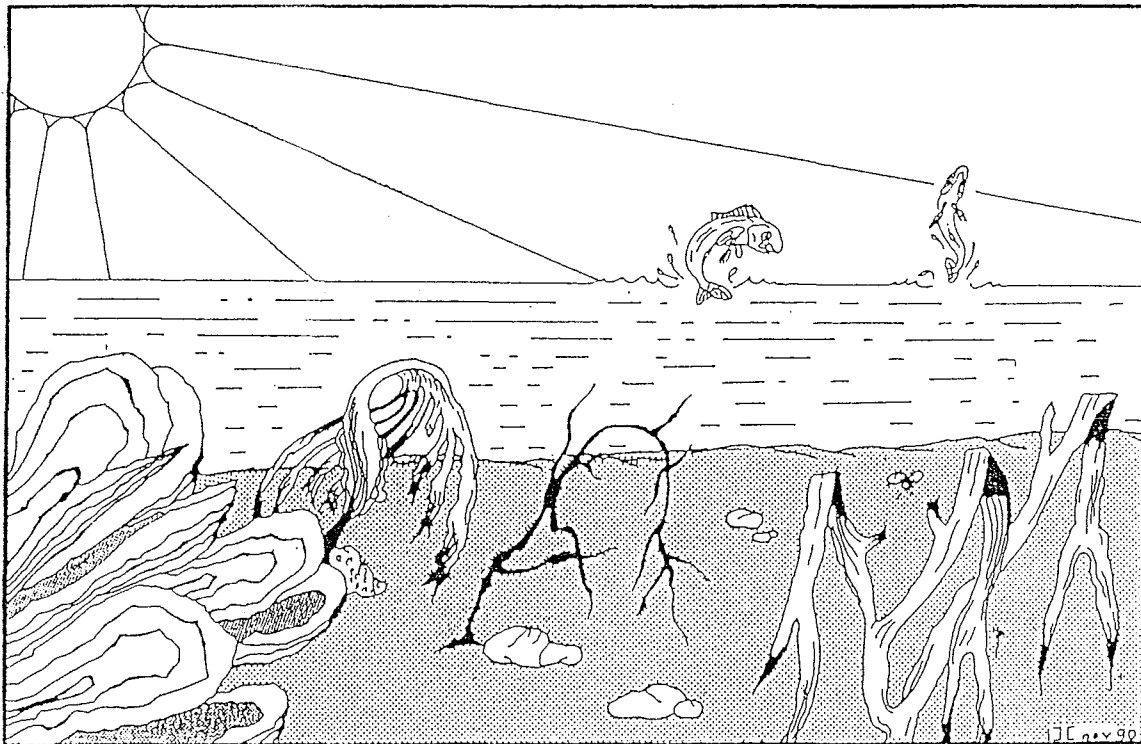


Rapports internes de la Direction des Ressources Océaniques  
Laboratoire Environnement Méditerranéen Sète

L'OXYGENE EN ETE DANS L'ETANG DE THAU  
CONTRIBUTION A L'ETUDE DU RISQUE DE  
"MALAIGUE"

H.TOURNIER, D.AUDABRAM, S.LANDREIN et JM.DESLOUS-PAOLI

Illustration de C.JUGE



R.I. DR0.90.02.LEM/SETE

IFREMER  
 Centre de TOULON  
 Station de Sète  
 TEL. : 67 74 77 67  
 Télécopieur : 67 74 70 90

DIRECTION RESSOURCES  
 OCEANIQUES  
 LABORATOIRE ENVIRONNEMENT  
 MEDITERRANEEN

<p>AUTEUR (S) : TOURNIER H., AUDABRAN D., LANDREIN S. et          DESLOUS-PAOLI J.M.          Illustrations : JUGE C.</p>	<p>CODE :          N° DRO.90.02.EM</p>
<p>TITRE L'OXYGENE EN ETE DANS L'ETANG DE THAU.          CONTRIBUTION A L'ETUDE DU RISQUE DE          "MALAIGUE". ANNEE 1989</p>	<p>Date : décembre 1990          Tirage nb :          Nb pages :          Nb figures :          Nb photos :</p>
<p>CONTRAT          (intitulé)          n°</p>	<p>DIFFUSION          Libre <input checked="" type="checkbox"/>          Restreinte <input type="checkbox"/>          Confidentielle <input type="checkbox"/></p>
<p><u>RESUME</u></p> <p>L'étang de Thau, lagune méditerranéenne, subit des crises dystrophiques pouvant entraîner des mortalités des coquillages élevés. Cette étude montre que le risque de crise est permanent en été. La disparition de l'oxygène a principalement lieu dans les zones conchylicoles et près du fond du fait de la concentration en coquillages et de l'abondance des biodépôts. Une corrélation est établie entre le niveau d'oxygène de l'eau et la vitesse du vent, principal facteur d'équilibre.</p> <p><u>ABSTRACT</u></p> <p>The mediterranean lagoon of Thau is subject to dystrophic crisis leading to mortalities of the shells grown there. This study shows that the risk for such a crisis is permanent during the Summer. Disappearing of oxygen, mainly takes place in the breeding areas and near the bottom because of the concentration of shells and the abundance of biodeposit. A correlation is shown between the level of the oxygen in the water and the speed of the wind which is the main factor of balance.</p>	
<p>Mots-clés : anoxie, oxygène, température, salinité, météorologie, étang de Thau</p>	
<p>Key words : anoxy, oxygen, temperature, salinity, meteorology, lagoon of Thau</p>	



<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>2. MATERIEL ET METHODES</b>	<b>4</b>
2.1. Réseau de stations	4
2.2. Calendrier des prospections	5
2.3. Paramètres étudiés	5
2.3.1. L'oxygène dissous	5
2.3.2. Température et salinité	5
2.3.3. Données météorologiques	6
2.3.4. Représentation graphique et traitements	6
<b>3. ETUDE DE LA REPARTITION SPATIALE DE L'OXYGENE</b>	<b>6</b>
3.1. Carte des minima en oxygène près du fond	6
3.2. Carte de l'oxygénation moyenne	8
3.3. Oxygénation moyenne à 1 m du fond et à 1 m 50 de la surface	9
3.4. Etude des coupes	10
<b>4. ETUDE DE L'EVOLUTION TEMPORELLE DE L'OXYGENE</b>	<b>12</b>
4.1. Evolution de la répartition verticale de l'oxygène en zone A	13
4.2. Etude de l'influence du vent	16
4.3. Relation entre déficit en oxygène près du fond et vent	17
4.4. Comparaison de l'évolution entre la zone A et les zones B et C	19
<b>5. DIFFERENTS ASPECTS DE LA REPARTITION DE L'OXYGENE     EN 1988 et 1989</b>	<b>20</b>
<b>6. CONCLUSION</b>	<b>24</b>

# L'OXYGENE EN ETE DANS L'ETANG DE THAU CONTRIBUTION A L'ETUDE DU RISQUE DE "MALAIGUE"

par H.TOURNIER, D.AUDABRAM, S.LANDREIN et J.M.DESLOUS-PAOLI

Illustrations de C.JUGE

## 1. INTRODUCTION

L'étang de THAU est le plus important centre de production de coquillages du sud de la FRANCE. Episodiquement, au cours de l'été, il subit des crises dystrophiques connues localement sous le nom de "MALAIGUES" entraînant quelquefois d'importantes mortalités comme en 1975, 1982 et 1987. Bien que connaissant les conditions favorables au déclenchement de ces crises, essentiellement dues à l'absence prolongée de vent et à une forte demande en oxygène, il est quasiment impossible à l'heure actuelle d'en prévoir le moment et le lieu précisément, même à court terme.

Les travaux de l'IFREMER ont alors porté, dans un premier temps, sur la recherche de moyens de prévention et de lutte ainsi que sur la détermination des secteurs soumis aux plus hauts risques, sites que l'on pourrait assimiler à des foyers, et plus récemment, sur la hiérarchisation des différents facteurs consommateurs d'oxygène responsables de l'évènement.

La présente étude porte principalement sur la distribution verticale et horizontale de l'oxygène dissous afin de déterminer les zones subissant les plus fortes désoxygénations, ainsi que sur l'influence du vent.

## 2. MATERIEL ET METHODES.

### 2.1. Réseau de stations

Le réseau de stations est présenté par la figure 1 sur laquelle on remarque d'une part, que l'espacement des tables est moindre en zone A où les grands couloirs ne font que 100 m, qu'en zones B et C où ils font 150 m et d'autre part, que le secteur relativement profond (à plus de 8 m de sonde) ne pénètre par endroit que la zone A.

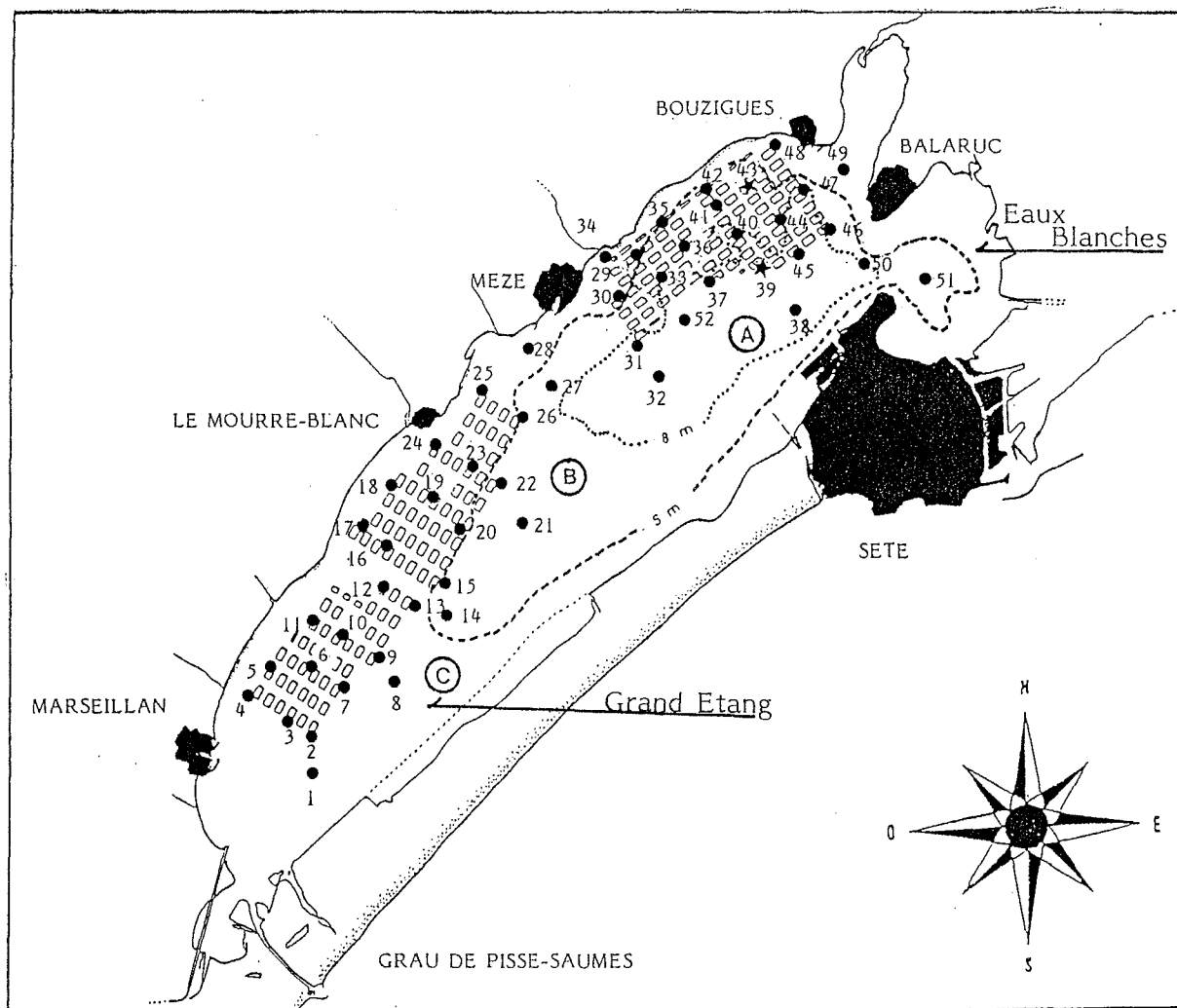


Figure 1 . Situation géographique des stations étudiées dans l'étang de THAU durant l'été 1989 . ( \* stations 39 et 43 ) .

## *2.2. Calendrier des prospections.*

Ce réseau a été prospecté partiellement ou intégralement, en 1989 aux dates suivantes :

27 juin.....	16 stations
4 et 5 juillet.....	32 "
7 juillet.....	17 "
12 juillet.....	10 "
18 et 19 juillet....	52 "
25 juillet.....	15 "
28 juillet.....	16 "
3 août.....	17 "

## *2.3. Paramètres étudiés.*

### *2.3.1. L'oxygène dissous.*

L'oxygène dissous, exprimé en ppm et en pourcentage de saturation a été mesuré à chaque station et à deux niveaux : 1,50 m au-dessous de la surface, de manière à définir la répartition de l'oxygène à un niveau constant correspondant dans l'ensemble des zones conchylicoles à la présence de coquillages en élevage, et 1,00 m de fond, pour déceler, indépendamment de la bathymétrie, une baisse d'oxygène qui se produirait à proximité du sédiment. Deux stations profondes (39 et 43) ont fait l'objet d'une étude plus poussée, par des mesures effectuées tous les mètres, de façon à pouvoir établir des profils verticaux.

L'oxygène dissous a été mesuré, d'une part avec un oxymètre YSY 58 à compensation automatique de température (précision  $\pm 0,08 \%$ ), d'autre part avec la trousse HACH OX-DT utilisant la méthode de Winckler (précision  $\pm 0,01$  ppm).

### *2.3.2. Température et salinité.*

Ces deux paramètres ont été mesurés à un certain nombre de stations grâce à la thermosalinosonde BECKMAN RS 53 (précision  $\pm 0,05^\circ \text{C}$  et  $\pm 0,03 \text{‰}$ ).

Pour chacune de ces campagnes l'ensemble des cartes, profils et coupes ont été établis et les principales cartes sont fournies en fin de texte. Mais dans le but de faire apparaître l'aspect moyen des phénomènes, nos résultats sont présentés sous la forme la plus synthétique possible par le biais de cumuls de nos mesures.

### *2.3.3. Données météorologiques*

Les tableaux climatologiques mensuels de la station météorologique de SETE ont été dépouillés afin d'extraire chaque jour la vitesse moyenne des vents de secteur nord comptés entre 270, 360 et 90° et de secteur sud comptés entre 270, 180 et 90°. Le but de cette collecte était d'établir la corrélation entre vent et niveau d'oxygénation des eaux de l'étang en surface et surtout près du fond.

### *2.3.4. Représentation graphique et traitements.*

Les données d'oxygène, de température et de salinité ont été utilisées pour l'établissement de cartes, de coupes et de profils par interpolation graphique de manière à figurer la localisation des zones et des volumes d'eau les moins oxygénés et leur caractéristiques thermohalines.

L'établissement de tableaux synoptiques tente de synthétiser l'évolution des paramètres dans le temps.

La corrélation entre vitesse du vent et oxygénation des eaux de fond a été recherchée à l'ordinateur par la méthode des moindres rectangles.

## **3. ETUDE DE LA REPARTITION SPATIALE DE L'OXYGENE**

Différents traitements permettent de synthétiser nos résultats. Comme il a été dit précédemment, nous choisissons ici de présenter des cartes établies sur les moyennes des données à chaque station. Ces cartes ne représentent donc pas des situations observées mais des répartitions moyennes pour la période du 27 juin au 3 août 1989.

### *3.1. Carte des minima en oxygène près du fond*

Nous avons déjà été amenés à définir les malaïgues de fond et les malaïgues de bordure (TOURNIER et al 1979) étant bien entendu qu'en cas d'accident majeur comme en 1975, les deux se conjuguent.

En 1989 aucune mortalité massive consécutive à une crise dystrophique n'a eu lieu mais selon la thèse que nous défendons le risque se renouvelle systématiquement chaque année, notamment à proximité des fonds chargés en matière putrescible (biodéposition).

Le risque de malaïgue de bordure étant quelque peu réduit depuis la mise en place d'un réseau de ramassage des déchets conchylicoles des mas de travail bordant le nord du bassin, il est intéressant de localiser les secteurs où la dégradation du milieu près du fond aurait pu, en l'absence prolongée de vent, conduire au développement d'une crise.

Ainsi, a été réalisée la carte des minima observés à - 1 m du fond sur l'ensemble de la période étudiée (figure 2) : nous y constatons que les baisses en oxygène sont les plus importantes dans les secteurs les plus profonds de la zone A, avec un minimum de 0,78 ppm à la station 43. Ceci peut s'expliquer par le fait que non seulement nous nous trouvons là en secteur conchylicole dense où le fond doit être chargé beaucoup plus qu'ailleurs en biodépôts mais peut-être aussi que ceux-ci ont tendance à s'accumuler dans les endroits les plus creux où l'eau se renouvelle moins souvent par brassage vertical.

La zone A apparait donc, de toute évidence, comme étant le secteur de l'étang présentant la plus forte probabilité de développement de malaïgue de fond.

D'autres secteurs montrent des baisses d'oxygène moins accusées : il s'agit de la région située entre l'anse de MEZE et le port du MOURRE BLANC, sans que nous puissions pour l'instant préciser l'origine des désoxygénations. Il s'agit aussi d'une zone située au centre de la zone B.

En revanche le pourtour des zones B et C ainsi que le centre de l'étang montrent les teneurs les plus élevées ce qui démontre que les déficits en oxygène sont bien à mettre en rapport avec la présence des zones conchylicoles.

La bonne oxygénation d'une partie de la bande côtière au nord des zones B et C est vraisemblablement due à la présence d'herbiers à Posidonies qui produisent de l'oxygène pendant la journée donc au moment de nos mesures.

Il importe de rappeler ici que ces résultats reposent uniquement sur des observations faites de jour. Elles ne sont que le reflet de désoxygénations plus poussées qui se produisent la nuit du fait notamment de l'interruption de la photosynthèse et que nous n'avons pas pu prospecter en 1989.

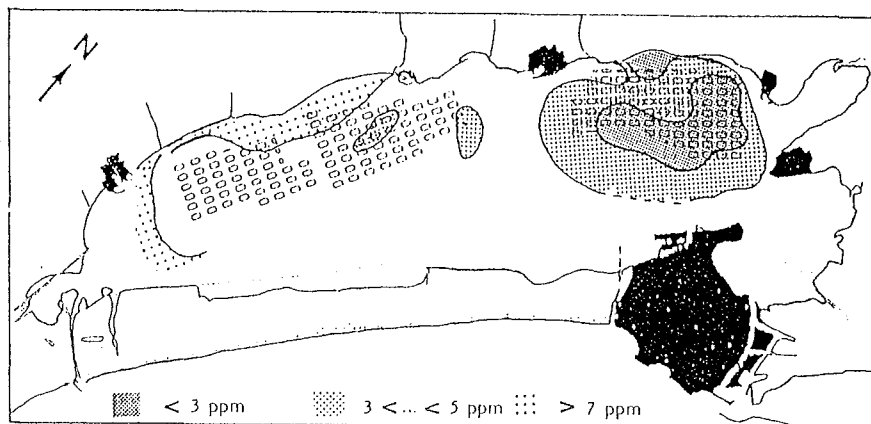
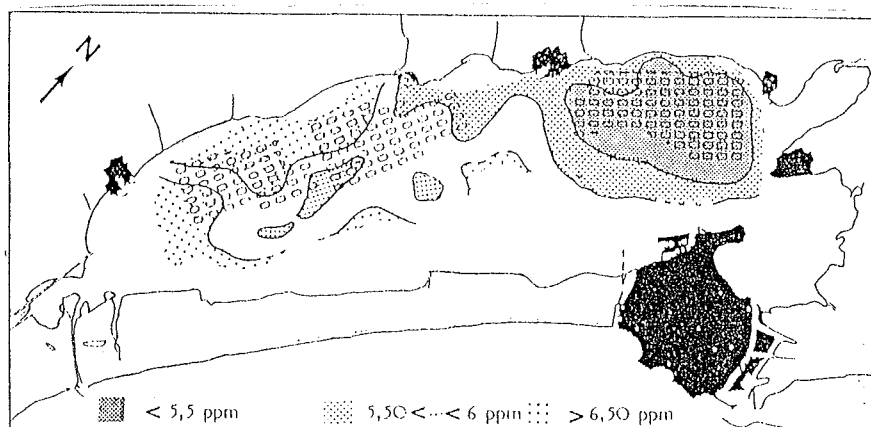


Figure 2 . Carte des minima en oxygène à 1 mètre du fond.



### 3.2. Carte de l'oxygénation moyenne

A chaque station la valeur utilisée est la moyenne arithmétique des valeurs enregistrées en surface et au fond (figure 3).



Nous retrouvons sensiblement la même configuration que celle définie par la carte des minima. L'ancrage à la côte d'une zone relativement pauvre en oxygène à partir de MEZE et jusqu'au-delà du MOURRE BLANC y est cependant plus nette. Par comparaison avec la carte précédente, il apparaît que les désoxygénations sont plus intenses près du fond mais se répercutent sur la totalité de la tranche d'eau jusqu'à proximité de sa surface et que par ailleurs certains secteurs présentent un danger permanent car les baisses les plus accusées se produisent aux endroits qui sont en moyenne les moins oxygénés pendant toute la période.

Au plan conchylicole, au moins en été 1989, nous constatons que les mollusques élevés en suspension bénéficiaient régulièrement d'une eau mieux aérée en zones B et C qu'en zone A. Il se révèle ainsi une certaine pérennité dans les caractéristiques des différents secteurs de l'étang du point de vue de son équilibre en oxygène : le secteur central ainsi que les zones à herbiers se sont maintenus à un meilleur taux d'oxygénation du fait de l'absence d'exploitation conchylicole.

L'apport d'eau mieux oxygénée que l'eau de l'étang, que l'on aurait pu supposer provenir de la mer à travers les canaux de SETE ou le grau de PISSES SAUMES n'apparaît absolument pas, une bonne part de l'étang des EAUX BLANCHES ayant une teneur en oxygène inférieure à celle relevée dans le centre du GRAND ETANG. Ce constat n'exclue évidemment pas l'existence d'un effet des échanges d'eau avec la mer, mais celui-ci ne devient sans doute sensible, bien que vraisemblablement peu durable sur l'oxygène, qu'à l'occasion d'importantes vidanges de l'étang par fort vent de nord et d'intrusion massive d'eau de la mer par tempête de sud.

### 3.3 Oxygénation moyenne à 1 m du fond et à -1.5 m de la surface.

Près du fond (figure 4) nous retrouvons une configuration très proche de celle définie par la carte des minima, ce qui n'est pas pour surprendre, les minima ayant toujours été observés à ce niveau. On remarque que l'essentiel du secteur englobant la zone A, de MEZE à la presqu'île de BALARUC est à moins de 5,5 ppm. Les 6,5 ppm n'apparaissent qu'au delà de l'anse de MEZE et du port du MOURRE-BLANC. Des valeurs plus faibles affectent épisodiquement les trois quarts de la zone B et le début de la zone C ; il semble qu'il y ait alors une certaine continuité de cette masse d'eau jusqu'à la côte nord. L'ouest des zones B et C est fréquemment bien oxygéné, du moins de jour, entre 6,5 et 7,6 ppm. Les plus faibles valeurs sont essentiellement localisées aux grands fonds de la zone A, que nous sommes conduits à considérer comme les véritables "foyers" potentiels de malaïgue de fond en 1989.

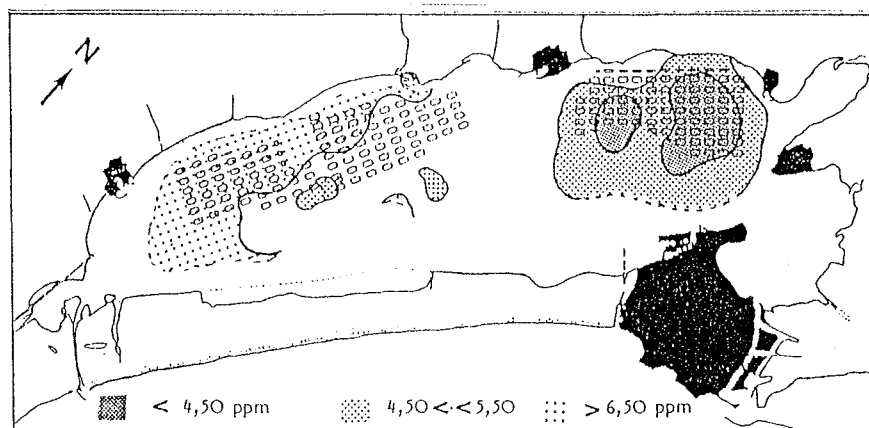


Figure 4. Oxygénation du fond à toutes les stations .

Si l'on examine la carte de subsurface (figure 5) nous voyons encore que l'ouest et le centre du bassin sont toujours mieux oxygénés ; les secteurs d'élevage et particulièrement la zone A apparaissent toujours comme appauvris en oxygène, du fait, comme déjà dit, de la présence de matériel oxydable et de la respiration des êtres vivants, mais aussi du fait de la forte concentration de ces derniers qui limite les échanges

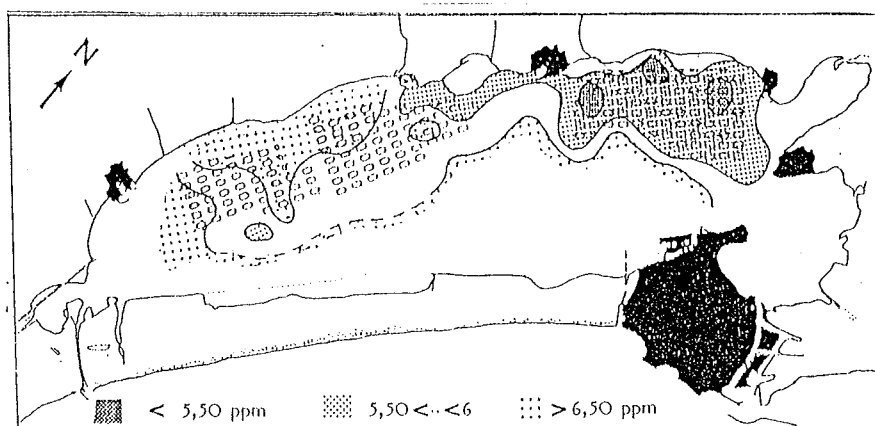


Figure 5 . Oxygénation de surface à toutes les stations ,  
valeurs non pondérées .

hydrauliques. Cependant la répercussion près de la surface des baisses d'oxygène près du sédiment, du moins dans nos résultats, est toujours décalée. Ce décalage vertical à partir des secteurs profonds où la sonde avoisine les 10 m, peut être le fait, et nous le verrons sur les coupes, du mouvement des eaux. D'après cette constatation, nous sommes amenés à penser que la turbidité observée de la surface ou d'avion, à l'occasion d'une malaïgue ne coïncide sans doute pas précisément avec la position des foyers qui lui ont donné naissance, en particulier s'ils sont profonds. Mais il faut aussi admettre que des foyers de malaïgue peu profonds se créent épisodiquement et concernent, comme cela a déjà été observé, un secteur côtier (malaïgue de bordure) mais aussi bien un secteur quelconque surchargé en biomasse ou en matière organique.

Par ailleurs un fait doit être remarqué, c'est la présence, près de la surface seulement, d'une nappe relativement désoxygénée, apparemment en rapport avec la côte entre MEZE et le MOURRE BLANC qui s'étend jusqu'à la limite des zones B et C et suggère une consommation d'oxygène superficielle. Nous ne disposons pas encore de données suffisantes pour examiner la participation possible du bassin versant à cette formation.

#### 3.4. Etude des coupes.

Seule la campagne des 18-19 juillet, par le nombre de stations prospectées (52) permet de présenter des coupes verticales. Les quatre radiales choisies sont définies sur la figure 6. Ces résultats ne sont donc pas établis sur des moyennes comme précédemment. Cependant la structuration de l'oxygène répondant sensiblement au même schéma à toutes nos campagnes, nous pouvons les considérer comme assez représentatifs de la saison.

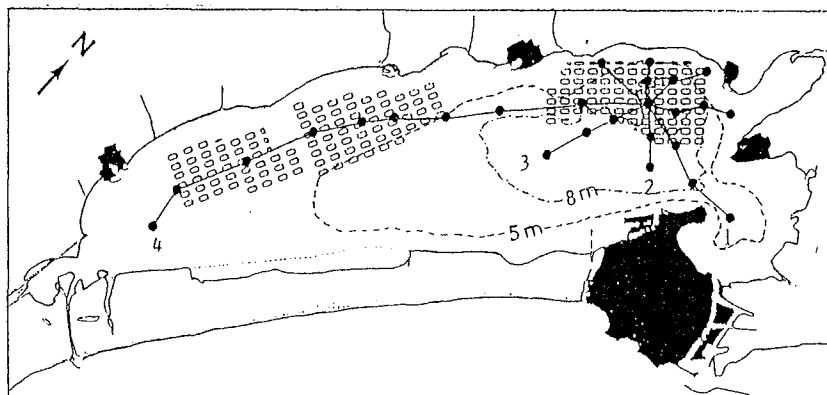


Figure 6 . Coupes hydrologiques pratiquées .

Les coupes pratiquées dans la zone A, la plus profonde, nous conduisent à deux constatations principales (figure 7) :

La remontée de l'appauvrissement en oxygène de l'eau vers la surface se produit sous la zone conchylicole ; elle est le fait de la consommation de l'oxygène par les milliers de tonnes de coquillages en suspension sous les tables et, sur le fond, par les bactéries aérobies minéralisant la matière organique accumulée ainsi que de l'oxydation des produits de la fermentation anaérobie qui s'opère dans le sédiment. Elle disparaît assez rapidement lorsque l'on s'éloigne de la zone à l'extérieur de laquelle on devine l'établissement d'une sédimentation normale des teneurs en oxygène. Comme corollaire on constate que la désoxygénation n'est qu'accessoirement liée à la profondeur ; sur la coupe n° 2 les 4 ppm sont atteints à 4,5 m de profondeur au dessus des fonds de 5,5 m ; ils ne sont atteints à la station 38, hors zone, qu'à 8 m au dessus des fonds de 9 m. Le débordement modéré des faibles valeurs en dehors des élevages en direction des secteurs les plus profonds peut s'expliquer par l'entraînement et l'accumulation dans ces secteurs d'une partie des biodépôts et des vases fluides lorsque les eaux sont agitées ; la simple tendance à plonger des eaux peut aussi en rendre compte.

Une autre conclusion se confirmant à travers nos résultats est que l'obstacle fait aux courants par les structures d'élevage chargées est tel qu'il réduit considérablement le mélange horizontal des eaux de l'étang. On constate en effet, pour plusieurs paramètres, un confinement certain, dans tout le volume des zones conchylicoles, révélé aussi bien par l'accumulation de matière organique sur le fond que par la distribution de l'oxygène, de la ressource alimentaire exprimée en chlorophylle a (TOURNIER 1987) ou des performances de croissance des coquillages meilleures sur le pourtour des zones qu'en leur centre et près de la surface que vers le fond.

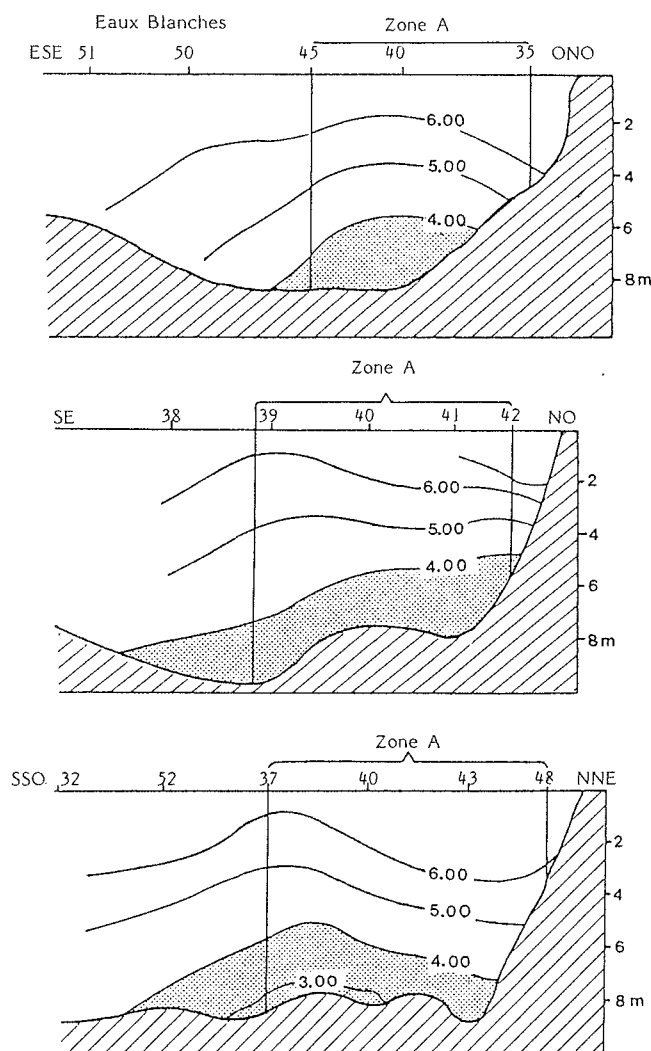


Figure 7 . Coupes 1, 2 et 3 passant par la zone A .

La coupe n°4 (figure 8) présente l'intérêt de passer par les trois zones conchylicoles. Elle synthétise bien les conclusions précédentes à savoir:

- l'appauvrissement des eaux en oxygène dans les zones d'élevage ; les 6,3 ppm y remontent à moins de 2 m alors qu'ils atteignent le fond hors secteurs conchylicoles. En zone B le fond est habituellement strictement occupé, comme dans les deux autres zones, par les eaux les plus pauvres (voir cartes en fin de texte). Dans cette coupe le décalage observé correspond à un mouvement d'eau en provenance de la côte sous l'effet d'un coup de vent de nord,

- l'appauvrissement le plus intense, représentant le risque de malaïgue de fond, s'observe en zone A. Son intensité n'est que partiellement le fait de la profondeur ; elle est aussi à mettre en rapport avec la concentration horizontale des tables, plus rapprochées qu'en zones B et C, et à la longueur des cordes d'élevage bien supérieure, la respiration et la biodéposition y étant au total nettement plus fortes (HAMON et TOURNIER, 1981 et 1986),

- le gradient général, du NE au SO, de richesse en oxygène qui se surimpose aux gradients correspondant aux trois zones, qui avait déjà été défini (TOURNIER, 1982), se retrouve avec des teneurs maximales au fond, dépassant 7 ppm à l'est de la zone C, trois fois supérieures à celles relevées en zone A.

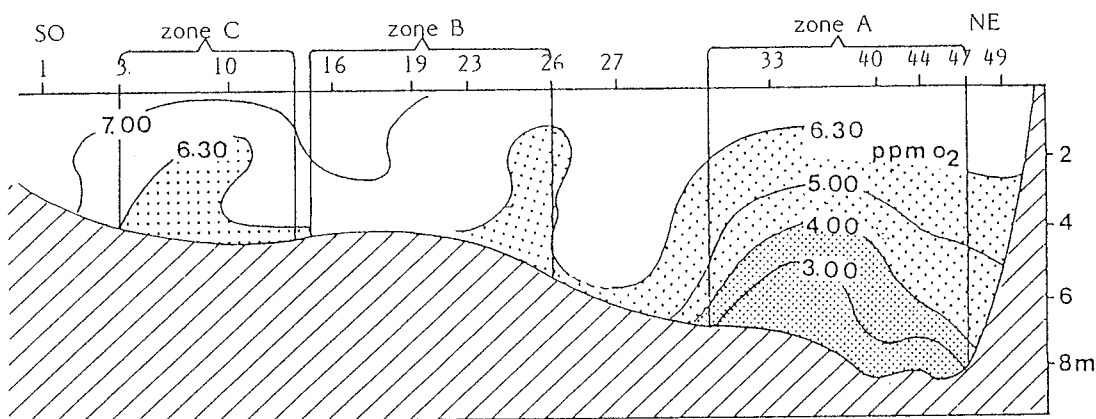


Figure 8 . Coupe 4 passant par les 3 zones conchylicoles .

#### 4. ETUDE DE L'EVOLUTON TEMPORELLE DE L'OXYGENE

Dans le même esprit de synthèse que précédemment nous pouvons fournir une idée de l'évolution de l'oxygène dans le temps d'une part au sein de la masse d'eau sur les stations 43 et 39 pour appréhender les modifications de sa répartition verticale et d'autre part globalement pour chacune des trois zones d'élevage.

Rappelons encore que ces données, comparables entre elles, ne reflètent que des situations diurnes, les baisses nocturnes en oxygène n'ayant pu être étudiées.

#### 4.1. Evolution de la répartition verticale de l'oxygène en zone A.

La figure 9 présente l'évolution de la répartition verticale de l'oxygène mesuré tous les mètres à la station 43, située en zone profonde proche de la côte, et à la station 39 située aussi en zone profonde mais à la lisière sud de la zone A.

Nous voyons d'abord que les profils sont très fluctuants : ils changent rapidement d'aspect, par exemple entre le 25 et le 28 juillet où en trois jours le fort déficit près du fond disparaît. Il faut noter que de tels changements sont le résultat de deux phénomènes concomitants : d'une part la réoxygénation des eaux de surface à la faveur du vent, d'autre part, les teneurs se trouvant réhaussées sur toute la tranche d'eau, le brassage vertical.

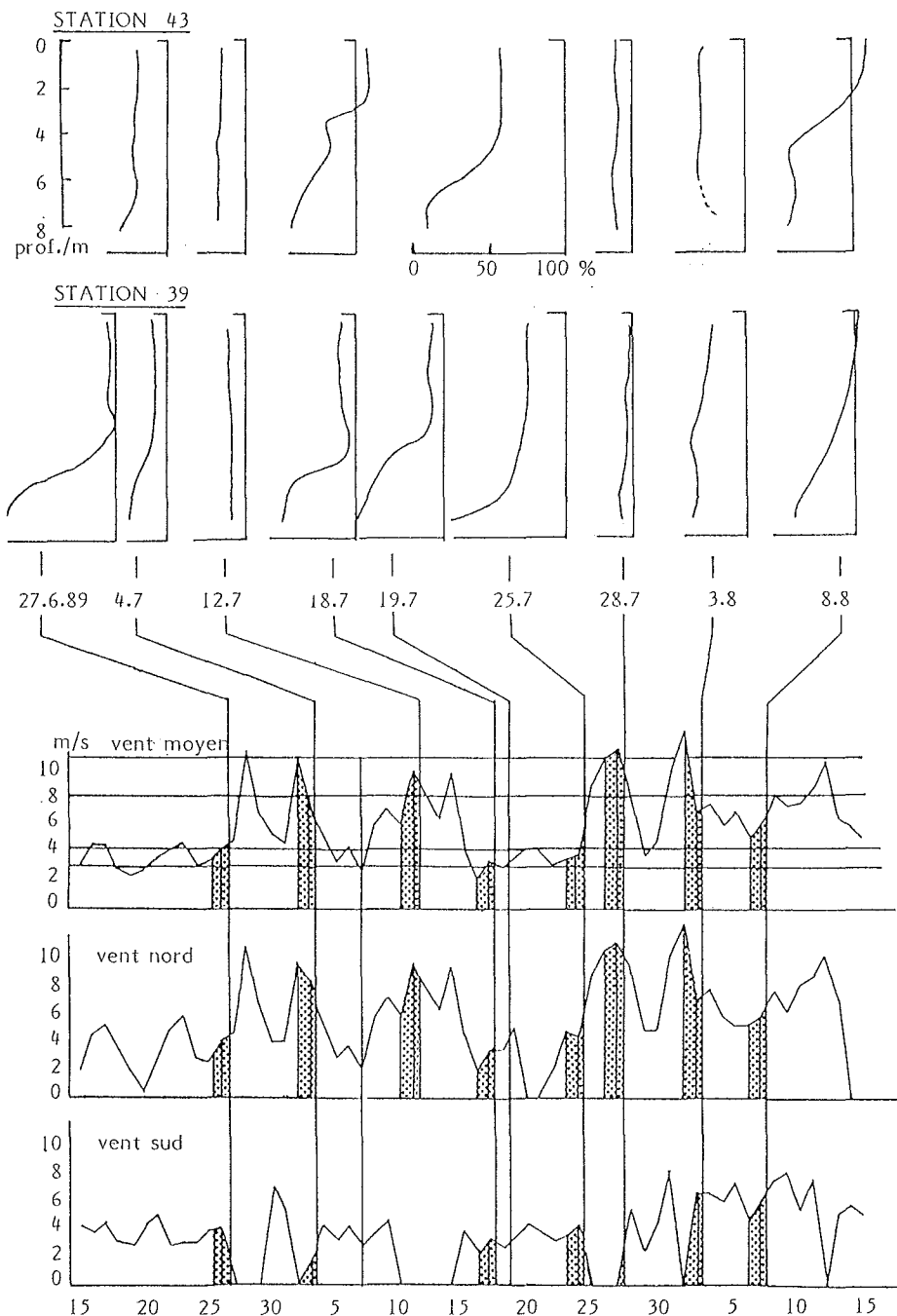


Figure 9 . Evolution de la répartition verticale de l'oxygène aux stations 39 et 43 .

D'ailleurs nous ne voyons pas s'établir de véritable oxycline, même dans ce secteur dit profond de l'étang, et si une consommation importante d'oxygène est révélée au niveau des sédiments il n'existe apparemment pas de nette stratification des eaux sur toute cette période. Loin de pouvoir imaginer dans l'étang une stratification semblable à celle classiquement observée dans les lacs ou le milieu océanique, il convient de rappeler que cette lagune, à l'échelle, à la forme d'une "flaque" avec ses 10 m de profondeur maximale pour ses 17000 m de longueur. La forme prise par les profils, particulièrement au sein des zones conchylicoles, est plus le fait de la consommation in situ d'oxygène par les mollusques et par les sédiments que de l'établissement d'une stratification hydrologique durable, reposant notamment sur l'absence d'échanges verticaux.

Il est de fait qu'en l'absence prolongée de vent et dans le cas extrême du développement d'une malaïgue de fond, l'horizon anoxique progresse lentement, dans les zones conchylicoles essentiellement, du fond vers la surface, causant asphyxie et intoxication d'abord sur le bas des cordes d'élevage. Mais les résultats présentés ici nous montrent que l'appauvrissement en oxygène se répercute alors jusqu'en surface, comme par exemple entre le 12 et le 25 juillet ne laissant pas subsister de couche superficielle bien aérée qui déterminerait une véritable oxycline à sa base. Cet effet se conçoit si l'on considère que le mécanisme du processus dépend de deux actions : une consommation intense d'oxygène par le fond et dans la masse de l'eau et, à l'opposé, une diminution d'apport d'oxygène de l'air au niveau de la surface.

Lorsque le vent reprend, surtout avec une certaine violence, l'oxygénation se rétablit rapidement jusqu'au fond. Quelle est dans ce rétablissement la part du brassage vertical? Quelle est celle de l'entraînement en surface des eaux de fond sous l'effet d'un upwelling côtier? Il est difficile de répondre à cette question mais quelques indications nous sont données :

- la valeur moyenne des teneurs ou plus précisément le pourcentage de saturation est généralement plus faible à la station 43, pourtant plus proche de la côte, qu'à la station 39. Cela pourrait signaler un appel d'eau de fond sur l'ensemble de la zone A en direction des faibles profondeurs côtières sous l'effet du vent dominant de nord. Mais il n'est pas possible de conclure dans ce sens, la faiblesse des teneurs à la station 43 s'expliquant aussi par le fait qu'elle est totalement à l'intérieur des tables contrairement à la station 39,

- quand une tramontane violente se lève après démarrage d'une crise dystrophique, les eaux turbides blanchâtres sont chassées sans doute principalement en surface vers le sud. C'est ce qui a été montré par photographie aérienne (ARMENGAU et SEGALA 1983), mais si ce mouvement se propage sur une partie des zones de culture, il est surtout net et continu dans les grands couloirs entre tables,

- il est possible que les tables ou des groupes de tables, en raison de leur densité et de leur forme jouent le rôle d'une côte artificielle dans des mouvements d'upwelling locaux. L'accumulation de biodépôts concentrés à la lisière sud de la zone B a conduit à émettre cette hypothèse (TOURNIER 1987, PENA, 1989).

En résumé il semblerait que le brassage s'effectue à la fois par un mouvement ample intéressant de grandes zones en cas de vent fort et durable, principalement dans les

couloirs, et par des mouvements multiples et localisés peut-être au niveau de chaque table. Selon la répartition des vents sur l'étang il est possible que certains secteurs soient mieux brassés. L'incertitude sera levée par la réalisation de quelques coupes détaillées relevées par vent moyen. Avec les seules informations de la figure 9 nous constatons qu'à ces deux stations les évolutions du paramètre étudié sont très semblables et surtout simultanées.

Notons encore qu'en dehors des zones conchylicoles seulement et dans les régions occupées par des herbiers, on observe fréquemment de jour, près du fond, les plus fortes teneurs en oxygène en raison de l'activité photosynthétique de ces derniers.

L'étroite relation qui existe entre le vent et la réoxygénation des eaux en été a déjà été montrée sur nos données de 1987 et 1988 (TOURNIER et LASRAM 1989) (figure 10) nous conduisant à estimer qu'une malaïgue pouvait être engendrée quand les vitesses moyennes journalières des vents sont inférieures à 5 m/s environ pendant une quinzaine de jours. Il est intéressant, à la faveur de ces nouveaux résultats, d'essayer de préciser l'effet du vent sur la forme des profils.

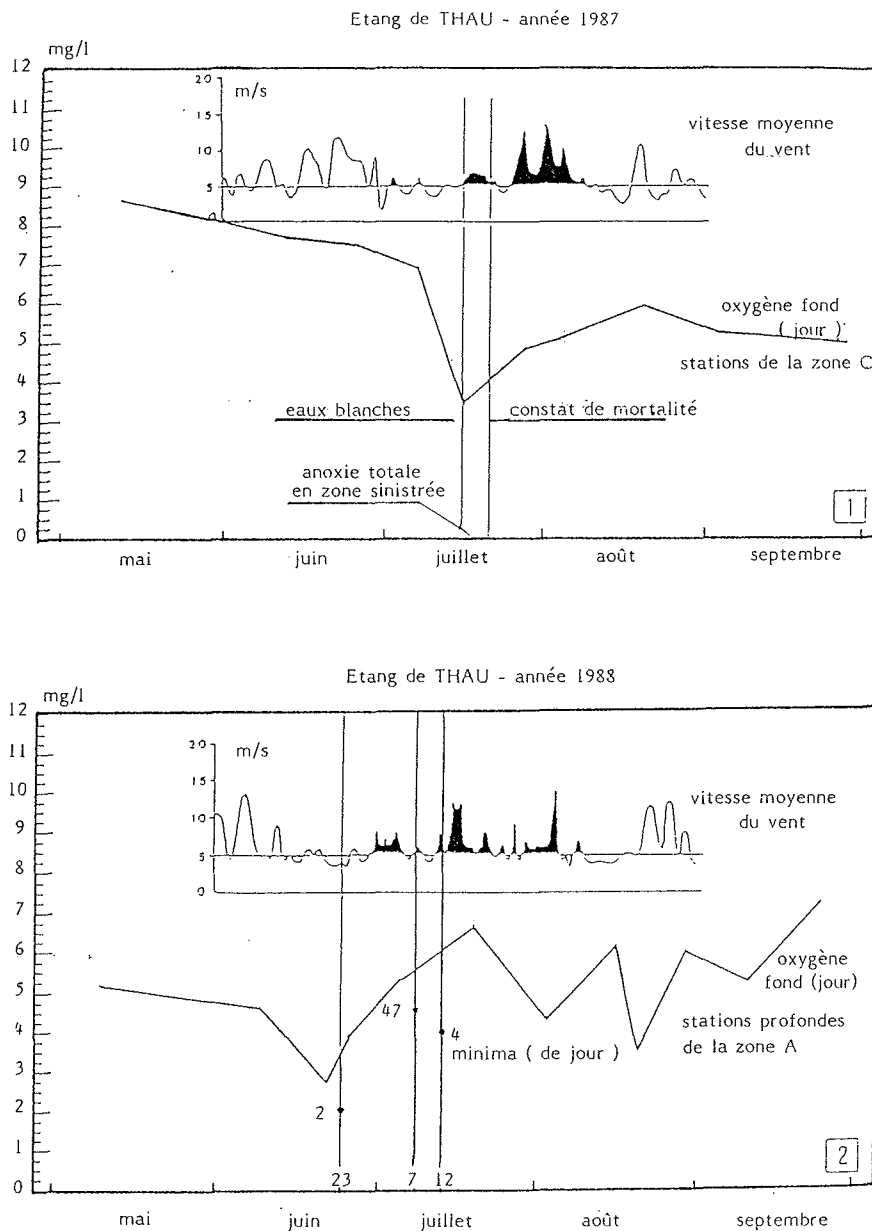


Figure 10 . Relation vent-réoxygénation des eaux .



#### 4.2. Etude de l'influence du vent.

Si l'on compare l'évolution des profils verticaux avec la répartition des vents (figure 9) nous parvenons à plusieurs conclusions :

4.2.1. Le brassage et la réoxygénation des eaux jusqu'au fond se réalisent lorsque le vent moyen journalier (à la station météorologique de SETE) est supérieur à 8 m/sec. C'est le cas les 4, 12 et 28 juillet. Dans ce premier cas, la meilleure corrélation s'établit en prenant en compte le vent des 36 heures précédant la situation hydrologique observée. Toujours à ces trois dates, la composante principale du vent est de secteur nord, ce qui conforte l'hypothèse du brassage par upwelling au niveau de la côte nord ou de la structure abrupte des tables, alors que les vents de sud sont nuls ou très faibles. Cela révèle l'efficacité majeure de la tramontane et du mistral.

4.2.2. A l'inverse, un appauvrissement en oxygène accusé s'instaure près du fond et se répercute progressivement jusqu'en surface lorsque le vent s'affaiblit à moins de 4 m/sec. C'est ce qui s'observe le 27 juin et les 18, 19 et 25 juillet. Dans ce deuxième cas, le déficit en oxygène par rapport à la saturation près du fond ( $6,60 \pm 0,04$  mg/l) atteint 75 p. cent le 25 juillet après 9,5 jours de vent moyen compris entre 3 et 4 m/sec. ; il est de 70 p. cent le 27 juin après 12,5 jours de vent compris entre 2,5 et 4,5 m/sec., mais il est encore de 55 p. cent le 19 juillet après 3,5 jours de vent faible et de 45 p. cent le 18 juillet après 2,5 jours seulement de vent inférieur à 3,5 m/sec. Ainsi, au moins près du fond, la tombée du vent se marque en quelques heures sur les teneurs en oxygène et se répercute en quelques jours jusqu'en surface (voir l'évolution à la station 39 du 12 au 27 juillet). Ces résultats montrent encore la rapidité avec laquelle l'anoxie peut être atteinte en cas d'absence totale d'agitation. Il apparaît aussi qu'en l'absence de malaïgue établie, la réoxygénation par un coup de vent est encore plus rapide (voir l'évolution aux deux stations entre le 25 et le 28 juillet où l'on passe d'un déficit de 75 p. cent à une légère sursaturation). Lorsqu'une malaïgue s'est déclanchée, rappelons que l'effet du premier coup de vent est de déplacer des masses d'eaux devenues dangereuses pour les mollusques qu'elles atteignent, après quoi l'on retrouve l'effet bénéfique de l'agitation si le vent persiste.

4.2.3. Les profils des 3 et 8 août correspondent à un troisième cas, celui des situations intermédiaires où la vitesse moyenne du vent est comprise entre 4 et 8 m/sec. : le déficit en oxygène n'est pas très important près du fond (30–40 p. cent), il est à peine plus faible qu'en surface (20 p. cent), notamment le 3 août. Cela montre qu'un vent moyen de 7 à 8 m/sec. n'est pas suffisant pour forcer de manière notable une importante réintroduction d'oxygène dans l'eau mais assure cependant un certain brassage vertical. La situation relevée le 8 août appelle un commentaire particulier car elle dénote une forte sursaturation en surface aux deux stations : l'analyse des vents montre les jours précédant les observations que la composante de secteur sud du vent est importante relativement au vent moyen (elle est d'ailleurs la plus forte sur les 36 heures pour notre série d'informations) ; il est très vraisemblable que la couche supérieure d'eau bien aérée, libre de tables d'élevage,

située au sud de la zone A, s'est trouvée poussée vers le nord sous l'effet du vent, circulant relativement bien, même au niveau des tables où les cordes ne sont chargées de mollusques qu'à partir de 50 cm à 1 m en dessous de la surface. Cette saturation superficielle serait ainsi due à un mouvement horizontal des eaux vers le nord.

Le 3 août cet effet n'est pas sensible, sans doute du fait que la composante de vent de sud est plus faible par rapport à celle de vent de nord, un courant de surface portant au nord ne pouvant pas être engendré dans ces conditions.

### 4.3 Relation entre déficit en oxygène près du fond et vent

La corrélation présentée figure 11 est une première approche. Elle concerne le déficit en oxygène à 1 m du fond en zone A, de jour, en fonction de la vitesse moyenne du vent sur les 36 heures avant mesures.

La "droite", non représentée, est exclue car elle indiquerait que l'anoxie ne serait pas encore atteinte lorsque le vent devient nul. Nous savons en effet qu'en raison de l'importance des consommateurs d'oxygène dans l'étang, le déséquilibre entre la disparition résultante de l'oxygène dans l'eau et l'apport atmosphérique de ce dernier, au début d'une malaïgue, se crée avant cessation totale du vent.

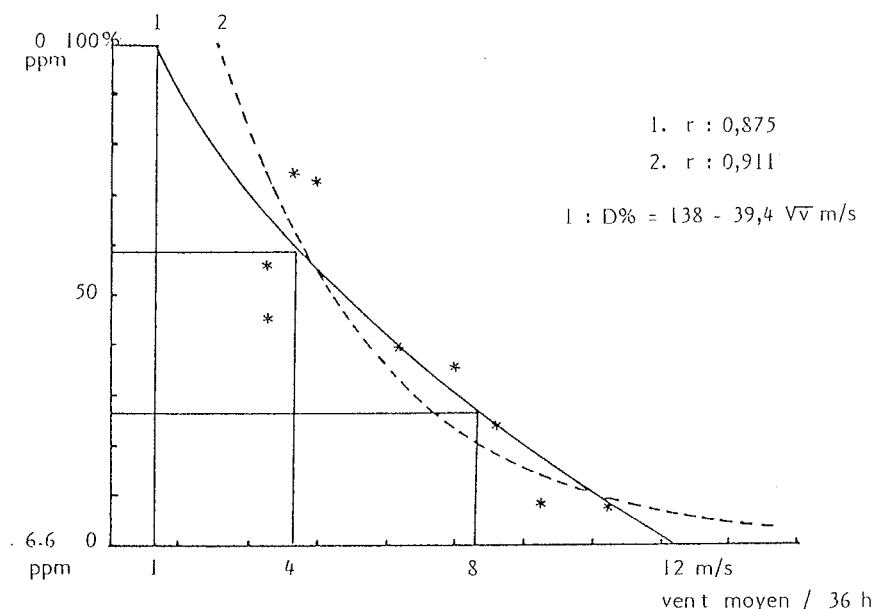


Figure 11 . Corrélation entre le déficit en oxygène et la vitesse moyenne du vent .

La courbe 2, bien qu'offrant un excellent coefficient de corrélation, est exclue elle aussi car elle n'indique pas que la saturation de l'eau peut être observée pour des vents de l'ordre de 12 m/sec. ( voir profils des 12 et 28 juillet).

Nous retenons ainsi en première approximation la courbe 1 qui montre que :

- la saturation est atteinte jusqu'au fond pour des vents de 12 m/sec,
- de 8 à 4 m/sec nous sommes dans une situation intermédiaire rencontrée 28 jours sur 60 en été 1989, correspondant à un déficit en oxygène près du fond allant de 25 à

60 p. cent, non dangereuse biologiquement et pouvant se restaurer facilement si l'agitation se renforce,

– l'anoxie (déficit de 100 p. cent) est atteinte quand le vent moyen tombe à 1 m/sec.

Le seuil d'alerte est à fixer vers 2 m/sec (80 p. cent de déficit), valeur non atteinte en 1989, en l'absence de malaïgue.

De nuit, signalons que l'anoxie est apparue, épisodiquement et localement sur le fond même, des mortalités de palourdes ayant été constatées à 7 mètres au bord sud de la zone A (DUCLERC, communication personnelle).

Bien entendu la corrélation présentée ci-dessus devrait être modulée par la prise en compte d'autres paramètres que le vent : variation de la biomasse et de sa respiration, degré de la fermentation aérobie et anaérobie des sédiments, état de prolifération ou de dégradation des algues et du plancton. Il convient cependant de souligner que la relation trouvée est très hautement significative ce qui montre bien que le vent est, de beaucoup, le facteur explicatif prépondérant.

En ce qui concerne l'effet de la durée du vent, en particulier lorsqu'il demeure faible, nos données sont insuffisantes pour nous permettre de l'intégrer dans la formulation. Nous avons toutefois constaté que lorsque le vent tombe entre 3 et 4 m/sec, la répercussion près du fond est d'abord très rapide (15 p. cent de déficit en oxygène en 36 heures) plus lente ensuite, 15 jours paraissant nécessaires pour déclencher une malaïgue de fond durable. Mais assez rapidement aussi l'ensemble de la couche d'eau se trouve affectée jusqu'à la surface où un net déficit en oxygène se manifeste moins de 8 jours après l'accalmie du vent, comme cela se trouve illustré à la station 39 du 18 au 25 juillet (figure 9). En revanche lorsque le vent tombe entre 1 et 2 m/sec. l'évolution vers la malaïgue peut être extrêmement rapide, l'anoxie devant apparaître près du fond en quelques heures et se propager quelques heures plus tard seulement jusqu'en surface. Le processus qui conduit à une malaïgue n'est donc sans doute pas lié à la durée du vent par une relation linéaire mais vraisemblablement par une loi exponentielle. La diminution plus ou moins rapide de l'activité bactérienne aérobie selon la concentration du milieu en oxygène doit rendre compte, au moins en partie, de cet aspect du phénomène.

Au vu de ces résultats, il apparaît que pour améliorer notre connaissance de la relation vent-oxygène, en particulier pour intégrer la durée du vent et les phénomènes particuliers liés aux heures d'obscurité, il serait nécessaire de disposer à la fois dans l'étang d'une station météorologique et d'oxymètres enregistreurs.

Nos données sont insuffisantes pour établir une corrélation entre vent et oxygénation en subsurface mais nous pouvons indiquer que sa courbe représentative est vraisemblablement de même forme que la précédente (figure 11) et se situe en dessous.

#### 4.4 Comparaison de l'évolution entre la zone A et les zones B et C

La figure 12 où l'on retrouve différents éléments déjà étudiés ne suscite que quelques remarques :

Les différences entre les moyennes de surface et de fond des températures et des salinités sont toujours très faibles ce qui correspond à l'absence de discontinuités verticales marquées.

La salinité augmente très régulièrement. Elle est à peine influencée par les rares et très faibles précipitations.

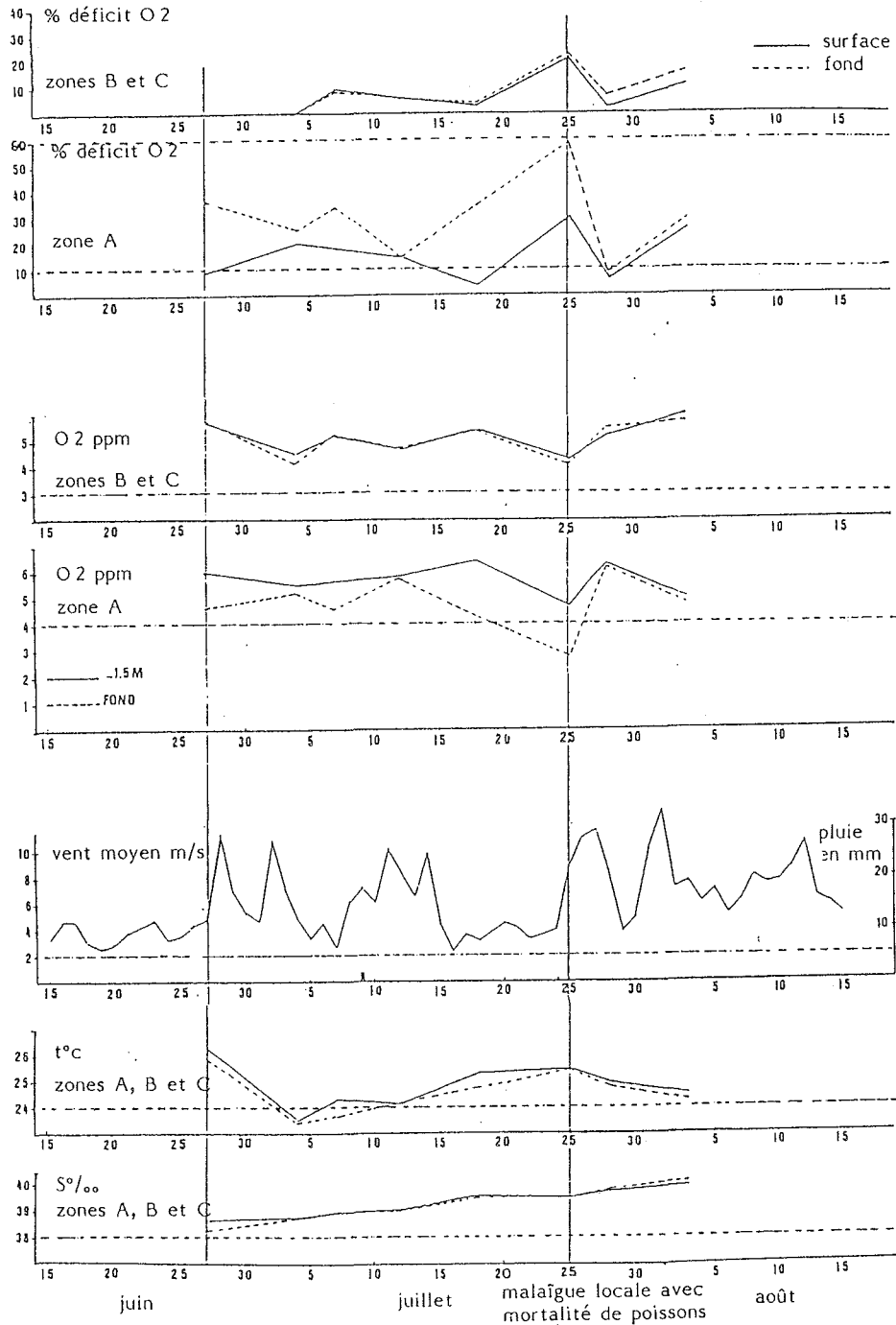


Figure 12 : Evolution des paramètres durant l'été.

La température fluctue principalement avec le vent sous l'effet duquel elle s'abaisse passagèrement.

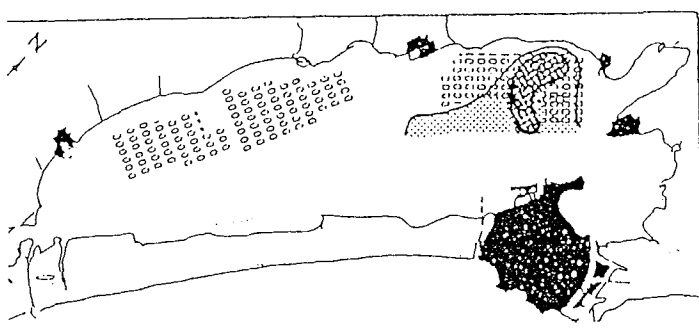
En ce qui concerne l'oxygène, le déficit moyen engendré près du fond par l'affaiblissement du vent est beaucoup plus marqué en zone A qu'en zones B et C (60 % contre 23 % le 25 juillet). Il en est d'ailleurs de même en surface (30 % contre 20 %) ce qui montre bien que cette différence n'est pas seulement le fait de la profondeur supérieure mais aussi de la plus grande densité des cultures en zone A.

Dans ces conditions, lorsqu'une malaïgue se déclare en zone B ou C à partir d'un secteur très localisé où se révèle une intense demande en oxygène, alors que rien ne se produit en zone A, il serait intéressant de suivre le mécanisme de contamination qui conduit à l'extention de la région atteinte. Les mortalités occasionnées aggravant la situation et les émanations du sédiment sont à mettre en cause.

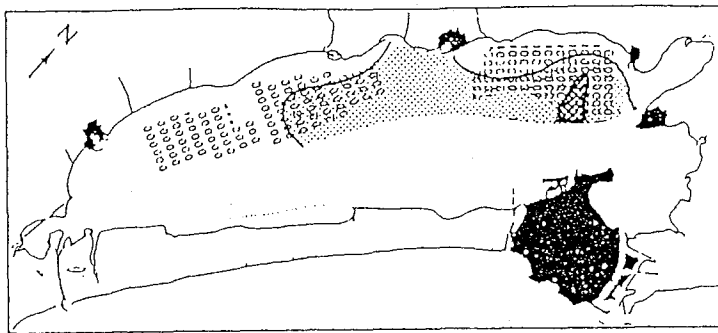
## 5. DIFFERENTS ASPECTS DE LA REPARTITION DE L'OXYGENE EN 1988 et 1989

Les cartographies moyennes présentées au chapitre 2 ont permis de délimiter les zones présentant le plus de risque pour les élevages, mais elles n'indiquent pas la variabilité de la configuration. C'est pourquoi nous présentons ci-après les différentes cartes de répartition de l'oxygène près de la surface et du fond établies en 1988 et 1989.

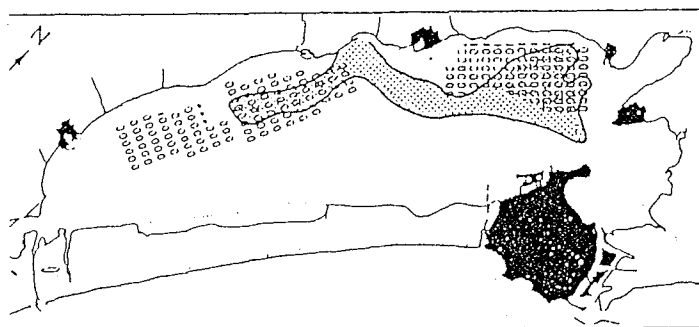
En 1988 (figure 13) nous n'avons pas noté de désoxygénation critique. On remarque cependant un abaissement important le 23 juin en secteur profond de la zone A.



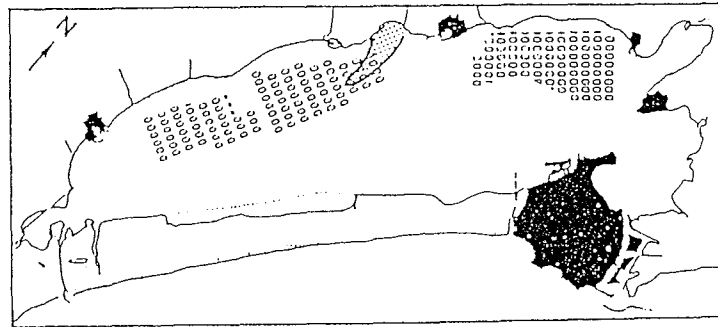
23.6.88 . Fond - 1,5 m. min. = 2 ppm (-71%)





12.7.88 . Fond - 1 m. min. = 3 ppm (-40%)



7.7.88 . Fond - 1,5 m. min. = 4,7 ppm (-33%)



7.7.88 . Surface - 1 m. min. = 5,9 ppm (-13%)

Figure 13 . Cartographie établie en 1988 :  < 4 ppm (-40%~)  4 à 6 ppm (-10 à -40%)

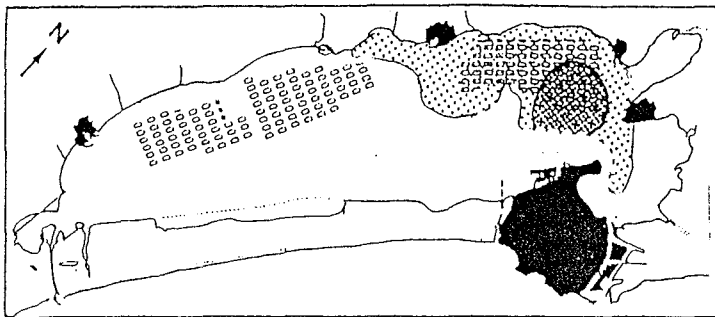
En surface quelques mesures ont montré qu'un abaissement moins marqué se produit dans les zones conchyliques. Le 7 juillet l'abaissement le plus accusé se retrouve sur la partie des grands fonds occupés par la zone A ; deux digitations peu oxygénées prennent aussi racine sur l'anse de MEZE dont l'une influence la zone B. Les zones peu profondes occupées par des herbiers, où la production d'oxygène est importante dans un faible volume d'eau, près de MARSEILLAN, sont sursaturées. Près de la surface le minimum se situe au coin nord de la zone B et semble correspondre à un mouvement superficiel affectant principalement cette zone. Le 12 juillet un déficit en oxygène localisé près du fond s'établit, toujours en zone A, mais un second, moindre, s'étale en englobant les deux tiers de la zone B et l'anse de MEZE.

En 1989 nous disposons à chaque campagne de cartes de fond et de surface (figures 14 et 15).

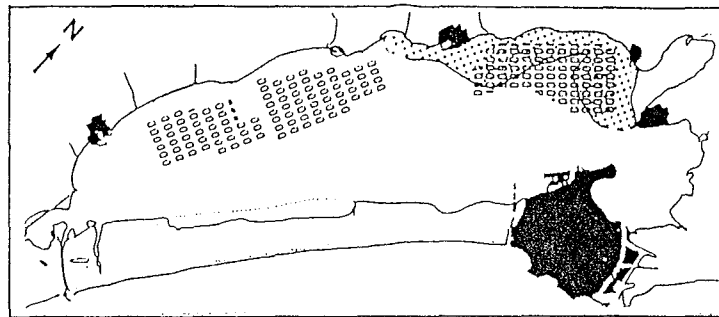
Si l'on rapproche l'examen de ces cartes de l'étude des profils présentés en figure 9, nous voyons que chaque fois que le vent faiblit en dessous de 3 m/sec environ, un secteur où les teneurs en oxygène tombent à moins de 4 ppm (plus de 40 p. cent de déficit) se constitue très rapidement près du fond en zone A. C'est le cas les 27 juin, 7, 18 et 25 juillet. Près de la surface, d'aussi faibles teneurs n'apparaissent qu'une fois, le 25 juillet, toujours en zone A, la seule fois où le vent s'est maintenu durablement (10 jours) à moins de 4 m/sec (3,5 m/sec en moyenne). Cela montre que, par vent faible, une légère baisse en oxygène près du fond demande quelques jours pour se répercuter en surface. Par vent très faible, lorsqu'un fond tend vers l'anoxie, cette répercussion est quasiment immédiate. D'ailleurs le 25 juillet les minimas mesurés sont très semblables au fond (0,8 ppm) et en surface (0,9 ppm) et des mortalités de poissons ont été constatées près de la côte. Lorsque l'oxygénation chute en dessous d'un certain seuil, la contamination des masses d'eau susjacentes et avoisinantes s'accélère par suite des mortalités provoquées.

Nous remarquons par ailleurs que la zonation du déficit en oxygène est toujours semblable aux deux niveaux et se calque sensiblement sur les zones conchyliques. La zone A est généralement la plus affectée et la zone C le moins (de jour).

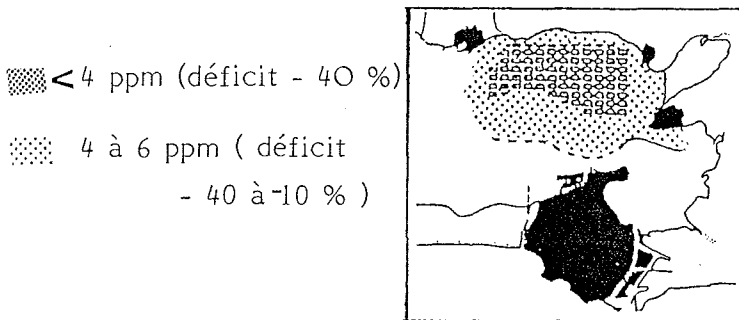
Lorsque le vent vient de souffler assez fort la répartition de l'oxygène est beaucoup moins contrastée. C'est le cas les 12, et 28 juillet et 3 août où les eaux ont été plus ou moins réoxygénées mais aussi mélangées par des mouvements latéraux.



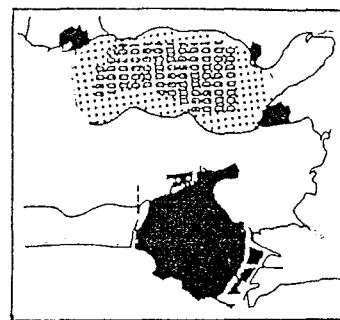
27.6.89 min. : 2,3 ppm ( - 65 % )



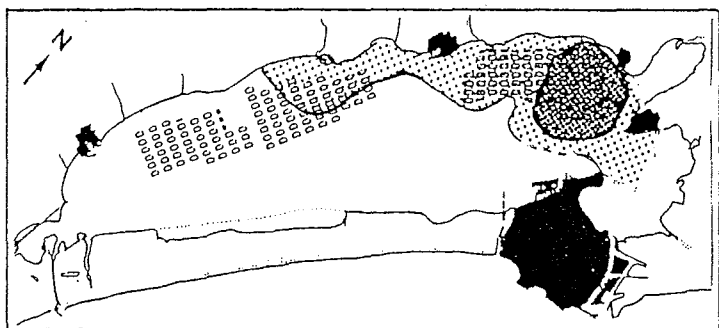
min. : 5,7 ppm ( - 14 % )



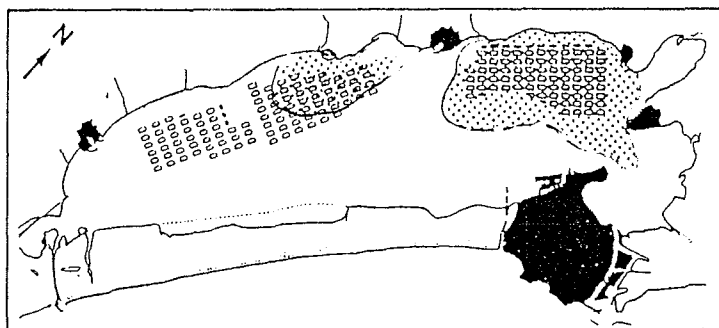
4.7.89 min. : 4,1 ppm ( - 38 % )



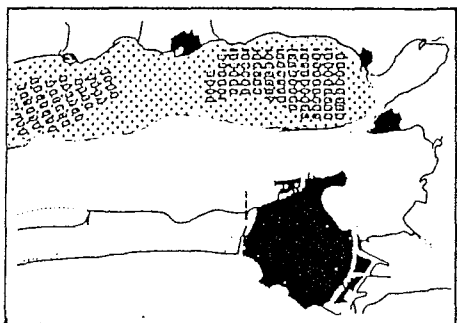
min. : 4,9 ppm ( - 26 % )



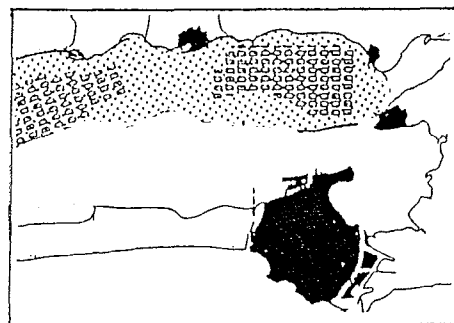
7.7.89 min. : 3,4 ppm ( - 48 % )



min. 5,4 ppm ( - 18 % )

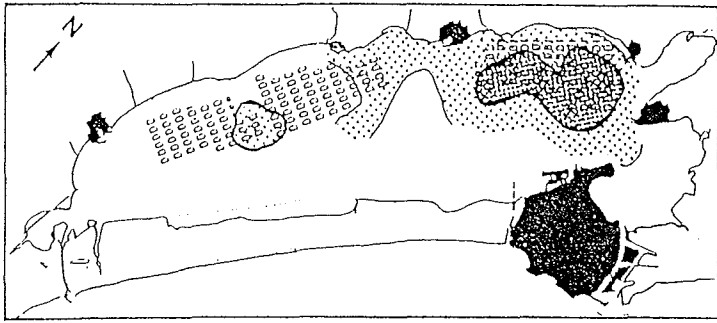


12.7.89 min. : 5,5 ppm ( - 17 % )

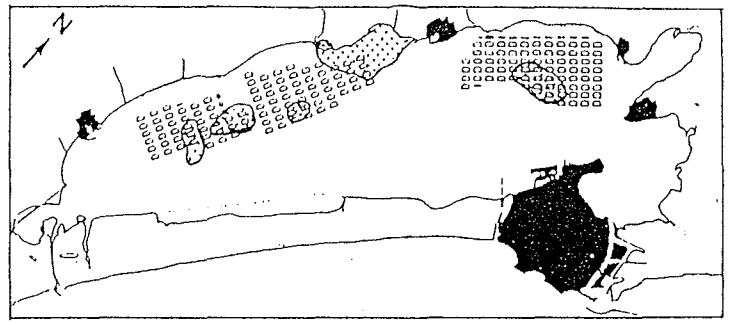


min. : 5,5 ppm ( - 17 % )

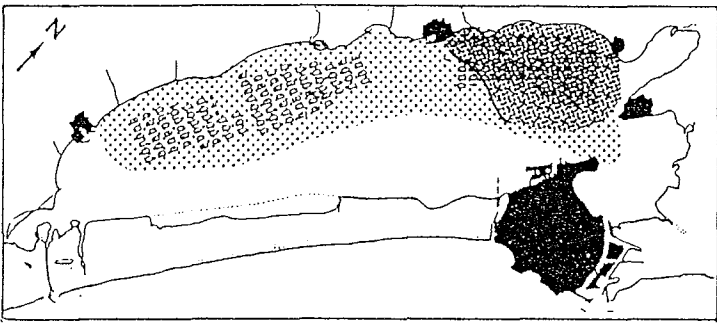
Figure 14 . Répartition de l'oxygène à 1 m. du fond ( à gauche ) et à 1,5 m. en dessous de la surface ( à droite ) .



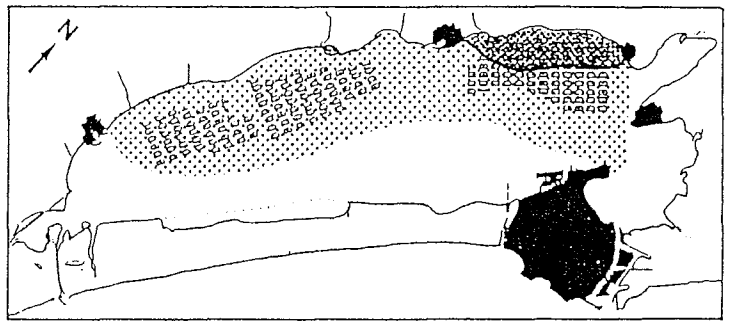
18.7.89 min. : 2,5 ppm ( - 62 % )



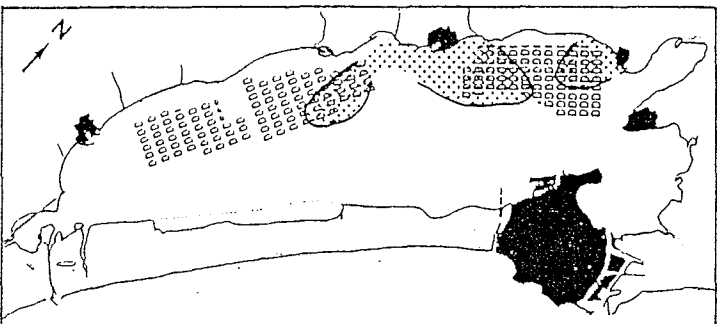
min. : 5,7 ppm ( - 14 % )



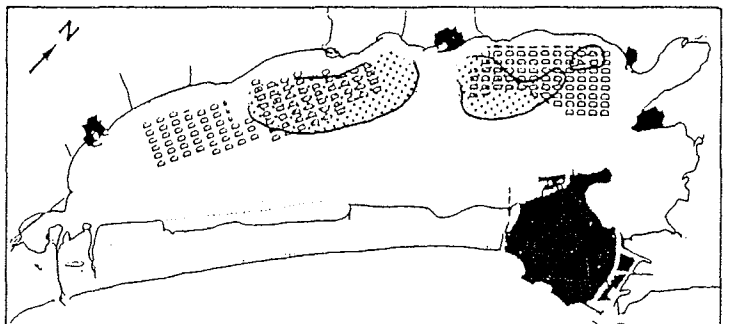
25.7.89 min. : 0,8 ppm ( - 88 % )



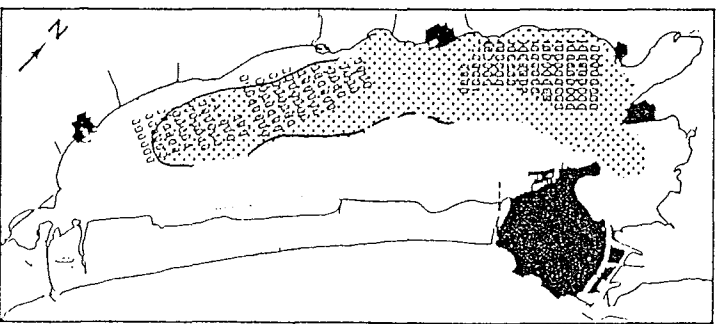
min. : 0,9 ppm ( - 86 % )



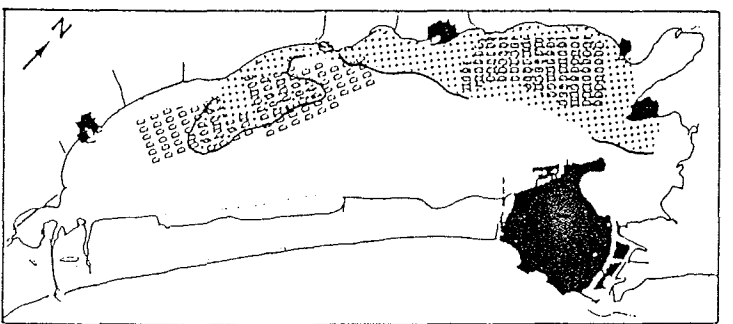
28.7.89 min. : 5,3 ppm ( - 20 % )



min. : 5,4 ppm ( - 18 % )



3.8.89 min. : 4 ppm ( - 39 % )



min. : 4,4 ppm ( - 33 % )

Figure 15 . Répartition de l'oxygène à 1 mètre du fond ( à gauche ) et à 1,5 m. en dessous de la surface ( à droite ).



## 6. CONCLUSION

Le vent, principalement de secteur nord, est le facteur essentiel de l'équilibre en oxygène des eaux de l'étang dont il assure l'aération forcée ainsi que le brassage vertical et horizontal.

Lorsqu'en été il faiblit aux environs de 2 m/sec. pendant 36 heures, ce qui doit pouvoir être considéré comme un seuil d'alerte, l'anoxie peut s'installer près du fond dans les zones conchylicoles.

S'il s'agit d'un épisode passager avec reprise immédiate d'un vent fort, seul le bas des cordes d'élevage se trouve affecté par des mortalités.

Si, au contraire, la situation se maintient, le défaut d'oxygène se propage extrêmement vite jusqu'à la surface.

Il semble, d'après les résultats acquis en 1988 et en 1989 qu'un tel évènement menace en premier lieu la zone A où la sonde est relativement importante, mais il s'est aussi développé exclusivement en zones B et C où il faut admettre qu'alors une surcharge locale en matière réductrice ou en consommateurs vivants s'était constituée.

Lorsque le vent demeure faible, sans toutefois tomber aussi bas, une anoxie momentanée se manifeste peut-être en cours de nuit. Cela explique les faibles mortalités ou certains déficits de croissance observés généralement dans le bas des cordes, en l'absence de malaïgue reconnue. Pour préciser cet effet ainsi que sa corrélation avec le vent et la profondeur, des données d'enregistrement en continu seraient nécessaires, ainsi que l'analyse in situ de l'hydrogène sulfuré.

Ces résultats pourront peut-être aider à chiffrer le flux d'oxygène nécessaire entre atmosphère et eau des zones d'élevage pour y maintenir l'ambiance favorable à la vie des mollusques et interdire le démarrage des fermentations anaérobies près du fond. Mais encore faut-il identifier les différents facteurs correspondant à cette demande en oxygène et chiffrer chacun d'entre eux si l'on veut savoir sur lesquels il serait judicieux d'agir en priorité pour éviter les malaïgues.

Ces différents facteurs consommateurs d'oxygène nous semble être essentiellement :

- les biodépôts sous tables, siège d'une fermentation aérobie et en cas d'anoxie responsables de la demande en oxygène des produits réducteurs toxiques de la fermentation anaérobie, aspect éclairé par les résultats de GRENZ (thèse 1989),

- la respiration des mollusques et des épibiontes fixés sur les cordes d'élevage. Des mesures in situ sont prévues au programme du Laboratoire. En cas de malaïgue, la demande en oxygène du fait de ce matériel partiellement ou totalement tué doit augmenter énormément et brutalement,

- les champs d'algues lorsqu'il s'en trouve à proximité des tables conchylicoles et surtout s'ils viennent à se dégrader massivement du fait de leur cycle biologique ou de l'évolution climatique.

– les hécatombes planctoniques et la respiration du plancton vivant dont l'évolution annuelle est déjà relativement connue à travers nos travaux sur la chlorophylle a.

Chacun de ces quatre paramètres devrait être chiffré d'une part de jour et de nuit, d'autre part en secteur profond de la zone A, en zones B ou C, moins profondes, ainsi que plus près de la côte, face à une concentration de mas.

Une autre optique consisterait à envisager l'apport artificiel de l'air nécessaire à la survie des mollusques au niveau de chaque table, pendant la durée de la crise dystrophique.

## BIBLIOGRAPHIE

- AMANIEU M., BALEUX B., GUELORGET O., et MICHEL P., 1975. Etude biologique et hydrologique d'une crise dystrophique (malaïgue) dans l'étang du Prévost à Palavas (Hérault). *Vie et Milieu*, XXV, 2-B, pp. 175-204, 15 fig., 2 tabl., 5 réf.
- ARMANGAU C. et SEGALA B., 1983. Enseignement du suivi par photographies aériennes de l'évolution de la malaïgue dans l'étang de Thau. *Rapp. Comm. INT. Mer Médit.*, 28-6, pp. 377-378, 7 réf.
- BALEUX B. et TROUSSELLIER M., 1981. Effets des apports polluants bactériens sur les composantes (eau, sédiment, production) d'un écosystème lagunaire méditerranéen. *Rapp. Comm. Int. Médit.*, 27-4, pp. 183-184, 4 réf.
- CAUMETTE P. et BALEUX B., 1980. Etude d'une eau rouge due à la prolifération de bactéries photosynthétiques (étang du Prévost, France). *Mar. Biol.* 56 (3), pp. 183-194, 12 fig., 20 réf.
- FRISONI G.F. et CEJPA A.M., 1989. La malaïgue dans les étangs littoraux du Languedoc-Roussillon. Rapport CEPRALMAR IARE.
- GADEL F., MARTIN R. et DUMAS J.P., 1983. Origine, distribution et évolution de la matière organique dans les dépôts de deux écosystèmes lagunaires méditerranéens. *Rapp. comm. int. Mer Médit.* 28, 7 (1983).
- GEHANT P. et JEANNERET H., 1985. Etude sur l'impact des activités aquacoles dans l'étang de Thau. CEPRALMAR/CNABRL, sept. 1985.
- GRENZ C., 1989. Quantification et destinée de la biodéposition en zones de production conchylicole intensive en méditerranée. Thèse Université d'Aix Marseille.
- GUELORGET O. et PERTHUISOT J.P., 1983. Le domaine paralique. Expressions géologiques et économiques du confinement. *Trav. lab. Géol. E.N.S.*, 16, 136 p.
- HAMON P.Y. et TOURNIER H., 1981. Estimation de la biomasse en culture dans l'étang de Thau (été 1980). *Science et pêche n° 313. Bull. ISTPM.*
- HAMON P.Y. et TOURNIER H., 1986. Evolution de la biomasse de mollusques en élevage dans l'étang de Thau de 1980 à 1984. *Rev. Trav. Inst. Pêches marit.* 48 (1 et 2).
- PENA G., 1989. Sels nutritifs et micropolluants métalliques dans un écosystème lagunaire : l'étang de Thau. Thèse USTL Montpellier.

- SAMMARITANO V., 1989. Etude sur la malaïgue de l'étang de Thau. DEUST Science et Environnement USTL Montpellier.
- SORNIN J.M., FEUILLET M., HERAL M. et DESLOUS-PAOLI J.M., 1983. Effet des biodépôts de l'huître *Crassostrea gigas* sur l'accumulation de matières organiques dans les parcs du bassin de Marennes-Oléron. J. moll. Stud. (1983) suppt. 12 A. 185-197.
- TOURNIER H., HAMON P.Y. et ARNAUD P., 1979. Développement de la "malaïgue" en 1975 dans l'étang de Thau. Rapp. Comm. int. Mer Médit., 25-26/03, pp. 103-104.
- TOURNIER H., HAMON P.Y. et LANDREIN S., 1982. Synthèse des observations réalisées par l'ISTPM sur les eaux et le plancton de l'étang de Thau de 1974 à 1980. Rev. Trav. Inst. Pêches marit. 45 (4).
- TOURNIER H., LASRAM A. et PICHOT Y., 1989. Dévasement expérimental de tables conchylicoles dans l'étang de Thau. Impact sur le milieu et sur les mollusques. Rapport IFREMER DRV-89-016/RA/Sète.
- TOURNIER H. et PICHOT Y., 1987. Répartition de la chlorophylle a dans l'étang de Thau : richesse nutritive pour les mollusques d'élevage. Rev. Trav. Inst. Pêches marit. 49 (1 et 2).