

37592
4857

H100-LEM-1

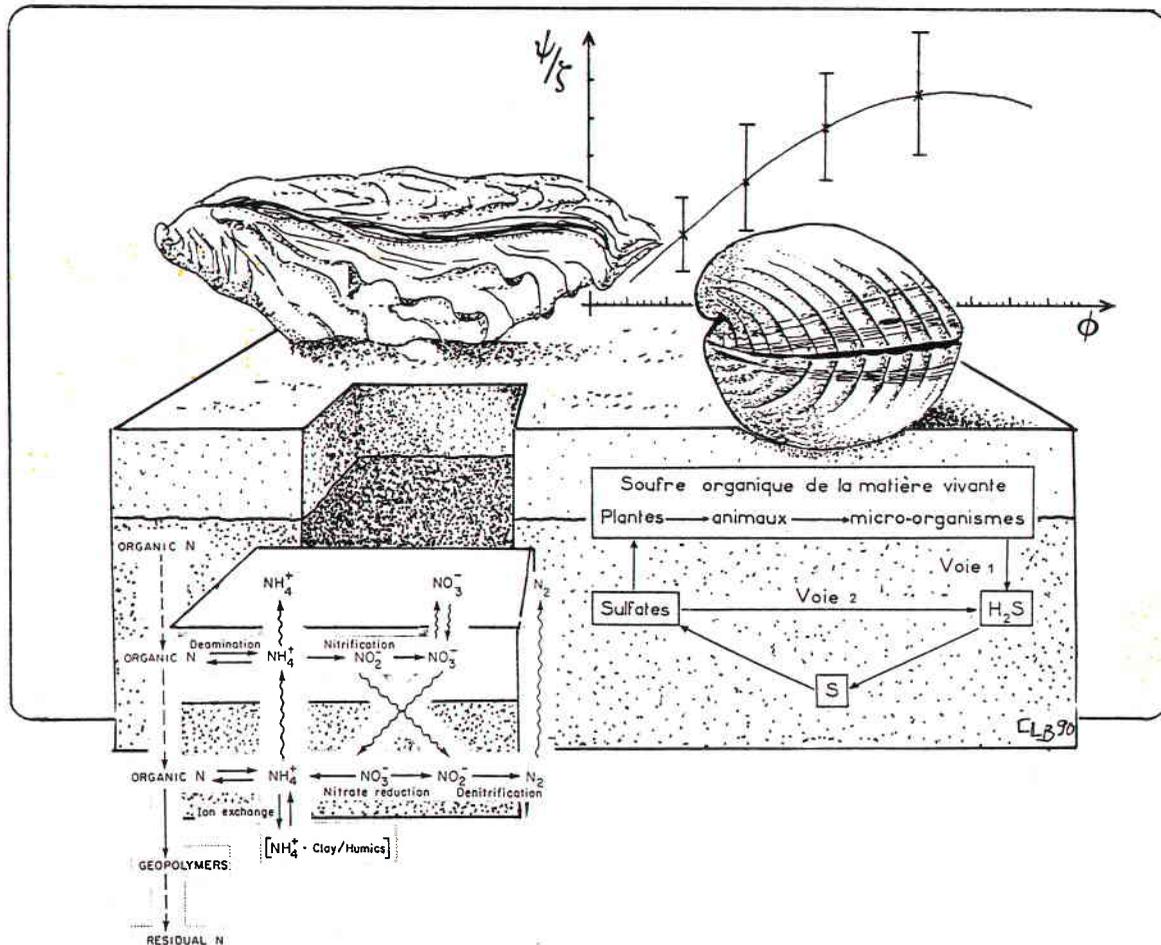
DÉPARTEMENT ENVIRONNEMENT
LITTORAL ET GESTION DU MILIEU
MARIN

Rapport interne de la Direction des Ressources Vivantes
de l'IFREMER

EXCLU DU PRET

INFLUENCES du SEDIMENT sur les RENDEMENTS CONCHYLICOLES

Gérard LEMOINE



RIDRV - 90.59 -R.A. La Trinité



IFREMER-DERO/EL



0EL03634

G511-LEM.I

INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE POUR L'EXPLOITATION DE LA MER

Adresse :
 IFREMER
 12, rue des Résistants
 56470 La Trinité/Mer

DIRECTION DES RESSOURCES VIVANTES

DEPARTEMENT Ressources Aquacoles

STATION/LABORATOIRE La Trinité/Mer

AUTEURS (S) : Gérard LEMOINE		CODE : RIDRV - 90.59-RA
TITRE : Influences du sédiment sur les rendements conchylicoles		Date : 10/12/90 Tirage en nombre : 40
		Nb pages : 41 Nb figures : 13 Nb photos :
CONTRAT (intitulé) N° _____		DIFFUSION libre <input checked="" type="checkbox"/> restreinte <input type="checkbox"/> confidentielle <input type="checkbox"/>

RESUME

Des problèmes d'équilibre écologique surviennent fréquemment au sein des bassins conchylicoles, interface particulièrement sensible de la frange côtière. Si le suivi de paramètres hydrologiques permet des expertises assez fiables, l'analyse des sédiments apporte aussi des éléments dont une synthèse a été tentée ici.

Ainsi la granularité et ses implications physiques, biologiques et chimiques permettent d'établir des aires enveloppes intéressantes pour l'ostréiculture (sols sablo-vaseux). Le recyclage de la matière organique est abordé par le biais des cycles de l'azote, du phosphore et du soufre de même que les phénomènes d'eutrophisation qui lui sont liés. Le rôle du carbonate de calcium, apporté lors d'épandage de chaux, est mis en évidence (propriétés physiques, chimiques et nutritives).

Cette synthèse bibliographique, confirme la position régulatrice du sédiment dans l'écosystème ostréicole.

mois clés: Ostréiculture, sédiment, granularité, eutrophisation

azote, phosphore, soufre, matière organique



**INFLUENCES
du SEDIMENT
sur les
RENDEMENTS CONCHYLICOLES**

par

Gérard LEMOINE

Diplômé de l'INTECHMER (Cherbourg)

spécialité : Géologie

(sédimentologie marine)

Sous la Direction de :

Joseph MAZURIE
et **Claude LE BEC**
du laboratoire Ressources Aquacoles/IFREMER La Trinité sur Mer

du 15 juin au 15 octobre 1989

SOMMAIRE

INTRODUCTION

I. HISTORIQUE 2

II. ROLE DE LA GRANULARITE

II.1. Classification de référence 3

II.2. Application à la tenue du sol 5

II.3. Influence biologique 7

II.4. Influences physico-chimiques 9

II.4.1. Sur la porosité 9

II.4.2. Sur la perméabilité 10

II.5. Conclusion : introduction à la notion d'aires enveloppes de granularités propices à l'ostréiculture 12

III. ROLE DE LA MATIERE ORGANIQUE

III.1. Approche bio géochimique des phénomènes intersticiels 15

III.1.1. Généralités

III.1.2. Dégradation de la matière organique et recyclage des sels nutritifs

III.1.2.1. Le cycle de l'azote 16

III.1.2.2. Le cycle du phosphore 16

III.1.2.1. Le cycle du soufre 18

III.2. Influences sur les eaux conchyloles 19

III.2.1. Pouvoir régulateur du sédiment 19

III.2.1.1. Cas des éléments azotés 19

III.2.1.2. Cas des éléments phosphatés 24

III.2.2. Part des éléments soufrés dans les processus de dégradation	25
III.2.2.1. Généralités	25
III.2.2.2. Effets de l'hypoxie et de l'anoxie en conchyliculture	25
III.2.2.3. Mode d'apparition dans les aires conchylicoles	26
III.2.2.4. Impact de l'hydrogène sulfuré ou conchyliculture	28
III.2.2.5. Mortalités ostréicoles, associées, mode d'apparition	28
III.2.2.6. Approche quantitative des processus de relargages par le sédiment	30
III.3. Critères d'appréciation de la qualité du sol liés à la matière organique	33
III.3.1. Taux de matière organique, fluctuations saisonnières	33
III.3.2. Aptitude du sol au recyclage des sels nutritifs, apports de l'indice C/N	34
IV. ROLE DES CARBONATES	35
V. CONCLUSION	37
BIBLIOGRAPHIE	39

INTRODUCTION

Cette étude, réalisée au laboratoire Ressources Aquacoles de la station IFREMER de la Trinité-sur-Mer (56), s'est imposée dans le cadre d'un travail pour lequel j'avais initialement été sollicité : la cartographie morphosédimentaire de la zone ostréicole et ses abords en baie de Quiberon. Pour mener à bien cette tâche, il était en effet important de bien cerner les moyens à mettre en oeuvre en vue d'obtenir des informations utiles à des professionnels de la mer. Dans ce sens, une recherche de relations pouvant exister entre le sédiment et l'ostréiculture constituait un préalable. Après une investigation dans la littérature française traitant ce sujet, un premier document de synthèse bibliographique vit le jour ; il permit de mieux conduire l'étude sédimentaire de la baie de Quiberon.

Toutefois, l'actualité m'amena à réviser ce document par la suite dans le contexte de mortalités importantes sur le site ostréicole de Pen Bé (44) en 1987 et 1988. A la demande des ostréiculteurs de cette baie, une expertise écologique a été menée pour déterminer les causes de ce sinistre. Les résultats obtenus par la Société Saunier "Eau et Environnement" retenue pour cette étude faisaient état d'une charge de matière organique et d'un taux de sulfures assez, sinon très élevés dans les sédiments de la baie. Parmi les causes invoquées pour expliquer cette "pollution" du sol, les rejets de la laiterie d'Herbignac, s'imposaient à première vue. Cette installation industrielle, la seule sur le bassin versant, était d'autant plus sur la sellette que ses rejets se situaient bien au-delà des normes en vigueur. Afin de garantir un redémarrage de l'activité dans les meilleures conditions, une opération de "nettoyage" de la baie de Pen Bé était réalisée durant l'hiver 89-90 : retrait des poches à huîtres et des tables, hersage du sol pour permettre aux tempêtes d'éliminer cet excès de charge organique.

C'est dans le cadre de réunions préparatoires à cette opération de dévasement qu'IFREMER fut sollicité pour émettre un avis. Les nombreux échanges de vue entre chercheurs à cette occasion m'ont conduit à dépasser l'objectif d'une synthèse bibliographique pour tenter d'analyser ce type de phénomènes à partir de données empiriques.

I. HISTORIQUE

Avant les années 1980, l'étude des animaux marins en relation avec le fond faisait intervenir des considérations essentiellement éthologiques (mode de vie, collecte de la nourriture...). Durant sa recherche sur les corrélations granulométrie-structures benthiques à la pointe de la Bretagne, Anne TOURMELON (1972) montre que les espèces eurytopes sont peu dépendantes du sédiment dans leur mode de vie (elles maintiennent une relation constante avec l'eau surjacente). A l'opposé, les espèces sténotopes vivent davantage à l'intérieur du substrat, elles sont plus dépendantes des conditions de renouvellement de l'eau interstitielle. De ce fait, leur abondance, voire leur seule présence, s'associe à un spectre granulométrique assez précis que l'on peut définir par une aire-enveloppe (fig. 1).

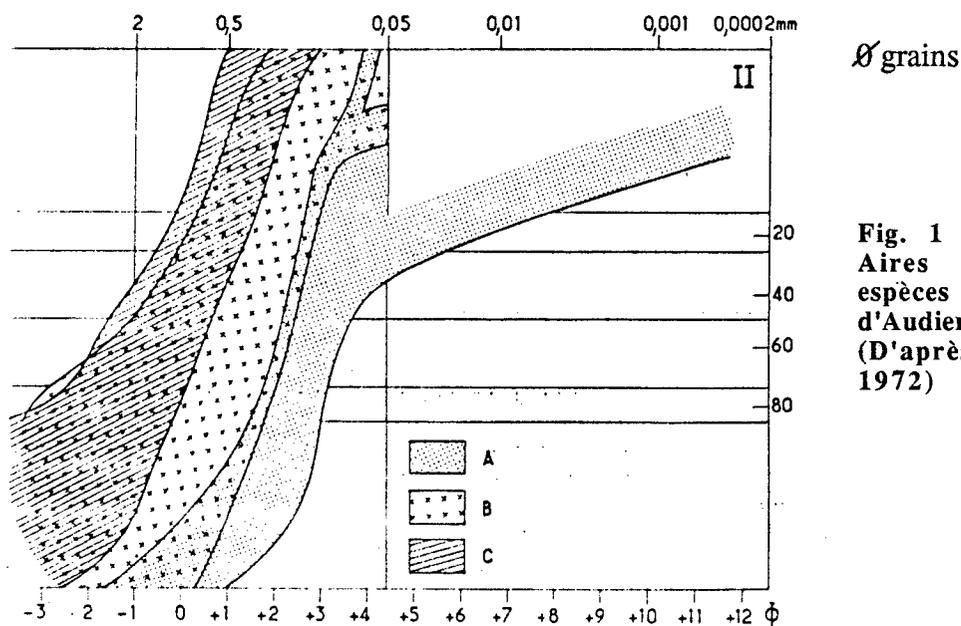


Fig. 1
Aires enveloppes de 4
espèces de Vénus en baie
d'Audierne
(D'après A. Tourmelon,
1972)

A partir des années 1970, les travaux menés sur l'interface eau-sédiment (motivé par un intérêt croissant pour les nodules polymétalliques) mettent en lumière l'existence de flux tels ceux du cycle du manganèse. Dès lors, les recherches sur les relations entre les peuplements et leurs substrats s'orientent vers les propriétés de l'eau circulant dans le sédiment. Amorcée en 1956 par BARBIER (qui prouve l'existence, pour chaque espèce d'ions, d'échanges permanents entre les deux phases liquide et solide d'un sol), ces investigations sont reprises en France par M. FEUILLET, D. GOULEAU, G. BOUCHER et d'autres géochimistes. Elles mettent notamment en évidence l'importance des flux azotés et phosphatés entre le sédiment et la colonne d'eau. Des pratiques traditionnelles, telles l'épandage de la craie sur les sols ostréicoles attirent l'attention de ces chercheurs qui en analysent les effets. Ce nouvel élan dans la recherche eau-sédiment serait surtout un écho de l'expansion des activités aquacoles.

II. ROLE DE LA GRANULARITE

II.1. Classification de référence

Plusieurs classifications permettent d'exprimer la fréquence statistique des grains de différentes tailles dans un sédiment. Celle de BOURCART (1957) présente un double avantage :

- . Les fractions s'y caractérisant par des propriétés physiques bien tranchées.
- . La terminologie reprend des mots déjà connus dans le langage courant.

C'est donc cette échelle que nous utiliserons ici. Elle distingue les phases suivantes :

. graviers et granules de	20	à	2	mm
. sables grossiers	2	à	0,5	mm
. sables moyens	0,5	à	0,2	mm
. sables fins	0,2	à	0,05	mm
. limons	0,05	à	0,02	mm
. argile	<	à	0,02	mm

Ainsi, le sédiment sera défini en fonction de sa fraction modale (la plus importante en poids) :

. sols graveleux	:	graviers et granules dominants
. sols sableux	:	sables grossiers et moyens dominants
. sols sablonneux	:	sables fins dominants
. sols vaseux	:	limons et argiles dominants

Toutefois ce schéma type, ne distinguant que 4 sortes de sols, ne permet pas d'appréhender la distribution statistique d'un matériel plurimodal. C'est pourquoi un critère d'homogénéité (ou d'hétérogénéité) intervient souvent en complément . Le plus connu est le "Sorting index" de TRASK. Cet indice est calculé à partir de deux paramètres de la courbe cumulative :

. le 1er quartile,	Q1	:	abscisse dont l'ordonnée est 25 %
. le 3ème quartile,	Q3	:	abscisse dont l'ordonnée est 75 %

Il s'obtient par la formule :

$$So = \sqrt{Q1/Q3}$$

En pratique, on peut distinguer les triages suivants :

- . So de 1 à 1,2 : classement excellent : sédiment très homogène
- . So de 1,2 à 1,6 : classement bon à moyen
- . So de 1,6 à 2 : classement moyen à médiocre
- . So > 2 : mauvais classement : sédiment très hétérogène

Deux autres paramètres, par leur comparaison, permettent de visualiser l'allure de la courbe cumulative :

- . la Médiane, Md, abscisse dont l'ordonnée est 50 %

- . la Moyenne, Me =
$$\frac{Q1 + Q3}{2}$$

Ainsi, pour Md proche de Me, les différentes fractions se répartissent de façon régulière autour du mode (courbes logarithmiques, "bien classées"). Pour Md bien inférieur à Me, le faciès hyperbolique correspondant décrira une forte représentation des éléments les plus fins. Enfin, pour Md très supérieur à Me, l'allure parabolique de la courbe cumulative indiquera au contraire un mode grossier.

II.2. Application à la tenue du sol

C'est le premier critère intervenant dans le choix d'une concession. L'impératif d'une bonne protection des cultures et installations contre les houles du large conduit les professionnels à sélectionner des sites abrités (estuaires, anses, baies relativement fermées) déjà enclins à une sédimentation fine. Dans ces milieux bien particuliers, le sol devra concilier deux exigences :

- . Une cohésion suffisante pour que les huîtres ne soient pas enfouies au cours des tempêtes. On estime généralement que les sédiments deviennent cohésifs lorsque la taille des grains est inférieure à 100 μm . Dans ce cas, la houle pour une longueur d'onde L supérieure au double de l'épaisseur de la tranche d'eau d (formule de début d'action sur le fond = $d/L < 1/2$), engendre sur le fond une simple oscillation visqueuse. Dans le cas contraire, c'est-à-dire sur des fonds sablonneux ou sableuses, le même contexte hydrodynamique peut entraîner la formation de Ripple Marks. Ces derniers, soumis aux courants de marée, se déplacent et peuvent recouvrir les huîtres.
- . Une "dureté" (résistance à la compression) permettant le maintien des cultures à l'interface. Disposées en un substrat trop vaseux, les huîtres s'enfoncent et périssent.

Si la première de ces conditions est généralement réalisée dans les secteurs abrités, la seconde implique parfois une intervention humaine, pour durcir les terrains trop meubles, les ostréiculteurs procèdent alors à des amendements mécaniques : épandage de granules et de graviers (fig. 2). Ces éléments grossiers en offrant des supports fixes, favorisent par ailleurs le captage naturel. Ainsi, pour le cas de l'huître en eau profonde, JOUAN (1977) remarque en baie du Mont Saint-Michel que les fonds les plus favorables sont constitués d'un matériel hétérogène envasé. Toutefois, aucune étude n'a été menée jusqu'à présent sur les effets à long terme de ces épandages. L'artificialisation des sols résultant de ces pratiques présente pourtant un caractère irréversible. A ce titre, il serait intéressant de s'interroger sur la granulométrie de fonds naturellement productifs.

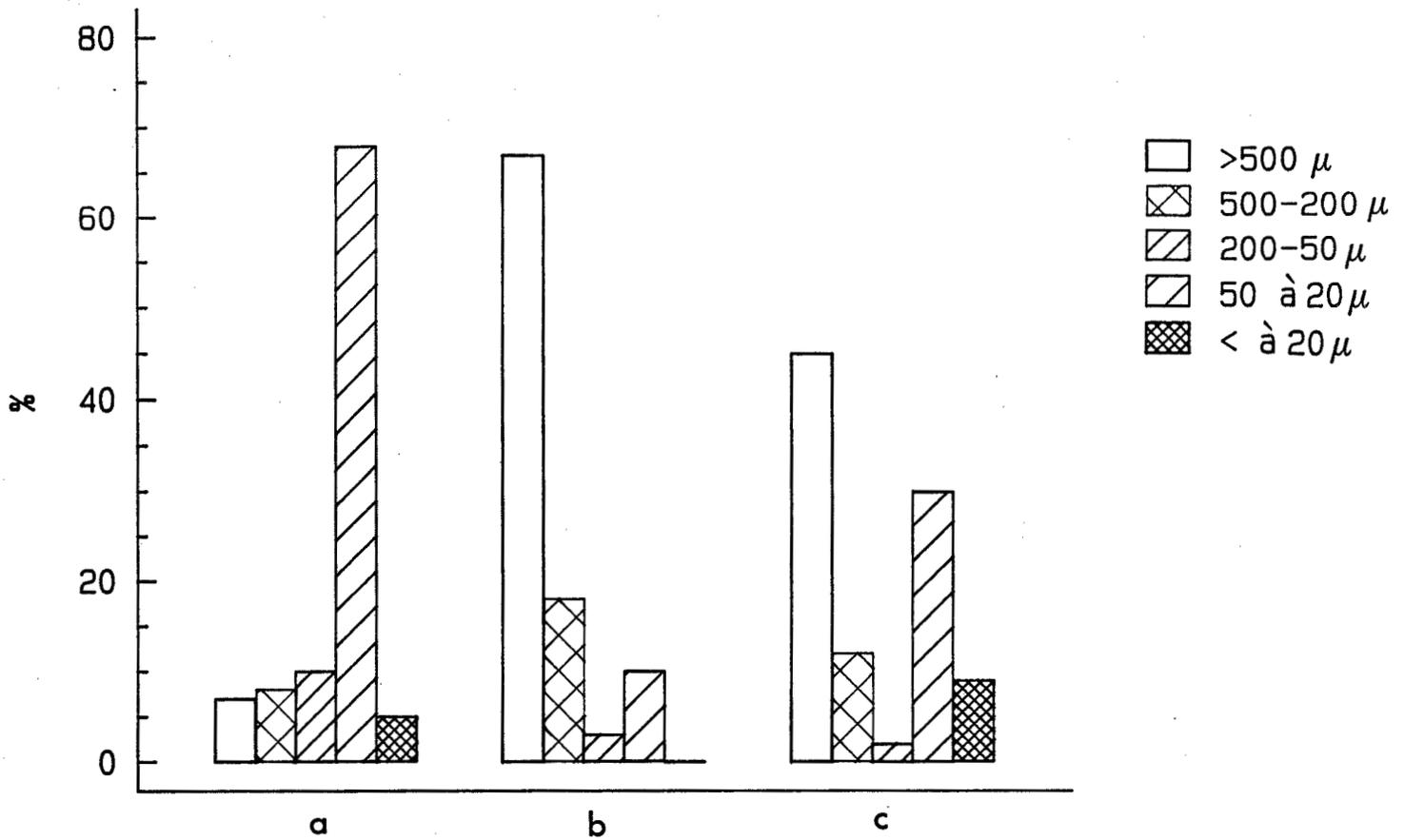
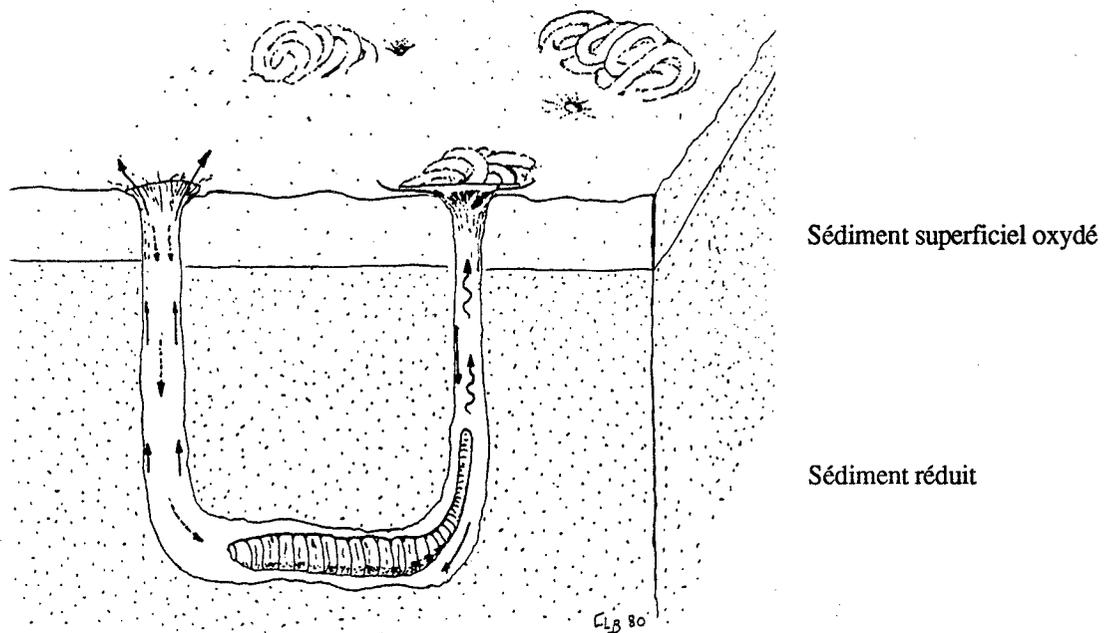


Fig. 2 - Belon - Effet de l'amendement mécanique sur la texture du sol :
 a) sol naturel
 b) arène granitique utilisée pour l'amendement
 c) texture après amendement
 (D'après Marin, 1971)

II.3. Influence biologique

L'impact de la vie endogée sur l'ostréiculture repose sur deux fonctions essentielles des biocénoses benthiques :

- Epuration et aération du sédiment : dans des sites déjà favorables à une sédimentation fine, la présence d'installations et les biodépositions inhérentes aux cultures occasionnent un envasement accéléré. Dans ces contextes à teneurs en matière organique élevées, le macrozoobenthos, notamment par l'action conjuguée de polychètes détrivores ou limnivores, joue un rôle épurateur non négligeable. Le mode de collecte de la nourriture de ces annélides (voir fig. 3) favorise :



- ← circulation de l'eau dans le terrier
- mouvement du sédiment
- ~~~ rejet des fécès

- Fig. 3 - Influence du macrozoobenthos sur les sédiments
Exemple de *Arenicola marina*

- L'oxygénation de sédiment en profondeur grâce à la circulation d'eau créée dans les terriers. Celle-ci accélère la minéralisation des matière organiques dans ces niveaux où règnent des conditions réductrices.

- . La régénération d'un sédiment "propre" dans la couche superficielle par les défections de ces annélides. Si ce dernier point comporte un inconvénient certain pour la culture à même le sol (ameublissement, profil tourmenté), il peut dans certain cas limiter les risques d'émission d'hydrogène sulfuré au-dessus du fond, grâce à l'entretien d'un horizon "tampon".
- . Dégradation de la matière organique. Cette fonction assurée principalement par la microflore bactérienne, permet un recyclage en sels minéraux. Tributaire du potentiel d'oxydo-réduction, elle s'exerce de deux façons différentes dans la colonne sédimentaire : dans la couche superficielle (quelques mm à 5 cm en général), les conditions normales d'oxygénation autorisent une minéralisation rapide par voie aérobie. A l'opposé, dans le matériel réduit des niveaux sous jacents, cette dégradation s'opère lentement par voie anaérobie sans l'action des bactéries sulfato-réductrices.

Ces considérations sur le rôle de la vie endogée montrent que la reconnaissance d'un sol biologiquement favorable à l'ostréiculture peut être appréhendée à partir de deux indices :

- . Une macrofaune riche en limnivores et détrivores avec les réserves déjà mentionnées pour les cas de la culture sur le fond où l'abondance de ces organismes (arénicoles sur estran notamment) crée des conditions techniques défavorables pour l'exploitant .
- . Une microflore abondante. C'est de loin le paramètre le plus important pour la minéralisation de la matière organique.

Si le premier de ces indices apparaît dans des substrats sableux plus ou moins vaseux (substrat à arénicoles par exemple), le second se retrouve avec des teneurs en vases généralement élevées. En effet, à l'opposé d'un sédiment grossier à tendance azoïque, un matériel fin sera le siège d'une vie bactérienne très riche. ZO BELL (1946) réussit à établir qu'indépendamment des ressources nutritives disponibles, le poids des bactéries par gramme de matériel croissait d'un facteur trois entre des sables fins humides et des vases (pour des teneurs en eau respectives de 33 % et 56 %), puis d'un facteur 20 entre les vases et les colloïdes (teneur en eau de 98 % pour l'argile colloïdale). En définitive, c'est donc un compromis entre le sable fin et la vase qui offre les conditions biologiques les plus favorables à l'ostréiculture.

II.4. Influences physico-chimiques

II.4.1. Sur la porosité

"La porosité est le volume des vides du sol exprimé en pourcentage de volume total" ($p = V_v \times 100/V$; DUCHAUFOR , 1960). Dans les sols de la frange intertidale, même en fin d'émission, elle donne un bon indice sur la teneur en eau (w). Cette particularité s'explique par l'importance de la porosité capillaire, c'est-à-dire celle liée à l'eau d'imbibition retenue par les interstices du sédiment. Le degré de saturation élevé qui en découle ($S_r = V_w/V_v$) varie en raison inverse de la texture. Lors de son étude physico-chimique de l'estuaire de Belon, J. MARIN (1971) relève des degrés de saturation de 64 % dans des sols sableux ($M_d = 1,25$ mm) et de 82 % dans des sols sablonneux ($M_d = 0,125$ mm) pour des porosités totales respectives de 51 et 57 %. Dans des sols vaseux, cette saturation avoisine 100 %, notamment pour le cas de vases fraîchement déposées dont la porosité peut atteindre 90 %. Ces constatations montrent que la porosité capillaire tend à égaler la porosité totale pour des textures de plus en plus fines. On remarque par ailleurs qu'une diminution de la taille des grains d'un facteur 1/10, n'entraîne qu'une augmentation de la porosité de l'ordre de 6 % pour le sédiment sableux, de 20 % en plus pour les sols sablo-vaseux. C'est donc plus sur le taux de saturation en eau que sur la porosité en elle-même que la granularité aura une influence.

Pour l'ostréiculture, les conséquences de ces relations existant entre la granularité, la porosité et le degré de saturation en eau du sédiment seront de deux ordres.

- Potentiel d'échange entre le sol et l'eau susjacente : dans ce sens, l'eau interstitielle constitue un intermédiaire indispensable pour le transfert des sels nutritifs issus de la dégradation de la matière organique. Comme le souligne D. GOULEAU (1975), ce flux ascendant n'est pas réglé simplement par des gradients de concentrations en période d'immersion. Un autre vecteur, celui de l'ascension capillaire, intervient de façon très active durant l'émergence pour compenser l'évaporation superficielle. Il en résulte une concentration en calcium, sulfate, silice, ions bicarbonates et carbonates qui seront restitués à la mer lors du retour du flot. Ces résultats confirment le rôle important de l'eau d'imbibition dans les flux nutritifs.

La porosité favorisant ces processus physico-chimiques caractérise des sédiments fins : sables très fins ($n > 55$ %), sables vaseux, vases...).

- La faculté d'aération de la pellicule superficielle. Elle dépendra surtout de la porosité non capillaire, c'est-à-dire du pourcentage de vides dans lesquels l'eau n'est pas retenue lors de l'émersion. En effet, la saturation totale et permanente d'un sol limite considérablement les possibilités de renouvellement de l'eau d'imbibition. Cela est notamment le cas des substrats exclusivement vaseux. En contrepartie, les matériaux sableux et sable vaseux conservent généralement un horizon superficiel bien oxygéné.

II.4.2. Sur la perméabilité

Si la mesure de la porosité donne une indication quant au "potentiel biochimique interstitiel", celle de la perméabilité permet d'estimer la cinétique des échanges à l'interface eau-sédiment. C'est donc ce dernier outil qui déterminera le mieux le pouvoir compensateur du sédiment vis-à-vis de déficits de la colonne d'eau.

Dans le cas de sols pratiquement imperméables, seuls des transferts par voie de diffusion moléculaire interviennent (CALLAME, 1960, 1961, 1965). De la lenteur de ces processus, essentiellement anaérobis, découlent non seulement une conservation importante de la matière organique, mais surtout une forte inertie du sol face aux variations de la composition chimique de l'eau susjacente. Ainsi, lors de déficits saisonniers en sels nutritifs, la réponse du sédiment reste faible, aggravant les conditions déjà défavorables pour la croissance des huîtres.

En contrepartie, si une certaine perméabilité existe, d'autres voies d'échanges, plus efficaces, s'ajoutent à celle de la diffusion moléculaire. Selon L. MARTEIL (1974), elles résident surtout en des "mouvements de convection" des eaux interstitielles. Elles peuvent aussi s'établir accessoirement par "l'agitation du fond sous l'effet de la turbulence". Plus récemment, D. GOULEAU (1975) a mis en évidence l'impact primordial de l'ascension capillaire lors de l'immersion sur les vasières littorales atlantiques (voir page 9). Durant les épisodes saisonniers critiques évoqués plus haut, ces autres voies d'échange peuvent donc atténuer, de façon sensible, les déficits en sels nutritifs de la colonne d'eau.

Dans les sols "assez perméables", les flux à l'interface sont gouvernés par la convection des eaux interstitielles. De ce fait, la réponse du sédiment aux sollicitations chimiques de la colonne d'eau se trouve considérablement accélérée. Ce faible pouvoir tampon peut être préjudiciable pour l'ostréiculture lorsque des conditions défavorables d'oxygénation surviennent (ce qui est fréquemment le cas dans les sites protégés en période estivale) : en effet, lors des poussées phytoplanctoniques, la consommation d'oxygène importante des épisodes nocturnes favorise l'apparition de contextes anoxiques et le relargage des sulfures dans la colonne d'eau par le sédiment.

Pour garantir un "pouvoir tampon" intéressant en terme de régulation de sels nutritifs, une légère perméabilité du sédiment semble donc requise. Celle-ci dépendante à la fois de la taille des grains et de leur classement s'exprime en cm/mm. C'est la distance verticale que parcourt une colonne d'eau de 1 cm de longueur dans une section de sol de 1 cm². Selon les résultats de J. MARIN (1971), elle varie en fonction du sédiment de la façon suivante :

. sables moyens (0,5 à 0,2 mm) :	v de l'ordre de	3,4 cm/mm
. sables fins (0,2 à 0,05 mm) :	v de l'ordre de	0,45 cm/mm
. vase (Md environ 16 μ) :	v de l'ordre de	0,0018 cm/mm

En d'autres termes, la perméabilité est sept fois plus faible dans des sables fins par rapport à celle des sables moyens (alors que la diminution de taille du grain n'est que l'un des facteurs 0,5) et 250 fois plus faible dans des vases par rapport à celle des sables fins (diminution de la taille du grain d'un facteur 0,1). A la lumière de ces résultats, on peut donc émettre l'idée qu'une teneur en vase même modeste tend à rendre le sol très asphyxiant. En contrepartie, un sable fin bien classé conserve une perméabilité importante.

En définitive, c'est sur des sols sablonneux légèrement vaseux que les conditions de perméabilité seront les plus favorables à l'ostréiculture.

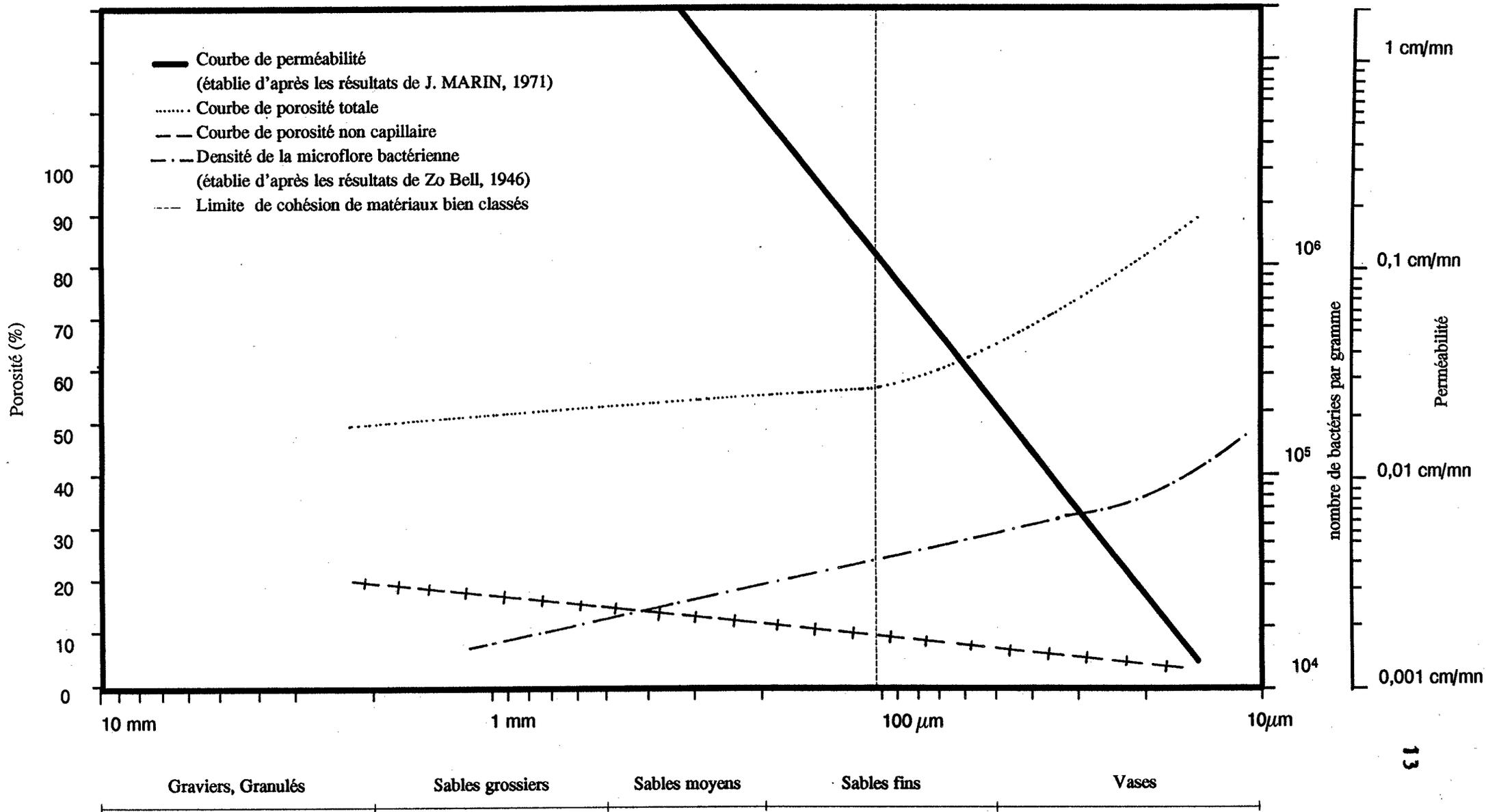
II.5. Introduction à la notion d'aires enveloppes des granularités propices à l'ostréiculture

Les considérations précédentes, sur la granularité et ses implications à la fois physiques, biologiques et chimiques dans le comportement du sol, ont permis de dégager les points suivants :

- . Pour la culture sur le fond, les sédiments vaseux prédisposent les huîtres à l'enfoncement dans le substrat. Les sols sableux ne conviennent pas non plus en raison d'une absence de cohésion et du risque d'enfouissement encouru. De façon empirique, on estime que la cohésion souhaitée sera réalisée dans un matériel fin inférieur à 100 μm .
- . La qualité biologique du sol se définit autour de deux critères : capacité d'aération et de renouvellement du sédiment superficiel par la macrofaune d'une part, potentiel de recyclage de la matière organique par la microflore d'autre part. Ces deux conditions ne seront pleinement réunies que dans des sédiments sablo-vaseux.
- . Le potentiel d'échanges en sels nutritifs à l'interface eau-sédiment est lié aux eaux interstitielles qui constituent un intermédiaire essentiel. Les sols très fins à forte porosité capillaire auront donc un potentiel d'échange élevé.
- . Une certaine porosité non-capillaire est nécessaire pour maintenir l'aération de la pellicule superficielle. Cette exigence ne peut être réalisée dans les sols très vaseux.
- . La valorisation du potentiel d'échange évoqué plus haut dépend de la perméabilité du sédiment. C'est, en définitive, ce paramètre qui joue le rôle le plus important en ostréiculture de par son impact sur la régulation des cycles chimiques dans la colonne d'eau. Les sols sablo-vaseux présentent à ce titre une perméabilité intéressante.

Ces différents critères pour définir la qualité granulométrique sont résumés dans le graphique n° 1. Leur exploitation synthétique aboutit à l'établissement d'aires-enveloppes des sédiments intéressantes pour l'ostréiculture (voir graphique n° 2). Il ne s'agit là que d'un modèle ne prenant en compte que le cas de distributions unimodales. Par ailleurs, l'évolution du sol liée à l'activité conchylicole n'est pas prise en compte. Une certaine prudence s'impose donc pour l'exploitation de ces résultats.

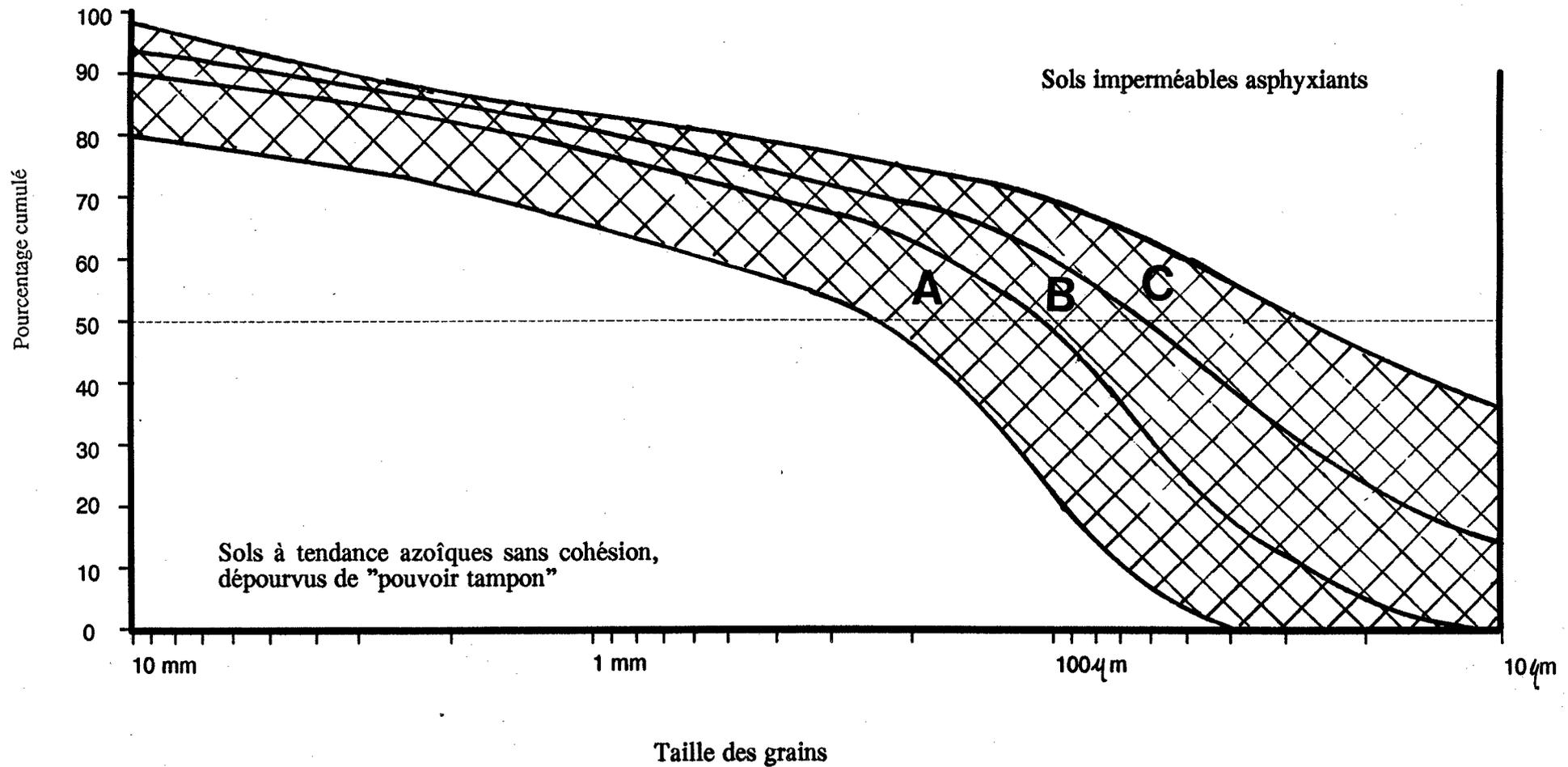
Graphique n° 1 - Caractéristiques physiques et biologiques du sédiment liées à la granularité



Graphique n° 2 - Aires enveloppes granulométriques des sols

Domaine intéressant pour l'ostréiculture

- A : Sols assez cohésifs et perméables à activité biologique médiocre
- B : Sols cohésifs à pouvoir tampon élevé, biologiquement très actifs
- C : Sols peu perméables mais à micorflore très abondante



III. ROLE DE LA MATIERE ORGANIQUE

III.1. Approche bio géochimique des phénomènes intersticiels

III.1.1. Généralités

Bien que des critères d'ordres hydrodynamiques et géotechniques orientèrent initialement l'aménagement conchylicole sur le littoral, le sol ne peut être considéré comme un support pour les cultures.

De ses facultés de stockage, d'adsorption, de relargage, découlent en effet des échanges importants à l'interface eau-sédiment. Ces transferts qui ont un impact certain sur les eaux côtières ne peuvent être négligés. Ils s'inscrivent dans différents cycles de la matière organique faisant intervenir des processus de dégradation et de recyclage en sels nutritifs. Ces transformations s'opèrent principalement dans les eaux intersticielles, dans un contexte d'anaérobiose. Trois d'entre elles, les plus connues, seront décrites ici.

III.1.2. Dégradation de la matière organique et recyclage des sels nutritifs

III.1.2.1. Le cycle de l'azote

La dégradation initiale du matériel organique azoté s'effectue par hydrolyse des acides aminés. Sources d'énergie pour les bactéries anaérobies, les processus de désamination à partir des protéines alimentent directement le milieu en azote ammoniacal. Dans le bassin des Chasses des Sables d'Olonne, M. FEUILLET (1971) a ainsi relevé des teneurs de NH_3 allant jusqu'à $450 \mu\text{g at N/l}$ dans l'eau intersticielle alors que la concentration dans l'eau des parcs ne dépassait pas $87 \mu\text{g at N/l}$. La formation des nitrates s'opère de façon indirecte par oxydation de l'ammoniaque. Les bactéries (nitrobactériacées entre autres) intervenant dans ces mécanismes agissent à la surface du sédiment où le potentiel rédox est plus élevé. Dans le bassin des Chasses des Sables d'Olonne, l'auteur cité précédemment a enregistré des concentrations très élevées en nitrate dans l'eau d'imbibition (maximum : $528 \mu\text{g at N/l}$) par rapport à celle de la colonne d'eau (maximum de $360 \mu\text{g at N/l}$).

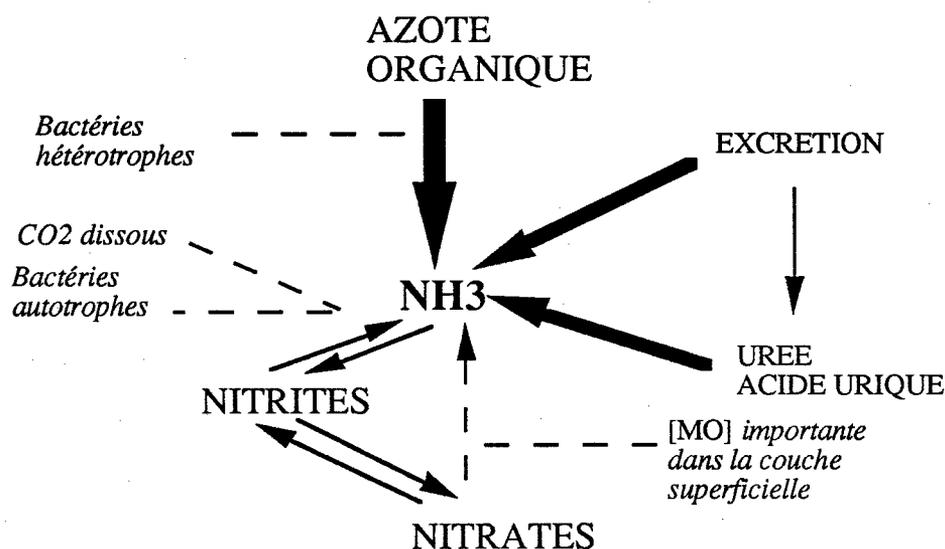


Fig. 4 - Cycle simplifié de l'azote dans le sédiment

Ces deux mécanismes essentiels du recyclage de l'azote organique sont présentés dans la figure 4 où d'autres sources de régénération de l'ammoniaque, telle l'excrétion, sont également exposées. L'idée générale qui s'en dégage réside en une production préférentielle de l'azote sous forme ammoniacale dans le sédiment, les processus de nitrification proprement dits s'opèrent davantage au voisinage de l'interface.

III.1.2.2. Le cycle du phosphore

Dans le sédiment, les formes organiques du phosphore (phosphore phytinique, nucléique) se surajoutent à des composés plus ou moins cristallisés : minéraux natifs (apatite - vivianite), de néoformations (phosphate de Ca ou phosphates mixtes de Ca, Fe, Al et ions phosphates adsorbés). Les processus de diffusion dans l'eau interstitielle ont été décrits par M. FEUILLET (1971). Ils seraient liés à la présence de formes "réversiblement adsorbées" et donc rapidement désorbables. L'une, la forme A serait liée à celle de cations métalliques échangeables, l'autre, la B, serait retenue par des sesquioxydes. Lorsque le phosphate de fer est le principal constituant des phosphates, ces formes labiles A et B augmenteraient avec le développement de conditions réductrices (ce qui est notamment le cas des sols immergés) en présence de matière organique. Ces mécanismes, illustrés dans la figure 5, mettent en évidence les rôles déterminants de facteurs tels le potentiel rédox, la teneur en fer, mais aussi celle du calcium. Mais les fortes concentrations en ions PO_4^{--} enregistrées dans l'eau interstitielle (jusqu'à plusieurs dizaines ou centaines de fois celles de l'eau adjacente à certaines périodes de l'année, avec des maximums de $30.10^{-6} \mu\text{g at/l}$, pour le bassin des Chasses des Sables d'Olonne) et l'intensité du flux qui en découle vers la colonne d'eau ne peuvent s'expliquer uniquement par des processus purement géochimiques. C'est pourquoi BARBIER (1956) a évoqué l'action probable de micro-organismes dont l'attaque s'exercerait d'une part sur des phosphates minéraux cristallisés, d'autre part sur les composés organiques phosphorés.

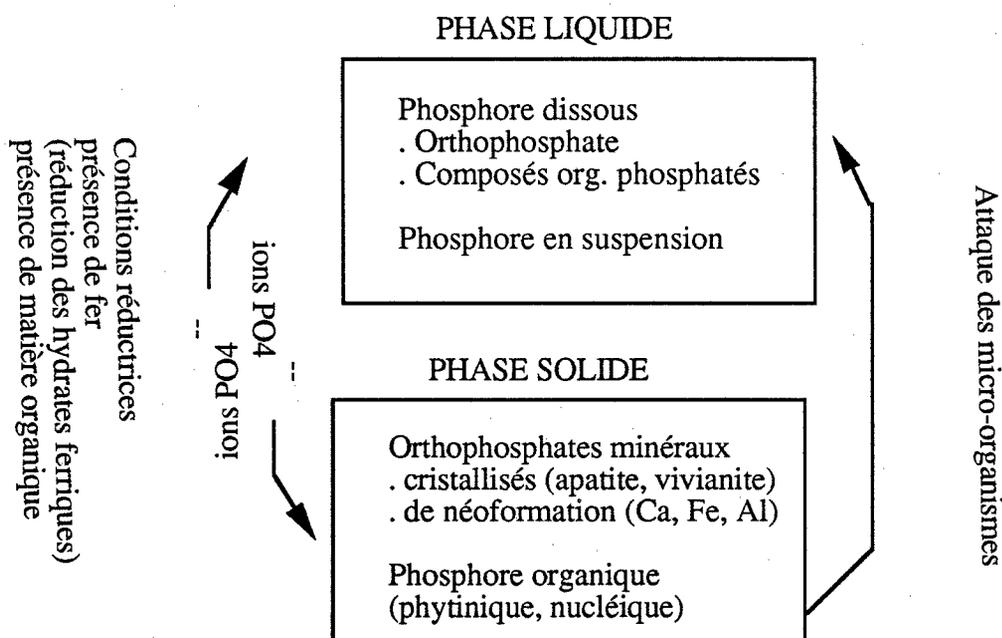


Fig. 5 - Cycle du phosphore intra-sédimentaire

III.1.2.1. Le cycle du soufre

La minéralisation du soufre organique s'effectue en contexte d'anaérobiose, par réduction des sulfates. Elle est régie par l'activité des bactéries sulfato-réductrices : celles-ci, en consommant la matière organique fournie sous forme de glucose (acidifiant par ailleurs le milieu par dégagement de CO_2), provoquent une solubilisation du CaCO_3 contenu dans les vases et une précipitation simultanée du CaCO_3 (D. GOULEAU, 1975). Cette suite réactionnelle réversible peut être résumée de la façon suivante :



puis



Le bilan, établi par D. GOULEAU, fait apparaître une donnée intéressante : "la réduction des sulfates demande la consommation du dixième seulement de la matière organique contenue dans les sédiments". L'intensité du flux des éléments soufrés dans le milieu intersticiel reste donc peu influencé par le taux de matière organique.

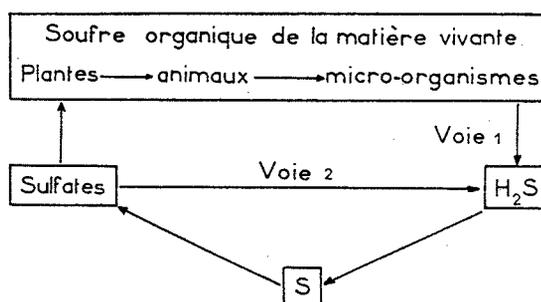


Fig. 6 - Cycle biologique du soufre ; (voie 1) décomposition de la matière organique par les micro-organismes, (voie 2) action des bactéries sulfato-réductrices

Dans les conditions normales, l'émission d'hydrogène sulfuré issue de fermentations est contrebalancée par une oxydation en sulfates (fig. 6) presque totale dans la pellicule superficielle du sédiment. Cet équilibre, rétabli par les bactéries sulfato-oxydantes, permet le maintien de conditions favorables à la vie.

III.2. Influences sur les eaux conchylicoles

III.2.1. Pouvoir régulateur du sédiment

III.2.1.1. Cas des éléments azotés

Les considérations précédentes montrent combien le système interstitiel joue un rôle déterminant pour les échanges à l'interface eau-sédiment. La qualité et l'intensité des flux de matière ont un écho certain sur la production primaire susjacente. Les mollusques planctonophages-suspensivores qui occupent l'échelon trophique suivant reçoivent d'une manière indirecte ces influences. En conchyliculture, ce dernier aspect n'est pas à négliger. Les déficits saisonniers en sels nutritifs dans la colonne d'eau peuvent en effet être tempérés par les apports du sédiment. C'est notamment le cas pour les éléments azotés dont le cycle à l'interface a été étudié en milieu ostréicole par Y. LERAT, G. BOUCHER, et P. LE CORRE (1985). Ces recherches menées en baie de Penzé (Manche Occidentale) ont mis en évidence :

Pour l'ammonium (voir fig. 7)

- . Une forte concentration dans le sédiment, contemporaine de la sédimentation maximale des fécès en période estivale.
- . Une accumulation hivernale dans le sédiment, liée probablement à une forte production de pseudo-fécès en eaux turbides.
- . Une stratification des concentrations dans la colonne sédimentaire, à la fin de l'été quand l'accumulation est maximale.
- . Le rôle de polychètes tubicoles pour l'accroissement des concentrations à certains niveaux du sédiment.
- . Une orientation du flux - vers le sédiment, lorsque la concentration est maximale dans la colonne d'eau - hors du sédiment, lorsque la concentration est minimale dans l'eau adjacente (fig. 12).

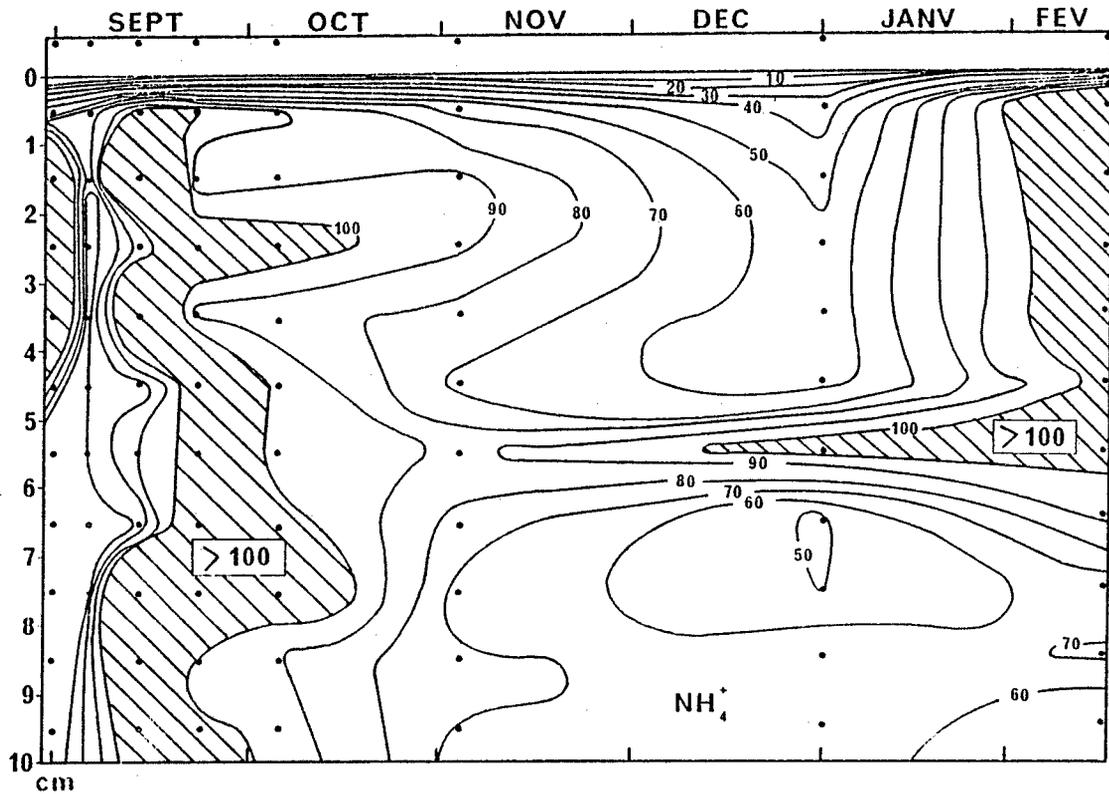


Fig. 7 - Evolution des teneurs en ammonium dissous dans l'eau interstitielle des dix premiers centimètres du sédiment entre août 1983 et février 1984
D'après Y. LERAT, G. BOUCHER, P. LE CORRE (1985)

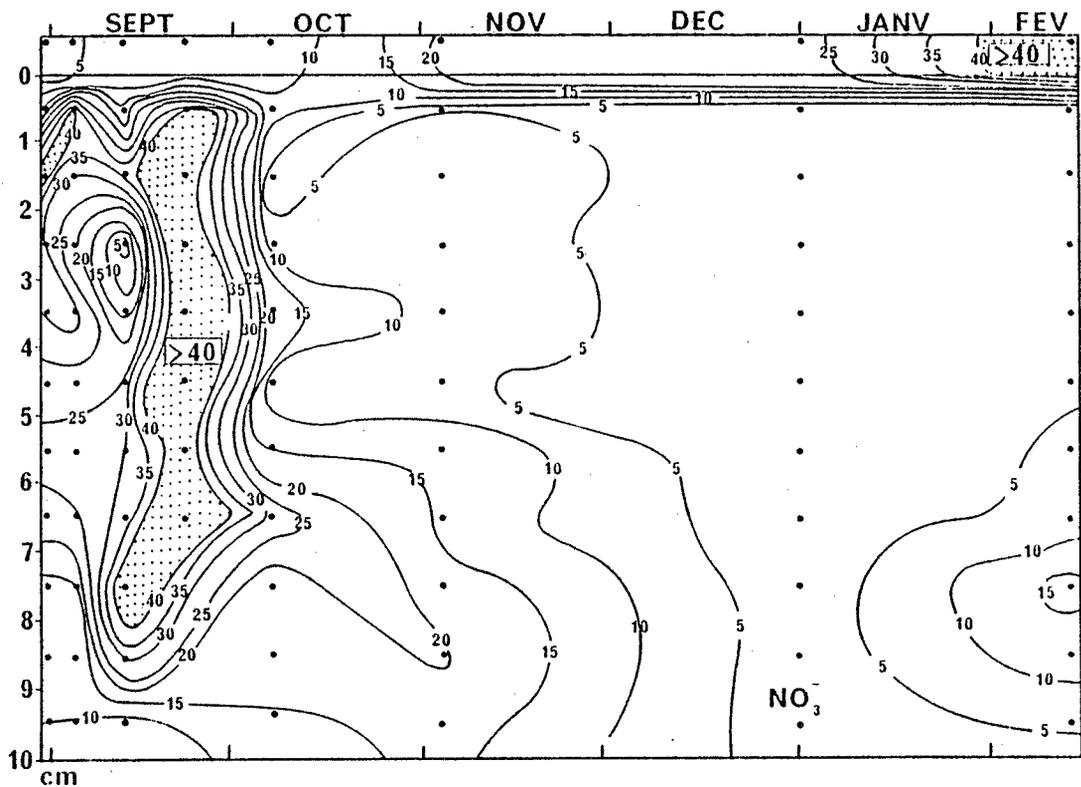


Fig. 8 - Evolution des teneurs en nitrates dissous dans l'eau interstitielle des dix premiers centimètres du sédiment entre août 1983 et février 1984
D'après Y. LERAT, G. BOUCHER, P. LE CORRE (1985)

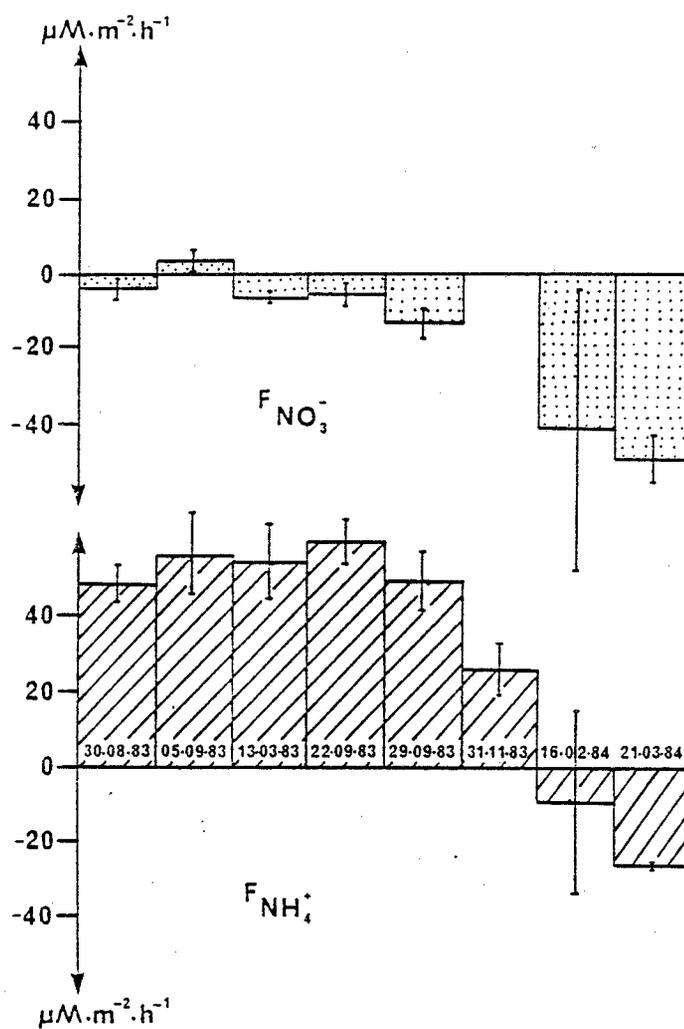


Fig. 9 - Evolution des flux d'ammonium et de nitrates à l'interface eau-sédiment entre août 1983 et février 1984
D'après Y. LERAT, G. BOUCHER, P. LE CORRE (1985)

Pour les nitrates (voir fig. 8)

- . Une superposition des maximum à ceux de l'ammonium en période estivale.
- . L'existence probable d'une consommation endogène active, celle-ci serait seulement compensée en été par une forte régénération (d'où l'absence d'accumulation hivernale) au voisinage de l'interface.
- . Un transfert en profondeur par l'activité des tubicoles.
- . L'orientation du flux presque en permanence vers le sédiment avec un maximum d'absorption correspondant aux concentrations maximales dans la colonne d'eau (voir fig. 9).

Ces études montrent également que les flux à l'interface eau-sédiment ne sont pas réglés uniquement par des gradients : l'existence d'une circulation de l'eau intersticielle permettant un transport des molécules plus rapide que par simple diffusion est probable (cas de l'ammonium notamment dont les concentrations sont toujours plus élevées dans l'eau intersticielle).

Cette caractéristique des flux des éléments azotés confère au sédiment un pouvoir compensateur. L'implication en conchyiculture sera surtout sensible en période estivale pendant laquelle le stock de sels minéraux tend à s'épuiser. C'est en effet à cette époque de l'année que la production d'ammonium "endogène" contribue au maintien d'une production primaire au-dessus de l'interface.

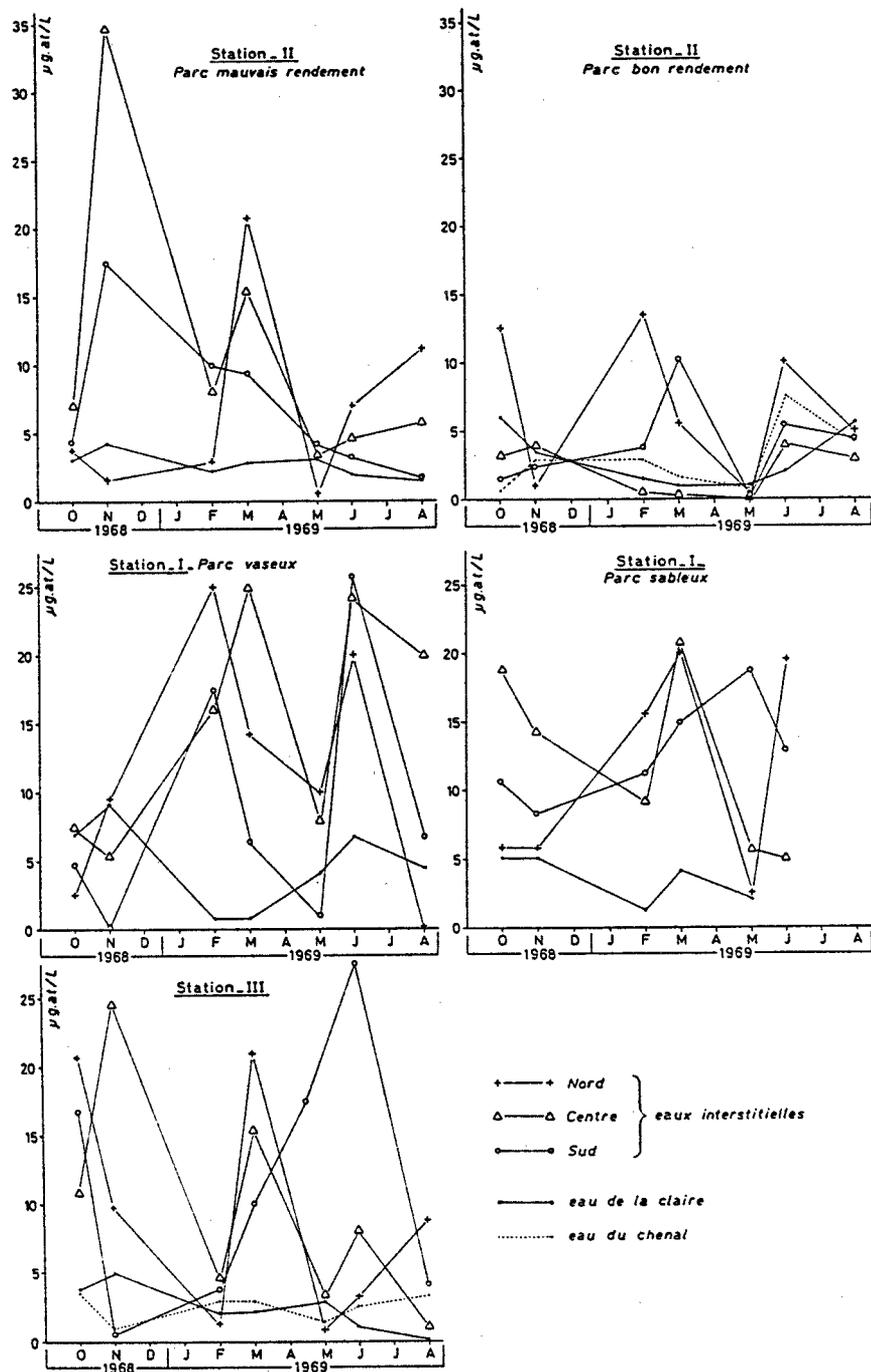


Fig. 10 - Courbes de répartition du phosphore dans les différents parcs étudiés et aux périodes considérées
D'après M. FEUILLET (1971)

III.2.1.2. Cas des éléments phosphatés

A partir de ses travaux sur le bassin des Chasses des Sables d'Olonne, M. FEUILLET (1971) dégage les observations suivantes :

- . Des teneurs en phosphore inorganique beaucoup plus élevées dans les eaux intersticielles que dans les eaux susjacentes.

- . Une décroissance de la teneur sur une faible colonne d'eau : "l'eau recouvrant chaque parc étudié entre 0 (à partir du fond) et 10 cm à une teneur plus élevée que celle qui se trouve entre 10 et 50 cm. Ces teneurs vont de 10 à $3 \cdot 10^{-6}$ at g/l et 3 à $1 \cdot 10^{-6}$ at g/l".

- . Une corrélation négative avec le rythme phytoplanctonique, avec une déficience en phosphore très nette en mai, et ceci, dans toutes les stations étudiées (voir fig. 10).

L'auteur en déduit l'existence très probable de flux phosphorés à l'interface eau-sédiment. Ces derniers, commandés notamment par des gradients de concentration peuvent intervenir comme compensateur sur les carences saisonnières enregistrées dans la colonne d'eau (contemporaine des blooms phytoplanctoniques).

III.2.2. Part des éléments soufrés dans les processus de dégradation

III.2.2.1. Généralités

Les risques de toxicité surviennent lorsque le cycle du soufre se bloque au stade de l'hydrogène sulfuré (voir fig. 6 p. 18) au-dessus de l'interface eau-sédiment. Les teneurs en sulfures, habituellement de l'ordre de quelques décimilligrammes par litre, peuvent s'élever jusqu'à plusieurs grammes. Si des bactéries sulfato-réductrices supportent de telles contradictions, la plupart des êtres vivants meurent bien avant que ces seuils ne soient atteints. En effet, l'apparition d'H₂S dans la colonne d'eau à des taux anormalement élevés implique un fort déficit en oxygène dissous, c'est-à-dire des conditions initialement peu favorables à la vie.

III.2.2.2. Effets de l'hypoxie et de l'anoxie en conchyliculture

Face à un déficit, voire l'absence d'oxygène dissous, les huîtres révèlent une remarquable faculté d'adaptation : elles peuvent se protéger de l'asphyxie en fermant leur valves pour survivre en "autarcie" complète en utilisant l'énergie de leurs réserves glucidiques. HIS (1970) a ainsi montré que *C. Angulata* arrivée, sous des conditions moyennes de température et de salinité à survivre une quinzaine de jours dans un milieu confiné sans possibilité de réoxygénation. Des expériences plus récentes prouveraient que cette période de survie peut même s'étendre jusqu'à 3 mois (Communication M. HERAL, réunion interne IFREMER, 1989). C'est donc essentiellement sur la croissance des huîtres que les déficits prolongés en oxygène dissous se feront sentir. En effet, l'isolement vis-à-vis du milieu ambiant décrit plus haut est lourd de conséquences sur la nutrition. Comme le besoin en oxygène double lorsque la température s'élève de 16 à 28°C et triple entre 10 et 28°C (JORGENSEN, 1960), c'est surtout en période estivale que des interruptions de croissance seront à craindre. A cet effet principal de l'hypoxie ou de l'anoxie, négatif sur la croissance, s'ajoute une altération de la coquille. Celle-ci voit son origine dans un processus de neutralisation de l'acide lactique par le CaCO₃. C'est grâce à cela que le mollusque en survie réussit à se préserver de l'intoxication par les produits d'excrétions de son métabolisme de base. Le carbonate de calcium nécessaire à cette auto-épuration de l'eau intervalvaire est puisé dans la coquille (Communication C. LEBEC, réunion interne IFREMER, 1989). Les expériences menées montrent que la diminution du poids coquillier peut atteindre 15 % en 3 semaines. Les conséquences prévisibles de cette fragilisation de l'habitable résident surtout en une vulnérabilité accrue face aux agressions parasitaires. L'annélide *polydora* sp. notamment trouverait là peut être un terrain plus favorable pour s'installer.

En définitive, l'impact sur la croissance de l'huître et la dureté de la coquille, découlant de manière directe d'un déficit ou d'un manque d'oxygénation, semble donc réversible. Il ne peut, à première vue, s'aggraver jusqu'au seuil léthal. Une certaine réserve s'impose toutefois, compte tenu des conditions d'expérimentation de la résistance à l'anoxie : dans chacune de ces expériences, l'anoxie est entretenue de façon continue. Dans le milieu naturel par contre, comme nous le verrons plus loin, ce sont davantage des phénomènes répétés, entrecoupés de chocs hydriques et thermiques, liés au cycle de la marée, qu'il faudra prendre en compte. En l'état actuel des connaissances, la résistance des mollusques bivalves à ces anoxies répétées n'est pas prouvée.

III.2.2.3. Mode d'apparition dans les aires conchylicoles

L'ambiance expérimentale d'anoxie prolongée décrite précédemment semble peu réalisable dans les eaux conchylicoles si l'on se réfère aux seuils de saturation en oxygène dissous enregistrés jusqu'à présent :

- . Bassin d'Arcachon (d'après LE DANTEC, 1968) :
 - . 70 % dans les chenaux en vives eaux,
 - . 50 % dans les chenaux en mortes eaux à pleine mer,
 - . 100 % dans les chenaux en mortes eaux à basse mer,
(grâce à l'agitation créée par le vent)
- . Bassin de Marennes Oléron (d'après GRAS, 1971) :
 - . 100 % et plus.
- . Rivière d'Auray, Morbihan (d'après MARTEIL, 1960) :
 - . 60 % à 93 % en aval,
 - . 60 % à 75 % en amont.
- . Rivière du Belon, Morbihan (d'après MARIN, 1971) :
 - . 90 % à 110 %.

En fait, les cas de déficits prolongés en oxygène dissous ont été surtout recensés dans des eaux suffisamment profondes pour la stratifier. L'hécatombe de poissons de fond survenue en baie de Vilaine durant l'été 1982 fut révélatrice à ce sujet. Selon ROSSIGNOL STRICK (1985), c'est en effet une stratification haline qui fut à l'origine de cette mortalité catastrophique.

Les lâchers massifs d'eau douce de la Vilaine par le barrage d'Arzal, conjuguées à une faible agitation de la baie en mortes eaux eurent pour conséquence l'établissement d'une barrière hydrologique. Celle-ci entraîna un confinement des eaux de fond, l'oxygène dissous consommé à ce niveau ne pouvant plus être renouvelé.

En conchyliculture, les risques d'hypoxie ou d'anoxie prolongée, par voie de stratification hydrologique demeurent donc très limités : seuls les exploitations en eau profonde seraient localement et momentanément exposées. Pour le reste, c'est-à-dire la culture sur estran, les déficits en oxygène dissous se caractérisent par leur courte durée et leur répétitivité. Cette particularité s'explique par une étroite dépendance vis-à-vis du rythme phytoplanctonique :

- . le rythme saisonnier d'une part avec deux blooms, l'un très marqué au printemps, l'autre moins accusé au début de l'automne,
- . le rythme circadien d'autre part avec une production d'oxygène (consommation de CO₂) durant la journée et une consommation d'oxygène (production de CO₂) au cours de la nuit.

Ainsi, en prenant le contexte le plus défavorable réunissant les conditions suivantes :

- . jours assez courts,) septembre,
- . activité phytoplanctonique assez intense,) octobre
- . mortes eaux avec faible agitation des eaux,
- ; marée basse de la journée,
- . culture sur les parties élevées de l'estran.

Deux remarques s'imposent :

- . L'anoxie ou l'hypoxie pouvant en résulter, surtout durant les épisodes nocturnes, sera intercalée par des phases d'oxygénation non négligeables.
- . Ce contexte défavorable, en prenant en compte le cycle de la marée, ne peut excéder 15 jours.

C'est donc sous une forme répétitive, durant des périodes de 15 jours au plus, que le problème des déficits en oxygène dissous risque habituellement de se poser dans les eaux conchylicoles. Si ces épisodes sont momentanément défavorables à la croissance des mollusques, il reste peu probable qu'ils occasionnent des mortalités importantes.

III.2.2.4. Impact de l'hydrogène sulfuré ou conchyliculture

L'hypothèse d'un empoisonnement par excès d'hydrogène sulfuré a souvent été avancé pour expliquer les hécatombes dans certains sites conchylicoles. La toxicité de ce composé chimique, universellement connue, notamment dans le monde de l'exploration pétrolière, constitue de même une menace pour la fertilité du milieu marin. Récemment, elle a encore été soulignée dans le cadre de l'expertise écologique consécutive de fortes mortalités sur les parcs ostréicoles de Pen Bé (SAUNIER, Eau et Environnement, 1989).

Les premiers effets de ce gaz dissous lorsqu'il atteint des concentrations anormalement élevées, se font d'abord sentir sur la croissance des mollusques par une diminution du taux de filtration et donc de nutrition (ITO et IMAI, 1955). Les concentrations critiques voire mortelles (1 000 à 1 500 mg/l, prélèvements en mai et à la mi-octobre 1989, pour le site de Pen Bé) s'associent généralement à un grave déficit en oxygène dissous. Si, dans la pratique, on considère que "les cultures sont menacées dès que le seuil de saturation en oxygène dissous reste en permanence inférieur à 70 % (MARIN, 1971), c'est très probablement pour cette raison.

III.2.2.5. Mortalités ostréicoles associées, mode d'apparition

Dans les conditions habituelles, les concentrations en hydrogène sulfuré dans la colonne d'eau sont toujours plus élevées pour les sites conchylicoles par rapport à celle des zones non exploitées. Cette différence s'explique généralement par l'apport important de la biodéposition des mollusques dans la charge organique du sédiment sous les cultures. Ainsi, dans les eaux du bassin de Marennes Oléron, des teneurs de 28 mg/l ont été enregistrées sous des tables ostréicoles installées depuis 6 mois, alors que les parcs sans huîtres ne contenaient que 0,5 mg/l (ISTPM La Tremblade, rapport d'activité, 1979). Selon SORNIN (1981), la concentration en hydrogène sulfuré s'élève d'un facteur 8 dans les aires cultivées.

Ce gradient spatial en sulfure, bien que non négligeable, ne semble pas avoir une influence très significative sur la fertilité des sites si l'on se réfère aux teneurs observées dans les cas d'hécatombes ostréicoles. Pour le cas du site de Pen Bé déjà évoqué, on peut estimer un gradient de concentration, entre les eaux du large et celles de la baie, de l'ordre de 500 à 2 000, au cours des périodes critiques. Les autres cas étudiés par ailleurs affichent une analogie quant aux événements précurseurs. Ainsi trois "anomalies" semblent précéder ce type de pollution :

- . Déficit important en oxygène dissous succédant à des épisodes de sursaturation diurnes.
- . Abondance de substances fermentescibles et de germes susceptibles de produire de l'hydrogène sulfuré dans le sédiment.
- . Contact assez direct entre la phase organique fermentescible et la phase liquide facilitant des processus de relargage (ex : crème de vase non consolidée).

Les travaux de P. GRAS en rivière du Belon (1971) où d'importantes mortalités d'huîtres plates furent recensées dans les années 60 mettent en lumière une certaine chronologie dans l'évolution de la pollution. Les mesures estivales sur les parc de Gorgen, en 1969, sont assez significatives :

Dans l'eau :

- 1er juillet 1969
- . sursaturation anormale en oxygène dissous pendant la journée : 200 % soit 156 mg/l.
 - . augmentation de la microflore bactérienne totale : de 250 000 germes/ml initialement, celle-ci passe à 450 000.
 - . apparition de germes susceptibles de produire de l'hydrogène sulfuré (115 germes sulfato-réducteurs et 45 germes minéralisateurs/ml).
- 29 juillet 1969
- . déficit notable en oxygène dissous : 85 % de saturation, soit 6,7 mg/l.
 - . accroissement considérable de la microflore bactérienne totale : d'un facteur 10 (de 450 000, celle-ci s'élève à 4 500 000 germes/ml).
 - . augmentation des germes susceptibles de produire de l'hydrogène sulfuré :
 - d'un facteur 8 pour les bactéries sulfato-réductrices (de 115 à 950/ml),
 - d'un facteur 3 pour les bactéries minéralisatrices (de 45 à 150/ml).

Dans le sol :

- 1er juillet 1969
- . accroissement des germes susceptibles de produire de l'hydrogène sulfuré.
 - d'un facteur 20 pour les bactéries sulfato-réductrices (de 2 500 à 45 000 germes/g de sédiment humide),
 - d'un facteur 150 pour les bactéries minéralisatrices (de 150 à 25 000/g de sol humide).

- 29 juillet 1969 . croissance ralentie de ces germes
- d'un facteur 2 pour les sulfato-réducteurs et les bactéries minéralisatrices (respectivement de 45 000 à 95 000 et de 25 000 à 45 000 unités/g de sédiment humide).

Cette explosion bactérienne dans le sédiment entraîne une augmentation des sulfures : de 40 mg/kg de sédiment humide pour l'année précédente (01.07.68), ils passent à 76 mg/kg pendant la période critique (prélèvement du 29.07.69).

Pour expliquer l'hécatombe d'huîtres plates, P. GRAS invoque l'abondance du matériel organique fermentescible dans le sédiment tout en soulignant la forte activité chlorophyllienne à l'origine du phénomène.

III.2.2.6. Approche quantitative des processus de relargages par le sédiment

L'abondance de matière organique fermentescible dans le sédiment s'associant à des teneurs élevées en hydrogène sulfuré dans la colonne d'eau s'est retrouvée plus récemment à Pen Bé (44) où de fortes mortalités ostréicoles ont été constatées. Suite à une première investigation, menée de 1987 à 1988 par "SAUNIER Eau et Environnement" et la SRAE (Etude de la pollution de l'étier de Pont d'Arms et des zones conchylicoles, janvier 1989), l'hypothèse de relargages anormaux d'H₂S à partir du sédiment, lié à des conditions hydrologiques défavorables (hypoxies saisonnières), s'est imposée de prime abord. L'étude complémentaire de sédiments de cette baie (granulométrie, matière organique, sulfures), menée à partir de 15 carottages effectués en avril 1989 ne permet pas de confirmer toutefois ces premières impressions :

- . Les teneurs en matière organique, comprises entre 3 et 7 % n'apparaissent qu'un peu fortes comparativement aux valeurs observées en Charente.
- . Les valeurs des sulfures totaux atteignant 1 000 µg/g de sédiment humide (estimation à partir des taux/g de sédiment sec communiqués) ne se révèlent qu'un peu fortes par rapport à celles observées couramment à Marennes Oléron (1 000 à 500 µg/g de sédiment humide).

Les écarts observés sur chacun de ces paramètres du sédiment, par rapport à la normale restent donc peu significatifs. En retour, les mesures effectuées dans la colonne d'eau suite aux prélèvements de juin 1989 firent apparaître des données bien plus probantes :

- . Sursaturation diurne en oxygène dissous (15 mg/l dans le cours bas du chenal au niveau de la zone conchylicole).
- . Teneur très élevée en chlorophylle (jusqu'à 1 447 mg/m³) s'associant à des fortes populations phytoplanctoniques (10 000 à 3 300 000 cellules par litre nano plancton exclu).
- . Abondance des phéophytines (1 630 mg/m³ le 6 juin 1989).

Elles réunissant en effet tous les symptômes d'une activité phytoplanctonique aberrante commune aux phénomènes d'eutrophisation de fond de baie. Ces explosions d'algues microscopiques, assez analogues aux "red tides", amènent une grande quantité de matière organique dans le milieu. La forte DBO (notamment au cours des épisodes nocturnes) qui en découle peut créer des conditions anoxiques avec émission d'H₂S dans la colonne d'eau. Les mesures réalisées sur les prélèvements d'octobre 1989 semblent confirmer cette idée. C'est en effet à cet période de l'année où les jours raccourcissent que les teneurs les plus élevées en sulfures ont été recensées (jusqu'à 1 000 µg/l).

En définitive, les processus de relargages à partir d'un sédiment à forte charge organique semblent n'intervenir qu'à titre accessoire dans les cas d'hécatombes ostréicoles évoquées ici. Seule une perméabilité exceptionnelle du sol fournirait une explication allant dans ce sens. Ce dernier point n'est pas à négliger pour la pollution de Pen Bé où l'étude comparée des sédiments avec ceux de Ronce les Bains (fig. 11) permet d'entrevoir aussi une sorte de déséquilibre entre la granulométrie et le taux de matière organique : la fraction fine, peu représentée à Pen Bé (15 % en moyenne) est relativement riche en matière organique (1/3 environ) comparée à celle de Ronce les Bains où les vases, plus abondantes sont nettement plus minérales. Néanmoins, il semble plus probable que ce soient des processus ayant principalement leur siège dans la colonne d'eau qui déclenchent ces dégradations soudaines de la qualité des eaux conchylicoles. Quant au sol, il garde mémoire de ces phénomènes en recevant une forte charge organique et constitue surtout un bon indicateur. C'est donc plus le degré d'évolution que la teneur de la fraction organique qui fournira des indications précieuses dans ces cas de mortalités conchylicoles.

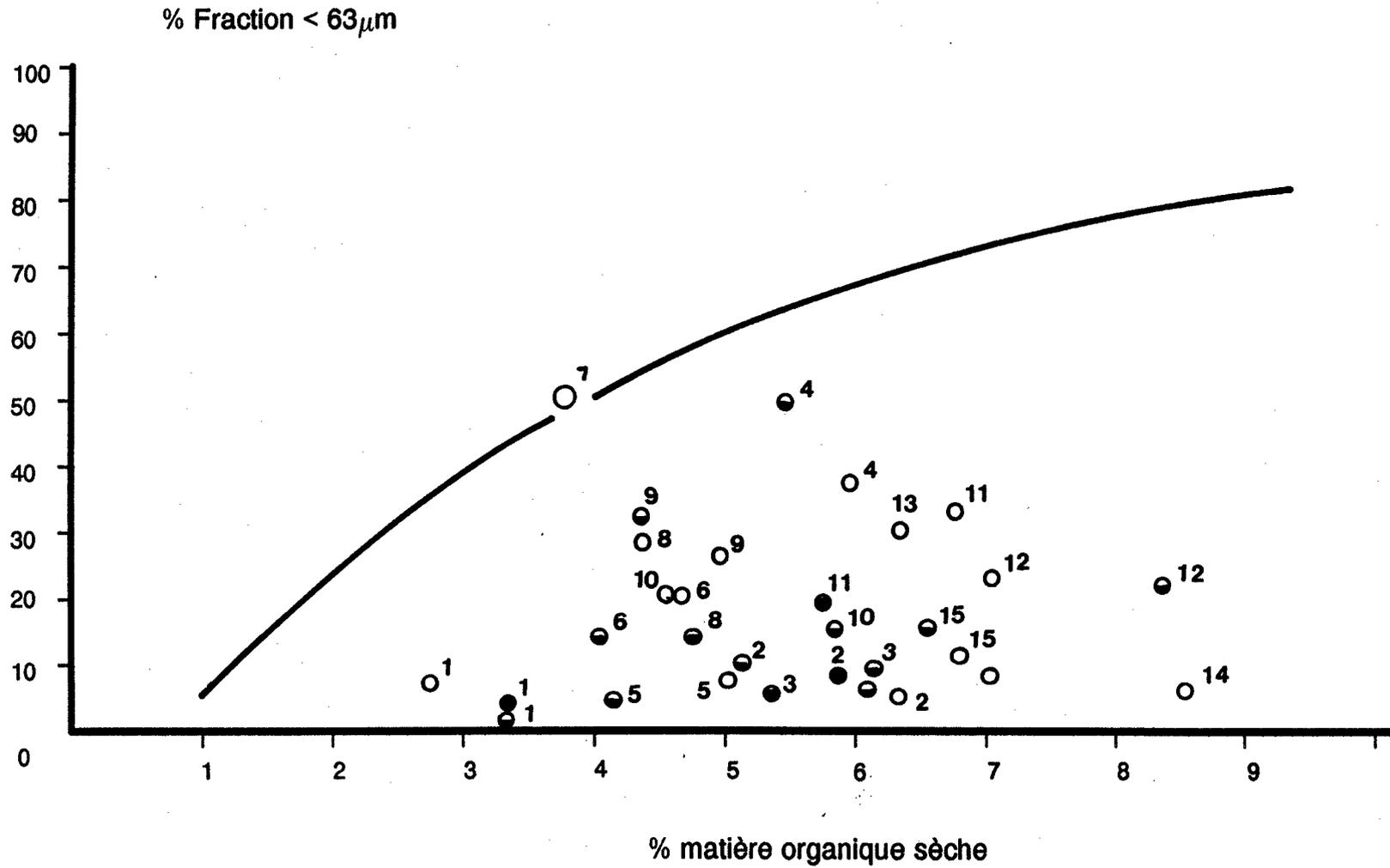


Fig. 11 - Evolution de la matière organique par rapport à la fraction vaseuse, comparaison entre les sites de Ronce-les-Bains (—) et Pen-Bé (profondeur échantillon : ○ : de 0 à 5 cm, ◐ : de 15 à 20 cm, ● : de 20 à 90 cm)
(D'après les résultats de SORNIN et SAUNIER "Eau et Environnement

III.3. Critères d'appréciation de la qualité du sol liés à la matière organique

III.3.1. Taux de matière organique, fluctuations saisonnières

La teneur en matière organique d'un sédiment est généralement proportionnelle à celle de la fraction fine. Ce rapport de concentration a été bien établi en milieu ouvert (voir fig. 12). En se référant aux résultats de J.M. SORNIN, il avoisine 1/10 dans les sédiments de type sableux sur estran.

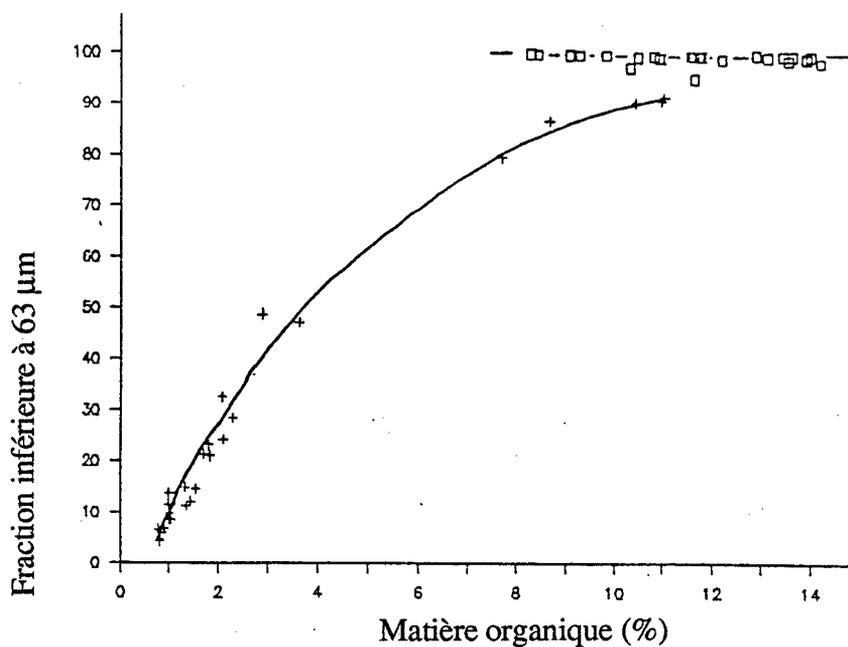


Fig. 12 - Relation entre la teneur en matière organique et la granulométrie dans les horizons sédimentaires sous cultures d'huîtres (□) sédiment de type "bri" en bassin expérimental ; (+) sédiment de type sableux sur estran

Ces taux de matière organique varie par ailleurs dans l'année sous l'influence de deux sources d'apports caractéristiques des eaux côtières :

- L'activité planctonique : les blooms phytoplanctoniques et leurs échos aux différents niveaux trophiques entraînent une forte sédimentation à partir du printemps. Ainsi, la charge organique du sédiment est toujours plus forte à la fin de l'été que durant le reste de l'année.
- Les apports des bassins versants qui enrichissent le sédiment en débris végétaux et rejets anthropiques notamment en période hivernale.

Dans les sols des sites conchylicoles, la charge organique est assez élevée de par la forte biodéposition des fécès et pseudo fécès rejetées par les mollusques. Les teneurs enregistrées oscillent le plus souvent entre 2 et 4 %. Au-delà d'un seuil de 5 % - 6 %, on considère généralement que le site se dégrade.

III.3.2. Aptitude du sol au recyclage de sels nutritifs, apports de l'indice C/N

Si ces apports organiques sont conservés pour l'essentiel par les sédiments et peuvent être considérés comme "perdus" pour le milieu, une part non négligeable est recyclée en sels nutritifs et restituée à la colonne d'eau. C'est donc surtout cette faculté de minéralisation, plus que la charge organique elle seule, qui déterminera la qualité du sol. Nous avons vu précédemment que le rôle des bactéries devait être pris en compte. Pour estimer ce foisonnement de la flore bactérienne et la vitesse de minéralisation de la matière organique qui en découle, on utilise le rapport C/N (taux de carbone organique/taux d'azote total). Ce rapport augmente avec la profondeur (Tab. 1) où les conditions réductrices ralentissent l'attaque de la microflore.

STATIONS	Niveaux en cm	C %	N %	C/N
"sol naturel"	0-5	0,32	0,053	6,0
	5-10	0,34	0,055	6,1
	10-15	0,43	0,053	8,1
	15-20	0,47	0,052	9,0
"sol nylon"	0-5	0,43	0,070	6,1
	5-10	0,47	0,072	6,5
	10-15	0,42	0,061	7,0
	15-20	0,42	0,050	8,3

Tab. 1 - Distribution verticale de la matière organique dans les sols des parcs de Gorgen (moyennes des résultats obtenus les 1er juillet et 25 septembre 1969) (D'après J. MARIN, 1971)

Lors de son étude sur l'estuaire du Belon, J. MARIN (1971) a mis en évidence ce lien entre les valeurs de C/N et le stade d'évolution de la matière organique. Les valeurs fortes notamment (C/N > 10) témoignent d'apports récents de débris végétaux sur lesquels l'action des bactéries est plus lente.

IV. ROLE DES CARBONATES

Les essais d'épandage de craie sur les parcs ostréicoles ont donné des résultats intéressants ces 20 dernières années. Des expériences in situ et en laboratoire ont été menées pour cerner l'action de ces amendements par M. FEUILLET et D. GOULEAU (1977). Les deux produits utilisés (Hydral et Nautex) ont une forte teneur en CaCO_3 et une solubilité carbonique supérieure à 80 %. Leur action sur le sédiment se situerait à 4 niveaux.:

- . "Une action physico-chimique : par un abaissement du pH et du potentiel rédox (de 30 à 60 m.v.), ce qui favorise une corrosion anaérobie de la matière organique".
- . "Une action minéralisatrice de la matière organique : lorsque les processus de transformation sont bloqués".
- . "Une action chimique et nutritive" : l'adjonction de carbonates renforce le rôle tampon du sédiment vis-à-vis des sels nutritifs dont elle régularise l'émission à l'interface à partir de l'eau interstitielle. Cette colonne d'eau lors des blooms phytoplanctoniques printaniers. Cette action minéralisatrice est bien établie pour les nitrates (voir fig. 13) et l'ammonium.

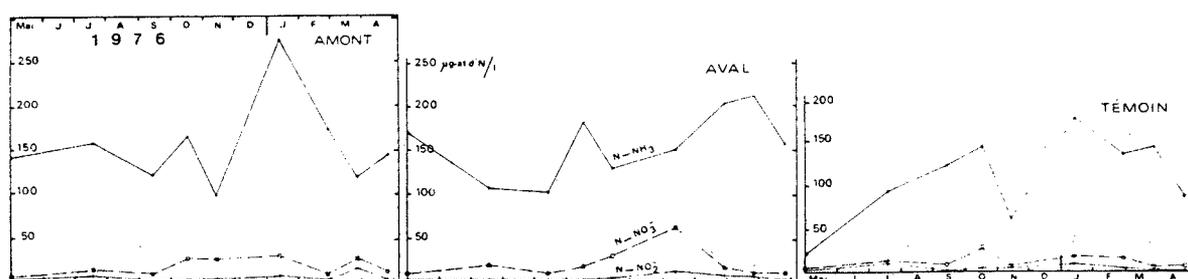


Fig. 13 - Variations des éléments nutritifs azotés dissous dans les eaux interstitielles des zones-témoins et traitées, en aval et en amont (moyenne sur les trois niveaux d'observations) (D'après M. FEUILLET et D. GOULEAU, 1977)

- . "Une action mécanique sur les vases : déstructuration et défloculation sur les vases, permettant une érosion plus facile lorsque les courants sont suffisamment forts pour entraîner les particules".

Ces conclusions de D. GOULEAU et M. FEUILLET, conduisent à penser qu'un sol présentant naturellement une teneur en carbonate suffisante sera davantage propice à l'utilisation conchylicole. Mais les expériences décrites précédemment ont été menées en bassin. En eau libre, l'action de ces amendements, comme celle des fertilisants d'une manière générale reste à prouver (MARTEIL, 1974). Seule une amélioration de la tenue du sol peut être retenue en l'état actuel des connaissances. Cela n'exclue pas pour autant l'hypothèse d'une influence des carbonates sur les flux intersticiels si l'on se réfère aux résultats de BARBIER (1956), la réduction des sulfates en sulfure dans l'eau intersticielle entraîne un excès d'ions Ca^{++} selon la réaction :



suivie par l'équilibre :



Les ions Ca^{++} en surplus sont susceptibles de diffuser vers la colonne d'eau.

L'implication de ce phénomène géochimique sur la faune benthique reste donc très probable dans les premiers cm au-dessus de l'interface. La teneur en CaCO_3 dans le sédiment reste donc un indice de richesse du milieu en ressources nutritives, notamment pour les cultures sur le fond, le calcium jouant un grand rôle dans le développement de la coquille.

V. CONCLUSION

A l'issue de cette investigation sur l'influence du sédiment en conchyliculture, il convient de restituer l'importance respective des 3 paramètres pris en compte.

La granularité

Très liée au contexte morphologique et aux impératifs techniques qui ont orienté le choix des sites pour les cultures, elle réunit donc deux qualités géotechniques requises : dureté et cohésion suffisante limitant les risques d'enfoncement ou d'enfouissement des mollusques. En retour, les atouts biologiques et physico-chimiques, pour un bon recyclage de la matière organique et la restitution de sels nutritifs à la colonne d'eau, ne se retrouvent que dans une aire enveloppe bien déterminée : celle du sédiment sablo-vaseux légèrement perméable abritant une abondante microflore et autorisant une circulation des eaux interstitielles.

La matière organique

L'action de la matière organique emmagasinée dans le sédiment s'exerce de deux façons :

- Par voie de dégradation : grâce au relais bactérien, elle fournit des formes assimilables de l'azote et du phosphore dans le sédiment dans des concentrations nettement supérieures à celles de la colonne d'eau. Ces gradients de concentrations favorisent une diffusion au-dessus de l'interface. L'effet de ces apports sur la productivité primaire n'est plus à démontrer. On sait que l'azote joue un rôle physiologique en terme de croissance et que le phosphore tient une place importante dans le métabolisme des lipides et des glucides.
- Par les conditions qu'elle crée à l'intérieur même du sédiment : en affinant la texture, le matériel organique favorise l'implantation de la microflore bactérienne et l'existence de conditions réductrices. Ce dernier point est fondamental car la réduction de sulfates en sulfures en présence de matière organique libère des acides faibles dans le milieu. Elle permet de ce fait :
 - l'entretien de la réserve alcaline (FEUILLET, 1971),
 - la dénitrification en profondeur,
 - un mouvement des pools d'ions PO_4^{--} échangeables,
 - un excès d'ions Ca^{++} diffusables.

Ces processus conduisent, là aussi, à de fortes concentrations des sels nutritifs et à leurs diffusions au-dessus de l'interface.

La fraction organique du sédiment est donc à prendre en compte pour définir la qualité des sols conchylicoles. Son impact sur les rendements reste toutefois subordonné à un fonctionnement "normal" de l'écosystème littoral. Si l'abondance de germes susceptibles de produire de l'hydrogène sulfuré, des teneurs "anormales" en sulfures a été remarquée sur certains sites momentanément sinistrés par des mortalités conchylicoles, la présence d'une charge organique élevée dans le sédiment ne semble pas menacer en elle-même les cultures. En retour, le degré d'évolution de cette matière organique constitue un indicateur précieux pour retracer les contextes hydrobiologiques récents. C'est en effet surtout les processus ayant leur siège dans la colonne d'eau qui ont une influence déterminante sur les cultures. Ce dernier point conduit à intégrer des phénomènes climatiques et plus particulièrement un nouveau régime dans nos régions. Celui-ci caractérisé par des étés très secs, prédispose les sols des bassins versants à un lessivage intense par les premières pluies abondantes d'automne ou d'hiver.

Les zones littorales reçoivent ces influences sous la forme d'arrivée brutales "d'eaux froides" très riches en sels nutritifs. De ce fait, les sites conchylicoles, situés en fond de baie, se trouvent plus exposés à des risques d'eutrophisation. Pour limiter ces risques, le maintien et l'entretien de zones tampons (marais salants par exemple) en amont devient nécessaire. Ces écosystèmes qui jouent par ailleurs le rôle d'une nursery pour la production ostréicole, peuvent également s'avérer être des protections à la fois hydrauliques et biologiques contre ces influences terrigènes trop brutales.

BIBLIOGRAPHIE

BARBIER G. (1956) - Introduction à l'étude des phosphates du sol - VI^e Cong. Internat., Sciences du sol

BOURCART J.(1957) - L'érosion des continents - Paris, Ed. Armand-Colin, 216 p

CALLAME B. (1960) - Etude sur la diffusion des sels entre les eaux surnageantes et les eaux d'imbibition dans les sédiments marins littoraux - Bull. Inst. Océanogr., Monaco - n° 1181, 19 p

CALLAME B. (1961) - Note sur les échanges de phosphates entre l'eau interstitielle des sédiments marins et l'eau qui les recouvre - Bull. Inst. Océanogr., Monaco - n° 1201, 8 p

CALLAME B. (1965) - Sur la diffusion des gaz à l'intérieur des sédiments marins - C.R. Acad. Sci., Paris, 260, p 1220 -1223

DELTREIL J.P., FEUILLET M., ARCHAMBEAU G (1977) - Etude expérimentale de la fertilisation phosphatée dans les claires à huîtres - Rev. Trav. Inst. Pêches marit. 41 (3), p. 283-297

DELTREIL J.P., FEUILLET M., GRAS P., MARIN J. MARTEIL L. (1974) - La conchyliculture française - Le milieu naturel et ses variations - Revue des travaux Inst. Pêche marit., 38 (3), p 269-279

DUCHAUFOR P.(1960) - Précis de pédologie - Paris, Masson, 348 p

FEUILLET M. (1971) - Etude du phosphore dans les sédiments ostréicoles du Bassin des Chasses des Sables d'Olonne - Rev. Trav. Inst. Pêches marit., 35 (4), p. 443-453

FEUILLET M. (1971) - Relations entre les eaux intersticielles des fonds sédimentaires ostréicoles et le milieu hydrobiologique - Le Bassin des Chasses des Sables d'Olonne - Rev. Trav. Inst. Pêches marit. 35 (4), p. 435-442

FEUILLET M., GOULEAU D. (1977) - Action des épandages de la craie (ou CaCo_3) sur les vases des claires et des parcs ostréicoles - Rev. Trav. Inst. Pêches marit. , 41 (4), p. 417-436

GOULEAU D. (1975) - Les premiers stades de la sédimentation sur les vasières littorales atlantiques, rôle de l'émersion - Thèse 3ème cycle, univ. Nantes

GRAS P. (1971) - Etude microbiologique des mortalités d'huîtres plates, *Ostrea edulis L.*, de la rivière Belon - Rev. Trav. Inst. Pêches marit. , 35 (2), p. 215-225

HIS E. (1970) - Comportement de *Crassostrea angulata L.* sous des conditions d'asphyxie - Rev. Trav. Inst. Pêches marit., 34 (2), p 189-194

ITOS S. et IMAI T. (1955) - Ecology of oyster bed. I. - On the decline of productivity due to repeated cultures - Tohoku J. agric. Res., 5 (4), p 251-268

JORGENSEN C.B. (1960) - Efficiency of particle retention and rate of water transport in undisturbed lamellibranchs - J. Cons., 26 (1), p 94-116

JOUAN G. (1977) - Etudes des conditions de développement de l'ostréiculture en eau profonde en baie du Mont Saint-Michel - Rapport interne - C.R.E.B.S. Rennes, 35 p

LE DANTEC J. (1968) - Ecologie et reproduction de l'huître portugaise (*Crassostrea angulata L.*) dans le bassin d'Arcachon et sur la rive gauche de la Gironde - Rev. Trav. Inst. Pêches marit., 32 (3), p 237-362

LERAT Y. , BOUCHER G., LE CORRE P. (1985) - Echanges à l'interface eau-sédiment dans un secteur côtier à forte biodéposition (parc ostréicole), cas de l'ammonium et des nitrates - Cah. Biol Marine, 26, p. 393-408

MARIN J. (1971) - Etude physico-chimique de l'estuaire de Belon - Rev. Trav. Inst. Pêches marit. , 35 (2), p. 109-156

MARTEIL L. (1960) - Ecologie des huîtres du Morbihan *Ostrea edulis* et *Gryphaea angulata* - Rev. Trav. Inst. Pêches marit., 29 (2), p 327-446

ROSSIGNOL-STRICK M. (1985) - A marine anoxic event on the Brittany coast, July 1982 - Journal of Coastal Research, 1 (1), p 11-20

SAUNIER EAU ET ENVIRONNEMENT (1989) - Etude de la pollution de l'étier de Pont d'Armes et des zones conchylicoles - Rapport de synthèse - SIVOM de la région Bauloise

SORNIN J.M. (1979) - Enquête sur la sédimentation et l'exhaussement des fonds dans les zones conchylicoles des côtes de France - Mém. D.E.A. Univ. Nantes

SORNIN J.M. (1981) - Processus sédimentaires et biodéposition liés à différents modes de conchyliculture - Baie de Cancale, Anse de l'Aiguillon et Bassin de Marennes Oléron -Thèse 3ème cycle Univ. Nantes

TOURMELON A. (1972) - Influence de la nature granulométrique des sédiments sur les structures benthiques - Baies de Douarnenez et d'Audierne (Ouest Finistère) - Cah. Biol. Marine, 13, p. 91-136

ZOBELL C.E. (1946) - Marine microbiology - Waltham, Massachusetts, Chrono. Bot. C°, 240 p