

# Le lac de Tunis après les aménagements. Paramètres physico-chimiques de l'eau et relation avec la croissance des macroalgues

*Tunis North lake after the restoration works. Physico-chemical parameters  
of the lake water and relationships with macroalgal growth*

par Ben Charrada Rafik

The Lake Group - B.P. 14 - La Goulette - Tunisie

## RÉSUMÉ

Après les aménagements du lac Nord de Tunis, les sels nutritifs (phosphore et azote), les paramètres physiques (salinité, température, turbidité), l'oxygène dissous et le pH ont été contrôlés pendant deux années successives (1988 et 1989) dans les eaux du lac. La variation spatiale de ces paramètres est fonction du sens de circulation du courant alors que leur variation temporelle reste influencée par la fluctuation de la biomasse végétale du lac. L'azote est un facteur principal pour le développement des macroalgues et, de ce fait, apparaît comme un facteur limitant pour leur croissance.

## ABSTRACT

After the restoration of the Tunis North lake, nutrients (total phosphorus, total nitrogen and dissolved inorganic components), physical parameters (temperature, salinity and water turbidity), dissolved oxygen and pH value, were monitored during the years 1988 and 1989 in the lake waters. The variation of these parameters in space, is related to the direction of the current whereas, their seasonal variation remains a function of the annual fluctuation of the vegetal biomass. Nitrogen is a principal factor for the macroalgal growth, and thus appears to be a limiting factor for their growth.

### MOTS CLÉS

LAC NORD DE TUNIS, POLLUTION, NUTRIMENT, BIOMASSE VÉGÉTALE, FACTEUR LIMITANT

### KEY-WORDS

TUNIS NORTH LAKE, POLLUTION, NUTRIENTS, VEGETAL BIOMASS, LIMITING FACTOR

Article reçu le 4 juin 1990 ; accepté le 28 mars 1991. / Received June 4, 1990 ; accepted March 28, 1991.

## INTRODUCTION

Le lac de Tunis est situé sur la côte méditerranéenne nord de la Tunisie. Autrefois, il faisait partie d'une lagune plus étendue. Celle-ci fut divisée en 1885 par un chenal de navigation, séparant ainsi le lac Nord dont la surface est de 27 km<sup>2</sup> et le lac Sud (12 km<sup>2</sup>) (figures 1 et 2). Le lac Nord peu profond (moyenne : un mètre) recevait environ 50 000 mètres cubes par jour d'eaux usées traitées et non traitées au niveau

Ouest (figure 2). Du fait du faible échange d'eau avec la mer, la lagune atteignait un degré d'eutrophisation très élevé se caractérisant, surtout en été, à la mort des macroalgues, par le dégagement d'une quantité énorme de gaz sulfurés.

Plusieurs tentatives furent entreprises pour trouver une solution à ce problème mais les résultats ne furent que très limités. Un large programme d'assainissement du lac a été envisagé en 1985 et entamé en 1988.

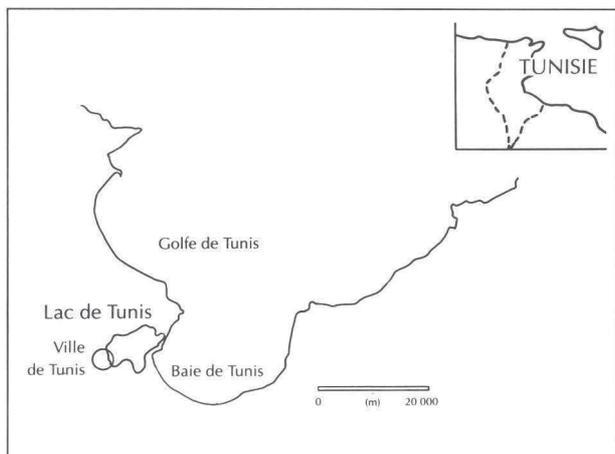


Figure 1 - Situation du lac de Tunis. / Situation of the lake of Tunis.

Il a consisté à mettre en place un système de circulation d'eau actionné par les marées, comprenant une sortie et une arrivée principale sous forme de vannes à l'entrée de l'eau de mer.

La circulation des eaux dans le lac est canalisée par une digue de séparation reliant les vannes d'entrée et de sortie à l'île de Chekli (figure 3).

17 millions de mètres cubes de boue ont été dragués et rejetés hors du lac et 15 millions de m<sup>3</sup> de sable ont été extraits du lac pour le remblayage des berges. Actuellement, le lac occupe une surface de 22 km<sup>2</sup> et reçoit environ 1,5 million de m<sup>3</sup> par jour d'eau de mer. Tous les rejets ont été arrêtés ; le lac est partiellement divisé en une partie nord draguée, de profondeur moyenne de deux mètres, et une partie sud non draguée, de profondeur moyenne d'un mètre (figure 3).

La qualité des eaux a été suivie, dès la fin des aménagements, pendant deux années (1988 et 1989) dans le lac, ainsi que dans le golfe de Tunis. Cinq stations ont été choisies dans le lac (figure 3) : trois dans la partie nord (stations 1, 2 et 3); une dans la partie sud non draguée (station 4); et une dans la partie sud draguée et qui représente la fin du parcours de l'eau (station 5). Trois stations sont situées dans le golfe de Tunis à un kilomètre du canal d'entrée des eaux de mer dans le lac.

Les paramètres physico-chimiques (température, salinité, oxygène dissous, pH, turbidité, N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub>, N-NH<sub>3</sub>, P-PO<sub>4</sub>, le phosphore total et azote total), la croissance des macroalgues et le contenu en chlorophylle *a* de l'eau du lac ont été contrôlés d'une façon périodique toutes les deux semaines.

Dans cette étude on essaiera de présenter les résultats des mesures des années 1988 et 1989 en

mettant l'accent sur les principaux changements enregistrés après les aménagements et les relations avec les processus biologiques dans la partie sud (station 4).

## MÉTHODES UTILISÉES

L'oxygène dissous, la température de l'eau, la salinité, le pH et la turbidité sont mesurés directement sur site. L'oxygène dissous est mesuré avant le lever du soleil avec un oxymètre type WTW OXI 196 à mi-profondeur. La salinité de l'eau est mesurée avec un salinomètre type WTW LF 191. Le pH est mesuré périodiquement vers 10 h du matin avec un pH-mètre du type WTW pH 196. La transparence est mesurée par un disque de Secchi de 25 cm de diamètre.

Les prélèvements d'eau sont réalisés à mi-profondeur dans le lac et à un mètre de profondeur dans le golfe. L'eau pour les analyses chimiques, est conservée dans des bouteilles en plastique bien acidifiées. Un litre d'eau est filtré par un GFC filtre pour analyse de chlorophylle *a*. Les analyses chimiques sont réalisées en laboratoire sur une eau filtrée pour les nitrites, nitrates, ammoniacque et orthophosphates et sur une eau non filtrée pour l'azote total et le phosphore total. Ces analyses chimiques sont dosées calorimétriquement par un Nannocolor 100 D. La chlorophylle *a* est déterminée par extraction à l'acétone (90%) fluorimétriquement.

La concentration des macroalgues au fond est déterminée à l'aide d'un cadre en bois de section carrée (0,8 x 0,8 m). Il est installé sur le fond; son contenu est récolté et nettoyé, puis pesé en poids frais humide sur le bateau. Le poids frais mesuré contient environ 15 % de matière sèche.

## RÉSULTATS

### 1 - Température de l'eau

La température de l'eau est un paramètre qui dépend des facteurs climatologiques. Du fait de la faible profondeur de l'eau, les variations de la température des eaux sont fonction de celles de l'air ambiant. Les vents jouent un rôle important sur la variation de la température. En hiver, ils soufflent principalement de la direction nord-ouest et ont pour effet le rafraîchissement des eaux du lac. En été, le vent souffle de la direction est et du fait de l'alternance des brises de terre et de mer,

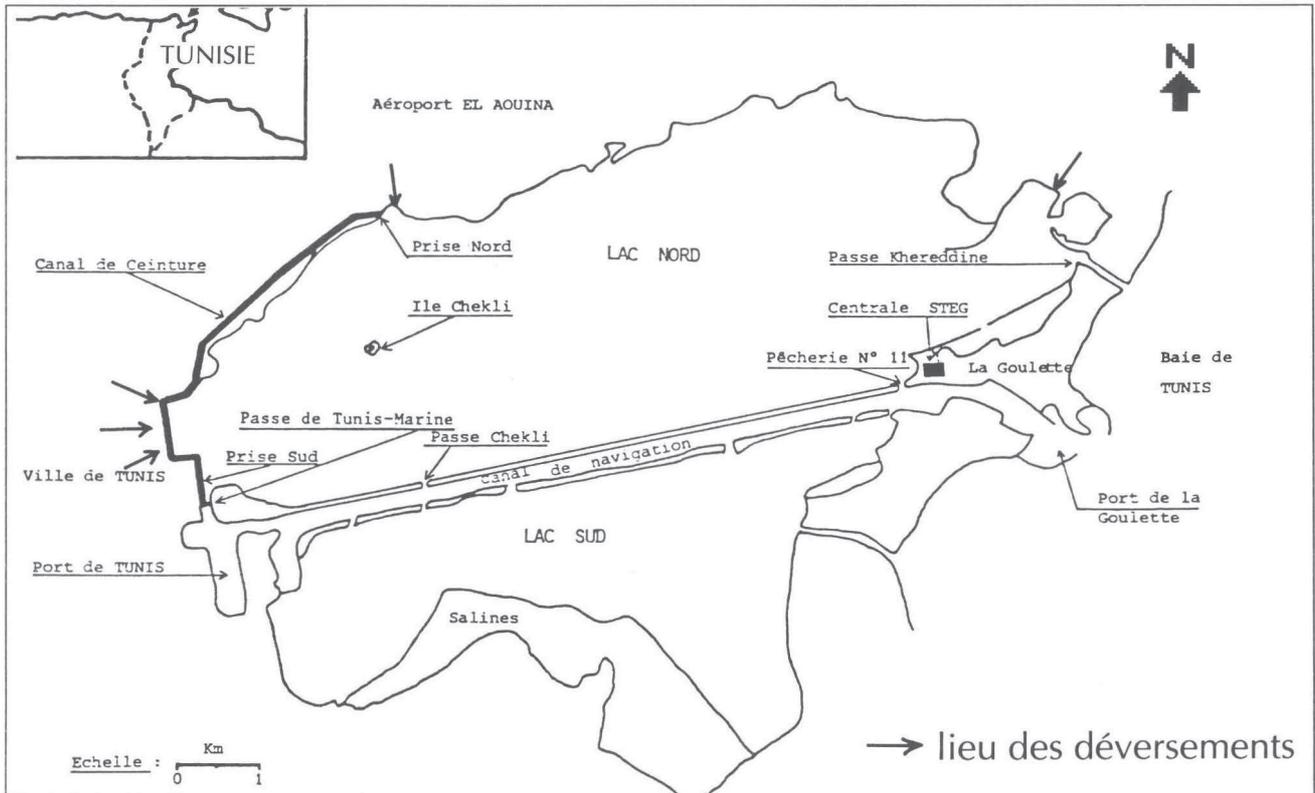
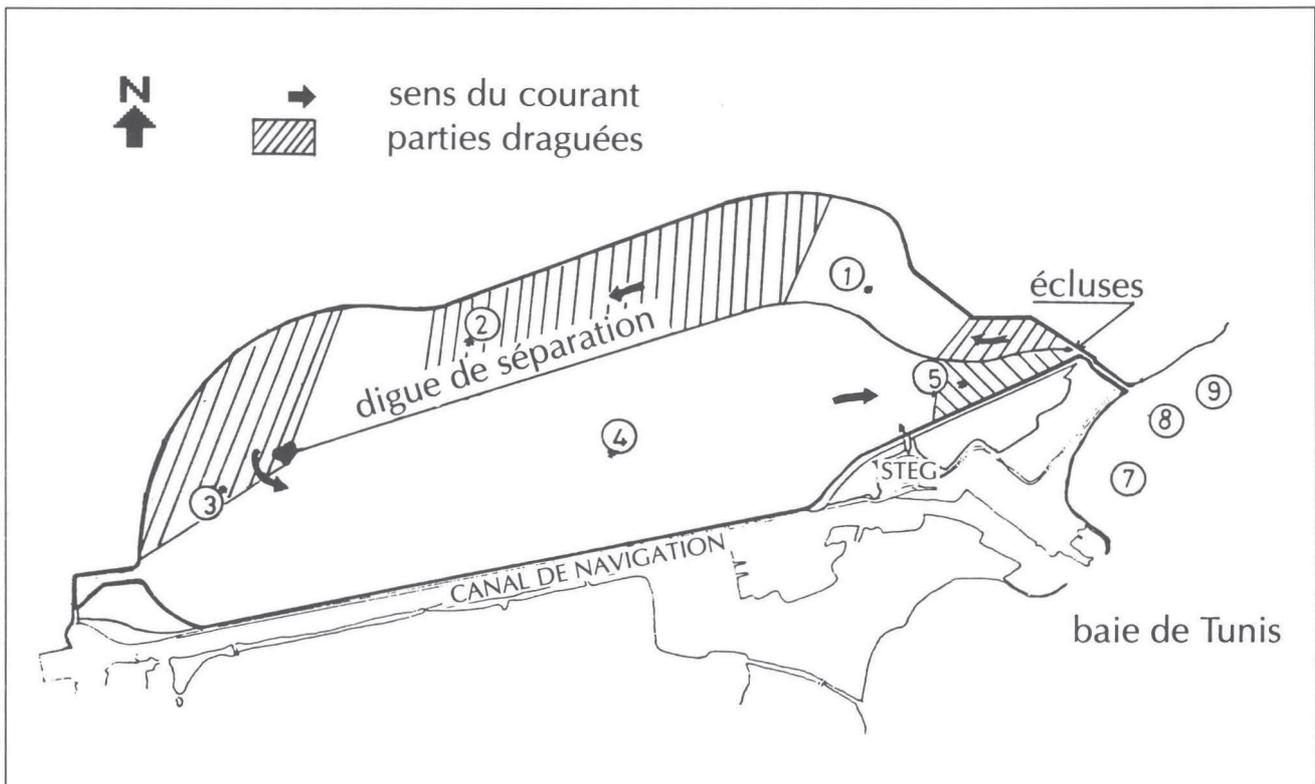


Figure 2 - Le lac de Tunis avant les aménagements. / The lake of Tunis before the restoration works.

Figure 3 - Le lac de Tunis après les aménagements - stations de prélèvements et sens de circulation du courant. / Tunis North lake after the restoration works-sampling stations and flushing system.



la température de l'eau reste homogène dans tout le lac et sur toute la profondeur.

La température de l'eau est, en général, légèrement inférieure à celle de l'air (de 2 à 3°C), et c'est seulement vers l'après-midi, en été, qu'elle excède légèrement celle de l'air. La fluctuation journalière de la température n'est pas très importante, elle varie entre un minimum enregistré vers le lever du soleil et un maximum l'après-midi vers 17 h avec une amplitude maximale de 3°C.

Sur la *figure 4a* est représentée la variation annuelle de la température moyenne de l'eau au cours des années 1988 et 1989. A partir de cette courbe on peut distinguer trois périodes différentes :

- . août - décembre : température décroissante, de 29°C en août à 10°C vers la fin de décembre ;
- . janvier - mars : température faible et stable variant entre 10°C et 12°C ;
- . avril - août : température croissante de 12 à 29°C.

La température moyenne annuelle est de l'ordre de 19,5°C, et c'est seulement à la station 5 qu'elle est un peu élevée à cause du rejet des eaux chaudes de la centrale thermique STEG (*figure 2*) à un débit de 2 m<sup>3</sup>/s. Les températures maximales sont atteintes généralement en juillet, suite à des vents de sirocco et sont de l'ordre de 40°C. Ces températures jouent un rôle important dans le déséquilibre de l'écosystème.

## 2 - Salinité

La salinité de l'eau est variable dans le temps, ainsi que dans l'espace. La valeur moyenne annuelle de la salinité croît de la station 1 vers la station 5. Elle est respectivement de 36,2, 36,5, 37 et 37,8 ‰. Quatre facteurs principaux influent sur la salinité de l'eau : l'apport des eaux marines, l'évaporation, les précipitations et la profondeur de l'eau. La variation de la salinité dans le temps s'effectue, comme la température, selon trois séquences (*figure 4b*) :

- . décembre - mars : la salinité dans tout le lac est homogène et aucune différence appréciable n'est enregistrée entre les cinq stations. Elle fluctue autour de 35 ‰ et elle est légèrement inférieure à celle du golfe. Ceci s'explique par l'effet des précipitations, la faible évaporation et l'effet du vent qui devient critique pendant cette période ;
- . avril - septembre : la salinité est croissante au fur et à mesure que l'évaporation augmente et le gradient de variation est croissant de la station 1 à la station 5. Les valeurs maximales sont enregistrées en septembre et sont respectivement pour les cinq stations de 37,5, 39, 40, 42 et 42,5 ‰ ;

. septembre - décembre : avec le refroidissement des eaux, la diminution de l'évaporation et l'effet des précipitations, la salinité chute vers la fin du mois de décembre à des valeurs inférieures à celles du golfe (34 ‰).

Avant les aménagements, Ktari F. (1972) a enregistré des salinités dans le lac plus fortes en 1966 : jusqu'à 48 ‰ dans certains prélèvements. L'équipe Rudis relève en été 1966, une salinité de 49 ‰ et S. Vuillemin (1965) trouve des taux de 51 ‰.

Les valeurs minimales ont toujours été rencontrées en hiver (Rudis, 1966 : 27 ‰ et S. Vuillemin, 1965 : 27 ‰). Ces valeurs étaient dues aux précipitations, d'une part, et à la forte influence des rejets d'eaux d'égout à l'ouest du lac, d'autre part.

Actuellement la salinité est essentiellement influencée par l'évaporation et les précipitations vu l'échange important avec la mer (1,5 million de m<sup>3</sup> par jour) qui donne une variation moyenne du niveau du plan d'eau de 80 mm.

## 3 - Turbidité

La variation de la turbidité est présentée sur la *figure 5*. Généralement le fond du lac est visible dans les trois premières stations et pendant toute l'année.

La turbidité des eaux du lac dépend de l'intensité du vent, de la concentration en chlorophylle *a* et de quelques processus chimiques.

Le vent intervient surtout dans les parties peu profondes (station 4), où les sédiments très fins sont mis en suspension dans la colonne d'eau pour des vents dépassant 5 m/s.

La concentration en chlorophylle *a*, très faible, a diminué la transparence de l'eau dans la partie sud, une seule fois en été 1988.

Quelques processus chimiques interviennent en été dans la partie sud par la formation de précipité de calcium diminuant légèrement la transparence de l'eau.

Dans la station 5, la plus profonde (2,6 m), le fond est bien visible, seulement en hiver. Pendant le reste de l'année, l'eau est légèrement trouble à cause de l'apport des matières en suspension de la partie sud et du rejet des eaux chaudes par la centrale thermique de La Goulette.

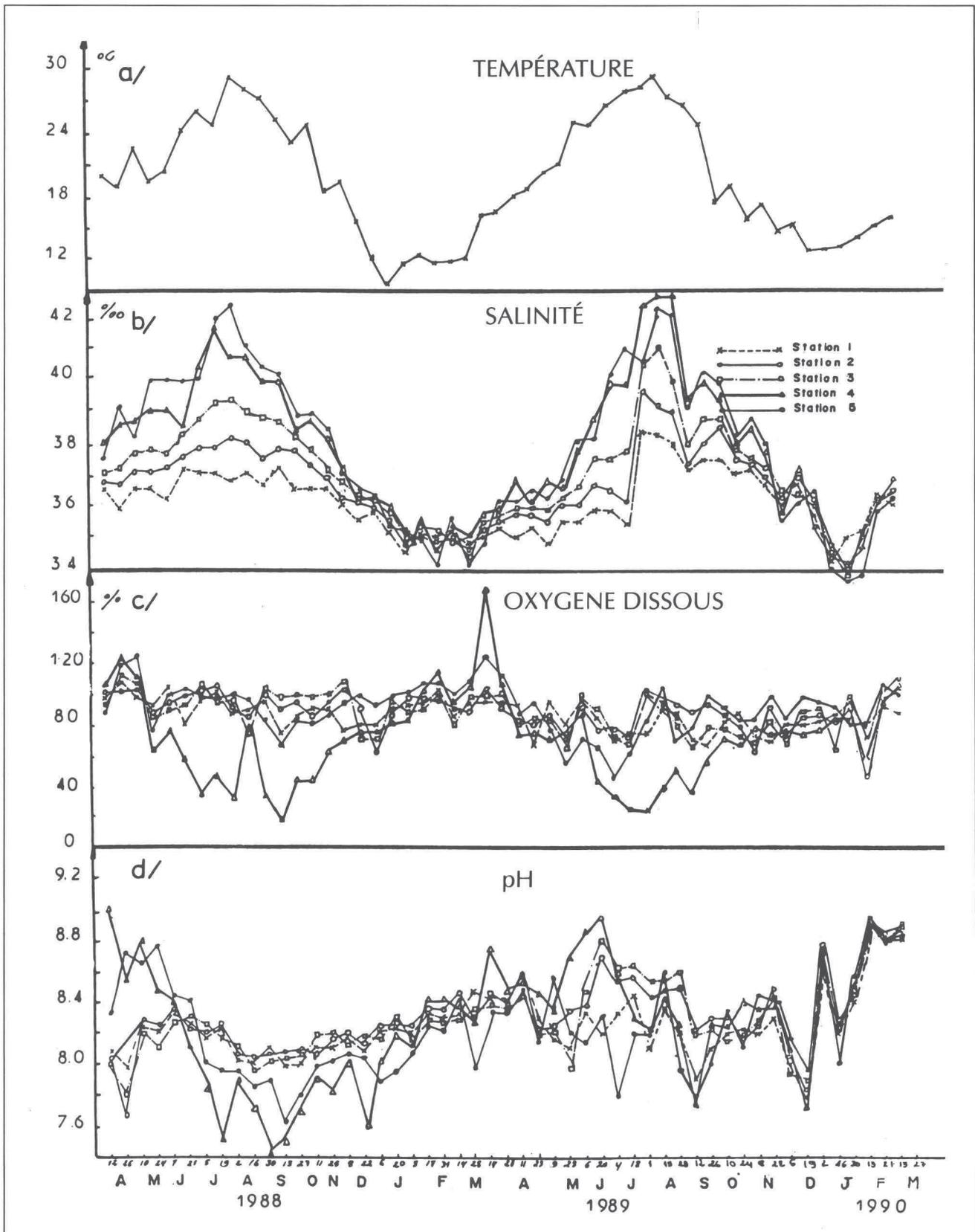


Figure 4 - Variation temporelle des paramètres physico-chimiques de l'eau du lac. / Seasonal variation of physico-chemical parameters in lake water.

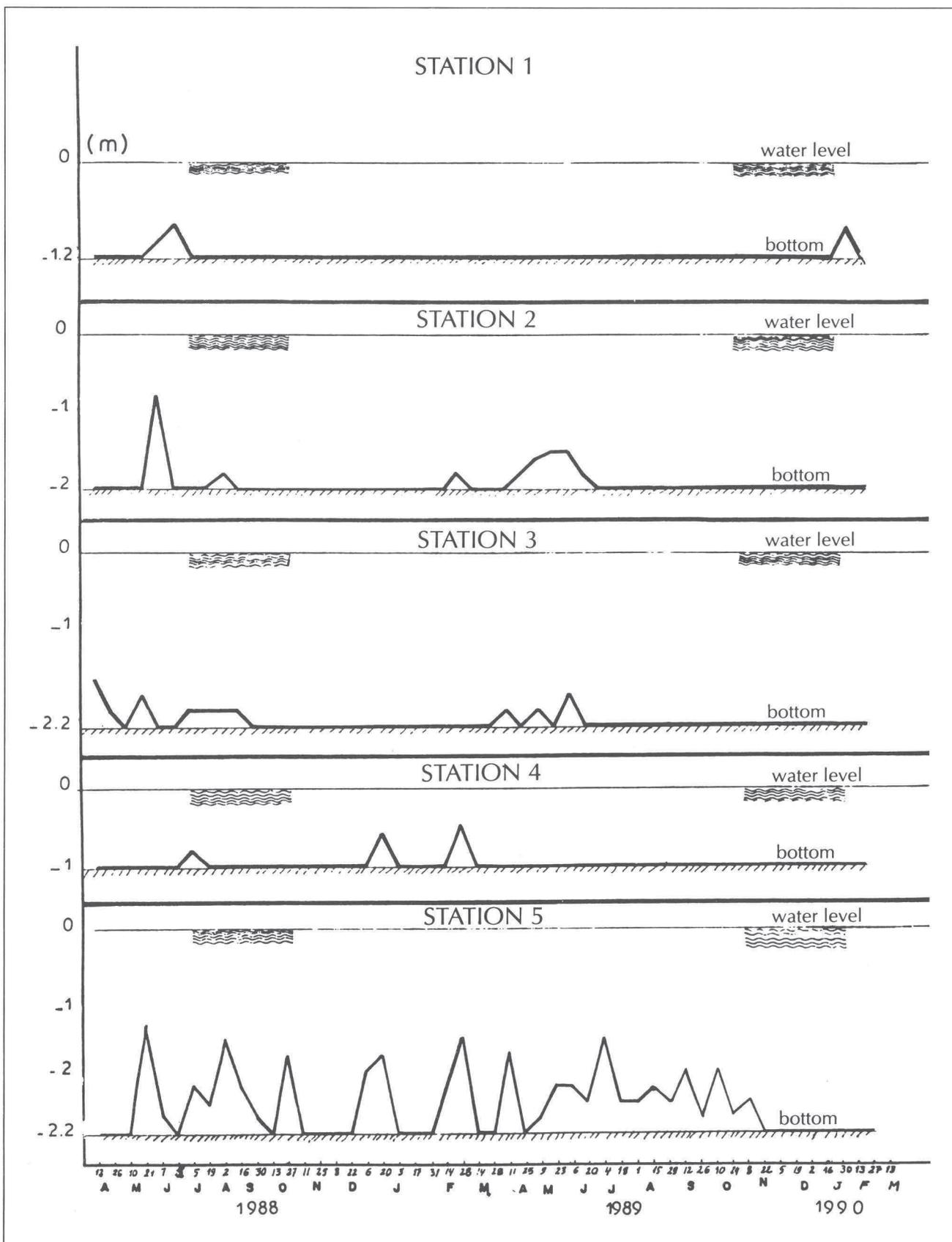


Figure 5 - Variation temporelle de la turbidité de l'eau du lac. /Seasonal variation of water turbidity.

#### 4 - Le pH

Le pH est également variable dans le temps et dans l'espace. Dans les trois premières stations de la partie nord, sa variation au cours du temps est très faible; il varie entre une valeur minimale de 8 en juillet et maximale de 8,5 en avril. Dans la partie sud, et particulièrement dans la station 4, la situation est différente. En avril 1988, avec les hautes concentrations des Ulves, le pH a atteint une valeur de 9,02. Pendant la période estivale, le pH chute dans cette station à 7,5 et reste inférieur à 8 jusqu'à la fin de septembre (*figure 4d*).

Les études réalisées avant les aménagements ont enregistré des valeurs différentes. L'équipe de Rudis (1966) a noté un pH de 9,20. S. Vuillemin, en 1965, a indiqué des valeurs très faibles : 6,4 en juillet. Zaouali (1971) a relevé un pH de 6,7.

Les études de M. Aubert et J. Aubert, en juillet 1985, juste avant les travaux d'aménagement, ont indiqué des valeurs de pH de 6,6 dans la partie sud lors de la coloration des eaux et de 8,20 pour l'eau du canal Khéreddine.

Si on examine la courbe de variation du pH (*figure 4d*), dans la partie sud du lac, on voit une différence entre les saisons 1988 et 1989.

En avril 1988, la concentration des Ulves au fond est très élevée, et le pH atteint une valeur de 9,02. En été, avec la mortalité des Ulves et la diffusion continue des gaz sulfurés dans l'eau, le pH chute à des valeurs très basses (7,5 en juillet 1988).

La variation du pH en 1989 est un peu différente, les Ulves sont moins denses et sont remplacées par des Chaetomorphes. La valeur maximale du pH est atteinte en juin, soit 8,88.

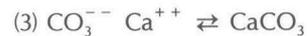
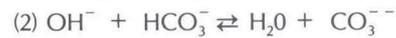
Pendant toute la période chaude, le pH reste un peu supérieur à 8. Le pH a chuté au-dessous de 8, une seule fois en 1989, vers la fin septembre.

En période de décomposition végétale, le pH est fonction de l'alcalinité de l'eau qui dépend des deux facteurs suivants :

- quantité d'ions hydrogène ajoutée au milieu ;
- processus chimique intervenant sur l'équilibre des carbonates, bicarbonates, acide carbonique et oxyde de carbone.

La quantité d'ions hydrogène ajoutée ne peut provenir que des dégagements de sulfure d'hydrogène suite aux décompositions de la matière organique contenue dans les macroalgues et les

sédiments. Elle a pour effet l'acidification du milieu et par suite la diminution du pH, ce qui explique la grande chute du pH dans la partie sud en été 1988. L'équilibre intervenant sur la variation du pH provient du processus chimique suivant :



D'après les références bibliographiques, l'Ulve consomme le  $\text{CO}_2$  gazeux (acide), d'où une augmentation du pH. Elle consomme ensuite l'ion  $\text{HCO}_3^-$ . Des ions  $\text{OH}^-$  libérés alors des cellules (Lucas et Berry 1985), ainsi que le déplacement de l'équilibre des carbonates vers la gauche, vont provoquer une augmentation du pH.

#### 5 - Oxygène dissous

L'oxygène dissous est également mesuré tous les 15 jours dans les cinq stations et avant le lever du soleil. La teneur en oxygène dissous est variable au cours de l'année, surtout dans la partie sud. Elle dépend du renouvellement des eaux du golfe, des propriétés physiques de l'eau (température et salinité), des conditions climatiques et des propriétés biologiques du milieu.

Sur la *figure 4c*, on a représenté la variation annuelle de l'oxygène dissous dans les cinq stations du lac. Dans les trois premières stations qui reçoivent les eaux de mer, la teneur en oxygène reste au niveau de la saturation (70 - 100 %) pendant toute l'année.

La température et la salinité interviennent dans la pression de saturation. Pour les fortes salinités (> 40 ‰) et températures (> 28°C) en été, la pression de saturation est très faible (100 % - 6 mg/lr) alors qu'en hiver (température < 14°C et salinité < 36 ‰), elle est forte (100 % - 10 mg/lr).

Dans la station 4, la teneur en oxygène descend à des valeurs très basses pendant la période estivale, soit 19 % en septembre 1988 et 25 % en août 1989, alors qu'en hiver elle atteint 160 % au lever du soleil et 300 % l'après-midi.

#### 6 - Les macroalgues

Les macroalgues continuent à se développer dans la partie sud du lac. Les espèces les plus importantes sont les Ulves, les Chaetomorphes, les Entéro-

CHARRADA RAFIK B.

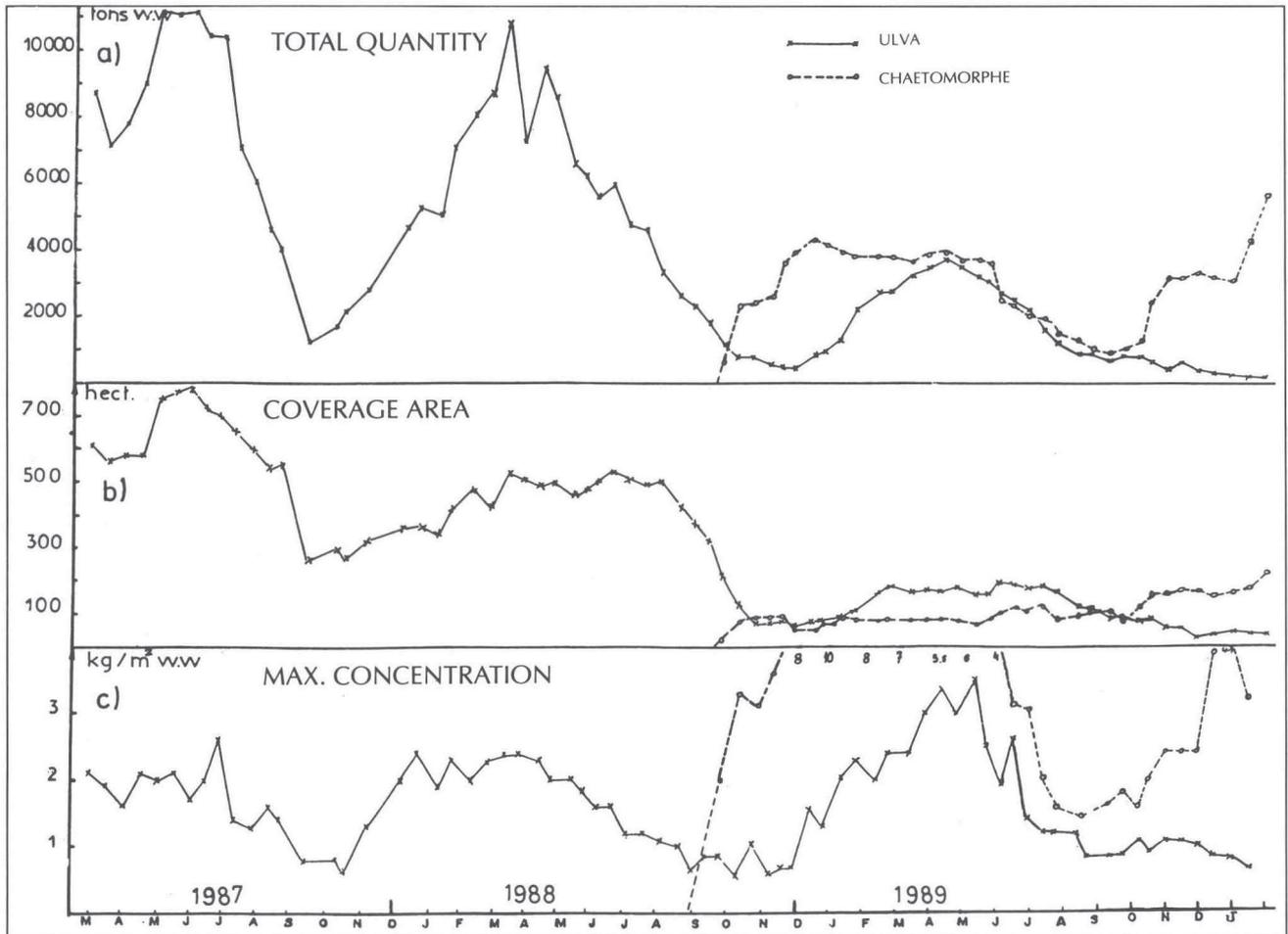
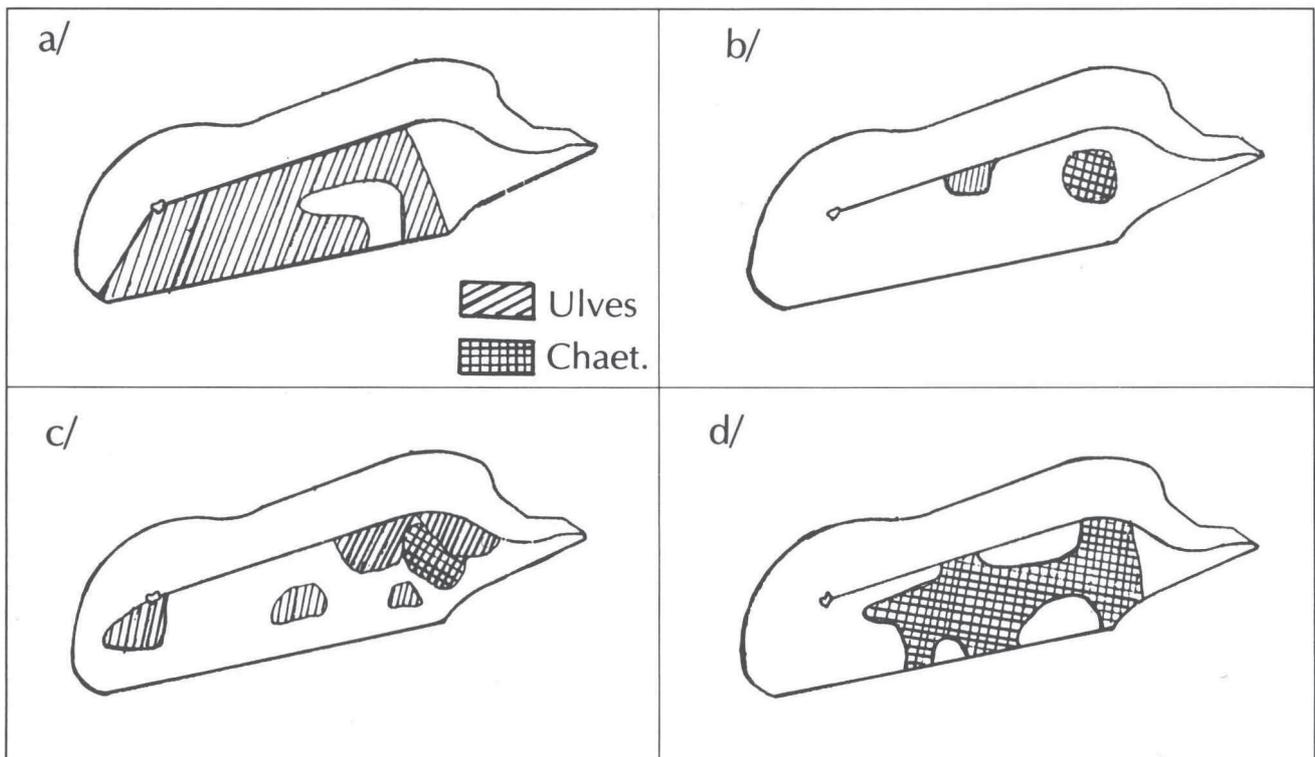


Figure 6 - Variation temporelle des macroalgues : a - quantité totale ; b - surface couverte ; c - concentration au fond. / Seasonal variation of macroalgae : a - total quantity (tons wet weight) ; b - covered area (hectare) ; c - maximum bottom concentration (kg ww./m²).

Figure 7 - Répartition des macroalgues dans le lac : a - mars 1988 ; b - novembre 1988 ; c - mars 1989 ; d - mars 1990. / Distribution of macroalgae in the lake : a - March 1988 ; b - November 1988 ; c - March 1989 ; d - March 1990.



morphes et les Gracilaires. Ces macroalgues se développent en automne-hiver-printemps, et meurent en été ; leur cycle de croissance diffère d'une espèce à l'autre.

Les concentrations au fond et la répartition de ces macroalgues ont été suivies d'une façon périodique depuis 1987. Les variations de quantités des Ulves et des Chaetomorphes pendant les années 1987, 1988, 1989, sont représentées sur la *figure 6*.

Avant les aménagements (1987), l'Ulve était l'espèce la plus répandue dans le lac et les autres espèces se développaient localement d'une façon secondaire.

La saison de croissance des Ulves commence en octobre, continue jusqu'à la fin du printemps et s'arrête en été. En 1989, la quantité totale des Ulves a chuté énormément (*figure 6*) ; elle est passée d'environ 12 000 tonnes en poids frais en 1987 et 1988, à 3 600 tonnes en 1989.

Les Ulves ont quasi complètement disparu pendant la saison de croissance en 1990.

Les Chaetomorphes croissent pendant la même période que les Ulves ; elles se sont développées d'une façon très rapide la première fois dans l'eau du lac Nord de Tunis vers la fin de 1988 et le début de 1989, lorsque la quantité des Ulves a chuté.

Les Chaetomorphes se développent en profondeur et ont une croissance plus rapide que les Ulves. Citons, par exemple, que pendant la période d'octobre 1988 à janvier 1989, elles ont atteint une concentration de 12 kg/m<sup>2</sup> et une quantité totale de 4 200 tonnes en poids frais dans la partie sud-est.

En 1990, ces Chaetomorphes se sont répandues sur toute la partie sud du lac (*figure 7*) et ont atteint une quantité totale de 5 600 tonnes en janvier.

Les Entéomorphes croissent également pendant la période hivernale, elles sont apparues localement dans la partie sud-est en 1988 et dans la région de Chekli en 1989, pour réapparaître dans la zone sud-est vers la fin de 1989.

Les Gracilaires croissent dans la partie orientale au printemps et vers le début de l'été.

Sur le tableau suivant on donne les quantités maximales enregistrées (tonnes en poids frais), de 1987 à 1990 pour ces quatre espèces.

	1987	1988	1989	1990
Ulves	12 000	11 000	3 600	-
Chaet.	-	-	4 200	5 600
Enté.	-	1 000	600	-
Graci.	-	-	1 500	1 900

(-) l'espèce existe en quantité très faible.

Peu de documents nous ont renseignés sur l'évaluation de la quantité totale de biomasse végétale dans le lac avant les aménagements : citons, par exemple, les études de Fresenius (11 000 tonnes en 1976 et 71 000 tonnes d'Ulves en 1977).

## 8 - Les sels nutritifs

Les sels nutritifs dissous dans l'eau sont représentés par les contenus en azote et phosphore totaux (TN et TP) et de leurs composantes inorganiques, le phosphore des ions orthophosphates et l'azote des ions nitrites, nitrates et ammoniums.

La somme des contenus en azote nitreux, nitrique et ammoniacal représente l'azote total inorganique (TIN).

Sur les *figures 8 et 9*, on a représenté la variation du phosphore total, du phosphore inorganique, de l'azote total et de l'azote total inorganique dans les cinq stations du lac, ainsi que dans le golfe de Tunis.

La variation du phosphore total dans le lac, ainsi que dans le golfe montre que pendant la période hivernale (décembre - avril) sa teneur est très faible (< 20 µg/l) et que les valeurs les plus élevées sont enregistrées en été (juin - août). La variation du phosphore en 1988 n'est pas très différente entre les cinq stations ; les valeurs maximales sont enregistrées en été et sont respectivement pour les cinq stations 60, 60, 50, 60 et 40 µg/l, alors qu'en 1989 la variation est très nette. Les pics rencontrés en été varient respectivement de la station 1 à la station 5 de 20, 40, 40, 50 et 65 µg/l.

La variation du phosphore inorganique (P-PO<sub>4</sub>) suit la même allure que le phosphore total (*figure 8*). Il atteint 30 µg/lr en été 1988 et 20 µg/l en été 1989 dans la station 4.



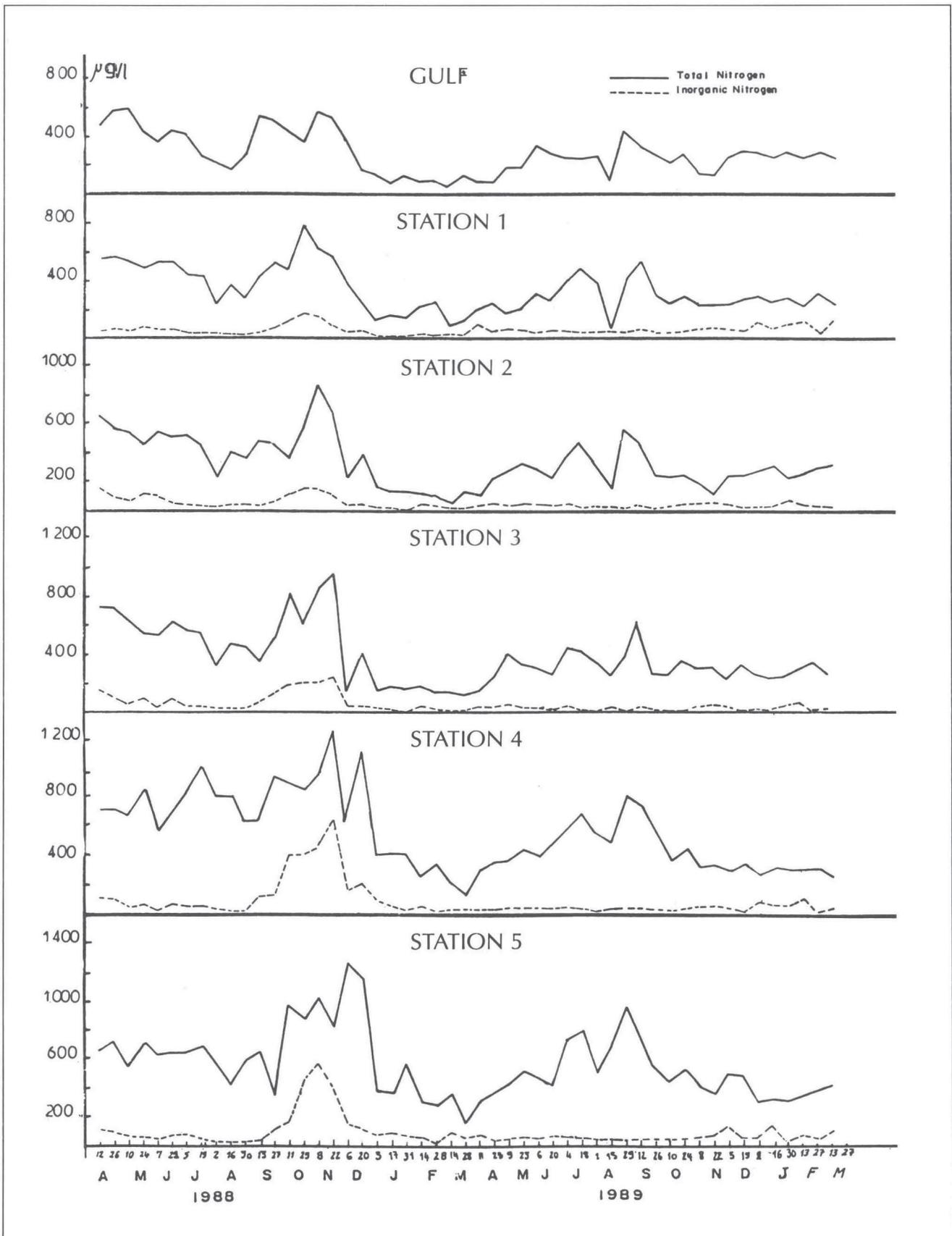


Figure 9 - Variation temporelle de l'azote total et de l'azote inorganique dans le lac. / Seasonal variation of total and inorganic nitrogen in the lake ( $\mu\text{g/l}$ ).

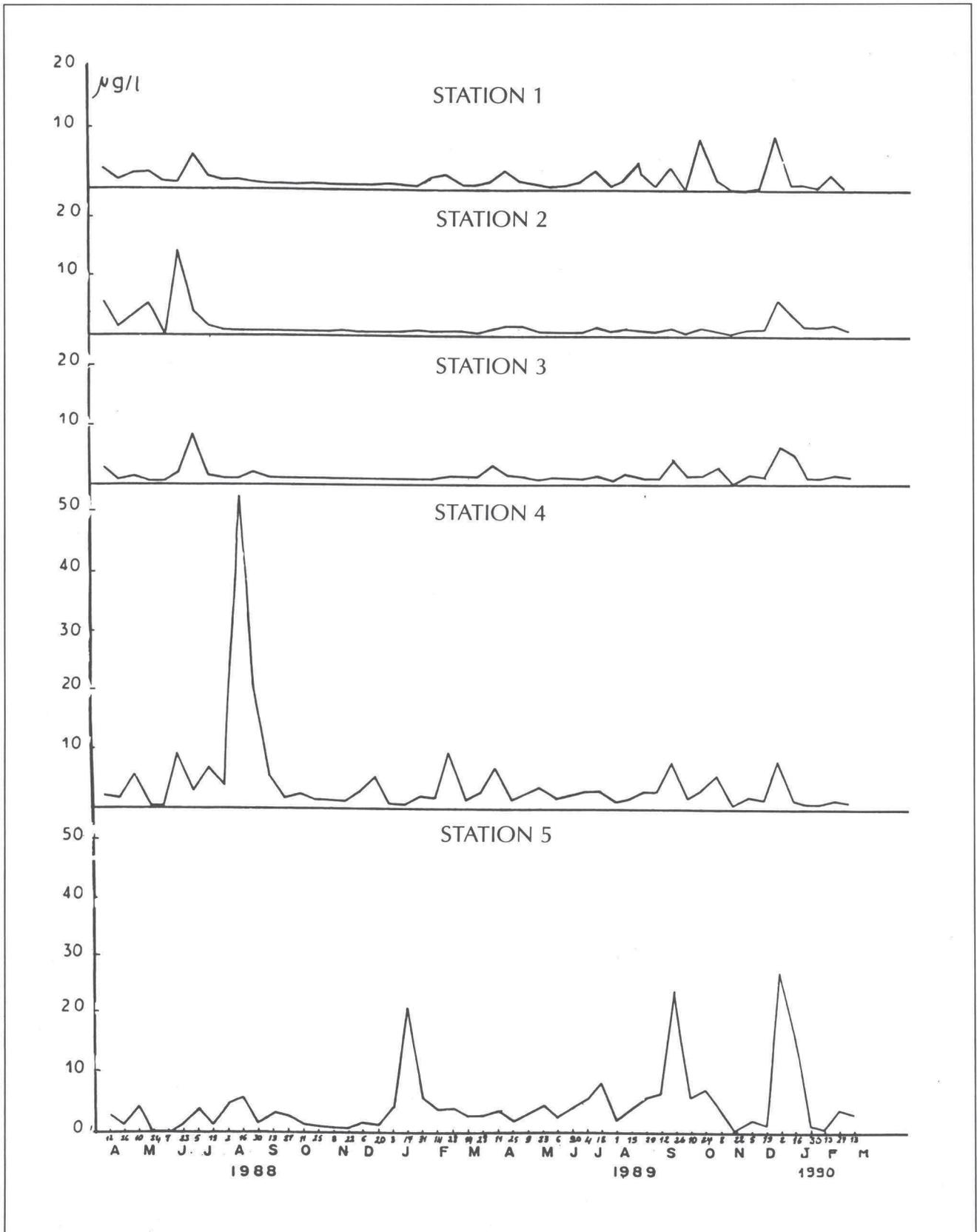


Figure 10 - Variation temporelle de la chlorophylle a dans le lac. /Seasonal variation of chlorophylle a in the lake.

La variation temporelle de l'azote est présentée sur la *figure 9*, les valeurs les plus basses sont toujours enregistrées pendant la période hivernale. Sa variation annuelle présente deux pics.

En 1988, l'azote total monte en juillet dans les cinq stations, ainsi que dans le golfe, puis chute légèrement en août. En novembre, il remonte à des valeurs très élevées dans les cinq stations qui sont respectivement 800, 820, 1000, 1200 et 1240  $\mu\text{g/l}$ .

Pendant cette même période, un pic d'azote inorganique est observé ; il varie de la station 1 à la station 5 de 150, 150, 220, 640 et 590  $\mu\text{g/l}$ .

En janvier, l'azote inorganique chute à moins de 50  $\mu\text{g/l}$  et reste très faible pendant toute l'année. L'azote total chute également pendant la période hivernale et reste inférieur à 400  $\mu\text{g/l}$ . Les valeurs les plus basses sont atteintes vers la fin du mois de mars lorsque la quantité totale de biomasse végétale atteint sa valeur maximale (*figures 7 et 12c*).

En juillet 1989, la teneur en azote total monte comme en 1988 puis chute légèrement vers le début du mois d'août, ensuite elle remonte en septembre respectivement pour les cinq stations à 600, 600, 600, 750 et 900  $\mu\text{g/l}$ . En novembre, avec la régénération des macroalgues, l'azote total chute à moins de 400  $\mu\text{g/l}$ .

## DISCUSSION

Les paramètres physico-chimiques de l'eau du lac sont variables dans l'espace ainsi que dans le temps. Les valeurs relevées dans les trois premières stations ne diffèrent pas trop de celles du golfe ; la fluctuation annuelle est faible comparée à celle des stations 4 et 5.

Sur le tableau ci-dessous on donne une comparaison du cycle des sels nutritifs pendant les quatre années suivantes :

.1976 : le lac de Tunis en période de déversements d'eaux usées urbaines ;

.1985 : le lac de Tunis après l'arrêt des déversements et juste avant le commencement des travaux d'aménagement ;

. 1988 : le lac juste après les aménagements ;

. 1989 : le lac après une année de fonctionnement du nouveau système de circulation (*tableau ci-dessous*).

D'après ces valeurs, on voit que la richesse en matières organiques du lac avait pour origine les rejets d'eaux usées ; leur arrêt a réduit cette richesse au quart. La nouvelle circulation l'a réduit au tiers par le relargage continu des réserves du fond.

Sur les *figures 11a et b*, nous avons représenté les variations des différentes formes de sels nutritifs dans la station 4 pendant les deux années 1988 et 1989.

En 1988, le cycle de l'azote total présente deux pics ; le premier coïncide avec celui du phosphore de la période estivale ; un deuxième, en novembre, coïncide avec un pic d'azote inorganique.

En 1989, les deux cycles du phosphore et de l'azote suivent la même allure et présentent un seul pic en été.

En revenant au cycle de croissance des macroalgues dans le lac, on voit qu'en hiver 1988 les Ulves étaient les plus répandues dans le lac (11 000 t) ; avec l'élévation de température en été, ces Ulves sont décomposées en libérant une grande quantité d'azote et de phosphore dont une grande proportion est stockée dans les sédiments et une

		1976	1985	1988	1989
Chl. a $\mu\text{g/l}$	moy. annuelle	61.2	29.2	5.8	3.0
	val. maximale	254.2	139.9	57.2	9.9
P- $\text{PO}_4^{--}$ $\mu\text{gat/l}$	moy. annuelle	1.8		<0.3	<0.3
	val. maximale	6.6		1.0	0.65
N- $\text{NO}_2^-$ $\mu\text{gat/l}$	moy. annuelle	2.1	0.1	<0.7	<0.2
	val. maximale	10.1	0.4	5.7	0.7
N- $\text{NO}_3^-$ $\mu\text{gat/l}$	moy. annuelle	4.1	1.2	3.5	1.0
	val. maximale	10.9	3.2	24.0	2.8
N- $\text{NH}_3$ $\mu\text{gat/l}$	moy. annuelle		4.1	5.6	1.6
	val. maximale		11.5	25.0	4.3
TN $\mu\text{g/l}$	moy. annuelle	4 400	1 162	692.0	438.0
	val. maximale	5 600	2 351	1 270.0	810.0
TP $\mu\text{g/l}$	moy. annuelle	600	100	27.2	22.2
	val. maximale	900	301	60.0	53.0

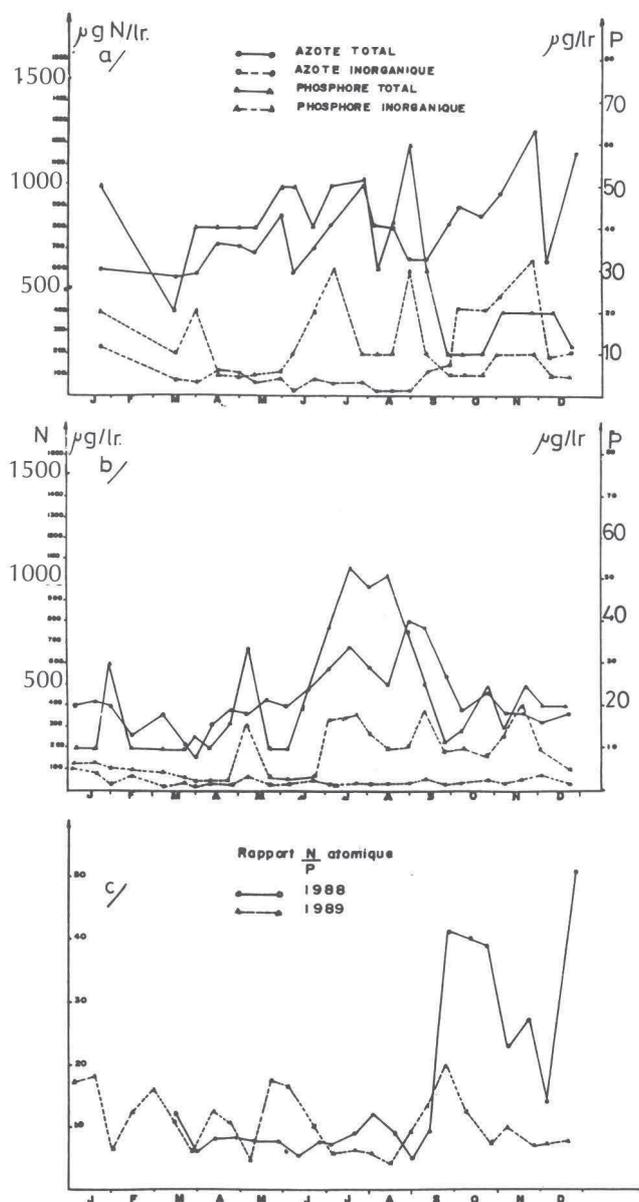


Figure 11 - Variation annuelle des sels nutritifs dans la station 4 : a - TN et TP en 1988 ; b - TN et TP en 1989 ; c - N/P (quantités totales). / Variation of the nutrients in station 4 : a - TN and TP on 1988 ; b - TN and TP on 1989 ; c - N/P (total quantity).

partie est libérée dans l'eau. Dans ces conditions le milieu s'appauvrit en oxygène, le pH de l'eau devient très bas à cause de la diffusion des gaz sulfurés.

Puis, en août 1988, un *bloom* phytoplanctonique a été enregistré (57  $\mu\text{g/l}$  de Chl.a (figure 8). En même temps, on observe une chute de la teneur en phosphore inorganique de 30  $\mu\text{g/l}$  à moins de 10  $\mu\text{g/l}$ .

Le phosphore paraît donc un élément indispensable pour le développement de ces microalgues et un facteur limitant pour leur croissance. A ce moment

les eaux sont réoxygénées et la teneur en oxygène dissous atteint 88 % en août 1988 (figure 4c).

En septembre 1988, la transparence de l'eau revient, la concentration en chlorophylle chute, la température et la salinité sont encore élevées (28°C et 40 ‰) et l'oxygène dissous chute une deuxième fois à 19 %. Donc, le milieu s'est retrouvé une deuxième fois appauvri en oxygène à cause de la décomposition continue des Ulves et de la sédimentation des microalgues.

A ce moment, l'azote organique stocké dans les sédiments est fixé et converti par les bactéries anaérobiques benthiques en azote inorganique ammoniacal (figure 12-a). Ce processus est souvent nommé désamination des aminoacides ; ceci est observé en septembre lorsque l'ammoniaque a augmenté avant les nitrites et les nitrates.

Ensuite, avec l'aération du milieu, l'ammoniaque est oxydée en nitrite puis en nitrate :



Nitrification et oxydation

L'azote nitrite est une forme très instable, en milieu oxygéné ; il est rapidement oxydé en nitrate. Ce qui explique la faible concentration de nitrite pendant la période où on a observé le pic d'azote inorganique. Il est à noter que, pendant toute la période allant de septembre à décembre 1988 (figure 12), la concentration des macroalgues et en chlorophylle a à la station 4 est très faible. En janvier, dès que la croissance des Ulves commence, la teneur en azote inorganique chute à des valeurs très basses.

Sur la figure 11c, on a représenté la variation du rapport N/P (totaux) pendant les deux années 1988 et 1989. En 1988, N/P est constant pendant la période allant de mars à septembre ( $8 < \text{N/P} < 11$ ). Vers la fin de l'année, ce rapport atteint des valeurs très élevées ( $> 40$ ). En 1989, ce rapport est plus stable, il descend à des valeurs très basses en juillet-août 1989, puis remonte à 20 en septembre et redescend à 8 vers la fin de l'année. Donc, l'écosystème semble avoir plus de tendance à la stabilité en 1989 qu'en 1988.

Plusieurs auteurs ont étudié ce rapport dans des lagunes méditerranéennes. A. Sfriso et A. Marcomini l'ont étudié dans la lagune de Venise. Chiaudani *et al* (1983) l'a également étudié dans quelques autres lagunes italiennes, et a trouvé que lorsque le rapport N/P est élevé, le phosphore est

un facteur limitant alors que lorsqu'il descend à des valeurs très basses, l'azote devient le facteur limitant pour la croissance des macroalgues.

D'après les variations annuelles de l'azote inorganique, du phosphate inorganique, des macroalgues, de la chlorophylle *a* et du rapport N/P (figures 12 et 11c), l'azote semble être un facteur limitant pour la croissance des macroalgues.

## CONCLUSION

Les paramètres physico-chimiques de l'eau du lac sont directement influencés par la circulation de l'eau et les processus biologiques du milieu. Dans la partie nord du lac, ces paramètres sont plus influencés par l'apport d'eau de mer et leur fluctuation annuelle n'est pas très importante. Dans la partie sud, ils sont en relation directe avec la fluctuation de la biomasse végétative. Les macroalgues se développent en automne - hiver et au début du printemps et assimilent les sels nutritifs disponibles dans les sédiments et dans l'eau.

Pendant cette période de croissance, la teneur en sels nutritifs est très faible et le rapport N/P est inférieur à 7. Vers la fin du printemps, avec l'élévation de la température, ces macroalgues meurent et libèrent une grande quantité de nutriments dans l'eau. En été, une prolifération des microalgues se produit en présence d'une abondante quantité de sels nutritifs dans l'eau. Le rapport N/P est réduit pendant la saison de

croissance et l'azote paraît donc un facteur limitant pour la croissance des macroalgues.

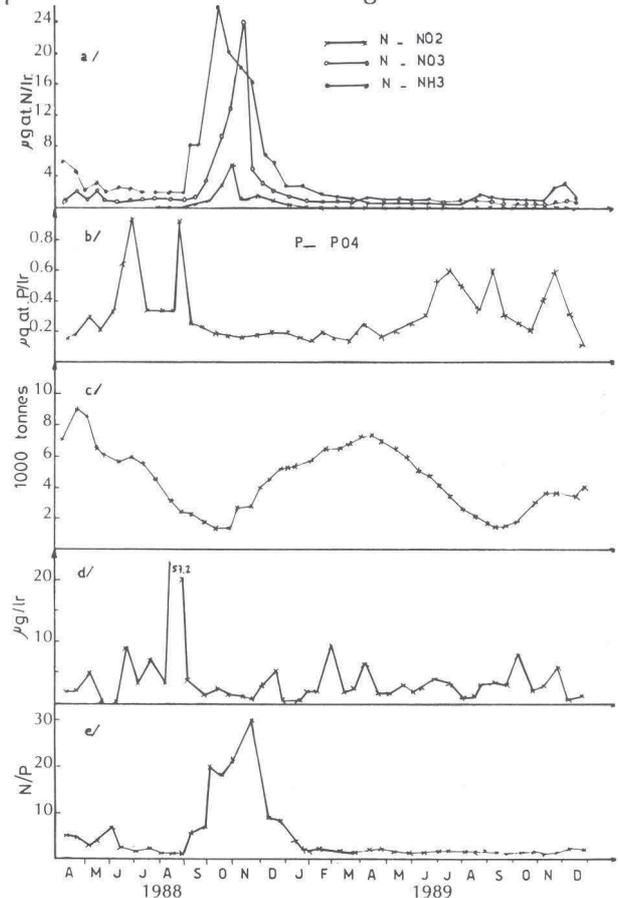


Figure 12 - Variation temporelle dans la station 4 de : a - formes inorganiques de l'azote ; b - phosphore inorganique ; c - quantité des macroalgues (*Ulves* + *Chaetomorpha*) ; d - chlorophylle *a* ; e - N/P (inorganique). / Annual variation in station 4 of : a - inorganic nitrogen ; b - inorganic phosphate ; c - quantity of macroalgae ; d - chlorophyll *a* ; e - N/P (inorganic).

## BIBLIOGRAPHIE

□ Aubert M. et J. Aubert, 1986 - Eutrophie et dystrophie en milieu marin. Phénomènes planctoniques et bactériens. *Revue internationale d'Océanographie médicale*. Tomes LXXXIII et LXXXIV.

□ Belkhir M., 1977 - Recherches sur la production primaire du lac de Tunis. *Diplôme d'études approfondies de biologie marine et d'océanographie de la Faculté des Sciences de Tunis*.

□ Ben Charrada R., 1988 - L'hydrodynamique du lac de Tunis après les aménagements. *Diplôme d'études approfondies de mécanique appliquée de la Faculté des Sciences de Tunis*.

□ Chiaudani G., G.F. Gaggino et M. Vighi, 1983 - Synoptic survey of the distribution of nutrients in Italian Adriatic coastal water. *Thalassia Jugoslavia* 19: 77-86.

□ E.P.A., 1977 - Recherches sur l'eutrophisation du lac de Tunis. Vol. 2, *Géologie, Biologie, Chimie et Hydrologie*. Inst. nat. scient. ocean. et de Pêche.

□ Ktari F., Chakroun, 1972 - Etudes physico-chimiques et microbiologiques du lac de Tunis. *Bull. int. océanogr. Pêche. Salambo*, vol. 2, n° 3.

□ Sfriso A., B. Pavoni, A. Marcomini et A. Orio, 1988 - Annual variation of nutrients in the lagoon of Venice. *Marine Pollution Bulletin*, volume 19, n° 2, pp. 54-60, printed in Great Britain.

□ Sfriso A., A. Marcomini et B. Pavoni, 1987 - Relationships between macroalgal biomass and nutrient concentration in hypertrophic area of the Venice Lagoon. *Marine environmental Research* 22 : 297-312.

□ Shneider W., 1977 - Bilan des substances nutritives dans le lac de Tunis. *Institut Fresenius, R.F.A.*

□ Vuillemin S, 1964 - Contribution à l'étude écologique du lac de Tunis. Biologie de *Mercierella enigmatica*. *Thèse Sc. nat., Paris*.

□ Zaouali J., 1977 - Le lac de Tunis : facteurs climatiques, physico-chimiques et crise dystrophique. *Bull. Off. nat. Pêche, Tunisie, Vol.*