

THÈSE

présentée

A L'INSTITUT DES SCIENCES DE LA NATURE DE L'UNIVERSITE DE NANTES

par

Mariline DIARA

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR 3ème CYCLE

spécialité : Océanologie

ECHANGES HYDROLOGIQUES ET SEDIMENTOLOGIQUES  
ENTRE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE ET SES ZONES MARGINALES  
(VASIERES - ETIERS - MARAIS)

soutenu le 17 novembre 1983, devant la Commission d'Examen :

M. F. OTTMANN, Professeur, Université de Nantes

Président

M. D. GOULEAU, Chargé de RC (CNRS), Université de Nantes

Rapporteur

M. C. LATOUCHE, Maître de RC (CNRS), Université de Bordeaux

M. M. MEYBECK, Maître-Assistant, ENS Paris

Examineurs

M. J. BOURGOUIN, Ingénieur Général du S.H.O.M.

Président du CSEEL

**T H E S E**

présentée

A L'INSTITUT DES SCIENCES DE LA NATURE DE L'UNIVERSITE DE NANTES

par

**Mariline DIARA**

pour obtenir

**LE TITRE DE DOCTEUR 3ème CYCLE**

spécialité : Océanologie

**ECHANGES HYDROLOGIQUES ET SEDIMENTOLOGIQUES  
ENTRE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE ET SES ZONES MARGINALES  
(VASIERES - ETIERS - MARAIS)**

soutenue le 17 novembre 1983, devant la Commission d'Examen :

M. F. OTTMANN, Professeur, Université de Nantes

Président

M. D. GOULEAU, Chargé de RC (CNRS), Université de Nantes

Rapporteur

M. C. LATOUCHE, Maître de RC (CNRS), Université de Bordeaux

M. M. MEYBECK, Maître-Assistant, ENS Paris

Examineurs

M. J. BOURGOUIN, Ingénieur-Général du S.H.O.M.

Président du CSEEL

Mes remerciements s'adressent à :

Monsieur le Professeur F. OTTMANN qui m'a accueilli dans son laboratoire et m'a permis d'accomplir ce travail dans de très bonnes conditions,

Monsieur D. GOULEAU, Chargé de Recherche au C.N.R.S., qui m'a constamment aidé et conseillé au cours de cette étude, au laboratoire comme sur le terrain,

Messieurs C. LATOUCHE, Maître de Recherche au C.N.R.S., et M. MEYBECK, Maître - Assistant à l'E.N.S. de Paris qui ont accepté de juger cette étude et de participer au Jury,

Monsieur J. BOURGOIN, Ingénieur Général du S.H.O.M. et Président du Comité Scientifique de l'Environnement et de l'Estuaire de la Loire (C.S.E.E.L.) qui a permis le financement de cette étude (1981), et me fait l'honneur de sa présence dans le Jury,

Monsieur J.F. GUILLAUD du C.N.E.X.O., Délégué auprès du C.S.E.E.L., dont les conseils m'ont aidé au cours de ce travail, et qui a facilité le financement en 1982,

la D.G.R.S.T. qui, par l'attribution d'une allocation de recherche, m'a permis de réaliser cette étude.

Je remercie vivement les étudiants et le personnel du laboratoire de Géologie Marine dont j'ai pu apprécier l'aide, tout au long de ce travail.

Mes remerciements à Mme I. TRUQUET du laboratoire de l'I.S.T.P.M. qui m'a initiée et conseillée pour les dosages à "l'Autoanalyser II Technicon".

# SOMMAIRE

CHAPITRE I - Introduction	7
1 - But du travail	9
2 - Cadre géomorphologique	11
3 - Cadre géologique	11
4 - Cadre hydrologique	11
5 - Les étiers et leur marais	14
6 - Le choix du site	18
 CHAPITRE II - Méthodologie	 19
I - Dans le système de Lavau	21
1 - Sur le terrain	21
2 - En laboratoire	24
II - Dans les systèmes de Cordemais et du Dareau	27
1 - Sur le terrain	27
2 - En laboratoire	27
 PREMIERE PARTIE - HYDROLOGIE	 29
CHAPITRE III - Hydrodynamique	31
1 - Terminologie des termes	31
2 - Paramètres intervenant dans l'hydrodynamique des étiers étudiés	31
3 - L'influence de la marée dynamique dans les étiers	41
4 - Bilan hydrodynamique	52
5 - Conclusions	59
 CHAPITRE IV - La température	 63
I - Les variations de température dans le système de Lavau	65
1 - Le cycle tidal	65
2 - Le cycle annuel	65
3 - Evolution des températures à l'intérieur du système	68
II - Les variations de température dans les systèmes de Cordemais et du Dareau	69
III- Conclusions	70
 CHAPITRE V - Le pH	 71
I - Les variations du pH dans le système de Lavau	73
1 - Le cycle tidal	73
2 - Le cycle annuel	73
3 - Evolution du pH dans l'ensemble du système	76
II - Les variations du pH dans les systèmes de Cordemais et du Dareau	77
1 - A Cordemais	77
2 - Au Dareau	77
III- Conclusions	78
 CHAPITRE VI - Les M.E.S.	 79
I - Nature des M.E.S. dans le système de Lavau	81
1 - Fraction fine/fraction grossière	81
2 - Teneurs en carbonates	81
3 - Pertes au feu	81
4 - Les minéraux argileux	81
5 - Conclusions	83
II - Les variations des M.E.S. dans le système de Lavau	84
1 - Le cycle tidal	84
2 - Le bilan sédimentaire saisonnier	89
3 - Bilan érosion - sédimentation dans l'étier	96
4 - Evolution des M.E.S. entre le marais et l'embouchure	98
5 - Conclusions	99
III- Les M.E.S. dans le système de Cordemais et du Dareau	100
1 - A Cordemais	100
2 - Au Dareau	102
IV - Comparaison des trois systèmes	103

CHAPITRE VII - La chlorosité

107

I - La chlorosité dans l'étier et le marais de Lavau .....	107
1 - Le cycle tidal .....	107
2 - Le cycle saisonnier .....	111
3 - Evolution de la chlorosité entre l'embouchure et le marais .....	114
4 - Bilan quantitatif .....	114
5 - Conclusions .....	116
II - Les variations de la chlorosité dans les systèmes de Cordemais et du Dareau .....	117
1 - A Cordemais .....	117
2 - Au Dareau .....	118
III- Comparaisons entre les trois systèmes de Lavau, Cordemais et Dareau .....	119

DEUXIEME PARTIE - LES PARAMETRES BIOCHIMIQUES

CHAPITRE VIII - Les pigments chlorophylliens

121

I - Les pigments chlorophylliens dans le système de Lavau .....	123
1 - Les variations saisonnières .....	123
2 - Facteurs contrôlant la production primaire .....	126
II - Les variations saisonnières des pigments chlorophylliens dans les systèmes de Cordemais et du Dareau .....	126
III - Conclusions .....	127

CHAPITRE IX - L'oxygène dissous

129

I - L'oxygène dissous dans le système de Lavau .....	131
1 - Le cycle tidal .....	134
2 - Le cycle annuel .....	134
3 - Evolution de l'oxygène dissous à l'intérieur du système étier-marais .....	137
4 - Bilan quantitatif de l'oxygène dissous .....	137
5 - Conclusions .....	138
II - L'oxygène dissous dans les systèmes de Cordemais et du Dareau .....	140
1 - A Cordemais .....	140
2 - Au Dareau .....	140
III - Comparaisons entre les trois systèmes .....	141

CHAPITRE X - La silice dissoute

143

I - Variations de la silice dissoute dans le système de Lavau .....	145
1 - Le cycle tidal .....	145
2 - Le cycle annuel .....	147
3 - Evolution de la silice dissoute entre le marais et l'embouchure .....	153
4 - Bilan quantitatif de la silice dissoute .....	153
5 - Conclusions .....	155
II - Variations de la silice dissoute dans les systèmes de Cordemais et du Dareau .....	157
1 - Dans le système de Cordemais .....	157
2 - Dans le système du Dareau .....	157
III - Comparaisons entre les trois étiers et leur marais .....	158

CHAPITRE XI - Les composés azotés

161

I - Les variations des composés azotés dans le système de Lavau .....	163
1 - Cycle tidal des composés azotés .....	163
2 - Cycle annuel des produits azotés à l'embouchure .....	169
3 - Cycle annuel des sels azotés à l'écluse .....	171
4 - Variations saisonnières dans le marais .....	175
5 - Evolution des produits azotés entre l'embouchure et le marais .....	176
6 - Bilan quantitatif de l'azote minéral .....	177
7 - Conclusions .....	181
II - Les variations des sels azotés dans les systèmes de Cordemais et du Dareau .....	184
1 - Variations de l'azote ammoniacal .....	184
2 - Variations des nitrites à Cordemais et au Dareau .....	185
3 - Variations des nitrates à Cordemais et au Dareau .....	185
III - Comparaisons des concentrations en azote minéral des trois systèmes .....	186

CHAPITRE XII - Les phosphates

189

I - Variations des phosphates dans le système de Lavau .....	191
1 - Le cycle tidal .....	191
2 - Le cycle saisonnier .....	195
3 - Evolution des teneurs en phosphates entre le marais et l'embouchure .....	197
4 - Bilan quantitatif des phosphates .....	198
II - Variations des phosphates dans les systèmes de Cordemais et du Dareau .....	200
1 - A Cordemais .....	200
2 - Au Dareau .....	202
III - Comparaisons entre les trois systèmes .....	203
 CONCLUSIONS GENERALES	 205
 Bibliographie	 211
 Liste des figures	 219
 Liste des tableaux	 225

\* \* \* \* \*

## AVANT - PROPOS

Au cours des travaux antérieurs, l'importance des zones marginales de l'estuaire de la Loire était nettement apparue, soulevant le problème des liaisons entre Loire et marais.

Le Laboratoire de Géologie Marine avait donc l'intention d'y consacrer ses recherches. Parallèlement, le problème était étudié à Bordeaux dans l'estuaire de la Gironde par I. Barreau (thèse en cours sous l'autorité de D. Gouleau, Chargé de Recherche au C.N.R.S), ce qui permettra des comparaisons ultérieures.

C'est pourquoi, dans le cadre du Comité Scientifique pour l'Etude de l'Estuaire de la Loire (C.S.E.E.L) présidé par M. l'Ingénieur Général J. Bourgoïn, M. A. Vigarié, responsable du thème " zones humides ", nous confiait une première étude, limitée aux échanges marais - étiers à l'endroit des écluses (contrat C.S.E.E.L. 1981). Très vite, ce sujet apparaissant comme trop limité, vu la fermeture fréquente des écluses, fût étendu aux échanges étiers - estuaires, et soutenu par le contrat C.S.E.E.L. - C.N.E.X.O (1982). Grâce à ces contrats, nous avons pu intensifier les recherches, multiplier les points de prélèvements et les sorties dans les systèmes étudiés. Les étiers choisis, situés sur la rive Nord de l'estuaire interne sont trois systèmes représentatifs de l'évolution des phénomènes estuariens de l'amont vers l'aval, et ont porté préférentiellement sur l'étier de Lavau, le plus aval, le plus accessible, et offrant le maximum d'échanges. De plus, il est sous l'influence " des bras " entre les fles qui en font un système plus complexe où l'influence des roselières se fait mieux sentir.

Afin de mieux comprendre les phénomènes liés à ces cours d'eau, nous avons consacré quelques sorties supplémentaires à l'étier de la Taillée qui se jette dans l'étier de Lavau :

- au mois d'avril 1983, nous avons pu le jauger et estimer ainsi les volumes d'eau y transitant au cours d'une marée,

- au mois de septembre 1983, nous avons prélevé simultanément des échantillons dans les étiers de la Taillée, de Lavau, et en plusieurs points du système pendant un cycle tidal.

L'analyse et l'interprétation des résultats n'ont pu être intégrées à cette thèse, et feront l'objet d'une publication et d'un rapport ultérieurs.

*CHAPITRE I*

*Introduction*



"Un étier est un petit canal qui aboutit à la mer ou à un grand fleuve et qui peut recevoir de petits navires." (le Littré)

Les étiers sont également des canaux qui permettent les échanges hydrologiques, sédimentologiques et biologiques entre la Loire et les marais. Ceux que nous étudions sont fermés par des écluses ou vannages qui limitent l'accès au marais. C'est pourquoi, suivant la définition du Littré, nous conserverons le terme d'étier pour le canal en aval de l'écluse, et le terme de marais pour la zone amont parcourue par des douves et des canaux.

#### 1 - BUT DU TRAVAIL

Après le travail de BOUTELIER P. (1979) qui a étudié le rôle des roselières en Loire, il était nécessaire d'élargir les recherches sur les phénomènes existant entre l'estuaire de la Loire et les systèmes hydrologiques des zones dites "marginales" (marais-vasières-roselières) rendus complexes, dans notre cas, par la présence de vannages (appelés communément écluses) qui limitent les entrées et les sorties d'eau des marais.

Cette étude est donc centrée sur trois étiers et leur marais, situés sur la rive Nord de l'estuaire de la Loire, qui sont, de l'aval vers l'amont (fig I.1) :

- l'étier de Lavau avec le marais du Pré-Neuf et le marais du Syl,
- l'étier de Cordemais avec le marais de la Roche,
- l'étier de Dareau et son marais, près de Couéron.

Ces deux derniers étiers sont l'objet d'observations plus succinctes et essentiellement comparatives

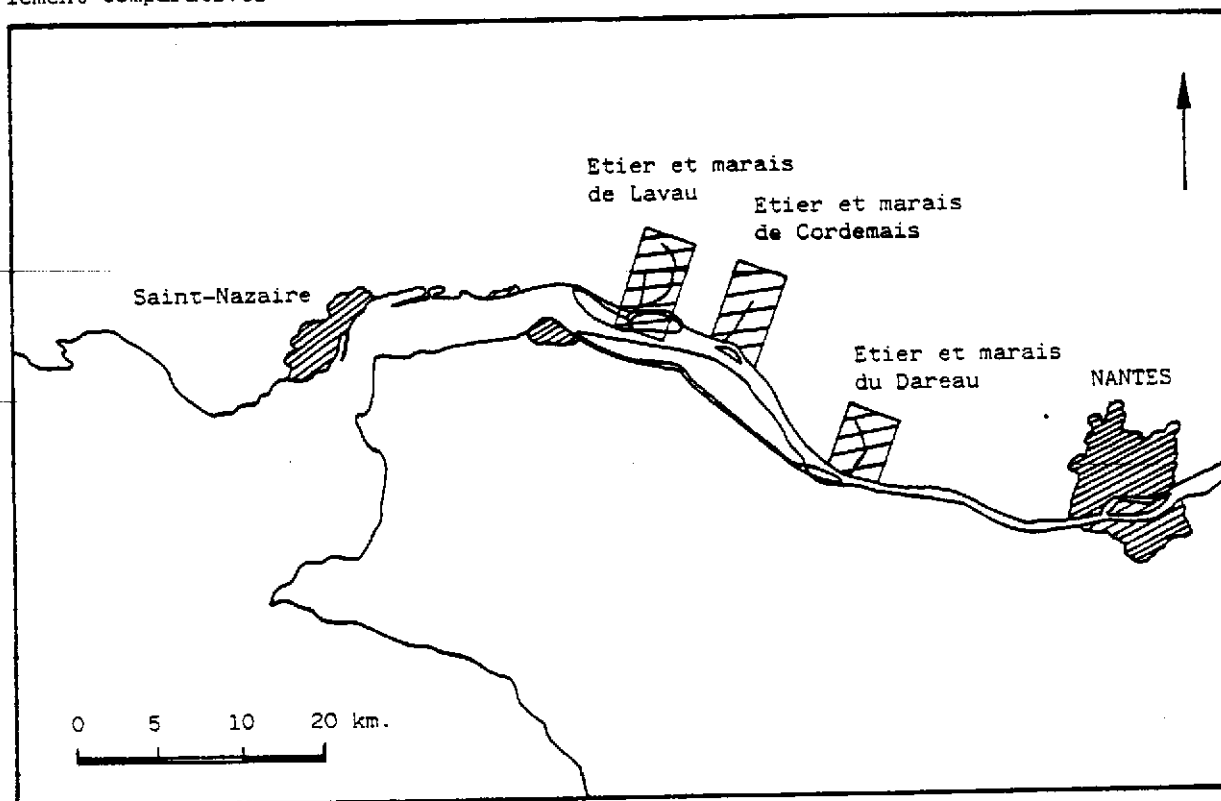


Fig. I.1 - Situation géographique des étiers et des marais dans l'estuaire de la Loire.

Il s'agit, à l'aide de certains paramètres tels que la température, le PH, la turbidité, la salinité, l'oxygène dissous, les sels nutritifs, la chlorophylle, de déterminer les échanges ou apports de la Loire aux marais et des marais à l'estuaire par l'intermédiaire des étiers.

Nous mettrons ainsi en évidence les problèmes spécifiques tels que le rôle des vasières et des cycles microbiologiques sur la qualité des eaux.

## 2 - CADRE GEOMORPHOLOGIQUE

Après avoir traversé Nantes, la Loire franchit le sillon de Bretagne et s'écoule à l'ouest vers la mer. La grande inflexion située entre Donges et Paimboeuf assure une zone de calme sur la rive Nord où s'accumulent les sédiments (BOUETIER P. 1979). Le seuil morphologique majeur entre St Nazaire et Mindin détermine un estuaire externe et un estuaire interne qui se subdivise selon GALENNE B. (1974) en trois zones (fig.I.2) :

- une section "endiguée" de Nantes au canal de la Martinière où l'on note actuellement l'absence d'îles et de vasières,
- une section "intermédiaire" de la Martinière à Paimboeuf. C'est dans cette zone que se situent les grands ensembles marécageux : les îles et les nombreux bras morts de la Basse Loire,
- une zone dite de "transition" de Paimboeuf à St Nazaire, où le chenal subit diverses inflexions dues à l'influence structurale armoricaine et à la présence de bancs de sable.

Les trois étiers étudiés se situent sur la rive droite de la Loire, dans l'estuaire interne en amont de Donges. L'étier de Lavau est à huit kilomètres environ en amont de Donges dans la zone de "transition", l'étier de Cordemais à sept kilomètres en amont de Lavau dans la zone "intermédiaire", et l'étier du Dareau près de Couëron à huit kilomètres en amont de Cordemais et à douze kilomètres en aval de Nantes dans la zone "endiguée" (cf. fig I.1)

## 3 - CADRE GEOLOGIQUE

Dans la zone étudiée, la Loire traverse des formations métamorphiques et granitiques de Bretagne méridionale.

Le remplissage sédimentaire est constitué essentiellement de graviers et de sables de base pouvant atteindre huit mètres d'épaisseur au-dessus d'un bed-rock situé à environ -37 mètres C.M dans l'axe du paléolite de la Loire (BITEAU F., 1978). Une nappe de sable fait suite aux graviers et sables de base, un niveau de vase molle termine le remplissage (fig I.3 - I.4). Les étiers étudiés sont creusés dans ces vases molles, récentes, de surface.

## 4 - CADRE HYDROLOGIQUE

L'hydrologie des trois étiers dépend essentiellement de celle de l'estuaire, mais également des ruisseaux provenant du Sillon de Bretagne et des précipitations locales.

L'estuaire interne est sous l'influence de la marée dynamique et saline (jusqu'à Couëron pour des débits moyens). Par conséquent, les trois étiers subiront également ces deux phénomènes mais de façon diverse (cf. fig I.2).

Les courbes de marée sont dissymétriques et montrent une durée réduite pour le flot de cinq heures, et une prolongation du jusant un peu plus de sept heures (GALENNE B., 1974). La pénétration de la marée saline est fonction du débit de la Loire et des coefficients de marée qui jouent un rôle prépondérant dans l'hydrodynamique des étiers. Comme le souligne LE DOUAREC P. (1978), la Loire est un fleuve très irrégulier caractérisé par des étiages et des crues d'amplitudes très variables, c'est pourquoi le débit fluvial est un paramètre plus important que le coefficient de marée.

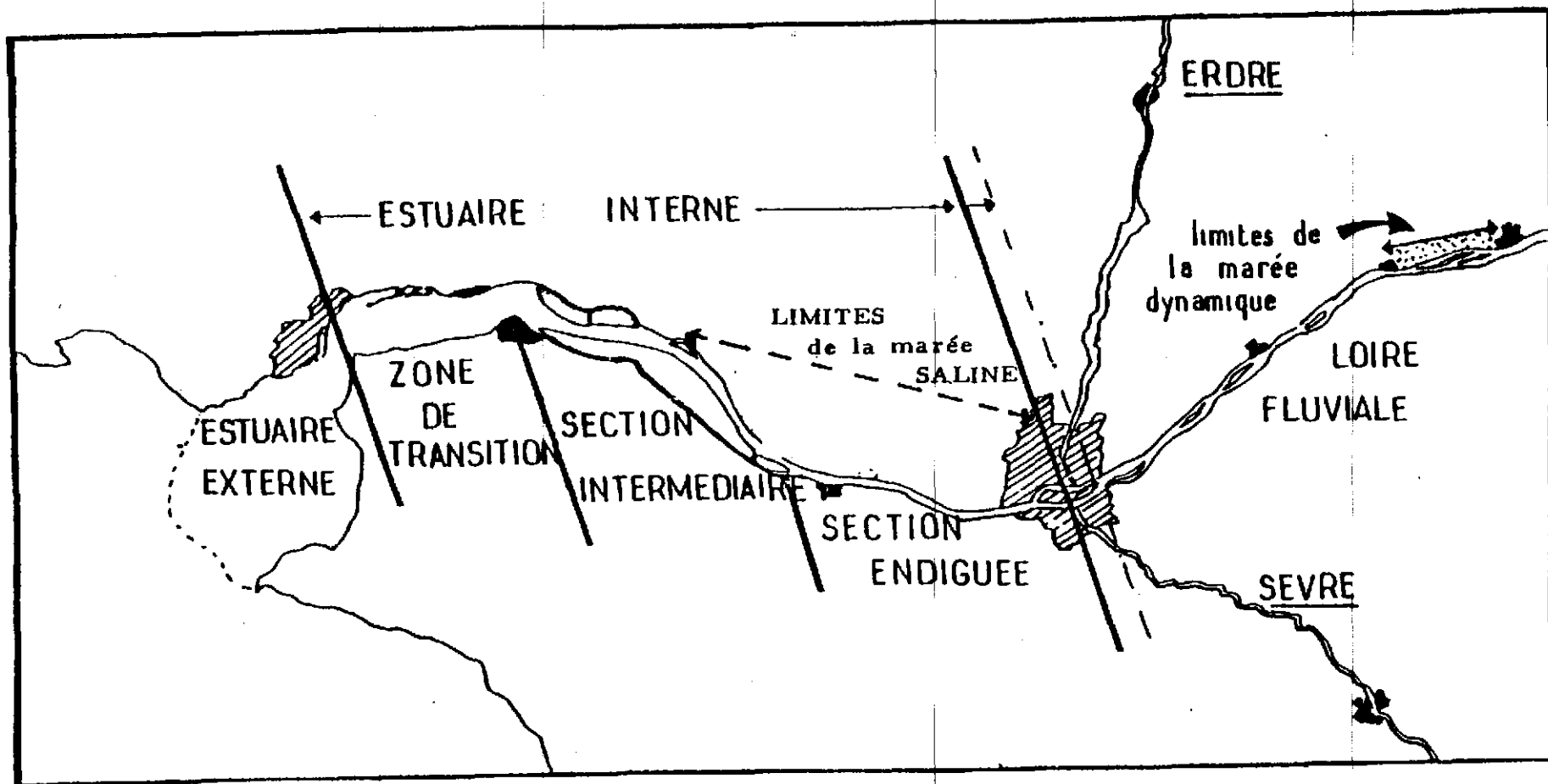


Fig. 1.2 - Frontières et subdivision de la Loire maritime.

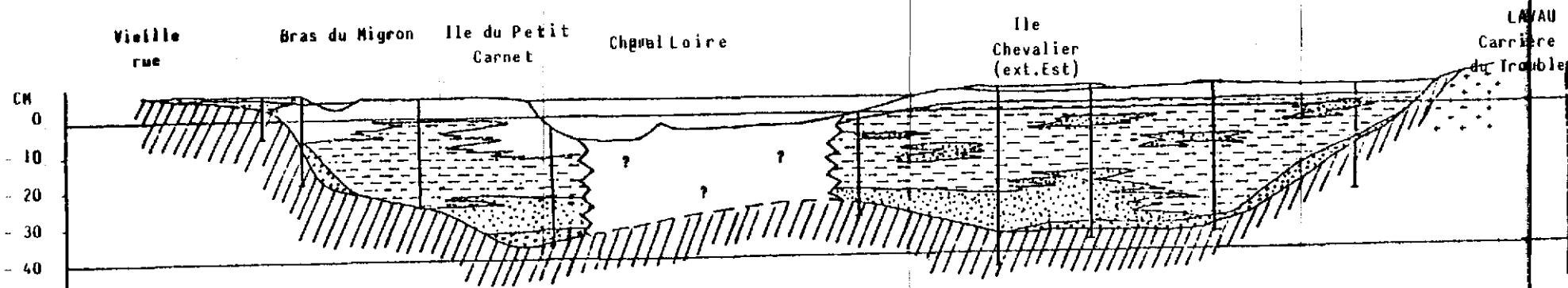


Fig. 1.3 - Coupe synthétique transversale à l'Ouest de Lavau-sur-Loire (d'après F. Biteau, 1978).

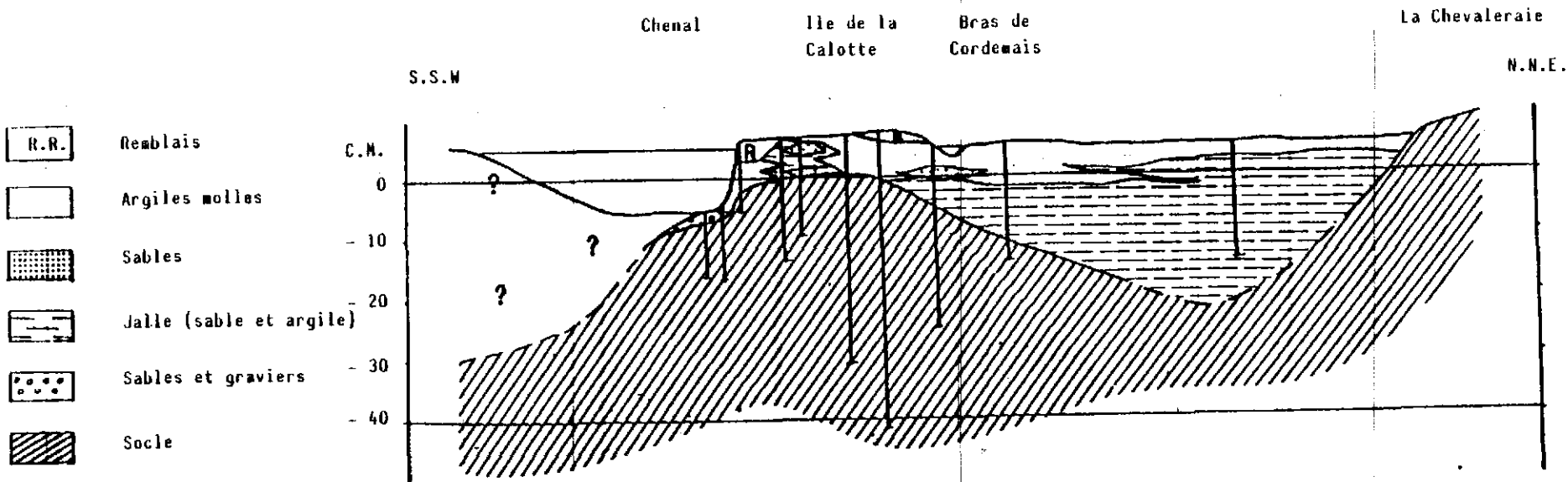


Fig. 1.4 - Coupe transversale de l'Ile de Cordemais (d'après F. Biteau, 1978).



## 5 - LES ETIERS ET LEUR MARAIS

GRAS J. (1983) distingue deux systèmes d'étiérs et marais le long de la rive Nord de l'estuaire, caractérisés par une organisation :

- de type longitudinal, de l'étiér du Dureau à l'étiér de la Peille en aval (fig I.5),
- de type transversal, de l'étiér du Port à l'étiér de la Taillée, incluant les étiérs de Cordemais et de Lavau (fig I.6).

Le système longitudinal regroupe des étiérs dont la disposition générale est parallèle à la Loire, avec des marais dépendants les uns des autres, tandis que le système transversal correspond à des étiérs perpendiculaires à la Loire avec des marais isolés géographiquement, et par conséquent indépendants les uns des autres.

### 5.1 - ETIER ET MARAIS DE LAVAU

L'étiér de Lavau situé à trente cinq kilomètres en aval de Nantes appartient au type transversal. Du Sillon de Bretagne, à soixante mètres d'altitude, s'écoulent dans le bassin versant de trente huit kilomètres carrés, 4 ruisseaux qui se jettent dans les différents canaux du marais de Lavau, constitué en fait par ceux du Pré-Neuf et du Syl. Le marais du Pré-Neuf, d'une superficie de 0,69 kilomètre carré est traversé du Nord au Sud par le canal de Lavau, celui du Syl d'une superficie de 4,9 kilomètres carrés déverse ses eaux dans le canal du Syl. Ils confluent l'un vers l'autre à trois cent mètres en amont de l'écluse de Lavau. A 1,250 kilomètre en aval de cette écluse l'étiér de la Taillée rejoint l'étiér de Lavau qui se jette dans la Loire à 2,350 kilomètres du vannage.

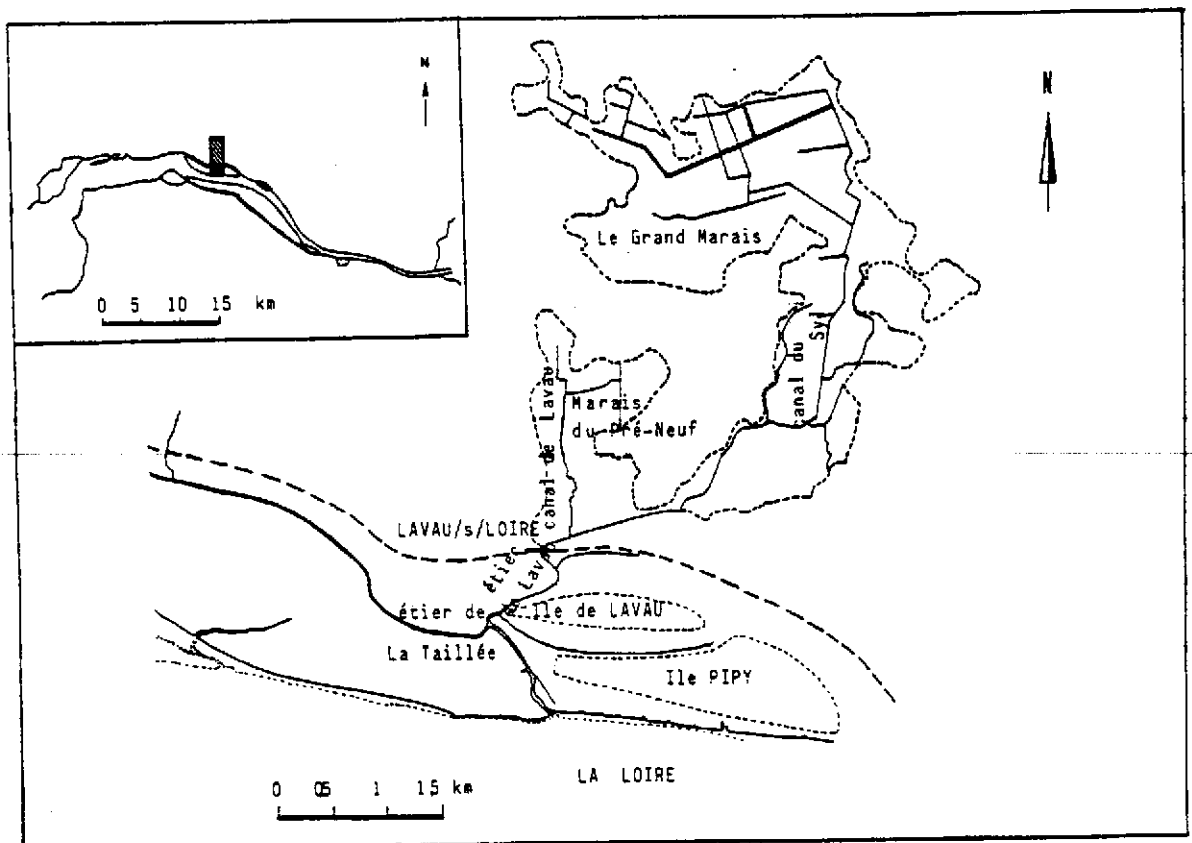


Fig. I. 7 - Etier et marais de Lavau.

Un vannage, improprement appelé "écluse", sépare l'ensemble hydraulique en deux zones :

- à l'aval, l'étier allant de la vanne à l'estuaire sans aucune obstruction,
- à l'amont, un système de canaux drainant le marais. A l'intérieur du marais une deuxième "écluse" isole le marais du Syl.

### 5.2 - ETIER ET MARAIS DE CORDEMAIS (fig I.8)

L'étier de Cordemais, situé à vingt huit kilomètres en aval de Nantes, appartient également au type transversal. Quatre ruisseaux s'écoulent du Sillon de Bretagne dans le bassin versant de 36 km<sup>2</sup> et rejoignent le marais de la Roche (3,34 km<sup>2</sup>). L'étier de Cordemais se jette dans le bras de Cordemais après un parcours de 1,5 km.

Le marais de la Roche est isolé de l'étier de Cordemais par un vannage électrique.

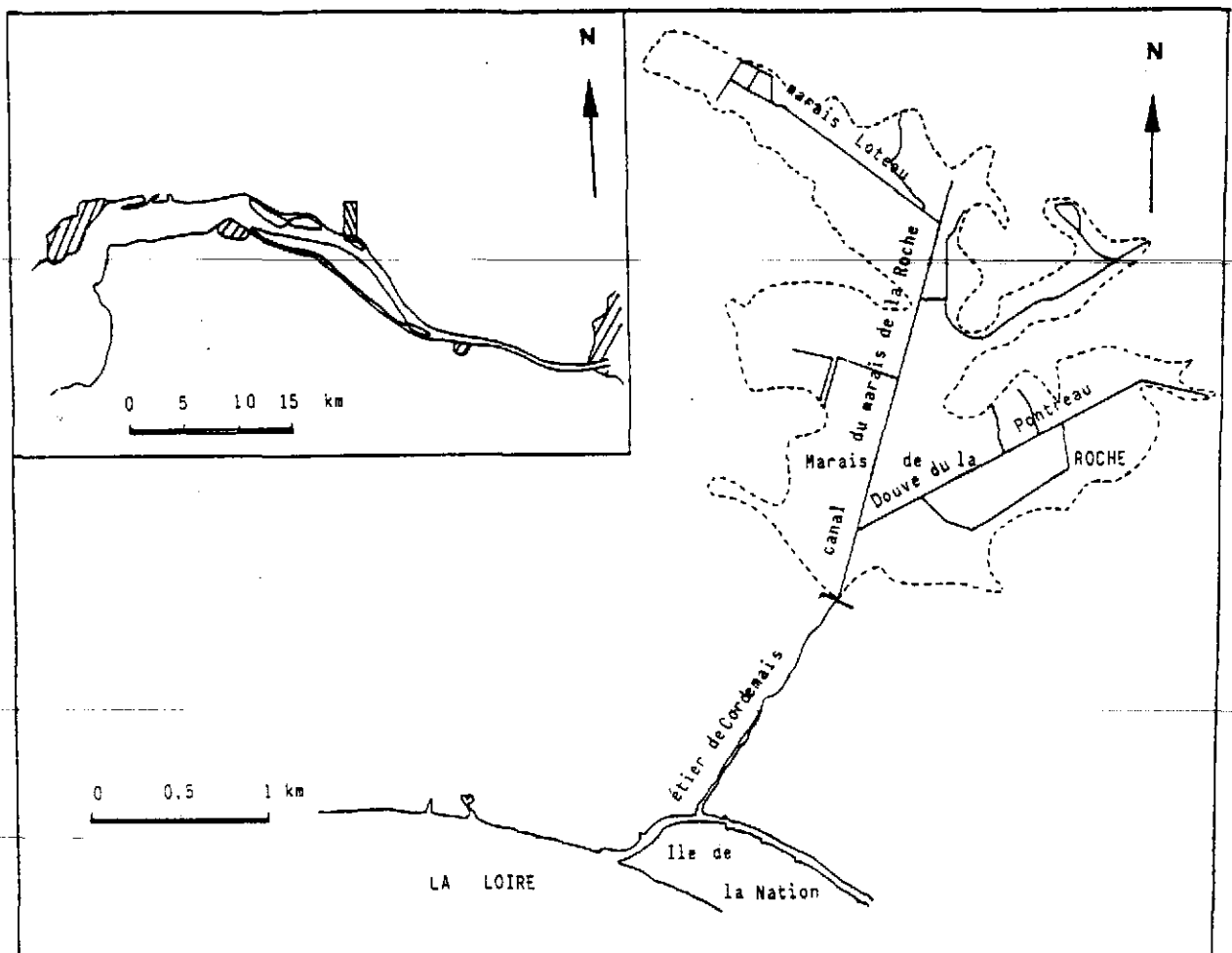


Fig. I.8 - Etier et marais de Cordemais

### 5.3 - ETIER ET MARAIS DU DAREAU (fig. I.9)

L'étier du Dareau situé près de Couëron à un douzaine de km en aval de Nantes appartient au type longitudinal, et il est donc dépendant des marais voisins. Il est par conséquent impossible de déterminer son propre bassin versant et délicat de donner des limites au marais. Les observations faites sur le terrain ont tout de même permis de délimiter sa surface à 6,8 km<sup>2</sup> environ. L'étier du Dareau, qui permet les échanges entre le marais et la Loire, s'écoule sur une longueur de 1,6 km avant de se jeter dans l'estuaire.

La circulation des eaux dans le marais est très bien résumée sur la fig I.10 par GRAS J., malgré la présence de nombreuses vannes qui rend plus complexes les mouvements de l'eau.

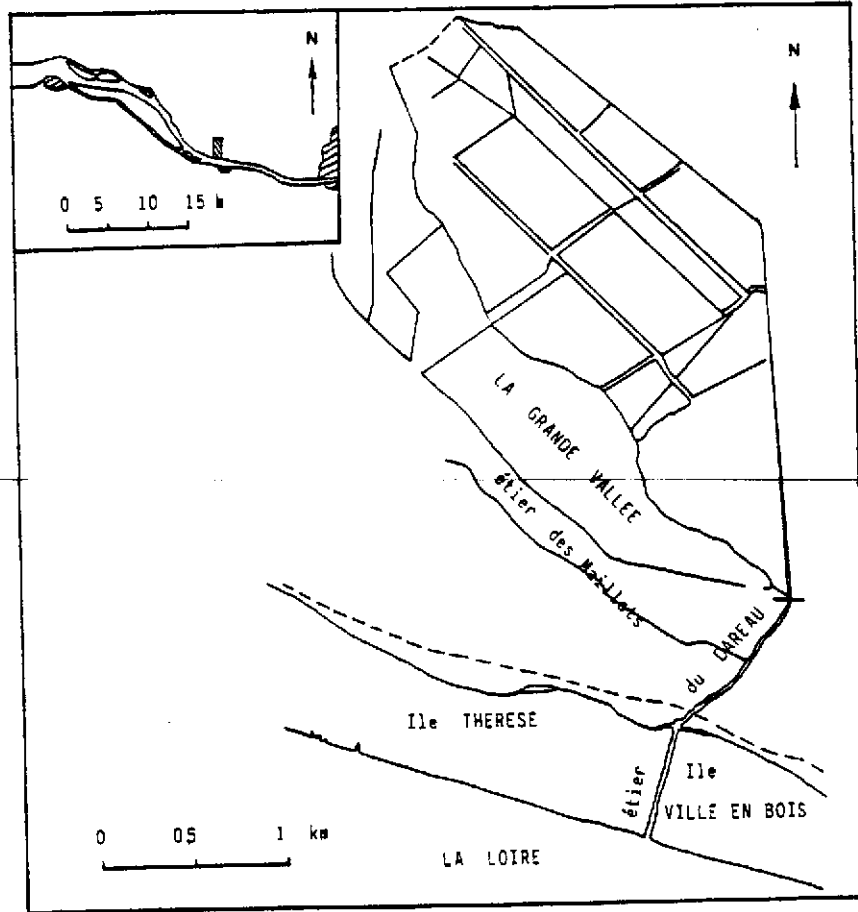


Fig. I.9 - Etier et marais du Dareau.

### 5.4 - LE ROLE DES VANNES

Les vannes servent à contrôler le niveau d'eau dans le marais en la retenant ou en l'évacuant selon les besoins. En règle générale, les écluses sont ouvertes pendant toute la durée du jusant du mois de Septembre au mois de Mai ou Juin; elles sont fermées pendant le flot au cours de cette même période.

En été, lorsque le niveau d'eau du marais est jugé trop bas par les exploitants, l'éclusier ouvre les vannes pendant la marée montante afin de permettre la pénétration de l'eau de la Loire dans le marais : c'est ce que l'on appelle un "envoi de marée". Les vannes sont refermées à la fin de la marée montante.

Malgré un effort d'organisation de la part des éclusiers, la fermeture des vannes est avant tout empirique et parfois aléatoire, ce qui complique beaucoup les études.



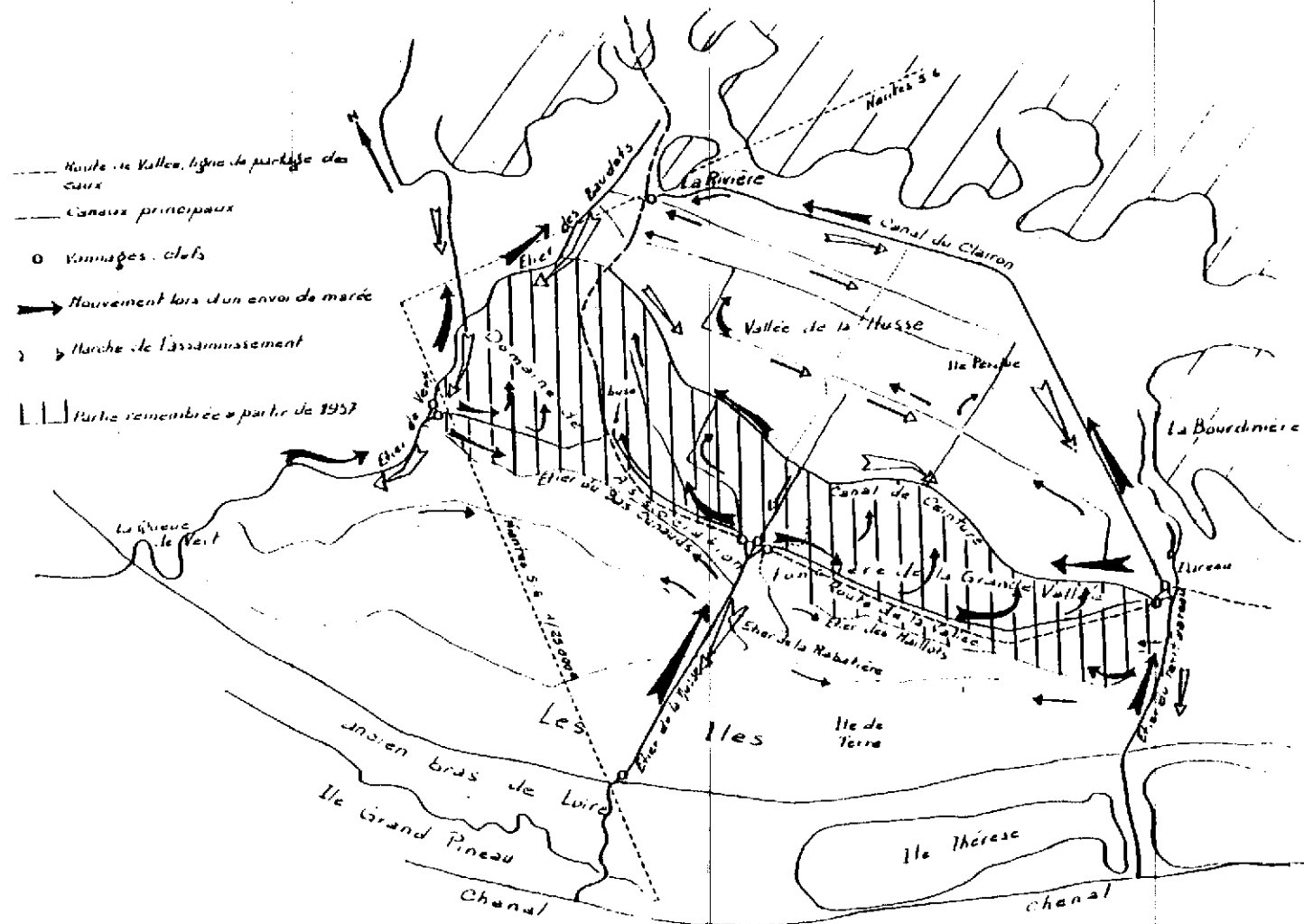


Fig. I. 10 - La circulation des eaux entre Vert et Dareau  
(d'après J. Gras, 1983)

## 5 - LE CHOIX DU SITE

L'étude porte sur trois étiers, mais celui de Lavau et ses marais ont fait l'objet d'observations plus approfondies pour les raisons suivantes :

- La navigabilité : en effet, pour étudier correctement les échanges hydrologiques, il nous a semblé indispensable de pouvoir descendre l'étier jusqu'à son embouchure, or seul l'étier de Lavau le permettait.

- La position au sein de l'estuaire : l'étier de Lavau, situé le plus en aval, est plus sujet aux interactions océan-fleuve. L'étier du Dareau, à la limite de la marée saline, nous intéressait beaucoup moins, quant à l'étier de Cordemais, très proche de la centrale EDF et par conséquent perturbé par les rejets de celle-ci, correspondait moins à nos recherches en milieu naturel, non modifié.

- La structure géographique des marais : les marais de Lavau et de Cordemais, comme nous l'avons vu précédemment, sont bien délimités alors que le marais du Dareau est difficile à individualiser.

Par conséquent, notre choix s'est porté sur le système de Lavau et le nombre de prélèvements est de très loin supérieur à celui des autres systèmes (cf. Chapitre II, méthodologie).

\* \* \* \* \*

*CHAPITRE II*

*Méthodologie*

## I - DANS LE SYSTEME DE LAVAU

### 1 - SUR LE TERRAIN

#### 1.1 - POSITION DES PRELEVEMENTS ET PERIODICITE DES MESURES (fig II.1)

Des prélèvements mensuels ont eu lieu de Janvier 1982 à Avril 1983, avec une sortie supplémentaire pour le jaugeage de l'étier à l'écluse et à l'embouchure.

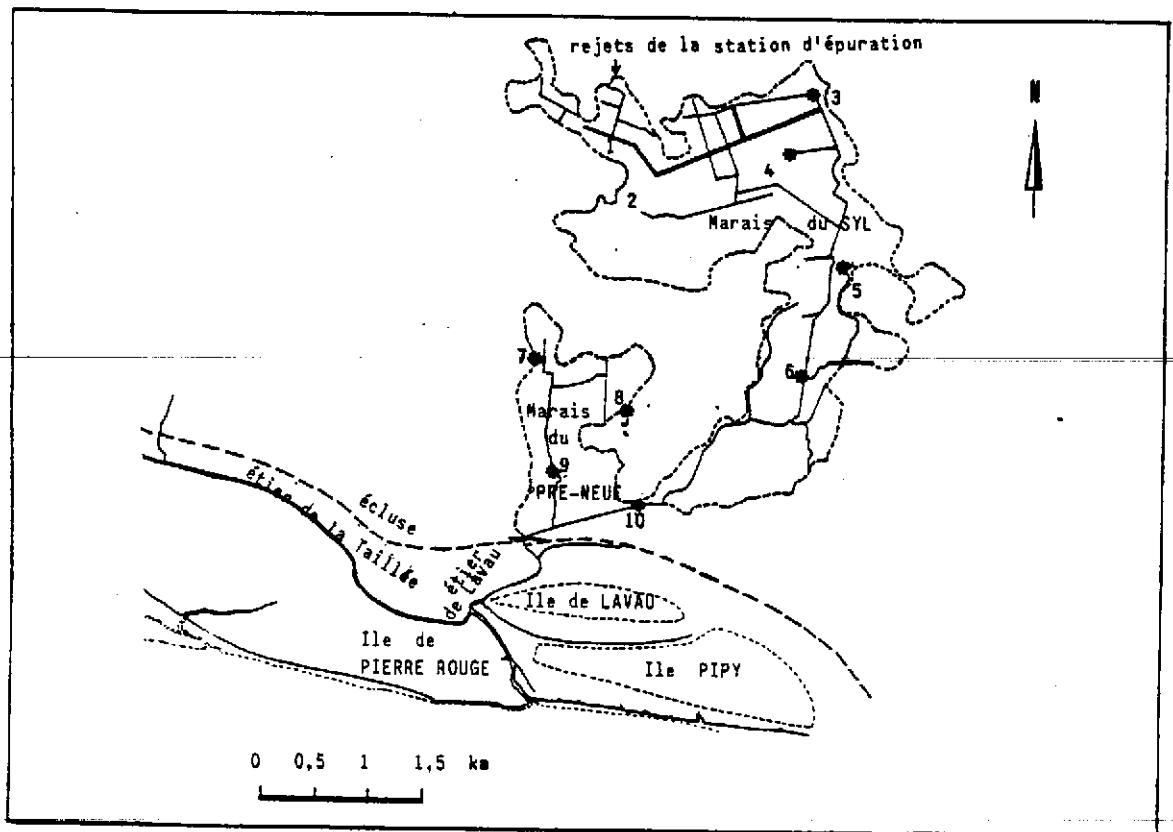


Fig. II.1 - Position des prélèvements dans le système de Lavau.

#### - A L'embouchure de l'étier

Nous avons fait des prélèvements horaires, au fond et en surface pour les différents paramètres étudiés, et de plus nous avons réalisé une coupe verticale en sept points répartis sur toute la hauteur d'eau pour les matières en suspension et la chlorosité, pendant un cycle de marée

#### - A la confluence des étiers de Lavau et de la Taillée

Des prélèvements ont eu lieu toutes les heures pendant le flot au fond, en surface et en sept points répartis sur la verticale.

Une sortie a eu lieu le 28.04.83 pour le jaugeage des étiers de Lavau et de la Taillée légèrement en amont de la confluence afin de connaître les apports de l'étier de la Taillée dans l'étier de Lavau.

- A l'écluse

Les prélèvements ont été effectués toutes les heures pendant un cycle de marée, à l'aval de l'écluse, au fond et en surface lorsqu'il y avait assez d'eau (l'étier étant parfois à sec en été).

- Dans le marais

Les prélèvements sont répartis en dix points. Ils ont été faits au cours de l'après-midi à raison d'un suivi tous les mois, de Mai à Septembre 1982, ainsi qu'en Décembre 1982 et Janvier 1983.

Du fait de la faible profondeur des douves et des canaux (souvent inférieurs à 50 cm), seuls des prélèvements de surface ont été réalisés.

1.2 - MATERIEL DE TRANSPORT UTILISE

Nous disposons pour cette étude de :

- une vedette type "Artaban" (7m-55CV) qui permet d'effectuer des stations de treize heures à l'embouchure de l'étier. Elle est positionnée dans l'axe du chenal grâce à trois ancres,

- un zodiac puis un new-matic (Moteur Yamaha-9,5CV) utilisés pour remonter à la confluence des étiers de la Taillée et de Lavau, toutes les heures pendant le flot,

- une camionnette J9 qui reste stationnée quinze heures à l'écluse, et sert de laboratoire,

- une voiture personnelle qui permet d'effectuer les prélèvements dans le marais.

1.3 - METHODE DE PRELEVEMENTS

1.3.1 - A l'embouchure

-Prélèvements pour les M.E.S. et les Chlorures:

les échantillons sont prélevés à différents niveaux de la tranche d'eau grâce à la perche conçue par Gouleau D. et modifiée par Boutelier P. (fig. II.2).

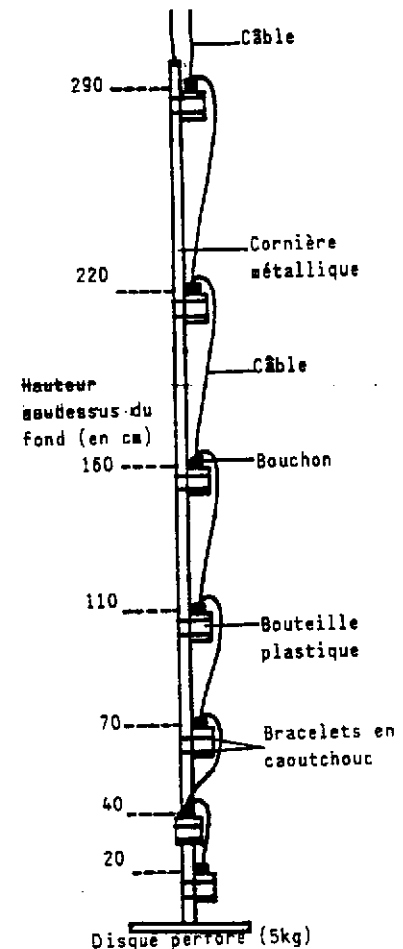


Fig. II.2 - Perche de prélèvement d'eau (d'après Gouleau D., 1975)

D'autre part, nous prélevons 30 litres d'eau à BM et 30 litres à PM pour étudier la nature des matières en suspension.

- Pour les autres paramètres analysés, les prélèvements de surface sont faits à l'aide d'un seau, et les prélèvements de fond avec une bouteille horizontale "OTTMANN".

#### - oxygène dissous

Nous laissons l'eau décanter pour éviter que les matières en suspension trop importants ne masquent le virage lors du dosage. Nous prélevons 250 cm<sup>3</sup> de cette eau dans une bouteille brune, à l'aide d'un petit tuyau simple pour éviter toute formation de bulle d'oxygène. Nous fixons le prélèvement selon la méthode de WINKLER (KI, Mn Cl<sub>2</sub>, NaOH).

#### - nutriments

Pour obtenir les résultats les plus exacts possibles, nous filtrons les échantillons sur le terrain, au moyen d'appareils Sartorius (fig II.3) qui permettent de filtrer des volumes de 250 cc.

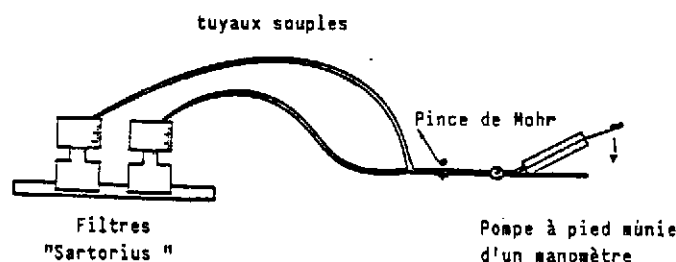


Fig. II.3 - Schéma de montage des appareils "Sartorius" sur le terrain.

méthode de filtration : après avoir laissé l'eau décanter, nous recueillons le surnageant et le passons sur un filtre de 0,45 µm grâce à la pression donnée par une pompe à pied et contrôlée par un manomètre. Ces échantillons, ainsi filtrés, sont gardés au frais pendant la journée.

#### - La chlorophylle

Grâce aux appareils Sartorius, nous pouvons filtrer immédiatement une quantité d'un litre en opérant quatre fois. L'eau est filtrée sur des préfiltres que l'on conserve ensuite dans un tube en verre dans lequel nous avons préalablement mis quelques cm<sup>3</sup> d'acétone pur à 90 %. Les filtres introduits dans les tubes sont isolés de la lumière grâce à du papier aluminium, et mis au frais.

#### - Les mesures de vitesses de courants

Elles sont faites dans le chenal de l'étier à partir de la vedette avec un courantomètre "Eckmann" ou un modèle NBA à lecture directe.

#### - Les mesures in situ

Nous mesurons la température de l'eau grâce à un thermomètre à mercure, et le PH de l'eau grâce à un PH mètre "Knick" à sonde.

#### 1.3.2 - A la confluence des étiers de la Taillée et de Lavau

Les prélèvements sont faits de manière identique à ceux de l'embouchure mais seulement pendant le flot pour des raisons de navigation.

### 1.3.3 - A l'écluse

- Pour les prélèvements en surface nous utilisons un seau.

- Pour les prélèvements de fond nous employons une pompe péristaltique qui nous permet de recueillir l'eau à l'aide d'un tuyau passant dans une canne à pêche (fig. II.4).

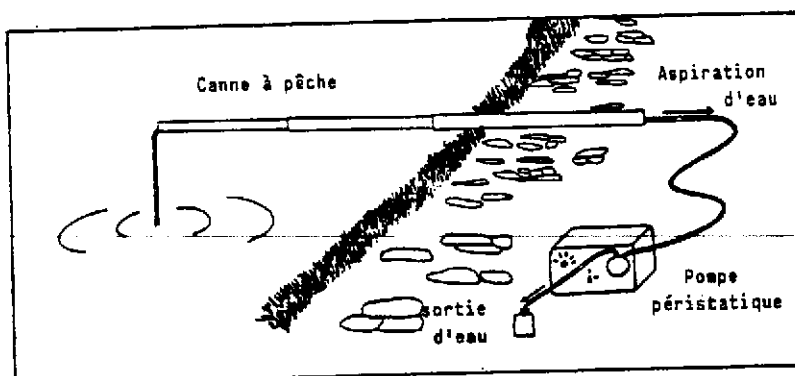


Fig. II.4 - Montage de la canne à pêche et de la pompe péristaltique sur le terrain.

Les échantillons sont ensuite traités de la même manière qu'à l'embouchure, dans la camionnette J9 transformée en laboratoire de terrain.

- Prélèvements pour le Carbone organique particulaire :

- des prélèvements de surface sont faits toutes les heures pour étudier le carbone organique particulaire (C.O.P). Les échantillons sont filtrés dans le J9,

- méthode de filtration : un certain volume d'eau est filtré grâce à un système en verre Sartorius sur un filtre Whatman GF/C en fibres de verre préalablement grillé à 450° C pendant une heure et pesé. Les filtres sont ensuite disposés, à l'aide de pince, chacun dans une petite boîte en plastique afin d'éviter toute contamination.

- Les mesures de température et de PH sont faites in situ. Les mesures de courant quand elles sont possibles (écluse ouverte) sont effectués grâce à une petite bouée que nous laissons dériver sur une distance connue.

### 1.3.4 - Dans le marais

Les prélèvements sont effectués grâce à un seau de la même manière qu'à l'écluse en surface.

## 2 - EN LABORATOIRE

### 2.1 - LES MATIERES EN SUSPENSION

#### 2.1.1 - Les teneurs en M.E.S

Les teneurs en M.E.S en g/l sont obtenues en filtrant une certaine quantité d'eau connue sur des filtres de mailles de 0,45 µm, préalablement séchés et pesés. Le filtre est séché à l'étuve à 50° C pendant douze heures et pesé. Nous en déduisons le poids des M.E.S retenues. Connaissant le volume initial de la prise d'essai et le poids correspondant, nous calculons la teneur en M.E.S exprimée en g/l.

#### 2.2.2 - Nature des M.E.S

- La fraction fine et la fraction grossière sont séparées grâce à un tamis de 45 µm. La fraction supérieure à 45 µm est la fraction grossière. La fraction inférieure à 45 µm est la fraction fine.

- Détermination des argiles :

L'étude aux rayons X sur la fraction fine permet la détermination des argiles. L'appareil utilisé en laboratoire est un "Siemens Kristalloflex" (Puissance 100 KV).

Les minéraux argileux sont déterminés d'après la méthode de LUCAS J. (1962) et LATOUCHE C.L (1968) à partir des échantillons naturels.

- Les matières organiques

La quantité de matière organique végétale dans la fraction fine est déterminée grâce à la perte au feu à 450° C, les hydroxydes et complexes divers grâce à la perte au feu à 900° C.

- Les carbonates

Pour le dosage des carbonates, nous utilisons la calcimètre DIETRICH-SHEIBLER. On attaque 2 g de FF (fraction fine) par 1 ml de HCL 1/2, et on déduit la quantité de CO<sub>3</sub>Cx détruite du volume de CO<sub>2</sub> dégagé pendant l'attaque.

2.2 - LES CHLORURES

Nous dosons les ions Cl<sup>-</sup> par la méthode de MOHR-KNUDSEN qui consiste à précipiter les halogénures par une solution de nitrate d'argent N/10 en présence de chromate de potassium à 5 %. L'étalonnage est fait avec de l'eau de mer (l'eau de Copenhague); Les résultats sont exprimés en g/l.

2.3 - L'OXYGENE DISSOUS

Les dosages sont faits à l'aide de la méthode titrimétrique de WINKLER, les échantillons ayant été préalablement fixés au chlorure de manganèse et à la potasse iodurée.

2.4 - LES SELS NUTRITIFS

La silice dissoute, les nitrates, les nitrites et les phosphates sont dosés au Technicon à l'Institut scientifique et technique des pêches maritimes (I.S.T.P.M.).

L'ammoniaque est dosé grâce à la méthode de SOLORZANO L. (1969). Après oxydation de l'ammoniaque on obtient du bleu d'indophénol. La mesure de la densité optique s'effectue au colorimètre à 630 nm. Les résultats sont exprimés en µatg/l pour les différents sels nutritifs.

2.5 - LA CHLOROPHYLLE

Nous utilisons la méthode de LORENZEN C.J (1967) pour doser les pigments chlorophylliens. On mesure au spectrophotomètre la densité optique à 665 nm avant et après acidification. Les résultats sont exprimés en µg/l.

2.6 - LE CARBONE ORGANIQUE PARTICULAIRE

Nous utilisons la méthode ANNE améliorée par ETCHEBER H. (1981). Les résultats sont exprimés en mg/l.



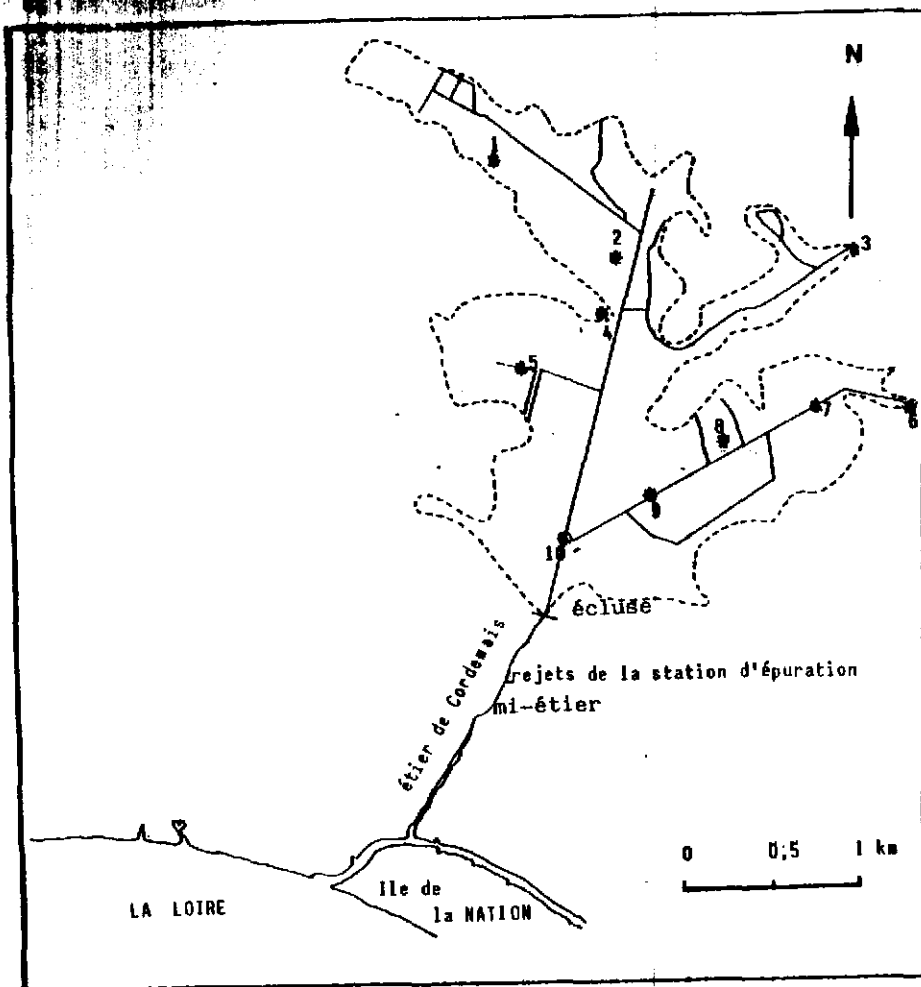


Fig. II.5 - Position des prélèvements dans le système de Cordemais.

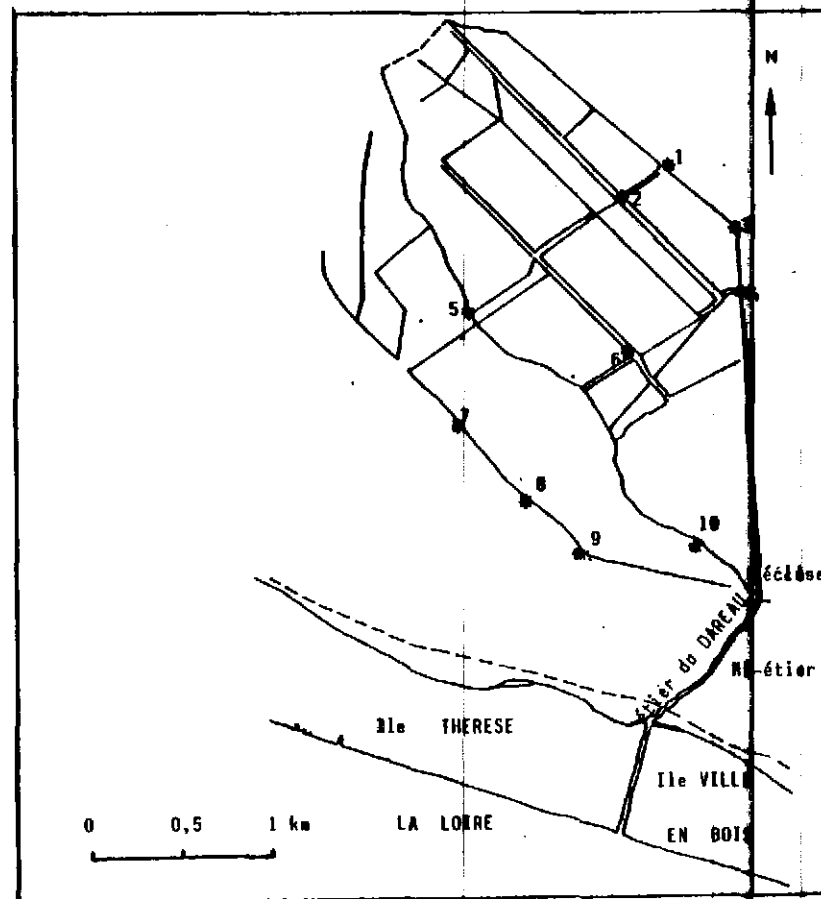


Fig. II.6 - Position des prélèvements dans le système du Dareau.

## II - DANS LES SYSTEMES DE CORDEMAIS ET DU DAREAU

### 1 - SUR LE TERRAIN

#### 1.1 - POSITION DES PRELEVEMENTS ET PERIODICITE DES MESURES

Les prélèvements sont répartis de la même façon et avec la même périodicité dans les deux systèmes (fig II.5 - II.6).

- Au milieu de l'étier (les prélèvements étant impossibles à l'embouchure à cause des difficultés d'accès).

Les mesures ont été faites toutes les heures au fond et en surface pendant un cycle de marée, au cours de trois sorties dont deux en été et une en hiver :

	2.08.82		23.06.82
à Cordemais	8.09.82	au Dareau	6.09.82
	24.02.83		3.02.83

- A l'écluse, les prélèvements ont eu lieu toutes les heures pendant un cycle de marée au fond et en surface pour 3 mois d'hiver et 2 mois d'été :

	15.01.82		27.01.82
	12.02.82		8.02.82
à Cordemais	2.08.82	au Dareau	23.06.82
	8.09.82		6.09.82
	24.02.83		3.02.83

- Dans le marais, dix points de prélèvement ont été choisis dans le marais à raison de deux sorties durant l'été 1982, et une sortie en février 1983 :

	2.08.82		23.06.82
à Cordemais	8.09.82	au Dareau	6.09.82
	24.02.83		3.02.83

#### 1.2. - MATERIEL DE TRANSPORT UTILISE

- Le J9 reste stationné à l'écluse.

- Une voiture personnelle permet de faire les prélèvements à mi-étier et dans le marais.

#### 1.3 - METHODE DE PRELEVEMENTS

##### 1.3.1 - Dans l'étier

Les prélèvements sont faits de la même façon qu'à l'écluse de Lavau avec la pompe péristatique et la canne à pêche ainsi qu'avec un seau.

##### 1.3.2 - Dans le marais

Les prélèvements sont effectués grâce à un seau.

### 2.- EN LABORATOIRE

Pour les M.E.S., les chlorures, la chlorophylle, nous utilisons les mêmes méthodes que pour les échantillons de Lavau. Les dosages de l'oxygène dissous et des sels nutritifs (Si (OH)<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>) sont effectués au laboratoire départemental d'hygiène de Nantes (L.D.H.) selon les normes de l'Association Française de Normalisation (A.F.N.O.R) et de Communautés européennes (1980).

*PREMIERE PARTIE - HYDROLOGIE*

*CHAPITRE III*

*Hydrodynamique*

## 1 - DEFINITION DES TERMES

L'ambiguïté des termes concernant les différentes étapes d'un cycle de marée nous conduit à donner ici les définitions des termes que nous utiliserons tout au long de ce travail.

La marée, dans l'estuaire de la Loire, est de type semi-diurne, et un cycle de marée dure 12h25mn. Celui-ci est composé d'une marée montante et d'une marée descendante.

Le courant résultant de l'ascension de l'eau est le flot, alors que le jusant accompagne le reflux des eaux vers la mer. L'instant où les courants s'annulent est appelée la renverse, et l'étale correspond au moment où l'eau ne monte ni ne baisse.

Pour des raisons de commodité, nous évoquerons toujours le jusant ou le flot lorsqu'il s'agit de la période du jusant ou du flot qui correspond au temps écoulé entre deux renverses de courant, et non pas seulement au courant lui-même.

## 2 - PARAMETRES INTERVENANT DANS L'HYDRODYNAMIQUE DES ETIERS ETUDIES

L'hydrodynamique des trois systèmes étier-marais dépend des différentes masses d'eau s'y déplaçant et des vannages qui régulent les entrées et sorties d'eau.

### 2.1 - LES DIFFERENTES MASSES D'EAU

#### 2.1.1 - Les ruisseaux

Les ruisseaux qui s'écoulent du Sillon de Bretagne dépendent directement des précipitations que nous verrons ultérieurement. Quatre ruisseaux descendent dans les deux marais du Pré-Neuf et du Syl, quatre également se jettent dans le marais de la Roche et deux ruisseaux rejoignent le marais du Dareau.

#### 2.1.2 - Les rejets des stations d'épuration

##### 2.1.2.1 - dans le système de Lavau

- La station d'épuration de Savenay, avec boues activées, rejette les eaux traitées dans un ruisseau au Nord-Est du marais du Syl près du point de prélèvement 1 (cf. Chapitre méthodologie).

Avant juillet 1982, elle était prévue pour 3500 équivalents-habitants et ne devait pas dépasser 525 m<sup>3</sup>. Agrandie depuis pour 7000 équivalents-habitants, elle ne doit pas, théoriquement, dépasser 1050 m<sup>3</sup>/jour. D'après la courbe des débits (fig. III.1), tracée depuis janvier 1979 jusqu'à décembre 1982, nous constatons que cette valeur est largement dépassée : en hiver, la quantité d'eau rejetée peut être trois fois supérieure à la valeur théorique admise.

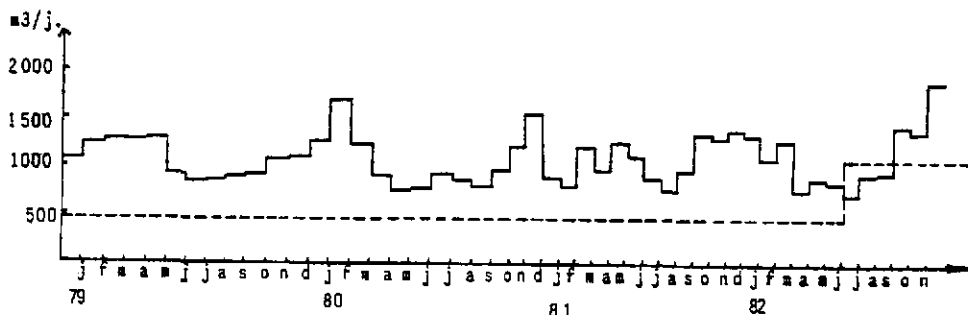


Fig. III.1 - Débits de la station d'épuration de Savenay.

L'apport d'eau par cette station d'épuration est toujours beaucoup plus élevée en hiver qu'en été.

- La station d'épuration de Lavau S/LOIRE est située près d'un nouveau lotissement ; le rejet des eaux se fait à 10 m environ en aval de la vanne. Elle emploie le système de lagunage simple.

~~Cette station ne fonctionne que depuis la fin 1981, aussi aucun bilan n'a été~~  
encore fait.

Elle est prévue pour 220 équivalents-habitants soit 33 m<sup>3</sup>/jour de rejets ce qui est peu significatif pour l'étier.

2.1.2.2 - dans le système de Cordemais

- La station d'épuration de Cordemais, à boues activées, est située près du terrain de sport. Les rejets se font dans l'étier de Cordemais à 1 km environ en aval de l'écluse.

Conçue pour 600 équivalents-habitants, elle devrait donc rejeter 90 m<sup>3</sup>/jour.

D'après la courbe de débit tracée de janvier 1979 à décembre 1982 (fig III.2), nous nous apercevons là aussi que le débit est généralement très au-dessus de la valeur prévue : en Octobre 1982, nous atteignons un débit de 320 m<sup>3</sup>/jour. C'est en été que les débits sont les plus faibles, de l'ordre de 100 m<sup>3</sup>/jour.

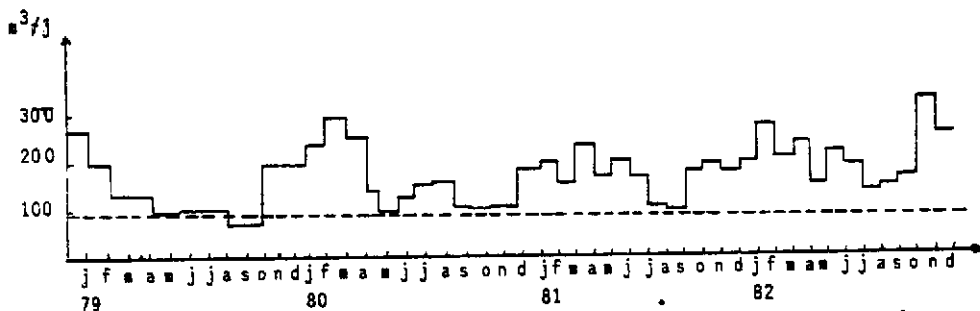


Fig. III.2 - Débits de la station d'épuration de Cordemais.

2.1.2.3 - dans le système du Dareau

- Aucune station d'épuration ne rejette ses eaux dans le système du Dareau.

2.1.2.4 - conclusion

La station d'épuration de Savenay a une influence sur la région Nord-Est du marais du Syl où aboutissent ses eaux. Le marais à cet endroit joue le rôle de lagune de finition. Les rejets de la station d'épuration de Cordemais, effectués dans l'étier à l'aval de l'écluse modifient la qualité des eaux de l'étier.

2.1.3 - Les précipitations

Elles jouent un rôle très important dans l'hydrodynamique des systèmes étudiés car elles alimentent les marais pendant la majeure partie de l'année et commandent l'ouverture ou la fermeture des vannes en fonction du besoin d'eau dans les marais.

- Les précipitations à Lavau

Nous adoptons pour Lavau les données pluviométriques de Savenay résumées sur le tableau III.1. Nous notons un total de précipitations de 1082 mm pour l'année 1982, année relativement humide (825 mm en moyenne). Les précipitations maximales eurent lieu en Octobre (176 mm), Novembre (157 mm), Décembre (151 mm), alors qu'en Janvier elles n'étaient que de 112 mm pour l'année 1982 et de 40 mm pour l'année 1983. Le mois le plus sec est avril 1982 (8 mm).

Connaissant la pluviométrie à Savenay, nous calculons le volume d'eau précipitée sur le bassin versant de l'étier de Lavau. Les résultats sont exprimés dans le tableau III.2.

- Les précipitations à Cordemais

Nous adoptons également pour Cordemais les données pluviométriques de Savenay résumées sur le tableau III.1.

Le tableau III.3 donne les volumes d'eau dus aux pluies pour le bassin versant de Cordemais.

MOIS PRECIPITATIONS en mm	1982												1983				
	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avril	
1ère Décade	77,70	4,60	29,60	7,90	34,70	5,60	0	25,20	5,10	81,90	80,00	59,90	18,90	10,00	0	93,7	
2e Décade	14,80	31,30	29,40	0	5,70	42,00	36,80	9,00	8,80	59,50	37,10	78,50	7,10	0	8,4	16,7	
3e Décade	19,30	27,30	9,10	0	24,90	42,50	34,30	2,60	68,70	34,80	40,30	12,80	14,20	42,90	19,1	47,8	
Total mensuel	111,80	63,20	68,10	7,90	65,30	90,10	71,10	36,80	82,60	176,20	157,40	151,20	40,20	52,90	27,5	156,2	
Moyennes journalières (par mois)	3,60	2,26	2,20	0,26	2,11	3,00	2,29	1,19	2,75	5,87	5,08	4,88	1,30	1,89	0,89	5,27	
Moyennes journalières	1e Décade	7,77	0,46	2,96	0,79	3,47	0,56	0	2,52	0,51	8,19	8,00	5,89	1,89	1,00	0	9,37
	2e Décade	1,48	3,13	2,94	0	0,57	4,20	3,68	0,90	0,88	5,95	3,71	7,85	0,71	0	0,84	1,67
	3e Décade	1,75	3,41	0,83	0	2,26	4,25	3,12	0,24	6,87	3,16	4,03	1,16	1,29	5,36	1,74	4,78

Tableau III.1 - Précipitations à Savenay.

Mois Volumen d'eau en m <sup>3</sup>	Janvier 1982	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Janvier 1983	Février	Mars	Avril
Total mensuel	4248.10 <sup>3</sup>	2401.10 <sup>3</sup>	2588.10 <sup>3</sup>	300.10 <sup>3</sup>	2481.10 <sup>3</sup>	3424.10 <sup>3</sup>	2702.10 <sup>3</sup>	1388.10 <sup>3</sup>	3139.10 <sup>3</sup>	6696.10 <sup>3</sup>	5981.10 <sup>3</sup>	5746.10 <sup>3</sup>	1528.10 <sup>3</sup>	2010.10 <sup>3</sup>	1045.10 <sup>3</sup>	6018.10 <sup>3</sup>
Moyennes journalières ( par mois )	137.000	86.000	83.000	10.000	80.000	114.000	87.000	45.000	105.000	216.000	199.000	185.000	49.000	72.000	34.000	200.000

Tableau III.2 - Volumes d'eau de précipitation dans le bassin versant de Lavau.

Mois Volumen d'eau en m <sup>3</sup>	Janvier 1982	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Janvier 1983	Février	Mars	Avril
Total mensuel	4025.10 <sup>3</sup>	2275.10 <sup>3</sup>	2452.10 <sup>3</sup>	284.10 <sup>3</sup>	2351.10 <sup>3</sup>	3244.10 <sup>3</sup>	2560.10 <sup>3</sup>	1925.10 <sup>3</sup>	2974.10 <sup>3</sup>	6343.10 <sup>3</sup>	5663.10 <sup>3</sup>	5443.10 <sup>3</sup>	1447.10 <sup>3</sup>	1904.10 <sup>3</sup>	990.10 <sup>3</sup>	5095.10 <sup>3</sup>
Moyennes journalières ( par mois )	130.000	81.000	79.200	9.360	75.960	108.000	82.440	62.840	99.000	211.230	18.288	175.680	46.800	68.040	32.000	160.000

Tableau III.3 - Volumes d'eau de précipitation dans le bassin versant de Cordemais.

- Les précipitations au Dareau

Nous avons choisi les précipitations données par la station du Pellerin bien qu'elle soit située au Sud de la Loire. Elles sont transcrites dans le tableau III.4.

Mois Précipitations en mm.	Décembre 1981	Janvier 1982	Février 1982	Juin 1982	Septembre 1982	Février 1983
Total mensuel	140,1	86,00	43,7	75,9	62,9	35,9
Moyennes journalières (par mois)	4,52	2,77	1,56	2,53	2,10	1,28

Tableau III.4 - Les précipitations au Pellerin.

L'impossibilité de délimiter un bassin versant pour l'étier du Dareau, nous a empêché de calculer les volumes d'eau engendrés par les pluies.

- Remarque

Les volumes d'eaux précipitées sur les bassins versants ne correspondent pas aux volumes d'eaux écoulées dans l'étier, en effet de nombreux paramètres interviennent et modifient l'écoulement des eaux :

- la nature du sol, qui peut être plus ou moins perméable,
- l'ensoleillement et l'évaporation,
- la saturation du sol,
- la végétation et l'évapotranspiration végétale,
- la pente du terrain...

Tous ces facteurs sont autant d'obstacles pour le calcul exact du volume d'eau écoulé dans l'étier. N'étant pas en possession des différents paramètres, nous ne pouvons faire d'estimation quant à la quantité d'eau arrivant dans l'étier grâce aux précipitations.

2.1.4 - Les eaux estuariennes

Elles sont, de par leur volume, les plus importantes dans les étiers. Sous l'effet de la marée, elles pénètrent deux fois par jour dans les étiers, avec des volumes variant selon les coefficients de marée et le débit de la Loire.

- Les coefficients de marée

Les études ont toujours été effectuées lors de coefficients de vives-eaux et quelquefois lors de marée moyenne, pour les étiers de Lavau et du Dareau. A Cordemais, les prélèvements ont eu lieu lors de coefficients de mortes-eaux ou de marée moyenne.

- Les débits de la Loire

Les débits de la Loire sont très variables au cours de l'année, mais d'après BARRIERE F. (1970) le débit moyen de la Loire sur cent ans, d'après la cote à Montjean, est de  $825 \text{ m}^3/\text{s}$ . MANICKAM S. (1982) a établi, pour la période allant de Mai 1981 à Juillet 1982, la moyenne mensuelle des débits en Loire, qui est de  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ .



## 2.2 - LES VANNAGES

### 2.2.1 - Description

Nous ne présenterons que les vannages importants qui séparent les marais des étiers et sont souvent appelés improprement écluses.

#### - A Lavau

Il existe deux vannages dans le système de Lavau :

- un vannage situé dans le "port " de Lavau, commun aux canaux des marais du Pré-Neuf et du Syl (photo 1),

- un vannage situé sur la D. 90 ferme le marais du Syl.

Ces deux "écluses" métalliques sont électrifiées. Sur la paroi métallique, 2 clapets à bascule s'ouvrent sous la pression de l'eau à marée descendante et se ferment à marée montante. Toutefois, ils peuvent être bloqués par des tiges métalliques et suppriment ainsi toute communication entre marais et etier.

#### - A Cordemais

Un vannage identique à celui de Lavau sépare le marais de la Roche de l'étier de Cordemais.

#### - Au Dareau

Il s'agit d'une véritable écluse (photos 2 et 3), pouvant laisser passer les barques, constituée de quatre portes en bois :

- deux portes tournées vers l'amont,
- deux portes tournées vers l'aval.

La fermeture des portes se fait automatiquement sous la poussée de l'eau. Pour laisser passer l'eau dans un sens ou dans l'autre il faut ouvrir les portes à l'aide de chaînes enroulées sur un treuil.

### 2.2.2 - Ouverture et fermeture des vannes

Les vannes servent à préserver les marais des irrégularités de la Loire et permettent de maintenir le niveau d'eau souhaité dans ces marais. Les ouvertures et les fermetures des vannes se font en fonction des précipitations, de la marée et des exigences des exploitants ; elles sont donc empiriques et souvent imprévisibles.

#### - A Lavau

En règle générale, du mois d'Octobre au mois de Mai, l'évacuation des eaux se fait, en jusan, par l'intermédiaire des clapets et quelques fois par l'ouverture totale de la vanne lorsque le niveau d'eau devient trop élevé dans le marais pour certains usages. De Décembre à Janvier, le marais saturé d'eau, et même souvent inondé, montre que l'évacuation est insuffisante. De Mai à Septembre, les ouvertures et fermetures des vannes sont plus complexes.

En période sèche, lorsque les précipitations sont insuffisantes, le niveau d'eau baisse dans le marais et l'éclusier ouvre alors la vanne pendant le flot pour réaliser "les envois de marées". Ils ont lieu généralement lors des marées de vives-eaux et leur durée est irrégulière.

Souvent pendant l'été, les vannes restent complètement fermées, supprimant ainsi tout échange entre l'étier et le marais.

#### - A Cordemais et au Dareau

Dans les systèmes du Cordemais et du Dareau, les ouvertures et fermetures des vannes se font de la même façon qu'à Lavau bien que les envois de marée ne commencent pas avant le mois de Juin.

Les trois systèmes étudiés étant indépendants les uns des autres, les envois de marée ne se font pas simultanément et dépendent des conditions locales.

PLANCHE 1

Photo 1 - " Ecluse " de LAVAU électrifiée,  
constituée d'une paroi métallique et de deux  
clapets s'ouvrant sous la pression de l'eau  
vers l'étier.

Photo 2 - " Ecluse " du DAREAU (vue générale),  
constituée de quatre portes en bois, s'ouvrant  
et se fermant sous la pression de l'eau.

Photo 3 - " Ecluse " du DAREAU (vue de détail).  
Les deux portes tournées vers l'aval sont  
fermées, empêchant l'eau de pénétrer dans  
le marais à marée montante.

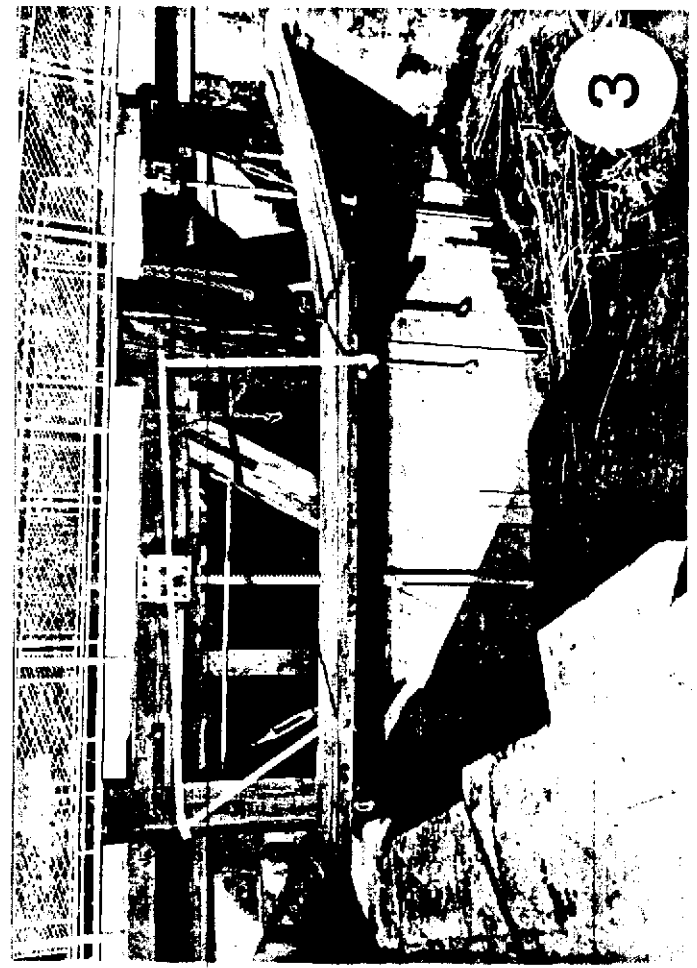
2



1



3



### 3 - L'INFLUENCE DE LA MARÉE DYNAMIQUE DANS LES ETIERS

#### 3.1- L'ETIER DE LAVAU

Le très grand nombre d'observations réalisées pendant plus d'un an en trois points de l'étier ont permis d'étudier les mécanismes de pénétration de la marée, ce qui n'a pu se faire de façon aussi complète dans les autres étiers. Ainsi l'étier de Lavau nous servira de référence.

##### 3.1.1 - L'onde de marée et sa propagation dans l'étier

###### 3.1.1.1 - la dissymétrie de l'onde de marée

L'onde de marée est dissymétrique dans l'estuaire sous l'effet des apports fluviaux. La pénétration dans l'étier accentue cette dissymétrie dès l'embouchure et l'augmente encore en amont.

A l'écluse comme à l'embouchure, la durée du flot est irrégulière (fig III.3) mais elle est toujours inférieure à 5h00.

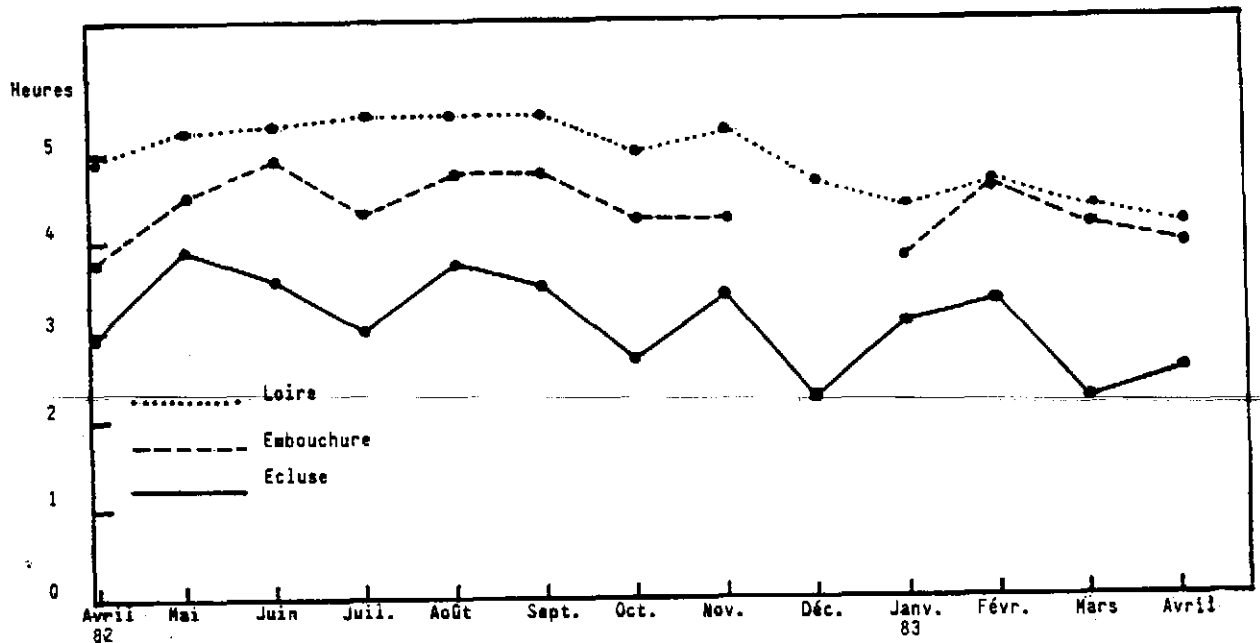


Fig. III.3 - Durée du flot

La durée du flot mesurée à l'écluse est inférieure de 35 mn à 1h40 à celle observée à l'embouchure. Elle est plus longue en été qu'en hiver car une grande partie de l'eau du marais, évacuée pendant le jusant, s'oppose à la remontée dans l'étier des eaux de l'estuaire pendant le début du flot. La Taillée qui se jette dans l'étier de Lavau à marée descendante intensifie ce processus.

Nous avons calculé la durée du flot en Loire, à hauteur de l'étier de Lavau et nous constatons là aussi une prolongation du flot pour les mois d'étiage d'environ 15 mn (cf. fig III.3).

###### 3.1.1.2 - le décalage horaire

Le décalage horaire des renverses entre "l'écluse" et l'embouchure est plus marqué à la renverse de BM (environ 1h30) qu'à celle de PM (0h30 environ) (fig III.4). Ceci résulte de la diminution de la durée du flot à mesure que l'on remonte vers l'amont.

Durant les mois de Juin à Octobre, nous observons une diminution très nette de l'écart des renverses de PM entre "l'écluse" et l'embouchure.

DATES	EMBOUCHURE					ECLUSE		
	Coeff.	Débits de la Loire <sup>3</sup> en m <sup>3</sup> /s	Niveau à B.N. en m.	Niveau à P.N. en m.	Marnage en m.	Niveau à B.N. en m.	Niveau à P.N. en m.	Marnage en m.
28.04.82	74	525	0,40	4,70	4,30	0,00	2,00	2,00
24.05.82	104	400	0,80	5,00	4,20	0,60	2,70	2,10
25.06.82	81	282	0,50	4,50	4,00	0,00	2,30	2,30
22.07.82	99	135	0,20	4,30	4,10	0,00	2,50	2,50
20.08.82	103	145	0,10	5,00	4,90	0,90	2,70	1,80
17.09.82	101	124	0,30	5,00	4,70	0,10	2,70	2,60
19.10.82	90	790	0,70	6,00	5,30	0,30	2,80	2,50
15.11.82	90	825	0,70	6,00	5,30	0,40	2,50	2,10
16.12.82	78	3620				0,80	2,80	2,00
18.01.83	71	1480	0,90	4,80	3,90	0,20	2,80	2,60
15.02.83	85	1460	0,40	6,30	5,90	0,10	2,30	2,20
17.03.83	92	1170	0,70	6,00	5,30	0,20	2,40	2,20
14.04.83	97	5060	1,10	5,70	4,60	0,40	2,70	2,30

Tableau III.5 - Amplitudes de la marée à l'embouchure et à l'écluse.

DATES	Coeff.	Débit de la Loire <sup>3</sup> en m <sup>3</sup> /s	Courant maximum	
			En Jusant en m/s.	en Flot en m/s.
29.03.82	96-90	1060		0,36
28.04.82	82-74	525		0,58
24.05.82	105-104	400	1,82	0,54
25.06.82	86-81	282	0,51	0,50
21.07.82	99-99	135	0,74	0,71
20.08.82	102-103	145	1,25	0,61
17.09.82	97-101	124	0,87	0,59
19.10.82	94-90	790	1,00	0,67
15.11.82	89-90	825	0,65	0,90
18.01.83	73-71	1480	0,56	0,45
15.02.83	85-85	1460	0,59	0,32
17.03.83	93-92	1170	0,73	0,57
14.04.83	96-97	5060	0,55	0,45

Tableau III.6 - Les courants maximaux de surface à l'embouchure.

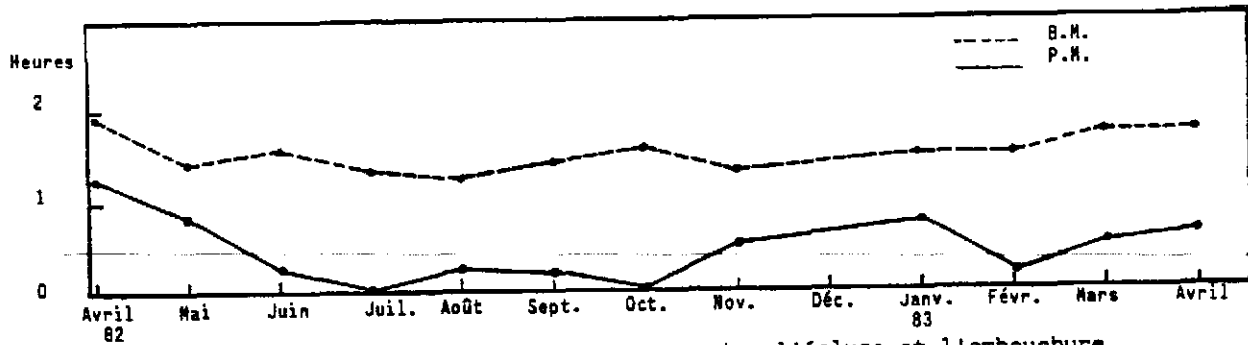


Fig. III.4 - Décalage des renverses entre l'écluse et l'embouchure.

### 3.1.1.3 - l'amplitude de marée (photos 4,5,6 et 7)

A l'embouchure, le marnage varie entre 3,90 et 5,90 m (tableau III.5). Il dépend du coefficient de marée et des débits en Loire. Nous remarquons, en effet, qu'il est plus faible en période d'étiage et pour les coefficients de marée moyenne, lors de nos observations.

A l'écluse, par contre, il varie de 1,80 m à 2,50 m suivant d'autres facteurs (tableau III.5) : le marnage dépend avant tout de l'ouverture et de la fermeture de la vanne. En jusant, la fermeture de l'écluse entraîne une augmentation du marnage puisque le niveau de BM est alors égal à zéro ou presque ; à PM, la hauteur d'eau varie en fonction du coefficient de la marée et du débit de la Loire.

### 3.1.1.4 - les courants de marée

Les marées engendrent des courants qui accompagnent les mouvements d'eau avec un décalage dans le temps (fig III.5). Celui-ci se traduit à marée basse par un gonflement des eaux à l'embouchure de l'étier, pouvant atteindre 1 m sous l'action de l'écoulement des eaux des différents bras de Loire et des étiers entre les îles Lavau, Pipy-et-Chevalier.

L'élévation du niveau de l'eau, en fin de jusant, est encore nette à la confluence de la Taillée et de l'étier de Lavau. Elle est par contre très atténuée ou inexistante à l'écluse, à cause du marnage plus faible ou de l'absence d'eau en été.

- A l'embouchure, les vitesses de courant sont maximales en fin de jusant environ 5 à 6 heures après l'étale de flot, et en flot dès la 1ère ou la 2ème heure après l'étale de jusant, ce qui entraîne une remontée d'eau plus rapide en début de flot que la baisse de niveau en jusant.

Les vitesses maximales de courants (tableau III.6) et la durée du jusant, supérieure à celle du flot, donnent au jusant un rôle prépondérant par rapport au flot, rôle renforcé pendant la période hivernale par l'ouverture de l'écluse de Lavau et celle de la Taillée pendant la marée descendante.

Les courbes (fig III.6) mettent en évidence l'influence des coefficients de marée sur les courants de fin de jusant, tandis que les maxima des flots varient peu au cours de l'année.

Les vitesses de courants au fond et en surface sont assez peu différentes : en règle générale, les vitesses des courants en surface sont légèrement supérieures de 0 à 0,1 m/s.

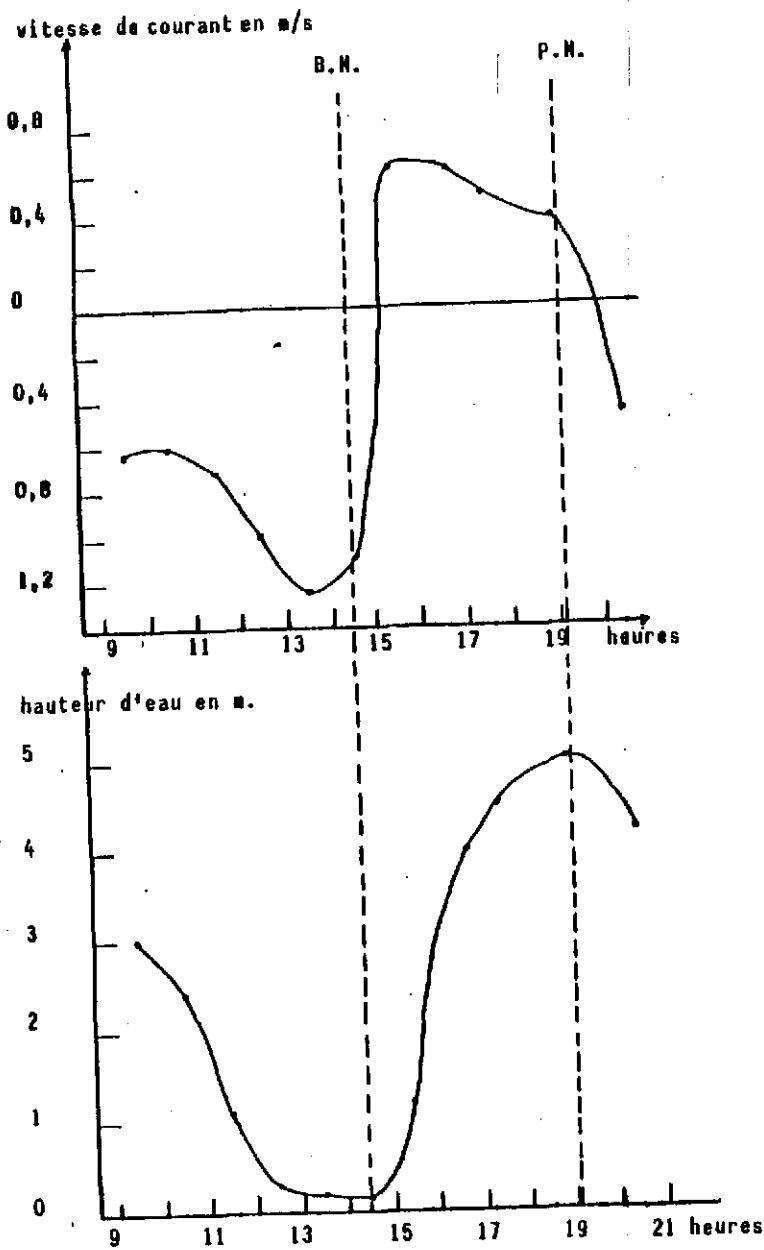


Fig. III.5 - Evolution des vitesses de courant et des hauteurs d'eau au cours d'une marée (20.08.82)

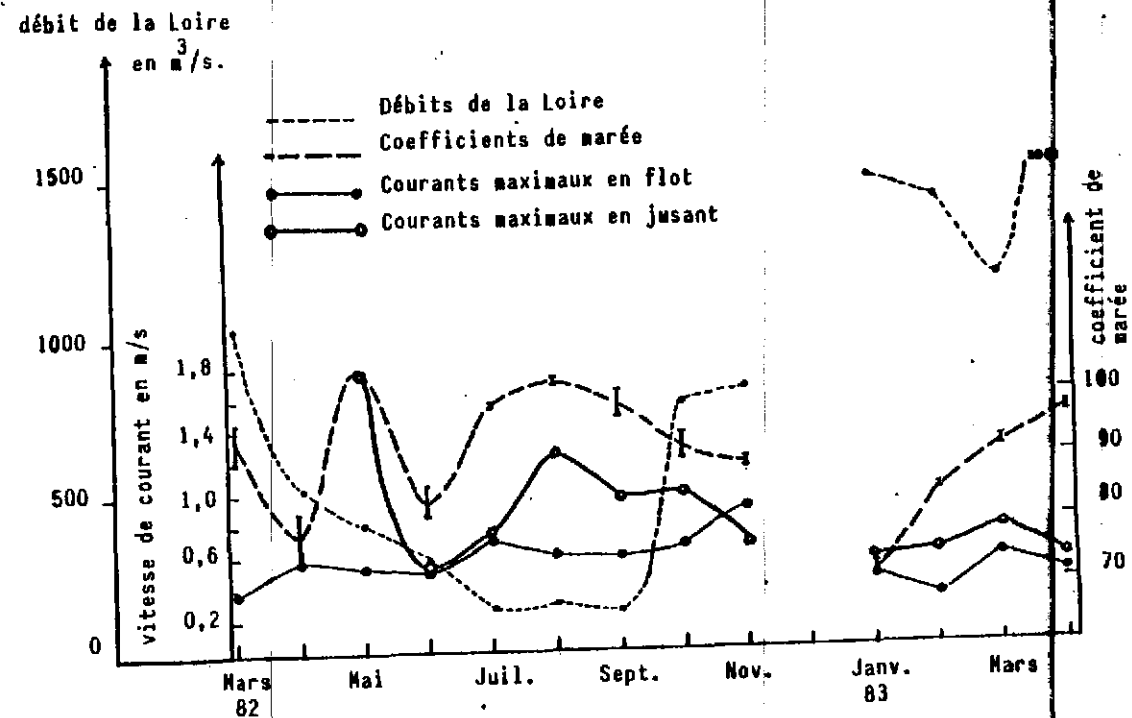


Fig. III.6 - Evolution annuelle des courants maximaux en flot et en jusant avec les débits de la Loire et les coefficients de marée.

PLANCHE 2

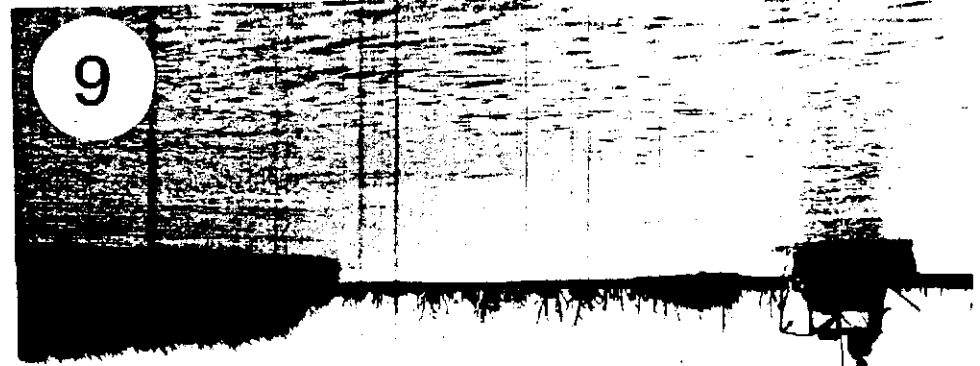
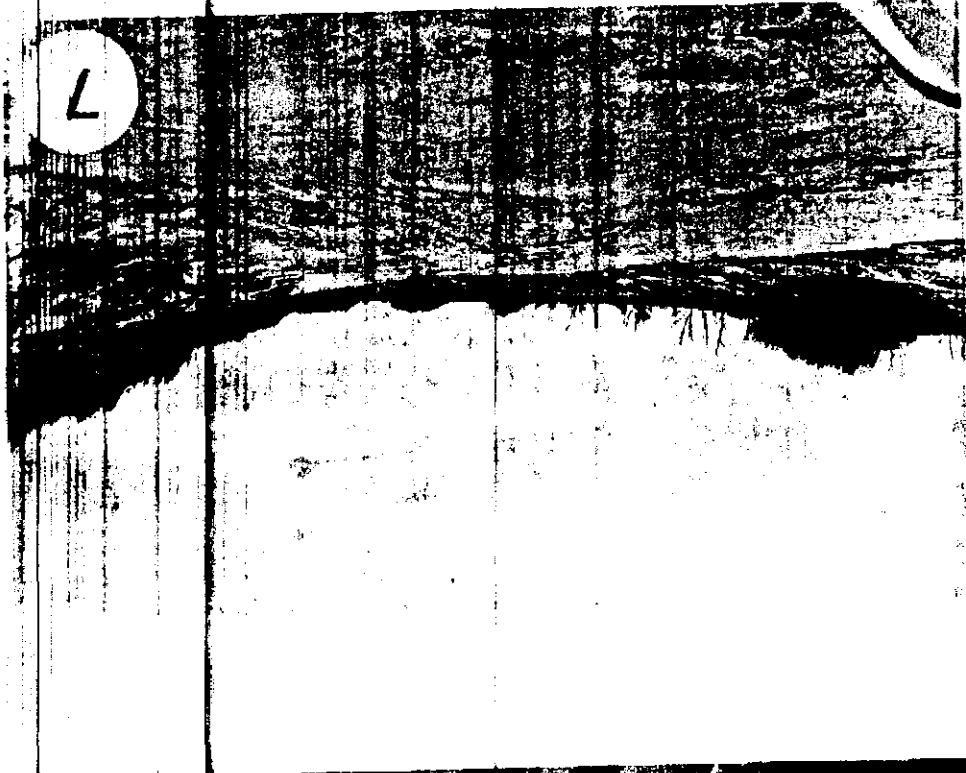
Photo 4 - Etier de LAVAU,  
légèrement en aval de l'écluse, à P.M. (vers l'aval).

Photo 5 - Etier de LAVAU,  
légèrement en aval de l'écluse, à B.M. (vers l'aval).

Photo 6 - Etier de LAVAU,  
à l'embouchure, à P.M. (vers l'amont).

Photo 7 - Etier de LAVAU,  
à l'embouchure, à B.M. - 1h. (vers l'amont).





- L'étier de la "Taillée" plus imposant par ses dimensions (4,5 km de longueur, 36 m de largeur) que l'étier de Lavau, entraîne des modifications dans l'hydrologie de l'étier étudié.

Afin de mieux cerner l'importance de l'étier de la Taillée, nous avons consacré une sortie, le 25.04.82, à la mesure des courants dans la Taillée et dans l'étier de Lavau en amont de la confluence. Les courbes (fig III.7) indiquent des courants plus forts dans l'étier de la Taillée que dans celui de Lavau ; l'écart moyen est de l'ordre de 0,30 m/s en jusant comme en flot.

vitesse de courant en m/s

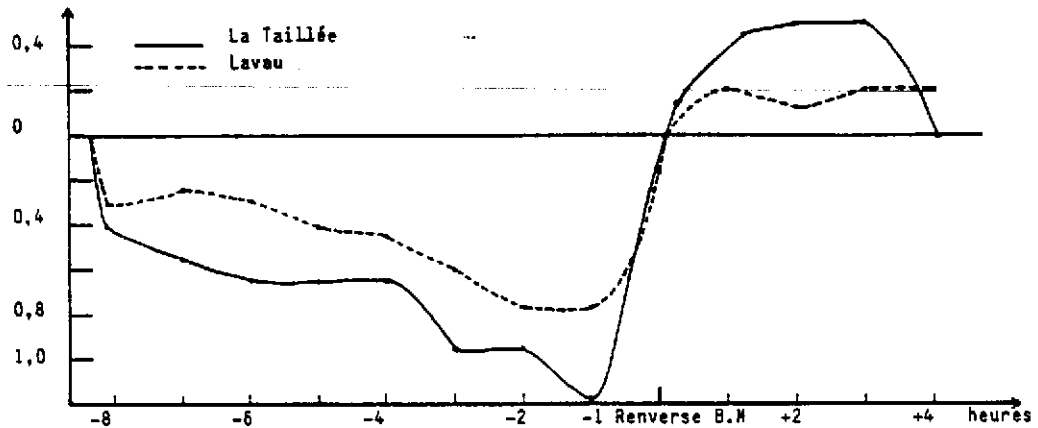


Fig. III.7 - Variations des courants de surface dans les étiers de la Taillée et de Lavau au cours d'une marée (28.04.82).

Ceci nous montre que la Taillée est un élément important dans l'hydrologie de l'étier de Lavau surtout lorsque ses eaux viennent gonfler les eaux de l'étier à marée descendante.

- A l'écluse, les observations et les mesures de courants (tableau III.7) faites sur le terrain nous ont amené aux constatations suivantes :

- à marée descendante

- l'ouverture des clapets augmente les courants en début de jusant où l'on observe les valeurs maximales,

- la fermeture totale de l'écluse, en été, diminue les vitesses de courants qui peuvent alors s'annuler.

- à marée montante

- la fermeture de l'écluse entraîne une diminution telle du flot qu'il est impossible d'en mesurer la vitesse, bien que le niveau d'eau continue de monter,

- l'ouverture de l'écluse permet une remontée normale des eaux vers le marais.

DATES	COEFFICIENT	DEBITS de la LOIRE en m <sup>3</sup> /sec.	COURANT MAXIMUM	
			en jusant en m/sec	en flot en m/sec
10.02.82	100 - 99	1 325	0,45	0
24.05.82	105 - 104	400	0,45	0,32
16.12.82	78 - 78	3 620	0,57	0

Tableau III.7 - Les courants maximaux de surface à l'écluse.

3.2 - LES ETIERS DE CORDEMAIS ET DU DAREAU

Pour des raisons d'accès, nous n'avons pas pu étudier les eaux à l'embouchure de ces deux étiers et les prélèvements n'ont eu lieu qu'à l'écluse et à mi-étier.

3.2.1 - L'onde de marée et sa propagation dans les étiers

Depuis les travaux d'aménagement dans l'estuaire, la propagation de la marée se fait sans diminution sensible d'amplitude (5,70m à St-Nazaire - 5,50m à Nantes), aussi la propagation de l'onde de marée est comparable à celle observée dans l'étier de Lavau :

- la durée du flot est plus courte à l'écluse qu'à mi-étier ; la différence est de 15 mn à 1 heure environ. L'écart dans l'étier du Dareau n'est que de 15 mn environ ; il est plus important dans l'étier de Cordemais à cause du bras de Cordemais qui est un facteur de retard.

3.2.2 - L'amplitude de marée (tableaux III.8 - III.9)

Elle est plus importante à mi-étier qu'à l'écluse.

DATES	Coeff.	Débits de la Loire en m <sup>3</sup>	ECLUSE			MI ETIER		
			H.eau à B.M. en m.	H.eau à P.M. en m.	Marnage en m.	H.eau à B.M. en m.	H.eau à P.M. en m.	Marnage en m.
1.12.81	65-61		0,60	0,90	0,30			
15.10.82	70-64	5230	1,20	1,80	0,40			
12.02.82	88-83	1230	0,60					
2.08.82	55-59	134	0,60	1,50	0,90	0,30	1,70	1,40
8.09.82	84-79	184	0,40	1,80	1,40	0,20	2,50	2,30
24.02.83	56-63	900	0,50	1,80	1,30	0,15	2,10	1,95

Tableau III.8 - Amplitudes de marée dans l'étier de Cordemais

DATES	Coeff.	Débits de la Loire en m <sup>3</sup>	ECLUSE			MI ETIER		
			H.eau à B.M. en m.	H.eau à P.M. en m.	Marnage en m.	H.eau à B.M. en m.	H.eau à P.M. en m.	Marnage en m.
30.11.81	71-68							
27.01.82	85-85	1790	0,50	1,30	0,80			
8.02.82	94-97	1500	0,50	1,50	1,00			
23.06.82	99-97	299	0,70	3,40	2,70	0,30	3,50	3,20
6.09.82	93-92	166	0,20	2,80	2,60	0,20	3,20	3,00
3.02.83	77-70	1380	1,00	3,00	2,00	1,00	2,90	1,90

Tableau III.9 - Amplitudes de marée dans l'étier du Dareau

L'amplitude de marée, d'une manière générale, est plus grande dans l'étier du Dareau que dans celui de Cordemais. En effet, le bras de Cordemais constitue une réserve d'eau qui diminue les mouvements hydrauliques dans l'étier de Cordemais.

3.2.3 - Les courants de marée

Les vitesses maximales de courant sont généralement observées en jusant (tableaux III.10 et III.11).

DATES	ECLUSE		MI-ETIER	
	Jusant	Flot	Jusant	Flot
15.01.82	0,71			
12.02.82	0,45			
8.09.82			0,28	0,29
24.02.83			0,91	0,31

Tableau III.10 - Les courants maximaux de surface dans l'étier de Cordemais (en m/s).

DATES	ECLUSE		MI-ETIER	
	Jusant	Flot	Jusant	Flot
8.02.82	0,38			
23.06.82	0,36	0,11		
8.09.82			0,18	0,20
3.02.83			1,43	0,15

Tableaux III.11 - Les courants maximaux de surface dans l'étier du Dareau (en m/s).

En hiver (Février), les vitesses maximales ont lieu en fin de jusant et en début de flot, en été (Septembre), le phénomène inverse se produit et les maxima se situent en début de jusant et en fin de flot. Les mesures sont trop peu nombreuses pour en tirer des conclusions.

#### 4 - BILAN HYDRODYNAMIQUE

Nous avons pu estimer les volumes d'eaux entrés et sortis au cours des cycles de marée, à l'aide des vitesses de courants et des hauteurs d'eau mesurées sur le terrain.

##### 4.1 - LE CALCUL DES SECTIONS MOUILLEES

Un profil topographique a été réalisé pour chacun des différents lieux de prélèvements dans les étiers, à l'aide d'une sonde manuelle qui nous permet de mesurer, avec une précision de quelques centimètres, la hauteur d'eau tous les mètres sur toute la largeur de l'étier (fig III.8 - III.9 - III.10). Connaissant les hauteurs d'eau au cours du cycle de marée, nous calculons la section mouillée de l'étier pour chaque hauteur d'eau considérée (tableaux III.12, III.13, III.14, III.15, III.16, III.17).

##### 4.2 - LE CALCUL DES DEBITS INSTANTANES

Les vitesses de courant ont été mesurées toutes les heures au fond, à mi-fond et en surface. Nous séparons deux tranches d'eau :

- une tranche supérieure pour laquelle nous considérons la moyenne des courants en surface et à mi-fond,

- une tranche inférieure avec la moyenne des courants à mi-fond et au fond.

Chaque section mouillée est multipliée par la valeur du courant moyen respectif, et le total des deux donne le débit pour chaque heure d'observation.

##### 4.3 - LES VOLUMES D'EAU TRANSITANT DANS L'ETIER

A partir des débits calculés à chaque heure du cycle de marée, nous pouvons déterminer le volume d'eau qui s'est écoulé pendant un cycle de marée.

###### 4.3.1 - A Lavau

- A l'embouchure, les résultats consignés dans le tableau III.18 nous montrent que pendant les mois d'été, de Juillet à Septembre, il rentre plus d'eau dans l'étier qu'il n'en sort. Ceci s'explique par :

- un faible débit en amont dû à la fermeture de l'écluse en jusant, à la diminution des précipitations, et à l'évaporation plus intense,

- l'augmentation de la durée du flot,

- l'absorption de l'eau à marée montante par le sol desséché des prairies, comme par la végétation et l'évapotranspiration.

Nous avons tracé les courbes (fig III.11) des volumes d'eaux entrés et sortis, ainsi que les courbes des coefficients de marée et des débits de la Loire, afin de connaître l'influence de ces deux facteurs hydrologiques dans le bilan hydrodynamique de l'étier :

- le volume d'eau entrant dans l'étier en flot varie avec le coefficient de marée,

- le volume d'eau sorti en jusant dépend à la fois du coefficient de la marée et des débits de la Loire.

- A l'écluse, il avait été prévu de faire un bilan des eaux entrant et sortant du marais, sur toute une année. Cela n'a pas été possible étant donné le système d'ouverture et de fermeture des vannes. Par contre, nous avons pu calculer le volume d'eau sortant du marais pendant le jusant à partir de l'ouverture des clapets et jusqu'à la fermeture pour les sorties du 10.02.82 et du 16.12.82. Lors de la sortie du 24.05.82, l'écluse est restée ouverte de 10h05 à 19h10. Ceci nous a permis de déterminer le volume d'eau entré et sorti dans le marais. C'est la seule fois que nous avons observé une aussi longue ouverture de la vanne au cours de toutes nos sorties. Les résultats donnés dans le tableau III.19 montrent la différence entre les volumes d'eau passant à l'écluse et à l'embouchure. Le volume d'eau très supérieur à l'embouchure s'explique par :

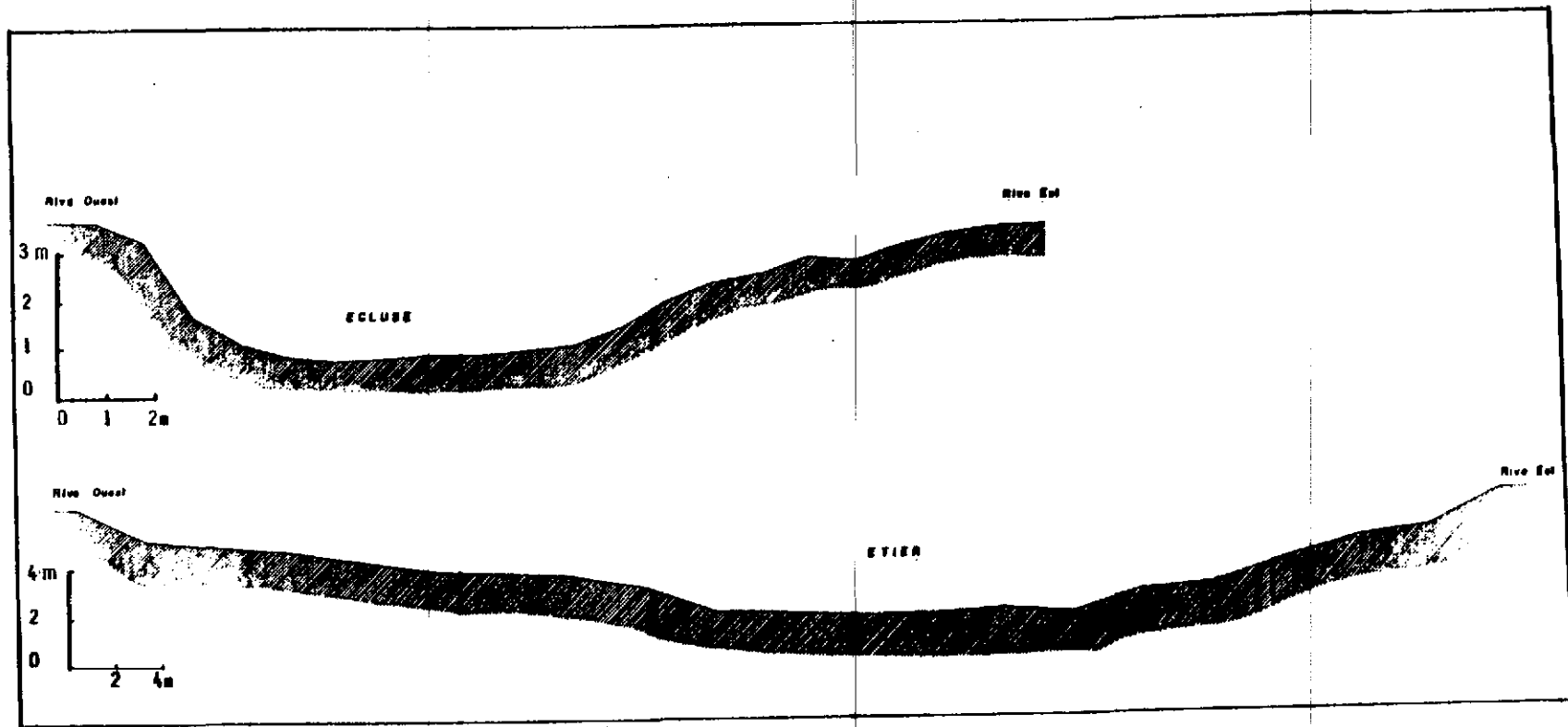


Fig. III.8 - Profils topographiques de l'étier de Lavau d'après des relevés réalisés  
 - le 19 octobre 1982 à l'embouchure,  
 - le 2 mars 1983 à l'écluse.

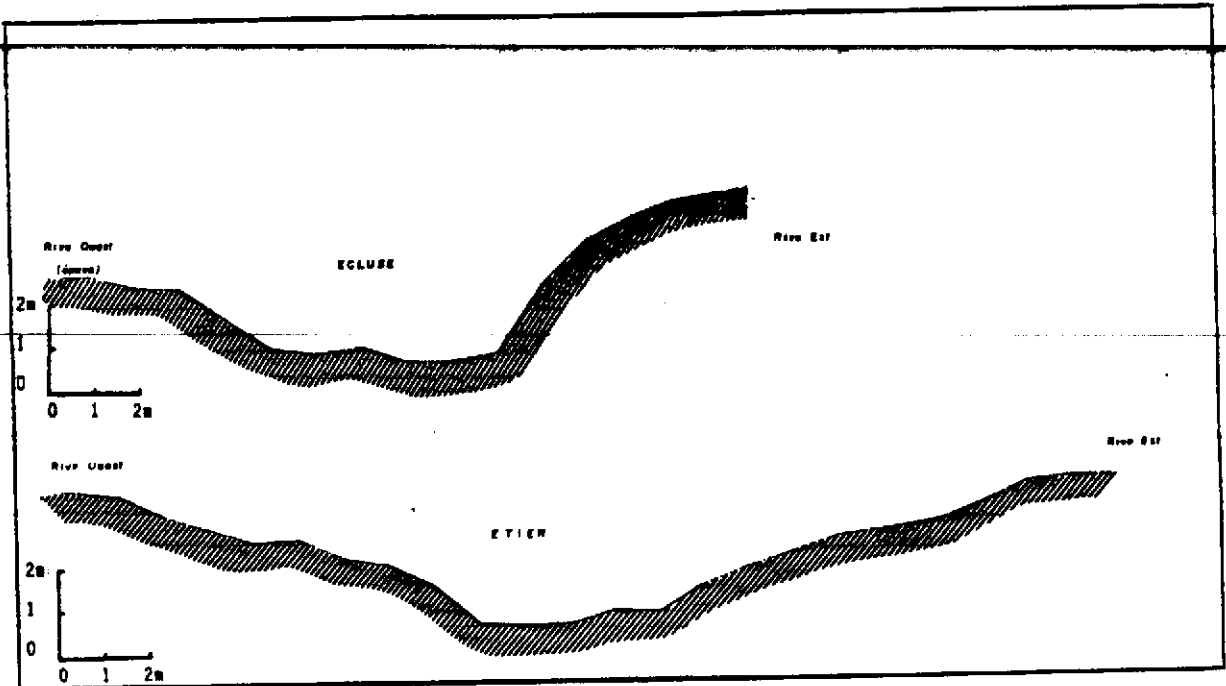


Fig. III.9 - Profils topographiques de l'étier du Cordemais d'après des relevés réalisés le 24 février 1983.

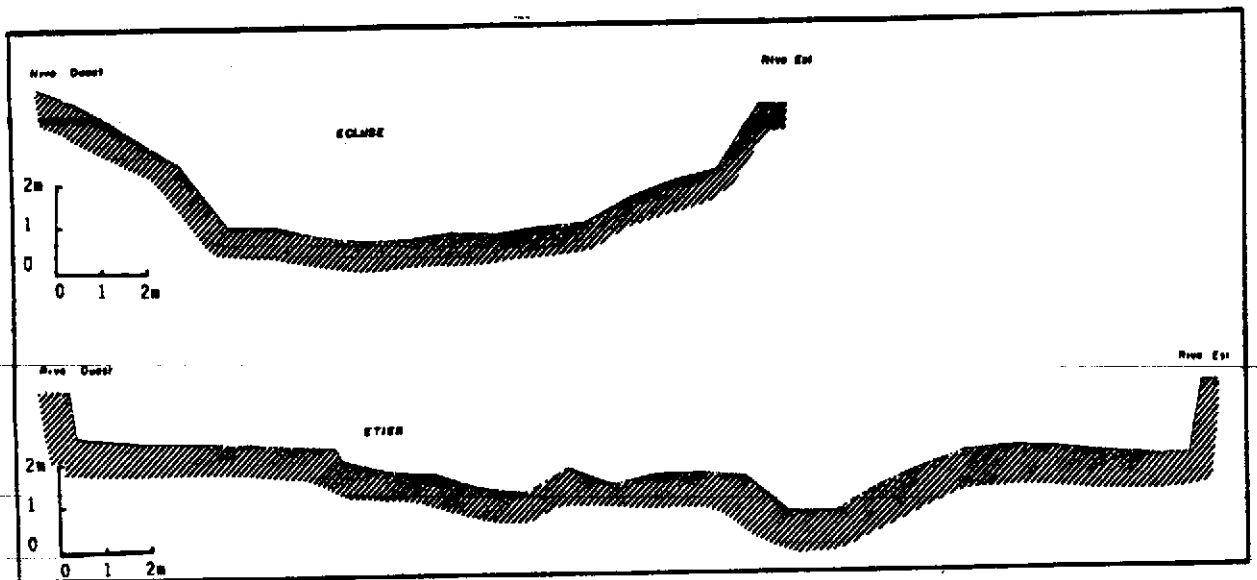


Fig.III.10 - Profils topographiques de l'étier du Dareau d'après des relevés réalisés le 9 février 1983.

Hauteur d'eau en m.	0.00 m <sup>2</sup>	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
0	0.00	0.18	0.65	1.27	2.45	3.21	4.00	4.84	5.74	6.67
1	7.63	8.36	9.37	10.41	11.49	12.59	13.74	14.94	16.20	17.50
2	18.84	20.26	21.79	23.35	24.97	26.63	28.38	30.14	32.01	

Tableau III.12 - Evaluation des surfaces mouillées de l'étier de Lavau, en aval de l'écluse, le 2.03.1983.

Hauteur d'eau en m.	0.00 m <sup>2</sup>	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
0	0.00	0.56	1.78	3.39	4.07	5.82	7.64	9.53	11.49	13.54
1	15.72	18.03	20.42	22.88	25.44	28.10	30.86	33.72	36.61	39.91
2	43.61	46.31	50.10	54.01	58.04	62.19	66.46	70.45	74.97	79.67
3	84.57	89.67	94.92	100.35	105.85	111.38	116.94	122.54	128.19	132.89
4	138.64	144.44	150.29	156.19	161.14	168.14	174.19	180.29	186.44	192.64
5	198.89	205.19	211.54	217.94	224.39	230.89	237.44	244.04	250.69	257.39
6	264.09									

Tableau III.13 - Evaluation des surfaces mouillées de l'étier de Lavau, à l'embouchure, le 2.03.1983.



Hauteur d'eau	0.00 m <sup>2</sup>	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
0	0.00 m <sup>2</sup>	0.14	0.36	0.69	1.18	1.72	2.28	2.86	3.46	4.08
1	4.72	5.39	5.81	6.50	7.21	7.94	8.69	9.46	10.34	11.30
2	12.31	13.36	14.41							

Tableau III.14 - Evaluation des surfaces mouillées de l'étier de Cordemais, en aval de l'écluse, le 24.02.1983.

Hauteur d'eau en m.	0.00 m <sup>2</sup>	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
0	0.00 m <sup>2</sup>	0.22	0.49	0.86	1.31	1.80	2.33	2.88	3.47	4.09
1	4.74	5.44	6.19	6.99	7.84	8.79	9.81	10.88	12.02	12.72
2	14.08	15.59	17.18	18.84	20.55	22.33	24.15	26.02	27.97	29.92
3	31.97									

Tableau III.15 - Evaluation des surfaces mouillées de l'étier de Cordemais, en son milieu, le 24.02.1983.

Hauteur d'eau en m.	0.00 m <sup>2</sup>	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
0	0.00 m <sup>2</sup>	0.10	0.41	0.84	1.43	2.08	2.77	3.47	4.19	4.93
1	5.69	6.48	7.32	8.16	9.05	9.97	10.92	11.88	12.85	13.84
2	14.84	15.87	16.91	17.97	19.05	20.15	21.27	22.40	23.55	24.72
3	25.91									

Tableau III.16 - Evaluation des surfaces mouillées de l'étier du Dareau, en aval de l'écluse, le 8.02.1983.

Hauteur d'eau en m.	0.00 m <sup>2</sup>	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
0	0.00 m <sup>2</sup>	0.12	0.27	0.45	0.53	0.72	0.96	1.30	1.74	2.32
1	3.16	4.11	5.14	6.22	7.46	8.88	10.42	12.02	13.80	15.76
2	17.77	19.77	21.78	23.80	25.81	27.82	29.84	31.86	33.88	35.91
3	37.94									

Tableau III.17 - Evaluation des surfaces mouillées de l'étier du Dareau, en son milieu, le 8.02.1983.

DATES	COEFFICIENTS	DEBITS DE LA LOIRE en m <sup>3</sup> /sec	VOLUME D'EAU ENTRE EN FLOT en m <sup>3</sup>	VOLUME D'EAU SORTI EN JUSANT en m <sup>3</sup>	VOLUME D'EAU TOTAL SORTI en m <sup>3</sup>
29.03.82	96-90	1 060	343 206		
28.04.82	82-74	525	323 774		
24.05.82	105-104	400	1 058 526	1.178 832	+ 120 036
25.06.82	86-81	282	535 364	645 457	+ 110 093
22.07.82	99-99	135	934 869	589 682	- 345 187
20.08.82	102-103	145	1 059 025	780 813	- 278 212
17.09.82	97-101	124	857 479	563 120	- 294 359
19.10.82	94-90	790	1 339 003	1.663 980	+ 324 977
15.11.82	89-90	825	954 978	983 017	+ 28 039
18.01.83	73-71	1 480	388 377	750 531	+ 362 154
15.02.83	85-85	1 460	576 141	786 906	+ 210 765
17.03.83	93-92	1 170	818 550	857 245	+ 38 695
14.04.83	96-97	5 060	466 151	678 109	+ 211 958

Tableau III.18 - Volumes d'eau transitant à l'embouchure par cycle de marée.

DATES	COEFFICIENTS	DEBITS DE LA LOIRE en m <sup>3</sup> /sec	VOLUME D'EAU ENTRE EN FLOT en m <sup>3</sup>	VOLUME D'EAU SORTI EN JUSANT en m <sup>3</sup>	VOLUME D'EAU TOTAL SORTI en m <sup>3</sup>
10.02.82	100-99	1 325	47 988	0	47 988
24.05.82	105-104	400	70 458	52 534	17 924
16.12.82	78-78	3 620	84 591	0	84 591

Tableau III.19 - Volumes d'eau transitant à l'écluse par cycle de marée.

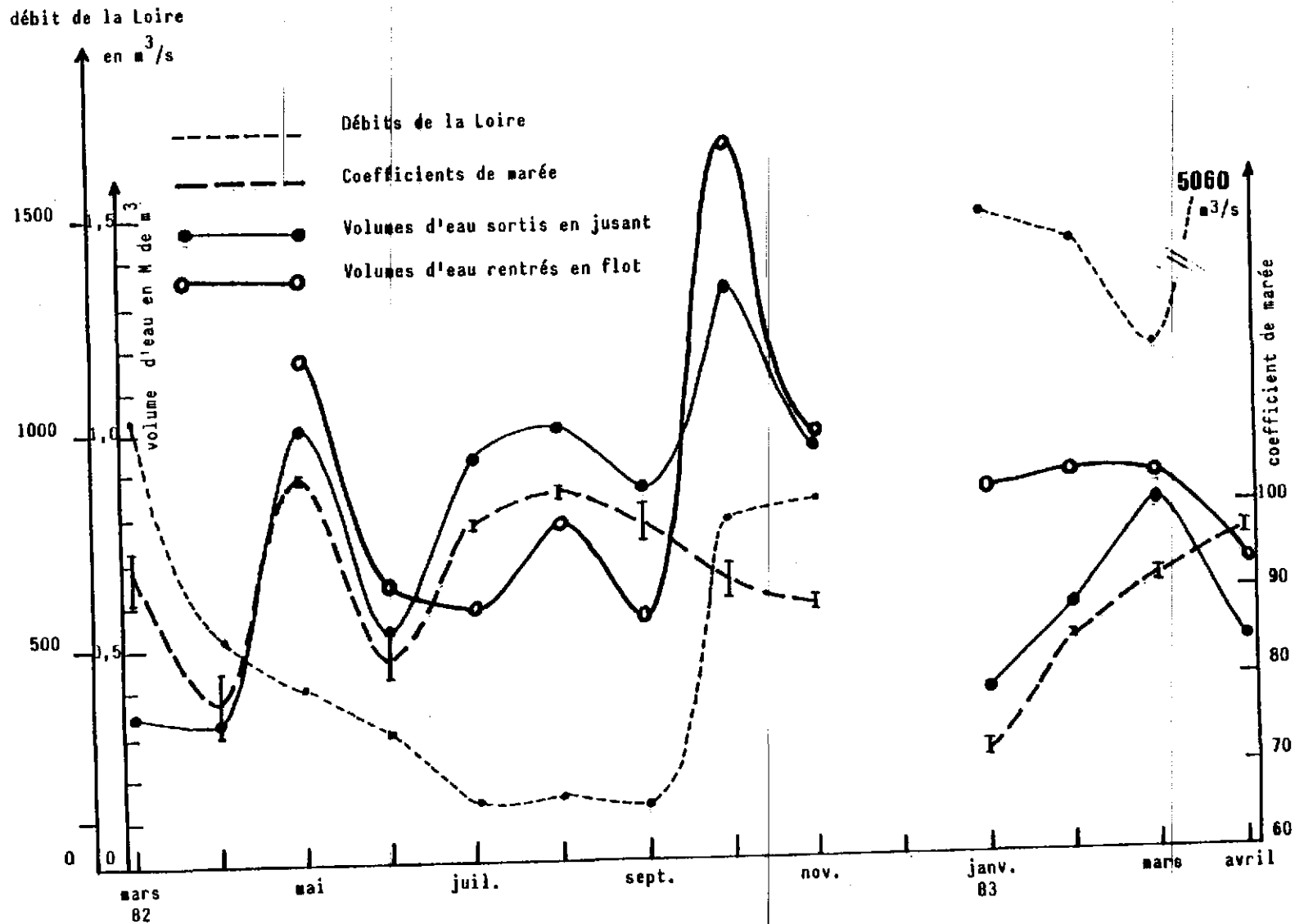


Fig. III.11 - Variations annuelles des volumes d'eau entrés et sortis au cours d'une marée, des débits de la Loire et des coefficients de marée.

- les arrivées des autres étiers tels que "Rohars", "la Taille", et des bras de Loire entre les fies Lavau, Pipy et Chevalier particulièrement importantes en vives-eaux,

- une section mouillée beaucoup plus grande qu'à l'écluse (exemple : pour une hauteur d'eau de 2,50 m, la section mouillée à l'écluse est de 26,6 m, elle est de 62,8 m à l'embouchure). D'autre part, le temps pendant lequel l'eau s'écoule ou rentre dans le marais est, par suite de la fermeture de l'écluse, plus court que le cycle de marée pour lequel nous avons calculé les volumes d'eau à l'embouchure.

#### 4.3.2 - A Cordemais et au Dareau (tableau III.20 - tableau III.21)

Dans l'étier de Cordemais, nous observons en Septembre et en Février (tableau III.20) un volume d'eau rentrant plus grand que le volume d'eau sortant ; ceci est dû à la fermeture de la vanne en jusant et à son ouverture en flot. Si cette manoeuvre est explicable en été par le besoin d'eau dans le marais, elle est exceptionnelle en hiver et a pour but de noyer les rats qui envahissent le marais.

#### - Remarque

Le calcul des volumes d'eau entrant et sortant est l'objet de nombreuses approximations :

- les mesures de courants sont faites sur une seule verticale au milieu du chenal, ou en unique point en surface, et on extrapole à toute la section,

- nous ne tenons pas compte de l'effet de paroi qui inverse le sens du courant sur les bords de l'étier,

- les profils n'ont été faits qu'une fois, l'érosion ou sédimentation a pu en modifier le tracé au cours de l'année,

- nous faisons des moyennes de débits calculées à une heure d'intervalle.

Malgré ces approximations, les volumes obtenus nous donnent un ordre de grandeur des phénomènes.

## 5 - CONCLUSION

L'hydrologie de l'étier peut être comparée à celle d'un petit estuaire. Nous observons, en effet de nombreuses similitudes entre les deux systèmes :

- une dissymétrie de l'onde de marée de plus en plus marquée en amont, se traduisant par une prolongation du jusant au détriment du flot,

- un décalage des renverses entre l'embouchure et les zones en amont,

- une amplitude de marnage qui varie en fonction des coefficients et des débits,

- des courants maximaux plus forts en jusant qu'en flot.

Ces points communs nous permettent d'utiliser des conclusions d'études antérieures sur la Loire, mais il ne faut pas perdre de vue des différences notables entre l'estuaire et les étiers :

- les dimensions réduites des étiers, par rapport à l'estuaire, empêchent la formation d'une "lentille immobile" décrite par BERTHOIS L. (1957) dans la Loire,

- la petitesse des étiers entraîne une amplification relative des phénomènes observés, car la remontée rapide des eaux transforme le filet d'eau de la fin de jusant en un volume important,

- les écluses sont également à l'origine de modifications que l'on ne rencontre pas en milieu ouvert :

- la diminution des courants à la fermeture de la vanne,
- la variation du débit selon l'ouverture ou la fermeture,
- les faibles échanges avec le marais.

- à l'écluse

DATES	COEFF.	DEBITS DE LA LOIRE en m <sup>3</sup> /sec	VANNAGE	VOLUME D'EAU SORTI DU MARAIS en m <sup>3</sup>
15.01.82	70-84	5 230	clapets ouverts en jusant.	124 885
12.02.82	88-83	1 230	fermés en flot	14 994

à mi-étier

DATES	COEFF.	DEBITS DE LA LOIRE en m <sup>3</sup> /sec	VANNAGE	VOLUME D'EAU SORTI EN JUSANT en m <sup>3</sup>	VOLUME D'EAU ENTRE EN FLOT en m <sup>3</sup>	VOLUME TOTAL D'EAU + sorti - entré en m <sup>3</sup>
8.09.82	84-79	184	écluse fermée en jusant, ouverte en fin de flot	24 260	34 404	- 9 744
24.02.83	56-63	900	écluse fermée en jusant, ouverte en flot	17 432	36 234	- 18 802

Tableau III.20 - Volumes d'eau transitant dans l'étier de Cordemais au cours d'un cycle de marée.

- à l'écluse

DATES	COEFF.	DEBITS DE LA LOIRE en m <sup>3</sup> /sec	VANNAGE	VOLUME D'EAU SORTI DU MARAIS en m <sup>3</sup>
8.02.82	94-97	1 500	écluse à demi-ouverte en jusant.	26 743
23.06.82	99-97	299	fermée en flot	31 513

- à mi-étier

DATES	COEFF.	DEBITS DE LA LOIRE en m <sup>3</sup> /sec	VANNAGE	VOLUME D'EAU SORTI EN JUSANT en m <sup>3</sup>	VOLUME D'EAU ENTRE EN FLOT en m <sup>3</sup>	VOLUME TOTAL D'EAU + sorti - entré en m <sup>3</sup>
6.09.82	93-92	166	écluse fermée en flot et en jusant	53 814	54 884	- 870
3.02.83	77-70	1380	écluse ouverte en jusant	133 344	23 662	+ 109 682

Tableau III.21 - Volumes d'eau transitant dans l'étier du Dareau au cours d'un cycle de marée.

Par conséquent, l'étier peut être comparé à un petit estuaire ayant sa propre individualité, dans lequel nous définissons différentes masses d'eau :

- les eaux de retrait, s'écoulant pendant les cinq ou six premières heures de jusant et sont constituées en grande partie par les eaux de flot,

- les eaux de ruissellement, s'écoulent en fin de jusant durant les deux ou trois dernières heures ; ce sont les eaux des marais et des vasières,

- les eaux de refoulement remontent l'étier en début de flot et sont un mélange des eaux de ruissellement et des eaux de la Loire,

- les eaux de flot sont les eaux provenant de l'estuaire, observées les deux dernières heures de flot.

Cette distinction entre les diverses masses d'eau sera fondamentale dans l'étude des paramètres physico-chimiques, objet des chapitres suivants.

\* \* \* \* \*

*CHAPITRE IV*

*Température*

Dans le chapitre précédent, nous avons analysé le rôle de la marée dans le processus hydrodynamique. Elle présente aussi une grande importance pour les variations de température des eaux, renforcées par l'émergence. Ceci nous conduit à l'étude des températures des eaux au cours du cycle tidal, puis du cycle saisonnier.

## I - LES VARIATIONS DE TEMPERATURE DANS LE SYSTEME DE LAVAU

### 1 - LE CYCLE TIDAL

Nous observons sensiblement les mêmes variations à l'écluse et à l'embouchure (fig IV.1).

En été, les températures des eaux augmentent au cours du jusant et atteignent les valeurs les plus fortes en fin de jusant, lors du gonflement des eaux (cf. Chapitre Hydrodynamique) : les eaux de ruissellement se réchauffent sur les vasières l'après-midi à la faveur des températures de l'air plus élevées. En effet, l'étude étant effectuée lors de coefficients de vives-eaux, la marée basse a lieu en début d'après-midi, lorsque l'ensoleillement est le plus important sur les vasières largement découvertes.

Le retour du flot entraîne une diminution des températures immédiate, par suite de la dilution des eaux relativement chaudes de l'étier par les eaux de l'estuaire plus froides.

En hiver 1982-1983, les processus sont différents : de façon générale, les températures diminuent au cours du jusant et augmentent au retour du flot. Les apports d'eaux froides du marais et l'évaporation sur les vasières, bien que très faible, abaisse la température à l'interface air-sédiment. Les eaux de ruissellement sont ainsi refroidies par rapport aux eaux estuariennes qui restent plus stables au cours de l'année.

### 2 - LE CYCLE ANNUEL

#### 2.1 - A L'EMBOUCHURE (fig IV.2)

En été, les températures augmentent avec un maximum en juillet ( $24^{\circ}$ ), suivi d'une baisse en août ( $20-21^{\circ}$ ) accompagnant une baisse de la chlorosité due à des précipitations élevées entre Juillet et Août (58,5 mm). Ces fortes pluviosités entraînent une diminution de l'ensoleillement, et par conséquent, des températures plus faibles.

En hiver, les eaux de flot ont une température légèrement plus élevée que celle de ruissellement. Par exemple le 15.02.83, les températures minimales sont de  $3^{\circ}$  pour les eaux de ruissellement, et de  $3^{\circ}5$  pour les celles de flot. Les températures des eaux de ruissellement varient plus que celles de flot, grâce aux écoulements sur les vasières qui augmentent les échanges entre l'air et l'eau. D'autre part, comme le souligne CARRIKER M.R. (1967), l'océan joue un rôle de régulateur thermique par rapport à l'estuaire. De même, l'estuaire de la Loire est un régulateur de température pour les masses d'eaux réduites telles que les étiers. C'est pourquoi, l'amplitude annuelle des variations de température est plus élevée pour les eaux de ruissellement ( $21^{\circ}2$ ) que pour les eaux de flot ( $20^{\circ}$ ).



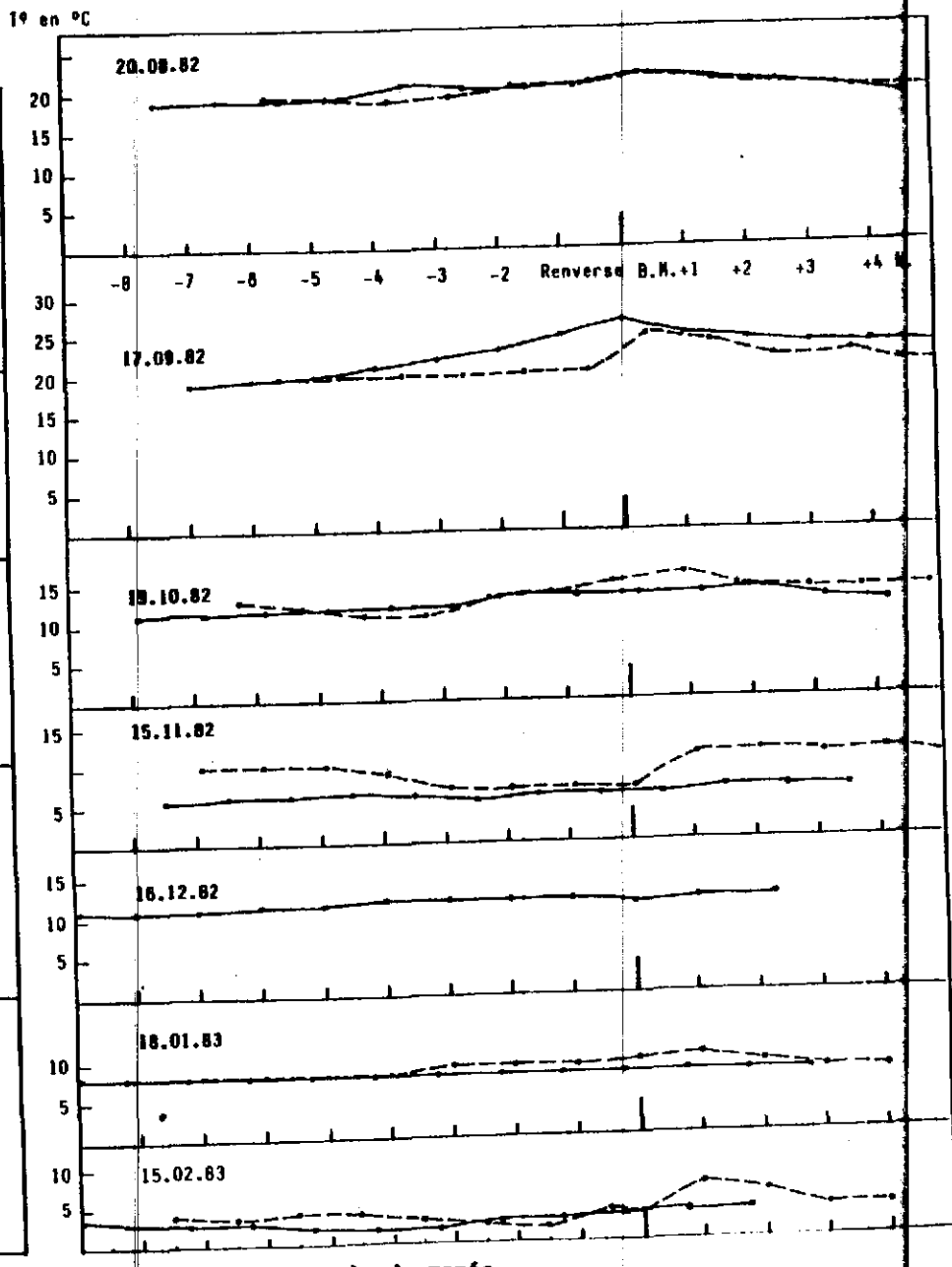
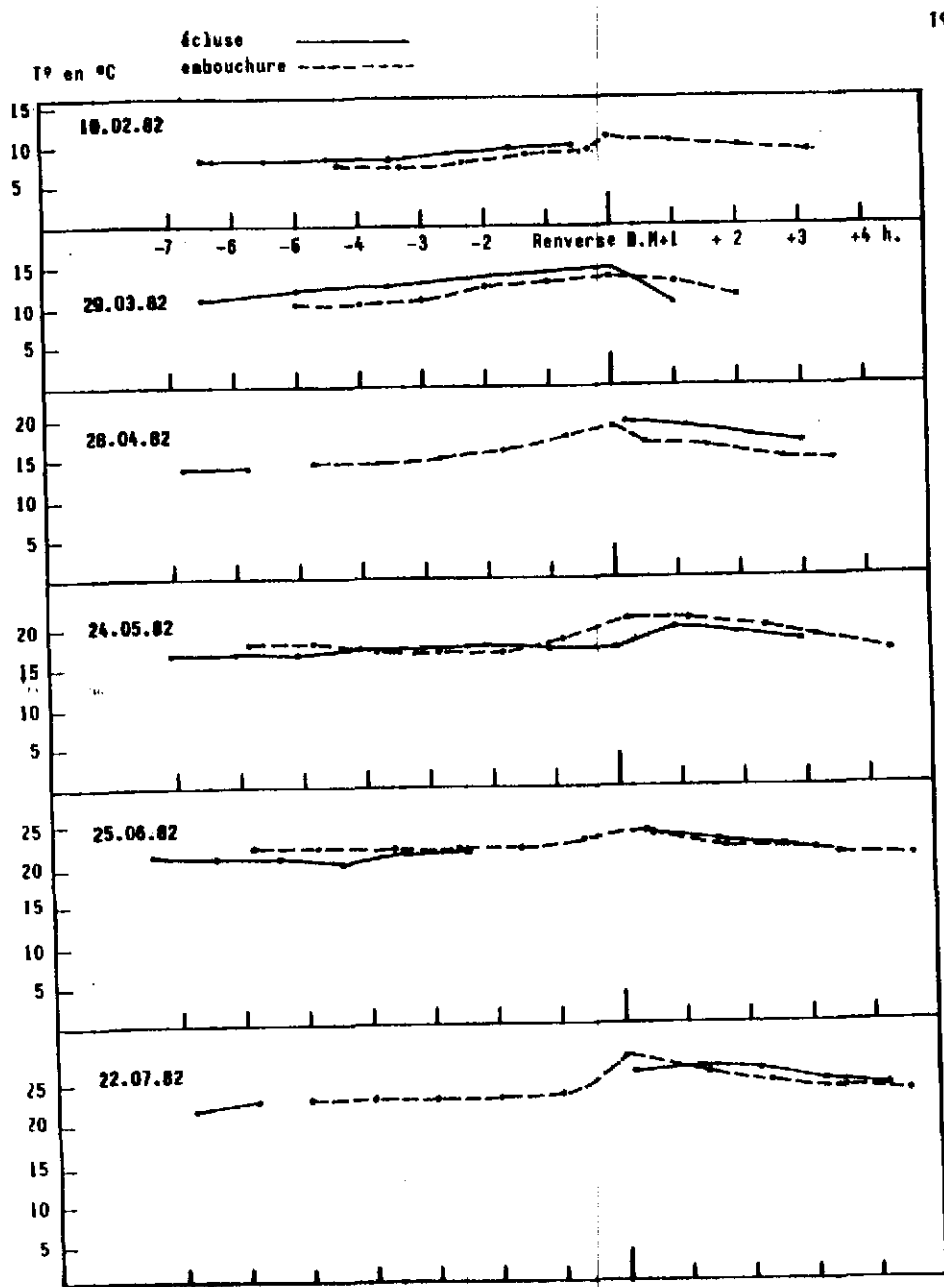


Fig. 17-1 - Variations des températures pendant un cycle de marée.

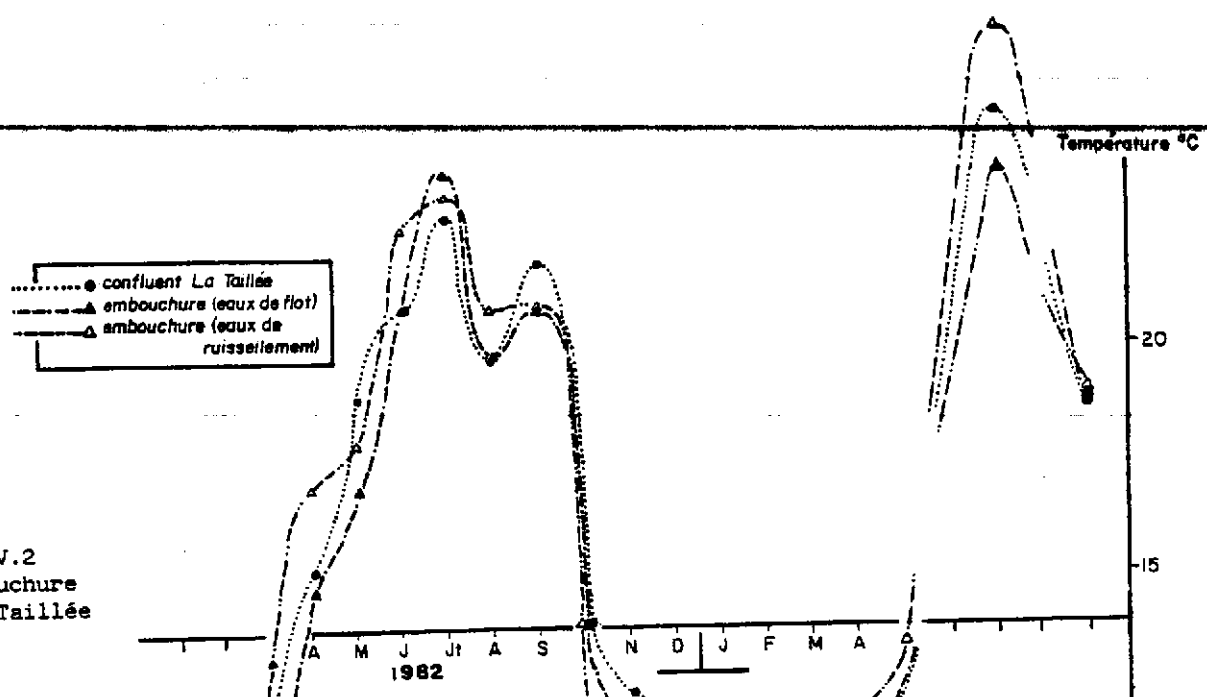


Fig. IV.2  
A l'embouchure  
à la Taillée

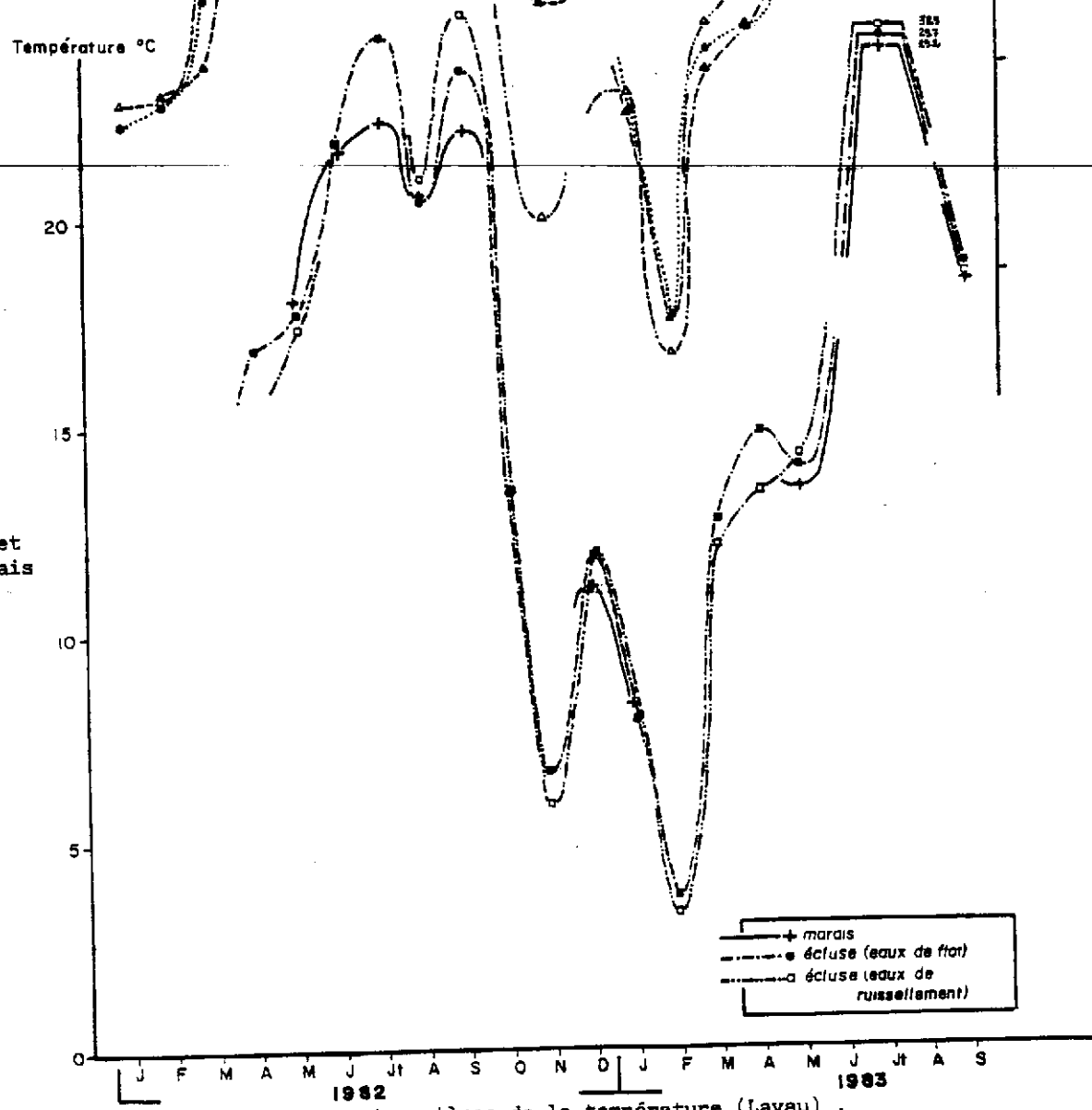


Fig. IV.3  
A l'écluse et  
dans le marais

Variations saisonnières de la température (Lavau).

## 2.2 - A L'ECLUSE (fig IV.3)

En été, les températures atteignent deux maxima de 25°, en Juillet et en Août 1982.

Nous notons, également, une baisse de la température le 20 Août en corrélation avec une diminution de la chl<sub>1</sub>océsité, due aux précipitations.

A la fin de l'été, les eaux de ruissellement réchauffées sur les vasières ont une température plus élevée de 1° que les eaux de flot, tandis qu'en hiver, de Novembre 1982 à Février 1983, les températures des eaux de flot sont légèrement plus élevées que celles des eaux de ruissellement. La différence est toutefois inférieure à 1°.

L'amplitude annuelle de variation de température est de 21°6 dans les eaux de ruissellement et de 20°8 dans les eaux de flot. On retrouve le rôle de régulateur thermique de l'estuaire.

## 2.3 - DANS LE MARAIS (fig IV.3)

D'un point à l'autre du marais, les températures varient (fig VI.4).

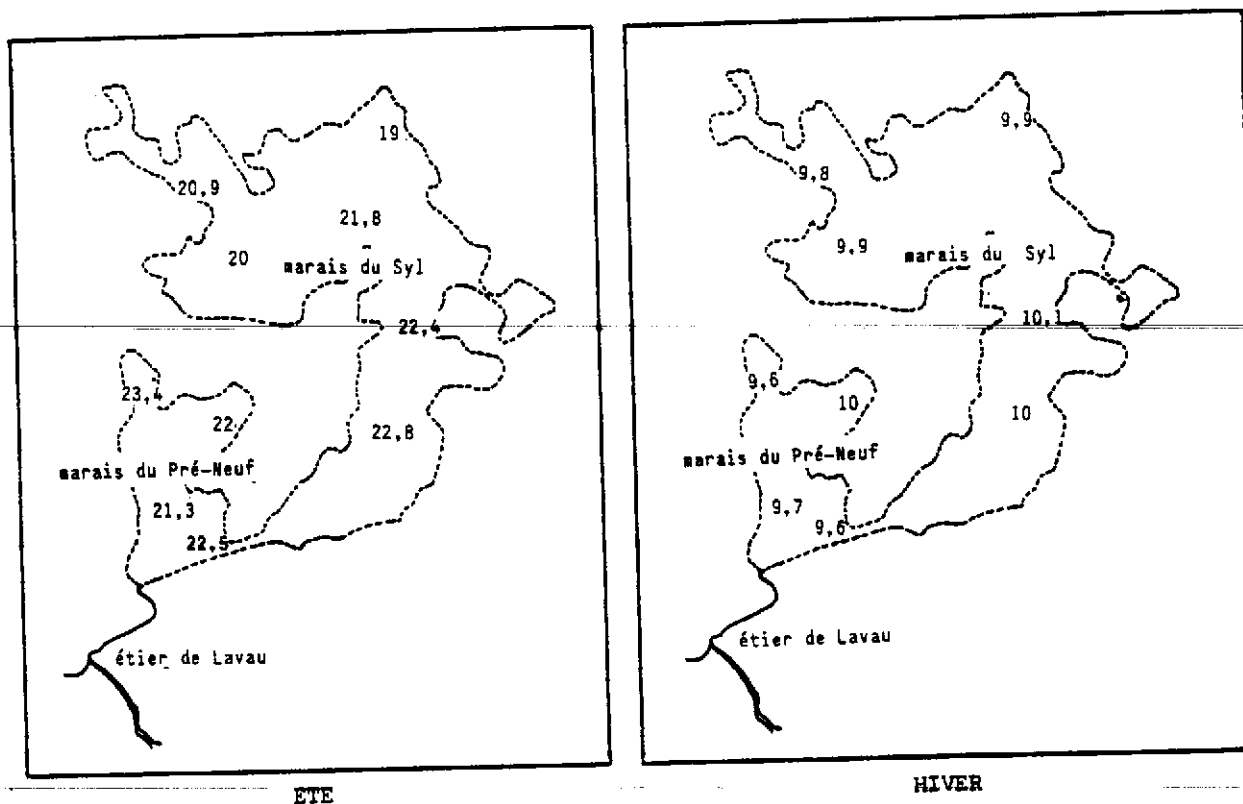


Fig. IV.4 - Variations des températures dans le marais.

La moyenne minimale des températures (8°4) est obtenue le 18.01.83 et la moyenne maximale (22°4) est observée le 22.07.82.

## 3 - EVOLUTION DES TEMPERATURES A L'INTERIEUR DU SYSTEME

En été, la température des eaux de flot augmente légèrement entre l'embouchure et l'écluse.

Le 22 Juillet, les températures ont été de :

- 24° à l'embouchure,
- 24° à la taillée,
- 24°5 à l'écluse,
- 22°4 dans le marais.

Lors de la marée descendante, en fin de jusant, nous observons les températures les plus élevées à l'écluse, grâce à l'action de l'ensoleillement sur un très faible volume d'eau.

En hiver, la température des eaux de flot diminue entre l'embouchure et l'écluse, et les températures s'équilibrent entre l'écluse et le marais. Les eaux de ruissellement se réchauffent au cours de la descente de l'écluse vers l'embouchure.

### II - LES VARIATIONS DE TEMPERATURE DANS LES SYSTEMES DE CORDEMAIS ET DU DAREAU

Généralement les températures augmentent au cours du jusant en hiver comme en été, alors que le retour du flot entraîne une diminution des températures ou une stabilité.

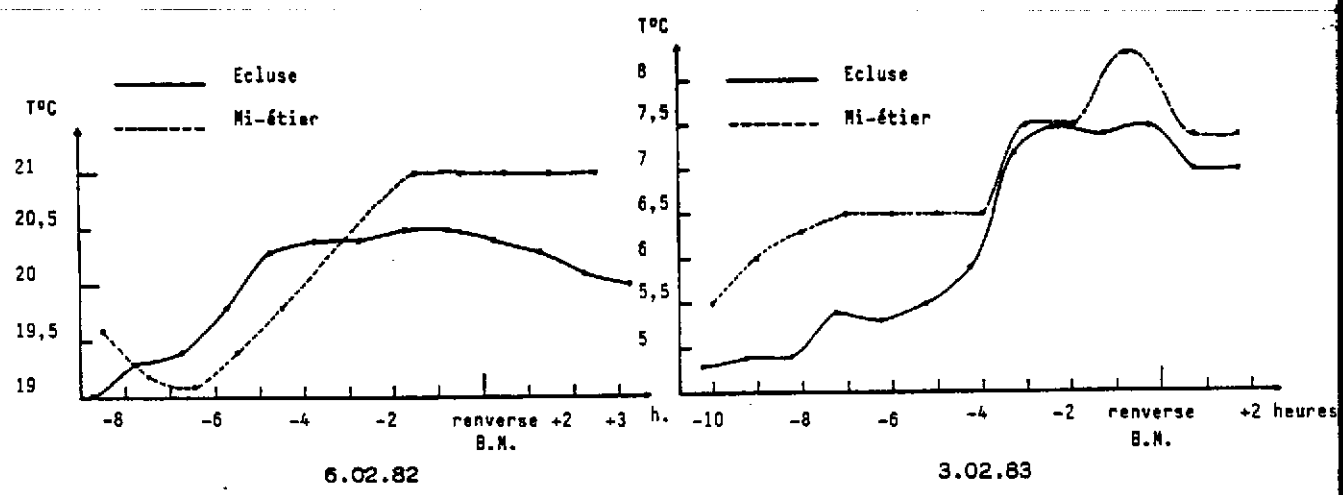


Fig. IV.5 - Variations des températures au cours d'un cycle tidal dans l'étier du Dareau.

Les températures des eaux du marais sont toujours inférieures à celles du flot qui ont pu se réchauffer au passage sur les vasières.

Un fait particulier est à noter dans l'étier de Cordemais où nous observons le 8.09.82 une élévation de température de 7°entre la renverse de B.M. et la fin du flot à l'écluse, et de 6°entre la renverse de B.M. et le début du flot à mi-étier (fig IV.7). Cette élévation thermique ne peut être expliquée par le réchauffement sur les vasières. Elle est due, plus vraisemblablement, aux rejets des eaux chaudes de la Centrale Thermique de Cordemais dans le bras de Cordemais.

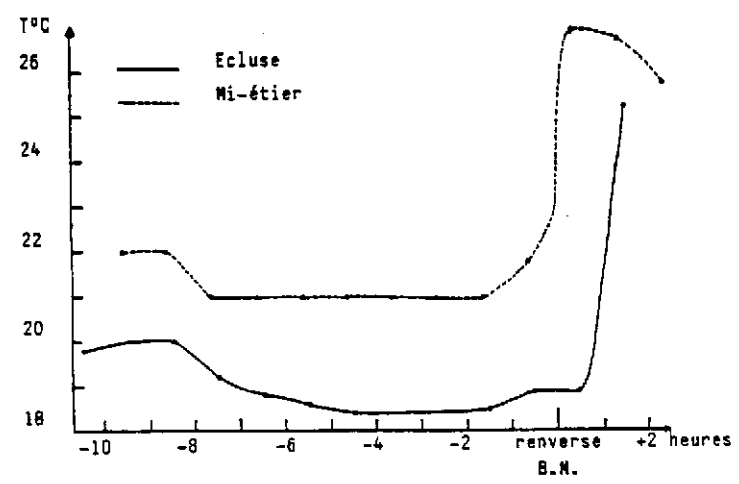


Fig. IV.6 - Variations des températures au cours d'un cycle tidal dans l'étier de Cordemais le 8.09.82.

### III - CONCLUSIONS

Les températures des eaux des systèmes étiers-marais, liées aux températures atmosphériques, sont ~~des~~ maximales en été, minimales en hiver.  
De plus, les vasières, soumises à l'émergence au cours d'un cycle tidal, jouent un rôle primordial dans le réchauffement des eaux en été et leur refroidissement en hiver, alors que la Loire est un régulateur thermique pour les étiers.  
Enfin, nous soulignons les faibles variations d'amplitude des températures lors du cycle tidal, qui sont sans influence sur la vie dans les étiers.

\* \* \* \* \*

CHAPITRE V

pH

Bien que très variable, le pH est un élément important dans les cycles hydrobiologiques, et pour les phénomènes géochimiques.

Le pH varie de 7 à 9,3 dans la Loire fluviale (MANICKAM S., 1982), et il est de 8 environ en mer.

Dans l'estuaire, il évolue de façon complexe (de 7,4 à 8,4) en fonction des apports fluviaux, des apports marins alcalins, et de l'activité microbologique.

## I - LES VARIATIONS DU pH DANS LE SYSTEME DE LAVAU

### 1 - LE CYCLE TIDAL

#### 1.1 - A L'EMBOUCHURE (fig V.1)

##### - en jusant

En période hivernale, le pH reste stable pendant le jusant ou diminue légèrement en fin de jusant (de 7,9 à 7,5 le 15.02.83), sous l'action des eaux du marais moins alcalines. Du printemps à l'été, le pH diminue très légèrement dans les eaux de retrait (de 7,4 à 7,3 le 24.05.82), puis augmente en fin de jusant dans les eaux de ruissellement (de 7,4 à 7,6 le 22.07.82) - (de 7 à 8 le 24.05.82).

L'augmentation du pH, liée à l'activité photosynthétique des organismes, est favorisée par un éclaircissement plus intense (FRANCIS-BOEUF C., 1947 - DEBYSER J., 1961). La photosynthèse étant plus active au cours de la journée, la teneur en gaz carbonique dissous diminue, et le pH augmente. Ainsi, l'assimilation chlorophyllienne du phytobenthos, présent au sein de la pellicule superficielle des vasières, est à l'origine d'une élévation du pH dans les eaux de ruissellement.

D'autre part, la production biologique d'azote ammoniacal, particulièrement intense sur les vasières (cf. Chapitre XI: Les sels azotés), entraîne également une augmentation du pH dans les eaux de ruissellement.

##### - en flot

Le pH augmente, avec l'arrivée des eaux estuariennes toujours plus alcalines que celles de l'étier.

#### 1.1 - A L'ECLUSE (fig V.1)

Le pH varie peu entre le flot et le jusant, mais nous notons toutefois ceci :

- le 25.06.82, le pH augmente (de 7,55 à 8,45) après l'ouverture de l'écluse, quatre heures avant la B.M.

- le 20.08.82, après une légère baisse en début de jusant (de 7,5 à 7,4), le pH augmente progressivement pendant tout le reste du cycle de marée (de 7,4 à 8,4).

Ces modifications peuvent être dues aux envois de marée effectués les jours précédents nos sorties, et ayant entraîné la pénétration des eaux de Loire plus basiques que celles du marais. On remarque, en effet, des pH élevés au point 9 (9,1) et au point 10 (8,3) le 25.06.82. En été, l'eutrophisation dans les eaux entraîne également une augmentation du pH.

## 2 - LE CYCLE ANNUEL

### 2.1 - A L'EMBOUCHURE (fig V.2)

D'une façon générale, nous observons une augmentation du pH du printemps à l'été qui résulte de la pénétration des eaux marines et d'une activité photosynthétique plus intense qu'en hiver (8,2 dans les eaux de flot et 7,9 dans les eaux de ruissellement le 20.08.82).

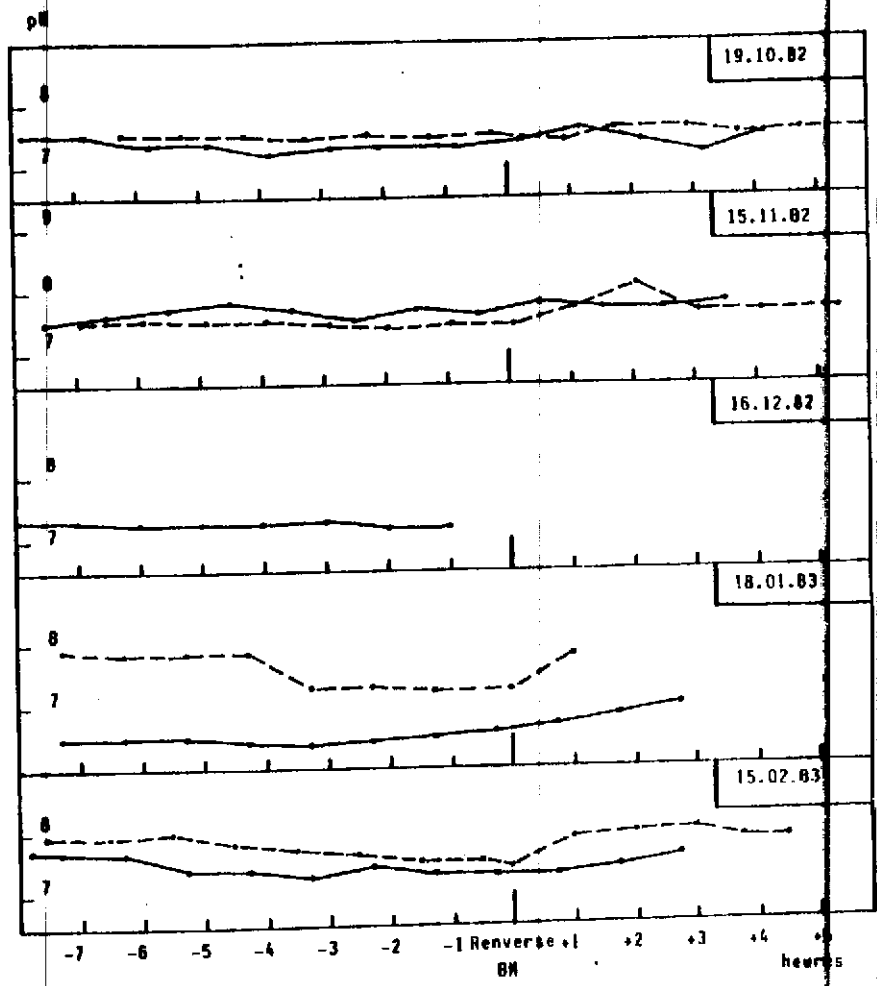
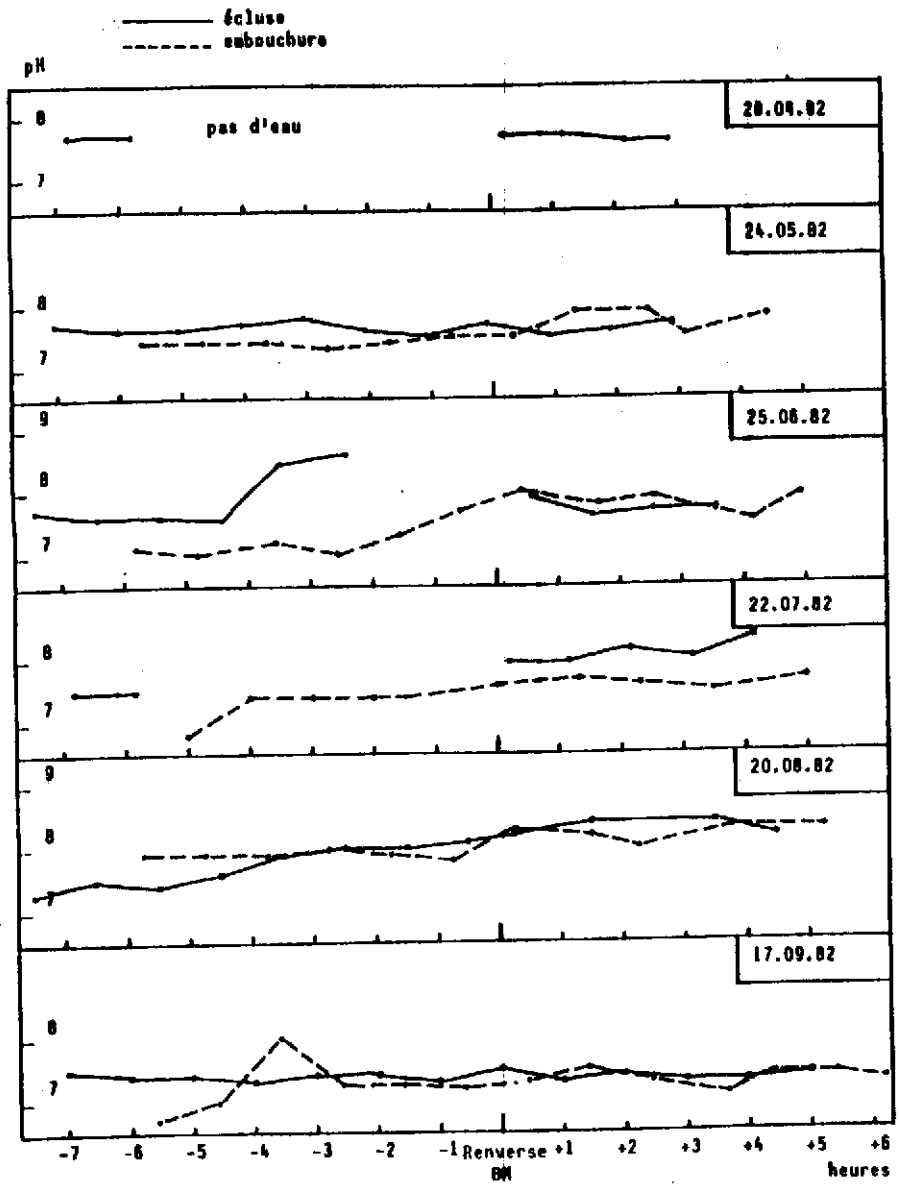


Fig. V.1 - Variations des pH pendant un cycle de marée.

8.5  
8.0  
7.5  
7.0  
6.5

pH



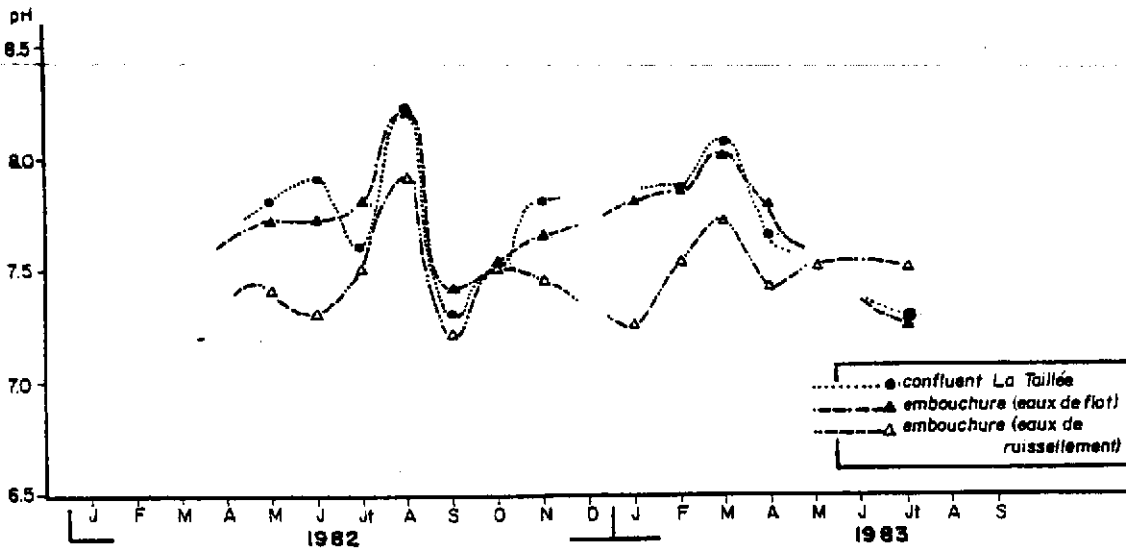


Fig.V.2 - Variations saisonnières du pH à l'embouchure de l'étier de Lavau et à la Taillée .

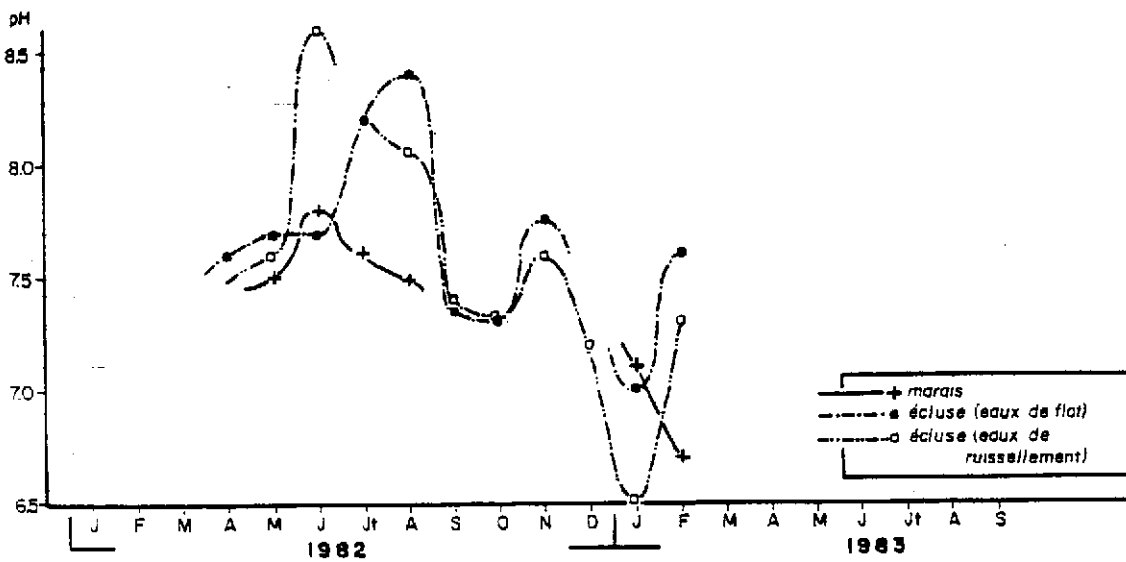


Fig.V.3. - Variations saisonnières du pH à l'écluse et dans le marais de Lavau .

Par contre, le 17.09.82, une chute très nette du pH est due à la dégradation de la matière organique particulièrement importante (7,2 dans les eaux de ruissellement - 7,4 dans les eaux de flot).

En période hivernale, le pH varie entre 7,55 et 7,85 dans les eaux de flot et de 7,2 à 7,55 dans les eaux de ruissellement. En effet, le lessivage des sols par les crues et l'apport des eaux de marais entraînent une diminution du pH assez nette pour les eaux de ruissellement, moins alcalines que les eaux de flot.

2.2 - A L'ECLUSE (fig V.3)

Du printemps à l'été, le pH est supérieur à celui de l'hiver. A partir de Septembre, il diminue nettement et reste généralement faible endant l'hiver (de l'ordre de 7,2). Le 18.01.83, les eaux de ruissellement issues du marais, sont légèrement acides (6,5).

2.3 - DANS LE MARAIS (fig V.3)

Le pH est plus élevé en été qu'en hiver ; il varie d'une moyenne maximale de 7,8 le 25.06.82 à une moyenne minimale de 6,7 le 18.01.83.

Comme l'a constaté HALGAND G. (1973) dans le bassin Briéron, les variations du pH sont liées aux variations de la chlorosité dans le marais : les envois de marée, en été, provoquent une élévation du pH, tandis que l'accumulation d'eau douce en hiver, abaisse le pH, sous l'action des acides humiques (fig V.4)

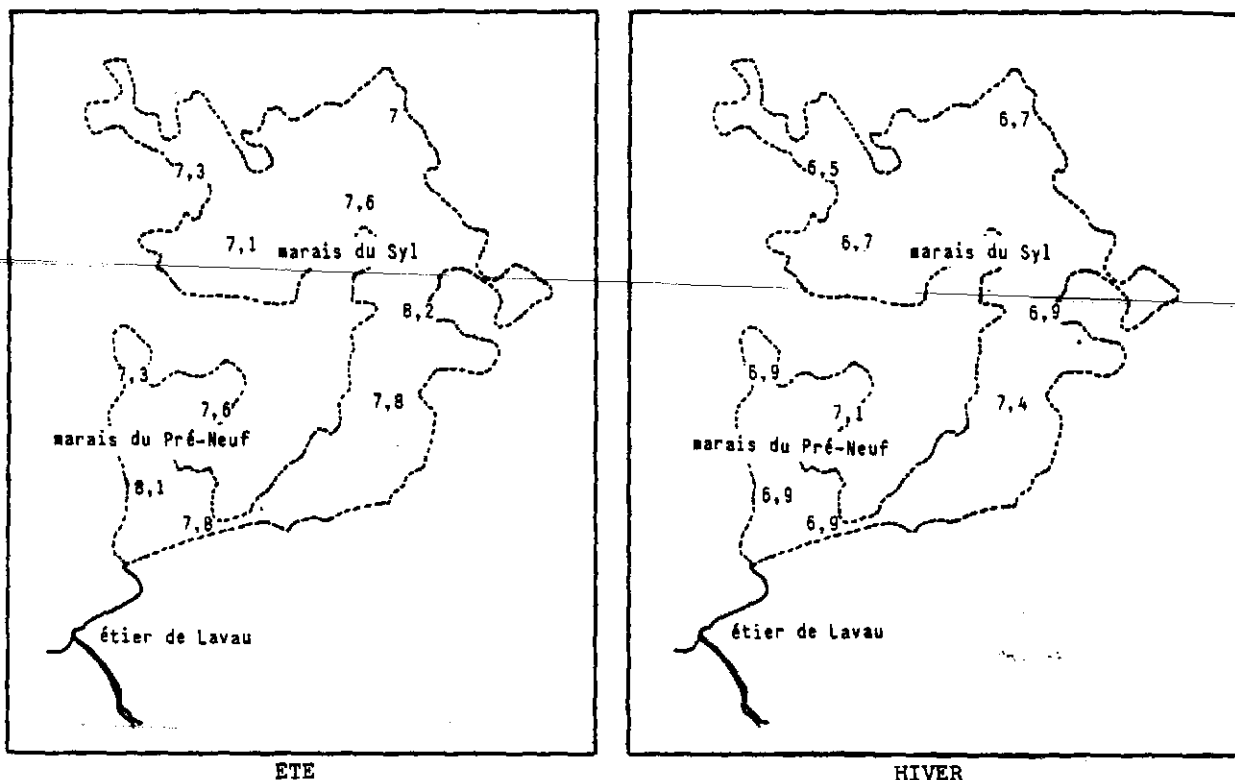


Fig. V.4 - Variations des pH dans le marais.

De façon générale, le pH est plus faible au Nord du marais du Syl à cause d'une influence moindre des eaux de la Loire.

3 - EVOLUTION DU pH DANS L'ENSEMBLE DU SYSTEME

- A marée montante

En plein été (juillet-août), le pH augmente au cours de la remontée des eaux de flot vers l'écluse, il diminue ensuite dans le marais. L'élévation du pH à l'écluse peut être due à une accumulation d'eau contre la vanne permettant un début d'eutrophisation, déjà favorisé par l'augmentation de la température.

A partir du mois de septembre et durant toute la période hivernale, le phénomène s'inverse :

- les eaux de flot sont plus alcalines à l'embouchure qu'à l'écluse, et entre l'écluse et le marais le pH reste sensiblement le même. En hiver, le lessivage du sol par les eaux de crue et les précipitations entraîne une diminution du pH dans le marais, plus importante qu'à l'embouchure.

- A marée descendante

Pendant l'été, le pH augmente du marais vers l'écluse en fin de jusant et diminue à l'embouchure. En hiver, le pH est presque identique dans le marais et à l'écluse, il croît ensuite vers l'aval, et atteint une valeur de 7,55 à l'embouchure le 15.02.83, alors qu'il est de 7,3 à l'écluse.

## II - LES VARIATIONS DU pH DANS LES SYSTEMES DE CORDEMAIS ET DU DAREAU

### 1- A CORDEMAIS

Les variations au cours d'un cycle de marée sont peu importantes, et se résument à une légère augmentation en flot provoquée par la remontée des eaux estuariennes. Les variations saisonnières montrent une particularité : les eaux de l'étier et du marais sont neutres ou légèrement alcalines en hiver (Février) et faiblement acides en été (Septembre), malgré la pénétration des eaux estuariennes alcalines (fig V.5). Cette acidité peut être due aux rejets de la Centrale Thermique de Cordemais.

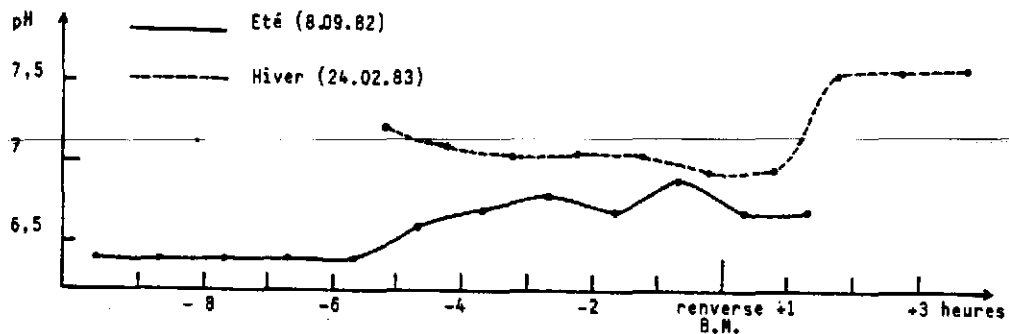


Fig. V.5 - Variations tidales du pH.

### 2 - AU DAREAU

Au cours du cycle tidal, nous observons une augmentation du pH entre le flot et le jusant comme dans les étiers de Lavau et de Cordemais (fig V.6).

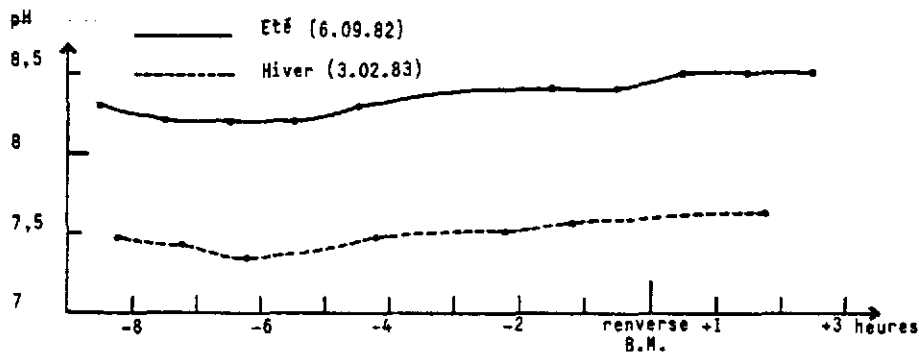


Fig. V.6 - Variations tidales du pH.

Les variations saisonnières sont nettes : le pH est plus élevé en été, pouvant atteindre 8,5 en flot en Septembre et 8,3 dans le marais, alors qu'il est de 7,6 en hiver dans tout le système.

### III - CONCLUSION

Les variations du pH dans les étiers sont dues essentiellement à l'antagonisme entre les eaux légèrement acides des marais (eaux de lessivage des sols, pluies) et les eaux alcalines de l'estuaire, mais en été, la photosynthèse, favorisée par un éclaircissement intense, intervient également pour l'augmentation du pH, ainsi que la forte production de  $NH_4$  sur les vasières.

\*\*\*\*\*

*CHAPITRE VI*

*Les matières en suspension*

DATES		F.F. %	F.G. %	CO <sub>2</sub> Ca %	PERTE AU FEU	
					450°	900°
28.04.82	B.M.	99	1	9,8	9,5	17,4
	P.M.	100	0	10,3	10,8	16,7
24.05.82	B.M.	99	1	6,6	12,6	20,6
	P.M.	100	0	5,7	16,2	26,1
25.06.82	B.M.	100	0	10,0	9,9	20,5
	P.M.	100	0	5,8	13,9	21,9
20.08.82	B.M.	96	4	6,8	13,5	20,7
	P.M.	100	0	5,5	10,3	20,2
17.09.82	B.M.	97	3	9,5	11,8	18,6
	P.M.					
19.10.82	B.M.	98	2	7,3	7,4	14,4
	P.M.	100	0	7,2	11,5	24,7
15.11.82	B.M.	98	2	7,9	8,7	16,4
	P.M.	100	0	5,8	11,2	20,3
18.01.83	B.M.	100	0	8,2	10,2	18,7
	P.M.	100	0	8,8	10,2	20,3
15.02.83	B.M.	100	0	8,8	11,6	18,9
	P.M.	100	0	4,3	13,3	21,3
17.03.83	B.M.	100	0	6,5	10,6	20,8
	P.M.	100	0	5,9	8,2	18,9
14.04.83	B.M.	100	0	5,5	9,4	16,3
	P.M.	100	0	4,4	13,7	21,8

Tableau VI.1 - Nature des M.E.S.

## I - NATURE DES M.E.S. DANS LE SYSTEME DE LAVAU

Nous étudions les matières en suspension (M.E.S.) à B.M. et à P.M. sur un cycle annuel.

### 1 - FRACTION FINE / FRACTION GROSSIERE (tableau VI.1)

- Les M.E.S., recueillies par décaiftation, présentent toujours des valeurs très élevées de particules fines : 100 % à pleine mer et entre 96 % et 100 % à basse mer. La remise en suspension des sables fins est favorisée à basse mer par les courants violents de fin de jusant et la très faible profondeur.
- La médiane, sur les sédiments défloculés, montre pour les M.E.S. des particules très fines : de 0,8 à 1  $\mu$ m. (fig VI.1).

### 2 - TENEURS EN CARBONATES (tableau VI.1)

Les teneurs en carbonates varient de 4 à 10,5 %. Les valeurs à basse mer sont généralement supérieures à celles de pleine mer de 0,1 à 2 %, soit une augmentation de l'ordre de 3 à 20 %. Cette augmentation des carbonates à basse-mer contribue à une meilleure mobilité des sédiments fins dans l'étier. Les ostréiculteurs utilisent la méthode de l'épandage de craie ou de  $\text{CaCO}_3$  pour lutter ainsi contre l'envasement des claires et des parcs à huîtres (FEUILLET M., GOULEAU D., 1977). Les teneurs en carbonates, à B.M., sont plus élevées du printemps à l'été (de l'ordre de 8,5 %) qu'en automne et en hiver (de l'ordre de 7,4 %). Ces teneurs plus fortes résultent peut-être de la précipitation des carbonates dissous sous l'action de l'eutrophisation (MANICKAM S. 1982).

### 3 - PERTES AU FEU (tableau VI.1)

- à 450 ° C

Elles varient de 7,3 à 16,2 % au cours de l'année. On observe une diminution nette entre les valeurs à P.M. et celles à B.M., pouvant atteindre 36 % (par exemple : de 11,5 à 7,3 le 19.10.82). Cette diminution importante traduit la consommation de la matière organique par les microorganismes et la minéralisation sur les vasières.

- à 900 ° C

Ces pertes au feu correspondent aux matières volatiles, aux carbonates et à la destruction des complexes, des hydroxydes, etc... Elles varient de 14,4 % à 26,10 %, soit presque le double de celles à 450 ° C, ce qui correspond à un phénomène général dans l'estuaire et la Loire (MANICKAM S., 1983). Elles ne présentent pas de variations saisonnières particulières.

### 4 - LES MINERAUX ARGILEUX

Les minéraux argileux types de la Loire maritime sont l'illite, la kaolinite, la montmorillonite, la chlorite. Les minéraux accidentels sont la pyrophyllite, l'halloysite, la méthalloysite ainsi que les interstratifiés (GALENNE B., 1974). Nous n'étudierons que l'illite, la kaolinite et la montmorillonite qui représentent presque la totalité des minéraux argileux.

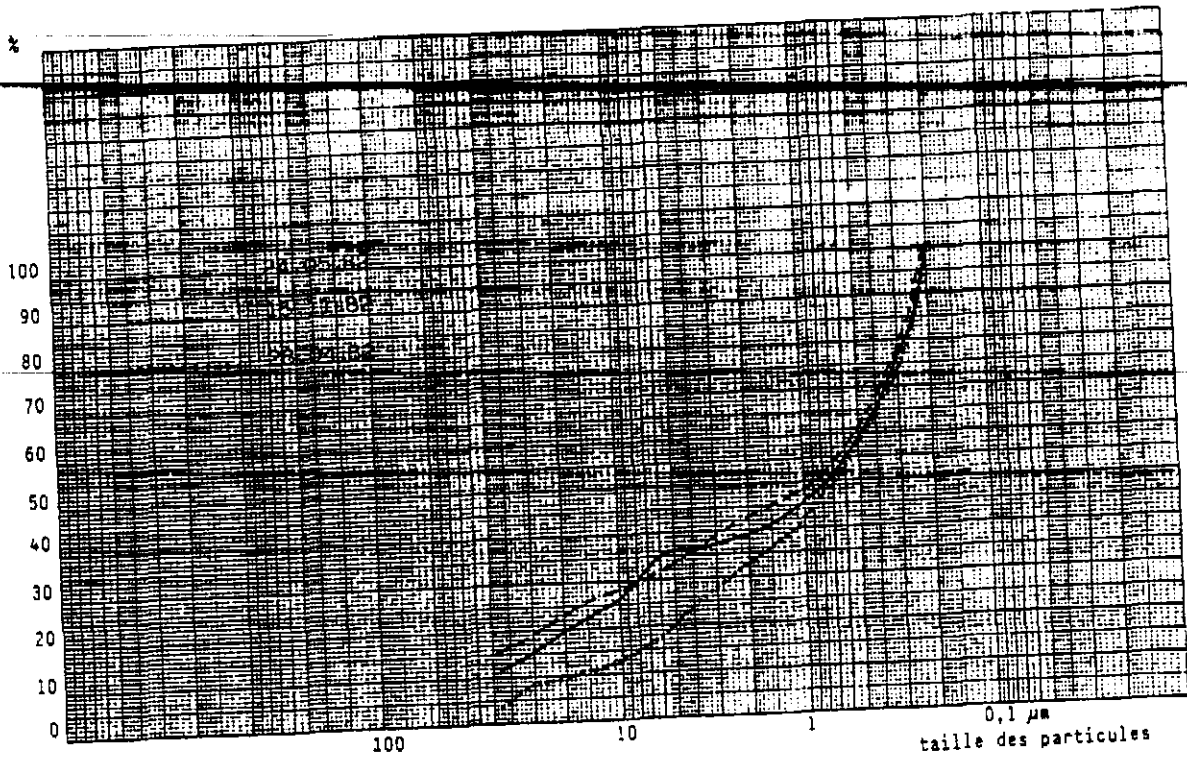


Fig. VI.1 - Courbes granulométriques des matières en suspension à l'embouchure de l'étier de Lavau.

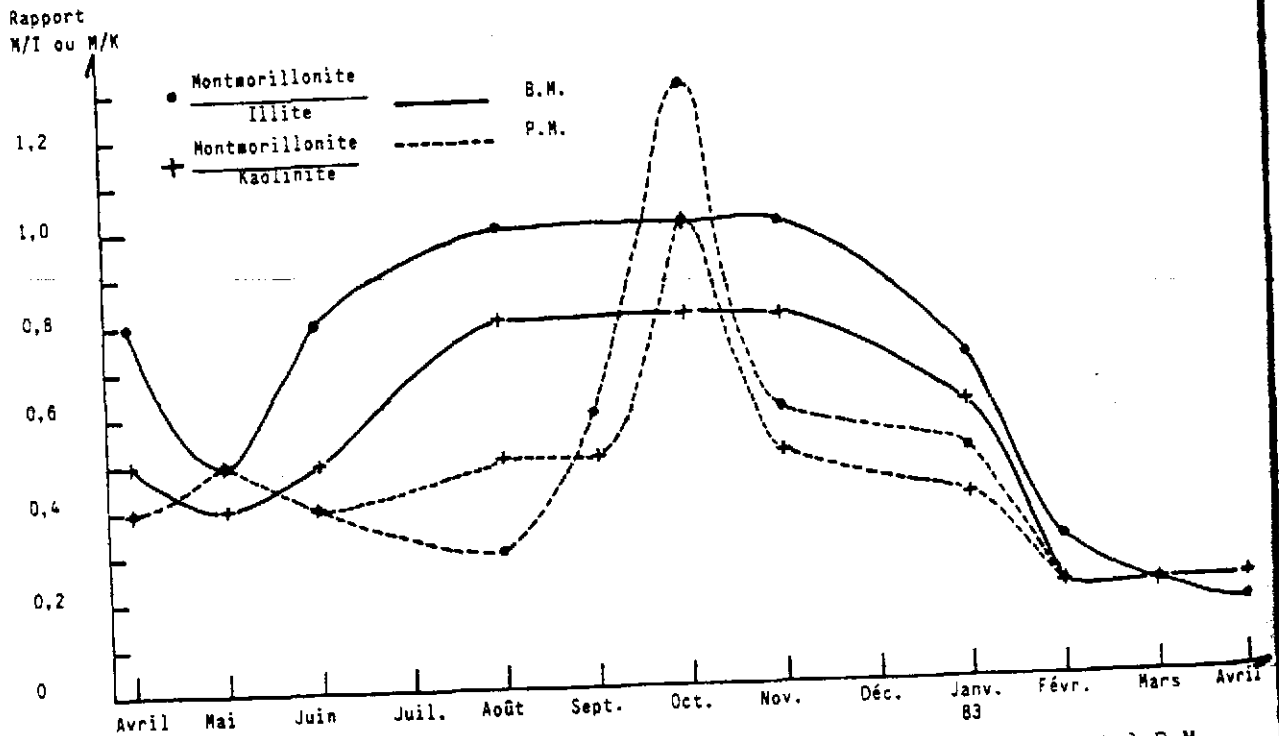


Fig. VI.2 - Variations saisonnières des rapports M/I et M/K à B.M. et à P.M.



- Les quantités relatives des minéraux argileux

Nous avons calculé les pourcentages respectifs des principaux minéraux argileux présents dans l'étier à B.M. et à P.M. pour toute une année à partir des diagrammes des rayons X (tableau VI.2).

DATES	28.04.82		24.05.82		25.06.82		20.08.82		17.09.82		19.10.82		15.11.82		18.01.83		15.02.83		17.03.83		14.04.83	
	B.M	P.M	B.M	P.M	B.M	P.M	B.M	P.M	B.M	P.M	B.M	P.M	B.M	P.M	B.M	P.M	B.M	P.M	B.M	P.M	B.M	P.M
Kaolinite	45	42	45	38	45	43	39	34			42	40	43	40	41	47	44	56	46	46		42
Illite	31	42	37	42	31	41	31	49			36	29	34	29	37	38	36	34	46	44		51
Montmorillonite	24	16	18	20	24	16	30	17			21	31	23	31	22	27	19	10	8	10		1

Tableau VI.2 - Les pourcentages des minéraux argileux.

La kaolinite (34 à 56 %) est généralement mieux représentée que l'illite (29 à 51 %) et nettement plus abondante que la montmorillonite (7 à 43 %).

Les pourcentages de kaolinite et de montmorillonite sont plus faibles à P.M. qu'à B.M., ce qui indique une exportation de ces argiles de l'étier vers la Loire.

Les pourcentages d'illite sont, par contre, plus importants à P.M. qu'à B.M.: ceci correspond à un apport d'illite de la Loire. Ainsi, alors que l'illite est retenue par les vasières, la kaolinite et la montmorillonite sont expulsées.

- Les rapports M/I et M/K

Après avoir établi les pourcentages respectifs de la kaolinite, l'illite, et la montmorillonite à B.M. et à P.M., nous calculons les rapports montmorillonite/illite et montmorillonite/kaolinite pour chaque prélèvement. Nous suivons ainsi l'évolution de ces rapports pour toute l'année à B.M. et à P.M. (fig VI.2).

Le rapport M/I varie entre 0,2 et 1 à B.M. et entre 0,2 et 1,3 à P.M., mais il est généralement supérieur à B.M. : la montmorillonite est expulsée à B.M. préférentiellement à l'illite.

Le rapport M/K varie entre 0,2 et 0,8 à B.M. et entre 0,2 et 1 à P.M., mais il est supérieur à B.M. de façon générale. Nous retrouvons le même phénomène que pour le rapport M/I, la kaolinite étant expulsée en plus faible quantité que la montmorillonite à B.M. Ainsi le comportement de la kaolinite et de l'illite par rapport à la montmorillonite est comparable, mais contrairement aux observations de BOUTELIER P. (1979) sur la rose-lière, l'illite et la kaolinite sont retenues plus facilement sur les vasières que la montmorillonite. En effet, la montmorillonite ayant des cristaux plus fins que les deux autres minéraux argileux, elle reste plus longtemps en suspension que l'illite et la kaolinite. GALENNE B. (1974) a déjà montré ce phénomène dans la Loire où la montmorillonite se concentre dans les sédiments en suspension, au niveau des vasières latérales et du toit de la crème de vase quand elle est présente.

Au cours de l'année, les rapports sont assez constants ( de l'ordre de 0,5 à 1), excepté en hiver où l'on observe une diminution très nette (les rapports variant de 0,15 à 0,3) qui indique que la kaolinite et l'illite augmentent relativement à la montmorillonite.

5 - CONCLUSIONS

Les particules fines (de 0,8 à 1 µm) sont toujours très élevées ( 96 %) dans l'étier. La mobilité des sédiments fins est favorisée à B.M. par des courants forts, la très faible profondeur et des teneurs en carbonates plus importants qu'à P.M.

La matière organique diminue à B.M. par suite de la consommation par les microorganismes et de la minéralisation sur les vasières.

Parmi les principaux minéraux argileux, la montmorillonite est moins abondante dans l'étier que l'illite et la kaolinite, puisqu'elle est facilement expulsée vers la Loire.

## II - LES VARIATIONS DES M.E.S. DANS LE SYSTEME DE LAVAU

Nous étudierons les variations des M.E.S dans le système étier-marais au cours d'un cycle de marée, puis sur un cycle annuel, du point de vue qualitatif et quantitatif. L'accent sera mis sur les résultats obtenus à l'embouchure puisque, nous le verrons ultérieurement, c'est à ce point là que les variations sont les plus importantes.

### 1 - LE CYCLE TIDAL

#### 1.1 - VARIATIONS DES M.E.S AU COURS D'UN CYCLE TIDAL

##### 1.1.1 - A l'embouchure (fig VI.3 -VI.4)

A l'instar de GOULEAU D. (1975) et de BOUTELIER P. (1979), nous traçons des courbes d'isoturbidités à partir des prélèvements horaires. Celles-ci mettent en évidence une nette stratification au cours du cycle de marée, les eaux de surface étant beaucoup moins turbides que les eaux de fond.

- en jusant

Dans l'heure suivant la renverse de P.M., les courants entraînent une remise en suspension des sédiments déposés pendant la renverse de P.M. Au cours des deux ou trois dernières heures de jusant, les turbidités sont importantes sur toute la tranche d'eau : ceci est dû à une hauteur d'eau très faible et à des courants plus forts en fin de jusant. Le 22.07.82, les turbidités sont comprises entre 6 et 7 g/l sur toute la tranche d'eau ; le 15.02.83, elles sont de 6 g/l au fond et de 3,5 g/l en surface. A la renverse de B.M., l'absence de courant entraîne une décantation des M.E.S.

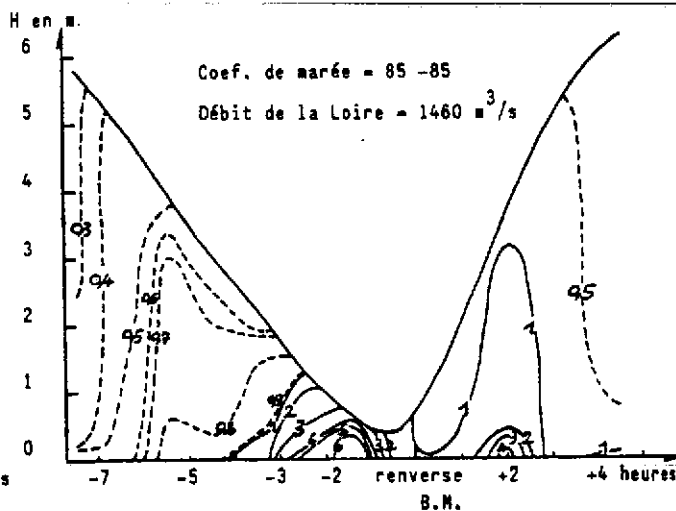
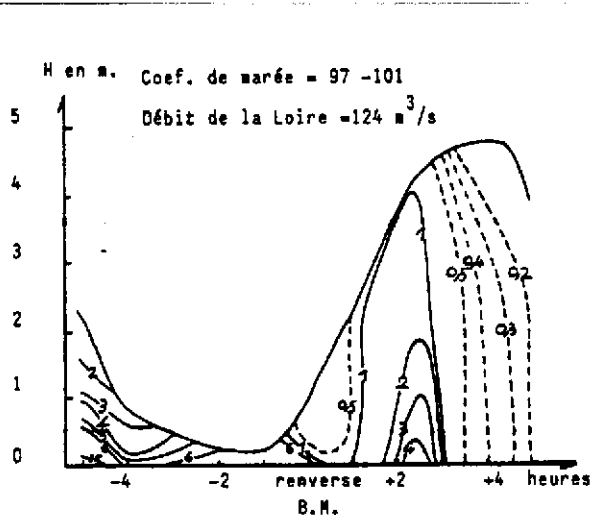


Fig. VI.3 - Diagramme d'isoturbidité (22.07.82)

Fig. VI.4 - Diagramme d'isoturbidité (15.02.83)

- en flot

Une demi-heure environ après la renverse de B.M., nous observons une remise en suspension des sédiments déposés lors de la renverse, et une décantation s'amorce généralement deux heures avant la renverse de P.M. grâce à la décélération du flot. La décantation devient maximale lorsque les courants s'annulent à la renverse de P.M.:

### 1.1.2 - à la Taillée

En flot, nous notons une remise en suspension qui se prolonge pendant deux heures environ, suivie d'une décantation atteignant son maximum à la renverse de P.M.

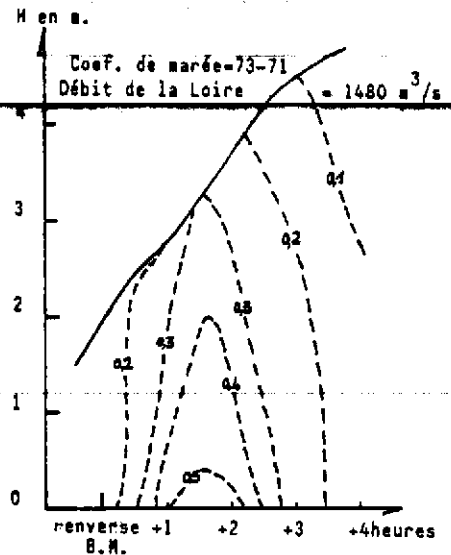


Fig. VI.5 - Diagramme d'isoturbidité (18.01.83)

### 1.1.3 - A L'écluse

- en jusant

Nous observons peu de variations des turbidités, excepté dans l'heure suivant l'ouverture des clapets ou de la vanne métallique de l'écluse : le 24.05.82, les turbidités augmentent de 0,05 à 1,55 g/l après l'ouverture de l'écluse (fig VI.6).

- en flot (fig VI.7)

Tout au long de l'année, après la renverse de B.M., nous remarquons une augmentation de la turbidité provoquée par le retour d'eau dans l'étier. Elle est particulièrement importante en été, lorsque, la vanne fermée, l'étier s'est totalement vidé à l'écluse de (0,02 à 0,48 g/l le 17.09.82). Cette augmentation a pour origine les M.E.S. sédimentés à l'embouchure, où le flot beaucoup plus puissant qu'à l'écluse remet en suspension les vases décantées lors de la renverse jusant-flot ; une partie de ces vases est amenée, lors de la marée montante jusqu'à l'écluse où se produit une décantation très rapide lorsque l'écluse est fermée. Par contre, si l'écluse est ouverte comme le 24.05.82, la turbidité s'accroît progressivement pendant le flot jusqu'à la fermeture de l'écluse.

## 1.2 - FACTEURS ENTRAINANT LES VARIATIONS DES M.E.S. AU COURS D'UN CYCLE TIDAL

### 1.2.1 - LES COURANTS DE MAREE

- A l'embouchure

Nous avons évoqué les courants au cours de l'étude des variations des M.E.S. pendant un cycle de marée. Il est alors intéressant de relier les quantités de sédiments transportées avec les courants. Les courbes des courants et l'histogramme des M.E.S. transportées à l'embouchure en période d'étiage (fig VI.8), et en période de crue (fig VI.9), montrent des périodes de décantation et de remise en suspension.

La remise en suspension

Elle se produit :

- une heure après la renverse jusant-flot, atteignant un maximum à mi-flot,
- une à deux heures après la renverse flot-jusant.

(parfois une augmentation des M.E.S. a lieu une à deux heures avant la renverse de B.M. sous l'action des courants plus forts pour un volume d'eau plus faible).

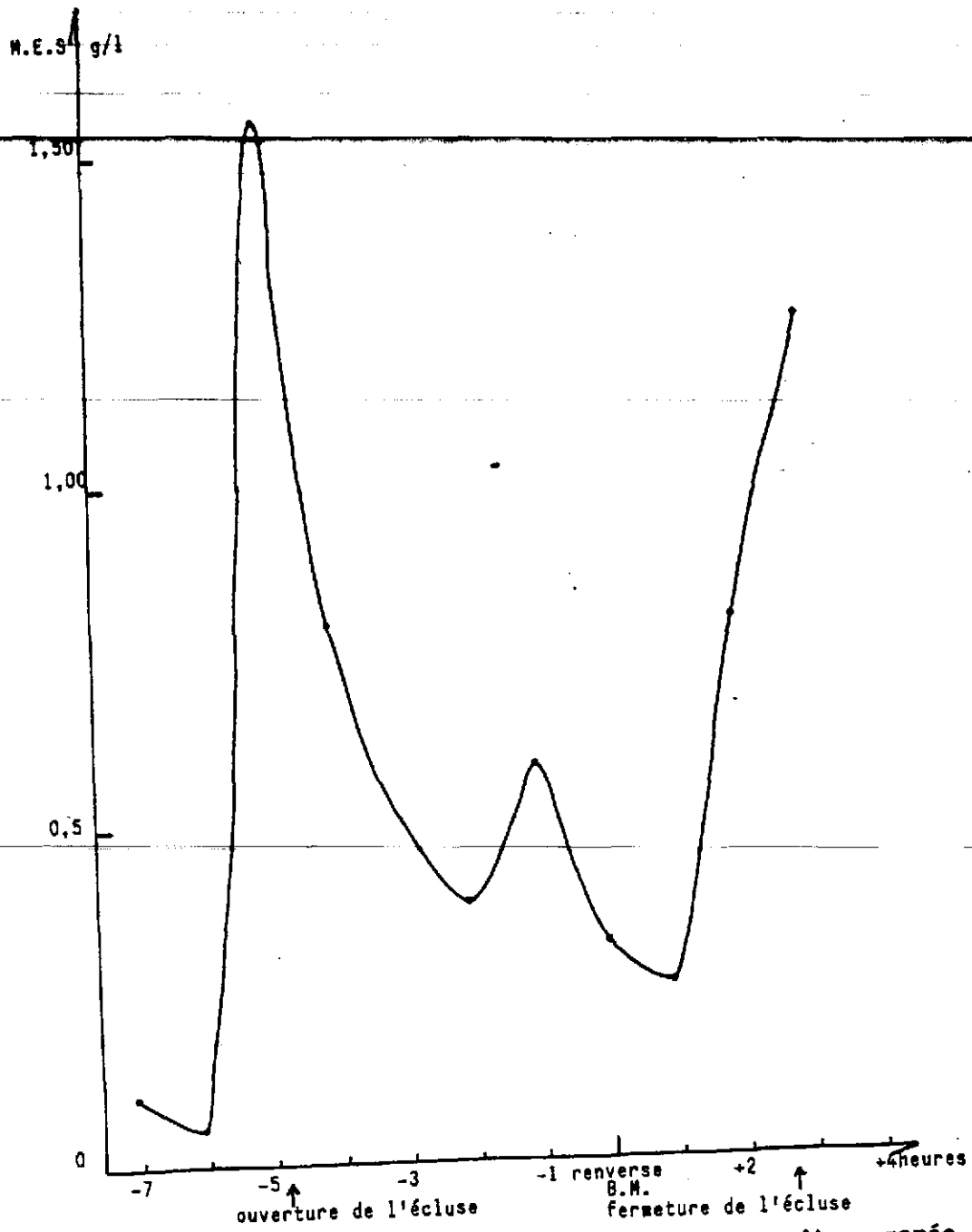


Fig. VI.6 - Variations des M.E.S. au cours d'une marée (24.05.82)

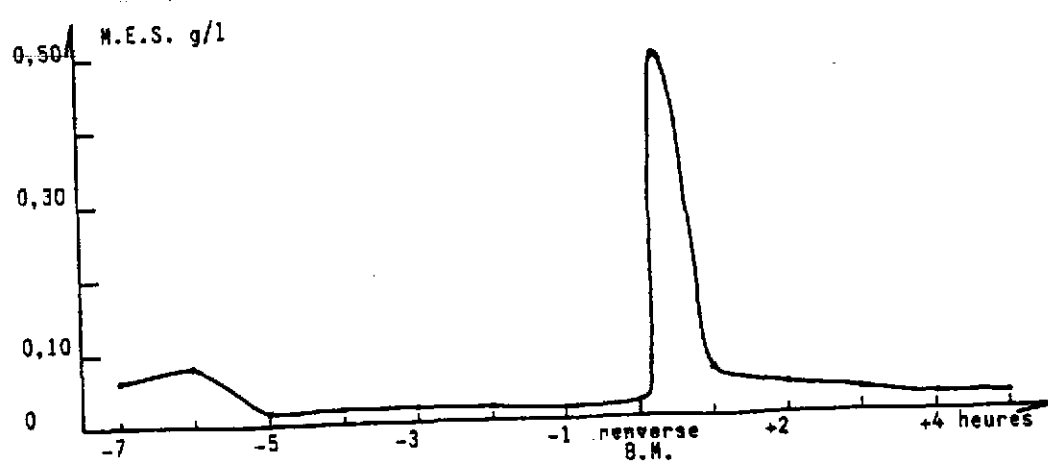


Fig. VI.7 - Variations des M.E.S. au cours d'une marée (17.09.82)

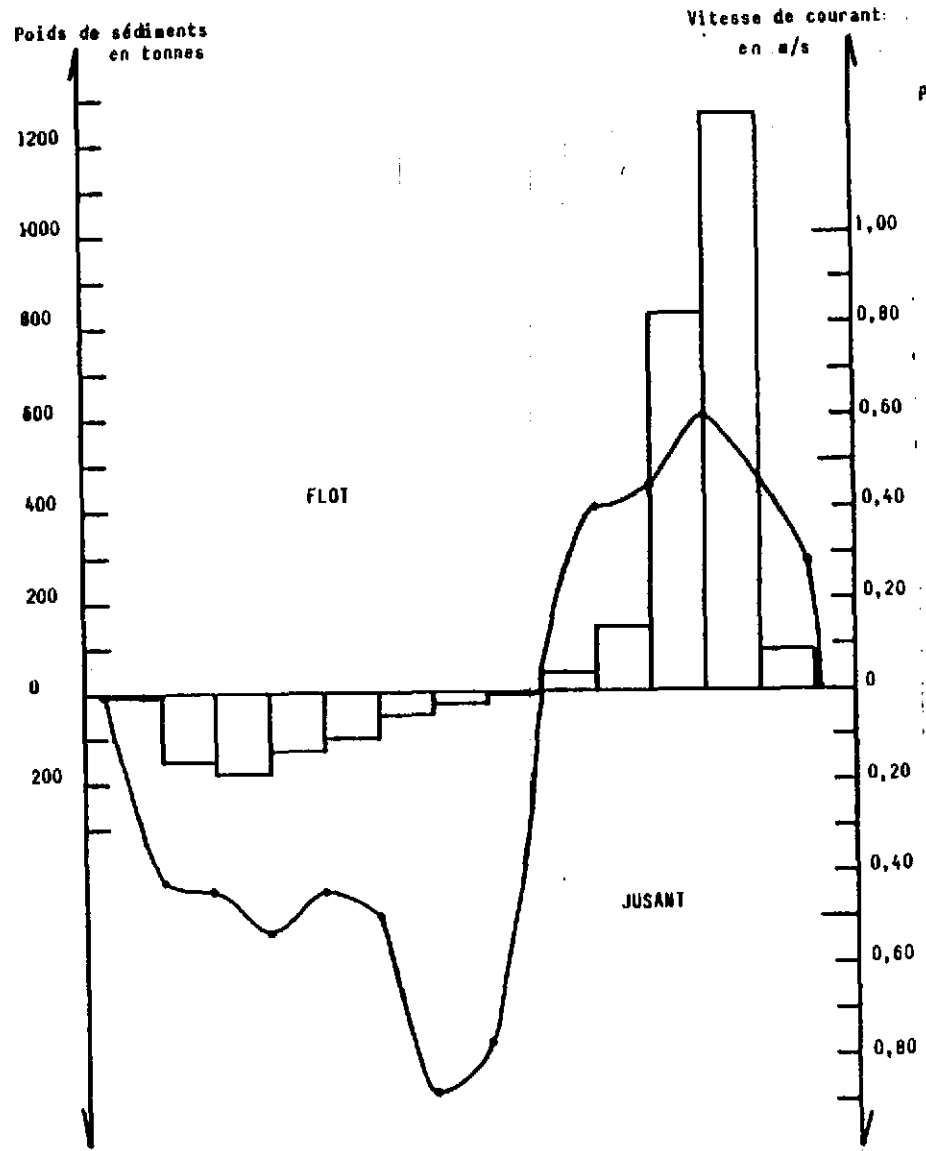


Fig. VI.8 - Relation entre transport des sédiments et vitesse de courant en période d'étiage (17.09.82)

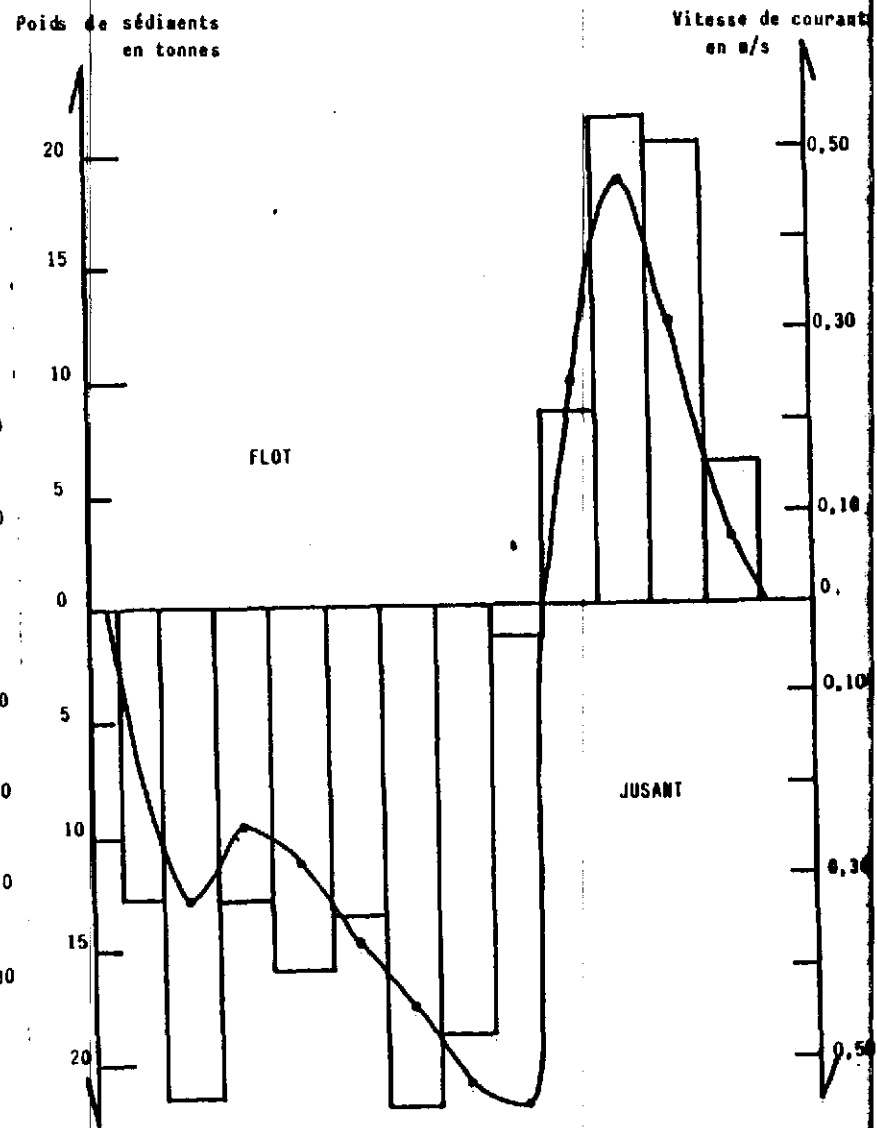


Fig. VI.9 - Relation entre transport des sédiments et vitesse de courant en période de crue (14.04.1983)

Elle résulte de :

- la dilution de la vase tapissant le fond du chenal de l'étier,
- l'érosion de la couche superficielle des sédiments récemment déposés sur les vasières,
- l'effondrement d'une partie de la haute slikke en fin de jusant (photo 8).

Si les turbidités, exprimées en g/l, sont maximales lorsque les courants sont les plus forts, en flot et en jusant, les quantités de M.E.S transportées ne sont pas liées à la vitesse du courant. En effet, en fin de jusant, les turbidités (en g/l) sont très élevées alors que les volumes des eaux sont extrêmement réduits. Les quantités de sédiments transportées sont donc très faibles en fin de jusant malgré des teneurs élevées. BOUTELIER P. (1979) fait déjà cette observation dans l'étier irriguant la roselière de l'île Chevalier.

#### La décantation

Au moment des renverses de courants, les M.E.S décantent puisqu'il n'y a plus de filets d'eau turbulents ou "fluid supported" pour maintenir les sédiments en suspension, comme l'ont constaté BERTHOIS L. (1964) en Loire, et ALLEN G.P. (1972) en Gironde. La décantation est maximale après l'étale de P.M., lors de la renverse flot-jusant. Ce décalage entre l'étale de P.M. et la décantation maximale, décrit par VAN STRAATEN L.M. et KUENEN P.H. (1957) sur le littoral hollandais, est observé par GOULEAU D. (1975) et BOUTELIER P. (1979) sur les vasières atlantiques et estuariennes.

#### - A L'écluse

Les courants de marée sont liés à l'ouverture ou à la fermeture de l'écluse. Celle-ci modifie, en effet, la vitesse des courants et donc le transport des sédiments.

- L'ouverture des clapets, sous la poussée des eaux du marais deux à trois heures après la P.M., augmente la turbidité par accroissement de la vitesse du jusant,

- la fermeture des clapets, en flot, engendre une diminution considérable du courant qui est de plus en plus marquée à l'approche de l'écluse, et a pour conséquence la décantation rapide des M.E.S.

Ainsi le rôle de l'écluse se manifeste :

- lors de la fermeture en diminuant la pénétration des M.E.S. dans le marais,
- lors de l'ouverture des clapets en augmentant le pouvoir d'érosion du jusant dans l'étier, ce qui est un des buts recherchés,
- lors de l'ouverture de la vanne qui provoque une chasse d'eau nécessaire pour éroder les sédiments accumulés au cours du temps.

C'est d'ailleurs ce système de chasse qui, s'il était fréquemment appliqué, assurerait le dévasage de l'étier.

#### 1.2.2 - L'émersion

Nous avons vu dans le chapitre "Hydrodynamique" que le marnage à l'embouchure variait en fonction du coefficient de marée et du débit fluvial. Ces deux facteurs interviennent donc, dans la durée d'émersion et l'extension des surfaces émergées des vasières de l'étier. GOULEAU D. (1975) démontre le rôle primordial de l'émersion, qui favorise la fixation des sédiments grâce à la diminution de la teneur en eau de la pellicule superficielle soit par écoulement; soit par évaporation. Ceci implique, par conséquent, pour la remise en suspension, la nécessité de courants plus intenses que dans les zones immergées. D'autre part, plus l'émersion est longue et plus la remise en suspension des sédiments est difficile. C'est ainsi que la vase la mieux stabilisée de la partie haute des slikkes, n'est remise en suspension que lors de grandes crues ou de tempêtes.

#### 1.2.3 - Le bouchon vaseux

Le bouchon vaseux de la Loire lorsqu'il est situé légèrement en aval de l'étier devrait entraîner une augmentation des M.E.S. pendant le flot. Nous étudierons cela plus en détail dans le cycle annuel.

### 1.3 - CONCLUSION SUR LE CYCLE TIDAL

D'une manière générale, nous observons dans l'étier :

- la décantation des M.E.S. aux renverses de B.M et de P.M. avec un maximum à celle de P.M., se prolongeant pendant une à deux heures après la renverse flot-jusant, et renforcées par la fermeture de l'écluse en amont,

- la remise en suspension en flot et en jusant dès que le seuil de la vitesse critique d'érosion est dépassé et tant que la vitesse critique de dépôt n'est pas atteinte (ALLEN G.P. (1972) - GOULEAU D. (1975).

Le décalage, entre le moment où le courant devient insuffisant pour le transport des particules, et celui où se déclenche la chute des particules sur le fond à la renverse, est appelé "settling lag effect" par VAN STRAATEN L.M. et KUENEN P.H (1957). Ils décrivent également une différence entre les vitesses de courant maximales permettant la sédimentation des particules en suspension et les vitesses minimales qui entraînent l'érosion du même matériel sur les vasières. Ce phénomène, le "scour lag effect" provoque une accumulation de sédiments sur les vasières. Dans l'étier de Lavau, ce processus ne se produit, qu'en été (août-septembre) où l'on note un piégeage des sédiments de 447 tonnes le 20.08.82 et de 1663 tonnes le 17.09.82 (cf. Bilan sédimentaire). Pendant le reste de l'année, la réserve d'eau accumulée dans le marais, et libérée au cours de la marée descendante, accélère les courants, facilitant la remise en suspension des vases et leur expulsion vers la Loire. Les processus de décantation et de remise en suspension sont liés également à l'émersion qui permet la fixation des sédiments décantés pendant le jusant sur les vasières.

## 2 - LE BILAN SEDIMENTAIRE SAISONNIER

La seule approche pratique pour l'étude saisonnière des M.E.S. dans l'étier est de faire un bilan sédimentaire au cours de chaque cycle de marée observé.

### 2.1 - METHODE DE CALCUL DES BILANS SEDIMENTAIRES DANS L'ETIER

Nous reprenons la méthode déjà utilisée pour les volumes d'eau. Toutefois, étant donné la stratification des M.E.S., nous séparons la tranche d'eau arbitrairement en trois tranches (de 0 à 1,00 m - de 1,00 m à 2,50 m - de 2,50 m à la hauteur maximale).

Nous multiplions, ensuite, les turbidités moyennes horaires obtenues par les flux écoulés correspondants. Nous obtenons ainsi le tonnage des M.E.S. transitant dans l'étier, par cycle de marée.

### 2.2 - INTERPRETATIONS DES OBSERVATIONS

#### 2.2.1 - A l'embouchure

Les résultats donnés dans le tableau VI.3 et exprimés sur la figure VI.10 mettent en évidence certains facteurs.

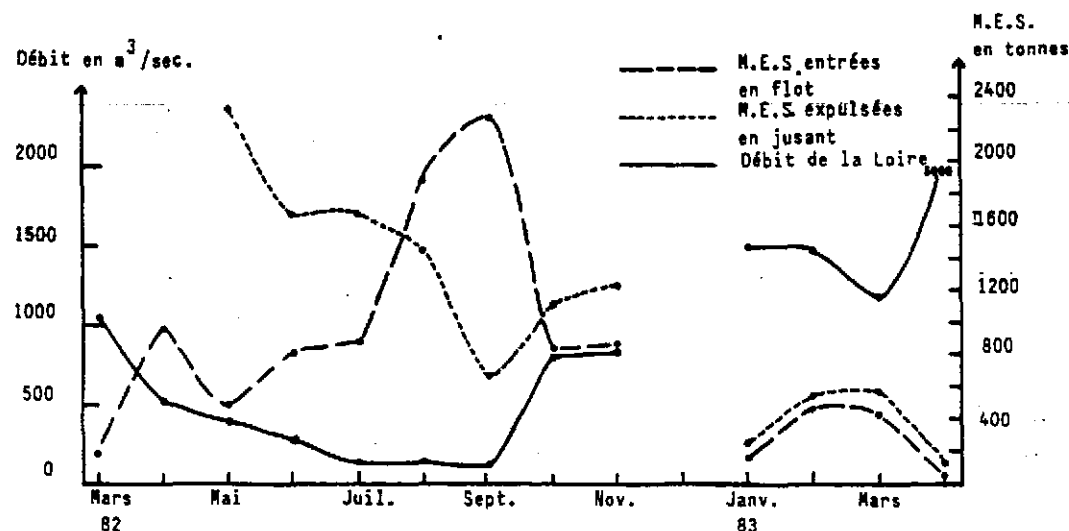


Fig. VI.10 - Variations des quantités de M.E.S. transportées en flot et en jusant, et des débits de la Loire, sur un cycle annuel.

Dates	Coeff.	Débits de la LOIRE en m <sup>3</sup> /sec	Volume d'eau entré en flot en m <sup>3</sup>	Volume d'eau sorti en jusant en m <sup>3</sup>	Volume total d'eau - entré + sorti en m <sup>3</sup>	M.E.S. en T.		Bilan des MES sorties en tonnes
						Flot	Jusant	
29.03.82	96-90	1060	343 206			209		
28.04.82	82-74	525	323 774			977		
24.05.82	105-104	400	1 058 526	1 178 832	+ 120 306	499	2421	+ 1922
25.06.82	86-81	282	535 364	645 457	+ 110 093	834	1676	+ 845
22.07.82	99-99	135	934 869	589 682	- 345 187	889	1860	+ 971
20.08.82	102-103	145	1 059 025	780 813	- 218 212	1905	1458	- 447
17.09.82	97-101	124	857 479	563 120	- 294 359	2340	677	- 1663
19.10.82	94-90	790	1 339 003	1 663 980	+ 324 977	847	1114	+ 268
15.11.82	89-90	825	954 978	983 017	+ 28 039	864	1234	+ 370
18.01.83	73-71	1480	388 377	750 531	+ 362 154	161	248	+ 87
15.02.83	85-85	1460	576 141	786 906	+ 210 765	466	556	+ 90
17.03.83	93-92	1170	818 550	857 245	+ 38 895	4833	571	+ 138
14.04.83	96-97	5060	466 151	678 109	+ 211 958	57	122	+ 65

Tableau VI.3 - A l'embouchure .

Dates	Coeff.	Débits de la LOIRE en m <sup>3</sup> /sec	Volume d'eau entré dans le marais en m <sup>3</sup>	Volume d'eau sorti du marais en m <sup>3</sup>	Volume total d'eau - entré + sorti en m <sup>3</sup>	M.E.S. en T.		Bilan des MES sorties du marais en tonnes
						Flot	Jusant	
10.02.82	100-99	1325	0	47 988	47 988	0	1,60	+ 1,6
24.05.82	105-104	400	52 534	70 458	17 924	44	54	+ 10
16.12.82	78-78	3600	0	84 591	84 591	0	3,5	+ 3,5

Tableau VI.4 - A l'écluse.

Bilans hydriques et sédimentaires au cours d'un cycle de marée.



### 2.2.1.1 - les facteurs climatiques

En flot, les variations des M.E.S. entrant dans l'étier suivent apparemment celles du débit de la Loire, d'une façon inverse : plus le débit est faible, plus les quantités de M.E.S. pénétrant dans l'étier sont importantes.

C'est ainsi qu'au mois de septembre, nous notons pour un débit de Loire de 124 m<sup>3</sup>/s, le bilan sédimentaire le plus élevé de tout le cycle annuel étudié (2340 tonnes). En fait, ce sont les facteurs climatiques qui réduisent, en étiage, aussi bien le débit de la Loire que l'évacuation des eaux du marais et augmentent la turbidité dans l'estuaire.

En jusant, les quantités de M.E.S. transitant dans l'étier varient de façon analogue aux débits de la Loire. La diminution des débits provenant du marais, simultanée avec la diminution des débits de Loire, entraîne une baisse des volumes d'eau et des sédiments transportés. Le 17.09.82, la quantité de sédiments expulsée en jusant est de 677 tonnes pour un débit de Loire de 124 m<sup>3</sup>/s, alors que le 24.05.82, elle est de 2421 tonnes pour un débit de Loire de 400 m<sup>3</sup>/s. Cependant, de janvier à avril 1983, ceci ne se vérifie pas, les quantités de M.E.S. expulsées restant peu élevées malgré des débits à 1000 m<sup>3</sup>/s. En avril notamment, nous remarquons que seulement 122 tonnes de sédiments sont rejetées en Loire pour un débit de 5060 m<sup>3</sup>/s. Il est probable qu'en hiver, la diminution des échanges sédimentaires entre la Loire et l'étier, et d'autre part une érosion régulière mais peu intense à chaque cycle de marée soit à l'origine des faibles quantités expulsées en Loire.

### 2.2.1.2. - le bouchon vaseux

La position du bouchon vaseux dans la Loire varie selon les coefficients de marée et les débits de la Loire. Etant donné que nous avons généralement travaillé avec des coefficients de vives-eaux, le débit devient le facteur le plus important pour notre étude. GALLENNE B. (1974) décrit la position du bouchon vaseux en fonction du débit de la Loire : celui-ci se maintiendrait dans la région de Lavau pour des débits compris entre 200 et 1000 m<sup>3</sup>/s. D'après LE DOUAREC P. (1978), le bouchon vaseux occupe pratiquement tout l'estuaire interne en amont de Cordemais, lors des coefficients de vives-eaux, en période d'étiage (< 350). On devrait donc avoir le 24.05.82, avec un débit de 400 m<sup>3</sup>/s, une forte quantité de sédiments, due au bouchon vaseux, pénétrant dans l'étier. Par contre, le 17.09.82, le débit n'étant que de 124 m<sup>3</sup>/s et le bouchon vaseux situé en amont de Lavau, la quantité de sédiments pénétrant dans l'étier devrait être faible. Or, nous observons le phénomène inverse : le 24.05.82, il rentre 499 tonnes de sédiments dans l'étier pour 2340 tonnes le 17.09.82. Il semble donc que le bouchon vaseux ne soit pas à l'origine des apports sédimentaires dans l'étier au cours du flot. Cependant, des conditions hydrodynamiques particulières dans l'inflexion Donges-Paimboeuf, entraînent une agitation des eaux et des turbidités élevées qui pourraient remplacer celles du bouchon vaseux (BOUVELIER, P., 1979).

### 2.2.1.3 - influence des vasières (photos 9, 10 et 11)

Les vasières au Sud des îles Lavau, Pipy et Pierre-Rouge sont bien développées sur la rive Nord de la Loire, sur une largeur de 400 m environ. Les bras morts et les étiers qui séparent ces îles sont également bordés de vasières. Dans l'étier de Lavau à marée basse de vives-eaux, les vasières émergées occupent toute la surface de l'étier, hormis le chenal d'environ 1 m de large, sur une largeur de 60 m à l'embouchure. Par conséquent, les vasières sont particulièrement étendues dans la zone de l'étier de Lavau, et sont en grande partie à l'origine des quantités de sédiments transportées en flot dans l'étier. En effet, lors des coefficients de vives-eaux, les courants de flot sont forts, et érodent facilement les vasières. Cette érosion ou remise en suspension est d'autant plus remarquable qu'une grande quantité de sédiments a décanté lors du jusant. Or, nous l'avons vu précédemment, la sédimentation est particulièrement importante en été (août-septembre) où une quantité considérable de sédiments reste piégée sur les vasières (447 tonnes le 20.08.82 - 1663 tonnes le 17.09.82).

### 2.2.2 - A l'écluse

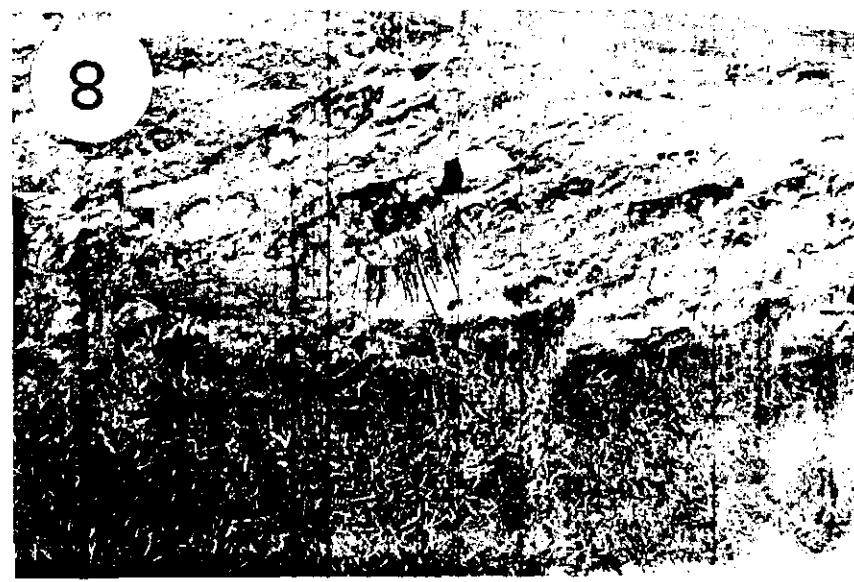
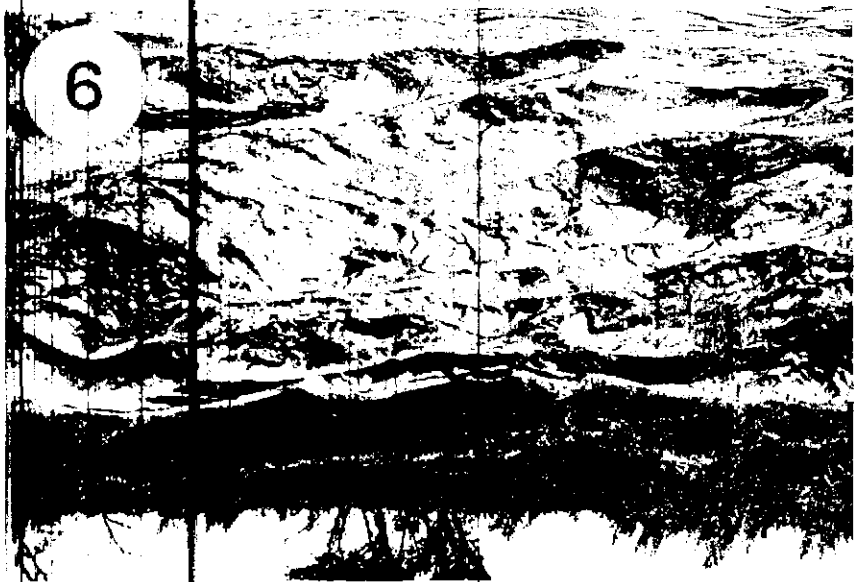
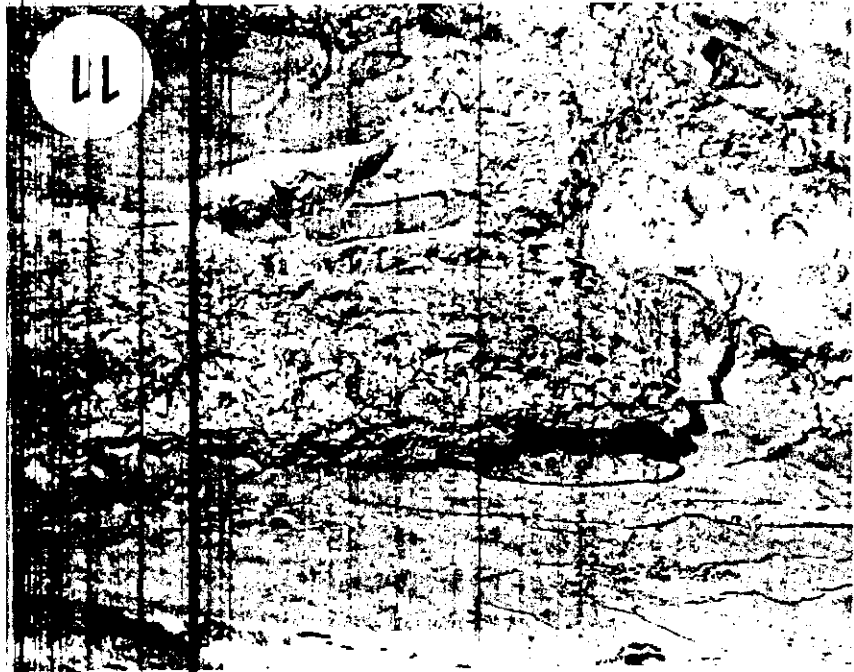
Le bilan sédimentaire est impossible à faire sur une année pour les mêmes raisons que le bilan hydrique. Nous donnons cependant quelques résultats dans le tableau VI.4.

La quantité de M.E.S. est très faible comparée aux tonnages obtenus à l'embouchure. En hiver, il sort plus de 200 tonnes de sédiments en jusant à l'embouchure, alors qu'il n'en sort qu'une à trois tonnes environ du marais. L'écoulement des eaux claires du Sillon de Bretagne dans le marais, et la présence de l'écluse qui freine le flot contribuent à une diminution de la turbidité des eaux de l'écluse.

Le 24.05.82, l'écluse étant restée ouverte pendant 10 heures, nous avons pu faire le bilan des sédiments entrés et sortis du marais. Nous le comparons au bilan sédimentaire à l'embouchure pour le même jour.

PLANCHE 3

- Photo 8 - Erosion de la slikke sur la rive Est à l'embouchure de l'étier de LAVAU.
- Photo 9 - Loupe d'affaissement d'environ 8 m<sup>2</sup> sur la rive Est de l'étier de LAVAU, en amont de l'embouchure.
- Photo 10 - Décrochage de la vase, en gros blocs d'environ 15 cm de hauteur, dû au courant des eaux de l'étier de LAVAU (à l'embouchure).
- Photo 11 - Microfalaise, d'environ 20 cm de hauteur, provoquée par le glissement de la vase sur des couches sous-jacentes, à l'embouchure de l'étier de LAVAU.



- en jusant : à l'embouchure: 2421 tonnes  
à l'écluse : 54 tonnes

- en flot : à l'embouchure: 400 tonnes  
à l'écluse : 44 tonnes

Entre l'écluse et l'embouchure, le rapport des tonnages passe d'un facteur 45 en jusant à un facteur 11 en flot. Ceci nous montre le rôle primordial du jusant, déjà noté dans le chapitre "Hydrodynamique", pour le bilan sédimentaire. Un apport sédimentaire considérable des vasières latérales se produit en aval de l'écluse pendant la marée descendante, alors que la marée montante, malgré l'ouverture de l'écluse, ne permet pas la remontée d'une quantité importante de sédiments. Ceci provient du fait que les eaux du marais ralentissent la progression des eaux de l'estuaire et favorisent la décantation des sédiments dans l'étier. Lorsque l'écluse est fermée, ce processus est amplifié.

### 2.3 - LE CYCLE SAISONNIER DANS LE MARAIS (tableau VI.5)

Les eaux du marais sont peu turbides puisque les moyennes des points sont comprises entre 0,007 g/l en décembre et 0,082 g/l en juillet. En hiver, la fermeture systématique de la vanne, en flot, empêche la remontée des sédiments, ce qui permet au marais de ne pas s'envaser trop rapidement. En été, nous observons en mai et en juillet des augmentations de turbidités pouvant atteindre jusqu'à 0,27 g/l, consécutives à des envois de marées.

Prélèvements	Dates		1982				1983	
	24.05	25.06	22.07	20.08	17.09	16.12	18.01	
Point 1	24	1	184	14	75	4	353	
Point 2	18	12	44	0	26	0	17	
Point 3	17		138	31	11	4	13	
Point 4	25	22		5	15			
Point 5	29	20	50	15	5	3	42	
Point 6	50	30	70	18	6	3	38	
Point 7		8	1156	3	3		43	
Point 8		126	28	20	19	16	20	
Point 9	48	7	66	27	19	20	82	
Point 10	273	43	74		6	10	35	

Tableau VI.5 - Variations saisonnières des M.E.S. dans le marais ( en mg/l ).

### 2.4 - CONCLUSION

La majeure partie des sédiments transitant dans l'étier provient de la remise en suspension des sédiments déposés sur les vasières. Après la remise en suspension en flot, les sédiments décantent progressivement sur les vasières lors de la marée montante, et les quantités arrivant jusqu'à l'écluse sont très faibles comparées à celles observées à l'embouchure.

De l'automne au printemps, les eaux de la marée descendante remettent en suspension les sédiments décantés, et érodent également des sédiments déposés antérieurement. Il sort donc plus de sédiments en jusant qu'il n'en est entré en flot, lors des vives-eaux. En été, (août-septembre) par contre, une grande partie des sédiments entrée en flot reste ~~piégée sur les vasières~~.

Par conséquent, les vasières sont des zones de stockage uniquement en été, et probablement aussi pour des faibles coefficients de marée, mais nous aborderons ce problème ultérieurement.

Pour des coefficients de vives-eaux, les vasières alimentent la Loire en sédiments lorsque les débits de l'étier sont assez élevés, et ceci lors de l'ouverture de l'écluse en jusant.

Si l'écluse était ouverte régulièrement en flot, le marais deviendrait lui aussi une zone de stockage des sédiments pendant l'été. La fermeture de la vanne empêche donc son envasement. Par contre, elle provoque un fort envasement de l'étier en aval de la vanne, qu'il faudrait éliminer par des chasses d'eau fréquentes et régulières.

### 3 - BILAN EROSION - SEDIMENTATION DANS L'ETIER

Afin de connaître les mécanismes d'érosion et de sédimentation, nous suivons l'exemple de BOUTELIER P. (1979) qui rapporte les tonnages transportés à un volume fixé arbitrairement à  $V = 100 \text{ m}^3$  afin de pouvoir comparer les sorties entre-elles. Ceci permettra donc des comparaisons théoriques seulement, car les volumes d'eau entrant et sortant sont très différents.

Le rapport  $\frac{J}{F}$  définit l'équilibre entre sédiments sortant et entrant, et permet la comparaison entre les différentes sorties.

Nous appelons  $\frac{J}{F}$  l'indice de rétention I.R. (BOUTELIER P.1979)

Si  $IR > 1$  : érosion  
 $IR = 1$  : équilibre  
 $IR < 1$  : sédimentation

#### 3.1 - RESULTATS

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau VI.6. Nous notons une érosion presque permanente pendant l'année avec, toutefois, une légère sédimentation en février 1983 et une sédimentation nette en septembre 1982.

Ces constatations sont assez différentes de celles de BOUTELIER P. (1979) sur la roselière, puisqu'il observe une sédimentation presque permanente au cours de l'année avec une érosion en hiver. Par conséquent, malgré la présence des vasières, il apparaît des différences notables selon les systèmes étudiés.

Ainsi, les roseaux provoquent des conditions favorables à la sédimentation sur la roselière selon BOUTELIER P. (1979). D'autre part, CHAPMAN V.J. (1960), VERGER F. (1968), GOULEAU D. (1975) décrivent eux aussi un exhaussement des vasières, alors que les chasses d'eau ou simplement les envois d'eau du marais entraînent des phénomènes d'érosion dans l'étier.

Malgré l'érosion constatée dans l'étier au cours de notre étude, nous observons un fort envasement sur le terrain. Comment une telle contradiction est-elle possible ? Pour répondre à la question, il faut noter l'importance des coefficients de marée dans les processus d'érosion et de sédimentation.

#### 3.2 - LES FACTEURS AGISSANT SUR LA SEDIMENTATION

##### 3.2.1 - Les coefficients de marée

Comme nous l'avons déjà souligné, nos sorties ont eu lieu lors de forts coefficients de vives-eaux. Aussi nous ne connaissons pas les phénomènes se produisant en mortes-eaux, mais il est probable que la sédimentation y soit assez active pour compenser l'érosion en vives-eaux. En effet, GALENNE B. (1974) note que, dans la Loire, les coefficients de mortes-eaux entraînent une réduction des courants favorisant une zone d'immobilité importante qui assure la décantation des sédiments alors que les coefficients de vives-eaux détruisent la crème de vase par une turbulence intense au profit d'un bouchon vaseux mieux développé. Il est permis de penser qu'un processus analogue se produit dans le chenal de l'étier.

##### 3.2.2 - Influence de la température et de la salinité

D'après BERTHOIS L. (1957), la température agit sur la vitesse de sédimentation en faisant varier la viscosité de l'eau : dans l'estuaire de la Loire, la sédimentation est favorisée par un fort abaissement du coefficient de viscosité dû à l'élévation de température, alors qu'en hiver, la vitesse de sédimentation est diminuée par une élévation du coefficient de viscosité.

DATES	M.E.S. EN FLOT pour V=100m <sup>3</sup> en tonnes	M.E.S. EN JUSANT pour V=100m <sup>3</sup> en tonnes	J 100 F 100
29.03.82	0,060		
28.04.82	0,30		
24.05.82	0,047	0,205	4,36
25.06.82	0,156	0,260	1,67
22.07.82	0,095	0,315	3,31
20.08.82	0,180	0,187	1,04
17.09.82	0,273	0,120	0,44
19.10.82	0,063	0,067	1,06
15.11.82	0,090	0,125	1,37
18.01.83	0,041	0,068	1,66
15.02.83	0,081	0,071	0,88
17.03.83	0,053	0,067	1,26
14.04.83	0,012	0,018	1,5

Tableau VI.6 - Bilan sédimentaire à l'embouchure au cours d'un cycle de marée rapporté à un volume unitaire ( V = 100 m<sup>3</sup> ).

D'autre part, certains auteurs tels que BERTHOIS L. (1961), MIGNIOT C. (1968), ALLEN G.P. (1972) observent que les sédiments argileux en suspension subissent une floculation au contact de l'eau salée. Cette floculation augmente la vitesse de chute des particules dans certaines conditions telles que des turbidités inférieures à 15 g/l (MIGNIOT C. 1968). Ces deux phénomènes peuvent être, en partie, à l'origine de la sédimentation observée en été dans l'étier, à la faveur de fortes températures et de chlorosités relativement élevées.

### 3.2.3 - La fermeture des écluses en été

La fermeture des écluses de Lavau et de la Taillée en jusant, en été (août -septembre) favorise la sédimentation d'une grande quantité de M.E.S. ayant pénétré en flot dans l'étier en diminuant le pouvoir d'érosion du cours d'eau. Par contre, l'ouverture des écluses en jusant et la fermeture en flot, pendant la majeure partie de l'année, agissent sur les vitesses de courant (cf. "cycle tidal") et sur le volume d'eau entrant et sortant (cf. Chapitre III : "Hydrodynamique"). Il en découle une quantité de sédiments expulsée en jusant supérieure à celle entrant en flot, et nous assistons ainsi à une érosion au cours de nos observations.

### 3.2.4 - L'influence biologique

Lors de l'émersion, les vasières se couvrent de taches vert-brun, tapis de diatomées qui se développent pendant le jusant, et disparaissent quelques temps avant la renverse de B. GOULEAU D. (1975) décrit leur influence dans le processus de stabilisation de la couche superficielle par le développement de filaments mucilagineux qui fixent ainsi les sédiments récemment déposés. BOUTELIER P. (1979), après avoir observé ce phénomène, compare le rôle de la végétation épigée sur la roselière à celui du benthos sur la vasière périphérique. Par conséquent, la sédimentation dans l'étier, mise en évidence essentiellement au mois de septembre, est liée, en cette période, à un développement phytoplanctonique important, sur lequel nous reviendrons ultérieurement, et qui consolide la pellicule superficielle des vasières.

## 4 - EVOLUTION DES M.E.S. ENTRE LE MARAIS ET L'EMBOUCHURE

### - A marée descendante

Lorsque l'écluse est ouverte, les eaux du marais gonflent les eaux de l'étier qui entraînent les particules déposées à la renverse de P.M., érodent les slikkes et arrivent à l'embouchure chargées de M.E.S. qui sont en partie expulsées vers la Loire (2421 t le 24.05.82).

Lorsque l'écluse est fermée, en été, la remise en suspension des sédiments est moins importante dans l'étier et la quantité de sédiments sortant en Loire est peu élevée par rapport à ce qui entre en flot. Nous observons, alors, une sédimentation intense dans l'étier. Le 17.09.82, 1663 tonnes de sédiments sont restées piégées en amont de l'embouchure.

### - A marée montante

Les eaux de flot reprennent les sédiments déposés sur les vasières en jusant et dans l'axe du chenal à la renverse de B.M. et les repoussent vers l'amont. La décantation s'amorce très tôt puisque dès la confluence des étiers de la Taillée et de Lavau, nous notons une légère diminution qui s'accroît jusqu'à l'écluse. Celle-ci freine alors les courants, ce qui provoque la décantation des M.E.S. en aval de l'écluse. La fermeture de la vanne empêche ainsi l'envasement du marais, nuisible à une bonne exploitation, mais provoque le dépôt de vases dans la zone à l'aval de l'écluse.

Nous déduisons donc de nos observations (en vives-eaux) :

- lorsque les vannes sont ouvertes en jusant, une exportation des M.E.S. vers la Loire supérieure à la quantité de sédiments amenée en flot,

- lorsque les vannes sont fermées en jusant (en été), une importation de sédiments, et une sédimentation dans l'étier favorisée par des températures et des salinités élevées.

### Remarque

Afin de mieux connaître le transfert sédimentaire dans l'étier, nous avons consacré une sortie le 28.04.83 aux jaugeages des étiers de la Taillée et de Lavau, légèrement en amont de la confluence. Nous avons également mesuré les hauteurs d'eau au cours du cycle de marée aux deux points, les courants et les turbidités (les échantillons étant prélevés à la perche).

Les résultats dans le tableau VI.7 nous indiquent que :

- en jusant, 1/3 seulement des sédiments vient de l'étier de Lavau,
- en flot, 1/4 des sédiments remonte vers l'écluse de Lavau, alors que les 3/4 restant sont entraînés par la marée montante dans l'étier de la Taillée. Ceci montre l'importance de l'étier de la Taillée pour le bilan sédimentaire de l'étier de Lavau et il serait intéressant d'étudier dans l'avenir l'étier de la Taillée et les repercussions qu'il peut avoir sur celui de Lavau.

	ETIER DE LA TAILLE	ETIER DE LAVAU
MAREE	Tonrages en M.E.S.	
Jusant	148	68
Flot	95	31
Bilan jusant-flot	+ 53	+ 37

Tableau VI.7 - Bilans sédimentaires des étiers de la Taillée et de Lavau en amont de leur confluence.

## 5 - CONCLUSION

Notre étude permet de définir les différents phénomènes sédimentologiques se produisant dans le marais et dans l'étier au cours des saisons.

Dans le marais, les phénomènes sédimentologiques dépendent essentiellement de l'ouverture et de la fermeture de l'écluse :

- les turbidités augmentent sous l'action des envois de marées en été,
- l'ouverture des écluses en jusant, en période hivernale, permet le rejet d'une partie des M.E.S. dans l'étier.

Dans l'étier, pendant le cycle tidal, nous observons une décantation aux renverses de courant et une remise en suspension dès que les vitesses de courant sont assez élevées. L'émersion joue un rôle important puisque plus elle est longue et les surfaces émergées développées (ceci lors des coefficients de vives-eaux), plus la remise en suspension des sédiments est difficile.

Les observations, au cours du cycle saisonnier, mettent en évidence deux phénomènes distincts :

- un phénomène d'érosion dans l'étier, de l'automne au printemps dû à l'action du jusant beaucoup plus intense en cette période grâce à l'évacuation des eaux du marais. Il est favorisé par une moindre remontée des sédiments dans l'étier grâce à la fermeture de l'écluse en flot,

- une sédimentation importante dans l'étier, en été, lors de la fermeture de l'écluse en jusant. Cette sédimentation est accrue par des températures et des salinités élevées mais également par l'action des diatomées dans la fixation du sédiment.

Malgré des résultats qui montrent l'ampleur de l'érosion au cours de l'année, nous avons constaté, sur le terrain, un exhaussement des vasières. Cette apparente contradiction est liée à un facteur très important : les coefficients de marée. En effet, nos observations ont eu lieu lors de coefficients de vives-eaux qui entraînent une forte turbulence et diminuent ainsi la sédimentation. Les faibles coefficients, au contraire, favorisent la sédimentation; comme ils sont beaucoup plus nombreux au cours de l'année que les forts coefficients, cela explique la sédimentation générale observée sur le terrain.

Par conséquent, l'étier fournit des sédiments au bouchon vaseux et à la crème de vase de Loire, lors des coefficients de vives-eaux pendant la majeure partie de l'année, il reprend des sédiments à l'estuaire lors des coefficients de mortes-eaux et à la fin de l'été à la faveur de l'étiage.



III - LES MATIERES EN SUSPENSION DANS LE SYSTEME DE CORDEMAIS ET DU DAREAU

1 - A CORDEMAIS

1.1 - CYCLE TIDAL (fig VI.11)

1.1.1 - A l'écluse

- en jusant

La turbidité diminue au cours du jusant. Les M.E.S. sont généralement inférieures à 0,3 g/l.

- en flot

Après la renverse de B.M., dès le début du flot, nous observons une remise en suspension qui atteint son maximum une heure environ après la renverse. Le 2.08.82, les M.E.S. varient de 0,02 g/l à la renverse de B.M. à 0,385 g/l, 3/4 d'heure après la renverse. Les sédiments décantent ensuite de nouveau (0,16 g/l le 2.08.82 à la renverse de P.M.).

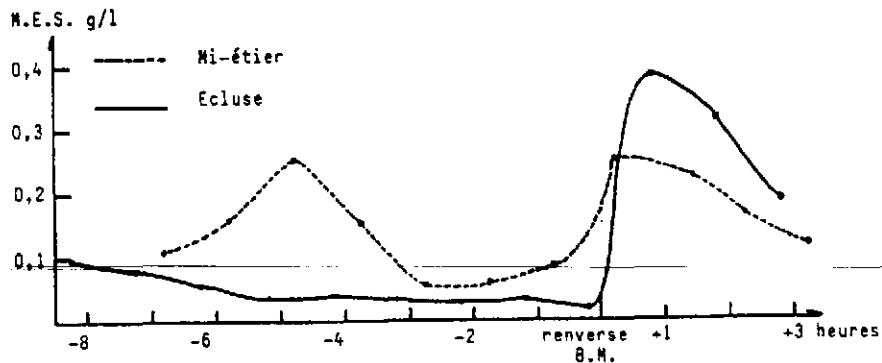


Fig. VI.11 - Variations des M.E.S. au cours d'une marée (2.08.82).

1.1.2 - A mi-étier

Les mêmes phénomènes se produisent à mi-étier, avec toutefois un décalage dans le temps, due à l'hydrodynamique dans l'étier.

1.2 - CYCLE SAISONNIER

1.2.1 - Dans l'étier

Les M.E.S. ne présentent pas de cycle saisonnier dans l'étier de Cordemais, le tableau VI.8, des bilans sédimentaires quantitatifs, donne en effet les résultats suivants :

DATES	MAREE	ECLUSE M.E.S. en tonnes	MI-ETIER M.E.S. en tonnes
15.01.82	Jusant	10	
12.02.82	Jusant	0,5	
8.09.82	Jusant		5,2
	Flot		8,3
	Bilan jusant-flot		- 3,1
24.02.83	Jusant		4,0
	Flot		7,9
	Bilan jusant-flot		- 3,9

Tableau VI.8 - Bilans sédimentaires au cours d'un cycle de marée dans l'étier de Cordemais.

- en septembre 1982 et février 1983, les bilans sédimentaires sont fort semblables et indiquent une importation des M.E.S. dans l'étier au cours du cycle de marée. Ceci est dû en février à une ouverture exceptionnelle de la vanne déjà évoquée dans le chapitre "hydrodynamique".

en janvier 1982, les quantités de sédiments sorties en jusant sont de 10,5 tonnes, elles sont de 0,5 tonnes en février 1982.

Quelle que soit la saison, les tonnages des matières en suspension évoluent comme les volumes d'eau.

### 1.2.2 - Dans le marais

En été, les envois de marées provoquent une augmentation très nette des M.E.S. (0,32 g/l en septembre - 0,25 g/l en août). En hiver, les M.E.S. sont très faibles, inférieures à 0,007 g/l.

### 1.3 - EVOLUTION DES M.E.S. entre le marais et l'étier

Pendant le jusant, les turbidités augmentent au cours de la descente de l'étier grâce à la remise en suspension des sédiments.

A marée montante, le retour d'eau dans l'étier entraîne une augmentation des M.E.S. qui atteint son maximum à l'écluse (0,43 g/l le 8.09.82).

En été, les eaux du marais sont particulièrement chargées en M.E.S. (0,32 et 0,25 g/l) par suite de la pénétration des eaux de l'étier lors des envois de marée. Un mauvais entretien du marais est également responsable des fortes concentrations en M.E.S.

### 1.4 - CONCLUSION

Etant donné le peu de résultats obtenus à cause de nos observations discontinues dans le système de Cordemais, il est difficile d'émettre des conclusions générales. Nous remarquons, cependant, une similitude avec l'étier de Lavau, au cours du cycle tidal :

- décantation à la renverse de B.M. amorcée en jusant,
- remise en suspension au retour du flot.

Un cycle saisonnier est impossible à mettre en évidence à cause de l'ouverture de l'écluse en flot le 24.02.83, ce qui est exceptionnel en hiver et perturbe nos résultats. Nous constatons toutefois une augmentation des turbidités dans le marais en été due aux envois de marée et au mauvais entretien des douves et des canaux.

## 2 - AU DAREAU

### 2.1 - CYCLE TIDAL (fig VI.12)

#### 2.1.1 - A l'écluse

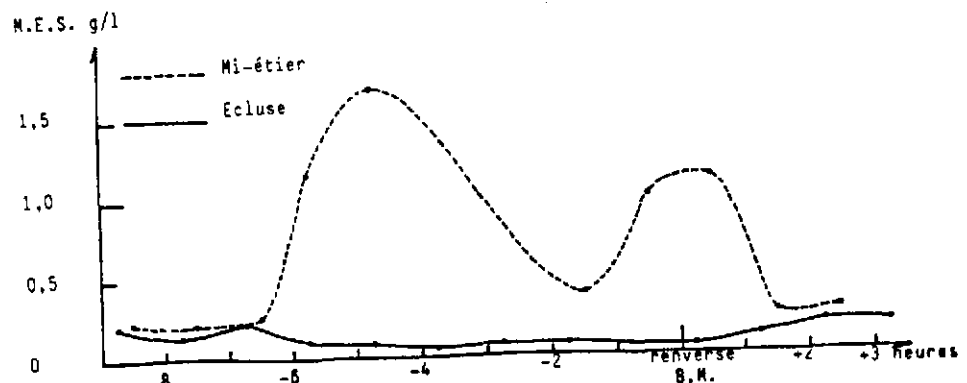
- en jusant

Nous observons une légère diminution des M.E.S. au cours du jusant (de 0,22 à 0,05 g/l le 6.09.82).

- en flot

Le retour d'eau provoque une augmentation des M.E.S. bien marquée le 6.09.82 (0,05 g/l à la renverse de B.M. à 0,19 g/l deux heures après). Les M.E.S. sont généralement inférieures à 0,02 g/l.

Fig. VI.12  
Variations des M.E.S.  
au cours d'une marée  
(6.09.82).



2.1.2 - A mi-étier

Nous devons distinguer l'hiver de l'été :

- en hiver, les M.E.S. sont faibles mais les turbidités sont légèrement supérieures à celles de l'écluse et subissent les mêmes variations,

- en été, les turbidités sont beaucoup plus élevées qu'à l'écluse notamment pendant la marée descendante.

En jusant, nous observons en juin et en septembre 2 pics pouvant provenir d'un apport de l'étier des Maillots qui se jette dans l'étier du Dareau, en amont de notre point de prélèvements.

En flot, la remontée des eaux entraîne une diminution des M.E.S. due :

- à l'arrivée des eaux de Loire moins turbides,
- à la diminution des vitesses de courants par rapport au jusant,
- au faible développement des vasières.

2.2 - CYCLE SAISONNIER

- Dans l'étier

Nous notons des turbidités beaucoup plus élevées en été qu'en hiver, notamment à mi-étier où les valeurs maximales varient de 0,076 g/l le 3.02.83 à 1,665 g/l le 6.09.82. Le tableau VI.9 donne les bilans sédimentaires quantitatifs :

- en été, une sédimentation a lieu dans l'étier du Dareau,
- en hiver, l'étier exporte les sédiments vers la Loire.

DATES	MAREE	ECLUSE M.E.S en tonnes	MI-ETIER M.E.S. en tonnes
8.02.82	Jusant	0,8	
23.06.82	Jusant	9,7	
6.09.82	Jusant		13,4
	Flot		21,8
	Bilan jusant-flot		- 8,4
3.02.83	Jusant		6,1
	Flot		2,8
	Bilan jusant-flot		+ 3,3

Tableau VI.9 - Bilans sédimentaires au cours d'un cycle de marée dans l'étier du Dareau.

- Dans le marais

Les valeurs sont toujours très faibles :

- 0,026 g/l le 6.09.82
- 0,097 g/l le 3.02.83

2.3 - EVOLUTION DES M.E.S. ENTRE LE MARAIS ET L'ETIER

En jusant, les M.E.S. augmentent au cours de la descente vers l'aval. Le 6.09.82, nous remarquons des maximum de 0,22 g/l à l'écluse et de 1,66 g/l à mi-étier, tandis que la moyenne des valeurs dans le marais est de 0,025 g/l.

A marée montante, les eaux de Loire moins turbides entraînent une diminution des M.E.S. et l'on note des valeurs de 0,25 g/l à mi-étier ; à l'écluse une remise en suspension, due au flot, provoque une augmentation des M.E.S., mais la turbidité reste toujours inférieure à celle observée à mi-étier.

2.4 - CONCLUSION

Dans l'étier du Dureau, nous observons les phénomènes suivants :

- A l'écluse
  - décantation à la renverse de B.M. et P.M.,
  - remise en suspension au retour du flot.
- A mi-étier
  - remise en suspension en jusant,
  - diminution des turbidités avec la remontée des eaux en flot.

Un cycle saisonnier apparaît dans l'étier :

- en été, les turbidités sont élevées et une grande quantité de M.E.S. décantée dans l'étier au cours du cycle tidal (8,4 tonnes le 6.09.82, en amont du prélèvement à mi-étier),
- en hiver, les turbidités sont faibles et un phénomène d'érosion permet l'exportation de 3,3 tonnes de sédiments au cours d'un cycle de marée le 3.02.83

IV - COMPARAISON DES TROIS SYSTEMES

La différence du nombre des observations faites dans l'étier de Lavau et dans les étiers de Cordemais et du Dureau rend délicate la mise en parallèle des résultats obtenus (tableau VI.10).

LIEUX DE PRELEVEMENTS		ETE (septembre 1982)			HIVER (janvier-février 1983)		
		LAVAU	CORDEMAIS	DAREAU	LAVAU	CORDEMAIS	DAREAU
MARAIS	Max	0,075	0,920	0,086	0,075	0,075	0,020
	Min	0,003	0,012	0	0,003	0,003	0,006
	$\bar{X}$	0,019	0,257	0,027	0,029	0,029	0,010
ECLUSE	Max	0,488	0,386	0,218	0,115	0,378	0,032
	Min	0,017	0,019	0,047	0,008	0,008	0,006
	$\bar{X}$	0,067	0,115	0,118	0,029	0,126	0,011
MI-ETIER	Max	7,840	0,256	1,663	0,880	2,925	0,177
	Min	0,140	0,057	0,208	0,109	0,017	0,022
	$\bar{X}$	2,571	0,152	0,661	0,269	0,178	0,061
EMBOUCHURE	Max	9,370			0,890		
	Min	1,738			0,110		
	$\bar{X}$	0,065			0,522		

Tableau VI.10 - Les M.E.S. dans les systèmes de Lavau, Cordemais et Dureau (exprimées en g/l).

La géomorphologie des étiers, leur situation dans l'estuaire et la position des prélèvements entraînent des variations entre les stocks sédimentaires de chacun (tableau VI.11). C'est ainsi qu'à Lavau :

- les prélèvements sont faits à l'embouchure, alors qu'ils sont faits à mi-étier dans les deux autres systèmes,
- les dimensions de l'étier sont plus grandes que celles des deux autres,
- les vasières sont beaucoup plus étendues (elles s'étendent jusque sur la rive Nord de la Loire, alors qu'à Cordemais et au DAREAU elles sont limitées à l'étier),
- la chlorosité y est toujours nettement plus importante par suite de sa position en aval de l'estuaire.

Toutes ces différences expliquent l'importance du stock sédimentaire considérable dans l'étier de Lavau par rapport aux deux autres étiers.

SAISONS	ETE (septembre 1982)			HIVER (février 1983)		
	LAVAU (embouchure)	CORDEMAIS (mi-étier)	DAREAU (mi-étier)	LAVAU (embouchure)	CORDEMAIS (mi-étier)	DAREAU (mi-étier)
Lieux de prélèvements						
Marée						
Jusant	677	5,2	13,4	556	4,0	6,1
Flot	2 340	8,3	21,8	466	7,9	2,8
Bilan jusant - flot	- 1 663	- 3,1	- 8,4	+ 90	- 3,9	+ 3,3

Tableau VI.11 - Bilans sédimentaires au cours d'un cycle de marée dans les trois étiers étudiés (exprimés en tonnes).

Toutefois, les phénomènes qui se produisent dans les trois étiers sont assez semblables. Nous observons :

- sur un cycle tidal, une décantation au moment des renverses de courants, et une remise en suspension en jusant et en flot dès que les vitesses de courants ont dépassé la vitesse critique d'érosion,

- au cours d'un cycle saisonnier, une sédimentation dans les trois étiers en été, tandis qu'en hiver ils exportent des sédiments vers la Loire, hormis à Cordemais, où le jour de nos observations, l'ouverture de l'écluse en flot a entraîné une importation de sédiments dans l'étier.

Enfin, la présence des écluses confèrent aux trois systèmes un fonctionnement assez identique :

- elles diminuent l'envasement des marais grâce à la fermeture des portes en flot, mais favorise le dépôt des vases dans l'étier en aval de l'écluse,
- elles augmentent l'érosion dans l'étier, à l'ouverture des portes en jusant.

Par conséquent, les écluses, par le jeu des ouvertures et fermetures des portes favorisent le retour des sédiments en Loire, par les étiers. Les sédiments, rejetés dans l'estuaire, grossissent le bouchon vaseux et la crème de vase et augmentent ainsi la capacité du bouchon vaseux à l'accumulation de polluants. Toutefois, en été, lorsque les conditions sont les plus favorables à une pollution (températures élevées, baisse en oxygène dissous, teneurs en nutriments importants, accumulations de déchets organiques...), les étiers piègent une partie des sédiments du stock estuarien et conservent, ainsi, un certain équilibre nécessaire à la vie dans l'estuaire.

Les étiers sont donc des zones de stockage des vases au cours de l'été, mais sont des sources de sédiments l'hiver. Ceci est très important pour la Loire, car on met ainsi en évidence un cycle annuel avec le piégeage des sédiments lors des faibles débits et l'expulsion vers la Loire l'hiver lors des crues.

\*\*\*\*\*

*CHAPITRE VII*

*La chlorosité*

Dans les estuaires, les océanographes utilisent de préférence la chlorosité à la salinité, à cause de la dilution par les apports fluviaux qui entraînent des variations dans les rapports ioniques marins, et modifient ainsi la loi de DITTMAR. Nous suivrons leur exemple en employant également la chlorosité exprimée en g/l.

Dans l'estuaire interne, la chlorosité est un facteur très variable au cours d'un cycle de marée, et, selon les saisons, soumis à la fois aux eaux fluviales de la Loire et aux eaux marines de l'Océan Atlantique. Les valeurs extrêmes en Loire et en mer sont respectivement de 15 à 25 mg/l pour les eaux douces et de 19,8 g/l pour les eaux salées.

Nous examinerons successivement les variations de la chlorosité dans les trois systèmes hydrauliques étudiés.

## I - LA CHLOROSITE DANS L'ETIER ET LE MARAIS DE LAVAU

### 1 - LE CYCLE TIDAL

Nous traçons des courbes d'isochlorosité de la même manière que les courbes d'isoturbidités.

#### 1.1 - A L'EMBOUCHURE

D'une façon générale, nous n'observons pas de stratification. Les isochalines sont verticales et témoignent d'une homogénéisation des eaux dues aux turbulences en faible profondeur.

- en jusant

Pendant les premières heures de jusant, nous notons une diminution de la chlorosité : elle marque l'écoulement des eaux douces du marais vers l'estuaire. Exceptionnellement, l'abaissement de la chlorosité peut se poursuivre jusqu'à la renverse de B.M en hiver (de 3,5 à 0,5 g/l le 15/11/82), il est le plus souvent suivi d'une très légère augmentation due à l'évaporation sur les vasières (de 1,2 à 1,5 g/l le 28.04.82) (fig. VII.1, VII.2).

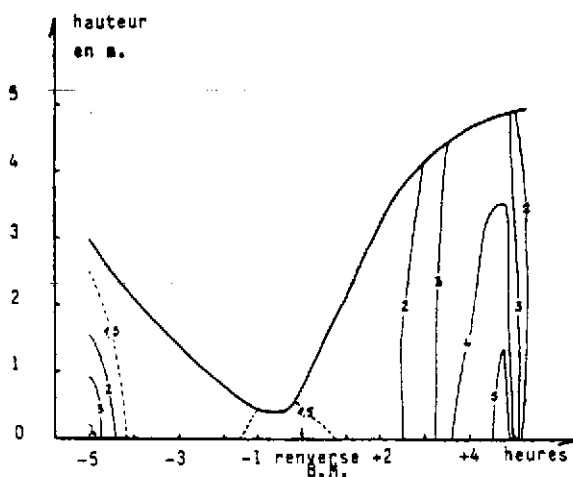


Fig. VII.1 - Diagramme d'isochlorosité (28.04.82).

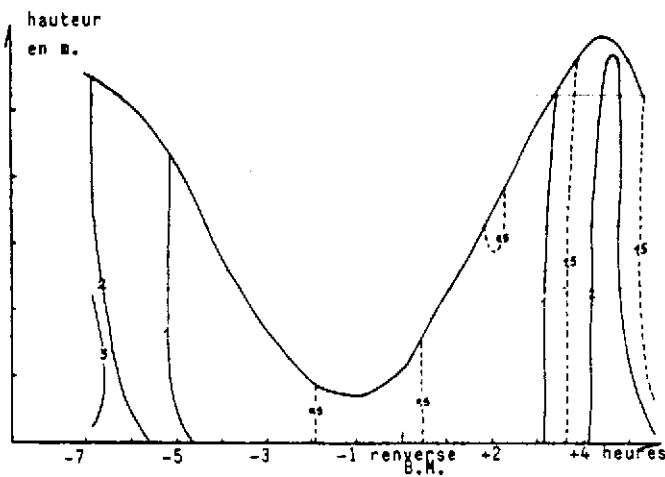


Fig. VII.2 - Diagramme d'isochlorosité (15.11.82).



Pendant les trois heures précédant la renverse de B.M., nous assistons à une stabilité des chlorosités : les eaux de ruissellement sont homogènes.

- en flot

L'arrivée du flot entraîne un appauvrissement en chlorures durant 1h30 environ après la renverse de B.M. sur toute la hauteur d'eau (de 0,28 à 0,13 g/l) le 15.02.83, de 3g/l à 1,5 g/l le 24.05.82), car les eaux de rives de l'estuaire généralement peu salées pénètrent en début de flot dans l'étier (fig VII.3 - VII.4).

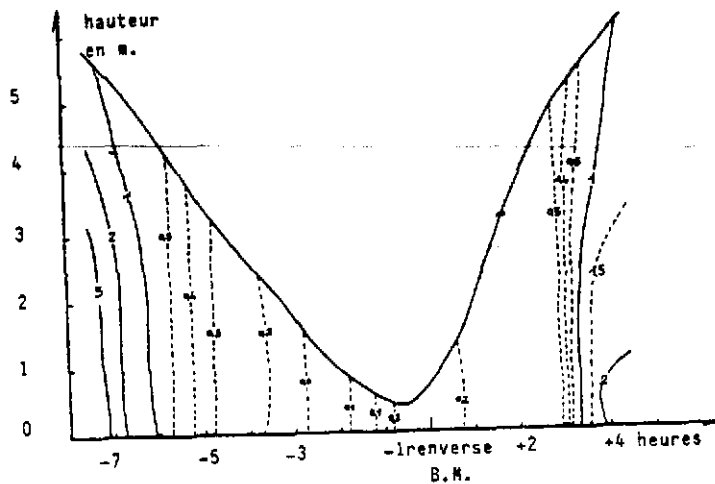


Fig. VII.3 - Diagramme d'isochlorosité (15.02.83).

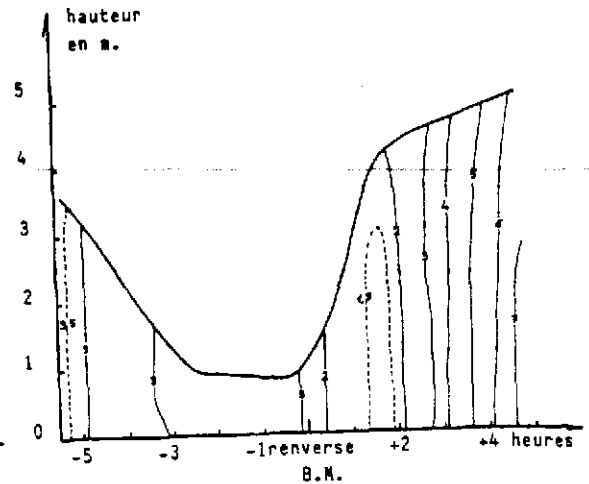


Fig. VII.4 - Diagramme d'isochlorosité (24.05.82).

La chlorosité augmente ensuite progressivement avec la marée montante jusqu'à la renverse de P.M. atteignant un maximum de 8,7 g/l le 20.08.82.

### 1.2- A LA TAILLEE (fig VII.5)

Lors de la première heure de flot, la remontée des eaux moins salées des rives de la Loire provoque une diminution de la teneur en chlorures (de 3,36 à 2,84 g/l le 20.08.82), puis nous observons une augmentation de la chlorosité jusqu'à l'étale de P.M., suivant celle de l'estuaire.

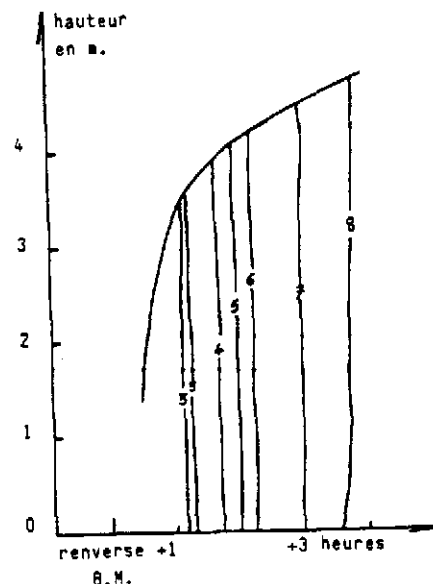


Fig. VII.5 - Diagramme d'isochlorosité (20.08.82).

### 1.3 - A L'ECLUSE

Pendant l'hiver, de novembre à mars, les eaux sont douces ( $Cl^-$  (0,250 g/l). En général, les eaux sont bien mélangées, hormis parfois une stratification en début de jusant qui disparaît après 2 ou 3 heures.

- en jusant

En été, lors de l'ouverture des clapets ou de la vanne métallique de l'écluse, il se produit temporairement une augmentation de la chlorosité (2,3 à 3,5 g/l le 24.05.82), suivie d'une faible baisse de la teneur en chlorures au cours du jusant jusqu'à la renverse de B.M (fig VII.6).

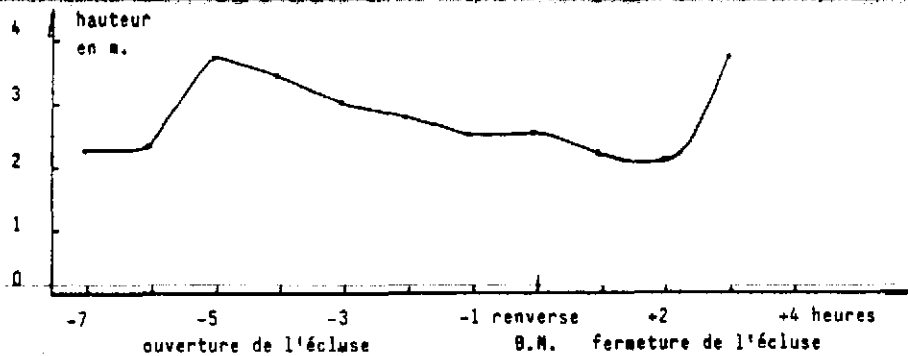


Fig. VII.6 - Variations de la chlorosité au cours d'une marée, (24.05.82).

Ces variations résultent des "envois de marée" qui précèdent nos observations. Après chaque "envoi de marée", l'écluse reste généralement fermée plusieurs jours, pendant lesquels l'évaporation produit une augmentation de la teneur en chlorures (d'un g/l environ). Aussi, dès l'ouverture de l'écluse les eaux les plus chargées en chlorures s'écoulent d'abord, suivies par les eaux venant de l'amont du marais et par conséquent plus douces.

- en flot

En début de flot, la chlorosité chute légèrement (de 2,5 à 2,1 g/l le 24.05.82, de 4,5 à 3,75 g/l le 17.09.82); les eaux de rives peu salées remontent jusqu'à l'écluse (fig.VII.6,VII.7). La concentration en chlorures croît de nouveau en fin de flot avec l'arrivée des eaux franchement estuariennes (de 3,75 à 4,2 g/l le 17.02.82), de 2,7 à 4,2 g/l le 20.08.82) (fig. VII.7, VII.8).

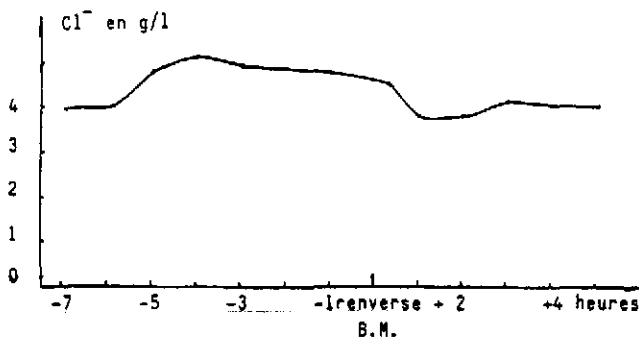


Fig. VII.7 - Variations de la chlorosité au cours d'une marée, (17.09.82).

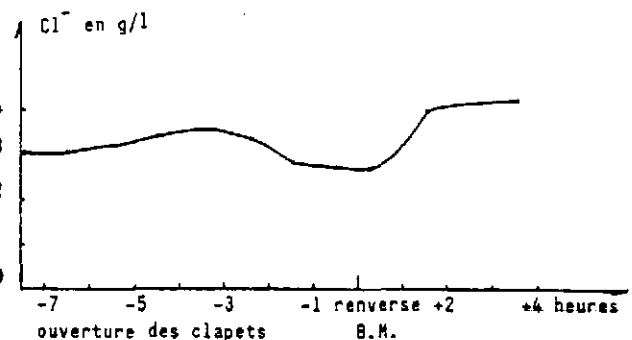


Fig. VII.8 - Variations de la chlorosité au cours d'une marée, (20.08.82).

## 2- LE CYCLE SAISONNIER

Pour l'embouchure et l'écluse, nous traçons les courbes des chlorosités moyennes mensuelles dans les eaux de ruissellement et dans les eaux de flot.

### 2.1 - A L'EMBOUCHURE (fig VII.9)

En été, de mai à septembre, les chlorosités sont les plus élevées (à 2 g/l) avec un maximum le 17.09.82 de 9,5 g/l dans les eaux de flot. Toutefois, en juin et en août 1982, nous notons une baisse de la chlorosité due à des précipitations élevées lors des journées précédant les sorties.

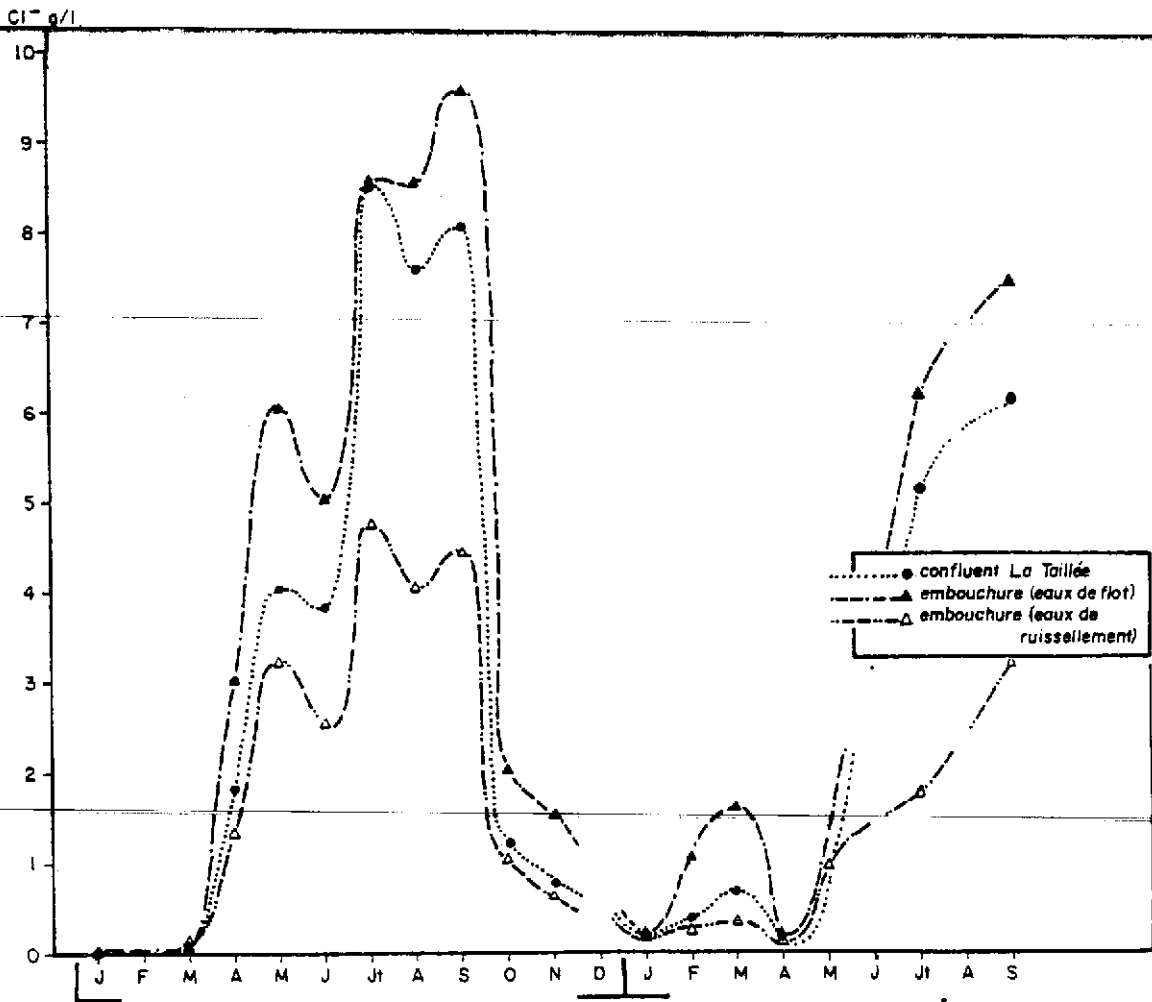


Fig.VII.9 - Variations saisonnières de la chlorosité à l'embouchure de l'étier de Lavau et à la Taillée .

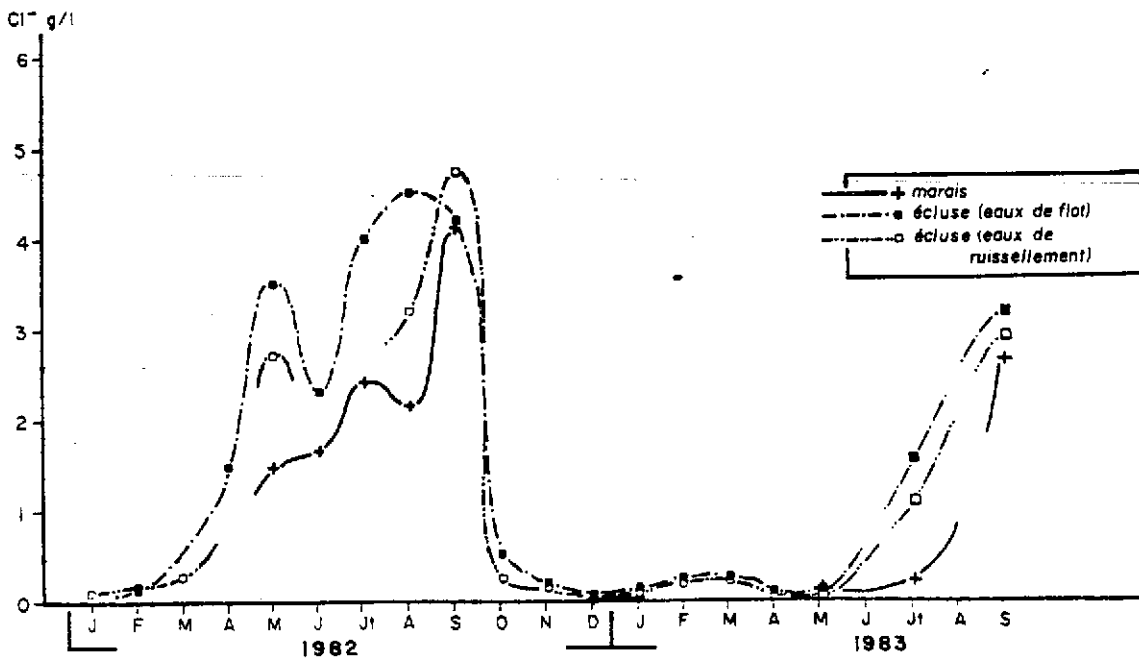


Fig.VII.10 - Variations saisonnières de la chlorosité à l'écluse et dans le marais de Lavau .

En hiver, la chlorosité est toujours inférieure à 2 g/l (elle est de 0,25 g/l le 18.01.83). L'amplitude de variation de la chlorosité atteint 9,3 g/l dans les eaux de flot, et seulement 4,5 g/l dans les eaux de ruissellement. Ces deux masses d'eaux suivent sensiblement les mêmes variations saisonnières, mais les eaux de flot sont toujours plus salées : le 17.09.82, la chlorosité varie de 4,5 g/l dans les eaux de ruissellement à 9,5 g/l dans celles de flot, soit une augmentation de 115 %. Par conséquent, quelle que soit la saison, la pénétration de la Loire dans l'étier entraîne une augmentation de la chlorosité, plus importante cependant en été. En effet, la chlorosité varie d'une façon inversement, plus proportionnelle au débit de la Loire. Celle des eaux de ruissellement varie en fonction du débit de la Loire, de l'évaporation sur les vasières due à l'ensoleillement, mais aussi en fonction de l'écoulement des eaux de l'amont, plus douces, qui diminuent la chlorosité.

2.2 - A L'ECLUSE (fig VII.10)

La chlorosité varie de 4 g/l en moyenne en été à 0,1 g/l en hiver. En général, les eaux de flot sont plus salées que les eaux de ruissellement (de 1,3 g/l au maximum). Le 17.09.82, cependant, la chlorosité maximale est atteinte dans les eaux de ruissellement avec 4,75 g/l : l'évapotranspiration, très importante durant les trois semaines avant la sortie, a permis une augmentation des chlorures dans le marais. La chlorosité à l'écluse varie donc tout au long de l'année suivant les débits de la Loire et de l'étier, mais également selon les phénomènes d'évapotranspiration qui ont lieu dans le marais en été.

2.3 - DANS LE MARAIS

La moyenne des valeurs des 10 points de prélèvements pour les différentes sorties a permis de tracer la courbe des variations saisonnières (fig VII.10). L'amplitude de variation de la chlorosité est de 4 : entre l'été et l'hiver. En été, la chlorosité augmente de mai à septembre (de 1,4 g/l à 4,1 g/l) avec toutefois une légère diminution en août due aux précipitations, et déjà observée à l'écluse et à l'embouchure.

Par suite de la topographie très plane des marais, la limite de la remontée du sel se situe au nord-ouest du marais du Syl, puisque seul le point 1 reste toujours en eau douce (fig VII.11).

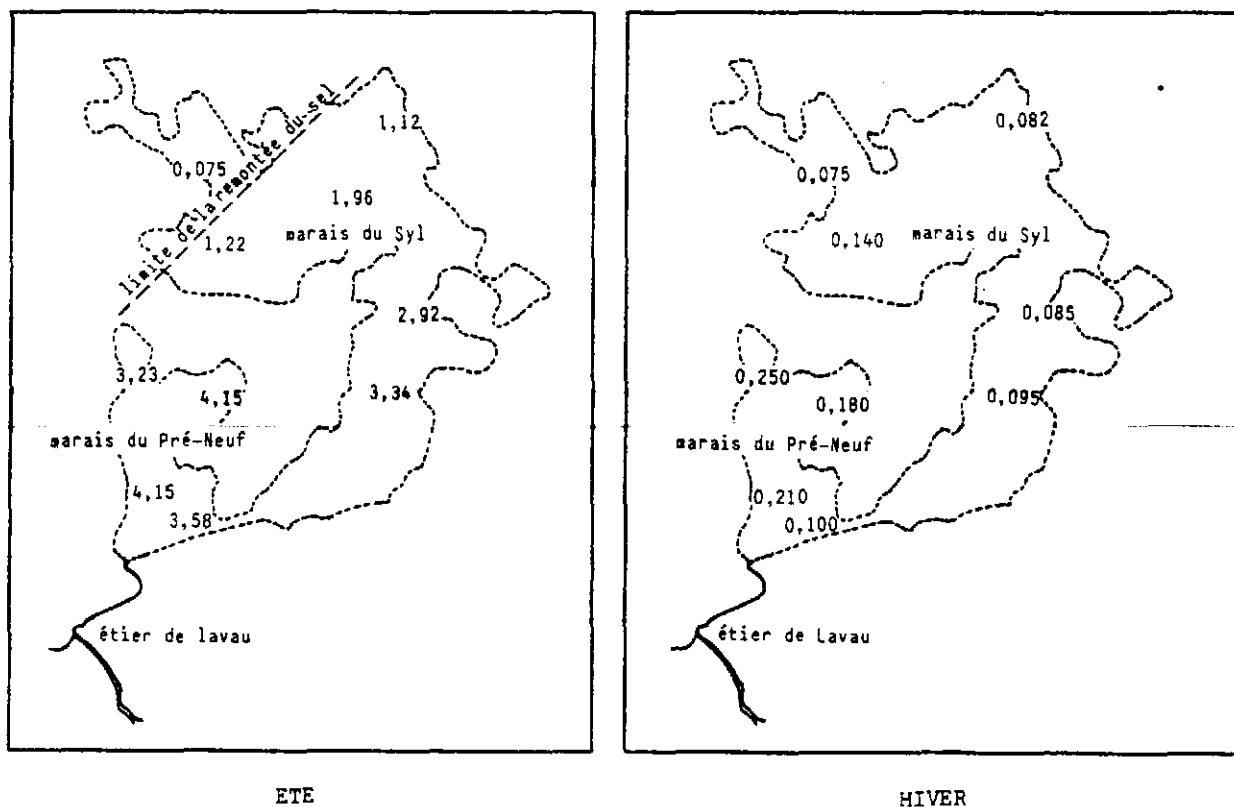


Fig. VII.11 - Variations de la chlorosité dans le marais de Lavau.

Les chlorosités dans le marais du Pré-Neuf sont plus élevées que dans le marais du Syl quelle que soit la saison : elles sont comprises entre 5 et 6 g/l dans le marais du Pré-Neuf et entre 3 et 5 g/l dans le marais du Syl le 17.09.82.

En hiver, les eaux du marais peuvent être légèrement salées à cause de la présence de sel résiduel, la chlorosité étant plus importante dans le marais du Pré-Neuf (de 0,23 g/l à 0,36 g/l) que dans le marais du Syl (de 0,09 à 0,18 g/l le 18.01.83).

Ces différences, en été comme en hiver, proviennent du fait que le marais du Pré-Neuf est légèrement plus bas que le marais du Syl, et également plus proche de l'étier de Lavau ; il est donc plus soumis à la pénétration des eaux de l'étier qui entraîne une augmentation de la chlorosité. Les chlorures, piégés par le sel à la suite des envois de marée d'été sont relargués en hiver grâce au lessivage par les eaux de pluie, ce qui explique la salinité résiduelle observée.

### 3 - EVOLUTION DE LA CHLOROSITE ENTRE L'EMBOUCHURE ET LE MARAIS

#### 3.1 - DE L'EMBOUCHURE VERS LE MARAIS

Les eaux de flot sont plus salées à l'embouchure qu'à l'écluse durant toute l'année, et l'amplitude de variation maximale est de 5,3 g/l le 17.09.82, c'est à dire que la chlorosité diminue en remontant vers l'amont de 66 % (de 9,5 à 4,2 g/l). Dans le marais, grâce à l'écluse dont un des rôles est d'empêcher la pénétration du sel en amont, nous observons en général une forte diminution de la chlorosité, sauf à la suite des envois de marée (4 g/l environ le 17.09.82). D'autre part, l'amplitude de variation de la chlorosité décroît tout au long de l'année de l'aval vers l'amont (de 8,5 g/l à l'embouchure, à 4 g/l à l'écluse le 22.07.82. Or, FRANCIS-BOEUF C. (1947) observe dans les estuaires de l'Aulne et de la Penzé (Bretagne) une croissance de l'amplitude de variation de la chlorosité de l'aval vers l'amont jusqu'à un certain point. Il existe donc une différence importante entre un étier et un estuaire. En effet, si l'amplitude de variation est à peu près nulle en mer, elle croît à mesure que l'on progresse vers l'amont de l'estuaire jusqu'à un maximum qui est fonction du débit et du coefficient de marée. Dans l'étier, par contre, la nette prédominance des eaux douces dans le marais diminue l'intensité des variations à l'écluse, tandis qu'à l'embouchure de l'étier les modifications entraînées par le mélange des eaux douces et salées de l'estuaire sont importantes.

#### 3.2 - DU MARAIS VERS L'EMBOUCHURE

Lors de la marée descendante, les eaux s'enrichissent en chlorures du marais vers l'embouchure tout au long de l'année, mais les variations de chlorosité entre les eaux de ruissellement à l'écluse et celles de l'embouchure sont assez faibles, le maximum étant de 0,8 g/l le 20.08.82. Le 17.09.82, les eaux de ruissellement sont, toutefois, légèrement plus salées à l'écluse qu'à l'embouchure, par suite de l'écoulement des eaux du marais plus riches en chlorures que lors des observations précédentes. De plus, le faible volume d'eau qui s'écoule à l'écluse en fin de jusant est soumis aux rayonnements intenses du soleil en début d'après-midi, ce qui provoque une augmentation de la chlorosité par évaporation.

### 4 - BILAN QUANTITATIF

De la même manière que pour l'évaluation du tonnage de sédiments transportés dans l'étier, nous calculons le tonnage des chlorures transitant dans l'étier.

#### 4.1 - A L'EMBOUCHURE

Les résultats, exprimés dans le tableau VII.1, montrent que les quantités de chlorures qui entrent et sortent de l'étier sont proportionnelles aux volumes d'eau, en période estivale (de mai à septembre). Par contre, en période hivernale (d'octobre à avril), les teneurs en chlorures sont très faibles et les tonnages ne sont plus en relation avec les volumes d'eau.

En été, les vannes étant généralement fermées, le volume d'eau entrant est supérieur à ce qui sort en jusant et entraîne donc la pénétration d'un tonnage de chlorures important dans l'étier. Si l'on compare les quantités de sel entrées au cours des trois cycles de marées observées en été, aux quantités de sel sorties pendant le reste de l'année, sur un cycle annuel, on obtient :

- en été, 8300 tonnes de sel entrées dans l'étier,
- de l'automne au printemps 3500 tonnes expulsées dans l'estuaire.

DATES	VOLUME D'EAU	VOLUME D'EAU	VOLUME D'EAU	CHLORURES		BILAN DES	CHLORURES	CHLORURES	J 100
	SORTI EN	ENTRE EN	TOTAL	en tonnes		CHLORURES	EN FLOT	EN JUSANT	
	JUSANT en m <sup>3</sup>	FLOT en m <sup>3</sup>	- entré + sorti en m <sup>3</sup>	FLOT	JUSANT	en tonnes	V=100 m <sup>3</sup> pour	V=100 m <sup>3</sup> pour	F 100
29.03.82		343 206					0,009		
28.04.82		323 774					0,20		
24.05.82	1 178 832	1 058 526	+ 120 036	3 450	4 794	+ 1 344	0,32	0,41	1,28
25.06.82	645 457	535 364	+ 110 093	1 916	2 250	+ 334	0,36	0,19	0,53
22.07.82	589 682	934 869	- 345 187	6 706	4 332	- 2 374	0,72	0,73	1,01
20.08.82	780 813	1 059 025	- 218 212	6 756	3 125	- 3 631	à,64	0,40	0,62
17.09.82	563 120	857 479	- 294 359	6 623	4 281	- 2 342	0,77	0,76	0,99
19.10.82	1 663 980	1 339 003	+ 324 977	1 403	1 658	+ 255	0,10	0,10	1,0
15.11.82	983 017	954 978	+ 28 039	1 010	1 769	+ 759	0,10	0,18	1,8
18.01.83	750 531	388 377	+ 362 154	51	121	+ 70	0,01	0,02	2,0
15.02.83	786 906	576 141	+ 210 765	349	663	+ 314	0,06	0,08	1,33
17.03.83	857 245	818 550	+ 38 695	372	778	+ 466	0,04	0,09	2,25
14.04.83	678 109	466 151	+ 211 958	195	27	+ 17	0,002	0,004	0,2

Tableau VII.1 - A l'embouchure

DATES	VOLUME D'EAU	VOLUME D'EAU	VOLUME D'EAU	CHLORURES EN TONNES		BILAN	CHLORURES	CHLORURES	J 100 F 100
	SORTI DU MARAIS en m <sup>3</sup>	ENTRE DANS LE MARAIS en m <sup>3</sup>	TOTAL - entré + sorti en m <sup>3</sup>	Flot	Jusant	DES CL <sup>-</sup> SORTIS DU MARAIS en tonnes	ENTRES DANS LE MARAIS pour -100 m <sup>3</sup>	SORTIS <sup>2</sup> DU MARAIS pour -100 m <sup>3</sup>	
10.02.82	47 988	0	47 988	0	6,7		0	0,014	
24.05.82	70 458	52 534	17 924	137	221	84	0,26	0,31	1,19
16.12.82	84 591	0	84 591	0	7,5		0	0,009	

Tableau VII.2 - A l'écluse

Bilans des chlorures par cycle de marée

Par conséquent, le système étier-marais piège des chlorures, et nous constatons qu'il y a rétention de la moitié des chlorures ayant pénétré dans le système. En réalité, la moitié des chlorures ayant pénétré dans l'étier n'y reste pas chaque année. En effet, nos observations ont eu lieu lors de coefficients de vives eaux pour lesquels, en flot, il rentre un volume d'eau important dans l'étier (cf. Chapitre III - Hydrodynamique). Ainsi, les quantités de sel qui sont rentrées en été, sont particulièrement importantes grâce aux forts coefficients de marée. Pour des coefficients plus faibles, il est vraisemblable que nous n'aurions pas une telle pénétration du sel. L'expulsion permanente du sel, de l'automne au printemps, quelque soit le coefficient, équilibre les apports particulièrement importants d'été, lors des forts coefficients. En ramenant les tonnages à un volume d'eau théorique de 100 m (tableau VII.1), comme pour les MES, on obtient :

- en été, de juin à octobre, les quantités de chlorures entrées sont soit équilibrées avec les quantités sorties, soit piégées en partie dans l'étier et le marais lors des envois de marée,

- de l'automne au printemps, les chlorures sont exportés vers la Loire grâce à la libération d'ions  $Cl^-$  accumulés, en été, dans le sol des marais et les vasières.

#### 4.2 - A L'ECLUSE

Les tonnages de chlorures (tableau VII.2) sont très faibles par rapport à ceux de l'embouchure, ce qui indique que des étiers tels que "la Taillée", "Rohars" et les bras de Loire entre les îles alimentent en sel l'étier de Lavau. Au mois de mai, nous observons une exportation de chlorures, du marais vers l'écluse (84 tonnes), due à l'ouverture de l'écluse pendant 10 heures, dont 7 heures de jusant et 3 heures de flot. D'autre part, les "envois de marée" des 2 jours précédents la sortie ont permis une augmentation de la chlorosité dans le marais. Cette exportation de chlorures est par conséquent exceptionnelle, et, pendant la majeure partie de l'année, il est vraisemblable qu'il arrive plus de chlorures à l'écluse qu'il n'en sort.

#### 5 - CONCLUSION

Les eaux de l'étier sont bien mélangées, et la chlorosité ne présente pas de gradient vertical. L'amplitude des variations annuelles de la chlorosité décroît de l'aval vers l'amont ; elle est d'autre part plus élevée dans les eaux de flot que dans les eaux de ruissellement. La chlorosité permet ainsi d'individualiser, dans l'étier, les quatre masses d'eau à caractères chimiques marqués, déjà définies dans le chapitre "Hydrodynamique" :

- les eaux de retrait ou de jusant sont un mélange des eaux de flot et des eaux écoulées du marais dont la chlorosité varie selon les débits de la Loire et de l'étier,

- les eaux de ruissellement issues des marais et des vasières, pour lesquelles la chlorosité est toujours plus faible que celle des eaux de flot, et varie en fonction des débits de la Loire et de l'étier, et de l'évaporation sur les vasières,

- les eaux de refoulement ou de début de flot, plus douces constituées par la fin des eaux de ruissellement et les eaux de rives de l'estuaire, toujours moins salées que celles du chenal,

- les eaux de flot, dont la chlorosité, très variable au cours de l'année suivant le débit de la Loire, diminue lors de la remontée des eaux depuis l'embouchure jusqu'à l'écluse.

Les eaux de retrait et de refoulement sont un mélange de plusieurs masses d'eau, alors que les eaux de ruissellement et de flot ont leur propre entité. C'est pourquoi, nous étudierons très souvent les différents paramètres de préférence dans les eaux de ruissellement et de flot puisque c'est dans ces deux masses d'eau qu'ils sont les plus significatifs.

- les eaux du marais, quant à elles, sont soumises, lors des envois de marée, à la dualité "eaux douces de précipitation - eaux saumâtres de la Loire". La chlorosité de ces eaux est accrue par le phénomène d'évaporation.

Enfin, d'une manière générale la Loire apporte des chlorures à l'étier, en été. De l'automne au printemps, le sel est exporté de l'étier vers la Loire mais en plus faible quantité. Il y a donc une rétention des chlorures dans le système au cours de l'année : d'après nos observations, la moitié de chlorures restent piégés dans le système. Cependant, cette rétention n'est observée que pour des coefficients de vives-eaux, et il est probable qu'elle est équilibrée par une expulsion des chlorures, lors de faibles coefficients beaucoup plus fréquents au cours de l'année.

## II - LES VARIATIONS DE LA CHLOROSITE DANS LES SYSTEMES DE CORDEMAIS ET DU DAREAU

Les phénomènes ont beaucoup moins d'ampleur dans les systèmes de Cordemais et du Dareau que dans celui de Lavau, à cause de leur position en amont.

### 1 - A CORDEMAIS

#### 1.1 - LE CYCLE TIDAL

En jusant, nous observons une diminution ou une stabilité de la chlorosité, excepté en septembre où elle augmente en fin de jusant grâce à l'évaporation dans le marais, provoqué par un fort ensoleillement (de 0,44 à 0,96 g/l le 8.09.82) - (fig VII.12 - VII.13).

En flot, une légère diminution à lieu parfois au début du flot, correspondant à la pénétration des eaux de rive de Loire et au refoulement des eaux de ruissellement, suivie d'une augmentation progressive jusqu'à la renverse de P.M.

Les variations à mi-étier sont identiques à celles observées à l'écluse.

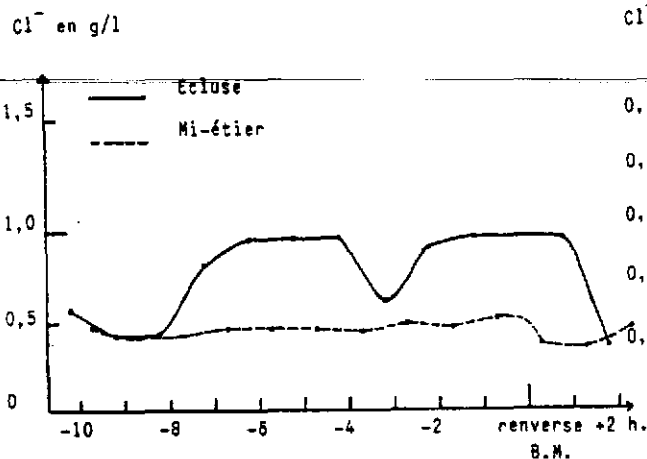


Fig. VII.12 - Variations de la chlorosité au cours d'une marée, (8.09.82).

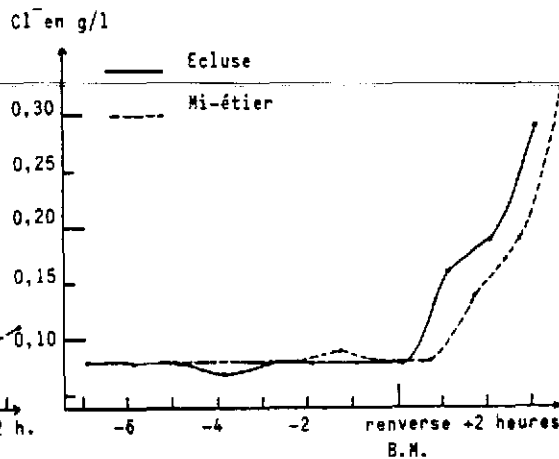


Fig. VII.13 - Variations de la chlorosité au cours d'une marée, (24.02.83).

#### 1.2 - LE CYCLE SAISONNIER

##### - Dans l'étier

En hiver, les eaux sont douces dans tout le système (la chlorosité est inférieure à 0,08 g/l) avec parfois exceptionnellement une légère augmentation de la teneur en chlorures en fin de flot (0,3 - 0,4 g/l).

En été, la chlorosité maximale est atteinte en flot dans l'étier le 20.08.82 (1,93 g/l).



La chlorosité varie d'une moyenne de 0,54 g/l en été à 0,09 g/l en hiver. Bien que les teneurs en chlorures soient très faibles comparées à celles de Lavau, le sel diffuse également très largement dans le marais. Le front de salinité est situé au NE du marais. Il recule légèrement vers l'amont entre août et septembre.

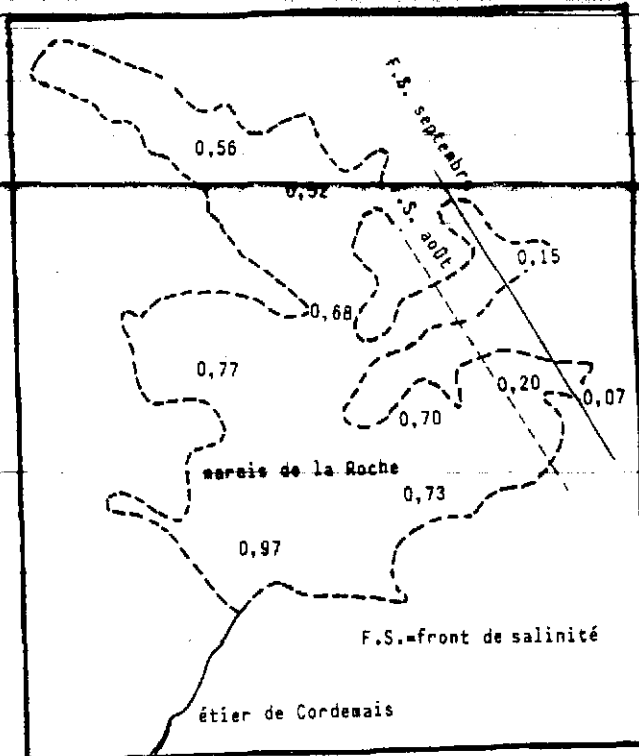


Fig. VII.14 - Variations de la chlorosité dans le marais de Cordemais (été).

### 1.3 - ÉVOLUTION DE LA CHLOROSITE ENTRE LE MARAIS ET LE MI-ETIER

D'une manière générale, les eaux sont de plus en plus salées du marais vers le mi-étier excepté en septembre où un ensoleillement intense a favorisé l'évaporation dans le marais et dans l'étier, provoquant en fin de jusant une augmentation des chlorures à l'écluse.

### 2 - AU DAREAU

Les eaux sont presque toujours douces (Cl (0,25 g/l), sauf au mois de septembre où nous atteignons parfois des valeurs de 0,3 à 0,4 g/l dans le marais. Toutefois, des variations apparaissent au cours du cycle tidal (fig VII.15) malgré la faible chlorosité : la teneur en chlorures diminue en jusant grâce à l'écoulement des eaux du marais, et en début de flot par suite de la pénétration des eaux douces de rive ; les chlorures augmentent, de nouveau, en fin de flot sous l'action des eaux franchement estuariennes, comme dans les autres étiers.

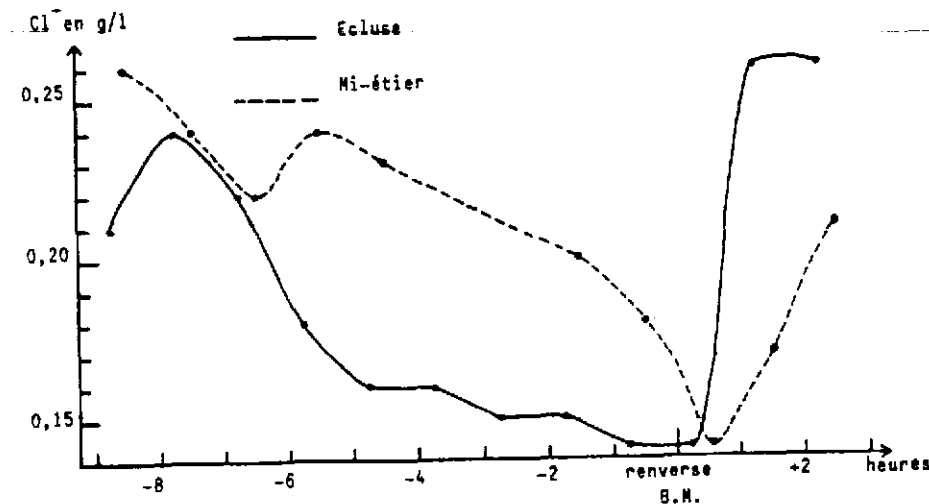


Fig. VII.15 - Variations de la chlorosité au cours d'une marée (6.09.82).

III - COMPARAISON ENTRE LES TROIS SYSTEMES DE LAVAU, CORDEMAIS ET DAREAU

Les trois systèmes sont soumis aux mêmes variations tidales et saisonnières bien que leur importance décroisse de l'aval vers l'amont (tableau VII.3).

LIEUX DE PRELEVEMENTS		ETE (septembre 1982)			HIVER (janvier-février 1983)		
		LAVAU	CORDEMAIS	DAREAU	LAVAU	CORDEMAIS	DAREAU
MARAIS	Max	5,90	0,99	0,67	0,36	0,32	0,04
	Min	0,09	0,06	0,15	0,09	0,04	0,02
	$\bar{X}$	4,16	0,66	0,34	0,18	0,094	0,03
ECLUSE	Max	5,15	0,96	0,26	0,17	0,29	0,03
	Min	3,78	0,36	0,14	0,12	0,07	0,03
	$\bar{X}$	4,38	0,76	0,18	0,14	0,13	0,03
MI-ETIER	Max	8,42	0,51	0,26	0,25	0,46	0,04
	Min	3,65	0,34	0,12	0,06	0,08	0,03
	$\bar{X}$	6,09	0,43	0,21	0,18	0,17	0,035
EMBOUCHURE	Max	10,70			0,38		
	Min	5,50			0,16		
	$\bar{X}$	3,22			0,05		

Tableau VII. 3 - Comparaisons de la chlorosité dans les systèmes de Lavau, Cordemais et Dareau (exprimée en g/l).

Des faits communs sont intéressants à noter.

1) Pendant la première heure de flot, nous remarquons une légère diminution de la chlorosité (même au Dareau) qui met en valeur l'existence d'eau plus douce sur la rive nord de la Loire, particulièrement nette à Donges et décrite par BOUTELIER P. et al (1982).

2) Après cette diminution en début de flot, l'augmentation de la chlorosité, dans l'é-tier, est due, généralement, à la pénétration des eaux franchement estuariennes. En septembre, par contre, l'évaporation due à l'ensoleillement est telle dans les marais et sur les vasières qu'elle entraîne une élévation de la teneur en chlorures dans le marais et dans les étiers des trois systèmes étudiés.

3) En hiver, l'ouverture des écluses en jusant entraîne une diminution de la chlorosité dans l'étier. En été, la fermeture des vannes en flot empêche la remontée du sel dans les marais, mais accentue l'évapotranspiration qui permet une augmentation de la concentration des chlorures ayant pénétré dans le marais lors des envois de marée.

4) L'amplitude de variation de la chlorosité, décroît de l'aval vers l'amont.

Ces observations, dans les trois systèmes, montrent que les variations de la chlorosité dans les étiers ne sont pas tout à fait semblables à celles de l'estuaire. En effet, dans l'estuaire interne, les teneurs en chlorures varient de façon inversement proportionnelle au débit de la Loire. Dans les étiers étudiés, les variations de la chlorosité sont liées au débit de la Loire, mais également à des phénomènes qui s'amplifient du fait des faibles volumes d'eau écoulés par rapport à ceux transitant dans l'estuaire. Ainsi, des variations propres aux étiers interviennent, entraînant des modifications de la chlorosité qui n'apparaissent pas dans l'estuaire. On peut les résumer de la façon suivante :

- diminution de la chlorosité dans les eaux de retrait, due à l'écoulement des eaux du marais,
- augmentation de la chlorosité dans les eaux de ruissellement grâce à l'évaporation sur les vasières,
- diminution de la chlorosité, pendant la première heure de flot dans les eaux de refoulement, due à l'arrivée des eaux de rives dans l'étier,
- augmentation de la chlorosité dans les eaux de flot grâce à la pénétration des eaux franchement estuariennes.

En conclusion, les variations de la chlorosité, dans les étiers comme dans l'estuaire, proviennent du mélange des eaux fluviales et marines. Les systèmes étiers-marais jouent un rôle non négligeable pour l'estuaire puisque des chlorures sont piégés en été dans les vasières et les sols des marais, et sont ensuite rejetés dans les eaux estuariennes lorsque les apports des eaux douces de la Loire sont importants.

\*\*\*\*\*

## DEUXIEME PARTIE - LES PARAMETRES BIOCHIMIQUES

Les paramètres biochimiques évoluant dans les systèmes étier-marais dépendent à la fois de la dualité " eau douce-eau marine ", mais également des phénomènes biologiques qui influent de façon très différente selon les saisons sur la qualité des eaux.

Ceci, nous a conduit à séparer la " période hivernale" (d'octobre à avril-mai) où les apports fluviaux sont importants et l'activité phytoplanctonique ralentie, de la période estivale (de juin à septembre) pendant laquelle les apports marins diluent ~~fortement les eaux douces (étiage)~~, et où l'activité phytoplanctonique est à son acmé.

### CHAPITRE VIII

#### Les pigments chlorophylliens

La chlorophylle a, pigment fondamental dans le phytoplancton, permet d'évaluer la production primaire végétale.

La phéophytine est le produit de dégradation de la chlorophylle et rend compte de la mortalité du phytoplancton composé d'organismes microscopiques, en grande majorité des diatomées et des péridiniens.

Nous étudierons, au cours de ce chapitre, uniquement les variations saisonnières de la chlorophylle a et de la phéophytine, les variations tidales et journalières ne mettant pas en évidence de phénomènes particuliers.

## I - LES PIGMENTS CHLOROPHYLLIENS DANS LE SYSTEME DE LAVAU

### 1 - LES VARIATIONS SAISONNIERES

Nous faisons pour chaque cycle de marée observé, la moyenne des résultats obtenus et nous traçons les courbes représentatives des variations annuelles pour l'embouchure, l'écluse et le marais.

Nous remarquons nettement dans le cycle saisonnier, l'opposition entre une période estivale (de juin à septembre) riche en chlorophylle a et en phéophytine, et une période hivernale (d'octobre à mai) où l'on assiste à une diminution importante de la teneur en pigments chlorophylliens.

#### 1.1 - A L'EMBOUCHURE

##### - La chlorophylle a (fig. VIII.1)

Nous observons les teneurs les plus élevées en chlorophylle a du mois de juin au mois d'août, avec un maximum de 44  $\mu\text{g/l}$  le 25.06.82.

Dès le mois de septembre, elles chutent (6  $\mu\text{g/l}$ ) et sont ensuite très basses pendant tout l'hiver (entre 0 et 6  $\mu\text{g/l}$ ) et jusqu'à la fin du printemps où l'on observe une période de faible production.

##### - La phéophytine (fig. VIII.2)

Les concentrations en phéophytine augmentent très rapidement au mois de juin (de 26  $\mu\text{g/l}$  en mai à 78  $\mu\text{g/l}$  en juin). Elles restent très élevées pendant tout l'été (entre 60 et 80  $\mu\text{g/l}$ ), diminuent ensuite nettement en octobre (45  $\mu\text{g/l}$ ) et restent faibles pendant tout l'hiver.

La phéophytine est toujours plus abondante que la chlorophylle. Le 20.08.82, par exemple, les teneurs sont de 30  $\mu\text{g/l}$  en chlorophylle a et de 72  $\mu\text{g/l}$  en phéophytine.

En effet, à la dégradation de la chlorophylle a du phytoplancton s'ajoute la dégradation de la chlorophylle a des végétaux supérieurs très développés dans le marais, les roselières et sur les bords de la Loire en général. Le débordement des eaux, lors des coefficients de V.E., entraîne la remise en suspension des végétaux morts qui sont évacués vers l'étier. Ceci explique les fortes teneurs en phéophytine dans tout le système.

#### 1.2 - A L'ECLUSE

##### - La chlorophylle a (fig. VIII.1)

Les variations sont sensiblement les mêmes qu'à l'embouchure :

- dès le mois de juin, la chlorophylle a augmente (27  $\mu\text{g/l}$ ). Elle atteint un maximum en juillet (44  $\mu\text{g/l}$ ) et diminue ensuite progressivement jusqu'à des valeurs très faibles, de l'automne au printemps (de l'ordre de 2,3  $\mu\text{g/l}$ ).

Chlorophylle a  $\mu\text{g/l}$

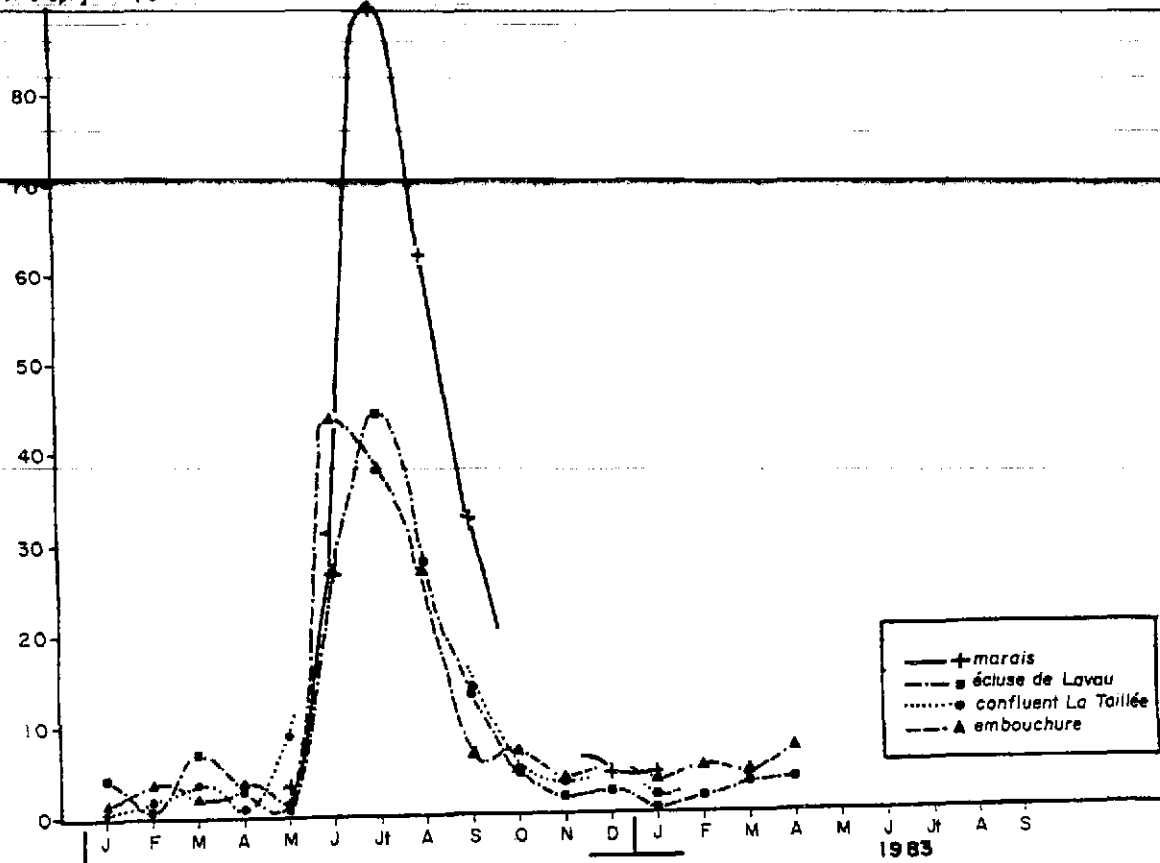


Fig. VIII.1 - Variations saisonnières de la chlorophylle a dans le système de Lavau.

Phéophytine  $\mu\text{g/l}$

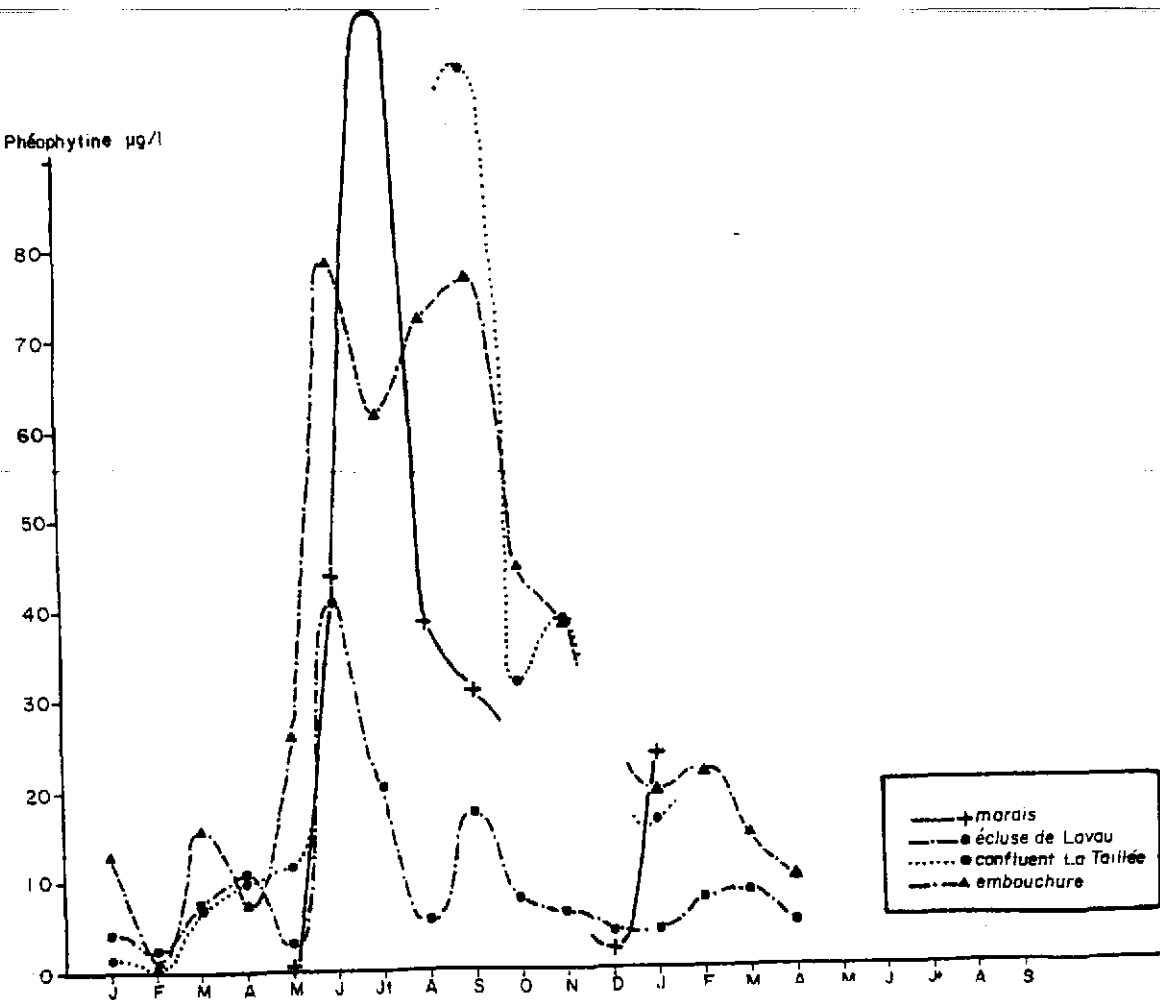


Fig. VIII.2 - Variations saisonnières de la phéophytine dans le système de Lavau.

Ayant étudié à l'écluse le carbone organique particulaire qui permet de caractériser la matière organique particulaire d'origine végétale, nous corrélons les résultats obtenus avec ceux de la chlorophylle (fig. VIII.3).

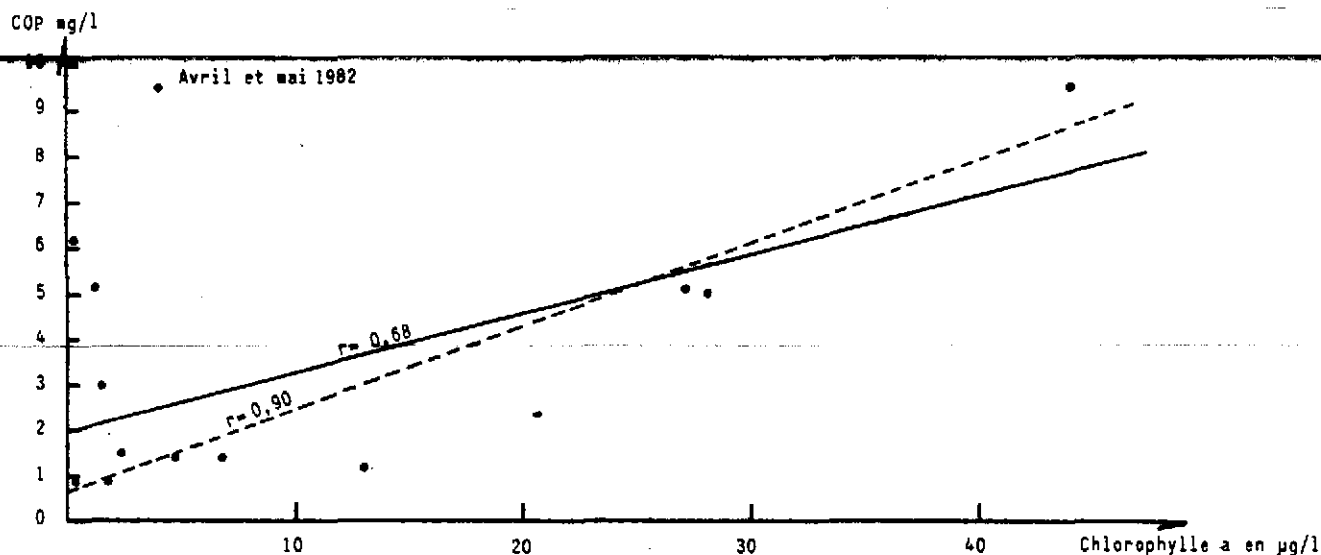


Fig. VIII.3 - Relations entre la chlorophylle a et le C.O.P.

Si l'on conserve tous les couples de valeur, le coefficient de corrélation de 0,68 indique une liaison assez nette entre la chlorophylle a et le carbone organique particulaire (C.O.P.), mais si l'on retire les points d'avril et mai qui sont éloignés de la droite de corrélation, le coefficient de corrélation devient 0,90 ce qui montre un rapport évident entre les deux éléments. Ainsi d'une manière générale, plus la chlorophylle est abondante et plus la teneur en C.O.P. est élevée : on obtient un maximum en juillet (chlorophylle a: 44 µg/l - C.O.P. 9,5 mg/l) et un minimum en janvier (chlorophylle a 0,4 µg/l - C.O.P. 0,85 mg/l). Cependant, en avril et en mai, nous remarquons une concentration forte en C.O.P., favorisée par des débits faibles de la Loire (525 et 400 m<sup>3</sup>/s), alors que, les conditions optimales pour le bloom phytoplanctonique n'étant pas encore réunies, les teneurs en chlorophylle a restent très basses.

#### - La phéophytine (fig VIII.2)

La phéophytine marque un premier pic en juin (40 µg/l), elle diminue ensuite jusqu'en août. On observe un deuxième pic en septembre (17 µg/l). De l'automne au printemps, les valeurs sont généralement inférieures à 10 µg/l.

A l'écluse, les concentrations en chlorophylle et en phéophytine varient comme dans les eaux du marais. L'augmentation de la phéophytine en juin, précédant celle de la chlorophylle, maximale en juillet, est probablement due à la dégradation des végétaux supérieurs du marais, plus intense et plus rapide que celle du phytoplancton.

### 1.3 - DANS LE MARAIS

#### - La chlorophylle a (fig. VIII.1)

Les variations sont celles observées à l'écluse, bien que très accentuées. En effet, les valeurs augmentent de 3 µg/l en mai à 89 µg/l en juillet. Elles diminuent ensuite progressivement (33 µg/l en septembre). En hiver, les teneurs sont de 4 µg/l environ.

#### - La phéophytine (fig. VIII.2)

Elle varie comme la chlorophylle avec toutefois un pic très élevé en juillet atteignant 106 µg/l, et correspondant à une dégradation intense liée à la stagnation des eaux.

La chlorophylle et la phéophytine varient de façon parallèle dans les eaux du marais et celle de l'écluse. Toutefois, en juillet, des concentrations en phéophytine particulièrement importantes (330 µg/l au point 1), dues à la stagnation des eaux au Nord du marais, modifient la moyenne établie pour tout le marais et ceci se traduit par un pic élevé sur la courbe.

Au Sud du marais, les teneurs sont relativement faibles (30 µg/l) et correspondent sensiblement aux teneurs dans les eaux de l'écluse.

## 2 - FACTEURS CONTROLANT LA PRODUCTION PRIMAIRE

Certains facteurs interviennent au niveau des mécanismes physiologiques. Ce sont : la température, l'énergie lumineuse (transparence de l'eau), la teneur en sels nutritifs. La consommation du zooplancton ("le grazing") est également un facteur important dans l'évolution du phytoplancton, mais ne fait pas l'objet de nos études.

### 2.1 - LA TEMPERATURE

La température est un facteur principal pour l'apparition et le développement des biocénoses. Un réchauffement de l'eau pendant l'été entraîne une augmentation de la photosynthèse à partir d'une température de (20°C). La baisse de la chlorophylle a, en septembre, se produit alors que les températures sont maximales et supérieures à 20°C. On assiste donc malgré des conditions de température favorables, à une diminution de l'activité biologique consécutive au bloom phytoplanctonique et provoquée par la remontée importante des eaux marines pauvres en nutriments. En octobre, les températures de l'ordre de 14° diminuant au cours de l'hiver ne permettent plus un développement important du phytoplancton.

### 2.2 - L'ENERGIE LUMINEUSE

L'énergie lumineuse est étroitement liée à l'insolation qui influe sur la température. Des turbidités particulièrement importantes peuvent empêcher la diffusion de la lumière dans les eaux réduisant ainsi la photosynthèse. Ce phénomène est net dans les étiers, en été. En effet, alors que les teneurs en chlorophylle a sont très élevées dans les eaux du marais peu chargées en M.E.S. (89 µg/l en juillet), elles ne sont que de l'ordre de 40 µg/l dans les étiers dont les eaux sont très turbides en été (cf. chapitre VI : M.E.S.).

### 2.3 - LES SELS NUTRITIFS

Les enrichissements en sels nutritifs entraînent une plus forte biomasse phytoplanctonique (GRALL J.R. - JACQUES G. 1964). De façon générale, les eaux de l'étier (et des marais) sont riches en nutriments, mais en juin-juillet (cf. chapitres sur les sels nutritifs) une augmentation en phosphate (4,5 µg/l), en silice dissoute (220 µg/l) et en ammoniacque (27 µg/l) favorise particulièrement le bloom phytoplanctonique observé pendant l'été. Au mois de septembre, les concentrations en silice dissoute et en phosphates chutent (SiO<sub>2</sub> 150 µg/l - PO<sub>4</sub>=2,3 µg/l) entraînant une diminution de la chlorophylle a, alors que les teneurs en phéophytine restent encore très importantes. En hiver, malgré l'abondance des sels nutritifs, la biomasse phytoplanctonique est très faible, limitée par une intensité lumineuse moindre et des températures trop basses.

## II - LES VARIATIONS SAISONNIERES DES PIGMENTS CHLOROPHYLLIENS DANS LES SYSTEMES DE CORDEMAIS ET DU DAREAU.

En été, nous remarquons, dans les deux systèmes, une augmentation très nette de la chlorophylle a et de la phéophytine :

- dans les deux étiers, les valeurs sont de l'ordre de 30 à 40 µg/l en chlorophylle a et de 30 à 50 µg/l en phéophytine,

- dans les marais, par contre, nous observons une nette différence entre les valeurs à Cordemais et les valeurs au Dareau.

	Chlorophylle a	Phéophytine
Cordemais	70 µg/l	110 µg/l
Dareau	10 à 20 µg/l	3 à 4 µg/l

Il semble que les faibles teneurs en pigments chlorophylliens dans le marais du Dareau soient liées à des concentrations moindres en sels nutritifs, comparées à celles des autres marais, et qui limiteraient ainsi la croissance phytoplanctonique.



	Cordemais	Dareau
SiO <sub>2</sub>	50 à 350 µatg Si/l	100 µatg Si/l
NH <sub>4</sub>	30 à 45 µatg N/l	10 µatg N/l
NO <sub>3</sub>	20 µatg N/l	0
PO <sub>4</sub>	8 à 9 µatg P/L	2 à 3,5 µatgP/l

Comparaisons des teneurs en sels nutritifs dans les marais de Cordemais et de Dareau.

En hiver, les teneurs en chlorophylle a et en phéophytine sont minimales dans les deux systèmes :

	Chlorophylle a	Phéophytine
Cordemais	0 à 16 µg/l	0 à 16 µg/l
Dareau	0 à 6 µg/l	2 à 10 µg/l

### III - CONCLUSIONS

Le tableau VIII.1 montre les variations des teneurs en pigments chlorophylliens dans les systèmes étudiés.

LIEUX DE PRELEVEMENTS		ETE (septembre 1982)						HIVER (janvier-février 1983)					
		LAVAU		CORDEMAIS		DAREAU		LAVAU		CORDEMAIS		DAREAU	
		C	P	C	P	C	P	C	P	C	P	C	P
MARAIS	Max	144	109	109	304	62	30	27,5	165,0	16,0	13,1	0,8	4,2
	Min	0	10	13	37	0	0	0	1,7	0	0	0	0
	$\bar{X}$	33	31	65	111	22	4	4,2	4,2	4,8	5,7	0,3	2,2
ECLUSE	Max	25	29	36	52	79	80	0,8	5,6	3,2	15,9	3,5	8,3
	Min	6	9	16	15	22	7	0	1,9	0	5,7	2,7	2,3
	$\bar{X}$	13	17	24	30	20	24	0,4	3,9	1,22	9,9	3,0	4,7
MI-ETIER	Max	14	99	60	78	52	90	2,9	25,6	2,7	8,3	11,2	15,5
	Min	14	99	20	19	23	10	0	8,1	0	6,5	2,9	6,0
	$\bar{X}$	14	99	35	45	33	50	1,7	16,0	1,3	7,4	5,9	10,1
ENBOUCHURE	Max	17	146					6,4	33,4				
	Min	0	25					0,5	7,0				
	$\bar{X}$	7	77					3,5	19,2				

Tableau VIII.1 - Comparaisons des pigments chlorophylliens dans les systèmes de Lavau, Cordemais et Dareau (en µg/l)  
C = Chlorophylle a P = Phéophytine

Dans les systèmes de Lavau et de Cordemais, la quantité de pigments chlorophylliens est beaucoup plus élevée dans le marais que dans l'étier, la photosynthèse étant limitée dans l'étier par des turbidités importantes. Dans le marais du Dareau, par contre, il semble qu'un manque de sels nutritifs limite la croissance phytoplanctonique en été.

Malgré ces différences, d'une manière générale, le cycle saisonnier de la chlorophylle a et de la phéophytine montre l'existence de deux phases distinctes dans les étiers :

1°) - la présence d'une grande quantité de chlorophylle a et de phéophytine en été, dans les systèmes étudiés, due à plusieurs facteurs dont la température et l'énergie lumineuse qui favorisent la photosynthèse, et les sels nutritifs nécessaires à la croissance de la biomasse phytoplanctonique,

2°) - la chute très nette des pigments chlorophylliens, en période hivernale, liée à la baisse des températures et à une énergie lumineuse beaucoup moins intense qu'en été alors que les sels nutritifs sont toujours très abondants au cours de l'hiver grâce aux lessivages des sols.

\* \* \* \* \*

*CHAPITRE IX*

*L'oxygène dissous*

L'oxygène dissous est indispensable à la vie végétale et animale. Des eaux trop pauvres en oxygène dissous perdent tout pouvoir épurateur, ce qui peut entraîner une aggravation de la pollution et la mort des organismes ; inversement, la sursaturation peut provoquer des perturbations. Par conséquent, l'oxygène dissous est un bon indicateur de la qualité hydro-biologique des eaux.

Dans les eaux fluviales de la Loire à Montjean, la concentration en oxygène dissous varie de 6 à 12,5 mg/l (66 à 102 % de saturation) de mai 1981 à juillet 1982 (MANICKAM S., 1983), elle varie de 2 à 10 mg/l (27 % à 85 % de saturation) dans les eaux marines à ST Nazaire entre septembre 1981 et décembre 1981 (RINCE Y., 1983). On observe donc une diminution des maxima vers l'aval de l'estuaire, sous l'influence de la salinité.

Nous étudierons l'évolution de l'oxygène dissous dans les trois systèmes à partir des cycles tidaux et annuels, et les variations entre les marais et l'estuaire de la Loire.

## I - L'OXYGENE DISSOUS DANS LE SYSTEME DE LAVAU

### 1 - CYCLE TIDAL (fig IX -1)

#### 1.1 - A L'EMBOUCHURE

##### 1.1.1 - En jusant

Nous observons une diminution de l'oxygène dissous de janvier à avril, plus accentuée en fin de jusant (de 6,5 à 3,5 mg/l - 68 % à 39 % - le 28.04.82). Cet appauvrissement en oxygène dans l'eau résulte de l'oxydation de la matière organique lors de la remise en suspension des sédiments de la couche superficielle des vasières.

De mai à octobre, l'oxygène dissous augmente progressivement (de 3 à 6 mg/l - 34 % à 66 % - le 24.05.82 soit une augmentation de 100 %) sous l'action de la photosynthèse due à une activité biologique intense, liée à l'ensoleillement.

##### 1.1.2 - En flot

En hiver, les teneurs en oxygène dissous augmentent dès le début du flot (de 7 à 8,5 mg/l - 64 à 78% le 11.01.82) grâce à la pénétration des eaux de Loire bien oxygénées. Ensuite, elles restent stables.

En avril, juillet et août 1982, les teneurs en oxygène dissous augmentent également dès le début du flot (de 3,5 à 6,0 mg/l - 39 à 64% le 28.04.82) grâce aux refolements des eaux de rive bien oxygénées sous l'action des zones "marginales"; mais la concentration en oxygène dissous diminue ensuite, pendant la fin du flot (de 6 à 4 mg/l - 64 à 42% le 28.04.82).

Au mois de mai, juin, septembre et octobre, nous observons une diminution de la concentration en oxygène dissous dès le début du flot, et qui se prolonge pendant tout le flot (de 3,5 à 1,7 mg/l - 41 à 20% le 24.05.82).

La variation des concentrations en oxygène dissous dans l'étier est due à l'apport des eaux estuariennes qui diffère suivant la saison en fonction de l'activité biologique.

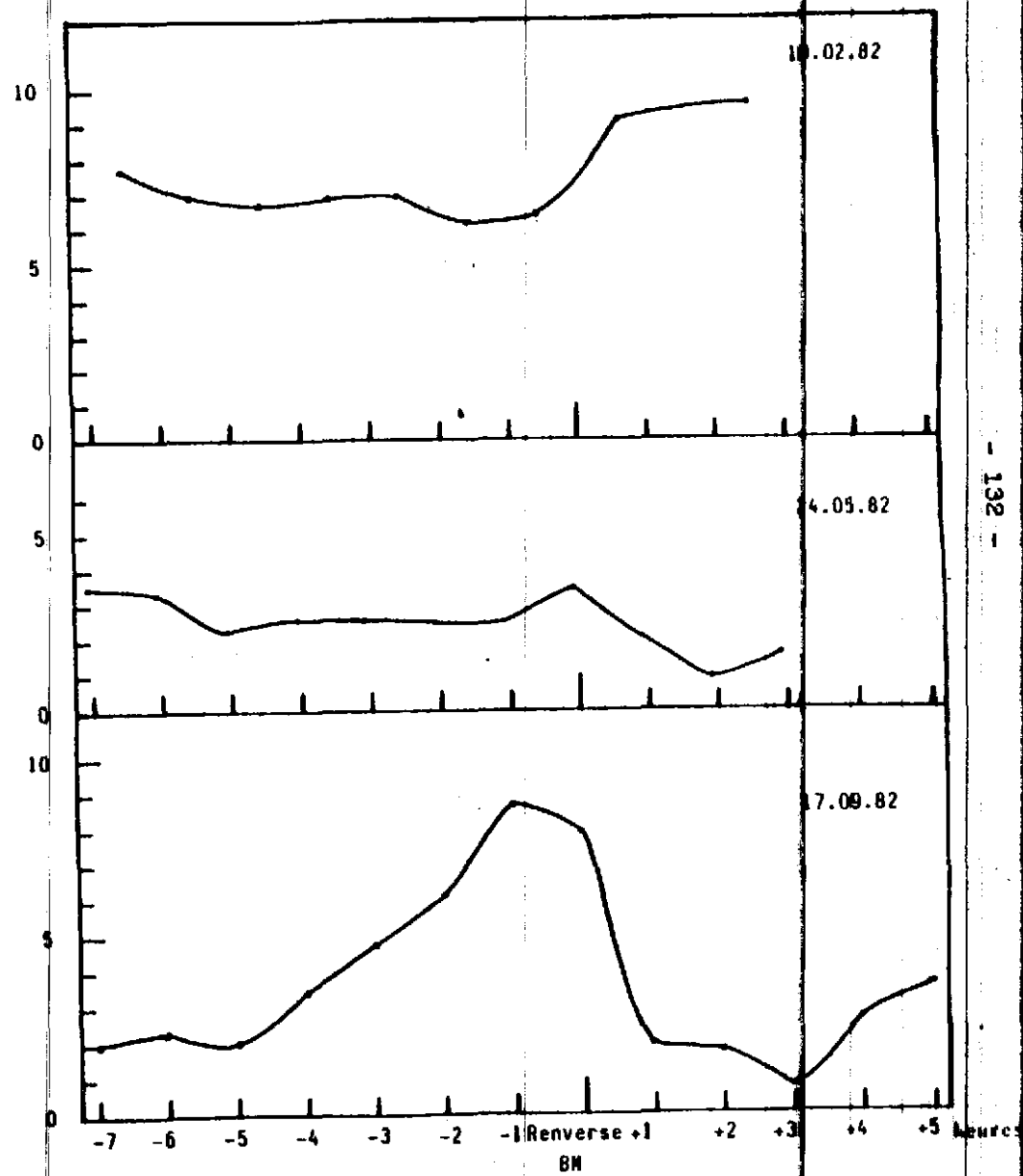
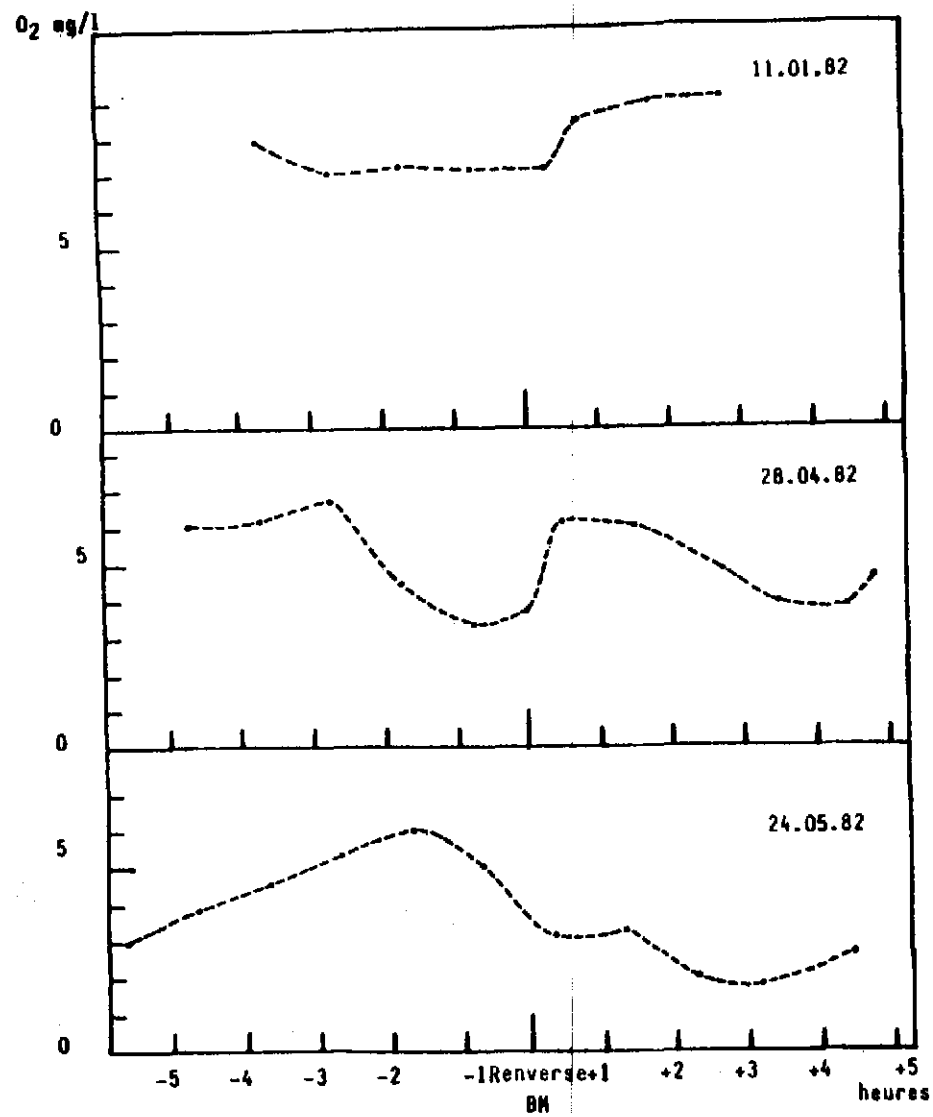
#### 1.2 - A l'écluse (fig IX.2)

##### 1.2.1 - En jusant

En hiver, l'oxygène dissous diminue légèrement pendant les premières heures de jusant (de 5 à 3 mg/l - 43 % à 26 % - le 18.01.83) par suite de l'écoulement des eaux du marais mal oxygénées pour la saison (4 mg/l en moyenne). En fin de jusant, l'oxygène dissous augmente (de 3 à 5 mg/l - 26 % à 43 % - le 18.01.83) grâce à la réaération atmosphérique favorisée par des surfaces de contact air/eau importante par rapport au volume d'eau transitant à l'écluse en fin de jusant. La turbulence des eaux de ruissellement sur les bords de l'étier, amplifiée par la présence de roseaux, entraîne également une augmentation des teneurs en oxygène dissous.

En été, l'oxygène dissous augmente au cours du jusant, notamment dans les eaux de ruissellement, grâce aux facteurs cités précédemment mais grâce aussi à la photosynthèse et à l'apport en oxygène par les eaux du marais. Ainsi, le 17.09.82, la concentration en oxygène dissous s'élève de 310 % pendant les cinq dernières heures de jusant (de 2 mg/l à 8,7 mg/l - 25 % à 112 %).

Variations de l'oxygène dissous au cours de différentes marées



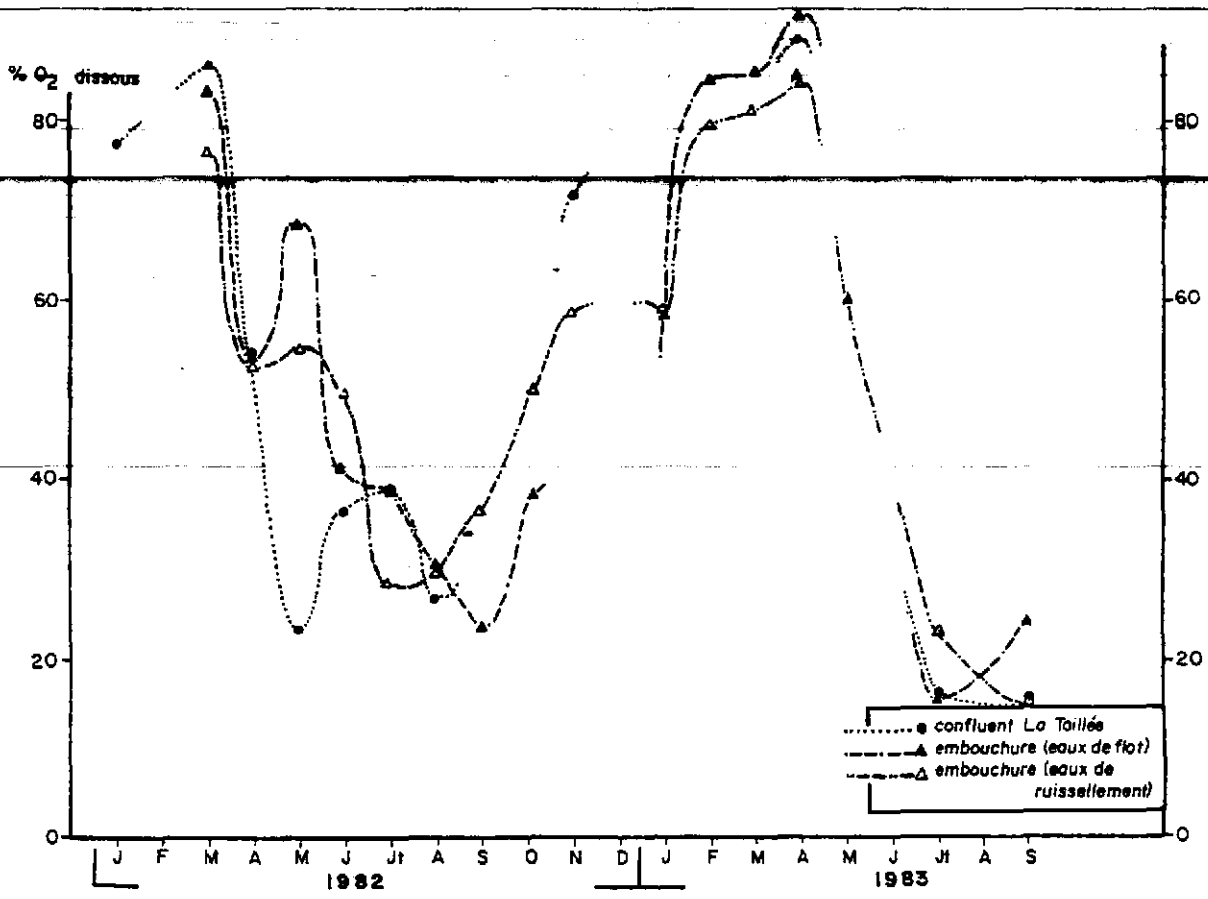


Fig. IX.3 - Variations saisonnières de l'oxygène dissous à l'embouchure et à la Taillée .

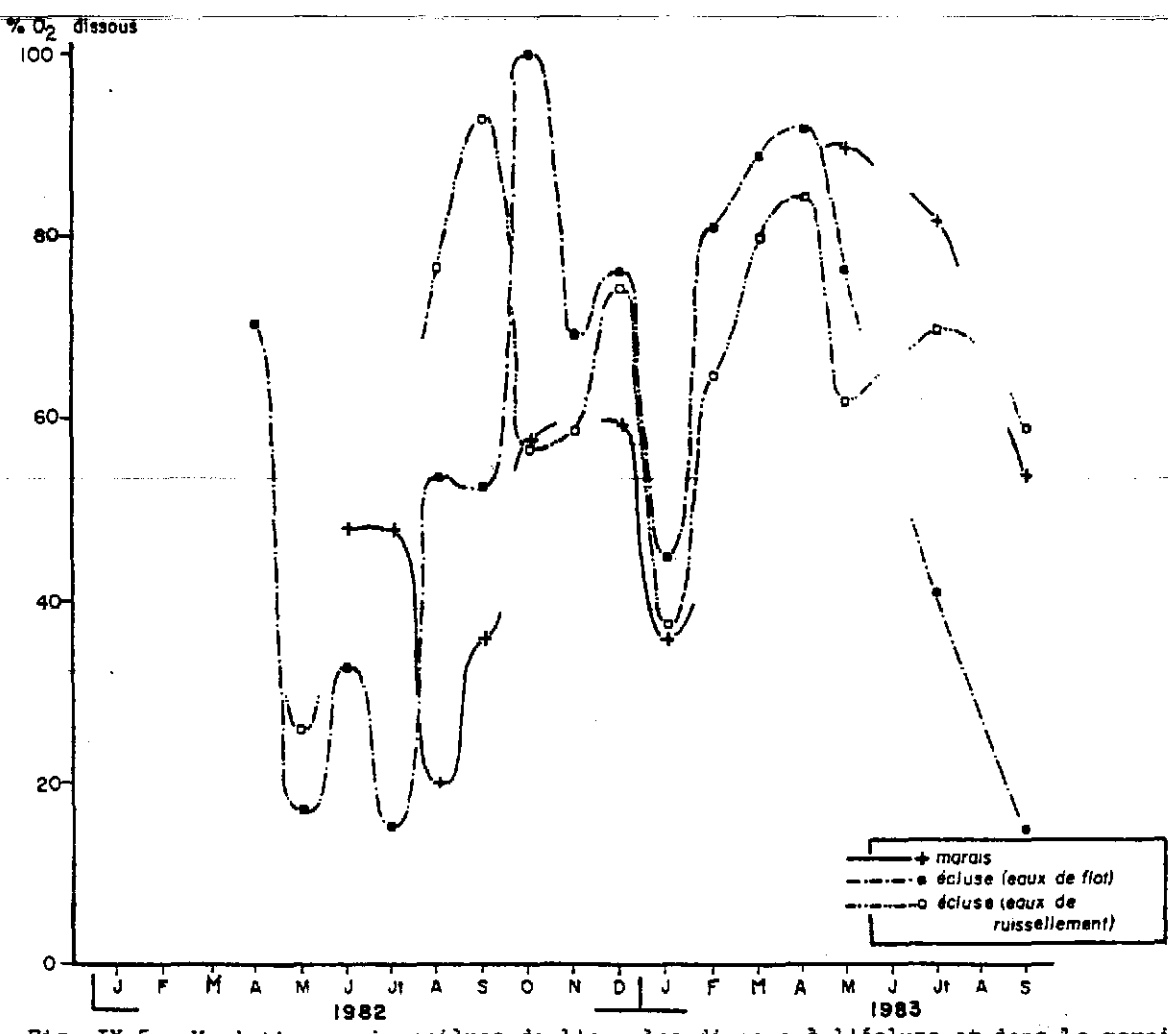


Fig. IX.5 - Variations saisonnières de l'oxygène dissous à l'écluse et dans le marais

### 1.2.2 - En flot

En hiver, la concentration en oxygène dissous augmente dès le début du flot grâce à la pénétration des eaux de Loire bien oxygénées (de 7 à 9 mg/l - 64 % à 83 % - le 10.02.82), et se stabilise ensuite.

En été, nous observons une baisse très importante de l'oxygène dissous (de 8 à 1 mg/l - 106 % à 13 % - le 17.08.82), due à l'arrivée des eaux estuariennes mal oxygénées.

## 2 - CYCLE ANNUEL

Afin de comparer nos séries de mesures entre elles au cours de l'année, nous calculons les pourcentages de saturation en oxygène dissous qui dépendent de la température et de la chlorosité.

### 2.1 - A L'EMBOUCHURE (fig. IX.3)

Nous étudions séparément les eaux de flot et celles de jusant, dans lesquelles nous individualisons les eaux de ruissellement puisque les eaux de retrait (en début de jusant) sont constituées en majeure partie par des eaux de flot et leurs variations saisonnières sont donc semblables.

#### 2.1.1. - Les eaux de flot

Nous observons une similitude entre les variations des débits de la Loire et celles des pourcentages de saturation (fig. IX.4), comme l'ont déjà fait remarqué certains auteurs tels que Francis BOEUF C. (1947) et MARTIN J.M. (1976) à propos des estuaires.

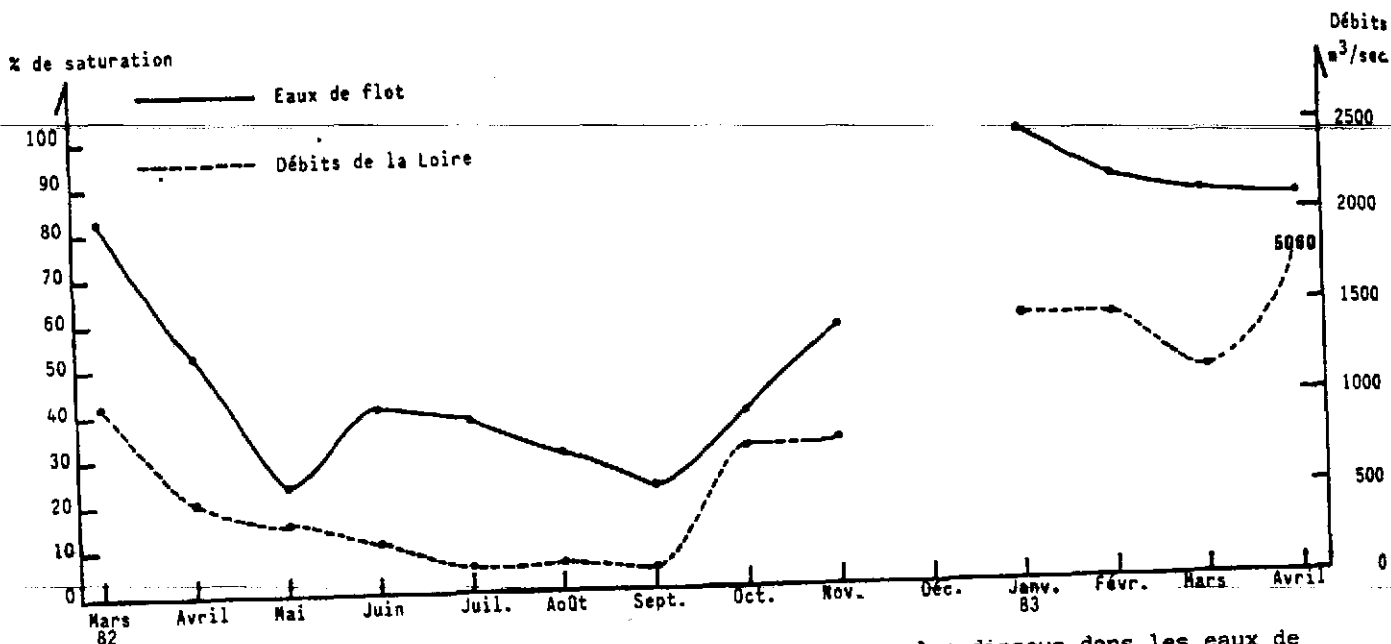


Fig. IX.4 - Variations annuelles des % de saturation en oxygène dissous dans les eaux de flot à l'embouchure et des débits de Loire.

Ainsi en période hivernale, les températures froides, la chlorosité moindre, et la plus grande dilution des matières oxydables et des rejets urbains et industriels améliorent l'oxygénation des eaux, et le pourcentage de saturation augmente (99 % le 18.01.83). Du printemps à l'été, les pourcentages de saturation sont faibles (24 % le 24.05.82) à cause des températures plus élevées, de l'augmentation de la chlorosité qui diminue la dissolution de l'oxygène dans l'eau, et de l'oxydation de la matière organique.

#### 2.1.2. - Les eaux de ruissellement

La valeur minimale du pourcentage de saturation (28 %) est atteinte le 22.07.82 et la valeur maximale (80 %) le 15.02.83. Par conséquent, les teneurs en oxygène dissous varient moins dans les eaux de ruissellement que dans celles de flot, mais elles évoluent de façon similaire à la température et à la chlorosité.

### 2.1.3 - Comparaison entre les eaux de flot et les eaux de ruissellement

En hiver, les eaux de flot sont plus riches en oxygène dissous que celles de ruissellement (de 71 % le 18.01.82) grâce à la pénétration de la Loire dans l'étier.

En été, les eaux de ruissellement sont généralement mieux oxygénées que celles de flot (de 59 % le 17.09.82) grâce à :

- la photosynthèse pendant la journée,
- la réaération, favorisée par le grand développement des surfaces au contact air/eau sur les vasières,
- la turbulence, due à l'écoulement des eaux de ruissellement vers l'étier.

### 2.2 - A L'ECLUSE (fig. IX.5)

Nous observons une meilleure oxygénation des eaux de flot en hiver (82 % le 15.02.83), et des eaux de ruissellement en été (93 % le 17.09.82).

Les facteurs intervenant dans la production d'oxygène sont identiques à ceux décrits à l'embouchure, auxquels il faut ajouter l'apport d'oxygène par les eaux du marais.

### 2.3 - DANS LE MARAIS (fig. IX.5-IX.6)

La figure IX. 6 donne les teneurs en oxygène dissous (en mg/l) dans le marais, en été et en hiver.

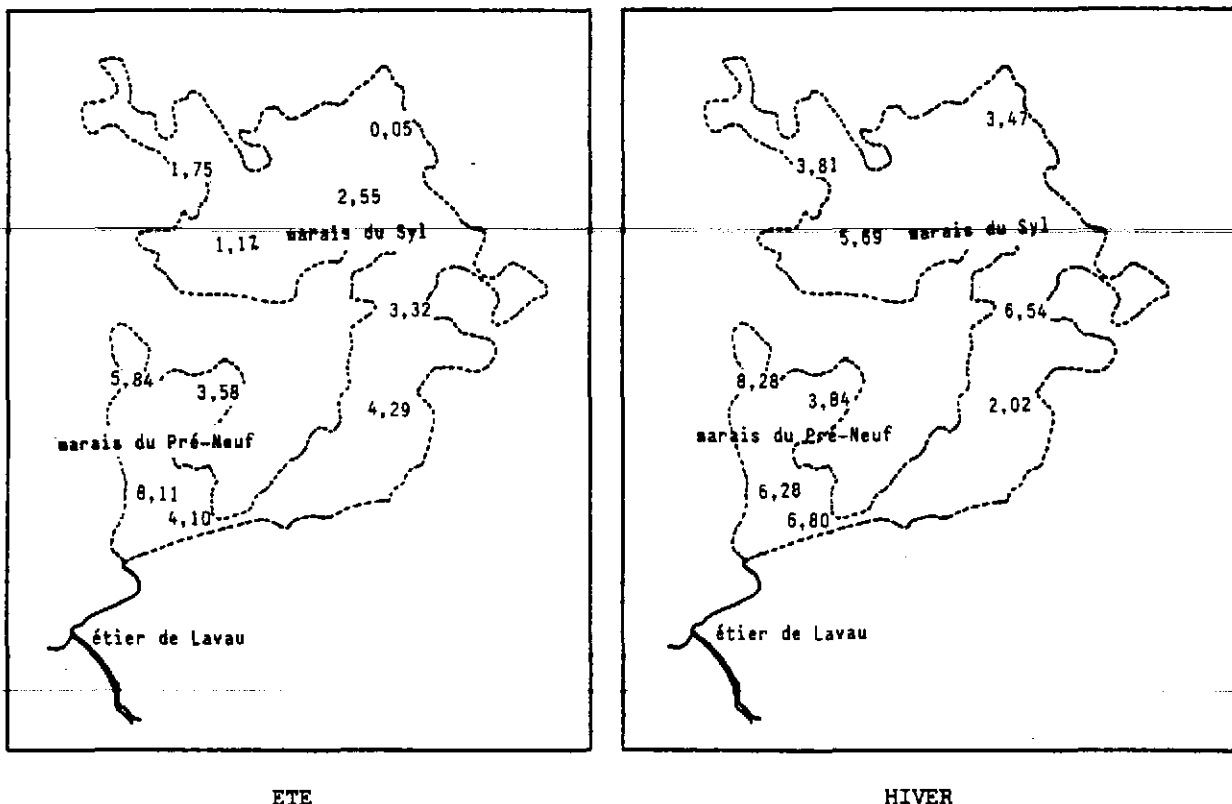


Fig. IX. 6 - Variations des teneurs en oxygène dissous dans le marais de Lavau, (en mg/l).

En hiver, les eaux du marais sont assez pauvres en oxygène dissous (35 % à 60 % de saturation) malgré une température basse et une chlorosité faible. La production d'oxygène dissous est ralentie par l'oxydation de la matière organique provenant de la dégradation des végétaux, des rejets domestiques et de la station d'épuration, ainsi que par une très faible activité photosynthétique.

En été, nous remarquons au Nord du marais du Syl des teneurs très faibles en oxygène dissous, pouvant atteindre zéro, dues aux rejets de la station d'épuration de Savenay au Nord-Est du marais et à la stagnation des eaux lors de la fermeture de l'écluse. Malgré cela, le pourcentage de saturation obtenu sur l'ensemble des points du marais est presque aussi élevé qu'en hiver (24 à 58 %) grâce à la photosynthèse productrice d'oxygène, et maximale sous l'action du soleil dans l'après-midi au moment des prélèvements.



DATES	VOLUME D'EAU	VOLUME D'EAU	VOLUME D'EAU	BILAN	BILAN	BILAN	O <sub>2</sub> SORTI	O <sub>2</sub> ENTRE	J 100 F 100
	SORTI EN JUSANT en m <sup>3</sup>	ENTRE EN FLOT en m <sup>3</sup>	TOTAL - entré + sorti en m <sup>3</sup>	DE O <sub>2</sub> EN JUSANT en kg	DE O <sub>2</sub> EN FLOT en kg	TOTAL DE O <sub>2</sub> - entré + sorti en kg	pour V = 100 m <sup>3</sup> en kg	pour V = 100 m <sup>3</sup> en kg	
29.03.82		343 206							
28.04.82		323 774							
24.05.82	1 178 832	1 058 520	+ 120 036	4 652	2 270	+ 2 282	0,39	0,21	1,86
25.06.82	645 457	535 364	+ 110 093	1 914	1 857	+ 57	0,30	0,31	0,98
22.07.82	589 682	934 869	- 345 187	1 545	2 520	+ 975	0,26	0,26	1,00
20.08.82	780 813	1 059 025	- 218 212	1 786	2 602	- 816	0,23	0,24	0,96
17.09.82	563 120	857 479	- 294 359	1 246	1 594	- 348	0,22	0,18	1,22
19.10.82	1 663 980	1 339 003	+ 324 977	8 672	5 174	+ 3 498	0,52	0,39	1,33
15.11.82	983 017	954 978	+ 28 039	6 362	5 699	+ 663	0,65	0,60	1,08
18.01.83	750 531	388 377	+ 362 154	6 470	3 838	+ 2 632	0,86	0,99	0,87
15.02.83	786 906	576 141	+ 210 765	8 731	6 619	+ 2 112	1,11	1,15	0,96
17.03.83	857 245	818 550	+ 38 695	7 446	6 025	+ 1 421	0,87	0,74	1,17
14.04.83	678 109	466 151	+ 211 958	6 660	4 739	+ 1922	0,98	1,02	0,96

Tableau IX.1 - A l'embouchure

	VOLUME D'EAU	VOLUME D'EAU	VOLUME D'EAU	BILAN	BILAN	BILAN	O <sub>2</sub> SORTI	O <sub>2</sub> ENTRE	J 100 F 100
	SORTI DU MARAIIS en m <sup>3</sup>	ENTRE DANS LE MARAIIS en m <sup>3</sup>	TOTAL SORTI en m <sup>3</sup>	de O <sub>2</sub> SORTI en kg	DE O <sub>2</sub> ENTRE en kg	TOTAL DE O <sub>2</sub> - entré + sorti en kg	V = 100 m <sup>3</sup>	V = 100 m <sup>3</sup>	
10.02.82	47 988	0	47 988	330		+ 330	0,69		
24.05.82	70 458	52 534	17 924	182	77	+ 105	0,26	0,15	1,73
16.12.82	84 591	0	84 591	628		+ 628	0,74		

Tableau IX.2 - A l'écluse

Bilans de l'oxygène dissous par cycle de marée

Cependant, si nous mettons en parallèle les bilans des volumes d'eau et les flux d'oxygène dissous obtenus au cours d'un cycle de marée à l'embouchure (fig. IX. 7), nous remarquons qu'en période d'étiage, de juillet à septembre, la différence entre les volumes d'eau et les quantités d'oxygène dissous est beaucoup plus grande que pour les autres mois : malgré des volumes d'eau piégés, très importants (294 359 m<sup>3</sup> le 17.09.82), la quantité d'oxygène dissous absorbée par le système étier-marais est faible (348 kg le 17.09.82).

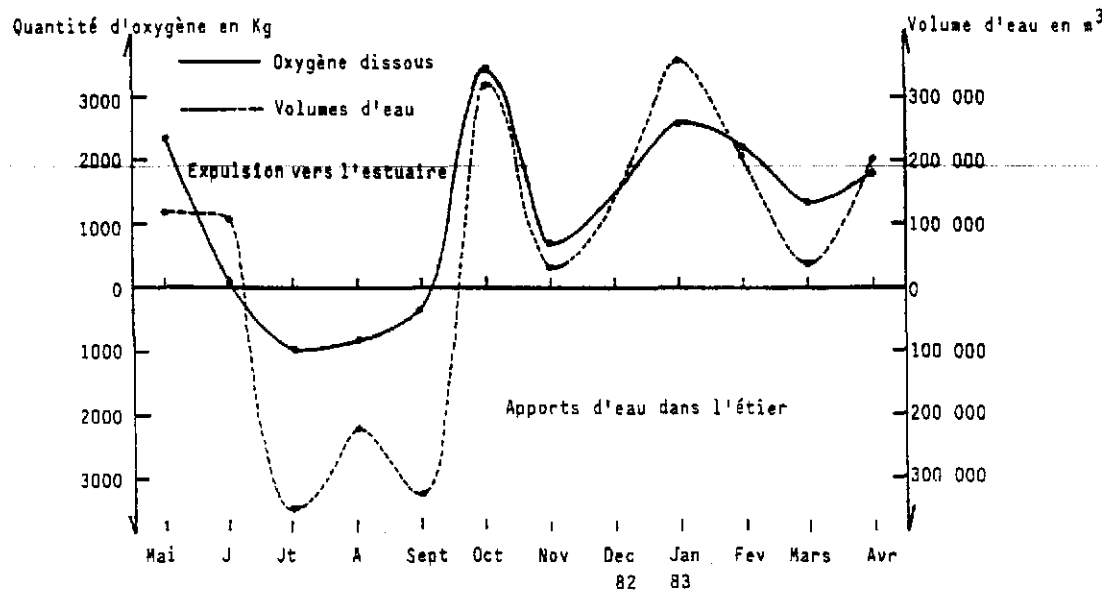


Fig. IX. 7 - Variations annuelles des flux des volumes d'eau et de l'oxygène dissous au cours d'une marée.

Pour nous affranchir des volumes d'eau, nous choisissons un volume unitaire de 100 m<sup>3</sup> (cf. chapitre VI : "Matières en suspension"). Les résultats exprimés dans le tableau IX. 1 montrent un équilibre général entre les entrées et les sorties, mais en septembre par contre, bien que les quantités d'oxygène dissous transportées dans l'étier soient plus faibles que pour les autres mois, l'étier expulse de l'oxygène en Loire. Nous retrouvons, ici, les constatations faites antérieurement, qui mettaient en valeur la capacité de l'étier à fournir de l'oxygène grâce, essentiellement, aux eaux de ruissellement.

#### 4.2 - A L'ECLUSE

Les résultats, dans le tableau IX. 2, indiquent que les quantités d'oxygène qui transitent dans l'étier à l'écluse sont beaucoup plus faibles qu'à l'embouchure puisque les volumes d'eau y sont également plus faibles. Si l'on s'affranchit des volumes d'eau, on remarque qu'en hiver (février et décembre 1982), les quantités d'oxygène dissous sorties du marais (0,69 kg/100 m<sup>3</sup> et 0,74 kg/100 m<sup>3</sup>) sont plus importantes que celles du mois de mai (0,26 kg/100 m<sup>3</sup>). Cette diminution en oxygène au printemps est due à des températures plus chaudes, et une chlorosité plus élevée par suite des envois de marée ayant débuté dès le mois de mai. D'autre part, la quantité d'oxygène dissous qui pénètre dans le marais est inférieure à la quantité qui en sort, à cause de la remontée des eaux estuariennes très pauvres en oxygène.

#### 5 - CONCLUSION

L'évolution de l'oxygène dissous dans le système étier-marais dépend de divers mécanismes de production et de consommation liés aux variations tidales et annuelles en chacun des points étudiés.

Nous tentons de les synthétiser dans le tableau IX. 3.

SAISONS	MAREE	MARAI	ECLUSE	ENBOUCHURE
du PRINTEMPS à L'AUTOMNE	JUSANT	Production d'Oxygène dissous grâce à la photosynthèse	<p style="text-align: center;">→ légère consommation d'O<sub>2</sub> →</p> Enrichissement grâce à la photosynthèse, la turbulence des eaux, la réaération atmosphérique Porte ouverte : apport des eaux du marais	- Production d'O <sub>2</sub> due aux mêmes phénomènes qu'à l'écluse - Utilisation d'O <sub>2</sub> par le benthos aérobie et pour la réduction de la matière organique.
	FLOT		Appauvrissement en O <sub>2</sub> dû à la remontée des eaux estuariennes <p style="text-align: center;">← enrichissement en O<sub>2</sub> grâce à la photosynthèse ←</p>	Appauvrissement en O <sub>2</sub> dû à la remontée des eaux estuariennes très pauvres en oxygène.
HIVER	JUSANT	Eaux pauvres en Oxygène	<p style="text-align: center;">→ production d'O<sub>2</sub> →</p> Diminution de l'O <sub>2</sub> due à l'écoulement des eaux du marais	Augmentation en O <sub>2</sub> grâce à la réaération atmosphérique et la turbulence des eaux
	FLOT		Diminution de l'O <sub>2</sub> due à l'oxydation de la matière organique remise en suspension en flot <p style="text-align: center;">← consommation d'O<sub>2</sub> ←</p>	Enrichissement en O <sub>2</sub> grâce à l'apport des eaux estuariennes bien oxygénées

Tableau IX.3 - Evolutions tidales et saisonnières de l'oxygène dissous dans le système de Lavau.

D'une manière générale, des températures basses et des salinités faibles améliorent l'oxygénation des eaux, mais selon les différents points étudiés d'autres facteurs interviennent en faveur de la production ou de la consommation d'oxygène dissous.

Les facteurs de production sont :

- la photosynthèse pendant la journée,
- la réaération atmosphérique sur les vasières,
- la turbulence des eaux de ruissellement,
- la pénétration des eaux de Loire en hiver.

Les facteurs de consommation sont :

- l'oxydation de la matière organique (déchets domestiques et industriels, organismes morts) favorisée par la remise en suspension,
- les organismes aérobies,
- la pénétration des eaux de Loire du printemps à l'automne.

Les interactions de ces phénomènes font de l'étier un exportateur d'oxygène dissous vers la Loire. Ceci est remarquable en été, lorsque les eaux de ruissellement enrichies en oxygène dissous grâce aux différents facteurs de production, entraînent une meilleure oxygénation des eaux de l'estuaire très pauvres en oxygène.

## II - L'OXYGÈNE DISSOUS DANS LES SYSTEMES DE CORDEMAIS ET DU DAREAU

### 1 - A CORDEMAIS

#### 1.1 - DANS L'ETIER (fig. IX.8-IX.9)

En hiver, les concentrations en oxygène dissous sont stables ou augmentent légèrement pendant le jusant. La pénétration des eaux de Loire en flot entraîne une augmentation (de 7,5 à 10,5 mg/l le 24.02.83).

En été, les concentrations en oxygène dissous augmentent pendant le jusant sous l'action de la photosynthèse et de la turbulence (de 6,7 à 10,2 mg/l le 2.08.82) et chutent brutalement en début de flot (de 10,2 à 5,2 mg/l le 2.08.82) à cause de l'arrivée des eaux de Loire peu oxygénées.

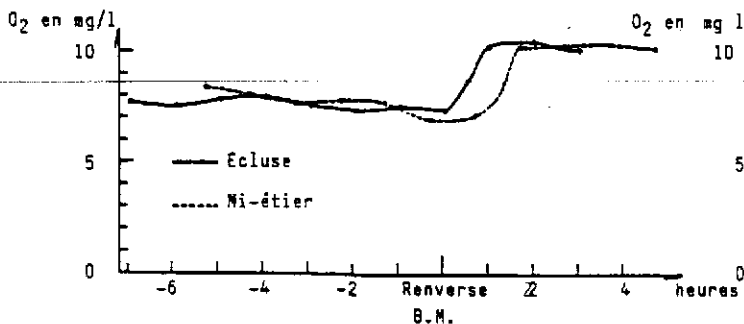


Fig. IX. 8 - Variations de l'oxygène dissous au cours d'une marée. (Cordemais le 24.02.83)

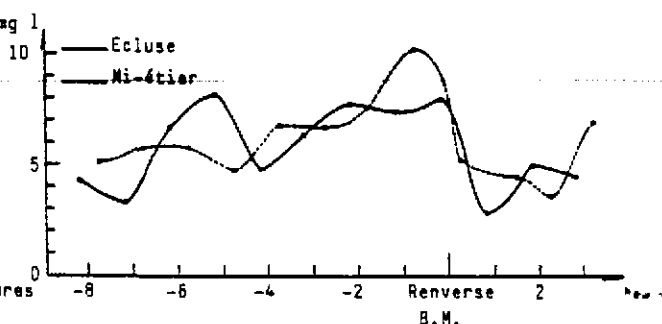


Fig. IX. 9 - Variations de l'oxygène dissous au cours d'une marée. (Cordemais le 2.08.82)

#### 1.2 - DANS LE MARAIS

Les eaux du marais sont plus oxygénées en hiver (8 mg/l) qu'en été (5 mg/l) mais alors que les teneurs en oxygène dissous sont à peu près identiques dans tout le marais en hiver, en été des différences très nettes apparaissent entre le Nord et le Sud. Les teneurs très faibles en bordure sud, pouvant atteindre 0,1 mg/l, témoignent d'une anoxie liée :

- à un renouvellement faible des eaux aux extrémités S du marais,
- à un mauvais entretien des douves et des canaux,
- aux rejets de la station d'épuration pénétrant dans le marais lors des envois de marée.

### 2 - AU DAREAU

#### 2.1 - DANS L'ETIER (fig. IX. 10 - IX.11)

En hiver, l'oxygène dissous augmente en jusant, et notamment après l'ouverture des portes, grâce à l'écoulement des eaux du marais riches en oxygène (de 8 à 10 mg/l le 3.02.83). Après la renverse de B.M., la teneur en oxygène dissous reste stable.

En été, la concentration en oxygène dissous augmente pendant le jusant et chute dès le début du flot (de 6,2 à 0,7 mg/l le 6.09.83) avec l'arrivée des eaux de Loire très pauvres.

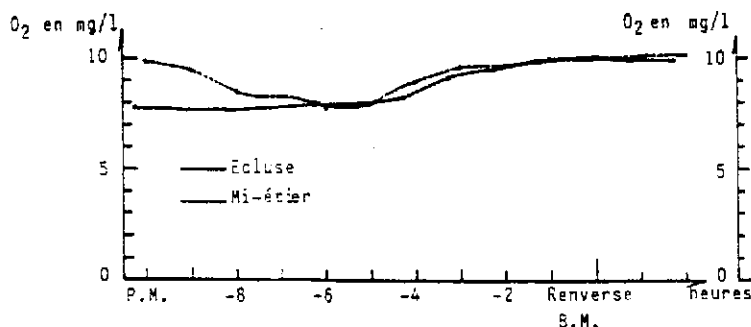


Fig. IX.10 - Variations de l'oxygène dissous au cours d'une marée. (Dareau le 3.02.83)

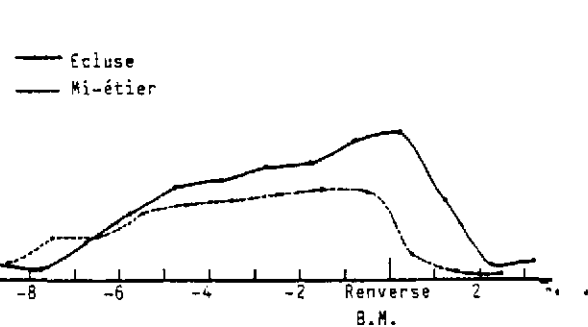


Fig. IX. 11 - Variations de l'oxygène dissous au cours d'une marée. (Dareau le 6.09.82)

2.2 - DANS LE MARAIS

Les concentrations en oxygène dissous augmentent de 4,5 mg/l le 6.09.82 à 9,8 mg/l le 3.02.83, mettant en évidence un cycle saisonnier. En été, les prélèvements faits au sud du marais ( aux points 7, 8, 9 ) en communication directe avec la Loire, montrent des teneurs en oxygène plus élevées que dans le marais proprement dit, soumis à une stagnation des eaux. En hiver, nous observons une homogénéité des résultats dans tout le marais.

III - COMPARAISON ENTRE LES TROIS SYSTEMES

Les variations des concentrations en oxygène dissous sont assez semblables dans les trois étiers et leur marais, sous l'action des mêmes facteurs physico-chimiques et biologiques de production et de consommation. Afin de comparer les trois systèmes entre eux, nous dressons le tableau IX. 4 des % de saturation de l'été (septembre 82) et de l'hiver (janvier et février 83).

LIEUX DE PRELEVEMENTS		ETE (septembre 1982)			HIVER (janvier-février 1983)		
		LAVAU	CORDEMAIS	DAREAU	LAVAU	CORDEMAIS	DAREAU
MARAIS	Max	133	124	88	87	93	94
	Min	3	1	10	4	42	70
	$\bar{X}$	58	54	52	36	69	85
ECLUSE	Max	108	32	76	59	97	89
	Min	9	9	5	27	61	60
	$\bar{X}$	42	25	38	41	76	74
MI-ETIER	Max	22	102	36	102	97	91
	Min	7	15	3	59	77	66
	$\bar{X}$	13	68	18	72	61	80
EMBOUCHURE	Max	49			117		
	Min	11			47		
	$\bar{X}$	27			76		

Tableau IX.4 - Comparaison des pourcentages de saturation en oxygène dissous dans les systèmes de Lavau, Cordemais et Dareau.

- En été

- dans les marais : on observe une diminution de l'oxygène dans les marais, de Lavau vers le Dareau : l'activité photosynthétique est plus importante dans le marais de Lavau (cf. chapitre VIII : Chlorophylle) et contribue à un enrichissement en oxygène plus marqué que pour les étiers en amont de Lavau.

- dans les étiers : du fait de l'écoulement des eaux du marais vers les étiers, les eaux à l'écluse de Lavau sont plus enrichies en oxygène. A mi-étier (et à l'embouchure) , les eaux de Lavau sont légèrement appauvries en oxygène par rapport à celles de l'étier du Dareau : les eaux les moins bien oxygénées sont donc situées en aval de l'estuaire interne et leur pénétration dans l'étier de Lavau entraîne une diminution de l'oxygène plus nette qu'au Dareau . D'autre part, les eaux sont plus salées dans la région de Lavau et diminuent donc la dissolution de l'oxygène dans l'étier . A Cordemais, des phénomènes particuliers - station d'épuration - centrale de Cordemais - viennent perturber les variations en oxygène que nous ne pouvons expliquer .

- En hiver

- Dans le marais, on note une augmentation de l'oxygène de Lavau vers le Dareau, qui se répercute dans les eaux de l'écluse : les eaux douces sont plus oxygénées que les eaux légèrement salées. D'autre part, les eaux du Dareau contiennent beaucoup moins de produits de dégradation (pheophytine) que les deux autres étiers, ce qui explique leur meilleure oxygénation.

- Dans les étiers, plus riches en oxygène que les marais, les eaux de Lavau sont plus oxygénées que celles de Cordemais et du Dareau : en aval de l'estuaire interne, les eaux sont enrichies en oxygène.

Ces comparaisons montrent que les variations sont beaucoup plus importantes dans l'étier de Lavau que dans les deux autres. Ceci justifie notre choix, au début de l'étude, axé essentiellement, sur l'étier de Lavau qui sert de référence pour les autres étiers, bien que l'amplitude des variations tidales et saisonnières y soit plus forte.

Ainsi, d'une façon générale, nous observons en hiver, l'enrichissement des eaux des étiers en oxygène dissous grâce à la pénétration des eaux estuariennes. Une partie de l'oxygène est ensuite consommée par le phénomène d'oxydation de la matière organique remise en suspension, lors de la remontée des eaux vers le marais.

En été, la Loire, très pauvre en oxygène, diminue les concentrations en oxygène des étiers au cours du flot. Les eaux de ruissellement qui s'écoulent de l'étier vers la Loire sont oxygénées grâce, en particulier, à la photosynthèse pendant la journée ainsi qu'à la réaération atmosphérique et la turbulence des eaux de ruissellement sur les vasières. Elles améliorent ainsi l'oxygénation en Loire.

Par conséquent, l'évolution de l'oxygène dissous dans les systèmes illustre très nettement l'importance des étiers et des marais dans la réoxygénation estuarienne en été. Nous préconisons donc la sauvegarde des zones marginales qui sont au coeur de la vie dans l'estuaire.

\* \* \* \* \*

CHAPITRE X

*La silice dissoute*

La silice, présente dans toute la biosphère sous forme hydratée (opale) (ERHART H. 1963), se trouve dans les eaux essentiellement sous la forme dissoute  $\text{Si}(\text{OH})_4$ . Les teneurs en silice dissoute très faibles dans l'eau de mer (de l'ordre de 1 à 10  $\mu\text{atg Si/l}$ ) sont comprises entre 67 et 230  $\mu\text{atg Si/l}$  (4 à 14  $\text{mg/l}$ ) dans les eaux de Loire.

Il convient, afin de comprendre l'évolution de la silice dissoute dans le système étier-marais, d'étudier le cycle tidal, puis le cycle annuel pour les différents points.

## I - VARIATIONS DE LA SILICE DISSOUTE DANS LE SYSTEME DE LAVAU

### 1 - LE CYCLE TIDAL

#### 1.1 - A L'EMBOUCHURE (fig X.1)

##### - en jusant

Nous observons des variations très importantes de la silice dissoute qui se manifestent différemment selon la période considérée.

- En hiver, la teneur en silice dissoute diminue (de 180 à 165  $\mu\text{atg Si/l}$  le 11.01.82 - de 240 à 140  $\mu\text{atg Si/l}$  le 29.03.82) : une partie de la silice, provenant du lessivage des sols en période de crues, est retenue par les vasières.

- A partir du mois d'avril 1982 et jusqu'en octobre 1982, le phénomène s'inverse et nous notons un enrichissement en silice correspondant à un apport des vasières (de 200 % le 24.05.82 et de 26 % le 19.10.82).

##### - en flot

- En hiver, lors des débits élevés de la Loire (1480  $\text{m}^3/\text{s}$  le 18.01.83), les eaux fluviales riches en silice descendent plus en aval et une faible quantité de ces eaux vient s'engouffrer dans l'étier de Lavau en début de flot : les teneurs en silice dissoute augmentent très rapidement à ce moment là (passant de 135 à 175  $\mu\text{atg Si/l}$ , soit 25 % le 15.02.83) et se stabilisent aussitôt après.

- D'avril à septembre, dans la demi-heure qui suit la renverse de B.M., nous observons une chute brutale des teneurs en silice dissoute (360 à 125  $\mu\text{atg Si/l}$  le 25.06.82) : les eaux océaniques pauvres en silice qui remontent dans l'estuaire à la faveur des faibles débits, pénètrent dans l'étier.

#### 1.2 - A L'ECLUSE (fig X.2)

##### - en jusant

Deux phénomènes différents se produisent selon les saisons :

- en hiver, une augmentation progressive de la silice, jusqu'à la renverse de B.M. (de 120 à 170  $\mu\text{atg Si/l}$  le 29.03.82) grâce à l'écoulement des eaux du marais particulièrement riches en silice.

- en été, une augmentation pendant les premières heures du jusant, suivie d'une diminution brutale 2 à 4 heures avant l'étale de B.M. Le 25.06.82 et le 20.08.83, cet appauvrissement a lieu après l'ouverture de l'écluse, le marais "consommateur de silice" libérant des eaux pauvres en silice.



Variations de la silice dissoute au cours de différentes marées

Fig. X.1 - A l'embouchure

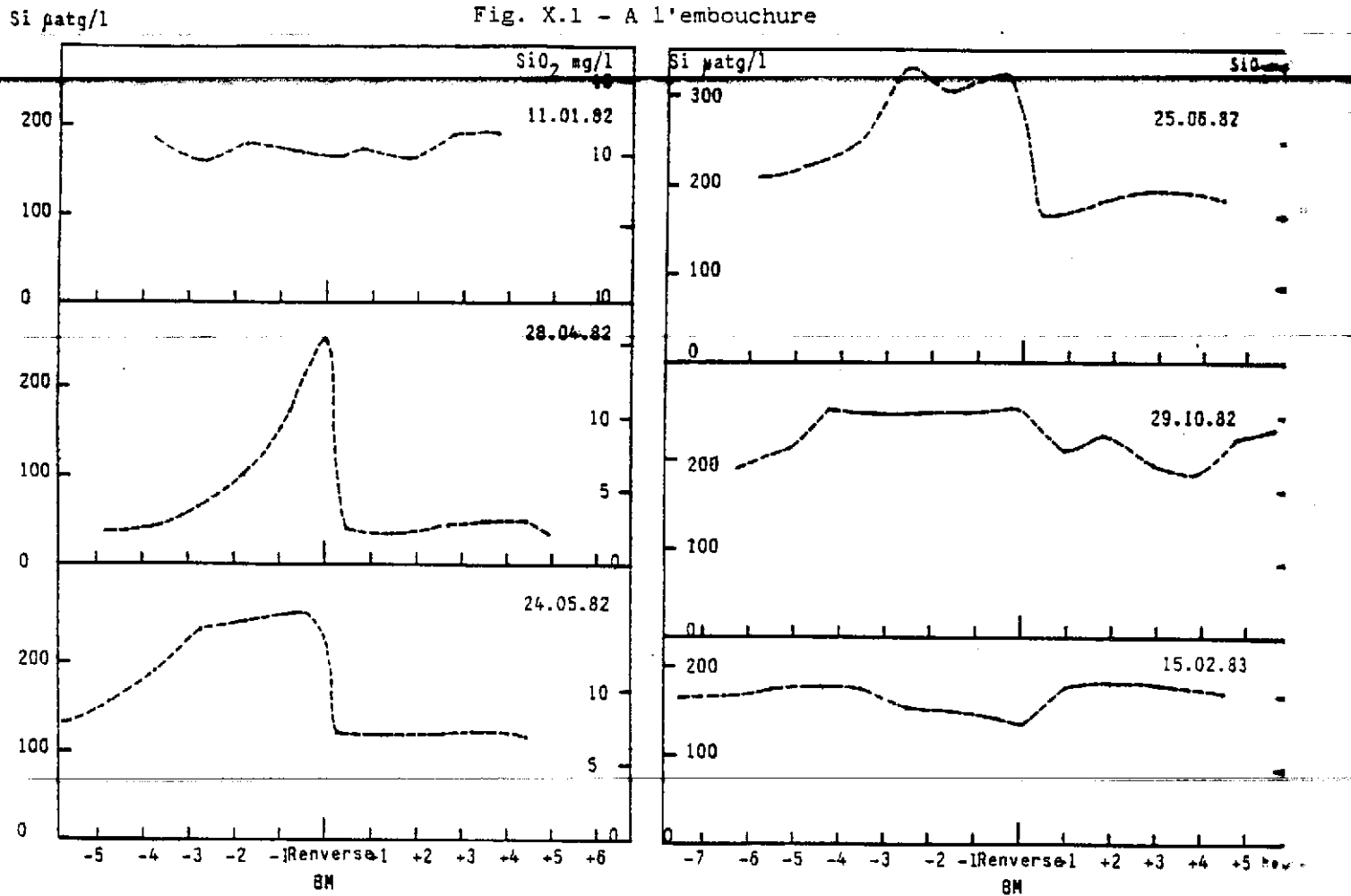
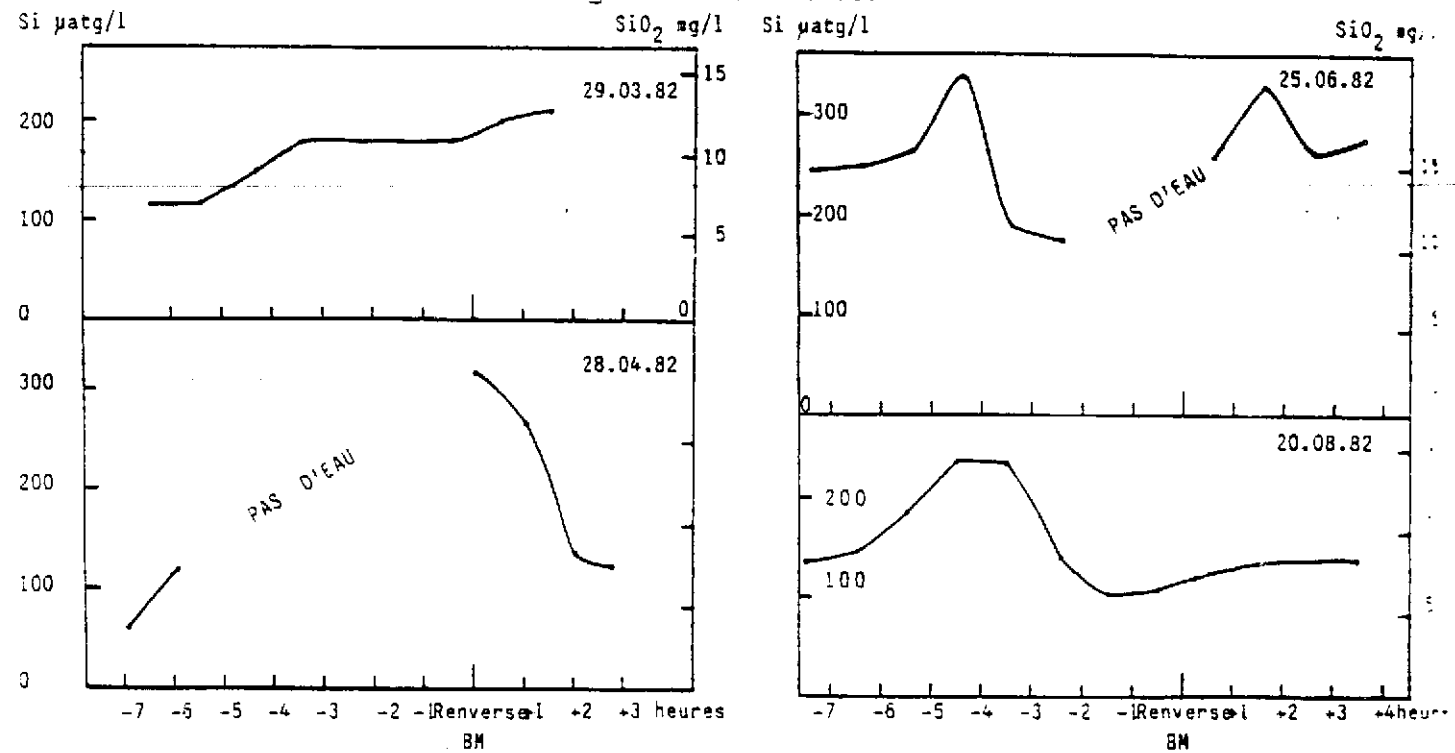


Fig. X.2 - A l'écluse



- en flot

- En hiver, nous n'observons pas de variation dans les teneurs en silice au cours du flot.

- D'avril à septembre 1982 (excepté en juin et en août), nous constatons une diminution de la silice dissoute (de 315 à 215 µatg Si/l le 28.04.82), plus ou moins marquée au cours du flot et due à la pénétration dans l'étier des eaux estuariennes plus marines, pauvres en silice.

### 1.3 - CONCLUSION

La concentration en silice dissoute varie considérablement au cours d'un cycle de marée dans l'étier, à l'écluse comme à l'embouchure.

Les facteurs principaux engendrant un appauvrissement en silice sont :

- les faibles débits de Loire qui entraînent l'arrivée des eaux océaniques dans l'estuaire, et dans l'étier,

- l'écoulement des eaux du marais pauvres en silice, en été,

- la rétention de la silice par les vasières, en hiver.

Les facteurs qui permettent un enrichissement sont :

- les débits de Loire élevés entraînant l'arrivée des eaux fluviales, en hiver,

- l'écoulement des eaux du marais en hiver,

- le relargage de la silice dissoute par les vasières.

Ces paramètres déterminent, pour chaque masse d'eau définie précédemment (cf. chapitre III : "Hydrodynamique"), des variations particulières, plus importantes et plus caractéristiques, cependant, pour les eaux de ruissellement et les eaux de flot, grâce à l'action des vasières en fin de jusant et à l'arrivée des eaux fluviales ou marines selon la saison, au cours du flot.

## 2 - LE CYCLE ANNUEL

### 2.1 - A L'EMBOUCHURE

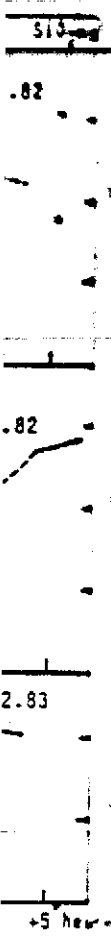
Pour étudier le cycle annuel de la silice dissoute, il est absolument indispensable de séparer les eaux de ruissellement et celles de flot puisqu'elles présentent des valeurs qui peuvent être fort différentes.

L'amplitude de variation de la silice dissoute au cours de l'année est importante à l'embouchure puisqu'elle est de 190 µatg Si/l pour les eaux de flot et de 220 µatg Si/l pour celles de ruissellement.

#### 2.1.1 - Les eaux de flot

Nous avons tracé la courbe montrant les variations annuelles de la silice pour les eaux de Loire pénétrant dans l'étier (fig X.3). En hiver, la concentration en silice dissoute est très élevée (230 µatg Si/l le 10.02.82), grâce aux lessivages des sols lors des crues de la Loire. BERTHOIS L. (1964), BOUTELIER P. (1979) ont déjà noté le lien entre les valeurs maximales de silice en hiver (de l'ordre de 230 µatg Si/l et les crues de Loire. Il est donc intéressant, d'étudier l'évolution de la silice dissoute en fonction de la chlorosité qui varie d'une façon inversement proportionnelle aux débits.

Nous construisons donc la droite de dilution (fig X.4) à partir de la moyenne des deux dernières heures de flot à l'embouchure pour les deux paramètres.



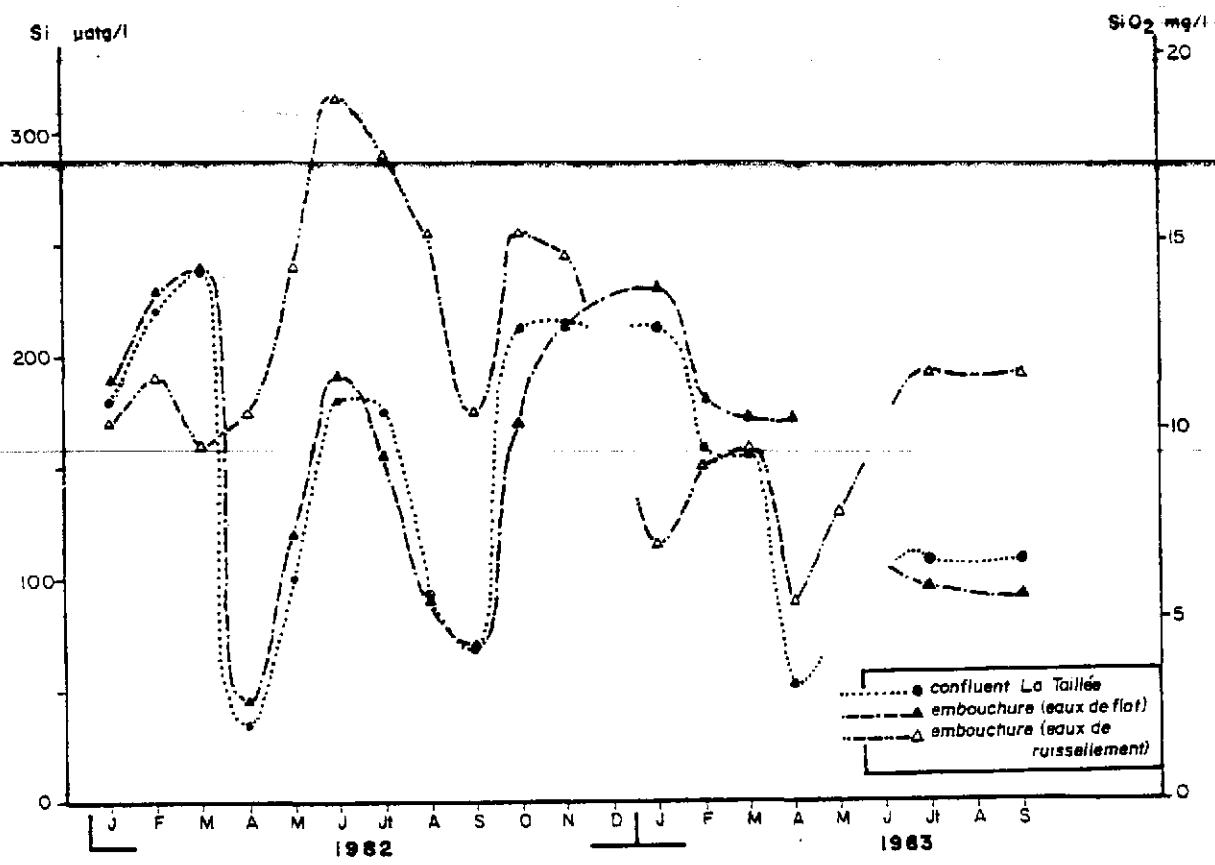


Fig. X.3 - Variations saisonnières de la silice dissoute à l'embouchure et à la Taillée .

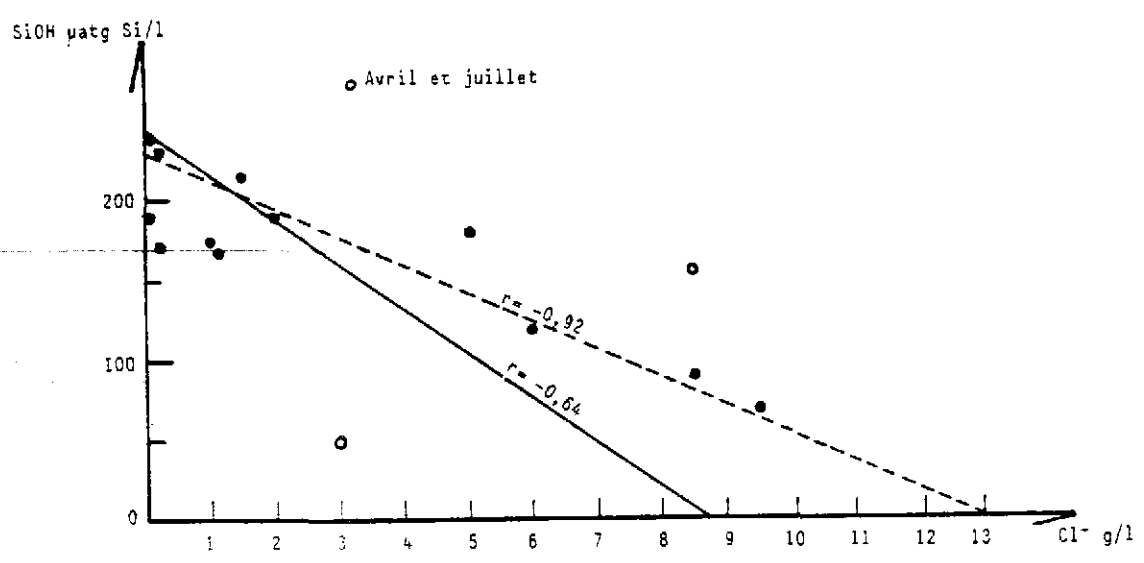


Fig. X.4 - Courbe de dilution de la silice dissoute dans les eaux de flot à l'embouchure de l'étier de Lavau .

Le coefficient de corrélation pour la droite de dilution est de - 0,64 si nous conservons toutes les valeurs de l'année, mais devient - 0,92, indiquant un degré de liaison élevé entre la silice dissoute et la chlorosité, si nous supprimons les points d'avril et de juillet, éloignés de la droite. En effet, au mois d'avril, marqué par une très forte diminution de silice, la concentration en silice atteint un minimum de 50  $\mu\text{atg Si/l}$ , soit un appauvrissement de 380 % par rapport au mois de mars. Cet appauvrissement considérable ne peut s'expliquer uniquement par un apport moins important des eaux ligériennes en silice dissoute à la faveur d'un débit relativement faible (525  $\text{m}^3/\text{s}$ ), puisque pour des débits encore plus faibles, nous n'observons pas une telle diminution de la silice. Il est vraisemblablement dû à une consommation par les diatomées lors du bloom phytoplanctonique se produisant en mars-avril, dans l'estuaire.

Au mois de juillet, par contre, la silice dissoute est en excès par suite de la dissolution des frustules de diatomées, consécutive au bloom phytoplanctonique du mois de juin dans l'étier (cf. chapitre VIII : Les pigments chlorophylliens).

De la fin du printemps au début de l'été, les teneurs en silice sont élevées (190  $\mu\text{atg Si/l}$  le 25.06.82) malgré la période d'étiage. Nous ne pouvons donc corréler les concentrations en silice dissoute avec les débits de la Loire pendant l'été, car des phénomènes biologiques importants viennent se surimposer aux phénomènes physiques (cf. chapitre VIII : Chlorophylle). En effet, les diatomées, consommatrices de silice dissoute, se développent de plus en plus grâce à des températures et des quantités de sels nutritifs favorables. Leur mortalité, puis la dégradation de leur frustule restitue ainsi la silice dissoute et provoque un excès le 22.07.82.

A la fin de l'été, la diminution de la concentration en silice indique une remontée importante des eaux marines dans l'estuaire pour des débits de Loire faibles (145-124  $\text{m}^3/\text{s}$ ), ainsi que la consommation par les diatomées encore relativement bien représentées.

Dès le mois d'octobre, à la faveur d'un débit plus important de 790  $\text{m}^3/\text{s}$  en Loire, nous observons un enrichissement des eaux en silice dissoute qui persiste pendant tout l'hiver.

### 2.1.2 - Les eaux de ruissellement

La moyenne des concentrations en silice pour chaque sortie nous permet d'établir la courbe (fig X.3) représentant les variations annuelles.

~~En été, la valeur maximale est de 315  $\mu\text{atg Si/l}$  le 25.06.82, pour une valeur maximale de 255  $\mu\text{atg Si/l}$  le 19.10.82, au cours de la saison hivernale. Cette variation de la teneur en silice entre les saisons est liée à différents facteurs. En effet, après le bloom phytoplanctonique observé en juin dans l'étier (cf. chapitre VIII : Chlorophylle), la mort des diatomées provoque une augmentation de la silice dans les eaux, mais elle~~

n'est pas suffisante pour expliquer un enrichissement d'au moins 20 % par rapport aux eaux d'hiver. Un deuxième phénomène intervient donc : les eaux interstitielles des vases superficielles des vasières s'enrichissent en silice dissoute ainsi que l'ont montré GARDNER L.R. (1975), GOULEAU D. (1975), BOUTELIER P. (1979) grâce à une évaporation intense sous l'effet de l'émersion qui permet l'ascension des eaux interstitielles sous-jacentes très riches en silice (GOULEAU D. (1975) Les eaux de ruissellement, qui s'écoulent sur les vasières enrichies en silice permettent ainsi une augmentation considérable de la teneur en silice des eaux de l'étier en fin de jusant. Ce phénomène est beaucoup plus marqué en été, à cause de l'intensité de l'évaporation.

Si l'on trace la droite de corrélation entre la silice dissoute et la chlorosité (fig X.5), on remarque une augmentation de la silice simultanée avec celle de la chlorosité. Ceci tend à prouver que le phénomène d'évaporation sur les vasières entraîne non seulement la remontée de la silice vers la surface eau/sédiment, mais également une remontée des chlorures piégés dans les vases.

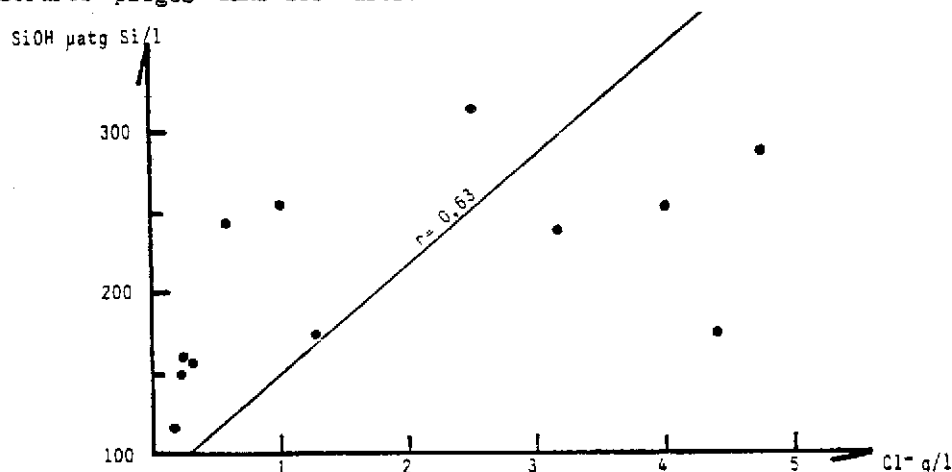


Fig. X.5 - Courbe de dilution de la silice dissoute dans les eaux de ruissellement à l'embouchure de l'étier de Lavau.

En hiver, les eaux de ruissellement s'appauvrissent en silice (150  $\mu\text{atg Si/l}$  le 15.02.83) : il semble que les vasières aient un rôle de rétention vis à vis de la silice pendant cette période. La diminution des températures sur les vasières au cours du jasant en hiver (cf. chapitre IV : température) peut être également à l'origine d'une baisse des teneurs en silice en diminuant le processus de solubilisation de la silice (GOULEAU D. 1975).

## 2.2 - A L'ECLUSE (fig X.6)

### 2.2.1 - Les eaux de flot

Les teneurs en silice dissoute varient de 125 à 310  $\mu\text{atg Si/l}$  au cours de l'année. De l'automne au printemps, les eaux de flot ont des concentrations sensiblement égales à celles des eaux de ruissellement.

En été, par contre, nous observons des variations nettes entre les eaux de flot et celles de ruissellement. Lors de la marée montante, les eaux de flot lessivent les vasières et entraînent la silice vers l'écluse où les eaux sont donc enrichies. Le pic maximum de 310  $\mu\text{atg Si/l}$  est atteint le 22.07.82. Le 24.05.82, cependant, nous observons l'inverse : contrairement aux autres sorties, l'écluse est restée ouverte pendant le flot, ce qui a permis la pénétration des eaux riches en silice plus en amont dans le marais, alors que les concentrations en silice étaient relativement faibles et sensiblement les mêmes dans les eaux de flot à l'écluse et à l'embouchure (120 et 125  $\mu\text{atg Si/l}$ ). Ceci montre bien que les eaux estuariennes, alors très pauvres en silice par suite du bloom phytoplanctonique en Loire, ont repoussé une masse d'eau de plus en plus enrichie grâce à l'apport des vasières. Cette masse d'eau a pu remonter plus en amont grâce à l'ouverture de l'écluse, et la pénétration de la Loire dans l'étier a ainsi été favorisée, ce qui explique les valeurs semblables à l'écluse et à l'embouchure.

A la fin de l'été (septembre 1982), une diminution de 150 % de la silice dissoute correspond à une arrivée importante d'eaux marines à la faveur d'un faible débit (124  $\text{m}^3/\text{s}$ ).

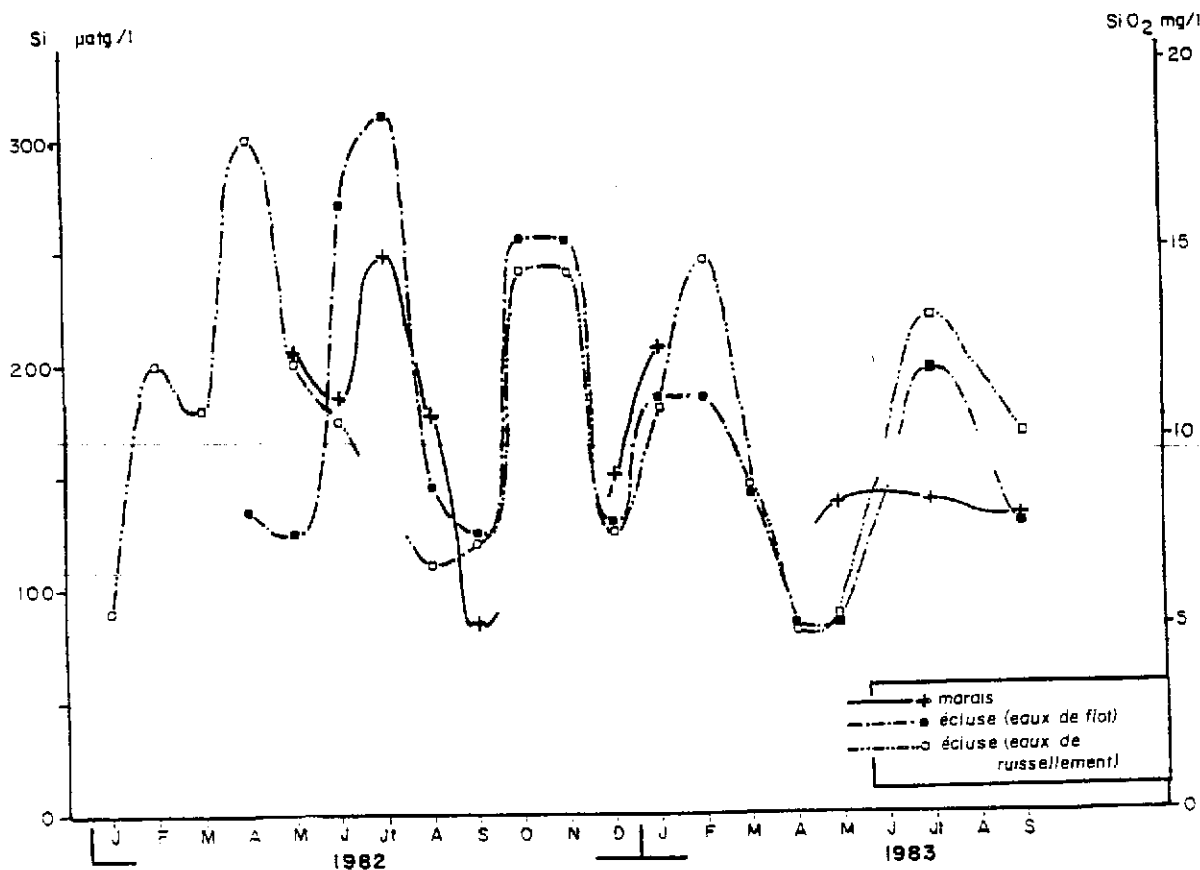


Fig. X.6 - Variations saisonnières de la silice dissoute à l'écluse et dans le marais .

Dès le mois d'octobre, les eaux retrouvent une teneur en silice comparable à celle de la Loire (220 µatg Si/l et ceci pendant tout l'hiver, grâce aux lessivages des sols lors des crues et des inondations.

### 2.2.2. - Les eaux de ruissellement

Avant tout, nous rappelons que nous n'avons pas pu faire des prélèvements pour toutes les sorties à cause de l'absence d'eau dans l'étier à l'écluse, en été. En hiver, les eaux sont enrichies en silice (245 µatg Si/l le 15.02.83) grâce aux apports fluviaux. En été, au mois d'août et de septembre, les concentrations sont les plus faibles, le minimum étant de 110 µatg Si/l le 20.08.82.

### 2.3 - LE MARAIS

La silice dissoute varie en moyenne de 220 µatg Si/l le 22.07.82 à 80 µatg Si/l le 17.09.82 (fig X.6).

Nous étudions l'évolution de la silice en fonction de la chlorosité en été le 22.07.82 et le 17.09.82 à partir des courbes de dilution (fig X.7).

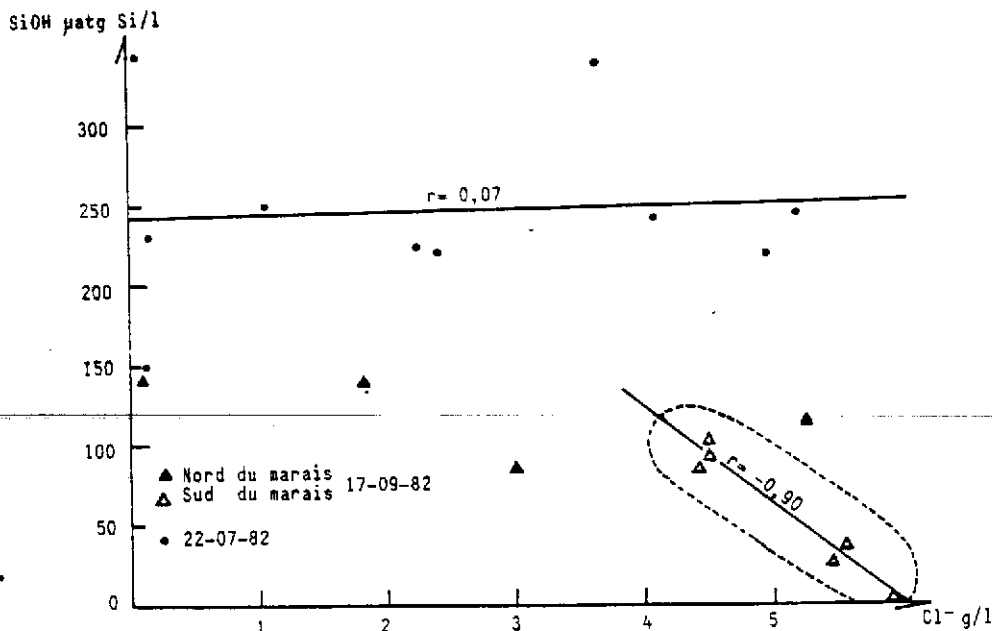


Fig. X.7 - Courbes de dilution de la silice dissoute dans le marais de Lavau, (en µatg Si/l).

Le 22.07.82, il n'existe pas de corrélation ( $r = 0,07$ ) entre la chlorosité et la silice dissoute, celle-ci étant toujours abondante dans le marais quelle que soit la chlorosité. Il est donc probable que les concentrations élevées en silice soient dues à la dissolution des frustules de diatomées et au lessivage des vasières en flot qui enrichissent les eaux du marais lors des envois de marée.

Le 17.09.82, nous observons une excellente corrélation ( $r = 0,90$ ) entre la silice et la chlorosité pour les points 5 à 10 (correspondant à la moitié Sud du marais du Syl et au marais du Pré-Neuf). Le mélange en ces points est de type conservatif et montre une nette pénétration des eaux estuariennes dans la partie Sud du marais de Lavau. Dans la partie Nord, par contre, nous ne mettons aucune relation en évidence entre la chlorosité et la silice, les teneurs étant modifiées par les rejets de la station d'épuration et les eaux s'écoulant du Sillon de Bretagne.

En hiver, la concentration en silice ne dépasse pas 200 µatg Si/l dans le marais du Syl, alors qu'elle peut atteindre 340 µatg Si/l dans le marais du Pré-Neuf (fig. X.8). Le marais du Pré-Neuf subit donc des variations très importantes (augmentation de 333 µatg Si/l au point 8 entre septembre 1982 et janvier 1983) par rapport au marais du Syl.

L'ensemble du marais est "consommateur de silice" en été, puisque l'augmentation de la concentration due à la dissolution des frustules de diatomées et aux envois de marée (apports de la silice des vasières) n'apparaît pas ensuite lors de l'écoulement des eaux du marais à l'écluse.

En hiver, la silice, exportée vers l'étier, vient essentiellement du marais du Pré-Neuf où l'on observe les teneurs les plus fortes.

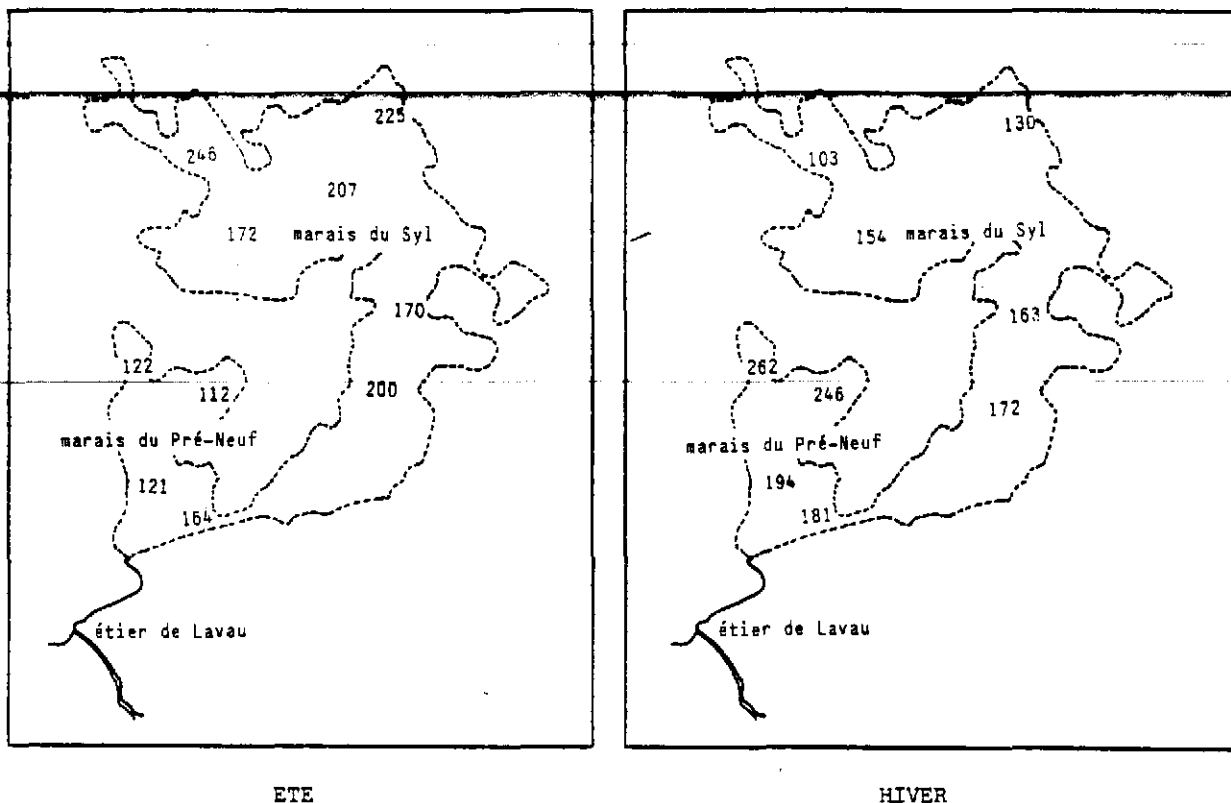


Fig. X.8 - Variations de la silice dissoute dans le marais de Lavau (µg Si/l).

2.4. - CONCLUSION

La variation annuelle de la silice dissoute, dans le système étier-marais, dépend de plusieurs facteurs d'importance différente selon les saisons :

- en automne et en hiver, la silice dissoute varie essentiellement en fonction des débits de la Loire enrichie sous l'action du lessivage des sols riches en silice dans le Bassin versant amont,
- au printemps, la diminution des débits entraîne une chute nette de la teneur en silice,
- au début de l'été, plusieurs phénomènes entrent en jeu pour contribuer à un enrichissement très important de la silice dans tout le système :

l'activité biologique telle que le développement des diatomées, leur mort et la dissolution des frustules,

les phénomènes physico-chimiques tels que l'ascension capillaire de la silice dans les eaux interstitielles des vasières. Ces deux facteurs d'enrichissement masquent l'appauvrissement des eaux dû à l'arrivée des eaux océaniques dans l'étier.

- à la fin de l'été, les faibles débits en Loire provoquent une baisse des concentrations en silice dissoute dans l'étier qui n'est pas compensée par l'activité biologique.

A ces différents facteurs ; nous pouvons ajouter le système d'ouverture et de fermeture de l'écluse qui entraîne la modifications des eaux dans le marais et à l'écluse.

En conclusion, ces différents facteurs provoquent :

- en hiver, une exportation de silice du marais vers l'étier où elle est retenue par les sédiments de la couche superficielle des vasières,

- du printemps à l'automne, une consommation de la silice dans le marais par le phytoplancton et les végétaux supérieurs, alors que l'étier exporte vers la Loire de la silice dissoute, dans les eaux de ruissellement enrichies par les vasières.

### 3 - EVOLUTION DE LA SILICE DISSOUE ENTRE LE MARAIS ET L'EMBOUCHURE

#### 3.1 - DU MARAIS VERS L'EMBOUCHURE

Du printemps à l'automne, les eaux du marais qui s'écoulent à l'écluse entraînent une diminution de la concentration en silice dissoute, tandis que le relargage de la silice par les vasières permet un enrichissement important des eaux, de l'écluse vers l'embouchure.

En hiver, les eaux du marais enrichissent les eaux de l'étier en silice, tandis que les vasières les appauvrissent grâce au phénomène de rétention favorisée par des températures faibles.

#### 3.2 - DE L'EMBOUCHURE VERS LE MARAIS

Du printemps à l'automne, lors de la marée montante, les eaux s'enrichissent en silice dissoute, de l'embouchure vers l'écluse, notamment en été, par suite du lessivage des vasières. Cet enrichissement est favorisé par la fermeture de l'écluse en flot. Entre l'écluse et le marais, nous observons généralement une baisse de la silice. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, l'ouverture de l'écluse le 24.05.82, entraîne une augmentation de la concentration en silice dans le marais.

En juillet, la teneur en silice dissoute varie de 175  $\mu\text{atg Si/l}$  à l'embouchure, 175  $\mu\text{atg Si/l}$  à la taillée, 310  $\mu\text{atg Si/l}$  à l'écluse et 220  $\mu\text{atg Si/l}$  dans le marais.

En hiver, on observe peu de variations des teneurs en silice entre l'embouchure et le marais.

#### 3.3 - CONCLUSION

Du printemps à l'automne, la présence des vasières bordant l'étier provoque un enrichissement en silice dissoute dans les eaux, alors que le marais est "consommateur" de silice dissoute.

En hiver, les eaux de Loire et les eaux du marais riches en silice augmentent la concentration de la silice dissoute dans l'étier tandis que la rétention par les vasières tend à la diminuer.

### 4 - BILAN QUANTITATIF DE LA SILICE DISSOUE

Nous venons de voir l'évolution de la silice dissoute dans le système étier-marais ; nous voulons maintenant justifier les hypothèses émises à l'aide de résultats quantitatifs.

#### 4.1 - A L'EMBOUCHURE

Nous calculons les flux de la silice dissoute dans l'étier de la même façon que pour les M.E.S. et les chlorures.

Les résultats présentés dans le tableau X.1 indiquent que l'exportation de la silice est directement liée au volume d'eau entrant et sortant. La courbe (fig X.9) montre l'évolution parallèle des volumes d'eau et des quantités de silice dissoute sorties au cours de l'année.

Si l'on calcule les quantités de silice dissoute transportées pour un volume unitaire de  $100 \text{ m}^3$  (tableau X.1), on constate que l'étier exporte de la silice du printemps à l'automne, alors qu'en hiver, on observe une faible rétention de la silice.

Par conséquent, du printemps à l'automne, la dissolution des frustules de diatomées et l'ascension capillaire de la silice dissoute dans la couche superficielle des vasières, entraînent une exportation de silice ( $0,72 \text{ kg}/100 \text{ m}^3$  le 20.08.82), tandis qu'il ne rentre que  $0,54 \text{ kg}/100 \text{ m}^3$  dans l'étier le 20.08.82.

Ces facteurs ont plus d'influence sur la quantité de silice dissoute en été, lorsque les arrivées d'eaux marines pauvres en nutriments sont maximales.

En hiver, la Loire importe de la silice dissoute dans l'étier en proportions assez élevées ( $1,25 \text{ kg}/100 \text{ m}^3$  le 18.01.83). Cette silice provient du lessivage des sols par les crues en amont de l'estuaire, mais une partie est retenue par les vasières puisqu'il ne sort que  $1,07 \text{ kg}$  pour  $V = 100 \text{ m}^3$  le 18.01.83.



DATES	VOLUME D'EAU	VOLUME D'EAU	VOLUME D'EAU	BILAN	BILAN	BILAN	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	J:W F:W
	SORTI EN JUSANT en m <sup>3</sup>	ENTRE EN FLOT en m <sup>3</sup>	TOTAL - entré + sorti en m <sup>3</sup>	DE SiO <sub>2</sub> EN JUSANT en kg	DE SiO <sub>2</sub> EN FLOT en kg	DE SiO <sub>2</sub> TOTAL - entré + sorti en kg	SORTI pour V = 100m <sup>3</sup> en kg	ENTRE pour V = 100m <sup>3</sup> en kg	
29.03.82		343 208			4 744				
28.04.82		323 774			845				
24.05.82	1 178 832	1 058 526	+ 120 036	10 990	7 712	+ 3 278	0,93	0,73	1,5
25.06.82	645 457	535 364	+ 110 093	8 750	6 057	+ 2 693	1,35	1,13	1,18
22.07.82	589 682	934 869	- 345 187	7 367	10 608	- 3 241	1,25	1,13	1,1
20.08.82	780 813	1 059 025	- 218 212	5 650	5 700	- 50	0,72	0,54	1,1
17.09.82	563 120	857 479	- 294 359	2 990	3 910	- 920	0,53	0,45	1,1
19.10.82	1 663 980	1 339 003	+ 324 977	22 248	16 315	+ 5 933	1,34	1,22	1,1
15.11.82	983 017	954 978	+ 28 039	13 233	13 169	+ 64	1,35	1,38	0,9
18.01.83	750 531	388 377	+ 362 154	8 003	4 868	+ 3 135	1,07	1,25	0,9
15.02.83	786 906	576 141	+ 210 765	7 780	5 960	+ 1 820	0,99	1,03	0,9
17.03.83	857 245	818 550	+ 38 695	9 441	7 996	+ 1 445	1,10	0,98	0,9
14.04.83	678 109	466 151	+ 211 958	3 369	4 641	+ 728	0,79	0,99	1,1

Tableau X.1 - A l'embouchure

DATES	VOLUME D'EAU	VOLUME D'EAU	VOLUME D'EAU	BILAN DE	BILAN DE	BILAN DE	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	J 100 F 100
	SORTI DU MARAI EN m <sup>3</sup>	ENTRE DANS LE MARAI en m <sup>3</sup>	TOTAL SORTI EN m <sup>3</sup>	SiO <sub>2</sub> SORTI EN kg	SiO <sub>2</sub> ENTRE EN kg	SiO <sub>2</sub> TOTAL SORTI en kg	SORTI POUR Q=100m <sup>3</sup> /sec	ENTRE POUR Q=100m <sup>3</sup> /sec	
10.02.82	47 988	0	47 988	653	0	653	1,36		
24.05.82	70 458	52 534	17 924	778	461	317	1,10	0,60	1,83
16.12.82	84 591	0	84 591	460	0	560	0,66		

Tableau X.2 - A l'écluse

Bilans de la silice dissoute par cycle de marée

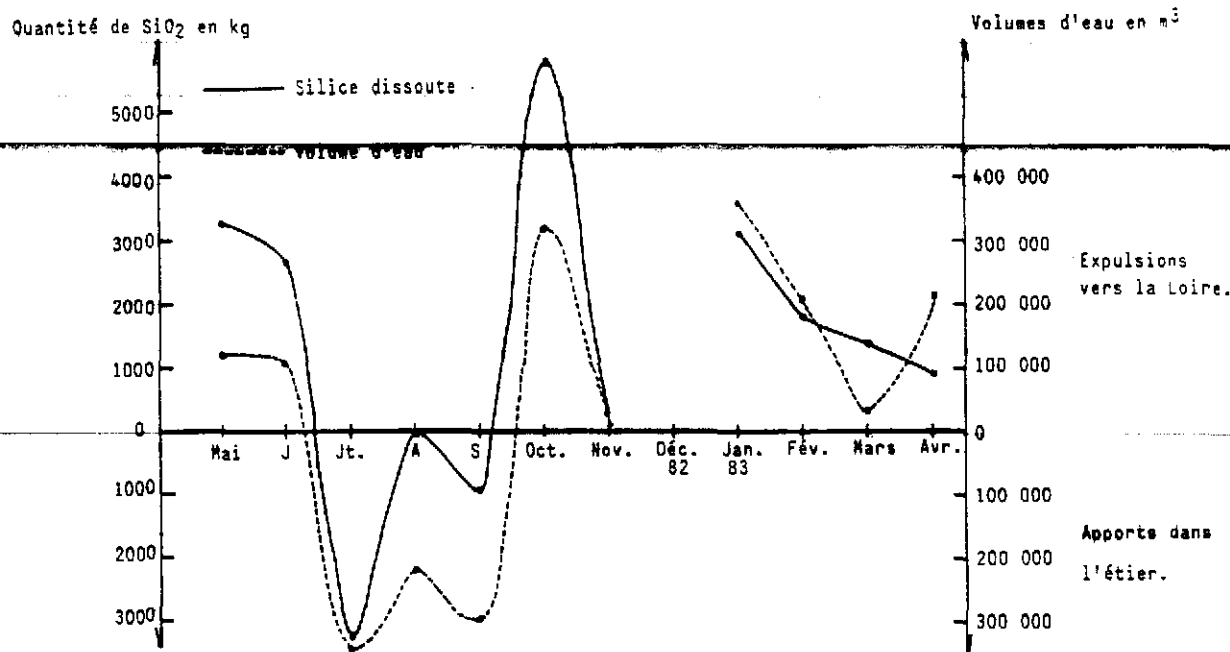


Fig. X.9 - Variations annuelles des flux de silice dissoute et des volumes d'eau observés au cours d'une marée.

#### 4.2 - A L'ECLUSE

Nous remarquons sur le tableau X.2, une exportation importante de silice du marais vers l'étier au mois de mai. Ceci est dû à une forte accumulation de silice dissoute dans le marais, provenant du lessivage des vasières, et consécutive aux envois de marée répétés les jours précédents la sortie. Au moment de l'ouverture de l'écluse, le marais rejette donc la silice en excès.

En hiver, les quantités de silice dissoute relarguées par le marais sont plus élevées qu'au printemps, ce qui montre l'influence du lessivage des sols, par les eaux de pluie, dans les variations des concentrations en silice du marais.

#### 5 - CONCLUSIONS

L'étude de la silice dissoute nous amène à individualiser, selon les différents facteurs, les masses d'eau entrant et sortant du système étier-marais au cours des cycles tidaux et annuels.

Le tableau X.3 tente de synthétiser les variations de la silice dissoute.

Comme nous l'avons vu, les variations de la concentration en silice dissoute sont très importantes au cours d'un cycle tidal et selon les saisons, grâce à différents facteurs physico-chimiques et biologiques. Ainsi, les eaux marines appauvrissent l'étier et le marais en silice alors que les eaux fluviales l'enrichissent d'où l'importance du débit de la Loire dans le cycle annuel de la silice.

L'émersion, qui joue un rôle important pour la sédimentation des M.E.S., est également à l'origine de phénomènes engendrant l'enrichissement des eaux de ruissellement, tel que l'ascension capillaire, maximale lors des forts ensoleillements. Ce facteur est donc plus efficace en fin de jusant et en période estivale.

Le développement des diatomées, particulièrement intense en été, entraîne une diminution de la silice dissoute tandis que la dissolution des frustules de diatomées enrichit les eaux en silice.

En conclusion, nous pouvons dire que l'étier est essentiellement "exportateur" de silice vers la Loire, excepté en hiver où une faible partie de la silice dissoute amenée dans le cours d'eau par les eaux fluviales y est retenue.

SAISONS	MARÉE	MARAIS	ECLUSE	EMBOUCHURE
du PRINTEMPS  à L'AUTOMNE	JUSANT	Consommation de $\text{SiO}_2$ par les végétaux supérieurs et les diatomées	Diminution de $\text{SiO}_2$ à cause de l'écoulement des eaux du marais	Augmentation de $\text{SiO}_2$ grâce au relargage par les vasières
	FLOT		Diminution de $\text{SiO}_2$ due à l'arrivée des eaux océaniques et à la consom- mation par les diatomées	Diminution de $\text{SiO}_2$ due à l'arrivée des eaux océaniques et à la consom- mation par les diatomées
HIVER	JUSANT	Production de $\text{SiO}_2$ grâce aux lessivages des sols par les pluies ou les inondations	Augmentation de $\text{SiO}_2$ grâce à l'écoulement des eaux du marais	Diminution de $\text{SiO}_2$ due à à la rétention par les vasières
	FLOT		Augmentation de $\text{SiO}_2$ grâce à l'arrivée des eaux flu- viales très riches en $\text{SiO}_2$	Augmentation de $\text{SiO}_2$ grâce à l'arrivée des eaux flu- viales très riches en $\text{SiO}_2$

$\xrightarrow{\text{enrichissement en SiO}_2}$   
 $\xrightarrow{\text{appauvrissement en SiO}_2}$   
 $\xleftarrow{\text{enrichissement en SiO}_2}$   
 $\xleftarrow{\text{très peu de variations}}$

Tableau X.3 - Synthèse des variations de la silice dissoute dans le système de Lavau.

## II - VARIATIONS DE LA SILICE DISSOUE DANS LES SYSTEMES DE CORDEMAIS ET DU DAREAU

### 1 - DANS LE SYSTEME DE CORDEMAIS

#### 1.1 - CYCLE TIDAL

En été, les concentrations en silice sont stables pendant les premières heures de jusant puis augmentent brutalement, surtout à mi-étier, pour atteindre des valeurs de 190  $\mu\text{atg Si/l}$  dans les eaux de ruissellement le 2.08.82. Dès le retour du flot, nous observons une chute de la teneur en silice dissoute dans les eaux de l'étier (fig X.10). En hiver, la concentration en silice ne varie pas au cours du cycle tidal.

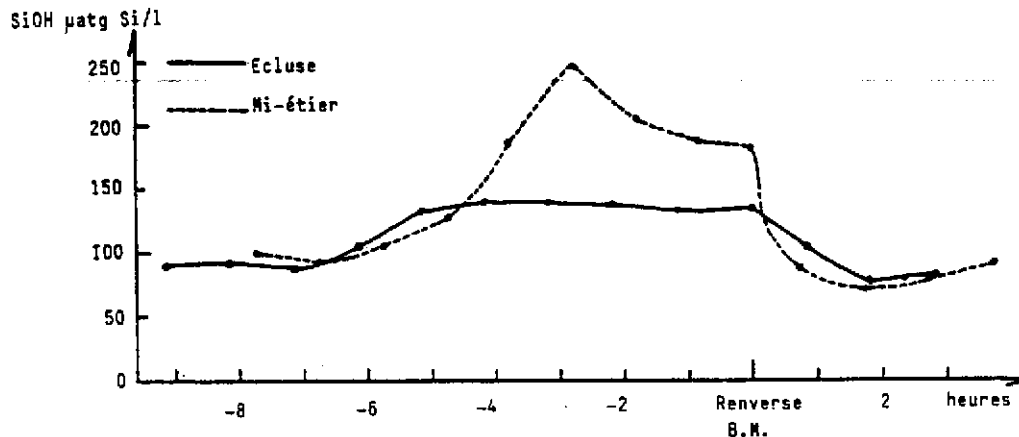


Fig. X.10 - Variations de la silice dissoute au cours d'une marée ( Cordemais le 2.08.82 ).

#### 1.2 - CYCLE SAISONNIER

Dans l'étier, la concentration en silice est de 80  $\mu\text{atg Si/l}$  dans les eaux de flot en été, et de 180  $\mu\text{atg/l}$  en hiver.

Dans les eaux de ruissellement, les teneurs en silice dissoute varient de 190  $\mu\text{atg Si/l}$  en été et de 120 à 180  $\mu\text{atg Si/l}$  en hiver.

Dans le marais, nous observons une diminution de la silice de 150 à 110  $\mu\text{atg/l}$  entre le mois d'août et le mois de septembre qui correspond à une pénétration plus importante des eaux estuariennes, alors qu'en hiver les eaux contiennent 180  $\mu\text{atg/l}$  de silice grâce aux lessivages des sols par les pluies.

### 2 - DANS LE SYSTEME DU DAREAU

Les variations de la teneur en silice sont faibles au cours d'un cycle tidal. Nous remarquons cependant qu'en juin, la concentration en silice diminue très légèrement en jusant et augmente aussitôt après la renverse de B.M., grâce à l'arrivée des eaux estuariennes. (fig X.11).

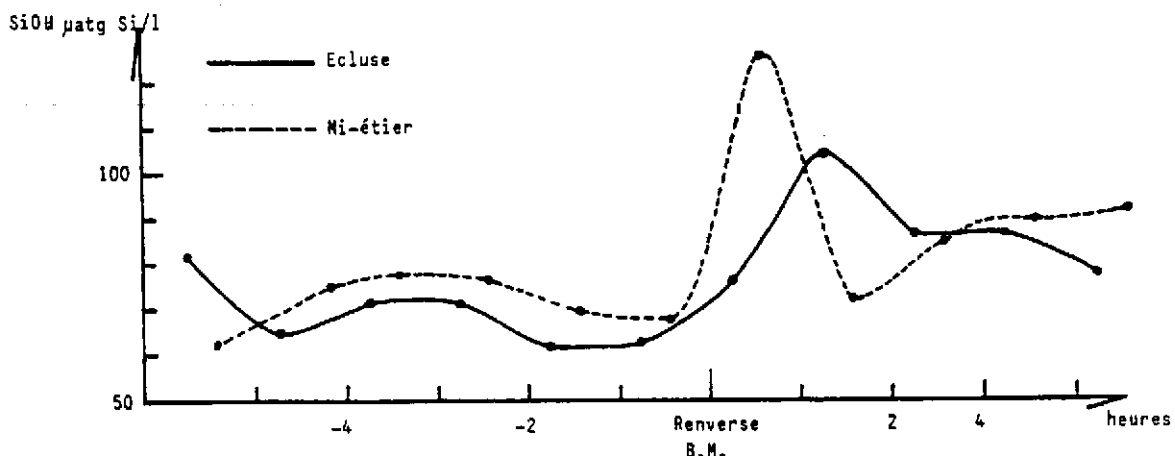


Fig. X.11 - Variations de la silice dissoute au cours d'une marée ( Dareau le 23.06.82 ).

En septembre par contre, la teneur en silice augmente progressivement dans les eaux en jusant à mi-étier pour atteindre un maximum de 170 µatg Si/l dans les eaux de ruissellement, et diminue juste après la renverse de B.M. avec l'arrivée des eaux plus marines (fig X.12).

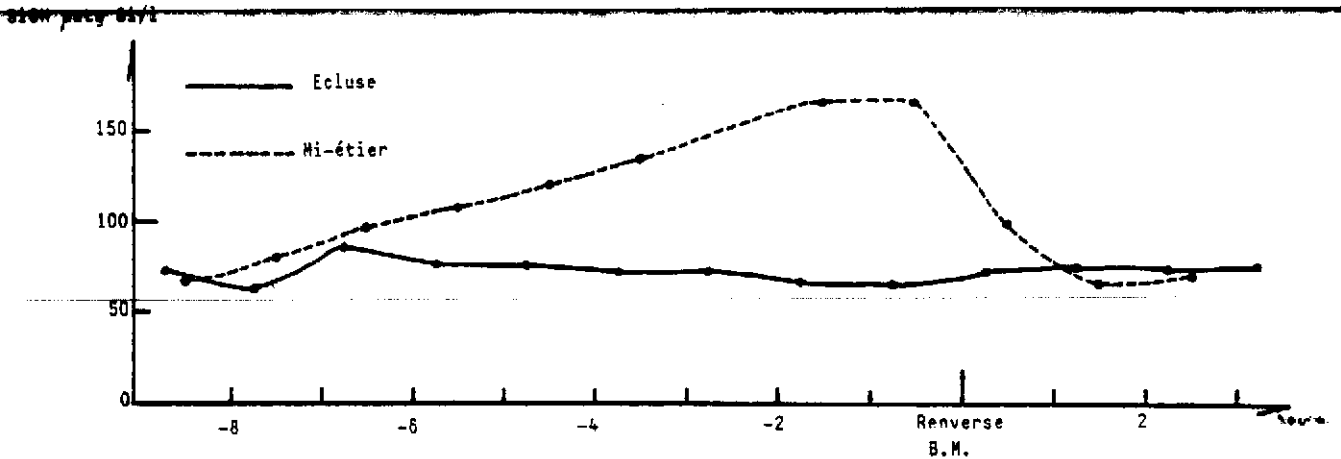


Fig. X.12 - Variations de la silice dissoute au cours d'une marée ( Dareau le 6.09.82

L'émergence des vasières, au demeurant peu développées, ne semble jouer un rôle pour le cycle de la silice qu'en septembre, période pendant laquelle l'action des eaux marines se fait réellement sentir.

En hiver, nous n'observons pas de variations liées au cycle tidal et les teneurs moyennes sont de 220 µatg Si/l. Dans le marais, les concentrations en silice dissoute sont comprises entre 106 et 158 µatg Si/l en été et sont de l'ordre de 180 µatg Si/l en hiver.

### III - COMPARAISONS ENTRE LES TROIS ETIERS ET LEUR MARAIS

Les concentrations en silice varient dans les trois étiers au cours d'un cycle tidal, et également en fonction des saisons. Alors que ces variations sont importantes dans l'étier de Lavau, elles s'amenuisent vers l'amont et sont plus faibles dans l'étier du Dareau (tableau X.4).

LIEUX DE PRELEVEMENTS		ETE (septembre 1982)			HIVER (janvier-février 1983)		
		LAVAU	CORDEMAIS	DAREAU	LAVAU	CORDEMAIS	DAREAU
MARAIS	Max	142	350	83	236	218	242
	Min	4	28	47	166	162	200
	$\bar{X}$	84	106	70	206	180	215
ECLUSE	Max	168	98	118	190	188	233
	Min	80	68	66	143	167	208
	$\bar{X}$	138	90	77	177	179	222
MI-ETIER	Max	80	217	167	210	192	233
	Min	74	57	63	202	168	217
	$\bar{X}$	77	124	94	204	178	222
EMBOUCHURE	Max	225			291		
	Min	59			53		
	$\bar{X}$	110			182		

Tableau X.4 - Comparaisons des teneurs en silice dissoute dans les systèmes de Lavau, Cordemais et Dareau (en µatg Si/l).

L'étier du Darcou est essentiellement sous l'influence fluviale et les eaux marines y pénètrent très peu, alors que la dualité "eaux fluviales - eaux marines" est de plus en plus forte vers l'aval et provoque des modifications de la teneur en silice dissoute. Selon le rapport "eaux fluviales - eaux marines", nous verrons ainsi des concentrations en silice dissoute plus ou moins élevées, sachant que le lac est riche en silice, surtout en hiver grâce aux lessivages des sols par les crues, et que la mer est pauvre en nutriments.

Un autre facteur amène également des variations de la teneur en silice : la présence des vasières beaucoup plus étendues dans l'étier de Lavau et qui favorisent l'augmentation de la silice dans les eaux de ruissellement grâce au phénomène d'ascension capillaire.

D'autre part, le développement considérable des diatomées sur les vasières entraîne également des modifications qui seront plus intenses dans l'étier de Lavau grâce à la plus grande superficie des vasières.

Ainsi, les vasières amplifient les variations tidales et saisonnières de la silice dissoute, et jouent donc un rôle primordial dans son évolution, particulièrement net dans l'étier de Lavau.

\* \* \* \* \*

CHAPITRE XI

*Les composés azotés*

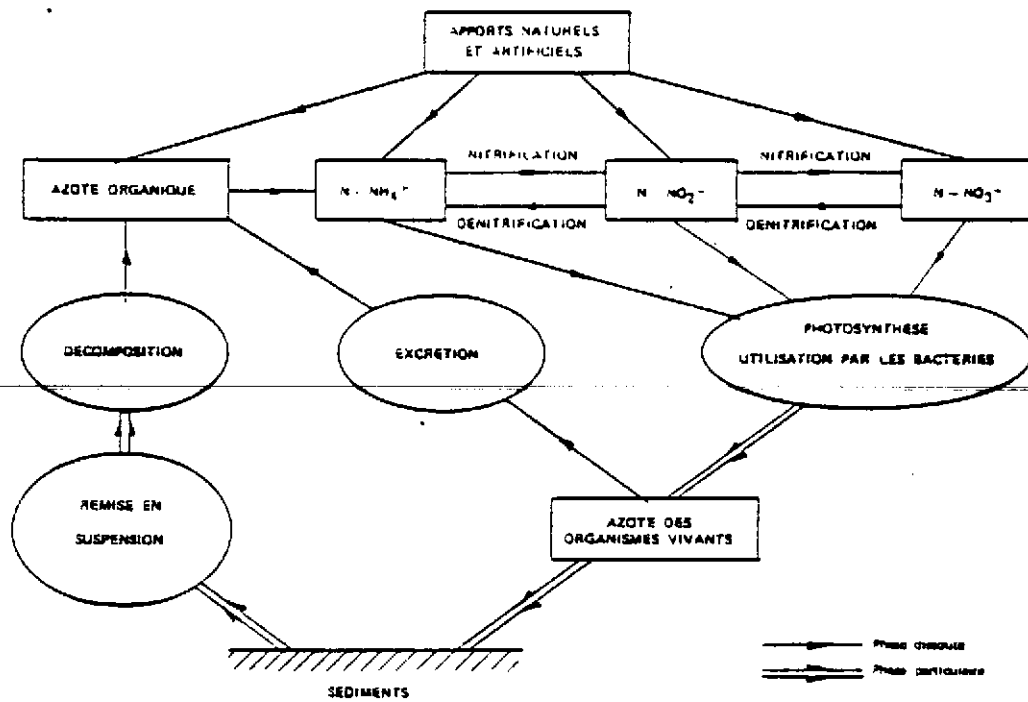


Fig. XI.1 - Caractéristiques principales du cycle de l'azote dans un estuaire.  
( MARTIN et al,1976 )



Nous étudions dans ce chapitre l'azote minéral représenté dans les eaux sous forme d'ions :

- ammonium  $\text{NH}_4$  (azote ammoniacal),
- nitreux  $\text{NO}_2$  (nitrites),
- nitriques  $\text{NO}_3$  (nitrates).

Les sources d'azote dans les eaux viennent des rejets urbains domestiques et industriels, du lessivage des sols, de l'apport atmosphérique et du relargage par les sédiments (MARTIN G., 1979). En Loire, les teneurs en sels azotés sont de l'ordre de 0 à 20  $\mu\text{atg N/l}$  (0 à 0,4 mg/l) pour l'ammoniaque, de 1 à 11  $\mu\text{atg N/l}$  (0,05 à 0,5 mg/l) pour les nitrites, de 20 à 250  $\mu\text{atg N/l}$  (1,2 à 15 mg/l) pour les nitrates, et varient selon les saisons (MANICKAM S., 1983 - GUILLAUD J.F., 1983).

A Saint-Nazaire, limite entre l'estuaire interne et l'estuaire externe de la Loire, RINCE Y. (1983) observe les valeurs suivantes :

- en septembre 1981

- 6,5  $\mu\text{atg N/l}$  (0,1 mg/l) de  $\text{NH}_4$ ,
- 2  $\mu\text{atg N/l}$  (0,09 mg/l) de  $\text{NO}_2$ ,
- 30  $\mu\text{atg N/l}$  (1,9 mg/l) de  $\text{NO}_3$ .

- en novembre 1981

- 2  $\mu\text{atg N/l}$  (0,04 mg/l) de  $\text{NH}_4$ ,
- 1  $\mu\text{atg N/l}$  (0,05 mg/l) de  $\text{NO}_2$ ,
- 80  $\mu\text{atg N/l}$  (5 mg/l) de  $\text{NO}_3$ .

Les concentrations en sels azotés varient beaucoup selon les saisons dans l'estuaire de la Loire. Nous verrons au cours de l'étude des cycles tidaux et annuels dans les étiers, des variations encore plus importantes, amplifiées par des phénomènes locaux.

Avant d'aborder l'analyse de ces variations, nous rappelons l'évolution des composés azotés dans les eaux estuariennes (fig. XI.1). La première phase de minéralisation de l'azote est la transformation de l'azote organique en azote ammoniacal, ensuite transformé par oxydation bactérienne (Nitrosomas) en ions nitreux ; le stade ultime de cette minéralisation est l'oxydation bactérienne (Nitrobacter) des nitrites en nitrates. La dénitrification des nitrates par les microorganismes aboutit à la formation d'ammoniaque et d'azote moléculaire (LAURENT M., 1972).

## I - LES VARIATIONS DES COMPOSES AZOTES DANS LE SYSTEME DE LAVAU

### 1 - CYCLE TIDAL DES COMPOSES AZOTES

#### 1.1 - CYCLE TIDAL DE L'AZOTE AMMONIACAL (fig. XI.2)

##### 1.1.1 - A l'embouchure

- en jusant

Nous distinguons deux périodes :

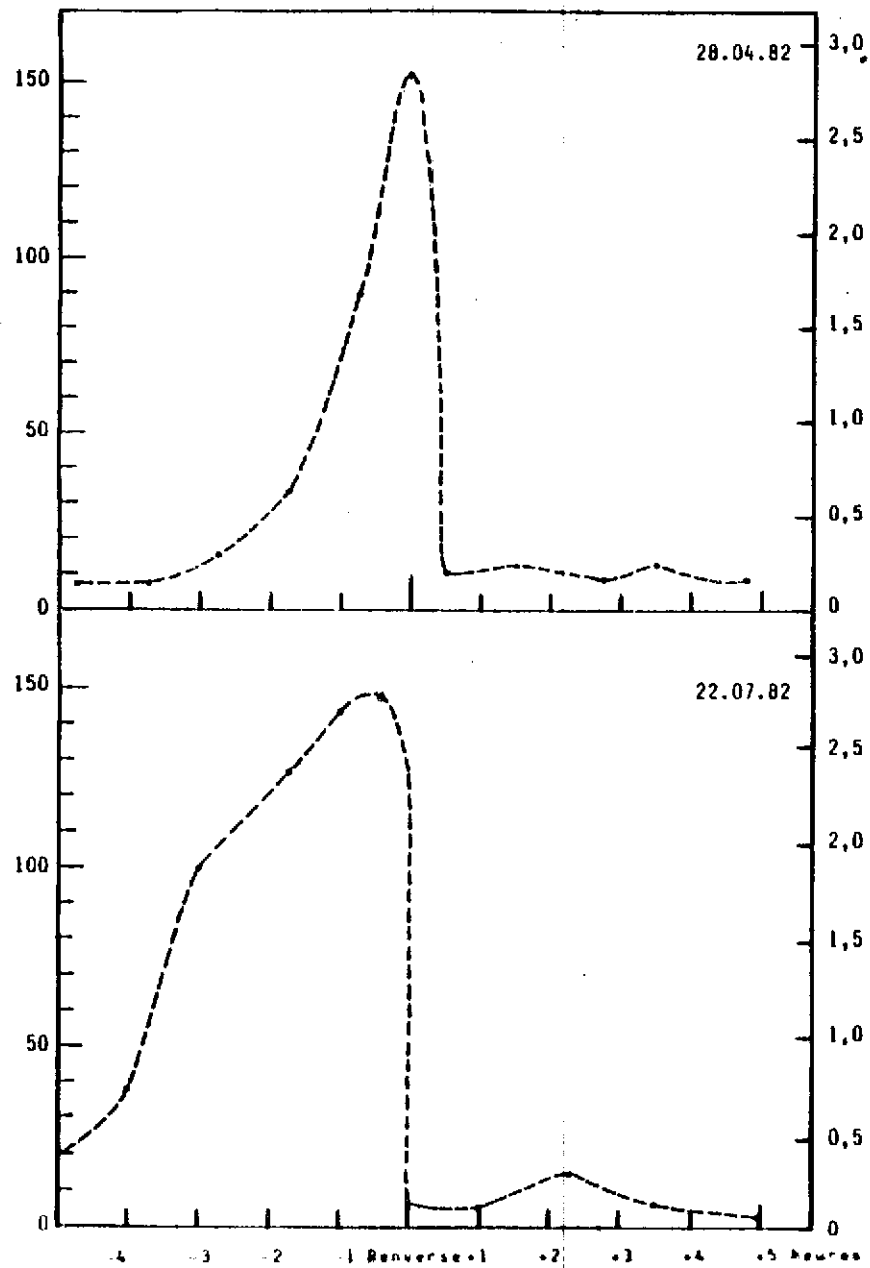
- le début de jusant pendant lequel les eaux s'enrichissent faiblement en azote ammoniacal,

- la fin du jusant, correspondant aux eaux de ruissellement, et pendant laquelle la teneur en ammoniaque croît très vite et de façon importante (de 15 à 150  $\mu\text{atg N/l}$  le 28.04.82). Cette augmentation peut être le résultat de l'ammonification de la matière organique par les bactéries.

(N-NH<sub>4</sub>) μatg/l

Fig. XI.2 - A l'embouchure

NH<sub>4</sub> mg/l

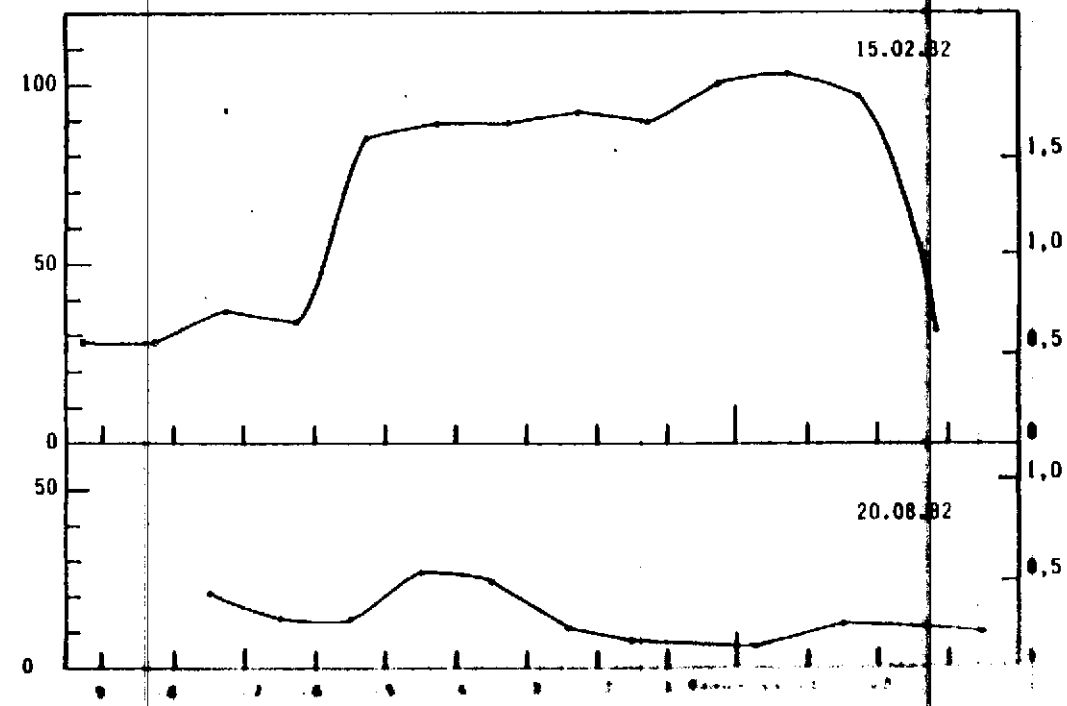


Variations de l'ammoniaque au cours de différentes marées

Fig.X.3 - A l'écluse

(N-NH<sub>4</sub>) μatg/l

NH<sub>4</sub> mg/l



152

- en flot

Dès la renverse de B.M., la teneur en ammoniacque chute brutalement (de 150 à 0,06  $\mu\text{atg N/l}$  le 22.07.82) et retrouve les valeurs initiales très faibles grâce à la pénétration des eaux estuariennes.

1.1.2 - A l'écluse (fig. XI.3)

- en jusant

Les variations observées ne permettent pas de mettre en évidence un phénomène particulier. les valeurs restent sensiblement les mêmes, excepté aux mois de février 1982 et février et mars 1983 où les eaux s'enrichissent en ammoniacque au cours du jusant (de 28 à 100  $\mu\text{atg N/l}$  le 15.02.83). Cet accroissement en fin d'hiver provient probablement de la décomposition des végétaux par les bactéries à la faveur des inondations du marais en périodes de crue.

- en flot

En début de flot, le refoulement des eaux de ruissellement chargées en ammoniacque entraîne un léger enrichissement des eaux à l'écluse (augmentation de 7  $\mu\text{atg N/l}$  le 20.08.82).

1.2 - CYCLE TIDAL DES NITRITES

1.2.2 - A L'embouchure (fig. XI.4)

Nous séparons la saison estivale (d'avril à septembre 1982) de la saison hivernale (octobre à avril 1983) pendant laquelle nous n'observons pas de variation notable au cours du cycle de marée.

- En jusant

Les eaux s'enrichissent en nitrites, notamment celles de ruissellement grâce à la nitrification sur les vasières (de 0 à 5,2  $\mu\text{atg N/l}$  le 20.08.82). Inversement, le 24.05.82, bien que l'ouverture de l'écluse permette l'écoulement des eaux du marais riches en nitrites, les eaux à l'embouchure s'appauvrissent en azote nitreux (de 7,2 à 2,2  $\mu\text{atg N/l}$ ) : cette diminution est vraisemblablement due à une consommation microplanctonique, l'ammoniacque absorbé préférentiellement, étant moins abondant à cette période (cf. fig. XI.8)

- En flot

La teneur en nitrites chute dès le début du flot (de 10 à 2,5  $\mu\text{atg N/l}$  le 28.04.82) à cause de l'arrivée des eaux estuariennes et se stabilise ensuite jusqu'à l'étale de P.M. Le 24.05.82, par contre, le phénomène inverse se produit: au début du flot, la concentration en nitrites augmente de 2,5 à 8  $\mu\text{atg N/l}$ . Ces nitrites proviennent, vraisemblablement, de l'oxydation de l'ammoniacque dans les eaux de Loire.

1.2.2 - A L'écluse (fig. XI.5)

- en jusant

En hiver, la teneur en nitrites augmente faiblement au cours de la marée descendante. En juin et en août, l'ouverture de l'écluse pendant le jusant entraîne une diminution des nitrites (de 1,5 à 0,35  $\mu\text{atg N/l}$  le 25.06.82). Les valeurs moyennes dans le marais, sont en effet extrêmement faibles : 0,21  $\mu\text{atg N/l}$  le 25.06.82 et 0,25  $\mu\text{atg N/l}$  le 20.08.82.

- en flot

Les nitrites extrêmement faibles, augmentent généralement, mais de façon peu significative (1,2 à 2,2  $\mu\text{atg N/l}$  le 25.06.82 de 2,5 à 2,8  $\mu\text{atg N/l}$  le 18.01.83).

Fig. XI.4 - A l'embouchure

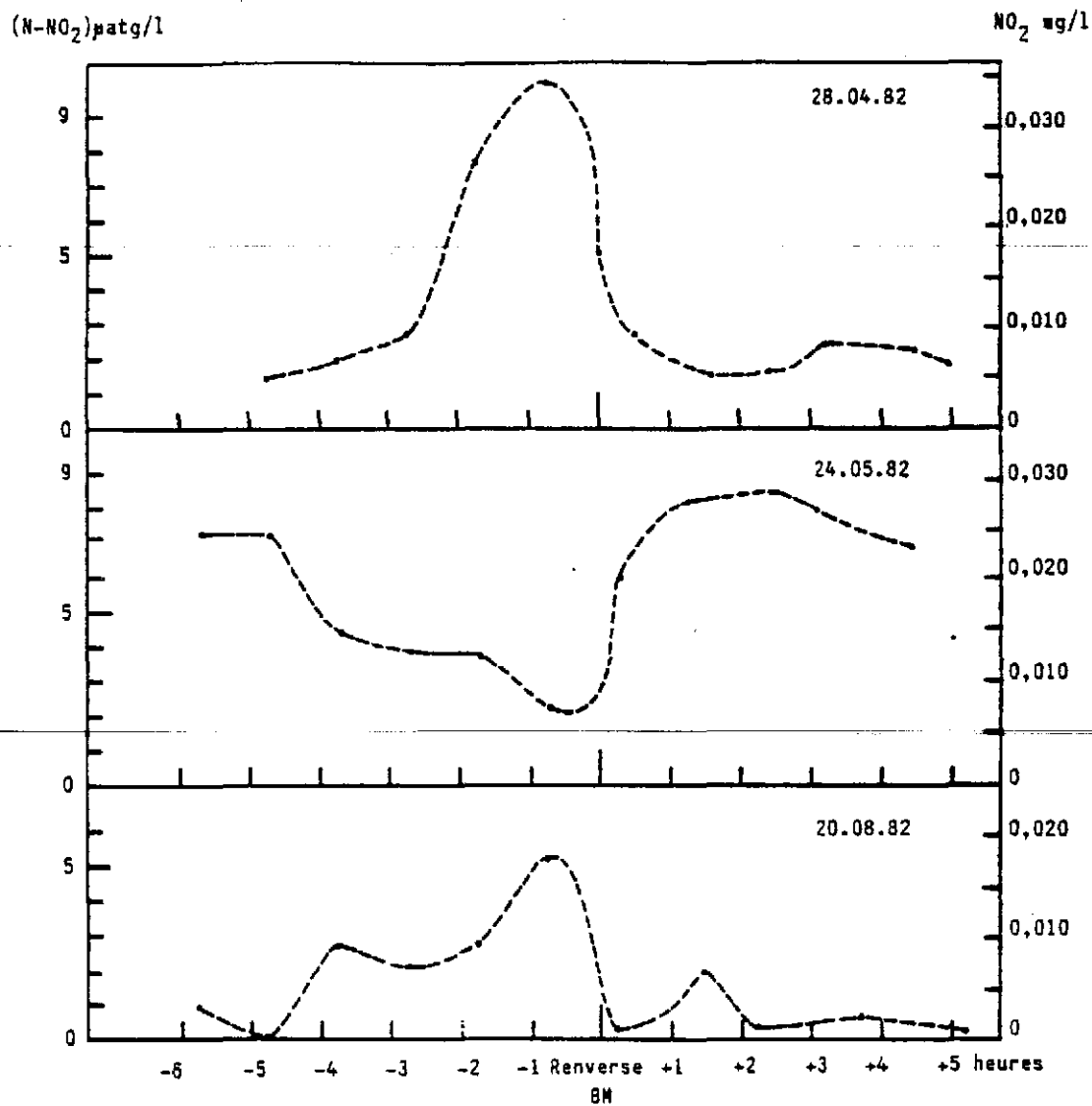
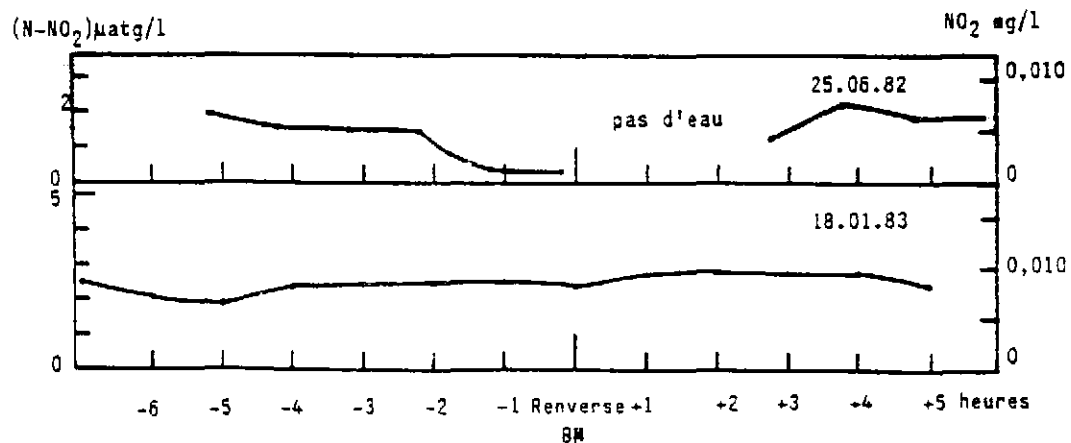


Fig. XI.5 - A l'écluse



Variations des nitrites au cours de différentes marées.

### 1.3 - LE CYCLE TIDAL DES NITRATES

#### 1.3.1 - A l'embouchure (fig. XI.6)

- en jusant

Les variations sont différentes selon les saisons :

- de l'automne au printemps, nous constatons un appauvrissement considérable des nitrates dans les eaux lors de la marée descendante, encore plus marqué pour les eaux de ruissellement (le 15.11.82, les nitrates diminuent de 208 à 190 µatg N/1 en début de jusant et de 190 à 40 µatg N/1 en fin de jusant) : cette disparition des nitrates peut être due à la dénitrification ou à des échanges avec la vase (LAURENT M., 1972),

- en été, il y a peu de modifications, et les valeurs restent très faibles. Le 25.06.82, les teneurs en nitrates restent proches de 35 µatg N/1.

- en flot

- De l'automne au printemps, dans la première heure qui suit la renverse de B.M., les eaux s'enrichissent en nitrates grâce aux apports fluviaux (de 30 à 240 µatg N/1 le 18.01.83).

En fin de flot, nous notons un moindre appauvrissement en nitrates, dû à l'arrivée des eaux à caractère plus estuarien (le 19.10.82 diminution de 155 à 135 µatg N/1).

- En été, les teneurs en nitrates restent faibles pendant tout le flot (40 µatg N/1 le 25.06.82) sous l'action des eaux marines.

#### 1.3.2 - A l'écluse (fig. XI.7)

- En jusant

Les teneurs en nitrates augmentent (de 20 à 100 µatg N/1 le 29.03.82) ou restent stables (15 µatg N/1 le 17.09.82), excepté le 25.06.82 où l'ouverture de l'écluse entraîne une diminution des nitrates.

- En flot

De mars à juin 1982, les nitrates augmentent en début de flot : les eaux de Loire qui pénètrent dans l'étier sont enrichies en nitrates grâce au phénomène de nitrification sur les vasières. D'août 1982 à décembre 1982, les concentrations en nitrates restent stables.

#### 1.3.3 - Conclusions

Au cours du cycle tidal, les variations des composés azotés peuvent être considérables ou au contraire négligeables selon le lieu, la saison et la forme azotée considérée.

- A l'embouchure, nous assistons en jusant, tout au long de l'année, à un enrichissement en azote ammoniacal, dû à l'ammonification de la matière organique, alors que les nitrates diminuent du printemps à l'automne.

Dès le retour du flot, le phénomène inverse se produit : les nitrates augmentent alors que l'ammoniaque diminue.

Ceci résulte de plusieurs facteurs parfois antagonistes :

- la décomposition de la matière organique azotée qui enrichit les eaux de ruissellement en ammoniacque,

- la dénitrification grâce à l'action bactérienne en fin de jusant qui transforme les nitrates en azote atmosphérique,

- la pénétration des eaux de Loire, en hiver, riches en nitrates et pauvres en ammoniacque comparées aux eaux de l'étier.

Les nitrites, du printemps à l'été, varient dans le même sens que l'azote ammoniacal, alors qu'en hiver leurs concentrations restent stables.

(N-NO<sub>3</sub>) µatg/l

NO<sub>3</sub> mg/l

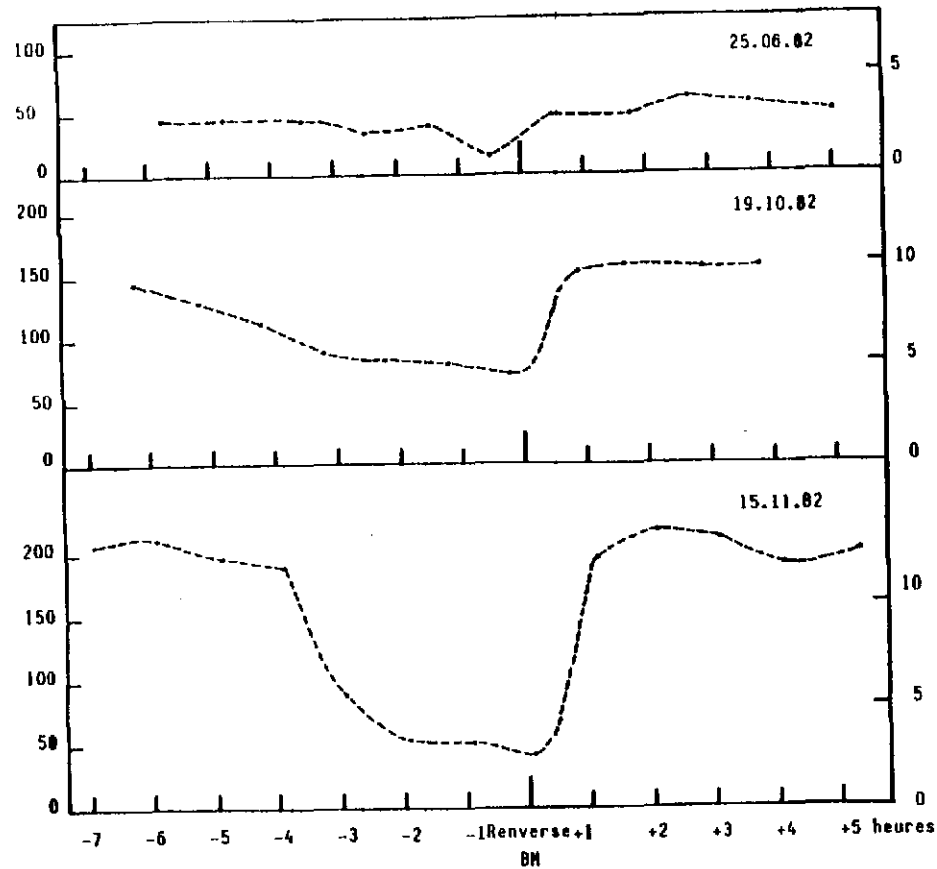


Fig. XI.6 - A l'embouchure.

Variations des nitrates au cours de différentes marées.

(N-NO<sub>3</sub>) µatg/l

NO<sub>3</sub> mg/l

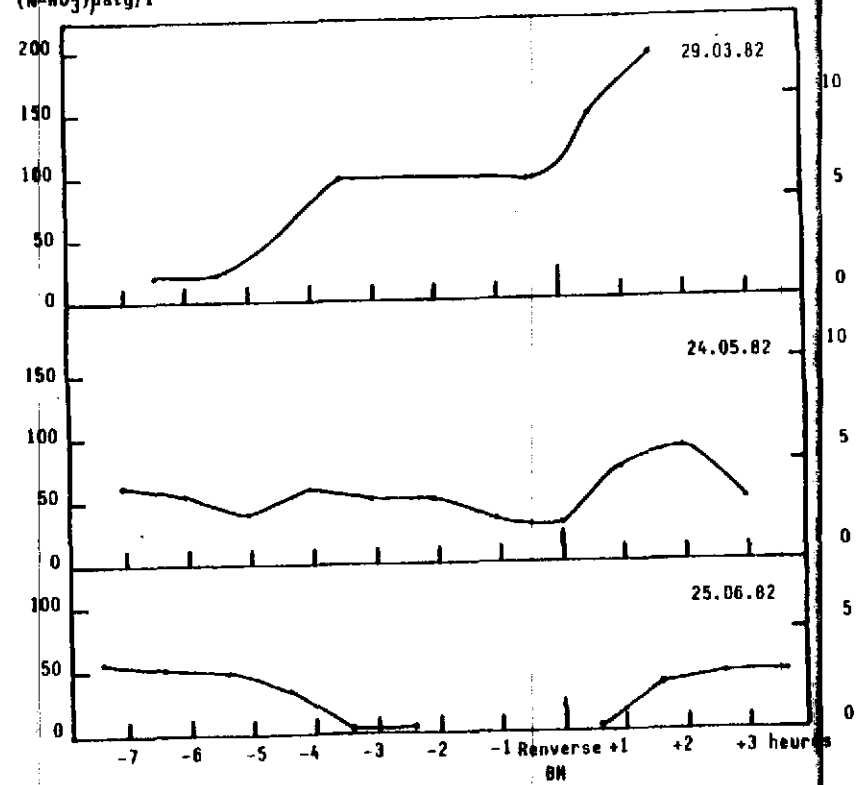


Fig. XI.7 - A l'écluse.

- A L'écluse, les sels azotés varient assez peu. Les modifications les plus importantes sont dues au refoulement des eaux de ruissellement.

## ~~2 - CYCLE ANNUEL DES PRODUITS AZOTÉS A L'EMBOUCHURE~~

Pour étudier les variations au cours de l'année, nous traçons les courbes avec les moyennes des valeurs en flot et celles des eaux de ruissellement.

### 2.1 - L'AZOTE AMMONIACAL (fig. XI.8)

#### - Les eaux de flot

L'amplitude de variation annuelle des teneurs en ammoniac est très faible : 19  $\mu$ atg N/l.

Les eaux de Loire qui pénètrent dans l'étier sont peu soumises aux variations saisonnières et la teneur en ammoniac varie autour de 10 à 15  $\mu$ atg N/l. Nous remarquons toutefois une légère baisse de juin à août (6 à 7  $\mu$ atg N/l).

#### - Les eaux de ruissellement

Contrairement aux eaux de flot, les variations des eaux de ruissellement sont extrêmement importantes avec une amplitude de 87  $\mu$ atg N/l. Les valeurs les plus fortes sont observées en avril (80  $\mu$ atg N/l) et en été (115  $\mu$ atg N/l le 22.07.82).

En avril, l'abondance en ammoniac est due à la décomposition de la matière organique particulièrement importante (3,6 g/l). Les organismes phytoplanctoniques étant en quantité insuffisante pour assimiler cet ammoniac (cf. chapitre VII : pigments chlorophylliens), une partie des ions  $NH_4$  est oxydée en ions nitreux.

En été, l'augmentation de l'azote ammoniacal est simultanée avec le bloom phytoplanctonique qu'elle favorise. Les concentrations en ions  $NH_4$ , particulièrement élevées, sont peut être liées aux mauvaises conditions d'oxygénation (28 % de saturation en oxygène dissous le 22.07.82) qui ralentissent la nitrification et permettent ainsi une augmentation de l'ammoniac provenant de la décomposition de la matière organique très importante en été. Cependant, MARTIN J.M. (1975) estime que la nitrification n'est retardée que pour des pourcentages de saturation en oxygène dissous inférieurs à 10 %, or nos valeurs se situent largement au-dessus.

Nous pouvons également penser, comme le fait remarquer PICHINOTY F. (1973), que la dénitrification, favorisée par une augmentation du pH et de la température, puisse être à l'origine de cette augmentation en ammoniac.

D'autre part, la quantité importante de matière oxydable dans la courbe superficielle des vasières entraîne indirectement, par l'utilisation de l'oxygène dissous, la réduction des nitrates en azote ammoniacal, mais celle-ci reste toujours très faible.

### 2.2 - LES NITRITES (fig. XI.9)

#### - Les eaux de flot

Les teneurs en nitrites sont généralement extrêmement faibles, de l'ordre de 1  $\mu$ atg N/l (elles sont de 1  $\mu$ atg N/l dans les océans et de 1 à 15  $\mu$ atg N/l dans les fleuves). Le 24.05.82, toutefois, nous remarquons un pic à 7,7  $\mu$ atg N/l amorcé dès le mois d'avril : dans les eaux estuariennes, les ions  $NH_4$  sont transformés en ions nitreux. En été, de juin à septembre, l'assimilation des composés azotés par le phytoplancton entraîne une diminution des nitrites dans les eaux de Loire (0,3  $\mu$ atg N/l le 22.07.82). Dès le mois d'octobre et pendant tout l'hiver, les nitrites atteignent des valeurs de 1 à 1,7  $\mu$ atg N/l.

#### - Les eaux de ruissellement

Du printemps à l'été, nous observons une augmentation générale des concentrations avec un pic de 6,4  $\mu$ atg N/l le 28.04.82 suivi d'un pic de 3,6  $\mu$ atg N/l le 20.08.82. Cet enrichissement en nitrites est corrélé avec celui de l'ammoniac, observé précédemment : les pics correspondent au maximum de la dégradation bactérienne des matières organiques au premier stade de la nitrification.

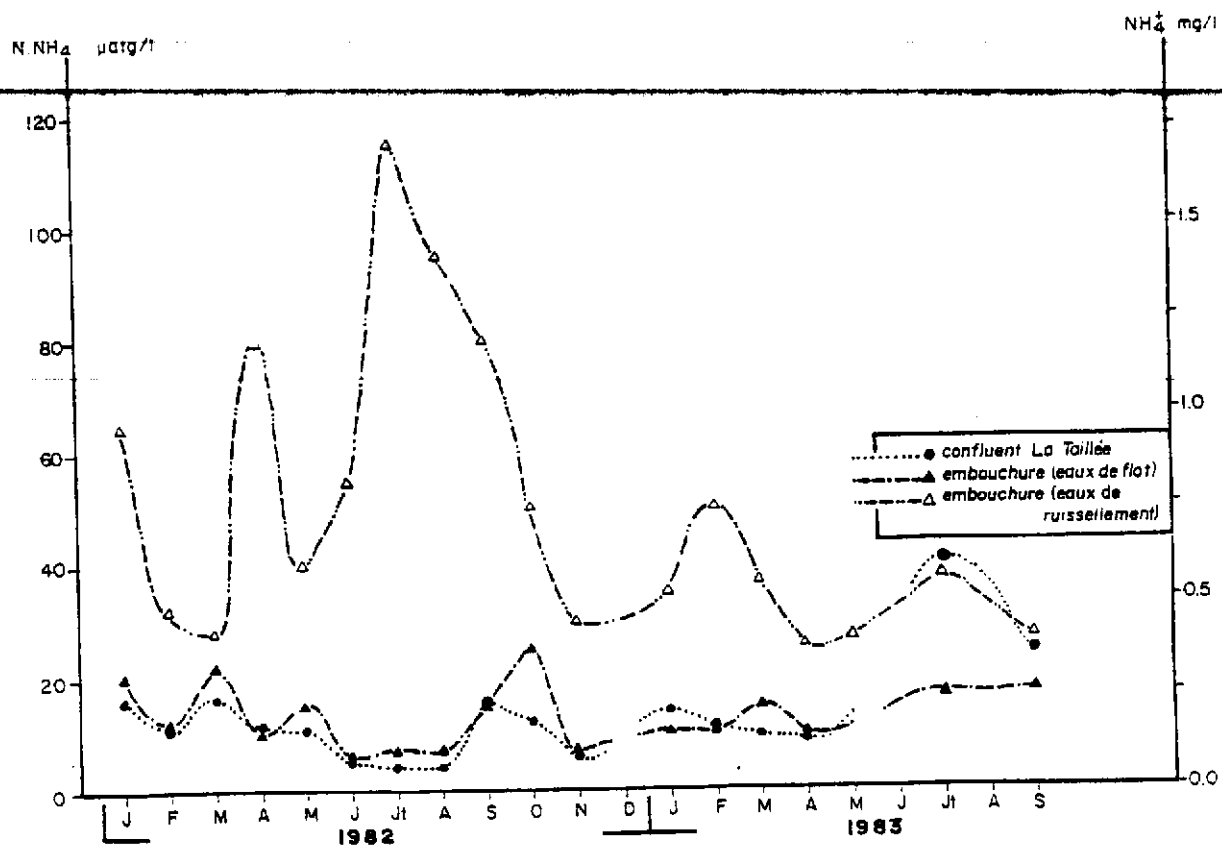


Fig. XI.8 - Variations saisonnières de l'ammoniaque à l'embouchure de l'étier de Lavau, et à la Taillée.

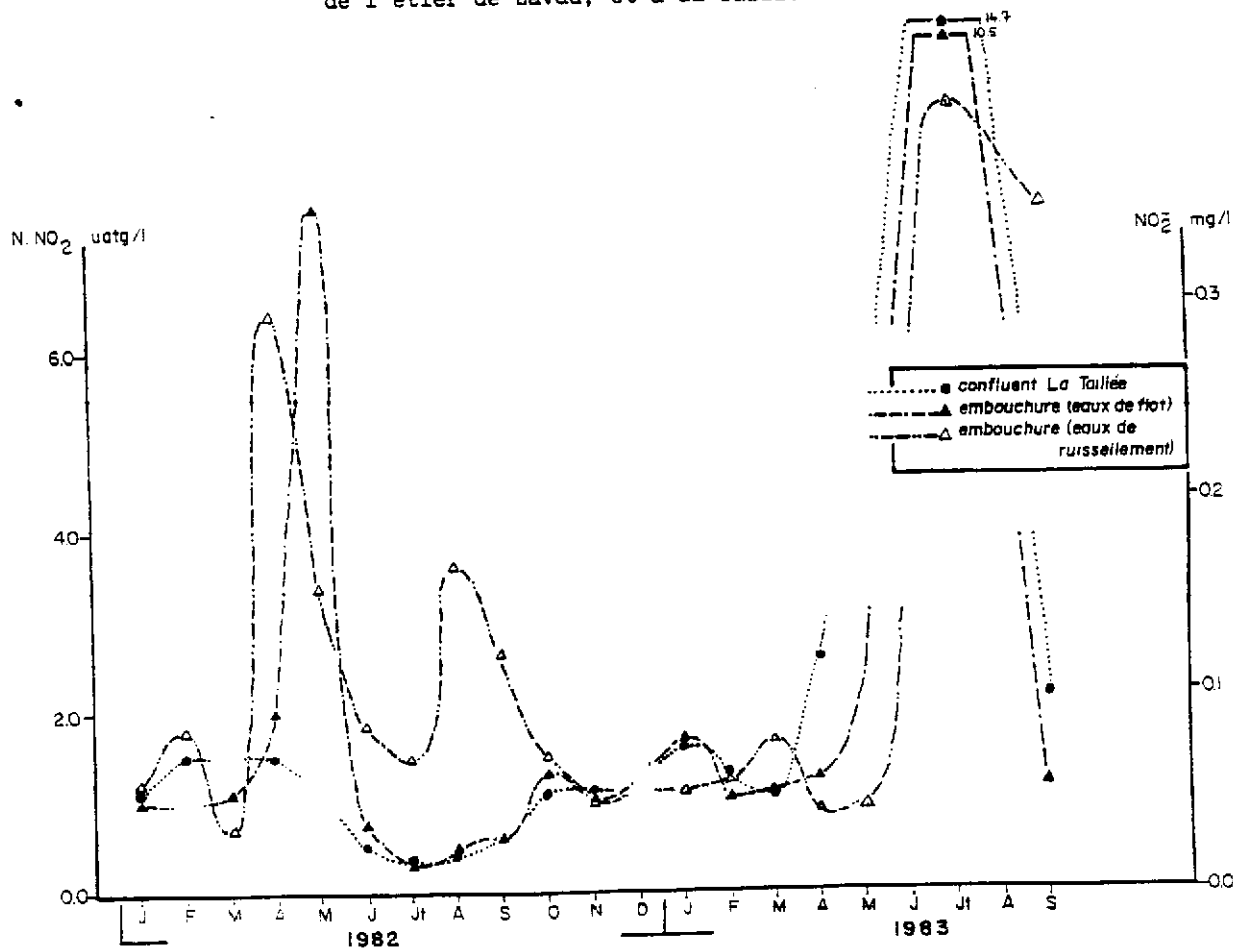


Fig. XI.9 - Variations saisonnières des nitrites à l'embouchure de l'étier de Lavau, et à la Taillée.



## 2.3 - LES NITRATES (fig. XI.10)

### - Les eaux de flot

Les variations saisonnières sont très importantes : les concentrations en nitrates dans les eaux de flot augmentent d'environ 20 µatg N/l en été à 250 µatg N/l en hiver.

Afin de vérifier si l'évolution des nitrates obéit à une loi de dilution, nous traçons leur droite de régression en fonction de la chlorosité (fig. XI.11).

La courbe de dilution des eaux de flot, avec un coefficient de corrélation de 0,94, indique que la variation des nitrates est étroitement liée à la variation de la chlorosité : le mélange est de type conservatif. Les eaux fluviales entraînent une augmentation en nitrates provenant des lessivages des sols lors des crues, tandis que les eaux marines, pauvres en sels nutritifs, diluent les eaux de l'étier.

En plus du rôle de la salinité, une activité biologique intense dans les eaux dès le mois de juin accentue la diminution des nitrates dans les eaux. BALEUX B. et al (1979) suggère que la perte azotée puisse provenir en faible partie de la sédimentation des matières azotées en suspension, en plus de la réduction assimilatrice.

### - les eaux de ruissellement

Elles sont généralement moins chargées en nitrates que les eaux de flot, notamment en hiver : il semble qu'une partie des nitrates apportée lors de la marée montante soit retenue par l'étier. BOYNTON W.R. et al (1980) observe déjà, dans une zone turbide de l'estuaire Patuxent, une accumulation considérable de nitrates dans les vasières en hiver, appauvrissant ainsi les eaux en azote nitrique. Si l'on trace la courbe de dilution des nitrates (fig. XI.12), on observe un léger excès en nitrates en été et un déficit en hiver : l'activité biologique et la "rétention" des nitrates par les vasières, en hiver, influent sur l'évolution de l'azote nitrique au sein des eaux de ruissellement.

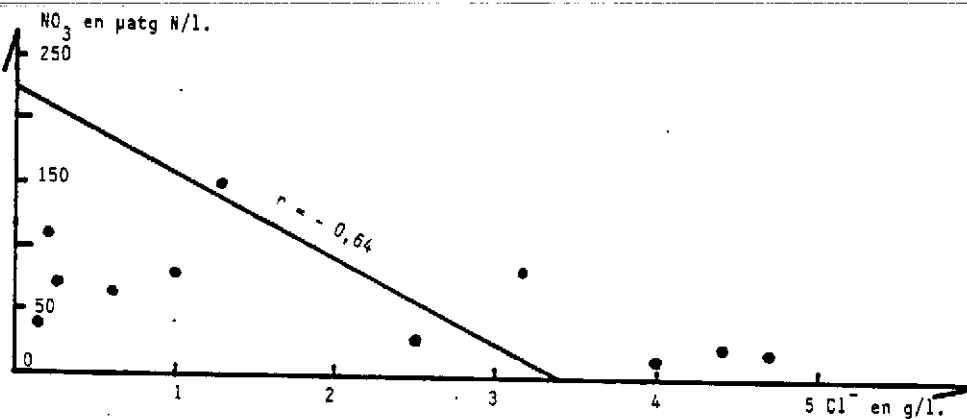


Fig. XI.12 - Courbe de dilution des nitrates dans les eaux de ruissellement à l'embouchure de l'étier de Lavau.

## 2.4 - CONCLUSION

Dans les eaux de flot, les variations saisonnières de l'ammoniaque sont peu marquées mais elles sont considérables pour les nitrates qui augmentent de 20 µatg N/l en été à 250 µatg N/l en hiver.

Dans les eaux de ruissellement, l'ammoniaque toujours très abondant, augmente du printemps à l'automne ainsi que les nitrites, alors que les nitrates diminuent pendant la même période.

Par conséquent au printemps - été, l'azote ammoniacal représente la source d'azote la plus importante et favorise l'explosion phytoplanctonique au sein de l'étier.

## 3 - CYCLE ANNUEL DES SELS AZOTES A L'ECLUSE

### 3.1 - L'AZOTE AMMONIACAL (fig. XI.13)

#### - les eaux de flot

Les teneurs en ammoniaque varient entre 9 et 40 µatg N/l et fluctuent d'un mois à l'autre. Nous observons des pics en avril, juillet, septembre et janvier, février : du printemps à l'automne, les augmentations sont dues à l'activité biologique,

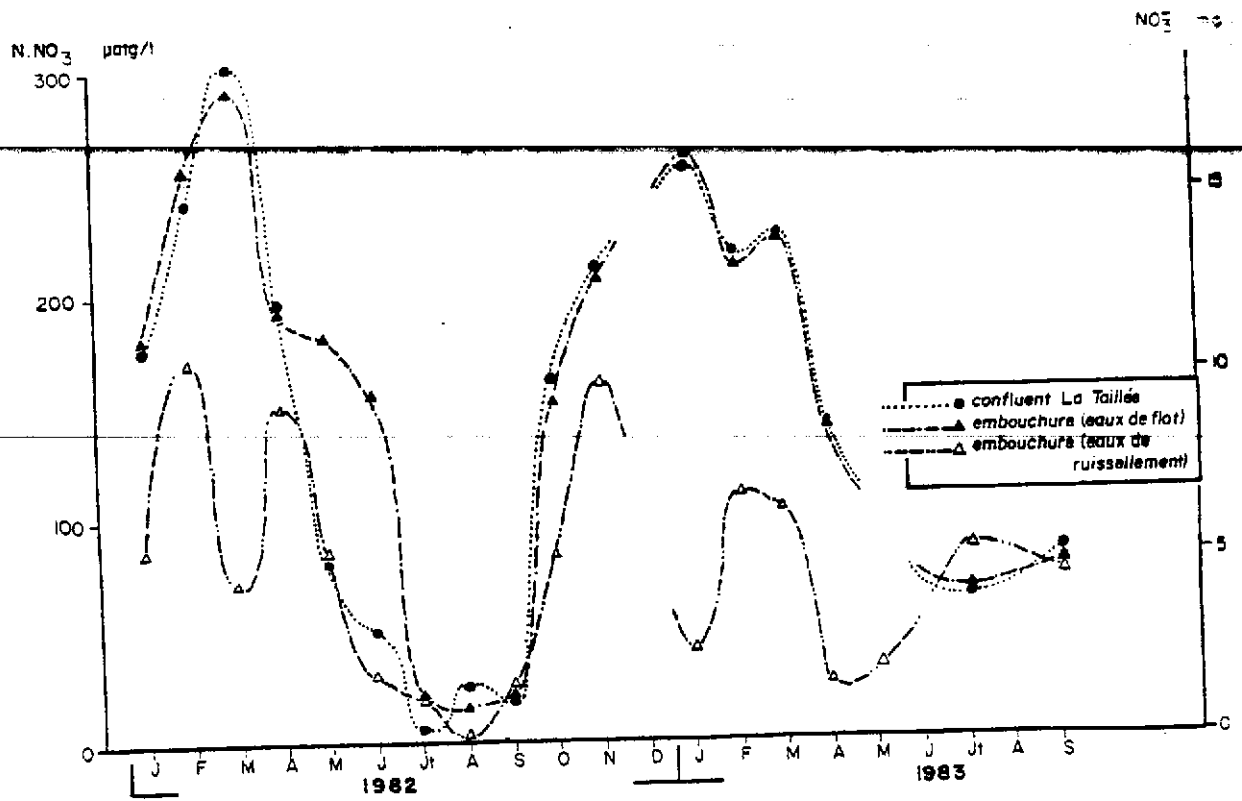


Fig. XI.10 - Variations saisonnières des nitrates à l'embouchure de l'étier de Lavau, et à la Taillée.

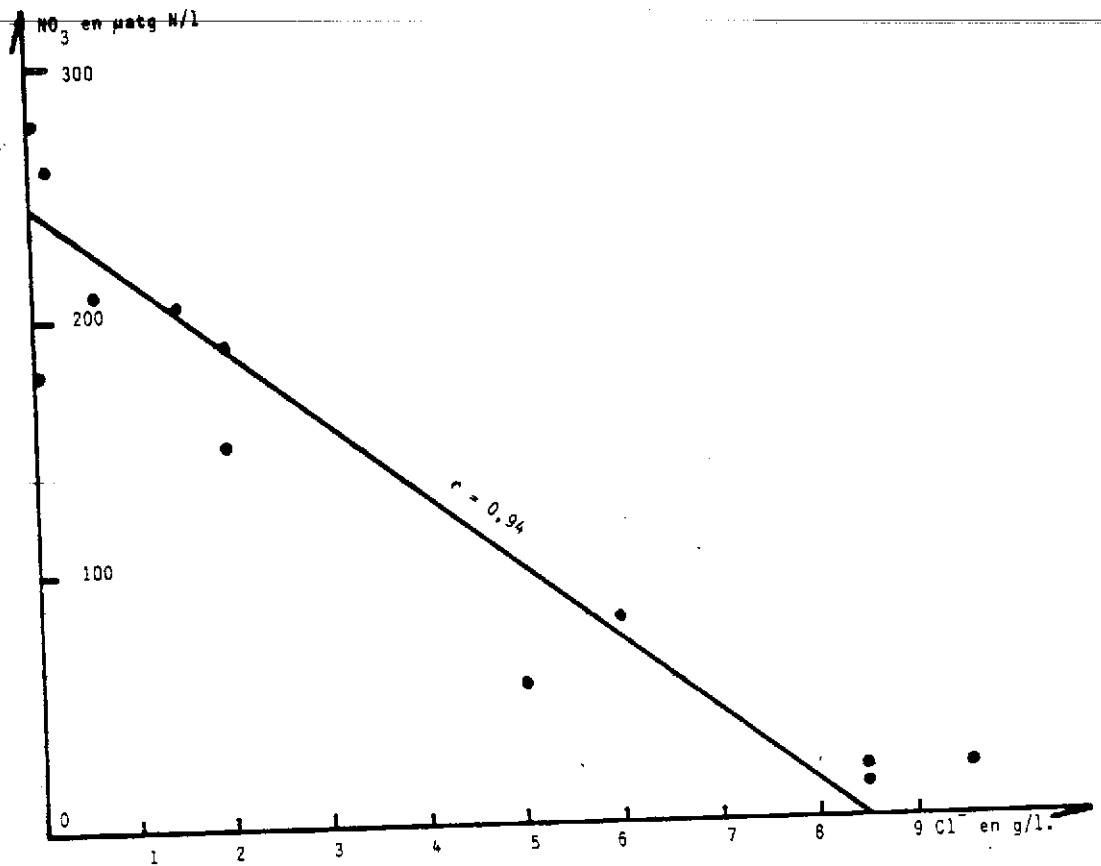


Fig. XI.11 - Courbe de dilution des nitrates dans les eaux de flot à l'embouchure de l'étier de Lavau.

Fig. XI.13  
Variations saisonnières de  
l'ammoniaque à l'écluse et  
dans le marais de Lavau.

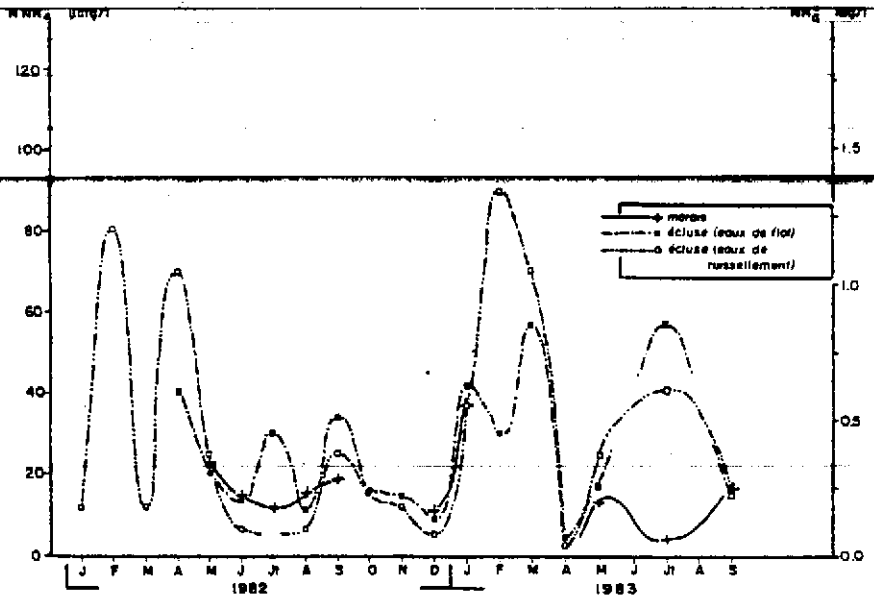


Fig. XI.14  
Variations saisonnières des  
nitrites à l'écluse et dans  
le marais de Lavau.

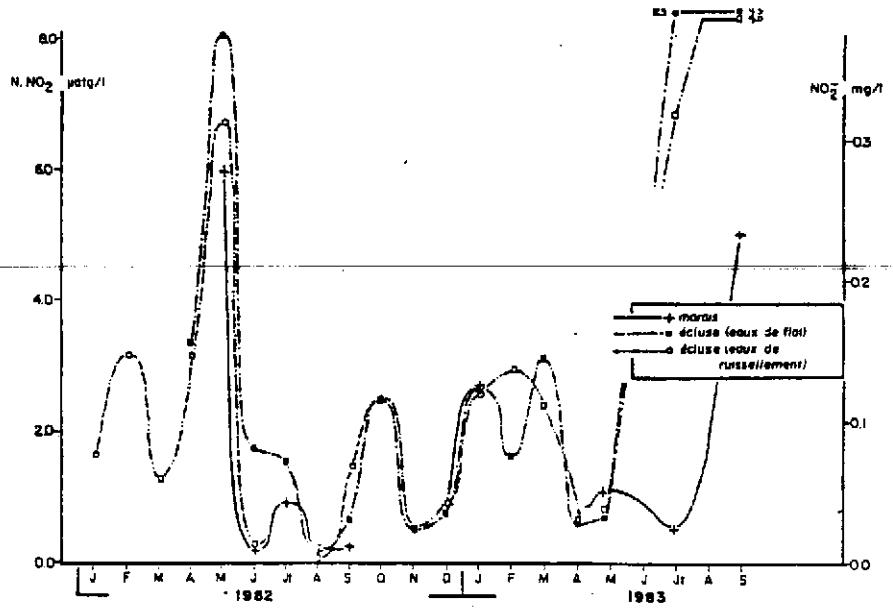
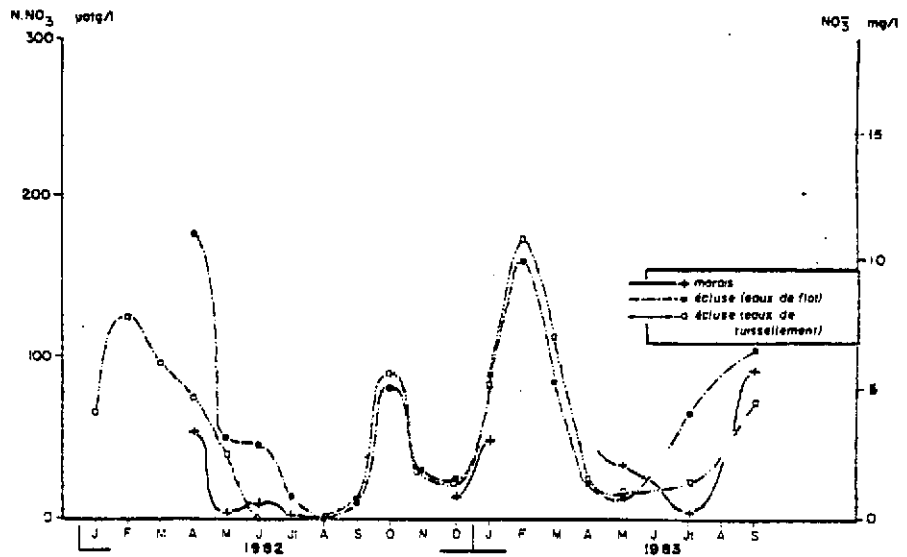


Fig. XI.15  
Variations saisonnières des  
nitrates à l'écluse et dans  
le marais de Lavau.



tandis qu'en hiver le passage des eaux de flot sur les vasières entraîne, vers l'écluse, l'ammoniac, provenant de la dégradation bactérienne de la matière organique.

- les eaux de fin de jusant

LES VARIATIONS SAISONNIÈRES SONT FAIBLES ET LES TENEURS EN AMMONIAC sont généralement inférieures aux teneurs des eaux de flot, excepté en février 1982 et février et mars 1983 où l'excès d'eau dans des sols déjà sursaturés a provoqué le rejet d'azote ammoniacal issu de la décomposition des végétaux supérieurs du marais.

3.2 - LES NITRITES (fig. XI.14)

Les nitrites sont peu abondants, aussi bien dans les eaux de flot qu'en fin de jusant : ils ne dépassent guère la valeur de 3 µatg N/l, excepté au mois de mai où les eaux de fin de jusant contiennent 9 µatg N/l et les eaux de flot 6,8 µatg N/l. Cette augmentation provient vraisemblablement de la pénétration dans le marais (l'écluse étant ouverte) des eaux de Loire riches en nitrites à laquelle s'ajoute l'action bactérienne sur les vasières.

3.3 - LES NITRATES (fig. XI.15)

La variation des nitrates est liée à la variation des débits en Loire. En hiver, nous observons les valeurs les plus fortes (160 µatg N/l le 15.02.82), alors qu'en été la teneur en nitrates est très faible (10 µatg N/l le 17.09.82). Une corrélation entre la chlorosité et les nitrates existe ( $r = - 0,53$ ), bien qu'elle soit moins significative qu'à l'embouchure (fig. XI.16).

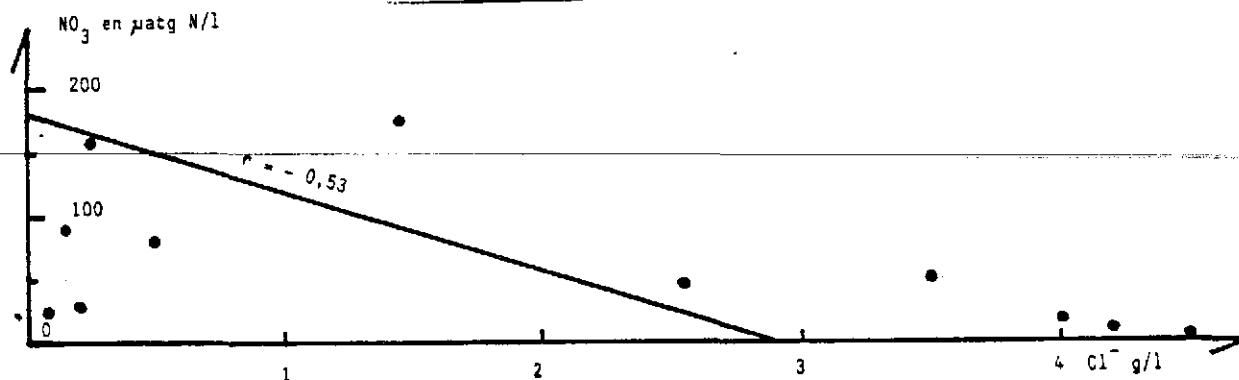


Fig. XI.16 - Courbe de dilution des nitrates dans les eaux de flot à l'écluse de Lavau.

En octobre, nous observons un pic à 82 µatg N/l résultant de la nitrification des ions ammoniacaux. En effet, lors de la même sortie, nous remarquons une diminution de l'ammoniac et une légère augmentation des nitrites. D'autre part, le pourcentage de saturation en oxygène augmente de 87 % entre septembre et octobre favorisant ainsi la formation des nitrates.

- les eaux de ruissellement

Les teneurs en nitrates, en fin de jusant, sont sensiblement les mêmes que dans les eaux de flot, excepté au printemps où l'écoulement des eaux du marais entraîne un appauvrissement en nitrates dans les eaux à l'écluse.

3.4 - CONCLUSION

Les différences entre les eaux de flot et les eaux de ruissellement sont beaucoup moins marquées à l'écluse qu'à l'embouchure : les eaux à l'écluse sont constituées par les eaux du marais, de ruissellement et les eaux de Loire, et ces trois volumes se mélangent à l'écluse au cours d'un cycle de marée.

Les variations saisonnières les plus importantes sont celles des nitrates qui passent de 0 à 175 µatg N/l entre l'été et l'hiver. Les nitrites varient peu si ce n'est au mois de mai.

L'azote ammoniacal, qui varie pendant la saison chaude en fonction de la production bactérienne et de la consommation par le phytoplancton, atteint un maximum de 90 µatg N/l en février dans les eaux de ruissellement par suite des inondations du marais.

#### 4 - VARIATIONS SAISONNIERES DANS LE MARAIS

Lors de l'étude de la répartition des produits azotés dans le temps, certains points dont la teneur en azote minéral était estimée anormalement forte ont été éliminés : il s'agit essentiellement du point 1 qui reçoit les eaux de la station d'épuration et quelques rares fois le point 2 et le point 4 comme le précise le tableau ci-dessous (ex : le 25.06.82, nous notons une concentration de 304 µatg au point 1, tandis que la moyenne des autres points n'est que de 3,7 µatg N/l).

POINTS PRODUITS AZOTES	1	2	4
NH <sub>4</sub>	22.07.82 : 123		24.05.82 : 116
	20.08.82 : 228	25.06.82 : 107	
	17.09.82 : 106		25.06.82 : 84
NO <sub>2</sub>	22.07.82 : 6,3		
NO <sub>3</sub>	24.05.82 : 338		
	25.06.82 : 304		
	16.12.82 : 127		

Tableau XI.1 - Concentrations anormalement fortes en produits azotés au N, du marais du Syl (en µatg N/l.)

Après le retrait de ces points, nous avons calculé les différentes moyennes pour chaque sortie, et tracé les courbes des trois éléments nutritifs étudiés.

##### 4.1 - L'AZOTE AMMONIACAL (fig. XI.13)

La concentration en ammoniacale est assez stable (entre 10 et 25 µatg N/l) excepté en janvier où elle atteint 37 µatg N/l par suite des inondations. En effet, des prairies submergées sont le siège de fermentations anaérobies qui décomposent les végétaux en ammoniacale.

##### 4.2 - LES NITRITES (fig. XI.14)

Les teneurs en nitrites sont extrêmement faibles dans le marais (inférieures à 3 µatg N/l), mais le 24.05.82 l'ouverture de l'écluse en flot, permettant l'arrivée des eaux de la Loire, entraîne une augmentation des ions nitreux (6 µatg N/l).

##### 4.3 - LES NITRATES (fig. XI.15)

La concentration moyenne ne dépasse pas 50 µatg N/l, avec des valeurs chutant à environ zéro en août et en septembre. Ces teneurs, particulièrement faibles en été seraient dues probablement à l'assimilation de l'azote ammoniacal par le phytoplancton avant que l'oxydation en nitrates n'ait eu le temps de se faire (HARRIS E., 1959).

##### 4.4 - CONCLUSION

Les variations des sels azotés dans le marais ne sont pas remarquables sauf en quelques points tels qu'à "la Prée-Neuve" (au N.W) ou le rejet de la station d'épuration de Savenay entraîne des enrichissements locaux en azote. Les sels les plus abondants, malgré des valeurs faibles, sont les nitrates et l'ammoniacale; ce dernier est plus abondant en été que l'azote nitrique et il devient la source principale d'azote minéral pour le phytoplancton. Le marais enrichit peu l'étier, par contre, la pénétration de la Loire entraîne une augmentation de l'azote dans le marais lors des envois de marée.

Remarque : Pendant les mois de mars et avril, les exploitants agricoles répandent des nitrates sur les marais. N'ayant pas fait de prélèvement durant ces mois, nous ne pouvons observer les variations dans le marais, mais à l'écluse nous avons remarqué une nette augmentation des nitrates dans les eaux au mois de mars (de 20 à 100 µatg N/l le 29.03.82).

## 5 - ÉVOLUTION DES PRODUITS AZOTES ENTRE L'EMBOUCHURE ET LE MARAIS

### 5.1 - L'AZOTE AMMONIACAL

#### - de l'embouchure vers le marais

Les teneurs en ammoniacque augmentent, de façon générale, entre l'embouchure et l'écluse. L'enrichissement de l'ordre de 150 % est dû à l'ammonification de la matière organique déposée sur les vasières à B.M. et remise en suspension par le flot. Lors de la marée montante, les eaux transportent l'azote ammoniacal, ainsi formé, vers l'écluse.

Les eaux du marais et les eaux de l'écluse ont sensiblement les mêmes concentrations en ammoniacque (10 à 20 µatg N/l), excepté en juillet et septembre où les eaux de l'écluse sont plus chargées en azote ammoniacal (35 µatg N/l le 17.09.82), grâce au refoulement des eaux de ruissellement enrichies en ammoniacque par la dégradation de la matière organique sur les vasières.

#### - du marais vers l'embouchure

Du printemps à l'automne, les eaux du marais qui s'écoulent vers l'écluse subissent fort peu de modifications quant à la teneur en ammoniacque. Par contre, les eaux de l'étier s'enrichissent considérablement en ions ammoniacaux au cours de leur descente vers l'embouchure. En effet, les vasières sont le siège d'activité biologique intense amenant à des concentrations ammoniacales très élevées. SAUTRIOT D. (1979) suggère que lorsque la sédimentation est importante, ce qui est le cas sur les vasières en été (cf. chapitre VI : M.E.S.), elle s'accompagne souvent de fortes teneurs en matière organique, dont une faible partie seulement est minéralisée à l'interface, tandis que les processus se poursuivent au cours de l'enfouissement vers les couches sous-jacentes. La quantité d'oxygène est alors insuffisante pour assurer la demande biologique et l'oxydation des composés organiques, ce qui amène à des conditions favorables à l'accumulation d'ions ammoniacaux.

En hiver, la décomposition des végétaux entraîne un enrichissement dans les eaux du marais, mais également dans les eaux de ruissellement, et à l'embouchure on atteint des valeurs de 35 à 50 µatg N/l.

En conclusion, du printemps à l'automne, l'ammoniacque est fourni essentiellement par les vasières, grâce à l'activité microbiologique. En hiver, le marais produit une certaine quantité d'azote ammoniacal lors des inondations, par décomposition des plantes.

### 5.2 - LES NITRITES

#### - de l'embouchure vers le marais

Les teneurs en nitrites, nous l'avons vu, sont généralement très faibles quel que soit le lieu et le jour de prélèvement. Les variations que nous observons à marée montante entre l'embouchure, la Taillée, l'écluse et le marais sont négligeables. Cependant au mois de mai, un enrichissement en nitrites dans les eaux de Loire entraîne une augmentation des ions nitreux dans tout le système, y compris le marais, grâce à l'ouverture de l'écluse.

#### - du marais vers l'embouchure

En hiver, la concentration en nitrites reste stable pendant la marée descendante d'un point à un autre. En été, l'excès d'ions ammoniacaux est transformé en ions nitreux sans toutefois atteindre le stade des nitrates. Cette transformation a lieu entre l'écluse et l'embouchure : les modifications se font au contact eau/sédiment des vasières, par l'action bactérienne.

### 5.3 - LES NITRATES

#### - de l'embouchure vers le marais

Deux périodes se distinguent pour l'évolution des nitrates :

- du printemps à la fin de l'été, les ions nitriques ont des concentrations très faibles dans tout le système, aussi les variations de l'aval vers l'amont sont insignifiantes lors de la marée montante,

- en hiver, par contre, les eaux de flot très riches en nitrates s'appauvrissent au cours de la remontée des eaux sur les vasières : le 18.01.83, les valeurs diminuent de 260 µatg N/l à l'embouchure à 90 µatg N/l à l'écluse. Cette diminution des nitrates au cours de la remontée des eaux est due aux processus de dénitrification, transformant les nitrates en azote atmosphérique et favorisée par des surfaces de contact eau/sédiment bien développées notamment lors du débordement sur les berges, en vives-eaux.

Dans le marais plus ou moins isolé des eaux de flot par l'écluse, nous notons, pour la même sortie, une teneur en nitrates de 45 µatg N/l.

- du marais vers l'embouchure

En été, du marais vers l'écluse, les teneurs très faibles restent stables. En hiver, par contre, nous notons un enrichissement à l'écluse dû à l'oxydation de l'ammoniaque.

- En été, du mois d'avril au mois de juillet, les nitrates augmentent généralement de l'écluse à l'embouchure dans les eaux de la marée descendante : ils résultent de la nitrification de la matière organique abondante dans la couche superficielle des vasières.

- En hiver, au contraire, les nitrates diminuent dans les eaux, de l'écluse vers l'embouchure, "piégés" dans les sédiments des vasières et transformés en azote atmosphérique.

Une étude de la couche superficielle des vasières serait très intéressante et très utile pour l'interprétation de ces phénomènes de "rétention" qui semblent être essentiellement d'origine biologique.

#### 5.4 - CONCLUSION

L'évolution des composés azotés dans le système étier-marais est rendue complexe par la présence de la Loire et des vasières. En effet, les eaux de la Loire entraînent des modifications dans l'étier sous l'action de divers facteurs tels que :

- le débit,
- la salinité,
- la matière organique en suspension.

Ces facteurs agissent différemment selon le composé azoté considéré.

Les vasières, dont les surfaces sont considérables à B.M. par rapport à celle de l'étier, sont également le siège de transformations des sels azotés grâce :

- à l'action bactérienne,
- à l'assimilation phytoplanctonique,
- à une sédimentation accrue.

Les eaux du marais, par contre, entraînent peu de modifications des teneurs en azote minéral dans l'étier, mais il est difficile d'en tirer des conclusions puisque le marais ne communique avec le cours d'eau de façon régulière qu'à marée descendante en hiver.

Après avoir vu le rôle des différents éléments sur l'étier, nous pouvons nous demander quel est le rôle de l'étier vis à vis de la Loire ?

L'étier apporte continuellement, au cours de l'année, de l'azote ammoniacal en quantité considérable, en fin de jusant, dans les eaux de Loire. En été, les ions ammoniacaux permettent l'explosion des blooms phytoplanctoniques, et ils sont assimilés par le phytoplancton, mais ils peuvent atteindre des valeurs toxiques pour le bon développement de la faune aquatique. Les nitrates, au contraire, sont "piégés" en partie par l'étier pendant l'hiver, notamment en fin de jusant.

Par conséquent, l'étier a un rôle primordial dans les variations des sels azotés grâce essentiellement à la présence des vasières, siège de transformations très importantes dans le cycle de l'azote, sous l'influence microbiologique.

#### 6 - BILAN QUANTITATIF DE L'AZOTE MINERAL

Nous venons d'étudier de façon qualitative les variations spatio-temporelles de l'azote minéral dans le système étier-marais et nous abordons maintenant le bilan quantitatif.

### 6.1 - BILAN QUANTITATIF A L'EMBOUCHURE

Le tableau XI.2 résume les quantités d'ions azotés entrées et sorties au cours d'un cycle de marée et nous permet de tracer les courbes des flux lors des cycles tidaux observés (fig. XI.17)

Les valeurs positives correspondant à ce qui est expulsé de l'étier vers la Loire; les valeurs négatives représentant l'apport des éléments de la Loire dans l'étier.

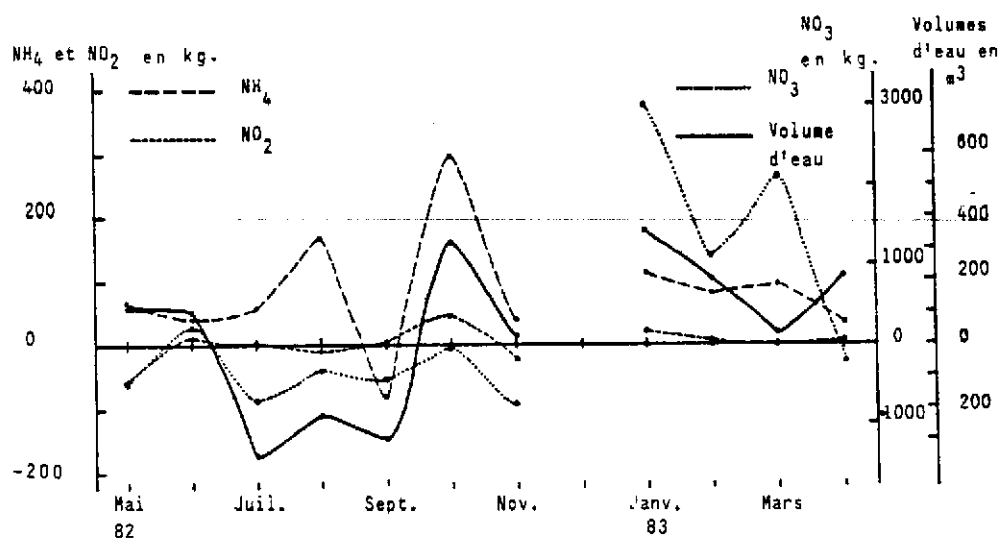


Fig. XI.17 - Variations annuelles des bilans jusant-flot de NH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub> et des volumes d'eau.

D'une façon générale, en automne et en hiver, les composés azotés sont exportés vers la Loire, les nitrates étant la forme azotée la plus abondante. Nous notons, en octobre, un pic pour les trois ions qui correspond à un volume d'eau exporté important. Du printemps à l'été, par contre, les bilans varient différemment selon chaque élément étudié.

#### 6.1.1 - L'azote ammoniacal

Il est toujours exporté en Loire (de 34 à 297 kg), excepté en septembre où il rentre 82,5 kg dans l'étier. Cette exportation presque continuelle est surprenante puisque de juillet à septembre, le bilan des sorties des eaux est négatif, mais l'ammoniacque est tellement abondant dans les eaux de ruissellement qu'une quantité importante est expulsée vers la Loire.

Les variations des bilans quantitatifs de l'azote ammoniacal, ne sont donc pas liées uniquement aux volumes d'eau mais également à des facteurs biologiques et chimiques qui assurent presque en permanence un rejet d'ammoniacque dans l'estuaire.

Le tableau X.3 des indices de rétention (cf. chapitre VI : M.E.S.) montre bien l'expulsion permanente d'azote ammoniacal (I.R. > 1) particulièrement importante en juillet-août (2,31 kg/100 m<sup>3</sup> et 3,60 kg/100 m<sup>3</sup>).

#### 6.1.2 - Les nitrites

Les quantités de nitrites sont très faibles, généralement inférieures à 20 kg sauf en mai et en octobre où elles sont de 31 et 45 kg. Les nitrites étant un stade intermédiaire entre l'ammoniacque et les nitrates, leurs bilans varient en fonction de ces deux composés azotés.

Les indices de rétention (tableau XI.3) indiquent en hiver, une importation de nitrites provenant de la Loire et une exportation de l'étier vers l'estuaire au cours des autres saisons.

#### 6.1.3 - Les nitrates

La variation des flux de nitrates est liée aux volumes d'eau entrés ou sortis au cours d'un cycle de marée. En été, de juillet à septembre, l'estuaire enrichit l'étier en nitrates, alors qu'en hiver (janvier - mars) l'étier exporte des ions nitriques vers la Loire.



Les quantités de nitrates, liées essentiellement au débit de la Loire, varient de - 707 kg par cycle de marée en étiage à + 3000 kg en crue. Les indices de rétention (tableau XI.3) sont généralement inférieurs à 1, la Loire enrichissant presque toujours l'étier en nitrates. Toutefois, en été (juillet - août), les quantités entrant et sortant pour un volume unitaire de 100 m<sup>3</sup> sont en équilibre (tableau XI.4). L'étier et la Loire sont tous les deux déficitaires à cette période et aucun apport ne se fait de l'un vers l'autre.

### 6.2 - BILAN QUANTITATIF A L'ECLUSE

L'abondance des nitrates par rapport aux nitrites et à l'ammoniaque est nette dans les eaux à l'écluse (tableau XI.4).

DATES	MAREE	Volumes d'eau en m <sup>3</sup>	NH <sub>4</sub> en kg	NO <sub>2</sub> en kg	NO <sub>3</sub> en kg
10.02.82	jusant	47 988	49,5	7,3	395
24.05.82	jusant	70 458	34,6	22,9	213
	flot	52 534	20,3	19,5	234
	bilan jusant-flot		14,3	3,4	-21
16.12.82	jusant	84 591	11,6	3,9	135

Tableau XI.4 - Bilan des composés azotés à l'écluse.

Le 24.05.82, nous observons des quantités relativement élevées en nitrites, du même ordre que les quantités d'azote ammoniacal : ceci résulte du processus de nitrification intense pendant cette période et ayant enrichi considérablement les eaux de l'étier et du marais à la faveur des envois de marée. Au cours de ce cycle de marée, l'ammoniaque et les nitrites sont expulsés du marais vers l'étier, par contre l'étier enrichit le marais en nitrates.

### 6.3 - CONCLUSION

Nous constatons, dans le bilan des sels azotés, que chaque élément varie de façon particulière parce qu'il est soumis à des facteurs différents. Les nitrates dépendent des débits de la Loire, tandis que l'ammoniaque résulte d'actions chimique et biologique qui masquent l'effet du débit de la Loire. Les nitrites suivent l'évolution des nitrates ou de l'azote ammoniacal en fonction des conditions du milieu (oxygénation, matière organique...). Le fait le plus remarquable est l'exportation permanente de l'ammoniaque. L'augmentation de l'ammoniaque dans la Loire entraîne une diminution de la qualité des eaux surtout en été puisqu'elle contribue au déficit en oxygène dissous (eutrophisation).

## 7 - CONCLUSION

Nous synthétisons dans les tableaux XI.5 et XI.6, l'évolution des composés azotés dans le système étier-marais de Lavau qui sert de référence pour l'ensemble des étiers étudiés.

### - L'azote ammoniacal

L'azote ammoniacal varie de manière semblable dans l'étier quelle que soit la saison : l'ammonification de la matière organique sur les vasières permet un enrichissement permanent en azote ammoniacal dans les eaux de l'étier, alors que les eaux estuariennes pauvres en ammoniaque entraînent une diminution des concentrations lors de la marée montante.

Dans le marais, les teneurs en ammoniaque sont peu élevées et seule la décomposition de la matière organique lors des inondations permet leur augmentation dans les eaux.

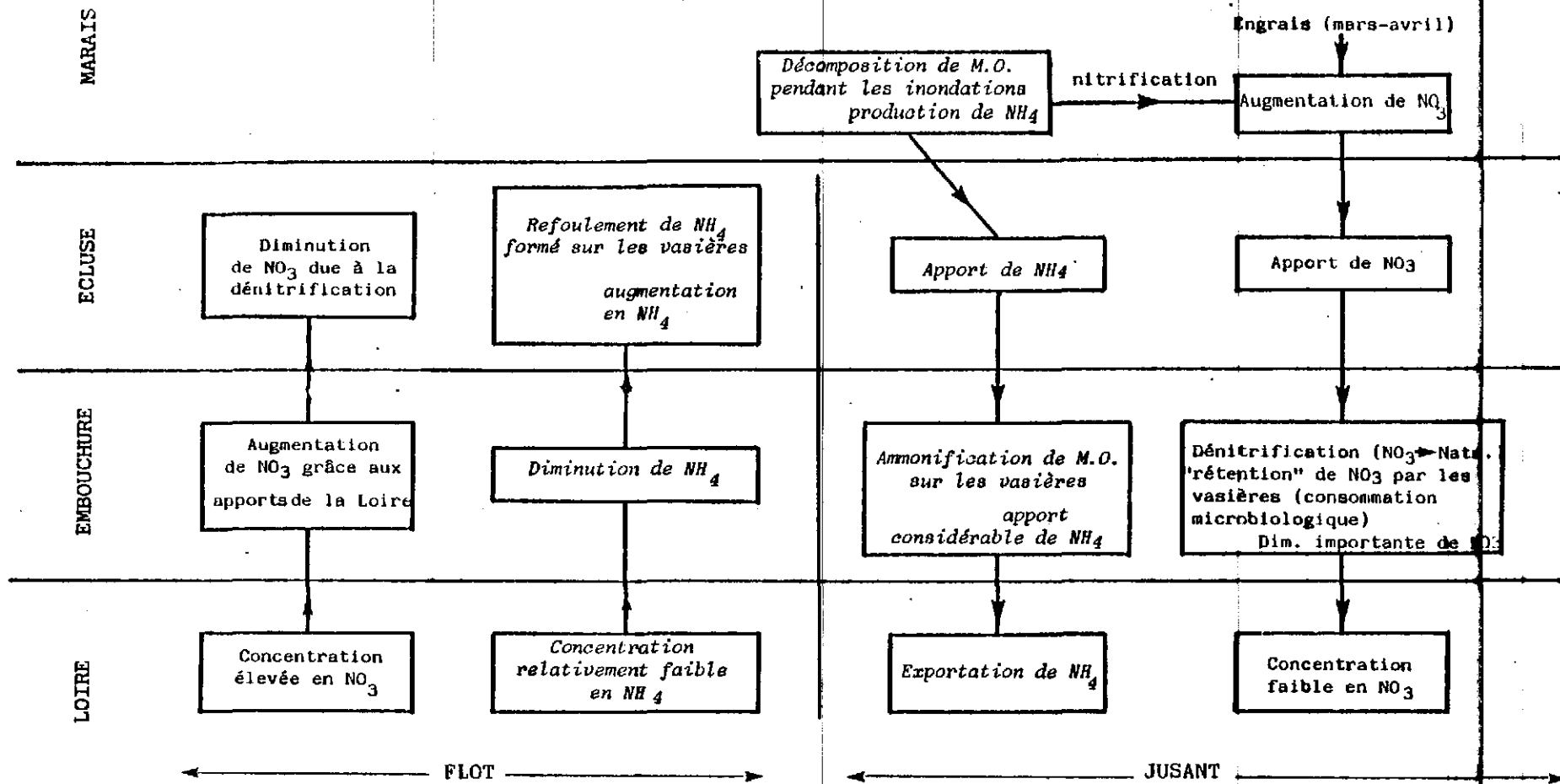


Tableau XI.6 - Evolution des composés azotés dans le système de Lavau, en période hivernale.

- Les nitrites

Au cours de la période hivernale, les teneurs en nitrites ne varient pas ou très peu.

Pendant la période estivale, la nitrification se produisant sur les vasières permet une légère augmentation des nitrites.

- Les nitrates

Les teneurs en nitrates varient considérablement entre l'hiver et l'été. En hiver, une diminution très importante des nitrates se produit lors de l'écoulement des eaux sur les vasières : elle est due à une dénitrification transformant les nitrates en azote atmosphérique grâce à l'activité bactérienne ("rétention" biologique par les vasières). Lors de la marée montante, les apports ligériens entraînent une forte augmentation des nitrates dans l'étier.

En été, les concentrations en nitrates restent toujours très faibles, la nitrification atteignant rarement le dernier stade.

En conclusion, nous observons des différences fondamentales entre l'azote ammoniacal et les nitrates :

- l'ammoniaque est toujours en quantité importante dans les eaux de l'étier grâce à l'ammonification de la matière organique sur les vasières,

- les nitrates sont très abondants en hiver grâce aux apports fluviaux et sont largement déficitaires, en été, aussi bien dans l'estuaire que dans l'étier.

Les vasières ont un rôle primordial pour les concentrations en ammoniaque et permettent une exportation permanente vers la Loire.

Par contre, les nitrates varient essentiellement selon les débits de la Loire. Nous observons, en hiver, une exportation vers l'estuaire grâce à d'importants volumes d'eau expulsés, et une importation dans l'étier en été.

II - LES VARIATIONS DES SELS AZOTES DANS LES SYSTEMES DE CORDEMAIS ET DU DAREAU

1 - VARIATIONS DE L'AZOTE AMMONIACAL

1.1 - A CORDEMAIS

- dans l'étier

En été, on observe, à l'écluse, une diminution de l'ammoniaque pendant le jusant (de 5,5 à 1,1 µatg N/l le 8.09.82) suivi d'une stabilisation lors du flot (1,1 µatg N/l). A mi-étier, les rejets de la station d'épuration entraînent des variations considérables (augmentation de 0 à 467 µatg N/l pendant le jusant) qui modifient complètement la qualité des eaux (fig. XI.18).

En hiver, à l'écluse les teneurs en ammoniaque diminuent au retour du flot (de 39 à 11 µatg N/l le 24.02.83). A mi-étier, nous atteignons un maximum de 333 µatg N/l dû aux rejets de la station d'épuration.

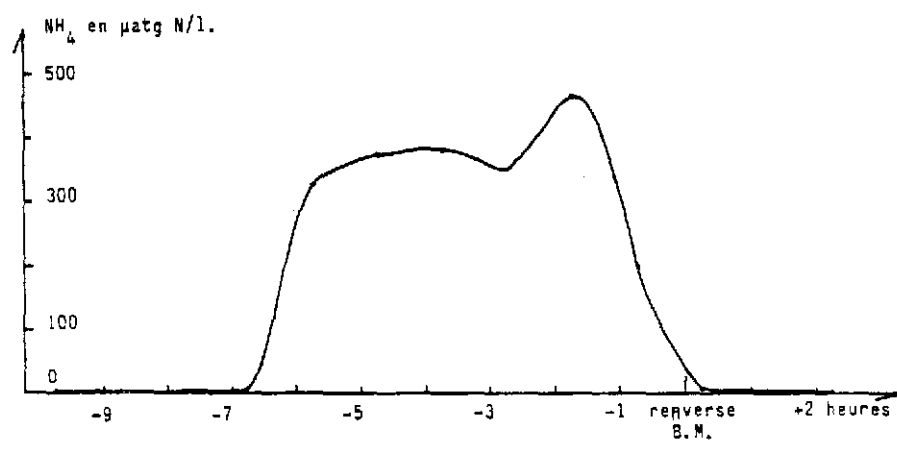


Fig. XI.18 - Variations de NH<sub>4</sub> à mi-étier au cours d'une marée ( Cordemais le 8.09.82 ).

- dans le marais

Les teneurs sont beaucoup plus élevées en hiver qu'en été, par suite des inondations entraînant la dégradation des végétaux.

1.2 - AU DAREAU

- dans l'étier

En été, alors qu'à l'écluse les concentrations diminuent pendant le jusant (de 10,5 à 2,2 µatg N/l le 6.09.82) et augmentent en flot (de 2,2 à 9,4 µatg N/l le 6.09.82), à mi-étier nous observons le phénomène inverse : augmentation de 4,4 à 13,9 µatg N/l pendant le jusant le 6.09.82 et diminution de 13,9 à 8,3 µatg N/l en flot (fig. XI.19).

Ces variations contraires montrent l'influence de l'écoulement des eaux du marais pauvres en ammoniacque sur les eaux à l'écluse, et l'action des vasières à mi-étier.

En hiver, les concentrations en ammoniacque varient peu le 3.02.83 :

- elles restent de l'ordre de 0,5 à 1 µatg N/l à l'écluse,
- elles diminuent de 4,4 à 2,2 µatg N/l pendant le jusant et augmentent à 7,2 µatg N/l en flot.

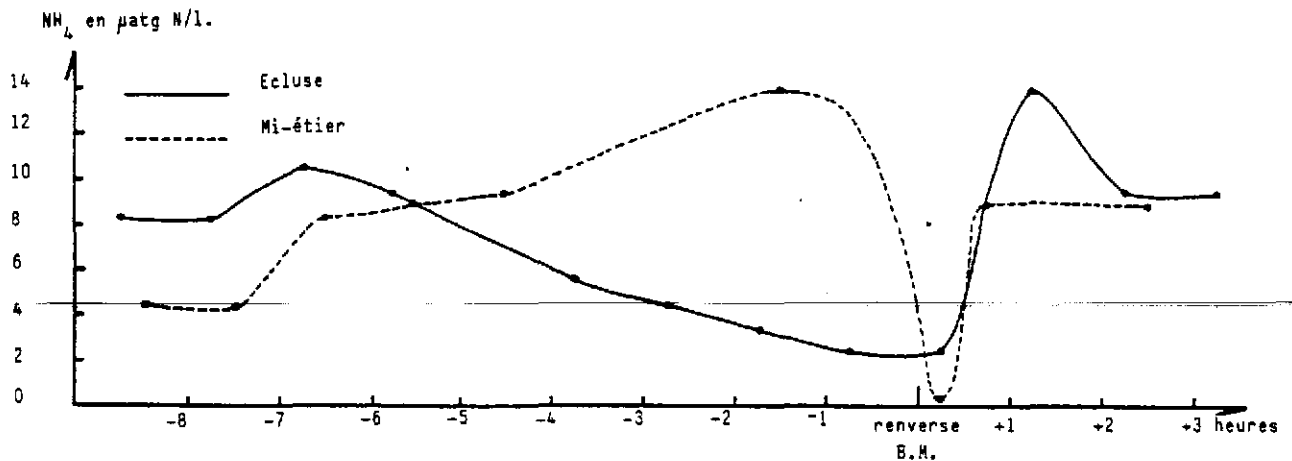


Fig. XI.19 - Variations de NH<sub>4</sub> au cours d'une marée ( Dareau le 6.09.82 ).

- dans le marais

Les teneurs diminuent d'environ 5 µatg N/l en moyenne en été à 0,4 µatg N/l en hiver.

2 - VARIATIONS DES NITRITES A CORDEMAIS ET AU DAREAU

Les variations des nitrites sont extrêmement faibles, et semblables dans les deux systèmes :

- dans l'étier, les valeurs restent proches de 0,5 µatg N/l en été et passent à 1,5 µatg N/l en hiver,
- dans le marais, les teneurs sont de l'ordre de 0 à 0,5 µatg N/l en été, et de 2 µatg N/l en hiver.

3 - VARIATIONS DES NITRATES A CORDEMAIS ET AU DAREAU

En été, les variations des concentrations en nitrates au cours des cycles tidaux sont totalement insignifiantes dans les deux étiers.

En hiver, le retour du flot entraîne une augmentation grâce à l'arrivée des eaux de Loire, très riches en nitrates.

Les variations saisonnières sont particulièrement importantes puisque les teneurs passent de 16 µatg N/l environ en été à des valeurs variant de 64 à 226 µatg N/l en hiver, dues à la pénétration des eaux fluviales.

Dans les marais, les variations saisonnières sont également très importantes :

- en été, les concentrations varient généralement entre 0 et 16 µatg N/l,
- en hiver, elles sont de 45 µatg N/l en moyenne à Cordemais et de 150 µatg N/l au Dareau.

### III - COMPARAISONS DES CONCENTRATIONS EN AZOTE MINERAL DES TROIS SYSTEMES

Les trois tableaux (XI.7 - XI.8 - XI.9) mettent en parallèle les variations des composés azotés dans les systèmes de Lavau, Cordemais et Dareau.

#### - l'azote ammoniacal

Nous observons des différences nettes entre les trois systèmes :

- à Lavau, les teneurs sont beaucoup plus élevées dans l'ensemble du système, en été comme en hiver.

Les vasières très développées dans la zone de Lavau sont à l'origine de ces fortes teneurs en ammoniacale,

- à Cordemais, les rejets de la station d'épuration dans l'étier modifient de façon considérable les teneurs en ammoniacale et rendent ainsi toute interprétation très difficile,

- au Dareau, l'azote ammoniacal est en très faible quantité par rapport à Lavau et les variations sont assez peu significatives. Nous observons toutefois, une diminution des teneurs entre l'été et l'hiver : les apports d'eau ligérienne en hiver diminuent les concentrations en ammoniacale.

#### - les nitrates

~~Les variations annuelles des nitrates augmentent de l'amont vers l'aval.~~

En effet, dans le système de Lavau, les nitrates sont moins abondants en été que dans les deux autres étiers. En hiver, par contre, nous observons le phénomène inverse: les nitrates sont plus abondants dans l'étier de Lavau.

En été, l'influence des eaux marines est plus marquée en aval de l'estuaire et appauvrit les eaux de l'étier de Lavau.

En hiver, les rejets industriels et domestiques en aval de la région nantaise et ceux de Saint-Nazaire sont peut-être à l'origine des gradients croissant de l'amont vers l'aval.

En conclusion, l'action des larges vasières bordant les étiers dans la zone de Lavau entraîne une augmentation considérable des concentrations ammoniacales que nous n'observons pas dans les deux autres systèmes. Les vasières font ainsi de l'étier de Lavau un système bien individualisé, où l'évolution de l'ammoniacale se démarque de celle observée dans l'estuaire.

Les nitrates, contrairement à l'azote ammoniacal, sont directement liés aux variations estuariennes et résultent du mélange eaux marines - eaux fluviales. Les rejets industriels et domestiques entraînent toutefois une augmentation des nitrates dans l'étier de Lavau en hiver, et les teneurs sont donc plus fortes que dans les étiers amonts.

\* \* \* \* \*

LIEUX DE PRELEVEMENTS		ETE (septembre 1982)			HIVER (janvier-février 1983)		
		LAVAU	CORDEMAIS	DAREAU	LAVAU	CORDEMAIS	DAREAU
MARAIS	Max	105,8	278,0	10,0	51,1	278,0	0,5
	Min	5,8	0,0	1,1	19,7	5,5	0,0
	$\bar{X}$	27,4	28,6	5,1	35,8	99,7	0,4
ECLUSE	Max	49,7	5,5	13,9	42,4	38,9	1,7
	Min	21,0	1,1	2,2	25,2	8,3	0,0
	$\bar{X}$	34,2	2,2	7,4	35,4	25,5	0,8
MI-ETIER	Max	22,9	467,0	13,9	24,3	333,0	7,2
	Min	9,9	0,0	3,3	13,4	5,5	0,5
	$\bar{X}$	16,7	164,0	7,8	18,7	72,2	2,7
EMBOUCHURE	Max	112,4			48,1		
	Min	9,0			4,2		
	$\bar{X}$	36,7			19,7		

Tableau XI.7 - Comparaisons des teneurs en ammoniac dans les systèmes de Lavau, Cordemais et Dareau (en  $\mu\text{atg N/l}$ ).

LIEUX DE PRELEVEMENTS		ETE (septembre 1982)			HIVER (janvier-février 1983)		
		LAVAU	CORDEMAIS	DAREAU	LAVAU	CORDEMAIS	DAREAU
MARAIS	Max	0,40	0,8	2,6	4,5	2,2	1,7
	Min	0,08	0,2	0,2	1,0	0,9	1,3
	$\bar{X}$	0,20	0,4	1,0	2,7	1,2	1,5
ECLUSE	Max	4,90	1,1	2,0	2,7	1,7	1,7
	Min	0,12	0,4	1,1	1,9	1,1	1,3
	$\bar{X}$	1,16	0,7	1,3	2,4	1,3	1,4
MI-ETIER	Max	0,70	2,2	1,5	1,7	2,2	2,0
	Min	0,02	0,2	0,6	0,7	1,3	1,3
	$\bar{X}$	0,35	1,0	1,0	1,3	1,6	1,6
EMBOUCHURE	Max	3,04			1,7		
	Min	0,14			1,2		
	$\bar{X}$	1,24			1,5		

Tableau XI.8 - Comparaisons des teneurs en nitrites dans les systèmes de lavau, Cordemais et Dareau (en  $\mu\text{atg N/l}$ ).

LIEUX DE PRELEVEMENTS		ETE (septembre 1982)			HIVER (janvier-février 1983)		
		LAVAU	CORDEMAIS	DAREAU	LAVAU	CORDEMAIS	DAREAU
MARAIS	Max	0,8	32,0	16,1	106,0	97,0	193,0
	Min	0,0	16,0	0,0	6,5	16,1	113,0
	$\bar{X}$	0,3	17,6	4,8	46,6	56,5	150,0
ECLUSE	Max	27,0	32,0	32,0	100,0	226,0	129,0
	Min	7,2	16,0	0,0	71,0	64,5	97,0
	$\bar{X}$	14,6	18,5	16,0	81,0	127,0	110,0
MI-ETIER	Max	17,9	32,0	32,0	261,0	226,0	274,0
	Min	4,5	16,0	16,0	236,0	64,5	113,0
	$\bar{X}$	13,0	17,2	24,0	245,0	134,0	150,0
EMBOUCHURE	Max	74,0			273,0		
	Min	12,6			12,0		
	$\bar{X}$	25,6			184,0		

Tableau XI.9 - Comparaisons des teneurs en nitrates dans les systèmes de Lavau, Cordemais et Dareau (en  $\mu\text{atg N/l}$ ).

*CHAPITRE XII*

*Les phosphates*