

LA SALINITE ET LA DENSITE DES EAUX DES ETANGS DE BERRE ET DE VAÏNE (MEDITERRANEE NORD-OCCIDENTALE) RELATIONS AVEC LES AFFLUENTS ET LE MILIEU MARIN VOISIN

Ki-Tai Kim

Marine Science Institute Yeungnam University
632 Gyongsan, Republic of Korea

ABSTRACT: From December 1976 to December 1978, vertical and horizontal distributions of salinity and density were studied in two brackish lakes located in the north-west Mediterranean Sea, in order to compare it with neighborhood seawaters and freshwaters.

The spatio-temporal variations of salinity and density are very closely similar. The seasonal variations are different from year to year, because the water masses of these lakes were disturbed by freshwaters at different times of the year.

Annual average values of salinity in Etang de Berre are 5–6‰ (meiomesohaline), and average value of Carry-le-Rouet is 37.605‰, representing typical Mediterranean seawater. The average value of sigma-t in brackish waters is about 2.76 and that of marine waters is 27.815.

On the other hand, evolutions of salinity in Etang de Berre were summarized in table from 1912 to 1978. This represented an ecological variation of these lakes. T-S diagrams have been studied in order to distinguish different water masses in spatio-temporal variations.

Introduction

D'un point de vue hydrologique, l'étang de Berre présente les caractères d'un milieu saumâtre, variant selon les lieux et les profondeurs. La salinité est ici l'un des facteurs dont l'étude est évidemment la plus indispensable puisque les milieux étudiés vont de l'eau douce à l'eau méditerranéenne, le centre de l'étude, concernant un milieu saumâtre, à salinité variable.

La salinité de l'étang de Berre, auparavant assez réduite, s'est accrue de plus en plus au cours du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle à la suite des élargissements et approfondissements successifs du canal de Caronte (Collot, 1882; Chevalier, 1916; Mars, 1949 et 1961; Schachter, 1954; Minas, 1961; Minas, 1965, 1968, 1970 et 1976 a, b; Blanc et al., 1967). L'étang montrait alors des caractères de plus en plus proches de ceux d'un écosystème néritique marin.

Actuellement l'écosystème de l'étang se caractérise par des variations spatio-temporelles liées à l'abondance du diversement de la Durance ainsi qu'à l'influence des eaux marines dans les eaux proches du fond de la partie sud de l'étang. Selon la valeur de la salinité, on peut souvent distinguer en surface des couches oligohalines (0.5–3‰) ou éventuellement méiomésohalines (3–10‰) et, près des fonds, des couches pléiomésohalines (10–18‰) voire polyhalines (18–30‰).

En ce qui concerne la densité des eaux, on peut s'attendre à ce que la température joue le rôle principal dans les variations de densité des milieux à salinité quasi-constante, comme les eaux douces et l'eau franchement marine, tandis que la salinité pourra jouer un rôle beaucoup plus important dans les fluctuations de la densité au sein des milieux à salinité variable.

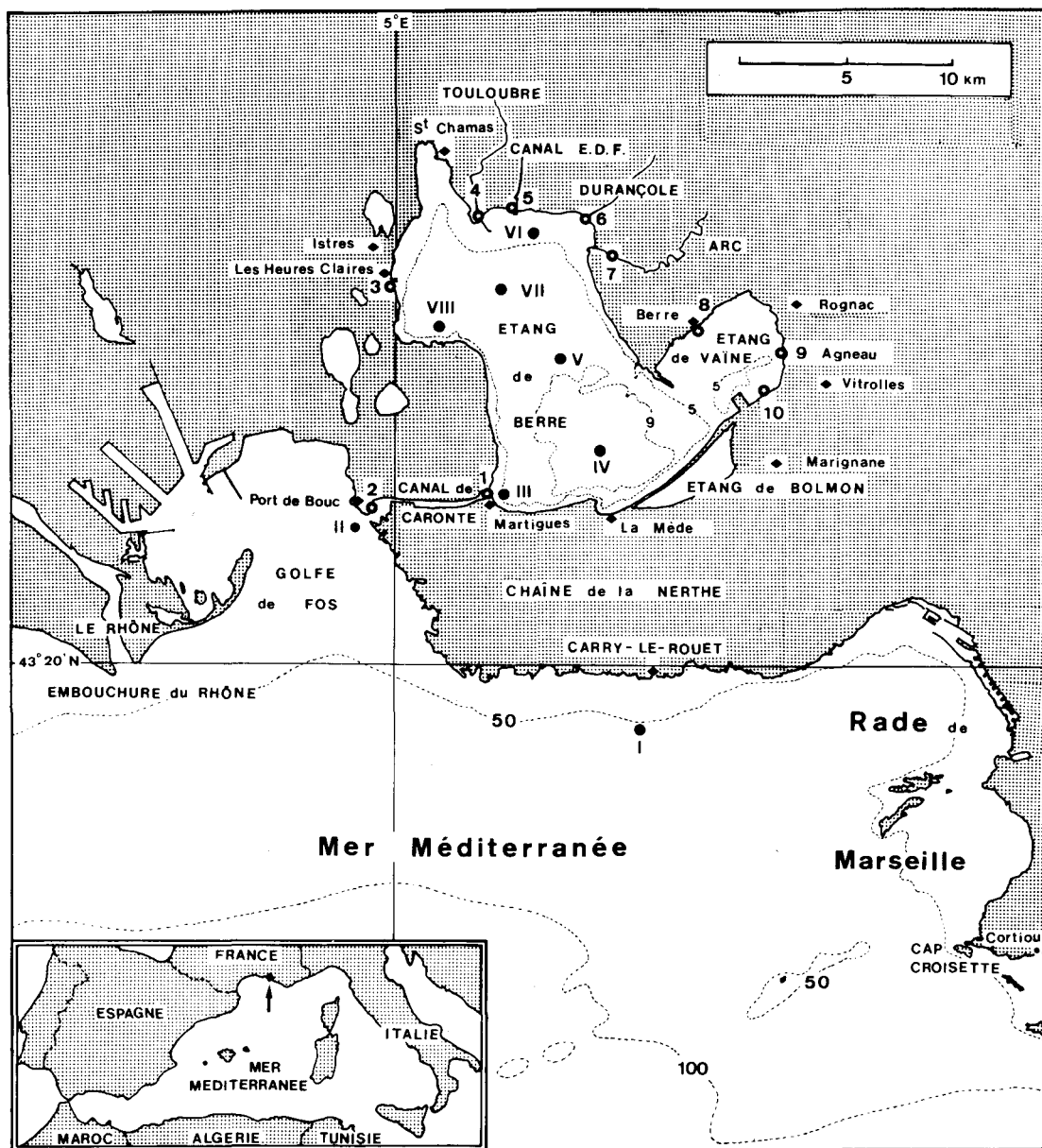


Fig. 1. Emplacement des stations de prélèvements.

Matériel et Méthodes

Emplacement des stations (Fig. 1)

L'étang de Berre est une cuvette peu profonde (maximum voisin de 10m) presque isolée de la Méditerranée. Longtemps ses eaux douces n'ont pu rejoindre cette der-

nière qu'à travers de zones marécageuses. Actuellement, la communication avec la mer s'effectue sans obstacle, même pour des navires d'un tonnage relativement important. Le chenal de Caronte, long de 6km environ, qui joint Martigues à Port-de-Bouc et Lavéra, est maintenu à une profondeur d'au moins 9m sur toute sa longueur. Ce

minimum est également assuré par dragage jusque dans la partie méridionale profonde de l'étang de Berre.

Les affluents principaux (Touloubre, Durance, Durancole et Arc; stations 4,5,6 et 7) sont situés au NE de l'étang de Berre, tous les 5km environ.

Les parages de Carry-le-Rouet se situent entre le golfe de Fos et le golfe de Marseille, qui représente le milieu marin typique méditerranéen.

Toutes les stations étudiées ont été décrites par les articles précédents: e.g; Kim (1979 et 1982) et Kim et Travers (1984).

Méthode d'étude

Les échantillons conservés dans des canettes de 250ml à capsule caoutchoutée sont analysés au salinomètre Beckman RS-7B, par l'intermédiaire d'une mesure de conductivité. L'eau normale utilisée provient de Copenhague (Laboratoire de Charlottenlund).

Les valeurs de la densité de l'eau sont calculées en fonction de celles de la température et de la salinité d'après les tables de sigma-t de Kealer (1965).

Salinité et Densité des Eaux de l'Étang de Berre

Au cours des deux années étudiées, les variations temporelles de la salinité (fig. 2 et 3), diffèrent beaucoup selon les niveaux et dépendent largement du débit des eaux douces afférentes. En effet, en surface, la salinité demeure presque toujours faible, en raison du fait que les eaux douces légères, notamment celles provenant de la Durance, s'étalent à la surface de l'étang. La seule exception vraiment importante est observée en été et en automne 1978, lorsque la dérivation de la Durance a été très fortement diminuée pendant cinq mois environ.

Au contraire, les eaux subsuperficielles ou proches du fond sont le siège de variations importantes de la salinité, d'autant plus marquées que l'on se situe plus au Sud de l'étang.

Elles sont dues à l'influence plus ou moins forte de l'eau de mer entrant par le chenal de Caronte.

Sur les deux années d'observation, on peut considérer que les salinités les plus faibles sont celles de la fin de l'hiver et du printemps, et qu'elles s'élèvent en été pour attein-

dre leur maximum en automne.

Les figures 2 et 3 montrent clairement que la répartition verticale des valeurs diffère selon la saison. Les haloclines les plus marquées sont observées en automne et en hiver bien qu'il puisse en apparaître à toute époque au voisinage du fond dans les stations méridionales plus profondes où peut toujours pénétrer l'eau de mer.

En toute saison, mais peut-être de façon plus nette au printemps, le brassage des eaux par les vents, notamment le mistral, allié dans le Nord de l'étang à l'effet cinétique des abondants apports d'eaux douces, peut créer ou maintenir une forte homogénéité thermohaline. Il est cependant fréquent d'observer, même en saison printanière et même dans les stations septentrionales, une salinité un peu plus forte à 7m que dans les eaux sus-jacentes.

Il existe globalement un très faible gradient de salinité croissante du Nord vers le Sud de l'étang. Par exemple, la moyenne pondérée bisannuelle atteint 6.15‰ à la station IV alors qu'elle n'est que de 5.05‰ à la station VII.

Cependant, comme on a pu s'en rendre compte, toutes les stations de l'étang de Berre sont très comparables au point de vue des caractéristiques générales de la salinité. Elles peuvent toutes présenter une homogénéité verticale totale à certaines époques et une dessalure très marquée jusqu'à peu de distance du fond. Toutes celles qui comportant des prélèvements à plus de 4 m de profondeur ont montré à un moment ou à l'autre des incursions d'eau salée au voisinage du fond. En automne, cette invasion d'eau salée est générale et concerne tout l'étang de Berre. Il n'en est pas de même aux autres saisons. Il est remarquable que la station IV et même la station VIII peuvent recevoir de l'eau salée en profondeur sans que le passage de cette eau apparaisse à la station III, pourtant située à l'entrée de l'étang de Berre. La quasi-uniformité de la salinité observée dans tout l'étang de Berre s'oppose à la situation décrite par Minas (1976 a) où la nappe de dilution intéresse beaucoup plus la moitié occidentale de l'étang que la moitié orientale.

La faiblesse du gradient nord-sud est encore attestée par la comparaison de la salinité superficielle aux stations 3 et 1 (fig. 4 A et le tableau ci-dessous).

station	salinité (‰)		
	minimale	maximale	moyenne
3 : Les Heures-Claires	1.20(12 juin 1978)	15.77(18 oct. 1978)	4.32
1 : Martigues	1.67(10 nov. 1977)	13.86(18 oct. 1978)	5.10
2 : Port-de-Bouc	4.92(10 fév. 1977)	23.21(18 oct. 1978)	11.32

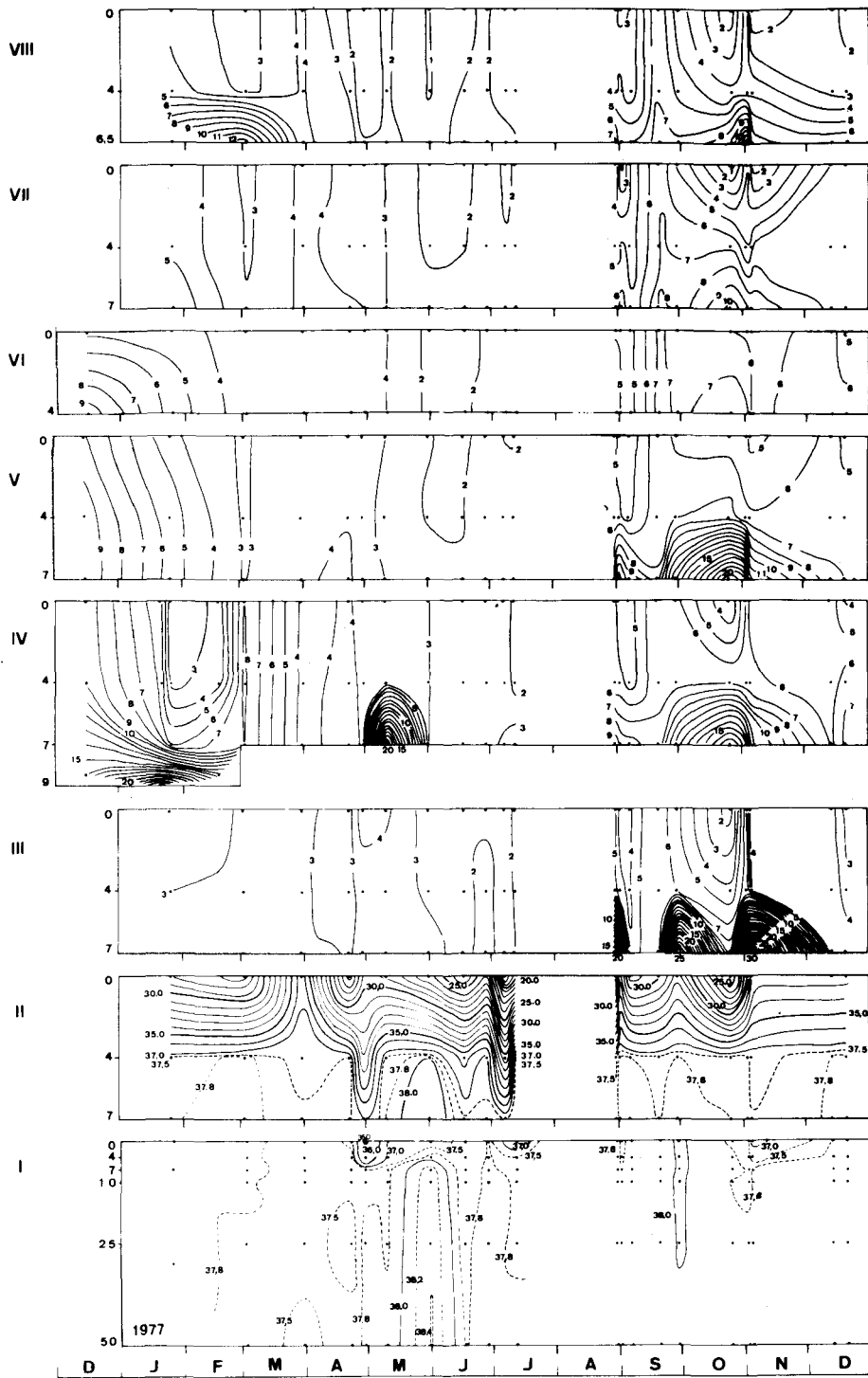


Fig. 2. Evolution annuelle de la salinité(‰) au cours de l'année 1977 aux stations VIII-1.

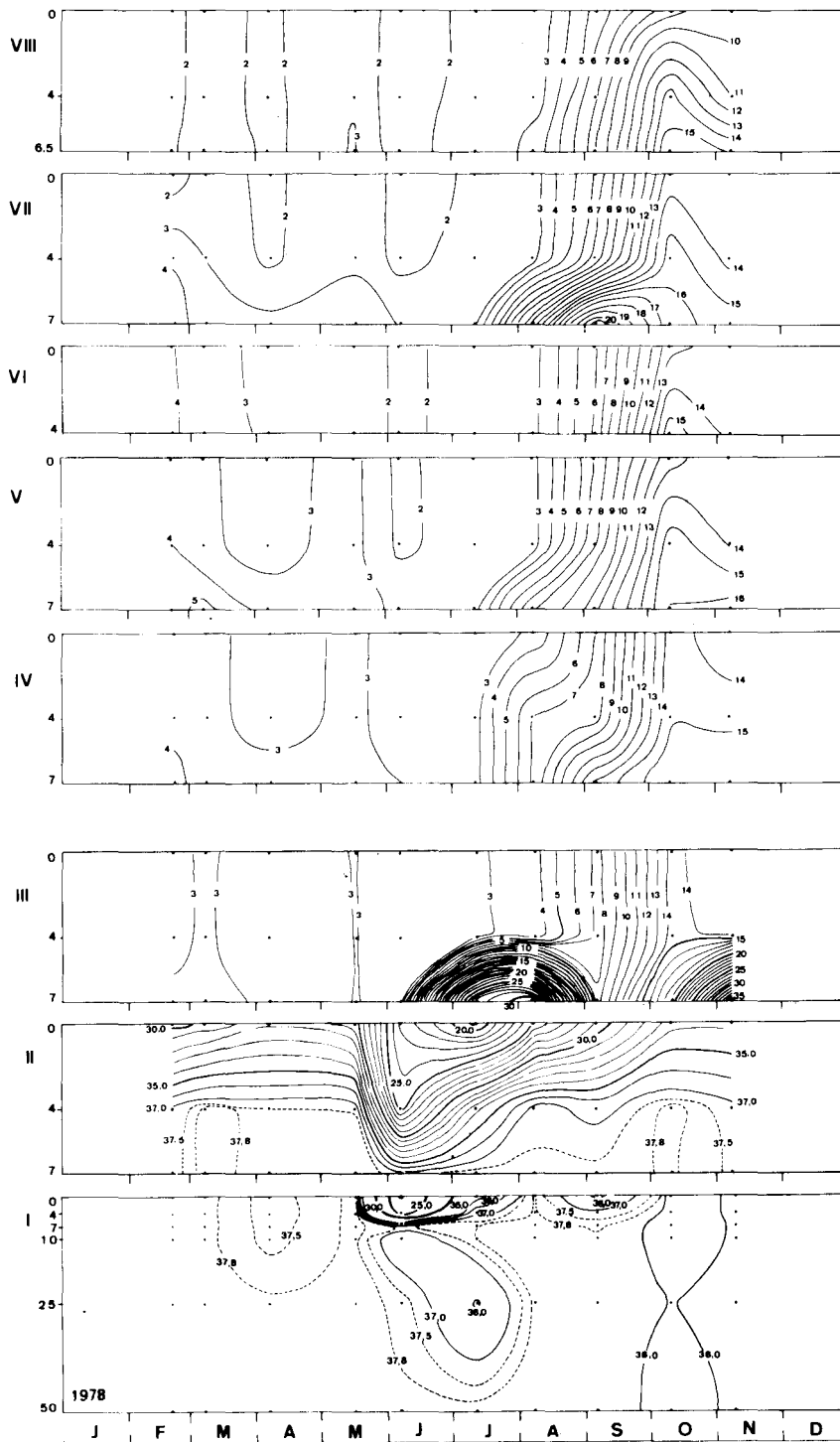


Fig. 3. Evolution annuelle de la salinité(‰) au cours de l'année 1978 aux stations VIII-1.

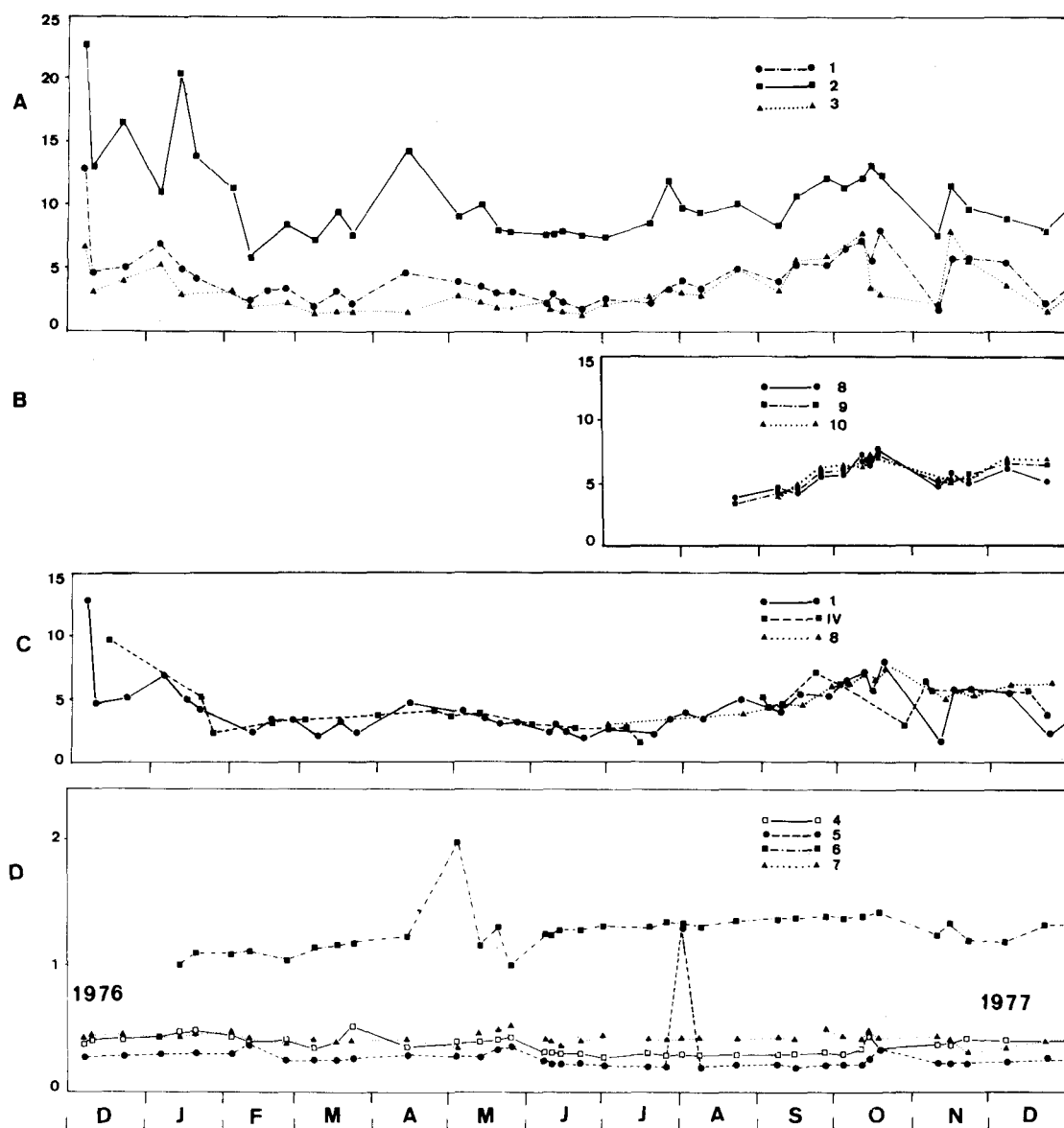


Fig. 4. Evolution annuelle de la salinité (‰) de surface de décembre 1976 à décembre 1977 aux stations : 1, 2 et 3 (A) ; 8, 9 et 10 (B) ; 1, IV et 8 (C) ; 4, 5, 6 et 7 (D).

On constate en revanche une augmentation importante de salinité entre les extrémités orientale et occidentale du canal de Caronte.

Notons aussi, en comparant les figures 2 A et 3, que les variations saisonnières en surface sont pratiquement identiques dans toutes ces stations.

Le tableau 1 schématise l'évolution de la salinité de

l'étang de Berre en tenant compte des données exposées ici et s'inspirant du tableau présenté par Minas (1973) pour résumer les résultats des travaux exécutés depuis 1912. Ce nouveau tableau résume donc l'évolution de la salinité de 1912 à 1978. Il montre en particulier que l'on a affaire, à cet égard, à des milieux complètement différents, avant et après la dérivation de la Durance. Avant 1966,

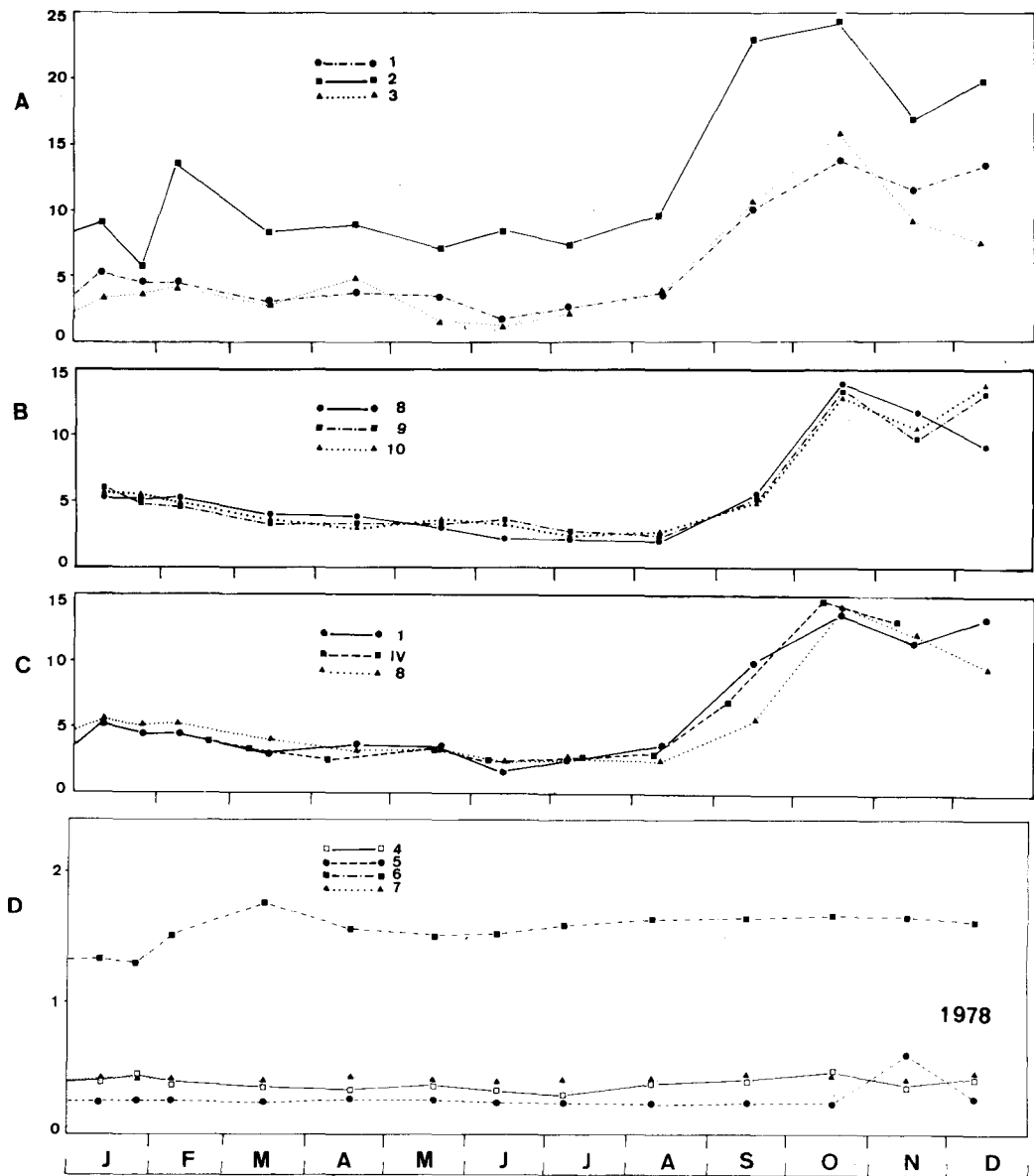


Fig. 5. Evolution annuelle de la salinité(‰) de surface en 1978 (voir légende de la fig. 4).

l'étang de Berre était très salé (généralement plus de 30‰). Les salines proches de la ville de Berre et de l'aéroport de Marignane s'étaient beaucoup développées, grâce à un climat permettant une importante évaporation. Mais à partir de 1966, le canal de dérivation de la Durance a commencé à déverser ses eaux dans l'étang de Berre. Il en est résulté une forte dessalure du milieu, la salinité

s'abaissant à moins de 3‰ et généralement même moins de 2‰ à l'époque actuelle.

La figure 6 permet de comparer les apports d'eaux douces par la dérivation de la Durance à l'évolution de la salinité de chaque niveau (0,4 et 7 m) dans toutes les stations de l'étang de Berre au cours de 1977 et 1978. La relation inverse entre les deux paramètres est évidente.

Tableau 1. Evolution de la Salinité en divers Points de l'étang de Berre
(S : en surface, F : près du fond)

Année	Sta.	J S/F	F S/F	M S/F	A S/F	M S/F	J S/F
1912	IV	.	.	.	.	.	.
	III	.	.	.	.	.	.
1947	V	.	.	.	31, 7/—	32, 5/—	32, 9/33, 4
1948	V	.	31, 6/31, 8	.	.	.	29, 6/—
1952	VII	.	.	.	.	.	.
	IV	.	.	.	.	.	.
1953	VII	29, 0/29, 5	29, 5/29, 5	28, 0/28, 0	29, 0/29, 5	.	.
	IV	29, 5/30, 0	29, 5/29, 5	28, 0/28, 5	30, 0/30, 5	.	.
1955	IV	.	.	.	.	.	.
	IV	.	.	.	.	.	.
1956	VI	33, 0/33, 5	.	32, 5/33, 0	31, 5/31, 5	30, 5/31, 0	30, 5/30, 5
	IV	33, 0/33, 5	.	32, 5/33, 0	32, 0/32, 0	31, 5/31, 0	31, 0/31, 0
1958	VII	.	.	.	.	.	.
1959	VII	.	.	.	.	.	.
	V	.	.	.	.	.	.
	IV	.	.	.	.	.	.
1960	VII	.	.	.	.	.	.
	V	.	.	.	.	.	.
	IV	27, 5/—	.	26, 7/—	.	25, 8/—	.
	III	.	.	.	.	.	.
1962	IV	.	.	.	.	.	32, 0/—
	III	.	.	.	.	.	.
1963	IV	.	32, 5/33, 3	30, 5/—	.	.	31, 7/32, 0
	III	.	31, 6/32, 7	.	.	.	31, 7/35, 1
1964	VII	.	.	.	.	28, 0/28, 1	.
	V	.	.	.	.	28, 6/29, 2	.
	IV	.	.	.	.	28, 8/29, 4	.
	III	.	.	.	.	29, 0/30, 2	.
1965	VII	.	.	.	.	31, 7/32, 3	32, 2/32, 3
	V	.	.	.	.	32, 3/—	32, 7/—
	IV	.	.	.	.	32, 7/—	32, 9/—
1966	VII	.	30, 8/32, 7	27, 5/31, 1	20, 1/28, 9	11, 6/22, 4	13, 9/18, 2
	V	.	32, 0/—	31, 0/—	25, 2/—	19, 0/—	16, 1/—
	IV	.	31, 8/—	30, 6/—	27, 6/—	20, 1/—	16, 9/—
1967	VII	2, 9/12, 7	4, 6/11, 0	8, 3/12, 6	14, 5/16, 0	17, 0/18, 0	19, 9/20, 5
	V	10, 9/—	9, 0/—	10, 2/—	15, 7/22, 9	15, 5/29, 5	20, 3/27, 9
	IV	11, 5/—	10, 0/—	9, 3/—	15, 6/28, 0	17, 4/32, 7	20, 2/30, 0
	III	.	.	.	.	.	.

Annee	Sta.	J S/F	A S/F	S S/F	O S/F	N S/F	D S/F
1912	IV	24/<24	.	.	.	.	.
	III	24, 5/32, 5	.	.	.	.	.
1947	V	34, 1/—	.	.	35, 2/35, 6	.	.
1948	V	.	.	.	.	.	.
1952	VII	26, 5/27, 5	.	29, 0/29, 5	30, 0/30, 0	28, 5/28, 5	.
	IV	27, 5/28, 0	.	29, 5/30, 0	30, 0/31, 0	29, 0/29, 0	.
1953	VII	.	30, 5/31, 0	.	.	.	.
	IV	.	31, 5/31, 0	.	.	.	.
1955	IV	.	.	.	35, 0/35, 5	32, 0/33, 5	32, 5/33, 0
	IV	.	.	.	35, 5/36, 0	33, 5/33, 5	33, 0/33, 0
1956	VI	31, 5/32, 0	.	32, 0/32, 5	.	.	.
	IV	31, 5/32, 0	.	33, 0/33, 0	.	.	.
1958	VII	.	.	31, 5/—	.	.	.
1959	VII	.	.	.	.	31, 4/—	.
	V	.	33, 6/—	.	.	.	.
	IV	.	.	.	.	31, 2/—	24, 4/—
1960	VII	.	.	.	30, 0/—	27, 9/—	25, 5/27, 5
	V	.	.	.	.	28, 0/30, 4	27, 4/27, 5
	IV	28, 2/—	.	.	.	.	.
	III	.	.	.	.	.	27, 7/32, 6
1962	IV	.	.	.	.	33, 6/35, 0	.
	III	.	.	.	.	33, 1/34, 8	.
1963	IV	31, 6/—	.	30, 7/—	.	30, 5/—	.
	III	.	.	.	.	.	.
1964	VII	.	.	.	31, 1/31, 2	.	.
	V	.	.	.	31, 5/31, 5	.	.
	IV	.	.	.	31, 6/34, 8	.	.
	III	.	.	.	.	.	.
1965	VII	33, 5/33, 3	.	33, 2/33, 6	32, 6/32, 9	.	32, 5/32, 6
	V	33, 5/—	.	33, 9/—	33, 5/—	.	32, 5/—
	IV	33, 6/—	.	33, 3/—	33, 1/—	.	33, 0/—
1966	VII	17, 7/19, 0	.	21, 7/21, 9	11, 5/22, 3	.	.
	V	18, 0/—	.	21, 4/—	19, 2/—	.	.
	IV	18, 2/—	.	21, 7/—	17, 9/—	.	.
1967	VII	21, 1/23, 0	23, 4/24, 0	24, 0/25, 1	23, 0/26, 3	18, 5/25, 0	14, 1/22, 7
	V	21, 5/26, 8	23, 9/30, 1	28, 8/28, 1	24, 8/27, 2	23, 3/28, 5	22, 7/24, 0
	IV	21, 7/34, 0	24, 0/32, 8	25, 9/32, 2	22, 8/29, 0	22, 3/33, 3	22, 4/23, 5
	III	.	.	25, 7/31, 6	.	.	.

Annee	Sta.	J S/F	F S/F	M S/F	A S/F	M S/F	J S/F
1968	VII	12, 4/21, 5	8, 6/20, 5	14, 1/17, 7	16, 8/19, 2	.	.
	V	21, 5/22, 2	16, 3/29, 2	17, 2/22, 4	17, 2/31, 6	.	.
	IV	19, 5/31, 8	14, 1/31, 2	17, 3/26, 3	17, 1/26, 9	.	.
1969	VII	2, 1/ 9, 7	5, 1/11, 0	3, 9/ 8, 3	5, 8/ 8, 3	4, 8/ 5, 0	7, 1/ 9, 0
	IV	9, 0/32, 4	10, 1/18, 8	5, 7/30, 6	7, 5/12, 1	7, 9/31, 7	8, 8/25, 8
1975	VII	.	.	.	.	.	11, 1/11, 9
	V	.	.	.	.	.	11, 4/17, 9
	IV	.	.	.	.	.	11, 4/30, 1
	VIII	.	.	.	.	.	11, 4/32, 8
1976	VII	.	6, 1/10, 3	.	.	.	.
	V	.	8, 3/16, 8	.	.	.	.
	IV	.	6, 1/28, 8	.	.	.	.
	III	.	5, 6/34, 5	.	.	.	.
1977	VII	4, 9/ 5, 9	.	3, 5/ 3, 7	3, 7/ 4, 1	3, 8/ 2, 8	2, 1/ 2, 4
	V	4, 2/ 5, 6	.	3, 4/ 3, 4	3, 4/ 4, 0	2, 5/ 2, 7	2, 1/ 2, 3
	IV	3, 7/15, 3	3, 2/19, 3	3, 5/ 3, 4	3, 9/ 4, 1	3, 4/11, 7	2, 7/ 2, 8
	III	2, 3/—	2, 7/—	3, 2/ 3, 6	3, 4/ 3, 3	3, 4/ 3, 3	2, 5/ 2, 0
1978	VII	.	1, 4/ 4, 6	2, 4/ 3, 5	1, 8/ 3, 3	2, 7/ 3, 6	1, 7/ 3, 0
	V	.	3, 5/ 4, 5	3, 1/ 5, 4	2, 6/ 3, 4	3, 3/ 3, 3	1, 8/ 2, 9
	IV	.	3, 9/ 4, 5	3, 3/ 3, 4	2, 5/ 3, 5	3, 3/ 3, 4	2, 4/ 3, 0
	III	5, 0/—	9, 1/ 9, 0	8, 5/ 8, 3	8, 4/ 8, 4	7, 7/ 7, 2	8, 1/ 6, 6

La pluviosité et l'évolution de la salinité sont également liées par une corrélation inverse à l'échelle de l'année, mais il est bien certain, comme on va le vérifier que le rôle de la pluie tombant directement sur les étangs est très inférieur à celui qu'elle joue indirectement lorsqu'elle tombe sur le bassin versant des affluents de l'étang de Berre, au premier rang desquels il faut évidemment situer la Durance (Kim, 1982).

Dans l'étang de Berre (fig. 7 et 8), les valeurs de sigma-t sont toujours positives, en 1977 et 1978, sauf en juillet et août, correspondant à la période de maximum thermique.

Les fluctuations saisonnières de la densité sont sensiblement calquées sur celles de la salinité, décrites plus haut. On constate notamment qu'elles sont plus importantes au voisinage du fond qu'en surface et qu'elles présentent partout un minimum estival et un maximum automnal et hivernal.

On voit apparaître des pycnoclines chaque fois qu'il existe des haloclines (cf. fig. 2 et 3). Elles peuvent être cons-

tatées dans toutes les stations mais le sont plus souvent dans la partie méridionale que dans la moitié septentrionale de l'étang. Ces pycnoclines et leurs variations semblent plus fréquentes en 1977 qu'en 1978, mais il y a lieu de tenir compte d'un rythme de sorties beaucoup plus soutenu pendant la première année. Bien entendu, l'élévation de la salinité consécutive à la sécheresse de l'été 1978 se traduit aussi par une élévation sensible de la densité et pouvant atteindre 10 en surface.

L'évolution de la densité des eaux est très comparable dans toutes les stations, si l'on excepte l'incidence des incursions temporaires d'eaux salées au fond de certaines stations, surtout méridionales. Globalement, comme pour la salinité, il existe seulement un très faible gradient croissant du Nord vers le Sud, dû à l'influence plus marquée des eaux douces légères au Nord, et des eaux salées plus lourdes au Sud.

On retrouve cette faible différence entre les caractéristiques de densité des stations 3 et 1 (très comparables aux stations VII et III) dont les moyennes bisannuelles et valeurs

Annee	Sta.	J S/F	A S/F	S S/F	O S/F	N S/F	D S/F
1968	VII	13, 3/15, 2	15, 8/16, 9	6, 2/15, 9	10, 6/15, 3	8, 4/14, 1	9, 7/11, 2
	V	14, 4/21, 0	16, 8/29, 1	12, 5/32, 2	16, 2/31, 9	.	.
	IV	14, 8/32, 3	17, 0/32, 4	13, 0/34, 9	14, 1/30, 0	12, 0/30, 9	9, 7/32, 3
1969	VII	8, 7/ 9, 5	6, 6/14, 8	9, 1/14, 6	.	.	.
	IV	8, 6/32, 4	11, 4/33, 9	13, 3/33, 6	.	.	.
1975	VII	.	.	8, 9/20, 0	.	.	.
	V	.	.	14, 1/30, 9	.	.	.
	IV	.	.	16, 9/30, 7	.	.	.
	VIII	.	.	16, 1/30, 1	.	.	.
1976	VII	.	.	.	.	.	.
	V	.	.	.	.	.	8, 2/ 9, 8
	IV	.	.	.	.	.	9, 7/16, 0
	III	.	.	.	.	.	.
1077	VII	2, 0/ 2, 8	4, 3/ 5, 9	4, 5/ 6, 8	0, 8/10, 4	2, 7/ 8, 8	5, 5/ 6, 9
	V	1, 9/ 2, 8	5, 4/ 7, 7	5, 4/10, 2	5, 5/21, 8	5, 2/16, 6	5, 3/ 7, 2
	IV	2, 2/ 3, 5	5, 1/ 9, 8	5, 5/ 9, 0	3, 0/18, 3	6, 0/ 3, 1	4, 8/ 6, 6
	III	2, 3/ 2, 4	5, 1/15, 8	4, 8/15, 1	1, 4/ 7, 5	5, 3/29, 0	2, 5/ 3, 3
1978	VII	2, 1/ 2, 6	2, 5/11, 6	6, 1/22, 0	13, 5/16, 3	13, 8/15, 6	.
	V	2, 6/ 2, 7	2, 5/ 7, 9	7, 1/10, 8	12, 7/16, 0	13, 7/16, 4	.
	IV	2, 7/ 2, 7	3, 1/ 7, 1	6, 9/13, 2	14, 6/16, 0	13, 0/15, 8	.
	III	7, 3/ 5, 7	4, 7/ 6, 1	7, 5/ 5, 6	7, 9/ 4, 1	8, 9/ 5, 1	12, 3/—

extrêmes sont respectivement de 2, 46 (– 1,10 à 6,36) et 3,05 (– 0,98 à 9,95). Par comparaison, la densité de surface à l'extrémité occidentale du chenal de Caronte est bien supérieure: 0,82 (3,57 à 16,96), ce qui, là encore, correspond bien à ce qui a été montré lors de l'étude de la salinité.

Les seuls travaux antérieurs concernant la densité des eaux sont ceux de Minas (1968, 1970 et 1973), bien qu'on puisse évidemment aussi utiliser les données de température et salinité d'autres auteurs. La densité, autrefois voisine de celle de l'eau de mer s'est considérablement abaissée à la suite de la dérivation des eaux de la Durance, jusqu'aux faibles valeurs constatées dans la présente étude.

Salinité et Densité de l'Étang de Vaïne

Les 3 stations visitées dans l'étang de Vaïne présentent les variations de salinité extrêmement similaires, comme le montre la figure 4 B et comme le confirment leurs

moyennes générales annuelles qui s'élèvent à 5, 13‰ à la station 8, 5,22‰ à la station 9 et 5,26‰ à la station 10. On remarque aussi que ces valeurs sont très proches de celles de l'étang et que l'évolution générale est tout à fait comparable dans les deux étangs (Fig. 4 C). Cette comparaison des fluctuations de la salinité de la ville de Berre à celle de Martigues montre que lors des fortes dérivations du canal EDF de la Durance, de juillet 1977 à Juin 1978, les valeurs mesurées à la stations 8 sont plus fortes et plus stables que celles des stations I et IV, alors que, lors des périodes de sécheresse, à partir de juillet 1978, ces valeurs de la salinité sont moins fortes que celles des stations I et IV. Ceci indique le caractère indirect de l'influence des apports de la Durance sur l'étang de Vaïne. Du reste, dans la plupart des cas, un examen attentif montre que les variations dans l'étang de Vaïne dépendent de celles qui affectent l'étang de Berre, mais ne s'y propagent qu'avec un certain retard et de façon amortie.

La densité des eaux de l'étang de Vaïne varie très peu d'une station à l'autre (fig. 9 B). Ses valeurs et ses varia-

tions saisonnières sont pratiquement identiques à celles qui viennent d'être décrites pour l'étang de Berre (fig. 9 C) et sont essentiellement déterminées par celles de la salinité (cf. fig. 4 B et C).

Les moyennes générales de sigma-t aux stations 8, 9 et 10 sont respectivement de 3,00; 2,96 et 2,91.

Salinité et Densité des Eaux douces

La mesure de la salinité des eaux douces est à priori beaucoup moins importante que celle des eaux saumâtres ou des eaux de mer. Elle s'est cependant révélée utile.

En ce qui concerne la salinité ou la conductivité des eaux douces, certains auteurs utilisent directement leurs mesures de conductivité comme caractéristique hydrologique (cf. Dussart, 1966), tandis que d'autres convertissent ces don-

nées en salinité (cf. Hutchinson, 1957). Dans le cas présent, où les eaux saumâtres sont l'objet principal de l'étude et où sont également considérées les eaux salées, la conversion en salinité s'imposait aussi pour les eaux douces.

La figure 4 D montre que les quatre cours d'eau présentent au long de l'année une salinité très constante. Mais elle montre surtout aussi que cette salinité diffère beaucoup entre eux. En effet, elle est tout-à-fait caractéristique de l'eau douce (0 - 0,5‰) dans la Touloubre, la Durance et l'Arc, tandis que celle de la Durançole correspond à de l'eau oligohaline (0,5 - 3‰). Plus précisément, elle varie entre 1,00 et 1,98‰, autour d'une moyenne générale de 1,43 (Kiener, 1978 cite une valeur de 1,13‰). La Durançole montre ainsi une nouvelle fois son caractère d'eau thermique minéralisée.

La Durance, dont l'importance pour l'étang de Berre

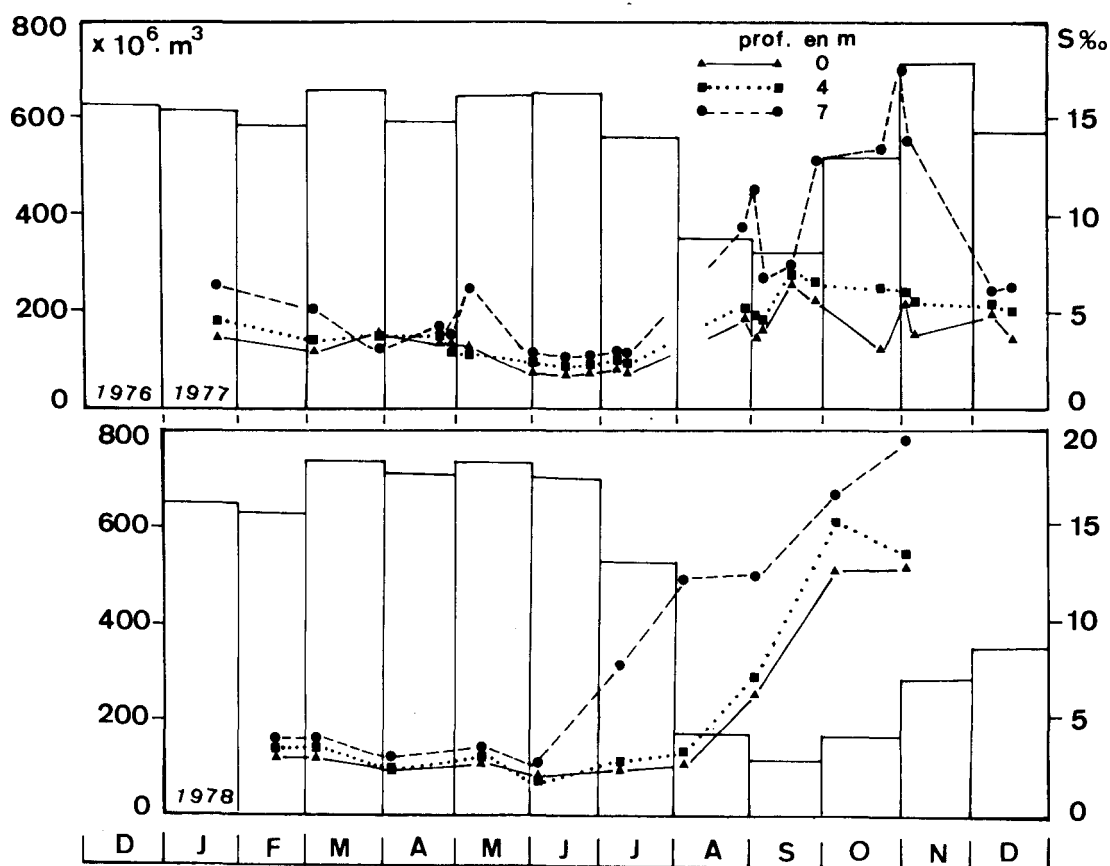


Fig. 6. Débits moyens mensuels du canal de dérivation de la Durance à l'usine de Saint-Chamas, en m^3 , comparés à l'évolution annuelle des moyennes de la salinité de chaque niveau (0,4 et 7m) de l'étang de Berre, au cours des deux années 1977 et 1978.

est de loin la plus considérable, est le moins minéralisé des affluents considérés, avec une moyenne de 0,28‰.

La moyenne s'élève respectivement à 0,38 et 0,43 dans la Touloubre et dans l'Arc, dont les caractéristiques sont très voisines à cet égard.

Il n'est pas habituel d'avoir recours à sigma-t pour étudier la densité des eaux douces, mais il nous a semblé que son emploi s'imposait dans le cas présent, par comparaison avec les eaux saumâtres.

Les valeurs de sigma-t mesurées dans les embouchures des quatre cours d'eau afférents oscillent entre -1,5 et 0,5. Les moyennes générales obtenues sont très voisines dans la Touloubre (-0,23), la Durance (-0,22) et la Durançole (-0,22) alors que celle de l'Arc est un peu plus basse (-0,39).

Les variations saisonnières de la densité (fig. 9 D) sont relativement réduites et sont comparables dans les quatre affluents quoique plus atténuées dans la Durançole et plus importantes dans l'Arc. Ceci peut s'expliquer par leurs caractéristiques thermohalines. En effet, la Durançole, relativement beaucoup plus salée que les trois autres cours d'eau, est plus dense qu'eux en été mais non en hiver (sa température est alors beaucoup plus élevée que celle des autres, ce qui compense sa salinité plus forte). Quant à l'Arc, sa moyenne plus faible ainsi que les valeurs estivales, sont dues à sa température plus élevée, surtout en été.

Salinité et Densité de l'Eau de Mer

Golfe de Fos (station II) : on a vu plus haut que la salinité de la station 2 est bien supérieure à celle de l'étang de Berre. On constate aussi (Fig. 2 II et 3 II) que ses variations sont très importantes (entre 5 et 25‰ environ). La station II (golfe de Fos) est sous l'influence des eaux saumâtres de l'étang, surtout en surface, mais ne montre jamais une dessalure aussi forte que la station 2. Les valeurs de salinité mesurées à la station II sont comprises entre 18,65 et 38,35‰. De telles fluctuations de la salinité superficielle dans le golfe de Fos ont été décrites par des travaux antérieurs (Blanc et al., 1969 et 1975; Blanc et Leveau, 1970; Benon et al., 1976).

Au dessous de 4m, on retrouve à peu près complètement les caractères de l'eau de mer méditerranéenne. Le 31 mars 1977, la très forte salinité mesurée à 7m (38,35‰), et d'ailleurs également constatée à la station I, pourrait signaler l'arrivée près de la surface d'une masse d'eau "intermédiaire de Méditerranée" (Coste, 1971; Coste et al., 1972).

Si on compare les stations II et III (fig. 2 et 3), c'est-à-dire, les deux extrémités du canal de Caronte, on peut constater que l'échange entre la mer et l'étang se fait mal. A l'extrémité orientale du canal de Caronte, on a des eaux très dessalées presque douces, avec un peu d'eau salée au fond. A l'extrémité occidentale, on a presque de l'eau de mer irrégulièrement dessalée en surface.

Carry-le-Rouet (station I) : Sur les deux années étudiées, la valeur moyenne pondérée de la salinité de la station I est de 37,607‰. Cette salinité est à peu près homogène dans toute la colonne d'eau, sauf dans le cas de dilution rhodanienne ou d'arrivée d'eau douce en provenance du canal de Caronte, mais les upwelling et l'apparition de l'eau intermédiaire des périodes printanières et automnales se font sous l'influence puissante et durable du mistral. Le 29 avril 1977, la salinité s'est abaissée jusqu'à 34,025‰, à 0 m; le 6 juin 1978, à 20,098‰, à 0 m bien qu'il y ait 25 km de distance entre l'embouchure du Rhône et la station de mesure. La figure 2 I et 3 I montre que l'extension verticale de la dilution n'intervient pas tout de suite. On peut trouver des variations relativement importantes jusqu'à la profondeur de 10 m. A partir de 25 m, on ne décèle aucune influence directe. Mais on retrouve encore cette baisse importante (35,904‰ en juillet 1978) au niveau de 25 m un mois plus tard. A ce moment-là, la salinité varie beaucoup entre les niveaux puisqu'elles sont 37,821‰ à 10 m et 37,977‰ à 50 m.

Cette station peut sans doute être expliquée par une alternance de mistral et de vents d'Est, le premier apportant en surface des eaux dessalées venant du golfe de Fos et pouvant déclencher au fond une remontée d'eaux sub-superficielles salées, tandis que le vent d'Est accumule en surface à la côte des eaux salées venant du large, renforçant ainsi l'influence du courant permanent Est-Ouest du Nord de la Méditerranée occidentale (Allain, 1963; Castelbon, 1972).

Le 31 mai 1977, la salinité maximale mesurée était de 38,410‰, à 50m. Diverses caractéristiques hydrologiques (salinité, densité, teneurs en nitrates et nitrites) semblent indiquer l'arrivée près de la surface d'une masse d'eau "intermédiaire de Méditerranée" (Coste, 1971; Coste et al., 1972), qui se combinerait en surface avec l'influence des fortes dessalures récentes (Kim, 1979).

Dans l'ensemble, c'est-à-dire en exceptant seulement des dessalures tout-à-fait exceptionnelles, les données recueillies à la station I s'intègrent bien aux résultats publiés jusqu'à ce jour pour des eaux voisines (Devèze 1959,

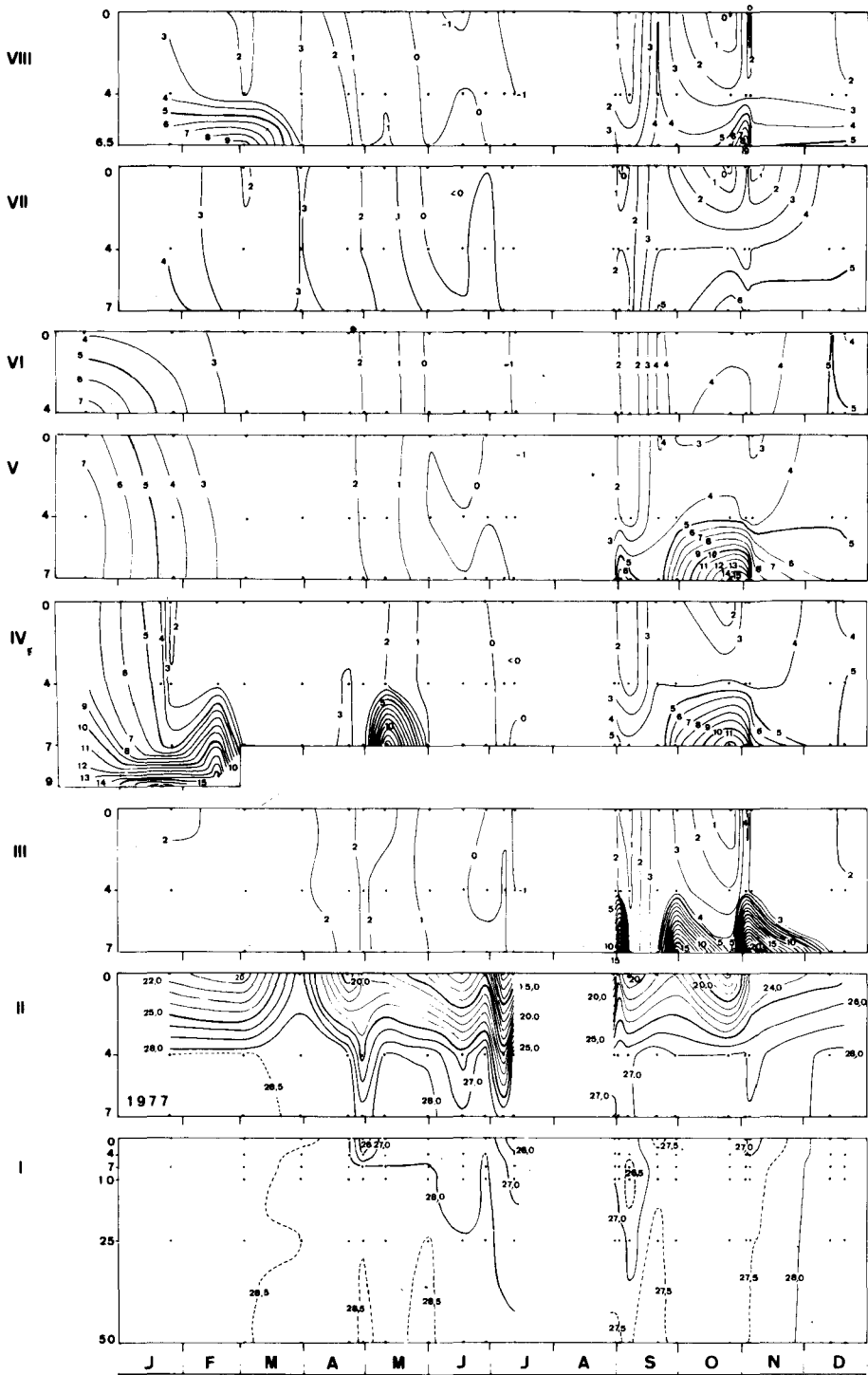
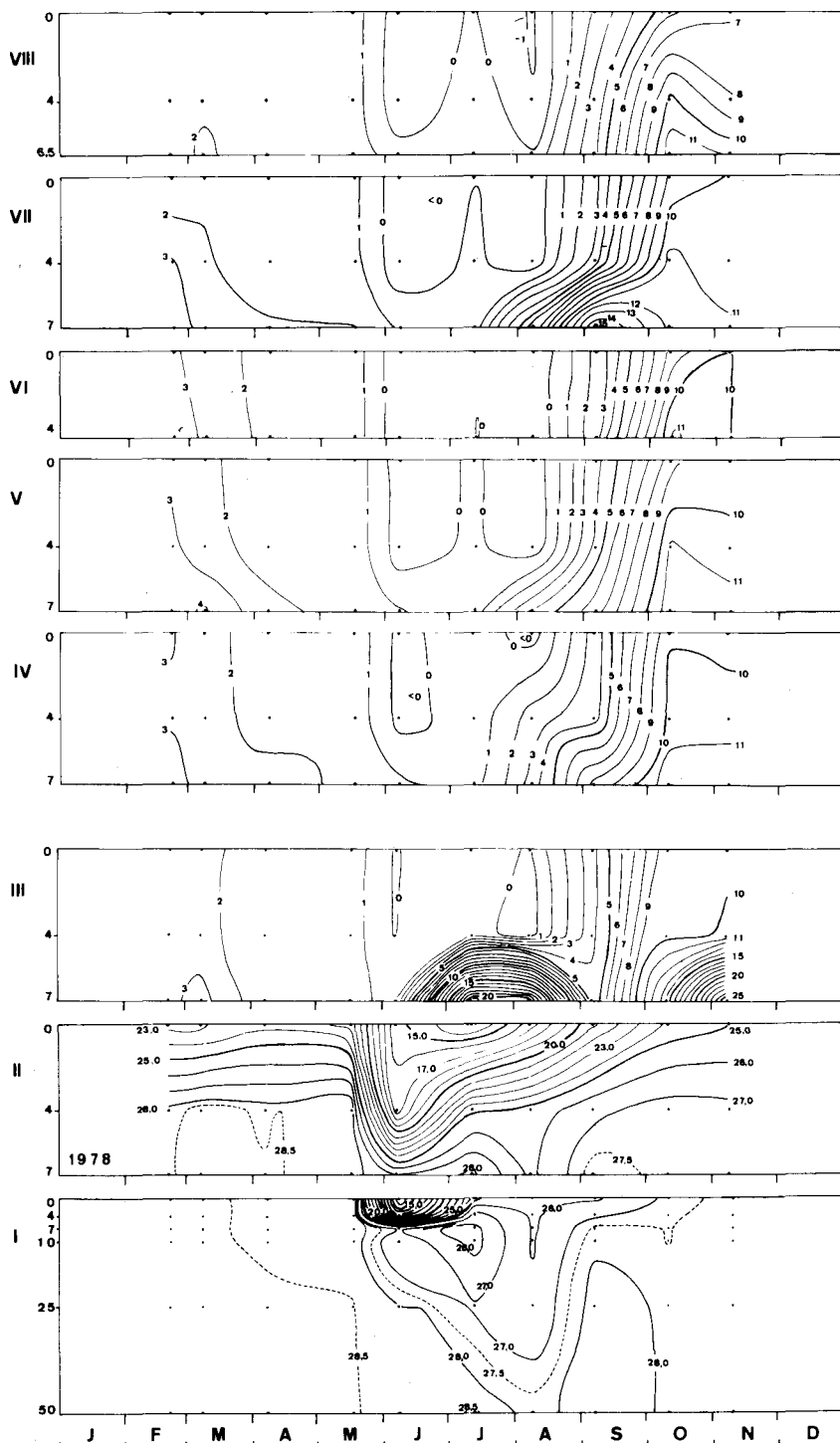


Fig. 7. Evolution annuelle de sigma-t au cours de l'année 1977 aux stations VIII-1.



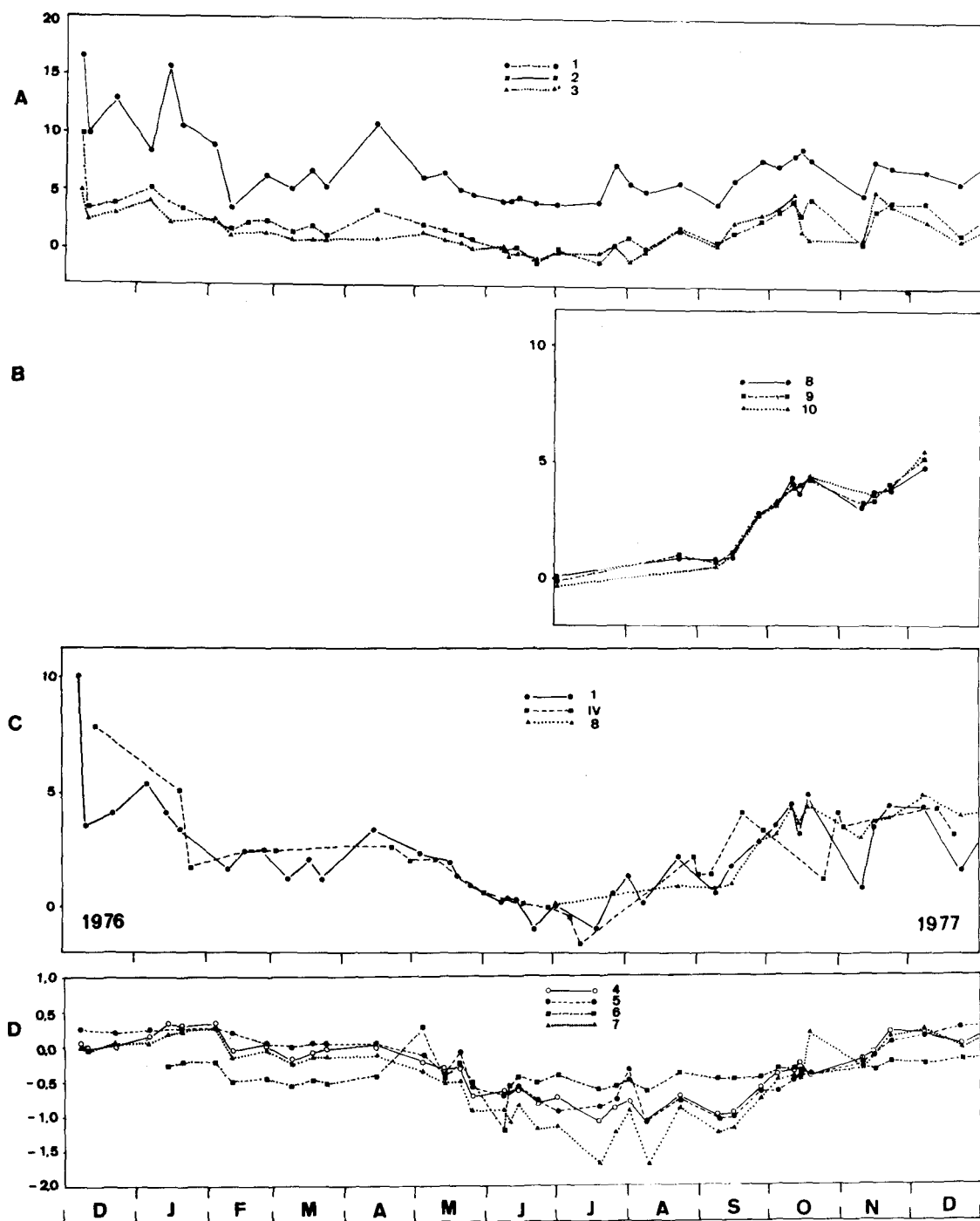


Fig. 9. Évolution annuelle de sigma-t en surface de décembre 1976 à décembre 1977 aux stations 1, 2 et 3(A) ; 8, 9 et 10(B) ; 1, IV et 8(C) ; 4, 5, 6 et 7(D).

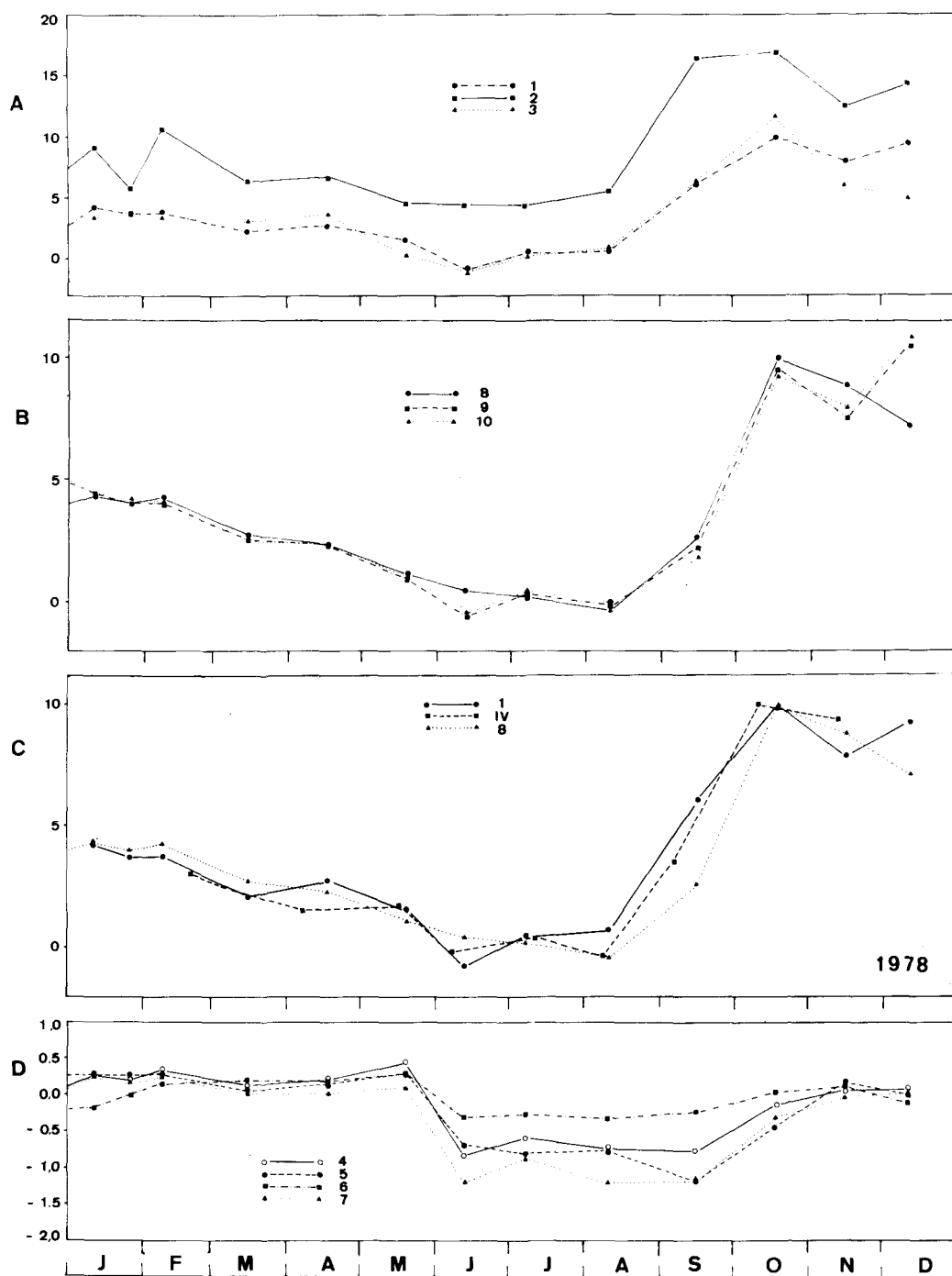


Fig. 10. Evolution annuelle de sigma-t en surface en 1978 (voir légende de la fig. 9.).

Gaudy 1962, 1970, Minas, 1971).

Golfe de Fos (station II): Comme on l'a vu plus haut, de Martigues au golfe de Fos, les valeurs de la densité des eaux augmentent fortement au fur et à mesure de la diminution de l'influence des eaux douces. Au niveaux de 4 m de la station II (golfe de Fos), elles atteignent presque celles de l'eau de mer. Pour l'ensemble de la colonne d'eau, elles varient entre 11,06 et 28,72, valeurs extrêmes indicatrices d'eaux saumâtres superficielles ou d'eaux marines plus profondes. Il n'apparaît pas de variations saisonnières bien caractérisées, mais en revanche, une stratification absolument permanente conduisant à une stabilité verticale variable mais toujours présente.

Carry-le-Rouet (station I): La variation de sigma-t à la station I (parages de Carry-le-Rouet) est en général relativement faible, sauf lors des grandes dessalures dues à deux eaux rhodaniennes en avril, juillet et septembre 1977 et en juin et juillet 1978. Toutefois, on ne constate la présence d'une pycnocline abrupte qu'en avril 1977 et juin-juillet 1978. Ces variations occidentales importantes masquent en grande partie les variations saisonnières beaucoup plus limitées qui sont normalement liés aux fluctuations de la température. On retrouve cependant un incontestable cycle annuel montrant un maximum hivernal et un minimum estival.

La "valeur moyenne" pour les deux années est de 27,825. La valeur maximale calculée atteint 28,917, aux niveaux de 25 et 50 m, le 20 février 1978. Par contre, le minimum était de 13,196, en surface, le 6 juin 1978 (Kim, 1979).

D'autre part, il est remarquable que le 11 juillet 1978, la valeur du niveau de 25 m ait été plus faible que celles des niveaux de 4, 7 et 10 m. On retrouve ici le problème soulevé à propos de l'étude de la salinité et pour lequel il a été proposé une explication liée à l'alternance des vents de NW et d'Est.

Diagramme T-S

La figure 11, considérée comme représentative de l'étang de Berre, est basée sur les moyennes mensuelles (pour les deux années) de la température et de la salinité aux seules stations IV et VII. Les mois y sont indiqués en chiffres arabes et le diagramme présente en outre les tracés de courbes de sigma-t d'après les tables de Kealer (1965).

On constate très peu de différences entre les tracés des

deux stations bien que la station IV ait une salinité légèrement plus forte. La différence est plus nette entre les niveaux de 0 et 7 m, notamment d'août à novembre, ce qui rappelle l'influence prépondérante de la salinité dans la structure thermohaline de l'étang de Berre.

En suivant les tracés, on retrouve en particulier, de février à juillet un accroissement progressif de la température sans changement notable de la salinité moyenne, puis une augmentation de celle-ci, surtout en profondeur, jusqu'en octobre ou novembre, suivie d'une diminution des deux paramètres.

Les points du diagramme T-S collectif (Kim, 1979) représentent toutes les valeurs relatives aux mesures effectuées à la station I en 1977 et 1978. Ce diagramme montre également les tracés des courbes de sigma-t d'après les tables de Kealer (1965). La dispersion des points est très forte et il n'apparaît pas de corrélation nette entre les deux paramètres (Kim, 1979).

Conclusion

Avant 1966, l'étang de Berre était presque aussi salé que la Méditerranée. A partir de cette date, l'écosystème a été complètement modifié par les déversements d'eaux douces provenant de la Durance, et il est maintenant très fortement dessalé, quoique d'une façon variable. La salinité de l'étang de Berre dépend des divers apports d'eaux douces, de l'eau méditerranéenne venant par le canal de Caronte et de l'évaporation qui dépend elle-même de la température et de divers facteurs comme l'insolation et le déplacement des masses d'air. Toutefois, la dérivation des eaux de la Durance joue ici un rôle beaucoup plus important que les autres facteurs.

Les valeurs de la salinité sont un peu plus fortes dans le secteur sud de l'étang que dans le Nord; mais ce gradient est vraiment très faible.

Les valeurs de la salinité de l'étang de Vaine sont extrêmement voisines de celles de l'étang de Berre, mais il n'est pas sous l'influence aussi directe des eaux de la Durance et ne la reçoit qu'indirectement et avec délai. La décroissance de la salinité est très nette dans le canal de Caronte. Les eaux du golfe de Fos (station II) offrent un caractère mixte puisqu'en surface, elles évoquent surtout celles de la station III (dans l'étang) alors que dans les couches sous-jacentes elles rappellent davantage le milieu marin vrai, tel qu'on peut l'observer à Carry-le-Rouet.

La figure 12, bien que limité aux valeurs observées en surface, confirme tout-à-fait, comme on pouvait s'y attendre, le gradient général qui vient d'être indiqué pour la

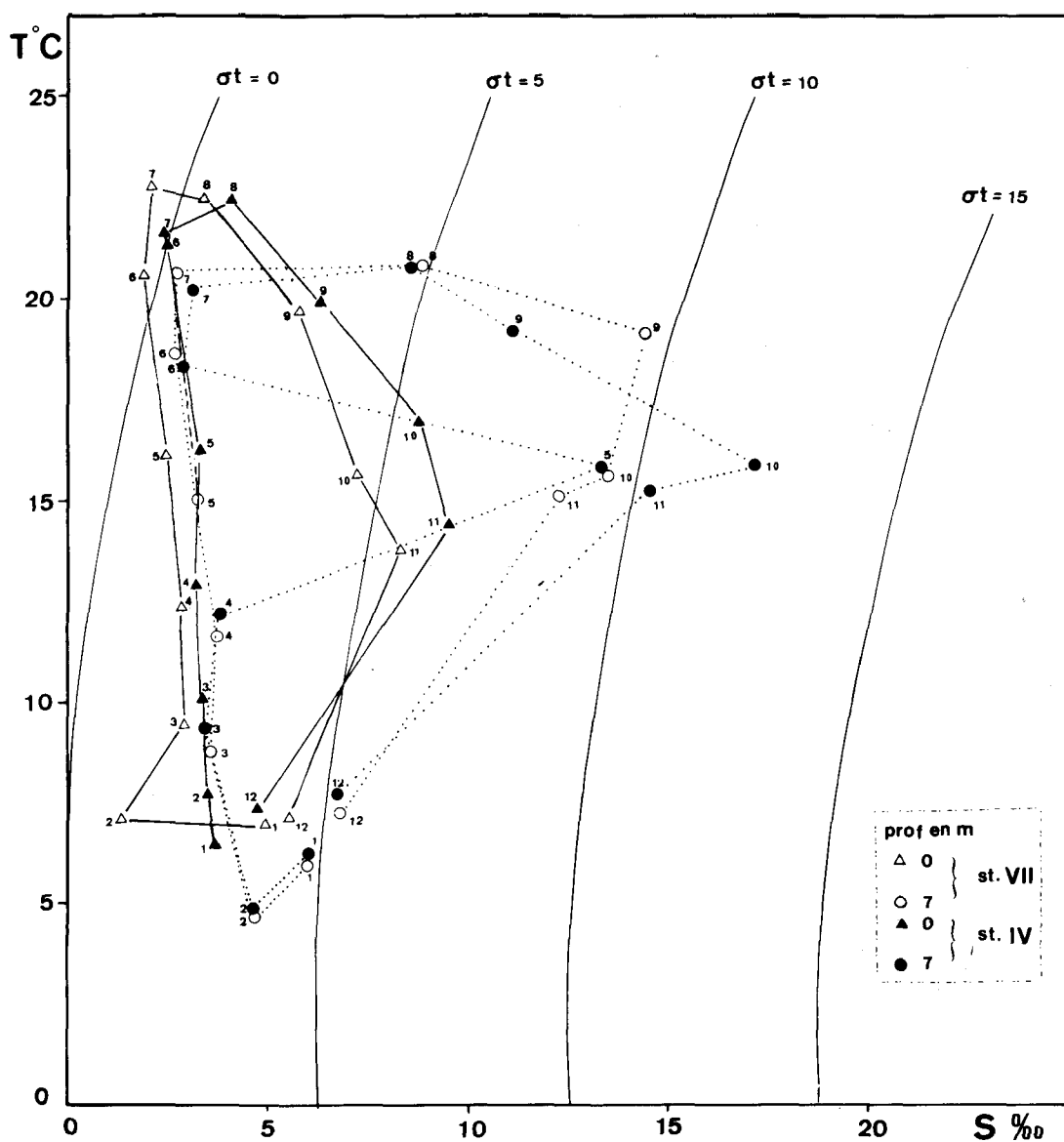


Fig. 11. Relations entre température et salinité aux stations IV et VII. Les graphiques joignent les valeurs moyennes de chaque mois (exprimé en chiffres arabes) pour deux niveaux : le tracé continu correspond aux eaux de 0m et le tracé discontinu aux eaux de 7m.

salinité, croissant des eaux douces à l'eau de mer: des valeurs très faibles dans les affluents (toutefois un peu plus élevées dans les eaux oligohalines de la Durançole), environ 4‰ dans l'étang de Berre, un accroissement important au passage du chenal de Caronte, conduisant à 10-12‰ à Port-de-Bouc, puis à 23‰ environ à la sur-

face du golfe de Fos, pour dépasser 37‰ près de Carry-le-Rouet.

Cette figure confirme également les différences signalées antérieurement entre les deux années.

L'étang de Berre (ainsi que celui de Vaine), avec une salinité moyenne de 5,5‰ environ, reçoit une contribu-

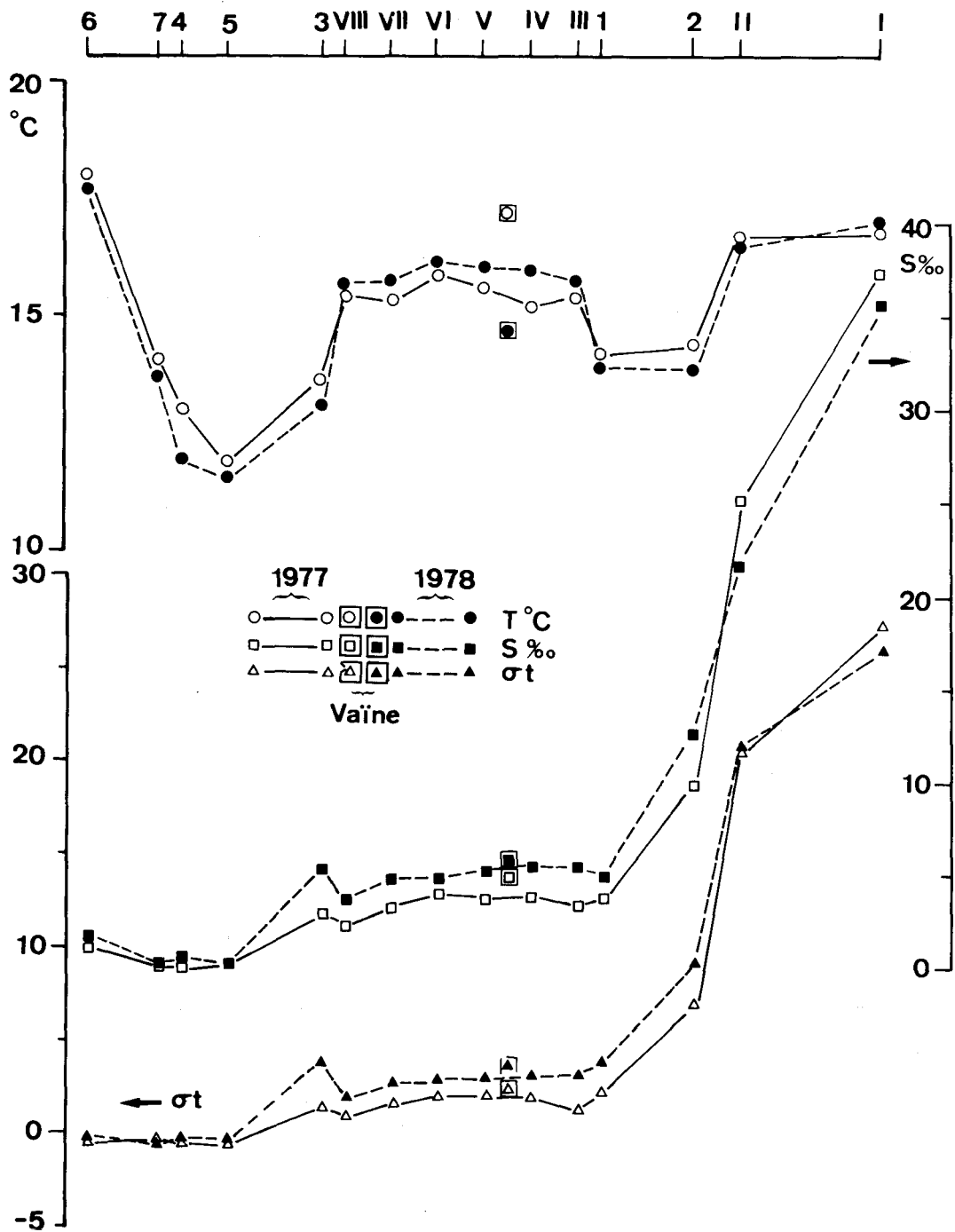


Fig. 12. Température, salinité et sigma-t moyens dans la plupart des stations étudiées au cours des années 1977 et 1978 (moyennes annuelles de surface).

tion six fois plus importante des eaux douces (Durance en particulier: 0,3‰) que de la Méditerranée (38‰); mais évidemment le mélange n'est pas homogène.

Il est intéressant de rapprocher le résultat de ce calcul du fait que l'excédent annuel des eaux douces dans l'étang de Berre est compris entre 7 et 8 fois son volume.

Les variations saisonnières, annuelles, verticales et horizontales de la densité des eaux des stations de l'étang de Berre sont, bien entendu, à peu près semblables à celles de la salinité.

Les caractéristiques de densité des eaux dépendent directement de la salinité et de la température et par conséquent sont indirectement sous la dépendance des facteurs météorologiques (ensoleillement, pluie, vent, etc.) et de l'influence des eaux douces, surtout la dérivation du canal de la Durance. Les eaux superficielles douces ou légèrement salées forment des couches d'eau légère surmontant des eaux subsuperficielles plus lourdes, notamment dans le chenal de Caronte ou dans la partie sud de l'étang de Berre.

Les valeurs de la densité des eaux dans les parages de Carry-le-Rouet sont très fortes par rapport à celles du golfe de Fos et surtout de l'étang sauf dans le cas relativement exceptionnel de perturbations par les eaux Rhodannienne et Carontienne dans la couche superficielle.

Dans les eaux saumâtres, la salinité exerce un rôle absolument prédominant dans les fluctuations de la densité. Au contraire, la température retrouve un rôle prééminent dans les eaux douces et dans les eaux marines (sauf pour ces dernières lorsque les nappes dessalées ont une importance particulière).

La figure 12 étant basée sur les moyennes annuelles de surface, l'influence des variations verticales et des variations saisonnières de température est complètement annulée. On y retrouve donc surtout l'effet des différences de salinité entre les diverses stations. Les graphiques des densités sont tout-à-fait parallèles à ceux des salinités et l'on y retrouve des valeurs plus élevées en 1978 qu'en 1977, à l'exception de la station I.

Références

- Allain C., 1963. Topographie dynamique et courants généraux dans le bassin occidental de la Méditerranée au Nord du 42° parallèle (supplément à l'étude hydrologique de septembre-octobre 1958). *Rec. Trav. Inst. Pêches marit.*, 27(2): 127—135.
- Benon P., Blanc F., Bourgade B., Charpy L., Kantin R., Kerambrun P., Leveau M., Romano J.C., Sautriot D., 1976. Golfe de Fos. Impact de la pollution. *Fondation sci. Ricard. Observatoire de la Mer, Bull.*, 3(1): 1—12.
- Blanc F., Coste B., Minas H.J., Szekiolda K.H., 1967. Distribution et corrélations des principaux facteurs hydrobiologiques dans un milieu de forte production organique (Etang de Berre) *Mar. Biol.*, 1(1): 43—55.
- Blanc F., Leveau M., 1970. Effects de l'eutrophie et de la dessalure sur les populations phytoplanctoniques. *Ibid.*, 5(4): 283—293.
- Blanc F., Leveau M., Bonin M.C., 1975. Ecosystème planctonique. Structure et fonctionnement en relation avec des phénomènes de dystrophie (golfe de Fos). *Int. Rev. ges. Hydrobiol.*, 60(3): 359—378.
- Blanc F., Leveau M., Szekiolda K., 1969. Effects eutrophiques au débouché d'un grand fleuve (Grand Rhône). *Mar. Biol.*, 3(3): 232—242.
- Castelbon C., 1972. Etude de la circulation des d'eau dans le golfe de Marseille. *Téthys*, 4(2): 269—312.
- Chevalier A., 1916. L'étang de Berre. *Ann. Inst. Océanogr.*, 5(4): 1—19.
- Collot L., 1882. Histoire quaternaire et moderne de l'étang de Berre. *Bull. soc. géol. Fr.*, (Sér 3) 10: 333.
- Coste B., 1971. Les sels nutritifs entre la Sicile, la Sardaigne et la Tunisie. *Cah. océanogr.*, 18(1): 49—83.
- Coste B., Gostan J., Minas H.J., 1972. Influence des conditions hivernales sur les productions phyto- et zooplanctoniques en Méditerranée nord-occidentale. I. structures hydrologiques et distribution des sels nutritifs. *Mar. Biol.*, 16: 320—348.
- Deveze L., 1959. Cycle biologique des eaux et écologie des populations planctoniques. *Rec. Trav. Sta. mar. Endoume.*, 25 (Bull.15): 1—218.
- Dussart B.M., 1966. Limnologie. L'étude des eaux continentales. Paris, Gauthier-Villars: 1—676.
- Gaudy R., 1962. Biologie des Copépodes pélagiques du golfe de Marseille. *Rec. Trav. Sta. mar. Endoume.*, 42 (Bull.27): 93—184.
- Gaudy R., 1970. Contribution à la connaissance du cycle biologique et de la physiologie des Copépodes du golfe de Marseille. Univ. Aix-Marseille, Thèse Doct. Etat. CNRS n° A.O. 3822:1—294.
- Hutchinson G.E., 1957. A treatise on limnology, vol. 1: Geography, physics, and chemistry, New York, J.Wiley: 1—1015.

- Kealer B.A.L., 1965. Table of sigma-t with intervals of 0.1 for temperature and salinity. *U.S. Fish. Wild. Serv. Spec. sci. Rep. Fish.*, 506: 1—186.
- Kiener A., 1978. Ecologie, physiologie et économie des eaux saumâtres. Ed. masson.: 220.
- Kim K.-T., 1979. Contribution à l'étude de l'écosystème pélagique dans les parages de Carry-le-Rouet (Méditerranée nord-occidentale) 1. Caractères physiques et chimiques du milieu. *Téthys*, 9(2): 149—165.
- Kim K.-T., 1982. La température des eaux des étangs de Berre et de Vaïne en relation avec celles des cours d'eau afférents et du milieu marin voisin (Méditerranée nord-occidentale) *Ibid.*, 10(4): 291—302.
- Kim K.-T. et Travers M., 1984. La phytoplancton des étangs de Berre et de Vaïne (Méditerranée nord-occidentale). *Int. Revue ges. Hydrobiol.*, 69(3): 361—388.
- 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. Univ. Paris, Thèse Doct.: 1—270.
- Minas H.J., 1961. Etude comparée de quelques facteurs physicochimiques des eaux portuaires et des eaux du golfe de Marseille. *Rec. Trav. Sta. mar. Endoume.*, 34 (Bull. 21): 5—58.
- Minas H.J., 1971. Observations hydrologiques dans le golfe de Marseille (Années 1961 à 1965). *Téthys*, 3(3): 447—457.
- Minas M., 1965. Aperçu hydrologique préliminaire sur l'étang de Berre. *Rec. Trav. Sta. mar. Endoume.*, 53 (Bull. 37): 3—9.
- Minas M., 1968. Quelques données hydrobiologiques sur l'étang de Berre durant la période postestivale. *Ibid.*, 60 (Bull. 44): 5—12.
- 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(1): 73—88.
- Minas M., 1973. Sur la synthèse et la dégradation de la matière organique dans l'étang de Berre. Dynamique et Bilans. Rapports avec le régime hydrologique. Univ. Aix-Marseille, Thèse Doct. Etat: 1—339.
- Minas M., 1976 a. Production organique primaire dans un milieu saumâtre eutrophe (étang de Berre). Effects d'une forte dilution (dérivation des eaux de la Durance). *Mar. Biol.*, 35: 13—29.
- Minas M., 1976 b. Evolution saisonnière de plusieurs paramètres indicateurs de la biomasse dans les eaux de l'étang de Berre et leurs relations. *Téthys*, 7 (2—3): 115—130.
- Schachster D., 1954. Contribution à l'étude hydrographique et hydrologique de l'étang de Berre (Bouches-du-Rhône). *Bull. Inst. Océanogr. Monaco.*, 51(1048): 1—20.

This article was presented by professor K. T. Kim;
it was accepted for printing on 30. December. 1987.