action des courants de marée, les vases déposées et plus ou moins tassées, pourront, suivant le cas, soit résister aux vitesses de frottement qui s'exercent sur les fonds si ces vitesses sont trop faibles ou si les vases sont trop consolidées, soit être remises en suspension.

La connaissance de ces possibilités de reprise et des quantités qui peuvent être érodées par les courants est fondamentale pour la compréhension des phénomènes sédimentaires de la Loire. On peut avoir une idée de l'ordre de grandeur des vitesses de frottement u^ ou des contraintes sur les fonds \mathcal{T}_0 nécessaires pour remettre des vases en suspension en appliquant les formules empiriques du L.C.H.F. suivantes :*

$$\text{pour } \mathcal{T}_y \leq 1,5 \text{ N/m}^2 \\ u^* \text{ (en m/s)} = 0,017 \mathcal{T}_y^{1/4}$$

$$\text{pour } \mathcal{T}_y \geq 1,5 \text{ N/m}^2 \\ u^* \text{ (en m/s)} = 0,014 \mathcal{T}_y^{1/2}$$

Concentration en g/l	115	175	200	250	285	345	470
Rigidité en N/m ²	0,09	0,3	0,6	1,2	3,1	10	28

Tabl. 1 - Variation de la rigidité des vases de Loire en fonction de leur concentration. (vase pure sans sable).

Rappelons que la contrainte tangentielle sur les fonds est égale à :

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot Rh \cdot i$$

avec ρ = masse spécifique du fluide (kg/m³)

g = accélération de la pesanteur (m/s²)

Rh = rayon hydraulique ou profondeur (m).

i = pente de la ligne d'eau.

et qu'il existe une relation entre u^* et τ_0 de la forme :

$$u^* = \left(\frac{\tau_0}{P} \right)^{1/2}$$

La vitesse de frottement u^* peut être évaluée à partir de la répartition des vitesses au-dessus des fonds en admettant une répartition logarithmique ou plus simplement en rattachant la vitesse de frottement u^* à la vitesse moyenne de l'écoulement \bar{U} par le coefficient de CHEZY C ou le coefficient de STRICKLER K :

$$\frac{\bar{U}}{u^*} = (C/g)^{1/2} = K Rh^{1/6} / g^{1/2}$$

Pour une profondeur d'eau Rh de 15 m, on aurait un rapport de $\frac{\bar{U}}{u^*} = 0,50 K$ environ c'est-à-dire de 25 pour un coefficient de STRICKLER de 50 (estuaires moyennement rugueux) et de 35 pour un estuaire de vases (fonds plus lisses).

La quantité de vase susceptible d'être transportée par unité de surface et de temps peut être évaluée à partir du rapport entre les forces tractrices et la rigidité des dépôts $\left(\frac{\tau_0}{\tau_y} \right)$

la formule de PARTHENIADES
 q (en g/m²/s) = $K_e (\tau - \tau_{cr})$

τ est la contrainte tangentielle s'exerçant sur les fonds en N/m² et τ_{cr} la contrainte critique d'érosion des vases ;

le coefficient K_e serait compris entre 2 et 4 d'après des mesures faites en laboratoire.

2 - Les apports sédimentaires fluviaux Charriage et suspension

2-1 Les apports de sable par charriage

On chiffre à 1 million de m³ par an les apports fluviaux de sable dans la première moitié du XX^e siècle - où l'on draguait près de 600 000 m³ par an de sable uniquement dans le port de Nantes. Ces apports ont diminué par suite des extractions massives de sable dans la Loire. Actuellement, les apports par charriage seraient très faibles (150 000 t pour l'année de forte hydraulicité de 1981-1982), la totalité des matériaux étant extraite ou piégée dans les zones surcreusées en amont de Nantes. Il se peut que l'interdiction d'extraction

des agrégats, qui a été donnée en 1980 entre Nantes et Montjean, conduise dans quelques années à une réapparition des apports de sable, encore faudrait-il que d'autres extractions n'aient pas lieu en amont du bief fluvio-maritime.

2-2 Les apports de vase et de sables très fins en suspension. (fig. 1 et 2).

Les mesures des apports de vases et de sables très fins en suspension (10 à 15% de sables fins et 85 à 90% de vases) effectuées à Montjean, dans le cadre du C.S.E.E.L., entre Mai 1981 et Août 1982 ont montré que les turbidités moyennes des eaux Tu (en mg/l) étaient reliées au débit fluvial Q (m³/s) par la formule :

$$Tu \text{ (mg/l)} = 40 \log Q \text{ (m}^3\text{/s)} - 80$$

et présentait des variations saisonnières importantes avec une décroissance entre l'hiver, où elles

sont maximales et l'automne suivant, où elles sont minimales. Les apports solides en suspension auraient atteint, entre Mai 1981 et Mai 1982, près de 2 millions de tonnes alors qu'ils étaient en moyenne de 800 000 t/an pour un module de 825 m³/s. Ces fortes valeurs qui sont à rapprocher d'un apport d'eau considérable à cette époque (40 milliards de m³ en 1 an) correspondant à un module de 1200 m³/s environ, se situent toutefois dans l'enveloppe des courbes qui donnent depuis 1953, la relation entre les apports liquides annuels de la Loire et les apports solides, les apports liquides étant compris entre 15 et 40 milliards de m³ par an (fig. 1).

L'étude de la répartition des débits solides instantanés Q_s en fonction des débits liquides Q_l (fig. 2) montre qu'à débit égal, les apports solides sont plus importants en crue qu'en décrue.

Pour des phénomènes extrêmes, on a montré que la crue de

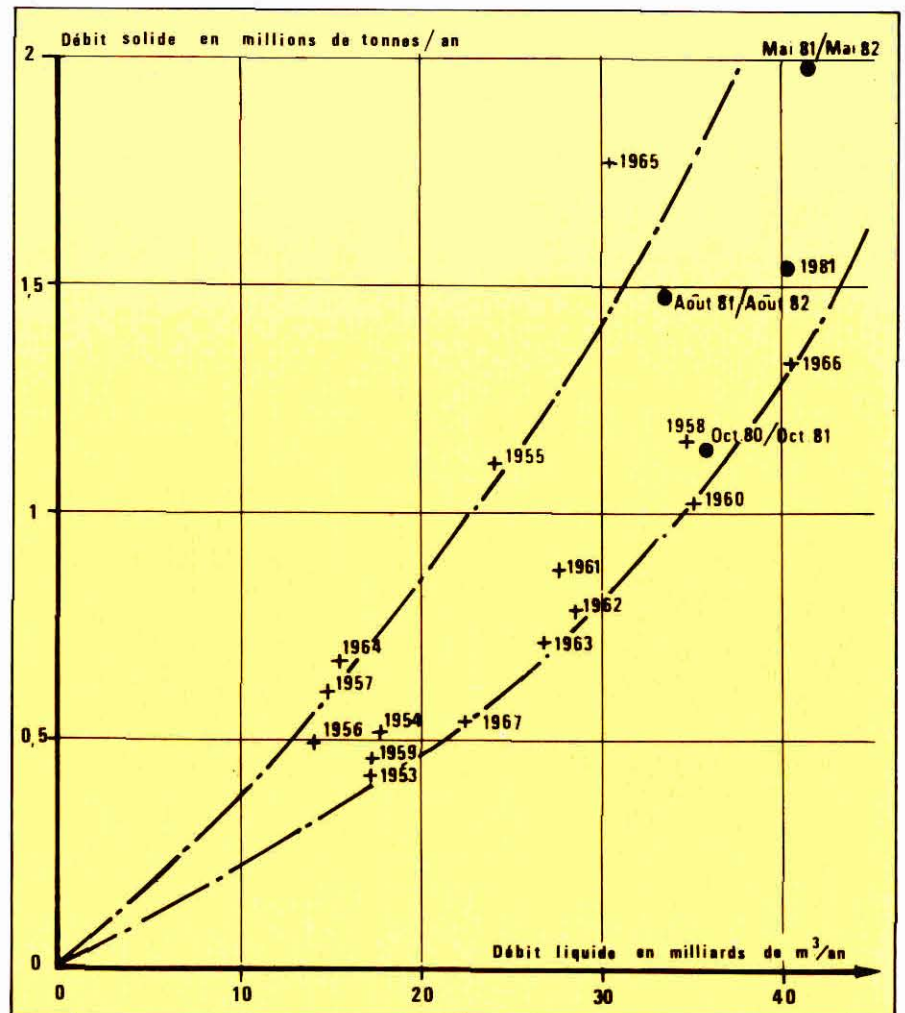


Fig. 1 - Apports solides en suspension de la Loire à Montjean en fonction des apports liquides.

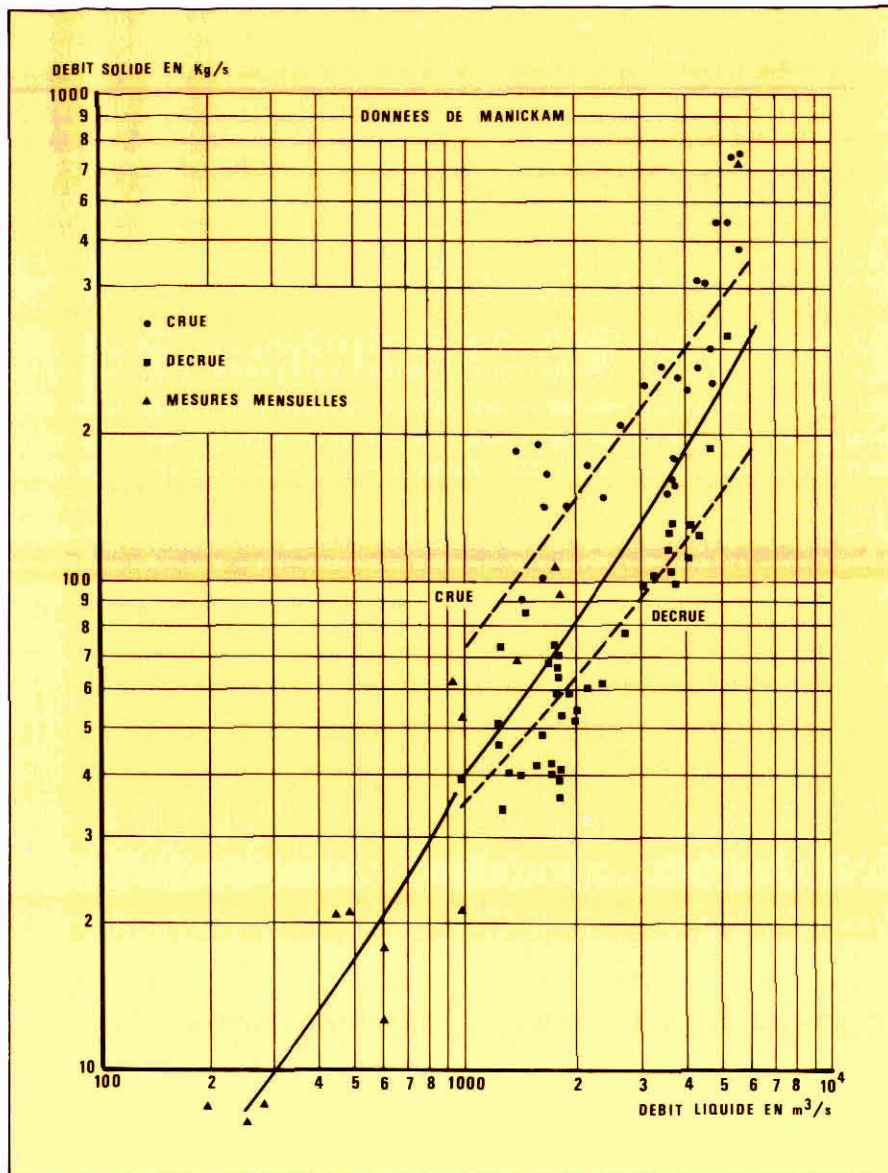


Fig. 2 - Relation débit liquide/débit solide.

5 400 m³/s de Janvier 1982 avait apporté 55 000 t/jour de matières en suspension (MES) et qu'en 10 jours 520 000 t ont été apportés dans l'estuaire à cette époque. Par contre, en Juillet 1982, les apports minimaux de MES étaient tombés à 30 t/jour.

3 - Les mouvements des sédiments.

Influence des coefficients de marée, des débits fluviaux et de la salinité. Évaluation théorique des dépôts.

3-1 Mouvements des sédiments.

3.1.1. Les sables

Les apports de sables ont considérablement diminué au cours des dernières années et sont, dans l'état actuel, pratiquement inexistant.

Des mesures faites en nature, il y a une dizaine d'années, lorsque les fonds de l'estuaire comportaient encore une phase sableuse appréciable, avaient montré que le transport des sables moyens et grossiers pouvait se faire, sous forme de ridens de 1 à 2 m de hauteur et 50 à 100 m de longueur se déplaçant en amont de l'estuaire avec des vitesses résultantes vers l'aval de 0,5 m/jour pour des débits de la Loire de 500 m³/s et de 3,5 m/jour pour des débits atteignant 2 500 m³/s.

3.1.2. - Les vases et les matières en suspension.

Influence du coefficient de la marée, du débit fluvial et de la salinité. (fig. 3 et 4).

Le stock de vase se rencontre dans l'estuaire sous deux formes différentes, l'une en suspension dans les eaux au moment où les vitesses des courants sont importantes, l'autre près du fond sous forme de "crème de vase" lorsque les vitesses sont assez faibles pour permettre la décantation.

Les différentes mesures faites en nature en 1976 dans l'estuaire de la Loire montrent que la "crème de vase" se forme, pour des vitesses assez faibles correspondant en général à des coefficients de marée inférieurs à 70 - 65. Elle peut atteindre 2 à 3 m d'épaisseur avec des concentrations de 100 à 300 g/l, se dépose dans tous les points bas de l'estuaire et peut s'étendre sur une vingtaine de kilomètres de longueur en étiage et 5 km en crue (avec une épaisseur de 1 m seulement lorsque les débits fluviaux dépassent 500 m³/s). Sa position dans l'estuaire dépend du débit fluvial et son déplacement en masse est faible (quelques centaines de mètres seulement).

Dès que les vitesses sont fortes et que les coefficients de marée dépassent 75 à 80, la "crème de vase" est remise en suspension et il ne reste sur les fonds qu'une fraction correspondant aux vases qui ont pu se consolider à un seuil supérieur à celui de reprise par les courants. La turbidité des eaux augmente localement dans de fortes proportions et un "bouchon vaseux" très concentré apparaît, s'étend en longueur (30 à 40 km), son centre de gravité se déplaçant alternativement sous le jeu des marées de vives-eaux d'une vingtaine de kilomètres. La turbidité des eaux est alors en moyenne 10 fois supérieure à celle mesurée en mortes-eaux, la quantité de vase en suspension qui traverse un secteur au cours de la marée pouvant atteindre 300 000 t.

En étiage, au cours d'un cycle de marée, on assiste donc à des variations périodiques de la

masse turbide en suspension, les particules se décantant aux marées de mortes-eaux pour former la " crème de vase ", lorsque la vitesse de frottement U^* est inférieure à 2 cm/s (vitesses moyennes dans la tranche d'eau de 0,5 à 0,7 m/s) et se remettant en suspension en vives-eaux d'autant plus que les vitesses de frottement sont élevées.

En crue, " bouchon vaseux " et " crème de vase " se déplacent dans l'estuaire en fonction du débit du fleuve. D'une façon générale, ils se situent à l'aval de Cordemais dès que le débit de la Loire dépasse 700 m³/s, en aval de Paimbœuf pour un débit de 2 000 m³/s et il faut atteindre plus de 3 000 m³/s pour que les vases soient expulsées partiellement au large de St-Nazaire. Les figures 3 et 4 illustrent ce mouvement des vases dans l'estuaire de la Loire en fonction du débit fluvial.

Les résultats des mesures en modèle réduit montrent que pour un débit de 1 400 m³/s, il faut 4 à 5 marées pour que les vases descendent l'estuaire de la Loire et arrivent en aval de Donges. En étiage, la même vase remonte l'estuaire avec une vitesse un peu moins rapide et il faut une dizaine de marées pour qu'elle atteigne la région de Nantes.

3-2 Évaluation théorique des dépôts (fig. 5).

Connaissant en un point de l'estuaire, la répartition des vitesses et les conditions de tassement

des vases au cours des temps, il est possible de faire une évaluation théorique des dépôts au cours d'un cycle de marée. Au cours d'une marée de vives-eaux par exemple, les vases en suspension n'auront qu'un temps très court pour se déposer et se décanter et les vitesses seront suffisantes pour reprendre la majeure partie des dépôts.

Au contraire, au cours d'un cycle de marées, on constate, comme il a été dit précédemment, que pour les marées de mortes-eaux et dès que les coefficients tombent en dessous de 70, la presque totalité des vases en suspension se dépose sur les fonds de l'estuaire. Cette vase déposée subira un tassement avec un gradient de concentration entre la surface et le fond au cours des 5 à 6 jours de mortes-eaux. Dès que les coefficients de marée dépasseront 75 à 80, cette " crème de vase " pourra être remise partiellement en suspension si les vitesses sont suffisamment importantes et il ne restera près du fond qu'une fraction correspondant aux vases qui ont pu se consolider au cours des mortes-eaux et atteindre une rigidité suffisante.

La figure 5 donne le schéma d'un dépôt de vase sur les fonds de l'estuaire de la Loire après une période de mortes-eaux de 5 à 6 jours avec son gradient de concentration et de rigidité en fonction de la hauteur du dépôt. On voit qu'en fonction de la vitesse de frottement sur les fonds U^* on pourra, en vives-eaux, tout remet-

tre en suspension si les valeurs de U^* sont supérieures à 3, 5 à 4 cm/s ou au contraire, ne reprendre qu'une partie des dépôts si les vitesses sont inférieures. Dans une zone surdraguée, il pourra donc y avoir piégeage des sédiments sur une épaisseur d'autant plus importante que la réduction des vitesses de frottement est grande. L'évaluation théorique par cette méthode conduirait à doubler le taux de sédimentation dans le chenal de Donges à St-Nazaire lorsque les profondeurs passent de - 10 à - 13,25 m (0,10 m par mois de sédimentation minimum) et à quadrupler ces valeurs dans un bassin d'évitage surdimensionné (0,50 m par mois).

4 - La masse turbide dans l'estuaire de la Loire. Les échanges avec le large.

4-1 - La masse turbide dans l'estuaire. (fig. 6 et 7).

Si l'on examine le stock de vase disponible en suspension dans un estuaire, sur toute l'étendue du plan d'eau allant de l'embouchure à la limite amont du bief fluvio-maritime, on trouve des chiffres relativement modestes qui sont sans commune mesure avec les quantités de matières en suspension qui peuvent osciller au cours des différentes marées, passer et repasser dans une section

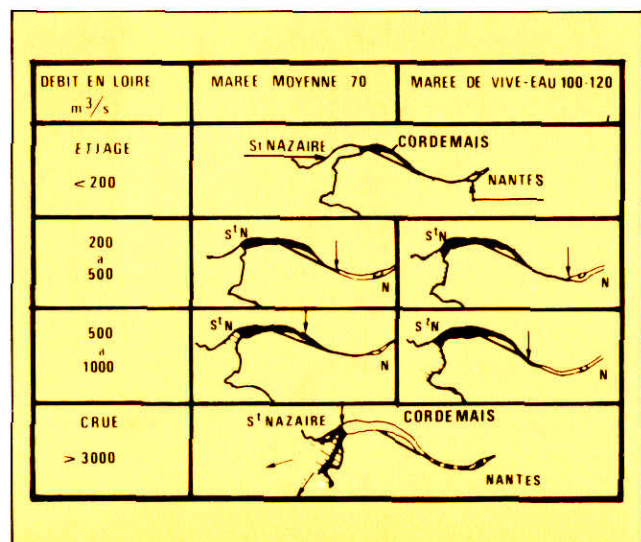


Fig. 3 - Déplacement du bouchon vaseux en Loire, en fonction du débit fluvial et du coefficient de marée - 1974.

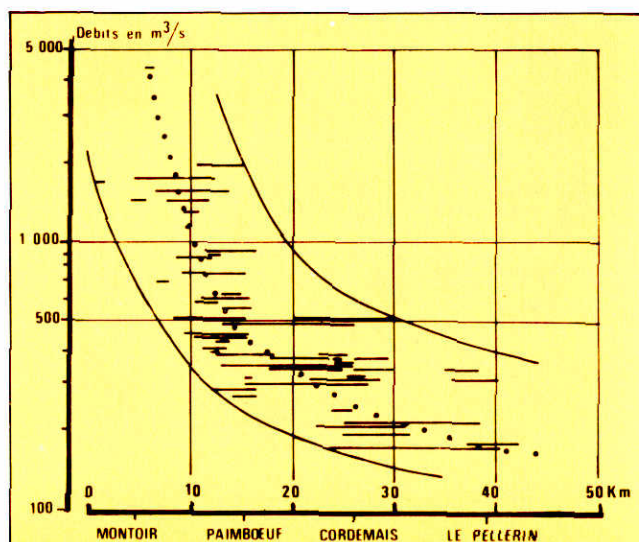


Fig. 4 - Déplacement de la crème de vase en Loire.

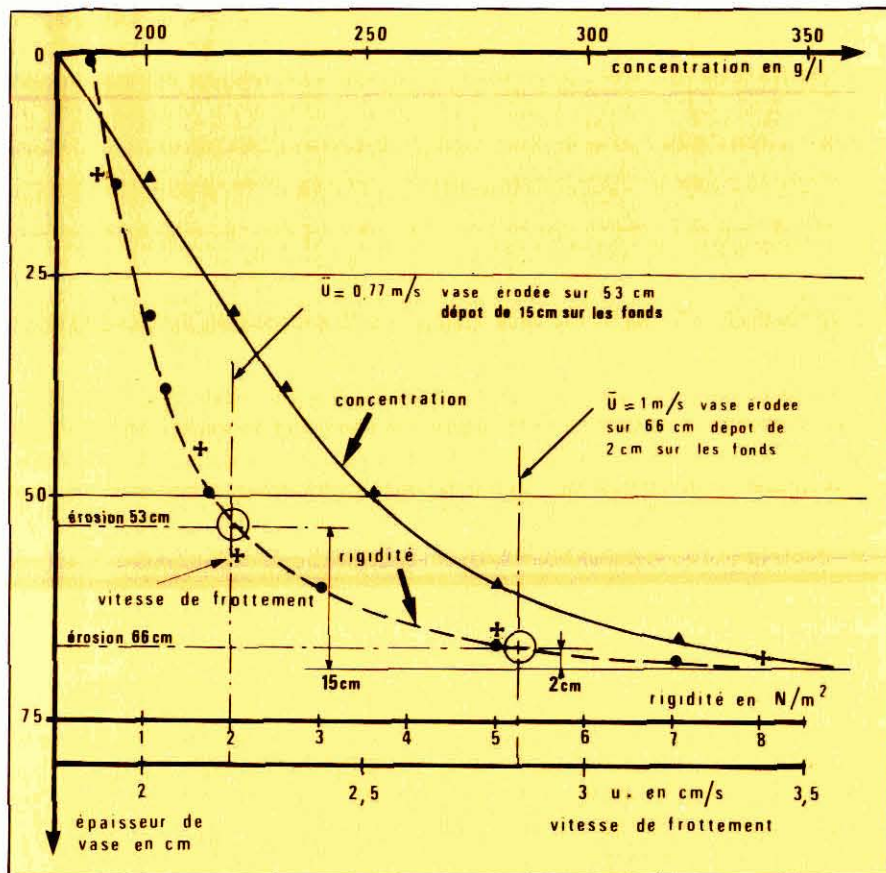


Fig. 5 - Vitesses pour remettre en suspension un dépôt de vase.

donnée et qui atteignent, 50 millions de tonnes dans la Loire à Paimbœuf.

La quantité des sédiments en suspension dans l'estuaire de la Loire a fait l'objet d'une première

évaluation basée sur des mesures de 1974 et l'on avait admis que l'ordre de grandeur de la masse turbide dans tout l'estuaire était en moyenne de 350.000 à 500.000 tonnes, les mesures

étant faites en début d'automne. Ces matériaux se trouvaient en suspension au moment des vives-eaux et sous forme de " crème de vase " aux mortes-eaux et représentaient environ 1,5 millions de m^3 de vase déposées et tassées.

Ces mesures ont été reprises dans le cadre des études du C.S.E.E.L. afin d'affiner les résultats et de mieux comprendre la dynamique sédimentaire de l'estuaire. Elles ont été réalisées en vives-eaux et mortes-eaux (avec le chenal dragué à $-13,25m$ en aval de Donges) respectivement en étiage ($Q = 210$ à $260m^3/s$, mesures de Septembre 1981) et pour un débit moyen (680 à $700m^3/s$, Novembre 1981), les mesures se répartissaient en 5 emplacements différents compris entre Montoir (PK 4) et Basse Indre (PK 45). La masse turbide en suspension ou sous forme de crème de vase dans l'estuaire semble être en 1981 plus élevée qu'en 1974 et son centre de gravité se déplace en fonction du débit fluvial avec des valeurs de la turbidité moyenne qui peuvent atteindre plusieurs grammes par litre ($5g/l$) au centre du bouchon vaseux (fig. 6). A cours de la marée, le centre de gravité de la masse turbide pourra se déplacer d'une dizaine

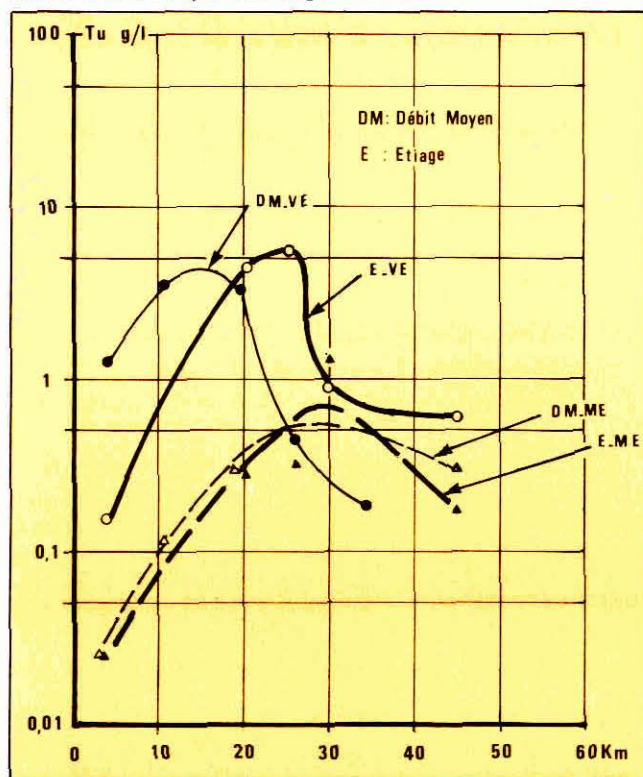


Fig. 6 - Masse turbide dans l'estuaire.
Turbidité moyenne des eaux au cours d'une marée.

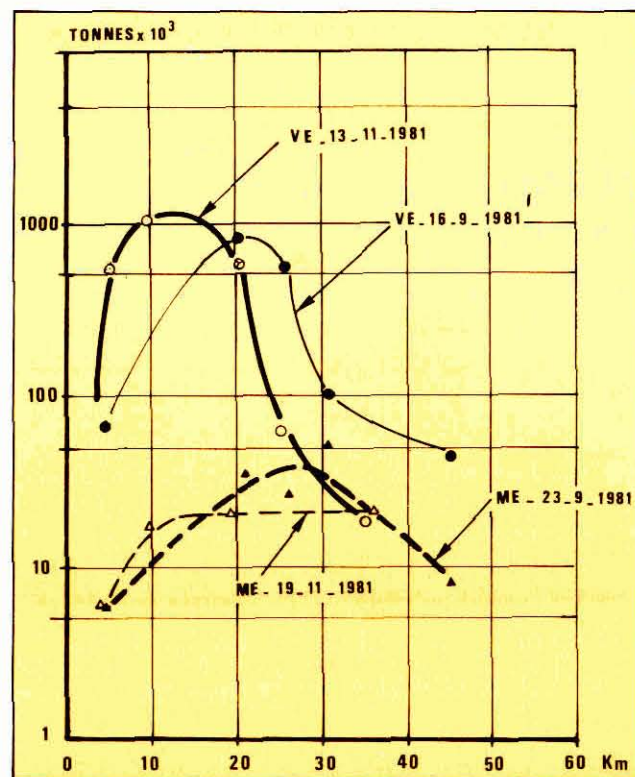


Fig. 7 - Débits solides dans l'estuaire au cours d'une marée.

de kilomètres. Il se situera vers le PK 25 pour un débit d'étiage de 210 m³/s et au PK 15 pour un débit de 700 m³/s (fig. 7). En étiage et en vives-eaux, la quantité de vases en suspension peut atteindre 500 000 tonnes avec un maximum au moment de la basse-mer. En mortes-eaux (Coef. 45 - 50) la quantité de vases en suspension tomberait à 50 000 t en moyenne, les sédiments se déposant sur les fonds sous forme de " crème de vase ". En débit moyen (700 m³/s), la masse turbide pourrait atteindre 1 million de tonnes en suspension en vives-eaux exceptionnelles (Coef. 112) avec des fluctuations importantes au cours de la marée, le minimum étant atteint entre mamarée et basse-mer (200 000 à 500 000 t en suspension). En mortes-eaux (Coef. 47), on retrouve une forte diminution de la quantité de vase en suspension qui tombe à 50 000 t comme en étiage. La répartition des turbidités en fonction de la hauteur suit une loi exponentielle.

En comparant les mesures de 1980/1981 avec celles de 1974, on constate d'une part, que la turbidité moyenne des eaux a augmenté de 50% et notamment pour les débits inférieurs à 1 000 m³/s, d'autre part, que le bouchon vaseux est remonté légèrement vers l'amont de l'estuaire au cours des temps. On retrouve là le même résultat que pour l'intrusion saline avec l'influence importante du surcreusement en amont de Nantes, et plus modeste, des travaux d'approfondissement de 1980-1981. L'accroissement du bouchon vaseux peut avoir plusieurs causes :

- un remaniement des particules fines contenues dans les produits dragués pour l'approfondissement du chenal ; en admettant seulement 10% d'éléments fins contenus dans les matériaux, cela représenterait un volume de vase de près de 5 millions de m³ équivalent à 2 millions de tonnes de matériaux ;
- une hydraulicité différente de la Loire en 1974 (module 865 m³/s) et 1981 (module 1 250 m³/s) avec des apports fluviaux plus importants à cette dernière époque ;

- enfin, à un piégeage plus grand dans la zone Donges-St-Nazaire des matériaux apportés dans l'estuaire par suite du surcreusement du chenal ; l'expulsion des sédiments vers le large serait donc diminuée permettant un enrichissement du bouchon vaseux.

4-2 Les échanges avec le large

L'estimation des masses de sédiments mises en jeu dans les échanges sédimentaires entre l'estuaire et le large a également été faite dans le cadre des études du C.S.E.E.L., sur un alignement St-Nazaire-Mindin. Les mesures ont été réalisées le 10 Décembre 1981 et le 25 Février 1982 pour des marées vives-eaux et un débit de Loire voisin de 1 000 à 1 050 m³/s, des débits plus importants atteignant 2 500 à 3 000 m³/s ayant séparé ces deux périodes d'observation.

Les principaux résultats sont les suivants :

- les échanges sédimentaires s'effectuent presque uniquement par le chenal Nord de navigation (85%), le chenal Sud représentant des déplacements de vase en suspension très faibles (15%) ;
- le débit solide en jusant s'effectue en majeure partie (70%) sur la partie Nord du chenal de navigation, la rive Sud de ce chenal ne participant que pour 15 à 20 % et la zone Sud de Bilho que pour moins de 15 %.
- les échanges en flot et en jusant sont assez voisins mais avec une prépondérance du jusant, c'est-à-dire d'une sortie des sédiments de l'estuaire qui atteindrait 30 à 35% de plus en jusant qu'en flot en Décembre 1981 (début de crue) et seulement 6% en Février 1982 (décrue). On retrouve là une tendance à l'expulsion des vases de l'estuaire lorsque les débits fluviaux augmentent et tendance à

l'équilibre lorsque les débits diminuent mais restent encore assez forts pour éviter que les vases expulsées en mer ne reviennent dans l'estuaire à l'amont de Mindin-St-Nazaire. Il serait intéressant de vérifier si, au cours des étiages et avec une agitation assez forte au large permettant de remettre des vases en suspension, il n'y aurait pas une inversion des échanges sédimentaires avec prédominance des apports de flot sur les apports de jusant ;

- le bilan des débits solides mesurés en Décembre 1981 et en Février 1982 est donné dans le tableau ci-après, les eaux turbides (à 40 g/l) près du fond, dans le chenal de navigation, n'étant pas prises en considération, leur déplacement étant évalué entre 50 et 100 000 tonnes.

Ce débit solide atteint 150 000 tonnes environ en Décembre 1981 et 200 000 tonnes en Février 1982. (tabl. 2).

Aucun élément ne permet de préciser quelle a été l'influence en nature du chenal de navigation à -13,25 m sur les échanges sédimentaires avec le large mais les études sédimentologiques réalisées en modèle réduit permettent d'avoir des ordres de grandeur de ce phénomène. En 1976 - 77 près de 50% des sédiments fluviaux apportés dans l'estuaire par la Loire étaient évacués en mer à l'aval de St-Nazaire ; après creusement du chenal de navigation à -13,25 m (ou -15 m), le pourcentage tombait à 30 % environ, la sortie des matériaux étant donc fortement réduite et leur piégeage dans la zone draguée augmenté.

DATES	15 - 12 - 1981		25 - 02 - 1982	
Marée V.E.	Flot	Jusant	Flot	Jusant
Q = 1 000 m ³ /s	121 000	164 000	198 000	210 000

Tabl. 2 - Débits solides en tonnes.

5 - L'évolution des fonds dans l'estuaire avant 1980 - Importance de la sédimentation dans le chenal et les zones limitrophes - Évolution des fonds de l'estuaire au cours des 150 dernières années.

Au cours des 150 dernières années, l'étude de la variation des profils en travers sur l'ensemble de l'estuaire fait apparaître une érosion générale du chenal et un colmatage progressif des berges, le bilan étant une sédimentation de l'estuaire. On peut estimer que la sédimentation de l'estuaire était en moyenne de 0,6 millions de m³ par an entre 1821 et 1881, période pendant laquelle 40 millions de m³ se seraient déposés au total. Entre 1920 et 1970, le bilan atteignait 45 millions de m³ par an se localisant principalement dans la section aval de l'estuaire qui avait été très perturbée par la modification du tracé du chenal de navigation.

On peut estimer qu'au cours de cette époque, les dépôts se sont effectués en majeure partie dans la zone de Lavau et au Sud du Banc de Bilho, la sédimentation atteignant 125 millions de m³ dans les zones hors chenal et les approfondissements (ou érosion) dans le chenal près de 80 millions de m³. Si l'on approche ce bilan de 45 millions de m³ de sédimentation, soit 20 à 25 millions de tonnes de sédiments fins tassés sur une durée de près de 50 ans, aux apports de matières en suspension de la Loire soit 40 à 50 millions de tonnes, on voit que plus de 50 % des apports fluviaux se seraient déposés dans la Loire hors chenal au cours de la période 1920-1970 alors qu'entre 1821 et 1881, le pourcentage des dépôts n'aurait été que de 35 à 40 %.

Il est probable en effet qu'aux apports en suspension de la Loire est venue s'ajouter une partie des produits dragués et remis en suspension, le bilan étant dans ces conditions très difficile à faire, les pourcentages indiqués supposant un recyclage de ces produits dragués.

De même, on constate qu'au cours de ces 150 dernières années, les dépôts hors chenal se sont produits de plus en plus en aval de l'estuaire, les zones canalisées tendant à s'équilibrer; on peut penser que le colmatage observé au Sud du Banc de Bilho tendra progressivement vers une asymptote réduisant dans de fortes proportions le volume des sédiments hors chenal et augmentant de ce fait les quantités de matériaux fluviaux expulsés vers le large ou captées dans le chenal.

5-1 Évolution des profondeurs dans le chenal de navigation (fig. 8).

Dans le chenal externe entre St-Nazaire et le large, les profondeurs ont été progressivement augmentées passant de -6 m environ en 1920, à -8 m en 1948 et -10 m de 1969 jusqu'à 1977. En 1981, ces profondeurs ont été portées à -13,25 m. Malgré cet approfondissement important du

chenal externe, les quantités draguées - en dehors des périodes qui ont suivi immédiatement les approfondissements et pendant lesquelles il y a eu un ajustement des pentes de talus - sont restées constantes et de l'ordre de 300 000 m³/s. Jusqu'à ces dernières années, l'accès à St-Nazaire ne présentait donc pas de problèmes importants pour le port de Nantes-St-Nazaire contrairement à d'autres ports d'estuaires (Anvers, Rotterdam, Bordeaux, etc.).

En amont de St-Nazaire, l'étude des profondeurs minimales du chenal, calculées sur 200 m de largeur en aval de Paimbœuf et sur 100 m de largeur en amont, permet de suivre l'amélioration des conditions nautiques (fig. 8). La période 1920-1976 peut donc être caractérisée pour les profondeurs dans le chenal comme ayant permis d'ouvrir la zone de Donges à des bateaux de fort tonnage (-9 à -9,50 m de profondeur) et

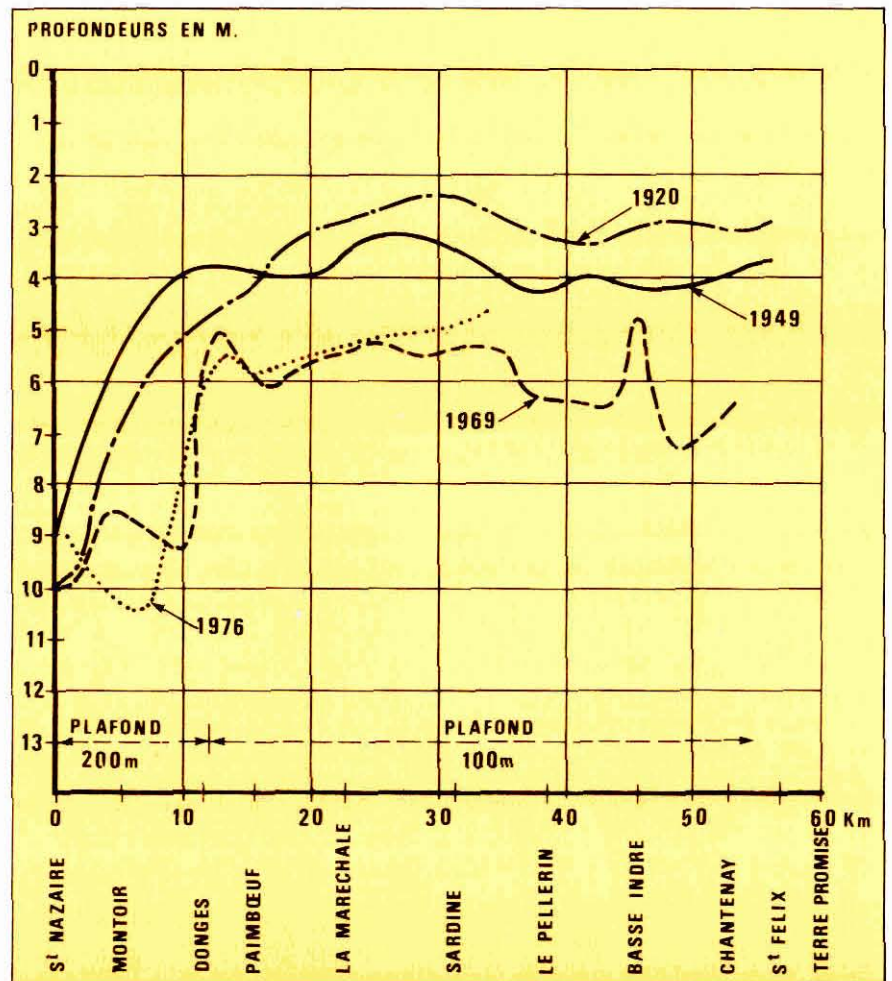


Fig. 8 - Profil en long de l'estuaire de la Loire (profondeurs minimales).

d'améliorer de 2 m environ les profondeurs entre Donges et Nantes (notamment par suppression des ridens), c'est-à-dire sur près de 40 km. Les travaux effectués en 1981 ont permis de porter les profondeurs en aval de Donges à $-13,25$ m.

5-2 *Les dragages d'entretien du chenal de navigation entre 1976 et 1978 entre Nantes et Saint-Nazaire.*

Pour maintenir les profondeurs indiquées dans le chenal de navigation, en amont de St-Nazaire, des dragages d'entretien ont été nécessaires. Leur évaluation est délicate car il faut déduire du volume total dragué les volumes correspondant à des améliorations des profondeurs et ne retenir que les quantités draguées nécessaires à la stabilisation des cotes du chenal. Par ailleurs, suivant le type de drague utilisé (drague à godets, drague aspiratrice en marche avec rejets à terre, dragage à l'américaine, etc.), les estimations du m^3 profil peuvent être très différentes.

Une évaluation basée sur la période 1975 - 1978 permet de donner les ordres de grandeur de ces volumes de dragages (volume au profil) dans les différentes zones de l'estuaire en éliminant les dragages dit à l'américaine qui ont pour but de remettre en suspension les vases déposées.

- Port de Nantes :
350 000 m^3/an (les dragages à l'américaine auraient été de plus de 700 000 m^3/an).
- Section endiguée (Cheviré-Sardine):
250 000 m^3/an (il n'y aurait pas eu dans cette section de dragages à l'américaine).
- Section intermédiaire (Sardine-Donges):
350 000 m^3/an (les dragages à l'américaine auraient été de 550 000 m^3/an).
- Section aval (Donges - St-Nazaire):
1 275 000 m^3/an (cette valeur englobant l'avant-port de St-Nazaire et les accès ainsi que les dragages dans les souilles, la totalité étant évaluée à

540 000 m^3/an). Il faut ajouter à cette estimation 1 000 000 m^3 de dragages à l'américaine, ce qui porterait les dragages dans la partie aval à 2 275 000 m^3/an .

Au total, pour maintenir les profondeurs du chenal de 1976, il a été nécessaire de draguer 2 225 000 m^3/an par dragues à godets ou dragues aspiratrices en marche et 2 250 000 m^3/an environ par dragages à l'américaine, ce qui représente une quantité totale de 4 500 000 m^3/an environ en cumulant les différents moyens de dragage.

Notons que ces dragages ont lieu principalement aux deux extrémités de l'estuaire c'est-à-dire dans le port de Nantes (20 à 25 %) et entre Donges et St-Nazaire (50 à 55 %), la zone des Brillantes située entre Carnet et Donges représentant 20 % de la totalité des dragages.

Après approfondissement du chenal à $-13,25$ m en 1980, les dragages d'entretien ont atteint 5.10^6 m^3 en aval de Donges, soit le double de ceux de la période 1975-1978. Cette augmentation est due à la fois à l'approfondissement lui-même et à une hydraulicité élevée au cours des années 1980-1982.

5-3 *Évolution des profondeurs en dehors du chenal d'accès. Les zones de Lavau et Sud de Bilho.*

Si les dépôts dans le chenal de navigation (état 1976) sont relativement modestes, on constate que le colmatage des zones hors chenal est très important. C'est le cas, en particulier, de la zone de Lavau située en amont de Donges sur la rive droite de l'estuaire et de la zone située au Sud du Banc de Bilho entre Paimbœuf et Mindin.

Dans la zone de Lavau, les fonds se sont exhaussés entre 1948 et 1969 en moyenne de 3 m et représentent en 20 ans un volume de dépôt de sédiments tassés de près de 15 millions de m^3 sur une superficie de 475 hectares environ. Ce colmatage continue d'ailleurs à se produire mais beaucoup plus lentement

par suite de la cote du terrain.

Au Sud du Banc de Bilho, le colmatage progressif de toute la zone située entre Paimbœuf et Mindin a débuté dès 1930 lorsque la fosse Nord de St-Nazaire-Donges a commencé à s'approfondir et à s'étendre vers l'amont. Le dragage du nouveau chenal de navigation à cet emplacement sur la rive droite de l'estuaire a intensifié les phénomènes (en 1981 une cote de $+1$ à $+2$ m était atteinte dans la partie amont, et de -1 à $-1,5$ m dans la partie aval).

Comme on le verra ultérieurement avec les essais de longue durée effectués sur modèle réduit physique, cette zone tendra progressivement à la fin du siècle vers des profondeurs de $+1,50$ m sur toute son étendue de Paimbœuf à Mindin avec des cotes extrêmes comprises entre $+0,50$ et $+2,50$ m.

Notons que dans l'état des fonds de 1976-77, l'importance des dépôts globaux hors chenal de navigation atteignait des valeurs comparables ou même supérieures à celles qui pouvaient être draguées sur la totalité du chenal de navigation, les berges ayant donc tendance à s'exhausser et le chenal à se creuser, la Loire tendrait donc progressivement vers un estuaire calibré.

Les essais effectués en modèle réduit pour réduire la sédimentation au Sud du Banc de BILHO en draguant artificiellement un chenal dans le Banc des Brillantes, n'ont pas conduit à une amélioration de la situation. Par contre, l'ouvrage de guidage des eaux réalisé sur le modèle à l'aval de Carnet (ouvrage en S à la cote $+3$ m) a eu pour effet, non seulement, de renforcer les courants dans la passe des Brillantes et dans le chenal de Donges mais d'écarter les eaux turbides de fond et d'alimenter en jusant la zone Sud de Bilho avec des eaux plus claires. Une réduction de 40 % de l'envasement en est résultée dans cette zone, permettant de reculer l'échéance de son colmatage.

Chapitre III
INFLUENCE DES AMÉNAGEMENTS
SUR L'HYDRAULIQUE, LA SALINITÉ
ET L'ENVASEMENT. LE DEVENIR DE
L'ESTUAIRE A LA FIN DU SIÈCLE

Dans ce chapitre, après avoir décrit sommairement les modèles réduits utilisés et les projets d'aménagements étudiés, nous examinerons successivement l'influence de ces aménagements sur l'hydraulique et la salinité, sur l'envasement du chenal de navigation et des zones limitrophes - dont celle située au sud de Bilho; enfin sur le devenir de l'estuaire à la fin du siècle.

1 - Les modèles utilisés, les aménagements étudiés

1-1 Les modèles utilisés

Les prévisions des aménagements de l'estuaire de la Loire, à court et moyen termes, c'est-à-dire l'approfondissement du chenal d'accès s'étendant de Saint-Nazaire à Donges, les possibilités de développements nautiques à Lavau et Carnet, l'amélioration des accès à Nantes et dans les zones intermédiaires, le surcreusement des fonds en amont de Nantes... ont été étudiés à l'aide de trois modèles dont un modèle mathématique "multicouches" et deux modèles réduits physiques.

L'un de ces modèles physiques dit modèle "d'ensemble" représentait la totalité de l'estuaire de la Loire depuis la limite amont de la propagation de la marée jusqu'au large, l'autre dit "partiel" s'étendait depuis l'amont de Corde-mais, au lieu-dit Sardine, jusqu'en aval de la Pointe de Chemoulin.

1-2 Les solutions d'aménagements étudiées en modèles réduits (fig. 1 et 2)

Les solutions d'aménagements étudiés sur les trois modèles ont couvert de nombreuses configurations passées ou futures que l'on a distinguées sous le terme "d'états" de l'estuaire en leur donnant des dates qui correspondent à des réalisations hypothétiques. Pour chacun de ces "états" on a, en plus, étudié différentes modifications portant par exemple sur la forme des dépôts du Banc de Bilho, les épis ou les digues de concavité devant Lavau, la réalisation de darses ou de quais de rive à Montoir etc.

Les principaux états étudiés sont donnés sur les figures 1 et 2 sur lesquelles on trouvera le

tracé schématique des ouvrages ainsi que les profils en long du chenal de navigation.

- État 1953 :
 - chenal à $-5,5$ m jusqu'à Donges
 - chenal de Nantes à $-3,5$ m.
- État 1976 (ou état de référence) :
 - chenal à -10 m jusqu'à Donges
 - zone de transition Donges-Petit Carnet
 - Chenal à -6 m jusqu'à Nantes
- États Mixtes 1978/1976/1953 (influence des approfondissements en amont de Nantes) :
 - aval Nantes 1976, amont 1953
 - aval Nantes 1976, amont 1978.
- État 1980 :
 - chenal à $-13,25$ m jusqu'à Donges.
 - zone de transition Donges-Petit Carnet, $-13,25$ m à -6 m.
 - chenal de Nantes à -6 m.
 - dépôt de dragages sur le Banc de Bilho.
- État 1985 :
 - chenal à $-13,25$ m jusqu'à Donges.
 - zone de transition Donges-Petit Carnet, $-13,25$ m à -9 m.
 - Petit Carnet, Grand Carnet à -9 m.
 - chenal de Nantes à -6 m.

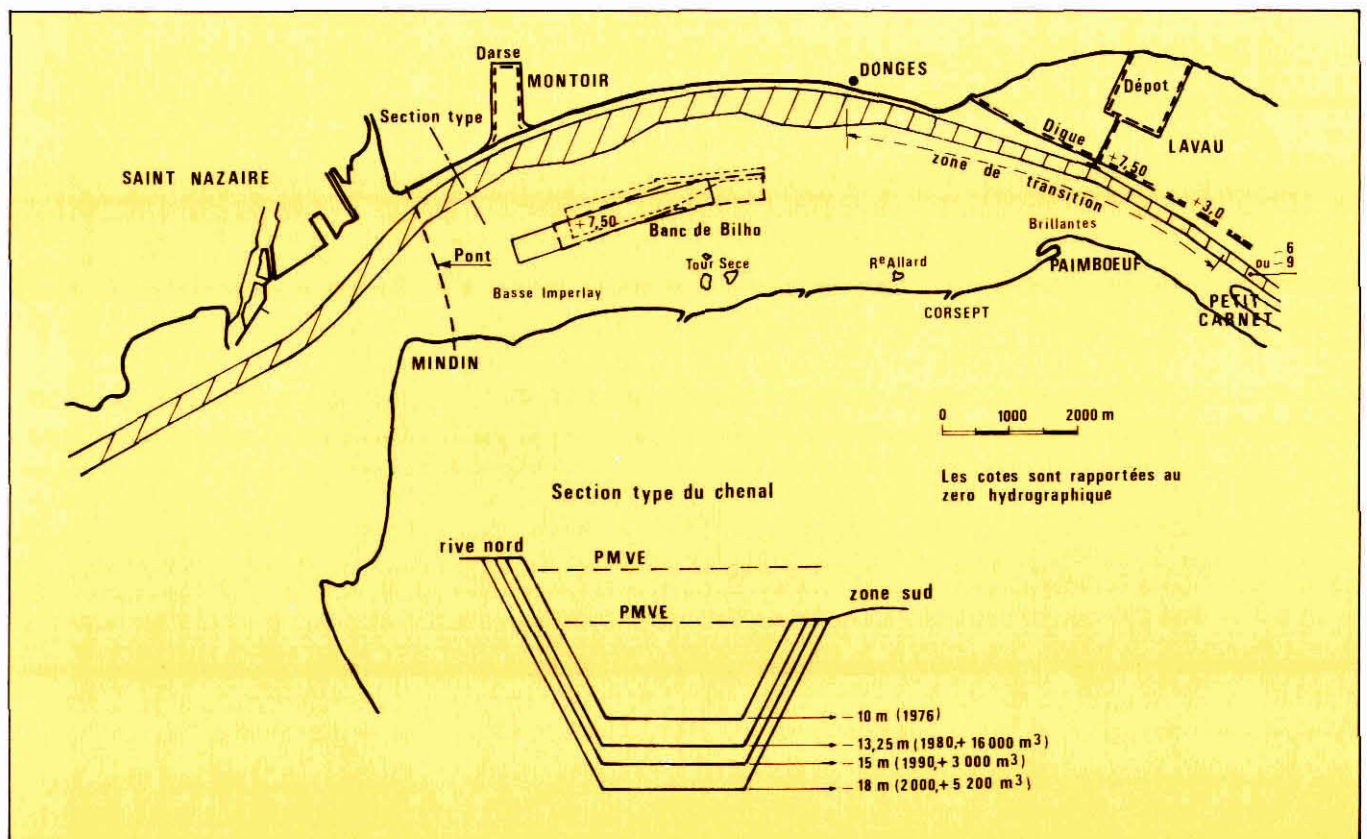


Fig. 1 - Aménagements réalisés ou projetés.

- dépôt de dragages sur le Banc de Bilho.
- État 1990 :
 - chenal à — 15 m jusqu'à Donges
 - zone de transition Donges-Petit Carnet, — 15 à — 9 m.
 - Petit Carnet, Grand Carnet à — 9 m.
 - chenal de Nantes à — 7 m.
 - dépôt de dragages sur le Banc de Bilho.
- État 2000 :
 - chenal à — 18 m jusqu'à Donges.
 - zone de transition Donges-Petit Carnet, — 18 m à — 9 m.
 - Petit Carnet, Cordemais à — 9 m.
 - chenal de Nantes à — 7 m.
 - dépôt de dragages sur le Banc de Bilho.
- Aménagement de barrages ou de réservoirs d'eau douce en amont de Nantes pour améliorer la qualité des eaux (état des fonds 1980).

Notons que les approfondissements du chenal en aval de Donges n'ont entraîné que des accroissements de sections de l'estuaire assez faibles (8 % pour

— 13,25 m, 15 % pour — 15 m et 25 % pour — 18 m), la section moyenne de l'estuaire étant voisine de 20 000 m² en 1976).

2 - Influence des aménagements sur l'hydraulique et la salinité

Les modifications de la géométrie d'un estuaire peuvent affecter dans des proportions plus ou moins importantes la propagation de la marée (lignes d'eau, lieux géométriques des pleines-mers et des basses-mers...), la répartition des vitesses et l'intrusion saline. En utilisant les trois modèles mathématique et physiques, il a été possible de prévoir avec une bonne précision "l'avenir hydraulique" de l'estuaire au cours des différentes phases d'aménagements possibles ou hypothétiques.

2-1 Marées et lieux géométriques des pleines-mers et des basses-mers

D'une façon générale, l'approfondissement du chenal en

aval de Donges affecte peu la propagation de la marée et les lieux géométriques des pleines-mers (P.M.) et des basses-mers (B.M.) par rapport à l'état de 1976 pris comme référence. Par contre, des modifications importantes peuvent se produire lorsque l'on creuse le bassin de marée en amont de Nantes ou le chenal de navigation entre Donges et Nantes.

Des essais réalisés avec et sans représentation de la salinité sur le modèle d'ensemble ont montré que la salinité n'affectait pas la propagation de la marée dans l'estuaire.

2.1.1. Influence du bassin de marée en amont de Nantes.

Les études systématiques effectuées sur les trois modèles ont permis de mettre en évidence l'influence du surcreusement du bassin de marée en amont de Nantes en réalisant des essais avec une même configuration des fonds de l'estuaire (état 1976) en aval de Nantes et en modifiant les

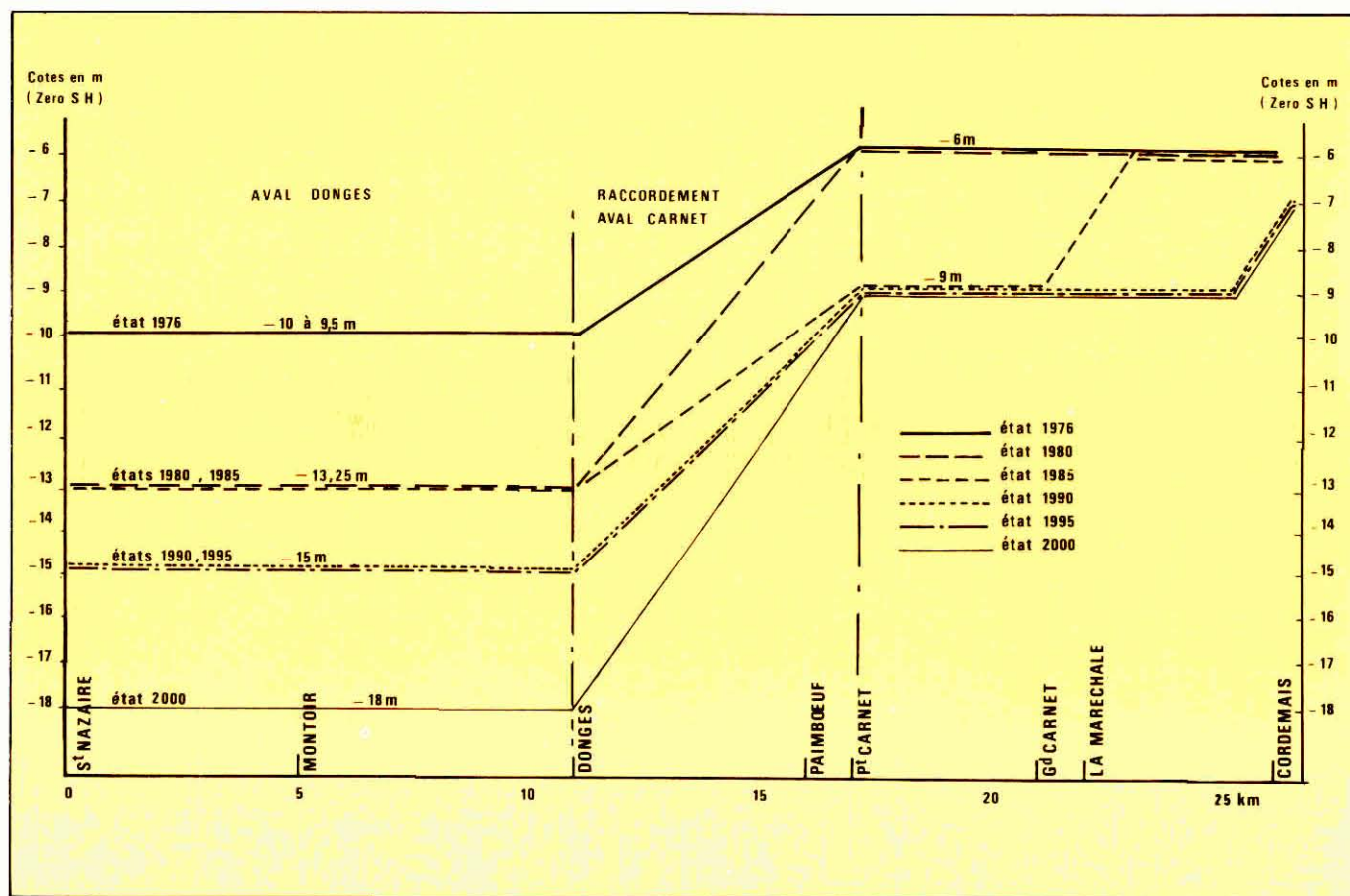


Fig. 2 - Aménagements réalisés ou projetés. Profil en long du chenal de navigation.

sections en amont de Nantes suivant les profils des fonds relevés en 1953, en 1974 ou en 1976-1978.

Les lieux géométriques des pleines-mers sont peu affectés par la géométrie de l'estuaire, par contre ceux de basses-mers subissent d'importantes modifications lorsque l'on augmente les profondeurs en amont de Nantes. Les extractions en amont de Nantes ont favorisé la propagation de la marée qui a triplé ou quadruplé à Mauves, l'onde remontant 20 à 25 km plus en amont tandis que le niveau des basses mers s'abaissait à Nantes de près de 1 m pour une marée de vives-eaux et un débit d'étiage. Il faut également remarquer que l'approfondissement du chenal entre Paimbœuf et Nantes, qui est passé entre 1953 et 1976 de -3,75 à -6 m environ, a également provoqué un abaissement général du niveau des basses-mers dans ce secteur.

2.1.2. Influence de l'approfondissement du chenal de navigation (fig. 3)

L'approfondissement du chenal de navigation en aval de Donges à -13,25 m (état 1980), sans modification des profondeurs en amont de Carnet, n'affecte pas la propagation de la marée ni les lieux des pleines-mers et des basses-mers par rapport à l'état de référence de 1976. La même constatation est faite en aval des Brillantes avec l'état 1985 comportant en plus de l'approfondissement à -13,25 m entre Saint-Nazaire et Donges, un approfondissement à -9 m devant Carnet, le chenal en amont restant inchangé jusqu'à Nantes (fig. 3). On remarque toutefois en amont des Brillantes un léger abaissement du lieu des basses-mers au voisinage de Cordemais.

L'approfondissement du chenal à -15 m en aval de Donges et à -9 m devant Carnet (état 1990) ne modifie pas le lieu des pleines-mers mais entraîne un abaissement des basses-mers de

l'ordre de 0,20 à 0,30 m entre Cordemais et Nantes, ce qui caractérise un léger gonflement de l'onde-marée. Ce phénomène s'accroît lorsque la profondeur du chenal passe à -18 m entre Donges et Saint-Nazaire et à -9 m de Petit-Carnet à Cordemais, le chenal de Nantes étant à -7 m (état 2000). Le niveau des basses-mers s'abaisse alors de 0,60 m au Pellerin et reste modifié jusqu'en amont de Nantes pour des marées de vives-eaux et des débits d'étiage.

2.1.3. Influence du dépôt de dragage sur Bilho, des ouvrages de Lavau et des darses de Montoir et de Lavau.

Les dépôts de dragage sur le Banc de Bilho n'entravent pas les écoulements de flot et de jusant et sont sans effet sur la propagation de la marée. Il en est de même de la réalisation des darses à Montoir et à Lavau ou des dépôts dans la région de Lavau avec ou sans digue de calibrage sur la rive droite.

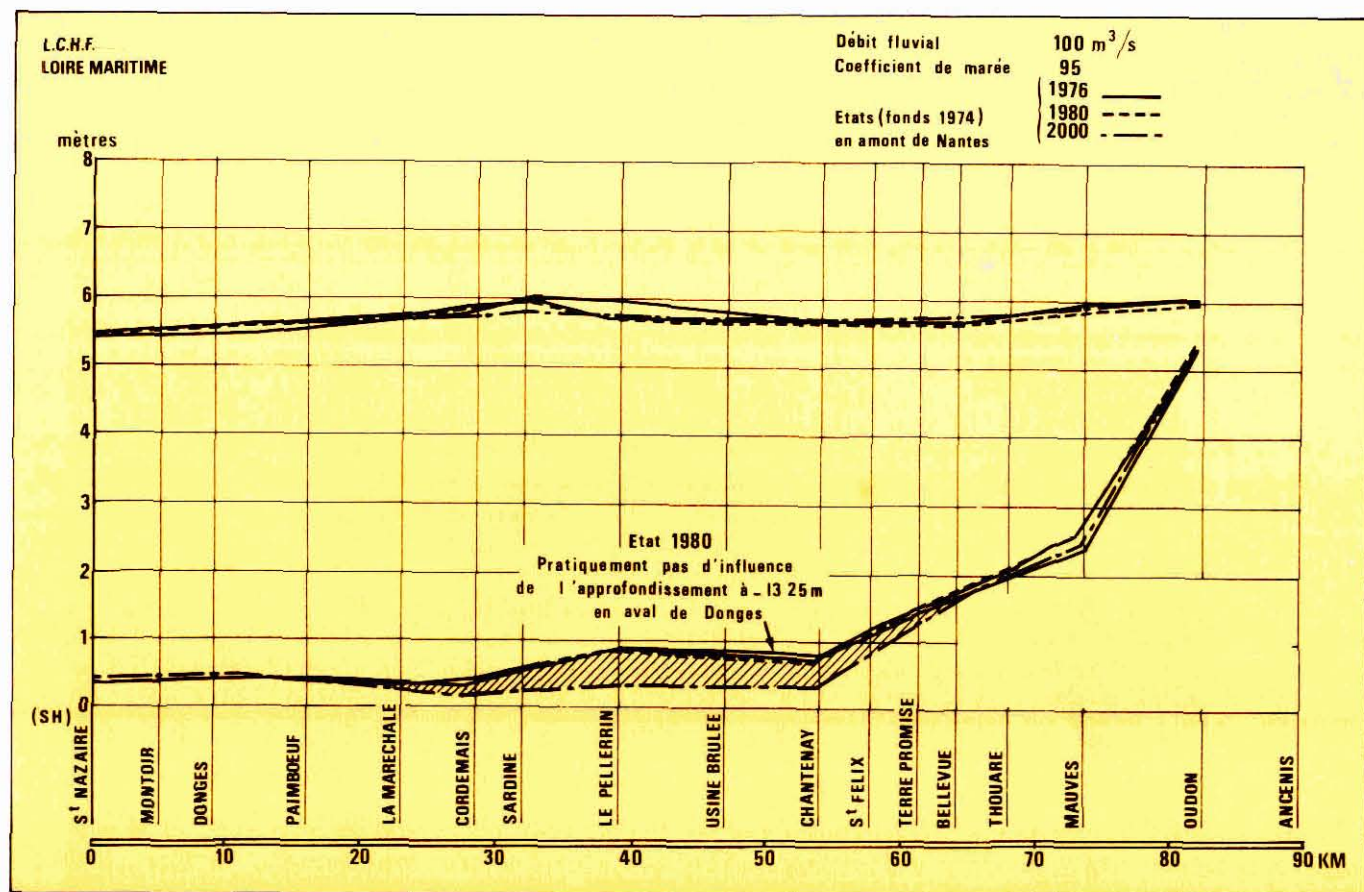


Fig. 3 - Évolution des paramètres hydrosédimentaires. Lieux géométriques des PM et BM. Modèle physique.

2.1.4. Influence de barrages en amont de Nantes pour améliorer la qualité des eaux (fig. 4)

Le surcreusement des fonds de l'estuaire en amont de Nantes ayant entraîné une augmentation du volume du bassin de marée et une avancée de l'intrusion saline, différentes études ont été réalisées pour tenter de s'opposer à ces phénomènes. Des barrages ont été envisagés à Bellevue, immédiatement en amont de Nantes et à Mauves (PK 73); de même, on a recherché à freiner la propagation de la marée en réalisant des seuils à des cotes croissantes (+ 1 m au PK 61 à Terre Promise, + 2,5 m au PK 66, + 3,5 m au PK 73 à Mauves).

Les seuils permettent de surélever le niveau des basses-mers et de réduire ainsi le bassin de marée. Le niveau des pleines-mers reste inchangé (fig. 4).

2-2 Vitesses des courants

2.2.1. Influence du bassin de marée en amont de Nantes

L'augmentation des volumes d'eau oscillants qui passent à Nantes par suite du surcreusement du bassin de marée entraîne une augmentation des vitesses dans la zone de Cheviré et dans toute la section située entre Nantes et Mauves.

2.2.2. Influence de l'approfondissement du chenal de navigation (fig. 5)

L'approfondissement du chenal de navigation en aval de Donges à une cote de - 13,25 m avec un raccordement progressif jusqu'à Petit-Carnet (état 1980) conduit à une réduction des vitesses à l'aval de Paimbœuf mais n'a pratiquement pas d'influence sur la partie centrale et amont de l'es-

tuaire comme le montre la figure 5 qui donne la répartition des vitesses maximales de surface sur tout l'estuaire dans l'état de 1976 et dans celui de 1980.

La même constatation sera faite avec les autres états d'aménagement à - 15 et - 18 m et il faudra attendre que le chenal soit dragué à - 9 m sur toute la zone de Carnet et à - 7 m jusqu'à Nantes pour que l'on constate une réduction des vitesses par rapport à 1980 (10 à 15 %) au Pellerin, liée d'ailleurs directement à l'augmentation de la section et à un léger accroissement des vitesses en amont de l'estuaire par suite d'une meilleure pénétration de la marée.

Les états de 1900 et 2000 donnent des courbes assez voisines de celles de 1980 mais avec une réduction des vitesses de 10 à 15 % supplémentaires en 1990 par rapport à l'état de 1980.

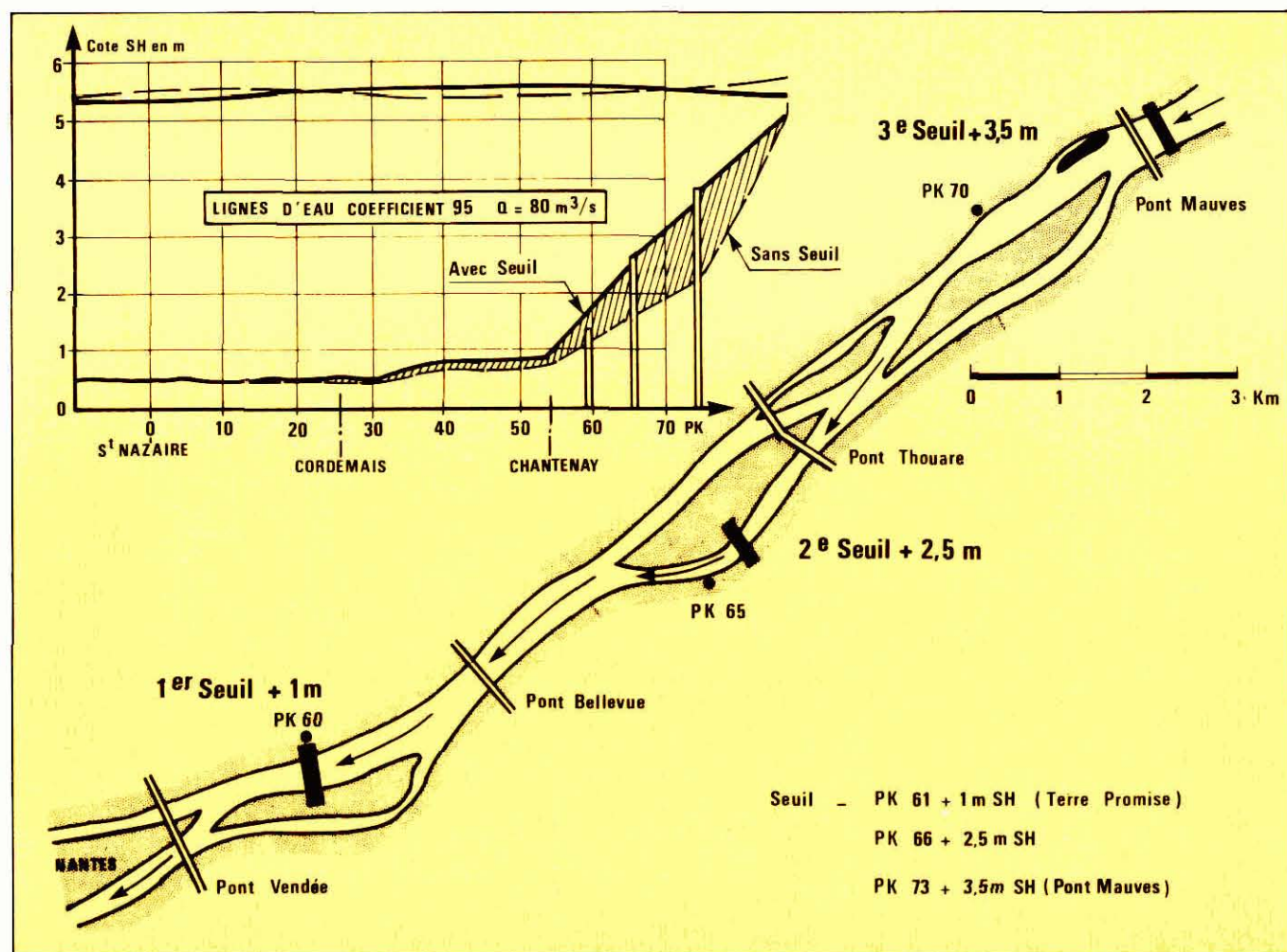


Fig. 4 - Estuaire de la Loire. Réalisation de seuils.

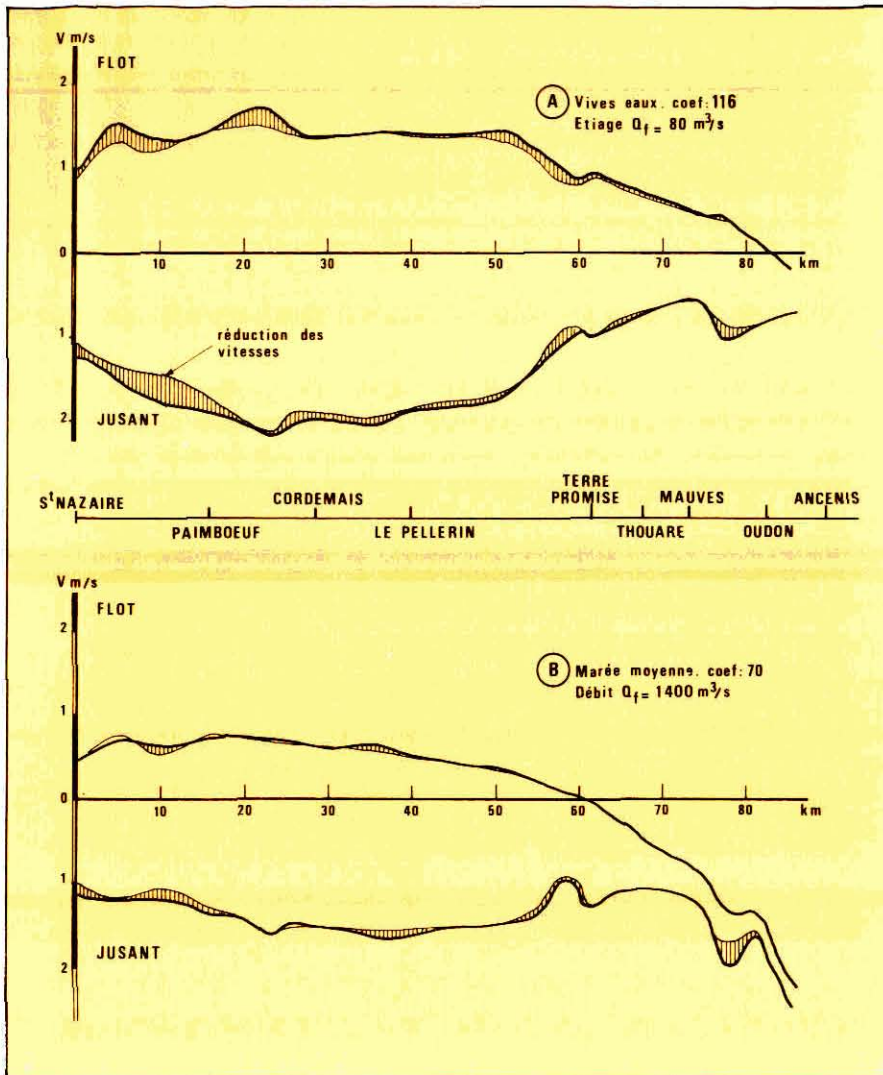


Fig. 5 - Influence de l'approfondissement du chenal à $-13,25$ m sur la répartition des vitesses de surface (État 1976 - État 1980).

Le tableau 1 ci-dessous donne les valeurs des vitesses maximales en vives-eaux (Coef. 95) mesurées dans le chenal de navigation à Donges en surface (S) et au fond (F) pour un débit d'étiage de $80 \text{ m}^3/\text{s}$ et différents approfondissements.

États		1976	1980	1990	2000
Profondeur en m		-10	-13,25	-15	-18
S	Flot	1,1	0,95	1,0	0,80
	Jusant	1,65	1,3	1,3	1,3
F	Flot	0,65	0,45	0,45	0,4
	Jusant	1,05	0,65	0,70	0,55

Tabl. 1 - Vitesses maximales en m/s.

2.2.3. Influence des dépôts de dragage sur Bilho, des ouvrages de Lavau, du dragage de la zone de Corsept-Brillantes et du calibrage à l'aval de Paimbœuf.

Le Banc de Bilho s'intègre bien dans l'ensemble des lignes de courants et n'apporte pas, dans les différentes configurations qui ont pu être étudiées, de perturbations appréciables dans les vitesses de ces courants.

Le dépôt sur la zone de Lavau, avec un épi perpendiculaire à la rive, provoque une légère accélération des courants en extrémité de l'épi et entraîne des tourbillons de part et d'autre de l'ouvrage. Un calibrage obtenu avec une digue longitudinale de 5 km de longueur à la cote $+7,5 \text{ m}$ dans sa partie aval et à $+3 \text{ m}$ dans sa partie amont a tendance à augmenter légèrement les vitesses dans Les Brillantes sans que cela puisse compenser les réductions de vitesses provoquées par les approfondissements. Cette digue de calibrage, malgré sa longueur appréciable, n'est pas suffisamment prolongée vers l'amont pour éviter le déversement en provenance de la vasière de Lavau.

Le dragage à $-0,50 \text{ m}$ de la zone de Corsept-Brillantes n'a pas une influence déterminante sur les vitesses dans la zone du chenal sud, les écoulements étant tributaires de l'envasement général de ce secteur.

De même, dans l'état hypothétique de l'an 2000 avec des fonds dragués à -18 m en aval de Donges et à -9 m devant Carnet, on a pu constater qu'une digue de calibrage sur la rive gauche entre Paimbœuf et Mindin, et une digue sur la rive droite entre Donges et Cordemais, ne modifieraient pas d'une façon appréciable le niveau des pleines-mers et des basses-mers mais apportaient une amélioration aux zones d'évitement de Montoir et Donges en supprimant les tourbillons et les déversements transversaux.

2-3 Salinité

Comme on a pu le constater en nature en comparant les fronts de $0,5\text{‰}$ dans les états de 1953, 1974, 1976 et 1981, si la salinité a fortement progressé lorsque le bassin de marée était surcreusé en amont de Nantes et le chenal approfondi entre Paimbœuf et Nantes, les essais aussi bien sur modèles physiques que mathématiques ont montré que le creusement à $-13,25\text{ m}$ du chenal à l'aval de Donges (état 1980) ne modifie pas d'une façon appréciable l'intrusion saline.

2.3.1. Influence du bassin de marée en amont de Nantes (fig. 6 et 7).

La modification des profondeurs entre 1953 et 1976, c'est-à-dire le creusement du chenal à l'aval de Donges entre $-5,75\text{ m}$ et -10 m , le creusement de Donges à Nantes de $-3,75\text{ m}$ à -6 m et le surcreusement du bassin de marées par suite des extractions d'agrégats en amont de Nantes, ont entraîné, tant sur modèle physique d'ensemble que sur le modèle mathématique, une remontée de 8 à 9 km du front de salinité (fig. 6). Cette remontée est en moyenne sensiblement plus faible que celle qui a été constatée en nature au cours de la même période. Cette différence peut être due au fait que sur le modèle l'état des fonds dit de "1976" en amont de Nantes était vraisemblablement sous-estimé par rapport à la nature.

En réalisant un état de "1978" en amont de Nantes correspondant à des extractions plus importantes d'agrégats dans cette zone, on a constaté sur le modèle physique une augmentation de la remontée saline de 5 km environ pour un débit de $500\text{ m}^3/\text{s}$ et une marée de vives-eaux montrant l'importance des extractions en amont de Nantes sur ce phénomène (fig. 7).

2.3.2. Influence de l'approfondissement du chenal de navigation (fig. 8, 9, 10, 11)

L'effet des approfondissements du chenal de navigation sur l'intrusion saline dépend

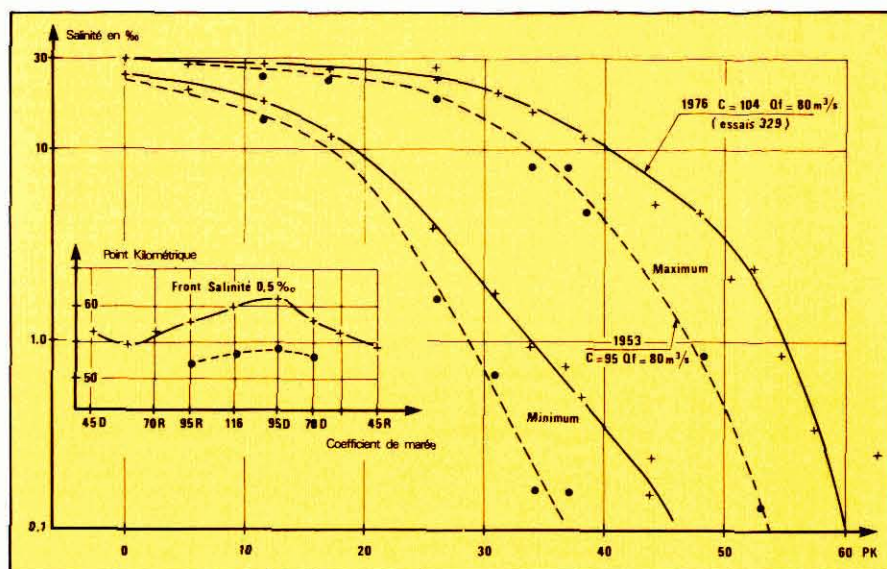


Fig. 6 - Comparaison de l'intrusion saline sur les modèles en 1953 et en 1976. Marées de vives eaux ; Étiage.

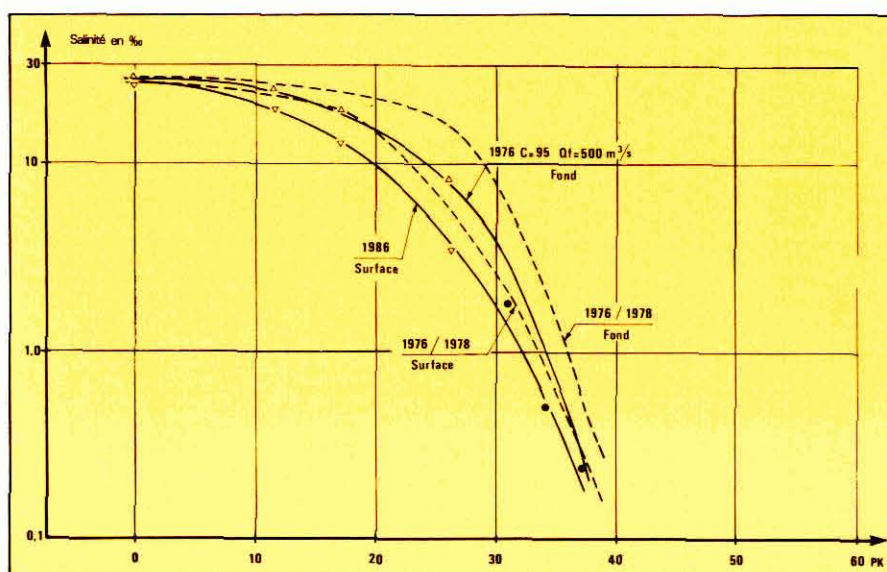


Fig. 7 - Influence de l'approfondissement en amont de Nantes entre 1976 et 1978. Vives eaux, débit $500\text{ m}^3/\text{s}$.

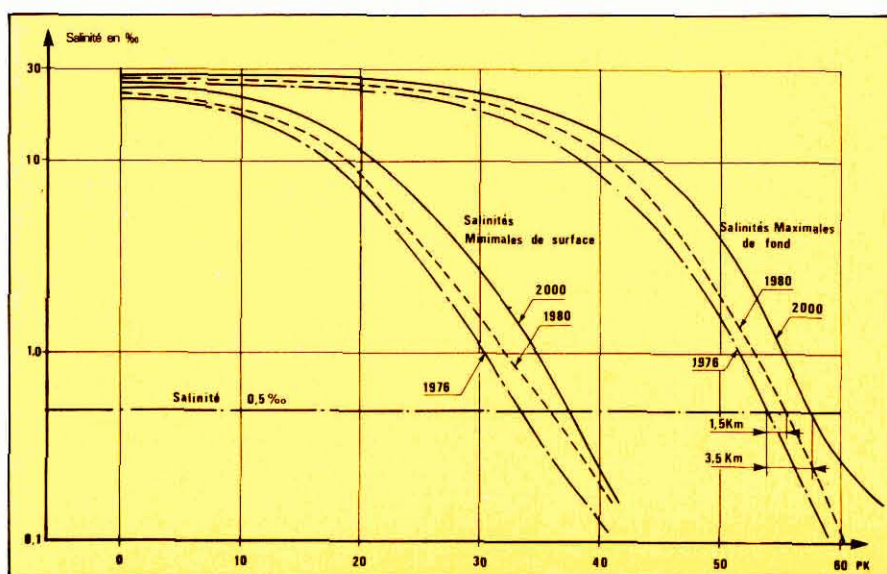


Fig. 8 - Répartition des salinités maximales et minimales pour différents états de l'estuaire. Vives eaux (coef. 95); Étiage $80\text{ m}^3/\text{s}$.

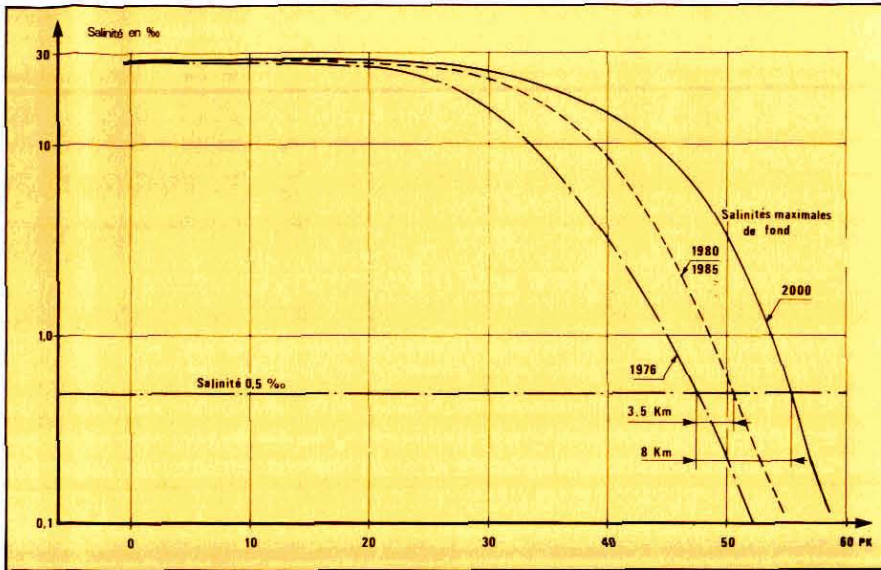


Fig. 9 - Répartition des salinités maximales de fond pour différents états de l'estuaire. Mortes eaux (coef. 45); Étiage (80 m³/s).

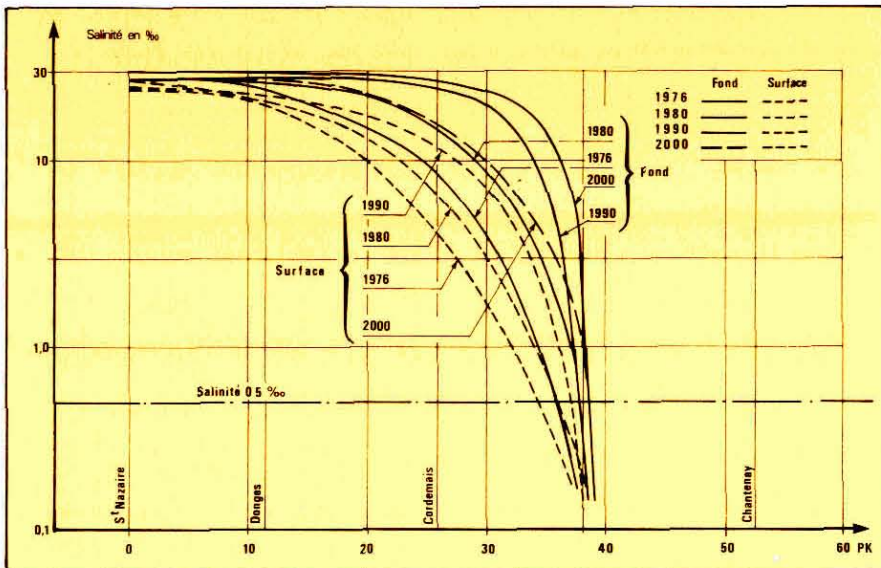


Fig. 10 - Répartition des salinités maximales pour différents états de l'estuaire. Vives eaux (coef. 95); Débit 500 m³/s.

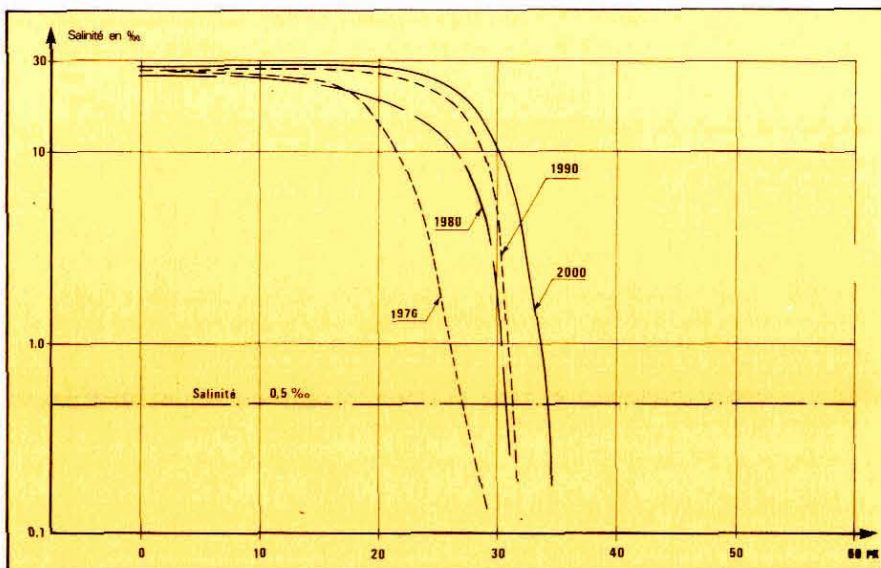


Fig. 11 - Répartition des salinités maximales de surface pour différents états de l'estuaire. Mortes eaux (coef. 45); Débit 500 m³/s.

avant tout de l'état de stratification de l'estuaire.

Lorsque l'estuaire est bien mélangé, ce qui correspond à des périodes de marées de vives-eaux et d'étiage (Coef. 95, débit 80 m³/s), l'intrusion saline n'est que peu modifiée dans les états 1980 et 1985 par rapport à celle mesurée en 1976.

En étiage (Qf = 80 m³/s), par rapport à l'état de référence de 1976, on constate par exemple que le front de salinité à 0,5‰ ne progresse en vives-eaux (Coef. 95) que de 1,5 km pour les états de 1980-1985 (fonds à -13,25 m) et de 3,5 km pour l'état 2000 (fonds à -18 m).

En mortes-eaux (Coef. 45), cette progression atteindrait respectivement 3,5 km pour les états 1980-1985 et 8 km pour l'état 2000 qui comporte un surcreusement du chenal à -18 m en aval de Donges et un creusement du chenal à -7 m entre Carnet et Nantes (fig. 8 et 9).

En crue ou pour des débits moyens, la stratification des eaux peut être accentuée par l'approfondissement du chenal, les eaux plus salées ayant tendance à pénétrer davantage au contact du fond. On assiste à un raidissement de l'enveloppe des maxima de salinités et si la progression du front de faible salinité reste négligeable, il n'en est pas de même pour le front de forte salinité qui avance d'autant plus que la profondeur du chenal en aval de Donges est plus grande (fig. 10 et 11).

Pour un débit de 500 m³/s, la progression du front de salinité maximale à 0,5‰ n'avancera que de 1 km entre 1976 et 1980 pour une marée de vives-eaux et de 2,5 km pour l'état 2000. Par contre, le front de salinité à 10‰ avance de 2,5 km pour l'état 1980, 4,5 km pour l'état 1985, 9 km pour l'état 1990 et près de 12 km pour l'état 2000.

Pour un débit de 1400 m³/s l'avancée du front de salinité à 0,5‰ pourra atteindre 3 km pour l'état des fonds de 1980 (-13,25 m) et 6 km pour le front de salinité à 1‰.

2.3.3. Influence de barrages et de seuils en amont de Nantes

Les effets de ces aménagements sur l'intrusion saline sont très complexes par suite de la réflexion possible de l'onde-marée sur les barrages qui crée des nœuds et des ventres de vitesses le long de l'estuaire, qui ne sont pas toujours favorables à une réduction de la salinité et nécessitent une modulation des débits d'eau douce.

Différentes études ont été réalisées pour repousser l'intrusion saline dans l'estuaire. On constate avant tout l'intérêt du soutien d'étiage puisque dans l'état des fonds de 1976-1980 (aval Donges à - 13,25 m), il serait possible de faire reculer le front de salinité maximal de 0,5 ‰ de 10 à 15 km lorsque l'on passe d'un débit de 70 à un débit de 140 m³/s. Il s'agit là de réaliser une régularisation des débits de la Loire par création de barrages très en amont du fleuve.

La réalisation de barrages en amont de Nantes pourrait également apparaître comme séduisante en permettant de retenir des eaux douces pendant une partie de la marée, ou une partie du cycle des marées, et en effectuant des lâchers d'eau douce à des périodes propices pour s'opposer à la remontée des eaux salées dans l'estuaire. De tels barrages ont été envisagés à Bellevue (PK 64), à Mauves (PK 73) et à Oudon (PK 82) avec des états des fonds de 1976 avec ou sans modulation du débit d'étiage (80 m³/s) pendant la marée ou le cycle de marées.

3 - Influence des aménagements sur l'ensablement et l'envasement

Les études faites en nature ont montré que si l'estuaire de la Loire avait été soumis à des phénomènes d'ensablement importants avant 1970-1974, avec apparition de ridens et de dunes de plus de 2 m de hauteur préjudiciables à la navigation, les extractions massives faites en amont de Nantes ont réduit considérable-

ment ce phénomène. Par contre, les approfondissements réalisés dans le chenal de navigation ont accentué les problèmes d'envasement dont l'étude a été jugée prioritaire dans l'état actuel des fonds ou pour les aménagements possibles au cours des prochaines années.

En dehors de l'étude des dépôts de sable sur le Banc de Bilho les recherches à l'aide des modèles réduits physiques ont donc porté essentiellement sur les phénomènes d'envasement en examinant l'évolution du chenal de navigation et des zones limitrophes (sud Bilho, Lavau, Carnet, etc.) dans les différents états d'aménagements possibles de 1976, 1980, 1985 et 1990. Parallèlement des solutions étaient recherchées pour améliorer les profondeurs dans la passe des Brillantes et tenter de localiser les dragages dans des fosses surdimensionnées réalisées à Donges, à Montoir et à Villes-Martin dans le but de servir de piège à vases. De même, l'influence de la géométrie du dépôt du Banc de Bilho et les aménagements des Brillantes sur l'importance des envasements entre Paimbœuf et Mindin, a fait l'objet d'une étude très attentive afin d'éviter que les aménagements du chenal de navigation ne viennent perturber un secteur particulièrement sensible pour l'équilibre biologique de l'estuaire.

3-1 Comportement du dépôt de produits de dragage sur le Banc de Bilho

Le dépôt sur le Banc de Bilho de 6 à 7 millions de m³ de matériaux provenant de dragage d'approfondissement du chenal de navigation à - 13,25 m, a fait l'objet d'une étude sur le modèle réduit partiel afin de préciser les conditions de mise en place des matériaux, supposés sableux, et de rechercher l'évolution possible des dépôts au cours des prochaines années. Parallèlement, des expériences à l'aide de traceurs radioactifs ont été réalisées pour évaluer les risques de dispersion des dépôts de sable.

Cinq tracés différents des dépôts de dragage ont été étudiés

avec soit des produits de dragages constitués par des sables fins, soit par des sables moyens et grossiers. Les dimensions et les cotes des dépôts ont été recherchées afin d'apporter le moins de perturbations possible dans les écoulements naturels et de réduire dans certains cas la partie du dépôt émergeant en permanence afin de favoriser, comme l'avait demandé l'I.S.T.P.M., l'établissement de nurserie pour les poissons.

Les essais en modèle réduit montrent qu'il est possible de réaliser un dépôt de sable sur le Banc de Bilho à condition de disposer dans les sédiments déversés de sables suffisamment grossiers permettant d'assurer une protection par pavage des dépôts. Dans tous les cas, les pentes des talus initialement prévues à 10 % s'adouciront vers une valeur moyenne de 4 à 5 % et l'on peut estimer qu'en plus de cet étalement des dépôts 10 % seulement des éléments sableux pourront être entraînés, le dépôt restant donc relativement stable.

Les observations faites en nature confirment ces prévisions du modèle et après un remaniement de sédiments au cours de la mise en place des dépôts, le banc artificiel semble conserver son intégrité, les pertes de matériaux étant de même grandeur que celles mesurées en modèle réduit.

3-2 Étude de l'envasement du chenal de navigation

L'estuaire de la Loire, se comporte comme un vaste réceptacle alimenté suivant les cas par des apports fluviaux de l'amont ou des apports marins de l'aval, stockant provisoirement ces apports, les déplaçant localement et alternativement d'une vingtaine de kilomètres à chaque marée de vives-eaux, les déposant partiellement aux marées de mortes-eaux et les soumettant à des remontées et à des descentes saisonnières sur toute la longueur de l'estuaire en fonction du débit fluvial. Lorsque le débit fluvial devient très important, une partie de ce stock sédimentaire peut être expulsée de l'estuaire tandis que l'autre se dépose soit dans le chenal de

navigation, soit dans les zones limitrophes qui s'exhaussent conduisant à la formation progressive d'un estuaire calibré ayant atteint une certaine maturité.

Ces différents phénomènes sédimentaires ont pu être représentés sur les modèles réduits physiques grâce à l'utilisation d'une "vase artificielle" présentant aux échelles du modèle les mêmes propriétés physiques et les mêmes comportements sous les actions hydrodynamiques. On a admis que les apports fluviaux annuels d'éléments en suspension étaient de 1 million de tonnes par an.

Pour chaque état d'aménagement (1976, 1980, 1985...), on a examiné d'une part comment évoluaient les turbidités et le bouchon vaseux dans l'estuaire, d'autre part comment se répartissaient les dépôts dans le chenal de navigation et les zones limitrophes ainsi que les quantités expulsées de l'estuaire.

3.2.1. Évolution de la turbidité des eaux et position du bouchon vaseux pour différents aménagements.

Sur le modèle comme en nature, on retrouve une évolution des turbidités au cours de la marée, des valeurs 5 à 10 fois fortes en vives-eaux qu'en mortes-eaux, un déplacement du centre de gravité du bouchon vaseux vers l'aval de l'estuaire lorsque le débit fluvial augmente, et une remontée lorsque le débit diminue.

En partant des mesures de turbidités moyennes au cours de la marée et en différents points de l'estuaire, il a été possible d'établir des "diagrammes routiers du bouchon vaseux" qui donnent, pour les différents états, la position et l'évaluation des masses turbides dans l'estuaire.

État de 1976

Dans l'état de 1976, pris comme référence, les turbidités supérieures à 1 g/l se répartissent sur une longueur de 28 km pour un débit fluvial de 200 m³/s.

Avec un débit de 800 m³/s, la longueur du bouchon vaseux à 1 g/l diminue et atteint 21 km.

Pour un débit de 1400 m³/s, la limite aval du bouchon vaseux oscille entre le PK 12 (amont de Donges) et le PK 8 environ.

On constate que sur le modèle comme en nature, la masse turbide en suspension est 7 à 10 fois supérieure en vives-eaux qu'en mortes-eaux (dépôt sous forme de crème de vase sur les fonds). Le poids total de vase en suspension atteint 680 000 tonnes en vives-eaux et pour un débit de 800 m³/s, et 300 000 tonnes pour un débit de 200 m³/s.

Au cours de la marée, ce poids total de vase en suspension varie sur le modèle d'une façon sensible et atteint un poids minimal au moment de la pleine mer et un poids maximal peu après la basse-mer. Ce serait donc le jusant qui aurait le rôle le plus important dans la remise en suspension des sédiments.

État de 1980

Dans l'état de 1980, le centre de gravité du bouchon vaseux se situe aux environs du PK 35 pour un débit de 200 m³/s et du PK 26 pour 800 m³/s. Par contre, la position du centre de gravité du bouchon vaseux est légèrement déplacée vers l'amont au moment des basses-mers, la remontée étant de 3 km pour les faibles débits et pratiquement nulle pour un débit de 800 m³/s. On retrouve là un résultat comparable à celui de l'intrusion saline.

État de 1990

Dans l'état de 1990, le bouchon vaseux va progresser vers l'amont de l'estuaire de 5 à 10 km à pleine-mer et de 1 à 5 km à basse-mer.

Notons que pour les états successifs étudiés en modèle réduit (1976, 1980, 1990), on a pu constater une augmentation de la turbidité moyenne des eaux en aval de Donges d'autant plus importante que la profondeur initiale du chenal était grande. Ce fait semble dû au "captage" d'une quantité importante de vase

fluide dans cette zone et à sa remise partielle en suspension au cours des vives-eaux.

3.2.2. Prévisions des envasements dans le chenal de navigation - Influence des différents approfondissements, du Banc de Bilho, de la salinité des eaux, de l'aménagement des Brillantes et des souilles de piégeage.

D'une façon générale, les dépôts dans le chenal de navigation sont peu modifiés entre Cordemais et Chantenay, c'est-à-dire dans la partie endiguée de la Loire, pour les différents approfondissements du chenal en aval de Donges. Par contre, les dépôts sont fortement augmentés dans le chenal de navigation entre Donges et St-Nazaire avec d'ailleurs des fluctuations épisodiques des profondeurs dues à des phénomènes saisonniers.

État 1976

Dans l'état des fonds de 1976, tous les essais font apparaître une sédimentation relativement faible du chenal de navigation.

Au total, de Nantes à Saint-Nazaire, les dépôts atteignent, avec cet état des fonds, 3 à 3,5 millions de m³ par an dont 1,5 à 2 millions de m³ pour le secteur Saint-Nazaire-Petit Carnet, (soit 0,25 m à 0,30 m), la zone des Brillantes représentant à elle seule 600 000 à 700 000 m³ par an de dépôt (soit 0,6 m à 0,7 m). En amont du Carnet les taux moyens d'envasement sont de 0,1 m.

État 1980 (fig. 12)

Lorsque le chenal de Donges est approfondi à -13,25 m (avec ou sans mise en place du dépôt de Bilho), l'état d'équilibre des fonds est rompu et les dépôts deviennent importants dans la section Saint-Nazaire Petit Carnet où ils sont en moyenne triplés par rapport à l'état de 1976 et atteignent 4,5 à 5 millions de m³ par an. Sur la totalité de l'estuaire de Nantes à l'aval de Saint-Nazaire, le volume des dépôts est de l'ordre de 7 millions de m³.

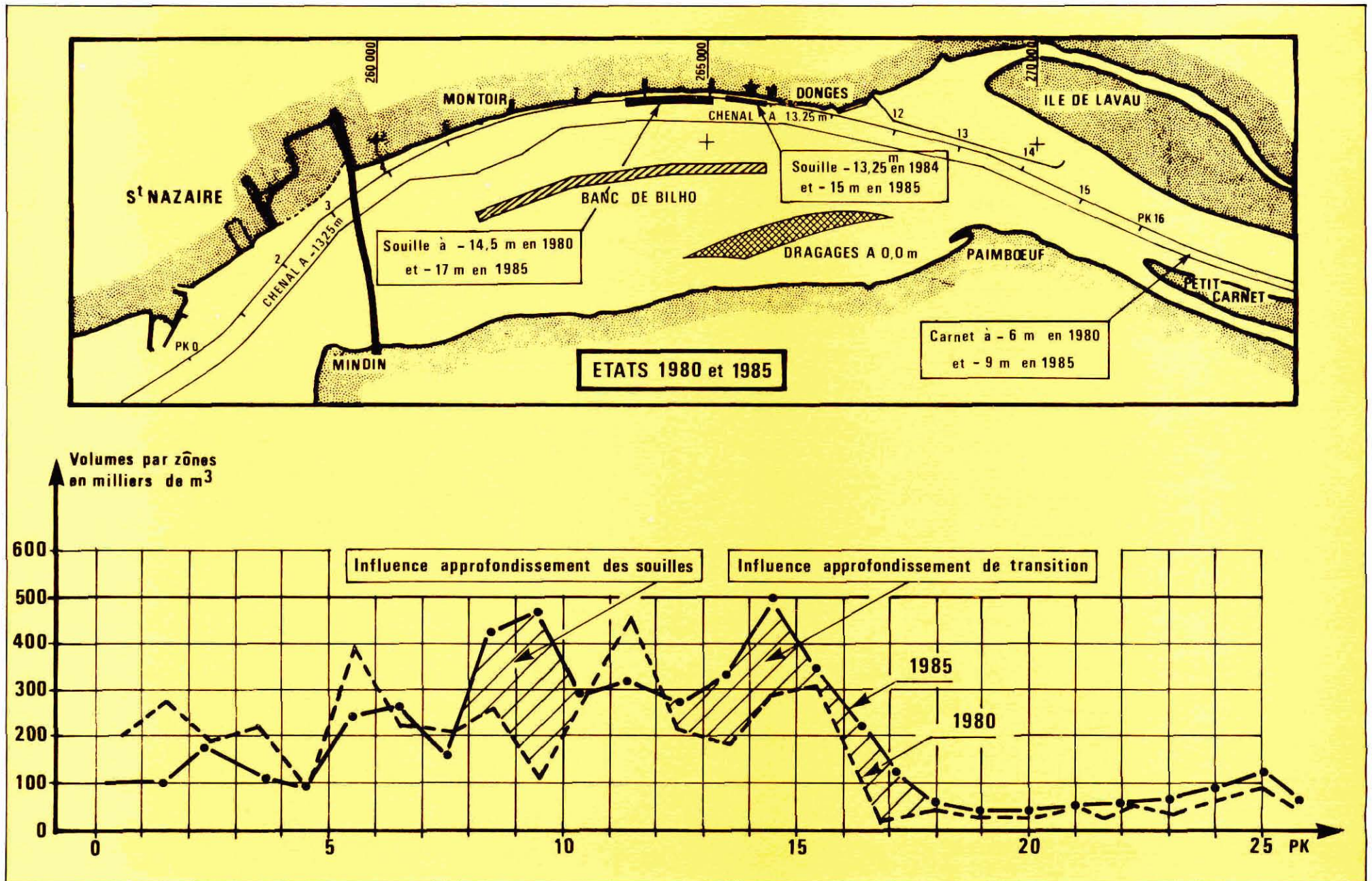


Fig. 12 - Répartition des dépôts dans le chenal. États 1980 et 1985 (modèle partiel).

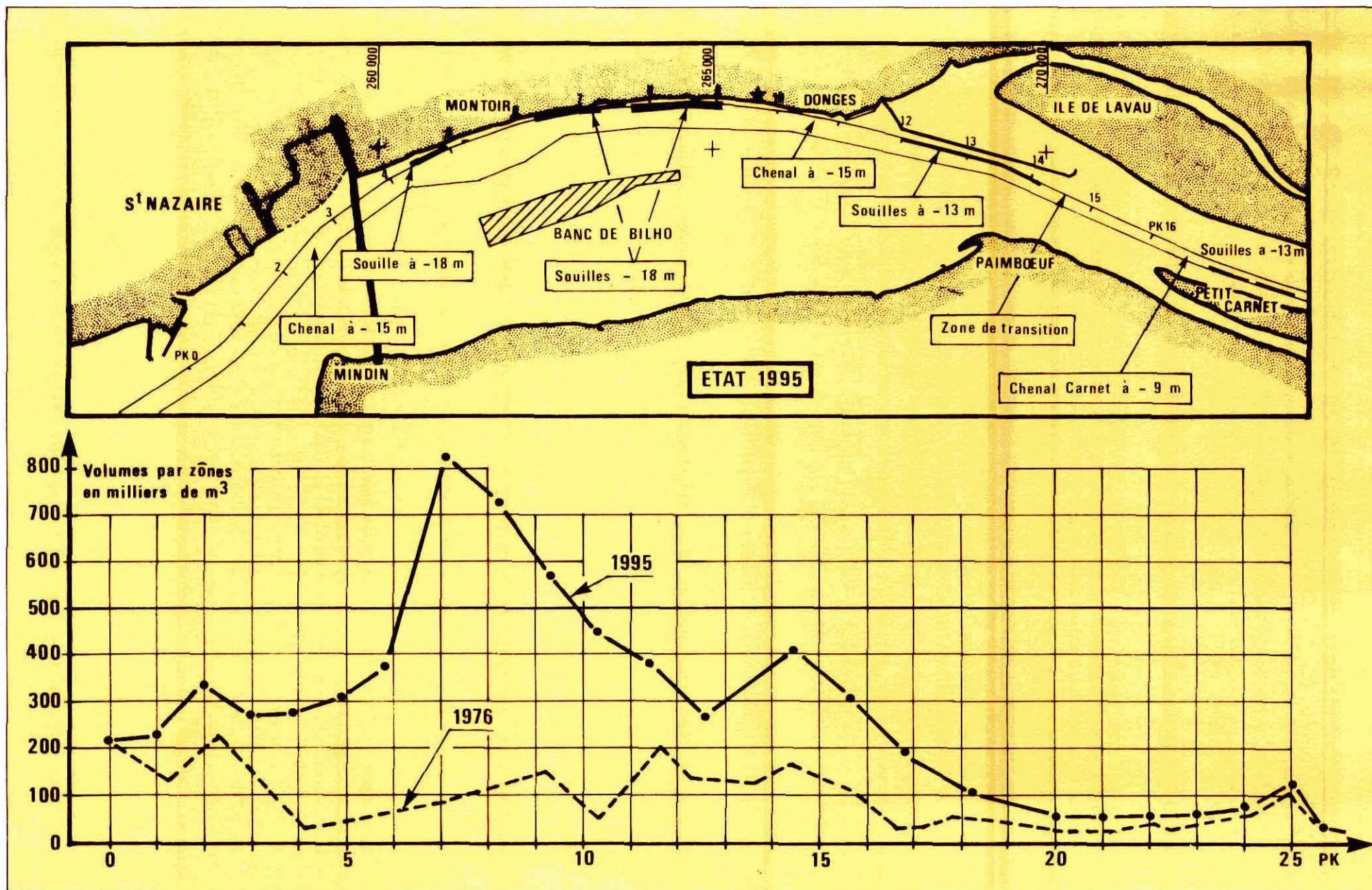


Fig. 13 - Répartition des dépôts dans le chenal. États 1976 et 1995 (modèle partiel).

Les dépôts se retrouvent principalement dans la zone d'évitage de Montoir, au niveau des postes aval de Donges où le taux de sédimentation dépasse 2 m/an (1,5 à 2 millions de m³ par an d'envasement sur une distance de 3 à 4 km), enfin dans les Brillantes, entre Paimboeuf et la pointe de l'île du Petit Carnet (près de 3 m/an de dépôt). Dans la région du Carnet où les courants de jusant sont bien canalisés, les dépôts sont très faibles. Cette augmentation des dépôts entre l'état 1976 et l'état 1980 est due à la réduction des vitesses par suite de l'approfondissement du chenal (diminution de 30 % des vitesses de fond dans certaines zones) et aux élargissements des sections dans les zones d'évitage qui entraînent des zones tourbillonnaires propices à la sédimentation sur la rive gauche du chenal.

Influence de la forme du dépôt de Bilho dans l'état de 1980

Ce banc joue un rôle de guidage des courants de jusant en les maintenant dans la zone Sud et en évitant que les eaux chargées de vase ne viennent se déverser dans le chenal de navigation en fin de jusant.

Par rapport à l'état des fonds de 1980 (chenal à -13,25m) sans dépôt de sable sur le Banc de Bilho, on note une réduction appréciable (20 %) des envasements dans le chenal de navigation en particulier dans la zone d'évitage de Montoir où les dépôts sont réduits de moitié lorsque le banc artificiel existe. Par contre, ce même ouvrage augmente la sédimentation au Sud de Bilho dans toute sa partie aval (20 % d'augmentation des dépôts par rapport à l'état sans banc artificiel).

État 1985 (fig. 12)

Dans l'état de 1985, sur la rive droite, une digue de 3000 m de longueur arasée à la cote +7,50m limite les vasières en aval de Lavau. Le dépôt de Bilho reste prolongé vers l'amont jusqu'au PK 10 et les fonds sont dragués à la cote 0m au niveau du seuil des Brillantes afin de tenter d'améliorer la circulation des eaux au Sud du Banc de Bilho.

Les dépôts dans le chenal de navigation sont, pour un dépôt de Bilho identique, assez voisins de ceux constatés avec l'état des fonds de 1980, la majoration des volumes d'envasement n'étant que de 8 % environ.

En fait, on assiste à un transfert des dépôts vers l'amont, en particulier vers la zone des Brillantes s'étendant entre Donges et Petit Carnet, où les profondeurs ont été augmentées par suite de l'abaissement des fonds à -9 m devant Carnet. Dans ce secteur, les volumes des dépôts sont pratiquement doublés par rapport à l'état 1980 tandis qu'entre Saint-Nazaire et Montoir, ils ne sont, dans l'état de 1985, que de 60 % de ceux mesurés en 1980.

La région de Carnet, bien que draguée à -9 m, ne subit pas d'envasement appréciable, les dépôts ne dépassant pas, entre le PK 16,6 et le PK 31 (Sardine), 10 % de la totalité des dépôts obtenus dans l'estuaire entre Sardine et Saint-Nazaire.

État 1990 (fig. 13)

Dans l'état 1990, les volumes d'envasement entre Saint-Nazaire et Carnet varient entre 6,5 et 7 millions de m³/an ; ils sont donc augmentés de 30 à 40 % par rapport à ceux mesurés dans l'état de 1980. Sur la totalité de l'estuaire, les dépôts atteignent près de 10 millions de m³ de vase non consolidée.

Une partie appréciable de ces envasements se retrouve dans la région des Brillantes entre Donges et Petit Carnet où l'on a 40 % de la totalité des dépôts compris entre Saint-Nazaire et Carnet (fig. 13).

On constate comme précédemment que les dépôts dans la région aménagée de Carnet sont faibles, ce secteur restant bien balayé par les courants. Par contre, devant Cordemais et légèrement en aval, on observe une augmentation des dépôts.

Possibilités d'aménagement des Brillantes (fig. 14, 15).

Par suite de l'importance des dépôts dans la passe des Brillantes, entre Donges et l'aval de l'île

de Petit Carnet, différentes solutions d'aménagements ont été envisagées.

Ce secteur de l'estuaire a toujours posé un problème pour l'entretien des profondeurs. Le fait d'avoir déplacé le chenal vers le Nord pour mieux desservir Lavau (fig. 14) n'a pas favorisé l'autodragage des fonds, les courants de jusant continuant d'emprunter la rive Sud. La mise en place d'un ouvrage de guidage sur 1 km de longueur en aval de Paimboeuf a amélioré légèrement les profondeurs dans le chenal mais les dépôts atteignent encore près de 2 m/an dans certaines zones. En amont de Paimboeuf, au PK 15, l'épaisseur des dépôts atteint 6m en 3 cycles annuels sur la rive droite du chenal, c'est à dire vers Lavau, et moins de 1 m sur la rive gauche devant Carnet.

Pour obtenir des résultats sensibles sur l'envasement des Brillantes, il faut implanter des digues-épis devant Paimboeuf, sur le bord Sud du chenal.

Avec ce type d'ouvrages comportant une digue en forme de S (fig. 15), les courants sont augmentés dans le chenal, au droit de Paimboeuf, aussi bien sur la rive gauche que sur la rive droite et peuvent dépasser en vives eaux 2 m/s en jusant et 1,75 m/s en flot. Les dépôts dans les Brillantes sont très fortement diminués (35 % dans toute la zone des Brillantes) par rapport à l'état de 1990 sans ouvrage ; on retrouve par contre des dépôts appréciables en amont et sur la rive droite tandis que sur la rive gauche devant Carnet les profondeurs se maintiennent. On constate également que cet ouvrage a une répercussion sur les dépôts entre Donges et Montoir (PK 11 à PK 7,7) où ils sont réduits à 25 % de leur valeur initiale environ et repoussés plus en aval entre Saint-Nazaire et Montoir où l'on constate une forte augmentation des dépôts, les volumes d'envasement étant doublés.

Il est probable que des solutions moins "agressives" pourraient être trouvées pour améliorer la zone des Brillantes en se rapprochant des digues de conca-

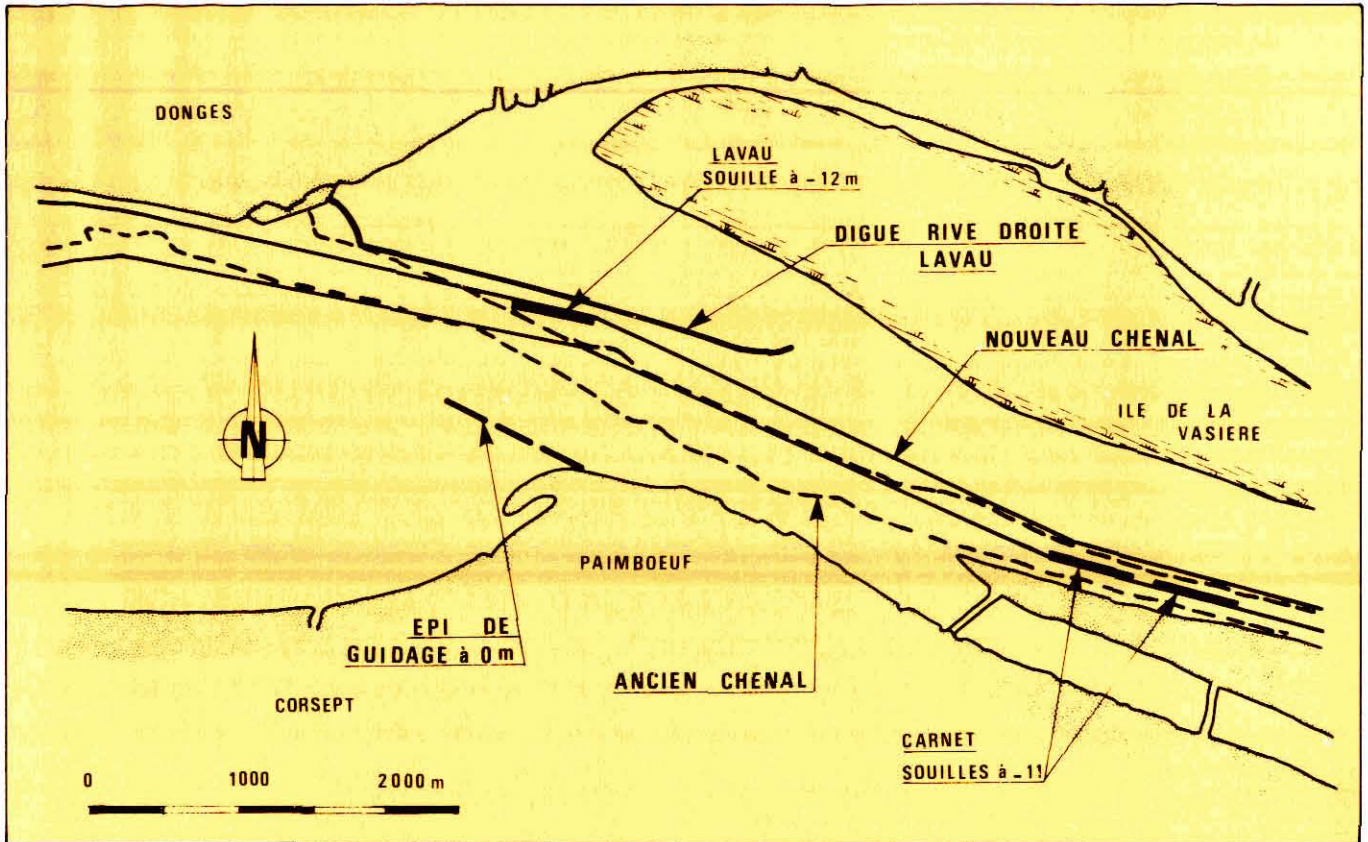


Fig. 14 - Déplacement du chenal vers le Nord dans la zone de Lavau.

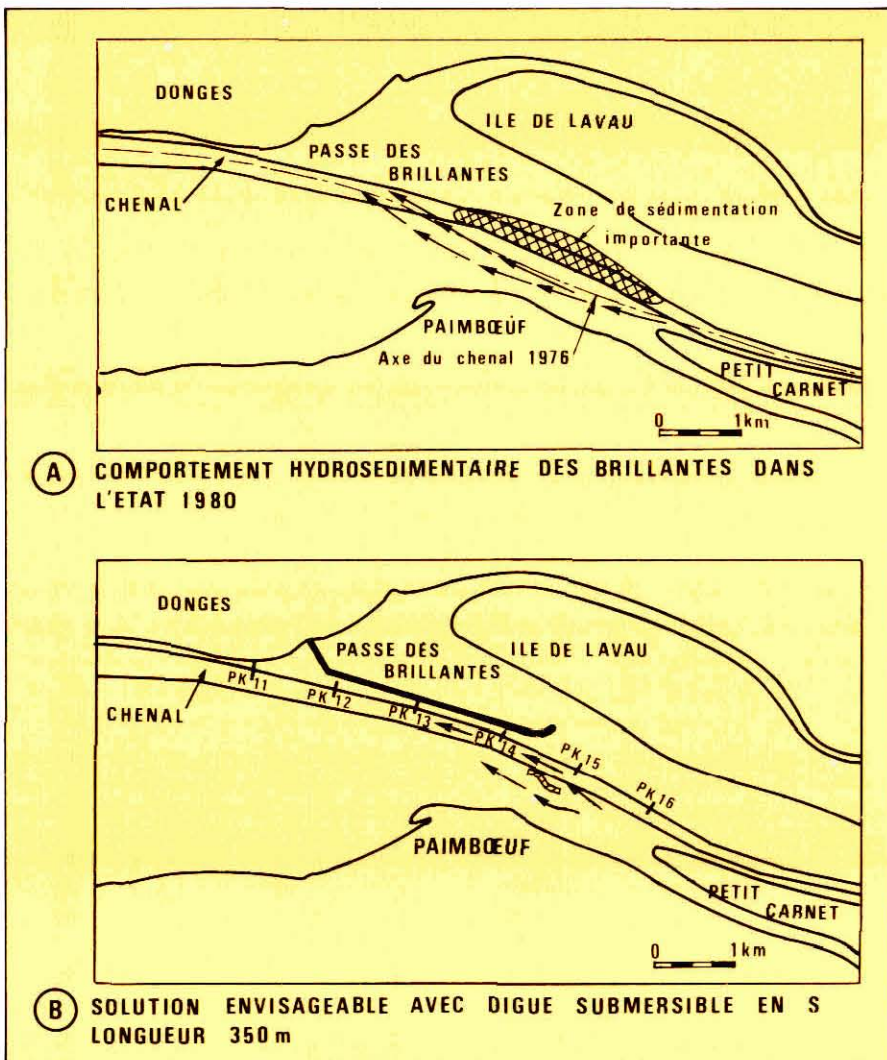


Fig. 15 - Aménagements des Brillantes.

vitité semi-submersibles enracinées sur la rive gauche et suffisamment prolongées vers l'aval pour bien guider les courants de jusant.

Comparaison des dépôts dans le chenal dans les différents états (fig. 16).

La figure 16 illustre les dépôts entre Saint-Nazaire et Petit Carnet.

Malgré de légères divergences entre les résultats obtenus sur le modèle d'ensemble et partiel, dues non seulement à des échelles du modèle différentes mais aussi à des implantations d'ouvrages qui ne sont pas rigoureusement identiques, en particulier pour le dépôt du Banc de Bilho, on voit que le volume global des dépôts constitués de vases fraîchement déposées (250 g/l) augmente dans de fortes proportions lorsque l'on approfondit le chenal de navigation entre Carnet et Saint-Nazaire.

Sur la totalité de ce secteur, les volumes de dépôts dans le chenal de navigation sont en moyenne 2,5 fois à 3 fois plus importants en 1980 avec un chenal à -13,25 m, qu'en 1976 avec un chenal à -10 m. En 1990, avec un

chenal à - 15m et Carnet à -9m, l'importance des dépôts est 3,5 à 4 fois supérieure à celle de 1976 par suite notamment d'une augmentation appréciable des envasements dans la zone des Brillantes.

Entre Donges et Saint-Nazaire, on retrouve en moyenne en 1980 un volume de dépôts 2,75 fois supérieur à celui de 1976 et 3,6 fois plus important en 1990.

En amont de Carnet, les dépôts dans le chenal de navigation sont peu affectés par les aménagements de l'aval de l'estuaire et si l'on retrouve des envasements appréciables devant Cordemais ainsi qu'à Nantes, en période d'étiage, on peut dire que toute la partie amont de l'estuaire ne présente pas de difficultés supplémentaires pour l'entretien de ses profondeurs sauf lorsque l'on passe à un chenal dragué à - 7m entre Cordemais et Nantes ; les dragages d'entretien peuvent alors atteindre 1,5 millions de m³/an dans ce secteur sans tenir compte des apports éventuels de sable.

3-3 Etude de l'envasement des zones limitrophes Les bancs de Bilho, de Lavau, de Cordemais L'expulsion des sédiments en aval de l'estuaire

3.3.1. Les zones limitrophes.

On retrouve sur le modèle, comme en nature, des dépôts importants dans les zones hors chenal et notamment au Sud de Bilho, sur les bancs de Paimbœuf - Les Brillantes et sur le banc de Cordemais.

D'une façon très générale, les approfondissements du chenal de navigation en aval de Donges et devant Carnet n'ont pas apporté de modifications dans le volume des dépôts hors chenal mais auraient au contraire tendance à les diminuer.

La zone située au Sud de Bilho s'est comblée progressivement depuis 1949 et se trouve dans toute sa partie amont au voisinage de son point d'équilibre vers la cote + 1,50 m. Les dépôts dans ce secteur tendent donc

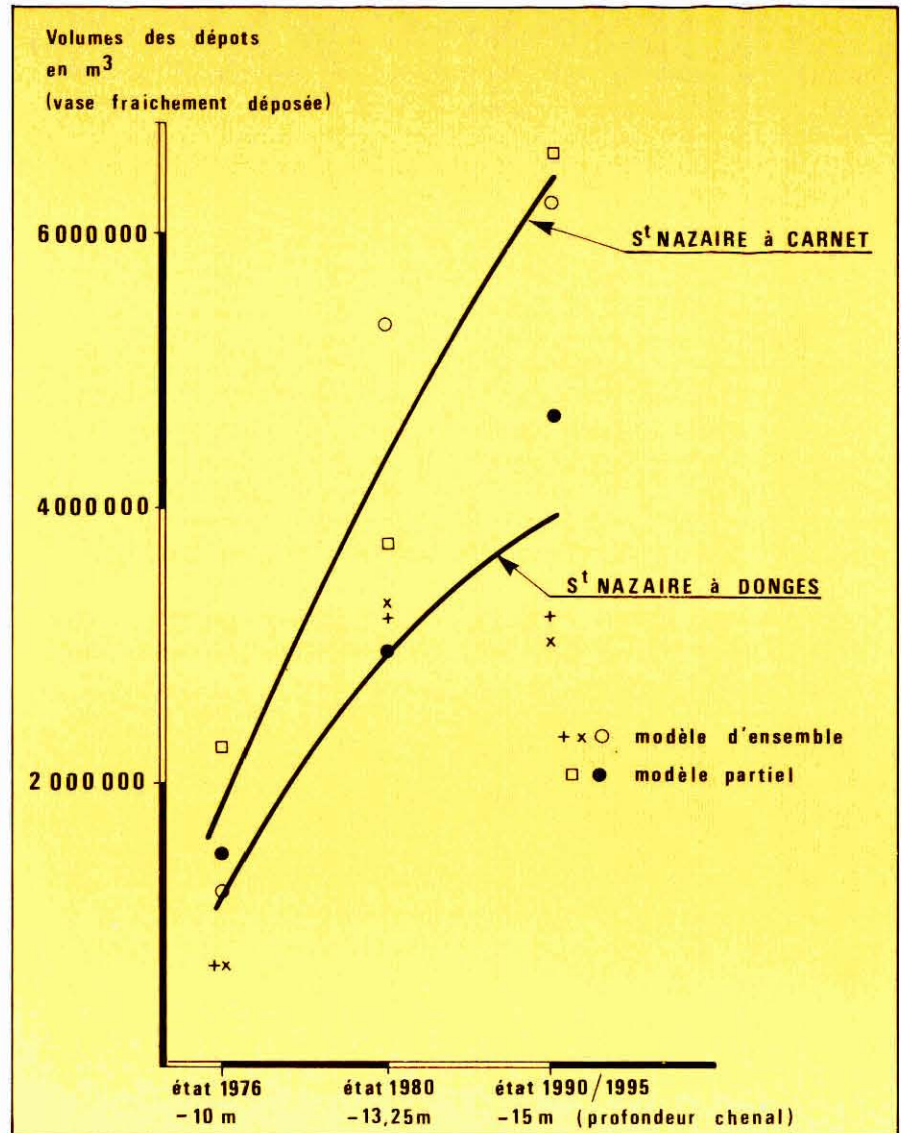


Fig. 16 - Évolution des dépôts dans le chenal aval.

après 1980 à colmater les zones plus profondes de l'aval pour tendre progressivement, comme le montreront les essais de longue durée, vers une grande vasière à la cote + 2 m environ de Mindin à Paimbœuf.

État 1976

En 1976, les dépôts de vase sur les zones limitrophes du chenal et les différents bancs atteignent des volumes légèrement supérieurs à ceux mesurés dans le chenal de navigation (3,5 millions de m³). La zone Sud du Banc de Bilho représente, à elle seule, plus de 50 % de ces dépôts, la zone située devant Paimbœuf jusqu'à Petit Carnet près de 20 % et l'on trouve encore 18 % dans le secteur qui s'étend de Donges à Cordemais.

Notons que ces valeurs conduiraient au Sud de Bilho à une

épaisseur moyenne des dépôts de près de 0,15 m/an.

État 1980

En approfondissant le chenal à -13,25m on augmente fortement la sédimentation dans le chenal de navigation mais en contrepartie on diminue de 25 % le volume total des dépôts dans la zone Sud de Bilho par rapport aux dépôts constatés en 1976.

Sur les bancs de Paimbœuf, Carnet et Donges-Cordemais les dépôts seraient par contre augmentés de 20 % en moyenne.

État 1990

Avec l'état de 1990 (chenal à - 15m) on retrouve des volumes de dépôts hors chenal identiques à ceux obtenus avec un chenal à - 13,25m (état 1980)

Au Sud de Bilho, on retrouve pratiquement les mêmes valeurs d'envasement que dans l'état de 1980 (10 % d'augmentation par rapport à l'état de 1976).

3.3.2. Expulsion des sédiments hors de l'estuaire

En comparant les quantités de matériaux alimentés à l'amont du modèle aux quantités déposées sur toute la superficie de l'estuaire, les ordres de grandeur de l'expulsion des sédiments hors estuaire peuvent être donnés pour les différents états d'aménagement et les conditions expérimentales réalisées c'est-à-dire sans représentation de crues exceptionnelles.

Le tableau ci-après donne les pourcentages de matériaux expulsés hors estuaire d'une part au cours des premières années qui suivent les travaux d'aménagement, d'autre part vers la fin du siècle avec l'aménagement initial de 1980.

On observe que l'approfondissement du chenal de navigation tend à réduire les sorties de matériaux de l'estuaire de façon appréciable par suite du piégeage des matériaux dans le chenal à l'intérieur de l'estuaire.

Par contre, vers la fin du siècle, les dépôts sur les zones hors chenal ayant tendance à se réduire comme on le verra dans les paragraphes suivants, le taux d'expulsion augmente légèrement si l'on maintient les profondeurs dans le chenal de navigation par

des dragages permanents (les sédiments étant supposés non remis en suspension) et très fortement si on laisse l'estuaire évoluer vers un nouvel état d'équilibre sans dragage du chenal. On trouverait alors une évacuation des dépôts pouvant atteindre près de la moitié des apports de l'amont.

3-4 Importance des dragages d'entretien du chenal de navigation

Au cours de l'année 1981, les dragages d'entretien ont atteint 7,3 millions de m³ (dragués et chargés, et dragués avec surverse) dont plus de 4 millions de m³ d'entretien uniquement dans la zone de Donges à Saint-Nazaire.

En 1982, on retrouve sur la totalité de l'estuaire une valeur des dragages du même ordre de grandeur avec plus de 8 millions de m³ chargés ou dragués par surverse. Pour le seul secteur de Donges à Saint-Nazaire, on atteint une valeur de près de 6 millions de m³.

Compte tenu que ces années 1981-1982 correspondent à des années de très fortes hydraulicités avec des apports de sédiments fluviaux en suspension de près de 2 millions de tonnes/an, on voit que les ordres de grandeur des dragages prévus par les essais en modèles réduits pour l'état des fonds de 1980 (chenal à - 13,25m) sont parfaitement retrouvés en nature.

On peut estimer qu'en année "normale" les dragages d'entre-

tiens nécessaires pour maintenir les profondeurs à - 13,25 m dans le chenal de navigation, avec raccordement avec les fonds naturels à Petit Carnet, seront de l'ordre de 7 millions de m³ pour la totalité de l'estuaire, dont 4 à 5 millions de m³ pour la région du chenal à - 13,25 m située en aval de Donges et dans la zone des Brillantes.

4 - Évolution de l'estuaire à long terme

Afin d'avoir une idée de l'évolution générale de l'estuaire au cours des prochaines décennies et notamment de toute la zone située au Sud du Banc de Bilho, un essai de longue durée a été réalisé sur le modèle d'ensemble.

Les vases étaient, comme pour les études précédentes, introduites à la limite amont du bief fluvio-maritime en admettant un apport moyen annuel de la Loire en matières solides en suspension de l'ordre de 1 million de tonnes par an et la salinité reproduite au large.

Cette étude entraine dans le programme que le C.S.E.E.L. s'était fixé afin d'améliorer les connaissances hydrosédimentaires de l'estuaire et prévoir l'évolution des profondeurs d'ici la fin du siècle en admettant que l'on maintient par des dragages annuels les profondeurs à la cote - 13,25 m entre Donges et le large ainsi que celles dans le chenal de raccordement entre Donges et Petit Carnet, la partie amont étant laissée dans son état naturel. Cette étude a été complétée par des essais effectués pour le compte du Port Autonome de Nantes/Saint-Nazaire en supposant que l'on arrête les dragages d'entretien du chenal, les profondeurs s'établissant ainsi autour d'un profil d'équilibre naturel.

4-1 Influence de l'évolution des fonds sur les phénomènes hydrauliques.

4.1.1. La propagation de la marée

La propagation de la marée est peu modifiée au cours de ces 20 prochaines années malgré une sédimentation appréciable dans

États	Premières années après travaux				Vers la fin du siècle	
	1976	1980	1985	1990	1980 avec dragage chenal	1980 sans dragage chenal
%	45	30	30	25	35	60

Tabl. 2 - Pourcentage de matériaux expulsés hors estuaire.

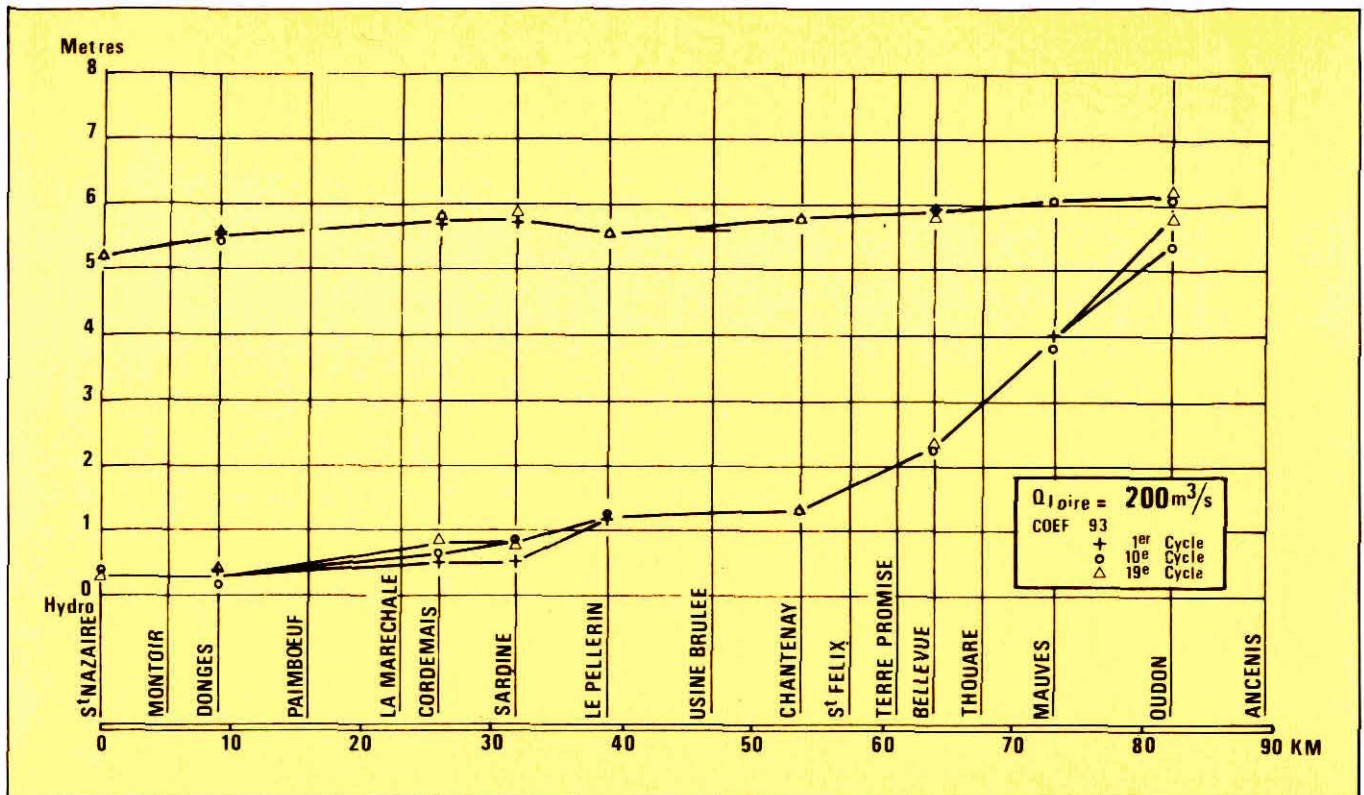


Fig. 17 - Influence de l'évolution des fonds à long terme sur les phénomènes hydrauliques. Evolution des lieux géométriques des PM et BM. Vives eaux (coef. 93). Débit 200 m³/s.

la partie aval de l'estuaire. Les lieux géométriques sont pratiquement les mêmes en 1980 qu'en l'an 2000 sauf très localement à basse-mer au niveau de Sardine-Cordemais où l'on constate une surélévation d'une vingtaine de centimètres ainsi que devant Oudon où la présence locale d'un dépôt de sédiments provoque une légère surélévation du niveau des basses-mers (fig. 17).

4.1.2. Les courants

Les courants sont peu modifiés dans l'estuaire en amont de Paimbœuf-Donges. Par contre, dans la région aval, ils subissent une évolution appréciable lorsque la région située au Sud de Bilho se sédimente.

Vers la fin du siècle, après colmatage partiel des fonds, les vitesses de flot et de jusant seront réduites de moitié au Sud de Bilho, le jusant ne durera que 3,5 heures. Par contre, les vitesses dans le chenal de navigation seront augmentées de 25 % pour le flot et de 15 % en jusant ce qui permettra de maintenir un certain état d'équilibre des profondeurs dans ce secteur.

4-2 Variation des profondeurs au cours du temps avec et sans dragage d'entretien du chenal de navigation

4.2.1. Sans dragage d'entretien du chenal de navigation

Zone du chenal de navigation

Sans dragage d'entretien, les profondeurs dans le chenal de navigation, entre Donges et Saint-Nazaire, retournent assez rapidement à une cote voisine de - 10 m, l'envasement étant rapide au cours des 4 premières années et très faible ensuite. Les zones d'évitage de Montoir et Donges sont les sièges d'importants dépôts atteignant 5 à 7 m.

Zone Sud de Bilho

La sédimentation de cette zone est surtout importante dans la partie aval où des dépôts de 3 à 4 m d'épaisseur apparaissent en 17 ans dans les zones profondes qui marquaient encore l'ancien chenal. Progressivement, les fonds s'exhaussent et tendent vers un état d'équilibre vers les cotes + 1,50 à + 2 m sur toute l'étendue de la zone Sud de Bilho.

Chenal intermédiaire et endigué

En amont de Petit Carnet, le chenal est très peu envasé sauf sur le banc situé en extrémité amont de Lavau où il y a une sédimentation entre les cotes zéro et + 6. Le banc de Cordemais s'étend également.

4.2.2. Avec dragage d'entretien annuel du chenal de navigation de St-Nazaire à Carnet (fig. 18)

Zone du chenal de navigation

Au cours des essais sur une période de 20 ans (1980-2000), on trouve au début de l'essai une valeur globale des dépôts de vase de 5 millions de m³/an mais l'on assiste au cours des temps à une progression sensible des dragages pour maintenir les profondeurs à la cote - 13,25 m. Parallèlement, les volumes des dépôts dans les zones hors chenal tendent à diminuer.

En 20 ans, on peut estimer que les volumes à draguer dans le chenal de navigation pour le maintien à - 13,25 m augmentent de 50 % environ.

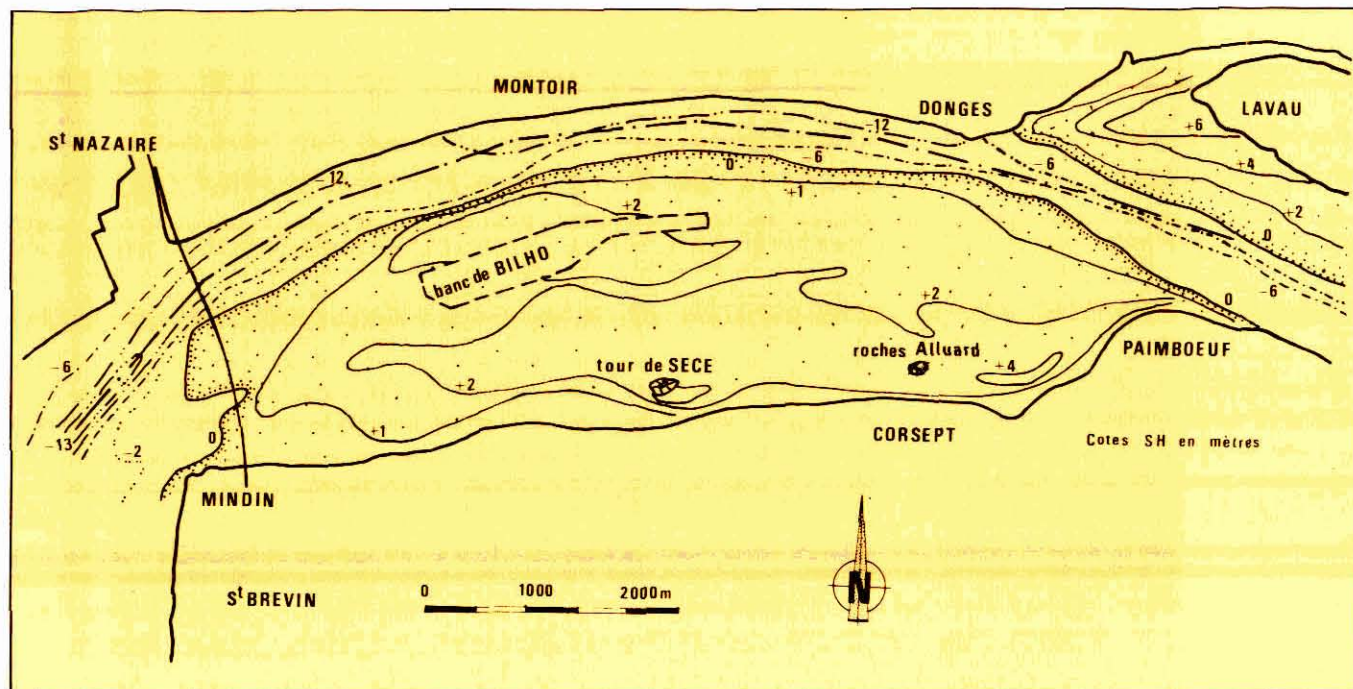


Fig. 18 - État des fonds de l'estuaire vers l'an 2000 (avec dragages d'entretien du chenal).

La progression des dragages annuels est surtout sensible dans la partie aval du chenal comme le montre le tableau ci-après .

Il est probable que cette augmentation des dépôts dans le che-

nal de navigation correspond à l'état d'équilibre des dépôts hors chenal.

Zone sud de Bilho

En 20 ans, l'épaisseur des dépôts atteint 3 m environ dans

les anciennes fosses situées à l'aval devant Mindin ainsi qu'entre Sécé et Rocher Alluard.

Les dépôts sur la partie amont devant Corsept sont très faibles, les fonds ayant déjà atteint en 1980 des cotes voisines du niveau des B.M.

Dans l'ensemble de la zone, les fonds tendent à s'équilibrer à des cotes moyennes de + 1,50 m, les extrêmes variant de + 0,5 à + 2,5 m.

Il est probable qu'à la longue la zone Sud du Banc de Bilho ne sera plus qu'une immense vasière balayée seulement par les courants de flot entre mi-marée et pleine-mer, les courants de jusant et les masses sédimentaires qui y sont attachées venant s'écouler principalement dans le chenal de navigation en amont du Banc de Bilho.

Zones	St-Nazaire Montoir PK 0 à 4,4	Zone évitage Montoir PK 4,4 à 7,6	Montoir Donges PK 7,6 à 12	Donges Petit Carnet PK 12 à 17	TOTAL en millions de m ³ /an	%
5 à 10 ans 1985-1990	0,25	0,85	2,5	2,0	5,6	100
10 à 15 ans 1990-1995	0,5	0,95	3,25	2,0	6,7	120
15 à 20 ans 1995-2000	0,75	1,7	3,9	2,2	8,55	150

Tabl. 3 - Dragages dans les différentes zones. Progression dans le temps.

Chapitre IV
L'UTILISATION DE L'ESTUAIRE
DE LA LOIRE POUR CERTAINS
AMÉNAGEMENTS INDUSTRIELS
ET URBAINS

Si l'estuaire de la Loire est attaché, avant tout, à une vocation nautique et portuaire, la qualité de ses eaux pour les besoins agricoles, urbains ou industriels, reste d'une grande importance. Par ailleurs, tout le long de cette voie naturelle d'accès, des aménagements tributaires des facteurs hydrosédimentaires pourront être développés, que ce soit pour l'aménagement de ports de plaisance ou pour la traversée de la Loire pour les besoins routiers ou ferroviaires.

Influence des centrales thermiques actuelles de l'Electricité de France, à Cordemais ou à Cheviré, prévision de l'action des futures centrales au Pellerin ou au Carnet, prises d'eau agricoles pour le canal de la Martinière, réserves d'eau douce dans les faux bras de la Loire, extraction possible de sable dans l'estuaire en amont de Nantes, aménagement d'un port de plaisance à Mindin, affouillements autour des piles de pont... autant de problèmes qui seront examinés dans ce chapitre.

1 - Influence des centrales thermiques.

1-1 Centrales de Cordemais et de Cheviré

La mise en service de deux nouvelles tranches de 600 MW chacune de la centrale de Cordemais — permettant de disposer d'une puissance totale de 3200 MW — nécessitera de porter le débit d'aspiration des eaux de refroidissement de 75 à 125 m³/s avec une élévation de température de + 8° C par rapport au milieu ambiant. Les études ont porté à la fois sur le champ thermique proche et sur le champ thermique lointain en prenant en compte non seulement la centrale de Cordemais mais son interaction avec la centrale de Cheviré à l'amont (débit maximum de 31 m³/s, $\Delta t = + 8^\circ \text{C}$) et le terminal méthanier de Montoir (débit 10 m³/s, $\Delta t = -4^\circ \text{C}$).

L'étude des isallothermes de + 0,5°, + 1°C, + 1,5°, + 2°C etc. permet de suivre la progression de la tache thermique dans l'es-

tuaire au cours de la marée ou de cycles de marées et de préciser les zones particulièrement touchées par une élévation de température. L'étendue des isallothermes supérieurs à 3°C dépend surtout du débit du rejet d'eau chaude ; il peut atteindre 3,5 à 6 km vers l'aval de Cordemais à basse-mer et pour des débits de rejet supérieurs à 100 m³/s avec des marées de vives-eaux. Les surélévations supérieures à 5°C ne dépassent pas 2 à 3 km. Vers l'amont, la contamination thermique est beaucoup plus limitée.

1-2 Centrale du Pellerin

Le projet d'aménagement d'une centrale nucléaire au Pellerin (PK 38) à 12 km en amont de Cordemais, ne nécessite que des volumes d'eau de refroidissement extrêmement faibles de 9 m³/s, l'augmentation de la température des eaux au rejet atteignant + 15°C en hiver et + 6°C en été.

L'impact thermique sur l'estuaire ne peut donc être que modéré ; par contre, il est souhaitable de préciser les conditions de dilution d'un effluent rejeté en solution dans ces eaux de refroidissement.

1.2.1. L'étude de la tache thermique

Les essais thermiques ont montré que le rejet se traduit par un panache dont l'élévation de température est inférieure à + 0,5 ° à 500 m du rejet. Par contre, au moment des renverses du courant, une tache de faible superficie se forme au niveau du rejet et conserve une certaine individualité avec des élévations de température de + 2 à + 3°C. Cette tache est entraînée par les premiers courants de flot ou de jusant sur des distances respectivement de 4 à 6 km avant d'être dissipée.

1.2.2. La dilution de l'effluent

Les eaux provenant d'une centrale nucléaire peuvent contenir accidentellement des éléments en solution susceptibles de se fixer sur les particules de vases et entraîner une pollution de l'es-

tuaire. Pour avoir une première idée de l'excursion de ces particules en solution dans les eaux, une étude de la dilution des rejets a été faite au cours de cycles de marées à coefficients variables et pour des débits fluviaux de 80 à 250 m³/s. La zone sensible s'étend du PK 50 jusqu'à l'aval de l'estuaire. Les dilutions que l'on rencontre dans cette zone seront, à l'équilibre, de l'ordre de grandeur du rapport entre le débit de rejet et le débit fluvial.

2 - Prises d'eau douce dans l'estuaire.

L'utilisation d'eau douce, ou tout au moins ayant une salinité très faible inférieure à 0,5 ‰, se retrouve tout le long de l'estuaire que ce soit pour l'alimentation de la ville de Nantes, à la Roche, pour des besoins agricoles avec l'alimentation des prés-marais de la Baie de Bourgneuf ou des prés salés de Loire en été, à des fins industrielles avec les différentes usines installées sur les rives de la Loire.

La remontée de l'intrusion saline au cours des dernières années, et notamment entre 1949 et 1978, a entraîné certaines difficultés pour l'approvisionnement en eau douce nécessitant de prévoir une gestion des installations en fonction des fluctuations de salinité au point considéré en tenant compte du débit fluvial, de la marée et du cycle de marées, de la profondeur de prélèvement etc.

2-1 Alimentation en eau douce des prés-marais de la Baie de Bourgneuf (fig. 1)

Les prés-marais de la Baie de Bourgneuf d'une superficie de 20 000 hectares sont associés à un système hydraulique complexe qui assure en période de crue l'évacuation en direction de l'estuaire de la Loire des eaux excédentaires du bassin versant et, en période sèche, l'alimentation en eau douce des marais par prélèvement dans l'estuaire de la Loire.

La prise d'eau douce peut se faire soit à Buzay, soit à La Martinière avec une alimentation gra-

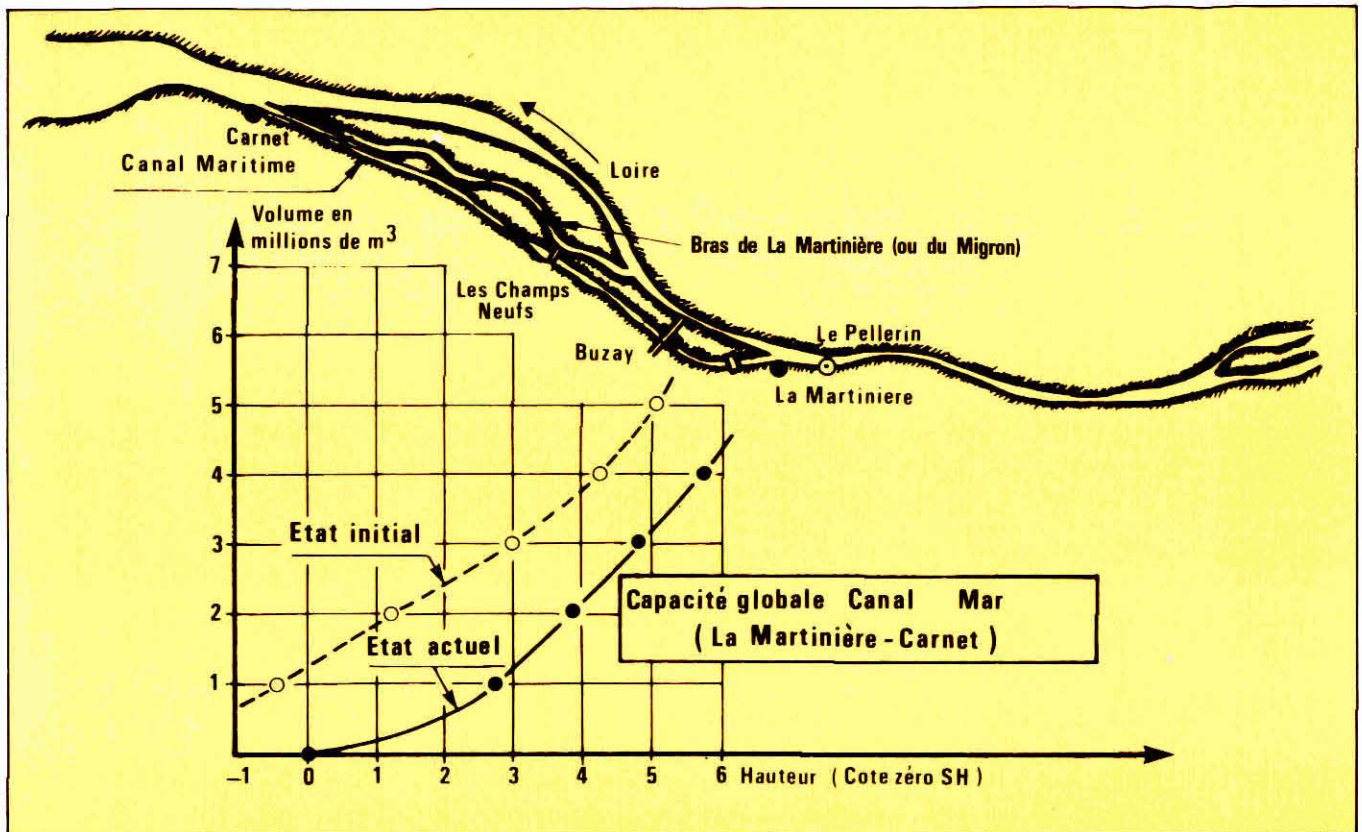


Fig. 1 - Exemple de possibilités de prélèvement d'eau douce ($S < 0,5 \text{ ‰}$) à Buzay. Influence du débit fluvial et du coefficient de marée.

vitaine ou par pompage vers le Canal Maritime ou le Canal de La Martinière qui peuvent être utilisés comme "réservoirs tampons". Les eaux douces stockées dans ce canal - dont la capacité atteint 5 millions de m^3 pour une hauteur de 6 m SH - sont ensuite envoyées dans les installations d'alimentation des marais.

En déplaçant la prise d'eau de Buzay à La Martinière (3 km en amont de Buzay), la qualité des eaux est améliorée dans des proportions appréciables et l'on pourrait à chaque marée prélever des eaux douces (salinité inférieure à $0,5 \text{ ‰}$) pendant 2 heures de plus pour des débits moyens et 1 heure de plus pendant les marées d'étiage.

En dehors de l'étiage exceptionnel ($70 \text{ m}^3/\text{s}$) d'Août 1976 pendant lequel les eaux sont toujours restées légèrement salées devant Buzay et La Martinière, il apparaît que depuis 1972 jusqu'à la fin de 1980, il était possible d'avoir des eaux douces devant La Martinière pendant plus de 3 à 4 h par marée.

Sur le plan des risques d'envasement, l'attention est attirée sur le fait que la zone de Buzay

- La Martinière occupe une position critique vis-à-vis du bouchon vaseux risquant ainsi d'entraîner, quelle que soit la période de prélèvements des eaux, des risques d'envasement des installations.

2-2 Création d'une réserve d'eau douce en amont de Nantes (fig. 2)

L'approvisionnement actuel en eau douce de l'agglomération nantaise et des installations d'irrigation s'effectue par pompage au fil de l'eau juste en amont de Nantes, dans un tronçon soumis à l'action de la marée.

En période d'étiage exceptionnel, la qualité de ces eaux peut être compromise par la remontée des eaux salées et des vases. Dans l'état de 1976, des difficultés importantes étaient apparues pour l'usine d'eau douce de La Roche et tous les essais réalisés montrent que dans l'état des fonds de 1980, l'usine de La Roche est à la limite du front de salinité maximale de $0,5 \text{ ‰}$ pour une marée de vives-eaux exceptionnelle se superposant à un débit fluvial d'étiage de $80 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour des débits fluviaux plus faibles ou si une surélévation météo-

rologique du niveau des eaux au large se produisait le pompage des eaux douces à La Roche devrait être arrêté pendant une partie de la marée.

Pour pallier ces risques, différentes solutions de barrages ont été étudiées. En dehors de la solution des seuils qui apportait un recul appréciable du front de salinité, ces barrages, réalisés à Bellevue, à Mauves ou à Oudon, n'ont pas apporté de solutions efficaces sauf si l'on décidait d'utiliser directement les eaux douces en amont du barrage pour alimenter les installations urbaines ou agricoles.

Une autre solution consistant en la création d'une réserve d'eau douce par isolement des faux bras entre Mauves et Thouaré a également fait l'objet d'étude. Les eaux douces ainsi stockées pourraient être ramenées par canalisation sur l'agglomération nantaise (fig. 2).

3 - Extractions de sable en amont de Nantes.

Pour compenser l'arrêt des extractions de sable en amont de Nantes, dont les effets étaient préjudiciables pour l'équilibre de

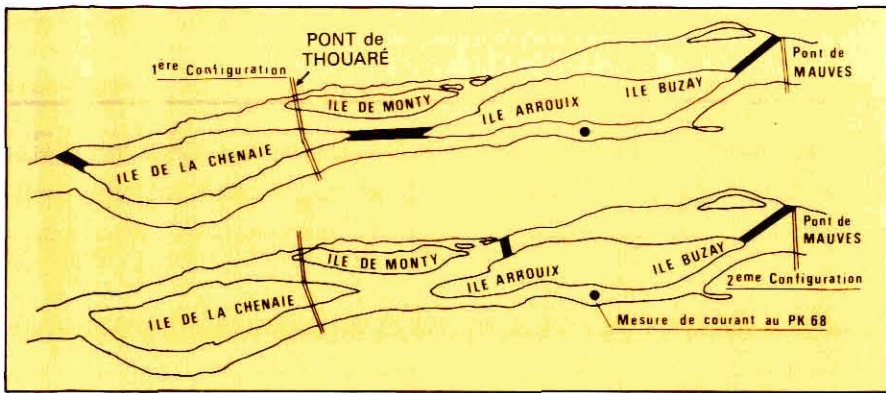


Fig. 2 - Création d'une réserve d'eau douce à l'amont de Nantes. Schéma des divers aménagements.

l'estuaire lorsque les volumes extraits dépassaient les possibilités d'apports naturels, il est envisageable de réaliser des emprunts de sable dans le faux bras de l'Ile Neuve et de l'Ile Macrière (P.K. 82 à 87) à condition de créer un ouvrage de régulation en amont de la zone d'extraction.

4 - Aménagement d'un port de plaisance à Mindin (fig. 3)

L'aménagement d'un port à Mindin (Saint-Brévin) dont une partie serait réservée à la plaisance et l'autre à la pêche, présente un intérêt indéniable sur le plan touristique. Situé dans un secteur soumis à la houle et aux courants de marée, cet emplace-

ment présente par contre l'inconvénient d'être tributaire de problèmes d'envasement qui ne peuvent que s'accroître à long terme par suite du colmatage progressif et naturel de toute la zone Sud de Bilho.

Pour fixer l'importance de ces difficultés et rechercher la solution la plus valable pour ce projet portuaire, cinq aménagements différents ont été examinés sur le plan hydraulique comportant une jetée de protection contre les houles orientées sensiblement Sud-Nord à la Pointe de Mindin et, dans certains cas, des ouvrages de guidage des courants ou d'enclôture permettant de réaliser un bassin portuaire entièrement protégé.

La présence d'une jetée de protection à Mindin risque d'engendrer une zone tourbillonnaire favorable à la sédimentation alors qu'en profilant cette jetée, on a des courants assez réguliers propices à un autdragage des fonds. Dans tous les cas, les courants restent orientés d'amont vers l'aval, les vitesses atteignant 0,70 à 0,90 m/s au maximum de jusant et en vives eaux.

En adoptant un port entièrement protégé par des ouvrages d'enclôture, on obtient une très bonne protection contre l'agitation et une parfaite tranquillité du plan d'eau mais les risques de décantation des sédiments ne sont pas négligeables (65 000 à 70 000 t/an représentant un volume de vase tassée de plus de 150 000 m³/an soit 1,5 m/an de dépôt).

Trois nouvelles implantations ont été étudiées sur le plan sédimentologique. La solution 1 comportait un port dragué sur sa totalité à - 2,50 m avec un terre-plein réalisé à la côte, la protection étant assurée du côté du large par une jetée de 150 m de longueur enracinée au Rocher Blanc et dans l'estuaire par une digue de 550 m parallèle à la rive, les courants pouvant circuler à travers le

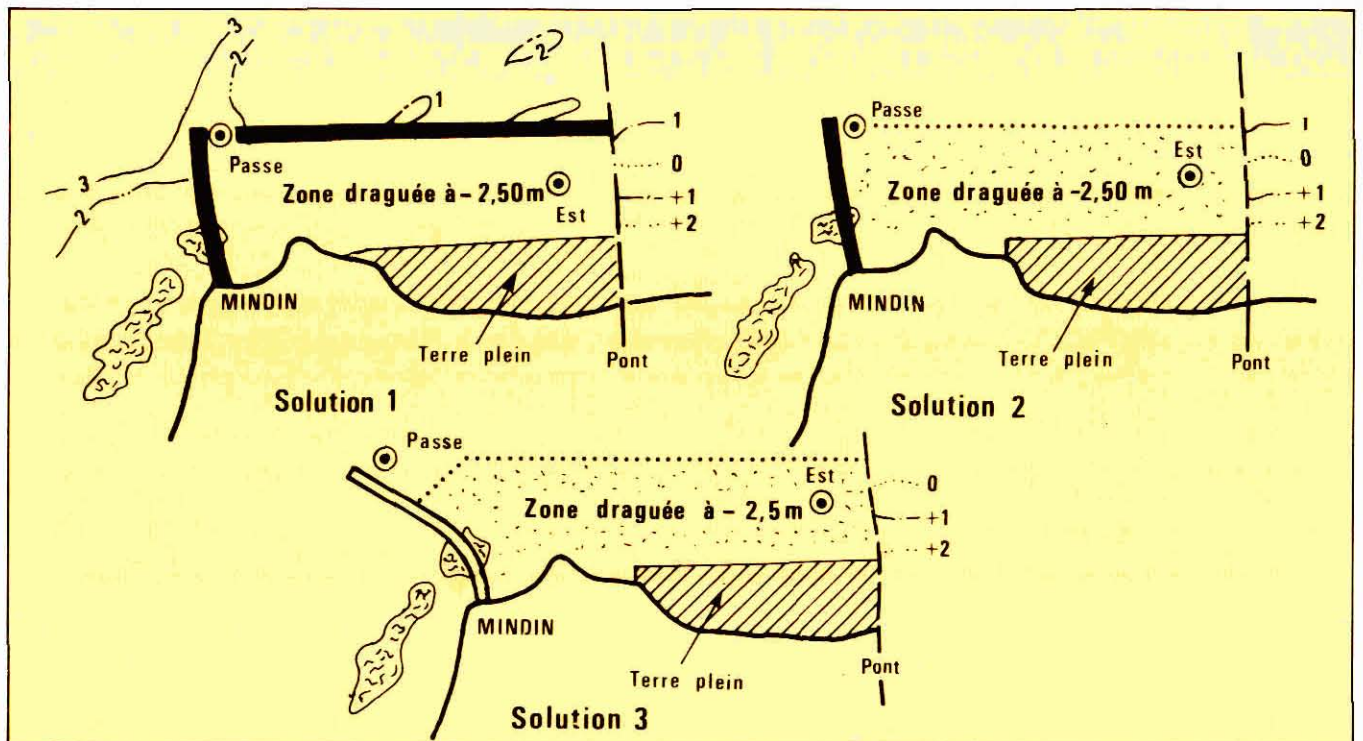


Fig. 3 - Étude sédimentologique du port de Mindin. Schéma des aménagements.

port. La solution 2 était identique à la précédente mais sans la digue de 550 m. La solution 3 était constituée par une jetée de 190 m de longueur orientée vers le Nord-Ouest, l'intérieur du port étant toujours dragué à - 2,50 m. (fig. 3)

Dans le cas d'un port semi-fermé (solution 1), l'envasement serait trois fois plus important qu'avec un port ouvert. Dans ce cas (solution 2), les dépôts sont concentrés surtout dans l'angle interne de la jetée où ils atteignent 2,80 m en deux ans et dans la partie centrale du bassin où les fonds s'exhaussent de près de 2 m en deux ans ; la première année qui suit les dragages à - 2,50 m l'épaisseur maximum des dépôts atteint 1,30 m/an environ. Le volume total des dépôts serait de 37 000 m³/an la première année et atteindrait 58 000 m³ après 2 années sans dragage.

5 - Ponts sur l'estuaire de la Loire

L'équilibre des fonds autour des piles d'un pont dépend des actions hydrauliques et sédimentologiques locales.

L'étude réalisée par le L.C.H.F. en 1981 correspondait à une recherche générale sur les érosions aux abords des piles de ponts en estuaire. Il avait été en effet constaté au cours d'études analogues sur d'autres estuaires qu'aux abords des anciennes piles de ponts, des affouillements

considérables étaient observés risquant de mettre en péril les installations.

A la suite d'une augmentation des volumes d'eau oscillants à l'emplacement des ponts, de l'abaissement du niveau des basses-mers, de la réduction des apports solides de l'amont... des affouillements de plus de 10 mètres pouvaient être obtenus en quelques années, les profondeurs passant de la cote 0 à la pile à - 27 m à une quarantaine de mètres, les pentes des talus étant très supérieures aux pentes d'équilibre des matériaux naturels. Grâce à des pavages de ces fosses par des enrochements appropriés, les phénomènes évolutifs ont pu être stoppés dans de nombreux cas et la pérennité du pont assurée ; dans d'autres cas, des dommages importants sont survenus.

Ces tendances se retrouvent dans l'estuaire de la Loire nécessitant des confortations d'ouvrages.

Le pont SNCF de la Vendée, à Nantes, réalisé en 1880, présentait en 1980 des fosses atteignant - 21 m à 60 m à l'aval du pont et - 5 m à l'amont (contre - 2 m en 1940). La pente des talus était de 35 %, correspondant au maximum possible de la stabilité. L'augmentation très importante de la propagation de la marée dans ce secteur ainsi que la réduction des apports terrigènes sont à l'origine de ces affouillements qui ont pu être accentués

par une réduction de la section d'écoulement entre piles.

Le pont de Thouaré situé à 15 km en amont de Nantes présente 4 fosses d'érosion avec des profondeurs qui atteignaient en 1979 des cotes de - 17,50 m à - 19 m (NGF) à 30 m à l'aval du pont et de - 3 à - 4 m à l'amont. Il est probable que ces érosions sont à rattacher à l'abaissement général du niveau des basses-mers de la Loire (4 m à l'étiage en un siècle, 2 m entre 1955 et 1975), à la fermeture du bras Nord (vitesse de l'écoulement doublée en 50 ans) et à la réduction des apports sableux de l'amont.

Le pont de Mauves situé à 20 km en amont de Nantes, présente des fosses moins importantes atteignant - 8 m à l'aval du pont et - 2,50 m à l'amont. L'abaissement de 2,50 m environ du niveau d'étiage lié à la réduction des apports terrigènes suffisent à expliquer ces affouillements.

Le pont de Champtoceaux à Oudon, situé à 30 km en amont de Nantes, est à la limite de l'action de la marée. Les profondeurs maximales des fosses atteignaient - 8 m à l'aval et - 3 m à l'amont, le niveau inférieur des fondations étant à - 4,4 m. Il semble que l'apparition de ces fosses soit assez récente (une dizaine d'années). Ces approfondissements sont à rattacher à l'abaissement du lit de la Loire à la suite d'extraction d'agrégats en amont de Nantes et peut-être à la rectification du cours de la Loire.

Deuxième partie

**LA QUALITÉ DES EAUX
ET LE MILIEU VIVANT
DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE**



INTRODUCTION

L'environnement hydrobiologique de l'estuaire de la Loire a suscité des recherches concernant les domaines et objectifs suivants :

- . les rejets et la qualité des eaux dans l'estuaire de la Loire, avec l'inventaire et l'analyse comparative des flux polluants, et les conséquences quant à la qualité de l'eau;

- . les caractéristiques des peuplements planctoniques, principalement leurs variations spatio-temporelles;

- . les peuplements benthiques constituant, en raison de

leur quasi-sédentarité, un indicateur biologique fidèle de la qualité du milieu; il convenait d'en établir une cartographie, de suivre l'évolution saisonnière de certains peuplements de zones riches pour en estimer la production annuelle, d'évaluer grâce à ces données l'état actuel des peuplements et de le comparer à celui d'autres estuaires;

- . les ressources benthodémersales, principalement celles présentant un intérêt économique: il s'imposait de les inventorier le mieux possible, par diverses méthodes, afin d'en

recueillir les différents stades de croissance présents dans l'estuaire et d'observer l'évolution de leurs densités et biomasses; pour certaines espèces d'intérêt économique une étude de répartition spatio-temporelle et de leur régime alimentaire a été effectuée afin de localiser leurs nourriceries et d'établir ainsi l'importance du rôle écologique de l'estuaire pour ces espèces.

Les rapports rendant compte des travaux réalisés et des résultats obtenus sont présentés dans les quatre chapitres qui suivent.

Chapitre I
LES REJETS ET LA QUALITÉ
DES EAUX DANS L'ESTUAIRE
DE LA LOIRE

1 - Les rejets dans l'estuaire de la Loire.

L'inventaire et l'évaluation des apports dans l'estuaire de la Loire ont été faits depuis l'amont au niveau de Montjean jusqu'à St-Nazaire - Mindin à l'aval.

Ce bilan a été établi à partir des données des années 1981-1982 recueillies par enquêtes auprès des industriels et des services techniques ou administratifs compétents. De plus des prélèvements et analyses effectués sur les déversements les plus importants se sont avérés indispensables pour vérifier, compléter et mettre en cohérence les données recueillies.

Il a été ensuite possible de déterminer un flux global par polluant considéré qui a été comparé au flux continental transité par la Loire avant son entrée dans la partie fluvio-maritime. Ce flux continental a été calculé à la station de Montjean pour trois débits: 100m³/s; 800m³/s; 3000m³/s, correspondant respectivement à l'étiage, au module et à une crue moyenne.

1-1 Inventaire et cartographie des rejets.

En première approche, les rejets urbains ont été distingués des rejets industriels parce qu'ils représentent traditionnellement des pollutions de nature différente.

1.1.1. Rejets urbains (fig. 1)

En matière d'assainissement collectif, le dimensionnement des ouvrages d'épuration nécessite d'apprécier le flux de pollution brut à traiter à l'entrée dans les stations.

La quantité de pollution brute est généralement exprimée en équivalent-habitant; elle correspond à 90 g/j de M.E.S., 57 g/j de matières oxydables, 15g/j d'azote, 4 g/j de phosphore. Ce mode d'évaluation a été adopté pour permettre de hiérarchiser l'importance des sources de pollutions urbaines dans la représentation cartographi-

que (fig. 1). Chaque source est signalée par un disque dont le rayon varie selon le nombre d'équivalent-habitants, l'éventail des flux bruts se situant dans l'intervalle compris entre 500 et 500000éq.-ha.

Par contre les quatre éléments (DBO, DCO, MES, Azote) qui composent les flux résiduels déversés en Loire figurent à l'intérieur des disques. Ils déterminent quatre secteurs circulaires dont les ouvertures sont respectivement proportionnelles au poids de chaque élément dans la charge déversée. Pour chaque élément considéré, la valeur du flux déversé, exprimée en kg/jour est indiquée par le chiffre inscrit dans les secteurs correspondants.

L'essentiel des apports se trouve situé au niveau des grandes agglomérations. En amont de l'estuaire on note l'importance du rejet de la station d'épuration de Nantes-Nord (72000m³/j et 500000éq.-ha.) et la station de la Petite Californie de Nantes-Sud (18000m³/j et 200000éq.-ha.). En aval de l'estuaire, au niveau de St-Nazaire (160000éq.-ha.) on trouve les rejets de St-Nazaire-Sautron (7800m³/j) et St-Nazaire-Gron (5200m³/j). L'amont de Nantes et

l'estuaire-central ne représentent quant à eux que 50000éq.-ha. et 100000éq.-ha. Le bilan des flux résiduels rejetés par les stations d'épuration urbaines figure au tableau 1.

1.1.2. Rejets industriels (fig. 2).

La gamme des éléments présents dans les rejets industriels est plus large. Les indicateurs retenus sont au nombre de huit dont les valeurs peuvent varier de 1kg/jour à 7500kg/jour (MES, DCO, DBO₅, Azote, sels, métaux, hydrocarbures, graisses).

Ils sont représentés sur la figure 2 par des bâtons dont la hauteur est fonction du flux rejeté. Sur chaque bâton sont portées les valeurs des différents flux exprimés en kg par jour et à l'intérieur de la flèche de localisation de la source figure le volume d'eau rejeté exprimé en m³ par jour. La présence du thermomètre à proximité d'un établissement indique qu'il s'agit d'un flux thermique dont la température est en moyenne supérieure à 30°C pour les rejets chauds.

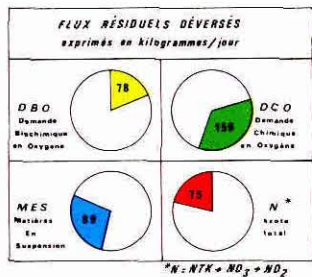
Les flux résiduels industriels dans l'estuaire sont regroupés dans le tableau 2.

Débit	120700 m ³ /j	MES	10695 kg/j
DBO ₅	9758 kg/j	Azote	3557 kg/j
DCO	21813 kg/j	Phosphates	1155 kg/j
		Sels	10000 kg/j

Tabl. 1 - Bilan des flux urbains déversés dans l'estuaire.

Débit	236000 m ³ /j	Cr	21 kg/j
DBO ₅	7870 kg/j	Al	8,5 kg/j
DCO	14932 kg/j	Zn	33 kg/j
MES	5100 kg/j	Graisses	900 kg/j
Azote	2255 kg/j	Sulfates	10926 kg/j
Fe	5286 kg/j	Chlorures	540 kg/j
Pb	26,5 kg/j	Phosphates	820 kg/j
Cu	6,5 kg/j	Rejets thermiques	15,210 ⁶ m ³ /j

Tabl. 2 - Bilan des flux industriels déversés dans l'estuaire.



FLUX BRUTS EXPRIMÉS EN NOMBRE
D'ÉQUIVALENT HABITANTS

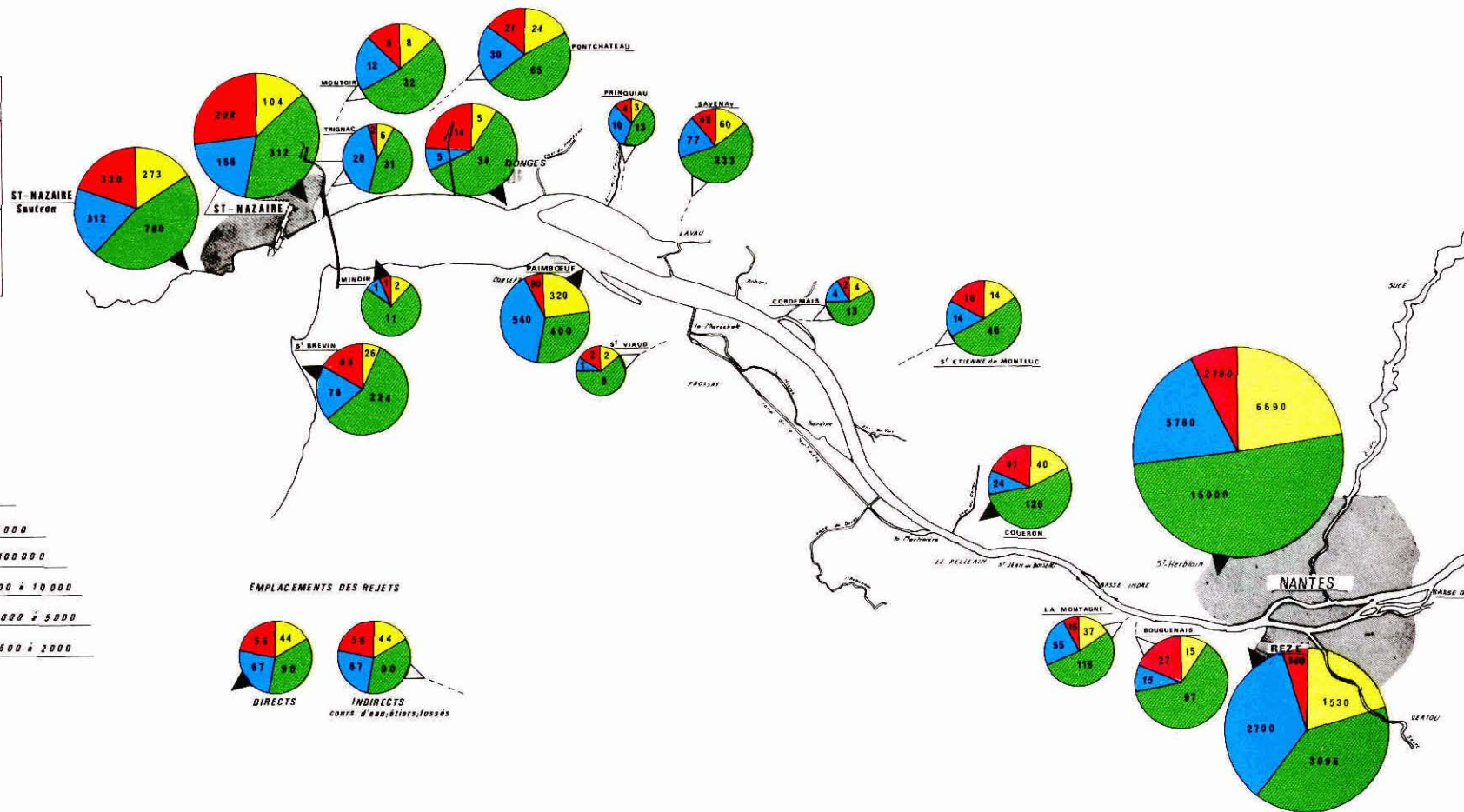
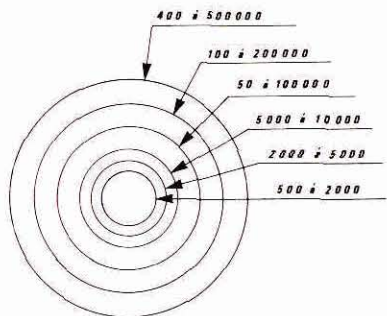


Fig. 1 - Rejets urbains dans l'estuaire de la Loire (PANSN).

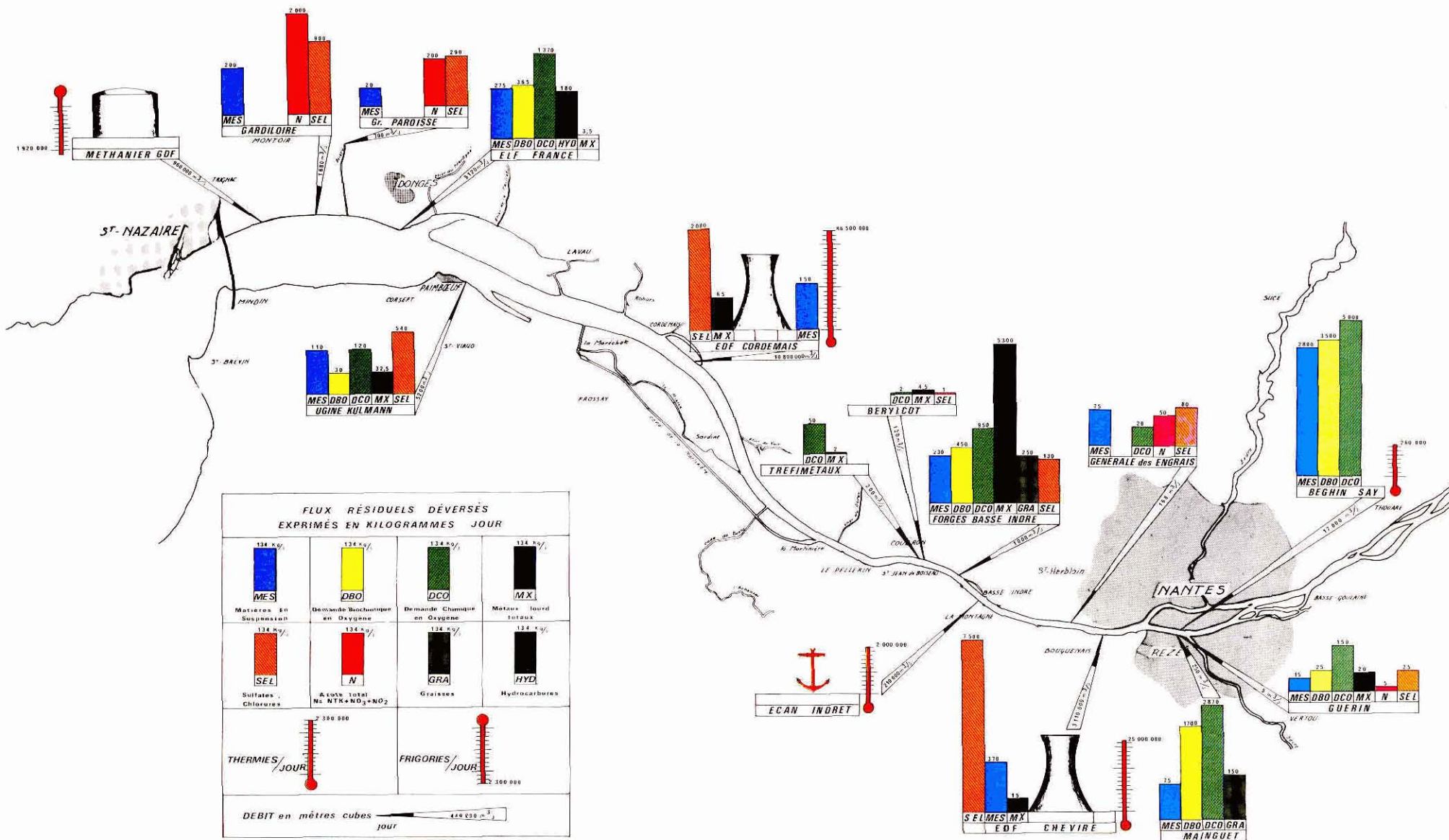


Fig. 2 - Rejets industriels dans l'estuaire de la Loire (PANSN).

1-2 Analyse comparative des flux polluants.

Le total des flux urbains et industriels déversés dans l'estuaire est résumé sur le tableau 3.

Les flux transités par la Loire à Montjean pour les trois débits sont résumés sur le tableau 4. Afin de comparer les différents apports entre eux, nous avons choisi d'analyser les éléments communs suivants: MES, DBO₅, DCO, Azote, Phosphates, Métaux, Température.

1.2.1. Les matières en suspension (M.E.S.).

La masse des M.E.S. déversée quotidiennement dans l'estuaire est de 50t/j dont 15t pour les rejets urbains et industriels et 35t pour les rejets de deux types d'activité qu'il convient de dissocier et qui sont:

- d'une part des déversements des boues issues des stations de traitement d'eau de Loire pour la production d'eau potable ou d'eau industrielle;

- d'autre part, les activités sablières en plein développement sur les rives de l'estuaire.

Pour apprécier l'importance relative de ces apports en M.E.S. il faut noter qu'il ne représentent que 10% environ du flux journalier de la Loire en période d'étiage (430t/j). Exprimés en flux annuels ces mêmes déversements ne représentent que 5% du stock sédimentaire de l'estuaire, qui est de l'ordre de 600 000 à 1 million de tonnes.

1.2.2. La demande biologique en oxygène (DBO₅)

La DBO₅ représente la consommation d'oxygène par les micro-organismes au bout de 5 jours.

Le bilan global des flux journaliers de DBO₅ déversés en Loire est de 18 tonnes dans lequel la fraction représentée par les effluents urbains est de 10 t soit plus de 50%. Dans cette charge, le poids de la station d'épuration de Nantes-Nord est de 6,7 tonnes en situation actuelle et de 1,5 t pour la station de Nantes-Sud.

La charge en DBO₅ rejetée par les industriels est de l'ordre de 8t/j, l'industrie agro-alimentaire intervenant pour près de 90% dans la partie amont de l'estuaire (laiterie St Florent, Beghin-Say, Mainguet).

En se référant à Montjean, il ressort que le flux total en DBO₅ rejeté dans l'estuaire représente 35% des apports amont de la Loire en étiage, 10% du module, et tombe à moins de 2% en période de crue. Il apparaît donc que le flux de DBO₅ rejeté dans l'estuaire prend une importance significative en période d'étiage.

1.2.3. La demande chimique en oxygène (DCO).

La DCO représente la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder l'ensemble de la matière organique biodégradable ou non.

La charge totale en DCO rejetée dans l'estuaire est de 37t/j dont 22t pour les rejets urbains et 15t pour les rejets industriels; à noter que la ville de Nantes avec un flux résiduel de 15t intervient pour 40% dans la charge totale déversée dans l'estuaire.

Les rejets dans l'estuaire ont cependant une charge faible en DCO, tant en valeur absolue qu'en valeur relative puisqu'ils ne représentent que 12% du flux de la Loire en période d'étiage et 2% en débit moyen.

Dans l'estuaire, l'ensemble des rejets a un rapport DCO/DBO de 2,1 ce qui témoi-

Débits = $356700 \text{ m}^3/\text{j} + 15,2 \cdot 10^6 = 15,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{j}$ soit $180 \text{ m}^3/\text{s}$			
DBO ₅	17650 kg/j	Métaux	5400 kg/j
DCO	36750 kg/j	Graisses	900 kg/j
MES	15800 kg/j	Sels	21500 kg/j
Azote	5800 kg/j	Phosphates	2000 kg/j

Tabl. 3 - Bilan des flux industriels et urbains déversés dans l'estuaire.

Paramètres	Débit	Débit	Débit
	Q = 100 m ³ /s	Q = 800 m ³ /s	Q = 3000 m ³ /s
	Flux	Flux	Flux
MES	430 t/j	3500 t/j	15000 t/j
DCO	300 t/j	1750 t/j	7800 t/j
DBO	52 t/j	210 t/j	1170 t/j
NH ₄	0,430 t/j	7 t/j	156 t/j
NO ₂	0,350 t/j	5 t/j	39 t/j
NO ₃	30 t/j	630 t/j	3120 t/j
Cl	200 t/j	1400 t/j	5200 t/j
SO ₄	170 t/j	1400 t/j	5200 t/j
PO ₄	0,430 t/j	35 t/j	104 t/j
Cu	34 kg/j	280 kg/j	1 t/j
Fe	990 kg/j	8 t/j	30 t/j
Pb	13 kg/j	103 kg/j	380 kg/j
Cr	26 kg/j	210 kg/j	780 kg/j
Zn	1290 kg/j	10,5 t/j	40 t/j

Tabl. 4 - Apports journaliers de la Loire à Montjean dans trois conditions de débit.

gne, d'un point de vue global, d'une pollution à dominante organique. Par contre à Montjean on trouve dans la Loire un rapport moyen DCO/DBO de 7, signe de la présence de matières polluantes plus difficilement biodégradables.

1.2.4. Azote.

La somme totale des flux journaliers d'azote déversés dans l'estuaire est de 5,8t/j soit environ 20% du flux amont en étiage et 1% en débit moyen.

Cette comparaison permet de fixer les idées en valeur relative, mais il convient cependant de noter que les rejets azotés sont concentrés en deux points de l'estuaire :

- au niveau de Nantes, les stations de Tougas et Petite Californie totalisent un flux journalier de 2,5t/j soit 43% de l'ensemble des déversements, Tougas représentant à elle seule plus de 35%;

- au niveau de Saint-Nazaire, les usines d'engrais (Gardiloire, Grande-Paroisse) et les stations d'épuration de St-Nazaire Gron et St-Nazaire Sautron déversent un flux journalier de 2,7t/j dans lequel l'usine de Gardiloire participe pour 75%.

Ces deux "foyers" de rejet se partagent 85% du flux global azoté déversé quotidiennement dans l'estuaire.

1.2.5. Phosphates.

La charge totale déversée dans l'estuaire peut être évaluée à 2t/j. Les rejets urbains représentent 1,2t/j dont la moitié pour la station d'épuration de Nantes-Tougas. Les rejets industriels représentent 0,8t/j dont 0,4t/j pour la Générale des Engrais de Basse-Indre et 0,4t/j pour les industries d'engrais de l'aval. Il convient de noter que 60% des apports se font à l'amont de l'estuaire.

En période d'étiage la charge totale rejetée paraît importante puisqu'elle représente plus de 4 fois le flux amont de la Loire. En période de débit moyen par contre, les rejets ne représentent que 6% environ des apports amont.

1.2.6. Les Métaux.

Il n'est question ici que des métaux dosés dans la phase soluble des effluents industriels, alors que la phase particulaire joue un rôle majeur comme agent vecteur des métaux. On peut donc supposer que les flux mesurés sont inférieurs à la réalité puisque les contrôles systématiques effectués sur les rejets industriels ne portent que sur l'eau. En outre, les rejets urbains ne font généralement pas l'objet de dosages des éléments métalliques sauf à l'occasion d'études spécifiques menées sur les agents inhibiteurs des filières biologiques de traitement.

Les principaux éléments métalliques rejetés dans l'estuaire sont :

Le Fer :

5,2 t/j essentiellement par les Forges de Basse-Indre ; à noter qu'en 1983 ces apports ont fortement diminué par suite des travaux d'amélioration entrepris ;

L'Aluminium :

8,5 kg/j, au niveau de Paimbœuf à Usine-Kuhlman ; il faudrait cependant prendre en compte les rejets de boues des stations d'épuration (alumine) ;

Le Zinc :

30 kg/j, au niveau des parcs à cendres et à charbons (Cheviré, Cordemais, Montoir) ;

L'Étain :

60 kg/j, aux Forges de Basse-Indre (étamage) ;

Le Cuivre :

6,5 kg/j, provenant des Établissements Tréfinmétaux et Berylcot à Couëron ; à titre indicatif ces apports représentent 20% des apports de la Loire en période d'étiage ;

Le Chrome :

les deux sources principales proviennent de la tannerie Guérin (20 kg/j) à Nantes et de la raffinerie de Donges (1 kg/j) ; comparés au flux amont estimé à 210 kg/j pour un débit de Loire de 800 m³/s, ces rejets représentent 10% ; il convient de signaler que les Établissements Guérin ont cessé leur activité en 1983 ;

Le Plomb :

le flux total de plomb rejeté dans l'estuaire est de 26,5 kg/j soit le double des apports de Loire en période d'étiage (12,6 kg/j) et 25% par débit moyen (103 kg/j) ; la principale source de rejet de cet élément se situe au niveau de Paimbœuf et provient des Établissements Octel-Kuhlman qui déversent en Loire, après traitement, 24 kg par jour de plomb total.

Pour apprécier l'importance relative de ces apports en M.E.S. il faut noter qu'il ne représentent que 10% environ du flux journalier de la Loire en période d'étiage (430t/j). Exprimés en flux annuels ces mêmes déversements ne représentent que 5% du stock sédimentaire de l'estuaire, qui est de l'ordre de 600 000 à 1 million de tonnes.

1.2.7. La Température.

La zone de transition que constitue l'estuaire connaît d'importantes variations saisonnières de température (28° C en août ; 0,5° C en janvier). Le profil longitudinal montre une décroissance de la température d'amont en aval en été et une croissance en hiver. La variation de température dans l'estuaire est en outre liée aux rejets thermiques. Diverses industries utilisent l'eau de l'estuaire comme réfrigérant et déversent ainsi des flux thermiques plus ou moins considérables. Nous retiendrons cinq grandes sources thermiques totalisant un débit de 15.10⁶ m³/jour, soit 96% du volume total des rejets dans l'estuaire. A titre de comparaison, cela équivaut à 170 m³/s, soit deux fois le débit d'étiage de la Loire en 1976 à Montjean.

D'une part il s'agit des rejets d'eaux chaudes qui déversent dans l'estuaire une quantité de chaleur de l'ordre de 115.10⁶ thermies par jour :

- la Centrale thermique de Cheviré avec des rejets maximaux de 3 millions de m³/j, un Δt de + 7°C au rejet et un panache thermique de + 1°C sur 15 km environ ;

- la Centrale thermique de Cordemais (tranches 1 à 5) avec

des rejets maximaux de 10 millions de m³/j, un Δt de + 8°C au rejet et un panache thermique de + 1°C collé en rive nord sur 31 km (Donges);

- l'Écan d'Indret qui rejette 360 000 m³/j d'eaux chaudes (refroidissement des essais moteur, générateur de vapeur...) avec un Δt voisin de + 20°C.

D'autre part il s'agit du terminal méthanier qui constitue au niveau de Montoir une source froide de 2.10⁶ frigories/jour environ avec un rejet maximal de 1 million de m³/jour, un Δt de -2°C et un panache thermique de -1°C sur 150 m.

2 - La qualité des eaux dans l'estuaire de La Loire

Les paramètres pris en compte pour l'étude du CSEEL de la qualité des eaux sont les sels nutritifs (silicates, phosphates, azote), les teneurs en oxygène dissous et la demande biologique en oxygène (DBO₅), les concentrations en chlorophylle et en phé-

Fleuves	N t/an	P t/an	Si t/an	Sources
LOIRE	60000	2400	100000	Présente étude
GIRONDE	29700	2030	-	Philipps - 1980
SEINE	66000	10300	37600	Guillaud - 1983
RHIN	263000	13500	-	R.N.O. - 1978
ESCAUT	18500	1400	-	Wollast - 1976
POTOMAC	16500	4850	-	Jaworsky - 1972
HUDSON	58400	4740	-	Malone - 1980
HUDSON NEW YORK	123500	22500	-	Mueller - 1976

Tabl. 6 - Apports en sels nutritifs (t/an).

pigments; enfin, on donnera quelques valeurs de concentrations en métaux dans l'estuaire de la Loire.

2-1 Les sels nutritifs (fig. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9).

Les concentrations en sels nutritifs dans les eaux de la Loire à l'amont de Nantes varient en fonction des saisons; elles sont en général maximales en hiver à cause des apports par lessivage du bassin versant et elles chutent

en période estivale du fait de la diminution du lessivage et de la consommation par les végétaux planctoniques. Les variations des concentrations à Ste Luce (données de l'Agence de Bassin Loire Bretagne) en nitrates, phosphates et silicates illustrent bien ce phénomène (fig. 3). Les concentrations moyennes annuelles pour les différents sels nutritifs à Ste Luce sont récapitulées au tableau 5 ci-dessous.

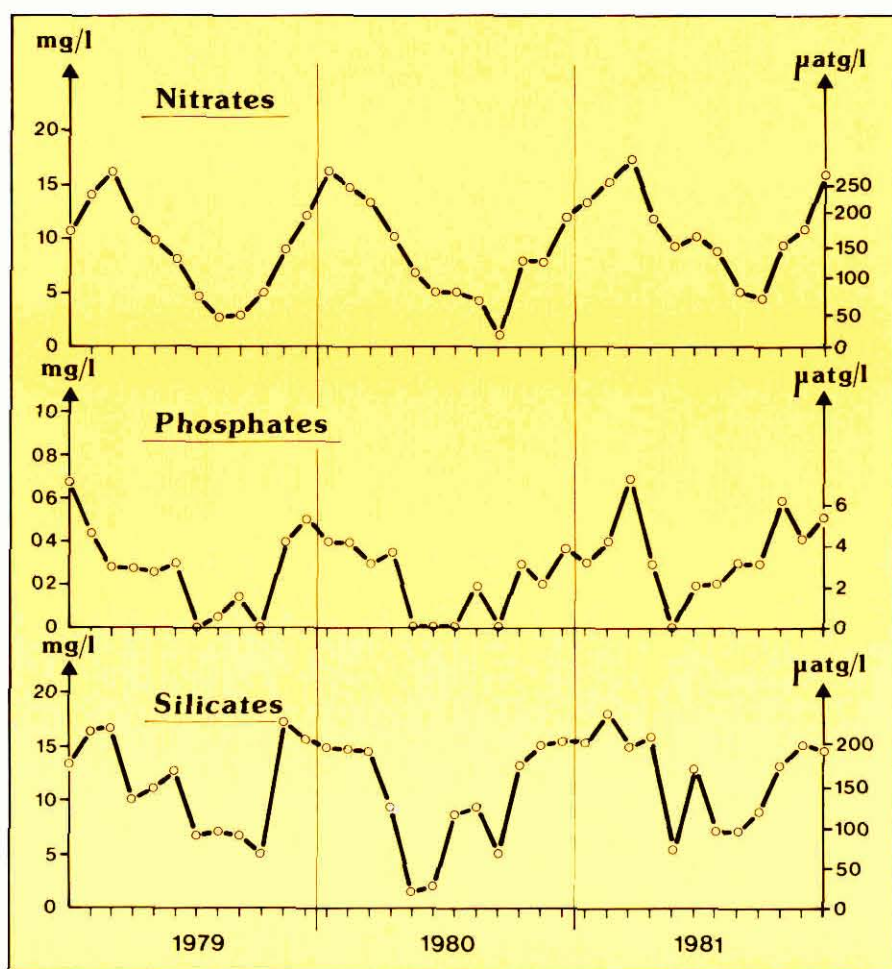


Fig. 3 - Concentrations en nitrates, phosphates et silicates dans la Loire à Ste Luce (1979-1981). Agence de Bassin Loire-Bretagne.

mg/l	LOIRE Ste Luce
NO ₃	8,8
NH ₄	0,3
PO ₄	0,3
SiO ₄	13,6

Tab. 5 - Concentrations moyennes en sels nutritifs dans la Loire (1976-1981)

Les apports en sels nutritifs par la Loire exprimés en tonnes/jour varient de façon croissante avec les débits du fleuve (fig. 4 et 5). Ils s'élèvent en moyenne par an à 60000 t d'azote, 100000 t de silice et 2400 t de phosphore.

Ces apports peuvent être comparés à ceux d'autres grands fleuves français ou étrangers. Au vu du tableau 6, on constate que les apports de la Loire dans l'estuaire restent relativement modérés notamment en phosphore.

Dans l'estuaire de la Loire, les sels nutritifs essentiellement apportés par les eaux douces, sont dilués au cours du mélange

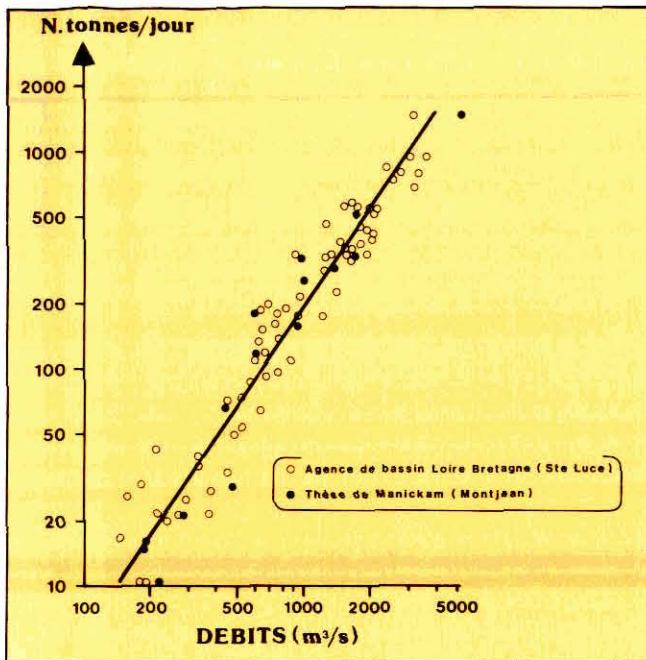


Fig. 4 - Apports par la Loire en azote total minéral dissous 1976-1981.

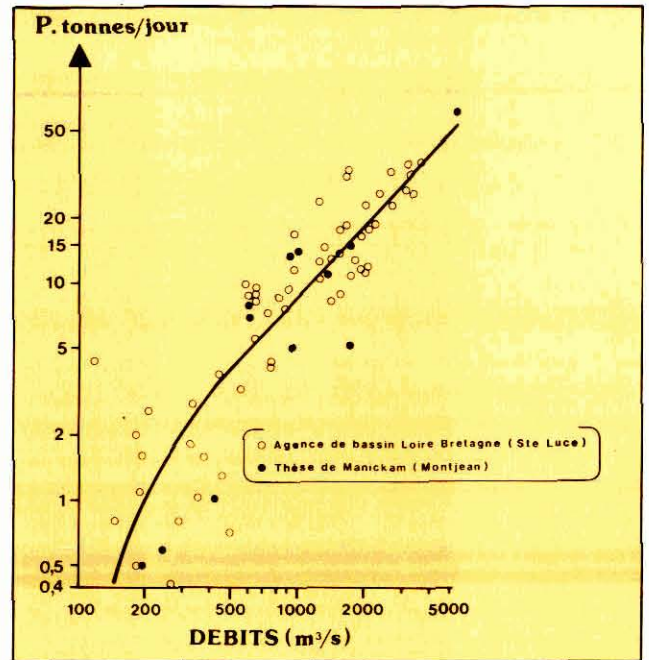


Fig. 5 - Apports par la Loire en phosphore (P, P04) 1976-1981

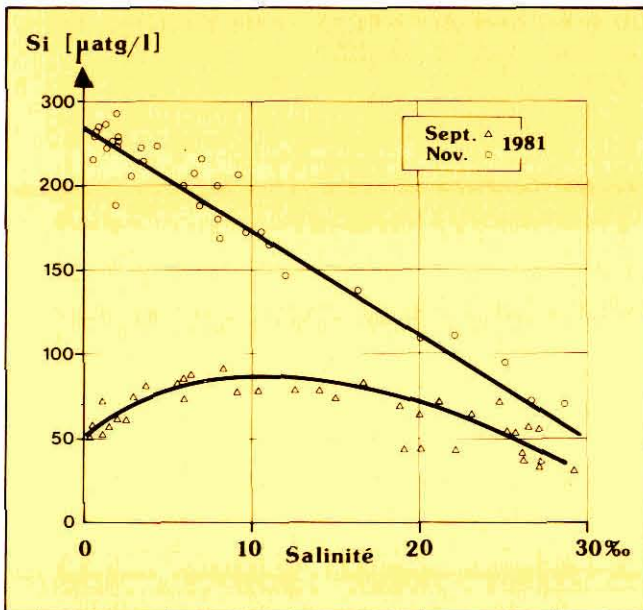


Fig. 6 - Concentrations en silicates dans l'estuaire de la Loire.

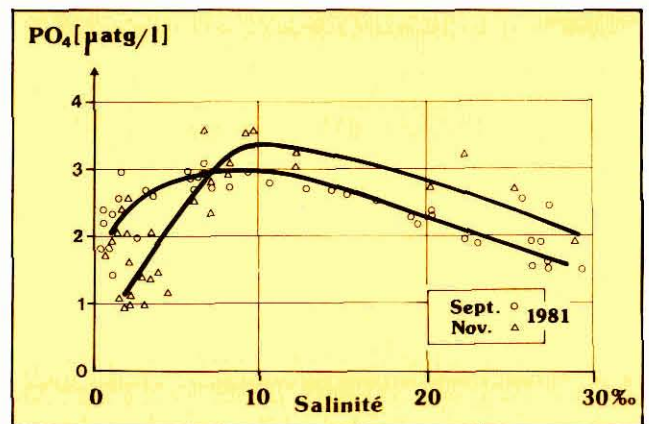


Fig. 7 - Concentrations en phosphates dans l'estuaire de la Loire.

avec l'eau marine beaucoup moins riche en nutriments. Cette dilution explique les gradients décroissants de l'amont vers l'aval ainsi que le déplacement vers l'aval des courbes d'isoteneurs lorsque l'on passe de la pleine mer à la basse mer ; enfin, les concentrations sont plus élevées en surface qu'au fond car la proportion d'eau douce y est plus grande (stratification des eaux).

Afin de mieux cerner les mécanismes de mélange dans l'estuaire, il est utile d'examiner comment varient les concentrations en sels nutritifs en fonction de la salinité ; s'il y a une simple dilution dans l'eau de mer plus pauvre en sels nutritifs, les points

du graphique salinité - sels nutritifs vont s'aligner sur une droite ; on dit alors que le mélange est de type conservatif ; dans le cas contraire, on peut mettre en évidence des phénomènes de production (points au-dessus de la droite de dilution théorique) ou de disparition (points en-dessous de la droite de dilution théorique) des sels nutritifs dans l'estuaire.

2.1.1. Les silicates (fig. 6)

L'examen des concentrations en silicates dans l'estuaire en fonction des salinités (fig. 6) montre qu'en période hivernale (Novembre 81) les concentrations dans l'eau douce sont très élevées et que les phénomènes de simple

mélange régissent les concentrations dans l'estuaire ; les points sont en effet assez proches de la droite de dilution théorique ; par contre, en période estivale (Septembre 81), les concentrations dans l'eau douce sont 5 fois plus faibles et il apparaît une production de silicates dans l'estuaire qui trouve très probablement son origine dans des processus de reminéralisation au niveau des sédiments mis en suspension au sein du bouchon vaseux. Par ailleurs, il faut rappeler que les vasières latérales de l'estuaire se sont aussi révélées comme un lieu de production de silice.

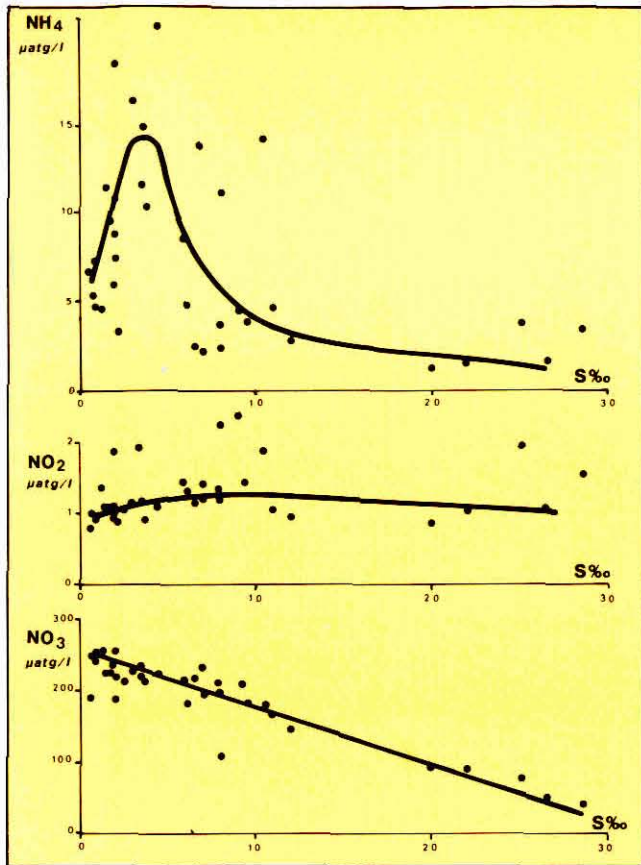


Fig. 8 - Concentrations en azote dans l'estuaire de la Loire (13-11-1981).

Les silicates ne semblent donc pas pouvoir être un élément susceptible de limiter la production du phytoplancton et notamment des diatomées, dans l'estuaire de la Loire.

2.1.2. Les phosphates (fig. 7)

Les concentrations en phosphates subissent une augmentation à la hauteur de l'agglomération nantaise, notamment en période estivale; elles croissent ainsi en été de 0,3 à 0,5, $\mu\text{atg/l}$ à l'amont à 1 ou 2 $\mu\text{atg/l}$ à l'aval de Nantes; ensuite, dans l'estuaire, lors du mélange eau douce - eau marine, on observe une nouvelle production de phosphates (fig. 7) due vraisemblablement à une désorption à partir des matières en suspension du bouchon vaseux; les concentrations atteignent alors des valeurs de 3 à 4 $\mu\text{atg/l}$.

Enfin l'on observe lors de certaines campagnes (Février 82) des valeurs élevées de phosphates (10 $\mu\text{atg/l}$) dans la partie aval de l'estuaire qui pourraient provenir soit des rejets nazairiens, soit des usines de fabrication d'engrais.

2.1.3. L'azote (fig. 8 et 9)

En période hivernale, les concentrations en nitrates dans les eaux de la Loire qui arrivent dans l'estuaire sont élevées (de l'ordre de 250 $\mu\text{atg/l}$) et l'on assiste à une simple dilution des nitrates dans l'estuaire (fig. 8); par contre on observe une production d'ammoniaque et dans une moindre mesure de nitrites, vraisemblablement due à la minéralisation des matières organiques présentes dans l'estuaire.

En période estivale et lorsque les concentrations en oxygène dissous deviennent très faibles, comme ce fut le cas en Septembre 1981 (fig. 9), on peut observer une chute rapide des nitrates au sein de l'estuaire qui correspond très probablement à un phénomène de dénitrification, c'est-à-dire de réduction des nitrates en nitrites; ces derniers voient alors leurs concentrations augmenter dans l'estuaire; ces phénomènes sont le signe d'une désoxygénation importante.

Il faut noter que les apports d'ammoniaque par les rejets urbains de l'agglomération nantaise (de l'ordre de 2 t/j) peuvent devenir, en période estivale de fai-

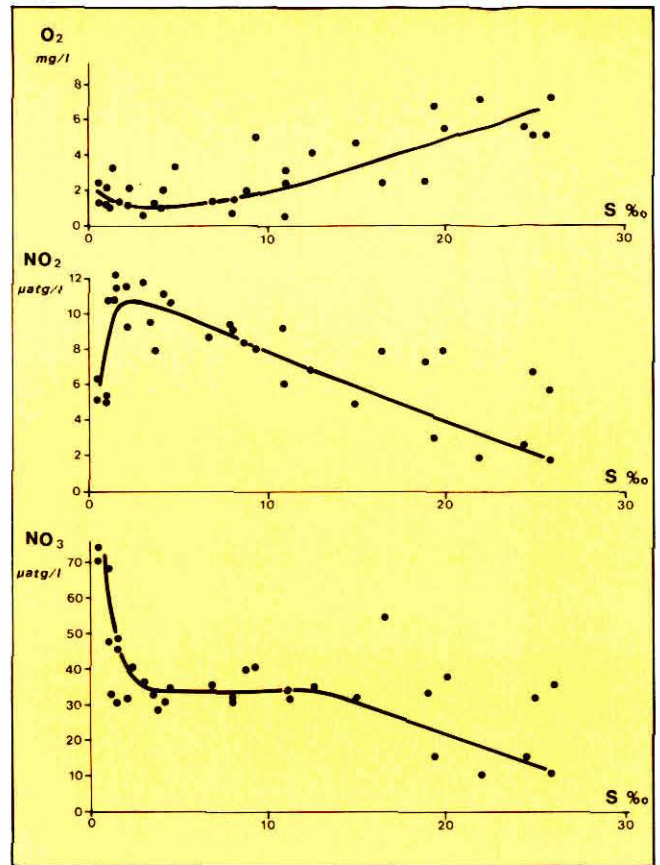


Fig. 9 - Concentrations en oxygène et en azote dans l'estuaire de la Loire (16-9-1981).

ble débit, supérieurs aux apports de la Loire (de l'ordre de 0,5 t/j pour un débit de 100 m^3/s); ces apports d'ammoniaque vont contribuer au déficit en oxygène dissous.

Par ailleurs on peut remarquer la présence, dans la partie aval de l'estuaire, des concentrations plus élevées en azote dues comme pour les phosphates, aux rejets industriels ou urbains de l'agglomération de Saint Nazaire.

2-2 L'oxygène dissous et la DBO₅ (fig. 10, 11, 12)

L'examen des concentrations moyennes en Demande Biologique en Oxygène (DBO₅) dans les eaux de la Loire en amont de Nantes (données à Ste Luce de l'ABLB) montre une élévation durant les mois d'été due à la présence d'une masse importante de phytoplancton (fig. 10).

Néanmoins, le calcul des apports en DBO₅ par la Loire à Ste Luce effectué en multipliant les débits par les concentrations, révèle que ces apports croissent avec le débit fluvial (fig. 11). Il faut rappeler que les apports de l'agglomération nantaise, qui se surajoutent aux apports ligériens, sont

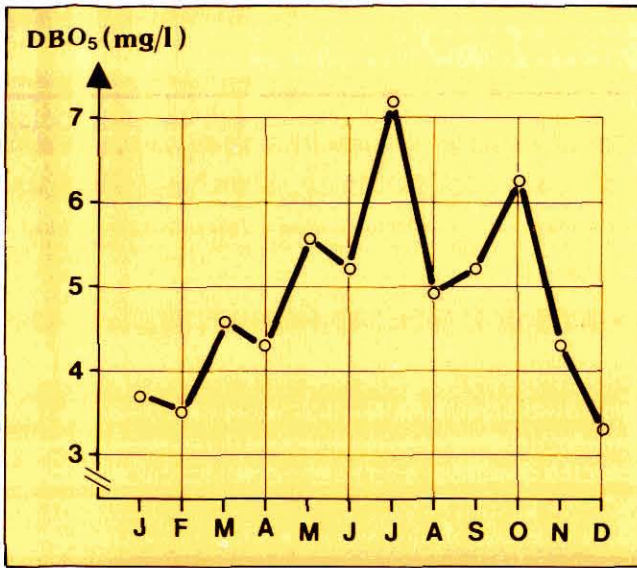


Fig. 10 - Concentrations moyennes en DBO₅ dans la Loire à Ste Luce 1976-1981. Agence de Bassin Loire-Bretagne.

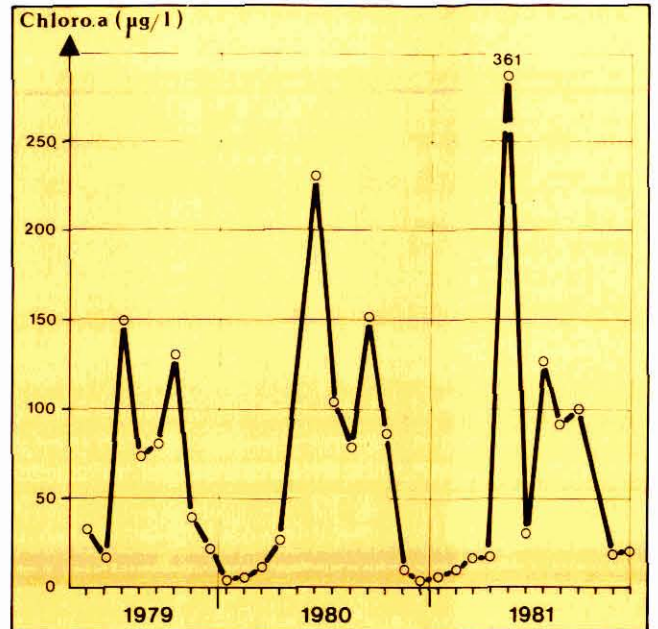


Fig. 13 - Concentrations en chlorophylle "a" dans la Loire à Ste Luce 1979-1981. Agence de Bassin Loire-Bretagne.

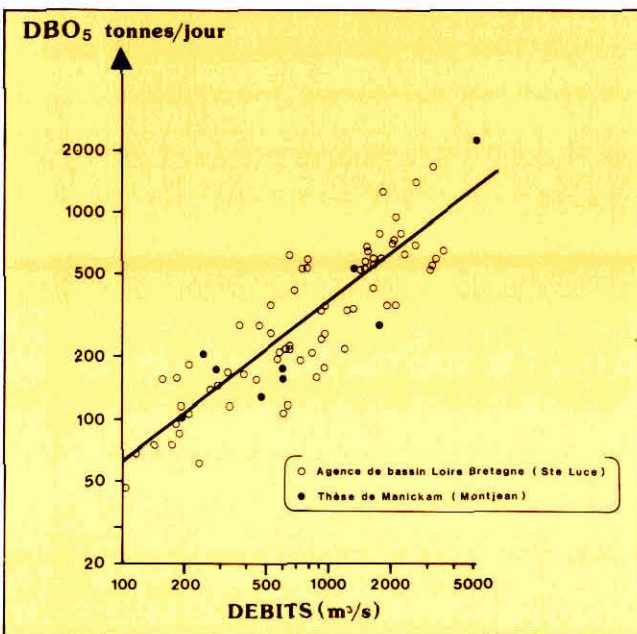


Fig. 11 - Apports par la Loire en DBO₅ 1976-1981.

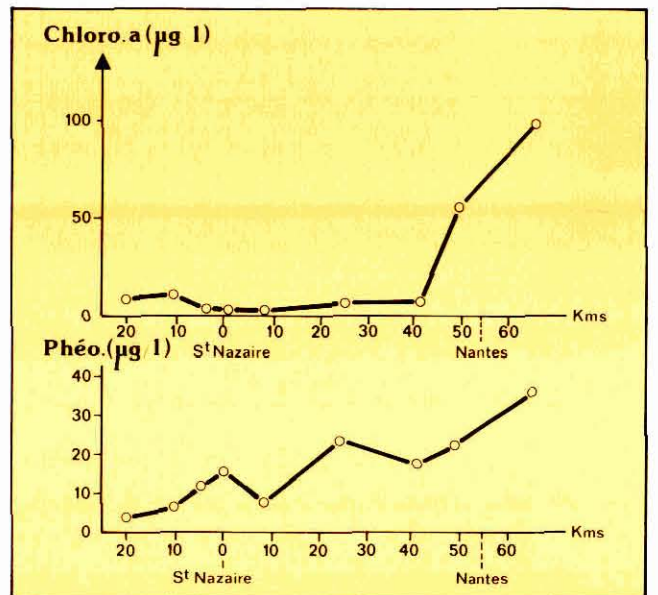


Fig. 14 - Concentrations en chlorophylle "a" et en phéopigments dans l'estuaire de la Loire (septembre 1981).

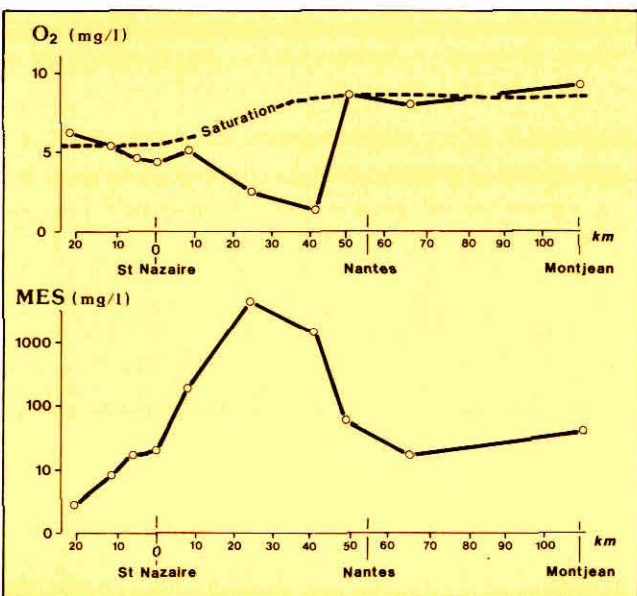


Fig. 12 - Concentrations en oxygène dissous et en matières en suspension (M.E.S.) dans l'estuaire de la Loire (septembre 1981).

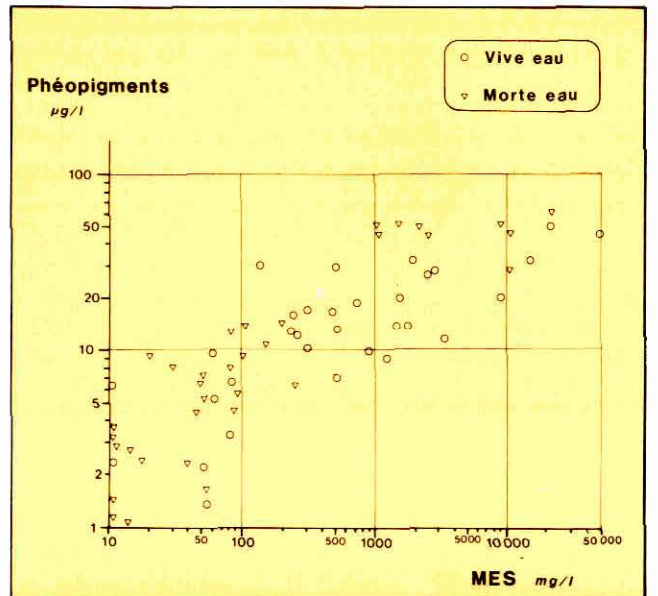


Fig. 15 - Concentrations en phéopigments dans l'estuaire de la Loire (septembre 1981).

de l'ordre de 18 t/j et représentent 35 % des apports de la Loire en étiage (100 m³/s).

Dans l'estuaire, les concentrations en oxygène dissous durant la période hivernale sont à un niveau tout à fait satisfaisant, en général supérieur à 7 mg/l. Par contre, en période estivale et post-estivale, lorsque les températures de l'eau sont élevées, on peut observer des concentrations en oxygène dissous égales ou inférieures à 1 mg/l (Septembre 1981). Ces chutes en oxygène dissous se produisent en aval de Nantes et correspondent à l'emplacement du bouchon vaseux (fig. 12). Les déficits en oxygène dissous sont, comme les teneurs en matières en suspension, plus importants en période de vives-eaux qu'en période de mortes-eaux.

Il semble donc que durant les périodes estivales, au cours desquelles les températures élevées favorisent les processus d'oxydation et les faibles débits entraînent un temps de séjour plus important des eaux douces dans l'estuaire, les déficits en oxygène dissous soient dus à une oxydation des matières organiques associées au bouchon vaseux.

2-3 La chlorophylle (fig. 13, 14, 15)

Les concentrations en chlorophylle "a" peuvent être considérées comme un paramètre de qualité des eaux car les fortes valeurs seront le signe de processus d'eutrophisation.

Dans la Loire, en amont de Nantes les concentrations en chlorophylle varient fortement en fonction des saisons (fig. 13); les valeurs maximales sont observées au printemps et en été, et elles peuvent dépasser 200 µg/l; elles sont alors le signe d'une eutrophisation importante et sont très supérieures aux quelques mesures dont on dispose pour le début du siècle.

Dans l'estuaire, en période printanière ou estivale, les teneurs maximales en chlorophylle restent comprises en 30 et 60 µg/l; les teneurs hivernales sont beaucoup plus faibles. On peut noter par exemple en Septembre 1981

une chute des concentrations en chlorophylle dans l'estuaire, par rapport à la Loire en amont de Nantes (fig. 14). Les teneurs en phéopigments (pigments de dégradation de la chlorophylle) se maintiennent dans l'estuaire à un niveau qui n'est que légèrement inférieur à celui de Loire amont. La zone estuarienne n'est donc pas un secteur où la production primaire phytoplanctonique est très active; cette production est très certainement limitée par la forte turbidité des eaux. Par contre l'estuaire est une zone où s'accumule du phytoplancton d'origine fluviale (et peut être marine) en voie de dégradation; ceci est mis en évidence par la relation qui existe entre les concentrations en phéopigments et les teneurs en matières en suspension (fig. 15).

La matière organique végétale, qui provient en grande partie du fleuve où la production phytoplanctonique est très importante, contribue en période estivale à consommer l'oxygène disponible dans le milieu (les apports en chlorophylle "a" par la Loire équivalent en été à un flux de DBO₅ compris entre 180 et 390 t/j).

Les apports de matière organique de l'agglomération nantaise, bien que plus limités (18 t/j de DBO₅) viendront s'ajouter aux apports fluviaux.

2-4 Les métaux (fig. 16).

Bien que l'étude systématique des métaux dans l'estuaire de la Loire n'ait pas été faite dans le cadre du CSEEL, les mesures réalisées par le R.N.O. en 1981 à Paimbœuf, fournissent un ordre de grandeur des concentrations rencontrées dans l'eau; elles ne permettent pas cependant d'expliquer les mécanismes complexes d'échanges de métaux entre l'eau et les matières en suspension dans l'estuaire et pour lesquels il apparaît que la matière organique particulière joue un rôle important.

Les valeurs rencontrées en 1981 à Paimbœuf (moyenne et mini-maxi) peuvent être comparées à la gamme de variation des concentrations en métaux dans les eaux côtières d'Europe (RNO 1981) (tabl. 7).

Rappelons aussi que MARTIN et WHITFIELD (1981) donnent comme concentrations

µg/l	Loire		Eaux côtières européennes
	moy.	min. - max.	
Hg	0,13	0,06 - 0,20	0,03 - 0,3
Cd	0,17	0,1 - 0,5	0,1 - 3
Pb	2,27	1 - 6	0,6 - 10
Cu	6,3	2,4 - 13,2	1 - 15
Zn	18,2	4 - 47,6	5 - 40

Tabl. 7 - Concentrations en métaux dissous dans l'estuaire de la Loire (µg/l), 1981.

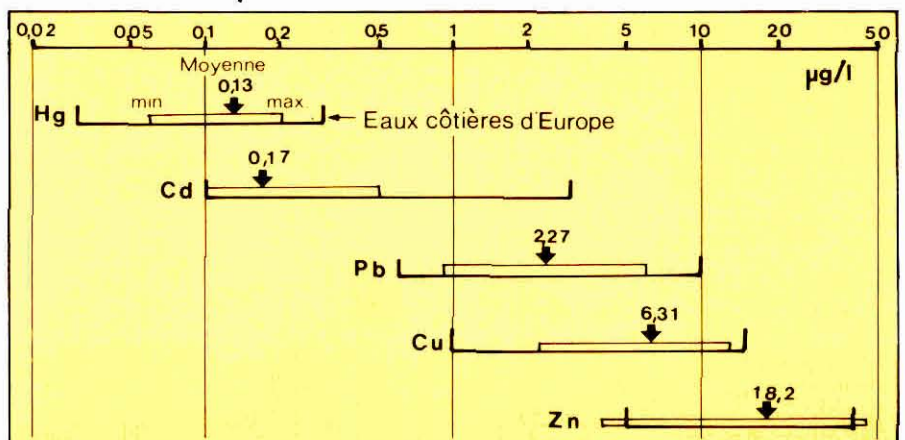


Fig. 16 - Concentrations en métaux dissous dans l'estuaire de la Loire. Paimbœuf R.N.O. 1981.

moyennes mondiales pour les fleuves non pollués les valeurs suivantes (en $\mu\text{g/l}$):

Cd = 0,2, Pb = 1 ;

Cu = 10 et Zn = 30.

Il apparaît donc au vu des résultats des mesures faites à Paimbœuf en 1981 que :

- les valeurs des concentrations en métaux dans les eaux de l'estuaire de la Loire sont comprises dans la gamme de variation des eaux côtières européennes (fig. 16);
- les valeurs moyennes sont inférieures aux concentrations données par MARTIN *et al.* à l'exception du plomb.

Il ne semble donc pas exister de problème crucial de pollution métallique dans l'estuaire de la Loire; néanmoins, il convient de rester vigilant en ce qui concerne les teneurs et les rejets de plomb et de cuivre dans l'estuaire.

3 - Conclusions

Il apparaît tout d'abord que les **sels nutritifs** dans l'estuaire de la Loire ne sont jamais limitants pour la production primaire phytoplanctonique; cette production est limitée par la forte turbidité des eaux et ce phénomène contrôle en fait toute croissance excessive du phytoplancton au sein même de l'estuaire.

Il existe dans l'estuaire en période estivale un déficit très important en **oxygène dissous** qui est associé à l'oxydation des matières organiques contenues dans le bouchon vaseux; ceci explique que ces déficits soient maximaux en vives eaux lorsque les remises en suspension sont importantes.

Il convient donc de mesurer de façon continue, notamment en aval de Nantes et en période estivale, les concentrations en oxygène dissous à l'aide de stations

automatiques. Par ailleurs, on doit s'efforcer de réduire les apports en **matières oxydables** dans l'estuaire qui ont deux origines principales. Il s'agit en premier lieu des apports amont en provenance du bassin versant qui, en période estivale, sont essentiellement dus à la prolifération des algues planctoniques dans la Loire; le programme général de lutte contre l'eutrophisation, engagé par l'Agence de Bassin Loire Bretagne et visant notamment à réduire les rejets de phosphates le long du cours de la Loire, doit être poursuivi car il contribuera aussi à améliorer la qualité des eaux au sein de l'estuaire. En second lieu, il est nécessaire de limiter en période estivale les rejets de matières oxydables en provenance de l'agglomération nantaise; il apparaît en effet que les apports en DBO₅ et en ammoniac ne sont pas négligeables par rapport aux apports amont lorsque la Loire est en période d'étiage marqué; ces efforts de réduction doivent être faits en particulier au niveau des industries agro-alimentaires, d'engrais et de la station d'épuration de Nantes-Tougas. La réduction des apports en phosphates au niveau de l'agglomération, qui deviennent importants en étiage, semble moins prioritaire car les phosphates ne sont pas consommateurs d'oxygène dissous, leur utilisation par le phytoplancton est limitée dans l'estuaire par la turbidité et parce que les concentrations semblent stabilisées dans l'estuaire à un niveau de 3 à 4 $\mu\text{atg/l}$ grâce aux échanges avec les matières en suspension.

Il est à noter que toute action en faveur du **soutien des débits d'étiage** améliorera la situation en oxygène dissous dans l'estuaire.

On peut ensuite tenter de fixer pour l'estuaire de la Loire des critères de qualité pour l'oxygène dissous car si les concentrations deviennent trop basses plu-

sieurs types de phénomènes risquent d'apparaître :

- mortalité de la faune qui a besoin d'oxygène pour son métabolisme,
- réduction des nitrates en nitrites et azote gazeux (dénitrification),
- réduction des sulfates et libération d'hydrogène sulfuré.

On pourrait ainsi fixer comme objectif à moyen terme une concentration minimale supérieure ou égale à 3 mg/l; il conviendrait alors de déterminer, à l'aide d'un **modèle mathématique de l'oxygène dissous** dans l'estuaire (comprenant notamment les phénomènes sédimentaires liés au bouchon vaseux), les taux de réduction qu'il faudrait appliquer à la fois aux apports amont de matières oxydables et aux rejets de l'agglomération nantaise pour parvenir à des concentrations en oxygène dissous supérieures ou égales au critère de qualité fixé. Les mesures en continu de l'oxygène dissous dans l'estuaire constitueraient alors une base de données permettant de caler le modèle mathématique.

L'impact des **rejets thermiques** doit faire l'objet de programmes de suivi détaillé car toute élévation excessive de température contribue à accélérer les phénomènes d'oxydation et donc à diminuer les concentrations en oxygène dissous.

En ce qui concerne les **métaux**, il convient non seulement d'exercer un contrôle suivi des concentrations dans l'eau, mais aussi d'étudier la phase particulière des rejets en relation avec une étude générale des teneurs dans les matières en suspension dans l'estuaire.

Enfin, une étude portant sur les **rejets bactériens** et le devenir des micro-organismes dans le système estuarien doit être entreprise assez rapidement.

Chapitre II
LES CARACTÉRISTIQUES DES
PEUPEMENTS PLANCTONIQUES
(voir figure 1 du chapitre III)

1 - Le Phytoplancton

Les peuplements végétaux de l'estuaire de la Loire, dominés par les Diatomées et les Algues vertes sont composés d'organismes marins et d'organismes réputés d'eaux douces ou d'eaux saumâtres.

1-1 Cycles de variations

Le cycle annuel du phytoplancton traduit le contexte saisonnier hydrologique avec une période automnale caractérisée par l'abondance, pendant l'étiage, des Chlorophycées et des Cyanophycées, une phase hivernale marquée par les crues et la dominance des Diatomées, et un développement printanier du nanoplancton accompagné de Diatomées.

Les variations du débit fluvial se font sentir sur la densité des peuplements et la biomasse pigmentaire ; elles jouent également sur la composition des peuplements. La diversité spécifique est ainsi plus faible dans les trois secteurs de l'estuaire pendant la crue printanière. Dans les secteurs méso et oligohalin elle est maximale lors de l'étiage automnal.

En ce qui concerne la biomasse pigmentaire, les teneurs maximales de chlorophylle "a" sont relevées au printemps ; celles de phéopigments sont observées en étiage.

Dans les secteurs méso et polyhalin, là où l'apport marin est le plus net, le phytoplancton est plus franchement dulçaquicole en jusant et à dominante marine au flot ; ce contraste disparaît lors des crues. Dans le secteur oligohalin, l'apport en espèces marines est très faible.

1-2 Impact de la qualité des eaux

La teneur des eaux en matières en suspension (M.E.S.) est susceptible de limiter la photosynthèse et, de ce fait, la production primaire par le phytoplancton.

L'évolution relative des quantités de chlorophylle "a" et de phéopigments révèle l'importance de l'accumulation du matériel détritique, surtout dans

	STATION 1 St Nazaire	STATION 2 Lavau	STATION 4 Buzay
Densité de Peuplement	4.10^7 à 2.10^9 cell/m ³	$1.8.10^8$ à 2.10^9 cell/m ³	5.10^8 à 9.10^9 cell/m ³
Biomasse pigmentaire	0,6 à 15 mg chl. "a"/m ³	1,5 à 32 mg chl. "a"/m ³	1,6 à 67 mg chl. "a"/m ³

les eaux de fond et plus spécialement en période d'étiage. Les résultats de l'étude montrent aussi que les teneurs en sels nutritifs ne constituent à aucun moment un facteur limitant de la production végétale planctonique. Par ailleurs, les biomasses pigmentaires relevées dans l'estuaire restent inférieures à celles que l'on observe dans le cours fluvial de la Loire ; elles montrent que le milieu estuarien n'est pas dans une situation d'eutrophisation critique.

2 - Le Zooplancton

Les principaux groupes constitutifs du zooplancton de l'estuaire de la Loire sont des Crustacés (Copépodes, Mysidacés, Cladocères, Ostracodes). Les éléments accessoires sont représentés par des Vers Annélides, des Mollusques, etc.

2-1 Cycles de variations

Le cycle annuel du zooplancton consiste en une phase hivernale où apparaissent les effectifs les plus élevés notamment à la station 2, une phase printanière où les peuplements sont les plus diversifiés, une phase estivale où la dominance des Copépodes s'atténue et une phase automnale où celle-ci atteint sa plus forte valeur ; la proportion de Mysidacés est maximale à la fin de cette période (Novembre).

La répartition temporelle des Copépodes paraît peu liée au

débit fluvial, en revanche celle des Mysidacés est affectée par la crue (minimum en Février). La période d'étiage durant laquelle le front de salinité remonte vers l'amont voit se raréfier les espèces dulçaquicoles.

D'ailleurs sur l'ensemble du cycle annuel, la répartition spatiale du zooplancton est tributaire de la zonation haline de l'estuaire ; les espèces marines et les espèces d'eau douce ne supportant pas les variations de salinité sont cantonnées dans leurs secteurs respectifs : poly et oligohalin, alors que le secteur mésohalin abrite un mélange d'espèces euryhalines.

Il faut noter aussi qu'aux stations 1 et 2, le printemps et l'été sont des périodes caractéristiques où les peuplements s'enrichissent des œufs et larves d'un très grand nombre d'espèces dont le cycle biologique comporte des phases de reproduction, soit dans l'estuaire même, soit dans les eaux côtières.

2-2 Impact de la qualité des eaux

Il est certain que, sans déterminer rigoureusement les effectifs zooplanctoniques, la charge des eaux en M.E.S. est préjudiciable à la survie du plancton animal.

L'oxygénation des eaux lui est, en revanche, plutôt indifférente sauf pour un Mysidacé (*Neomysis integer*).

La présence de matière organique, particulièrement évidente

	STATION 1 St Nazaire	STATION 2 Lavau	STATION 4 Buzay
Groupes dominants	Copépodes (55-99 %) Mysidacés (0,9-32 %)	Copépodes (68-99 %)	Copépodes d'eau douce (56-100 %) Ostracodes (0-37 %)
Densité de peuplement	200-15 000 individus/m ³	4 000-300 000 indiv./m ³	800-64 000 individus/m ³

pendant l'étiage post-estival, a été soulignée par l'augmentation des effectifs de Cladocères, mais, même si la composition globale du zooplancton de l'estuaire évoque celle d'un milieu tendant à l'eutrophisation, aucune des espèces recensées n'indique que ce stade de croissance soit atteint.

3 - Conclusions

Schématiquement le fonctionnement du compartiment biologique de l'éco-système estuarien peut se résumer de la manière suivante. Les apports en énergie lumineuse et en sels nutritifs stimulent le développement du plancton végétal. Ce phytoplancton (algues vertes et Diatomées pour l'essentiel) est consommé par des organismes planctoniques herbivores alors que le zooplancton détritivore vit aux dépens d'éléments en suspension dans l'eau, d'origine détritique ou bactérienne. Ces consommateurs sont à leur tour la proie de consommateurs de second ordre, l'extrémité des chaînes alimentaires étant représentée par des poissons dont les populations peuvent constituer un capital halieutique précieux dans l'estuaire. Sur cet édifice biologique, les composantes physico-chimiques peuvent exercer une action à tous les niveaux.

L'étiage planctonique végétal est dépendant de la fertilité potentielle des eaux et celle-ci relève d'apports largement suffisants en azote, en phosphore et en silice. Plus préjudiciable pour le plancton chlorophyllien, la teneur en M.E.S. limite le rendement énergétique photo-synthétique.

Parmi les composantes du phytoplancton, l'apport végétal provenant des marais adjacents est important. Il permet d'inoculer des individus susceptibles de relayer les espèces défaillantes. Il est donc tout à fait souhaitable que dans l'aménagement de l'estuaire soit prévu le maintien, voire l'amélioration, des échanges entre la Loire et les marais voisins.

Un des points les plus sensibles de la qualité des eaux est la plus forte consommation en oxygène en période d'étiage qui se traduit par une sous-oxygénation marquée et aboutit souvent à une mortalité importante de poissons. Un contrôle plus strict des apports de matières organiques fluviales et des rejets urbains et industriels ainsi qu'un soutien des débits les plus faibles permettraient, de maintenir à un niveau satisfaisant les teneurs en oxy-

gène dissous. Sinon le risque est grand de voir s'étendre une zone médiane critique où dans des eaux désoxygénées, fortement turbides et trop salées, s'accumulent bactéries et Cyanophycées.

Pour **les peuplements d'animaux planctoniques**, il est incontestable que le cycle d'abondance du groupe dominant, celui des Copépodes, reproduit l'évolution inverse de la charge en M.E.S. De même, une espèce de Mysidacé (second constituant en abondance du zooplancton) est affectée par la sous-oxygénation des eaux. Ces deux points méritent d'être soulignés car la biomasse que représentent Copépodes et Mysidacés constitue un apport alimentaire irremplaçable pour nombre de poissons de l'estuaire. Compromettre la vie de ce zooplancton revient à compromettre aussi celle de leurs prédateurs.

L'étude réalisée, si elle permet de conclure à la relative "bonne santé" de l'estuaire de la Loire, met surtout en évidence la fragilité de l'écosystème., exposé au risque de déséquilibre s'il n'y a pas stabilisation de la masse turbide dans ses caractéristiques actuelles et préservation de l'oxygénation par contrôle des apports d'éléments oxydables.

Chapitre III
LES PEUPEMENTS BENTHIQUES
DE L'ESTUAIRE

1 - Caractéristiques faunistiques des secteurs de l'estuaire interne de la Loire (fig. 1, tabl. 1)

L'estuaire interne de la Loire est subdivisé en 3 grands domaines halins dont les caractéristiques et les aires respectives d'influence varient au cours des saisons.

1-1 Le secteur oligohalin "D"

Ce secteur (de Buzay à Chevire) est faunistiquement le plus pauvre de l'estuaire. Les substrats bordant le chenal de navigation sont essentiellement rocheux (endiguement) avec parfois une bordure vaseuse ou sableuse de faible largeur. En raison d'un hydrodynamisme violent, la faune n'est représentée que par des larves d'Insectes et deux espèces d'Annélides Oligochètes en très faibles densités; la diversité spécifique n'y dépasse pas 0,85 (moyenne: 0,22).

1-2 Le secteur mésohalin "C"

Dans ce secteur (de Buzay à Paimboeuf), les bordures vaseuses sont mieux représentées que dans le secteur précédent; elles sont localisées le long de la rive nord, essentiellement de la Tourelle des Moutons à Cordemais.

Les peuplements caractéristiques de ces milieux sont constitués de 8 espèces et ont une faible diversité spécifique ($H_N = 0,81$). Les principaux constituants sont des Oligochètes dont les densités vont croissant de l'amont vers l'aval.

Dans la zone de l'île Pipy, le suivi mensuel de 4 stations choisies pour leur diversité édaphique a permis de montrer que la composition de la communauté et son abondance sont essentiellement liées à la qualité du substrat.

a) Les sables propres constituant le banc de Pipy sont pauvres aussi bien en faune (biomasse moyenne: $\bar{B} = 0,013 \text{ g/m}^2$) qu'en microphytobenthos ($\bar{B} = 30 \text{ mg/m}^2$). Ils sont directement soumis à l'influence des courants du chenal de navigation.

b) Les sables vaseux et les vases sableuses faisant le passage entre le banc et la vasière marginale sont plus riches. Leurs teneurs en particules minérales fines, en matière organique détritrique et en pigments végétaux augmentent, comparativement

Sédiments	Lieux		PIPY		IMPERLAY		BILHO	
	V.	A.	V.	A.	V.	A.		
VASE FRANCHE (molle ou compacte)	118	1,8	309	22,2	148	5		
VASE SABLEUSE	107	1,1			189	7,9		
SABLE VASEUX	70,4	0,1			77,7	0,61		
SABLE PROPRE	30	0,01			34	0,05		

Tabl. 1 - Comparaison des biomasses moyennes annuelles des peuplements étudiés selon le type sédimentaire (V = microphytobenthos en mg/m^2 (chl "a" + phéop.); A = benthos animal en g/m^2)

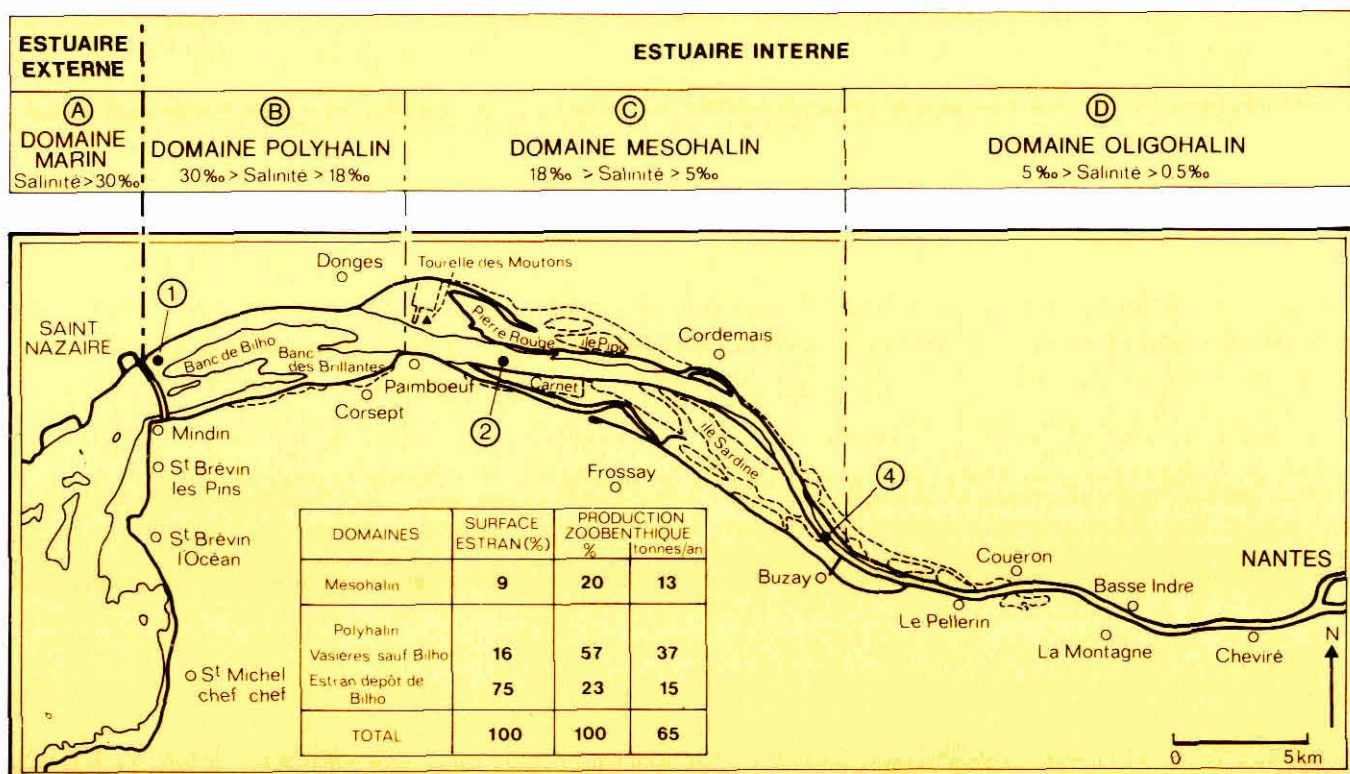


Fig. 1 - Divisions de l'estuaire de la Loire en domaines "halins". (1, 2, 4: stations d'étude hydrobiologique).

aux sables propres, de façon importante. Ces facteurs favorisent l'installation de la macrofaune benthique dépositivore adaptée à ce milieu peu salé. Mais ces substrats et en particulier les sables vaseux restent la plupart du temps peu productifs. (4,5 g/m²/an).

c) Les vases franches occupant les zones abritées de ce secteur sont de loin, les sédiments les plus riches en faune et en microflore benthiques. Les fluctuations saisonnières des abondances y sont très marquées :

- biomasses microphytobenthiques maximales en été et minimales en hiver ;

- densités et biomasses animales maximales en hiver et très réduites en période d'étiage.

Cette succession d'abondance de la microflore et de la faune correspond à des exigences spécifiques distinctes vis-à-vis des différents facteurs écologiques :

- le microphytobenthos est le plus productif en été lorsque la température et la lumière sont maximales et lorsque ses consommateurs sont rares ;

- la macrofaune (constituée d'Oligochètes de petite taille) est la plus dense et la plus productive en période hivernale. A cette époque, l'enrichissement du

milieu en matière organique et les conditions de température et de salinité favorisent le déclenchement du cycle reproducteur d'un Annelide Oligochète (*Limnodrilus hoffmeisteri*) qui est l'espèce-pilote de la communauté. Par ailleurs, lorsqu'en période d'étiage (été 1982) le milieu est soumis à une forte influence mésohaline, il existe une succession des espèces occupant ces milieux. Toutefois, la qualité de la vase est un des facteurs limitant la stabilité des populations : sa fluidité estivale ne permet pas une colonisation durable du substrat par les Annelides (présence du bouchon vaseux et de la crème de vase) qui migrent alors vers l'amont (île Demangeat). Un autre facteur limitant peut être le déficit en oxygène de ce secteur en période d'étiage. La mortalité et la migration estivales de la totalité ou de certaines fractions des populations sont responsables du niveau moyen de la production zoobenthique annuelle : 4,5 g/m²/an.

1-3 Le secteur polyhalin "B" (fig. 2).

1.3.1. La répartition des peuplements.

De Donges à St-Nazaire (rive nord) et de Paimbœuf à Mindin (rive sud), ce secteur présente une composition faunistique plus variée (14 espèces) et une

diversité spécifique supérieure à celles des autres secteurs ($H_N = 1,18$).

La caractéristique essentielle de sa cartographie zoobenthique est une micro-répartition en mosaïque de nombreuses petites communautés associées à des conditions édaphiques et hydrodynamiques locales.

a) Les sables propres sont, soit azoïques lorsqu'ils sont situés en position subtidale, soit très pauvres dans les zones intertidales. La surface de ce type de substrat peut être estimée à 23 % de l'aire étudiée.

b) Les sables vaseux sont limités à la rive sud de Bilho et à la bordure du chenal nord le long des Brillantes. Leur superficie ne dépasse guère 11 % du total.

c) Les vases sableuses constituent le biotope le mieux représenté (46 % de la surface de ce secteur).

d) Les vases franches, molles ou compactes, représentent 19 % des surfaces ; il s'agit de la banquette-relique de l'ancien banc de Bilho et de vases bordant la rive sud de Mindin à Paimbœuf. Les peuplements où les densités sont maximales sont tous situés en zone intertidale dans des sédiments plus ou moins envasés localisés hors des courants de marée.

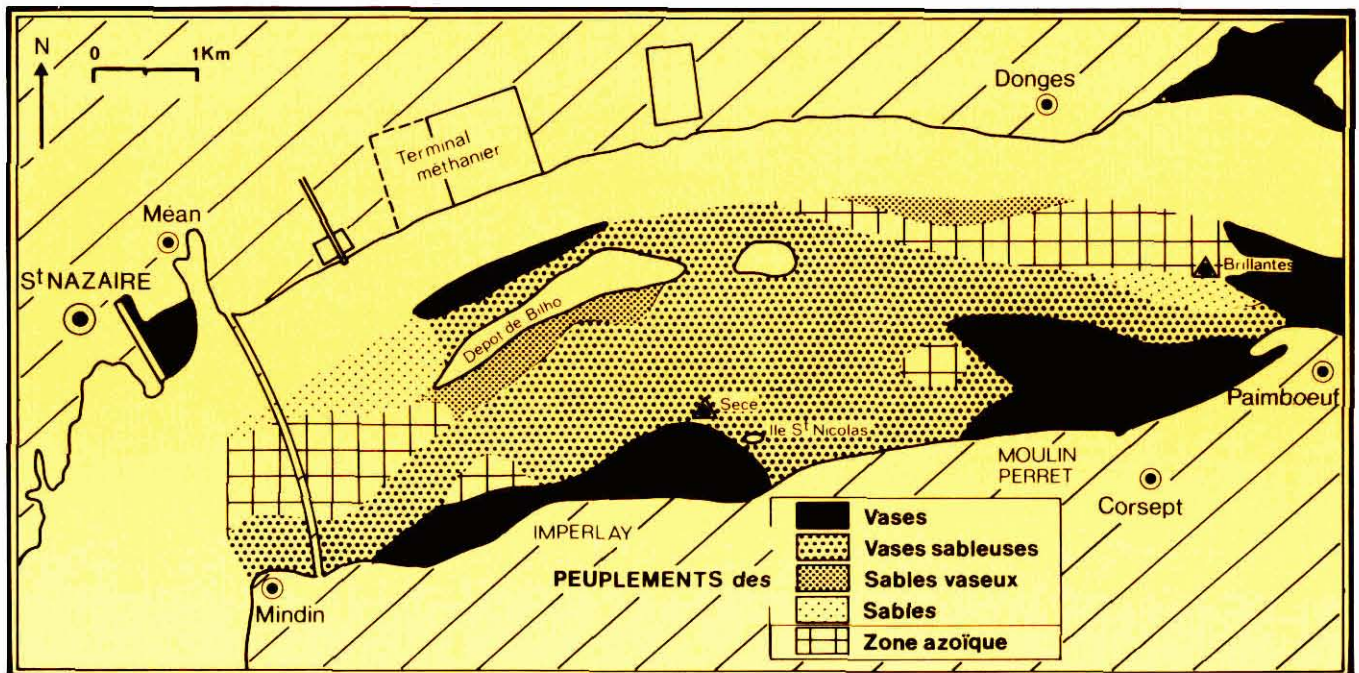


Fig. 2 - Répartition des peuplements benthiques dans le secteur polyhalin.

1.3.2. Le suivi annuel des peuplements.

Le suivi annuel des peuplements benthiques a été effectué sur 3 transects localisés dans des zones édaphiques et hydrodynamiques caractéristiques du secteur polyhalin : vasière naturelle de l'Imperlay (rive sud), estrans sud et nord du dépôt de Bilho. Il met en évidence les faits suivants.

a) La nature, l'abondance, et la production des peuplements benthiques sont liées aux qualités édaphiques du biotope (fig. 3).

• Quel que soit le transect, les biomasses microphytobenthiques et macrozoobenthiques sont toujours importantes dans les sédiments de faible médiane, riches en fines et en matière organique. C'est le cas de la vasière de l'Imperlay (tabl. 1). C'est également le cas pour la rive nord du Bilho où, toutefois, ces valeurs y sont 3 à 4 fois plus faibles. Il faut distinguer dans cet ensemble, la banquetterelique de l'ancien banc du Bilho, située en bordure du chenal nord. Elle est constituée de vases compactes litées, très réduites où do-

mine pendant l'hiver un crustacé benthique à caractère opportuniste (*Corophium volutator*), doté d'une importante capacité migratoire.

• Dans les sables propres ou peu envasés, comme ceux de la rive sud de Bilho, le faible niveau des biomasses est lié à l'instabilité des substrats et à leur pauvreté en fines et en matière organique.

b) Le niveau tidal des sédiments conditionne la répartition des peuplements.

• Pour le microphytobenthos : ce facteur, associé à la qualité du sédiment conditionne son développement. Les stations situées en haut de l'estran subissent une longue période d'émersion (donc de lumière) permettant la production primaire.

• Pour la macrofaune benthique, le rapport horaire émerision/immersion est un facteur de répartition qualitative et quantitative.

D'un point de vue qualitatif, la zonation tidale des espèces est

liée à ses exigences écologiques, plus particulièrement trophiques. Les mollusques filtreurs (suspensivores) nécessitent de longues périodes d'immersion : ils seront donc essentiellement localisés au bas de l'estran dans des zones alimentées par des masses d'eau riches en plancton comme on l'observe sur les deux rives de Bilho. Ces espèces sont absentes de l'Imperlay où le substrat vaseux et les eaux turbides leur sont défavorables.

D'un point de vue quantitatif, les répartitions faunistiques varient selon les zones :

- à l'Imperlay, les biomasses macrozoobenthiques sont équivalentes sur les 3/4 de l'estran ; seules les stations les plus basses présentent des caractéristiques plus faibles ;

- sur le dépôt de Bilho, les biomasses animales ne sont pas quantifiables au-dessus du niveau moyen des basses mers de mortes eaux, même lorsque la nourriture y est abondante (présence de microphytobenthos) ; il est vraisemblable que les substrats y sont trop instables.

c) Les effets des conditions hydrologiques saisonnières varient selon les divers milieux étudiés.

• A l'Imperlay, les débits fluviaux ne provoquent de mortalités hivernales que pour des valeurs supérieures à 1000 m³/s : les biomasses régressent durant les 3 mois d'hiver et 2 mois au printemps. La reconstitution cyclique des peuplements semble s'effectuer dans de bonnes conditions en été et en automne. L'hydrodynamisme des masses d'eau au niveau de ces vasières latérales est modéré et permet le renouvellement des populations des espèces-pilotes.

• Sur la rive sud de Bilho, la sensibilité du peuplement aux variations du débit est plus grande. Les mortalités se produisent dès qu'il atteint 825 m³/s (débit moyen). Les biomasses restent inférieures à la moyenne, pendant 9 mois, ce qui laisse peu de temps pour le renouvellement des populations ; les biomasses doublent ou triplent au cours des

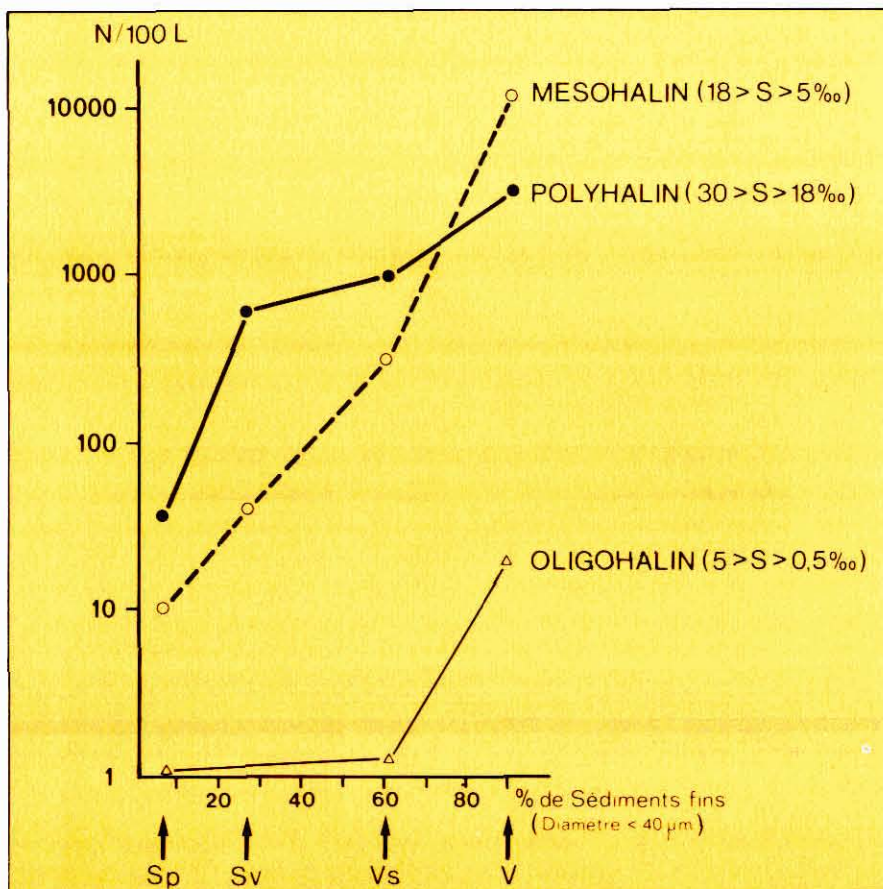


Fig. 3 - Évolution des densités zoobenthiques selon les caractéristiques édaphiques dans les 3 secteurs estuariens. (Sp : sables propres ; Sv : sables vaseux ; Vs : vases sableuses ; V : vases).

Lieux	Densité %		Biomasse %	
	Nord	Sud	Nord	Sud
Secteur de l'Imperlay				
Annélides Polychètes errantes	48		22	
Mollusques Lamellibranches	43		77	
Banc de Bilho				
Annélides Polychètes errantes	1,2	1,3	1,3	1,7
Mollusques Lamellibranches	30	43	70,5	91
Mollusques Gastéropodes	1,8	44	0,2	3
Crustacés Péracarides	64	7,7	28	4,1
Brouteurs	1,8	44	0,2	3
Dépositivores	83	41	89	40,8
Filtreurs	12	11	10,4	56,1

Tabl. 2 - Richesse des communautés zoobenthiques du domaine polyhalin.

3 mois d'été avec une contribution non négligeable mais fugace d'une espèce d'origine marine : la coque.

• Sur la rive nord de Bilho, l'évolution des biomasses est très différente.

Les valeurs sont maximales en hiver et au printemps et représentent 200 % de la biomasse moyenne. Ces accroissements sont dus à la présence de deux crustacés benthiques dont l'apport trophique est important, lorsque les milieux avoisinants sont appauvris par la mortalité affectant leurs composantes biologiques.

• Les valeurs minimales sont estivales et automnales. Les biomasses sont alors de 13 % inférieures à leur niveau moyen. Les espèces précédentes ont disparu du milieu et sont remplacées par les stades juvéniles de Lamellibranches marins transportés par les courants tidaux (coque). Ces jeunes Lamellibranches disparaissent pour des débits supérieurs à 900 m³/s.

2 - Contribution des composantes spécifiques à la richesse des communautés (tabl. 2)

2-1 Le secteur de Lavau

Les Annélides dominent largement en densité et en biomasse. Malgré la brièveté de leur présence, les Mollusques Lamellibranches représentent tout de même 13 % des biomasses totales. Quel que soit le groupe zoologique considéré, il s'agit d'organismes qui sont tous des mangeurs de dépôt ; leur présence est donc liée à la richesse nutritive des sédiments vaseux.

La production biologique de ces substrats, effective durant les trois mois de période hivernale, est due essentiellement aux Annélides.

2-2 Le secteur de l'Imperlay

Les Annélides Polychètes errantes et les Mollusques Lamellibranches constituent l'essentiel des peuplements (tabl. 2).

Les espèces présentes, limitées au nombre de 5, sont toutes des consommateurs primaires, les vases de l'Imperlay étant très riches en matière organique vivante (microphytobenthos) et détritique.

Dans ce secteur, les Annélides sont responsables de l'élaboration de 62 % de la matière

vivante, le reste étant produit par les Lamellibranches.

2-3 Le secteur de Bilho

- Sur la rive sud.

Trois groupes zoologiques sont diversement représentés ; il s'agit des Annélides Polychètes errantes, des Mollusques Lamellibranches et Gastéropodes, et des Crustacés Péracarides (tabl. 2).

Ces animaux appartiennent à trois catégories trophiques qui sont :

les brouteurs, les dépositivores, et les suspensivores ou filtreurs.

L'abondance pondérale des filtreurs montre que la nourriture planctonique est disponible dans ce secteur. Cependant les conditions hydrologiques sont telles qu'elles ne permettent pas la survie hivernale des populations installées en période de recrutement (été). La production globale y est donc nulle.

- Sur la rive nord.

Les groupes zoologiques ici représentés sont les mêmes que ceux de l'estran sud de Bilho avec une dominance des Mollusques Lamellibranches et des Crustacés Péracarides.

Les catégories trophiques correspondantes sont là aussi les brouteurs, les dépositivores, les filtreurs.

La production est essentiellement due aux Mollusques Lamellibranches dépositivores. Les autres espèces subissant de fortes variations démographiques ne peuvent assurer qu'une petite partie de la production.

3 - Conclusions.

3-1 Conséquences des derniers travaux d'aménagement : dépôt de dragage en 1980, creusement d'une zone d'évitage à Montoir, approfondissement du chenal de navigation (fig. 4) :

a) Le secteur le plus affecté est la zone de Bilho. Le dépôt de sédiments remaniés sur le banc de Bilho a provoqué une redistribution des peuplements avec :

. disparition des faciès à "Micro-Annélides" dépositivores

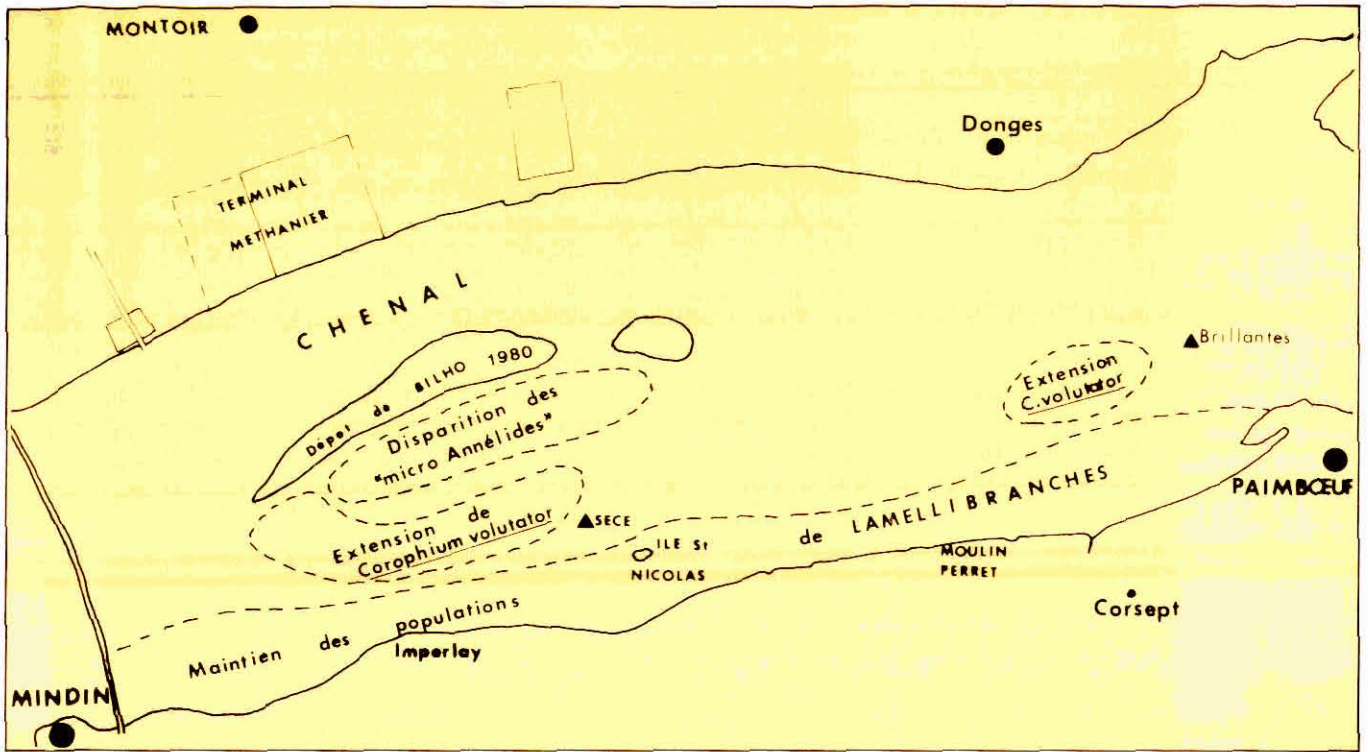


Fig. 4 - Principales modifications dans les répartitions des communautés benthiques depuis les travaux récents d'aménagement (1980).

qui ne représentent plus que 2 % de la superficie totale;

- . régression des faciès à Mollusques Lamellibranches filtreurs et dépositivores;

- . développement des populations de *Corophium* qui devient l'espèce pilote dans 43 % des surfaces.

Cette évolution est due à 2 principaux facteurs :

- . la redistribution des sédiments (ensablement du chenal sud; envasement de la passe des Brillantes; mobilité permanente du substrat);

- . la modification de la courantologie (les courants de jusant n'empruntent plus le chenal sud et sont canalisés au nord de Bilho dans le chenal de navigation; les courants de flot utilisent préférentiellement le chenal nord, mais également en partie le chenal sud en venant buter sur la zone envasée des Brillantes; un nouveau courant traversier de jusant orienté de Paimbœuf vers Gardiloire s'est établi et a remplacé ceux de la passe traversière du Priory et du sud des Brillantes).

b) Les vasières latérales de Mindin à Paimbœuf n'ont été touchées qu'indirectement par les aménagements. Le faciès à Mol-

lusques Lamellibranches y est toujours bien représenté. Toutefois, un envasement et un exhaussement progressif de cette zone qui n'est plus soumise qu'à un très faible hydrodynamisme peuvent se produire.

c) La répartition amont-aval des espèces a été légèrement modifiée et entraîne une remontée de quelques kilomètres de la limite de pénétration de certaines espèces euryhalines vers l'amont. Si le seuil de salinité ne remonte que faiblement vers l'amont, l'influence des eaux marines étant plus accentuée, le risque principal est d'assister à une diminution de l'aire de la zone de transition à caractère polyhalin. Même si sa remontée vers l'amont devenait effective, la zone Cordemais-Le Pellerin est moins propice à l'installation de peuplements productifs en raison de l'étroitesse des vasières latérales et de l'endiguement des berges.

3-2 Bilan de la production benthique.

a) La contribution des différentes stations d'un transect à la richesse d'un secteur est très variable.

- Dans le secteur C (mésohalin).

Seules les stations vaseuses sont productives, les sables plus ou moins envasés étant pauvres. On peut estimer à 13 t/an la quantité de matière organique produite dans ce secteur.

- Dans le secteur B (polyhalin).

. Toutes les stations de l'estran vaseux de l'Imperlay ont une contribution équivalente. Il y a homogénéité et stabilité du milieu. La biomasse animale produite en une année sur les vasières entre Mindin et Paimbœuf peut être estimée à 37 t/an.

. Seules les stations de la rive nord du dépôt de Bilho situées au-dessous du niveau de basse mer de morte eau sont productives. L'extrapolation à l'ensemble de la rive nord est délicate, étant donnée la mosaïque des peuplements. Cependant, on peut estimer à un maximum de 15 t/an la biomasse produite, la banquette relique en représentant 3 à 5 % à elle seule.

. Les sédiments de la rive sud du dépôt de Bilho ne sont pas productifs. Les mauvaises conditions édaphiques dues à la nature du substrat et à sa mobilité, la sensibilité du milieu aux conditions de dessalure font que le mauvais recrutement des espèces

et leur mortalité importante sont responsables d'une perte de biomasse estimée à 4 kg/ha/an, soit 1,5 t/an pour l'ensemble de la zone sud.

Au total la production macrozoobenthique de l'estuaire interne de la Loire, peut être évaluée très grossièrement à 65 t/an de matière organique.

- Le secteur mésohalin dont les estrans représentent 9 % des surfaces intertidales globales en produit 20 %.

- Dans le secteur polyhalin :

. les vasières marginales qui occupent 16 % des surfaces, produisent 57 % de la biomasse zoobenthique ;

. les estrans du dépôt de Bilho qui constituent 75 % des surfaces, n'en produisent que 23 %.

Cette approche permet d'évaluer le rôle joué par les vasières naturelles dans la richesse de l'estuaire.

b) La recolonisation des deux rives du dépôt de Bilho ne se fait pas de façon identique :

- la rive sud ne présente pas de signes effectifs de recolonisation ; ensablement de cette zone par les sédiments originaires de la dune terrestre est un handicap sérieux pour l'avenir de cet estran ;

- la rive nord est en cours de recolonisation par deux espèces de Mollusques Lamellibranches : les populations de *Scrobicularia plana* y sont productives, celles de

Mya arenaria semblent trouver sur cet estran des conditions favorables à leur réinstallation et donc à leur production future ; seul un suivi sur une ou deux années pourrait apporter des renseignements sur cette évolution.

c) Les récents essais de longue durée faits sur le modèle réduit de l'ensemble de l'estuaire de la Loire par le L.C.H.F. permettent d'envisager l'état des fonds vers l'an 2000. Ces essais, réalisés en prenant en compte des apports fluviaux de nature vaseuse (1 million de tonnes par an) et l'entretien régulier du chenal de navigation aux cotes actuelles mettent en évidence le colmatage progressif de la zone au sud de Bilho, les fonds ayant tendance à se niveler vers la cote + 2 m environ. On remarque notamment une extension vers le nord de l'ensemble des vasières situées entre Mindin et Paimbœuf ; ces vasières qui occupent actuellement une surface d'environ 300 ha au-dessus de la cote + 2 m, couvriraient vers l'an 2000 près de 590 ha. La production benthique de ce secteur clé de l'estuaire qui est actuellement de 37 t pourrait donc montrer une tendance à l'accroissement dans la mesure où :

- les substrats qui se mettront en place seront de nature vaseuse,

- la circulation des eaux et l'alimentation en matières organiques se feront de manière convenable,

- la surface de ces vasières ne sera pas à son tour réduite par une colonisation trop rapide des

parties supérieures par la végétation.

d) L'estuaire de la Loire se situe à un niveau de production moyen (4 à 7 g/m²/an), comparativement à ce qui est connu dans d'autres estuaires européens :

- 14,4 g/m²/an dans l'estuaire du Grevelingen (Pays-Bas),

- 13,3 g/m²/an dans l'estuaire de la Lynher (Grande-Bretagne).

Le maintien de la productivité d'un milieu tel que l'estuaire de la Loire, passe par l'intégrité des facteurs suivants :

- flux énergétique de sels minéraux et des matières organiques fluviales et marines ;

- qualité du support hydrologique et absence de pollution chimique ;

- qualité du support sédimentaire permettant l'installation de communautés benthiques productives ; la richesse des sédiments en fraction fine est indispensable au maintien des peuplements animaux et végétaux, d'où l'importance des vasières latérales ;

- extension des aires intertidales productives et leur stabilité hydrodynamique.

Actuellement ces conditions sont réunies en plusieurs zones de l'estuaire qui méritent d'être préservées de tout aménagement :

- les vasières bordant la rive nord, de l'île de Pierre Rouge jusqu'à Cordemais ;

- les vasières longeant la rive sud entre Mindin et Paimbœuf.

Chapitre IV
LES RESSOURCES
BENTHO-DÉMERSALES
DE L'ESTUAIRE

Dans l'estuaire de la Loire, les poissons et les crustacés vivant en liaison trophique avec le fond (espèces benthodémersales) peuvent être classés en plusieurs groupes en fonction de leur biologie et de leur dépendance vis-à-vis du milieu estuarien.

- *Les espèces endémiques.*

Les espèces qui accomplissent la totalité de leur cycle biologique dans l'estuaire de la Loire sont peu nombreuses (cas de la crevette blanche et des gobies). Une autre espèce de crevette est endémique du système estuarien, mais elle est localisée de préférence dans les étiers et les zones humides annexes.

- *Les espèces amphibiotiques.*

Ces espèces sont représentées par les poissons migrateurs qui changent 2 fois de milieu au cours de leur cycle :

"mer \leftrightarrow estuaire \leftrightarrow fleuve".

Selon l'ampleur de leur migration, elles peuvent être regroupées en 3 ensembles qui sont :

* les espèces à migration spatiale limitée : l'éperlan, qui se reproduit à la limite amont de la marée dynamique et qui ne s'éloigne guère des eaux de l'estuaire externe ; le mulot, qui a une aire de ponte estuarienne et qui peut pénétrer jusqu'aux limites de la marée dynamique ;

* les espèces à migration spatiale de moyenne importance : le flet, dont l'aire de ponte marine est située sur l'isobathe des 30 mètres et qui peut coloniser la partie basse et moyenne du bassin versant ;

* les espèces à très vaste migration spatiale : la lamproie fluviatile, dont les aires de ponte sont fluviales, mais dont on ignore la limite d'extension aval qui dépend du "poisson support" ; la lamproie marine, dont seule la phase continentale du cycle biologique est connue ; l'aloise vraie et l'aloise feinte, dont on connaît les aires fluviales de ponte, mais dont certaines écophases sont méconnues (dévalaison des juvéniles) ; l'anguille, espèce au cycle complexe et à vaste aire de répar-

tition (mer des Sargasses, Océan Atlantique, continents européen et nord-africain) est capable de "coloniser" le haut des bassins-versants (zone à Salmonidés).

Dans cette catégorie, on peut classer des Salmonidés tels que la truite de mer, le saumon atlantique et l'esturgeon qui n'ont pas été échantillonnés par les engins que nous avons utilisés.

- *Les espèces euryhalines.*

Leur répartition estuarienne qui se fait à l'occasion de certaines écophases de leur cycle biologique est d'une ampleur variable selon les espèces. On distingue les espèces d'origine marine comme la crevette grise, le syngnath, le sprat, le bar, l'anchois, la sole, et les espèces d'origine fluviale comme le poisson chat, la carpe, la brème, le sandre, l'épinoche.

La plupart de ces espèces peuvent être qualifiées de "latérestuariennes" car elles sont surtout inféodées aux bordures d'estuaire et aux marais annexes.

Si, pour les espèces endémiques, l'estuaire représente le support vital de tout le cycle biologique, il prend pour les autres une importance capitale et nécessaire durant certaines de leurs écophases.

Du fait de sa situation privilégiée par rapport à l'ensemble de l'hydrosystème, le rôle de l'estuaire est multiple et primordial. Pour les espèces amphibiotiques, il est un lieu de passage obligatoire pour les migrations de montaison ou d'avalaison, un lieu de sédentarisation de certaines fractions de la population, un lieu d'alimentation durant des écophases particulières. Pour les espèces euryhalines d'origine marine, il est un site privilégié servant de support trophique aux fractions juvéniles des populations (nourricerie).

1 - Caractéristiques générales des ressources benthodémersales.

1-1 Les ressources benthodémersales inventoriées par pêche planctonique.

La pêche planctonique des espèces benthodémersales per-

met de proposer un schéma de dispersion des stades planctoniques de certaines espèces de crustacés et de poissons.

- Crustacés.

Les post-larves de crevette grise apparaissent en avril dans le secteur polyhalin (B) et en mai dans le secteur mésohalin (C), plus en amont.

Les larves des Décapodes marcheurs (crabes et pagures) sont limitées à l'estuaire maritime pendant l'hiver. Elles pénètrent dans le secteur de Bilho dès le mois d'avril et peuvent même être transportées par le flot jusque sur le banc de Lavau en période d'étiage.

- Poissons.

Les post-larves de certaines espèces semblent avoir des migrations limitées. Celles du sprat qui apparaissent dès février dans le secteur marin (A) ne migrent pas au-delà de Bilho ; celles des autres Clupéidés (hareng et sardine) ont également une pénétration limitée à Bilho au début de l'étiage estival.

En revanche, les post-larves de poissons plats (flets), en provenance des aires marines de ponte, pénètrent dans l'estuaire interne en mars ou avril jusqu'au secteur mésohalin (C).

Provenant des aires de pontes fluviales, la migration des post-larves d'éperlan se fait en sens inverse de celle des espèces précédentes. Elles apparaissent en mars-avril dans le secteur oligohalin. Profitant des débits fluviaux, ces post-larves quittent l'estuaire interne en mai ou juin.

La civelle d'anguille, pénètre en Loire de la fin octobre à la fin mai avec, en début de saison, une vaste extension de St-Nazaire à Cordemais.

Les observations sur les stades planctoniques des ressources benthodémersales dans l'estuaire de la Loire montrent que la phase de colonisation estuarienne est printanière. Parallèlement, mais en sens inverse, les masses d'eaux fluviales, entraînent vers le secteur maritime les post-larves des espèces qui se sont reproduites en amont.

1-2 Les ressources benthodémersales inventoriées par pêche à pied.

- Les mares constituent des micro-biotopes dans lesquels les organismes apportés à chaque marée par le flot, sont piégés. Ce piégeage concerne essentiellement les espèces capables de s'enfourer partiellement ou totalement dans le substrat : jeunes crevettes grises et poissons plats (plie, flet, sole).

- La crevette grise est l'espèce-pilote de ces communautés ; le phénomène de concentration est particulièrement marqué pour cette espèce dont les densités dans les mares sont 5 fois celles de la première vague de flot. De plus, le piégeage ne concerne que les très jeunes individus (10 mm) ceux de taille supérieure ayant une meilleure capacité natatoire.

- Chronologiquement, on constate :

une phase printanière dominée par la crevette grise (première période reproductrice), la plie, puis le flet ;

une phase estivale avec la crevette grise (deuxième période reproductrice) et la sole dont la reproduction est plus tardive que celle des poissons plats cités précédemment ;

une phase automnale avec réduction des densités.

Cette première étude montre que les mares intertidales du dépôt de Bilho contribuent au rôle de nourricerie joué par ce secteur vis-à-vis de la crevette grise et des poissons plats.

1-3 Les ressources benthodémersales chalutées : caractéristiques qualitatives et quantitatives, et évolutions spatio-temporelles.

1.3.1. Caractéristiques générales des ressources benthodémersales de l'estuaire de la Loire.

Pour l'ensemble de l'estuaire, la biomasse moyenne s'élève à 4,5 kg/ha en poids frais. Dominent 4 espèces : le flet, la sole, l'éperlan et la crevette grise ;

. les Poissons représentent 51 % de la densité totale et 94 % de la biomasse totale ;

. les Crustacés en constituent respectivement 47 % et 5 %.

. les Mollusques Céphalopodes sont des éléments mineurs (1 %) essentiellement localisés dans l'estuaire externe.

Globalement, la richesse spécifique de l'estuaire provient du secteur maritime (A) qui constitue soit une réserve d'espèces euryhalines d'origine marine ayant une écophase estuarienne (migration trophique), soit une voie de passage vers les milieux marins profonds ou les milieux dulçaquicoles (migration génétique).

De l'aval vers l'amont, la diversité spécifique décroît de 2,54 (secteur A), à 1,62 (secteur B) puis à 1,34 (secteur C). Cette décroissance correspond à la dominance progressive d'une seule espèce : le flet.

1.3.2. Variations saisonnières des caractéristiques globales des ressources benthodémersales.

Les densités globales du peuplement sont sensibles aux variations des conditions hydrologiques : elles sont maximales en période d'étiage et minimales pour des débits moyens et forts.

Les biomasses globales fluctuent irrégulièrement sans liaison apparente avec l'hydrologie.

La richesse spécifique de l'estuaire est maximale en étiage (24 espèces) et minimale en période de crues (10 espèces).

La diversité spécifique est constante dans le secteur maritime et est de plus en plus fluctuante au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'embouchure de la Loire en direction de l'amont. Elle peut devenir nulle dans les cas extrêmes lorsque le flet devient l'unique espèce du peuplement (dans le secteur C).

1.3.3. Contribution des secteurs aux caractéristiques générales des ressources estuariennes.

- Que l'on considère la totalité des ressources ou uniquement les

poissons, le secteur polyhalin (B) est le plus riche de l'estuaire. A lui seul, il représente plus de 53 % des biomasses et 56 % des densités. Les deux autres secteurs, marin (A) et mésohalin (C), participent au reste de façon à peu près équivalente (entre 18 et 24 %).

- Pour les Crustacés, le secteur A est fondamental pour les biomasses (56 %) et le secteur B pour les densités (57 %). La contribution du secteur C est mineure.

a) Les poissons (fig. 1)

La richesse spécifique de l'ichtyofaune a essentiellement pour origine l'estuaire externe. Cependant en période de crues, les secteurs B et C y contribuent notablement par apport d'espèces euryhalines d'origine dulçaquicole.

En périodes estivale et automnale où les débits fluviaux sont faibles, les densités et les biomasses de poissons sont maximales. Leur concentration est effective dans le secteur polyhalin (B) plus particulièrement au nord du dépôt de Bilho et sur les vasières latérales de Corsept. Les espèces qui contribuent à ces abondances sont le flet, la sole et l'éperlan. Il ne faut toutefois pas négliger le rôle des vasières de la rive nord du secteur mésohalin (C) où le flet et l'anguille sont la base des abondances, suivis par l'éperlan.

En période de crues, les 3 secteurs interviennent de façons différentes :

- le secteur A avec la zone des bouchots qui est riche en tacauds ;

- le secteur B avec la rive nord du dépôt de Bilho essentiellement fréquentée par le flet et l'éperlan ;

- le secteur C avec les diguons de l'île Demangeat servant de refuge au flet.

En période de débits moyens printaniers, les vasières de l'estuaire externe situées sur le Grand Traict de St-Nazaire sont riches en soles alors que celles du secteur mésohalin (Pierre-Rouge-Lavau-Île Bernard) le sont en flet. Dans ce type d'hydrodynamisme le secteur de Bilho intervient peu.

b) Crustacés Décapodes (fig. 2)

Dans les ressources chalutées, la richesse spécifique est limitée à 5 espèces. Les secteurs A et B en sont les principaux responsables.

En période d'étiage estival et automnal, les densités et les biomasses de crevettes grises sont surtout concentrées dans le secteur B et plus particulièrement au niveau des vasières latérales bordant la rive sud de l'estuaire interne. Il faut noter, dans ce cas précis, la contribution momentanée mais réelle de la vasière de Pierre Rouge. La participation de l'estuaire externe repose sur les biomasses de crabe vert dont la population est principalement localisée dans la zone des bouchots.

En période de crues, la crevette grise est encore abondante numériquement dans le secteur de Bilho, mais est essentiellement concentrée dans la zone des bouchots et sur le Grand Traict de St-Nazaire.

En période de débits moyens printaniers, le secteur A constitue l'aire de localisation préférentielle de la crevette grise. Sa population est située à ces moments-là, soit dans la zone des bouchots, soit le long de la rive sud, devant St-Michel-Chef-Chef.

1-4 Conclusions.

L'examen de cet ensemble de résultats nous permet de mettre en évidence le rôle respectif des différents secteurs estuariens.

1.4.1. Le secteur polyhalin (secteur B).

Sa contribution à la richesse du système estuarien en ressources benthodémersales est primordiale, spécialement pour deux zones de ce secteur.

La rive nord du banc du Bilho, zone intertidale proche du chenal de navigation, constitue une zone de concentration d'ichtyofaune et de crevettes durant la période hivernale. La banquette relique de l'ancien banc y prend une place remarquable.

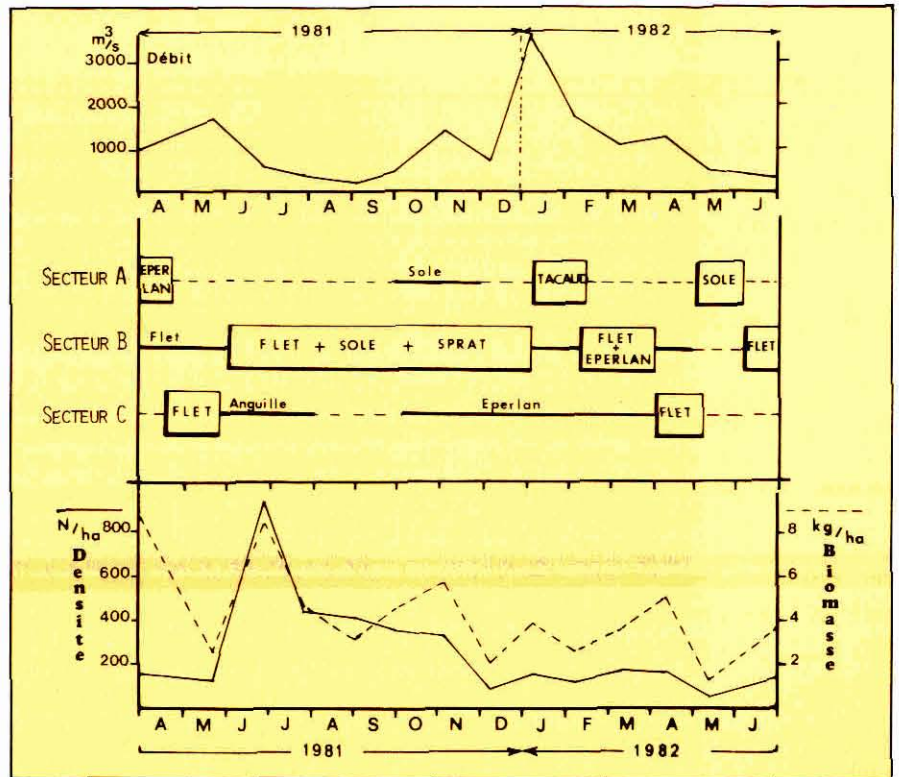


Fig. 1 - Variations saisonnières de la contribution des secteurs aux caractéristiques des ressources en poissons.

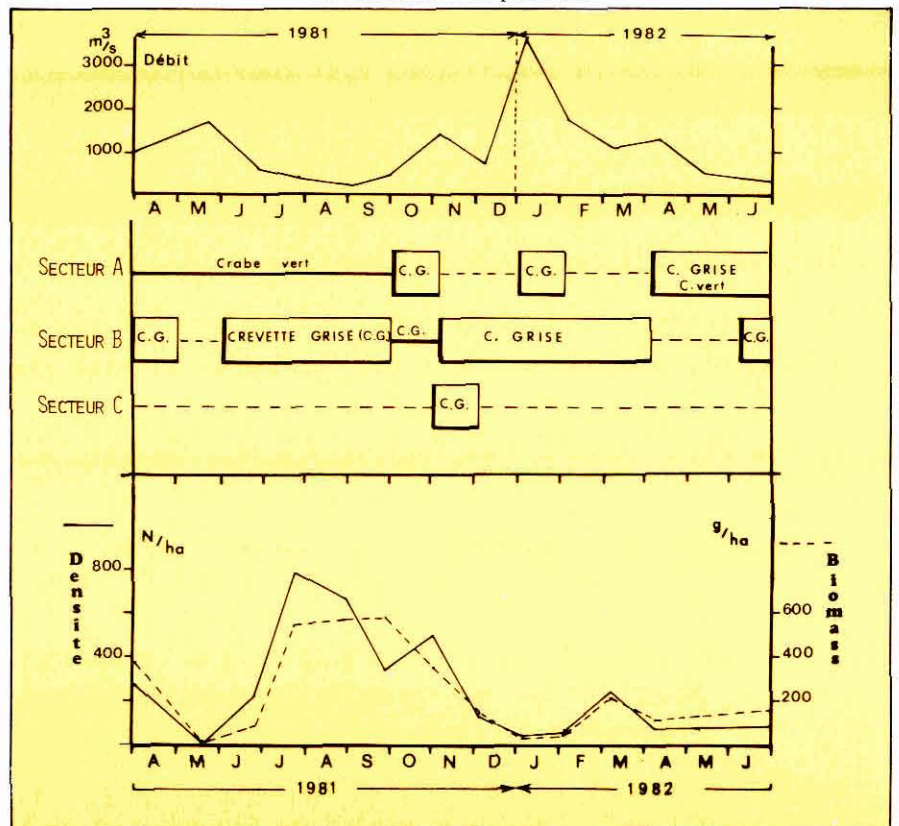


Fig. 2 - Variations saisonnières de la contribution des secteurs aux caractéristiques des ressources en crustacés.

Cette rive présente aussi des dépressions permettant des concentrations importantes de post-larves de crevettes grises (450 000 ind/ha) et de poissons plats (sole, plie, flet, 3 400 ind/ha). Ces mares constituent de véritables réserves d'organismes qui, à chaque flot, peuvent se disperser

sur les aires intertidales de nourrissage situées aux alentours et particulièrement riches en Invertébrés benthiques.

La rive sud de l'estuaire, constituée de vasières intertidales naturelles proches de l'ancien chenal sud, constitue la deuxième

zone de richesse. Cette dernière est marquée durant la période estivale, par une forte abondance d'ichtyofaune, sur la vasière de Corsept, et de crevettes grises, plus particulièrement sur les vasières de l'Imperlay.

N.B. : La rive sud du dépôt de Bilho, dont la sédimentologie a été modifiée par les dépôts de dragages, est remarquable par l'absence de sa contribution à la richesse de ce secteur.

Ces résultats sont importants car ils confirment ceux obtenus dans l'étude du benthos. En effet, les zones déterminées comme constituant les principales réserves de macrozoobenthos (rive nord du banc du Bilho et les vasières de la rive sud de l'estuaire) se révèlent ici comme les plus accueillantes pour l'ichtyofaune et les crevettes grises.

1.4.2. Le secteur maritime (secteur A).

Cette zone de "second ordre" n'a pas la même permanence dans la contribution à la richesse du système estuarien que celle du secteur précédent. Cependant, elle est essentielle et joue un rôle non négligeable à divers titres et à différents moments du cycle biologique de quantités d'espèces citées précédemment.

Nous pouvons y distinguer 3 grandes zones.

. La zone des bouchots qui est recherchée durant la période hivernale par le tacaud et la crevette grise ; cette dernière apparaît d'ailleurs, comme la proie préférée du tacaud.

. La rive sud, constituée de sables vaseux est fréquentée au printemps et en été par la crevette grise, la sole, l'éperlan et le sprat.

. La rive nord, et plus particulièrement les vasières intertidales du Grand Traict de St-Nazaire, où le flet, la sole et les gobies présentent des abondances printanière et estivale remarquables. L'association de ces espèces, typiques du secteur polyhalin, est un fait important car il marque ici le seul prolongement de l'estuaire interne dans le secteur maritime.

1.4.3. Le secteur mésohalin (secteur C).

Deux zones méritent d'être mentionnées.

. Les vasières naturelles de la rive nord (de la tourelle des Moutons au bras de Cordemais) où l'ichtyofaune et les Crustacés sont toujours présents et abondants. La faune de ces vasières naturelles (Oligochètes) constitue donc une base trophique de première importance.

. Les sables vaseux bordant l'île Demangeat (station la plus amont) qui, malgré leur pauvreté, semblent être une zone de refuge pour le flet en hiver.

De plus, la pauvreté de l'ichtyofaune et des Crustacés au droit de la centrale de Cordemais (banc des Bernards) doit être mentionnée.

Afin de préciser le rôle halieutique de l'estuaire, l'écologie des principales espèces participant à la richesse des différents secteurs est présentée ci-après.

2 - Écologie des principales espèces au cours de leurs écophases estuariennes.

Plusieurs critères sont à la base du choix des espèces étudiées :

1) espèce dont l'écologie est peu ou mal connue en France et pourtant caractéristique des estuaires européens,

2) espèce d'intérêt halieutique général et surtout local,

3) espèce dont l'aire de répartition amont ↔ aval est suffisamment vaste pour permettre d'embrasser le fonctionnement de sa population à l'intérieur de l'ensemble du système estuarien,

4) espèce plus particulièrement caractéristique d'un secteur de l'estuaire.

Ainsi les cinq espèces retenues sont la crevette grise, le flet, la sole, le merlan et le bar.

2-1 Écologie de la crevette grise durant ses écophases estuariennes (fig. 3).

Vis-à-vis de l'ensemble des ressources benthodémersales, la crevette grise représente :

- dans le secteur A : 64 % des densités et 7 % des biomasses ;

- dans le secteur B : 51 % des densités et 5 % des biomasses ;

- dans le secteur C : 23 % des densités et 1 % des biomasses.

Globalement, la présence de la crevette grise dans les divers secteurs estuariens suit un rythme saisonnier :

- en hiver : localisation préférentielle dans la zone centrale de l'estuaire externe (bouchots) avec extension certaine vers le large ;

- du printemps à l'automne : localisation préférentielle dans l'estuaire interne (jusqu'à Cordemais à la fin de l'été) et au sud du Pointeau (estuaire externe) (fig. 3).

L'étude du cycle de la crevette grise permet de distinguer 3 générations.

- Une génération hivernale dont l'aire de reproduction est située dans l'estuaire externe ; ces jeunes crevettes pénètrent au printemps dans le secteur polyhalin où elles séjournent au cours de l'été (vasières de l'Imperlay et de Corsept) et où elles deviennent adultes au début de l'automne. Leur migration vers les eaux salées de l'estuaire externe se fait en décembre-janvier et leur première reproduction hivernale s'effectue dans le secteur des bouchots.

- Une génération printanière dont l'aire de reproduction est localisée au sud du Pointeau ; ces animaux pénètrent dans l'estuaire interne en début d'été et y séjournent jusqu'à la fin de l'automne (vasières de Corsept et de Lavau) ; en hiver ces jeunes adultes migrent vers l'estuaire externe et y effectuent leur maturation sexuelle ; leur première reproduction se fait au printemps.

- Une génération estivale dont l'aire de reproduction est située entre le Pointeau et l'Imperlay ; ces animaux occupent au cours

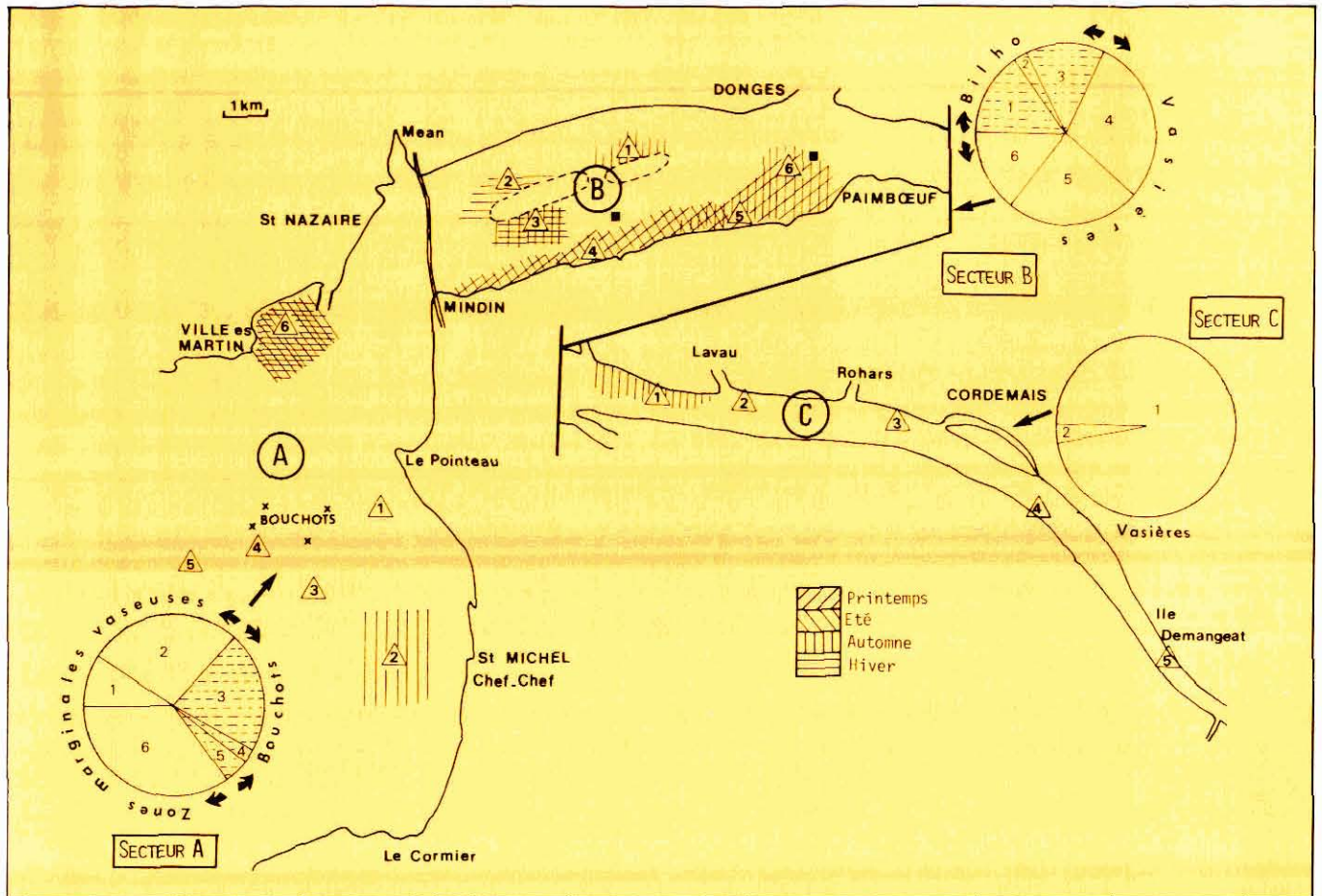


Fig. 3 - Localisation préférentielle des juvéniles de crevette grise dans l'estuaire de la Loire et répartition des densités entre les stations des 3 secteurs (⊗ en %)

de l'automne l'estuaire interne (vasières de Corsept et de Lavau) ; ils y restent durant l'hiver (zone de Bilho) en ne dépassant guère à l'aval le Grand Traict de St-Nazaire. Dès le printemps leur croissance se fait sur les vasières de l'Imperlay et de Corsept ; devenus adultes au cours de l'été, ils effectuent à cette période leur première ponte.

On voit que la crevette grise est une espèce à cycle court, c'est-à-dire qu'elle possède un taux élevé de renouvellement de sa population, dû à sa forte croissance et à l'acquisition rapide de sa maturité sexuelle (à l'âge d'un an). Sa concentration dans les zones littorales en période de reproduction est à l'origine d'une importante activité halieutique. Cependant, il est constaté une diminution régulière des pêches de crevette grise dans l'estuaire externe (intense activité halieutique de mars-avril à octobre) : de 174 tonnes en 1975 à 50 tonnes en 1982 (Port de St-Nazaire). La taille commerciale individuelle actuellement admise (30 mm) autorise la capture, non seulement des adul-

tes (essentiellement des femelles), mais également des immatures qui constituent le potentiel reproducteur de la population. Cette atteinte au stock des futurs géniteurs est certainement une des causes essentielles de l'appauvrissement observé. De plus, cette espèce ayant une aire de distribution limitée à la frange littorale, peut être considérée comme inféodée à un milieu "fermé" dans lequel l'apport de populations "extérieures" est réduit. Les aménagements estuariens entrepris depuis plusieurs années sont vraisemblablement une des autres causes d'appauvrissement. Ils agissent par :

- une réduction des aires de nurserie par comblement de vasières (Moutons) et par dépôt de dragage (Bilho) ;

- le caractère anoxique du bouchon vaseux faisant obstacle à la pénétration de la crevette grise dans les eaux estuarienne ;

- une augmentation de la turbidité due à l'entretien du chenal de navigation par des dragages réguliers.

Malgré la diminution effective de la densité de crevette grise dans l'estuaire de la Loire depuis environ une dizaine d'années, les vasières latérales naturelles continuent à jouer le rôle fondamental de zone de nurserie pour cette espèce. Les jeunes crevettes viennent s'y nourrir et y grandir en profitant de l'abondance saisonnière d'un petit nombre de proies estuariennes (micro-crustacés, micro-annélides). Leurs phases trophiques s'exercent préférentiellement dans les zones abritées de l'estuaire (Imperlay, Corsept, Pierre Rouge, Pipy) dans des conditions de salinité et de température convenant à leurs exigences biologiques.

2-2 Écologie du flet durant ses écophases estuariennes

Dans l'ensemble des ressources ichtyologiques, le flet apparaît comme l'espèce pilote de cette communauté dans les domaines poly- et mésosalin. Il représente, vis-à-vis de l'ensemble des ressources ichtyologiques :

dans le secteur A, 21 % des densités et 34 % des biomasses ;

dans le secteur B, 59 % des densités et 60 % des biomasses ;

dans le secteur C, 68 % des densités et 71 % des biomasses.

2.2.1. Cycle biologique du flet.

Les aires de ponte du flet se situent, au nord entre les îles Dumet et Hoëdic, et au sud au large des Sables d'Olonne, dans des fonds sableux situés de - 20 à - 30 mètres. La ponte a lieu en hiver, mais peut durer au-delà du mois d'avril.

A l'éclosion, les larves subissent un transport tout d'abord passif vers les aires trophiques. Leur migration active se fait lorsque les individus sont suffisamment développés.

Dans l'estuaire de la Loire, les larves apparaissent à la taille de 10 - 12 mm à la limite des secteurs A et B à partir de la mi-mars. On les retrouve un peu plus tard au niveau de Cordemais (avril-mai).

Ces individus deviennent ensuite des juvéniles et sont essentiellement localisés dans les secteurs polyhalin et mésohalin. Leur densité est maximale de juin à septembre-octobre. Au cours de cette période, il y a translation progressive de l'aire de distribution à partir du secteur le plus en amont, en direction des vasières de Pierre Rouge, puis de Corsept et des substrats de la rive nord de Bilho. Ces juvéniles restent pendant l'hiver dans le secteur polyhalin et en particulier dans la zone du Bilho. Au printemps suivant, ces juvéniles deviennent des immatures. Leur localisation est principalement concentrée dans l'estuaire interne (B et C). Toutefois, ils constituent aussi la majeure partie de la population présente dans le secteur maritime au niveau du Grand Traict de St-Nazaire.

Dans l'estuaire interne, ces immatures vont se disperser entre le dépôt de Bilho et l'île Demangeat vers laquelle ils migrent en hiver. Il est possible que cette aire "d'hivernage" s'étende vers le bassin versant. Au cours de cette phase la maturation sexuelle s'effectue et permet ensuite à ces individus de participer à la reproduction dès qu'ils ont plus de

deux ans. A partir de ces aires de ponte, les adultes se dispersent et peuvent, soit se maintenir sur le plateau continental, soit revenir en estuaire.

2.2.2. Régimes alimentaires du flet

L'étude du régime alimentaire dans les secteurs fréquentés par les juvéniles de flet montre que la qualité du support trophique (taille des proies) et son abondance constituent la "force d'attraction" de ces jeunes individus dans les secteurs estuariens.

Ses principales proies sont :

- au printemps et en été, des copépodes qui recherchent les eaux saumâtres chaudes des vasières latérales où abonde la matière détritique leur servant de nourriture ;

- en été, des "micro-annélides" dont l'extension des populations est maximale lors de l'envasement des substrats ;

- en hiver et au début du printemps, des petits crustacés benthiques, sur Bilho et Lavau, dont l'abondance est favorable au maintien des jeunes cohortes de flet dans l'estuaire.

On voit donc que, grâce à une succession saisonnière d'un petit nombre de proies, l'estuaire interne offre aux jeunes flets des supports trophiques variés et permanents leur permettant d'assurer leur première année de croissance dans de bonnes conditions.

Cette étude, met en évidence la localisation préférentielle des jeunes flets et montre que les zones de concentration correspondent aux aires de nourricerie, parmi lesquelles figurent les vasières naturelles de l'Imperlay à Cordemais.

2-3 Écologie de la sole durant ses écophases estuariennes.

D'un point de vue économique, la sole est l'espèce prépondérante du Golfe de Gascogne. Sa présence dans les zones littorales et continentales que nous avons étudiées se traduit par une fréquence plus élevée dans les secteurs maritime et polyhalin de l'estuaire que dans le reste de ce système.

Cependant, c'est dans le secteur polyhalin (secteur B) que les densités et les biomasses sont les plus fortes. La pénétration dans le secteur mésohalin ne se fait qu'à la faveur des périodes d'étiage ou de débits moyens avec de forts coefficients de marée.

La présence quasi permanente de la sole dans les secteurs A et B de l'estuaire subit des variations saisonnières qui sont dominées par une abondance d'individus de la fin du printemps au début de l'automne. Ceci est particulièrement net dans le domaine polyhalin qui est une zone de concentration estivale de soles.

Par rapport à l'ensemble du peuplement ichthyologique la sole représente :

- dans le secteur A, 22 % des densités et 13 % des biomasses

- dans le secteur B, 17 % des densités et 12 % des biomasses

- dans le secteur C, 3 % des densités et 0,7 % des biomasses.

2.3.1. Cycle biologique de la sole

A l'issue de la période hivernale de ponte qui s'effectue dans les eaux profondes (30 à 70 m) principalement situées au large des Sables d'Olonne et de la Rochelle, les larves puis les post-larves migrent vers les eaux littorales plus chaudes et plus dessalées. Elles arrivent dans l'estuaire de la Loire à partir du mois de février et atteignent un maximum d'abondance en avril. Les juvéniles se localisent alors essentiellement dans le secteur B. Leur pénétration dans l'estuaire amont se limite à Cordemais au début des périodes d'étiage. Ils se concentrent principalement sur les vasières latérales (Imperlay, Corsept). A l'automne, leur localisation préférentielle se fait au sud du Pointeau. En hiver, le secteur des bouchots constitue certainement la limite amont de leur aire d'hivernage dont le centre est situé en zone marine littorale. Les solettes mesurent alors en moyenne 80 mm.

Au printemps suivant, leur pénétration estuarienne se fait principalement dans le domaine polyhalin. En été et en automne, les solettes ayant alors plus d'un

an séjour en estuaire, mais en se limitant au dépôt du Bilho (surtout estran nord et ouest) et au sud du Pointeau. Leur aire estivale de nourricerie s'étend jusqu'au Grand Charpentier. En hiver, le secteur maritime des bouchots devient à nouveau la zone préférentielle mais ne constitue vraisemblablement qu'une petite partie de l'aire d'hivernage ; leur taille moyenne est alors de 170 mm à 180 mm. Lorsqu'elles atteignent leur troisième année, leur dispersion en estuaire se limite au printemps et uniquement dans la partie aval du domaine polyhalin (Bilho-Imperlay). Dès le début de l'été, elles occupent à nouveau les aires marines de l'estuaire. La taille moyenne des individus à la fin de leur 3^e année d'existence est d'environ 210 à 220 mm. A partir de ces aires estivales, la population migre progressivement vers les aires de ponte. Celle-ci débute dès le mois de décembre.

2.3.2. Régimes alimentaires de la sole

Contrairement au flet, les jeunes soles consomment peu de plancton ; elles ont dès leurs premiers stades benthiques une préférence alimentaire pour la faune du sédiment.

L'analyse des contenus digestifs montre que la sole se nourrit aux dépens des diverses communautés benthiques de l'estuaire de la Loire en y prélevant les proies les plus abondantes. Ainsi, en présence des populations très denses de Crustacés benthiques (rive nord du Bilho) la sole en fait ses proies préférentielles. Au niveau des vasières latérales, elle se nourrira plutôt d'Annélides et de siphons de Mollusques.

Il faut souligner l'importance de la crevette grise dans le régime de la sole. Il existe une parfaite concordance de présence spatiale et temporelle entre les aires de distribution estuarienne de la proie et de son prédateur. Ce phénomène est particulièrement net dans l'estuaire, soit au niveau des vasières latérales internes au prin-

temps, soit au niveau du secteur du Pointeau en été. Cette concordance spatio-temporelle est facilement observable lors de la pêche crevettière dans l'estuaire externe : la destruction des jeunes soles lors de cette activité y est impressionnante.

2-4 Écologie du merlan durant ses écophases estuariennes.

Par sa faible contribution à la richesse ichtyologique de l'estuaire, notamment dans les secteurs amont, le merlan ne joue pas un rôle fondamental dans ce milieu. Une prospection plus intense de la partie externe de l'estuaire avec des engins appropriés permettrait de mieux estimer l'importance de cette espèce dans les milieux littoraux de la région ligérienne.

2.4.1. Cycle biologique du merlan (fig. 4)

Au cours d'un cycle annuel, les jeunes merlans pénètrent dans l'estuaire externe dès le printemps et y restent en été en se localisant de façon préférentielle au sud du Pointeau. En automne, la pénétra-

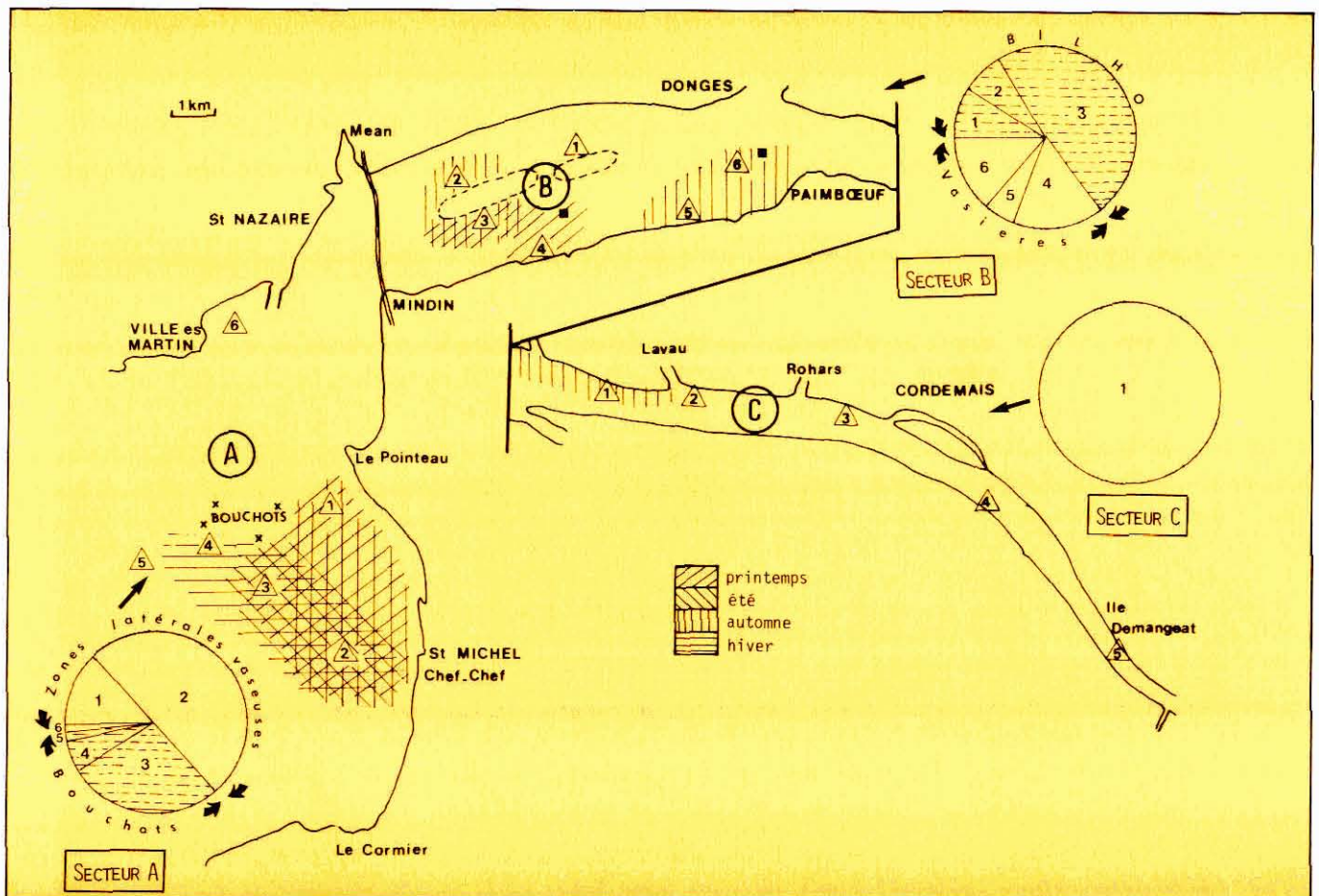


Fig. 4 - Localisation préférentielle du merlan dans l'estuaire de la Loire et répartition des densités entre les stations (\odot en %).

tion de ce groupe d'âge s'effectue jusque dans le secteur mésohalin ; toutefois, les densités sont maximales à cette époque dans le domaine polyhalin (secteur B). Dans ce dernier les vasières latérales sont surtout une zone d'accueil automnal alors que les estrans de Bilho interviennent comme principale zone de concentration tout au long de l'année (sauf en hiver).

2.4.2. Régimes alimentaires du merlan.

Quel que soit l'âge ou le secteur considéré, le merlan apparaît comme un prédateur de Crustacés suprabenthiques (crevette grise, Mysidacées, Gammarus). L'abondance de ces proies dans les divers secteurs estuariens constitue le support trophique idéal pour ces jeunes merlans. Il faut souligner, en particulier, la parfaite concordance entre les aires de distribution estuarienne de la crevette grise et de celles de ce prédateur qui suit les déplacements de sa proie au sein de l'écosystème. Il semble que les jeunes poissons (sprats, gobies) soient une proie

secondaire pour les jeunes merlans et deviennent dominants dans les régimes des individus plus âgés.

2-5 Écologie du bar durant ses écophases estuariennes

Globalement, le bar représente 0,9 % de la densité et 1,6 % de la biomasse de l'ichtyofaune présente dans l'estuaire de la Loire. Sa contribution à la richesse de l'estuaire en poissons est maximale :

- à la fin de l'hiver en ce qui concerne la densité (4,3 % en mars),

- au début de l'automne pour ce qui est de la biomasse (9 % en septembre).

2.5.1. Cycle biologique du bar (fig. 5)

La période de reproduction du bar débute en mars pour s'achever en août. Les jeunes bars nés au cours de l'été dans les eaux marines pénètrent en estuaire au début de l'automne et migrent jusque dans le secteur situé le plus en amont (Cordemais) de leur aire

de dispersion. Au cours de l'automne, ils occupent préférentiellement le secteur compris entre l'étier de Lavau et la vasière de Corsept. En hiver, leur aire de dispersion se rétrécit et se limite alors aux vasières de Corsept. Au printemps suivant, cette cohorte fréquente surtout les estrans du dépôt de Bilho et la vasière du Grand Traict de St-Nazaire.

Arrivés à l'âge d'un an (printemps-été), les jeunes bars se dispersent essentiellement dans la zone du Bilho qu'ils quittent dès l'été pour migrer vers les eaux plus marines. Ils peuvent être accompagnés de quelques individus âgés de plus de 2 ans dont la présence en estuaire est très limitée dans le temps et dans l'espace.

Il apparaît donc que l'estuaire de la Loire joue le rôle d'une zone de concentration des jeunes bars au cours de leur première année de vie. Dès leur seconde année, l'estuaire n'est plus qu'une zone de présence estivale.

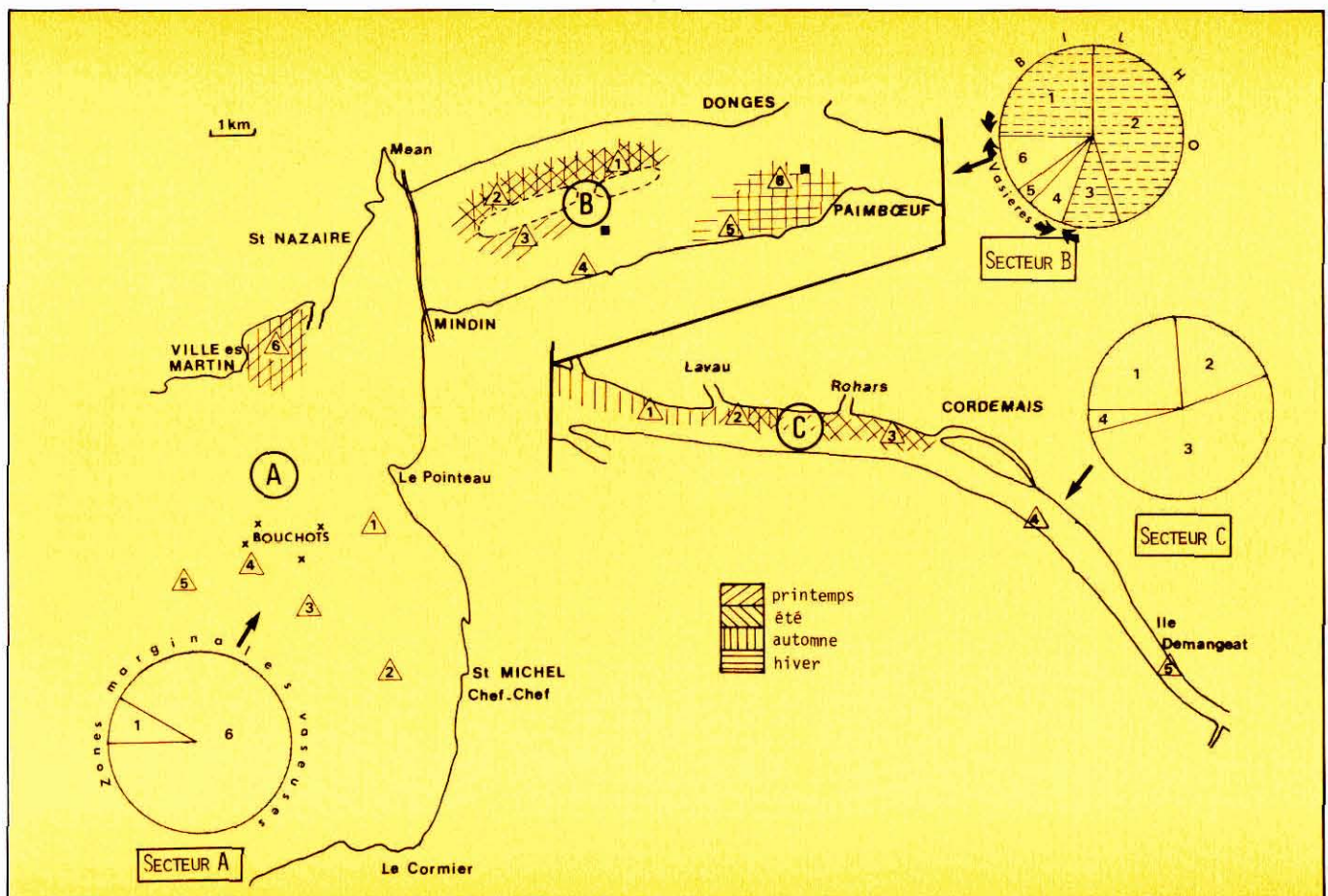


Fig. 5 - Localisation préférentielle du bar dans l'estuaire de la Loire et répartition des densités entre les stations (⊗ en %).

2.5.2. Régimes alimentaires du bar

- En automne les jeunes bars nés au cours de l'été pénètrent profondément dans l'estuaire jusqu'au niveau du panache thermique de la centrale de Cordemais. Dans ces nappes d'eau réchauffée, prolifèrent les populations automnales de Copépodes qui constituent la proie préférée des jeunes bars.

- En hiver, ils séjournent dans le domaine polyhalin, au niveau des vasières latérales où persiste également une partie de la population de crevette grise. Cette espèce devient alors la proie principale des poissons.

- Au printemps et en été, les jeunes bars qui atteignent un an se localisent surtout au nord du dépôt de Bilho où abondent les crustacés benthiques (*Corophium*).

- A la fin de l'été, les bars de plus d'un an quittent l'estuaire. Ils y reviennent le printemps suivant et se nourrissent alors essentiellement de *Corophium* dans le secteur A en avril, puis de crevette grise et de *Corophium* (secteur B) au début de l'été. Toutefois, il sem-

ble y avoir une évolution du comportement alimentaire du bar qui devient progressivement ichtyophage dès sa deuxième année de vie.

De cette analyse ressort le fait marquant, que les vasières de l'estuaire (de Corsept à Cordemais) et la banquette-relique du Bilho sont les aires de nourricerie des jeunes bars dans l'estuaire de la Loire.

3 - Bilan des relations trophiques dans l'estuaire de la Loire et conclusions.

3-1 Bilan des relations trophiques (fig. 6).

Les travaux conduits dans le cadre de cette étude générale sur la connaissance de l'environnement biologique estuarien permettent de réaliser une synthèse montrant la qualité et la diversité des liens trophiques unissant les différentes composantes biologiques des communautés faunistiques estuariennes.

Toutefois, il faut remarquer dans ces bilans l'absence quasi totale de la composante pélagique.

3.1.1. Dans le secteur maritime (A)

Les consommateurs secondaires et tertiaires dans ce secteur sont, par ordre décroissant d'importance, la sole, le flet, le tacaud, le sprat, l'éperlan et les gobies. Il faut ajouter à ces espèces principales, le merlan, le callionyme (ou dragonnet) et le chinchard ainsi que quelques espèces diverses (anguilles, motelle, merlu, anchois, lieu jaune, rouget, lançon).

En résumé, 2 grandes communautés de prédateurs sont reconnaissables dans le secteur maritime de l'estuaire.

- Une communauté de type estuarien basée sur des populations benthodémersales caractéristiques des eaux à salinité variable.

Sa localisation préférentielle se fait au niveau des faciès sablo-vaseux littoraux tels qu'on en rencontre au Grand Traict de St-Nazaire et au sud du Pointeau jusqu'au Cormier. Les espèces-proies y sont variées et relativement abondantes. Les Crustacés sont le groupe zoologique servant de base au réseau trophique. Ce dernier peut être :

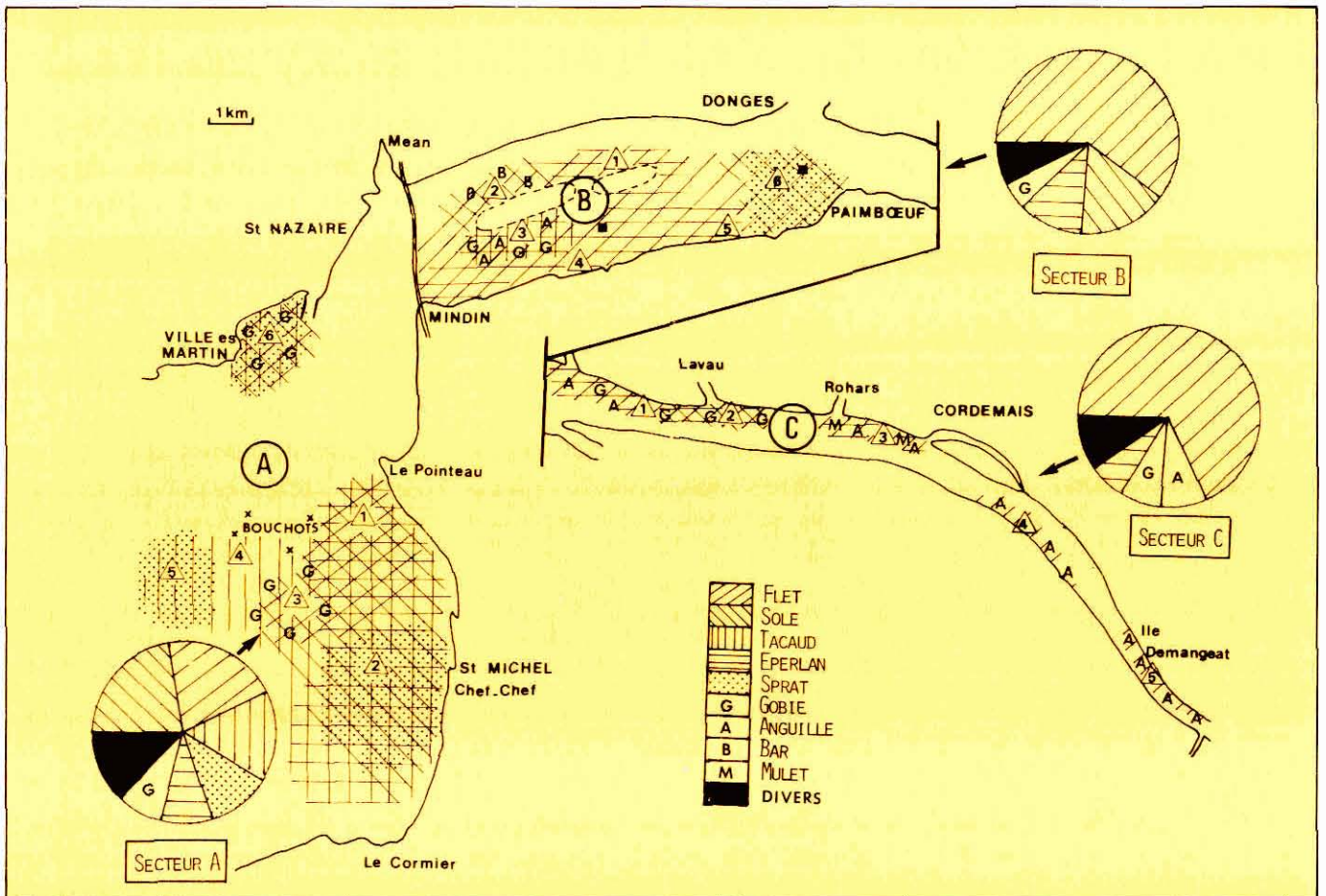


Fig. 6 - Localisation préférentielle des prédateurs et leurs contributions respectives (\odot en %) aux peuplements ichtyologiques des 3 secteurs estuariens.

. soit typiquement planctonique avec le sprat comme consommateur de second ordre (espèce à tendance pélagique);

. soit benthodémersal, avec la matière détritique à la base du réseau et des mangeurs de Crustacés (bar, tacaud, éperlan) ou de Mollusques et d'Annélides (flet, sole, bar) au sommet.

- Une communauté de type marin qui ne franchit pas le secteur des bouchots et qui est basée sur des espèces sténohalines (en faibles quantités) et des espèces euryhalines d'origine marine en plus grande quantité (tacaud) recherchant des fonds durs ou sableux. Elle occupe la zone centrale où les proies sont peu nombreuses : larves et adultes de Crustacés et Mollusques filtreurs. Les principaux prédateurs appartiennent à la communauté de type "estuarien" mais s'y ajoutent plusieurs espèces marines sténohalines. Les chaînes trophiques sont de 2 types :

. planctonique avec la liaison : Copépodes-Sprat ;

. benthodémersale où intervient la crevette grise, consommée essentiellement par le tacaud. En période hivernale, il y a concordance entre les aires de distribution de la proie et du prédateur. Cette chaîne se termine par les macro-carnivores (lançon, lieu jaune, merlu) qui se nourrissent de jeunes poissons.

3.1.2. Dans le secteur polyhalin (B)

La communauté des carnivores dans ce secteur est basée sur 4 espèces essentielles qui sont le flet, la sole, l'éperlan et les gobies. Viennent ensuite le sprat, le bar et l'anguille. Les espèces euryhalines d'origine marine sont limitées à 10 dont le congre, le chinard, le merlan et le merlu. Des espèces euryhalines d'origine fluviale et latéro-estuarienne complètent cet inventaire (le sandre, la brème, le poisson-chat, l'épinoche).

Une seule communauté de type estuarien constitue le compartiment des prédateurs dans le domaine polyhalin. Elle est basée sur le groupe des poissons plats euryhalins d'origine

marine et amphibiotiques (78 % des densités) où domine le flet. Toutefois, il est possible de distinguer 2 zones et 2 sous-ensembles de consommateurs, en se basant sur les caractéristiques bio-sédimentaires des supports trophiques.

- La zone du Bilho où les faciès sablo-vaseux ou vaseux (mais très compacts) attirent les espèces carnivores euryhalines d'origine marine comme le bar. Le faciès le plus propice à l'alimentation des prédateurs est la banquette vaseuse qui est le vestige de l'ancien banc du Bilho. L'abondance du microphytobenthos permet l'établissement d'une chaîne trophique de type limnique et détritique, avec un seul consommateur : le mulot. Les principales chaînes alimentaires ont pour base la matière détritique (et les bactéries). Elles sont de type benthodémersal, avec le *Corophium* et la crevette grise comme principales proies du flet, de la sole, du bar, du merlan et de l'anguille, et de type planctonique pour le sprat, l'anchois et le jeune flet.

- La zone des vasières latérales où les faciès de vase molle sont propices au regroupement des espèces fouisseuses euryhalines d'origines marine telle que la sole et amphibiotique tel que le flet. Les relations trophiques sont essentiellement de type benthodémersal mais également planctonique étant donnée l'abondance de Copépodes au niveau des estrans vaseux.

3.1.3. Dans le secteur mésohalin (C)

La communauté des prédateurs est dominée par 4 espèces qui sont le flet, l'anguille, le gobie et l'éperlan. Viennent ensuite la brème et les mulots. Les prédateurs du domaine mésohalin de l'estuaire peuvent être scindés en deux ensembles selon la nature des proies, et donc celle du substrat.

- De Donges à Cordemais, les vasières latérales sont fréquentées par une communauté relativement diversifiée d'espèces essentiellement fouisseuses. Pour certaines d'entre elles, Cor-

demais est la limite amont de leur pénétration estuarienne (bar et gobie). Dans le secteur compris entre Donges et les vasières de Pierre Rouge, les communautés benthiques sont constituées d'espèces rappelant celles du secteur polyhalin (B) ; on y trouve des relations trophiques de type benthodémersal avec l'anguille, le flet et la sole comme consommateurs secondaires ou le mulot comme détritivore-limnivore, et de type pélagodémersal où le zooplancton a pour nourriture la matière détritique. Dans le secteur des vasières latérales compris entre Pierre Rouge et Cordemais le benthos végétal (microalgues) et animal (micro-Annélides) sert de base à tout le réseau trophique dont le point de départ est la matière détritique ; toutefois, la longueur de la chaîne peut varier selon la participation de la crevette grise et des crustacés zooplanctoniques qui constituent un relais non négligeable surtout consommé par les espèces omnivores (le bar, le flet, l'anguille et l'éperlan).

- En amont de Cordemais, la communauté n'est pratiquement constituée que d'espèces amphibiotiques : le flet, l'anguille, l'alose et les mulots. Elles fréquentent essentiellement des fonds sablo-vaseux ou vaseux.

3-2 Conclusions

Dans l'ensemble de l'estuaire, les connaissances acquises permettent de localiser les aires de nourricerie fondamentales dans cet écosystème estuarien. Il s'agit :

- dans l'estuaire externe, du Grand Traict de St-Nazaire (prolongement de l'estuaire interne) et des zones situées au sud du Pointeau ;

- dans l'estuaire interne, des vasières latérales de la rive sud entre Mindin et Paimbœuf, de la rive nord de Donges à Cordemais et de la banquette vaseuse (ancien banc du Bilho) longeant au nord le dépôt de Bilho.

Les autres zones (aire des bouchots et diguons de l'île Demangeat) sont des aires de refuge hivernal pendant lequel l'activité trophique est ralentie. Elles se situent sur la voie des transits des espèces amphibiotiques.

Cette étude met en évidence plusieurs points.

1) Les prédateurs venant se nourrir en estuaire ne sont pas spécialisés : ils sont omnivores et ont un comportement opportuniste basé sur la disponibilité des

proies. On les rencontre essentiellement au niveau des vasières.

2) Dans les zones marquant les limites aval et amont de l'estuaire (bouchots et île Demangeat), il apparaît une simplification des relations trophiques qui sont compartimentées et très peu intriquées. De plus, la spécialisation des régimes s'accroît avec l'apparition des ichtyophages ("super-carnivores") ou des planctonophages vrais.

3) La crevette grise constitue un maillon fondamental dans les

réseaux trophiques estuariens. Elle assure le lien entre les consommateurs primaires (benthos, crustacés zooplanctoniques) et les carnivores. Son abondance au niveau des aires de nourriceries joue un rôle attractif pour l'ensemble des prédateurs.

Il faut donc souligner **l'intérêt de préserver les vasières naturelles** qui offrent une diversité et une abondance de proies caractéristiques de ces milieux saumâtres alimentés par une double source d'énergie : le fleuve et la mer.



Troisième partie

LA GESTION DES ZONES HUMIDES
DE LA RIVE NORD
DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE

INTRODUCTION

1 - Zones humides : définition.

L'expression désigne toutes formes de transition entre l'espace occupé par l'eau en totalité et de façon permanente, et la terre ferme exondée hors d'atteinte des eaux estuariennes ou de leur influence directe. Cette définition conduit à y intégrer :

- quant aux formes extérieures de la végétation : les slikkes et vasières, les schorres (ou herbus) et roselières, et les divers types de marais déterminés selon leur degré et leur durée de submersion;
- quant à la morphologie estuarienne: la zone de balancement des marées, les étiers, les anciens bras fluviaux, les îles, les berges à bourrelets de rives, et les zones de remblaiement par alluvions temporairement exondées.

2 - Structure et caractères physiques des marais de l'estuaire (fig. 1 et 2)

2-1 *L'origine géologique des marais et de leur environnement humide (fig. 2)*

Le point de départ, fort ancien, est la vieille pénéplaine post-hercynienne; elle a été frac-

turée par des failles sans doute dès la fin du primaire, de sorte que deux domaines tectoniques se sont constitués: l'un fait de cassures de direction armoricaine O-NO — E-SE au Nord, l'autre plus complexe, où dominent les orientations O - E au Sud; entre les deux, une zone de broyage de roches, d'interférences des deux directions, a fixé le cours de la Loire dans la seconde moitié du Tertiaire.

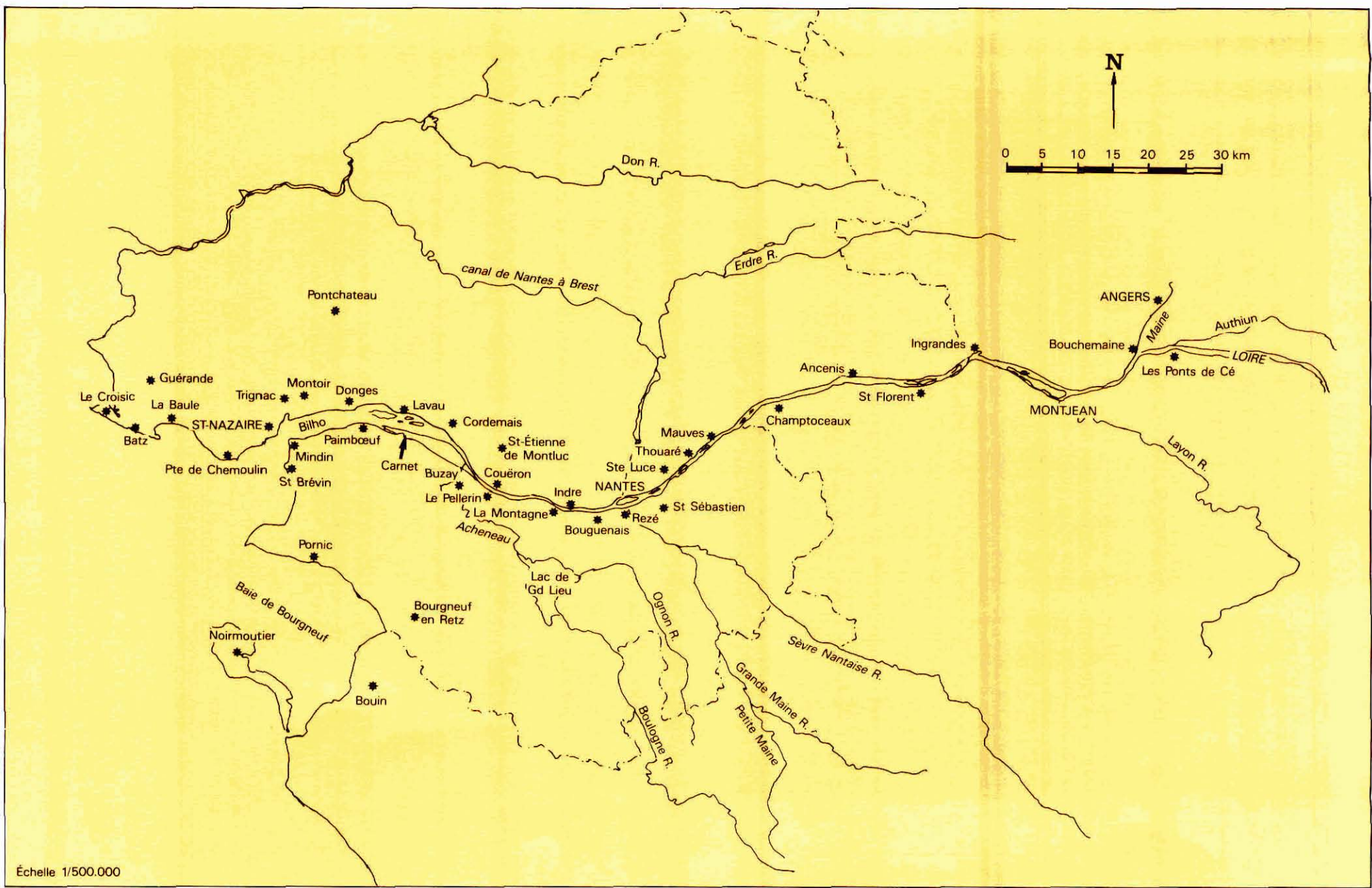
Il apparaît alors que la rive Nord -la seule qui intéresse directement les études du C.S.E.E.L.- est constituée d'une succession de plateaux parallèles basculés et affaissés vers le N-NE, chacun présentant un abrupt tourné vers le S-SO et un un revers en pente douce. En partant de l'Est, il s'agit: du Sillon de Bretagne (avec son revers), du Sillon de Guérande, du Sillon de Batz-Le Croisic; un autre existe en mer. La structure locale qui retiendra l'attention ici est celle formée par le Sillon de Bretagne formant côteaux (80 à 100 m NGF), sur lequel vient s'appuyer le revers du Sillon de Guérande dont la partie basse sert de support aux marais de toute la rive Nord.

La dernière glaciation (Würm) entraînant un abaissement du niveau marin de quel-

que 100 m a provoqué le creusement des rivières anciennes (paléoliths): de la Loire elle-même à — 51 m au droit de Saint Nazaire; mais aussi de tout le réseau diversifié des plateaux basculés: paléo-Brivet (— 31 m) dont la confluence avec ses affluents forme alors la cuvette où s'installera la Brière, et vallées würmiennes des petits ruisseaux descendant du Sillon de Bretagne vers le S.O. et dont les actuels étiers entre Couëron et Lavau sont les héritiers. La fonte des glaces a provoqué le relèvement progressif de la mer à son niveau actuel; ce relèvement entraîne l'ennoyage de l'estuaire, et de la partie basse du prolongement du plateau de Guérande, au pied du Sillon de Bretagne. Selon un processus classique, cet ennoyage s'accompagne de dépôts d'alluvions et de vases (remblaiement flandrien et dunkerquien, depuis 15.000 ans environ), qui met en place le gros-œuvre des marais actuels.

2-2 *Le glacis au pied du Sillon de Bretagne: support des marais de la rive Nord.*

Ce glacis se prolonge de la base du côteau jusqu'à la Loire; il est semé de buttes surbaissées, dont le niveau est de 15 à 20 m



Échelle 1/500.000

Fig. 1 - Partie aval du bassin de la Loire.

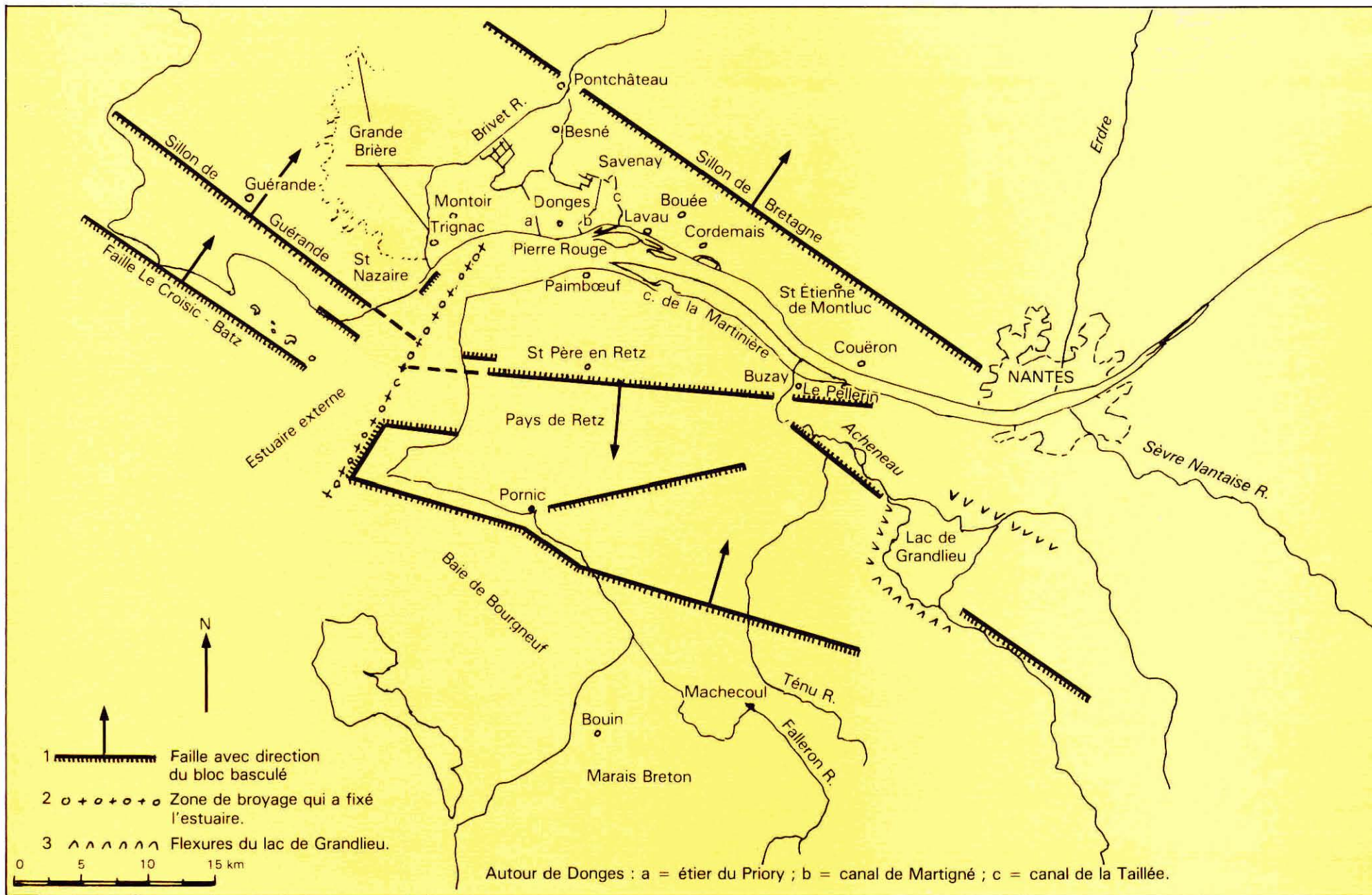


Fig. 2 - Estuaire de la Loire. Carte géologique.

(NGF), formant les interfluves des paléoruisseaux. Elles ont été occupées dès le XII^e siècle par des "gagneries", zones de cultures soumises à contraintes collectives, alors qu'en contrebas étaient les marais dont le niveau (2 à 3 m) dépend de celui des eaux dans l'estuaire.

Une vision d'ensemble montre une diversité d'allures. A l'O-NO, dans la cuvette comblée de l'ancien Brivet, la Brière a des buttes exondées (gagneries) allongées et de faible superficie, alors que les alluvions basses sont vastes et très humides. Au centre, dans les marais de Donges et de Besné, c'est l'inverse, et il s'y forme un lacis d'alluvions correspondant à l'ancien chevelu des rivières locales. A l'E-SE, entre Lavau et Couëron, les zones humides sont réduites à une largeur de 4 à 5 km entre le Sillon et la Loire : là, les buttes de roches cristallines sont mieux délimitées, et rattachées aux côteaux par des dépôts sableux, perméables, s'égouttant après les pluies dans les parties basses qui, finalement évacuent les eaux vers la Loire. La disposition de ces buttes fragmente l'espace et délimite nettement des cellules de marais juxtaposées dans lesquelles la distinction s'impose entre : marais internes ou **prés-marais**, et marais externes ou **prés de Loire**.

C'est seulement cette dernière partie de Lavau à Couëron, qui a été retenue dans les études spécifiques du C.S.E.E.L. sur les zones humides, car elle est la plus largement en contact avec les eaux de l'estuaire, ce qui permet la multiplication des échanges physiques et biologiques (à l'Ouest de Lavau commence l'occupation industrielle et portuaire; à l'amont de Couëron gagne l'urbanisation de l'agglomération nantaise).

Cependant, il n'est pas sans intérêt d'opposer les caractères des divers secteurs estuariens: ils aident à la compréhension des questions qui seront débattues dans le présent rapport.

3 - L'originalité des différentes zones des marais estuariens.

3-1 La rive Sud endiguée du Pellerin à Paimbœuf: une gestion des eaux rationalisée autour de l'Achenau et du Tênu.

L'armature du système hydraulique est la prise d'eau de Buzay, sur la rive endiguée. L'ancien canal de la Martinière permet de stocker l'eau douce et joue un rôle régulateur; l'eau est refoulée par le Tênu affluent de l'Achenau puis par le Falleron, pour irriguer les basses terres de Bouin et de Machecoul.

Ce système a exigé la mise en place de structures précises; une station de pompage à la Pommeraie pour vaincre la dénivellation d'interfluve de 3 m à travers le Pays de Retz entre le versant de la Loire et celui du Marais Breton; puis une organisation opérationnelle rigoureuse et centralisée: un directeur de travaux gère l'ensemble, décide de la politique des eaux; et des éclusiers appliquent les directives données dans le cadre d'un plan d'ensemble cohérent. L'originalité réside dans une conception unifiée et élaborée répondant en même temps aux besoins des marais de la rive gauche et à ceux de la baie de Bourgneuf.

3-2 La rive Sud à l'aval de Paimbœuf.

La frange de marais est étroite: les problèmes qu'elle pose n'ont pas la même ampleur et relèvent largement de la biologie marine.

3-3 L'ensemble géré par l'Union des Syndicats des Marais du bassin du Brivet.

Ici, la structure, on l'a vu, est celle d'une ancienne cuvette comblée drainée par une rivière, le Brivet, sur laquelle sont branchés plusieurs grands canaux. Quatre exutoires, interconnectés par l'amont, touchent la Loire: le Brivet, et les canaux du Priory, de Martigné et de la Taillée. Deux problèmes dominent l'ensemble, que l'on retrouvera à l'amont de Lavau: la difficulté

d'évacuation des eaux d'hiver par insuffisance de calibrage des canaux eux-mêmes; et le déficit estival qui oblige à des apports d'eau de Loire, puisée dans un secteur de forte salinité, ce qui semblerait soulever des difficultés pour la Brière plus que pour les marais de Donges; pourtant, il en est ainsi depuis des siècles.

Les objectifs d'aménagement récemment déterminés sont dès lors les suivants:

- recalibrage des exutoires des eaux pluviales et fluviales, et réorganisation des vannages de contact avec l'estuaire, afin d'éviter leur envasement actuel;
- réalimentation estivale, mais par l'amont, par les eaux de la Vilaine;
- relance agricole prioritairement pastorale, avec conservation de la faune originale pour sauvegarder les possibilités de pêche et de chasse; on veut revenir aux biotopes diversifiés naturels antérieurs, que la durée trop longue des inondations tend à uniformiser.

Le rapport d'étude qui a été établi montre une grande méfiance à l'égard des eaux de Loire, qui n'ont pas été étudiées cependant.

3-4 L'originalité des zones humides de Couëron à Lavau.

Elles sont donc l'objet d'étude du présent rapport. Elles se différencient par de nombreux caractères des ensembles précédents; en particulier:

- ce sont les seules qui possèdent d'**anciens bras fluviaux** encore fonctionnels, et des "**îles de rivière**" encore non intégrées à la "terre ferme"; cela permet la multiplication des interrelations estuaire-marais, et la grande étendue des **vasières** et des **roselières** dont on verra le rôle important;
- les seules où les marais apparaissent en **cellules individualisées** ayant chacune leurs caractéristiques et leur fonctionnement hydraulique propres;
- les seules présentant une diversité naturelle (îles, bras, étiers,

marais externes et internes) susceptible de faire naître de délicates **complémentarités** que l'on retrouve dans les conditions de mise en valeur, donc dans les aspects socio-économiques.

Dans ces zones humides de la rive Nord, se posent quatre séries de problèmes en relation avec l'estuaire:

- le problème de l'**eau**: toute modification dans le rythme de circulation ou la qualité de cette eau entraîne des répercussions en chaîne;
- le problème de l'**herbe**: c'est celui, plus généralement de la conservation de la couverture végétale qui intervient dans la fixation des sols, la constitution

des biotopes, le support de la vie pastorale;

- le problème des **chaînes trophiques** liées à la biologie des étiers et au couvert phytogéographique.
- le problème de l'insertion de l'**homme**, enfin, avec toutes ses conséquences économiques et sociales.

Chapitre I
LA SIGNIFICATION
DES ZONES HUMIDES
DANS LE CONTEXTE ESTUARIEN

Que veut-on faire des zones humides de la rive Nord ?

1 - Un milieu naturel dont la conservation est reconnue nécessaire.

1-1 Les prévisions d'aménagement.

De nombreux et solides arguments poussent à la conservation en l'état naturel. A l'amont, l'agglomération nantaise compte actuellement environ 450 000 habitants, et en aura quelque 820 000 en fin de siècle; le maintien d'**espaces verts** à l'Ouest de cette agglomération, c'est-à-dire dans la direction des vents dominants, est une question de salubrité en même temps que de contrôle contre l'expansion des aires urbaines nouvelles. A l'aval, au-delà de Lavau, se trouvent les seuls sites nautiques à grande profondeur propres au développement industriel et portuaire: il faut éviter une industrialisation continue qui progresserait en direction de Couëron et ferait de l'estuaire une rue d'usines, et ce, malgré l'existence de la Centrale de Cordemais.

Aussi, les positions officiellement prises sont-elles celles d'une urbanisation discontinue que l'on retrouve sous les aspects suivants:

- dès 1978 et 1979, l'OREAM Nantes/Saint-Nazaire a repris l'idée d'une "**écharpe verte de l'estuaire**" comprenant les marais de la rive Nord à l'amont de Lavau, et ceux de la rive Sud autour du plan d'eau de la Martinière;
- cette conception a été reprise par le Port Autonome qui a proposé une modification de sa circonscription afin de "ménager une large coupure verte en dehors de toute activité portuaire à l'aval du Pellerin, sur les deux rives du fleuve"; un décret en Conseil d'État a été demandé dans ce sens, qui doit être pris incessamment;
- les Plans d'Occupation des Sols (P.O.S.) des cinq principales communes intéressées reprennent à peu près systématiquement en zone non constructible (affectée durablement à l'agriculture) les terres basses de leurs

marais c'est-à-dire en gros, celles placées en dessous de la courbe de 5 m (NGF).

Globalement, il existe une large concertation pour le maintien de ce secteur en zone naturelle.

1-2 Cette position est en conformité étroite avec les incitations des écologistes scientifiques.

L'ichtyologie des marais dépend des échanges avec l'estuaire. L'aspect le plus important sans doute, en tous cas celui dont on parle le plus, est lié aux civelles et aux anguilles. L'arrivée de ces civelles et leur dissémination dans les étiers se fait jusqu'en avril ou mai; c'est le moment de remontée dans l'estuaire de diverses espèces piscicoles; c'est encore le moment du **vidage des eaux douces** des marais, propice aux brassages; par exemple, c'est alors que les canaux se repeuplent en sandre. En fin de printemps et au début de l'été (mai-15 juillet), les marais se sont égouttés, et demandent déjà les premiers **envois de Loire**: cela facilite la dissémination des jeunes anguilles devenues pimpre-neaux, et le frai des espèces d'eau douce a déjà permis la réoccupation des fonds de réseaux, à condition qu'il y ait une circulation d'eau suffisante. Les grands **envois de marée**, l'été, quand ils ont lieu, imposent une sélection spontanée des espèces: la salinité est perceptible loin vers l'intérieur. Puis quand les pluies d'automne reviennent, c'est le retour à la phase limnique, à un certain rééquilibrage plus durable par la remise en place des variétés d'eau douce sur de plus vastes espaces. Le rythme saisonnier est donc original.

A côté de cet aspect de la vie ichtyologique, et en relation avec elle, se multiplient les autres formes vivantes: formes benthiques des crustacés, dont divers types de crevettes qui ont là leur aire de croissance normale, batraciens, mammifères comme le ragondin dont la prolifération est suffisante dans certains secteurs pour provoquer la détérioration

des berges, avifaune qui ne manque pas d'intérêt, même si l'on ne trouve pas ici, systématiquement, les relais des grands migrateurs.

1-3 Le degré d'artificialisation actuelle des marais.

Dans des régions aussi anciennement occupées que l'estuaire de la Loire il n'y a plus depuis longtemps d'espace intégralement issu des processus naturels.

L'examen de la situation fait ressortir:

- qu'entre les deux parties les plus artificialisées (agglomération nantaise et port polyindustriel de Montoir-Donges), les marais apparaissent évidemment comme des endroits les moins "dénaturés";
- mais qu'ils ont une **faible résistance** à l'artificialisation (poussée urbaine, pollution...);
- qu'ils présentent donc une **vulnérabilité** rapide devant les "agressions" susceptibles d'en perturber les équilibres;
- et qu'enfin, de façon générale, les marais présentent une bonne **faculté de récupération** de cet état naturel recherché à condition qu'ils ne supportent pas une urbanisation permanente et étendue (industrie, accostages portuaires, échangeurs routiers, etc.). Cette heureuse faculté est due entre autres, à la présence des vasières et autres "terres mauvaises" qui ont été ici conservées.

"Écharpe verte", coupure non artificialisée: les zones humides sont un secteur dont la conservation et la protection sont nécessaires; leur vulnérabilité suggère de nécessaires mesures de défense; leur faculté d'auto-régénération, dans des limites qui demeurent imprécises, conduit à prendre en compte une **politique adaptée de gestion**.

2 - Un milieu agricole et socio-économique original et vivace.

Une telle politique doit tenir compte d'une seconde série de facteurs essentiels: la mesure de la vitalité et la signification économique des populations agricoles qui occupent le marais et en sont, de quelque façon, les dépositaires.

2-1 L'individualité agricole des zones humides de la rive Nord (fig. 1)

La construction des systèmes hydrauliques dans les marais est au point de départ de toute production agricole. Elle est le résultat d'un long héritage, et le parcellaire des terres, qui a dépendu de ces systèmes hydrauliques, en ressort souvent fragmenté, ainsi que la propriété actuelle du sol: moins de 10 % des propriétaires possèdent plus de 50 ha.

Les exploitations ont une structure souvent diversifiée; l'opposition est fondamentale entre les "gagneries" toujours exondées et à contraintes collectives essentielles dans le passé pour les productions vivrières, les **prés-marais** internes, les plus pauvres, les **prés de Loire** plus riches, mais eux-mêmes différenciés; certains exploitants y ajoutent des terres de plateau, sur le revers du Sillon de Bretagne; d'autres n'ont que des prés. Les combinaisons et les dosages peuvent varier; mais les spéculations pastorales dominent, encouragées par le marché nantais proche: les marais participent à la ceinture laitière de l'agglomération, qu'ils alimentent aussi en viande; la pousse d'herbe y est propice, pourvu que l'on corrige les inconvénients de la pluviosité. Les petites exploitations s'orientent plutôt vers le lait, les grandes vers l'embouche des bœufs "jaunes".

Peu d'exploitations ont moins de 5 ha, et encore assez peu moins de 20; mais nombreuses sont les moyennes et les grandes qui dépassent 40 ha, ce qui contraste avec le régime de petite propriété, et ce qui oppose cette rive droite aux marais de la rive gauche où l'on constate des superficies plus faibles; pour le Nord, cela provient du regroupement des parcelles affermées à cause de la régression démographique agricole depuis un quart de siècle.

Dans l'ensemble, ces structures ont bien résisté à la pression urbaine qui, ici, arrive par Couëron et Saint-Étienne de Montluc, sans doute parce que dans ce secteur, les drainages ont été réorganisés et la gestion perfectionnée: la Vallée de la Musse et la Grande Vallée servent d'éléments protecteurs contenant la poussée d'urbanisation, de colonisation résidentielle

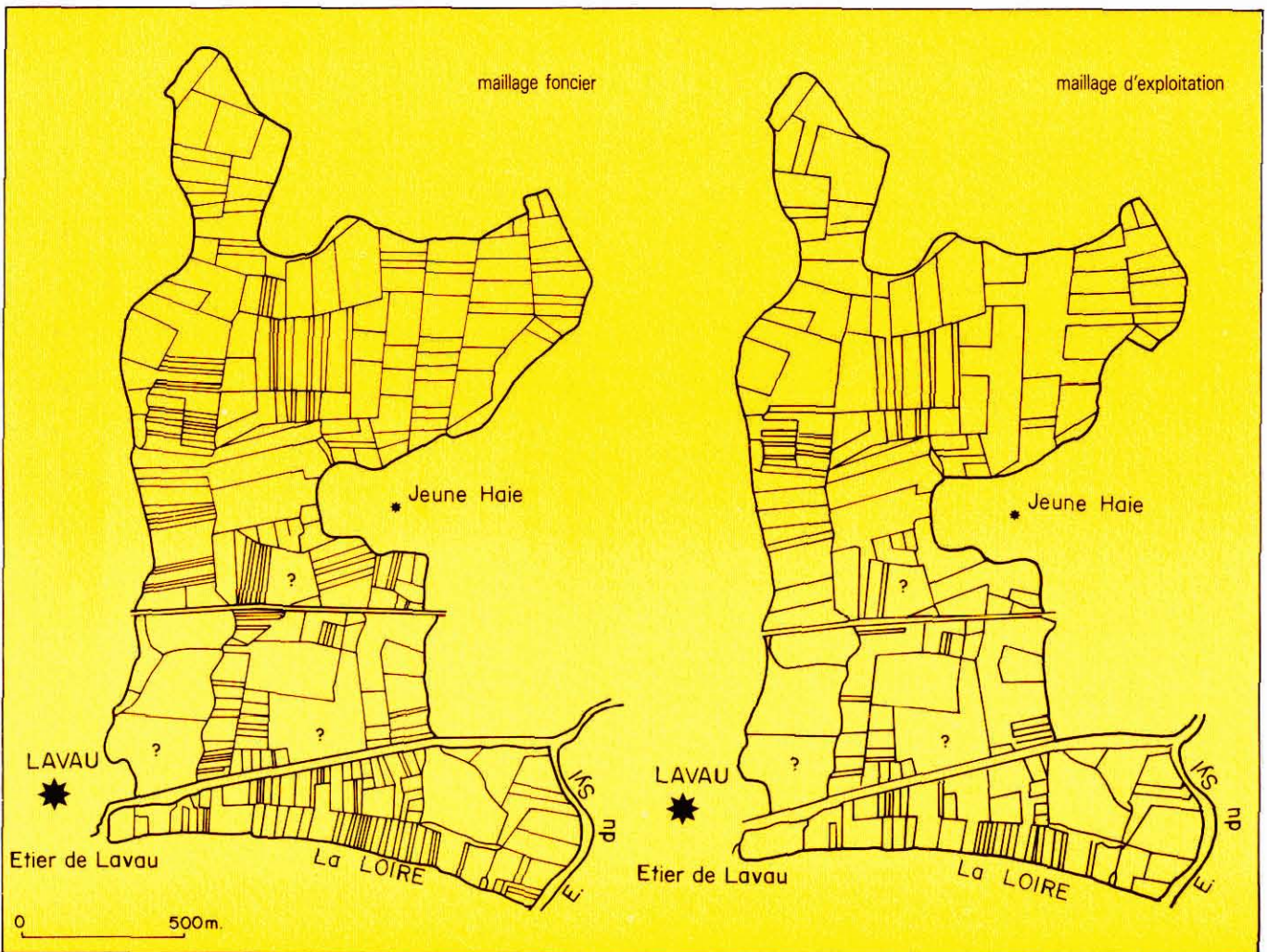


Fig. 1 - Morcellement parcellaire à Lavau-sur-Loire. Maillage foncier et maillage d'exploitation. Situation au 1-1-1982 (D. Rapetti).

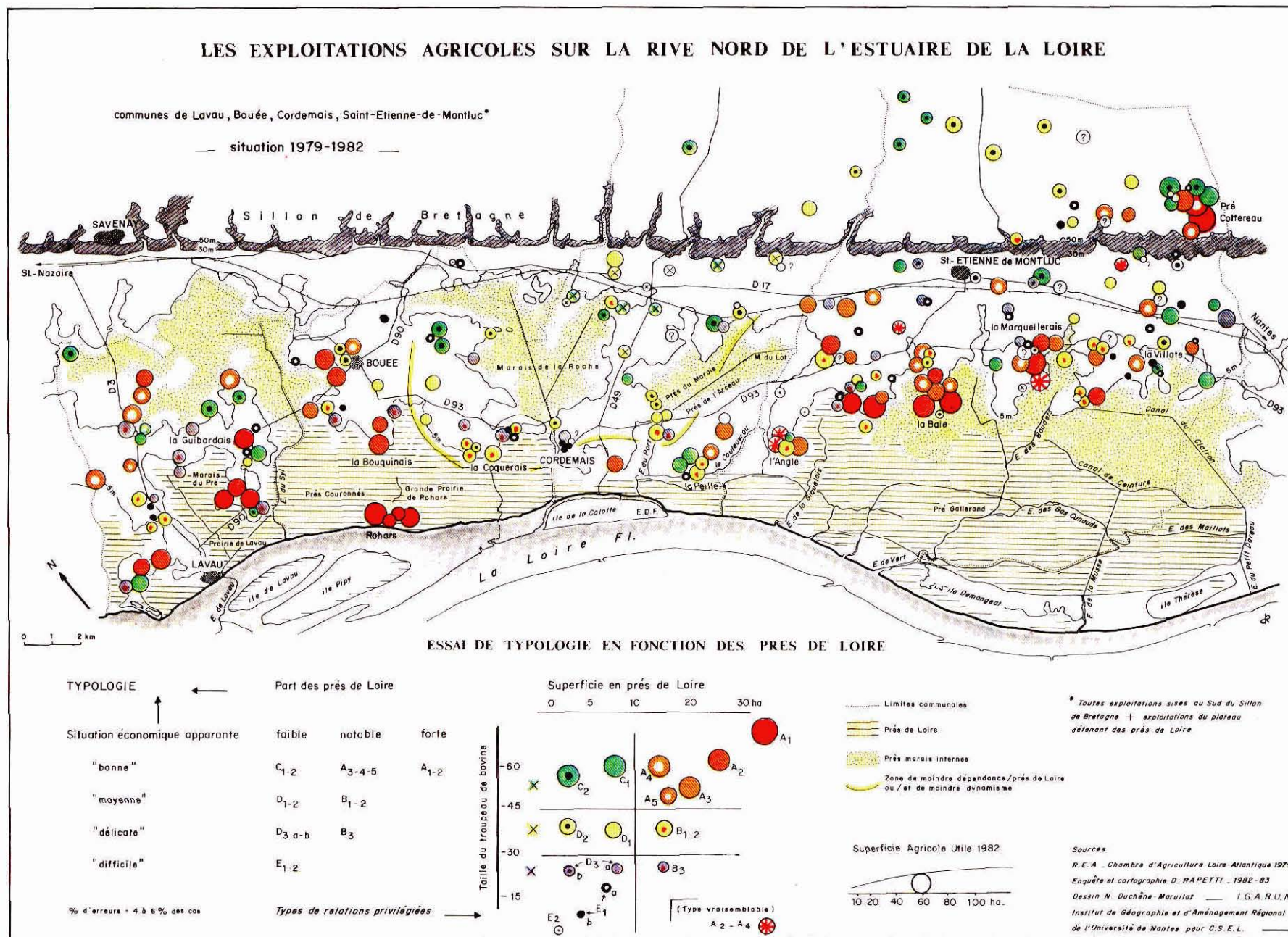


Fig. 2 - Les exploitations agricoles, rive Nord de l'estuaire de la Loire. Essai de typologie en fonction des prés de Loire. Communes de Lavau, Bouée, Cordemais, St Étienne de Montluc. Situation 1979-1982 (D. Rapetti).

pavillonnaire; ce n'est pas aussi net vers Donges et Montoir par exemple.

2-2 *Le prestige des prés de Loire (fig. 2)*

Dans les exploitations, la part toujours en herbe est souvent supérieure à 50 %, et peut dépasser 75 % de la S.A.U. (surface agricole utile). La densité de vaches laitières est forte et décroît lorsque l'on dépasse Lavau vers l'Ouest. C'est largement dû à la qualité des prés de Loire: alors que les prés-marais de l'intérieur fournissent 1 000 et 1 500 unités fourragères, l'estimation accorde aux premiers deux à trois fois plus; d'où l'élévation des prix du sol et du fermage.

La réputation des prés de Loire a été liée, après la guerre, à la richesse que procuraient l'herbe et le foin, sans investissement important en travail ou en amendements. Il en était résulté une forte pression foncière, notamment de la part des citadins.

Mais dans les vingt cinq dernières années, la situation s'est détériorée. Sur les plateaux d'encadrement, hors de l'estuaire, l'intensification de la mécanisation et la révolution fourragère ont revalorisé les terres de culture face aux prairies naturelles; l'attrait de ces dernières a diminué. Aujourd'hui, les prés de Loire demeurent la meilleure partie des zones humides; mais la réalité de leurs avantages, leur rentabilité ont baissé dans le contexte régional; leur valeur fiscale, qui n'a pas changé, paraît surévaluée: c'est une source de litiges, de désintérêt, de désaffection, dont une des traductions est l'insuffisance d'entretien des douves et vannages locaux.

Les prés de la Loire représentent un pourcentage élevé

dans presque toutes les entreprises rurales actuelles, et au total, environ 50 % de la S.A.U. Par conséquent, une très forte majorité d'agriculteurs dans les communes concernées, sont dépendants de ces prairies naturelles. L'importance de ces parcelles de rive est exprimée pour chacune des exploitations par la figure 2. A partir de plusieurs critères, dont la superficie des prés de Loire utilisée et le nombre corrélatif de bovins, ce document montre très visiblement que, dans ces zones humides de la rive Nord, trois secteurs apparaissent: à l'Ouest autour de Lavau et de Rohars, on est dans le secteur de bonnes îles (Lavau, Pipy) et des grandes prairies (Rohars, la Coquerais, Prés Couronnés); à l'Est, une partie des exploitations ont leur siège sur le plateau, mais utilisent des parcelles nombreuses dans les zones basses: celles-ci sont considérées comme "un volant de sécurité" dans les années sèches, lorsque la terre du revers du Sillon de Bretagne "grille". Enfin, le secteur de Cordemais introduit une discontinuité, avec un usage moins affirmé des prés de Loire.

Par conséquent, si ces derniers, avec les îles qui s'y intègrent, étaient soustraits à leur actuelle utilisation, par industrialisation, par urbanisation, par remblaiement de quelque ampleur, ou altérés par un endiguement systématique, il est clair que cela entraînerait des **perturbations** ou une **désorganisation** de la majorité des exploitations.

2-3 *Conclusion:*

la signification économique et humaine des zones humides.

Les milieux agricoles ont vieilli; mais ils tendent à se renouveler: dans la décennie écoulée, on a constaté un certain

retour des jeunes vers l'estuaire en général. Les zones humides ne sont pas les secteurs les plus productifs de l'agriculture régionale, laquelle possède des cultures intensives à grand rendement, ou de grande réputation (vignoble, maraîchage, horticulture, etc.); mais la situation de la rive Nord de l'estuaire est globalement **saine**; on y a observé un retour de la pression foncière. S'il y a des faiblesses dans ce complexe socio-économique, il faut les chercher dans la relative altération des **structures agraires** ci-dessus indiquées: fragmentation du parcellaire, dévalorisation relative des prés de Loire, taxes foncières héritées du proche passé; il faut les rechercher aussi dans l'évolution des **mentalités** liée aux changements de notre civilisation: évolution des styles de vie, refus d'une durée exagérée du temps de travail, moindre acceptation des efforts physiques qui étaient jugés usuels voici deux générations.

Cela ne remet pas en cause cependant l'avenir de ces zones humides sous leur état présent; cela pourrait à la limite diminuer leur faculté de résistance devant la pression urbaine; surtout, cela aide au développement de revendications ou de doléances à l'égard des aménagements portuaires, à l'égard du "danger du sel partout dénoncé" (J. GRAS) sans que, jusqu'alors, une analyse scientifique en ait été faite à l'égard des inondations ou des envois de Loire "qui ne sont plus ce qu'ils étaient autrefois".

Cet esprit critique et chagrin montre le besoin de conforter l'équilibre nécessaire entre l'exploitation agricole, le milieu naturel et le fleuve qui, en fait, commande l'hydraulique, donc la vie des marais, puisqu'elle passe par la **maîtrise de l'eau**.

Chapitre II
LA MAITRISE DE L'EAU

L'eau est donc le facteur dominant l'état et l'évolution des zones humides; cela a été parfaitement perçu dans le passé, puisque les systèmes hydrauliques mis en place visaient à la conquête des marais. Cette dernière est un compromis séculaire entre l'intervention humaine et le fleuve; un compromis, parce qu'il n'y a pas souveraineté totale de l'homme face à la puissance fluviale. De fait, trois séries de problèmes continuent de se poser:

- celui de la gestion des eaux dans le marais,
- celui de la qualité des eaux,
- celui de la mise en valeur pastorale face aux irrégularités du régime des eaux.

1 - Le contrôle de la circulation et la gestion des eaux dans les marais.

Ce contrôle porte sur la partie placée en arrière des bourrelets de rive; il laisse soumis aux influences directes du chenal les îles de la rivière et les anciens bras fluviaux, puisqu'il n'y a pas de digue de contrainte le long de cette rive Nord dans le secteur étudié.

1-1 La mise en place des systèmes de circulation.

Elle est très ancienne, mais c'est au début du XIX^e que l'on a entrepris une remise à jour importante: en 1820 pour le Dareau, vers 1830 pour la redéfinition des aires syndicales existantes. Depuis, on a procédé à des ajustements ou à la mise en place d'équipements de façon périodique, et ce jusqu'à nos jours.

Les étiers appuyés sur les bourrelets de rives, les douves qui les prolongent jusque dans le détail, conduisent à un cloisonnement minutieux de l'espace qui, on l'a vu, conditionne le parcellaire; les vannes principales qui s'opposent à la marée, et celles privées des rigoles sont des trappes à eau.

1-2 L'organisation physique des réseaux.

Dans la zone étudiée, deux

systèmes de drainage s'opposent à cause de la structure morphologique du glacié sur lequel se sont installés les marais.

1.2.1. Une organisation longitudinale à l'amont, entre Dareau et Vair (fig. 1).

A part les exutoires principaux qui sont branchés sur le fleuve, les étiers prennent une disposition à peu près parallèle à ce dernier parce qu'une succession de petits bombements continus, de moins en moins hauts quand on pénètre vers l'intérieur, et qui sont liés aux bourrelets de rive, imposent cette orientation.

Cette disposition a poussé à unifier l'équipement hydraulique; il fallait drainer les eaux d'hiver à contre-pente, vers le fleuve. L'écluse aval du Dareau est sur la roche en place, alors que le Vair est, pour l'essentiel, un ruisseau naturel.

1.2.2. Une organisation transversale à l'aval (fig. 2).

Les étiers sont, sauf modification (Canal de Lavau), le reste d'un drainage naturel, souvent très amélioré, plus ou moins transversal. Tels sont les étiers du Port, de Cordemais, de Rohars, du Syl, dont les dispositifs hydrauliques sont nettement séparés les uns des autres. A l'inverse de ce qui est constaté à l'amont, il y a peu d'interférences entre ces dispositifs.

Les dispositions topographiques permettent d'y distinguer trois secteurs relativement nets: le long du chenal, les îles et les anciens bras fluviaux encore parcourus à chaque marée; puis, appuyés sur les bourrelets de rive, les prés de Loire (Prés Couronnés, Prairie de Rohars, Prés Cordemaisiens...); enfin, isolés par le pincement des buttes cristallines couvertes de gageries entourées de bocages, vers l'intérieur, les prés-marais. Or, ici, l'écoulement des eaux ne se fait pas au même rythme dans les prés d'amont et dans ceux d'aval: en année sèche, ces derniers sont égouttés plus vite que

les premiers; les uns peuvent être secs alors que les autres sont encore mouillés: il en résulte des divergences d'intérêt, gênantes quand le même syndicat ne gère pas l'ensemble du système de drainage.

1-3 La maîtrise des mouvements de l'eau.

Le principe de cette maîtrise est simple: maintenir l'eau à un niveau compatible avec la croissance continue de la végétation et la mise en valeur pastorale. Cela implique à la fois l'**évacuation des excès** dus aux pluies et ruissellements, et l'**introduction** en période de sécheresse d'**eau de Loire** (envoi de marée, ou baignage).

1.3.1. Les mouvements des eaux et la compétence des systèmes d'étiers.

Le système le plus compliqué est celui de l'amont et comprend les ensembles du Vair, du Dareau, de la Musse. Ils sont interconnectés par un système de canaux et de vannes, sans parler des transfluences par inondation.

A l'aval, à l'Ouest du Vair, le contrôle théorique est plus simple, à cause du dispositif transversal signalé. Les écluses principales, ouvertes autour de la basse mer permettent l'évacuation des eaux douces; fermées, elles interdisent la pénétration du flot; ouvertes autour de la haute mer, elles autorisent le dosage des envois de Loire. L'ensemble, pénétré par une foule de micro-étiers impossibles à contenir, souffre d'intrusions fluviales intempestives.

1.3.2. La politique de gestion des eaux.

Il existe dans ces zones humides de la rive Nord, 11 syndicats responsables de quelque 3 000 hectares. Ils ont de leur compétence les étiers et canaux, les écluses principales; ils décident de l'entretien, du curage, des campagnes de recalibrage; mais leur autorité s'arrête à la propriété privée: celle des douves et vannages secondaires. Ils ne couvrent pas la totalité des marais.

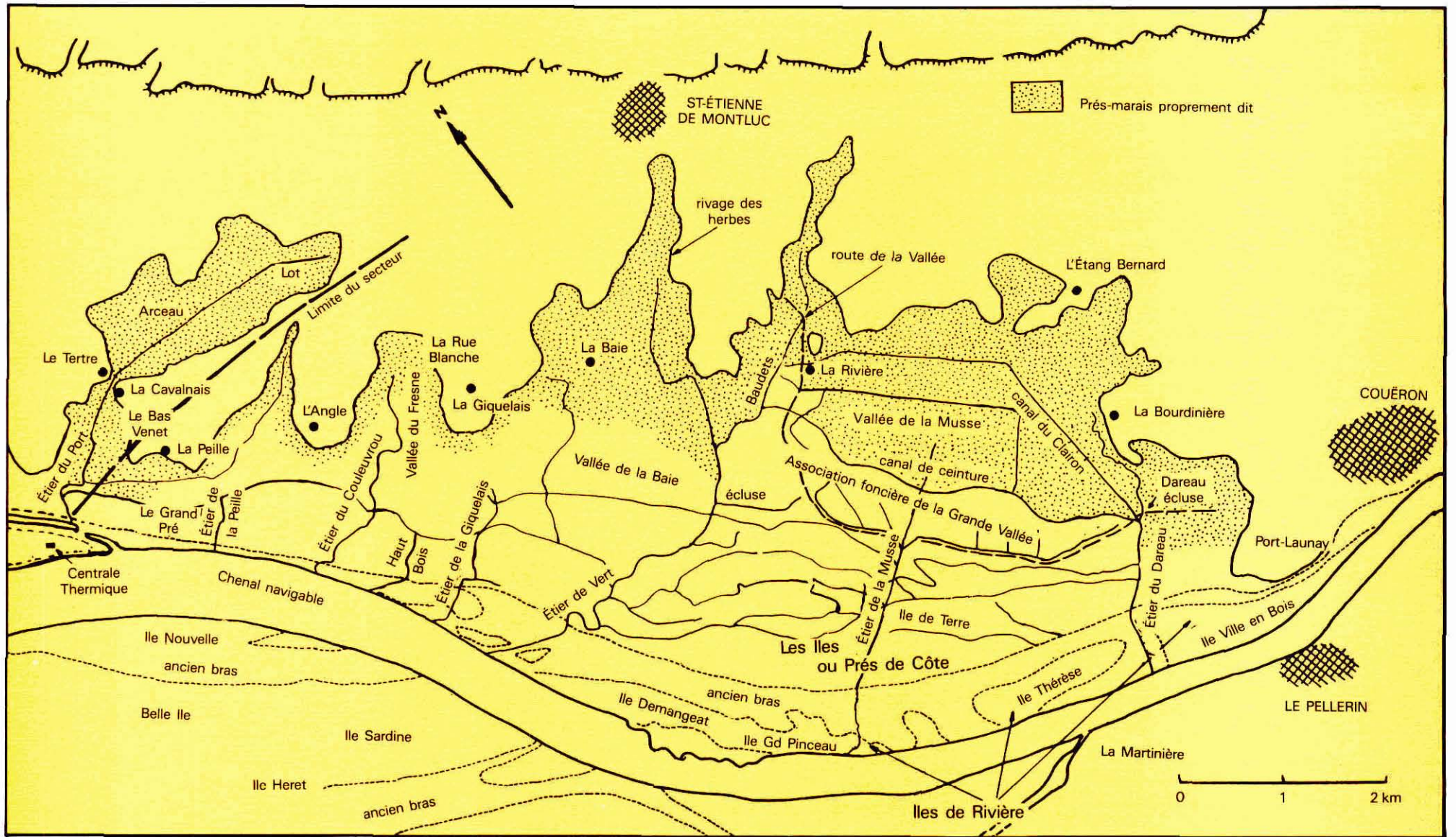


Fig. 1 - Organisation longitudinale de la plaine inondable à l'amont de la Centrale thermique de Cordemais - 1983 (J. Gras).

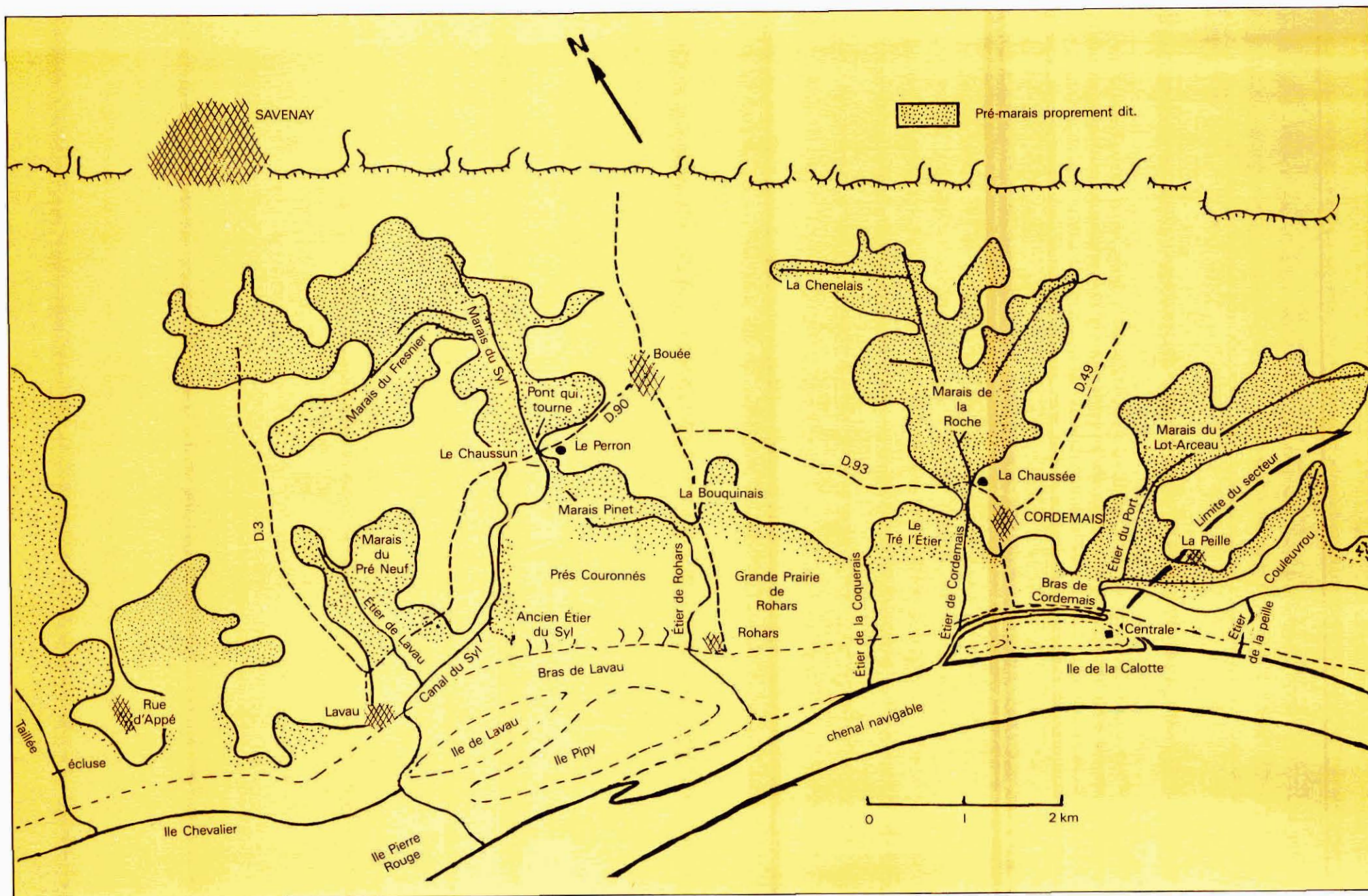


Fig. 2 - Organisation transversale de la plaine inondable à l'aval de la Centrale thermique de Cordemais - 1983 (J. Gras).

La **politique des eaux** consiste donc à fermer au moment opportun, et pour une durée calculée, les exutoires des marais vers le fleuve. Le vidage requiert la surveillance de l'éclusier: il doit mesurer l'écoulement de sortie en fonction des niveaux dans l'intérieur, sa surveillance est facilitée par un système de clapets et portillons qui battent sous la pression des eaux douces, mais se ferment sous celle de la marée. Mais les décisions prennent plus d'importance encore quand il s'agit de "baignages": ils doivent être faits pour que l'herbe ne grille pas l'été, mais après la fenaison pour que la maturation soit bonne, et cependant assez tôt pour faciliter le démarrage du regain. Le besoin de synchronisation en liaison avec les conditions météorologiques n'est pas simple; certaines années, il y a un ou deux envois de Loire, rarement plus; d'autres, il n'y en a pas.

Dans le système à drainage transversal (partie Ouest) il faut une fine observation et un bon esprit de synthèse pour dégager un plan théorique de gestion des écluses; dans le système longitudinal (partie Est), l'ensemble est remarquablement organisé pour la fauchaison, avec un tableau d'entretien et de fonctionnement de 41 vannes locales permettant une grande souplesse d'utilisation estivale, sous contrôle de l'Association Foncière de la Grande Vallée.

1-4 Conclusion.

Avantages et inconvénients de l'actuelle gestion de l'eau.

Elle est largement empirique: elle s'appuie sur l'expérience et sur la connaissance de la conjoncture du moment. Mais cet appui sur l'intérêt spontané conduit à des conflits, on l'a vu; d'autre part, malgré l'argument de l'individualisation de chaque groupe de marais à l'Ouest du Vair, la situation présente, avec 11 syndicats, conduit à la fragmentation des responsabilités; il est pratiquement impossible d'utiliser ou d'unifier un matériel commun (pelleteuses, bateaux-dévaseurs qui pour-

raient être transférés d'un secteur dans l'autre, au lieu de se détériorer en attente d'utilisation). La fréquence de l'appel au bénévolat, excellent dans son principe, l'est moins dans ses effets, et aide à la dilution des prises de responsabilités, lorsque l'on passe du président de Syndicat au Secrétaire Général, puis aux Syndics de quartiers, puis aux éclusiers qui ne sont pas tous appointés.

Enfin, il est clair que le complexe d'un marais est un tout unifié dans ses différentes parties; dans la réalité, il est fréquemment divisé en deux ou plusieurs domaines d'autorité. De là, les difficultés de concertation pour l'entretien, le financement des parties communes, alors qu'un certain désintérêt apparaît pour les prés de Loire, pourtant les meilleurs.

2 - Les caractères physico-chimiques et la qualité des eaux d'échange entre l'estuaire et les marais.

La gestion des eaux est essentielle; encore faut-il savoir quelles eaux on va gérer: l'effort de recherche pour d'éventuelles améliorations ne se justifierait pas si leur qualité était discutable et si leur utilisation était déconseillée sur le plan biologique.

Or, on est en présence de plusieurs types d'eau qui ont des échanges entre eux. Ce sont: les eaux du chenal estuarien, où se fait le battement direct de la marée; puis celles des bas étiers et anciens bras fluviaux encore parcourus, qui sont déjà différentes des précédentes; enfin celles qu'on trouve à l'intérieur des marais.

Elles seront successivement analysées sous leurs aspects qualitatifs et évolutifs.

2.1 Caractéristiques des eaux du chenal fluvial

Ce sont ces eaux qui, en cas d'inondation ou d'envoi en été, pénétreront dans les secteurs agricoles.

2.1.1. La salinité.

Du point de vue de la sali-

nité mesurée au droit de Cordemais, qui constitue une position moyenne pour le secteur étudié, on sait que le taux dépend du coefficient de marée et du débit fluvial; la situation moyenne, en 1982, est la suivante:

- en crue, la salinité est pratiquement nulle,
- par débit de 500 m³/s elle varie 1 à 14 ‰ selon les marées,
- en étiage, elle atteint de 4 à 22 ‰.

Elle est plus faible au Dareau, et un peu plus forte à l'aval. Le front de salinité a remonté vers l'amont depuis une décennie, on le sait, renforçant un peu la chlorinité moyenne au droit des étiers des zones humides étudiées.

2.1.2. La turbidité.

Le bouchon vaseux ne remonte à l'amont du secteur Lavau-Cordemais que par haute mer de vive eau, et par débit inférieur à 500 m³/s; il s'établit au droit de ce secteur par flux de 100 à 500 m³/s et surtout en vive eau, moins fréquemment par petits coefficients.

On sait par ailleurs que lorsque ces derniers sont supérieurs à 70, la crème de vase alimente largement le bouchon vaseux, donnant un taux de turbidité élevé; cela conduit aux dépôts blanchâtres constatés dans les prairies en inondations de vive eau, dépôts différents des limons fluviaux apportés par les crues.

2.1.3. L'oxygène dissous.

Il y a un déficit d'oxygène dissous dans la partie centrale de l'estuaire, c'est-à-dire au droit des zones étudiées, déficit par rapport à la fois aux eaux de mer venues par l'aval, et à celles du fleuve par l'amont. La teneur en O₂ est parfois très basse, de 0,5 à 1 mg/l à Cordemais; elle correspond à la forte turbidité (0,5 à 2 g/l) du bouchon vaseux qui accumule les matières organiques oxydables.

2.1.4. La pollution.

Quant à la pollution bactériologique et métallique, ce même bouchon vaseux agit également comme un piège où l'auto-épuration est très affaiblie,

et où se concentrent les coliformes totaux dans une proportion qui est de 10 à 100 fois plus forte qu'à l'amont ou à l'aval; mais cette concentration est plus importante vers le fond, et plus faible latéralement, c'est-à-dire dans les parties d'eau qui alimentent les marais. La forte turbidité est aussi un facteur de fixation des polluants métalliques et éventuellement radioactifs; dans ce cas, il peut y avoir rétention dans les vases, ce qui avait déjà été montré dans les études antérieures.

Les regroupements des rejets polluants sont majoritairement placés à l'amont des zones humides étudiées, dans l'agglomération nantaise et, dans ce cas, ces rejets descendent avec le courant; à l'aval aussi, autour du port poly-industriel; ils remontent avec la marée; ceux de Paimbœuf sont retrouvés au plein, face à l'étiage de la Musse. Il convient donc de les surveiller. La Centrale de Cordemais en fournit également; mais ils sont très contrôlés et maintenus dans des limites définies par le cahier de charges.

L'état actuel des faits connus dans l'estuaire ne laisse apparaître aucun cas relevé de contamination bactériologique des marais par la Loire et la pollution métallique révèle des teneurs inférieures aux normes acceptées.

Ce domaine reste pourtant l'un de ceux où les recherches doivent être poursuivies.

2.1.5. Conclusion.

Depuis la fin des campagnes importantes de travaux du bas estuaire, au cours desquelles la turbidité a été anormalement amplifiée, **les eaux** du chenal **ne présentent pas**, en période normale, des **caractères physiques, chimiques ou biologiques excessifs**, et susceptibles de provoquer des perturbations gênantes dans les zones humides adjacentes. Il importe donc de rester dans cette situation **normale**.

Ces caractères sont altérés par le passage dans les anciens bras fluviaux et les vasières; il convient de voir comment.

2-2 Le rôle des îles, des anciens bras fluviaux et des étiers à l'aval des écluses

Ce rôle est important surtout pour la moitié aval des zones humides étudiées; il a été analysé essentiellement autour du bras de Lavau.

2.2.1. Les mécanismes généraux.

Du point de vue hydraulique, le bras de Lavau fonctionne comme un mini-estuaire: la durée du flot y est de plus en plus brève lorsque l'on remonte de l'embouchure vers l'intérieur; le marnage est très réduit à l'écluse comparativement à l'ouvert sur le chenal.

Le volume de pénétration à l'embouchure au cours d'une marée va de 500 000 à 1 300 000 m³.

Ces bras fluviaux correspondent au secteur de vasières le plus étendu; celles-ci provoquent des échanges chimiques et microbiologiques avec les eaux qui les parcourent alternativement. Entre autres particularités, il faut signaler le fort enrichissement en silice en jusant, qui est dû au rejet par les marais d'une part d'origine continentale, mais aussi au lessivage des vasières qui constitue un apport important surtout l'été; cette silice est utile dans la biologie générale de l'estuaire: elle est consommée par les diatomées en particulier, qui sont, on le sait, au début de chaînes trophiques.

Le mouvement alternatif des eaux a un effet de nettoyage, surtout quand on fait des chasses d'eau douce l'hiver; mais de façon plus générale, au jusant, il y a remise en suspension de vases latéralement, et la turbidité devient très élevée; au flot, c'est par le fond que se fait cette remise en suspension. Un allègement de la charge des eaux s'est produit avant qu'elles ne pénètrent dans les marais soit par envoi de Loire, soit par inondation; mais la rançon est que lorsque ces eaux buttent sur les écluses fermées, des dépôts volumineux se produisent juste à l'avant de ces dernières, susceptibles de gêner gravement la circulation dans les étiers.

Dans l'ensemble l'envasement se produit pendant les périodes de marées de morte eau et en été surtout; en hiver et en marée de vive eau, il y a érosion par remise en suspension et expulsion des vases vers la Loire.

2.2.2. Deux faits importants

pour la biologie des marais

La teneur en **sel** des eaux des bas étiers est évidemment élevée: elle est due au flot qui vient par le chenal estuarien. Cette teneur varie entre l'écluse et l'embouchure: d'abord selon la saison, et à Lavau, elle peut être nulle pratiquement en forte crue, ou au contraire très forte en étiage et en vive eau; ensuite selon les étiers: les intrusions de sel qui peuvent se produire l'été en cas d'envoi de marée sont importantes à Lavau, moyennes à Cordemais, marginales au Dareau; dans la perspective de cette gradation, il ne faut pas oublier cependant la progression vers l'amont du front salé de l'estuaire depuis environ une décennie.

D'autre part, les teneurs en **ammoniaque** constituent un autre fait marquant de ces eaux des bas étiers: elles atteignent au jusant une valeur de 3 mg/l à Lavau. Elles sont dues à la décomposition par les bactéries des matières organiques et peut être aussi à la fermentation bactérienne des nitrates dans les vasières.

2.2.3. Les autres caractères

physico-chimiques
susceptibles
d'influencer la vie
dans les marais.

Dans ces bras fluviaux, la teneur en **oxygène** est variable; elle dépend d'abord de cette teneur dans les eaux du chenal, et du rythme particulier des courants dans les bas étiers, puis du bloom phytoplanctonique qui se produit en période printanière ou estivale: ce peut être favorable en cas d'envoi de marée.

Les **phosphates** conservent une valeur faible, mais tendent à croître avec le flot en hiver à cause des lessivages des sols en amont. En été, les phosphates s'accumulent dans le marais par suite de la fermeture de l'écluse.

Enfin, la **nitrification** sur les vasières tendrait à renforcer la teneur en nitrates des eaux intérieures en cas de baignage.

2.2.4. En conclusion.

Les îles et les anciens bras fluviaux, placés en avant des principaux bourrelets de rive, ont un **effet modificateur** quant aux propriétés dynamiques et physico-chimiques des eaux qui se présentent à l'entrée des marais. Cet effet se retrouve dans les étiers d'amont, mais d'une façon qui varie avec la position des écluses.

2-3 Les caractéristiques des eaux de l'intérieur des marais.

2.3.1. Il y existe 3 types d'eaux différents.

Les eaux de pluie et de ruissellement

Le régime annuel est celui d'un climat océanique qui aboutit ici à une pluviosité moyenne annuelle de 800 à 850 mm (en 1982, année des mesures faites dans l'estuaire, et auxquelles on se réfère ici, il est tombé 1082 mm d'eau). L'écoulement se produit après capitalisation dans les marais, sur plusieurs jours après les pluies. Il n'a pas été possible de mesurer les flux de sortie aux vannages principaux. Les caractères physiques et chimiques de ces eaux rejetées à l'extérieur dépendent de leur ruissellement sur les terres de culture, ou les sables et éboulis du Sillon de Bretagne, puis des conditions de leur accumulation et de leur cheminement dans les douves et rigoles du marais.

Les eaux de Loire provenant des envois de marée.

Le volume de ces eaux que l'on fait entrer est variable selon les années, et de toutes façons, il est mal connu. A titre indicatif, le 25 mai 1982, à Lavau, et pour un seul envoi il a été de 52 000 m³ ce qui représente 7,7 % du flux total qui a transité ce jour-là par le bras de l'étier à l'aval de l'écluse. Cet envoi ne représente théoriquement qu'une couche d'un centimètre sur l'ensemble du marais baigné; mais il est alors entré 200 à 250 tonnes de sel, soit 3 à 4

grammes par mètre carré. Il est également entré 30 tonnes de vase, qui, si elle avait été régulièrement répartie, aurait correspondu à 0,5 g par mètre carré: c'est peu, et l'on retrouve là l'effet de décantation des bras fluviaux signalé ci-dessus.

Les eaux d'inondation

Elles sont différentes, et arrivent soit par fort débit fluvial et haute mer, soit par fortes marées de vive eau, d'automne souvent, mais avec influence des vents en force et en direction (surtout d'Ouest).

Les caractéristiques des eaux d'inondation sont variables en fonction du complexe des causes qui provoquent l'inondation: crues fluviales des eaux douces à turbidité limoneuse, débordements lors des grandes marées, avec pénétration d'eaux turbides en provenance du bouchon vaseux.

2.3.2. Les aptitudes physiques et chimiques des eaux de marais quant au développement de la vie.

Les eaux des marais sont donc un mélange des trois types d'eaux ci-dessus caractérisés; un mélange très variable selon la saison, les conditions météorologiques, l'éloignement par rapport à la Loire, etc. Cependant, quelques faits importants sont apparus à la lumière des études réalisées; il ne faut les généraliser qu'avec prudence.

La **salinité** à l'intérieur des marais affecte essentiellement la partie aval des zones humides de la rive Nord; elle peut atteindre jusqu'à 11 g/l dans le secteur de Lavau: c'est beaucoup. Dans le réseau hydraulique, elle diminue de l'aval vers l'intérieur, et des canaux principaux vers la périphérie; mais la limite de pénétration est repoussée loin de l'écluse: pratiquement tout le marais de Pré Neuf est pénétré par la salinité estivale, et les neuf dixièmes du marais du Syl, qui est beaucoup plus vaste. L'évaporation d'été conduit à renforcer partout le taux de chlorinité. Les étiers d'amont (Dareau, la Musse) n'ont pas les mêmes pro-

blèmes: pour un cycle de mesures couvrant 12 mois, les poids des chlorures relevés à l'écluse de Dareau sont compris entre 0,06 et 0,18 g/l. L'hiver, vers Lavau, demeure une salinité résiduelle de 0,1 à 0,5 g/l liée très vraisemblablement à l'imprégnation des sols.

Les concentrations en **sels nutritifs** sont importantes dans les marais; outre le lessivage des bassins versants, certains rejets (station de Savenay) peuvent contribuer à cette richesse, et on peut dire qu'il y a eutrophisation. La faible turbidité des eaux dans les marais permet alors un développement estival important du phytoplancton et des végétaux supérieurs. La dégradation de cette matière organique conduit à des chutes importantes des concentrations en **oxygène** dissous. Néanmoins, il apparaît que l'eutrophisation est moins marquée dans les marais de l'Est (Dareau) que dans ceux de l'ouest (Lavau). Les apports en sels nutritifs y sont peut-être plus faibles et la circulation des eaux plus efficace.

En conclusion, lorsque l'on isole les critères les moins favorables dans la qualité des eaux pour l'intérieur des marais, on constate que cette qualité tend à décroître de l'amont vers l'aval, du Dareau vers le Syl: c'est perceptible pour le sel, pour les cas d'anoxie, d'eutrophisation. Les causes de cette relative dégradation du milieu sont à la fois naturelles (position par rapport au chenal, au bouchon vaseux, au front de salinité), et humaine (rôle des deux stations d'épuration de Savenay et de Corde-mais, insuffisance de renouvellement des eaux des douves et rigoles privées dont le calibrage et l'entretien ne sont pas régulièrement assurés).

Il reste que:

- globalement, les cas les plus gênants sont limités dans l'espace et dans le temps;
- les analyses physiques, chimiques et bactériologiques dans les marais devraient être poussées plus loin, avec un nombre plus élevé de prélèvements et d'analyses afin d'établir une carte typologique détaillée et évolutive des eaux des marais.

3 - Qualité des Eaux et Élevage des bovins.

L'été de 1976 a été anormalement sec et marqué par un déficit pluviométrique et un étiage fluvial très bas. Il semble que l'on ait alors constaté une mortalité exceptionnelle des bovins de tous âges: cela est signalé prioritairement pour la rive gauche de l'estuaire, mais aussi dans les prairies de la rive Nord. Il en est résulté des doléances selon lesquelles cette mortalité serait liée aux envois d'eau de Loire (baignages d'été) pour compenser le déficit en eau des marais: le taux de salinité trop élevé (par suite de la remontée du front de salinité dit-on) étant responsable des accidents constatés.

Les recherches sur cette question ont été confiées aux spécialistes de l'École Nationale Vétérinaire de Gachet sur les bases suivantes.

3-1 Objectifs.

Les objectifs sont :

- d'analyser les conditions physiologiques et pathologiques d'ingestion des eaux résultant du baignage des marais en période estivale, afin de déterminer leur responsabilité dans les cas de mortalité signalés;
- d'étudier les cas concrets d'accidents survenus quand les animaux n'ont d'autre source d'eau que celle des étiers;
- de déterminer les limites de salinité supportables, avec toutes les interférences possibles résultant de l'état physiologique du bétail au moment des éventuels accidents;
- d'envisager les éventuelles mesures à prendre pour éviter le retour de ces accidents.

3-2 Moyens.

Les moyens et méthodes retenus sont :

- les enquêtes près des vétérinaires locaux, avec détermination

des cas et établissement de la liste des exploitations concernées;

- les enquêtes épidémiologiques et chimiques sur les conditions d'abreuvement;
- l'examen clinique des phénomènes pathologiques et l'observation corrélatrice de l'environnement matériel des abreuvoirs;
- l'étude générale de l'état des cheptels intéressés.

Ces travaux sont en cours et doivent être achevés courant 1984. Les premières conclusions s'appuient sur la littérature existante et sur l'expérience des vétérinaires consultés. Elles paraissent suffisantes cependant pour que l'on dégage quelques mesures de précautions générales consistant à faciliter la circulation des eaux toute l'année par le curage des douves et à alimenter temporairement le bétail en eau extérieure lors des envois de marée.

Chapitre III
LA COUVERTURE VÉGÉTALE DES
ZONES HUMIDES.
ÉLEVAGE ET CULTURES
DANS LES MARAIS

Les formes actuelles d'occupation humaine des zones humides de la rive Nord, ont été mises en place dans la seconde moitié du Moyen Age. Or, l'opinion fréquemment exprimée est que ces zones humides ne sont plus ce qu'elles furent dans le passé, pour des raisons diverses parmi lesquelles on évoque l'altération de la végétation, de l'herbe surtout, à cause de la détérioration de la qualité des eaux par le sel et la vase.

Que peut-on penser à ce sujet, en s'appuyant sur les travaux scientifiques qui ont été faits ? L'étude ci-dessous est limitée aux bords de Loire et n'intéresse pas les marais de l'intérieur.

1 - La couverture végétale et l'apport des eaux d'estuaire.

Elle a été très finement étudiée par le C.S.E.E.L. dans les secteurs directement soumis aux eaux de Loire, celles d'inondation surtout.

1-1 Les traits généraux des associations floristiques actuelles

Les associations sont très diversifiées, et à l'intérieur de celles-ci, les espèces dominantes sont elles aussi très variées. L'analyse des terrains montre que cette profusion des formes dépend pour une large part de la **micro-topographie** dont les dénivellations jouent sur quelques décimètres, et souvent nettement moins. On est alors conduit à distinguer : la végétation des anciens bras fluviaux, ceux visibles et connus, signalés par les cartes et dont les nuances se mesurent en centimètres, et ceux plus ou moins oubliés dans le paysage, parce que plus vieux encore et restés en arrière des berges dans le processus de colmatage des derniers siècles écoulés ; puis la couverture des micro-zones basses, dont les cuvettes de rétention et de tassement ; puis celle des bourrelets de rives, de talus de curage ou de protection ; puis celle des îles actuelles ou anciennes ; et il faut

de plus tenir compte des transitions entre toutes ces formes.

Ces reliefs minuscules déterminent l'abondance, la durée, les modalités de la stagnation des eaux d'inondation ; en fonction de cette dernière et de l'égouttage plus ou moins rapide qui la suit, il est possible d'établir trois gradations typologiques en restant dans la grande famille de la phytogéographie des zones humides :

- un type **hygrophile** : celui de la plus forte humidité, caractérisé par la présence de la grande glycérie, des phalaris, de carex riparia, de rumex hydrolapathum et de nombreuses autres variétés ;
- un type **mésophile** adapté aux prairies les moins humides, et au total les meilleures souvent (prés de Loire), avec les trèfles, la renoncule âcre, la houlque laineuse, la crénelle, le vulpin, un lychnis, et l'été le chien-dent ;
- et un type intermédiaire, **mésogyrophile** sur les zones inondables mais vite libérées ; on y trouve : plusieurs trèfles (*Trifolium pratense* ou maritime), *Ranunculus repens*, *Agrostis stolonifera*, des carex, etc.

La variation de la composition floristique à l'intérieur de ces types dépend de l'état d'entretien et du rythme de fonctionnement des vannages, de la rapidité des vidages, mais aussi du mode agricole d'exploitation : zones pénétrées par le bétail, "refus" des prés pâturés, etc.

Il est essentiel de constater :

- que dans les secteurs les plus humides (bras, fonds), la couverture végétale est pâturée donc utilisée, sauf dans les transitions vers la vase nue. Le rythme normal des inondations actuelles n'empêche pas l'exploitation pastorale dans des conditions semblables à celles du passé ;
- que dans la partie la plus proche du fleuve, les îles d'amont (Ville en Bois, Thérèse...) et d'aval (Lavau, Pipy) connaissent des pratiques anciennes ; elles restent largement exploitées et recherchées pour l'élevage ; or, étant près du chenal,

elles seraient les premières affectées, s'il y avait risque de détérioration par les eaux estuariennes ;

- que les inondations et la présence de l'eau n'ont pas dans les zones humides de cette rive Nord, un rôle pernicieux. La distinction des trois gradations indiquées (hygrophile, mésohygrophile, mésophile) est en réalité celle d'une échelle de tolérance à l'eau, échelle dans laquelle, pratiquement, toutes ces associations restent exploitables, même si c'est au prix de la variation des valeurs fourragères. Certaines des espèces qui les constituent montrent une grande amplitude d'adaptation : c'est le cas de la Glycérie flottante, de la fléole, de l'agrostis blanc, de *Carex riparia*, etc. ;
- que les zones humides constituent en définitive un complexe phyto-géographique offrant une bonne résistance à l'eau - qui eût pu en douter ? - mais aussi une variété de modes ou possibilités d'exploitation.

1-2 Y a-t-il dans ce complexe, une altération des qualités fourragères par rapport au passé ?

"Le marais n'est-il plus ce qu'il était".

1.2.1. L'envasement.

Il est clairement reconnu que dans la période de recreusement intense du Chenal de Donges, où la turbidité a été exceptionnellement élevée, les inondations ont provoqué en 1979 des envasements anormaux et préjudiciables aux prés situés à proximité des bras et des étiers. Aujourd'hui, l'estuaire est revenu à des conditions normales de fonctionnement et la turbidité est revenue à des valeurs moins fortes. Quelles constatations objectives a-t-on pu faire sur le terrain ? Celles ci-dessous regroupées ont été faites dans un cycle de près de deux années (avril 1981 - décembre 1982) dont une au cours de laquelle les inondations ont été relativement importantes.

- A l'amont et dans les prés de Loire, on a observé une grande inégalité des dépôts. Dans les

endroits de rétention des eaux, on a mesuré jusqu'à 6 cm; quand le vidage a été fait au rythme habituel par rigoles et étiers, il n'y avait plus que quelques millimètres; en drainage rapide, ce n'était plus qu'une pellicule blanchâtre. Sans doute y a-t-il des périodes plus accusées où les formations de vase sont plus épaisses et étendues; dans ce cas, il se produit une adaptation des associations végétales par sélection des espèces se comportant bien face à cette sédimentation.

- A l'aval, les dépôts restent plus systématiquement dans les grands bras fluviaux ou à côté: c'est le mécanisme normal de leur comblement, avec les mêmes processus d'adaptation des mêmes végétaux.

Au total, "... sans doute les prairies envasées posent-elles des problèmes d'utilisation; mais d'année en année, le niveau se hausse et la qualité s'améliore" (P. DUPONT). C'est le **processus général des prairies d'estuaires**; et ici, c'est celui que les prés de Loire ont connu depuis des siècles et qui ont fait leur bonne réputation.

1.2.2. Le sel et la végétation

Les analyses des botanistes confirment celles des hydrologues concernant la teneur en sel des eaux et des terres de marais, et opposent l'amont, qui a de faibles salinités, à l'aval des zones ici étudiées.

Les principales espèces végétales franchement halophiles, qui dans le bas estuaire étaient habituées à un taux élevé de salinité, s'arrêtent à Pierre Rouge, sur le méridien de Lavau: elles ne remontent pas au-delà. Celles encore un peu halophiles, qui demeurent jusqu'à Couëron, ont une large amplitude écologique du point de vue de la présence du sel. Certaines sont cependant à leur limite de tolérance car on ne les retrouve plus à l'ouest de Lavau; mais nombreuses sont les autres, qui ont une large faculté d'adaptation aux teneurs moyennes en sel que l'on note dans les zones humides de la rive Nord: agrostis, *Lotus témis*, etc.

Les spécialistes phytogéographes sont très fermes dans leurs affirmations: "Les agriculteurs disent que le sel grille les prairies: circulant depuis plusieurs années dans toutes les parties de l'estuaire, nous avons très rarement rencontré de tels faits..." (P. DUPONT), sauf dans de petites cuvettes sans écoulement où il y a stagnation et concentration.

Et s'il se produisait une augmentation de la salinité? Il faudrait d'abord savoir par quels mécanismes. Mais cela "... aboutirait sans doute à des modifications de la flore, mais assurément pas à une baisse de qualité...". "Il y a à l'aval de Paimbœuf (dans la partie la plus salée de l'estuaire) des prairies donnant d'aussi bons résultats qu'à Couëron".

"... Le sel est couramment accusé de tous les maux...; c'est totalement injustifié, et il faut chercher ailleurs les raisons de la baisse de qualité des prairies" (P. DUPONT).

Cependant, dès que l'on quitte les processus d'adaptation naturelle des associations végétales en imposant au milieu de marais des espèces **cultivées**, la situation change; les plages d'adaptabilité des plantes sont beaucoup plus étroites, et des incompatibilités avec le sel peuvent apparaître.

Où chercher les causes de la baisse qualitative des prés?

1-3 Le calendrier des fauchaisons

La cartographie des dates de fauches a été établie pour les deux saisons de 1981 et de 1982; la première a été assez humide, ce qui a pu retarder les travaux; la seconde a été marquée de conditions météorologiques excellentes. Or, ces dates de fauches ont été tardives sur la majeure partie des marais: l'essentiel a été coupé entre le 10 et le 20 juillet dans l'été de 1981 c'est-à-dire 3 semaines trop tard.

La richesse fourragère baisse dès qu'est passée l'épiaison chez les graminées, et la floraison chez les légumineuses. Or, l'étude systématique de la

composition floristique des prairies de fauches montre des dates de floraison et d'épiaison nettement antérieures aux dates de fauche ci-dessus indiquées.

L'exploitation des prés après fenaison en est diminuée. Le regain est affaibli à cause de la repousse tardive de végétation après coupe, et de l'utilisation en foin de première fauche des variétés qui devraient alimenter la seconde.

Si cette repousse est utilisée en pâture, les mêmes inconvénients et le même appauvrissement fourrager se produisent.

Pourquoi ce retard coûteux de la fenaison?

Il faudrait en déterminer les causes par des enquêtes près des exploitants et de leurs associations professionnelles. Mais on peut penser à diverses causes possibles:

- la crainte de "défoncer" les terres fragiles (parce que longtemps humides) avec du matériel trop lourd; on a vu que le passage répété des tracteurs entraîne une dégradation floristique; les aires de tassement retarderaient l'égouttage des sols; cela expliquerait qu'avec une mécanisation moins sophistiquée, il y a une génération, la fenaison était faite plus tôt;
- il est des secteurs où l'état des chemins d'accès ne permet plus une fauchaison normale;
- on peut évoquer la crainte des aléas de séchage des foins si la coupe a lieu près d'un mois plus tôt; cependant, la pluviosité et les conditions météorologiques sont les mêmes dans les marais et sur les plateaux d'encadrement; tout le Pays Nantais ne connaît pas les mêmes retards; et y a-t-il des changements du régime des pluies avec le passé?
- alors faut-il penser à une insuffisance d'information technique des milieux agricoles? à leur charge de travail dans la période d'été?

1-4 Conclusion.

*Les eaux de l'estuaire
et la mise en valeur
des zones humides.*

1.4.1. Les zones humides: dispositif naturel adapté à un certain milieu.

L'ajustement floristique au milieu pédologique a abouti à l'état d'équilibre actuel. L'eau de Loire est **nécessaire** et globalement très **bénéfique** au développement de la vie végétale. La composition botanique et les groupements des associations présentent des traits d'originalité et un intérêt floristique réel. Il est des espèces rares, protégées par la loi dans les prairies de la Coquerays et de Rohars, qui risquent de disparaître et ce serait une perte scientifique.

Par conséquent, l'**équilibre naturel** de ces zones humides, qui est sans doute une condition de la conservation de "l'écharpe verte" est à rechercher dans le **maintien des caractéristiques** du cadre physique, y compris la circulation des eaux douces et estuariennes, et donc dans la continuation libre des échanges entre les marais et le fleuve. Dans les anciens bras, la végétation est "...fille de la vase et des eaux saumâtres" (P. DUPONT), ailleurs, sur les bourrelets de rive et dans les prés, elle l'est aussi, selon des dosages différents que les diverses sociétés végétales ont montrés.

1.4.2. La dégradation de la qualité des prairies ?

Une question posée de façon insuffisamment claire: quelles parties considère-t-on comme dégradées ? Les anciens bras fluviaux ? leur colmatage est un processus normal et séculaire. Les prés de Loire ? Après les accidents d'envasement de 1979, l'étude de terrain montre que l'on est revenu à une situation normale pourvu que les mécanismes estuariens demeurent dans leurs normes actuelles.

Le sel ? Les conclusions des scientifiques sont formelles: il n'y a pas d'effet pernicieux aussi longtemps que la couverture de prairies naturelles, avec leur adaptabilité biologique, sera conservée.

Restent alors les deux problèmes des conditions agricoles d'exploitation des prairies de fauche, et de la relative dévalorisation des prés de Loire dans le contexte d'une économie agricole générale qui a évolué; dans les deux cas, ils relèvent des comportements de groupes socio-économiques avec sans doute un arrière-fond de psychologie et de mentalité collectives, plutôt que d'une gestion physique de l'estuaire.

Des questions demeurent posées: l'analyse de la valeur fourragère exacte des associations végétales n'a pu être faite systématiquement, et il n'est pas possible actuellement d'en tirer des conclusions.

Une étude sociologique de la population des marais serait sans doute utile pour cette population elle-même, de même que celle de la comptabilité d'exploitations, sous l'angle de l'investissement en temps de travail et en rythme de travail. Cela ne relève pas des recherches ici résumées.

2 - L'hypothèse de l'assèchement général des marais de la rive Nord.

Les milieux agricoles exploitant les prairies d'estuaire, en particulier à l'occasion de l'envasement anormal qui s'est produit lors des marées de vive eau d'août et Septembre 1979, ont lancé, ou repris, l'idée d'une poldérisation des marais. Bien que cette question, et les répercussions qui en résulteraient, aient été retenues comme un thème d'étude par le Syndicat Mixte de l'Estuaire de la Loire, en cours de constitution en 1982, le C.S.E.E.L. les a intégrées à sa réflexion, et les a abordées sous la forme de scénarios d'aménagement.

2-1 Signification d'une éventuelle poldérisation sous l'angle de l'aménagement physique.

L'assèchement des prairies sous-entend, en première approche: l'établissement de levées insubmersibles du type des levées de Loire à l'amont, pour contenir les inondations; puis l'établissement de vannages nou-

veaux ou renforcés en relation avec ces levées, les écluses actuelles n'ayant pas été conçues dans cette perspective; puis le contrôle des eaux, à l'intérieur, autour des prés.

Or, ce contrôle peut être interprété dans différentes optiques: l'assèchement peut être total, mais il faut alors fixer une limite intérieure. Les prés-marais seront-ils compris ? Leur niveau est le plus bas (2 m NGF) les eaux de ruissellement s'y accumulent l'hiver; il faudra de toutes façons procéder à une révision totale des conditions d'évacuation des eaux. Cet assèchement peut aussi être conçu avec conservation de douves à niveau contrôlé, traversant les prairies pour maintenir à niveau désiré une nappe phréatique compatible avec la pousse de l'herbe pendant l'été; ce serait alors un polder de type hollandais.

Ces diverses solutions suggèrent des systèmes hydrauliques différents; mais dans tous les cas, il faut retenir le maintien d'exutoires de vidage éclusés puisque le niveau fluvial est périodiquement au-dessus des plus basses terres. Les aspects des travaux de génie civil n'ont pas à être pris en compte ici, puisqu'on ignore quelle modalité serait éventuellement retenue; mais en toute occurrence, ils impliquent un **financement** important qui ne saurait être totalement pris en compte par la collectivité.

2-2 L'idée de la généralisation des cultures est sous-jacente à celle de la poldérisation.

Car s'il s'agit de maîtriser les prairies naturelles, les conditions physiques de l'estuaire suffisent tant qu'elles sont contenues dans des normes usuelles de turbidité, de salinité, de pollution; les études scientifiques les plus exigeantes le montrent jusqu'à présent; et la réputation des prés de Loire dans le passé également.

Or, il existe actuellement des essais de pratiques culturales en zones humides; n'est-il pas possible, avec prudence, d'en tirer un enseignement ?

Quant à la **nature des sols** estuariens d'abord. Ils sont hydromorphes, à texture fréquemment argileuse. Des fentes de dessiccation sont observées l'été très souvent et presque partout: elles provoquent l'absorption rapide des eaux de première inondation. Ces sols sont exigeants du point de vue des pratiques culturales, et les agriculteurs disent qu'une prairie retournée est lente à se remettre en herbe. Des études pédologiques minutieuses et répétées seraient nécessaires avant toute décision; des apports d'amendements et d'engrais s'imposent dans les cas étudiés, sous peine d'affaiblissement des rendements; on sait que la teneur en matières organiques est moyenne ou faible, que celle en CaCO_3 est très variable d'un groupe de parcelles à l'autre, etc.

Puis la poldérisation ne libère pas du **problème de l'eau**. D'autre part, chaque type de culture a ses réactions propres.

Il faut donc envisager une **sélection des productions** en fonction des sols, ce qui demeure un facteur limitatif.

2-3 *Pour quelle nouvelle spéculation agricole à introduire dans l'estuaire ?*
Les prés de Loire ont eu

dans le passé un prestige qui a diminué pour des raisons de comparaisons avec une agriculture régionale qui a évolué. La généralisation des cultures dans les terres basses rétablirait-elle l'égalité des rentabilités et des profits avec les plateaux d'encadrement ? Ne restera-t-il pas des raisons d'inégalité: hétérogénéité des sols, accès à restaurer, exigences des pratiques culturelles ?

D'autre part, le cloisonnement en marais juxtaposés a marqué par des siècles de vie estuarienne les **structures socio-économiques** et les **mentalités** d'une population agricole qui n'est que médiocrement renouvelée par des apports jeunes; ici comme ailleurs, il y a un conditionnement par le milieu physique. Un changement des pratiques culturales implique un changement de ces structures et de ces mentalités. Ainsi se trouve posée la question de la conservation du groupe des exploitants actuels, et de leurs Associations et Syndicats, et celle de leur évolution.

2-4 *Conclusion:*
la poldérisation est un bouleversement profond, physique, économique et humain.

Il peut être parfaitement judicieux de le vouloir. Il faut en mesurer les coûts financiers et sociaux, par référence aux résultats escomptés.

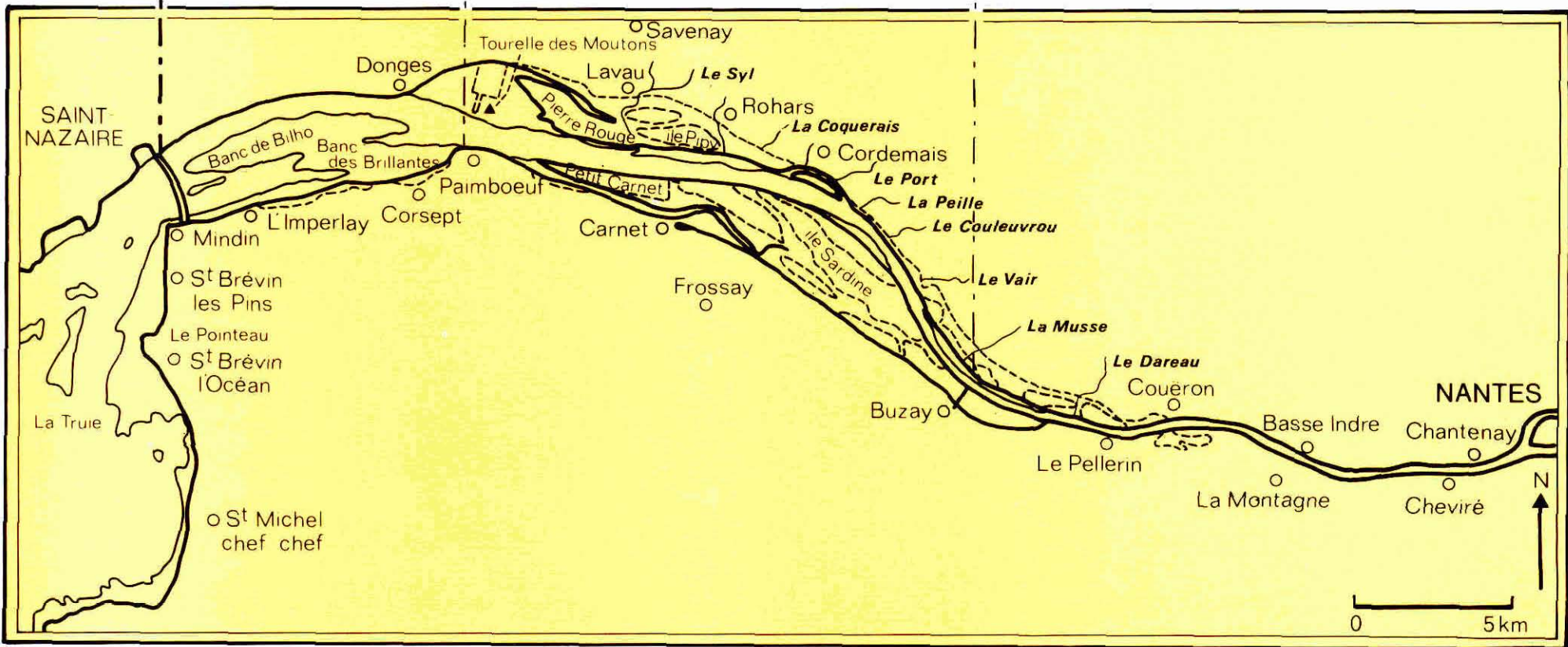
Ce bouleversement n'est pas compatible avec le maintien des conditions écologiques actuelles de la zone naturelle de la rive Nord, s'il est compatible avec la conservation de l'"écharpe verte" par l'agriculture. En particulier, les échanges des eaux entre le marais et le fleuve en seraient très modifiés, et ces modifications auraient des conséquences biologiques dont il faut mesurer le poids.

En regard de ces modifications, il faut peut-être rappeler l'avis des experts du Laboratoire d'Écologie et de Phytogéographie (Université de Nantes) dont l'audience est reconnue: la simple introduction de la rotation des pâturages dans certains secteurs suffirait à y augmenter de plus de 80 % le rendement pastoral. Les zones humides, dans leur état actuel, permettent encore une large marge de perfectionnement économique; si tel est l'objectif que l'on poursuit à travers la vision de la poldérisation, il convient de connaître cette possibilité de croissance.

Quatrième partie

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

ESTUAIRE EXTERNE		ESTUAIRE INTERNE	
(A)	(B)	(C)	(D)
DOMAINE MARIN	DOMAINE POLYHALIN	DOMAINE MESOHALIN	DOMAINE OLIGOHALIN
Salinité > 30 ‰	30 ‰ > Salinité > 18 ‰	18 ‰ > Salinité > 5 ‰	5 ‰ > Salinité > 0,5 ‰



Chapitre I
LE BILAN DES CONNAISSANCES

L'ensemble des études faites dans l'estuaire de la Loire dans le cadre du CSEEL permet d'abord de dresser un **bilan synthétique des connaissances** sur cet estuaire et de déterminer quelles sont les **tendances évolutives du milieu**; ces recherches conduisent ensuite à la **formulation de recommandations** concernant l'**aménagement** de l'estuaire, l'**amélioration** et le **contrôle de la qualité du milieu** et les **études complémentaires** à entreprendre.

1 - L'estuaire en 1983

1-1 Caractéristiques hydrosédimentaires

L'estuaire de la Loire se caractérise tout d'abord par une **pénétration importante de l'onde de marée** puisque celle-ci remonte actuellement en période d'étiage et de vive-eau jusqu'à l'amont d'Ancenis, soit à **plus de 95 km de l'embouchure**; cette **limite de pénétration de la marée a progressé** vers l'amont d'environ 30 km durant les 75 dernières années du fait du **creusement du chenal de navigation** à l'aval et des **approfondissements à l'amont de Nantes** où les **extractions d'agrégats ont quadruplé les sections**. Le phénomène de marée engendre dans l'estuaire des **courants** qui peuvent **dépasser 2 m/s en étiage et en vive-eau et atteindre 3,7 m/s en crue exceptionnelle**.

La **remontée de la marée** dans l'estuaire s'accompagne d'une **pénétration des eaux marines** dont la limite se situe actuellement **dans l'agglomération nantaise** durant les périodes de **grand étiage**; cette limite de pénétration du sel a connu au cours des dernières années une évolution parallèle à celle de la marée et le front de salinité à 0,5 ‰ a remonté d'une vingtaine de kilomètres entre 1949 et 1979. Il est clair que depuis quelques années la cause principale de la remontée du front de salinité est l'augmentation du volume du bassin de marée en amont de Nantes dont l'extraction d'agrégats est directement responsable, les

approfondissements du chenal de navigation entre St-Nazaire et Donges ayant une influence beaucoup plus faible. Les **travaux d'aménagement de l'aval effectués à partir de 1980 (chenal porté à -13,25 m en aval de Donges) ne modifient pas la propagation de la marée** et l'intrusion saline est peu affectée pour les faibles débits de la Loire; par contre, les envasements en aval de Donges ont triplé depuis 1976 où le chenal de navigation était dragué à -9 m et peuvent atteindre 4,5 à 5 millions de m³ par an.

Au sein de l'estuaire, les eaux douces ont tendance à s'écouler en surface alors que les eaux plus salées se trouvent près du fond; **la stratification haline est maximale en période de crues et de faible mélange (morte-eau)**. Le **temps de séjour des eaux douces** dans l'estuaire, et donc des **polluants dissous** qui y sont associés, est **étroitement lié au débit fluvial**; il **varie de 0,5 jour en forte crue à près de 20 jours en grand étiage**.

L'estuaire de la Loire est soumis par ailleurs à des **apports sédimentaires d'origine essentiellement fluviale**; la part des sables reste faible dans ces apports du fait des extractions en amont de l'estuaire, et les éléments sont principalement véhiculés sous forme de **matières fines en suspension**; le **tonnage de matériaux, apportés en majeure partie durant les crues, est compris entre 800 000 et 1 million de tonnes pour une année hydrologique moyenne**; ils peuvent atteindre 2 millions de tonnes pour les années de forte hydraulité.

Les **sédiments en suspension s'accumulent dans l'estuaire sous forme d'un bouchon vaseux, très développé en vive-eau**, avec des turbidités moyennes pouvant atteindre 5 g/l; **en période de morte-eau les sédiments se déposent sur les fonds sous forme de crème de vase** dont la concentration est de plusieurs centaines de grammes par litre, et dont l'épaisseur peut atteindre 2 m.

La **masse du bouchon vaseux** a été évaluée en période

d'étiage et de débit moyen à environ **700 000 tonnes**; elle peut atteindre **1 million de tonnes en vive-eau exceptionnelle**, alors qu'en morte-eau elle est de l'ordre de **50 000 tonnes**. Il apparaît que **par rapport à 1974, la masse du bouchon vaseux s'est accrue de près de 50 %**; cette augmentation peut provenir soit du fait que les débits de la Loire, et donc les apports sédimentaires, ont été plus faibles en 1974 qu'en 1981 (les débits moyens annuels sont respectivement de 679 m³/s et 1254 m³/s), soit d'un remaniement des particules fines contenues dans les produits dragués pour l'approfondissement du chenal, soit d'un piégeage plus important dans la zone Donges-St-Nazaire par suite du surcreusement du chenal.

Le **stock de vase subit un déplacement saisonnier en fonction du débit fluvial**; les **sédiments en suspension** contenus dans l'estuaire peuvent être **évacués vers le large en période de crue** et ces échanges se font essentiellement par le chenal de navigation; les études sur modèle réduit ont montré que 50 à 60 % des apports fluviaux étaient expulsés avant 1976 et qu'après approfondissement du chenal à -13,25 m ce pourcentage tombait à 30 % environ.

1-2 Caractéristiques biologiques

Les **éléments nutritifs** (azote, phosphore, silice), apportés essentiellement par la Loire, ne sont que **modérément consommés dans les eaux de l'estuaire**; en effet **la turbidité gêne la pénétration de la lumière et donc l'activité du phytoplancton**; ce phénomène limite en fait les processus préjudiciables d'eutrophisation dans l'estuaire. Par contre, **les concentrations en oxygène dissous tombent en fin de période estivale à des niveaux très bas** et ces **déficits** semblent être **liés à l'oxydation des matières organiques au sein du bouchon vaseux**. Les **matières organiques proviennent en grande partie, durant l'été, des végétaux planctoniques** produits dans la Loire **en amont de Nantes** où l'on constate une

eutrophisation importante; les rejets urbains et industriels se surajoutent à ces flux d'éléments oxydables et représentent 35 % des apports ligériens en étiage.

Les animaux planctoniques qui vivent dans l'estuaire sont essentiellement des mangeurs de détritiques accumulés dans le bouchon vaseux, mais certaines espèces semblent pouvoir être gênées dans leur comportement alimentaire par de trop fortes turbidités; d'autres espèces apparaissent comme sensibles aux teneurs en oxygène dissous trop basses.

L'étude des invertébrés qui vivent en liaison avec les sédiments montre le contraste existant entre le secteur amont assez pauvre et le secteur aval, entre Paimbœuf et St-Nazaire, présentant de nombreuses communautés benthiques; la richesse de ces peuplements est essentiellement liée à la nature vaseuse des sédiments, à leur niveau tidal et aux conditions hydrodynamiques locales; le dépôt de matériaux sur le banc de Bilho a cependant entraîné certaines modifications dans la répartition des peuplements.

La production benthique dans l'estuaire de la Loire est moyenne, comparée à d'autres estuaires européens; elle est de l'ordre de **65 t/an de matière organique pour une surface totale de 3 000 ha environ**, et elle se répartit sur des zones bien spécifiques de la manière suivante (t/an, % de surface).

Amont de Paimbœuf: 13 t/an - 9 %

Aval de Paimbœuf:

- secteur de Bilho et estrans rive Nord: 15 t/an - 75 %

- vasières Sud entre Mindin et Paimbœuf: 37 t/an - 16 %.

Il apparaît donc que les vasières de la rive nord en amont de Paimbœuf, ainsi que celles de la rive sud entre Mindin et Paimbœuf sont les zones essentielles pour la production benthique; ces secteurs vaseux sont aussi le principal lieu de production des algues microscopiques qui se trouvent à la surface des sédiments et qui contribuent à la réoxygénation des eaux en été.

L'estuaire constitue par ailleurs un lieu de séjour obligatoire pour les post-larves de crevettes et de nombreux poissons qui y pénètrent essentiellement en période printanière pour s'alimenter.

Le secteur polyhalin ($30 > S > 18 \%$) se révèle être la principale aire de nourricerie de l'estuaire, avec en particulier la rive nord du dépôt de Bilho et les vasières de l'Imperlay et de Corsept sur la rive sud; le secteur maritime de l'estuaire contribue aussi à cette richesse notamment par ses secteurs sablo-vaseux au sud et par ses vasières intertidales au nord (Grand Traict de St-Nazaire). Dans le secteur mésohalin ($18 > S > 5 \%$), seules les vasières de la rive nord entre Donges et Cordemais et les sables vaseux à l'amont, qui constituent un refuge pour les flets durant l'hiver, participent au maintien des ressources halieutiques.

Il apparaît donc une concordance remarquable entre les zones de forte production benthique et les secteurs de grand intérêt halieutique. Le bilan des relations trophiques fait apparaître que les prédateurs venant se nourrir en estuaire ne sont pas spécialisés et profitent des proies diverses disponibles en abondance sur les vasières.

L'espèce principale qui fréquente l'estuaire est la crevette grise; elle constitue à la fois une ressource exploitée qui donne lieu à une pêche intensive (76 tonnes en 1982) et un maillon fondamental dans les réseaux trophiques de l'estuaire, car elle assure le lien entre les consommateurs primaires (benthos, zooplancton) et les carnivores.

Les principales autres espèces étudiées par chalutage et qui présentent un intérêt halieutique sont le flet, la sole et le merlan; l'estuaire constitue pour ces poissons un lieu essentiel d'alimentation, notamment au cours de leurs jeunes stades de croissance.

1-3 Caractéristiques des zones humides

Les marais et zones humides

situés entre Couëron et Donges-Lavau constituent une "écharpe verte" aux abords de l'agglomération nantaise; ils ont une réelle valeur agricole et de nombreuses exploitations rurales sont concernées par la conservation et la qualité des prés de Loire.

L'étude de la structure physique des marais fait ressortir, en ce qui concerne la circulation des eaux, un système longitudinal en partie rénové, à l'amont, et un système transversal plus ancien, à l'aval de l'étier du Vair; la circulation des eaux dans les marais dépend non seulement du contrôle des écluses, mais aussi des inondations provenant de l'estuaire. **La gestion hydraulique de ces marais** montre le déphasage existant entre ces systèmes hérités du passé et les structures sociales et économiques actuelles du milieu rural; elle est dispersée entre 11 syndicats ou associations propriétaires des étiers, canaux, douves ou écluses, ce qui entraîne une pulvérisation des responsabilités.

Les sorties d'eau venant des marais sont une nécessité pendant l'essentiel de l'année; à la hauteur des vasières latérales les eaux s'enrichissent en ammoniacale, en silice et en oxygène, plus particulièrement durant l'été, et contribuent par ce dernier paramètre au maintien de la qualité des eaux dans l'estuaire.

Les envois d'eau de Loire à l'intérieur des marais sont une exigence agricole estivale; ils apportent aussi des matières en suspension en quantité limitée et du sel, ce dernier tendant à croître de l'amont vers l'aval.

A l'intérieur des marais les eaux de lessivage des bassins versants et les rejets de certaines stations d'épuration peuvent conduire à l'eutrophisation du milieu notamment en été; on assiste alors à une baisse des teneurs en oxygène dissous qui sera favorisée par l'insuffisance de circulation des eaux. **La végétation naturelle** qui couvre ces marais s'adapte bien aux dépôts de vase lorsque ceux-ci se font selon un rythme estuarien normal; par contre, il est clairement reconnu que durant la période de recouvrement

intense du chenal il y a eu, du fait des turbidités très élevées, des envasements anormaux dans les prés situés à proximité des bras et des étiers.

Les végétaux des zones humides sont aussi adaptés à l'élévation saisonnière de la salinité ; la teneur des sols en sel ne devient notable que dans les anciens bras fluviaux ; ailleurs, la salinité n'est jamais excessive, et elle pose des contraintes uniquement lorsqu'il y a substitution de certaines cultures à la végétation naturelle. Par ailleurs, il apparaît que **la valeur fourragère des foins récoltés dans ces marais est compromise par des dates de fenaison trop tardives.**

2 - Les tendances évolutives

2-1 Évolution morphologique et sédimentaire

L'étude sur modèle physique de l'évolution morphologique de l'estuaire sur 20 ans, avec conservation du chenal de navigation aux profondeurs actuelles, montre que l'on assistera à un comblement dans la partie aval de l'estuaire et notamment dans l'ancien chenal au sud du banc de Bilho, où les fonds ont tendance à se stabiliser à des cotes voisines de + 1 m à + 2 m au-dessus du zéro hydrographique ; dans cette zone les courants se réduiront, alors qu'ils auront tendance à augmenter dans le chenal de navigation où la cote d'équilibre par autdragage semble se situer au voisinage de - 9,5 m ; **on assistera aussi à un**

exhaussement des bancs latéraux entre Sardine et le Petit Carnet, à un envasement important devant Paimbœuf, à des dépôts dans les zones d'évitage et à une tendance au comblement de la fosse de l'ancien chenal de la Truie dans l'estuaire externe. Par contre, les dépôts seront faibles dans le chenal de navigation en amont de Carnet jusqu'à Nantes et probablement en aval de St-Nazaire.

La propagation de la marée dans l'estuaire ainsi que la position du bouchon vaseux ne semblent pas devoir être modifiées ; par contre, des turbidités 1,5 à 2 fois plus fortes que dans l'état actuel pourraient être mesurées par suite d'une augmentation de l'envasement dans le chenal dragué, les dépôts ne pouvant plus se produire sur les zones latérales qui atteignent leur niveau d'équilibre ; l'importance des dragages annuels d'entretien pour maintenir le chenal aux cotes actuelles pourrait passer de 5 millions de m³ à 7 à 8 millions de m³ vers les années 2000.

2-2 Conséquences biologiques

Dans la zone située entre Mindin et Paimbœuf, les vasières très productives au-dessus de la cote + 2 m et qui occupent actuellement environ 300 ha pourraient s'étendre et couvrir près de 600 ha en l'an 2000 ; la production benthique de ce secteur clé de l'estuaire pourrait donc montrer une tendance à l'accroissement dans la mesure où la surface de ces

vasières ne sera pas à son tour réduite par une colonisation trop rapide de la végétation dans les parties supérieures ; par ailleurs, l'accroissement des surfaces de vasières pourrait augmenter la production d'oxygène par les végétaux benthiques qui s'y trouvent.

L'apparition de turbidités plus élevées au sein de l'estuaire risque de favoriser la limitation de la production primaire phytoplanctonique et donc de diminuer la production d'oxygène dissous dans le milieu ; de plus, les espèces zooplanctoniques sensibles aux fortes charges en matières en suspension pourraient voir leur rôle se restreindre.

La présence dans l'estuaire de turbidités plus fortes devrait aussi conduire à une augmentation parallèle de la demande en oxygène provenant des matières organiques en suspension et donc à une aggravation des déficits en oxygène dissous en période estivale, si les actions de lutte contre les apports de matières oxydables ne sont pas poursuivies.

C'est aussi en période estivale que l'impact de l'élévation de température due aux installations industrielles et à la production d'énergie électrique se fera sentir le plus fortement sur le taux d'oxygène dissous.

Enfin, si des turbidités plus importantes apparaissent à la hauteur des étiers, ceux-ci, ainsi que les prés qui les bordent, risquent d'être soumis à un envasement plus important.

Chapitre II
LES RECOMMANDATIONS

Compte tenu des lacunes de connaissances qui subsistent, des aménagements portuaires éventuels, des établissements industriels et des agglomérations effectuant dans l'estuaire des rejets qui s'ajoutent aux apports du bassin versant, et des activités halieutiques exercées en secteur maritime, le maintien de la richesse du milieu vivant de l'estuaire de la Loire appelle certaines recommandations.

1 - Aménagements

A la lumière des études réalisées, il est possible de faire des recommandations concernant d'une part les aménagements physiques de l'estuaire et, d'autre part, la protection et la mise en valeur du milieu.

1-1 Les aménagements physiques de l'estuaire (fig. 1)

Le maintien du chenal de navigation à une profondeur de -13,25 m dans sa partie aval et l'entretien des zones d'évitage nécessiteront très probablement à moyen terme une augmentation de la capacité de dragage ;

il faudra aussi améliorer les conditions de dragages (problème des dragages à "l'américaine"), **et d'évacuation des vase**, afin d'éviter les phénomènes de recyclage dans l'estuaire ; on pourra aussi tenter de réduire les dragages d'entretien en prenant mieux en compte des phénomènes saisonniers d'apports de vase et de reprise naturelle de ces mêmes vases en fonction des conditions hydrauliques, c'est-à-dire du cycle des marées et des variations du débit.

Le passage du chenal de navigation à des cotes plus importantes (-15 m en aval de Donges et -9 m au Carnet) modifierait peu le lieu des pleines mers, mais celui des basses mers serait abaissé de 0,20 m à 0,30 m entre Cordemais et Nantes. En draguant le chenal de Carnet à Nantes à -7 m on obtiendrait un abaissement des basses mers sensiblement plus important, de 0,60 m au Pellerin. L'avancée du front de salinité maximale à 0,5 ‰ atteindrait 2,5 km et serait due principalement à l'abaissement à -7 m du chenal de Nantes. Cette

avancée serait de 9 km pour le front de salinité à 10 ‰. Les volumes des dépôts s'élèveraient à 6,5 - 7 millions de m³ en aval de Donges et 10 millions de m³ pour la totalité de l'estuaire. Un tel approfondissement du chenal de navigation **ne devrait être envisagé qu'après une étude sur modèle physique permettant de déterminer**, pour cette nouvelle configuration du chenal, l'évolution à long terme de l'estuaire et en particulier **les valeurs qu'atteindront, aux environs des années 2000, la turbidité des eaux et les tonnages à draguer pour l'entretien du chenal.**

L'approfondissement complémentaire du chenal à -18 m en aval de Donges entraînerait un abaissement du lieu des basses mers à Paimbœuf, jusqu'à l'amont de Nantes avec un maximum de 0,60 m du Pellerin à Chantenay ; de même, l'avancée du front de salinité dépasserait 6 km et l'on assisterait à une remontée de la turbidité et, sans doute, à une forte augmentation du volume des dépôts ; l'ensemble de ces conséquences fait que **cette hypothèse**

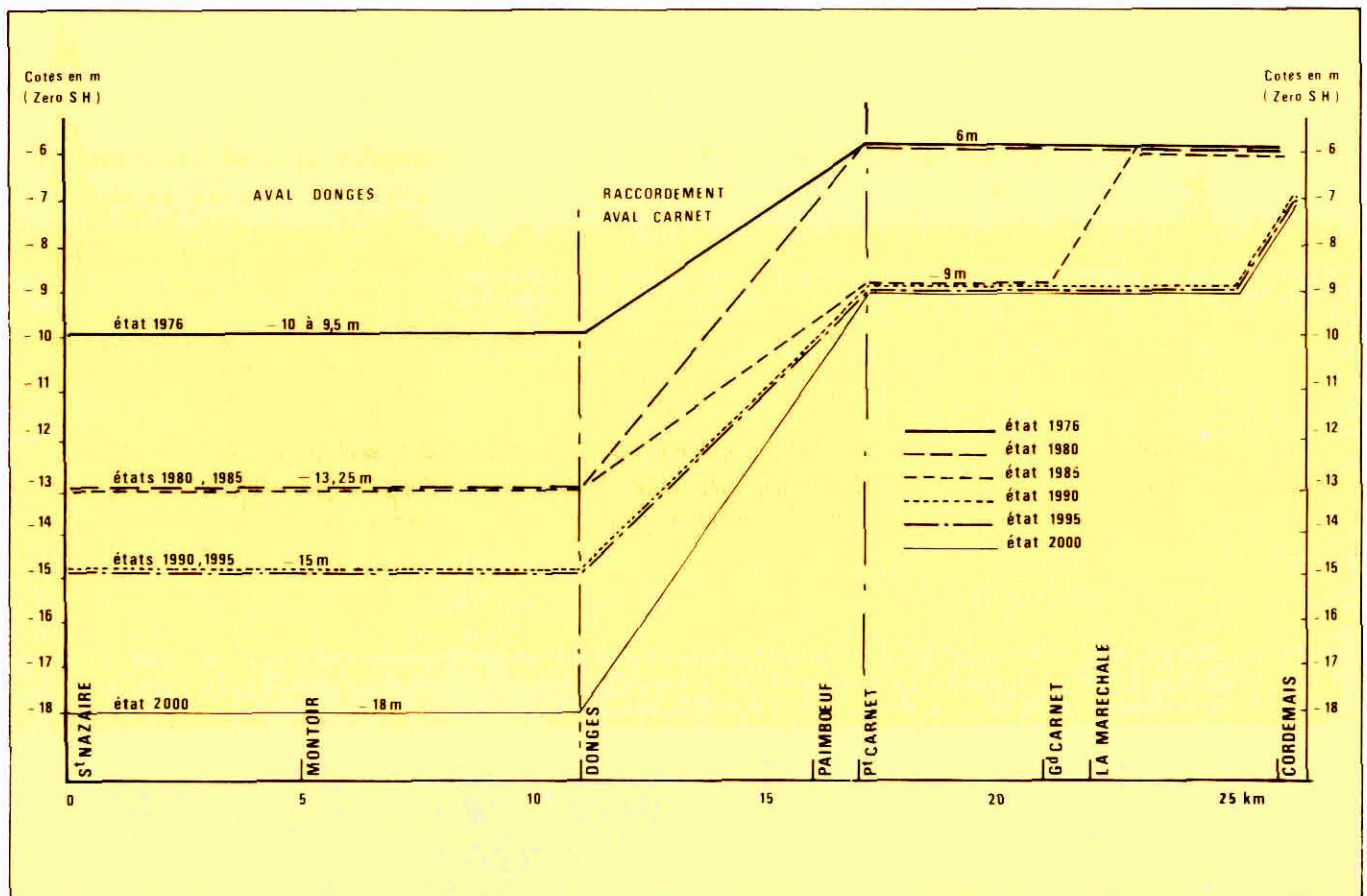


Fig. 1 - Aménagements réalisés ou projetés. Profil en long du chenal de navigation.

ne peut actuellement être retenue.

Afin de limiter la remontée du bouchon vaseux et du sel dans l'estuaire, il est nécessaire de ne pas augmenter le bassin de marée en amont de Nantes par des extractions trop importantes ; la mise en place de seuils dans cette zone amont devrait être étudiée car elle pourrait contribuer à réduire ce même bassin et à repousser le front de salinité de plusieurs kilomètres vers l'aval. Par contre, les barrages envisagés en amont de Nantes pour s'opposer à l'intrusion saline n'ont que des effets modérés et nécessitent des modulations du débit d'eau douce pendant le cycle de marées pour avoir une certaine influence. L'amélioration des débits d'étiage par création de réserves importantes d'eau douce dans la partie amont de la Loire apporterait une solution pour limiter l'intrusion saline en période estivale.

Dans l'hypothèse où l'on souhaite reculer l'échéance du colmatage au sud du banc de Bilho, les essais sur modèle physique ont montré que le dragage d'un chenal dans le banc des Brillantes ne conduit pas à une amélioration de la situation ; par contre, la mise en place d'un ouvrage de guidage en S (à la cote + 3 m) à l'aval du Carnet aurait pour effet de renforcer les courants dans la passe des Brillantes et dans le chenal de Donges, et d'alimenter en jusant la zone sud avec des eaux moins chargées en sédiments, les eaux de fond étant écrêtées par l'ouvrage ; en contre partie il faut s'attendre à un dépôt de vase sur la rive droite en face de Paimbœuf.

Une autre solution, dont on devra étudier l'ensemble des conséquences, consisterait à réaliser une digue de calibrage semi-submersible entre le banc de Bilho et un point à la hauteur de Donges, sur la rive gauche du chenal de navigation. Il semble qu'un tel ouvrage réduirait les dépôts dans le chenal, ainsi qu'au sud du banc de Bilho, les sédiments étant repoussés au large de St-Nazaire.

Néanmoins, la tendance au comblement de l'ancien chenal sud fait que dans le cas de la mise en place d'un port de plaisance à Mindin, on devra procéder à des dragages d'entretien très importants.

D'une façon générale, il apparaît que le colmatage des rives de l'estuaire et des zones hors-chenal est un phénomène qui se poursuit depuis plusieurs siècles. Les essais à long terme confirment ce processus et montrent que progressivement l'estuaire de la Loire tend vers un estuaire avec un chenal plus profond encaissé entre des rives de plus en plus accores. Devant ce calibrage naturel inéluctable mais lent, il semble souhaitable de maintenir un linéaire de rives aussi long que possible en évitant le colmatage des réseaux secondaires de drainage des vasières et en ne réalisant, pour guider éventuellement les courants, que des ouvrages semi-submersibles moins limitatifs pour les contacts entre les eaux de l'estuaire et les terres limitrophes.

En particulier, afin de préserver les échanges hydrauliques nécessaires entre les marais et l'estuaire, l'endiguement de la rive nord du chenal, de Couëron jusqu'au-delà de Pierre Rouge est formellement déconseillé ; les bourrelets de rives devront être néanmoins renforcés, avec éventuellement des produits de dragages de qualité, là où ils sont insuffisants (entre le Vair et Cordemais) pour éviter la pénétration trop aisée des eaux d'inondation.

La circulation des eaux ne devra pas être entravée à la hauteur des anciens bras de la Loire (entre le bourrelet de rive et les îles sur le Domaine Public Fluvial) par la mise en place de passages pour le bétail.

De plus, il faut rendre aux réseaux de circulation des eaux dans les marais leur efficacité :

- en procédant à d'éventuels désenvasements dans les bras d'étiers en aval des premières écluses,

- en palliant les déficiences des vannages de contact avec

l'estuaire (cas des étiers du Port, de la Peille, de la Coquerai et du vannage de Lavau où les eaux d'inondation peuvent contourner l'écluse),

- en calibrant les étiers et canaux à l'amont de ces écluses,

- en entretenant les douves, rigoles et petits vannages à l'intérieur des marais,

- en programmant de façon optimale des ouvertures et fermetures des vannes, et notamment en prévoyant une chasse d'eau totale au printemps adaptée aux conditions d'accumulation des pluies d'hiver et aux exigences de renouvellement des paturages.

Enfin, il convient d'évoquer, en ce qui concerne les aménagements physiques de l'estuaire, l'hypothèse d'une poldérisation générale de la rive nord ; celle-ci exigerait une délimitation des zones à assécher et l'accord des propriétaires et exploitants intéressés. Elle conduirait dans les périmètres retenus, à un renforcement systématique des bourrelets de rives, à une reconception de leurs vannages et de la gestion de ces derniers. Elle exigerait une part volontaire considérable d'investissements privés ; il conviendrait alors de définir quelle spéculation agricole justifierait et amortirait ces investissements ; elle conduirait à une mutation des syndicats actuels des marais et sans doute à la disparition de certains d'entre eux.

Les conséquences quant à la gestion de l'estuaire seraient les suivantes :

- l'assèchement systématique risque de conduire à la prolongation des endiguements, donc à l'artificialisation croissante de l'estuaire contraire aux positions d'aménagements retenus,

- les échanges entre marais et estuaire seraient fortement affaiblis,

- si dans l'hypothèse de cette poldérisation on conserve le besoin d'envoi d'eau de Loire, la plupart des contraintes de gestion de l'estuaire, du point de vue des marais, demeurent,

- toute décision de poldérisation partielle ou totale devrait être précédée de la définition précise des formes agricoles et de l'économie de remplacement, des conditions correspondantes de l'aménagement physique rendu nécessaire, d'études pédologiques poussées débouchant sur l'analyse des investissements en travail et en engrais ou amendements qui seraient requis.

1-2 La protection et la mise en valeur du milieu

La première recommandation consiste à **concrétiser par des moyens réglementaires la notion de coupure verte dans l'estuaire à l'aval du Pellerin sur les deux rives** (Décret en Conseil d'État); **il conviendrait** aussi dans les P.O.S. **de garder toutes les étendues relevant des syndicats de marais en zone non constructible**, et d'**engager une révision de la valeur fiscale du parcellaire** qui paraît à l'heure actuelle surévaluée; **un remembrement correctement conduit supprimerait certaines gênes actuelles** à l'entretien des douves, rigoles et chemins, la dispersion du parcellaire de propriété et d'exploitation étant un frein à cet entretien.

Des progrès pourraient être faits pour la mise en valeur des marais **en procédant sur la rive nord à une unification de la gestion des eaux** qui est actuellement très dispersée; à cet effet, il serait souhaitable de **rechercher la création d'une union générale des syndicats de marais qui pourrait conduire à une gestion commune, avec un matériel commun et un directeur des travaux** comme cela a été fait dans les marais du Pays de Retz; dans une phase transitoire on devrait aboutir à des regroupements locaux comprenant l'ensemble de Lavau, du Syl et de Rohars, l'ensemble de Cordemais, l'ensemble du Port, l'ensemble du Coulevrou et de la vallée de la Baie et enfin le complexe intégré du Vair, de la Musse et du Dareau. **La mise en valeur des marais et notamment des prairies naturelles nécessite aussi une rationalisation des dates et rythmes de fenaison pour tirer le meilleur parti de la valeur fourragère des espèces**

végétales, les cultures devant par ailleurs être réservées aux secteurs non soumis aux inondations par les eaux salées.

En ce qui concerne l'exploitation des ressources halieutiques dans l'estuaire, il convient que soit respectée l'interdiction de pêche au chalut dans l'estuaire interne, étant donné son rôle fondamental de nourricerie (en amont d'une ligne St-Nazaire - Mindin), et que des mesures réglementaires soient prises pour **limiter la capture et la vente des "solettes" dès leur deuxième année**; par ailleurs, si les études en cours démontrent que la pression par pêche exercée sur les populations de crevettes grises de l'estuaire atteint un pourcentage sensible par rapport à la mortalité naturelle estimée, **il pourrait être envisagé une taille commerciale des crevettes supérieure à 40 mm**, respectant un bon pourcentage de femelles immatures, **et des zones interdites ou ouvertes à durée limitée à la pêche crevette** (secteur du Pointeau par exemple). Enfin, **en ce qui concerne la pêche civellière, il apparaît d'une part que la date de fermeture serait à reconsidérer** car, dès la fin mars, les jeunes poissons plats remontent dans l'estuaire et sont susceptibles d'être capturés avec les civelles, **et d'autre part qu'il faut attirer l'attention des syndicats de marais, propriétaires des étiers, sur les excès de la pêche à la civelle**; il convient de signaler à ce sujet qu'**une ouverture des écluses et des vannages le plus longtemps possible, durant la première partie du flot, permettrait une meilleure pénétration des poissons**; par contre, **il faut éviter les délestages trop brutaux ou rapides d'eau douce en provenance des marais** car ils éjectent les larves et alevins dans la période où la teneur en ammoniacque dans les bras d'étiers atteint des niveaux très importants.

Dans le domaine de la protection du milieu, et outre la notion de coupure verte dans l'estuaire qu'il convient de réaffirmer, deux points méritent d'être soulignés; tout d'abord **il apparaît nécessaire que les vasières intertida-**

les de l'estuaire situées entre Donges et Cordemais, en aval de St-Nazaire (le Grand Traict), sur la rive nord du dépôt de Bilho, et surtout entre Paimbœuf et Mindin, puissent conserver leur intégrité car elles sont apparues comme capitales pour la richesse biologique de l'estuaire. **Les études phytogéographiques ont, par ailleurs, montré l'intérêt de certaines associations floristiques dans les marais**, où subsistent quelques espèces rares dont certaines sont actuellement protégées sur le plan national; **il conviendrait donc de traiter une partie des prairies de Rohars et de la Coquerais en réserve naturelle** avec maintien possible d'une activité herbagère contrôlée.

2 - Amélioration et contrôle des eaux

Les études engagées sur l'estuaire de la Loire ont montré que les déficits en oxygène dissous enregistrés durant la période estivale pouvaient entraîner la mortalité de nombreux poissons et constituaient un problème important. Il faut rappeler à ce sujet que l'oxygène dissous est à la fois indispensable au métabolisme de tout être vivant et à la dégradation de la matière organique inerte, ou minéralisation, productrice de sels nutritifs.

Il apparaît donc nécessaire de lutter contre les apports de matières oxydables dans l'estuaire; ceci passe par la poursuite, et peut-être le renforcement, du programme de lutte contre l'eutrophisation engagé dans la Loire amont, par l'Agence de Bassin Loire-Bretagne; ce programme repose sur la réduction des apports en sels nutritifs (phosphore et azote) le long du fleuve, car ceux-ci entraînent une production excessive de phytoplancton; de plus, en période d'étiage, les rejets de matières oxydables (matières organiques et ammoniacque) au sein même de l'estuaire, deviennent significatifs et leur réduction contribuerait à améliorer la qualité des eaux; par contre, les rejets de sels nutritifs à la hauteur de l'agglomération nantaise n'entraînent pas dans l'estuaire de phénomène

d'eutrophisation marqué car la production phytoplanctonique est limitée par la turbidité des eaux ; les concentrations en phosphates, malgré des apports importants en étiage à la hauteur de Nantes, semblent quant à elles stabilisées dans l'estuaire par les échanges avec les matières en suspension.

Comme cela a été fait dans de nombreux estuaires étrangers, il devrait être possible de **fixer une norme minimale de concentration en oxygène dissous (3 mg/l) pour les eaux de l'estuaire** ; cette norme constituerait un des objectifs à moyen terme du programme de lutte engagé ; il faut aussi noter que **toute action en faveur du soutien des débits d'étiage** (débit minimum de 100 m³/s) **contribuerait à améliorer la qualité des eaux dans l'estuaire et à limiter la remontée du front de salinité**. Une coordination des recherches et des actions avec l'étude intégrée du Bassin de la Loire est donc non seulement souhaitable mais nécessaire.

Les études hydrosédimentaires entreprises en Loire devraient aussi permettre de **définir un programme de pompage des eaux douces, soit pour l'alimentation de la ville de Nantes, soit pour les besoins agricoles ou industriels**, en examinant les possibilités de pompage des eaux, en période de grand étiage, uniquement pendant une partie de la marée. **La création de bassins de "stockage" des eaux douces serait alors nécessaire** pour assurer une alimentation régulière. Par contre, il faudra **envisager éventuellement un déplacement des prises d'eau plus en amont, si l'on devait, au cours des prochaines décennies, approfondir le chenal, notamment entre Carnet et Nantes**, ou si, par suite de pompes excessifs dans la Loire fluviale, le débit d'étiage devait être diminué.

Dans les marais il existe des cas d'eutrophisation entraînant des déficits en oxygène dissous ; il convient donc de **contrôler les rejets d'origines urbaine ou rurale** qui y sont effectués et de tenter de **réduire les apports en**

éléments nutritifs par les stations d'épuration qui s'y déversent ; l'amélioration de la circulation des eaux dans ces marais aiderait aussi à limiter les cas d'eutrophisation.

Des opérations de mesures en continu de la qualité des eaux devront être faites dans l'estuaire afin d'en suivre les évolutions ; les paramètres essentiels à prendre en compte sont la salinité, les concentrations en oxygène dissous, la température et les teneurs en matières en suspension ; ces contrôles sont une nécessité pour évaluer les conséquences possibles d'une éventuelle augmentation de la turbidité des eaux sur l'oxygène dissous. Par ailleurs, **les contrôles concernant les micro-polluants et en particulier les métaux lourds devront être poursuivis**.

3 - Études complémentaires

Bien que de nombreuses études aient été engagées dans le cadre du CSEEL, il apparaît à l'issue de ces travaux qu'un certain nombre de recherches complémentaires restent à mener.

Dans le domaine de la qualité des eaux, il faudrait pouvoir **développer un modèle mathématique des concentrations en oxygène dissous dans l'estuaire** ; la difficulté à résoudre pour mettre au point un tel modèle réside dans la nécessité de simuler les remises en suspension et la formation du bouchon vaseux dans l'estuaire ; on peut espérer que dans les prochaines années ces étapes seront franchies et ce modèle permettrait alors de donner les taux de réduction à apporter aux charges en matières oxydables pour arriver à des teneurs en oxygène dissous acceptables.

Par ailleurs, **la question des rejets bactériens dans l'estuaire et le devenir des micro-organismes au sein du système estuarien nécessitent un programme d'étude complémentaire**.

En ce qui concerne la sédimentologie, il faudrait pouvoir évaluer les temps de séjour des

vases dans l'estuaire car elles sont le vecteur de nombreux polluants ; par ailleurs, il serait souhaitable de préciser si, à certaines périodes d'étiage, et pour des conditions d'agitation déterminées, il n'y a pas recyclage partiel des vases à partir de l'estuaire externe ; de même, des ordres de grandeur des échanges en crue permettraient de préciser le pourcentage de matériaux fins expulsés vers le large.

Il serait aussi important de pouvoir **déterminer les conditions éventuelles de navigation dans la crème de vase fluide**, tout en assurant une sécurité totale pour les bâtiments.

Enfin, **une meilleure connaissance des apports fluviaux sableux actuels dans l'estuaire permettrait de trouver un juste équilibre dans l'extraction des agrégats**.

Dans le domaine des ressources biologiques, **les études entreprises concernant les poissons n'ont porté que sur les espèces chalutables** ; il conviendrait donc **de conduire des travaux similaires sur l'écologie des espèces pélagiques à écophase estuarienne telles que le hareng, le sprat et l'anchois** ; par ailleurs, il faudrait préciser le **rôle joué par l'estuaire dans la migration d'espèces amphibiotiques telles que le saumon, l'alose et l'anguille**. De façon plus générale, **une étude complète sur la pêche dans l'estuaire doit être entreprise** pour acquérir des données chiffrées les plus exactes possibles sur les activités (diversification, durée) **et les captures** effectives des flottilles opérant dans l'estuaire, sur les interactions entre espèces associées dans les captures et entre les différentes activités de pêche et sur **le poids économique et social des activités halieutiques** ; **cette étude doit permettre d'établir à l'aide des connaissances acquises un projet concerté avec les diverses catégories de pêcheurs pour l'aménagement de l'estuaire**.

De même **une étude complète de l'avifaune reste à faire**.

Sur un plan scientifique, les

études du CSEEL sont loin d'avoir épuisé les problèmes fondamentaux de la productivité des vasières (en particulier celui des échanges d'éléments organiques et minéraux à l'interface eau-sédiment), **et de la connaissance de la chaîne trophique dans l'estuaire** (y compris sa quantification); il conviendra de les poursuivre.

Des travaux complémentaires

devront aussi être engagés pour **suivre les modifications sédimentologique et biologique de la zone située au sud de Bilho** parce que ce secteur, qui est susceptible de connaître une évolution morphologique notable, est une zone très importante pour la biologie de l'estuaire.

Il serait souhaitable **d'analyser la qualité fourragère des prés de Loire en fonction des dates de fenaison.**

Enfin, il convient de noter que devront être pris en compte les résultats des **études actuellement en cours**, et qui concernent d'une part **l'influence du sel et de la qualité des eaux sur l'élevage dans les marais** (en raison même de la pollution dont il est la cause; il sera peut-être nécessaire d'envisager une alimentation du bétail en eau extérieure au marais), et d'autre part **les échanges ichtyologiques entre l'estuaire et les marais.**

ANNEXES

ANNEXE 1

GLOSSAIRE DES TERMES SCIENTIFIQUES UTILISÉS DANS LE RAPPORT

ALGUES :

Végétaux chlorophylliens dont certains sont unicellulaires vivant en milieu aquatique. Les algues contiennent divers types de pigments, ce qui permet de les diviser en "algues vertes" (chlorophycées), "algues rouges" (rhodophycées), "algues brunes" (phéophycées), et "algues bleues" (cyanophycées). Elles assurent l'essentiel de la production primaire et constituent la base des chaînes alimentaires marines.

AMPHIBIOTIQUE :

Qualifie les animaux aquatiques dont l'existence comprend une phase marine et une phase dulçaquicole.

ANNELIDES :

Embranchement du règne animal comprenant les vers annelés. Divisé en trois classes, les Polychètes, les Oligochètes et les Hirudinées.

ANOXIE :

Privation d'oxygène pouvant provoquer la mort par asphyxie.

BENTHIQUE :

Qualifie tous les organismes et les processus ayant un lien étroit avec le fond.

BENTHOS :

Ensemble des organismes aquatiques vivant en relation étroite avec le fond.

BIOMASSE :

Quantité totale de matière vivante des organismes présents dans un milieu à un instant donné. On l'exprime en masse (poids sec, poids frais, décalcifié ou non), en carbone, en calories par unité de volume ou de surface.

BIOTOPE :

Aire géographique, de surface ou de volume variable, constituant l'habitat d'une biomasse, et qui est soumise à des conditions dont les dominantes sont homogènes.

BLOOM PHYTOPLANCTONIQUE :

Forte élévation de la densité du phytoplancton.

BOUCHON VASEUX :

Dans un estuaire, zone à concentration élevée de matières en suspension.

BOUCHOT :

Pieux ou alignements de pieux pour l'élevage des moules.

BOURRELET DE RIVE :

Zone terrestre en légère surélévation par rapport au marais et qui constitue la rive actuelle ou ancienne du fleuve ou de la rivière.

CEPHALOPODES :

Classe de mollusques marins, à symétrie bilatérale dont les bords du pied, transformés en bras ou tentacules, sont disposés autour de la bouche. Ex. seiche, calmar et pieuvre.

CIVELLE :

Stade jeune de l'anguille, lorsqu'elle a pris sa forme cylindrique, au moment de sa pénétration en eau douce.

**CHAÎNE TROPHIQUE ou
CHAÎNE ALIMENTAIRE :**

Se compose à la base de végétaux photosynthétiques produisant de la matière organique à partir d'éléments minéraux, assurant la production primaire. Cette matière organique est consommée par les animaux phytophages assurant la production secondaire. Ceux-là sont à leur tour la proie des carnivores et des carnassiers. Les détritivores interviennent à tous les niveaux.

CHLOROPHYCEES :

(voir algues).

CHLOROPHYLLE "a" :

Pigment assimilateur vert contenu dans les végétaux et qui permet la photosynthèse : on distingue les chlorophylles a, b et c, la première étant la plus abondante.

COEFFICIENT DE MARÉE :

Rapport, en un lieu donné, du marnage au marnage moyen en vive eau d'équinoxe. Ce nombre, exprimé en centièmes, est appliqué aux marées des côtes de France.

CONSOMMATEURS PRIMAIRES :

Animaux qui se nourrissent de matière organique végétale ou détritique.

CONSOMMATEURS SECONDAIRES :

Animaux carnivores prédateurs de consommateurs primaires.

COPEPODES :

Sous classe de crustacés inférieurs de petite taille, constituant l'une des parties essentielles du zooplancton.

CYANOPHYCÉES :

(voir algues).

**D.B.O. (DEMANDE
BIOCHIMIQUE EN OXYGÈNE) :**

Expression de la quantité d'oxygène nécessaire à la destruction ou à la dégradation des matières organiques dans une eau, avec le concours des micro-organismes se développant dans le milieu, dans des conditions données (DB05 : demande biologique en oxygène sous 5 jours).

**D.C.O. (DEMANDE
CHIMIQUE EN OXYGÈNE) :**

Expression de la quantité d'oxygène nécessaire pour l'oxydation non biologique d'eaux contenant des corps réducteurs.

DECHET (ou perdant) :

Intervalle de temps pendant lequel le marnage diminue entre la vive-eau et la morte-eau suivante.

DEMERSAL :

Qualifie les espèces qui vivent sur le fond ou à son voisinage.

DETRITIVORES :

Qui se nourrissent de déchets, de détritus.

DIATOMÉES :

Classe d'algues unicellulaires à squelette externe silicieux, dont la taille varie entre 2 et 400 microns. Outre la chlorophylle, elles contiennent des pigments bruns. Elles jouent un rôle très important dans la production marine et dans la formation des sédiments.

DINOFLAGELLÉES :

Classe de végétaux unicellulaires généralement marins, libres, planctoniques ou benthiques, caractérisés par la présence de deux flagelles battant dans deux plans perpendiculaires.

**DIVERSITÉ SPECIFIQUE
(ou Indice de Shannon) :**

Cet indice traduit le degré de diversité d'une communauté. Il est égal à :

$$HN = \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \log \frac{n_i}{N}$$

S = nombre d'espèces présentes dans l'échantillon.

n_i = effectif de l'espèce i

N = effectif total de l'échantillon.

Cet indice peut également être utilisé avec les biomasses :

$$H_B = \sum_{i=1}^S \frac{b_i}{B} \log \frac{b_i}{B}$$

où b_i et B sont respectivement les biomasses spécifiques et globales.

DOUVE :

Étroit fossé servant à l'écoulement des eaux.

DULÇAQUICOLE :

Qualifie un organisme qui vit dans les eaux douces.

EDAPHIQUE :

Se dit des facteurs liés au substratum (sol et eau), qui ont une influence profonde sur la répartition des êtres vivants.

ENDEMIQUE :

Espèce considérée comme originaire du lieu dans lequel elle vit.

EPIAISON :

Développement de l'épi dans la tige des graminées.

EPIDEMIOLOGIE :

Discipline qui étudie l'influence de divers facteurs individuels ou relatifs à l'environnement sur les maladies.

ESPÈCE :

Collection d'individus ayant des caractères analogues, transmissibles par hérédité.

ETIER :

Chenal plus ou moins ramifié et soumis à la marée dans les marais maritimes.

EURYHALINITÉ :

Propriété caractérisant certains organismes qui supportent sans dommage notable d'importantes et rapides modifications de la salinité du milieu.

EUTROPHISATION :

Phénomène caractérisé par une multiplication des végétaux dont la décomposition diminue la teneur en oxygène des eaux. Il résulte d'un excès de sels nutritifs comme les nitrates et les phosphates, ou de matière organique particulaire ou dissoute.

"FINES" (en sédimentologie) :

Ensemble des sédiments dont la taille est inférieure à 40 microns.

FLOCCULATION :

Comportement particulier des sédiments argileux en suspension lorsqu'ils entrent en contact avec l'eau salée dont l'action provoque la coalescence de ces particules.

FRAI :

Oeufs et larves d'animaux aquatiques issus de la reproduction.

FRAYERE :

Aire dans laquelle les poissons se réunissent périodiquement au moment de la reproduction et y déposent leurs œufs.

FRONT DE SALINITÉ :

Surface fictive séparant une étendue d'eau douce d'une étendue d'eau saumâtre ou salée.

GAGNERIE :

Zone exondée de cultures soumises à des contraintes collectives et dont le paysage découvert contraste avec l'environnement bocager ou semi-bocager.

GAMMARES :

Genre de crustacés, de l'ordre des amphipodes. Ex. : crevette d'eau douce.

HALIEUTIQUE :

Qualifie tout ce qui se rapporte à la pêche.

HALIN :

Qui a rapport au sel.

HALOPHYTE :

Plante qui se développe dans les terrains salés.

ICHTHYOLOGIE :

Partie de la zoologie qui traite des poissons.

INTERTIDAL :

Qualifie l'espace côtier entre les limites extrêmes de la marée.

INTRUSION SALINE :

Phénomène dans lequel une masse d'eau salée pénètre à l'intérieur d'une masse d'eau douce.

LAMELLIBRANCHES :

Classe de mollusques caractérisés par la présence d'une coquille calcaire composée de deux pièces articulées et d'un corps pourvu de branchies lamelleuses.

LIMNOLOGIE :

Science pluridisciplinaire qui étudie les eaux douces sous tous leurs aspects.

MACROFAUNE BENTHIQUE :

Ensemble des organismes benthiques dont la taille est supérieure à 1 mm.

MARÉE DYNAMIQUE (zone de) :

Se dit de la zone où se font sentir les effets dynamiques (variations de niveau de l'eau, courant) de la marée.

MARNAGE :

Différence des hauteurs d'eau d'une pleine mer et d'une basse mer successives.

MESOHALINITE :

Caractérise une eau dont la salinité varie entre 5 et 18 ‰.

MICROPHYTOBENTHOS :

Ensemble des algues benthiques microscopiques vivant sur les substrats ou dans les interstices des grains de sable des substrats meubles.

MODELE MATHEMATIQUE :

Présentation à l'aide d'une formulation mathématique, d'une relation causale ou simplement descriptive d'une situation ou d'une évolution sous l'influence de certaines variables.

MODULE :

Débit moyen annuel d'un fleuve.

MYSIDACEES :

Ordre de crustacés marins, pélagiques pour la plupart, dont la taille varie généralement de 5 à 20 mm.

NANOPLANCTON :

(voir plancton).

NITRIFICATION :

Transformation de l'ion ammonium (NH_4^+) en ion nitrite (NO_2^-) par processus enzymatique en milieu de bactéries nitrifiantes.

NOURRICERIE :

Zone marine littorale où les individus juvéniles d'une espèce se réunissent pour passer les premières phases de leur vie.

NUTRIENTS :

(terme anglo-saxon), voir sels nutritifs.

NUTRIMENTS :

(voir sels nutritifs).

OLIGOCHETES :

(voir annélides).

OLIGOHALINITÉ :

Caractérise une eau dont la salinité varie entre 0,5 et 5 ‰.

PELAGIQUE :

Qualifie tout ce qui se trouve en pleine eau sans relation avec le fond.

PHEOPIGMENT :

Pigment résultant de la dégradation de la chlorophylle.

PHOTOSYNTHESE :

Processus biochimique par lequel les végétaux chlorophylliens élaborent des substances organiques à partir du gaz carbonique et de l'eau, en utilisant la lumière solaire comme énergie et en rejetant de l'oxygène.

PHYTOBENTHOS :

Ensemble des organismes du benthos appartenant au règne végétal.

PHYTOGEOGRAPHIE :

Science de la distribution des plantes sur la terre.

PHYTOPLANCTON :

Ensemble des organismes du plancton appartenant au règne végétal. Les diatomées et les dinoflagellées constituent la plus grande partie des organismes phytoplanctoniques.

PLANCTON :

Ensemble des organismes, animaux et végétaux, microscopiques ou de petite taille, vivant en pleine eau, et de faible capacité nataoire.

N.B. La taille du nanoplancton est comprise entre 5 et 50 microns.

POINT NODAL :

(voir vitesse résiduelle).

PRÉS DE LOIRE :

Prés situés dans la partie du marais la plus proche du fleuve et ayant une altitude supérieure au prés marais.

PRÉS MARAIS :

Prés situés dans la partie la plus reculée du marais et en général la plus basse.

PRODUCTION :

Quantité de matière organique élaborée par l'ensemble des individus d'une même population sur une unité de surface (ou de volume) et par unité de temps. La production comprend :

- . l'accroissement de la biomasse par croissance tissulaire des individus ;
- . l'apport de matière par le recrutement de jeunes individus au sein de la population ;
- . la perte de matière par mortalité et émigration.

PRODUCTION PRIMAIRE :

Quantité de matière organique élaborée par les végétaux photosynthétiques, pendant une période donnée.

PRODUCTION SECONDAIRE :

Production de matière organique réalisée par les organismes (herbivores) qui tirent leur énergie de la production primaire.

PRODUCTIVITE :

La productivité d'une population est le rapport entre la production et la biomasse moyenne ; elle correspond à la vitesse de renouvellement de la biomasse par unité de temps, soit encore le "turn-over" de la population.

POLYHALINITÉ :

Caractérise une eau dont la salinité varie entre 18 et 30 ‰.

REVIJ :

Intervalle de temps pendant lequel le marnage augmente entre la morte-eau et la vive-eau suivante.

ROSELIERE :

Endroit où poussent beaucoup de roseaux.

SCHORRE (ou HERBU) :

Partie d'une étendue intertidale située au-dessus des pleines mers moyennes et dont la couverture végétale composée d'halophytes est dense et continue.

SELS NUTRITIFS :

Formes assimilables par les végétaux marins de l'azote, du phosphore et de la silice dissous dans l'eau de mer. Ils représentent un facteur important de la fertilité des océans.

SLIKKE :

Partie d'une étendue intertidale de vases plus ou moins sableuses dont l'immersion a lieu à chaque marée et dont la couverture végétale est pauvre et discontinue.

STENOHALINITÉ :

Propriété de certains organismes aquatiques qui présentent une tolérance étroite aux variations de salinité du milieu.

TIDAL :

Qui se rapporte à la marée.

TROPHIQUE :

Qui concerne la nutrition.

UNITÉ FOURRAGÈRE :

Unité de mesure de la valeur énergétique des fourrages.

VITESSE RÉSIDUELLE :

La vitesse résiduelle en un point du fleuve d'exprime par le rapport :

$$\frac{\text{vitesse moyenne flot} \times \text{durée flot} - \text{vitesse moyenne jusant} \times \text{durée jusant}}{\text{durée flot} + \text{durée jusant}}$$

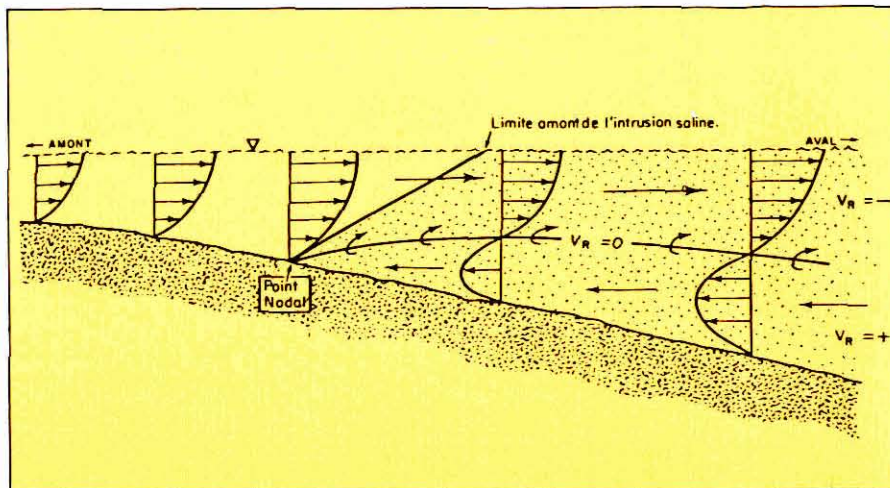
Dans toute l'intrusion saline, il existe un écoulement résiduel vers l'amont au fond et vers l'aval en surface. A une certaine hauteur du fond, la direction des vitesses

résiduelles s'inverse et se manifeste vers l'aval dans toute la tranche supérieure de l'écoulement. Les écoulements inverses et superposés subsistent en amont jusqu'à la limite de l'intrusion des eaux salées. En amont de cette limite l'écoulement résiduel est du type fluvial, c'est-à-dire dirigé vers l'aval dans toute la tranche d'eau, malgré la renverse des courants de marée. La limite au fond entre les deux écoulements

résiduels est appelé "point nodal". En période de crue, le point nodal se déplace vers l'aval et en étiage vers l'amont. Le point nodal est le siège d'une accumulation de sédiments.

ZOOPLANCTON :

Ensemble des organismes du plancton appartenant au règne animal



■ Eau salée et saumâtre.
□ Eau douce.

Gradient des vitesses résiduelles (V.R.)

Répartition schématisée des vitesses résiduelles dans un estuaire idéal

QUELQUES SIGLES UTILISÉS DANS LE RAPPORT

A.B.L.B. - Agence de Bassin Loire-Bretagne.

C.N.E.X.O. - Centre National pour l'Exploitation des Océans.

C.O.B. - Centre Océanologique de Bretagne.

C.S.E.E.L. - Comité Scientifique pour l'Environnement de l'Estuaire de la Loire.

L.C.H.F. - Laboratoire Central d'Hydraulique de France.

M.E.S. - Matières en suspension.

N.G.F. - Nivellement Général de la France.

O.R.E.A.M. - Organisation d'Études d'Aménagement de l'Aire Métropolitaine.

P.A.N.S.N. - Port Autonome de Nantes/Saint-Nazaire.

P.K. - Point Kilométrique.

R.N.O. - Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin.

O.S.H. ou S.H. - est utilisé pour définir des niveaux rapportés au zéro hydrographique.

ANNEXE 3

**LISTE DES ÉTUDES ET RAPPORTS EFFECTUÉS
POUR/PAR LE COMITÉ SCIENTIFIQUE
POUR L'ENVIRONNEMENT DE L'ESTUAIRE
DE LA LOIRE (C.S.E.E.L.).**

Thème 1 - Les aspects hydraulique et sédimentaire de l'estuaire de la Loire.

- Les aspects hydraulique et sédimentaire de l'estuaire de la Loire - **Rapport de synthèse par M.C. Migniot**, Laboratoire Central d'Hydraulique de France (L.C.H.F.) **1984.**

- Étude hydrologique et sédimentologique de la zone de transition entre la Loire fluviale et l'estuaire. Thèse de 3^e cycle soutenue par M. Manickam le 5 novembre 1982 au Laboratoire de Géologie Marine et Appliquée de l'Université de Nantes, dirigé par le Professeur Ottmann.

Principaux résultats des études réalisées sur la basse Loire en 1980-1982 - 27 avril 1983. (Résumé de la thèse de M. Manickam par M. Ottmann).

- Étude de la masse turbide dans l'estuaire de la Loire, mai 1983. M. Migniot, Laboratoire Central d'Hydraulique de France.

- Étude des échanges sédimentaires entre l'estuaire et la Loire et le milieu extérieur, mai 1983. M. Migniot, Laboratoire Central d'Hydraulique de France.

- Évolution à long terme des fonds de l'estuaire de la Loire, juin 1983. M. Migniot, Laboratoire Central d'Hydraulique de France.

Thème 2 - La qualité des eaux et le milieu vivant de l'estuaire de la Loire.

- La qualité des eaux et le milieu vivant de l'estuaire de la Loire. **Rapport de synthèse par M. Vincent 1984.**

- Inventaire et évaluation des rejets urbains et industriels dans l'estuaire de la Loire, janvier 1983. Document Port Autonome

de Nantes/Saint-Nazaire (P.A.N.S.N.), établi par M. Gallenne.

- Chimie des eaux à Montjean et Mauves-Thouaré. Voir plus haut thèse M. Manickam (avec le concours du Laboratoire Départemental d'Hygiène, Mme Quéré).

- Qualité des eaux et milieu vivant dans l'estuaire de la Loire :

Étude réalisée par le Laboratoire de biologie marine de l'Université de Nantes, sous la responsabilité scientifique de Mme Marchand et de M. Rincé. mai 1983. Document publié en 5 tomes :

Tome 1 : Présentation générale des connaissances sur le milieu vivant et de l'environnement géographique et physique de l'estuaire de la Loire.

Tome 2 : Hydrologie. Planctonologie

Tome 3 : Contribution à l'étude des peuplements benthiques de l'estuaire de la Loire.

Tome 4 : Contribution à l'étude des ressources benthodémersales de l'estuaire de la Loire : Biologie et écologie des principales espèces.

Tome 5 : Synthèse des études du milieu vivant de l'estuaire de la Loire.

Thème 3 - La gestion des zones humides de la rive Nord de l'estuaire de la Loire.

- La gestion des zones humides de la rive Nord de l'estuaire de la Loire. **Rapport de synthèse, par le Professeur Vigarié, juillet 1983.**

- Échanges hydrologiques et sédimentologiques entre l'estuaire de la Loire et ses zones marginales (vasières, étiers, marais). Thèse de 3^e cycle soutenue le 17

novembre 1983 par Mlle Mariline Diara du Laboratoire de Géologie Marine et Appliquée de l'Université de Nantes (Professeur Ottmann), avec le concours du Laboratoire Départemental d'Hygiène (Mme Quéré).

- Étude de la politique du contrôle des eaux dans les étiers de l'estuaire de la Loire (rive droite), par le Professeur J.E. Gras de l'Institut de Géographie de l'Université de Nantes, assisté de M. Paul Fattal. Février 1983.

N.B. - Il existe un condensé de cette étude, avec compléments, publié en Avril 1983.

- Étude des associations végétales dans les zones humides de l'estuaire de la Loire, par le Professeur P. Dupont, Directeur de Laboratoire d'Écologie et de Phytogéographie de l'Université de Nantes, assisté par M.M. J.Y. Bernard et F. Bioret. Mai 1983.

- L'intégration des prés de Loire dans les exploitations agricoles sur la rive Nord de l'estuaire (de la Loire), par Mlle Danielle Rapetti, sous la direction du Professeur J. Gras, responsable scientifique à l'Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes (I.G.A.R.U.N.) 1983.

- Possibilités et conséquences d'une poldérisation éventuelle des prés de Loire, par le Professeur P. Dupont, Directeur du Laboratoire d'Écologie et de Phytogéographie de l'Université de Nantes. Juin 1983.

- Le peuplement végétal du Banc de Bilho (estuaire de la Loire) en 1982, par le Professeur P. Dupont. (Étude réalisée pour le Port Autonome de Nantes/Saint-Nazaire).

TABLE DES MATIÈRES

	PAGES
• SOMMAIRE _____	3
• INTRODUCTION _____	5

Première Partie LES ASPECTS HYDRAULIQUE ET SÉDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE

• INTRODUCTION _____	13
• Chapitre I - ASPECT HYDRAULIQUE DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE _____	15
1 - Rappel des caractéristiques géométriques de la Loire _____	16
1-1 <i>Longueur du bief fluvio-maritime</i> _____	16
1-2 <i>Largeur et sections de l'estuaire</i> _____	16
2 - Apports liquides de la Loire _____	16
3 - La marée, sa propagation, ses modifications _____	17
3-1 <i>Généralités</i> _____	17
3-2 <i>Propagation de la marée en étiage</i> _____	17
3-3 <i>Propagation de la marée en crue</i> _____	17
3-4 <i>Modifications de la marée au cours du temps</i> _____	20
4 - Les volumes d'eau oscillants et les courants dans l'estuaire _____	20
4-1 <i>Les volumes d'eau oscillants</i> _____	20
4-2 <i>Les courants</i> _____	21
5 - La salinité : sa répartition et ses modifications dans le temps sous l'action du débit fluvial et de la propagation de la marée _____	23
5-1 <i>Mélange vertical des eaux douces et des eaux salées</i> _____	23
5-2 <i>Influence du coefficient de marée</i> _____	24
5-3 <i>Influence du débit fluvial</i> _____	24
5-4 <i>Variation de la salinité dans le temps</i> _____	24
5-5 <i>Renouvellement des eaux dans l'estuaire</i> _____	26

• Chapitre II - ASPECT SÉDIMENTOLOGIQUE DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE	27
1 - Nature des sédiments des fonds de l'estuaire. Les vases et leurs propriétés physiques	28
2 - Les apports sédimentaires fluviaux. Charriage et suspension	29
2-1 Les apports de sable par charriage	29
2-2 Les apports de vase et de sables très fins en suspension	29
3 - Les mouvements des sédiments. Influence des coefficients de marée, des débits fluviaux et de la salinité. Évaluation théorique des dépôts	30
3-1 Mouvements des sédiments	30
3-2 Évaluation théorique des dépôts	31
4 - La masse turbide dans l'estuaire de la Loire. Les échanges avec le large	31
4-1 La masse turbide dans l'estuaire	31
4-2 Les échanges avec le large	33
5 - L'évolution des fonds dans l'estuaire avant 1980. Importance de la sédimentation dans le chenal et les zones limitrophes. Évolution des fonds de l'estuaire au cours des 150 dernières années	34
5-1 Évolution des profondeurs dans le chenal de navigation	34
5-2 Les dragages d'entretien du chenal de navigation entre 1976 et 1978 entre Nantes et St-Nazaire	35
5-3 Évolution des profondeurs en dehors du chenal d'accès. Les zones de Lavau et Sud de Bilho	35
• Chapitre III - INFLUENCE DES AMÉNAGEMENTS SUR L'HYDRAULIQUE, LA SALINITÉ ET L'ENVASUREMENT. LE DEVENIR DE L'ESTUAIRE A LA FIN DU SIÈCLE	37
1 - Les modèles utilisés. Les aménagements étudiés	38
1-1 Les modèles utilisés	38
1-2 Les solutions d'aménagements étudiées en modèles réduits	38
2 - Influence des aménagements sur l'hydraulique et la salinité	39
2-1 Marées et lieux géométriques des pleines mers et des basses mers	39
2-2 Vitesses des courants	41
2-3 Salinité	43
3 - Influence des aménagements sur l'ensablement et l'envasement	45
3-1 Comportement du dépôt de produits de dragage sur le Banc de Bilho	45
3-2 Étude de l'envasement du chenal de navigation	45
3-3 Étude de l'envasement des zones limitrophes. Les Bancs de Bilho, de Lavau, de Cordemais. L'expulsion des sédiments en aval de l'estuaire	51
3-4 Importance des dragages d'entretien du chenal de navigation	52
4 - Évolution de l'estuaire à long terme	52
4-1 Influence de l'évolution des fonds sur les phénomènes hydrauliques	52
4-2 Variation des profondeurs au cours du temps avec et sans dragage du chenal de navigation	52
• Chapitre IV - L'UTILISATION DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE POUR CERTAINS AMÉNAGEMENTS INDUSTRIELS ET URBAINS	55

1 - Influence des centrales thermiques	56
1-1 Centrales de Cordemais et de Cheviré.	
1-2 Centrale du Pellerin	56
2 - Prises d'eau douce dans l'estuaire	56
2-1 Alimentation en eau douce des prés-marais de la Baie de Bourgneuf	56
2-2 Création d'une réserve d'eau douce en amont de Nantes	57
3 - Extractions de sable en amont de Nantes	57
4 - Aménagement d'un port de plaisance à Mindin	58
5 - Ponts sur l'estuaire de la Loire	59

Deuxième Partie
LA QUALITÉ DES EAUX
ET LE MILIEU VIVANT DE L'ESTUAIRE
DE LA LOIRE

• INTRODUCTION	63
• Chapitre I - LES REJETS ET LA QUALITÉ DES EAUX DANS L'ESTUAIRE DE LA LOIRE	
1 - Les rejets dans l'estuaire de la Loire	65
1-1 Inventaire et cartographie des rejets	66
1-2 Analyse comparative des flux polluants	69
2 - La qualité des eaux dans l'estuaire de la Loire	71
2-1 Les sels nutritifs	71
2-2 L'oxygène dissous et la DBO ₅	73
2-3 La chlorophylle	75
2-4 Les métaux	75
3 - Conclusions	76
• Chapitre II - LES CARACTÉRISTIQUES DES PEUPELEMENTS PLANCTONIQUES	77
1 - Le phytoplancton	78
1-1 Cycles de variations	78
1-2 Impact de la qualité des eaux	78
2 - Le zooplancton	78
2-1 Cycles de variations	78
2-2 Impact de la qualité des eaux	78
3 - Conclusions	79

• Chapitre III - LES PEUPELEMENTS BENTHIQUES DE L'ESTUAIRE _____	81
1 - Caractéristiques faunistiques des secteurs de l'estuaire interne de la Loire _____	82
1-1 <i>Le secteur oligohalin (D)</i> _____	82
1-2 <i>Le secteur mésohalin (C)</i> _____	82
1-3 <i>Le secteur polyhalin (B)</i> _____	83
2 - Contribution des composantes spécifiques à la richesse des communautés _____	85
2-1 <i>Le secteur de Lavau</i> _____	85
2-2 <i>Le secteur de l'Imperlay</i> _____	85
2-3 <i>Le secteur de Bilho</i> _____	85
3 - Conclusions _____	85
3-1 <i>Conséquences des derniers travaux d'aménagement</i> _____	95
3-2 <i>Bilan de la production benthique</i> _____	86
• Chapitre IV - LES RESSOURCES BENTHO-DÉMERSALES DE L'ESTUAIRE _____	89
1 - Caractéristiques générales des ressources benthodémersales _____	90
1-1 <i>Les ressources benthodémersales inventoriées par pêche planctonique</i> _____	90
1-2 <i>Les ressources benthodémersales inventoriées par pêche à pied</i> _____	91
1-3 <i>Les ressources benthodémersales chalutées : caractéristiques qualitatives et quantitatives, et évolutions spatio-temporelles</i> _____	91
1-4 <i>Conclusions</i> _____	92
2 - Écologie des principales espèces au cours de leurs écophases estuariennes _____	93
2-1 <i>Écologie de la crevette grise</i> _____	93
2-2 <i>Écologie du flet</i> _____	94
2-3 <i>Écologie de la sole</i> _____	95
2-4 <i>Écologie du merlan</i> _____	96
2-5 <i>Écologie du bar</i> _____	97
3 - Bilan des relations trophiques dans l'estuaire de la Loire et conclusions _____	98
3-1 <i>Bilan des relations trophiques</i> _____	98
3-2 <i>Conclusions</i> _____	99

Troisième Partie
LA GESTION DES ZONES HUMIDES
DE LA RIVE NORD DE L'ESTUAIRE
DE LA LOIRE

• INTRODUCTION _____	103
1 - Zones humides : définition _____	103
2 - Structure et caractères physiques des marais de l'estuaire _____	103
2-1 <i>L'origine géologique des marais et de leur environnement humide</i> _____	103
2-2 <i>Le glacis au pied du Sillon de Bretagne : support des marais de la rive nord</i> _____	103

3 - L'originalité des différentes zones des marais estuariens	106
3-1 <i>La rive sud endiguée du Pellerin à Paimbœuf : une gestion des eaux rationalisée autour de l'Achenau et du Ténu</i>	106
3-2 <i>La rive sud à l'aval de Paimbœuf</i>	106
3-3 <i>L'ensemble géré par l'Union des Syndicats des Marais du bassin du Brivet</i>	106
3-4 <i>L'originalité des zones humides de Couëron à Lavau</i>	106
• Chapitre I - LA SIGNIFICATION DES ZONES HUMIDES DANS LE CONTEXTE ESTUARIEN	109
1 - Un milieu naturel dont la conservation est reconnue nécessaire	110
1-1 <i>Les prévisions d'aménagement</i>	110
1-2 <i>Cette position est en conformité étroite avec les incitations des écologistes scientifiques</i>	110
1-3 <i>Le degré d'artificialisation actuelle des marais</i>	110
2 - Un milieu agricole et socio-économique original et vivace	111
2-1 <i>L'individualité agricole des zones humides de la rive nord</i>	111
2-2 <i>Le prestige des prés de Loire</i>	113
2-3 <i>Conclusion : la signification économique et humaine des zones humides</i>	113
• Chapitre II - LA MAITRISE DE L'EAU	115
1 - Le contrôle de la circulation et la gestion des eaux dans les marais	116
1-1 <i>La mise en place des systèmes de circulation</i>	116
1-2 <i>L'organisation physique des réseaux</i>	116
1-3 <i>La maîtrise des mouvements de l'eau</i>	116
1-4 <i>Conclusion : avantages et inconvénients de l'actuelle gestion de l'eau</i>	119
2 - Les caractères physico-chimiques et la qualité des eaux d'échange entre l'estuaire et les marais	119
2-1 <i>Caractéristiques des eaux du chenal fluvial</i>	119
2-2 <i>Le rôle des îles, des anciens bras fluviaux et des étiers à l'aval des écluses</i>	120
2-3 <i>Les caractéristiques des eaux de l'intérieur des marais</i>	121
3 - Qualité des eaux et élevage des bovins	122
3-1 <i>Objectifs</i>	122
3-2 <i>Moyens</i>	122
• Chapitre III - LA COUVERTURE VÉGÉTALE DES ZONES HUMIDES. ÉLEVAGE ET CULTURES DANS LES MARAIS	123
1 - La couverture végétale et l'apport des eaux d'estuaire	124
1-1 <i>Les traits généraux des associations floristiques actuelles</i>	124
1-2 <i>Y a-t'il dans ce complexe une altération des qualités fourragères par rapport au passé ?</i>	124
1-3 <i>Le calendrier des fauchaisons</i>	125
1-4 <i>Conclusion : les eaux de l'estuaire et la mise en valeur des zones humides</i>	126
2 - L'hypothèse de l'assèchement général des marais de la rive Nord	126
2-1 <i>Signification d'une éventuelle poldérisation sous l'angle de l'aménagement physique</i>	126
2-2 <i>L'idée de la généralisation des cultures est sous-jacente à celle de la poldérisation</i>	126
2-3 <i>Pour quelle nouvelle spéculation agricole à introduire dans l'estuaire ?</i>	127
2-4 <i>Conclusion : la poldérisation est un bouleversement profond, physique, économique et humain</i>	127

Quatrième Partie
CONCLUSIONS ET
RECOMMANDATIONS

• Chapitre I - LE BILAN DES CONNAISSANCES	133
1 - L'estuaire en 1983	134
1-1 <i>Caractéristiques hydrosédimentaires</i>	134
1-2 <i>Caractéristiques biologiques</i>	134
1-3 <i>Caractéristiques des zones humides</i>	135
2 - Tendances évolutives	136
2-1 <i>Évolution morphologique et sédimentaire</i>	136
2-2 <i>Conséquences biologiques</i>	136
• Chapitre II - LES RECOMMANDATIONS	137
1 - Aménagements	138
1-1 <i>Les aménagements physiques de l'estuaire</i>	138
1-2 <i>La protection et la mise valeur du milieu</i>	140
2 - Amélioration et contrôle des eaux	140
3 - Études complémentaires	141

ANNEXES

Annexe 1 : . Glossaire des principaux termes scientifiques utilisés dans le rapport. Liste des sigles	145
Annexe 2 : . Liste des contrats d'études et leur financement	149
Annexe 3 : . Liste des études et rapports effectués pour/par le Comité Scientifique pour l'Environnement de l'Estuaire de la Loire. (C.S.E.E.L.)	151

