

ETUDE DE L'EFFET DES FACTEURS DU MILIEU SUR LA DISTRIBUTION DES BACTERIES ENTERIQUES DANS LA LAGUNE DE BIZERTE (NORD -TUNISIE)

Imen BOUKEF^{1*}, M. ELBOUR¹, B. BEJAOU², A. HARZALLAH², M. BELHASSEN²,
R. MRAOUNA¹, S. MEJRI¹ et A. BOUDABOUS³

¹Laboratoire de Microbiologie, Institut National des Sciences et Technologie de la Mer, 2025 Salammbô, Tunisie.

²Laboratoire du Milieu Marin, Institut National des Sciences et Technologie de la Mer, 2025 Salammbô, Tunisie.

³Laboratoire des Microorganismes et biomolécules actives, Faculté des Sciences de Tunis, El Manar II, Tunisie.

* imen.boukef@yahoo.fr

ملخص

تأثير العوامل الطبيعية المحيطة على انتشار البكتيريا المعوية الملوثة في بحيرة بنزرت (الشمال التونسي) : اهتمت هذه الدراسة بتقييم انتشار البكتيريا المعوية الملوثة في بحيرة بنزرت و مدى تأثيرها بالعوامل الطبيعية و المناخية المحيطة خلال الأربعة فصول (نوفمبر 2004, فيفري 2005, ماي 2005 و أوت 2005). و قد اعتمدنا في هذه الدراسة على تقييم نسبة بكتيريا CT, و EF في عينات من الماء و التربة و ذلك على مستوى 41 محطة تغطي كامل البحيرة. وقد دلت النتائج أن نسبة البكتيريا في التربة مرتفعة مقارنة مع تواجدها في الماء, ما يدل على أن التربة تمثل بيئة مناسبة لتعايش و تكاثر هذه البكتيريا و لذلك تجدر مراقبتها بنفس أهمية المياه.

من ناحية أخرى, أظهرت نتائج البحث أن البكتيريا المعوية الملوثة متركزة أساسا على مستوى المناطق الساحلية. إن تواجده من البكتيريا كان مرتبطا ب(1) نسبة الأمطار خلال الفترة الشتائية و (2) ارتفاع نسبة المياه المستعملة خلال الفترة الصيفية نتيجة ارتفاع الأنشطة الملوثة. و قد أثبتت الإحصائيات أن البكتيريا المعوية مرتبطة بالحرارة و نسبة الملوحة و كذلك الشعاع الشمسي. و نستنتج أن تواجده هذه البكتيريا و خاصة خلال الفترة الصيفية يمثل خطرا صحيا على مستوى تربية القواقع الرخوية و كذلك بالنسبة لمستعملي مياه البحيرة.

كلمات مفاتيح : Entérocoques Fécaux, Coliformes totaux, بحيرة بنزرت, العوامل المناخية.

RESUME

La présente étude est effectuée dans le but d'évaluer l'effet des facteurs du milieu sur la distribution des populations bactériennes entériques dans un milieu lagunaire : la lagune de Bizerte. Un échantillonnage saisonnier, (novembre 2004, février 2005, mai 2005 et août 2005), portant sur 41 stations couvrant toute la lagune ont été réalisés. Les analyses bactériologiques effectuées ont concerné l'eau et le sédiment. Les paramètres physico-chimiques de l'eau ont été mesurés *in-situ* simultanément aux différents échantillonnages. Aussi, les paramètres climatiques ont été fournis par une station météorologique située à proximité de la lagune.

Les résultats obtenus ont révélé que les charges en bactéries sont plus importantes dans les sédiments que dans l'eau (charges doubles). Ce sont les sédiments qui constituent le réservoir potentiel pour ces différentes populations bactériennes en comparaison avec la colonne d'eau.

Par ailleurs, ce sont les berges qui constituent les zones les plus chargées notamment en face des zones urbaines et agricoles.

L'arrivée de ces bactéries est corrélée positivement avec (i) la pluviométrie, durant la période hivernale et à (ii) l'augmentation en décharges urbaines estivales suite à l'augmentation des activités anthropiques. Ainsi, l'étude statistique a révélé une corrélation positive des CT et des EF, avec la température, la salinité et la durée d'ensoleillement. La persistance de ces populations bactériennes notamment pendant la saison estivale pose un risque sanitaire important particulièrement sur la conchyliculture.

Mots clés : coliformes totaux, entérocoques fécaux, écosystème lagunaire, distribution spatiale, paramètres abiotiques.

ABSTRACT

Effect of environmental factors on the enteric bacterial distribution in the Bizerte lagoon (Northern Tunisia):

The focus of the present study was to evaluate the effect of hydrobiological parameters on the spatial distribution of enteric bacteria (total coliform (TC) and fecal enterococci (FE)) in Bizerte lagoon (northern Tunisia). Thus, a seasonal survey (November 2004, April 2005, May 2005 and August 2005) of the total fecal pollutants was dealt simultaneously to measures of hydrobiological parameters within 41 stations, covering the entire surface of the lagoon. The climatic parameters were provided by a meteorological station nearby the lagoon.

The results obtained, showed high fecal bacterial counts in the sediment during all the period of survey. The sediments seemed to be the most favourable environment for survival and growth of enteric bacteria and it must be controlled with the same degree as the water.

Besides, we noted high loads in TC and FE for the entire coastal areas of the lagoon especially in front of the urban and agricultural zones.

The incoming of these bacteria were linked to (i) the rainfall, during the wintry season and to (ii) the increase of sewage discharge in summer due to the increasing in anthropogenic activities. Thus, statistical study revealed a positive correlation of TC and FE with temperature, salinity and sunshine period. The persistence of the indicator organisms notably during the summer season presents a sanitary risk on the shellfish as well as on the swimmers.

Key Words: Total coliforms, Fecal enterococci, coastal ecosystem, spatial distribution, abiotic factors.

INTRODUCTION

Dans les lagunes côtières, la pollution microbienne compte parmi les problèmes majeurs qui affectent la qualité des eaux, et qui est aggravée par l'augmentation des rejets des eaux usées liées aux développements des activités anthropiques et agricoles (Aslan-Yilmaz *et al.*, 2004; Jeng *et al.*, 2005).

Ce sont les bactéries entériques (notamment la flore fécale) qui sont utilisés comme indicateurs de pollution fécale en vue d'évaluer l'état de contamination bactérienne des eaux douces et marines (Noble *et al.*, 2003; Elmanama *et al.*, 2006). L'augmentation en taux de ces indicateurs en zone côtière a été souvent sous influence des rejets d'eaux usées urbaines et agricoles véhiculées en amont par les eaux de ruissellement drainant les rejets de réseaux sanitaires et des bassins versants (Elmanama *et al.*, 2006 ; An *et al.*, 2002). Aussi, plusieurs sont les études épidémiologiques notamment en Tunisie qui attribuent la pollution marine par les rejets fécaux comme risque sanitaire majeur pour l'homme induisant les épidémies gastroentériques (Bouhaddioui *et al.*, 1998 ; Miossec *et al.*, 1998 ; Al-Gallas *et al.*, 2006; Dallal *et al.*, 2006 ; Rosas *et al.*, 2006).

La flore fécale notamment les coliformes se multiplient dans les systèmes de distributions des eaux (biofilms), dans les sols ainsi que les plantes. Ce groupe, bien qu'il est considéré un faible indicateur d'une contamination fécale récente, il continue à être utilisé dans les études de suivie de la qualité des eaux (Figueras *et al.*, 1997; Noble *et al.*, 2003 Mill *et al.*, 2006).

A l'inverse, les entérocoques fécaux (EF) sont considérés meilleurs indicateurs en raison d'une meilleure survie dans aussi bien en eaux marines qu'en eaux douces (Sinton *et al.*, 1994; Noble *et al.*, 2003 ; Anderson *et al.*, 2005; Mill *et al.*, 2006). D'après les travaux de l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement, les EF sont aussi des indicateurs pour les maladies gastro-intestinales (Sinton *et al.*, 1994; Noble *et al.*, 2003).

C'est au niveau des sédiments marins que ces bactéries entériques comme plusieurs autres groupes de bactéries allochtones au milieu marin peuvent se multiplier en absence de prédateurs (Rozen et Belkins, 2001). En raison de leur richesse organique ces sédiments constituent un environnement favorable (Rozen et Belkins, 2001; Oliver, 2005 et Anderson *et al.*, 2005). Il a été démontré que les sédiments marins sont dix fois plus riches en substances nutritives assimilables (osmolytes et bétaines, en quantité suffisante pour l'osmorégulation) et donc la survie des entérobactéries dans la masse sédimentaire (Gauthier *et al.*, 1993 ; Davies *et al.*, 1995 ; La Rosa *et al.*, 2001 ; Dai et Sun, 2007). Par ailleurs, les études d'Auer et Niehaus (1993)

et Jeng *et al.*, (2005) ont révélé la présence notable des coliformes et en entérocoques fécaux attachées aux particules sédimentaires par flocculation .

D'autre part, le devenir de ces bactéries allochtones en milieu aquatique serait sous contrôle de plusieurs facteurs dont le rayonnement solaire, la température, la salinité, la disponibilité en nutriments, la sédimentation ainsi que la prédation (Gonzalez *et al.*, 1990 ; Davies-Colley *et al.*, 1994 ; Alkan *et al.*, 1995 ; Davies *et al.*, 1995; Gottschal, 1999 ; Sinton *et al.*, 1999 ; Crowther *et al.*, 2001 ; Sinton *et al.*, 2002 ; Menon *et al.*, 2003 ; Chandran et Hatha, 2005). Ainsi, il a été prouvé que le rayonnement solaire est le facteur le plus bactéricide (Alkan *et al.*, 1995; Sinton *et al.*, 2002; Yukselen *et al.*, 2003) notamment quand il est associé à une augmentation de la salinité et à des taux élevés en oxygène dissout (Solic et Krstulovic, 1992 ; Trousselier *et al.*, 1998). La combinaison de l'oxygène et l'UV permet la formation des radicaux libres hautement actifs causant l'altération cellulaire (Hughes, 1992). En Tunisie, la lagune de Bizerte (nord – Tunisie) connaît une forte anthropisation durant la dernière décennie en raison de l'affluât de plusieurs cours d'eau y débouchant, principalement au niveau de ses bordures sud et ouest) en plus de son ouverture naturelle sur la mer par un chenal de navigation long de 6 Km, et qui est sous pression d'un trafic maritime important (Ben Mahmoud, 2003 ; Hassen *et al.*, 2004 ; El Hili *et al.*, 2005 ; Hammami *et al.*, 2005 ; Trabelsi et Driss, 2005). Cette anthropisation est intensifiée par des rejets urbains (Dellali *et al.*, 2000 et 2001 ; Hassen *et al.*, 2004 ; Ben Saïd, 2007 ; Boukef *et al.*, 2007 ; Boukef *et al.*, 2008 ; Essid *et al.*, 2008 ; Grami *et al.*, 2008 ; Sakka *et al.*, 2008).

Dans la présente étude, l'intérêt est porté sur l'évaluation de la distribution spatio-temporelle de populations bactériennes allochtones (CT et EF) dans l'eau et les sédiments de la lagune de Bizerte corrélée aux variations en paramètres hydrobiologiques (température, salinité, oxygène dissout et pH) et climatiques (pluviométrie et ensoleillement) en vue de prédire leur devenir et leur influence sur l'équilibre de la lagune.

MATERIELS ET METHODES

Site d'étude et échantillonnage :

La lagune de Bizerte, (Fig.1), est située au nord de la Tunisie, sur la côte sud de la mer Méditerranée (entre les latitudes 37°8' et 37°14' et entre les longitudes 9°46' et 9°56'). La lagune communique avec la mer Méditerranéenne par un chenal de navigation long d'environ 6 km. Elle est reliée dans sa partie ouest à un lac très étendu, le lac Ichkeul, avec qui elle communique par l'intermédiaire de l'oued Tinja. La lagune couvre une

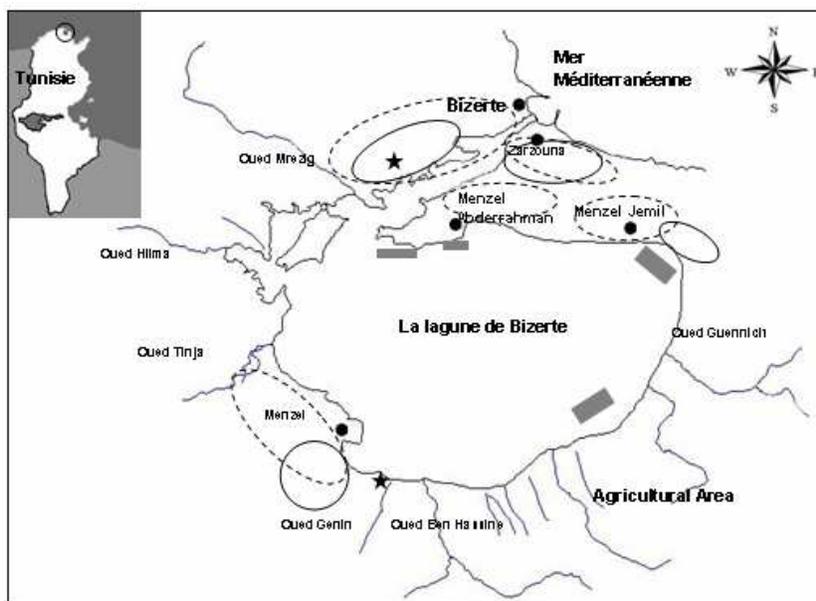


Figure 1: La lagune de Bizerte. Localisation des principales agglomérations (●), des zones conchylicoles (■) et des stations d'épuration (STEP)★. Les cercles discontinus sont les secteurs de zones urbaines et les cercles continus sont des zones industrielles.

superficie de 128 Km² avec une profondeur moyenne de 7m. Une grille d'échantillonnage régulier dont les nœuds sont distants de 1 km a été utilisée pour les mesures et les prélèvements effectués dans la lagune (Fig.2). Au total 41 stations ont été définies. Les prélèvements d'eau ont été effectués à 0,5 m sous la surface d'eau, dans des bouteilles en verre stériles. Des

échantillons de sédiment ont été récupérés dans des sacs plastiques stériles à l'aide d'une benne manuelle. Les échantillons ont été conservés à 4°C. L'analyse bactériologique a été effectuée dans les 24 heures qui suivent. L'échantillonnage a été répété quatre fois au cours du temps : novembre 2004, février 2005, mai 2005 et août 2005.

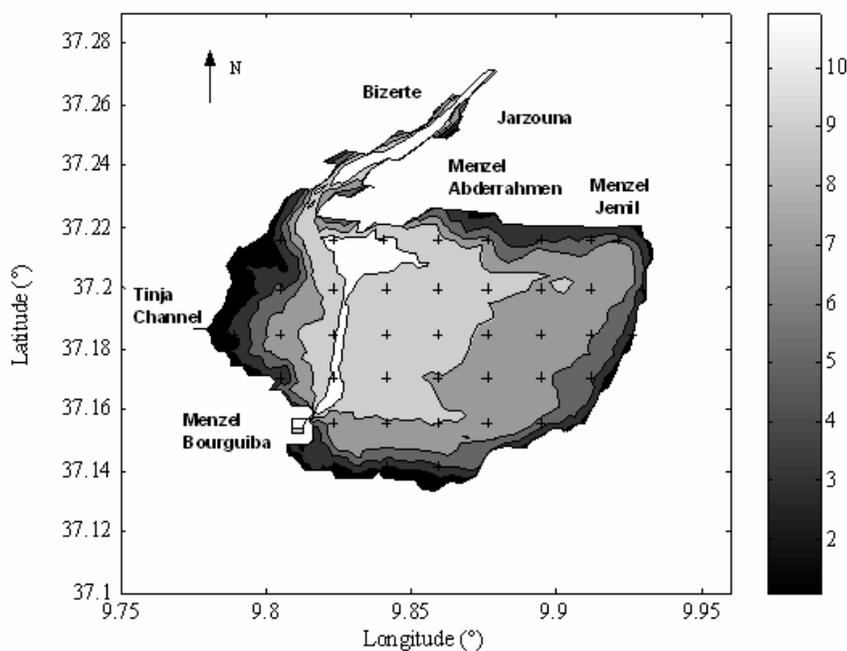


Figure 2: Bathymétrie de la lagune de Bizerte et les stations d'échantillonnage spatial.

Paramètres abiotiques :

Les relevés des moyennes mensuelles de la pluviométrie (mm) et la durée d'ensoleillement (h), ainsi que les valeurs journalières de la vitesse du vent (m/s) durant la période d'étude (septembre 2004-août 2005) ont été obtenus à partir d'une station météorologique située à proximité de la lagune. Les paramètres physico-chimiques : température (°C), salinité (mg/L), oxygène dissous (mg/L) et pH ont été mesurés *in-situ* à 0,5 m de profondeur, en utilisant une sonde multiparamétrique (type WTW) au niveau des 41 stations à chaque prise d'échantillon et pour les quatre campagnes effectuées.

Technique de dosage de la chlorophylle-a :

Le dosage de la chlorophylle-a a été réalisé le jour même des prélèvements, par une méthode fluorimétrique basée sur la mesure de la fluorescence de la chlorophylle-a extraite, à l'acétone (Parsons et al, 1984). Les échantillons conservés à l'obscurité, ont été analysés dans les 4 heures qui suivent les prélèvements.

Techniques de dénombrement des coliformes totaux et des entérocoques fécaux :

Les prélèvements d'eau ont été analysés à l'état brut. Les dénombrements des coliformes totaux (CT) et des entérocoques fécaux (EF) ont été réalisés par la technique de filtration, après concentration de différents volumes de l'échantillon (1, 10 et 100 mL) sur membrane filtrante (0,45 µm de porosité, 25 mm de diamètre, Millipore), lesquelles sont ensuite déposées à la surface de la gélose (Rodier, 1998).

Pour le sédiment, 10 g de prise d'essai ont été mis en suspension dans un flacon stérile contenant de l'eau physiologique à 3% de NaCl (w/v). Le dénombrement des CT et des EF dans le sédiment a été effectué par prise de 100 µL d'homogénéat pur ou dilué (série de dilution 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3}), selon la technique de dénombrement en boîtes gélosées ou plate counting agar (ISO 15214, 1998).

Les CT et les EF sont cultivés sur des milieux sélectifs respectivement, Désoxycolate Lactosé (DCL, Bio-rad) et Slanetz and Brathely (SB, Bio-rad). Toutes les boîtesensemencées sont incubées 24h à 37°C avant leur lecture. A chaque dénombrement la charge en bactéries est estimée en nombre d'unité formant colonies (ufc).

Méthodes de traitement des données

Les valeurs brutes obtenues par dénombrement des charges bactériennes (x) sont transformées au moyen de l'équation $y = \text{Log}_{10}(x+1)$. La cartographie a été établie par la méthode de krigeage. Les cartes sont réalisées à l'aide du logiciel Surfer 7.0.

Les valeurs moyennes ainsi que les valeurs des coefficients de variations obtenues à chaque station, sur la base des quatre valeurs mesurées à chaque saison et pour chaque type de bactéries dans l'eau et dans le sédiment, ont été cartographiées. Le coefficient de variation = (Ecart type/La moyenne)*100.

Les différents types de corrélations entre les charges bactériennes moyennes, dans toute la lagune pour chaque saison et les différents paramètres du milieu ont été déterminés à l'aide du logiciel STATISTICA 6.0.

RESULTATS

1-Paramètres abiotiques

1-1 Facteurs climatiques :

Les relevés des moyennes mensuelles de la pluviométrie (mm) et de l'ensoleillement (h), ainsi que les valeurs journalières de la vitesse du vent durant la période d'étude (septembre 2004- août 2005) sont illustrés sur la figure 3. Les campagnes réalisées sont indiquées par des flèches.

Les campagnes de novembre 2004 et février 2005 correspondent à des périodes pluvieuses avec des valeurs très importantes en pluviométrie (210 mm) et en vitesse du vent (>20m/s) enregistrées en février 2005. La durée d'ensoleillement mensuelle moyenne est de 155 heures. Les campagnes de mai et août 2005 ont été marquées par l'absence de pluie, avec des durées moyennes d'ensoleillement deux fois plus importantes (> 300h) et une vitesse du vent relativement stable.

1-2 Salinité:

Un minimum de salinité a été observé pendant la campagne de novembre dans la zone ouest de la lagune de Bizerte. Ce minimum qui s'étend vers l'est reflète les eaux de faible salinité en provenance du lac Ichkeul qui se rejettent dans la lagune par l'oued Tinja au début de la période pluvieuse. Lors de la campagne de février 2005 (fin de la période pluvieuse), les taux de salinité étaient les plus faibles (< 20g/L) notamment dans la partie nord de la lagune. Les eaux de pluies du lac Ichkeul partiellement diluées dans les eaux de la lagune se sont principalement orientées vers le nord de la lagune dans la direction du chenal amenant à la mer ouverte. Ceci reflète l'important surplus d'eau de l'épisode pluvieux en provenance des différentes rivières et du lac Ichkeul qui s'achemine progressivement vers la mer. En février, la plus grande partie de l'eau douce a atteint la moitié nord de la lagune. En mai 2005, les eaux ont été plus salées (>32g/L) notamment au niveau de la partie nord de la lagune. Cette situation reflète l'état typique de la lagune où les zones nord, plus proches de la mer ont des salinités plus élevées. La salinité moyenne de la lagune a encore augmenté en août pour dépasser la valeur de 36 g/L. Les plus fortes valeurs se trouvent près du chenal de navigation (Fig.4A).

1-3 Température:

En novembre 2004 la température des eaux de la lagune a varié entre 15 et 18°C. Elle a baissé considérablement (<12°C) lors de la campagne de février 2005. En mai et août, on retrouve une situation plus typique avec des valeurs de température plus élevées dans la partie continentale au sud de la lagune par rapport à la partie plus marine au nord. En août la température atteint 25-29°C et augmente du nord au sud de la lagune. La température est plus homogène en août suite au mélange des eaux lagunaires par les eaux marines (Fig.4B). Notons que seules les grandes tendances de température sont significatives puisque les plus petites dépendent fortement de l'heure de mesure, qui, elle change selon le chemin suivi lors de la campagne.

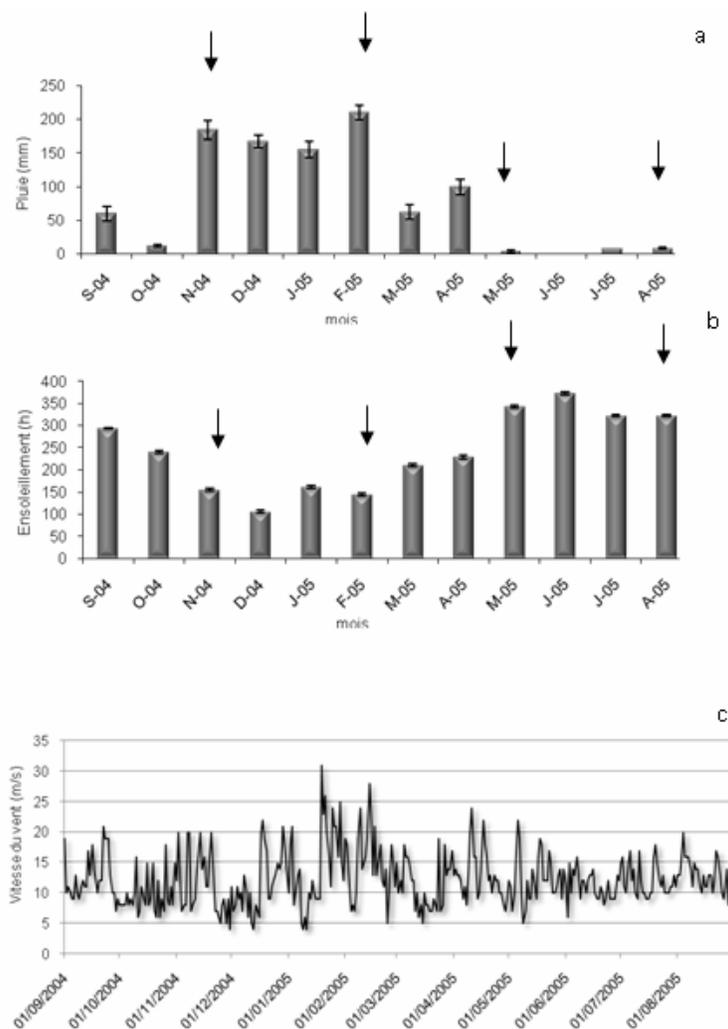


Figure 3: Les taux mensuels de pluviométrie (mm) (a) et de la durée d’ensoleillement (h) (b) et les valeurs journalières de la vitesse du vent (m/s) (c) enregistrés dans le site durant la période d’étude.

1-4 Oxygène dissous:

Les valeurs observées de la concentration en oxygène dissous (O₂d) ont présenté une variation spatiale importante pendant les campagnes de novembre 2004 et février 2005 avec une moyenne de 7.7 mg/L. les concentrations atteignent 9 à 10 mg/L dans quelques endroits du nord de la lagune. L’oxygène dissous baisse considérable en mai et août 2005 avec une moyenne de 5 mg/L et une distribution spatiale plus homogène notamment en août (Fig.4C).

1-5 pH:

Les eaux de la lagune montrent une variation spatiale notable de leur pH pendant les campagnes de novembre 2004 et de février 2005 avec un pH moyen égal à 8. En mai et août 2005, une variation spatiale moindre a été observée. La distribution est particulièrement homogène en août (Fig. 4D).

1-6 Distribution de la chlorophylle-a:

Le dosage de la chlorophylle-a été réalisé au mois de février et août 2005 (Fig.4E). En février, le taux moyen

en chlorophylle-a est de 3,2 µg/L, les concentrations les plus importantes sont localisées sur les extrémités nord et nord-est à proximité des zones conchylicoles qui seraient riches en matière organique. En août, un envahissement en masse chlorophyllienne-a a été observé sur toute la lagune, le taux moyen est de 5 µg/L. Durant ce mois, un gradient croissant du nord vers le sud de la lagune a été détecté. Aussi, un maximum local est situé à l’embouchure de l’oued Guenniche, à l’est de la lagune indiquant un apport en matière organique dans cette zone.

2- Distribution des populations bactériennes fécales dans la lagune

Les distributions spatiales des valeurs moyennes pour les deux populations bactériennes dans l’eau et dans le sédiment sont illustrées dans la figure 5. Les résultats ont démontré que dans l’eau, les plus fortes charges en coliformes totaux ont été observées essentiellement sur

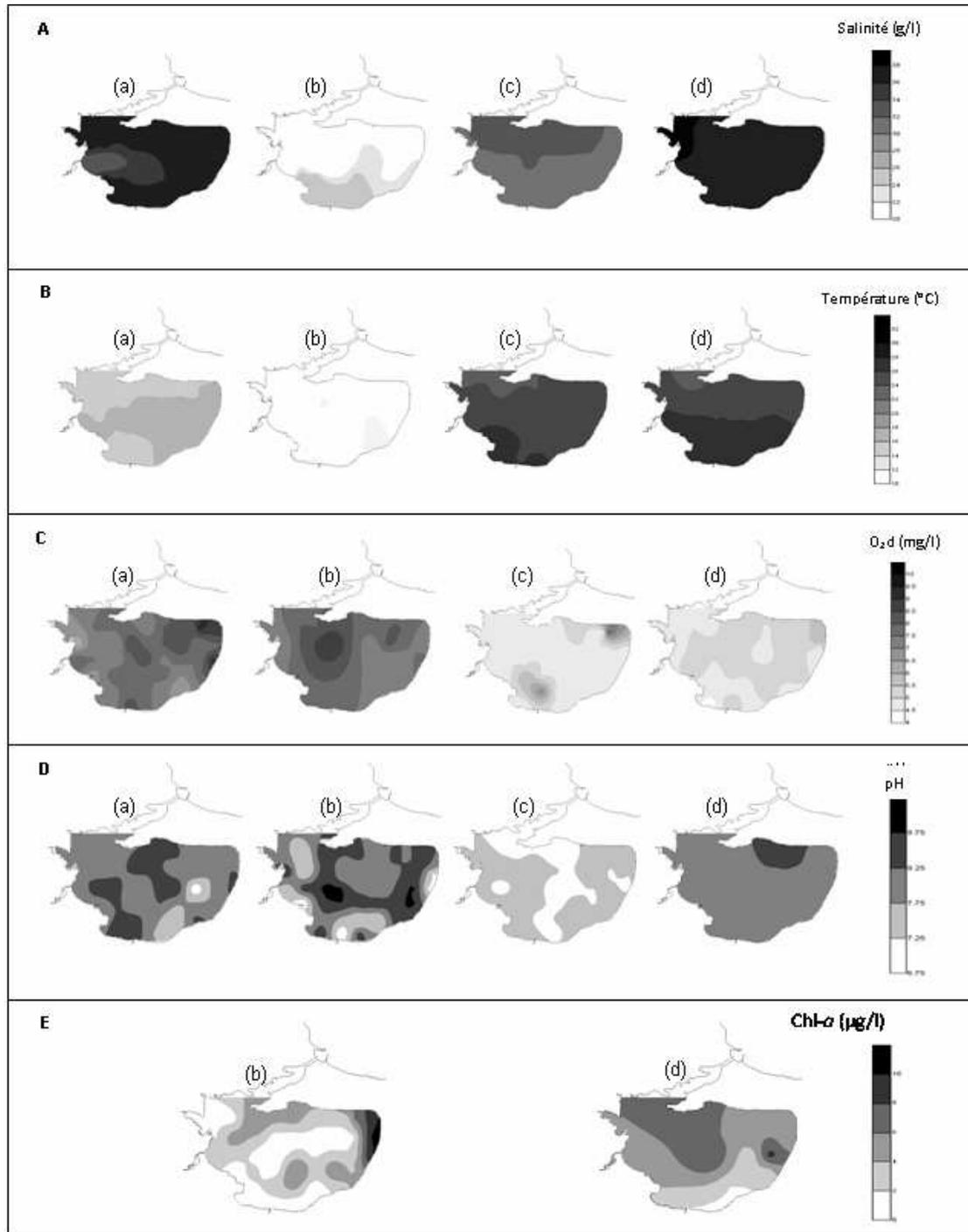


Figure 4: Les cartes de la distribution spatiale de la salinité (A), la température (B), l'oxygène dissout (C) et le pH (D) pour chacune des campagnes d'échantillonnage : novembre 2004 (a), février (b), mai (c) et août (d) 2005. La distribution spatiale de la chlorophyll-a (E) a été reliée en février (b), et en août (d) 2005.

les côtes, où elles peuvent dépasser la valeur de 10^2 ufc/100mL (Fig.5Aa). Les abondances en EF (Fig.5Ab) les plus importantes sont également localisées dans les zones extrêmes est et ouest (10^2 ufc/100mL). Au niveau

du sédiment, les abondances moyennes en CT ($>10^4$ ufc/100mL) et en EF ($>10^3$ ufc/100mL) sont plus importantes que celles dans l'eau. Les abondances les plus élevées sont observées à l'extrémité sud-ouest de la lagune pour les deux groupes de bactéries (Fig 5B).

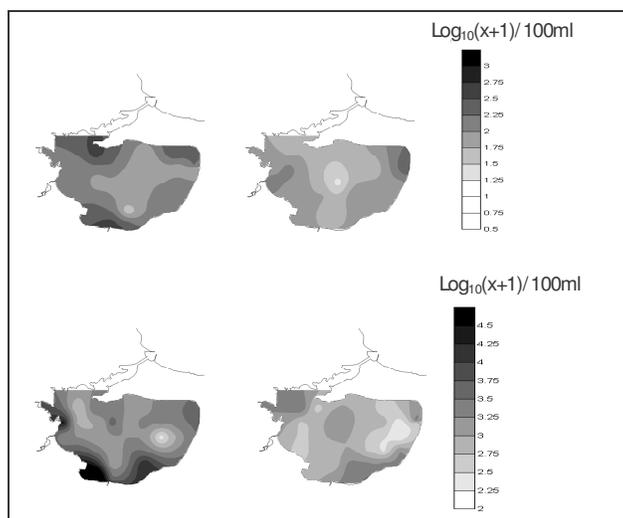


Figure 5: Les cartes de la distribution spatiale des abondances moyennes des CT (a) et des EF (b) dans l'eau (A) et dans le sédiment (B).

Des cartes d'abondances en CT et en EF pour chacune des campagnes (novembre 2004, février 2005, mai 2005 et août 2005) ont été réalisées afin d'illustrer les différentes distributions spatiales en ces populations bactériennes dans l'eau et le sédiment et les corréler aux points de rejets ainsi qu'aux variations dans les conditions météorologiques.

2-1 Distribution spatiale dans l'eau :

a- Les coliformes totaux :

La campagne de novembre 2004 correspond à des niveaux d'abondances en CT compris entre 1 et 10^2 ufc/100mL. Cinq principales zones ayant un maxima local apparaissent au voisinage des régions côtières et du chenal de navigation au nord-ouest de la lagune. Le centre de la lagune présente un minimum (< 2 ufc/100mL). En février 2005, de larges étendues de la lagune en particulier les régions au nord et au nord-ouest sont le siège de fortes charges en CT ($> 2 \cdot 10^2$ ufc/100mL). En mai 2005, les concentrations en CT sont encore plus élevées et peuvent dépasser la valeur de 10^3 ufc/100mL. La campagne d'août 2005 est marquée par les charges les plus importantes en CT (entre 10^2 et $2 \cdot 10^3$ ufc/100mL) avec une répartition plus ou moins homogène sur toute la lagune (Fig.6A).

b- Les entérocoques fécaux :

En novembre 2004, les EF présentent la même répartition que celle des CT. Les taux les plus élevés (> 30 ufc/100mL) sont observés sur les berges de la lagune. Les EF ont été presque indétectables au centre. En février, les taux en EF ont été encore plus élevés ($> 10^2$ ufc/100mL) notamment dans la partie nord de la lagune. La campagne de mai 2005 correspond à des niveaux d'abondances très faibles ou indétectables en EF notamment dans la partie nord de la lagune avec quelques valeurs localement élevées (> 10 ufc/100mL). Lors de la campagne d'août 2005, les abondances ont été beaucoup plus élevées (10^3 ufc/100mL). Deux principales zones de charges maximales en EF sont

situées au nord-est et au sud-ouest de la lagune (principales zones d'agglomérations) (Fig.6B).

2-2 Distribution spatiale dans le sédiment

a- Les coliformes totaux :

Les abondances en CT de la campagne de novembre 2004 ont présenté des valeurs très importantes qui peuvent atteindre 10^6 ufc/100mL, notamment près des zones d'agglomérations et agricoles. En février 2005, les taux en CT étaient moins importants ($< 10^4$ cfu/100mL). Les taux les plus élevés sont répartis sur la côte sud ouest de la lagune. En mai 2005 les niveaux d'abondances sont faibles (< 10 ufc/100mL) sur la majorité de la superficie de la lagune, avec quelques valeurs localement élevées ($10^2 - 10^4$ ufc/100mL) essentiellement au niveau de la zone conchylicole de Menzel Jemil ainsi que la station d'épuration de Menzel Bourguiba. Lors de la campagne d'août, les abondances en CT ont augmenté considérablement ($> 10^5$ ufc/100mL). Les taux les plus élevés ont été observés au niveau de la zone urbaine de Menzel Bourguiba. Cette zone représente l'origine (10^7 cfu/100mL) d'un gradient décroissant en charge de CT (Fig.6C).

b- Les entérocoques fécaux

La campagne de novembre correspond à des niveaux d'abondances importants répartis d'une façon homogène sur toute la lagune avec des valeurs localement élevées au niveau du port de Menzel Bourguiba et au niveau du chenal de navigation ($> 10^3$ ufc/100mL).

En février, les plus fortes abondances en EF ont été localisées sur les extrémités sud et sud-est de la lagune où elles ont dépassé la valeur de 10^4 ufc/100mL. En mai, des taux faibles en EF ont été répartis d'une façon homogène avec des valeurs localement un peu plus élevées ($> 10^2$ ufc/100mL) au niveau de la zone conchylicole de Menzel Jemil ainsi que la station d'épuration de la ville de Menzel Bourguiba. Lors de la campagne d'août, une augmentation notable en EF a été observée sur la totalité de la lagune ($> 10^4$ ufc/100mL) (Fig.6D).

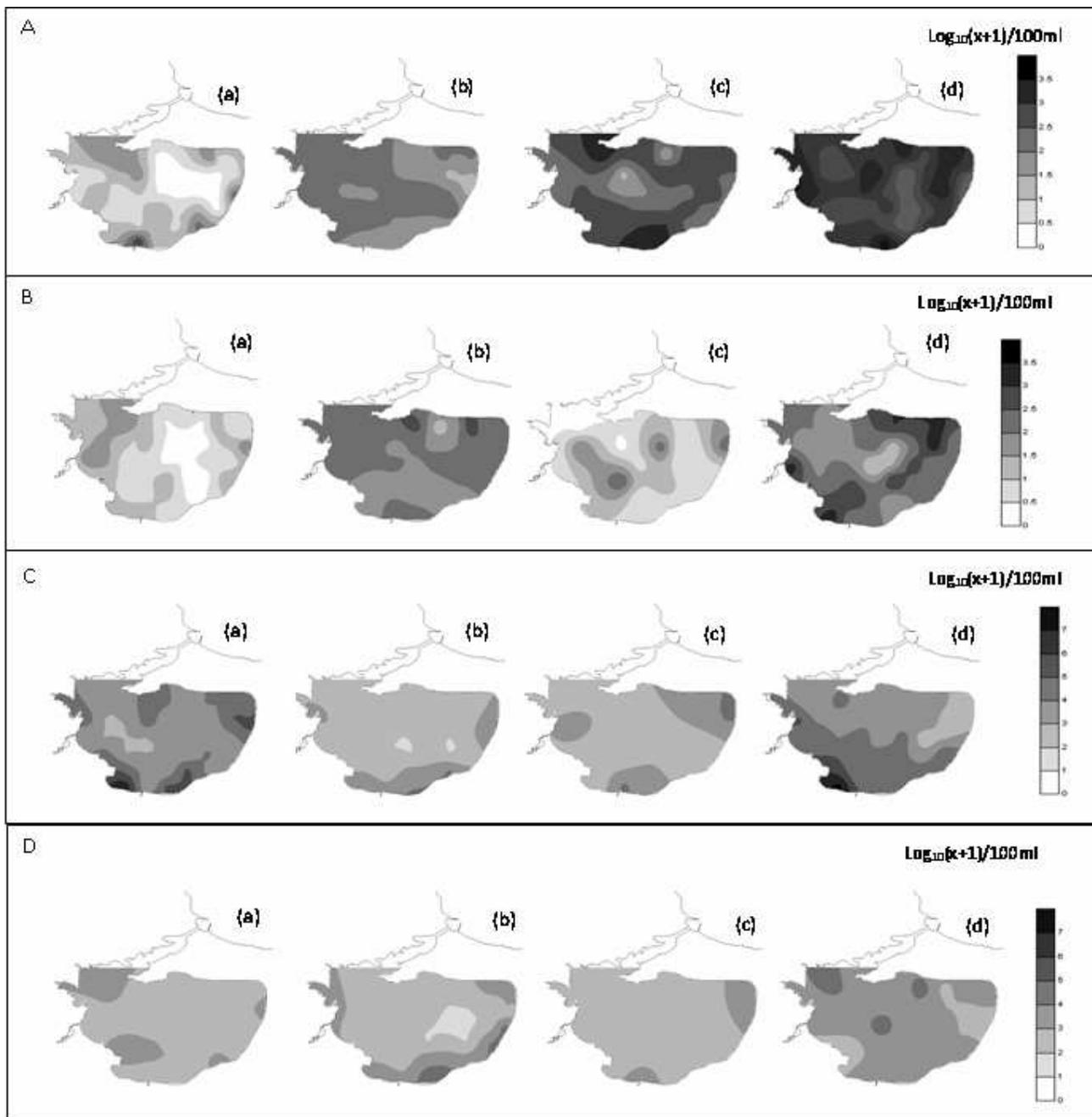


Figure 6: Les cartes de la distribution spatiale des CT (A, C) et des EF (B, D) dans l'eau (A, B) et dans le sédiment (C, D) pour chacune des campagnes d'échantillonnage : novembre 2004 (a), février (b), mai (c) et août (d) 2005.

Pour visualiser l'intensité de la variabilité saisonnière dans les figures précédentes, les cartes des valeurs des coefficients de variation dans l'eau et dans le sédiment, sont illustrées sur la figure 7.

D'une façon générale, les valeurs des coefficients de variation sont plus élevées au niveau de l'eau par rapport au sédiment. Ces coefficients varient selon la position géographique des stations. Lorsque les cartes des coefficients de variation sont comparées aux cartes des valeurs moyennes (Fig.5) pour chaque type de bactéries et d'échantillons, les zones de forte variabilité se

superposent aux zones de faible abondance et inversement (Lebaron *et al*, 1999).

3- Etude des corrélations :

D'après le calcul des coefficients de corrélations (tabl. I), les concentrations moyennes en CT, dans l'eau et dans le sédiment, ont été corrélées pendant les quatre campagnes de prospections significativement, voir même très significativement, à la température ($r = 0.91$ et 0.46 , $p < 0.05$ pour l'eau et le sédiment respectivement), à l'ensoleillement ($r = 0.95$ et 0.38 , $p < 0.05$ pour l'eau et le

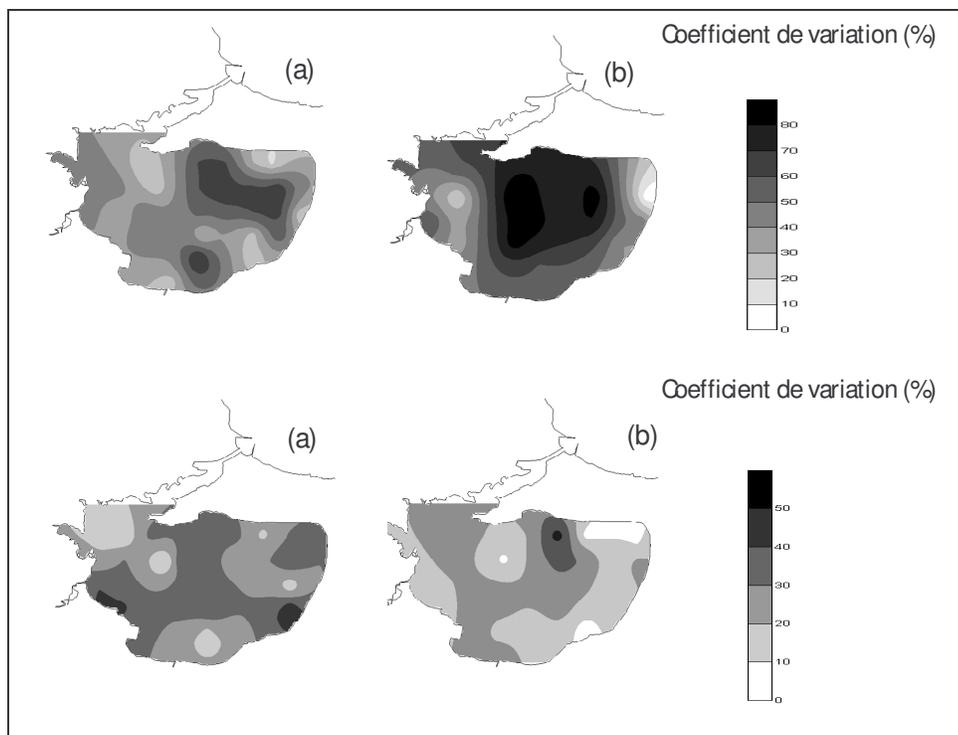


Figure 7: Les cartes de la distribution spatiale des coefficients de variation des CT (a) et des EF (b) dans les échantillons d'eau (A) et du sédiment (B).

Tableau I : Matrice des corrélations ($p < 0.05$) entre les moyennes saisonnières des coliformes totaux (CT) et des entérocoques fécaux (EF) analysés dans l'eau (E) et dans les sédiments (S) et des paramètres abiotiques dans la lagune de Bizerte.

	Pluie (mm)	Ensoleillement (h)	T (C°)	Salinité (mg/L)	O ₂ d	pH	CT_E	EF_E	CT_S	EF_S
Pluie (mm)	1,00									
Ensoleillement (h)	-1,00	1,00								
T (C°)	-0,98	0,97	1,00							
Salinité (mg/L)	-0,55	0,49	0,67	1,00						
O ₂ d	1,00	-1,00	-0,97	-0,51	1,00					
pH	0,58	-0,64	-0,58	-0,02	0,59	1,00				
CT_E	-0,96	0,95	0,91	0,47	-0,96	-0,38	1,00			
EF_E	-0,44	0,41	0,36	0,27	-0,46	0,40	0,68	1,00		
CT_S	-0,45	0,38	0,46	0,70	-0,43	0,45	0,60	0,85	1,00	
EF_S	-0,39	0,35	0,32	0,29	-0,40	0,47	0,63	1,00	0,88	1,00

sédiment respectivement) ainsi qu'à la salinité ($r = 0.47$ et 0.7 , $p < 0.05$ pour l'eau et le sédiment respectivement). Par contre, les taux en CT ont été inversement corrélés à la pluviométrie ($r = -0.96$ et -0.45 , $p < 0.05$ pour l'eau et le sédiment respectivement) et à la teneur en oxygène dissous ($r = -0.96$ et -0.43 , $p < 0.05$ pour l'eau et le sédiment respectivement).

Pareillement pour les concentrations moyennes des EF, qui ont été positivement corrélées à la température ($r = 0.36$ et 0.32 , $p < 0.05$ pour l'eau et le sédiment respectivement) et à l'ensoleillement ($r = 0.41$ et 0.35 , $p < 0.05$ pour l'eau et le sédiment respectivement) mais négativement corrélés à la pluviométrie ($r = -0.44$ et -0.39 , $p < 0.05$ pour l'eau et le sédiment respectivement) et

à la teneur en oxygène dissous
pour l'eau et le sédiment

| Par ailleurs, les concentrations
significativement corrélées
celles des EF, tous compris
entre 0.6 et 0.88, $p < 0.05$).

DISCUSSION

Les résultats relatifs aux
charges moyennes des C
campagnes effectuées dans
montré que les charges
essentiellement sur les be
plus élevées dans le sé

haut risque sanitaire aussi bien pour la conchyliculture que pour la baignade.

BIBLIOGRAPHIE

- Al-Gallas N., O. Bahri, R. Ben Aissa, 2006- Prevalence of shiga Toxin-Producing *Escherichia coli* in a diarrheagenic Tunisian population, and the report of isolating STEC O157:H7 in Tunis. *Curr. Microbiol.*, 53: 483-490.
- Alkan A., Elliott D.J., Evison L.M., 1995- Survival of enteric bacteria in relation to simulated solar radiation and other environmental factors in marine waters, *Water Res.* 29: 2071-2081.
- An Y., Kampbell D., Breidenbach G., 2002- *Escherichia coli* and total coliforms in water and sediments at lake marinas, *Environ. Pollut.* 120: 771-778.
- Anderson K. L., Whitlock J. E., Harwood V., 2005- Persistence and differential survival of fecal indicator bacteria in subtropical waters and sediments, *Appl. Environ. Microbiol.* 71 : 3041-3048.
- ANPE (Agence National de la Protection de l'Environnement), 2007- Prise en compte des besoins écologiques de l'Ichkeul dans la gestion de l'eau en Tunisie. Gestion de la demande en eau en méditerranée, progrès et politiques. ZARAGOZA, 19-21 mars p.14.
- Aslan-yilmaz A., E. Okus, S. Övez, 2004- Bacteriological indicators of anthropogenic impact prior to and during the recovery of water quality in an extremely polluted estuary, Golden Horn, Turkey, *Mar. Pollut. Bull.* 49 : 951-958.
- Auer M. T., S. L. Niehaus, 1993- Modeling fecal coliform bacteria-I field and laboratory determination of loss kinetics. *Wat. Res.* 27: 693-701.
- Bejaoui B., R. Ben Charrada, M. Moussa, R. Ben Hamadou, A. Harzallah, A. Chapelle, 2005- Caractérisation hivernale de la lagune de Bizerte. *Bull. Inst. Natl. Sci. Technol. Mer*, 32: 79-91.
- Bejaoui B., A. Harzallah, M. Moussa, A. Chapelle, C. Solidaro, 2008- Analysis of hydrobiological pattern in the Bizerte lagoon (Tunisia). *Estuarine, coastal and Shellfish Science.* 80: 121-129.
- Ben Mahmoud I., 2003- Influence d'une contamination bactérienne sur le cycle biologique de *Mytilus galloprovincialis* (Lmk) dans la lagune de Bizerte. Diplôme d'Etudes Approfondies, Institut National Agronomique de Tunis, 118 p.
- Ben Said O., M. El Bour, M. S. Goni, M. Dallali, R. Duran, P. Aissa, 2007- Caractérisation préliminaire à partir de la lagune de Bizerte (Tunisie) des bactéries tolérantes aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPS). *Bull. Inst. Natl. Sci. Technol. Mer*, 34: 129-134.
- Braga E., Bonett C., Burone L., Bonetti Filho J., 2000- Eutrophication and bacterial pollution caused by industrial and domestic wastes at the baixada santista estuarine sistem- Brazil. *Mar. Pollut. Bull.*, 40: 165-173.
- Bouhaddioui B., R. Ben Aissa, A. Boudabous, 1998- Caractérisation de souches d'*Escherichia coli* isolées chez l'homme et dans le milieu marin. *Bull. Soc. Pathol. Exot.*, 91 : 283-286.
- Boukef I., M. El Bour, R. Mraouna, S. Elmejri, O. Chahad, B. Bejaoui, C. Sammari, A. Boudabous, 2007- Étude de la distribution des *Escherichia coli* pathogènes dans la lagune de Bizerte (Nord-Tunisie). 38th CIESM Congres, Istanbul, Turquie, 38: p 351.
- Boukef I., M. El Bour, S. Elmejri., B. Bejaoui, R. Mraouna, A. Harzallah, A. Boudabous, 2008- Étude de l'influence des facteurs environnementaux sur la distribution de différentes populations bactériennes dans une station mytilicole de la lagune de Bizerte (Nord-Tunisie). *Rev. Sci. Eau*, 21(6) (*In Press*)
- Bouvy, M., E. Briand, M. M'Boup, P. Got, C. Leboulanger, Y. Bettarel, Y., R. Arfi, 2008- effects of sewages discharges on microbial components in tropical coastal waters (Senegal, West Africa). *Marine Fresh Research* 59, 614-626.
- Chandran A., M. Hatha, 2005- Relative survival of *Escherichia coli* and *Salmonella typhimurium* in tropical estuary. *Water Res.* 39: 1397-1403.
- Castaneda Chavez M., V. P. Sedas, E. O. Borunda, F. L. Reynoso, 2005- Influence of water temperature and salinity on seasonal occurrences of *Vibrio cholerae* and enteric bacteria in oyster-producing areas of Veracruz, Mexico. *Mar. Pollut. Bull.* 50: 1641-1648.
- Crabill C., Donald R., Snelling J., Foust R., Southam G., 1999- The impact of sediment fecal coliform reservoirs on seasonal water quality in oak creek, Arizona, *Water Res.* 33: 2163-2171.
- Crowther J., D. Kay, M. D. Wryer, 2001- Relationship between microbial water quality and environmental conditions in coastal recreational waters: the fylde coast, UK, *Water Res.* 35: 4029-4038.
- Dai J., M-Y Sun, 2007- Organic matter sources and their use by bacteria in the sediments of the Altamaha estuary during high and low discharge periods, *Organic Geochemistry* 38:1-15.
- Dallal M.M.S., M.R. Khorramizadeh, K. MoezArdalan, 2006- Occurrence of enteropathogenic bacteria in children under 5 years with diarrhea in south Tehran. *La revue de la santé de la Méditerranée orientale*, 12: 792-797.
- Davies C., Long J., Donald M., Ashbolt N., 1995- Survival of fecal microorganisms in marine and freshwater sediments, *Appl. Environ. Microbiol.* 61: 1888-1896.
- Davies-Colley R. J., R. G. Bell, A. M. Donnison, 1994- Sunlight inactivation of enterococci and fecal coliforms in sewage effluent diluted in seawater, *Appl. Environ. Microbiol.* 60 : 2049-2058.
- Dellali M., M. El Bour, P. Aissa, 2000- Evaluation de la

- pollution bactérienne dans la lagune de Bizerte : résultats préliminaires. J. Rech. Océanogr. 26 : 18-28.
- Dellali M., M. Elbour, P. Aissa, 2001- Caractérisation des populations bactériennes de *Vibrionaceae* de la lagune de Bizerte (Tunisie). J. Eur. Hydrol. 31: 91-103.
- Delille D., Gleizon F., 2003- Distribution of enteric bacteria in Antarctic seawater surrounding the Port-aux-Français permanent station (Kerguelen Island). Mar. Pollut. Bull. 46: 1179-1183.
- Elmanama A.A., Afifi S., Bahr S., 2006- Seasonal and spatial variation in the monitoring parameters of Gaza beach during 2002-2003, Environ. Res. 25: 25-33.
- Essid N., E. Mahmoudi, F. Boufahja, M. Dellali, H. Beyrem, P. Aissa, 2007- Impact des pseudo-fèces de moules sur les densités des bactéries hétérotrophes dans le secteur mytilicole de la lagune de Bizerte (Tunisie). *Revue des Sciences de l'eau*, 20, 383-392.
- Figueras M. J., Polo F., Inza I., Gurro J., 1997- Past, present and future perspectives of the EU bathing water directive, Mar. Pollut. Bull. 34 : 148-156.
- Gauthier M., Munro P., Breittmayer A., 1993 -Nouvelles perspectives sur l'adaptation des entérobactéries dans le milieu marin. Mar. Life, 3: 1-18.
- Gonzalez J., Iriberry J., Egea L., Barcina I., 1990- Differential rates of digestion of bacteria by freshwater and marine phagotrophic protozoa, Appl. Environ. Microbiol. 56: 1851-1856.
- Gottschal J., 1990- Phenotypic response to environmental changes, FEMES Microbiol. Ecol. 74: 93-102.
- Grami B., N. Niquil, A. Sakka Hlaili, M. Gosselin, D. Hamel, H. Haj Mabrouk, 2008- The plankton food web of the Bizerte lagoon (South-Western Mediterranean): Carbon steady-state modelling using inverse analysis. Est. Coast. Shel. Scien., 79:101-113.
- Hammami J., M. Brahim, M. Gueddari, 2005- Essai d'évaluation de la qualité des eaux de ruissellement du bassin versant de la lagune de Bizerte, Bull. Inst. Natn. Scien. Tech. Mer de Salammbô, 32: 69-77.
- Harzallah, A., 2003- Transport de polluants dans la lagune de Bizerte simulé par un modèle de circulation de l'eau. Bulletin de l'Institut National des Sciences et Technologie de la Mer, Salammbô 30, 1-19.
- Hassen A., M. Yoshida, S. Kouki, O. Bouzaiane, N. Saidi, Z. Taghouti, N. Jedidi, 2004- Microbial and physico-chemical characterization of repository sediment of Bizerte lagoon, RPP-SEPMCL Final Report March 2004 (INRST-JICA) p. 91-101.
- Hughes K. A., 2003- Influence of seasonal environmental variables on the distribution of presumptive fecal coliforms around an antractic research station. Appl. Environ. Microbiol. 69: 4884-4891.
- Jeng H. A. C., A. J. Englande, R. M. Bakeer, H. B. Bradford, 2005- Impact of urban stormwater runoff on estuarine environmental quality. Estuarine coastal and shelf science, 63, 513-526.
- La Rosa T., S. Mirto, A. Marino, V. Alonzo, T. L. Maugeri, and A. Mazzola, 2001- Heterotrophic bacteria community and pollution indicators of mussel-farm impact in the gulf of Gaeta (Tyrrhenian Sea). Mar. Environ. Res., 52 301-321.
- Laliberte P., D. Grimes, 1982- Survival of *Escherichia coli* in lake bottom sediment, Appl. Environ. Microbiol. 43 : 623-628.
- Lebaron P., Troussellier M., Got P., Baleux B., 1990- Distribution spatio-temporelle d'une population bactérienne allochtone (coliformes thermotolérants) dans un écosystème marin côtier (Bassin de THau, France), Can. J. Microbiol. 36 : 307-317.
- 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. pp.161
- Marino R., Gannon J., 1991- Survival of fecal coliforms and fecal streptococci in storm drain sediment, Water Res. 25: 1098-1991.
- Menon P., G. Billen, P. Servais, 2003- Mortality rates of autochthonous and fecal bacteria in natural aquatic ecosystems. Water Res. 37: 4151-4158.
- Medhioub M. M., 1993- Aperçu sur la conchyliculture en Tunisie point de situation et réflexions. Rev. Inst. Natl. Agron. Tunis, 8: 19-26.
- Mill A., T. Schlacher, M. Katouli, 2006- Tidal and longitudinal variation of fecal indicator bacteria in an estuarine creek in south-east Queensland, Australia. Mar. Pollut. Bull. 52: 881-891.
- Miossec L., Le Guyader F., Haugarreau L., Comps M., Pommepey M., 1998-Possible relation between a winter epidemic of acute gastroenteritis in France and viral contamination of shellfish. J. Shellf. Res. 17: 1661-1664.
- Noble R. T., Moore D.F., Leecaster M. K., Mc Gee C.D., Weisberg S.B., 2003- Comparaison of total coliform, fecal coliform and enterococcus bacterial indicator response for ocean recreational water testing, Wat. Res. 37: 1637-1643.
- Oliver J. D., 2005- The viable but noncultivable state in bacteria, The J. of Microbiol. 43: 93-100.
- Parsons T., Maita Y., Lalli C. M., 1984- A manual of chemical and biological methods for seawater analysis, Pergamon Press, Oxford, 173 pp.
- Pires Coelho M. P., Eugenia Marques M., Carlos Roseiro J., 1999- Dynamics of microbiological contamination at a marine recreational site, Mar. Pollut. Bull. 38:1242-1246.
- Rosas I., E. Salinas, L. Martinez, E. Calva, A. Cravioto, C. Eslava, C. F. Amabile-Cuevas, 2006- Urban dust fecal pollution in Mexico city : antibiotic resistance and virulence factors of *Escherichia coli*. Int. J. Hyg. Environ. Health. 209: 461-470.
- Rozen Z., S. Belkin, 2001- Survival of enteric bacteria.

- FEMS Microbiol. Rev. 25:513-529.
- Sakka Hlaili A., B. Grami, N. Niquil, Gosselin M., D. Hamel, M. Troussellier, H. Haj Mabrouk, 2008- The planktonic food web of the Bizerte lagoon (south-western Mediterranean) during summer : spatial distribution under different anthropogenic pressures. *Est. Coast. Shel. Scien.*, 78: 61-77.
- Shibata T., H. M. Solo-Gabriel, L. E. Fleming, S. Elmir, 2004- Monitoring marine recreational water quality using multiple microbial indicators in an urban tropical environment, *Water Res.* 38 : 3119-3131.
- Sinton L. W., Davies-Colley R. J., Bell R., 1994- Inactivation of enterococci and fecal coliforms from sewage and meatworks effluents in sweater chambers, *Appl. Environ. Microbiol.* 60: 2040-2048.
- Sinton L. W., Finlay R., Lynch P., 1999- Sunlight inactivation of fecal bacteriophages and bacteria in sewage-polluted seawater. *Appl. Environ. Microbiol.* 65: 3605-3613.
- Sinton L. W., C. Hall, P. A. Lynch, R. J. Davies-Colley, 2002- Sunlight inactivation of fecal indicator bacteria and bacteriophages from waste stabilization pond effluent in fresh and saline water. *Appl. Environ. Microbiol.* 68: 1122-1131.
- Solic M., Krstulovic N., 1992- Separate and combined effects of solar radiation, temperature salinity and Ph on the survival of fecal coliforms in seawater, *Mar. Pollut. Bull.* 24: 411-416.
- Trabelsi S., M. R. Driss, 2005- Polycyclic aromatic hydrocarbons in superficial coastal sediments from Bizerte lagoon, Tunisia. *Mar. Pollut. Bull.*, 50: 344-359.
- Troussellier M., Cahet G., Lebaron P., Baleux B., 1993a- Distribution and dynamics of bacterial production in relation to wind perturbations in a Mediterranean lagoon. *Limnol. Oceanogr.*, 38, 193-201.
- Troussellier M., Lebaron P., Baleux B., Got P., 1993b- Spatial distribution patterns of heterotrophic bacterial populations in a coastal ecosystem (Thau basin, France) *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 36, 281-293.
- Troussellier M., Bonnefont J., Courties C., Derrien A., Dupray E., Gauthier M., Gourmelon M., Joux F., Lebaron P., Martin Y., Pommepuy M., 1998- Responses of enteric bacteria to environmental stresses in seawater. *Oceanol. acta*, 21 : 965-981.
- Yukselen M.A., Calli B., Gokyay O., Saatci A. 2003- Inactivation of coliform bacteria in black sea waters due to solar radiation, *Environ. Interna.* 29: 45-50.