



Caractérisation hivernale de la lagune de Bizerte

Item Type	Journal Contribution
Authors	Bejaoui, B.; Ben Charada, R.; Moussa, M.; Ben Hamadou, R.; Harzallah, A.; Chapelle, A.
Citation	Bulletin de l Institut national des sciences et technologies de la Mer, 32. p. 79-91
Publisher	INSTM
Download date	06/02/2023 12:59:06
Link to Item	http://hdl.handle.net/1834/3748

CARACTERISATION HIVERNALE DE LA LAGUNE DE BIZERTE

Béchir BEJAOU^{1*}, R. BEN CHARRADA², M. MOUSSA³,
R. BEN HAMADOU⁴, A. HARZALLA¹ et A. CHAPELLE⁵

1 : Institut Nationale des Sciences et Technologie de la Mer (INSTM)-28, rue 2 mars 1934 - Salammbô 2025. Tunisie.

2. Ingénierie de l'Hydraulique et de l'Environnement (IHE), 8 Rue Hbib Chrita Ariana 2080, Tunisie.

3 : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT)-BP 37, 1002 Tunis Belvédère, Tunisie.

4 : CCMAR-Universidade do Algarve-Gambelas-8000 Faro, Portugal.

5 : IFREMER Brest, BP 70, 29280 Plouzané, France.

*BEJAOU@webmails.com

ملخص

الخصائص الهيدروبيولوجية الشتوية بحيرة بنزرت : اهتمت هذه الدراسة بتقييم بحيرة بنزرت من خلال انتشار العوامل الهيدروبيولوجية بها وذلك بالإعتماد على 17 محطة منتشرة على كامل البحيرة. خضعت على عينة لقياسات أنية على عين المكان (الحرارة، الملوحة، التوصيل الكهربائي، الشفافية، الحموضة و كمية الأوكسجين في الماء) و لتحليل مخبرية (النترت، النترات، النتروجين الكلي، الفسفور الرباعي، اليخضور "أ"، صبغ الفيتوبلانكتون و المواد العالقة). لقد أبرزت هذه الدراسة أن انتشار العوامل الهيدروبيولوجية مرتبط أساسا بحمولة مياه السيالان و الأودية و التيارات المائية كما ابرزت تحليل انتشار المواد المغذية و اليخضور علاقة متميزة بين كمية الفيتوبلانكتونات و الفسفور الرباعي. لقد مكنت هذه الدراسة بالإعتماد على طرق إحصائية مختلفة من تحديد أربعة مناطق تتشابه نوعية الماء بها، وهي : قنال البحيرة، منطقة تربية المحار، المناطق الساحلية و المنطقة الوسطى للبحيرة. كلمات مفاتيح : بحيرة بنزرت، هيدروبيولوجيا، المواد المغذية، النيتروجين، الفسفور.

RESUME

Ce travail porte sur la caractérisation hivernale de la lagune de Bizerte en se basant sur une campagne de mesures effectuée en janvier 2004. Cette campagne a porté sur 17 stations réparties sur toute la lagune ainsi qu'une station marine de référence. Chaque échantillon a fait l'objet de mesures *in-situ* (Température, Salinité, Conductivité, Transparence, Acidité et Oxygène dissous) et des analyses au laboratoire (NO_3 , NO_2 , NT, PO_4 , Chlorophylle-a, Pheopigment et MES).

Cette étude a montré que la distribution spatiale des paramètres est fortement liée aux apports fluviaux. Contrairement au phosphore minéral, la teneur en azote total montre une variation spatiale importante. L'analyse de la distribution spatiale des nutriments d'une part et de la chlorophylle-a d'autre part suggère (que le phosphore minéral est un facteur limitant pour la production primaire) une relation étroite entre la biomasse phytoplanctonique et la disponibilité du phosphore minéral.

Une caractérisation spatiale de la lagune a été effectuée au moyen d'une Classification Hiérarchique Ascendante (CAH) permettant le regroupement des stations ainsi qu'une Analyse en Composantes Principales (ACP) qui a permis la caractérisation multivariée des stations. La Méthode des Vecteurs Equivalents (MVE) a été par la suite utilisée pour identifier les paramètres hydrobiologiques expliquant la plus grande part de la variance totale de l'ensemble des données. L'analyse statistique a permis de distinguer quatre zones le chenal de navigation (y compris le goulet), la zone conchylicole, la zone littorale et la partie centrale.

Mots Clés : Hydrobiologie, Nutriments, Azote, Phosphore, ACP, Lagune de Bizerte

ABSTRACT

Winter characterization of the Bizerte lagoon: This work concerns the winter characterization of the lagoon of Bizerte based on series of measurement taken in January 2004 (winter season). This sampling has interested 17 stations distributed in the lagoon and a reference marine station. Each sample was the subject of *in-situ* measurements (Temperature, Salinity, Conductivity, Transparency, Suspended matter, Acidity and dissolved Oxygen) and of the analyses in the laboratory (NO_3 , NO_2 , NT, PO_4 , Chlorophyll-a, Pheopigment and MES).

For better characterizing the state of the lagoon a statistical analysis was applied to the hydrobiological data obtained. This analysis consists in applying the technique of Principal Components Analysis (ACP) and the technique of the Ascending Hierarchical Clustering (CAH) with flexible bonds. The last stage consists in using the Method of the Equivalent Vectors (EVM) in order to identify the significant hydrobiological parameters.

This study showed that the space distribution of the parameters is strongly related to the contributions of fresh waters. With the opposition to mineral phosphorus the total nitrogen content shows a significant space variation. The analysis of the spatial distribution of the nutrients on the one hand and chlorophyll-a on the other hand

suggests a close connection between the quantity of the phytoplankton and the availability of mineral phosphorus. The statistical analysis made it possible to distinguish five areas the Narrow part, the conchylaceous zone, the littoral zone, the eastern, the western part and the central part.

Key words : Hydrobiology, Nutrients, Nitrogen, Phosphorus, ACP, Bizerte lagoon

INTRODUCTION

La lagune de Bizerte est située à l'extrême Nord de la Tunisie entre les latitudes 37°8' et 37°14' et entre les longitudes 9°46' et 9°56'. La lagune s'étend sur une superficie de l'ordre de 128 km², avec une largeur maximale de 11 km et une longueur maximale de 13 km, et communique avec la mer par un canal de 6 km de longueur. La largeur et la profondeur maximales du canal sont de 0,8 km et 12 m, respectivement. La lagune est reliée dans sa partie ouest à un second plan d'eau, le lac Ichkeul, par le canal Tinja d'environ 5 km de long et de quelques mètres de profondeur (3 mètres en période de crue) (Figure 1). L'appartenance de cette lagune à une région d'effondrement entouré d'une série de petites montagnes lui affecte le caractère d'un réceptacle d'un réseau hydrographique développé qui prend naissance dans ces montagnes. Le réseau hydrographique se compose de plusieurs cours d'eaux qui débouchent principalement au niveau des bordures Sud et Ouest de la lagune. La

quantité d'eau qui arrive dans la lagune est estimée à 125 Mm³/an (Tableau I) A cette double influence marine et continentale s'ajoute une troisième influence d'ordre urbaine et industrielle (MAERH, 2003).

Pour mieux maîtriser le fonctionnement de la lagune (effet des apports exotiques en saison hivernale) afin de proposer un plan d'action pour sa gestion, le Ministère de l'Agriculture de l'Environnement et des Ressources Hydrauliques a confié aux bureaux d'études CE (COMETE-Engineering) et IHE (Ingénierie de l'Hydraulique et de l'Environnement) une étude concernant l'assainissement de la lagune de Bizerte.

Cette étude comprend trois volets :

1. Identification des différentes sources de rejet en particulier industrielles,
2. Caractérisation des sédiments,
3. Caractérisation de la qualité des eaux.

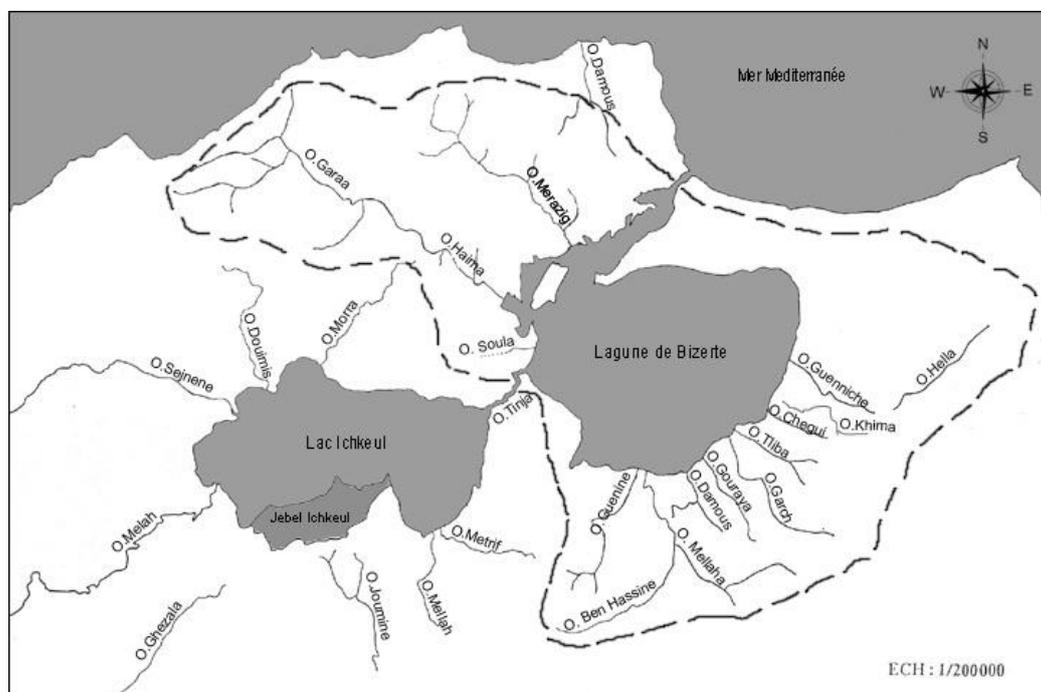


Figure 1 : Situation géographique et délimitation du bassin versant de la lagune de Bizerte

Tableau I : Bilan hydrologique de la lagune de Bizerte
(D'après : ANPE, 1990)

Origine	BV Lagune Bizerte	Pluie	BV Lac Ichkeul	Total
S (km ²)	380	128	2200	508
V (Mm ³)	31	74	20	125

Nous présentons dans cet article les principaux résultats des mesures hydrobiologiques effectués dans le cadre de cette étude ainsi que les résultats de l'analyse numérique appliquée sur ces mesures. L'étude de la qualité des eaux de la lagune s'est portée sur les paramètres physicochimiques, les paramètres biologiques et les sels nutritifs. Ces paramètres ont été mesurés dans 17 stations réparties dans toute la lagune ainsi que dans une station en mer, située en face de la lagune (Figure 2). Les paramètres physiques ont été mesurés directement in situ, les autres paramètres ont été analysés en laboratoire sur des échantillons d'eau prélevés in situ.

MATERIELS ET METHODES

Nous distinguons les mesures in-situ et les analyses de laboratoire.

1. Mesures in-situ :

Les mesures de terrain concernent la température, la transparence, la salinité et la conductivité des eaux ainsi que la concentration en oxygène dissous et le pH. La température des eaux, à environ 10 cm de la

surface, est mesurée à l'aide d'un thermomètre électronique de précision gradué au 1/10^{ème} de °C. La transparence de l'eau est évaluée à l'aide du disque de Secchi. La salinité des eaux, la teneur de l'eau en oxygène dissous et le pH sont mesurés *in-situ*, respectivement, à l'aide : d'un salinomètre de type *WTW.LF-197*, d'un oxymètre de terrain de type *WTW.OXI-197* et d'un pH-mètre électronique portable de type *WTW.pH-197* qui ont été préalablement étalonnés.

2. Analyses de laboratoire :

Dans chaque station, une fois les mesures *in-situ* réalisées, nous procédons à un prélèvement d'eau pour les différentes analyses de laboratoires. Pour cela, deux bouteilles de un litre, en plastique opaque, sont immergées à 10 cm de la surface de l'eau, remplies puis placées dans des glacières isolées de la lumière. En laboratoire, les analyses chimiques concernent les paramètres suivants : nitrite (*N-NO₂*), nitrate (*N-NO₃*), azote ammoniacal (*N-NH₃*), azote total (*NT*), orthophosphate (*P-PO₄*) et phosphore total (*PT*). Ces paramètres sont analysés en laboratoire en passant par une méthode photométrique qui utilise comme

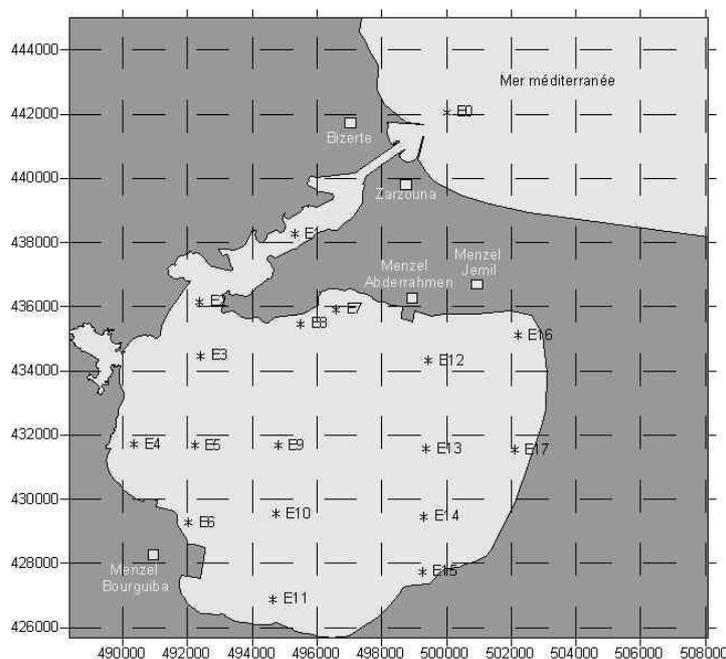


Figure 2 : Répartition des stations de prélèvement

réactifs des tests kits préalablement préparés par le fournisseur des équipements. L'outil de base de la méthode photométrique est un photomètre *Photolab S12* type *WTW* muni d'un thermo-réacteur *CR3000* type *WTW*.

La mesure de la concentration en chlorophylle-a est réalisée par une méthode fluorimétrique basée sur la mesure de la fluorescence de la chlorophylle-a extraite à l'acétone. Le fluorimètre est à chaque fois calibré à partir de solutions standards. L'échantillon de un litre d'eau prélevé est conservé à l'obscurité. Les procédures d'analyse de la chlorophylle-a sont entamées rapidement (dans moins de 3 heures après le prélèvement).

VARIATION SPATIALE DES PARAMETRES HYDROBIOLOGIQUES

1. La température

La température de l'eau est comprise entre 10 et 12°C. Les valeurs les plus faibles ont été enregistrées au niveau de la partie centrale et à l'Est de la lagune (10,1°C) alors que les valeurs les plus fortes ont été enregistrées à l'Ouest (11,6°C) et dans le goulet, en face de la Cimenterie de Bizerte (12°C). Le gradient maximal de la température est de l'ordre de 1,9°C, a été observé entre la partie centrale et le goulet (Figure 3). L'élévation de la température dans le goulet et à l'Ouest de la lagune est probablement due aux rejets des industries installées sur les berges. En effet l'aciérie de Menzel Bourguiba située à l'Ouest de la lagune rejette des eaux à la température 40°C et la cimenterie de Bizerte située sur les berges Nord du

goulet rejette des eaux à la température 30°C (MAERH, 2003).

2. L'acidité des eaux

Les eaux de la lagune ne montrent pas une variation spatiale notable de leur pH. Les mesures effectuées révèlent d'une façon générale un pH qui varie peu aux alentours de 8. Cette stabilité du pH s'explique par l'échange important de la lagune avec la méditerranée (Figure 4).

3. La Salinité et la Conductivité

La carte de la répartition de la salinité montre deux régions : la première inclut la partie centrale et le littoral Nord situé entre Ras Gueblaoui (Nord-ouest) et Menzel Jemil (Nord-est) avec des concentrations de l'ordre de 35 *psu*, la deuxième région longe le littoral Ouest-sud-est de la lagune avec des concentrations variants entre 33 et 35 *psu* (Figure 5). La salinité au niveau du canal est légèrement supérieure (36 *psu*), rappelant celle d'une eau marine. La diminution de la salinité au niveau du littoral est due à la dilution par les eaux douces ramenées par le canal Tinja et par les cours d'eaux qui prennent naissance dans les montagnes du bassin versant de la lagune.

En moyenne, la salinité des eaux de la lagune est égale à 35 *psu*. L'analyse de la conductivité des eaux permet de distinguer deux régions, comme pour la salinité, la région septentrionale où la conductivité globale est de l'ordre de 54,5 *ms/cm* et la région méridionale où la conductivité des eaux est comprise entre 52 et 54,5 *ms/cm* (Figure 6).

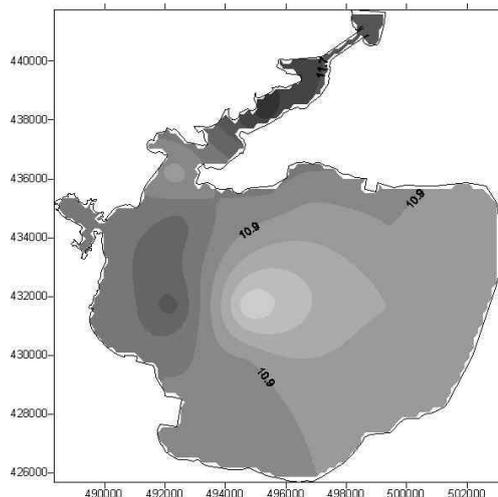


Figure 3 : Variation spatiale de la température (°C)

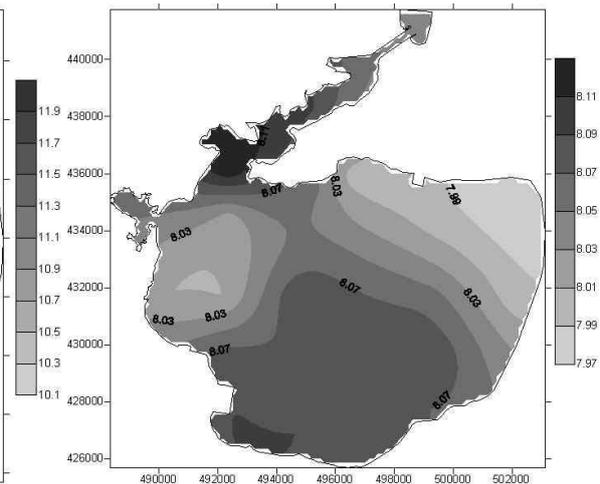


Figure 4 : Variation spatiale du pH

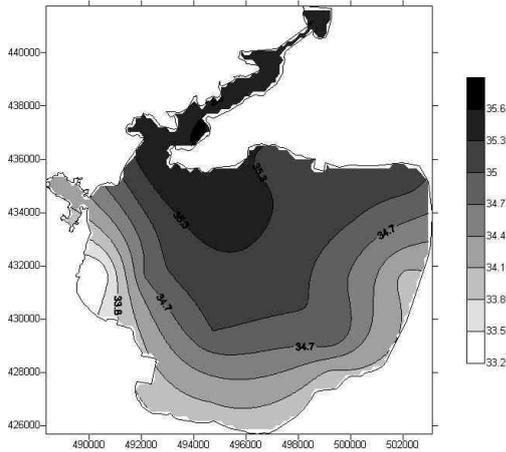


Figure 5 : Variation spatiale de la salinité (psu)

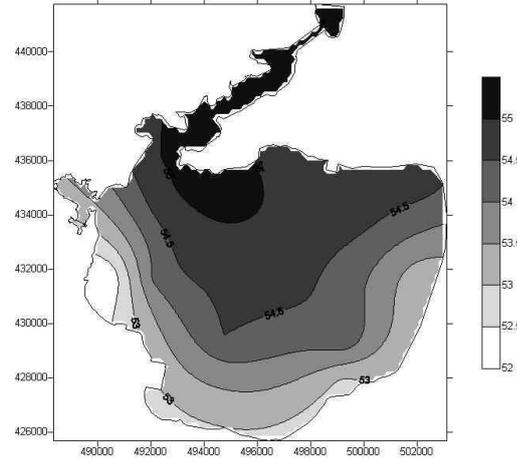


Figure 6 : Variation spatiale de la conductivité (ms/s)

4. L'oxygène dissous

Les valeurs observées de la concentration en oxygène dissous varient, en fonction des régions, entre 7,8 et 9 gO₂/m³.

Les concentrations les plus élevées occupent le front entre Menzel Abderrahmen et Menzel Bourguiba. La concentration relative est de l'ordre de 8,7 mgO₂/m³ ce qui correspond à une saturation en oxygène variant entre 99 et 103 %. Les régions les moins oxygénées sont situées à l'Ouest, à l'Est (au niveau de la station conchylicole de Menzel Jemil) et au niveau du goulet. Les concentrations relatives sont comprises entre 7,8 et 8,4 gO₂/m³ ce qui correspond à des saturations variants entre 93 et 95 % (Figure 7 et 8).

Les teneurs des eaux en oxygènes montrent une lagune bien oxygénée. Cette oxygénation importante des eaux est due en premier lieu à l'aération et à moindre degré à la présence d'un couvert végétal constitué par des *Caulerpa prolifera*, des *Gracilaria verrucosa*, des *Cystoseira compressa*, des *Cymodocea nodosa*, des *Ruppia cirrhosa* et *Zostera*

noltii (MAERH, 2003). Les teneurs moyennes des eaux de la méditerranée en oxygènes sont comprises entre 7 et 9 gO₂/m³ (Copin-Montégut, 1996).

Le gradient maximal de la concentration en oxygène est de 0,8 gO₂/m³, il a été enregistré entre la partie centrale et le secteur Nord-ouest de la lagune. Ce gradient spatial faible de l'oxygène indique une homogénéisation des eaux de la lagune.

5. Les matières en suspension (MES) et la Transparence

Les eaux les plus chargées en matières en suspensions correspondent aux embouchures des oueds avec une charge comprise entre 26 et 40 g/m³. La concentration maximale (40 g/m³) a été observée à l'embouchure du canal Tinja (Ouest de la lagune). Aux niveaux des embouchures des oueds Ben Hassine et Guenniche les teneurs en MES sont aussi élevées et atteignent 30 g/m³. Le disque de Secchi disparaît à une profondeur de l'ordre de 0,8 m (Figure 10).

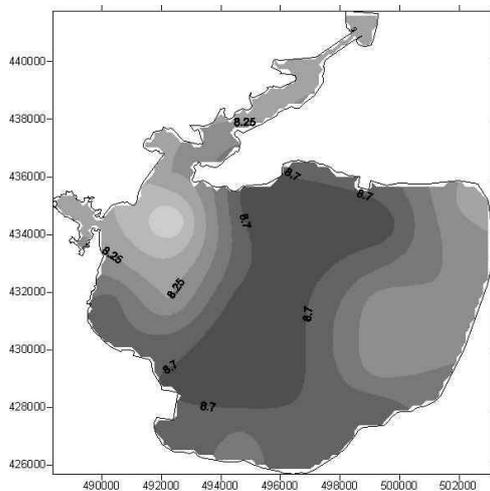


Figure 7: Variation spatiale de l'oxygène dissous (gO₂/m³)

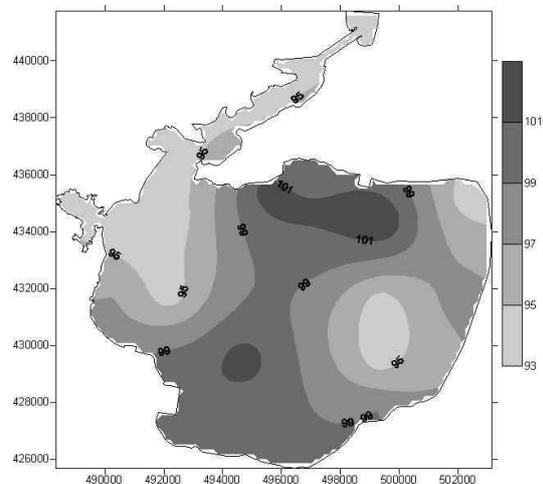


Figure 8 : Variation spatiale de l'oxygène dissous de saturation (‰)

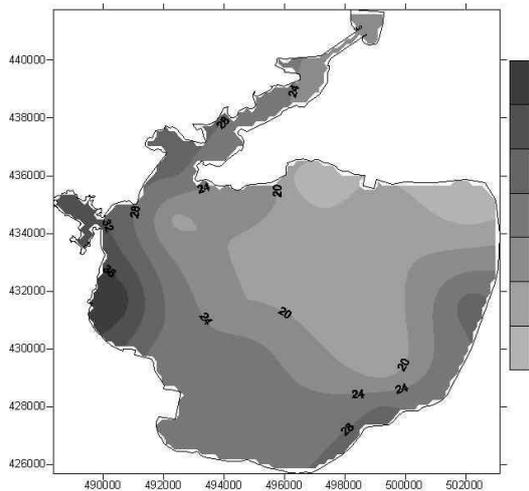


Figure 9 : Variation spatiale de la MES (g/m^3)

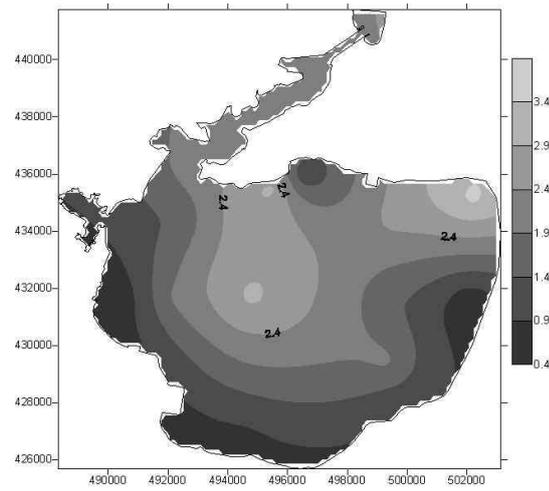


Figure 10 : Variation spatiale de la transparence (m)

Les parties centrale, Nord et Est de la lagune (au niveau de la station conchylicole *STL*) se caractérisent par des concentrations relativement faibles en MES qui varient entre 12 et 18 g/m^3 (Figure 9). La transparence importante des eaux au niveau de ces régions (de l'ordre de 3 m) (Figure 10) peut être expliquée par l'absence des cours d'eaux ramenant une charge solide élevée d'une part et par un faible hydrodynamisme du milieu, d'autre part (INSTM, 2002). Dans l'ensemble, les eaux de la lagune sont considérées assez chargées en MES puisque les concentrations relatives sont comprises entre 12 et 40 g/m^3 . Elles sont assez claires étant donnée que la transparence relative (Transparence/Profondeur) varie entre 14 et 70 % en fonction des régions

6. L'Azote total

La carte de la répartition de l'azote total montre une variabilité spatiale remarquable (Figure 11). La teneur en azote total est considérablement élevée dans le goulet et à l'Ouest de la lagune (2000-4000 mgN/m^3) et relativement élevée à l'Est de la lagune (1400 et 1800 mgN/m^3). Le reste de la lagune est caractérisé par des teneurs qui varient entre 500 et 1000 mgN/m^3 . La station marine de référence (E0), indique des teneurs de l'ordre de 744 mgN/m^3 . La teneur de l'azote total observée, à la même période, dans le lac nord de Tunis (en 1993) est de l'ordre de 350 mgN/m^3 (Ben Charrada, 1997).

Les teneurs élevées enregistrées au niveau du goulet et à l'Ouest de la lagune sont liées aux rejets d'eaux usées domestiques, industrielles et aux lessivages du dépotier de la ville de Bizerte qui est localisé au niveau de la baie de Sabra (dépôt municipal). La teneur élevée à l'Est de la lagune est due au lessivage des sols agricoles, aux rejets d'eaux usées

domestiques et industrielles d'El Alia qui se déversent actuellement dans l'Oued Guenniche.

7. Le nitrate

La carte de répartition du nitrate dans les eaux de surface (Figure 12) montre que les teneurs les plus élevées en nitrate sont situées tout le long des berges de la lagune, avec des concentrations supérieures à 110 mgN/m^3 et qui peuvent atteindre des teneurs de 200 mgN/m^3 en quelques endroits tels que l'embouchure de l'oued Guenniche, l'embouchure du canal Tinja et en face de Menzel Abderrahmen. La partie centrale de la lagune est caractérisée par des teneurs relativement faibles avec des concentrations qui varient entre 70 et 90 mgN/m^3 . La teneur en nitrate au niveau de la station marine de référence est de l'ordre de 37 mgN/m^3 .

8. Le nitrite

La carte de répartition du nitrite montre que les teneurs les plus élevées en nitrite sont situées tout le long du goulet (68 mgN/m^3) et à un degré moindre à l'est de la lagune (46 mgN/m^3). L'axe Menzel Abderrahmen-Menzel Bourguiba y compris la partie centrale de la lagune sont caractérisés par des teneurs en nitrite relativement faibles comprises entre 40 et 46 mgN/m^3 . La teneur enregistrée au niveau de la station marine de référence est de l'ordre de 40 mgN/m^3 (Figure 13).

Dans l'ensemble les teneurs en nitrite rencontrées dans la lagune sont assez élevées mis à part le goulet qui se caractérise par des teneurs en nitrite relativement important indiquant la présence d'une pollution organique.

9. L'orthophosphate

Les teneurs en orthophosphate mesurées dans la lagune de Bizerte sont comprises entre 61 et 105 mgP/m³ (Figure 14). Ces teneurs sont relativement élevées par rapport à celles rencontrées dans les milieux paraliques. La teneur en phosphore minéral observée à la même période de l'année 1993 dans le lac nord de Tunis, était de l'ordre de 20 mgP/m³ (Ben Charrada, 1997).

A l'encontre de l'azote inorganique, les teneurs en phosphore inorganique présente des variations

spatiales relativement faibles. Les concentrations les plus élevées ont été observées au niveau du secteur Sud-ouest de la lagune, en face de la zone industrielle de Menzel Bourguiba (100 mgP/m³), et celles relativement faibles (70 mgP/m³) ont été observées au nord de la lagune. Partout ailleurs, la teneur du phosphore est comprise entre 80 et 90 mgP/m³. La concentration du phosphore enregistrée à la station marine de référence est de 50 mgN/m³.

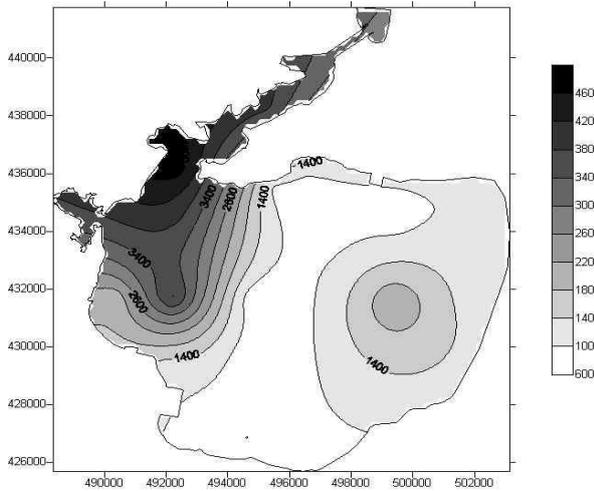


Figure 11 : Variation spatiale de la teneur de l'azote total (mgN/m³)

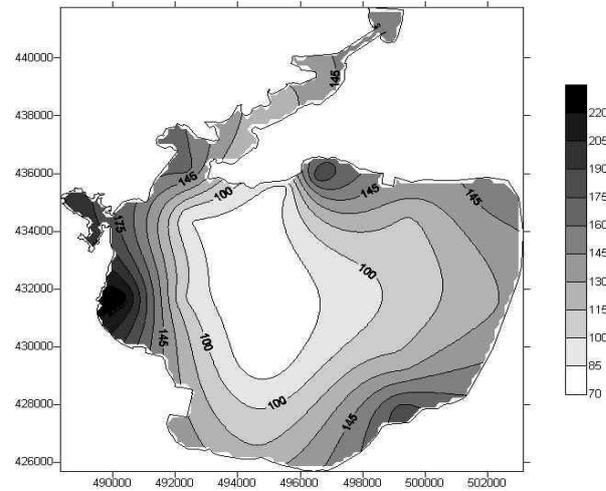


Figure 12 : Variation spatiale de la teneur de nitrate (mgN/m³)

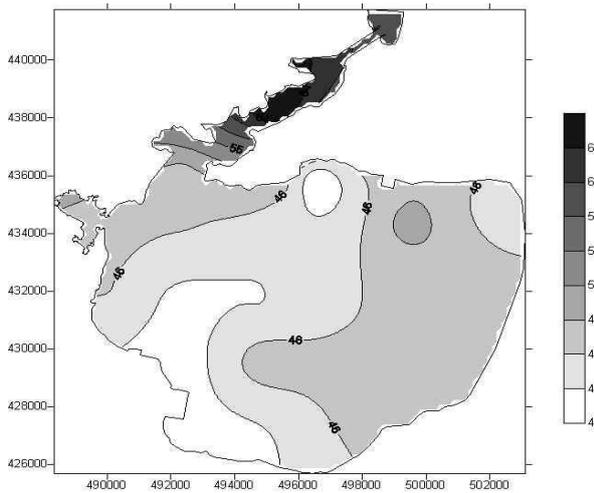


Figure 13 : Variation spatiale de la teneur de nitrite (mgN/m³)

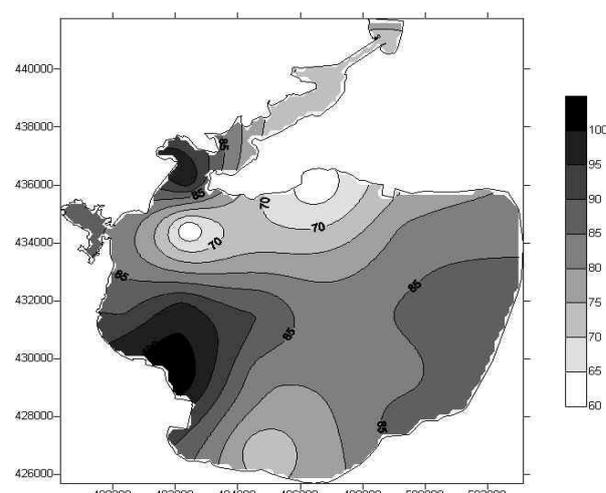


Figure 14 : Variation spatiale de la teneur du phosphore minéral (mgN/m³)

10. La chlorophylle-a

La répartition spatiale de la chlorophylle-a montre une abondance dans la moitié Sud de la lagune (2,4-4,6 mg/m³) par rapport à la moitié Nord qui est relativement pauvre (0,8-2,4 mg/m³) (Figure 15).

Les concentrations en chlorophylle-a à l'embouchure de l'oued Guenniche et en face de la zone industrielle de Menzel Bourguiba sont respectivement de l'ordre de 3 et 4,5 mg/m³. La partie centrale et le goulet enregistrent des concentrations en chlorophylle-a de l'ordre de 1,8 et 1,1 mg/m³, respectivement.

La concentration de la chlorophylle-a dans la lagune est supérieure à celle enregistrée dans le goulet mais inférieure à celle enregistrée dans le lac Ichkeul (10,5 mg/m³; ANPE, 1994). Les phytoplanctons dans la lagune s'enrichissent au fur et à mesure de leur déplacement en fonction des courants giratoires. Elle bénéficie ainsi des apports nutritifs des cours d'eau et du canal Tinja. Une part importante des phytoplanctons de la lagune provient du lac Ichkeul.

L'analyse des cartes de la répartition des teneurs de l'azote inorganique (Figure 12 et Figure 13) et de l'orthophosphate (Figure 14) et celle de la chlorophylle-a (Figure 15) permet de constater que la présence de la chlorophylle-a est à priori tributaire de la disponibilité du phosphore minéral. Ce qui explique la présence relativement importante de la chlorophylle-a au niveau du secteur Sud-ouest de la lagune et sa rareté malgré l'abondance de la matière azotée en quelques autres endroits.

11. Le phéopigment

La carte de répartition du phéopigment montre que ce dernier se concentre de plus à l'embouchure du canal Tinja et à l'Ouest de la lagune avec des teneurs comprises entre 1,2 et 1,6 mg/m³ alors que les teneurs les plus faibles ont été enregistrées au niveau du goulet et au nord de la lagune (0,4-1 mg/m³) (Figure 16).

L'analyse (des cartes du phéopigment et de la chlorophylle-a) du rapport Pheo/Chla montre qu'il est compris entre 45 et 55 au niveau du goulet et entre 25

et 111 dans la lagune. Ce qui montre que les eaux entrantes contiennent une biomasse phytoplanctonique moins dégradée que les eaux dans la lagune

ANALYSES NUMERIQUES DES PARAMETRES HYDROBIOLOGIQUES

L'algorithme (Figure 17) utilisé pour la caractérisation de la lagune de Bizerte à partir des données hydrobiologiques est inspiré de celui utilisé par Ben Hamadou *et al.* (2001). L'analyse commence avec une matrice (*H*) à deux dimensions avec 17 lignes qui correspondent à 17 stations de prélèvement et 15 colonnes qui correspondent aux 15 paramètres hydrobiologiques. La matrice *H* subit une transformation par double standardisation pour obtenir une matrice *H'*. Cette transformation est effectuée afin d'obtenir la multinormalité des données afin de satisfaire les conditions d'utilisation des méthodes d'analyses multivariées utilisées ultérieurement. Un test de multinormalité est utilisé pour vérifier la bonne normalisation des données afin d'obtenir des groupes de stations homogènes. Une Analyse en Composantes Principales (ACP) et une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) ont été appliquées aux données hydrobiologiques déjà transformées.

Une analyse supplémentaire a été réalisée pour identifier les paramètres hydrologiques qui renferment la plus grande partie de la variance totale entre stations. Cette Méthode des Vecteurs Equivalents (MVE) (Escoufier, 1970) permet l'identification des paramètres qui présentent la plus grande hétérogénéité entre stations permettant ainsi leur discrétisation. Cet algorithme peut être utilisé en tant que critère de choix d'un échantillonnage plus réduit. Cette réduction possible du nombre de paramètres s'avère intéressante pour le gain en temps et des moyens dispensés dans les échantillonnages.

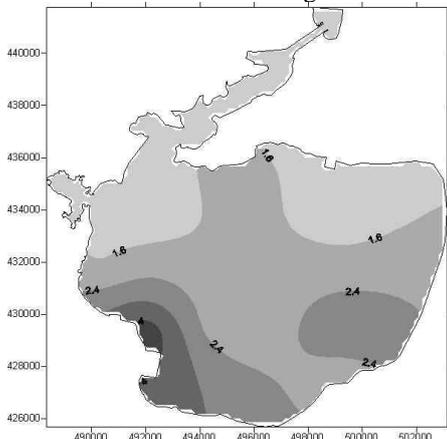


Figure 15 : Répartition spatiale de la concentration de la Chlorophylle-a (mg/m³)

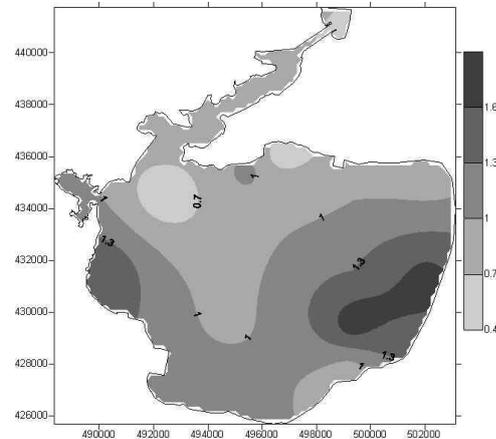


Figure 16 : Variation spatiale de la concentration du phéopigment (mg/m³)

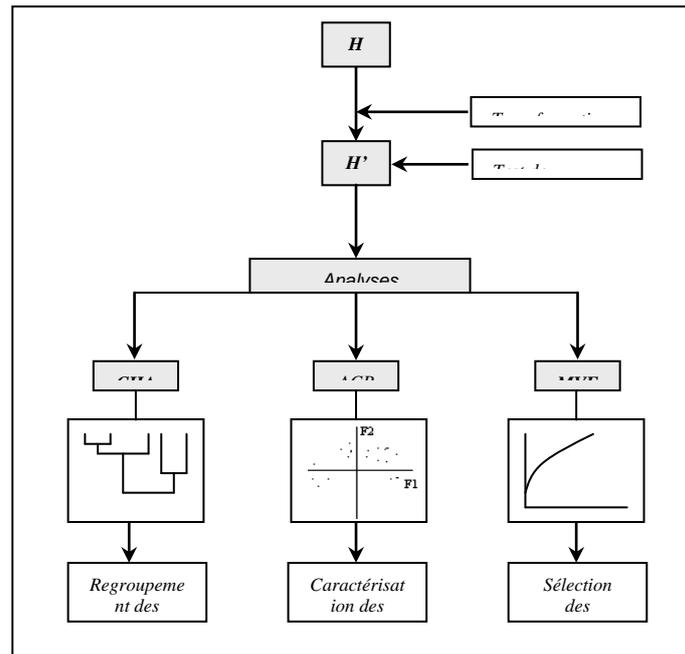


Figure 17 : Organigramme montrant les différentes étapes de l'analyse numérique appliquée aux données hydrobiologiques

1. Transformation des données

Les données obtenues se présentent sous la forme d'un tableau multivariables ; afin de satisfaire les conditions d'applicabilité des méthodes multivariées, il est nécessaire d'effectuer des transformations afin de normaliser la variance entre les paramètres (Escofier, 1990). Plusieurs transformations ont été testées afin d'en déterminer la plus adaptée aux données.

Le choix de la transformation appropriée dépend de la multinormalité des données obtenues. Afin de tester la multinormalité, la distance généralisée de Mahalanobis D^2 (Mahalanobis, 1936) a été calculée entre chaque observation et le centroïde des données.

$$D^2 = d_i \Sigma^{-1} d_i ;$$

d_i : Distance du vecteur des données centrées des descripteurs à l'observation i ;

Σ^{-1} : Inverse de la matrice variance-covariance entre les descripteurs.

En cas de multinormalité, le vecteur D^2 devrait être normalement distribué ; il est représenté sur un graphique de probabilités normales, et puis une régression linéaire a été utilisée afin de tester à quel degré la distribution suit une loi normale (Dagnelie, 1975).

Les données brutes ont subi une première transformation logarithmique suivie d'une double standardisation. Cette dernière transformation consiste à centrer et réduire les données brutes deux fois de suite (Hernandez, 1997), elle a été choisie en

raison de la meilleure cohérence des données ainsi transformées avec la multinormalité (Figure 18).

$$H2_{ij} = \frac{H1_{ij} - \overline{H1_j}}{\sigma_{1j}}$$

$$H'_{ij} = \frac{H2_{ij} - \overline{H2_j}}{\sigma_{2j}}$$

tel que

$$i=1, \dots, n$$

$$j=1, \dots, k$$

n : nombre de stations,

k : nombre de variable,

H_{ij} : valeur de la matrice H des données brutes,

$H1_{ij}$: valeur de la matrice $H1$ pour l'observation i et la variable j , obtenues par la transformation Logarithmique de la matrice des données brutes H ,

$\overline{H1_j}$: valeur moyenne sur les observations de la matrice $H1$,

$H2_{ij}$: valeur de la matrice intermédiaire $H2$ pour l'observation i et la variable j ,

$\overline{H2_j}$: valeur moyenne sur les observations de la matrice $H2$,

H'_{ij} : valeur de la matrice H' pour l'observation i et la variable j , obtenues après la double standardisation,

σ_{1j} : écart type des paramètres hydrobiologiques de la matrice $H1$,

σ_{2j} : écart type des paramètres hydrobiologiques de la matrice $H2$

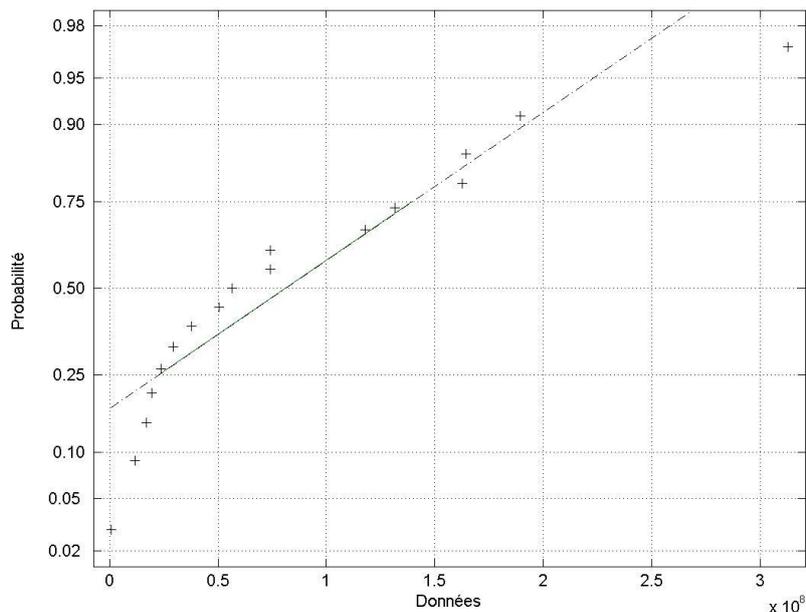


Figure 18 : Graphique de probabilités normales pour les données hydrobiologiques transformées et de la régression linéaire démontrant la distribution normale des données transformées.

2. Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

Afin de déterminer des groupes de stations homogènes une CHA à liens flexibles a été appliquée sur les données hydrobiologiques transformées. Le résultat de cette analyse se présente sous forme d'un dendrogramme qui permet l'obtention de groupes de stations de plus en plus homogènes.

Cette classification permet l'agglomération des stations selon une métrique bien définie (Legendre & Legendre, 1998). La distance euclidienne est utilisée pour calculer la distance entre les stations. Le seuil de coupure du dendrogramme a été choisi à 1 (Figure 19) permettant l'obtention de 4 groupes de stations (G1, G2, G3 et G4).

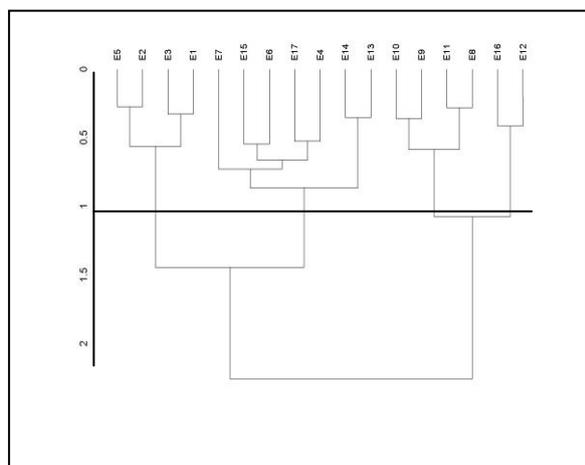


Figure 19 : Classification Hiérarchique Ascendante établie sur les données hydrobiologiques de la lagune de Bizerte

3. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'ACP a pour but de réduire la dimension des données afin d'en résumer l'information selon des axes factoriels sans une perte importante de l'information. Cette méthode a été appliquée sur la matrice *H'* (matrice des données transformées) permettant l'obtention des même groupes de stations déjà décelés par la CHA.

En outre, cette méthode permet l'obtention d'un cercle de corrélation afin de reconnaître les liens existants entre les axes factoriels et les variables réels. Le cercle de corrélation doit nous indiquer pourquoi les stations se sont regroupées de cette façon dans l'ACP et selon quels paramètres (paramètres homogènes par groupe de station selon leurs position par rapport aux axes factoriels) (Figure 21).

La Figure 20 montre la projection des stations sur le plan factoriel constitué par les deux axes principaux F1 et F2 de l'ACP. Ces deux premiers axes factoriels résument respectivement 52,69 % et 25,13 % de la variance totale.

L'axe F1 dissocie essentiellement les deux groupes de stations G1 (E1, E2, E3 et E5) et G2 (E12 et E16) et à moindre raison le groupe de stations G3 (E8, E9, E10 et E11). La caractérisation des groupes de stations selon les axes factoriels est effectuée en connaissances des liens entre les axes factoriels et les paramètres originaux (Figure 20).

Nous pouvons distinguer sinon un dernier groupe de stations G4 constitué par les stations E4, E6, E7, E13, E14, E15 et E17 ayant à priori des caractéristiques hydrologiques moyennes selon l'axe factoriel F1 vu

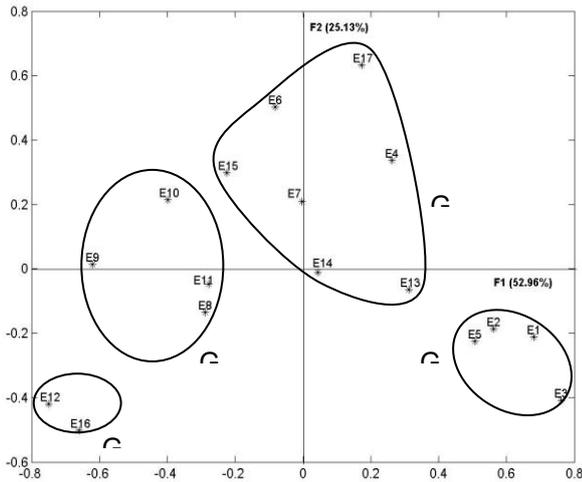


Figure 20 : Projection des stations sur le plan factoriel constitué par les deux premiers axes principaux F1 et F2

sa position médiane. Cette même constation est donnée pour le groupe G3 vis-à-vis de l'axe factoriel F2 (Figure 20).

Le groupe G1 est constitué par les stations situées au niveau d'une zone à caractère marin (le goulet y compris chenal de navigation). Cette zone se caractérise par des salinités (Figure 5) légèrement inférieures à celles enregistrées en face de la lagune (37 *psu*) et par des teneurs élevées de l'azote (nitrite, nitrate et azote total) (Figure 11, Figure 12 et Figure 13). La chlorophylle-*a* (Figure 15) et le phéopigment (Figure 16) présentent des concentrations relativement faibles par rapport à celles enregistrées à l'intérieur de la lagune.

Le groupe G2 est constitué par des stations situées au niveau de la zone conchylicole de Menzel Jemil. Cette région est distinguée par une transparence élevée (Figure 10) et par des concentrations relativement faibles en chlorophylle-*a* (Figure 15) et en phéopigment (Figure 16). La concentration relativement faible en chlorophylle-*a* est entre autre le résultat de la de l'effet des filtreurs cultivés au niveau de ce secteur.

Le groupe G3 est constitué par des stations situées au centre (E9 et E10), au nord (E8) et au sud (E11) de la lagune. Les régions relatives partagent les mêmes teneurs de oxygène dissous (8,7 gO_2/m^3), de l'azote total (1400 mgN/m^3), du nitrate (90-110 mgN/m^3) et du nitrite (43-46 mgN/m^3). Elles enregistrent des concentrations de chlorophylle-*a* comprises entre 1,6 et 2,4 mg/m^3 et des concentrations de phéopigment comprises entre 0,7 et 1,0 mg/m^3 . Ce franc Nord-Sud constitue un milieu intermédiaire entre une région marin et celui lacustre avec des valeurs plutôt moyennes pour la plupart des paramètres.

Le dernier groupe G4 est constitué par les stations littorales qui sont localisées au niveau des embouchures des oueds, ces zones sont caractérisées par des teneurs élevés en MES (Figure 9) qui entraînent une transparence faible (Figure 10) des eaux et par des salinités relativement faibles (Figure 5).

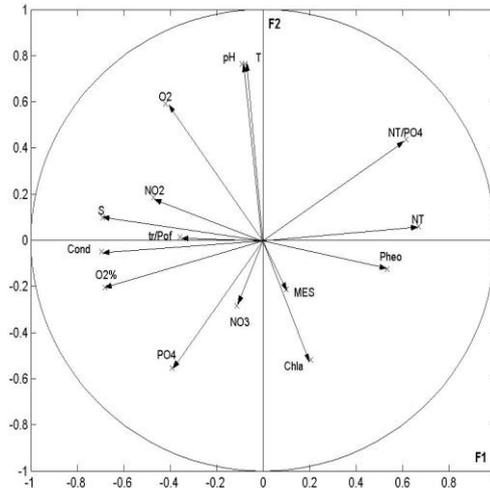


Figure 21: Projection des paramètres hydrobiologiques sur le plan des deux premiers facteurs.

4. La classification des variables

Afin d'identifier les paramètres hydrobiologiques bien corrélés avec les premiers axes factoriels, la MVE est utilisée (Escoufier, 1970). La sous-matrice avec les paramètres sélectionnés devrait comporter la plupart de la variance totale des données complètes. Les paramètres sont ordonnés selon leurs variances expliquées par ordre décroissant, par la suite la sélection du groupe de variables se fait selon un seuil identifié en tant que palier de variance cumulée. Le résultat de la méthode MVE est présentée sur la Figure 22, elle montre la variance cumulée selon l'incrément de chaque paramètre.

La première partie de la courbe à forte pente détermine les paramètres à forte contribution à la variance totale. Ainsi, au seuil de 95% de la variance totale, la salinité (*S*), le *pH*, l'azote total (*NT*), la transparence (*Tr/Prof*), la chlorophylle-*a* (*Chla*) et la conductivité (*Cond*) sont les paramètres important à retenir. Nous rappelons que les prélèvements ont été effectués en hiver, il est par conséquent attendu de trouver la salinité et l'azote total parmi les premiers paramètres significatifs de la lagune en période hivernale. Il faut noter que cette classification des paramètres est relative à la période hivernale et sujette de changer en période estivale, par exemple.

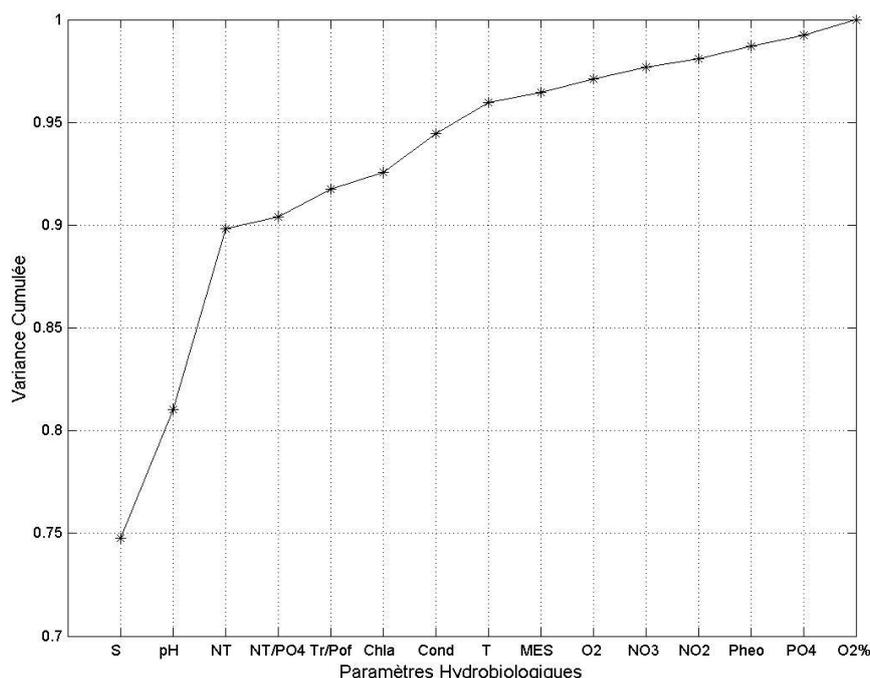


Figure 22 : Pourcentage de la variance de chaque paramètre cumulée selon la méthode MVE

DISCUSSIONS

L'objectif de cette étude est de caractériser la lagune de Bizerte à travers les mesures hydrobiologiques effectuées au mois de janvier et à travers une analyse numérique combinant l'ACP et la CHA.

La variation spatiale des paramètres hydrobiologiques montre qu'elle est liée essentiellement aux apports pluviaux, urbains et industriels. Ces paramètres mettent en évidence que le goulet et le secteur Sud-ouest de la lagune présentent des symptômes de pollution.

Le rapport NO_3/PO_4 témoigne de l'état du milieu. En effet, ce rapport est compris entre 0.8 et 3, inférieur au rapport de Riedfield qui est égal à 16. Il semble que le milieu est déficitaire plutôt de l'azote inorganique que du phosphore inorganique malgré l'abondance de la matière azotée dans la lagune. Les proportions des nutriments sont différentes des proportions normalement enregistrées dans des milieux similaires.

Les mesures de la concentration des eaux en ammonium effectuées par l'INSTM (2002) révèlent des valeurs comprises entre 10 et 102 mgN/m^3 . Ces valeurs sont en faveur d'un milieu plutôt propre, cet effet résistant de la lagune contre la pollution est conséquence des échanges importants avec la mer.

Les concentrations en chlorophylle-a trouvées dans la lagune de Bizerte varient entre 0,8 et 5 mg/m^3 . Bien que ces concentrations ne permettent pas de donner une classification définitive (mesures ponctuelles

dans le temps) de la lagune, cependant nous pouvons considérer, en se basant sur l'étude de Hammami (2005), que la lagune est oligo-eutrophe (OCDE, 1982). Cette étude a relevé des concentrations de chlorophylle-a comprises entre 6 et 9 mg/m^3 en période printanière de l'an 2002.

L'analyse numérique appliquée a permis de mettre en évidence quatre zones. Une zone à influence marine comprenant le goulet (y compris le chenal de navigation), une zone côtière, la zone conchylicole située à Menzel Jemil et la zone centrale de la lagune. Les données hydrobiologiques brutes ont été transformées pour satisfaire la multinormalité des variables qui est une condition nécessaire pour l'application des méthodes statistiques. La pré-transformation des données type logarithme apparaît comme étape nécessaire pour satisfaire cette dernière condition.

La MVE effectuée a permis de classer les paramètres hydrobiologiques mesurés selon l'importance de variance. Ainsi, la salinité, le pH, la conductivité et l'azote total se trouvent en haut de l'échelle. Cette méthode a permis de mettre en relief quelques constatations qui sont difficilement décelable par une analyse brute des données. Une variation spatiale du pH bien qu'elle soit relativement faible s'avère importante quant à la discrétisation des stations.

Nous retenons qu'en période hivernale la lagune peut être subdivisée en quatre régions réparties principalement en fonction des apports fluviaux. Une

cartographie sera tracée dans un travail ultérieur en tenant compte du calcul de la probabilité d'appartenance des stations aux différents groupes de stations de la lagune pour une meilleure discrétisation.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été soutenue par Ministère de l'Agriculture de l'Environnement et des Ressources Hydrauliques (MAERH). Elle a été confiée aux groupements de Bureaux d'Etudes : COMETE-Engineering (CE) et Ingénierie de l'Hydraulique et de l'Environnement (IHE). Nous remercions la Direction Général de l'Environnement et de la Qualité de la Vie (DGEQV) de nous avoir autorisé d'exploiter les données hydrobiologiques.

BIBLIOGRAPHIE

- ANPE, 1990 : Etude préliminaire de l'écologie du lac de Bizerte. Etude réalisée par groupement de bureau d'études GIC, CNEA et TECI pour le compte de l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE), 100 p.
- ANPE, 1994 : Etude pour la sauvegarde du parc national de l'Ichkeul. Etude réalisée par le groupement de bureau d'études BCEOM, FRESINIUS CONSULT, CES SALZGITTER et STUDI pour le compte de l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE), Rapport de 3^{ème} Partie, pp. 18-258.
- Ben Charrada Rafik, 1997 : Etude hydrodynamique et écologique du complexe petit golfe-lac de Tunis. Contribution à la modélisation de l'écosystème pélagique des eaux côtières-petit golfe de Tunis. Thèse de spécialité en génie hydraulique. ENIT-Département 'hydraulique, 406 p.
- Ben Hamadou R., Ibanez F., Souissi S. and Cathelineau A. C., 2001 : Spatial analysis of hydrological and phytoplanktonic data of Bay of Tunis, Multivariate cartography. *Mediterranean Marine Science*, Vol. 2/2, pp. 67-85.
- Cpoin-Montégut G., 1996 : Chimie de l'eau de Mer. Institut Océanographique-Paris/Collection synthèses, 314 p.
- Dagnelie P., 1975 : L'analyse statistique à plusieurs variables. *Les Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux (Belgique)*, 362 p.
- MAERH (Ministère de l'Agriculture, de l'Environnement et des Ressources Hydrauliques), 2003 : Etude sur la dépollution industrielle dans le bassin versant du lac de Bizerte. Etude réalisée par le groupement de bureaux d'études COMETE-Engineering et IHE pour le compte du MAERH.
- Esoufier Y., 1970 : Echantillonnage dans une population de variables réelles. *Pub. Inst. Stat. Univ. Paris*, 19, pp. 1-47.
- Escofier B. et Pagès J., 1990 : Analyses factorielles simples et multiples. Objectifs, méthodes et interprétation, édition DUNOD, 287 p.
- Hammami J., 2005 : Géochimie des éléments nutritifs dans les eaux de la lagune de Bizerte (Tunisie Nord-Orientale). DEA/FST-Département de géologie, 130 p.
- INSTM, 2002 : Etat actuel et évolution de l'exploitation halieutique et aquacole des lagunes Cas de la lagune de Bizerte. Programme de Recherche dans le cadre de Contrat Programme pour la période allant de 1998 à 2001. SERST-Rapport final.
- Legendre P. & Legendre L., 1998 : Numerical ecology. *Elsevier Science B. V. Amsterdam*, 385 p.
- Mahalanobis P. C., 1936 : On the generalized distance in statistics. *Proc. Natl. Sci. India* 2, pp. 49-55.
- OCDE, 1982 : Eutrophisation des eaux : Méthodes de surveillance, d'évaluation et de lutte. Org. for Economic Cooperation and Development.