

NOUVELLES OBSERVATIONS SUR LE SYSTEME PRODUCTION-REGENERATION DE L'ETANG DE BERRE (LITTORAL MEDITERRANEEN)

Monique MINAS

Centre d'Océanologie de Marseille, Faculté des Sciences de Luminy, 13288 Marseille Cedex 09, France

ABSTRACT: General hydrochemical characteristics of the pelagic ecosystem in the Etang de Berre, brackish lake near Marseilles, are reviewed. Hydrological features and circulation patterns of the lake are those of a dilution basin. A permanent halocline creates, mainly during summer, anoxic conditions in the water near the bottom. Observations made on an overall station grid covering the lake, allow to describe the distribution of main chemical parameters such as oxygen and nutrient salts, and to show that regenerative mineral phosphorus (5 to $6 \mu\text{atg l}^{-1}$) and ammonia (up to $30 \mu\text{atg l}^{-1}$) are associated with oxygen consumption. The anoxic conditions vanish when the water column is thoroughly mixed and ventilated by strong north west winds (Mistral). Nutrients are then liberated from the bottom layer and entertain strong phytoplanktonic blooms, with chlorophyll concentrations reaching more than $50 \mu\text{g l}^{-1}$. In winter, the general biological activity of production and nutrient regeneration in the deep layer is reduced, and vertical mixing maintains an aeration of the water bodies. Some comparisons between hydrological and biological features of the Etang de Berre and those of the Baltic Sea are undertaken.

RESUME: Une mise au point sommaire expose les connaissances actuelles sur les conditions hydrochimiques de l'écosystème pélagique de l'Etang de Berre, dont le régime hydrologique présente les traits généraux de circulation d'un bassin de dilution. Une halocline permanente crée, surtout en période estivale, des conditions d'anoxie des eaux de fond. Un travail d'observation sur un réseau de stations couvrant l'étang montre la distribution des paramètres chimiques principaux, oxygène et éléments nutritifs. On observe de fortes concentrations de phosphore minéral (5 à $6 \mu\text{atg l}^{-1}$) et d'azote ammoniacal ($>30 \mu\text{atg l}^{-1}$), dont la régénération accompagne la consommation d'oxygène. Ce régime type "anoxique" peut être rompu par le brassage puissant des eaux sous l'action du mistral, vent violent de secteur nord, qui provoque une réoxygénation et une libération des éléments nutritifs du fond au bénéfice de poussées phytoplanctoniques de grande envergure, avec des concentrations en chlorophylle dépassant $50 \mu\text{g l}^{-1}$. En hiver, les activités biologiques de production et de régénération sont ralenties, et les mélanges verticaux maintiennent une aération des eaux. Une comparaison avec des situations analogues en mer Baltique est établie.

Introduction et Généralités

L'étang de Berre, situé à une quarantaine de kilomètres

au Nord-Quest de Marseille, est un étang saumâtre en communication avec la Méditerranée au niveau du golfe de Fos (Fig. 1).

Le régime hydrologique a été étudié depuis fort longtemps par une série de travaux de Mars (1949, 1961), Schachter (1954), Minas H.J. (1961) et Minas M. (1965, 1970, 1973), qui décrivent l'étang comme un bassin de dilution modérée avec des salinités relativement élevées, dans une gamme de variation restreinte, de 28 à 33‰ environ.

Une intervention humaine devait rompre ce régime à partir du mois de mars 1966. A cette époque en effet, a été mise en service par EDF (Electricité de France) sur la bordure nord de l'étang, une usine hydroélectrique (Fig. 2) qui fonctionne sur une dérivation d'une partie des eaux de la Durance, rivière qui normalement coule au nord de

l'étang et se jette dans le Rhône. Le débit des eaux de la Durance a été suffisamment important pour induire un changement radical dans le régime hydrologique (Minas M., 1970, 1973). Un adoucissement considérable des eaux s'est produit, et selon les débits, contrôlés par EDF, la marge de variation de la salinité en cours d'année est généralement de 5 à 15‰ (Minas M., 1973 ; Kim, 1981, 1988) (Fig. 3). La dessalure générale de l'étang a conduit à un changement profond des écosystèmes pélagique et benthique. Les apports massifs d'eau douce ont en particulier provoqué l'établissement dans la région méridionale d'une halocline très marquée qui isole en profondeur une couche d'eau méditerranéenne à salinité

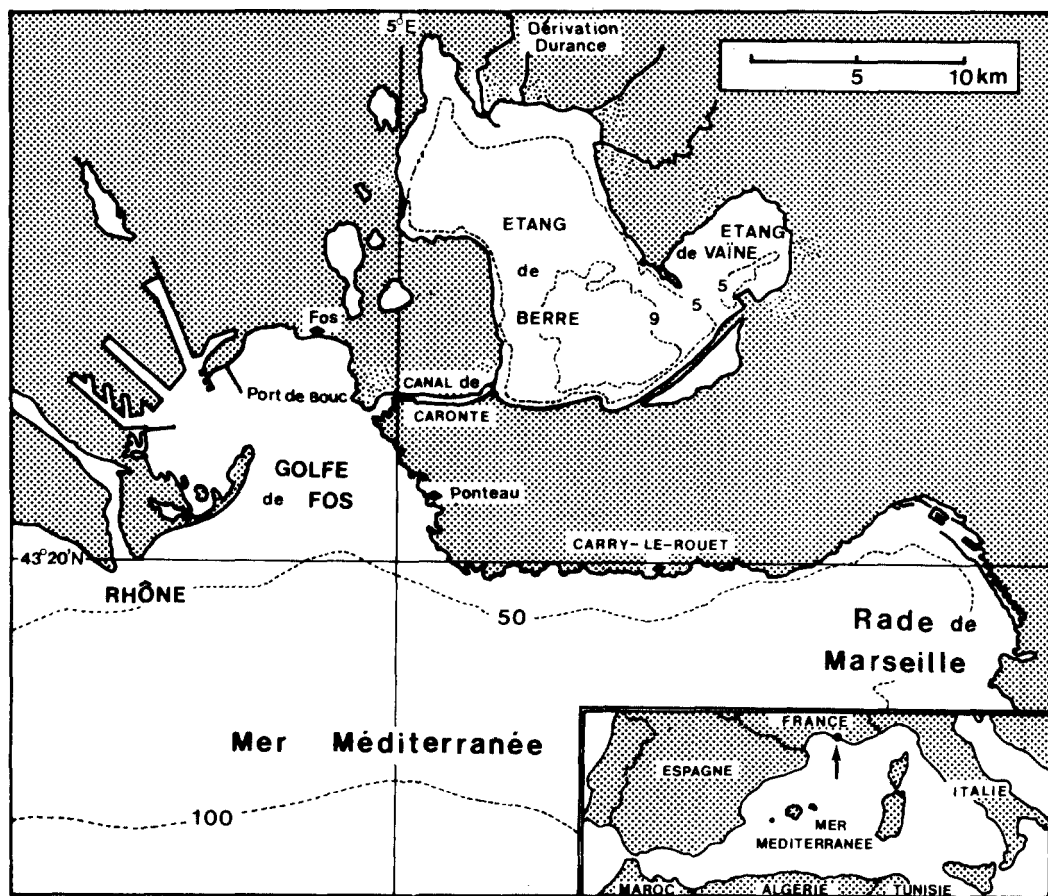


Figure 1. Situé à une quarantaine de kilomètres au NW de Marseille, l'étang de Berre couvre une superficie de 15.500 ha environ. Sa communication avec la mer s'effectue par un étroit canal (chenal de Caronte) qui s'ouvre sur la bordure orientale du golfe de Fos. (d'après Kim K.-T.)

élevée dans laquelle les propriétés chimiques sont entièrement modifiées (Fig. 4). La circulation d'eau, type bassin de dilution, est activée sous la pression des arrivées d'eau douce qui finissent par s'écouler à travers le chenal de Caronte, voie de communication de l'étang de Berre avec le golfe de Fos (Fig. 2). La partie sud de l'étang qui, topographiquement, présente une cuvette avec des pro-

fondeurs maximales de 9m environ, est alimentée par les eaux "lourdes" méditerranéennes dont la salinité s'abaisse au fur et à mesure de leur progression vers le Nord et de leur diffusion diapycnale à travers l'halocline.

Du point de vue biologique, l'adoucissement de l'étang a conduit à une eutrophisation générale due à des floraisons phytoplanctoniques permanentes alimentées par

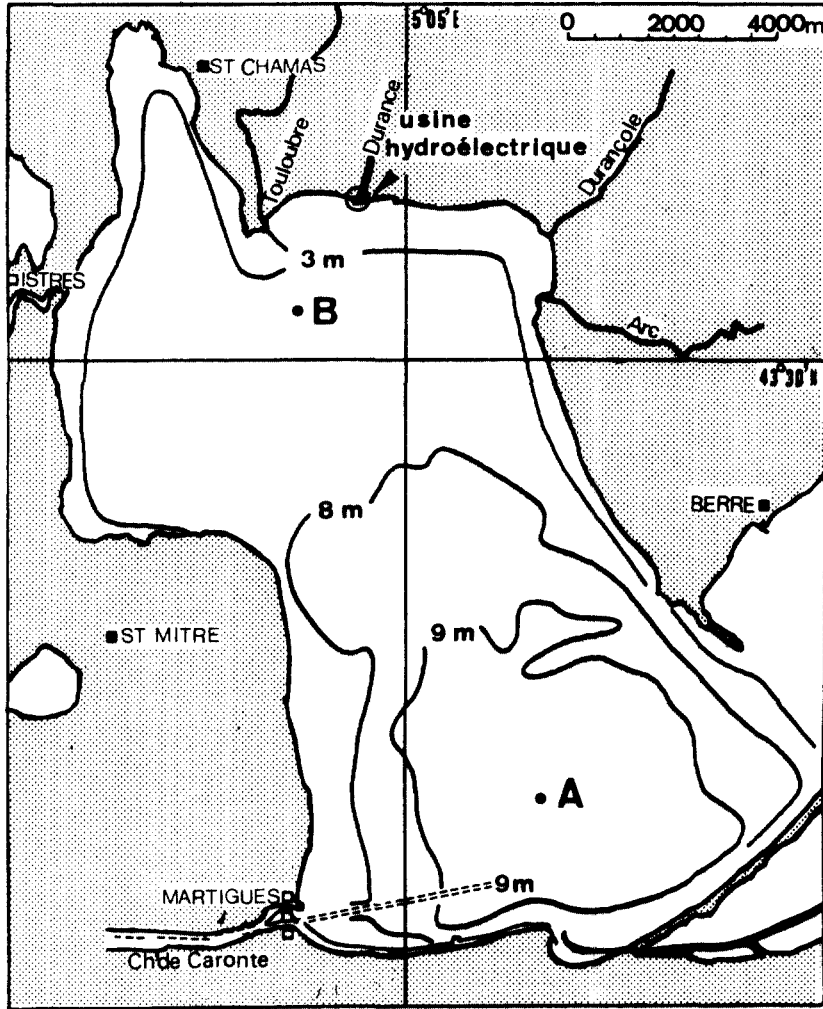


Figure 2. Topographiquement, l'étang de Berre peut être divisé en deux zones : - la région nord, peu profonde, qui reçoit tous les apports d'eau douce, principalement l'Arc, la Touloubre, la Durançole et, de loin le plus important, le canal de dérivation de la Durance: - la région sud, aux profondeurs maximales, qui reçoit le seul apport d'eaux marines, en provenance du golfe de Fos par le chenal de Caronte, dragué à 9m jusqu'à la cuvette centrale de l'étang. Cette véritable "gouttière" évite l'isolement complet des eaux de fond en abaissant le seuil d'entrée dans l'étang à la même profondeur que celle de la cuvette centrale.

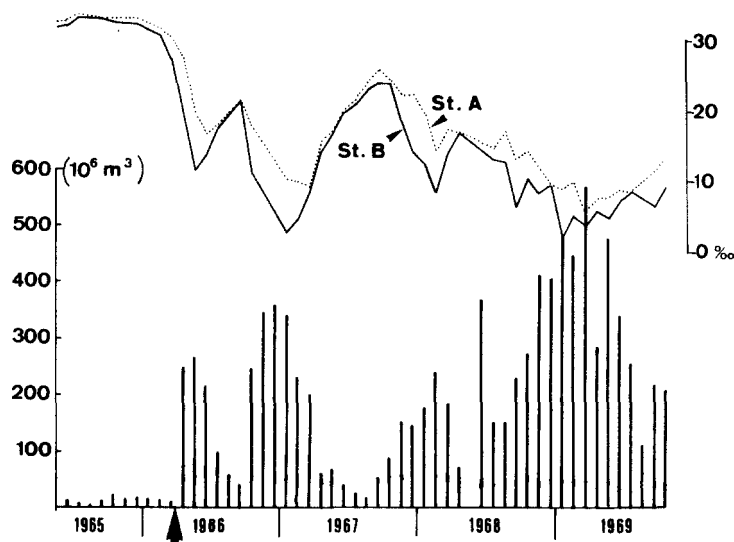


Figure 3. Apports d'eau douce et variations des salinités superficielles durant les premières années après la mise en eau du canal de la Durance.

- Le graphique inférieur porte les quantités d'eau douce amenées mensuellement à l'étang. La flèche en 1966 indique la date de mise en eau du canal de dérivation de la Durance (21 mars).

- Le graphique du haut montre l'évolution des salinités. Les variations de ces dernières suivent celles des apports, avec une plus forte dessalure dans la région septentrionale (station B), proximale des apports (trait plein) que dans la région méridionale (station A : trait pointillé). On observe également un décalage entre ces deux régions, à la dessalure comme à la ressalure.

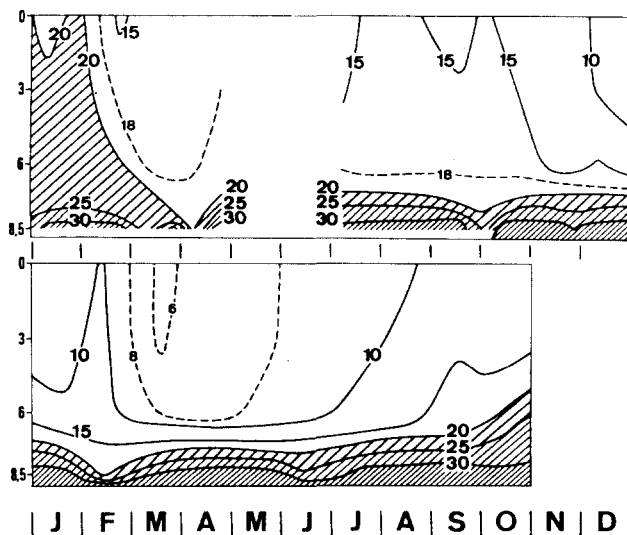


Figure 4. Exemple de distribution des salinités dans la région sud de l'étang (station A, au centre de la cuvette des 9m). Un important gradient de densité (pycno-halocline) isole un "coin salé" des couches superficielles, ceci même lorsque les salinités de surface s'accroissent à la suite de la diminution des apports du canal de dérivation (d'après Minas M., 1973).

les apports nutritifs des eaux douces terrestres. La matière organique résultant de cette richesse planctonique sédimente à travers l'halocline, provoquant en profondeur une consommation d'oxygène qui, à certaines périodes, peut devenir totale (conditions anoxiques), tout particulièrement lorsqu'en été, à la stratification haline s'ajoute une stratification thermique. Les vents faibles à cette époque de l'année brassent insuffisamment les eaux, et les conditions d'aération nulle conduisent alors à une anoxie prolongée des eaux de fond (Minas M., 1976). L'Étang

de Berre est alors comparable à un modèle réduit de mer de dilution, rappelant ainsi les caractéristiques hydrochimiques de la Baltique et, quoiqu'à un degré moindre, de la mer Noire. Ce qui l'empêche de ressembler entièrement à cette dernière est le fait que les retours nutritifs en surface sont possibles sous la simple action d'un vent fort en raison de la faible épaisseur de la couche d'eau, et que la communication avec la mer ouverte est suffisante (le chenal de Caronte est dragué en permanence) pour maintenir active une circulation renouvelant, quoique

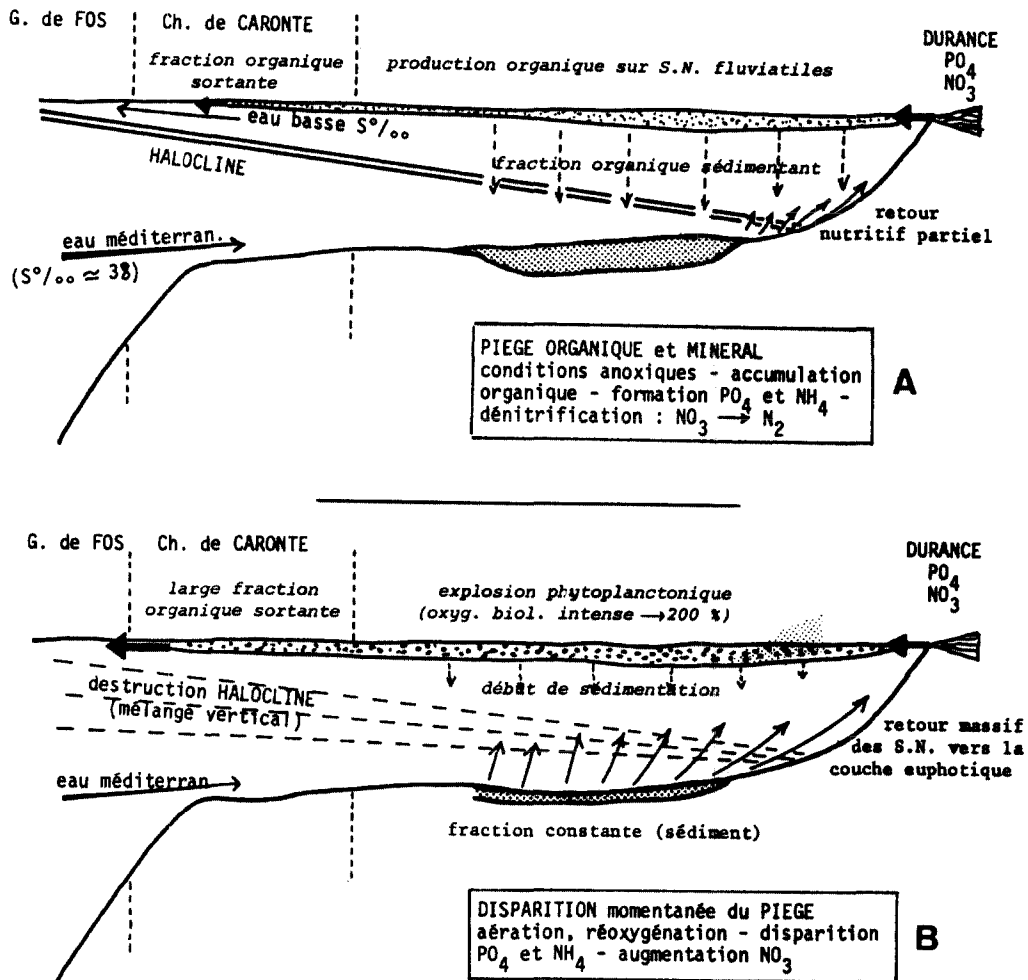


Figure 5. Représentation schématique du fonctionnement de l'écosystème : Stade A : absence de brassage par les vents (phase d'accumulation). Stade B : action du mélange vertical dû au vent lorsqu'il est suffisant pour atteindre la couche la plus profonde (phase de relargage). Le stade A est celui qui est observé sur la figure 6, et le stade B est illustré par les diagrammes c et d de la figure 7.

lentement, les eaux de fond.

Une série de travaux antérieurs (Minas M., 1973, 1974) a décrit les mécanismes du système d'eutrophisation, en particulier la production organique primaire induite par les apports nutritifs. Le schéma de la figure 5 résume la situation sur une coupe nord-sud à travers l'étang jusqu'à la mer ouverte. Le processus de régénération nutritive accompagnant la consommation d'oxygène dans le "piège" est un phénomène connu et analysé par de nombreux travaux dans la littérature. Richards (1977), récapitulant ces travaux, distingue les principales étapes d'un tel processus : 1. oxydation fonctionnant sur la réserve d'oxygène dissous. 2. réduction du nitrate et dénitrification. 3. réduction du sulfate (production de SH_2). 4. fermentation anaérobie (avec production de méthane).

Au stade actuel de nos connaissances, les conditions biogéochimiques des eaux anoxiques de l'Étang de Berre ont été encore peu explorées, et le milieu se prêtera dans l'avenir à des études et expérimentations intéressantes. Dans la présente exposition de données d'observation, l'attention est portée essentiellement sur des paramètres dont la distribution sous l'halocline accompagne classiquement la disparition d'oxygène, en particulier l'accroissement de phosphore minéral et d'azote ammoniacal, qui atteignent tous deux des concentrations élevées. On notera également la distribution significative du nitrate qui classiquement dans ce type de milieu, témoigne de la dénitrification, mais qui dans l'Étang de Berre présente d'autres raisons de distribution particulière que nous exposons plus loin. Nous présentons, à l'aide d'une distribution détaillée des propriétés chimiques sur l'ensemble de l'étang, un autre type de situation opposé à celui des conditions anoxiques : en hiver, lorsque les eaux sont brassées sous l'action des vents continentaux froids (Mistral), les actions biologiques de "production-régénération" sont ralenties et la distribution des paramètres est essentiellement régie par des facteurs physiques, circulation, et dilution des eaux

marines par des apports d'eau douce riches en sels nutritifs.

Un troisième type de distribution est observé à la suite de coups de mistral violents : la structure de grande stabilité est bousculée par un brassage des eaux sur la verticale qui a pour effet de relarguer vers la couche superficielle une partie des sels nutritifs du piège infrahaloclineal. Ces arrivées en surface d'éléments biogènes sont alors susceptibles de provoquer des poussées phytoplanctoniques de grande envergure, dont une partie alimente à nouveau le piège par sédimentation, mais dont une autre partie est évacuée vers la mer ouverte (Minas *et al.*, 1976). La figure 5B illustre ce phénomène.

Résultats

Les planches de la figure 6 présentent la distribution des principaux paramètres permettant d'analyser les processus de consommation d'oxygène aboutissant aux conditions anoxiques. Les observations portent sur les eaux du fond dont la topographie est donnée sur la figure 2.

La distribution de la salinité montre bien que la moitié sud de l'étang est occupée par des eaux à forte salinité, maximale dans la zone la plus profonde; cette distribution est liée à l'arrivée des eaux méditerranéennes à travers le chenal de Caronte. Le gradient de l'halocline est mis en évidence sur une gamme de salinités de 32 à 20‰, les plus basses salinités occupant la moitié nord de l'étang, peu profond et à proximité de l'arrivée des eaux douces.

La distribution des concentrations et des taux de saturation en oxygène montre des eaux riches en oxygène dans la partie dessalée au nord, et un gradient général de diminution, dont les valeurs les plus basses se situent dans la cuvette des eaux profondes et salées. Les quelques stations qui présentent des conditions anoxiques se trouvent dans cette zone.* La distribution du pourcentage de saturation met en évidence des valeurs supérieures à 100% dans les zones où la poussée phytoplanctonique liée aux arrivées d'eau douce est active.

* Il y a lieu de mentionner que la méthode classique de Winkler employée ici ne permet en fait que d'affirmer que les concentrations sont inférieures à une valeur limite de $0,1 \text{ ml l}^{-1}$. Toutefois, il faut signaler la très forte odeur de SH_2 lors du prélèvement des échantillons d'eau de fond (il n'y a pas eu de mesures effectuées), ce qui indique que la déficience en oxygène était totale.

La régénération des éléments nutritifs qui accompagne la disparition de l'oxygène est bien mise en évidence par la distribution du phosphore minéral, et aussi par les grandes quantités d'azote ammoniacal qui atteint des valeurs extrêmement élevées, jusqu'à $30 \mu\text{atg l}^{-1}$. Les nitrates n'atteignent des valeurs modérément élevées que dans la partie nord de l'étang, où l'origine fluviale est manifeste, tandis que la cuvette méridionale présente des concentrations proches de ou égales à zéro.

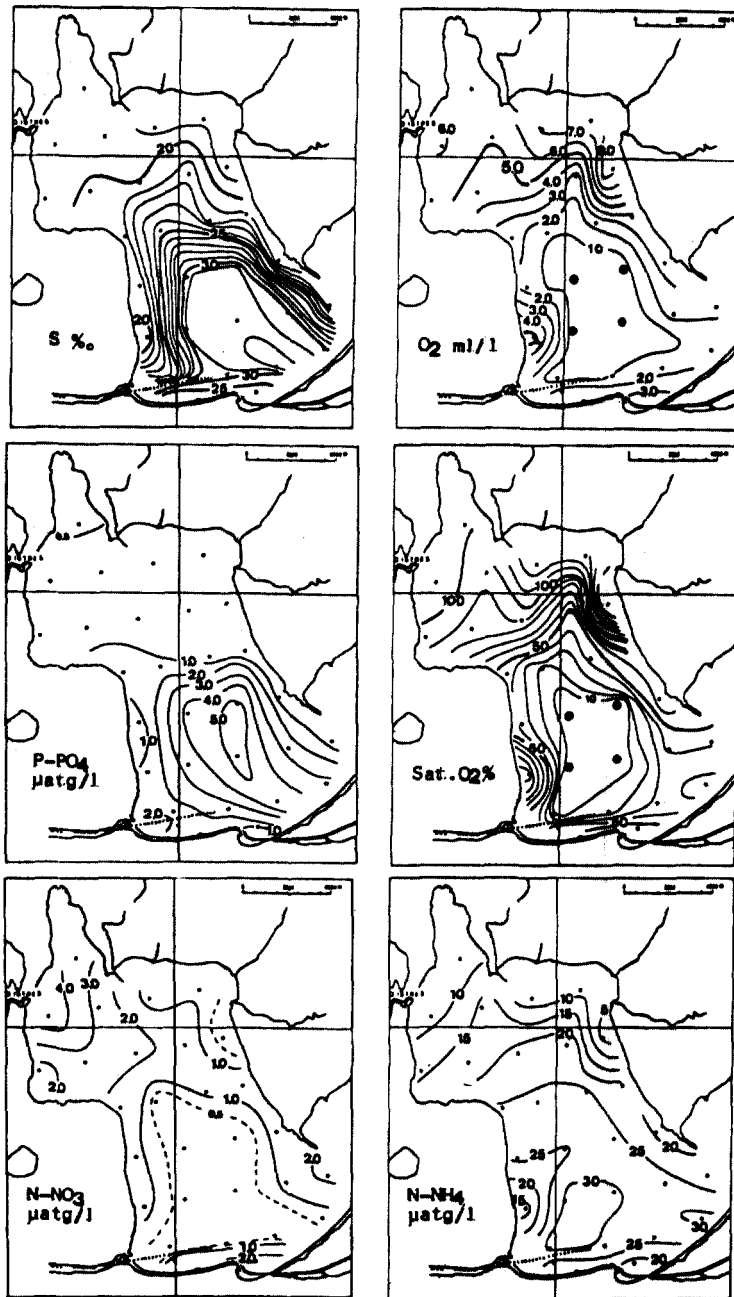


Figure 6. Distribution de plusieurs paramètres sur le fond de l'étang lors de la phase d'accumulation (voir figure 5). L'isolement du coin salé sous l'halocline dans la cuvette méridionale en fin d'été (ici fin septembre) se traduit par divers phénomènes, classiques dans ce type de milieu :

- apparition de conditions anoxiques (les points noirs signalent l'absence totale d'oxygène),
- accumulation de phosphore minéral et d'azote ammoniacal,
- disparition du nitrate.

Discussion et Conclusion

La situation-type des conditions de déficience ou d'absence d'oxygène rencontrée ici (Fig. 6) correspond à la période de grande stabilité estivale, marquée par des températures élevées et l'absence de régime de vents forts, mistral en particulier. La présence simultanée de phosphore minéral et d'azote ammoniacal sous de fortes concentrations ainsi que la diminution du nitrate, sont une caractéristique générale rencontrée dans divers milieux aquatiques marins ou lacustres. La baisse du nitrate en profondeur dans les systèmes anoxiques marins est due principalement à la dénitrification. Dans le cas de l'étang de Berre, la quasi absence de nitrate dans les eaux de fond de la partie méridionale s'explique surtout par l'alimentation du bassin par de l'eau méditerranéenne superficielle dépourvue de sels nutritifs. De ce fait d'ailleurs, découle que tout le phosphore minéral et l'azote ammoniacal des eaux profondes de l'étang résultent de la régénération.

Une comparaison de cette situation de l'étang de Berre avec celle d'un bassin de dilution de grande envergure comme la mer Baltique, dont la description et l'analyse hydrochimique sont exposées par Grasshoff (1975) est intéressante. De très fortes analogies avec les conditions de l'étang de Berre sont évidentes. Sans entrer ici dans une étude comparée détaillée, remarquons que les plus fortes concentrations en phosphore des cuvettes anoxiques de la Baltique sont expliquées en partie par le relargage de phosphates à partir du sédiment, dans lequel s'enterre une grande partie de la matière organique sédimentée. A l'évidence, les fortes concentrations observées dans les eaux proches du fond dans l'étang sont aussi dues au phénomène de diffusion d'éléments de régénération dans la pellicule superficielle du sédiment. On doit admettre que la richesse organique du sédiment de l'étang ne concerne encore que la partie superficielle, et que les conditions de grande eutrophisation sont trop récentes à l'échelle des temps géologiques pour déceler leur signature profonde dans le sédiment. Les analogies avec la mer Baltique se vérifient surtout pour certaines zones de cette dernière : ce sont en particulier les conditions hydrochimiques du fjord de Flensburg qui se rapprochent le plus de celles de l'étang de Berre (Grasshoff, 1975, voir fig. 15-53 et 15-54 pp. 539-540). Ceci concerne tous les paramètres, en particulier l'azote ammoniacal dont les concentrations atteignent $20 \mu\text{atg l}^{-1}$.

Une période intéressante est celle de fin d'été-début

d'automne, lorsqu'avec la reprise des vents la structure verticale de grande stabilité peut être sensiblement modifiée. Des vents temporaires de secteur nord sont capables de provoquer des brassages qui détruisent la stratification thermohaline et conduisent à la rupture de l'halocline. Un tel évènement provoque, d'une part une bonne réoxygénation sur toute la hauteur de la colonne d'eau, d'autre part le retour des éléments nutritifs des eaux profondes vers la surface où ils alimentent une production planctonique particulièrement spectaculaire, la principale source d'azote étant l'azote ammoniacal.

Parmi les différentes situations observées à cette époque de l'année, celle de la série d (30 octobre) sur la figure 7 met en évidence l'uniformisation des propriétés à la suite d'un régime de vents forts. Il est intéressant de noter que Grasshoff (1975) décrit en mer Baltique un phénomène analogue : sous l'action des vents, un upwelling provoque en période postestivale (13 septembre), une remontée des réserves nutritives qui donne lieu à une importante poussée phytoplanctonique, avec des teneurs en chlorophylle dépassant $20 \mu\text{g l}^{-1}$ (fig. 15-55 p. 541). Grasshoff mentionne également une oxydation fort probable de l'ammonium en nitrate.

Les caractéristiques hivernales sont représentées par les distributions de paramètres de la figure 8. La désoxygénation existe encore car l'halocline est toujours présente, renforcée même par la forte dessalure superficielle, les débits du canal de dérivation de la Durance augmentant en hiver, mais le phénomène est très atténué, avec des pourcentages de saturation en oxygène de l'ordre de 40%. La répartition des phosphates est plus uniforme avec des valeurs dans l'ensemble faibles, de l'ordre de $0,5 \mu\text{atg l}^{-1}$. La teneur en nitrate est élevée, conditionnée par les apports des eaux douces riches en cet élément, une partie étant toutefois probablement due à l'oxydation de l'ammonium qui de toute manière continue à être produit, et qui en milieu d'oxygénation plus normale se transforme en nitrate. Comme il est logique, les valeurs minimales se trouvent dans la poche d'eau salée méditerranéenne qui à l'entrée dans le chenal de Caronte ne contient pas de nitrate ou en quantité négligeable.

Il est à nouveau intéressant de faire un parallèle avec la mer Baltique, pour le fjord de Flensburg décrit par Grasshoff (1975) : la situation de mélange vertical pour les propriétés thermohalines provoque l'aération des eaux, concomitante de valeurs nettement plus faibles de phosphate et l'ammonium, et d'une augmentation relative

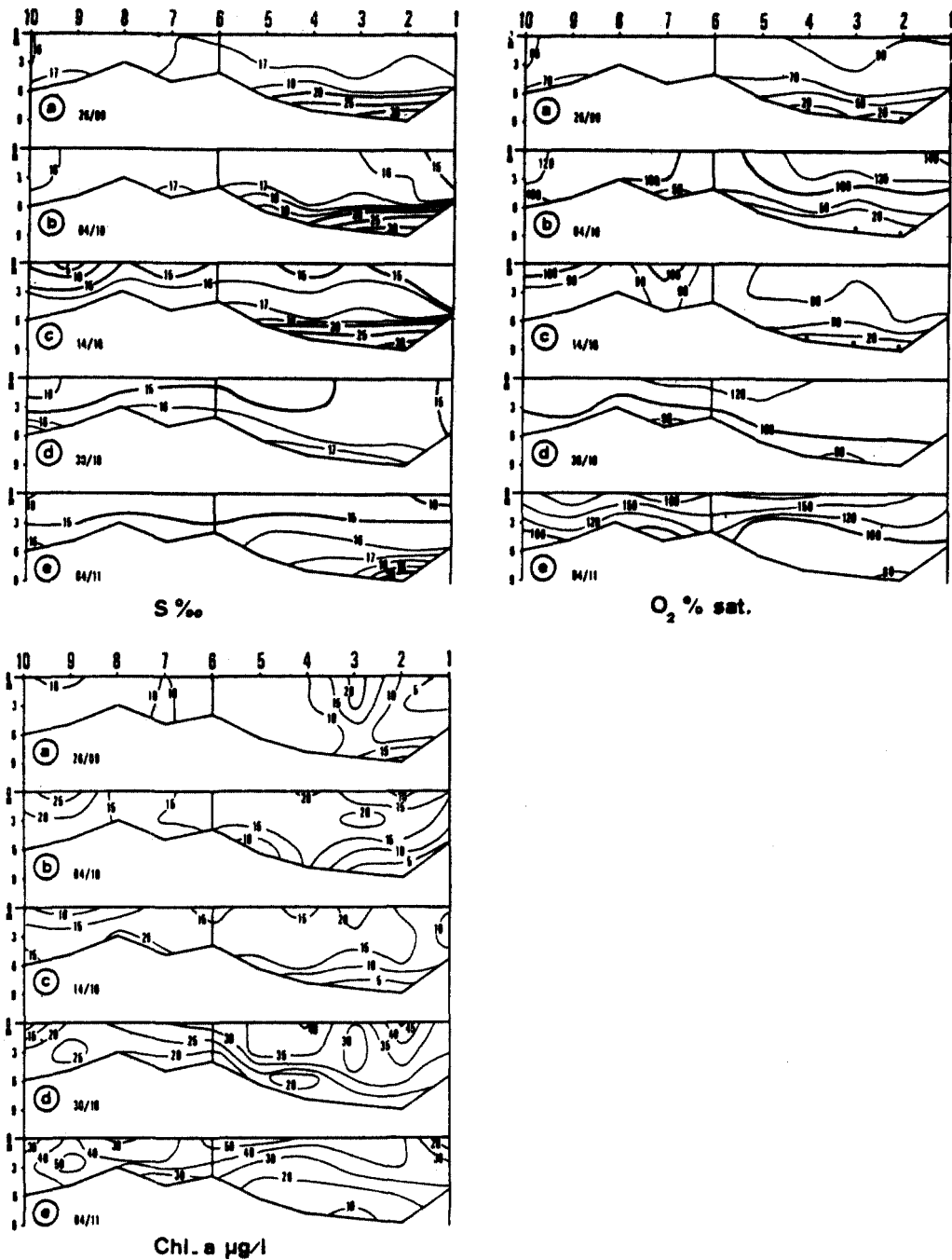


Figure 7. Une série de prélèvements effectués sur une coupe approximativement sud-nord (stations 1 à 10) à intervalles de temps rapprochés, durant la période fin d'été-début d'automne montre l'effet du brassage dû au vent ("coup de mistral" entre les campagnes de prélèvement c et d) sur l'évolution de différents paramètres. Les points noirs indiquent l'absence totale d'oxygène (d'après Minas *et al*, 1976).

du nitrate à des emplacements où en été prédomine la forme ammoniacale.

En conclusion, l'étang de Berre présente de fortes analogies avec deux types de systèmes : - certains systèmes naturels caractérisés par des conditions anoxiques, tels que mer Noire, fjords norvégiens, certaines parties de la Baltique ; - des systèmes aquatiques terrestres à tendance dystrophique. En fait, l'étang de Berre est un

système qui détient des caractéristiques des deux types précédents : eutrophisation permanente relativement modérée avec, momentanément, une eutrophisation importante parce que, contrairement au système type mer Noire par exemple, les retours nutritifs en surface sont possibles. Néanmoins, malgré une aération par l'oxygène atmosphérique, et surtout par l'oxygène photosynthétique provenant du mélange avec les couches supérieures

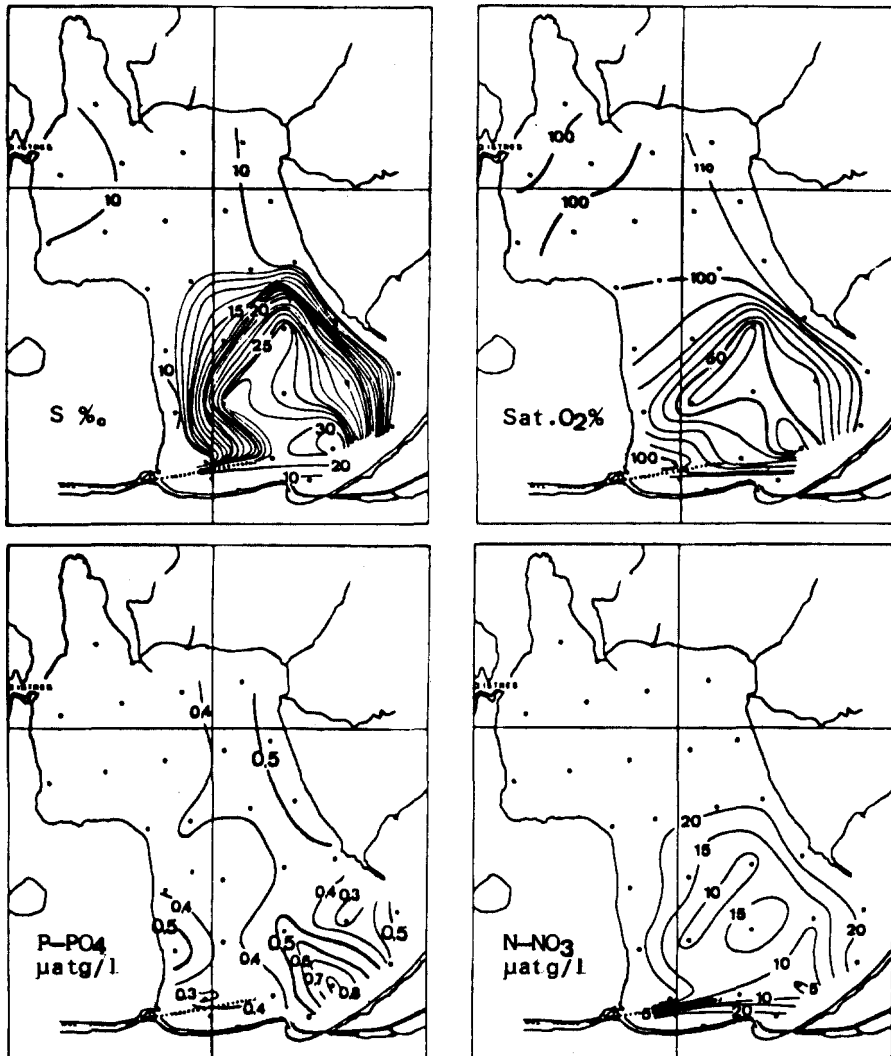


Figure 8. Distribution de certains paramètres sur le fond de l'étang en hiver (février). En dépit de l'existence d'une halocline bien exprimée, les sous-saturations demeurent relativement modérées ainsi que les concentrations en phosphates, tandis que les nitrates sont présents en quantité notable ; à cette époque de l'année de faible activité phytoplanctonique, la sédimentation organique se trouve réduite et, corrélativement, la demande en oxygène au niveau du fond ainsi que l'accumulation des éléments de reminéralisation.

lors des "coups de vent", les eaux anoxiques putrides prédominent pendant des laps de temps plus ou moins longs dans la cuvette méridionale, conférant à cette partie de l'étang toutes les caractéristiques d'un système dystrophique.

Références

- Grasshoff K., 1975. The hydrochemistry of landlocked basins and fjords. In : J.P. Riley and G. Skirrow, Ed. Chemical Oceanography vol. 2. Academic Press, London : 455-597.
- Kim K.-T., 1981. Le phytoplancton de l'étang de Berre : Composition spécifique, biomasse et production ; relations avec les facteurs hydrologiques, les cours d'eau afférents et le milieu marin voisin. Thèse Doct. Univ. Aix-Marseille II : 210 pp.
- Kim K.-T., 1988. La salinité et la densité des eaux des étangs de Berre et de Vaïne (Méditerranée nord-occidentale). Relations avec les affluents et le milieu marin voisin. *Marine Nature*, 1 : 37-58.
- Mars P., 1949. Quelques aspects de l'évolution de l'étang de Berre. *Bull. Soc. linn. Provence*, 17 : 8-16.
- Mars P., 1961. Recherches sur quelques étangs du littoral méditerranéen français et sur leurs faunes malacologiques. Thèse Doct. Univ. Paris : 270 pp. (Publiée 1966 : *Vie Milieu*, Suppl. 20 : 1-359).
- Minas H.J., 1961. Quelques données hydrologiques sur l'étang de Berre. *Rec. Trav. Sta. mar. Endoume*, 37 (Bull. 23) : 5-17.
- Minas M., 1965. Aperçu hydrologique préliminaire sur l'étang de Berre. *Rec. Trav. Sta. mar. Endoume*, 53 (Bull. 37) : 3-9.
- Minas M., 1970. Résultats d'observations hydrologiques sur l'étang de Berre années 1965, 1966, 1967. Modification du régime hydrologique par suite du déversement des eaux apportées par le canal de dérivation de la Durance. *Cah. océanogr.*, 22 : 73-88.
- Minas M., 1973. Sur la synthèse et la dégradation de la matière organique dans l'écosystème de l'étang de Berre. Dynamique et bilan. Rapports avec le régime hydrologique. Thèse Doct. Univ. Aix-Marseille : 337 pp.
- Manas M., 1974. Distribution, circulation et évolution des éléments nutritifs, en particulier du phosphore minéral, dans l'étang de Berre. Influence des eaux duranciennes. *Int. Rev. ges. Hydrobiol.*, 59 : 509-542.
- Minas M., 1976. Oxygène dissous et saturation dans un milieu de forte production organique (Etang de Berre). Rôle d'une halocline sur leur distribution et sur les rapports oxygène-phosphate. Notion de bilan. *Hydrobiologia*, 51 : 149-162.
- Minas M., Bonin M.C., Coste B., David P. et Minas H.J., 1976. Caractère particulier du mécanisme de l'eutrophisation dans l'étang de Berre. *Ann. Inst. océanogr.*, 52 : 153-164.
- Richards F.A., 1977. Marine areas of anomalous chemistry resulting from oxygen deficiencies. In : N.R. Andersen and B.J. Zahuranec, Ed. *Oceanic sound scattering prediction*. Plenum Press, New York : 117-128.
- Schachter D., 1954. Contribution à l'étude hydrographique et hydrologique de l'étang de Berre (Bouches du Rhône). *Bull. Inst. océanogr.*, Monaco, 1048 : 20 pp.

This article was presented by professor K.-T. Kim. It was accepted for printing on 30 October 1988.