

La lagune de Ghar El Melh : Diagnostic écologique et perspectives d'aménagement hydraulique

Ghar El Melh lagoon: Ecological diagnoses and future hydraulic restoration

M. MOUSSA^{1*}, L. BACCAR², R. BEN KHEMIS²

Reçu le 28 octobre 2003, accepté le 4 mai 2004**.

SUMMARY

The Ghar El Melh lagoon is a Mediterranean water body, situated in North-eastern Tunisia, on the Northwestern side of the Gulf of Tunis. The Ghar El Melh lagoon is a vestigial part of the Utique Sea, and this lagoon was largely open at the time of the Roman invasion. Due to a combination of the shape of the coastline and alluvium deposits from the Medjerda River, this small gulf has become progressively closed from the Utique Sea, causing the lagoon to become progressively shaped to its present morphology. The coastal barrier separating the lagoon from the Mediterranean Sea was interrupted, allowing a permanent hydraulic communication across a local opening. The lagoon has an elliptical shape of approximately 28.5 km² and an average depth of ~0.8 m. Due to human activities within the lagoon itself and in the surrounding area, the lagoon ecosystem has suffered a progressive deterioration. This deterioration has led to a reduction in biodiversity resulting mainly in a decrease in fish resources and production.

In order to improve the water quality of the lagoon for ecological and economical purposes, a diagnostic survey was carried out to characterize the present site conditions and to provide data for calibration of hydrodynamic and ecological models. The main results of the annual survey of biotic and non-biotic parameters demonstrated the existence of zones within the lagoon, with some seasonal variation. Thus, a decreasing biotic and non-biotic gradient was measured from the area of the lagoon under marine influence towards the bottom of the lagoon, under the continental and anthropogenic influence of the west side. The lagoon could be considered hypereutrophic with an annual average concentration of total phosphorus of 350 mg/m³.

In order to conceptualize and optimise hydraulic structures for water quality improvement in the lagoon, a numerical model of the velocity fields (depth

1. École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Labo. Hydraulique, BP 37, Le Belvédère, 1002 Tunis, Tunisie. Tél. : 216 71 874 700, Fax : 216 71 872 729.
2. Éco-Ressources International, avenue Taieb-Mhiri, immeuble 4, appart. 2, 2080 Ariana, Tunisie, Tél. : 216 71 704 910, Fax : 216 71 704.682.

* Correspondance : Mahmoud.moussa@enit.rnu.tn - Eco.Ressources@planet.tn

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 31 mai 2006.

averaged) and water depth was used. The hydrodynamic model used was bi-dimensional, adapted for use in shallow lagoons. After model calibration using in-situ measurements, simulations were carried out to analyse the present hydrodynamic condition of the lagoon. Several stagnation zones were detected, which contributed to the altered water quality that was observed. Several management practices were proposed and simulated, aiming to control and improve the internal circulation and water exchange between the lagoon and the Mediterranean Sea. The main goal of these simulations was to improve water mobility inside the lagoon, and thus improve the water quality. The proposed hydraulic development measures consisted mainly of the creation of a new hydraulic communication in the south-eastern area of the lagoon, by dredging the south part of the lake or by channel creation in front of the new communication, reaching the stagnation zones of the lagoon. The impact assessment of the proposed development was verified with simulations using the bi-dimensional hydrodynamic model.

An ecological model based on nitrogen and phosphorus cycling, was also developed for Ghar El Melh lagoon. It took into account one ecological compartment, the macro algae, that included *Cladophora* sp., *Ulva* sp. and *Enteromorpha* sp. Algae (A), inorganic nitrogen (NA), inorganic phosphorus (PA), organic nitrogen (NEorg) and organic phosphorus (PEorg), were the main variables of this model. After calibration of the model, a 10-yr simulation showed that all variables demonstrated a steady behaviour and that the lagoon eutrophication level remained. Model sensitivity analysis allowed the choice of some restoration scenarios and the prediction of their impacts on the ecological behaviour of the ecosystem. The simulations showed that wastewater load deviation combined with an increase in the sea-lagoon water exchange, instead of a decrease of nutrient diffusion from the sediments, led to a substantial decrease in the eutrophication level of the lagoon. Indeed, the annual average nutrient concentrations decreased from 270 to 60 mg/m³ for total nitrogen and from 350 to 20 mg/m³ for total phosphorus in the Ghar El Melh lagoon.

Keywords: lagoon, Ghar El Melh, Tunisia, ecology, nutrients, hydrodynamic, model, simulation.

RÉSUMÉ

La lagune de Ghar El Melh, située au Nord de la Tunisie (dans le Golfe de Tunis), est caractérisée par une superficie de 28,5 km², une faible profondeur et une faible communication avec la mer. Actuellement, sous l'effet des actions anthropiques (les rejets terrestres), elle connaît une dégradation progressive de la qualité de ses eaux et sédiments dont les conséquences sont la chute de la richesse biologique et la réduction des ressources halieutiques de la lagune.

Dans ce travail, nous présentons les résultats de l'analyse des caractéristiques physico-chimiques et biologiques des eaux de la lagune. Ces analyses montrent bien l'hyper-eutrophisation du milieu caractérisé par de fortes concentrations des eaux en azote total et en phosphore total. Les résultats de simulation du fonctionnement hydrodynamique, que nous avons réalisée à l'aide d'un modèle à 2 dimensions intégré sur la hauteur, montrent une stagnation des eaux dans environ 80 % de surface de la lagune qui a fortement amplifié la dégradation de la qualité de l'écosystème. Parmi plusieurs scénarios d'aménagements simulés, nous proposons la création d'une nouvelle communication avec la mer dont la simulation hydrodynamique montre une nette augmentation des échanges d'eau mer-lagune. Nous présentons ensuite un modèle écologique homogène de la lagune de Ghar El Melh qui a été mis au point et calibré en s'appuyant sur les mesures de terrain. Les simulations, avec ce modèle, montrent que l'arrêt total des rejets terrestres et la création

d'un nouveau grau réduisent considérablement l'eutrophisation du milieu ce qui conduiraient certainement à une nette amélioration de la production halieutique dans la lagune.

Mots clés : lagune, Ghar El Melh, Tunisie, écologie, sels nutritifs, hydrodynamique, modèle, simulation.

1 – INTRODUCTION

En Tunisie, les milieux lagunaires sont d'une grande importance écologique et économique. Ils couvrent une surface totale proche de 1 100 km² et sont répartis sur l'ensemble du littoral du Nord au Sud. Leur importance réside dans leur potentiel de productivité biologique. Actuellement, les lagunes tunisiennes, sous l'effet d'une anthropisation plus ou moins poussée, connaissent des crises de dégradations environnementales.

La lagune de Ghar El Melh n'en fait pas exception, elle connaît, suite aux actions anthropiques sources de pollution (rejets d'eaux usées domestiques et industrielles, rejets du système de drainage et de l'activité de la pêche), une régression de sa biodiversité et en particulier la réduction des ressources halieutiques, conduisant à la chute des revenus de la pêche. À cela, s'ajoute l'effet des perturbations naturelles (envasement de la lagune et particulièrement l'ensablement de la communication avec la mer) qui ont entraîné l'altération de l'hydrodynamisme de la lagune suite au ralentissement de la circulation et du renouvellement des eaux. Toutes ces actions ont engendré la dégradation de la qualité des eaux et des sédiments se matérialisant par une hyper-eutrophisation du milieu et conduisant ainsi à l'altération de l'équilibre biologique de la lagune. En effet, la production de la pêche dans ce milieu a chuté de 200 tonnes en 1993 à 26 tonnes seulement en 1996. Une action d'urgence de dragage de la passe dite « *El Boughaz* » (la seule communication de la lagune avec la mer), a été entreprise en 1996 et a eu pour effet l'amélioration de la circulation et de la qualité des eaux de la lagune ainsi que sur la production de la pêche, sans pour autant rétablir l'équilibre écologique initial du milieu.

Devant cette situation de déséquilibre écologique et économique du milieu, une étude pluridisciplinaire a été lancée par le Ministère de l'Agriculture (Tunisie) en vue de réhabiliter cet écosystème à des fins halieutiques. C'est dans la poursuite de cette étude que s'inscrit le présent travail, dans lequel nous présentons les principales caractéristiques de la lagune ainsi que les résultats des simulations hydrodynamique et écologique.

2 – PRÉSENTATION DE LA LAGUNE DE GHAR EL MELH ET DE SA RÉGION

La lagune de Ghar El Melh est située au nord de la Tunisie et au Nord-ouest du Golfe de Tunis entre le 10°08' et le 10°15' de longitude Est et entre le 37°06' et le 37°10' de latitude Nord (figure 1). Elle porte le nom d'un petit village situé au nord et au pied d'un chaînon orienté est-ouest. Cette lagune est en réalité un complexe lagunaire résultant de l'évolution du littoral, dans l'ancien golfe d'Utique, qui n'a cessé d'avancer dans la mer depuis les temps les plus reculés. La superficie totale de ce plan d'eau est d'environ 28,5 km² et la profondeur moyenne est de 0,8 m. La lagune communique avec la mer par un seul grau, à l'est, appelé « **El Boughaz** » dont la largeur est de 85 m et la profondeur moyenne est de 2,5 m. Ce grau souffre d'un ensablement continu par des dépôts de sables marins au niveau du cordon littoral. La dernière opération de dragage de cette passe date de 1996.

Le levé bathymétrique le plus récent, réalisé en 2000 (SCET-ERI, 2000), est illustré par la carte de la figure 2. Cette carte montre que la lagune est peu profonde : la profondeur d'eau varie de 0,2 m à 3,8 m, avec une moyenne de 0,8 m. Actuellement, du fait du déplacement de l'embouchure de la rivière Medjerda vers le Sud, qui autrefois s'y déversait, et avec les constructions des barrages sur son cours amont, les apports alluviaux ont nettement diminué et le niveau du fond de la lagune tend à se stabiliser. Le volume moyen d'eau dans la lagune est alors de l'ordre de 25 000 000 m³.

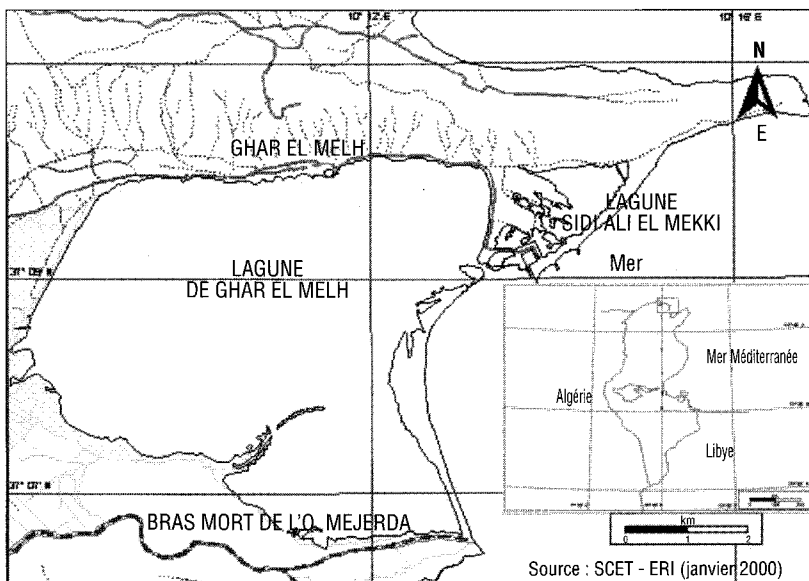


Figure 1 Situation de la lagune de Ghar El Melh.
Location of the Ghar El Melh lagoon.

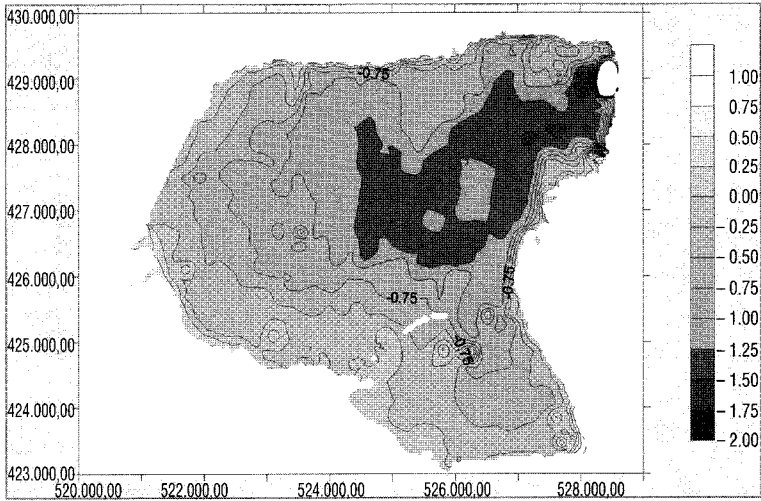


Figure 2 Localisation de la lagune de Ghar El Melh dans le repère géographique tunisien et sa carte bathymétrique.

Location of the Ghar El Melh lagoon, in the Tunisian geographic reference, and its bathymetric map.

La région de la lagune de Ghar El-Melh est considérée comme semi-aride, caractérisée par une pluviométrie moyenne de 540 mm/an. Les précipitations sont souvent orageuses et irrégulières. Cependant, l'évaporation est plus importante, avec une moyenne annuelle de 1450 mm/an. La lagune de Ghar El Melh draine un petit bassin versant de superficie 131 km². Le volume moyen de ruissellement est de 4 500 000 m³/an, ce qui est faible par rapport au volume de la lagune. Les vents dominants sont du secteur Ouest et leur intensité dépasse rarement les 10 m/s. Au niveau de la mer, dans le Golfe de Tunis, la marée dominante est de type semi-diurne et d'amplitude faible (de 0,08 m à 0,22 m, avec une moyenne de 0,15 m).

3 – DIAGNOSTIC ÉCOLOGIQUE DE LA LAGUNE

Durant une année (de juin 1999 à mai 2000), nous avons réalisé des mesures mensuelles dans 10 stations réparties dans toute la lagune. Ces mesures (ou analyses) ont concerné la qualité des eaux (salinité, température, sels nutritifs, Chlorophylle-a, transparence, oxygène dissous, pH), la qualité des sédiments (granulométrie, sels nutritifs) ainsi que le compartiment biologique algal (les macro-algues) (BEN KHEMIS, 2003). Dans ce qui suit, nous allons présenter brièvement le matériel et les méthodes de mesures ainsi que les principales conclusions de ces analyses.

3.1 Matériel et méthodes de mesures

La qualité des eaux a été caractérisée mensuellement, au niveau de 10 stations réparties sur l'ensemble du plan d'eau, par des mesures in situ et des analyses au laboratoire d'échantillons prélevés.

- **Mesures in situ** : Les mesures de terrain ont concerné la température, la concentration en oxygène dissous, la salinité, le pH et la transparence des eaux : La température des eaux et l'oxygène dissous à l'aide d'un thermoxymètre, la salinité à l'aide d'un salinomètre, le pH à l'aide d'un pH-mètre et la transparence à l'aide d'un disque de Secchi.
- **Analyses de laboratoire** : En laboratoire, les analyses des sels nutritifs concernent le nitrite, le nitrate, l'azote ammoniacal, l'azote organique, l'orthophosphate et le phosphore total. Ces paramètres sont analysés par filtration ou photométrie, distillation et/ou minéralisation, ensuite par différentes réactions en utilisant comme réactifs des tests kits préalablement préparés.
- **Mesures de la Chlorophylle-a** : La mesure de la concentration en Chlorophylle-a a été réalisée par filtration sur un filtre de fibre en verre borosilicate, conservation et extraction dans l'éthanol, et détermination par photométrie.
- **Mesures des macrophytes** : La cartographie des surfaces d'extension des peuplements phytobenthiques a été réalisée par GPS. L'estimation de la phytomasse épigée a été effectuée, dans plusieurs stations, sur des surfaces de 0,25 m² à l'aide de quadra métallique, et la phytomasse endogée sur des surfaces de 0,02 m² à l'aide de cylindre en plastique placé sur le fond. Après l'échantillonnage, des déterminations et des mesures sont réalisées au laboratoire.

3.2 Résultats des mesures

La salinité des eaux de la lagune varie de 36 g/l en hiver, suite aux pluies, à 51 g/l en été, à cause de la forte évaporation. La variation mensuelle de la température des eaux suit globalement, avec un décalage d'environ 3 °C, celle de la température de l'air. Ceci montre en effet la sensibilité du milieu à l'ensoleillement à cause de la faible hauteur d'eau. La transparence relative des eaux (transparence sur la hauteur d'eau) varie de 0,3 en cas de fort vent à 0,8 par temps calme. Les eaux sont généralement troubles et, bien que la hauteur d'eau soit faible, le fond n'est pas visible de la surface. Les teneurs moyennes en oxygène dissous varient de 6 mg/l en juin à 14 mg/l en janvier (SCET-ERI, 2000).

Les concentrations moyennes des eaux en azote total varient entre 60 mg/m³ en janvier et 1080 mg/m³ en juillet, avec une moyenne annuelle de 270 mg/m³. Comme le montre la figure 3, la forme organique de l'azote prédomine et constitue environ 75 % de l'azote total. La partie minérale est surtout constituée par l'ammoniaque (14 %), ce qui indique que le processus d'oxydation de l'azote est défavorisé. Les mesures du phosphore total montrent que les teneurs moyennes varient entre 30 mg/m³ en mai et 960 mg/m³ en août. Les orthophosphates n'en représentent en moyenne annuelle que 14 %. Avec une moyenne annuelle de la concentration en phosphore total de 350 mg/m³, l'abaque de l'OCDE (1982) indique que le milieu est **hypereutrophe** avec une probabilité de **87 %**. Les concentrations moyennes en Chlorophylle-a varient

de 2,2 mg/m³ en février à 54 mg/m³ en août. En été, l'enrichissement du milieu s'explique par l'approche de la température optimale de croissance du phytoplancton. Les macrophytes, composées principalement de phanérogames et d'algues nitrophiles, couvrent 96 % de la surface de la lagune. Les espèces dominantes sont la *Ruppia cirrhosa* et la *Cladophora sp.* L'apparition de ces espèces est récente et témoigne de l'importante dégradation de la qualité des eaux de la lagune. Par ailleurs, notons que ces mêmes tendances ont été observées dans les sédiments et dans les eaux interstitielles et confirmées par ADDED (2002) : Les orthophosphates entre 0,4 et 13 mg/kg de sédiments, l'azote organique entre 110 et 2 500 mg/kg et l'ammonium entre 6 et 16 mg/kg.

En ce qui concerne la répartition spatiale, une forte hétérogénéité du milieu est observée. En effet, les zones les plus éloignées de la communication avec la mer (les parties Ouest et Sud de la lagune) sont les plus polluées (Fortes concentrations en azote, en phosphore, en Chlorophylle-a et en macroalgues ; Faibles transparence et concentrations en oxygène dissous). À titre indicatif, la figure 4 montre la répartition spatiale de l'azote total dans la lagune de Ghar El Melh en été.

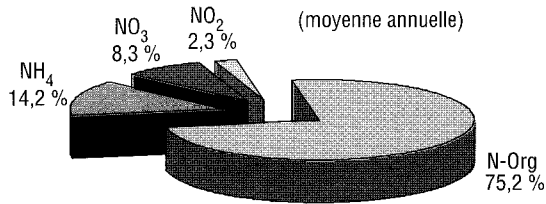


Figure 3 Différentes formes de l'azote dans les eaux de la lagune de Ghar El Melh.
Different forms of nitrogen in the waters of the Ghar El Melh lagoon.

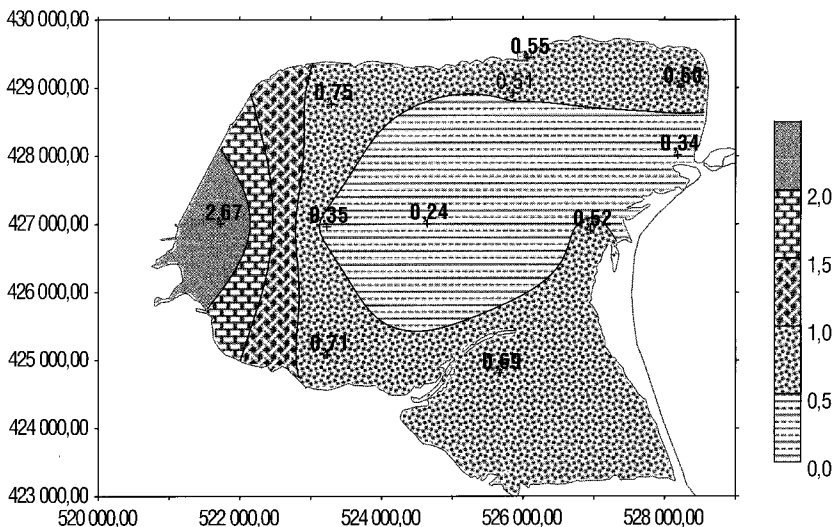


Figure 4 Répartition spatiale de l'azote total dans les eaux de la lagune, en été (g/m³).
Summer distribution of total nitrogen concentrations in the lagoon waters (g/m³).

4 – SIMULATION DE L'HYDRODYNAMIQUE DE LA LAGUNE

Pour analyser le fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Ghar El Melh, nous avons réalisé des simulations à l'aide du logiciel **MEPHYD** à 2 dimensions, intégré sur la hauteur, (BEN CHARRADA et MOUSSA, 1997). Ce modèle, qui résout les équations de l'hydrodynamique en utilisant la méthode des éléments finis, est bien adapté aux milieux peu profonds et non stratifiés comme la lagune de Ghar El Melh. Il calcule l'évolution spatio-temporelle du vecteur vitesse et de la hauteur d'eau en fonction des conditions aux limites (rejets, marée) et des forçages externes (vent, évaporation, pluie). L'hydrodynamique de la lagune est principalement contrôlée par le vent et la marée. Des mesures des débits échangés avec la mer, réalisées au niveau de la communication, nous ont permis le calage du modèle (ajustement des coefficients de Chézy et de frottement dû au vent). Les simulations de l'état actuel de la lagune montrent que les échanges avec la mer dépendent de la marée : Remplissage de la lagune en marée ascendante et vidange en marée descendante. Avec une marée moyenne, le débit échangé avec la mer atteint $90 \text{ m}^3/\text{s}$ et le volume total des échanges est de $3\,100\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$. Le temps moyen de renouvellement des eaux de la lagune est alors de 8,2 jours (AYADI et BEN ISMAIL, 2000). Ce temps de renouvellement n'est pas significatif dans ce cas, puisque les simulations montrent que les vitesses à l'intérieur de la lagune ne sont pas homogènes. En effet, la **stagnation** des eaux affecte environ **80 %** de la superficie de cette dernière (figure 5), ce qui a amplifié la dégradation de la qualité dans ces zones.

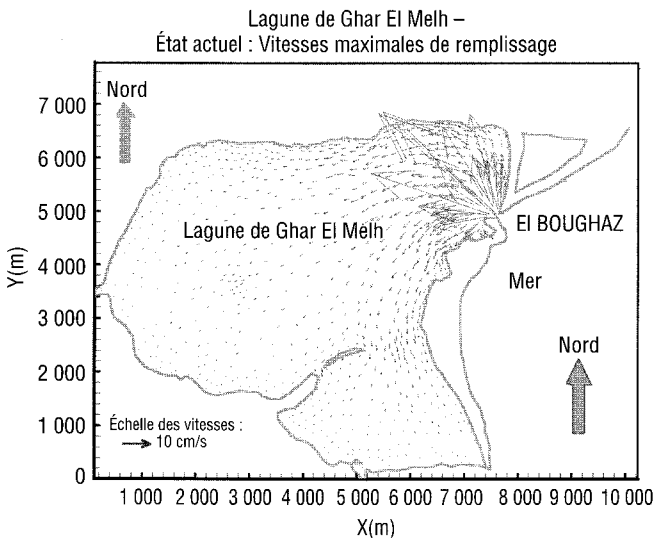


Figure 5 Vitesses dans la lagune de Ghar El Melh en marée ascendante.
Water velocity field inside Ghar El Melh lagoon at ascending tide.

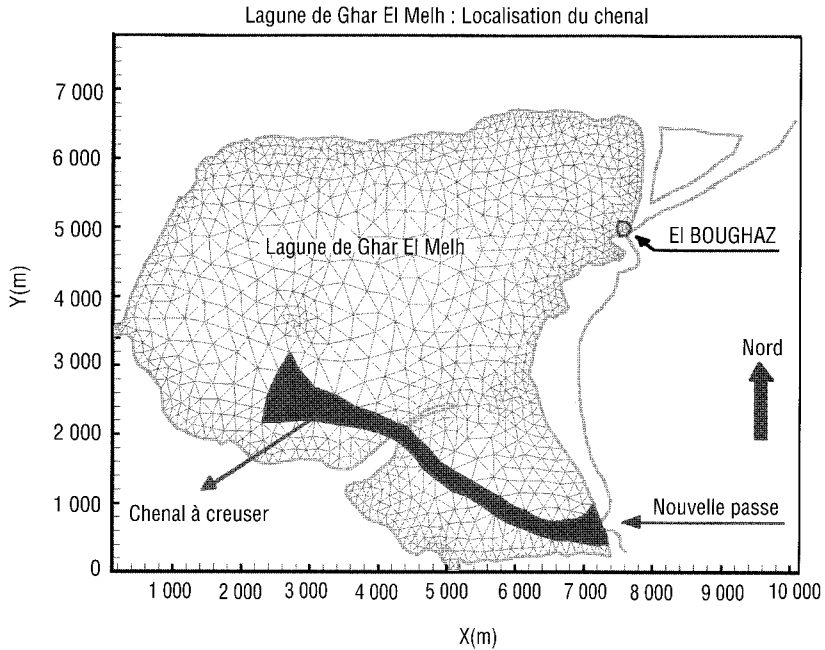


Figure 6 Aménagement proposé de la lagune de Ghar El Melh.
Proposed development of the Ghar El Melh lagoon.

Pour tenter d'améliorer le fonctionnement hydrodynamique de la lagune, nous avons proposé et simulé plusieurs scénarios d'aménagement : Élargissement de la communication actuelle, création d'une nouvelle passe au Sud, dragage de la partie sud de la lagune, aménagement d'un chenal central. Ces aménagements ont été simulés séparément et combinés. Les prédictions du modèle nous ont permis de proposer l'aménagement optimum : La création d'une nouvelle communication de 120 m de large au sud de la lagune, et le dragage d'un chenal en face de 5 km de long, de 200 m de large et de 2 m de profondeur (figure 6). En effet, les simulations de ces aménagements montrent que, avec une marée moyenne, le débit échangé avec la mer atteindra $170 \text{ m}^3/\text{s}$ et le volume total des échanges sera de $5\,300\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$, ce qui ramènera le temps moyen de renouvellement des eaux à 4,8 jours seulement. En plus de cette nette amélioration des échanges, soit une augmentation des échanges de 70 %, ces aménagements permettront d'améliorer considérablement la répartition des vitesses à l'intérieur de la lagune. En effet, la stagnation des eaux n'affectera qu'environ 25 % de la lagune seulement (figure 7). Ces aménagements permettront certainement de contribuer à l'amélioration de la qualité des eaux et l'augmentation de la production halieutique.

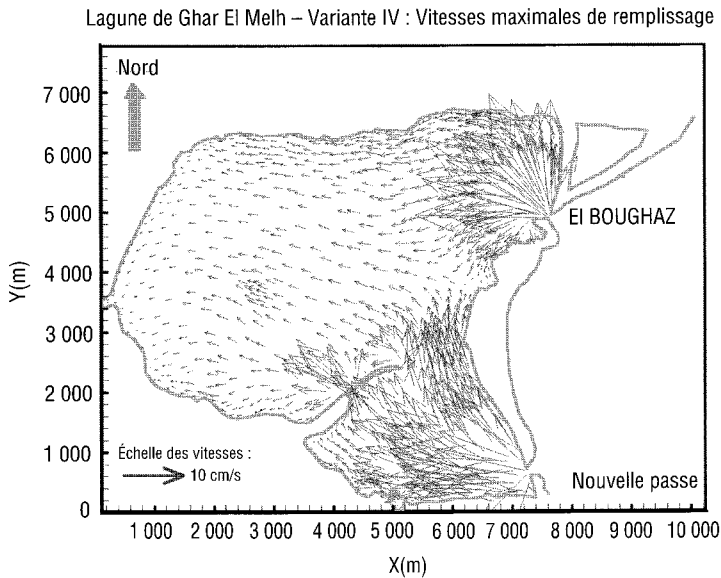


Figure 7 Vitesses dans la lagune en marée ascendante, après aménagement.
Velocity field inside the lagoon, after development, at ascending tide.

5 – SIMULATION DU FONCTIONNEMENT ÉCOLOGIQUE DE LA LAGUNE

Nous avons ensuite mis au point un modèle écologique pour tenter de prédire l'évolution de la qualité des eaux de la lagune avec et sans aménagements. Un modèle homogène à niveau trophique condensé (à une seule espèce d'algue) a été choisi. Ceci est justifié par la stagnation des eaux dans la majorité de la surface de la lagune d'une part, et par la dominance d'algues nitrophiles d'autre part.

Ce modèle, bien qu'il soit simplifié, est à 7 variables d'état : Les macroalgues (notées **A**), l'azote minéral (**NA**), l'azote organique (**NEorg**), l'azote cellulaire dans les algues (**NCA**), le phosphore minéral (**PA**), le phosphore organique (**PEorg**) et le phosphore cellulaire dans les algues (**PCA**). Les équations du modèle décrivent l'évolution temporelle de ces 7 variables en fonction des forçages externes (température, intensité lumineuse, rejets terrestres, échanges avec la mer, échanges avec les sédiments du fond).

L'équation de l'évolution temporelle des algues est la suivante :

$$\frac{dA}{dt} = (CA - MA) A \quad (1)$$

Dans laquelle CA est le taux de croissance des algues (qui dépend de la température de l'eau, de l'intensité lumineuse, de la disponibilité de la matière minérale et de l'auto-ombrage des algues) et MA est leur taux de mortalité qui dépend seulement de la température. La température des eaux et l'intensité lumineuse ont été déterminées par des lissages sinusoidaux des mesures.

L'évolution temporelle de la matière organique est décrite par les équations suivantes :

$$\frac{dNA}{dt} = MIN_N \cdot NEorg - V_N \cdot A + NA_{sed} + NA_{in} - NA_{out} \quad (2)$$

$$\frac{dPA}{dt} = MIN_P \cdot PEorg - V_P \cdot A + PA_{sed} + PA_{in} - PA_{out} \quad (3)$$

Où MIN_N et MIN_P représentent les taux de minéralisation de l'azote organique et du phosphore organique qui dépendent de la température, V_N et V_P sont les taux d'assimilation de l'azote minéral et du phosphore minéral par les macroalgues (qui dépendent de la disponibilité de la matière minérale et des quotas cellulaires internes des algues en azote et en phosphore suivant JØRGENSEN *et al.*, 1978), l'indice « *sed* » désigne la libération de la matière inorganique à partir des sédiments du fond, et les indices « *in* » et « *out* » désignent respectivement les entrées (terrestres et marines) et les sorties vers la mer.

Les équations de l'évolution temporelle de la matière organique sont :

$$\frac{dNEorg}{dt} = MA \cdot NCA - (MIN_N + SED_N) NEorg + NEorg_{in} - NEorg_{out} \quad (4)$$

$$\frac{dPEorg}{dt} = MA \cdot PCA - (MIN_P + SED_P) PEorg + PEorg_{in} - PEorg_{out} \quad (5)$$

Où le premier terme du second membre représente la matière organique libérée par la mortalité des algues, et le terme SED représente le taux de sédimentation de la matière organique.

L'évolution de l'azote cellulaire et du phosphore cellulaire dans les algues dépend de l'assimilation de la matière minérale et de la mortalité de ces macroalgues :

$$\frac{dNCA}{dt} = V_N \cdot A - MA \cdot NCA \quad (6)$$

$$\frac{dPCA}{dt} = V_P \cdot A - MA \cdot PCA \quad (7)$$

Ce système de 7 équations du modèle est résolu numériquement par un schéma de discrétisation temporelle explicite. Le pas de temps que nous avons adopté est de 1 jour. Les valeurs initiales des variables sont celles mesurées en juin 1999. Le calage de ce modèle, en s'appuyant sur les mesures réalisées in situ, nous a permis d'ajuster les valeurs des paramètres utilisés dans les équations du modèle (BEN KHEMIS, 2003).

Une série de tests de sensibilité du modèle nous a permis de dégager que les rejets terrestres, les échanges avec la mer et avec les sédiments du fond sont les facteurs déterminants vis-à-vis de l'évolution des paramètres écologiques du milieu. Ce modèle a été aussi utilisé pour prédire l'évolution de l'état de la lagune de Ghar El Melh, à travers l'évolution des 7 variables du modèle, et ce durant les 10 suivantes années (2000-2009). Les résultats de ces simulations montrent que, dans les conditions actuelles de la lagune, l'état de la lagune de Ghar El Melh restera stable et risquera de se dégrader d'avantage si les rejets terrestres augmentent, ou si les échanges avec la mer diminuent suite à l'envasement éventuel de la seule communication avec le golfe de Tunis.

Des simulations ont été ensuite réalisées pour prédire l'évolution de l'état écologique de la lagune suite à quelques actions et/ou aménagements visant l'amélioration de la qualité des eaux. Parmi ces actions simulées nous citons : Déviation des rejets terrestres pollués, création d'une nouvelle passe au Sud, aménagement d'un chenal central, dragage des sédiments du fond. La simulation de chacune de ces actions, seule, montre que la lagune resterait hypereutrophe. En effet, la couche superficielle des sédiments est tellement riche en nutriments, qui se sont accumulés au fil des années, pour maintenir la lagune à ce niveau d'eutrophisation, par la libération de la matière minérale dans la colonne d'eau. Même la combinaison de quelques actions ne serait pas suffisante pour améliorer considérablement l'état de la lagune.

Cependant, les résultats des simulations montrent que la création d'une nouvelle communication au sud et l'aménagement du chenal central (figure 6), accompagnés d'un arrêt total des rejets terrestres et le dragage de la couche superficielle des sédiments pollués (environ 20 cm d'épaisseur), amélioreraient considérablement l'état de la lagune. En effet, avec ces actions, le modèle prédit la disparition des algues nitrophiles, une concentration moyenne annuelle en azote total de 60 mg/m^3 (soit une réduction de 78 % par rapport à l'état actuel) et une concentration moyenne annuelle en phosphore total de 20 mg/m^3 (soit une réduction de 94 %). En effet, les nutriments sont évacués rapidement, au bout de quelques années, vers la mer à cause de l'augmentation des échanges suite à l'aménagement hydraulique, ce qui engendre une chute du développement des macro-algues nitrophiles. Avec cette concentration en phosphore total, l'abaque de l'OCDE (1982) indique que le milieu serait **mésotrophe** à 52 % et **oligotrophe** à 40 %. Quelques résultats de cette simulation sont présentés sur les figures 8 et 9, qui montrent l'évolution temporelle des macroalgues et du phosphore total dans la lagune et ce durant les 10 années à partir de la fin des travaux d'aménagement (notée année « 99 »). Ainsi, le milieu ne serait plus eutrophe, la qualité des eaux ainsi que la richesse halieutique du milieu s'amélioreraient considérablement, ce qui conduirait certainement à l'augmentation des captures de la pêche dans la lagune.

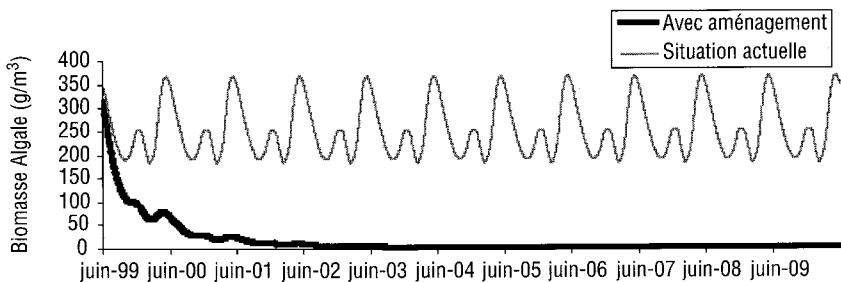


Figure 8 Évolution temporelle des macroalgues dans la lagune de Ghar El Melh.

Temporal variation of macro algae in the Ghar El Melh lagoon (under present conditions and after restoration).

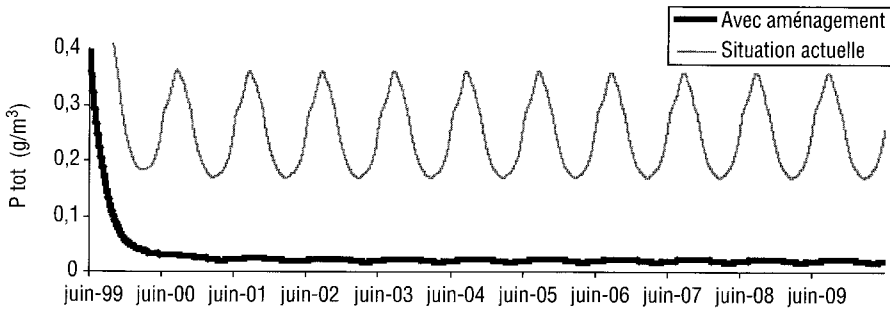


Figure 9 Évolution temporelle du phosphore total dans la lagune de Ghar El Melh.

Temporal variation of total phosphorus concentrations in the Ghar El Melh lagoon (under present conditions and after restoration).

6 – CONCLUSIONS

Le diagnostic de la lagune de Ghar El Melh montre que le milieu est hyper-eutrophe. Cet état est généré principalement par les divers rejets terrestres. La stagnation des eaux, dans environ 80 % de la surface de la lagune, a énormément amplifié cette dégradation de la qualité des eaux. Les simulations de l'hydrodynamique nous ont permis de proposer des aménagements permettant d'améliorer les échanges avec la mer ainsi que la circulation dans la lagune. Ces aménagements, avec l'arrêt total des déversements et le dragage de la couche superficielle des sédiments de lagune, transformeraient le milieu d'un hypereutrophe à mésotrophe - oligotrophe. Ce résultat a été prédit par le modèle écologique que nous avons mis au point. Les perspectives de développement de ce travail concernent notamment la mise au point d'un modèle écologique plus complet (modèle à plusieurs niveaux trophiques), et ensuite un modèle spatio-temporel, couplé avec l'hydrodynamique, qui permet de tenir compte de l'hétérogénéité spatiale de la lagune.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADDED A., 2002. Cycles bio géochimiques des sels nutritifs dans les sédiments de la lagune de Ghar El Melh et du lac nord de Tunis. Th. Doct. État, Fac. Sci. Tunis, Tunisie, 266 p.
- AYADI Z., BEN ISMAIL S., 2000. Modélisation hydrodynamique de la lagune de Ghar El Melh. *Mémoire*, École Nat. Ing. de Tunisie, 65 p.
- BEN CHARRADA R., MOUSSA M., 1997. Modélisation hydrodynamique et écologique des eaux côtières du golfe de Tunis. *La Houille Blanche*, 6, 66-78.
- BEN KHEMIS R., 2003. La lagune de Ghar El Melh : Diagnostic Environnemental et Modélisation Écologique. *Rapport de Mastère*, Inst. Nat. Agronomique de Tunisie, 100 p.
- JØRGENSEN S.E., MEJER H., FRIIS M., 1978. Examination of a lake model. *Ecological Modelling*, 4, 253-278.
- OCDE, 1982. Eutrophisation des eaux : Méthodes de surveillance, d'évaluation et de lutte. Org. for Economic Cooperation and Development, 164 p.
- SCET-ERI, 2000. Étude de l'amélioration de la qualité de l'eau de la lagune de Ghar El Melh. *Rapport d'étude pour le Ministère de l'Agriculture*, Tunisie, 293 p.