

Analyse physico-chimique et biologique des eaux et du sédiment de la baie de Tunis

Physico-chemical and biological analysis of water and sediment in Tunis Bay

Rafik Ben Charrada*, Mahmoud Moussa**, Jeanne Zaouali***

*IHE, rue du Paradis, Immeuble Ramla, Bloc A, App. 4, 2080 Ariana, Tunisie

**ENIT, Laboratoire Hydraulique, B.P. 37, Le Belvédère, 1002-Tunis, Tunisie

***INAT Département Halieutique, Le Belvédère, 43 Av. Charles Nicolle, Tunis, Tunisie

Mots clés : baie de Tunis, pollution, qualité de l'eau, nutriments, phytoplancton.

Key-words: Tunis Bay, pollution, water quality, nutrients, phytoplankton.

RÉSUMÉ

Ben Charrada R., M. Moussa, J. Zaouali, 1997 - Analyse physico-chimique et biologique des eaux et du sédiment de la baie de Tunis. Mar. Life, 7 (1-2) : 53 - 66.

Après la déviation, en 1980 des eaux urbaines de Tunis, du lac Nord vers la baie, des signes d'eutrophisation sont apparus, aussi bien au niveau de la qualité des eaux que des sédiments. Notre étude de ce milieu, à l'échelle spatiale, montre que les zones les plus touchées par la pollution sont situées du côté le plus urbanisé où se trouve le complexe lagunaire. Cette pollution se traduit surtout par une faible transparence des eaux, des fortes teneurs en nutriments dans les eaux et dans les sédiments, la raréfaction des Posidonies et la prolifération d'algues nitrophiles. La zone orientale entre Korbous et Ras El Fartass, toutefois, reste peu touchée. Le suivi, pendant une année dans la zone côtière la plus polluée, des paramètres physico-chimiques des eaux, de la fréquence d'apparition de quelques espèces planctoniques et de la Chlorophylle-a, montre que le phosphore est un facteur limitant pour la croissance du phytoplancton et que l'azote apparaît comme un facteur secondaire pour son développement.

ABSTRACT

Ben Charrada, R., M. Moussa, J. Zaouali, 1997 - [Physico-chemical and biological analysis of water and sediment in Tunis Bay]. Mar. Life, 7 (1-2): 53 - 66.

After the deviation in 1980 of urban waste waters of Tunis, from the north lake to the Gulf of Tunis, both water and sediment quality indicate considerable eutrophication. Our study of the water quality in the bay shows that the coastal area, situated near the most urbanised zone and the lagoon complex, is the most polluted. This pollution is especially apparent from the poor transparency of waters, high values of nutrient concentrations in waters and in sediments, the scarcity of Posidonia and a proliferation of nitrophile algae. The eastern area between Korbous and Ras El Fartass is less affected by this pollution. During one year, we controlled the physico-chemical parameters of waters, the appearance frequency of some planktonic species and the Chlorophyll-a in the coastal zone. This shows clearly that the phytoplankton growth is restricted by Phosphorus and that Nitrogen seems to be a secondary factor for its development.

INTRODUCTION

Le golfe de Tunis (figure 1), situé à 200 km au sud-ouest de la Sicile entre les parallèles 36° 42' et 37° 10' et les méridiens 10° 11' et 11° 5', s'étend sur une surface d'environ 1 500 km² avec une côte s'étendant sur 160 km. La baie de Tunis, située au sud de l'isobathe 30 m, a une surface totale de 350 km². Au sud-ouest de cette baie, se trouve le

complexe lagunaire, lacs Nord et Sud de Tunis, qui sont séparés par un canal de navigation (figure 2). Les profondeurs maximales de l'eau sont de l'ordre de 100 m dans le golfe, de 30 m dans la baie, de 4 m dans le lac Nord et de 1 m dans le lac Sud. Après l'aménagement du lac Nord, en 1988, les eaux usées urbaines de la ville de Tunis ont été déviées vers la baie ; ce qui a généré une nouvelle source de pollution dans ce milieu.

La qualité des eaux de la baie a été suivie pour ses variations temporelles (1988-1989) dans trois stations côtières et, pour son hétérogénéité spatiale (août 1995), dans 18 stations qui couvrent la totalité de la baie. Une corrélation avec la fréquence d'apparition de 17 espèces de planctons a été également réalisée à l'échelle temporelle dans trois stations côtières proches du complexe lagunaire.

Dans ce travail, nous présentons les résultats de ces mesures afin :

- d'évaluer l'impact des rejets urbains sur la qualité des eaux et déterminer la sensibilité environnementale de ce milieu marin ;
- de décrire le cycle écologique du phytoplancton dans la zone côtière en relation avec les sels nutritifs dissous.



Figure 1 - Situation géographique du golfe et de la baie de Tunis. / Geographical situation of Gulf and Bay of Tunis.

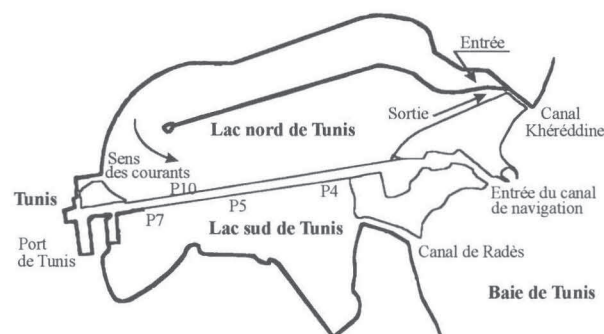


Figure 2 - Complexe lagunaire. / Lagoon Complex.

SOURCES DE POLLUTION

Sur les côtes est et sud de la baie, s'étendent la capitale Tunis et ses banlieues nord et sud avec une population totale d'environ deux millions d'habitants. Avant 1980, la plus grande partie des eaux usées domestiques de la ville de Tunis était déversée dans le lac Nord de Tunis, et ce n'est qu'après le grand programme d'assainissement de ce dernier que les eaux usées épurées de Tunis ont été déviées vers le golfe, dans les quatre points suivants (figure 3) :

- à Raoued, dans la partie nord-ouest de la baie, se trouve le canal Khelij qui draine les effluents des trois stations d'épuration de la ville de Tunis, Choutrana, côtière nord et Cherguia qui ont un débit total de l'ordre de $120\,000\text{ m}^3\cdot\text{jour}^{-1}$;
- à Radès dans la partie sud-ouest de la baie, l'oued Meliane déverse, en plus des eaux pluviales, les effluents de la station d'épuration sud Méliane qui a un débit de l'ordre de $8\,000\text{ m}^3\cdot\text{jour}^{-1}$;
- à Soliman (partie sud-est de la baie), l'oued El Bey draine les effluents de trois stations d'épuration ayant un débit total de l'ordre de $6\,400\text{ m}^3\cdot\text{jour}^{-1}$;
- enfin, dans le port de Tunis sont rejetées les eaux pluviales du grand Tunis.

Les autres sources de pollution sont d'origines lagunaire et industrielle. Nous citerons :

- le lac Nord de Tunis qui échange avec la baie, par le canal de Khereddine (figure 2), un débit journalier moyen de $950\,000\text{ m}^3\cdot\text{jour}^{-1}$;
- le lac Sud qui échange avec la baie, par le canal de Radès, un débit journalier moyen de l'ordre de $80\,000\text{ m}^3\cdot\text{jour}^{-1}$;
- le canal de navigation qui partage le lac de Tunis en deux parties et qui échange un débit journalier moyen de l'ordre de $1\,500\,000\text{ m}^3\cdot\text{jour}^{-1}$;
- la centrale thermique de Radès qui rejette un débit journalier d'eau de mer de $1\,300\,000\text{ m}^3\cdot\text{jour}^{-1}$ réchauffée à environ $+6^\circ\text{C}$ par rapport à la température initiale de l'eau.

La prise en compte des différents points de rejet d'eaux épurées ou brutes à partir des agglomérations côtières donne un volume total annuel d'environ 91 millions de m^3 rejetés dans le golfe de Tunis. Le bilan des décharges de l'ensemble de ces sources polluantes, évalué sur la base de la qualité des rejets, ainsi que celle des eaux du complexe lagunaire, donne un déversement total d'environ 2 400 tonnes d'azote et de 200 tonnes de phosphore (année 1994).

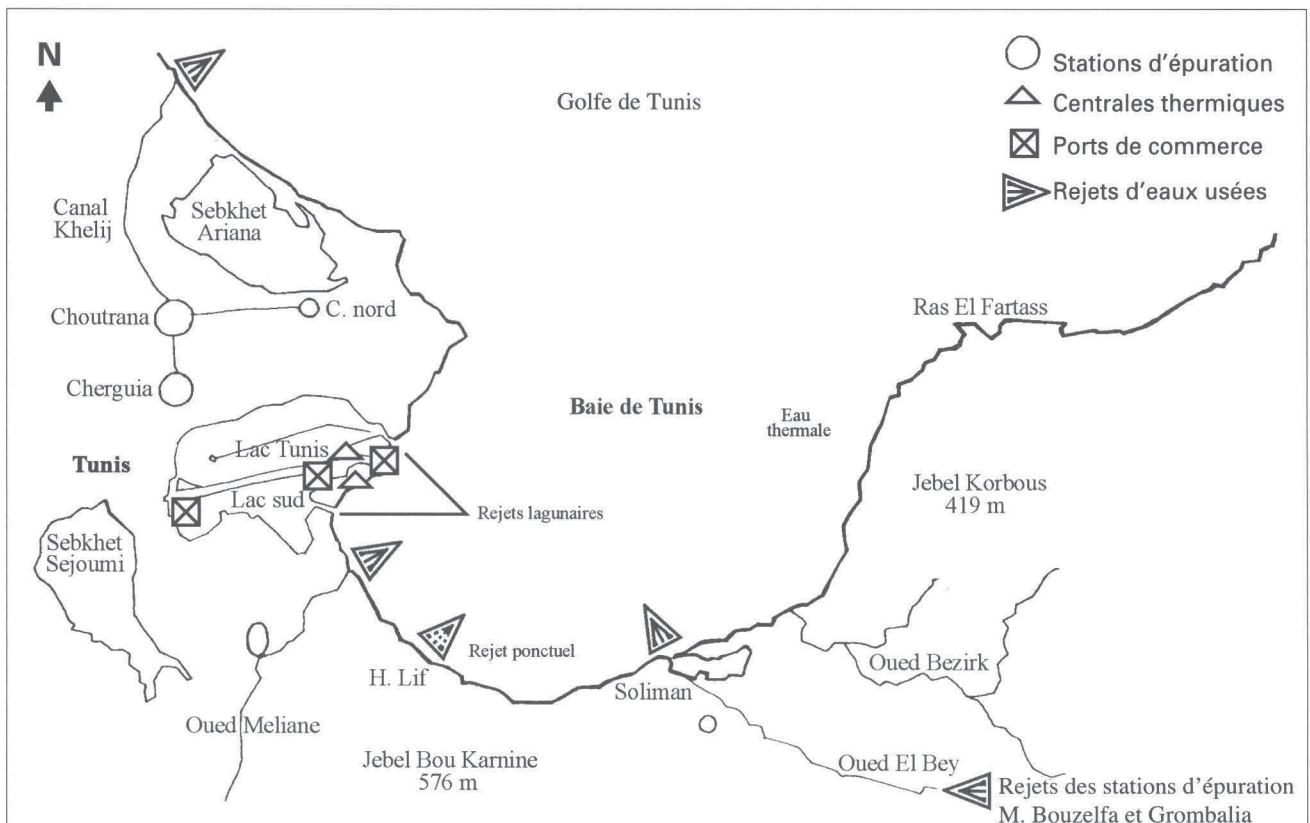


Figure 3 - Localisation des sources de pollutions dans la baie de Tunis. / Location of urban inflows into Tunis Bay.

PARAMÈTRES MESURÉS ET MÉTHODES UTILISÉES

À l'échelle temporelle, les paramètres physico-chimiques de l'eau (température, salinité, pH, azote inorganique et total, phosphore total et orthophosphate) et biologiques (Chlorophylle-a et plancton) ont été contrôlés avec un pas de temps de deux semaines. Les mesures réalisées à l'échelle spatiale ont concerné la qualité des eaux et des sédiments superficiels, ainsi que le benthos.

Les prélèvements d'eau ont été réalisés à l'aide d'un préleveur Rutner, et les échantillons ont été conservés dans des bouteilles plastiques acidifiées à une température inférieure à 4 °C. Les sédiments ont été prélevés par une benne de surface, et les échantillons ont été conservés dans des sacs plastiques à une température de -20°C. La faune et la flore benthiques ont été prélevées par dragage sur une longueur de 20 m à l'aide d'une drague Rally Batty. Les échantillons sont ensuite conservés dans une eau formolée. Le plancton est collecté par filtration de 30 litres d'eau par un filet à plancton ; il est ensuite conservé au formol 36 %.

L'oxygène dissous, la température, la salinité, le pH et la transparence de l'eau ont été mesurés directement sur le site. L'oxygène dissous a été mesuré avec un oxymètre type WTW OXI 196, la salinité et le pH avec des appareils WTW LF 191 et pH 196.

Les méthodes d'analyse d'eau de mer suivies sont les suivantes :

- azote nitrite : l'analyse est faite sur un échantillon d'eau de mer filtré par une méthode colorimétrique. Les ions nitrite (NO_2^-) contenus dans l'eau réagissent avec le sulfanilamide qui est couplé avec le N-1 Naphtylethylene-diamine pour donner un colorant rose qui est dosé par un colorimètre ;
- azote nitrate : l'analyse est faite sur un échantillon d'eau de mer filtré en deux étapes :
 - les ions nitrates sont réduits en ions nitrites à travers une colonne de cadmium,
 - les nitrites contenus dans l'échantillon, après réduction, sont déterminés par la méthode décrite ci-dessus. Le résultat donné correspond à la somme des nitrites et des nitrates dans l'échantillon ;
- azote total : l'analyse est faite sur un échantillon d'eau de mer non filtré en trois étapes :
 - digestion sous pression à 140°C avec des persulphates. Au cours de cette étape, l'azote organique et ammoniacal, est oxydé en nitrate,
 - réduction à travers une colonne de cadmium ; cette étape permet la réduction des nitrates formés, au cours de l'étape précédente, en nitrites,
 - détermination des nitrites par la méthode décrite ci-dessus. L'azote nitrite dosé au cours de cette étape correspond à l'azote total contenu dans l'échantillon de départ ;
- orthophosphate : l'analyse est faite sur un échantillon d'eau de mer filtré par une méthode photométrique utilisant comme réactif le molybdate d'ammonium. L'orthophosphate est dosé sous

forme d'un complexe bleu sur la base de quelques standards préalablement préparés ;

- phosphate total : digestion sous pression avec des persulphates à 100°C suivie d'une détermination des orthophosphates ;
- matière en suspension : filtration par un filtre GFC suivie d'un séchage à une température de 110°C pendant 24 heures ;
- chlorophylle-a : méthode fluorimétrique après extraction à l'acétone 90 %. Un litre d'eau est filtré juste après le prélèvement. L'extraction de la chlorophylle-a est faite dans l'acétone pendant une période de 12 heures, à l'obscurité. L'échantillon est ensuite clarifié dans une centrifugeuse et dosé par un fluorimètre préalablement calibré par un spectrophotomètre.

Pour l'analyse des sédiments, nous avons utilisé les méthodes suivantes :

- teneur en eau : l'échantillon est séché à l'étuve pendant une période de 24 heures, à une température de 105°C ;
- préparation des échantillons pour analyse des métaux lourds, l'azote total et le phosphore total : l'échantillon est séché à une température de l'ordre de 40°C jusqu'à obtention d'un poids constant des sédiments ;
- métaux lourds : attaque du sédiment par l'acide nitrique (10 ml HNO_3), l'acide fluorhydrique (10 ml HF), l'acide perchlorique (5 ml HClO_4) et l'acide borique (H_3BO_3). Les métaux sont ensuite dosés par spectrométrie d'émission (torche à plasma) ;
- azote total : méthode Kjeldahl utilisant comme catalyseur des comprimés Kjeldahl (produit Merk Art. 10958) ;
- phosphore total : dosage colorimétrique du phosphore après attaque par l'acide sulfurique et le persulphate de sodium.

RÉSULTATS DES MESURES

Mesures réalisées à l'échelle spatiale dans le petit golfe

Ces mesures ont été réalisées en août 1995 dans 18 stations uniformément réparties dans la baie de Tunis (figure 4). Elles ont concerné la physico-chimie des eaux, la qualité des sédiments et le benthos.

Physico-chimie des eaux

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux, telles que la température, la transparence, la salinité, le pH et les nutriments montrent une nette correspondance avec la morphologie de la baie et l'hydrodynamisme du milieu (figure 5). Ces paramètres se répartissent comme suit :

- Température : la température de l'eau varie entre 26,3 et 28,3°C avec une moyenne de 27,5°C. Sa répartition spatiale montre trois bandes parallèles aux côtes avec des maxima de température dans la frange littorale (figure 5). La variation verticale de la

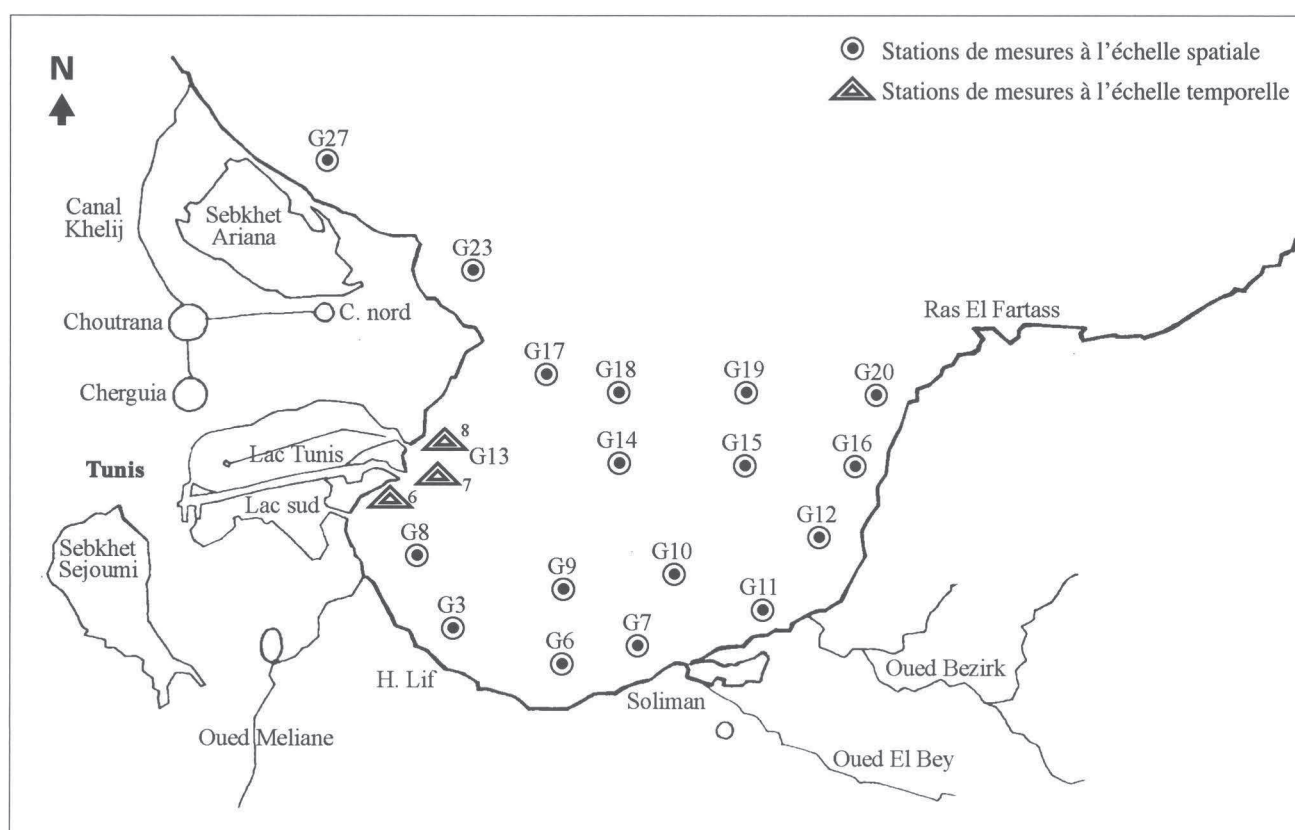


Figure 4 - Localisation des stations de mesures dans la baie de Tunis. / Location of the sampling stations in Tunis Bay.

température entre le fond et la surface est très faible; elle est de l'ordre $0,1^{\circ}\text{C}$ dans la zone littorale, de $0,3^{\circ}\text{C}$ dans la frange intermédiaire (profondeur inférieure à 20 m); elle atteint $1,1^{\circ}\text{C}$ au large où la profondeur est supérieure à 30 m.

- **Transparence** : à l'échelle spatiale, la transparence des eaux est plus forte vers le large que vers la côte (figure 5). Sur une bande littorale, commençant au débouché de la sebkha de l'Ariana jusqu'à Soliman, l'eau est légèrement verte et le disque de Secchi disparaît entre 2 et 4 m. Au-delà de cette zone littorale, la visibilité s'améliore jusqu'à 5 à 7 m au milieu de la baie, et atteint 12 m au large.

- **Salinité** : la salinité moyenne des eaux du petit golfe est de l'ordre de 37 PSU avec un maxima de 37,7 PSU à proximité du canal de Khereddine. Du côté ouest de la baie, la salinité des eaux est légèrement supérieure à celle du côté est, à cause de l'influence du lac Nord où la salinité moyenne, mesurée pendant la même période, est de l'ordre de 40 PSU.

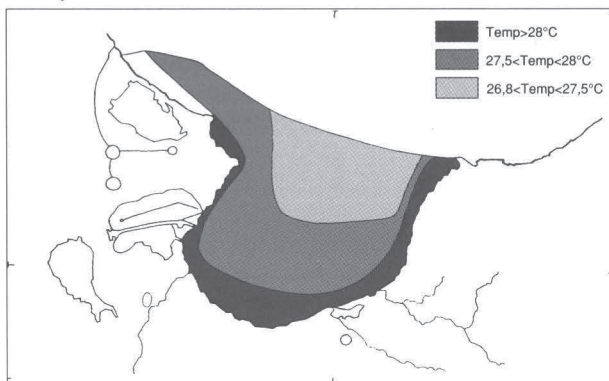
- **pH et oxygène dissous** : ces deux paramètres qui sont essentiellement liés aux activités photosynthétiques du milieu montrent des valeurs relativement stables avec une déviation standard faible. La valeur moyenne du pH dans le golfe est de 8,25 à la surface et de 8,26 au fond. La répartition spatiale du pH montre l'existence d'une bande littorale où la valeur du pH excède 8,3. Au delà de cette zone, le pH chute à des valeurs inférieures à 8,3, tout en res-

tant supérieur à 8,12. Les taux d'oxygénation montrent que les eaux sont bien oxygénées. La concentration de l'oxygène dissous, qui varie entre 94 et 105 % de la saturation, ne présente pas de différence appréciable entre la surface et le fond.

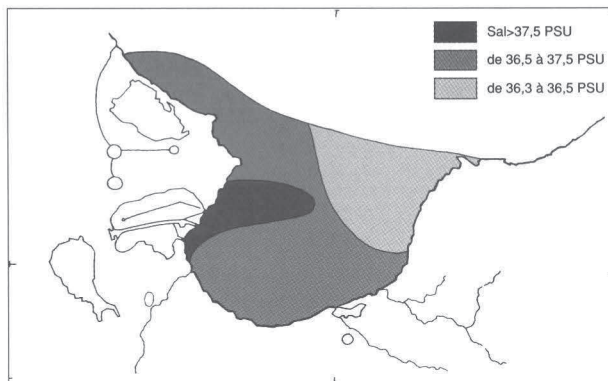
- **Matière en suspension** : la matière en suspension, mesurée pour les eaux du fond de la baie de Tunis, varie entre $19,6 \text{ mg.l}^{-1}$ à la station G12 et $37,1 \text{ mg.l}^{-1}$ à la station G8. Sa répartition spatiale se présente sous forme de bandes parallèles aux côtes. Sur une frange littorale, la matière en suspension est inférieure à 25 mg.l^{-1} , puis elle atteint des valeurs supérieures à 30 mg.l^{-1} sur une bande médiane. Du côté du large, la matière en suspension diminue progressivement avec des valeurs inférieures à 20 mg.l^{-1} .

- **Nutriments** : les nutriments analysés sont le phosphore total, l'orthophosphate, l'azote total et l'azote inorganique (NO_2 , NO_3 et NH_3). La répartition spatiale de l'azote est comparable à celle des paramètres physiques (figure 5). Au niveau du débouché du complexe lagunaire, on trouve une zone à très fortes teneurs en azote total ($> 500 \mu\text{g.l}^{-1}$) qui sont comparables à celles trouvées dans la partie sud du lac Nord de Tunis. Ces fortes concentrations d'azote sont dues en grande partie aux importants apports d'eaux usées urbaines par le biais de l'oued Meliane et d'eaux lagunaires par les canaux de navigation et de Khereddine. Entre cette zone de forte concentration et le large, la teneur en azote total diminue progressivement jusqu'à des valeurs de

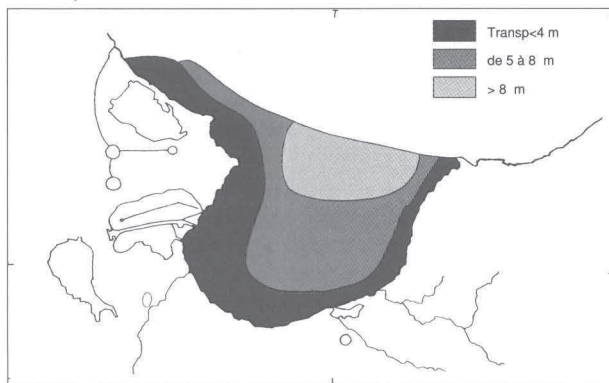
Température



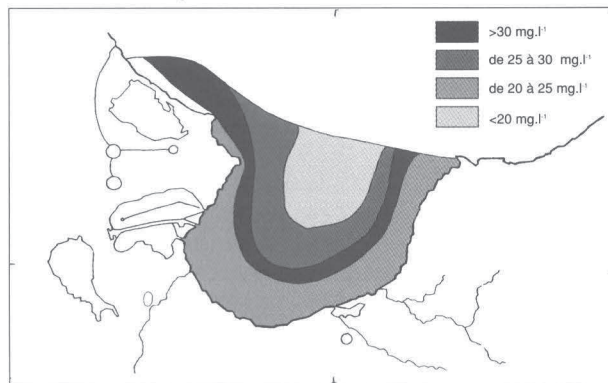
Salinité



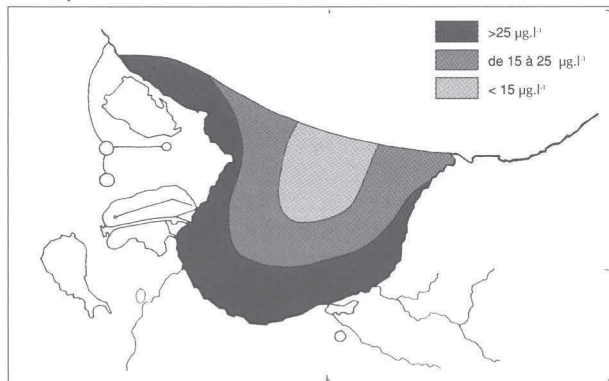
Transparence



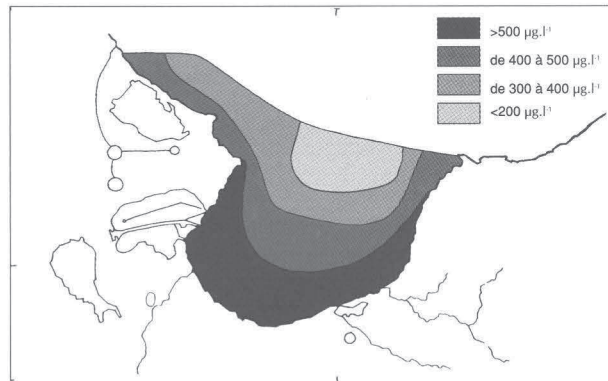
Matière en suspension



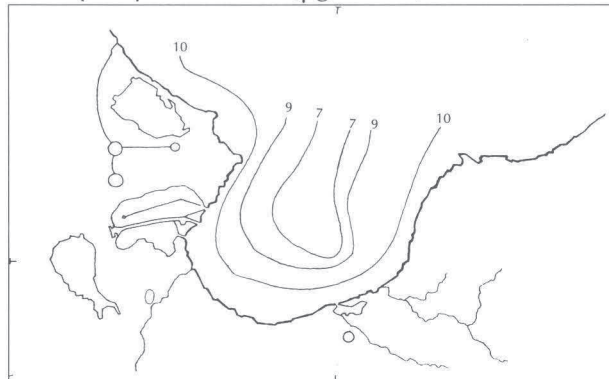
Phosphore total en P



Azote total en N



Orthophosphates - PO_4^{3-} ($\mu\text{g.l}^{-1}$ en P)



Nitrates- NO_3^- ($\mu\text{g.l}^{-1}$ en N)

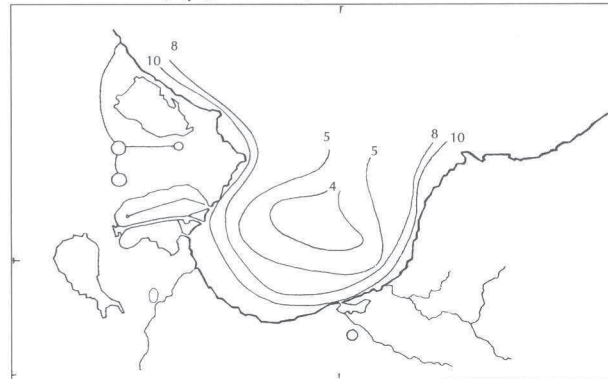


Figure 5 - Répartition spatiale de la température, de la salinité, de la transparence des matières en suspension et des nutriments dans l'eau (août 1995). / Distribution patterns of the temperature, salinity, transparency, suspended matter and nutrients in water (August 1995).

l'ordre de 250 $\mu\text{g.l}^{-1}$. La répartition spatiale des teneurs en phosphore total (figure 5) est comparable à celle de l'azote total. Néanmoins, on remarque l'existence d'une zone littorale, de forte concentration de phosphore, qui s'étend jusqu'aux régions côtières de Raoued où se déversent les eaux urbaines du canal Khélij et celles de la sebkha Ariana. Ceci montre l'effet des rejets des banlieues Nord sur la qualité des eaux de la zone côtière sud-ouest de la baie de Tunis. Au milieu de la baie, on remarque l'existence d'une auréole où la teneur en nitrate et en orthophosphate est très faible (3 à 4 $\mu\text{g.l}^{-1}$ et 6 à 7 $\mu\text{g.l}^{-1}$). En allant vers les côtes, la concentration des sels inorganiques augmente et atteint des valeurs maximales de l'ordre de 22 $\mu\text{g.l}^{-1}$ pour N et de 14 $\mu\text{g.l}^{-1}$ pour P à la station G6. Cette répartition peut être due, d'une part, à la structure des courants et, d'autre part, aux différentes sources, telles que les apports urbains et la libération à partir des sédiments benthiques.

Analyse des sédiments

Les éléments analysés pour les sédiments de surface sont la teneur en eau, le potentiel d'oxydo-réduction, les nutriments organiques (azote et phosphore total) et les métaux lourds tels que Ba, Cd, Pb, Ni, Al, Cu, Fe, Mn et Zn.

Les résultats des analyses du potentiel d'oxydo-réduction et des nutriments montrent des teneurs de matières organiques relativement importantes. La répartition spatiale de ces paramètres présente un étalement entre les différentes zones côtières et le large. Dans la zone littorale située à proximité du débouché du complexe lagunaire, les sédiments sont fortement réducteurs (potentiel d'oxydo-réduction < -220 mV) et la teneur en eau est relativement élevée (> 50 %), ce qui indique la présence d'un sédiment relativement chargé en matière organique. Les teneurs en nutriments, dans cette zone, sont importantes (> 1000 mg/Kg poids sec pour N et > 500 mg/Kg poids sec pour P), ce qui montre l'impact des apports urbains de la côte Nord et de l'oued Méliane, ainsi que des apports d'eaux lagunaires très chargées en nutriments et en matières en suspension (Ben Charrada, 1995). En s'éloignant de la côte, les teneurs en nutriments, qui diminuent légèrement au milieu de la baie et augmentent légèrement au large dans la zone la plus profonde située en face de Korbous et Ras El Fartass, marquent

l'impact des rejets côtiers sur les sédiments de la zone profonde du large par les transports solides côtiers.

Les résultats d'analyse des métaux lourds dans la couche superficielle des sédiments ne montrent pas de contaminations remarquables dues à une pollution industrielle extérieure. Le tableau I présente les moyennes, ainsi que les maxima et les minima des concentrations en métaux lourds dans la couche superficielle des sédiments de la baie de Tunis.

La répartition spatiale des éléments métalliques dans les sédiments superficiels (figure 6) montre une légère différence avec celle des nutriments organiques. On constate que cette répartition est due, d'une part, à la courantologie imposée par la morphologie de la baie et aux conditions météorologiques et, d'autre part, à la nature organique et granulométrique des sédiments. Du point de vue hydrodynamique, nous remarquons que les zones côtières, où s'effectuent des transports solides par les courants côtiers, sont caractérisées par des isoteneurs des métaux. Au milieu de la baie, apparaît une auréole de concentrations relativement élevées qui peut être due à une sédimentation de particules solides relativement chargées en métaux par suite d'un courant local. En effet, l'étude hydrodynamique par modèle 2D (Ben Charrada, 1997) relative à un vent sud-est montre un courant giratoire dans cette zone avec des vitesses relativement atténuées, ce qui donnerait des conditions favorables à une sédimentation locale (figure 7). Du côté nord-est de la baie, apparaît une deuxième auréole qui serait peut être due à la nature fine des sédiments de cette zone où les conditions de fixation des métaux sont plus importantes que sur la côte.

D'une manière générale, on remarque que les teneurs en métaux sont inférieures aux seuils de pollution, excluant tout signe de contamination extérieure importante.

Les valeurs très faibles du potentiel d'oxydo-réduction et les teneurs élevées de nutriments indiquent une forte eutrophisation ayant essentiellement pour origine les rejets urbains et les échanges avec le complexe lagunaire qui est fortement eutrophisé.

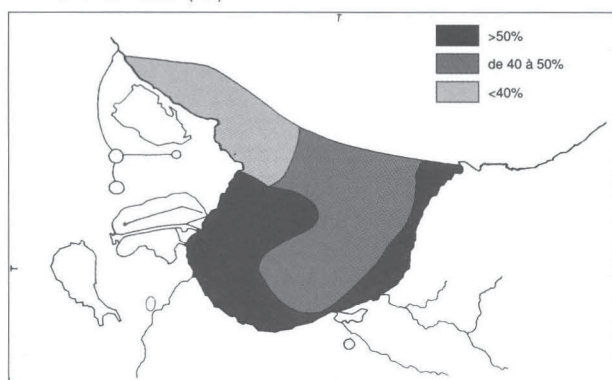
Analyse du benthos

Six espèces végétales ont été récoltées lors de la campagne d'exploration réalisée en août 1995 dans la baie. L'espèce la plus répandue est *Cymodo-*

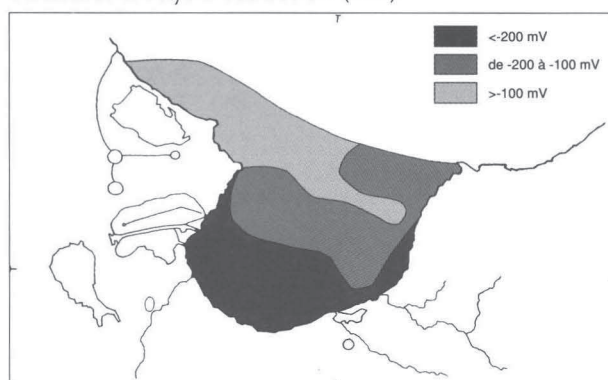
Tableau I - Les métaux lourds dans la couche superficielle des sédiments. / Heavy metals in the surface layer of sediment.

	t eau %	TN ppm	TP ppm	Zn ppm	Pb ppm	Cd ppm	Ni ppm	Ba ppm	Mn ppm	Fe %	Cr ppm	Mg ppm	Al %	Cu ppm	Si %
Moy.	48	724	533	86	87	<7	20	1067	249	2.39	45	8669	3.22	28	21
Max.	59	1201	782	144	187	<7	31	1936	337	3.44	92	12950	5.96	31	40
Min.	35	204	200	16	21	<7	8	767	132	0.63	18	3570	0.83	23	13

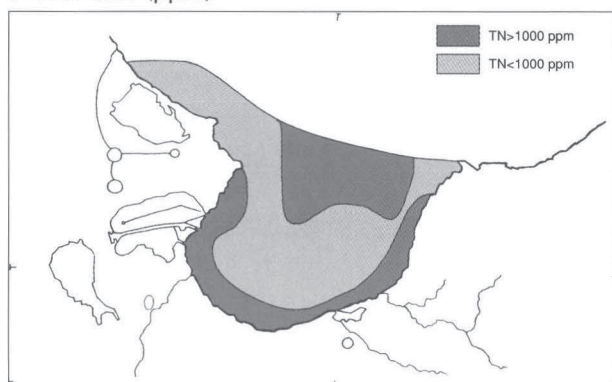
Teneur en eau (%)



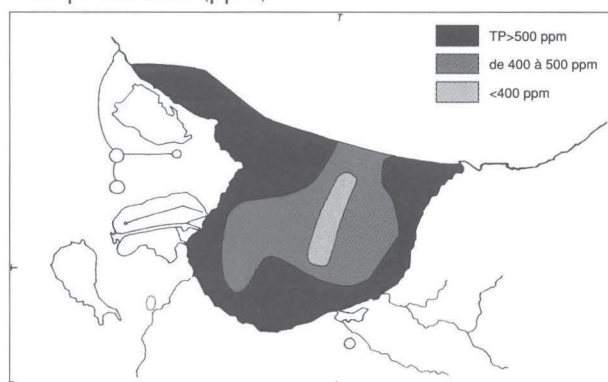
Potentiel d'oxydo-réduction (mV)



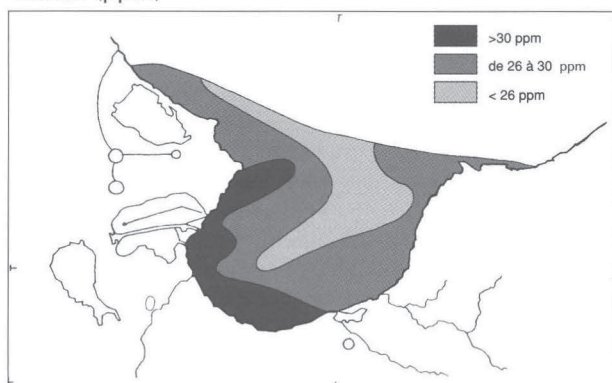
Azote total (ppm)



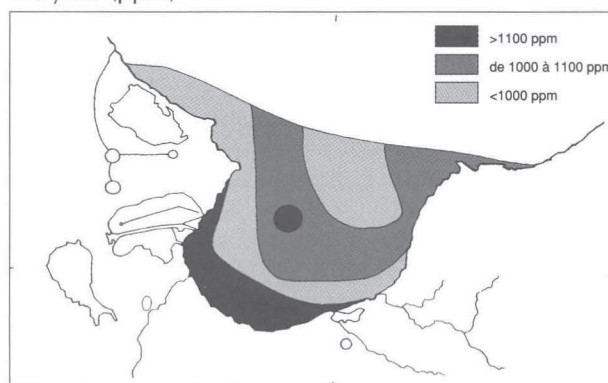
Phosphore total (ppm)



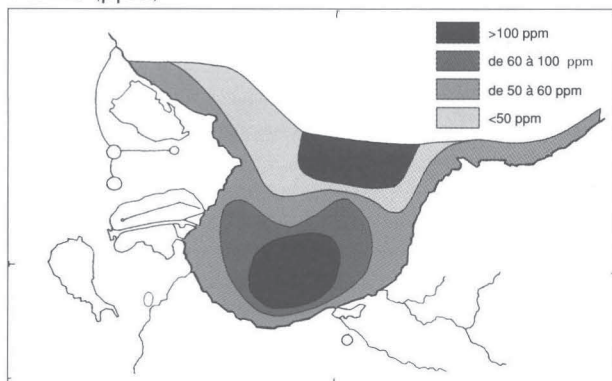
Cuivre (ppm)



Baryum (ppm)



Plomb (ppm)



Nickel (ppm)

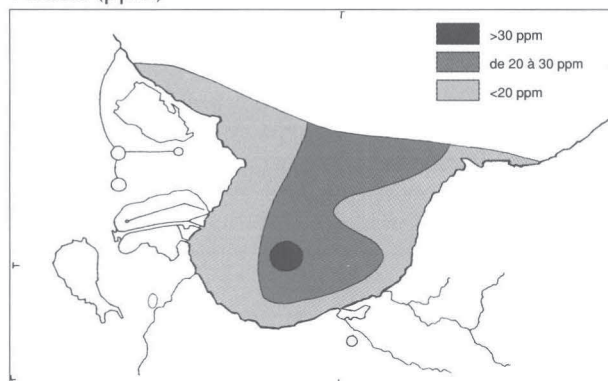


Figure 6 - Répartition spatiale de la teneur en eau, du potentiel d'oxydo-réduction, de l'azote total, du phosphore total, du cuivre, du baryum, du plomb et du nickel dans les sédiments superficiels de la baie de Tunis. / Distribution patterns of the water content, redox potential, total nitrogen, total phosphorus, copper, barium, lead and nickel in the surface sediment of Tunis Bay.

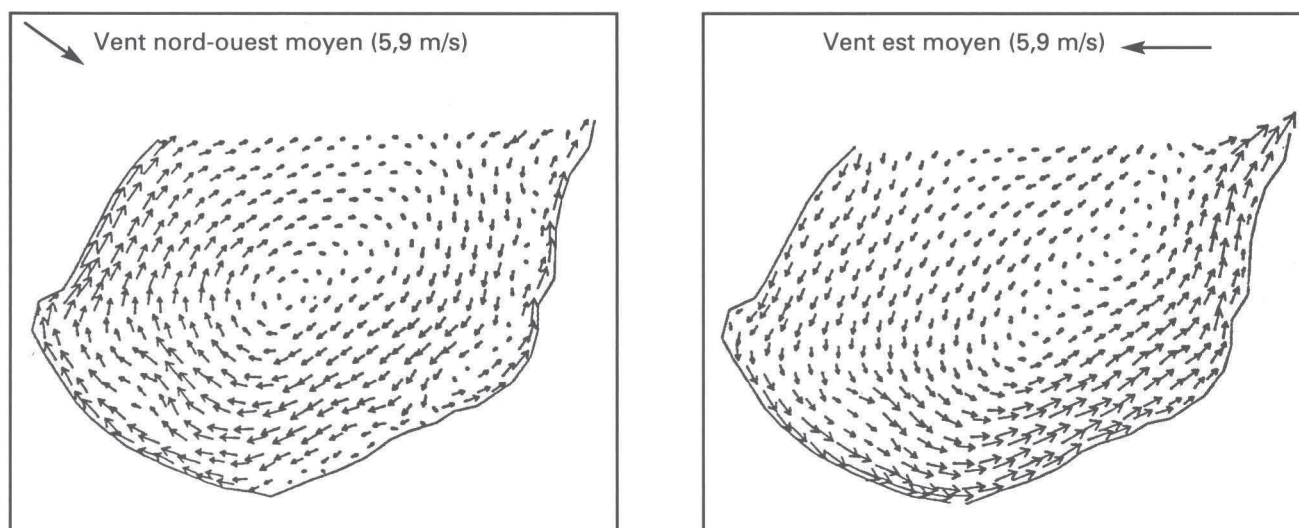


Figure 7 - Schéma de la circulation dans la baie, en fonction du vent, donné par une modélisation hydrodynamique 2D (Ben Charrada, 1997). / Water circulation in the bay, according to wind, on the basis of a 2D hydrodynamic model (Ben Charrada, 1997).

cea nodosa qui est présente en épave, à l'état fané, dans toutes les stations. Les autres espèces récoltées sont respectivement *Posidonia oceanica*, *Halimeda tuna*, *Udotea petiolata*, *Ulva rigida* et *Chaetomorpha linum* (ces deux dernières en épaves).

Posidonia oceanica a été trouvée seulement dans la zone nord-est du petit golfe (en face de Ras El Fartass) qui est la zone la moins touchée par la pollution, alors que la petite phanérogame *Cymodocea nodosa* est présente dans la totalité de la baie. Elle a parfois une taille assez importante ; ce qui témoigne, comme l'ont montré les analyses physico-chimiques, de la présence de fortes teneurs en nutriments. L'observation de cette phanérogame, à l'état fané, dans les zones relativement profondes où le taux de pénétration de la lumière est réduit, et sous forme d'importantes quantités de rhizomes sur les plages, montre l'instabilité de cette végétation vis-à-vis des courants. En effet, les Cymodocées qui sont résistantes à la pollution organique peuvent proliférer sur des fonds instables riches en nutriments. La présence des algues *Halimeda tuna* et *Udotea petiolata* à proximité du cap Carthage témoigne de la présence d'un substrat relativement compact sous luminosité atténuée.

L'impact du complexe lagunaire a été observé par la présence des deux macro-algues fortement nitrophiles *Chaetomorpha linum* et *Ulva rigida* qui sont apportées par les courants sortant des deux lagunes Nord et Sud de Tunis.

Au niveau faunistique, les prélèvements ont montré que la biodiversité est faible. Au total, nous avons récolté 17 espèces réparties comme suit :

- *Azorinus chamasolen* : bivalve très fréquent à la station G7 et mort aux stations G8, G10 et G11 ;
- *Tellina albicans* : ce bivalve non mentionné par d'autres études est trouvé seulement à la station G7 ;
- *Nereis* sp : ce ver est trouvé en petite quantité dans

les stations G7, G19 et G25. Sa présence coïncide avec les sédiments limoneux ayant une forte liquidité (polychète) ;

- *Cardium paucicostatum* : espèce trouvée vivante dans quatre stations (G3, G10, G12 et G15) et morte dans deux stations ;
- *Schizaster canaliferus* : fréquente seulement aux deux stations G18 et G20 (oursin) ;
- *Paguriste oculata* : crustacé trouvé dans quatre stations (G3, G10, G15 et G23) ;
- *Euclymene lumbricoides* : polychète très fréquent à la station G20 ;
- *Astropecten spinulosus* : présente dans une seule station G13 (échinoderme) ;
- *Asterina gibbosa* : présente seulement dans la station G13 (échinoderme) ;
- *Cliopsis khroni* : présente seulement dans la station G13 (gastéropode) ;
- *Macropipus barbarus* : présente seulement dans la station G12 (crustacé) ;
- *Bursatella leachi* : présente aux stations G10 et G12 (gastéropode) ;
- *Arca diluvii* : présente seulement à la station G17 (bivalve) ;
- *Polycarpa pomaria* : présente aux deux stations G9 et G17 (ascidie) ;
- *Aphrodite aculata* : présente à la station G16 (polychète) ;
- *Distoma hupferi* : présente à la station G23 ;
- *Crambe* sp : éponge encroûtante présente seulement à la station G17.

Cette faible diversité observée indique une déstabilisation au niveau benthique qui peut être due à l'eutrophisation qui a été déjà mise en évidence par les fortes teneurs en nutriments dans les sédiments, ainsi que par la présence des algues nitrophiles. La baisse de la biodiversité ne serait pas, comme l'ont montré les analyses des métaux lourds,

le fait d'une pollution métallique, et l'eutrophisation est donc à l'origine de la déstabilisation écologique de la baie de Tunis.

Une analyse des correspondances plurifactorielles réalisée sur les espèces vivantes de ces prélèvements faunistiques benthiques dans la baie a montré une répartition comparable à celle des organo-éléments présentée au paragraphe précédent. La répartition de ces espèces à l'échelle spatiale a montré, compte tenu de la qualité des sédiments, l'existence des trois zones suivantes :

- zone riche en nutriments : située au débouché du complexe lagunaire, elle représente la zone la plus touchée par la pollution provenant essentiellement du complexe lagunaire, des zones urbaines et de l'oued Meliane ;
- zone relativement saine : située du côté nord-est de la baie en face de la côte Korbous-Ras El Fartass, elle représente la zone la moins touchée par la pollution urbaine ;
- zone homogène : cette zone qui représente le reste de la baie comporte les stations éloignées des côtes qui ne sont pas comprises dans les deux zones précédentes. Elle présente une faune intermédiaire entre la zone côtière relativement polluée et la zone saine de Korbous.

Mesures réalisées dans la zone côtière proche du complexe lagunaire à l'échelle temporelle

Physico-chimie des eaux

Les paramètres phyco-chimiques relevés à l'échelle temporelle (entre août 1988 et août 1989) sont la température, la salinité et les sels nutritifs (azote et phosphore). Ils ont été mesurés dans les trois stations côtières représentées sur la figure 4 et les résultats sont présentés sur la figure 8.

- Température : les mesures montrent une variation saisonnière de la température de l'eau. La moyenne annuelle de la température des eaux est de l'ordre de 18,9°C avec un minimum de 13,8°C en janvier-février (11,7°C pour le lac Nord) et un maximum de 26,1°C en été (27,6°C pour lac Nord). En hiver, la température de l'eau est supérieure à celle de l'air ambiant (9 à 10°C), alors qu'en été la température de l'eau est inférieure à

celle de l'air ambiant (32 à 38°C, d'après les données météorologiques), ce qui montre l'effet régulateur de la mer sur la température des zones côtières.

- Salinité : la moyenne annuelle de la salinité des eaux de la baie est de l'ordre de 36,9 PSU avec un maximum de 37,4 PSU en août et un minimum de 36,5 PSU en février. Les moyennes mensuelles de la salinité des eaux montrent, qu'à l'échelle annuelle, les écarts sont relativement faibles par rapport à ceux du lac Nord de Tunis (Ben Charrada, 1995). En hiver, la salinité des eaux de la baie est légèrement influencée par la pluviométrie (36,5 PSU en février) ; par contre, en été, elle atteint 37,4 PSU à cause des fortes évaporations et de l'influence lagunaire.
- Les sels nutritifs mesurés sont les formes inorganiques de l'azote et du phosphore. Les concentrations de l'azote nitrite (N-NO_2) et de l'azote ammoniacal (N-NH_3) sont très faibles et sont généralement inférieures à la précision des instruments de mesure, alors que les formes d'azote nitrates (N-NO_3) sont relativement plus élevées et atteignent parfois 30 $\mu\text{g.l}^{-1}$. Ceci s'explique par le fait que la forme nitrite est très instable dans l'eau de mer ; en milieu alcalin ($\text{pH} > 8$) saturé en oxygène (le cas de la zone d'étude), les nitrites sont rapidement oxydés en nitrates. L'azote ammoniacal provient des micro-organismes et de la minéralisation de la matière organique contenue dans l'eau. En milieu marin, il est rapidement épuisé par les processus de nitrification, en présence de l'oxygène dissous, et par assimilation par le phytoplancton.

En ce qui concerne les concentrations totales de ces éléments, l'analyse pendant une période de cinq années (1988 à 1993 - périodicité bimensuelle) montre des écarts entre les périodes estivales et hivernales. En hiver, ces concentrations sont d'environ 10 $\mu\text{g.l}^{-1}$ pour P et 100 $\mu\text{g.l}^{-1}$ pour N, alors qu'en été, elles augmentent à 40 $\mu\text{g.l}^{-1}$ et 400 $\mu\text{g.l}^{-1}$, ce qui montre la présence d'une production organique supérieure à celle d'une eau méditerranéenne "normale". La variation de la moyenne annuelle de ces deux paramètres, dans les trois stations de la baie de Tunis et pendant les cinq années, est présentée dans le tableau II.

Tableau II - Moyennes annuelles des concentrations des nutriments dans la baie de Tunis. / Annual averages of Nutrient concentrations in Tunis Bay.

	88-89	89-90	90-91	91-92	92-93
Azote total $\mu\text{g.l}^{-1}$	313,6	237,6	303,9	313,3	336,7
Phosphore total $\mu\text{g.l}^{-1}$	22,9	18,5	18,3	21,2	17,4
Rapport N/P atomique	30,3	28,4	36,7	32,7	42,8

Les résultats montrent une légère augmentation de la concentration de l'azote en 1993 qui est, probablement, due à l'impact des rejets terrestres qui ont augmenté pendant cette période. Cette augmentation est due, en fait, à une baisse du taux de réutilisation dans l'agriculture des eaux épurées des stations d'épuration côtières.

Chlorophylle-a

La moyenne annuelle de la Chlorophylle-a mesurée pour dans la zone côtière est de l'ordre de $1,17 \mu\text{g.l}^{-1}$. Elle est supérieure à la moyenne enregistrée pour la baie de Tunis durant la campagne d'août 1995 ($0,52 \mu\text{g.l}^{-1}$), ce qui montre une production primaire dans cette zone côtière légèrement supérieure à celle du reste de la baie.

La variation annuelle de la concentration de la Chlorophylle-a, qui présente un pic de mars à mai ($> 1,5 \mu\text{g.l}^{-1}$), montre une prolifération printanière du phytoplancton. Au cours de cette période, le phosphore minéral (P-PO_4) est épuisé et l'azote minéral (N-NO_3) est maintenu à un niveau très faible. Ceci indique, d'une part, une limitation de la croissance du phytoplancton en fonction de la disponibilité des sels nutritifs dissous et, d'autre part, qu'il y a une carence plus marquée du phosphore que pour l'azote.

Pendant le reste de l'année (été-hiver), la concentration de la Chlorophylle-a oscille autour de la valeur moyenne. Néanmoins, on remarque qu'en octobre et en novembre, il y a une légère remontée de la concentration de la Chlorophylle-a ; ce qui marque une deuxième floraison planctonique en période automnale de quelques espèces de phytoplanctons (figure 8).

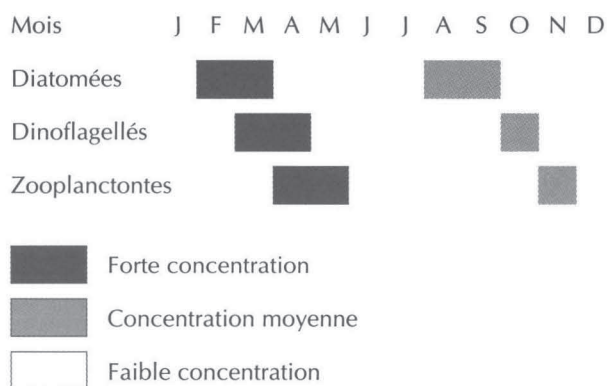
Plancton

Quelques espèces planctoniques ont été suivies durant la période de mesure pour rechercher une éventuelle corrélation avec les mesures de la Chlorophylle-a et des nutriments. Ces espèces, sélectionnées sur la base d'observations préliminaires sur le plancton des eaux côtières de la baie de Tunis, ont fait l'objet d'un suivi à l'échelle temporelle dans les trois stations côtières de la baie pendant la période des mesures physico-chimiques.

Ces "espèces" comportent des dinoflagellés, un flagellé et des diatomées (tableau III). Au niveau du zooplancton, l'étude a concerné les crustacés (Copépodes + Nauplii) ainsi que des larves de quatre groupes du macro-benthos (Bivalves, Gastéropodes, Ascidies et Vers). Soit, au total, 17 catégories contrôlées d'une manière périodique durant une période de 20 mois.

Un total de 35 prélèvements de plancton a été réalisé dans les trois stations côtières avec un pas de temps de deux semaines. L'étude a concerné uniquement la fréquence d'apparition de chacune des espèces sélectionnées. Les 34 prélèvements réalisés dans les trois stations côtières ont permis de tracer le schéma de croissance saisonnière suivant :

Tableau III - Schéma de croissance du plancton étudié dans la zone côtière du petit golfe de Tunis. / *Schema of plankton growth in the coastal area of small Tunis Bay.*



Cette analyse planctonique montre qu'il y a une étroite corrélation entre les observations microscopiques, les mesures physico-chimiques et la Chlorophylle-a. On remarque que les diatomées et les dinoflagellés ont des cycles de croissance différents et qu'il y a une relation entre les deux modes de développement. Les diatomées présentent, comme la Chlorophylle-a, deux pics pendant l'année : le premier (le plus important) apparaît pendant les mois de mars et d'avril et le second apparaît en septembre. Chacun de ces deux pics de diatomées est suivi par une légère augmentation du nombre des dinoflagellés et des larves de crustacés. La corrélation de ces observations avec les mesures de la Chlorophylle-a montre que la concentration maximale ($2 \mu\text{g.l}^{-1}$), atteinte au printemps, est due, en grande partie, aux diatomées qui prolifèrent avant les dinoflagellés. Le cycle de la Chlorophylle-a, qui présente aussi deux pics annuels coïncidant avec ceux des diatomées, semble suivre celui des *Chaetoceros*. Vers la fin de la période de croissance de ces diatomées, il y a une augmentation du nombre des dinoflagellés qui maintiennent le niveau de la Chlorophylle-a à un niveau moyen ($< 0,5 \mu\text{g.l}^{-1}$).

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les mesures de la physico-chimie des eaux, qui ont été réalisées à l'échelle spatiale, montrent, d'une manière générale, une dégradation de la qualité des eaux en allant du large vers les côtes. Les valeurs relevées du pH et de l'oxygène dissous indiquent un équilibre ionique et un niveau d'oxygénation qui sont encore stables, alors que les valeurs relativement élevées des nutriments (azote et phosphore) marquent l'influence nette des rejets urbains et des échanges avec le complexe lagunaire. Les valeurs des formes inorganiques de nutriments tels que l'orthophosphate (0 à $14 \mu\text{g.l}^{-1}$) et l'azote minéral (7 à $35 \mu\text{g.l}^{-1}$) sont relativement élevées par rapport aux eaux du large de la couche superficielle du canal

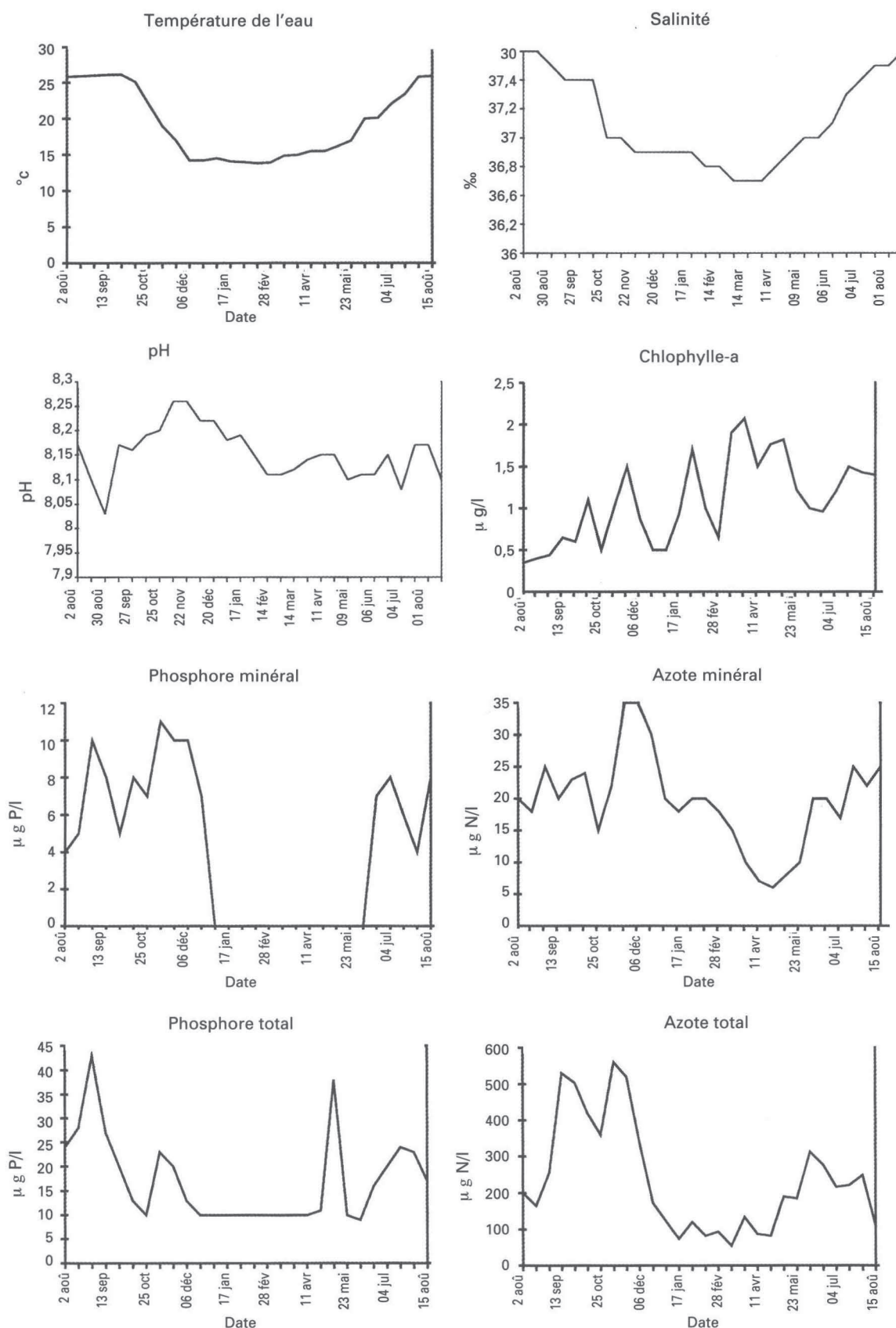


Figure 8 - Variation temporelle de la température, de la salinité et des nutriments dans la zone côtière de la baie (août 1988 jusqu'à août 1989). / Temporal variation of temperature, salinity and Nutrients in the coastal zone of Tunis (August 1988 to August 1989).

siculo-tunisien où les teneurs sont inférieures à 3,1 $\mu\text{g.l}^{-1}$ pour P et à 14 $\mu\text{g.l}^{-1}$ pour N (Coste, 1970). Par ailleurs, les teneurs en orthophosphate dans la baie de Tunis sont, d'une part, comparables à celles des eaux côtières du golfe du Lion où Coste et Minas (1967) mentionnent des valeurs comprises entre 1,55 et 8,68 $\mu\text{g.l}^{-1}$ et sont, d'autre part, de loin inférieures à quelques valeurs données pour d'autres milieux pollués tels que le golfe de Gabès qui est sous la pression des rejets industriels de phosphogypse (Darmoul *et al.*, 1980).

Les valeurs de salinité mesurées dans la baie de Tunis, comprises entre 36,5 et 37,7 PSU, sont légèrement supérieures à celles mentionnées par Belkhir, Haj Ali (1983) de 34 à 36 PSU. Elles sont comparables aux salinités données par Aubert (1980) dans la zone de Méditerranée occidentale située au nord de la Tunisie et celles données par Coste (1970) dans la couche superficielle du canal siculo-tunisien. Ceci témoigne donc de la présence d'une eau d'origine atlantique dans le golfe de Tunis plutôt qu'une eau de la Méditerranée orientale où la salinité est légèrement supérieure à 38 PSU (Coste 1970 ; Ben Othmen, 1973). Les valeurs relativement élevées de 37,7 PSU, enregistrées en été dans la zone côtière de la baie, semblent, quant à elles, le résultat des sorties d'eau du lac Nord où la salinité, mesurée pendant la même période, est de l'ordre 42 PSU (Ben Charrada, 1995).

Les répartitions spatiales de la transparence et de la matière en suspension sont en étroite relation avec l'hydrodynamisme du milieu. Les matières en suspension et les nutriments provenant de la zone nord-est du golfe, où se déverse le collecteur des eaux épurées de Tunis (canal Khelij), sont entraînées, d'après le sens des courants dominants, dans les zones sud-est de la baie.

Les mesures des nutriments et du potentiel d'oxydo-réduction (< -200 mV) dans les sédiments superficiels de la baie indiquent la présence d'une eutrophisation importante dont l'origine pourrait être attribuée aux rejets urbains et aux relargages progressifs des nutriments à partir des débris de végétation morte apportés par les courants du complexe lagunaire où se développent d'importantes quantités de macro-algues nitrophiles à *Ulva rigida* (lac Sud) et *Chaetomorpha linum* (lac Nord).

En ce qui concerne les éléments métalliques dans les sédiments superficiels, on enregistre des valeurs relativement faibles par rapport aux seuils de contamination (100 ppm pour le Cu, 300 ppm pour le Zn, 100 ppm pour le nickel et 40 ppm pour le Cd) donnés par Laurent et Fernex (1977), ce qui exclut l'existence d'une pollution extérieure d'origine industrielle.

La répartition des ces éléments à l'échelle spatiale dans les sédiments superficiels, ainsi que celle du benthos, permettent de faire une partition spatiale de la baie de Tunis en fonction du degré de pollution. La zone côtière proche du complexe lagunaire paraît comme la plus touchée par la pollution urbai-

ne alors que celle du côté opposé (Korbous-Ras El Fartass) semble mieux équilibrée avec une assez bonne transparence des eaux et la persistance d'un herbier de Posidonies. L'analyse de la faune benthique a montré, d'après l'analyse plurifactorielle, trois groupements essentiels ; le premier, situé dans la zone de Korbous-Sidi Errais, témoigne d'un milieu relativement sain ; le second, situé au débouché du lac Nord, caractérise une forte richesse en matière organique ; le troisième, qui regroupe les stations centrales et sud-ouest de la baie, a des propriétés intermédiaires et homogènes.

A l'échelle temporelle, la corrélation entre la température des eaux, les concentrations en azote inorganique (N-NO_3) et en phosphore inorganique (P-PO_4), ainsi que la Chlorophylle-a fait apparaître deux périodes ayant des caractéristiques différentes : une première période (de mars à mai) marquée par une concentration d'azote minéral faible, une absence du phosphore minéral, un rapport N/P élevé et un pic de Chlorophylle-a ; une seconde période (d'août à décembre) caractérisée par des niveaux de nutriments élevés, un rapport N/P faible (de l'ordre de 7) et une faible concentration de la Chlorophylle-a.

Pendant les périodes de hautes concentrations de la Chlorophylle-a, on remarque que le phosphore minéral est épuisé, alors que l'azote minéral est encore présent dans l'eau avec des concentrations très faibles (N/P élevé). La Chlorophylle-a, qui présente un pic au printemps, commence à chuter dès que le phosphore minéral devient très faible. En se référant aux travaux de Chiaudani *et al.* (1983), qui ont montré que lorsque le rapport N/P est élevé, le phosphore est un facteur limitant, alors que lorsque ce rapport descend à des valeurs basses, c'est l'azote qui est le facteur limitant, on peut dire que la croissance du phytoplancton est, dans notre cas, essentiellement limitée par le phosphore minéral. Néanmoins, l'absence de teneurs détectables d'orthophosphate dans le milieu ne signifie pas obligatoirement que cet élément soit indisponible pour le phytoplancton. La régénération du phosphore peut être très rapide et suffire à maintenir la production primaire. La croissance des diatomées peut être aussi expliquée par la disponibilité de la silice qui n'a pas été mesurée ici. Toutefois, la concentration maximale de la Chlorophylle-a ($2\mu\text{g.l}^{-1}$), atteinte pendant la floraison phytoplanctonique printanière, est inférieure à la valeur donnée par Munawar, Stadelman (1974), de l'ordre de 4,4 $\mu\text{gCh-a.l}^{-1}$, indicatrice de l'eutrophisation par les nutriments inorganiques.

CONCLUSION

La pression de l'urbanisation dans les banlieues de Tunis s'est traduite par l'augmentation des flux d'eaux polluées dans les zones côtières de la baie.

L'étude de ces milieux à l'échelle spatiale pendant l'été 1995, aussi bien au niveau de la physico-chimie des eaux et des sédiments qu'au niveau du

macro-benthos, a montré des indices d'une eutrophication. Celle-ci est, toutefois, plus visible au niveau des sédiments qu'au niveau de la colonne d'eau. Les zones les plus touchées par la pollution sont situées du côté ouest et sud de la baie, alors que la zone nord-est reste relativement mieux équilibrée.

L'étude à l'échelle annuelle des sels nutritifs dans la zone côtière la plus polluée montre qu'il y a une étroite relation entre les cycles annuels des nutriments inorganiques et du phytoplancton. Ce dernier présente un pic printanier en mars-avril au cours duquel le phosphore minéral est épuisé, l'azote minéral est très faible et le rapport trophique N/P est relativement élevé. Le phosphore apparaît donc comme un facteur limitant pour la croissance du phytoplancton et l'azote est un facteur secondaire pour son développement.

BIBLIOGRAPHIE

- Aubert M., 1980 - *Métaux lourds en Méditerranée*. Revue Int. d'Océanogr. médicale. CERBOM, Nice, 304 pp.
- 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.
- Ben Charrada R., 1997 - *Etude hydrodynamique et écologique du complexe golfe - Lac de Tunis. Contribution à la modélisation de l'écosystème pélagique des eaux côtières de Tunis*. Thèse de doct. de l'École Nat. d'Ing. de Tunis, 400 pp.
- Ben Othmen S., 1973 - *Le sud tunisien (golfe de Gabès) : hydrologie, sédimentologie, flore et faune*. Thèse 3^e cycle de l'Université de Tunis, 166 pp.
- Belkhir M., S. Haj Ali, 1983 - Notion d'hydrologie comparée dans le lac de Tunis et le golfe de Tunis. *Bull. Inst. natl sci. tech. Océanogr. Pêche Salammbô*, **10** : 5-26.
- Chiaudani G., G.F. Gaggio, M. Vighi, 1983 - Synoptic survey of the distribution of nutrients in Italian Adriatic coastal water. *Thalassia Jugosl.*, **19**: 77-86.
- Coste B., 1970 - Les sels nutritifs entre la Sicile, la Sardaigne et la Tunisie. *Cah. océanogr.*, **23** : 49-83.
- Coste B., H.J. Minas, 1967 - Premières observations sur la distribution des taux de productivité et des concentrations en sels nutritifs des eaux de surface du golfe du Lion. *Cah. océanogr.* **19** (5) : 417-429.
- Darmoul B., S. Hadj Ali, P. Vitiello, 1980 - Effets des rejets industriels de la région de Gabès (Tunisie) sur le milieu marin récepteur. *Bull. Inst. natl sci. tech. Océanogr. Pêche Salammbô*, **7** : 5-61.
- Laurent R., F. Fernex, 1977 - Contribution de la géologie sédimentaire à l'étude de la pollution du golfe de Napoule. *Revue Int. Océanogr. méd.*, **47** : 97-100.
- Munawar M., P. Stadelman, 1974 - Biomass parameters and primary production at a nearshore and a mid-lake station of Lake Ontario during IFYGL. In *Proc. 17th Conf. Great Lakes. Res. Int. Assoc.*, pp: 109-119.

Reçu en janvier 1998 ; accepté en octobre 1998.

Received January 1998; accepted October 1998.