

# Impact des aménagements de restauration sur la qualité des eaux et des peuplements benthiques du lac de Tunis

*Restoration impact on the water quality and the benthos of Tunis North Lake*

---

Rafik Ben Charrada

DHV Tunisie, 2, rue Ibn Zeidoun, El Menzah 5 - 2080 Ariana, Tunisie

**Mots clés :** pollution, aménagement, restauration, qualité, nutriments, végétation, lac de Tunis

**Key-words:** pollution, development, quality, nutrients, vegetation, Lake of Tunis

## RÉSUMÉ

Ben Charrada R., 1995 - Impact des aménagements de restauration sur la qualité des eaux et des peuplements benthiques du lac de Tunis. Mar. Life, 5 (1) : 51-64.

Le lac de Tunis est une lagune méditerranéenne, considérée avant les travaux que nous décrivons, parmi les lagunes les plus eutrophes du monde. Pendant la période allant de 1985 à 1988, un large programme d'aménagement et d'assainissement a été réalisé dans le but d'enrayer les nuisances qui affectaient le plan d'eau. Ce projet a été basé sur un ensemble d'essais approfondis prenant en compte des modèles numériques de l'hydrodynamique et de la qualité de l'eau. La qualité de ce plan d'eau a été suivie après ces aménagements pendant une période de six années et demie. Les résultats des mesures ont montré une amélioration nette de la qualité des eaux sur les plans physique, chimique et biologique. On a constaté une baisse considérable des nutriments dans l'eau et une substitution des peuplements benthiques par de nouvelles espèces adaptées aux nouvelles conditions de vie. La plupart des anciens récifs de *Ficopomatus enigmaticus* sont morts et ont laissé la place à des substratums durs favorables à l'installation de nouvelles espèces benthiques. L'algue envahissante *Ulva rigida* a également disparu et a été remplacée, en une quantité plus réduite, par deux peuplements de situation topographique distincte à *Chaetomorpha linum* et à *Ruppia cirrhosa*.

## ABSTRACT

Ben Charrada R., 1995 - [Restoration impact on the water quality and the benthos of Tunis North Lake]. Mar. Life, 5 (1) : 51-64.

The Lake of Tunis is a Mediterranean lagoon which was formerly considered as one of the most highly eutrophic in the world. From 1985 to 1988, a major programme of restoration and purification was undertaken in order to eradicate the sources of pollution of the water. This project was based on a set of detailed tests using mathematical models of hydrodynamic patterns and water quality. After completion of the project, the water quality was monitored for six and a half years. The results of analyses show a clear improvement in the physical, chemical and biological quality of the water. There has been a considerable decrease of the nutrients in the water and a replacement of the former benthic populations by new species adapted to the new conditions. Most of the old reefs of *Ficopomatus enigmaticus* have disappeared and have been replaced by hard substrates that favour other benthic species. The invasive plant species *Ulva rigida* has disappeared and has been replaced - albeit in smaller quantities - by two main populations: *Chaetomorpha linum* and *Ruppia cirrhosa*.

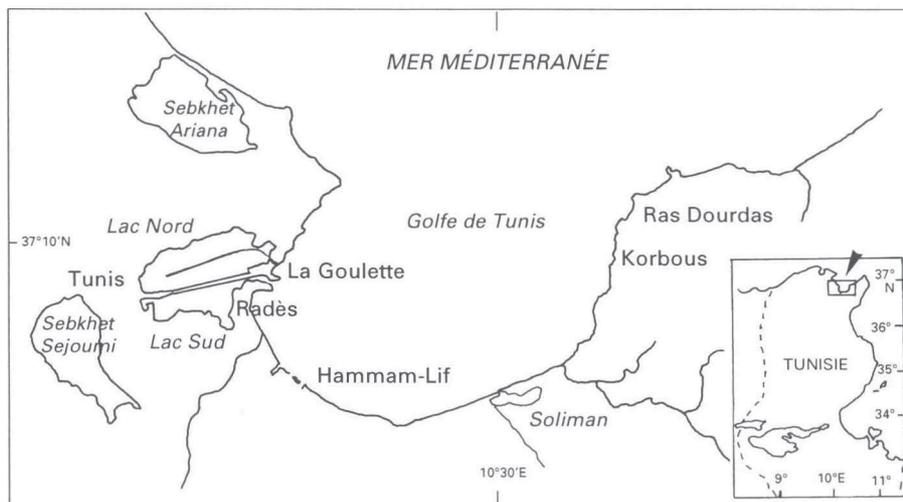


Figure 1 - Situation géographique du lac Nord de Tunis / Geographical situation of the Northern Lake of Tunis.

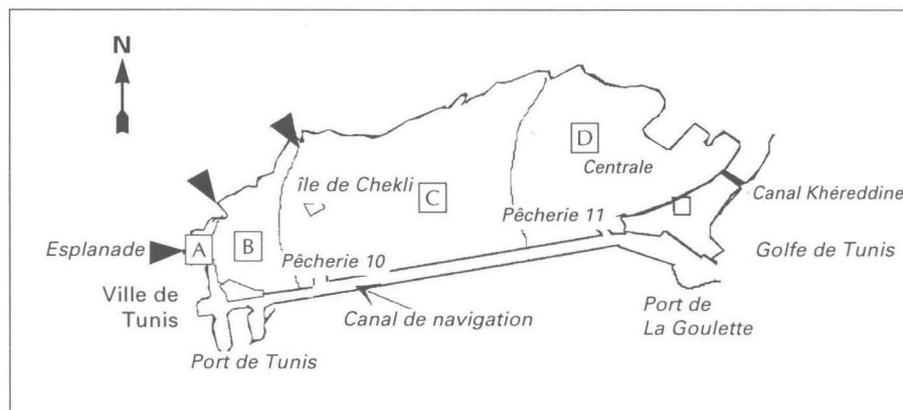


Figure 2 - Situation du lac Nord de Tunis avant les aménagements. Etat de la pollution et lieux de déversement des eaux usées, d'après EPA, 1977. A : Zone très polluée - Esplanade ; B : Zone moyennement polluée ; C : Zone moyennement polluée ; D : Zone peu polluée. > Lieux de déversement des eaux / Plan of the Northern Lake of Tunis before the restoration project. Degree of pollution and sites of sewage outfalls (>).

## INTRODUCTION

Le lac de Tunis est situé sur la côte nord de la Tunisie, à l'est de la capitale Tunis (Figure 1). Pendant la période allant de 1985 à 1988, le lac a été l'objet d'un grand programme d'aménagement qui a consisté à éliminer les sources de pollution affectant le plan d'eau.

Les actions entreprises ont permis de régénérer l'écosystème par l'introduction d'un ensemble de modifications de sa morphologie et la création d'un système de renouvellement d'eau à partir de la mer.

De plus, l'aménagement des berges en terre-pleins a permis de récupérer des terrains constructibles. Les travaux réalisés par l'entreprise néerlandaise *The Lake Group* ont été achevés en mars 1988. Ils ont été suivis par une période d'entretien

de dix-sept mois et une période de garantie de la qualité des eaux de cinq années.

Dans ce travail, nous traitons de la qualité des eaux de cet écosystème qui a été suivie, dès la fin des travaux, pendant les deux périodes d'entretien et de garantie.

Les caractères physico-chimiques ont été étudiés au niveau de cinq stations échelonnées sur une radiale longeant le parcours des eaux, ainsi qu'au niveau de trois stations prises comme eaux de référence dans le golfe de Tunis.

Dans la première partie de ce travail, nous donnons un bref aperçu sur l'historique de cet écosystème et les principaux aménagements introduits dans ce milieu. Dans la deuxième partie, nous présentons quelques résultats collectés pendant la période de suivi, ainsi que les principales répercussions sur la qualité de l'écosystème.

## SITUATION DU LAC AVANT LES AMÉNAGEMENTS

### Morphologie du lac

Autrefois, le lac de Tunis était une partie d'une lagune plus étendue. En 1885, celle-ci a été divisée en deux parties par un canal de navigation reliant le golfe au port de Tunis. Ces deux parties ont été ainsi individualisées en une partie Nord (lac Nord, objet du présent article) et Sud (lac Sud). En 1951, le lac Nord a été relié au golfe de Tunis par la construction du canal de Khéreddine (Figure 2) qui a été, par la suite, élargi en 1978 et dragué en 1981. Le lac était également en liaison avec le canal de navigation par trois passes dont deux, plus le canal de Khéreddine, étaient munies de bordigues (pièges fixes), qui réduisaient les échanges avec l'extérieur. Une centrale thermique (STEG), installée du côté sud-est depuis 1965, rejetait ses eaux de refroidissement dans le lac. En 1984, la superficie du lac Nord de Tunis était de l'ordre de 27 km<sup>2</sup> et sa profondeur moyenne de l'ordre d'un mètre (Figure 2).

### Dégradation de la qualité de l'écosystème

Depuis la construction de Tunis qui remonte au Moyen Age, le lac a reçu les eaux usées et pluviales de la ville dans sa partie occidentale, zone connue sous le nom d'Esplanade. Le volume total de ces rejets urbains atteignait, en 1976, un débit de 80 000 m<sup>3</sup>/jour, induisant, en particulier, une très forte pollution dans la zone.

La pression de l'urbanisation de la ville de Tunis, qui s'est fortement accélérée à partir des années 1970, a largement aggravé les nuisances. A cette époque, l'étude des boues qui recouvraient la quasi-totalité du lac a montré qu'elles contenaient plus d'un gramme de phosphore, 1 g de sulfures et 5 g d'azote par kilogramme de matière sèche (Shneider, 1997).

Cette richesse en matière organique et la présence d'un faible taux de renouvellement d'eau étaient à l'origine d'une eutrophisation très élevée se caractérisant, surtout en été, par des crises dystrophiques avec l'apparition du phénomène des eaux rouges et le dégagement d'une grande quantité de gaz sulfuré (Naguib M. and Kelly M., 1984). Ces crises dystrophiques estivales étaient caractérisées par un faible taux en oxygène dissous (0 %), un pH très bas ( $\cong$  6), une salinité élevée ( $\cong$  50) et des teneurs en phosphore et en azote élevées (1 mgP/L et 5 mgN/l). Elles sont suivies par un développement très rapide de microalgues de type *Nanochloris occulata* qui peuvent élever la concentration de la chlorophylle *a* jusqu'à 250 µg/l et réduire à zéro la transparence des eaux. Pendant les périodes hivernales, la situation s'inverse (Environmental Protection Agency, 1977). Le relais est pris par *Ulva rigida* qui envahit le milieu et atteint une concentration de l'ordre de 10 kg/m<sup>2</sup> au début du printemps. Les eaux deviennent alors très claires, à l'exception des zones d'eutrophisation majeure à

l'extrême ouest (Esplanade) et le milieu devient saturé en oxygène dissous au cours de la journée (> 200 % du niveau de saturation,  $\cong$  15 mgO<sub>2</sub>/l).

Ces conditions d'eutrophisation ont entraîné une sélection naturelle très sévère des peuplements. Au niveau zoologique, les travaux de Zaouali (1974) ont montré qu'à cette époque (1970-1980) les espèces benthiques subissaient une diminution progressive à partir des zones proches de la mer (côté est), du nombre d'espèces jusqu'aux zones de confinement majeur (côté ouest). Du côté est, s'installaient des gastéropodes épiphytes se réfugiant dans les algues, *Cerithium vulgatum*, *Gibbula* et le polychète *Ficopomatus enigmaticus*, alors que dans les zones les plus eutrophisées, du côté ouest, les éléments benthiques étaient presque absents. Le petit gastéropode brouteur *Hydrobia ventrosa*, vivant en épiphyte, dominait largement la biomasse des biocénoses invertébrées dans ces zones.

D'après des données fournies par Zaouali, une analyse historique de la dégradation de la qualité de l'écosystème a été faite en se basant sur la répartition des végétaux benthiques au cours d'une période s'étendant sur plus d'un demi-siècle :

- 1929 : dans les parties est et centrale, se développent des Zostères, des Acétabulaires et quelques Entéromorphes. Les zones ouest sont couvertes par des Ulves et des Entéromorphes. Les deux tiers du lac sont sous influence marine, les eaux sont peu eutrophisées, à l'exception de la partie ouest où l'on enregistre une certaine eutrophisation ;
- 1954 : les Acétabulaires et les Zostères occupent une surface réduite dans la zone est. Les Caulerpes apparaissent dans la partie centrale. A cette époque, la zone d'influence marine est réduite ;
- 1965 : les Ulves ont occupé une large surface dans la partie centrale et les Acétabulaires ont disparu. La pollution a donc regagné une grande partie du lac ;
- 1973 : les Ulves ont envahi totalement les parties centrale et est. La pollution a gagné l'ensemble du lac et le milieu est devenu hypertrophe ;
- 1980 : tout signe de vie a disparu dans la zone de l'Esplanade. La situation de 1973 est renforcée avec une production d'Ulves sans cesse grandissante. Le milieu est devenu dystrophe ;
- 1981 : tous les rejets d'eau urbaine sont arrêtés après la construction du canal de ceinture qui draine les eaux pluviales vers le port de Tunis ;
- 1985 : la situation de la végétation du lac est comparable à celle de 1980. Démarrage des grands travaux d'assainissement.

On observe donc, en moins de 100 ans, le passage du lac d'un état partiellement eutrophe à un état dystrophe. Ainsi, la prise de conscience de l'importance du problème a amené l'État tunisien à développer un grand programme d'aménagement et d'assainissement du lac pour arrêter les nuisances qui affectent le plan d'eau.

## LE PROJET D'AMÉNAGEMENT

L'ensemble du projet comportait, en plus des travaux d'aménagement, une garantie sur la qualité des eaux de l'écosystème pour une période de cinq années après les périodes des travaux et de maintenance. Cette garantie consistait à assurer les normes de qualité des eaux suivantes :

- les moyennes annuelles des contenus en azote total et en phosphore total ne doivent pas dépasser trois fois celles du golfe de Tunis ;
- la moyenne annuelle de la chlorophylle *a* ne doit pas dépasser 30 µg/l ;
- le disque de Secchi doit être visible à une profondeur supérieure à 2 m ou jusqu'au fond dans les zones peu profondes ;
- le pH ne doit pas dépasser 9 à tout moment ;
- le niveau minimum de l'oxygène dissous mesuré à l'aube doit être supérieur à 30 % du niveau de saturation ( $\cong 2.5 \text{ mg O}_2/\text{l}$ ).

### La solution

La première étape de la solution au problème posé a consisté à arrêter les rejets dans le lac et à construire un canal périphérique pour drainer les eaux pluviales de Tunis vers le port de Tunis.

La deuxième étape, de plus grande envergure, comprend plusieurs volets. Le premier fut la mise en place d'un système de circulation des eaux en provenance de la mer par des vannes actionnées par les marées et installées dans le canal de Khéreddine et par une digue de séparation qui lie l'île de Chekli à ces vannes. La digue a pour objet de forcer les eaux à circuler dans l'ensemble du lac, évitant ainsi la stagnation des eaux. Le second volet prévoyait également l'extraction de sable du lac pour le remblayage des berges, d'une part, et l'élimination d'une importante quantité de boue organique hors du lac, d'autre part. Le troisième volet prévoyait le déplacement d'une quantité de sédiments des zones peu profondes vers les zones d'emprunt de sable et enfin la récolte d'une grande quantité de macroalgues. En d'autres termes, ce projet prévoyait

la régénération totale du lac avec une modification du tracé de ses berges et de la topographie du fond.

### Les études

Le projet fut le résultat d'essais approfondis mettant en jeu des modèles mathématiques de l'hydrodynamique et de la qualité des eaux (The Lake Group, 1988).

L'étude de l'hydrodynamique a consisté en une utilisation d'un modèle unidimensionnel pour l'optimisation du tracé des berges et de la digue de séparation ; ce travail a fait suite à l'application d'un modèle 2D aux éléments finis pour le calcul des circulations internes, et à celle d'un modèle 2D aux différences finies pour le golfe de Tunis pour simuler les possibilités de recirculation dans le lac.

La qualité des eaux a été prévue par la mise au point d'un modèle écologique, à l'Institut Delta des recherches hydrobiologiques ; ce modèle, appuyé par de longues séries de mesures *in situ* et au laboratoire, décrit les variations saisonnières des sels nutritifs en fonction des cycles de croissance des végétaux et des échanges de nutriments avec les sédiments.

### Les travaux

Les aménagements introduits en vue de dégager des terre-pleins sur les berges et de maintenir la bonne qualité des eaux peuvent se résumer aux actions suivantes (Arjen H. et Oostinga, 1992) :

- l'extraction à partir du fond du lac d'environ 18 millions de m<sup>3</sup> de sable de deux zones d'emprunt en vue de remblayer les berges (zones ouest du lac). Suite à un manque de sable dans le lac, environ 1,3 million de m<sup>3</sup> ont dû être prélevés dans le golfe de Tunis ;
- l'élimination d'environ 10 millions de m<sup>3</sup> de boue hors du lac et le déplacement d'environ 6,8 millions de m<sup>3</sup> à l'intérieur du lac pour remblayer les deux zones d'emprunt à - 4 m ;
- l'extraction de 260 000 m<sup>3</sup> de boue pour la construction de la digue centrale de séparation de 8 km de longueur et de 4 m de largeur de crête ;
- l'installation, à Khéreddine, de deux écluses formées de 20 portes ;

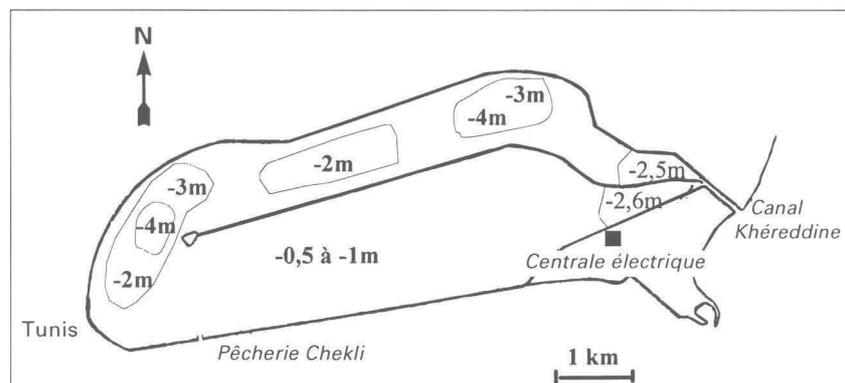


Figure 3 - Nouvelle configuration du lac de Tunis après les aménagements. Surface totale : 22 km<sup>2</sup> ; profondeur moyenne : 1,4 m / New configuration of the lake after the restoration project. Total surface: 22 km<sup>2</sup>; average depth: 1.4 m.

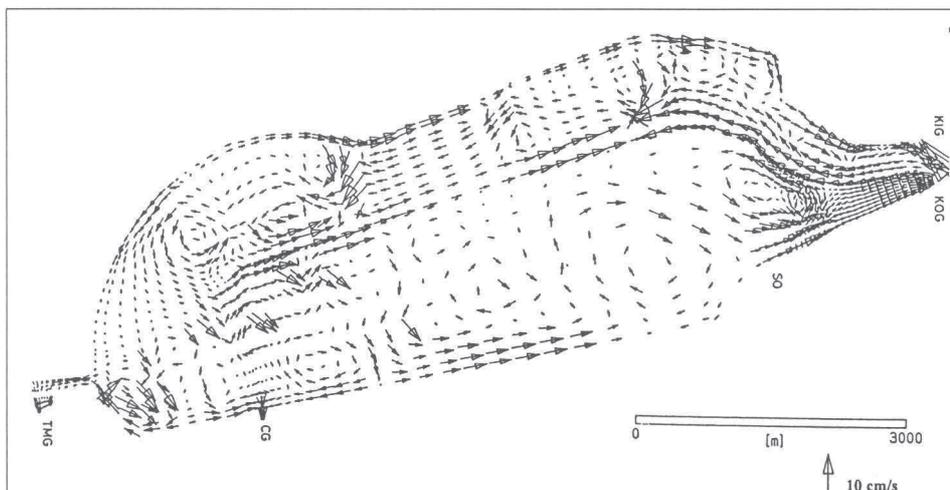


Figure 4 - Schéma de circulation des eaux, d'après le modèle hydrodynamique pour un vent nord-ouest 5,85 m/s (échelle : 1 mm pour 2 cm/s) / Schema showing water circulation patterns according to the hydrodynamic model for a north westerly wind of 5.85 m/s (Scale: 1 mm: 2cm/s).

- l'aménagement des berges sur 22 km de longueur dont 10 km ont été aménagés en plages naturelles ; le reste a été protégé par des blocs de roche. Au total, 37 000 tonnes d'enrochement extraites des carrières de Tunis ont été mises en place.

Ces travaux ont amené la reconstitution d'un nouveau lac partiellement divisé en deux parties de topographie distincte (Figure 3). Le plan d'eau occupe actuellement une surface de 22 km<sup>2</sup> à la profondeur moyenne de 1,4 m.

## RÉSULTATS DES ÉTUDES

### Étude de l'hydrodynamique du lac

Les circulations à l'intérieur du lac ont été calculées par un modèle hydrodynamique aux éléments finis. Il a été calibré suite à des campagnes de mesure de la vitesse du courant et du niveau de la marée dans les différentes passes qui liaient le lac à la mer. La première étape de ces calculs a consisté à étudier les circulations internes de l'état initial avant toute modification de la morphologie du lac. Le schéma de circulation relatif à cette situation a montré que les circulations internes étaient localisées uniquement à proximité des passes liant le lac à l'extérieur où la vitesse du courant varie en fonction du régime de la marée. A l'intérieur du lac (côté nord et partie ouest), les eaux étaient stagnantes et le taux de renouvellement des eaux était très faible.

La seconde étape de cette modélisation a consisté à étudier différents scénarios d'aménagement. La variante retenue qui donne le meilleur schéma de circulation a consisté à construire une digue de séparation qui peut canaliser les eaux à l'intérieur du lac pour éviter toute forme de stagnation. La passe située au sud-est (ancienne pêcherie 11) a été fermée et deux vannes entrées-sorties ont

Tableau I - Temps de séjour des eaux d'après les calculs hydrodynamiques / Duration of residence of water according to hydrodynamic calculations.

Niveau moyen de mer (m NGT)	Vent	Temps de séjour des eaux (jours)
0,16	Est	28,8
0,16	Ouest	24,8
0,16	Nord-ouest	26,3
0,16	Calme	26,9
0,00	Est	28,4

été installées au canal Khéreddine, de telle façon qu'au cours de la période de flot, l'eau pénètre dans la partie nord et, que pendant le jusant, l'eau sorte de la partie sud. Le schéma de circulation relatif à cette variante est présenté sur la Figure 4. Tous ces aménagements ont permis d'améliorer les circulations internes dans le lac. Le temps de séjour des eaux est variable en fonction du régime du vent et de la marée (Tableau I).

Ces résultats ont été vérifiés après les aménagements par une campagne de mesures réalisées le 19 mars 1988. Les paramètres mesurés sont la vitesse du courant et le niveau de la marée à des intervalles de temps de 15 mn pendant un cycle complet de la marée (12 heures 25 mn). Elles ont montré que la vitesse du courant varie de 0,5 à 1 m/s dans les différentes passes et que l'écluse d'entrée a pu transiter dans le lac environ 1,134 million de mètres cubes d'eau de mer par cycle de marée. Environ 20 % de ces eaux sortent du lac du côté ouest et le reste ressort par l'écluse de sortie du côté sud du lac.

### Étude de la qualité des eaux du lac

Un modèle écologique a été mis au point pour prévoir la qualité des eaux du lac de Tunis. Ce

modèle est basé sur la théorie de la qualité des eaux de Jorgensen (1979) ; le phosphore et l'azote organique dans les sédiments sont minéralisés sous forme inorganique dans l'eau interstitielle puis transférés dans l'eau par les processus de diffusion. Cette quantité disponible dans la colonne d'eau est assimilée par le phytoplancton et les macroalgues benthiques. Une seule espèce de macroalgue a été prise en compte dans le modèle écologique, à savoir *Ulva rigida* qui s'est développée pendant de longues périodes dans le lac. Lors du dépérissement de ces Ulves, la matière organique est régénérée dans les sédiments et le processus reprend. La croissance des Ulves et du phytoplancton est limitée par l'éclairement solaire, la salinité des eaux, la température, l'auto-ombrage et la disponibilité des sels nutritifs. La mortalité dépend essentiellement de la nature de l'eau et de la prédation par la faune benthique.

La première étape de cette modélisation a consisté à réaliser un modèle global calibré sur une série de mesures réalisées en 1984. Différents paramètres ont été déterminés, tels que le taux de croissance maximal des Ulves et du phytoplancton, les taux de mortalité maximum des Ulves et du phytoplancton, la consommation de la faune benthique, *Ficopomatus enigmaticus*, et les taux d'assimilation des sels nutritifs par les algues. L'échange des sels nutritifs entre les sédiments du fond et la colonne d'eau est déterminé sur des modèles réduits au laboratoire.

La deuxième étape a consisté à appliquer le modèle écologique sur la variante d'aménagement retenue par l'étude hydrodynamique. Dix zones ont été choisies en fonction des circulations internes pour la prévision de la qualité des eaux. Les données relatives à la qualité des eaux de mer de régénération étaient de 320 µgN/l, 20 µg P/l et de 2 µg Chl a/l.

Les paramètres simulés par ce modèle écologique sont :

- l'azote et le phosphore dans l'eau, les sédiments et la végétation (Ulves et phytoplancton) ;
- la concentration des Ulves ;
- la concentration du phytoplancton.

Les Figures 5 relatives aux concentrations de l'azote et du phosphore total dans l'eau, telles qu'elles sont prévues par le modèle écologique, montrent une nette amélioration de la qualité des eaux du lac après les aménagements.

## ANALYSE DE L'ÉCOSYSTÈME APRÈS LES AMÉNAGEMENTS

### Les paramètres mesurés

Dès l'achèvement des travaux d'aménagement, en avril 1988, la qualité des eaux du lac a été suivie jusqu'en septembre 1994. Les paramètres mesurés sont :

- la température, la salinité et la transparence des eaux (mesures *in situ*) ;
- l'oxygène dissous dans l'eau (mesure *in situ*) ;
- le pH de l'eau (mesure *in situ*) ;
- la chlorophylle a ;
- la concentration des macroalgues sur le fond du lac, la surface couverte (mesures *in situ*) ;
- l'azote total (organique + minéral) dans l'eau (analyse au laboratoire) ;
- le phosphore total (organique + minéral) dans l'eau (analyse au laboratoire).

Ces mesures ont été réalisées toutes les deux semaines, pendant la période de maintenance (avril 1988 à août 1989) et la période de garantie (septembre 1989 à août 1994). Les mesures ont été réalisées dans cinq stations du lac (stations 1 à 5) et dans trois stations du lac de Tunis (stations 6, 7 et 8) (Figure 6).

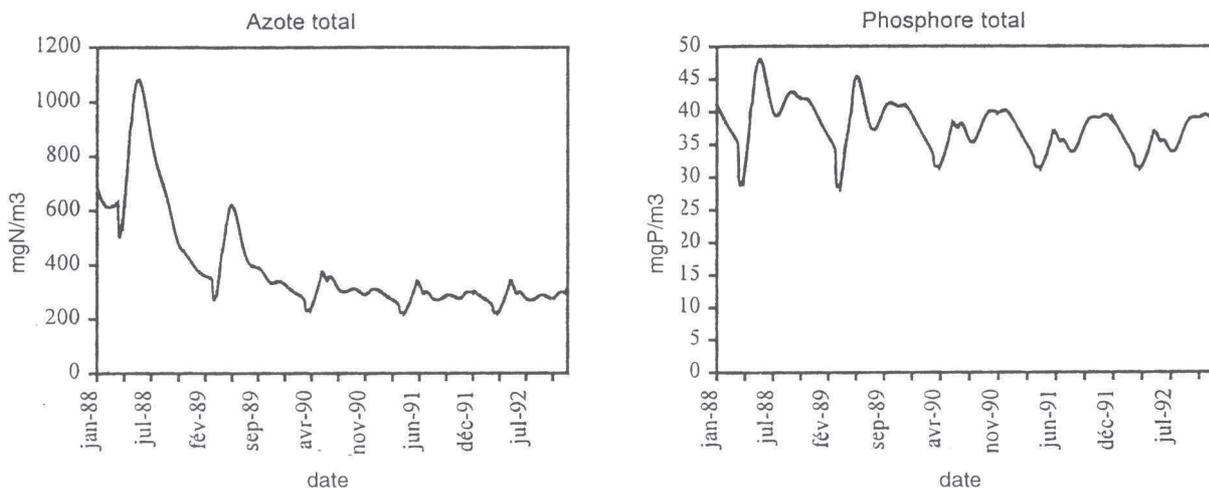


Figure 5 - Prévisions du modèle pour l'azote total et le phosphore total dans les eaux de la partie sud du lac de Tunis / Predictions of the model for total nitrogen and total phosphorus in the waters in the southern part of the Lake of Tunis.

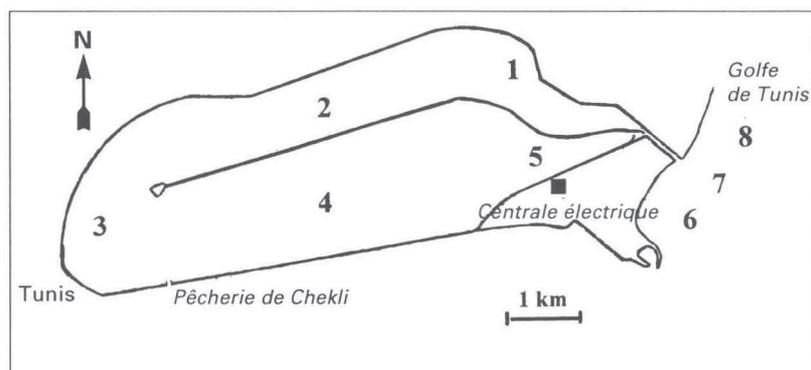


Figure 6 - Stations de prélèvement dans le lac et dans le golfe de Tunis / Sampling stations in the lake and in the Gulf of Tunis.

### Les méthodes

L'oxygène dissous, la température de l'eau, la salinité, le pH et la transparence de l'eau sont mesurés directement sur le site. L'oxygène dissous est mesuré avant le lever du soleil avec un oxygène-mètre du type WTW OX1 196. La salinité et le pH sont mesurés avec des appareils WTW LF 191 et pH 196 ; la transparence est contrôlée 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 de Tunis. L'azote total (organique + inorganique) est dosé suite à une digestion sous pression à 140°C avec les persulfates suivie d'une réduction des nitrates à travers une colonne de Cadmium et enfin une détermination colorimétrique des nitrites formés avec du Sulphanilamide et du N-(1-naphthyl-éthylène). Le phosphore total (organique + ortho-phosphate) est également dosé par une oxydation en milieu acide à 100°C suivie d'une détermination colorimétrique des orthophosphates formés avec du molybdate d'ammonium.

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 site. Le poids frais mesuré contient environ 15 % de matière sèche.

### Les résultats d'analyse

Les paramètres physiques de l'eau

Les propriétés physiques relevées sont la température, la salinité et la transparence des eaux.

La température moyenne des eaux du lac (Figure 7a) en hiver est de l'ordre de 13°C ; elle est légèrement inférieure à celle des eaux du golfe. Sa valeur minimale, de l'ordre de 9°C, est atteinte en décembre. En été, sa valeur moyenne est de 26°C ; cependant, elle atteint parfois des valeurs très hautes (30°C) par vent chaud de type sirocco. L'influence du système de circulation a été mise en évidence par les différences de température enregistrées entre la partie nord, fortement influencée par les apports importants en eau de mer, et sud. Dans la zone sud-est, les eaux sont légèrement

réchauffées par le rejet de la centrale thermique qui est installée sur la rive. Des mesures de température, selon des radiales transversales, montrent à ce niveau l'existence d'un contre-courant d'une eau légèrement réchauffée au niveau sud-est de la digue de séparation.

La salinité a largement évolué, par rapport à la situation avant la restauration environnementale, vers une certaine régularisation, à l'exception de la zone sud, peu profonde, qui reste marquée par de larges écarts entre saisons estivale et hivernale. En période chaude, la salinité des eaux du lac est supérieure à celle de la baie de Tunis (36-37 au golfe), à cause d'une forte évaporation (42 dans la partie sud). Dans la zone nord, elle reste influencée par les apports des eaux marines. Les hivers 1990 et 1991 ont été marqués par de faibles salinités (33) à cause de fortes précipitations (Figure 7b).

La turbidité de l'eau s'est nettement améliorée. Le fond du lac est maintenant visible pendant toute l'année, à l'exception des périodes de vent fort où les eaux se chargent de matières en suspension, ce qui diminue légèrement leur transparence.

Les paramètres chimiques de l'eau

Les mesures chimiques réalisées sont le pH, l'oxygène dissous, l'azote total et le phosphore total dans l'eau. La variation du pH et de l'oxygène dissous montrent que ces deux paramètres ont évolué vers une régularisation, à l'exception de la station 4 (Figure 7c) qui reste influencée par le développement des macroalgues. La mortalité des algues, en été, y abaisse légèrement le pH et le taux en oxygène dissous. Pendant le reste de l'année, les eaux sont saturées en oxygène en période diurne (80 à 100 %) et le pH varie entre 8 et 8,5.

La mesure des concentrations de l'azote et du phosphore montre une décroissance, très nette par rapport à la situation antérieure. Les valeurs maximales et les moyennes annuelles relevées au cours des six années après les aménagements sont données sur les Tableaux II et III.

Sur les figures 7e, f, g et h, nous avons représenté les variations des teneurs en azote total et en phosphore total dans le golfe, ainsi que dans la sta-

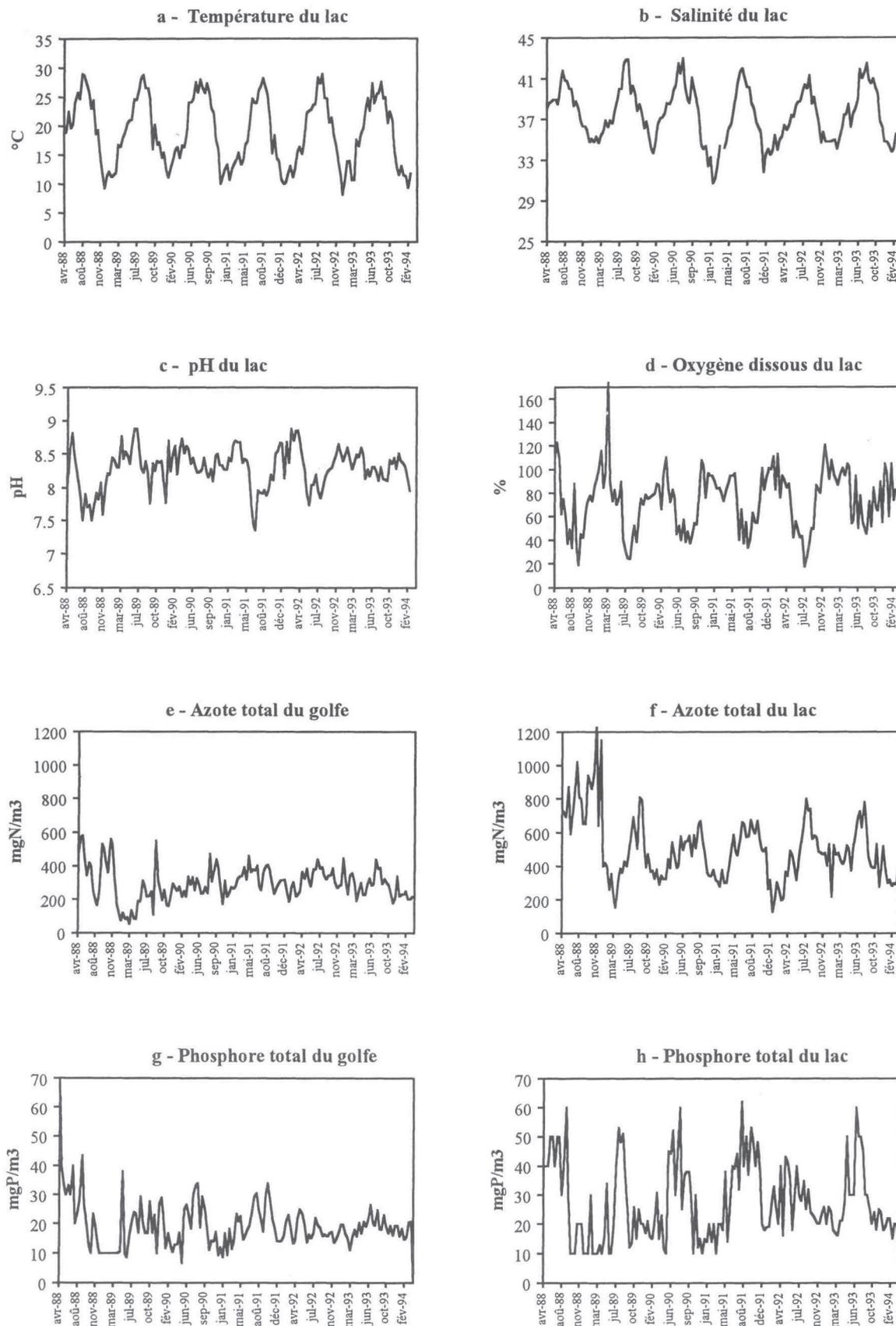


Figure 7 - Résultats des analyses physico-chimiques des eaux à la station 4 du lac et à la station 7 du golfe de Tunis / Results of physical and chemical analyses of waters at station 4 in the lake and station 7 in the Gulf of Tunis.

Tableau II - Valeurs maximales de l'azote total ( $\mu\text{gN/l}$ ) / Maximum values for total nitrogen (micro gN/l)

	Avant	Après les aménagements					
Année	1985	1988	1989	1990	1991	1992	1993
Station 1	2350	760	522	588	526	552	590
Station 2	2350	870	579	530	510	540	575
Station 3	2350	940	637	576	600	615	655
Station 4	2350	1270	810	668	666	737	780
Station 5	2350	1260	967	720	841	775	780

 Tableau III - Valeurs maximales du phosphore total ( $\mu\text{gP/l}$ ) / Maximum values for total phosphorus (micro gN/l)

	Avant	Après les aménagements					
Année	1985	1988	1989	1990	1991	1992	1993
Station 1	300	70	31	62	40	48	40
Station 2	300	60	40	46	45	53	40
Station 3	300	60	42	66	50	46	50
Station 4	300	60	53	60	62	43	60
Station 5	300	50	65	58	67	50	70

tion 4 du lac de Tunis. Ces figures montrent des fluctuations dans le lac entre les périodes estivales et hivernales, qui sont plus marquées dans les zones sud, influencées par la croissance des macroalgues et les sédiments du fond.

L'analyse du rapport (nutriment-lac/nutriment-golfe) montre une tendance à une stabilisation qui est plus nette pour l'azote que pour le phosphore. Au cours de la période 1988-1989, le rapport (azote-lac/azote-golfe) varie de 1 à 6,5 dans la partie sud pour chuter à des valeurs inférieures à 2,5, de 1990 à 1994. Ce rapport a également chuté pour le phosphore mais reste marqué par quelques fluctuations saisonnières.

L'analyse du rapport (N/P) dans le lac montre que ce terme présente un pic vers la fin de 1988 ((N/P = 80), puis il devient plus stable pendant les années suivantes. A partir de 1991, environ 80 % des valeurs de ce rapport varient constamment entre 10 et 20.

D'autres mesures ponctuelles des contenus en azote et en phosphore dans les sédiments et dans la végétation ont montré une baisse considérable de ces teneurs par rapport à la situation antérieure aux aménagements. Les Ulves contenaient auparavant d'après Shneider W. (1977), 4 % d'azote et 0,3 % de phosphore, alors que les deux nouvelles espèces, *Chaetomorpha linum* et *Ruppia cirrhosa*, contiennent respectivement 1,4 % et 1,37 % d'azote, et 0,16 % et 0,44 % de phosphore.

#### Les peuplements benthiques

Le fond du lac, qui était auparavant essentiellement colonisé par *Ficopomatus enigmaticus* et

*Ulva rigida*, a connu d'importantes modifications de ses peuplements benthiques.

Au niveau faunistique, la présence des récifs de *Ficopomatus enigmaticus* a été graduellement réduite. Une grande partie, dans la zone nord, a été enlevée par dragage. Dans la partie sud, quelques récifs sont restés dans la zone centrale, et ont quasiment disparu dans les zones ouest et est.

Dans la zone sud-ouest, les récifs morts ont servi de substratum où se sont installées des Ascidies *Ciona intestinalis*, des moules *Mytilus galloprovincialis*, des huîtres *Ostrea stentina*, des balanes *Balanus amphitrite*...

Dans la zone sud centrale, environ 70 % des anciens récifs ont disparu. Sur leurs anciens substratums, nous avons noté la présence d'algues bleues *Mastigocoleus* et *Lyngbya* et de quelques huîtres.

La zone sud-est est marquée par l'installation, sur les récifs morts, de colonies d'huîtres et des biocénoses très diversifiées avec des algues *Corallina elongata*, *Ceramium flaccidium*, des Bryopsis et une forte densité d'huîtres *Ostrea stentina*.

Pendant la période hivernale, saison de forte croissance des Chaetomorphes, ces dernières servent de support à un grand nombre de gastéropodes : *Amycla corniculum*, *Monodonta turbiformis*, *Cerithium vulgatum*...

Au niveau floristique, l'ancienne espèce envahissante *Ulva rigida* a disparu. Elle a été remplacée, en une quantité plus réduite, d'une part, dans la partie nord, par un herbier de phanérogames à *Ruppia cirrhosa* (espèce nouvelle) et, d'autre part, dans la partie sud, par une espèce macroalgale *Chaetomorpha linum*, espèce autrefois

présente en petite quantité. Nous avons également noté la présence, en quantité faible et pendant de courtes périodes de l'année, des Entéromorphes, des Cladophores, des Gracilaires, des Caulerpes, toutes espèces autrefois présentes dans le lac, et d'autres, nouvelles, non mentionnées par les études antérieures telles qu' *Ectocarpus*, *Corralina elongata*, *Hypnea musciformis* et *Dasya*. La répartition dans l'espace et dans le temps des peuplements végétaux apparaît sur la Figure 9. Sur la Figure 8, nous avons présenté la variation de la quantité des macroalgues mesurées dans la zone sud du lac dès le début de 1987 et jusqu'à la fin de 1994. Ci-dessous, nous donnons une description des cycles de croissance des espèces végétales les plus importantes :

- les Ulves

*Ulva rigida* était dominante avant les aménagements. Elle se développait en hiver et au printemps et mourait en été. Sa croissance a continué pendant les périodes de construction et d'entretien. Sa biomasse totale était, en tonnes de poids frais, d'environ 11 700 en 1987, 10 800 en 1988 et 3 900 en 1989. Au printemps, période de croissance des Ulves, les eaux étaient sursaturées en oxygène et le pH était relativement élevé. Pendant les étés 1988 et 1989, la mortalité de ces Ulves a généré des zones anaérobiques locales (eaux rouges) dans la partie sud du lac. Au début de 1990, elle a totalement disparu du lac pour laisser la place à de nouvelles espèces : *Chaetomorpha linum* et *Ruppia cirrhosa*.

- les Chaetomorphes

L'espèce *Chaetomorpha linum*, présente dans le lac avant les aménagements, ne s'est développée en grande quantité que vers la fin de 1988 dans la zone sud-est où elle a pris la place des Ulves au fur et à mesure de la décroissance de cette espèce (Ben Charrada 1992). Vers la fin de 1989, elle a envahi toute la partie sud du lac et quelques zones de la partie nord. Le cycle de croissance des Chaetomorphes est en avance de phase par rapport à celui

des Ulves (Figure 8). Sa saison de croissance commence en octobre et prend fin au début du printemps. En hiver, elle peut, dans certaines zones, coloniser tout le tirant d'eau. Son cycle de croissance montre à partir de 1990, une périodicité de croissance et sa biomasse globale tend vers une certaine stabilisation avec des biomasses maximales en janvier, de l'ordre de 6 000 tonnes poids frais.

- *Ruppia cirrhosa*

Cette espèce est envahissante en été. Sa période de forte croissance est courte (mai-août) ; cependant, elle est souvent entravée par de fortes températures suite à des vents chauds de type sirocco en juillet. Pendant sa croissance estivale, elle forme des tiges florifères qui occupent toute la colonne d'eau. Ses racines peuvent atteindre une profondeur de 50 cm dans les sédiments. Elle s'est fortement développée à partir des années 1990 et 1991 pour se stabiliser pendant les années suivantes. Son développement est souvent gêné par l'installation, sur ses tiges, d'une fine couche d'algues brunes qui empêche la lumière solaire d'atteindre le fond.

- les Gracilaires

L'espèce *Gracilaria verrucosa* apparaît souvent au printemps et au début de l'été, dans la zone sud-est, et disparaît en automne. En mars 1990, elle a atteint une biomasse totale de 1 900 tonnes. Pendant les années 1992 et 1993, cette biomasse a fortement diminué à cause de l'accumulation des Chaetomorphes à l'amont d'un grand barrage pour la pêche à l'anguille qui a été installé dans ses zones de développement.

### COMPARAISON DES RÉSULTATS DE MESURE AVEC LES PRÉVISIONS DU MODÈLE ÉCOLOGIQUE

Le modèle écologique mis au point pour le lac Nord de Tunis a été étalonné sur des conditions initiales se rapportant à l'état du lac avant les aména-

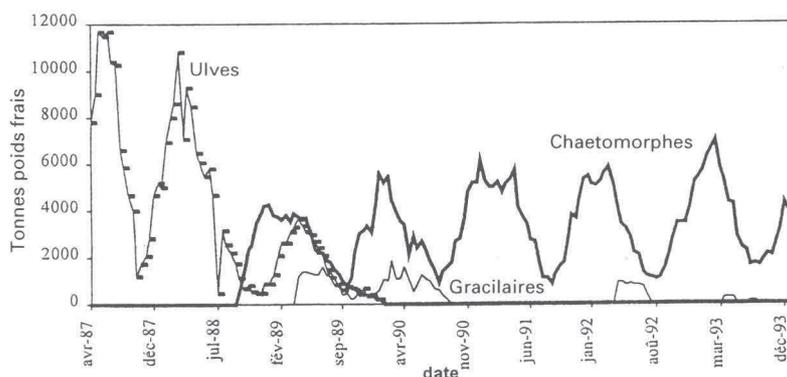


Figure 8 - Variation temporelle de la quantité de biomasse des principales espèces végétales du lac : Ulves, Chaetomorphes et Gracilaires / Variations over time in biomass quantity of the main plant species in the lake (*Ulva*, *Chaetomorpha* and *Gracilaria*).

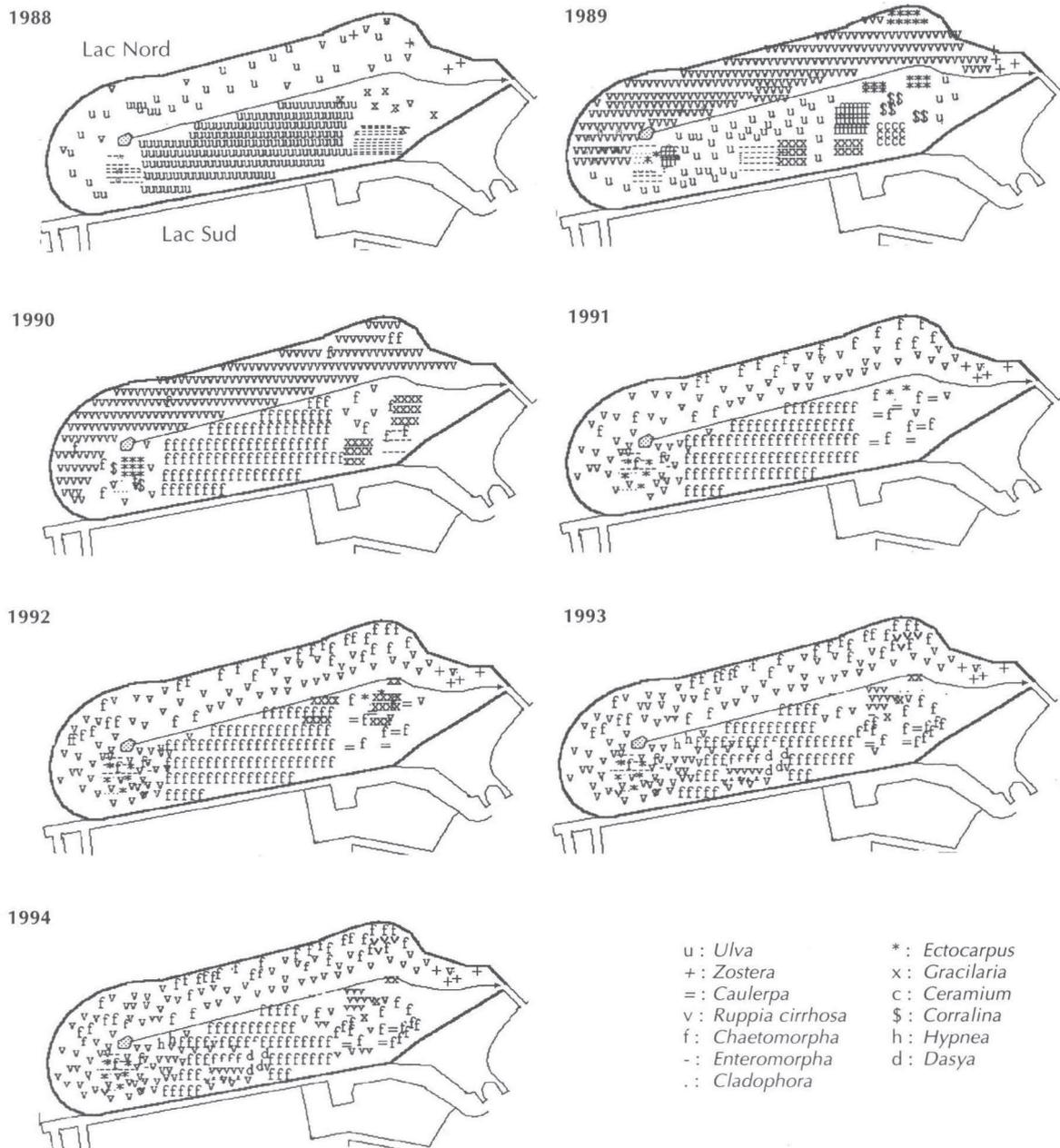


Figure 9 - Répartition dans l'espace et dans le temps des végétations dans le lac de Tunis après les aménagements / Distribution in space and time of plant species in the lake after the restoration project.

gements (1984). Une seule espèce clé macroalgale a été prise en compte (*Ulva rigida*) pour les prévisions de la qualité des eaux. Or, les mesures, après les aménagements, ont montré que cette espèce a totalement disparu et a été remplacée, en partie, par deux espèces pelotes : *Ruppia cirrhosa* dans la zone nord et *Chaetomorpha linum* dans la partie sud.

Toutefois, la croissance de ces espèces benthiques est tributaire des réserves en sels nutritifs restant dans les sédiments qui ont été bien simulées dans le modèle.

Les teneurs en sels nutritifs dans l'eau dépendent des quantités libérées à partir des sédiments et à partir des macroalgues lors de leur déperissement. Les tableaux IV et V donnent une analyse

comparative entre les valeurs simulées par modèle et celles mesurées pour l'azote et le phosphore dans l'eau. Ces valeurs montrent que les valeurs mesurées sont légèrement supérieures à celles qui sont simulées par le modèle écologique, surtout pour l'azote total. Cette différence peut être due aux changements apparus au niveau de la végétation benthique.

En effet, la nouvelle espèce *Ruppia cirrhosa* a introduit dans le cycle écologique un excès de sels nutritifs pompé par ses racines à partir des sédiments profonds, terme non pris en compte dans le modèle écologique. Ce phénomène est considéré comme plutôt positif car il accélère le relargage des réserves organiques dans les sédiments du fond.

Tableau IV - Analyse comparative entre les valeurs moyennes simulées et mesurées pour l'azote total dans l'eau ( $\mu\text{g/l}$ ) / Comparative analysis between simulated and measured mean values for total nitrogen in the water - micro g/l.

Station	Cond. Initiale	Année											
		1988		1989		1990		1991		1992		1993	
		Mesure	Modèle										
1	1600	380	321	288	319	387	319	363	319	361	319	355	318
2	1600	386	333	285	312	372	309	372	306	384	304	367	302
3	1600	452	349	329	312	390	306	402	302	400	298	380	295
4	1600	692	610	455	459	448	399	477	356	500	326	462	304
5	1600	626	612	506	459	491	399	499	357	534	327	458	305

Tableau V - Analyse comparative entre les valeurs moyennes simulées et mesurées pour le phosphore total dans l'eau ( $\mu\text{g/l}$ ) / Comparative analysis between simulated and measured mean values for total phosphorus in the water - micro g/l.

Station	Cond. Initiale	Année											
		1988		1989		1990		1991		1992		1993	
		Mesure	Modèle										
1	100	28	20	17	20	26	20	26	20	20	20	23	20
2	100	27	25	18	22	25	21	28	21	23	20	23	20
3	100	25	29	20	25	27	23	30	22	23	21	27	20
4	100	27	60	24	46	26	41	33	36	27	32	29	28
5	100	29	60	31	46	27	41	37	36	30	32	32	28

## DISCUSSION SUR LES RÉSULTATS DES MESURES

La prise en compte de l'ensemble des données abiotiques et biotiques mesurées montre que l'assainissement du lac de Tunis a généré d'importantes modifications de la chaîne trophique de l'écosystème. Il y a eu une baisse des sels nutritifs dans l'eau et les sédiments, et une substitution des anciens peuplements benthiques par de nouvelles espèces adaptées aux nouvelles conditions de vie. Ces principaux changements sont résumés sur la figure 10 :

L'élimination d'une importante quantité de boue du lac et les travaux de dragage ont permis de reconstituer un nouveau substrat dans le lac. Ces travaux ont réduit la richesse organique des sédiments à partir de laquelle se développait, autrefois, une importante quantité de biomasse d'Ulves. A cette action vient s'ajouter l'effet du courant forcé introduit dans le système. Il a permis une alimentation continue du milieu en eau de mer fraîche qui a favorisé une oxygénation continue du milieu et, par suite, la compensation de toutes les demandes biologiques en oxygène lors du dépérissement des Ulves en période estivale. Donc, dès la fin des aménagements, nous avons enregistré une chute rapide des concentrations moyennes en azote et en phosphore dans l'eau (de 60 % environ entre 1985 et 1988) et une disparition du phénomène des eaux rouges. Ces deux actions ont permis, en 1988, de rétablir un nouvel équilibre trophique et ionique (baisse du rapport N/P et pro-

priétés ioniques proches de celles du golfe de Tunis) à la suite duquel nous avons observé une chute des récifs de *Ficopomatus enigmaticus* et des blooms de microalgues *Nannochloris occulata* qui apparaissaient, autrefois, après les eaux rouges. Toutes ces conditions ont permis alors la régression des quantités d'Ulves et le développement de deux nouvelles espèces végétales, *Chaetomorpha linum* et *Ruppia cirrhosa*, qui ont trouvé des conditions plus favorables.

Ces modifications au niveau de la végétation, comparable à celle mentionnée par Mauro L. (1984), ont introduit un nouvel équilibre entre les nutriments dans l'eau et dans les sédiments. La répartition des sels nutritifs dans l'espace montre que les zones sud du lac sont encore marquées par des valeurs relativement élevées par rapport à celles du golfe de Tunis. Ce qui montre l'importance des réserves organiques qui sont restées au fond.

Ces nutriments sont utilisés par la végétation de deux manières : l'espèce *Chaetomorpha linum* utilise les nutriments diffusés dans les sédiments superficiels, alors que l'espèce *Ruppia cirrhosa* utilise les nutriments des couches profondes par ses racines qui s'enfoncent jusqu'à 50 cm. Donc, ce nouvel herbier de *Ruppia cirrhosa* a introduit un nouveau maillon dans la chaîne trophique, où les nutriments des couches profondes contribuent à la production primaire. Ceci conduit à dire que le système de circulation forcé a permis non seulement l'assainissement des couches superficielles des sédiments mais aussi des couches profondes.

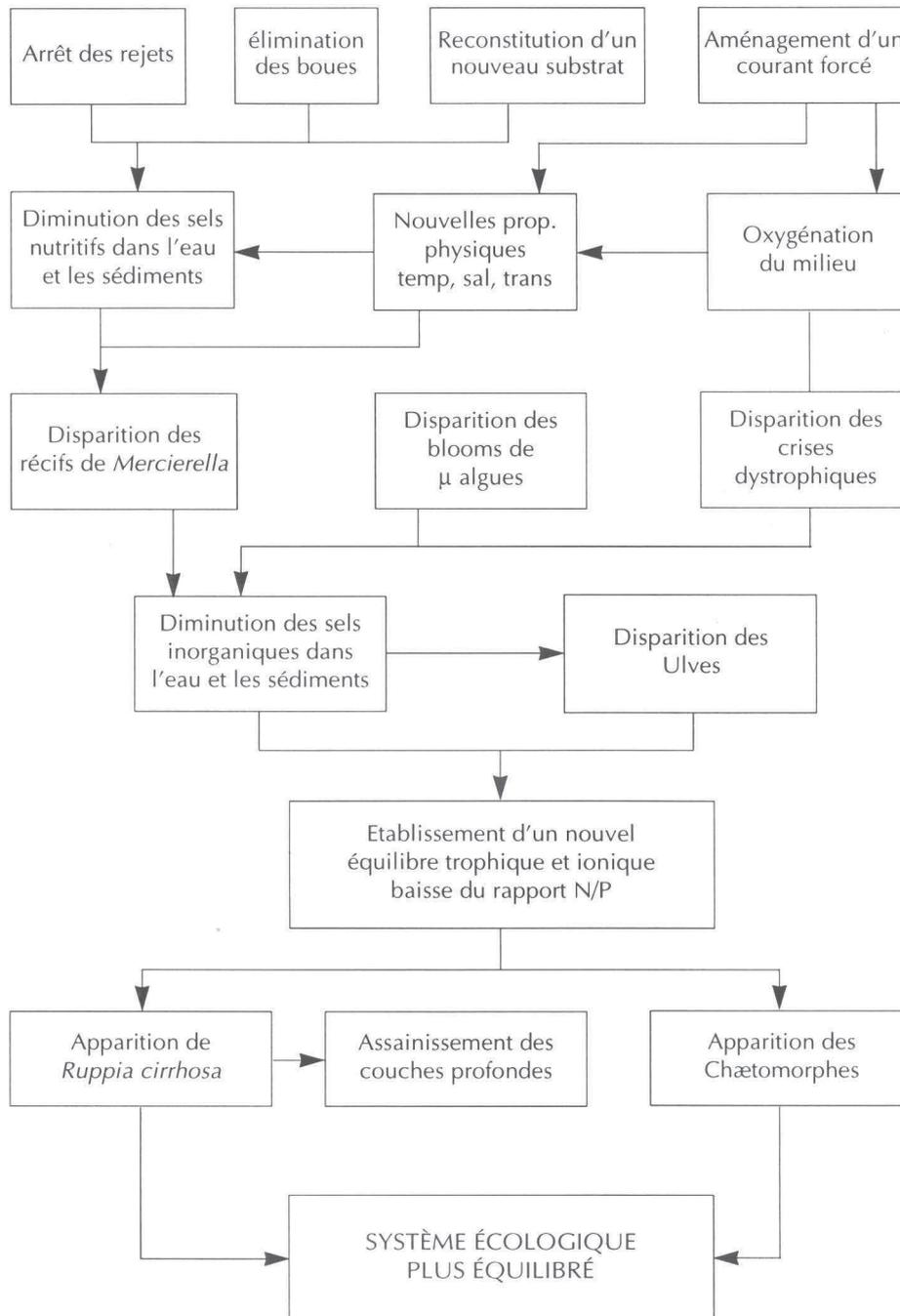


Figure 10 - Schéma des principaux changements apparus dans le lac de Tunis après son aménagement / Flow chart showing main changes recorded in the lake after restoration.

## CONCLUSION

Les mesures réalisées après les aménagements ont montré une baisse nette des sels nutritifs dans l'eau, dans les sédiments et dans la biomasse végétale. Les premiers signes de dépollution du lac sont apparus dès la fin des travaux par la régression des bioindicateurs des milieux très eutrophisés telles que la disparition des *Ulva rigida*, la diminution de la biomasse des Entéromorphes et des récifs

de *Ficopomatus enigmaticus* et, enfin, la disparition totale du phénomène des eaux rouges.

L'ancienne espèce végétale *Ulva rigida* a disparu à la suite d'un changement des propriétés trophiques et ioniques qui sont devenues assez proches de celles de la mer. Les conditions sont devenues favorables pour le développement des Chaetomorpes dans la partie sud et pour les *Ruppia cirrhosa* dans la partie nord, plus proche de la mer. Le développement de cet herbier a permis la

mobilisation, dans le cycle écologique, des réserves organiques contenues dans les sédiments profonds.

La lagune, connue autrefois parmi les milieux les plus eutrophisés du monde, a pu se régénérer en quelques années et la qualité des eaux s'est nettement améliorée sur les plans chimique, physique et biologique. Toutes les conditions sont, alors, réunies pour que le lac soit exploitable de diverses manières.

### REMERCIEMENTS

Je remercie M. Hans Oostinga, ingénieur à la Compagnie néerlandaise de dragage (Ham-Amsterdam), et Mme Jeanne Zaouali, professeur à l'Institut national agronomique de Tunis, pour leurs remarques judicieuses sur certains aspects de ce travail, ainsi que le Dr Leentfaar qui, avec cette dernière, a réalisée la détermination de la macrofaune et de la flore benthiques.

### BIBLIOGRAPHIE

- Arjen H., H. Oostinga, 1992 - North Lake of Tunis and its shores: restoration and development. *Terra e Aqua* : 23-32.
- Ben Charrada R., 1992 - Le lac de Tunis après les aménagements. Paramètres physico-chimiques de l'eau et relation avec la croissance des macroalgues. *Mar. Life*, 1 (1) : 29-44.
- Environmental Protection Agency (EPA), 1977 - Recherches sur l'eutrophisation du lac de Tunis. Géologie, Biologie, Chimie et Hydrologie. *Inst. nat. Scient. ocean. et de Pêche*, 2 : 64 pp.
- Jorgensen S.E., 1979 - Examination of a lake model. *Ecol. Modelling*, Amsterdam, Netherland, 4 : 253-278.

Mauro L., 1984 - Indagine sulla distribuzione delle Macrofite nella laguna di Orbetello. *Quad. Mus. Stor. Nat. Livorno*, 5 : 37-55.

Naguib M., Kelly M., 1984 - Eutrophication in coastal marine areas and lagoons. A case study of lac de Tunis. *Unesco reports in marine sciences*, 53 pp.

Shneider W., 1977 - Bilan des substances nutritives dans le lac. Institut Fresenius, G. m. b. H. Taunusstein , R.F.A : 777 pp.

The Lake Group, 1988 - Final Disign report, Restoration and development of the North Lake of Tunis and its shores, internal report, Netherland : 106 pp.

Zaouali J., 1974 - Les peuplements malacologiques dans les biocoenoses lagunaires tunisiennes. Étude de la biologie de l'espèce pionnière *Cerastoderma glaucum* Poirét. Thèse ès-sciences de l'Université de Caen, 345 pp.

Zaouali J., 1977 - Le lac de Tunis : facteurs climatiques, physico-chimiques et crise dystrophique. *Bull. Off. nat. Pêche, Tunisie*, 1 (2) : 193-205.

Reçu en décembre 1994 ; accepté en août 1996.  
Received December 1994; accepted August 1996.