

VARIABILITÉ SAISONNIÈRE DE LA BIOMASSE DES PEUPELEMENTS MICROPHYTOPLANKTONIQUES DANS LES DIFFÉRENTS BASSINS DE LA SALINE DE SFAX, TUNISIE

SEASONAL VARIABILITY OF MICROPHYTOPLANKTON BIOMASS IN THE DIFFERENT SOLAR SALT POND OF SFAX, TUNISIA

A. REKIK¹, S. BOUKHRIS, H. AYADI, J. ELLOUMI*

Université de Sfax, Faculté des Sciences de Sfax, Département des Sciences de la Vie. Laboratoire BIOME LR/18ES30 Biodiversité Marine et Environnement. Route Soukra Km 3,5 – BP 1171 – CP 3000 Sfax, Tunisie

*Corresponding Author E-mail: jannetelloumi@yahoo.fr

Received: May 9, 2019, Accepted: November 14, 2019, Online: December 27, 2019

RESUME

Une étude saisonnière (été - automne) de la biomasse microphytoplanctonique couplée aux facteurs environnementaux a été réalisée au niveau de quatre bassins de salinité croissante (A5, A16, C4-1, M2) de la saline de Sfax. L'analyse du microphytoplancton consiste en l'identification et le dénombrement de toutes les espèces dont la taille est supérieure à 20 µm. Les observations sont effectuées à l'aide d'un microscope inversé (Leica) après sédimentation 24 h des échantillons dans des cuves de sédimentation (Utermöhl, 1958). Les résultats obtenus au cours de cette étude soulignent l'importance de la salinité dans la structuration des communautés microphytoplanctoniques. Les valeurs de la biomasse du microphytoplancton montrent une grande amplitude de variations durant la saison automnale puisqu'elles fluctuent de 23,47 µgC l⁻¹ (au niveau du bassin M2) à 753,35 µgC l⁻¹ (au niveau du bassin C4-1). Des faibles biomasses du microphytoplancton ont été enregistrées durant la saison estivale (min=35,89 – max=293,48 µgC l⁻¹) au niveau des bassins C4-1 et A5 respectivement. L'étude de la composition spécifique du microphytoplancton nous a permis d'identifier 68 genres et/ou espèces appartenant à cinq classes à savoir les diatomées, dinoflagellés, cyanobactéries, chlorophycées et euglénophycées. Les diatomées

et les dinoflagellés représentent plus de 80% de la biomasse microphytoplanctonique totale au niveau des bassins A5, A16 et C4-1. On note nette dominance des diatomées pennées (*Navicula* sp. et *Nitzschia* sp.). Pour les dinoflagellés, ce sont surtout *Gymnodinium* sp., *Prorocentrum micans*, *Ackashiwo sanguinea* et *Peridinium* sp. qui prolifèrent. Au niveau du bassin hypersalé (M2), les cyanobactéries (*Oscillatoria salina*, *Aphanothece halophytica*, *Phormidium versicolor* et *Spirulina subsalsa*) et les chlorophycées (*Chlamydomonas rubrifilum* et *Dunaliella salina*) montrent les biomasses les plus élevées 49% pour les cyanobactéries et 16% pour les chlorophycées durant l'automne. Nous avons enregistré une nette variation spatiale et saisonnière des communautés microphytoplanctoniques et on a noté que la richesse spécifique et la biomasse diminuent avec le gradient croissant de salinité.

Mots clés : saline, microphytoplancton, biomasse, physicochimies.

SUMMARY

The seasonal distribution (summer-autumn) of microphytoplankton biomass coupled with environmental factors was studied at four ponds of increasing salinity (A5, A16, C4-1, M2) in the solar salt pond of Sfax. Subsamples for microphytoplankton (20–200 µm) counting were analysed under an

inverted microscope using the Utermöhl method after settling for 24 to 48 hr (Utermöhl, 1958). The results obtained during this study explain the importance of salinity in the microphytoplankton communities' structure. Microphytoplankton biomass values show a large range of variations since they fluctuate from $23.47 \mu\text{gC l}^{-1}$ (M2) to $753.35 \mu\text{gC l}^{-1}$ (C4-1) during the autumn season. Low microphytoplankton biomasses were recorded during the summer (min = 35.89 - max = $293.48 \mu\text{gC l}^{-1}$) at ponds C4-1 and A5 respectively. The microphytoplankton community consists of 68 taxa belonging to five groups composed of diatoms, dinoflagellates, cyanobacteria, chlorophyceae and euglenophyceae. Diatoms and dinoflagellates account for more than 80% of the total microphytoplankton biomass at ponds A5, A16 and C4-1. Microphytoplankton was characterised by the proliferation of pinnate diatoms (*Navicula* sp. et *Nitzschia* sp.) and *Gymnodinium* sp., *Prorocentrum micans*, *Ackashiwo sanguinea* and *Peridinium* sp. for dinoflagellates. In the hypersaline ponds (M2), cyanobacteria (*Oscillatoria salina*, *Aphanothece halophytica*, *Phormidium versicolor* and *Spirulina subsalsa*) and mainly chlorophyceae (*Chlamydomonas rubrifilum* and *Dunaliella salina*) showed the highest biomasses 49% for cyanobacteria and 16% for chlorophyceae during autumn. There was a clear spatial and seasonal variation in microphytoplankton communities and it was noted that species richness and biomass decreased with the increasing salinity gradient.

Keywords: saltworks, microphytoplankton, biomass, physicochemicals

1. INTRODUCTION

Les salines sont des écosystèmes littoraux dits paraliques, naturels ou artificiels (Elloumi et al., 2006). Ce sont des écosystèmes de transition entre le domaine marin et le domaine continental (Ayadi et al., 2004). Ces biotopes sont formés de bassins cloisonnés, interconnectés, de salinité croissante allant de l'eau de mer jusqu'aux bassins sursalés (Elloumi et al., 2009 a). Les salines figurent parmi les milieux qui assurent de nombreuses fonctions essentielles pour l'homme et son environnement (Boorman et al., 2002). La faible profondeur d'eau au niveau des bassins permet en effet à la lumière

de pénétrer jusqu'au fond des bassins, de le réchauffer et de favoriser le développement du plancton qui est la base de la chaîne alimentaire (Abid et al., 2008). Ces écosystèmes sont caractérisés par une importante richesse spécifique et une importante diversité (Sundararaj et al., 2006).

Ces bassins sont caractérisés par : (i) une faible profondeur, où le principal facteur de forçage est le rapport évaporation/précipitation (ii) une faible inertie thermique (en raison du fait que le volume d'eau est très faible par rapport à la surface offerte à l'évaporation) et enfin (iii) par une richesse spécifique et une diversité biologique limitée, mais pouvant être compensée par une forte production (Khemakhem et al., 2010). Le long du gradient de salinité, se met en place dans différents bassins une organisation biologique zonale, constituée d'entités écologiques pouvant être presque autonomes et stables (Ayadi et al., 2004; Khemakhem et al., 2010; Ladhar et al., 2014; Thabet et al., 2018). Les échanges avec la mer, l'hydrologie, la salinité et les éléments nutritifs y jouent un rôle déterminant dans le développement des communautés biologiques (Khemakhem et al., 2010, 2013; Masmoudi et al., 2014). Parmi les peuplements faunistique et floristique qui caractérisent les salins et s'adaptent au gradient de salinité et d'humidité, deux grandes groupes qui dominent par leur productivité: les organismes unicellulaires et les invertébrés aquatiques (Elloumi et al., 2009 b; Kobbi-Rebai et al., 2012).

Les études concernant le phytoplancton des marais salants sont relativement peu nombreuses (Campbell et Davis, 2000; Quintana et Moreno-Amich, 2002; Estrada et al., 2004; Madkour et Gaballah, 2012; Ghannay et al., 2015). Au niveau des bassins de la saline de Sfax les études concernant les communautés phytoplanctoniques s'intéresse à l'étude qualitative et quantitative (Ayadi et al., 2002, 2004), adaptation biochimique (Abid et al., 2008), Le concept de succession écologique appliqué au phytoplancton pendant quatre années consécutives dans cinq bassins de gradient croissant de salinité (Khemakhem et al., 2010), Modélisation de la dynamique du phytoplancton: prévision de l'impact de la restauration et du changement climatique (Khemakhem et al., 2013), répartition spatiale et temporelle de la densité (Kobbi-Rebai et al., 2012) et enfin importance de la

salinité et les nutriments dans la structuration du phytoplancton (Masmoudi et al., 2014).

Dans ce travail est le premier qui s'intéresse aux variations saisonnières de la biomasse microphytoplanctoniques dans les différents bassins de la saline de Sfax (A5, A16, C4-1 et M2) en relation avec les paramètres physico-chimiques.

2. MATERIAL ET METHODES

2.1. Description du site d'étude

La saline de Sfax jalonne la côte méridionale de Sfax, en front de mer, sur une distance de 12 km

linéaire et couvrant 1700 hectares environ. Elle est située sur une petite péninsule dite Ras Sfax, entre la région du port et la ville de Gargour près de l'isobathe 1m (Chaker et al., 2000). La saline de Sfax est gérée par la Compagnie Tunisienne des Salines (COTUSAL). Elle est partagée en plusieurs bassins et séparée de la mer par un barrage de limon rouge d'environ 4 m de hauteur. Les marais salants de la saline produisent des quantités importantes de sels de bonne qualité : l'halite commercialisable et les saumures magnésiennes issues de la maturation des eaux recueillies à la sortie des cristallisoirs (Fig. 1).

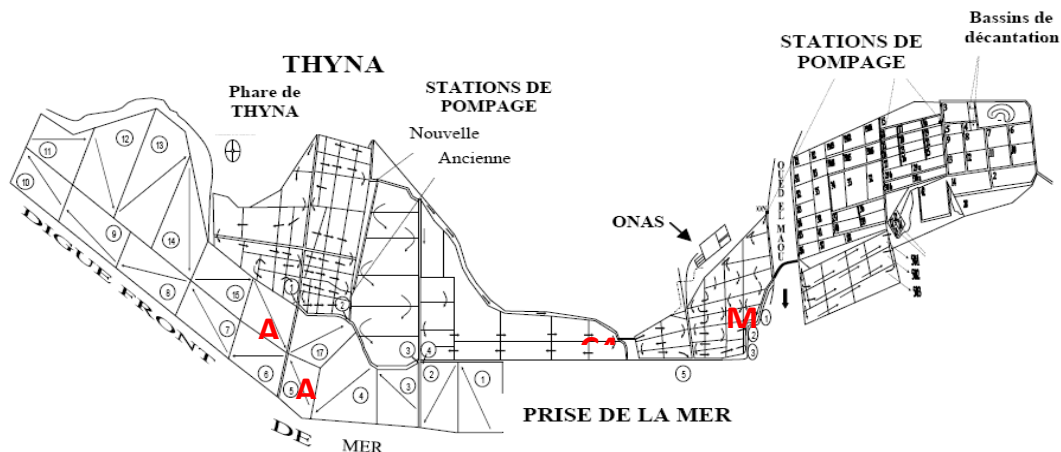


Fig. 1. Localisation des bassins d'échantillonnage.

Fig. 1. Map of the solar saltern and location of ponds.

2.2. Echantillonnage

Au cours de cette étude, 4 bassins de salinités croissantes (A5, A16, C4-1 et M2) ont été échantillonnés lors de deux saisons (été et automne). 12 séries de prélèvements ont été réalisées entre le mois de Juin et le mois de Novembre 2014. Les prélèvements ont été effectués tous les 15 jours. Les échantillons ont été prélevés à l'exutoire de chaque bassin. Au cours de chaque sortie, 4 échantillons ont été collectés pour l'analyse des paramètres abiotique (Température, Salinité, Densité, Matières en suspension, pH, Nitrate, Nitrite, Ions ammoniums, Azote total, orthophosphate, Phosphate total et Silicate) et des paramètres biologiques (microphytoplancton). La collecte des échantillons pour l'étude des paramètres physico-chimiques et des communautés microphytoplanctoniques a été effectuée par une bouteille fermante de type Van Dorn de capacité d'un litre. Un volume d'eau de chaque bassin, allant de 50 ml pour les bassins sursalés jusqu'à 200 ml pour les premiers bassins

est prélevé pour déterminer les concentrations des matières en suspension. Un volume de 60 ml est collecté pour le dosage des éléments nutritifs. Il est ensuite conservé à -20 °C jusqu'au jour d'analyse. Les échantillons destinés pour l'analyse du microphytoplancton ont été fixés par le lugol (4%) (Bourrelly, 1985) et conservés à l'obscurité.

2.3. Etude des paramètres abiotiques

La température, la salinité et le pH ont été mesurés à l'aide d'un kit de type Multi 340 i/SET. La méthode utilisée pour déterminer la concentration des matières en suspension est celle de pesée. L'eau collectée de chaque bassin est filtrée sur du papier Whatman GF/C de porosité 0,45 µm. Après filtration sous vide, les filtres sont mis à l'étuve pendant une heure. Les concentrations en MES, exprimées en mg l⁻¹, sont calculées par différence de masses du filtre avant et après filtration. La densité a été évaluée par la technique de pesée. La masse d'un volume (V) connu de saumure permet de calculer la densité. Six analyses indépendantes ont été effectuées par l'Autoanalyseur. La chaîne

d'analyse automatique permet une analyse rapide et précise des nutriments. Les concentrations ont été déterminées sur une machine Bran-Luebbe Autoanalyseur 3.

2.4. Etude des paramètres biotiques

Pour les communautés microphytoplanctoniques, un aliquote de chaque échantillon (20 ml) est sédimenté dans une cuve de sédimentation pendant 24 h. L'identification et l'énumération du microphytoplancton ainsi que l'estimation de la biomasse des différents groupes microphytoplanctoniques ont été réalisées à l'aide d'un microscope à phase inverse en se basant sur la méthode d'Utermöhl (1958). L'identification des différents taxons phytoplanctoniques a été réalisée grâce aux clés de détermination de Balech (1959) et Tomas et al. (1996). La densité microphytoplanctonique est exprimée en cellules l^{-1} . Pour chaque espèce de phytoplancton, un biovolume moyen est estimé en mesurant les cellules à l'aide d'un micromètre oculaire et en assimilant ces dernières à des formes géométriques calculables (Vadrucci et al., 2007). Ensuite, les biovolumes moyens seront convertis en biomasse en utilisant un facteur de conversion. Ce dernier prend en considération l'effet de déformation lié à l'utilisation de fixateurs. Le facteur de conversion utilisé pour le phytoplancton proposé par Menden-Deuer et al. (2000), avec $1 \mu m^3 = 0,288 \times 10^{-6} \mu g C l^{-1}$ pour les diatomées et $1 \mu m^3 = 0,216 \times 10^{-6} \mu g C l^{-1}$ pour toutes les autres espèces microphytoplanctoniques.

2.5. Analyses statistiques

Pour visualiser les relations des différents paramètres abiotiques et biotiques, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée (Dolédec et Chessel, 1989). Ce type d'analyse statistique entre les descripteurs bio-physico-chimiques est adéquat lorsqu'une relation monotone de type linéaire est susceptible d'exister entre des variables. Le test de corrélation Pearson permet de mettre en évidence les corrélations deux à deux entre les différents paramètres

abiotiques ou biotiques mesurées en utilisant une loi de Pearson. Ce type de test permet de mettre en relief les relations potentielles entre les différentes variables à tester.

Les différences entre les quatre bassins et entre les deux saisons sont testées par analyse de variance (ANOVA).

3. RESULTATS

3.1. Les paramètres abiotiques

La température la plus basse (26,17 °C) a été repérée au niveau du bassin A16 en automne, tandis que la plus élevée (34,25 °C) au niveau du bassin M2 en été. Nous n'avons pas remarqué une stratification thermique en raison de la faible profondeur des différents bassins de la saline de Sfax. Au cours de notre étude, les valeurs de salinité sont significativement différentes entre les bassins (ANOVA, $F=228,04$; $p<0,001$). La salinité des eaux augmente du bassin A5 (Salinité moyenne= $44,49 \pm 6,19$ p.s.u.) au bassin M2 (salinité moyenne= $239,58 \pm 18,29$ p.s.u.). Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées pendant la saison estivale, liée à une forte évaporation. Les valeurs du pH varient de 7,75 (au niveau du bassin A5, été) à 8,52 (au niveau du bassin A16, été) (Fig. 2). Les valeurs moyennes du pH étaient généralement alcalines suggérant une bonne activité photosynthétique. Les concentrations des matières en suspension mesurées dans les premiers bassins A5, A16 et C4-1 sont faibles et ne dépassent pas $500 mg l^{-1}$ durant la saison automnale. Au niveau du bassin M2, les matières en suspension augmentent surtout en saison chaude. Leurs concentrations atteignent les valeurs les plus élevées avec des moyennes de l'ordre de $2820,48 \pm 1954$ et $3561,79 \pm 3251,82 mg l^{-1}$ durant l'automne et l'été respectivement. La densité atteint un minimum de 0,96 au niveau du bassin A16 (automne) et un maximum de 1,10 au niveau du bassin M2 (été). La densité est quasi constante dans les quatre bassins étudiés (Fig. 2).

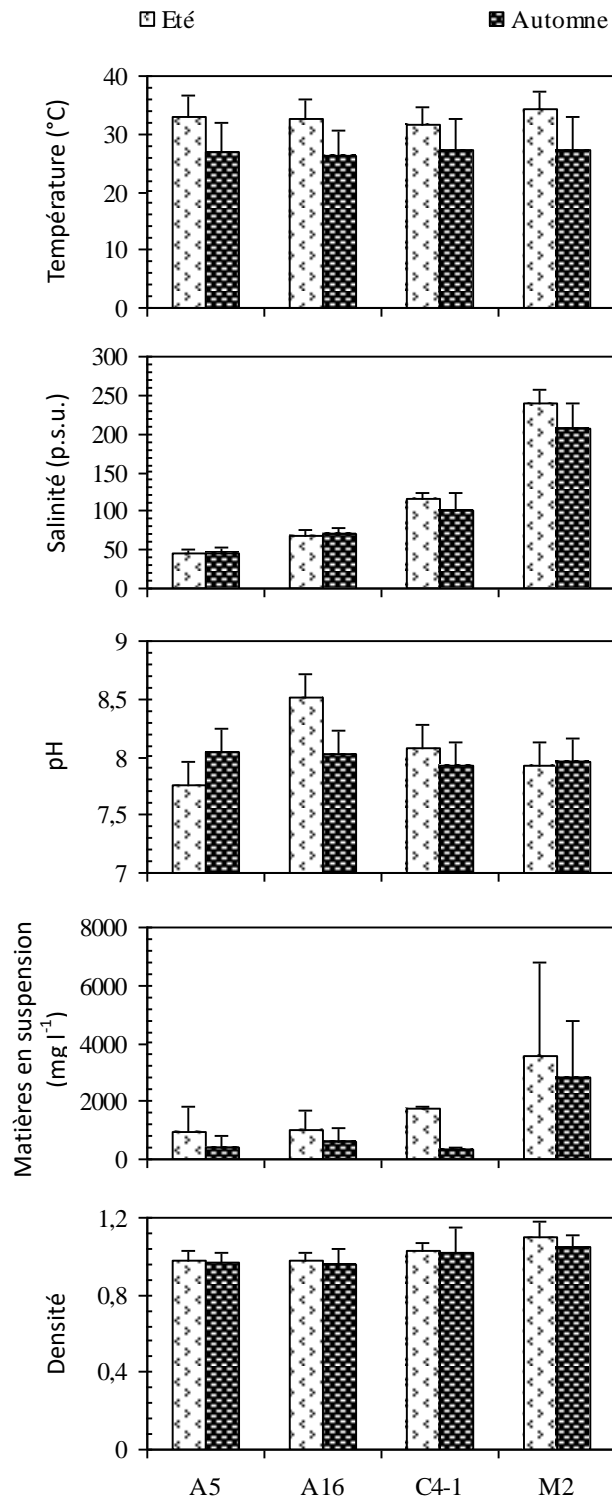


Fig. 2. Distribution spatiale et saisonnière des différents paramètres physiques.

Fig. 2. Spatial and seasonal variations of physical parameters.

Les concentrations des nitrates (Min = 3,28 – Max = 3,81 μM) et des nitrites (Min = 0,26 – Max = 0,48 μM) étaient plus importantes pendant l'automne. Alors que les concentrations en ions ammonium sont plus faibles (Min = 1,91 – Max = 2,37 μM) en automne. Les fortes valeurs sont enregistrées au

niveau des bassins A16, C4-1 et M2 avec des concentrations de l'ordre de 2,36 μM , 2,64 μM et 2,35 μM respectivement pendant la saison estivale (Fig. 3). L'azote total subit de faibles variations spatiales. Les plus fortes concentrations sont mesurées au niveau du bassin A5 atteignant des

valeurs moyennes de $22,16 \pm 2,08 \mu\text{M}$ durant l'été. Dans le bassin M2, les valeurs sont faibles et ne dépassent pas $19,93 \pm 1,00 \mu\text{M}$ durant l'automne (Fig. 3). Les concentrations en orthophosphate étaient faibles ($0,30 \pm 0,07 \mu\text{M}$) durant l'automne, mais atteint un maximum ($5,25 \pm 5,04 \mu\text{M}$) durant l'été. Les faibles concentrations sont enregistrées au niveau des bassins A16 et M2 avec une moyenne de $0,47 \pm 0,24 \mu\text{M}$ et $0,49 \pm 0,47 \mu\text{M}$ respectivement. Des variations spatio-temporelles marquées en phosphore total sont enregistrées au cours de cette étude (Fig. 3). Les fortes valeurs sont enregistrées au niveau des bassins A5 et M2 avec des moyennes de $10,85 \pm 8,04 \mu\text{M}$ et $18,18 \pm 15,13 \mu\text{M}$, respectivement durant la saison estivale. Pour les bassins A16 et C4-1 les concentrations en

phosphore total les plus importantes sont enregistrées pendant l'automne avec des concentrations moyennes ne dépassent pas $9,56 \pm 9,41 \mu\text{M}$. Le rapport N/P est de l'ordre de 21,91 aux niveaux des bassins A5 et M2 durant la saison automnale ce qui indique une richesse en éléments azotés. Ce rapport N/P, durant la saison automnale (bassins A16 et C4-1) et en été (bassins A5, C4-1 et M2) est faible, ce qui suggère un déficit en éléments azotés. Le rapport N/P est de l'ordre de 16 au niveau du bassin A16 durant la saison estivale (Fig. 3). Les concentrations les plus élevées de Si(OH)_4 ont été enregistrées pendant l'été (Min = $16,76$ – Max = $49,36 \mu\text{M}$) (Fig. 3). Pendant l'automne Si(OH)_4 présente une moyenne de l'ordre de $34,50 \pm 12,49 \mu\text{M}$.

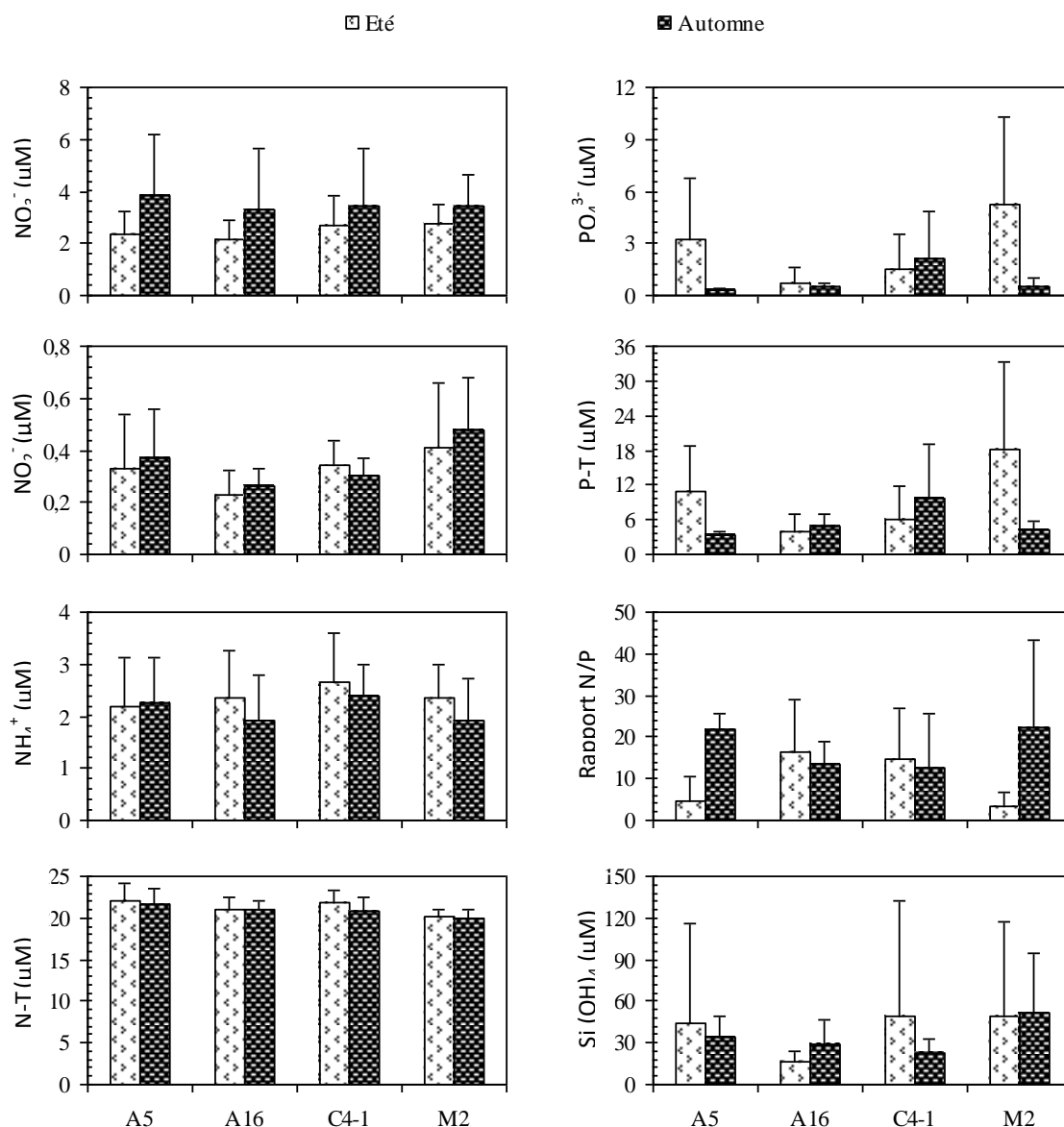


Fig. 3. Distribution spatiale et saisonnière des différents paramètres chimiques.

Fig. 3. Spatial and seasonal variations of chemical parameters.

3.2. La structure et variation saisonnière de la biomasse microphytoplanctoniques

Les valeurs de la biomasse du microphytoplancton montrent une grande amplitude de variations puisqu'elles fluctuent de $23,47 \mu\text{gC l}^{-1}$ (bassin M2, automne) à $753,35 \mu\text{gC l}^{-1}$ (bassin C4-1, automne) (Fig. 4). Des faibles biomasses du microphytoplancton ont été enregistrées durant la saison estivale (Min=35,89 - Max=293,48). Cependant, la biomasse moyenne du microphytoplancton est maximale en automne, en raison de la prolifération des diatomées et des dinoflagellés. Les plus fortes valeurs, au niveau du bassin C4-1, sont liées au développement très important des diatomées *Nitzschia* sp. ($293,02 \mu\text{gC l}^{-1}$). Les contributions relatives des biomasses des différents groupes microphytoplanctoniques sont présentées sur la figure 4. Les diatomées et les dinoflagellés sont nettement dominants dans la majorité des bassins de la saline de Sfax. Ces deux classes représentent plus de 80% des biomasses totales avec une dominance des diatomées

pennées telles que *Navicula* sp. et *Nitzschia* sp.. Pour les dinoflagellés, ce sont surtout *Gymnodinium* sp., *Prorocentrum micans*, *Ackashiwo sanguinea* et *Peridinium* sp. qui sont les genres dominants. Les euglénophycées (*Euglena* sp.), les cyanobactéries (*Oscillatoria salina*, *Aphanothece halophytica*, *Phormidium versicolor* et *Spirulina subsalsa*) et les chlorophycées (*Chlamydomonas rubrifilum* et *Dunaliella salina*) présentent des effectifs très faibles et sont même absentes dans certains bassins. Les dinoflagellés dominant au niveau du bassin A16 avec une biomasse moyenne de l'ordre $37,48 \mu\text{gC l}^{-1}$. Une liste des différents genres et/ou espèces rencontrés dans la saline de Sfax est présentée dans le Tableau 1. On dégage de ce tableau que la richesse spécifique du phytoplancton dans les différents bassins de la saline de Sfax est importante avec 68 espèces avec une nette dominance des diatomées (32 genres et/ou espèces) et des dinoflagellés (28 genres et/ou espèces).

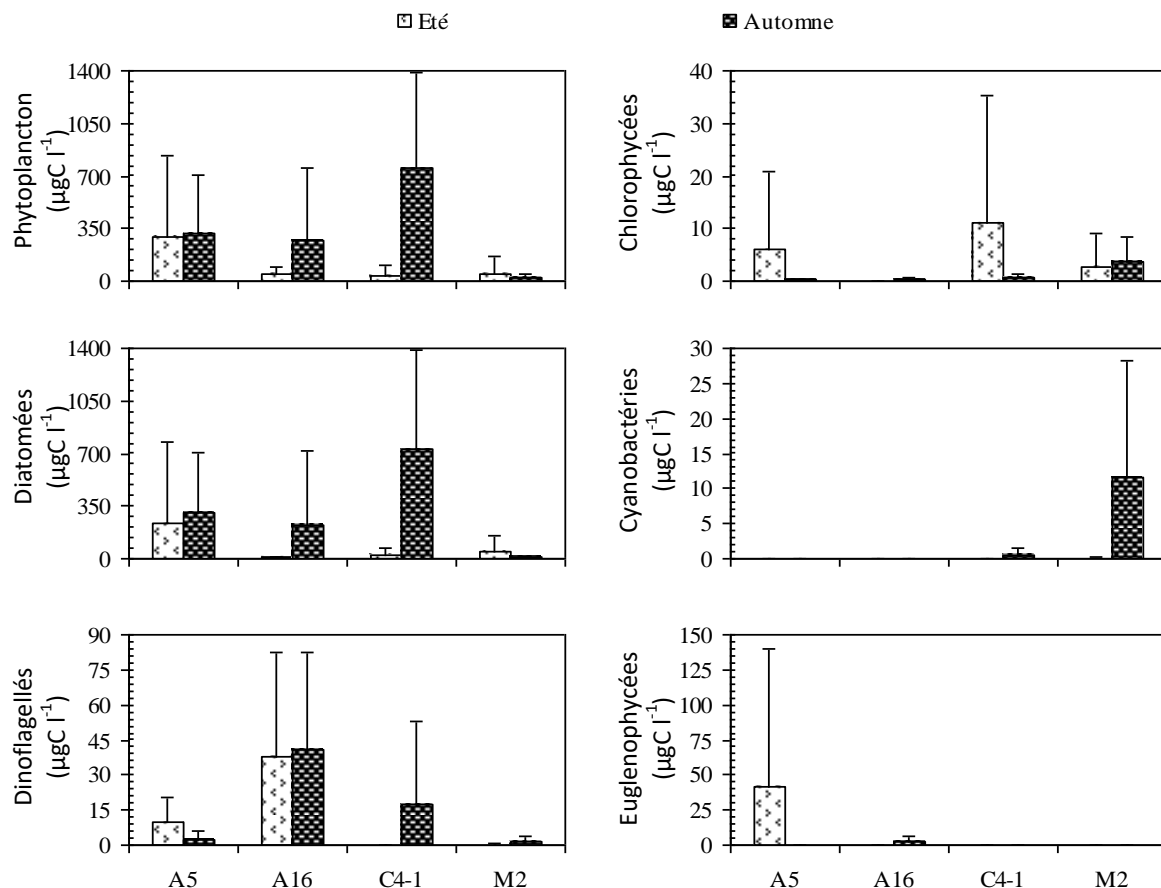


Fig. 4. Distribution spatiale et saisonnière de la biomasse microphytoplanctonique totale et des différentes classes microphytoplanctoniques.

Fig. 4. Spatial and seasonal variations of total microphytoplankton biomass and biomass of individual microphytoplankton groups.

Tableau 1. Liste des biomasses relatives des différentes espèces microphytoplanctoniques observée au niveau des quatre bassins étudiés.

Table 1. List of the biomass of microphytoplankton species found at four ponds.

	Longueur (μm)	Biovolumes ($\times 10^3 \mu\text{m}^3$)	A5	A16	C4-1	M2
Diatomées						
<i>Achnanthes inflata</i> (Cleve, 1895)	27,50	0,54	+	-	-	-
<i>Achnanthes</i> sp. (Cleve, 1953)	38,33	1,03	+	+	+	-
<i>Amphipleura</i> sp. (Kützing, 1849)	52,08	2,04	+	+	-	-
<i>Amphiprora</i> sp. (Smith, 1853)	35,80	4,22	+	+	+	-
<i>Amphora</i> sp. (Smith, 1857)	39,75	1,09	-	+	+	-
<i>Actinoptychus</i> sp. (Schmidt, 1874)	27,50	19,78	+	-	-	-
<i>Cocconeis</i> sp. (Ehrenberg, 1836)	75,00	26,49	+	-	-	-
<i>Cylindrotheca closterium</i> (Reimann, Lewin, 1964)	82,50	0,51	+	+	+	+
<i>Coscinodiscus</i> sp. (Ehrenberg, 1839)	28,13	8,57	+	-	+	-
<i>Cymbella</i> sp. (Grunow, 1880)	220,00	1,00	-	-	-	+
<i>Diatomella</i> sp. (Voigt, 1957)	15,00	1,00	-	+	+	+
<i>Epithemia</i> sp. (Hendey, 1954)	34,05	1,61	+	+	+	+
<i>Grammatophora</i> sp. (Kützing, 1844)	7,50	5,11	+	+	-	-
<i>Gyrosigma hassal</i> (Hassall, 1845)	325,00	211,68	+	-	-	-
<i>Gyrosigma</i> sp. (Hassall, 1845)	204,67	71,15	+	+	+	-
<i>Licmophora</i> sp. (Ehrenberg, 1838)	37,50	2,60	+	-	-	-
<i>Navicula elegans</i> (Smith, 1853)	23,75	0,77	+	+	+	-
<i>Navicula neoventricosa</i> (Hustedt, 1964)	37,50	2,81	-	+	+	-
<i>Navicula</i> sp. (Bory de St Vincent, 1822)	55,20	1,24	+	+	+	+
<i>Nitzschia closterium</i> (Smith, 1853)	138,75	3,20	+	-	+	+
<i>Nitzschia hungarica</i> (Grunow, 1862)	155,00	0,51	+	-	-	-
<i>Nitzschia longissima</i> (Ralf, 1861)	84,50	0,51	+	+	+	+
<i>Nitzschia sigma</i> (Grunow, 1881)	138,25	3,00	-	-	+	+
<i>Nitzschia ventricosa</i> (Kitton, 1873)	312,50	3,20	+	-	+	+
<i>Nitzschia</i> sp. (Hassall, 1845)	112,50	3,20	+	+	+	-
<i>Pinnularia</i> sp. (Ehrenberg, 1843)	26,25	3,68	+	+	+	+
<i>Pleurosigma</i> sp. (Hasle, 1990)	122,70	5,10	+	+	+	-
<i>Surirella</i> sp. (Hustedt, 1911)	57,50	28,79	+	-	-	-
<i>Synedra longissima</i> (Smith, 1853)	87,50	2,48	+	-	+	-
<i>Synedra</i> sp. (Kützing, 1844)	175,00	3,60	+	+	+	-
<i>Thalassiosira mendiolana</i> (Hasle, Heimdal, 1970)	18,75	0,55	+	-	-	-
<i>Thalassiosira</i> sp. (Gran, 1900)	25,00	4,29	+	+	+	-
Dinoflagellés						
<i>Ackashiwo sanguinea</i> (Hansen, Moestrup)	33,13	6,40	-	+	+	+
<i>Amphidinium</i> sp. (Skvortzov, 1958)	7,50	0,43	+	+	+	-
<i>Glenodinium</i> sp. (Ehrenberg, 1838)	25,00	2,81	+	+	-	-
<i>Gonyaulax</i> sp. (Kofoid, 1911)	35,00	21,17	+	-	+	-
<i>Gymnodinium</i> sp. (Stein, 1878)	22,50	0,61	+	+	+	+

<i>Gyrodinium</i> sp. (Freudenthal and Lee, 1963)	26,25	4,64	+	+	+	
<i>Mesoporos</i> sp. (Lillick, 1937)	22,50	3,61	+	+	-	+
<i>Oxyhyrris marina</i> (Dujardin, 1841)	25,00	2,26	+	+	+	-
<i>Peridiniopsis</i> sp. (Borrouelly, 1968)	32,50	1,00	+	-	-	-
<i>Peridinium</i> sp. (Ehrenberg, 1830)	20,63	0,08	+	+	+	-
<i>Polykrikos</i> sp. (Bütschli, 1873)	40,00	5,30	+	-	+	+
<i>Prorocentrum compressum</i> (Dodge, 1975)	30,00	2,12	-	+	-	-
<i>Prorocentrum concavum</i> (Fukuyo, 1981)	25,00	2,12	-	+	+	-
<i>Prorocentrum gracile</i> (Schütt, 1895)	40,00	12,95	+	+	-	-
<i>Prorocentrum lima</i> (Stein, 1878)	37,50	15,43	+	+	-	-
<i>Prorocentrum micans</i> (Ehrenberg, 1834)	41,65	11,37	-	+	+	+
<i>Prorocentrum</i> sp. (Ehrenberg, 1834)	32,50	0,59	+	+	-	+
<i>Protoperidinium achromaticum</i> (Balech, 1974)	32,50	20,19	+	+	-	-
<i>Protoperidinium bipes</i> (Balech, 1974)	45,00	19,88	+	-	-	-
<i>Protoperidinium brevipes</i> (Balech, 1974)	25,00	3,14	-	+	-	-
<i>Protoperidinium claudicans</i> (Balech, 1974)	27,50	6,99	-	+	-	-
<i>Protoperidinium mite</i> (Balech, 1974)	42,50	30,14	+	-	-	-
<i>Protoperidinium pellucidum</i> (Bergh, 1881)	36,25	15,26	+	-	-	-
<i>Protoperidinium</i> sp. (Balech, 1974)	35,00	4,35	+	+	+	-
<i>Protoperidinium steinii</i> (Balech, 1974)	39,00	11,42	+	-	-	-
<i>Pseliodinium</i> sp. (Sournia, 1972)	27,50	4,00	-	+	-	-
<i>Scrippsiella</i> sp. (Loeblich III, 1976)	40,00	3,81	+	+	-	-
<i>Scrippsiella trochoïdea</i> (Stein, 1883)	38,33	3,81	+	+	-	-
Chlorophycées						
<i>Chlamydomonas rubrifilum</i> (Korshikov, 1927)	17,50	0,26	+	+	+	+
<i>Dunaliella salina</i> (Massjuk, Radchenko, 1973)	16,88	0,20	+	+	+	+
Cyanobactéries						
<i>Aphanothece cf. halophytica</i> (Hof et Frémy)	25,70	0,20	-	+	+	+
<i>Oscillatoria salina</i> (Biswas 1926)	200,83	0,54	+	-	+	+
<i>Phormidium versicolor</i> (Wartmann in Rabenhorst 1865)	172,50	1,35	-	-	-	+
<i>Spirulina subsalsa</i> (Oersted ex Gomont 1892)	111,00	1,07	+	+	+	+
Euglenophycées						
<i>Euglena</i> sp. (Schiller, 1925)	36,65	1,84	+	+	-	+

3.3. Les analyses statistiques

L'analyse en composantes principales (ACP) nous a permis la discrimination de quatre groupes autour des axes F1 et F2 (Fig. 5), expliquant 44,42% de la variance pour le bassin A5. Ces axes ont sélectionnés positivement le groupe G1 formé par : salinité, pH, N/P et Si(OH)₄. L'axe F1, qui extrait 23,50% de la variabilité a sélectionné positivement le groupe G2 comprenant les paramètres biologiques (diatomées, cyanobactéries et chlorophycées) et plusieurs variables physico-chimiques (température, matières en suspension

et NH₄⁺). Le groupe G3 comprend : euglénophycées, densité, NO₂⁻, NT, PO₄³⁻ et PT. Le dernier groupe G4 est principalement liée à la biomasse des dinoflagellés est corrélée négativement à la concentration des nitrate (r = -0,92, n = 18, p < 0,05).

La représentation des descripteurs bio-physico-chimique sur le plan (F1 x F2) explique 46,84% de la variance totale du bassin A16. L'axe F1 et F2 sélectionnent positivement le groupe (G1) qui rassemble les variables suivants : salinité, pH, densité, NO₂⁻, PO₄³⁻, PT, diatomées et euglénophycées. L'axe F2 sélectionne négativement

l'association (G2) et positivement l'axe F1 qui regroupe les classes microphytoplanctoniques (cyanobactéries et Chlorophycées) en relation avec les concentrations en nitrate. Le troisième groupe (G3) rassemble les éléments nutritifs (N/P et $\text{Si}(\text{OH})_4$), et les dinoflagellés. Le quatrième groupe (G4) est formé par les paramètres abiotiques (température, matières en suspension et NH_4^+) (Fig. 5).

Pour le bassin C4-1, l'axe F1 expliquant 23,36% de la variabilité des paramètres abiotiques et biotiques, sélectionne positivement le groupe G1 qui est composé essentiellement de la température, la salinité, matières en suspension, NT, $\text{Si}(\text{OH})_4$ et les chlorophycées. L'axe F2, représentant 21,43% de la variabilité, met en évidence positivement le groupe G2 constitué essentiellement par des facteurs abiotiques tel que pH, densité et N/P en relation avec les cyanobactéries. Le groupe G3 formé essentiellement par les nitrates et les nitrites sont

corrélés positivement à la biomasse des dinoflagellés. Cette association suggère que la biomasse des dinoflagellés est strictement liée à la disponibilité des éléments azotés et particulièrement des nitrates et des nitrites qui semblent être le facteur qui influence la répartition de cette communauté. Le groupe G4 est formé par les diatomées et des paramètres chimiques comme NH_4^+ , PO_4^{3-} et PT (Fig. 5).

Au niveau du bassin M2, le groupe (G1) rassemble les variables suivants : température, pH, densité, NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , NT, diatomées et euglénophycées. L'association (G2) regroupe la salinité et les éléments phosphatés (PO_4^{3-} et PT). Le troisième groupe (G3) montre que la biomasse des dinoflagellés est corrélée avec les concentrations en silice. G4 est formé par des paramètres physico-chimiques (matières en suspension et le rapport N/P) et des paramètres biologiques (Cyanobactéries et Chlorophycées) (Fig. 5).

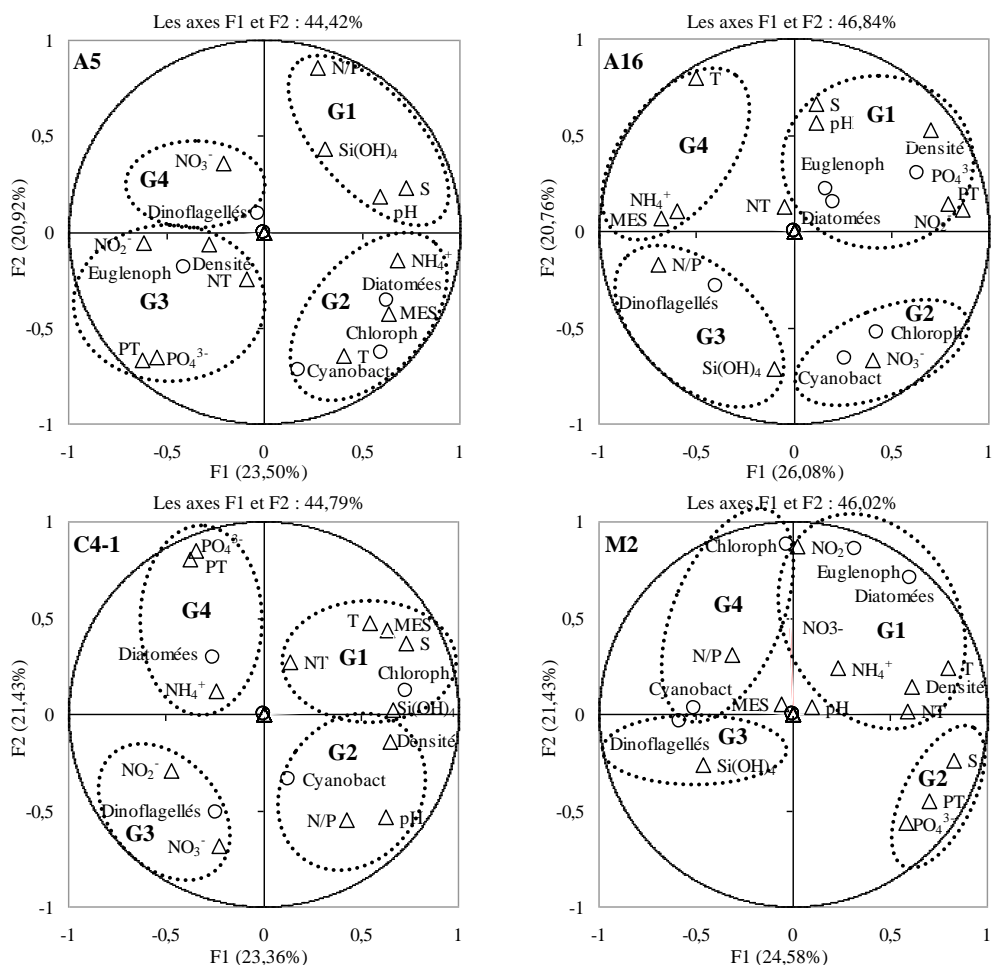


Fig. 5. Représentation des descripteurs bio-physico-chimiques dans l'espace des axes F1 et F2.

Fig. 5. Representation of bio-physico- chemical descriptors in the space of F1 and F2 axes.

4. DISCUSSION

La température suit régulièrement et de façon cyclique celle de l'air pour atteindre un maximum fin juillet - début Août, puis la température commence à diminuer durant la saison automnale. Ces variations saisonnières sont celles habituelles caractéristiques des eaux sous climat aride (Elloumi et al., 2006; Abid et al., 2008). La répartition spatiale de la température suit un gradient croissant allant de l'amont vers l'aval de la saline parallèlement à la variation de la salinité. Ceci est dû à la capacité calorifique importante des saumures (Pedros-Alio et al., 2000). Avec l'augmentation de la salinité on note une augmentation de la température (Pedros-Alio et al., 2000), ceci est confirmé par une corrélation significative entre la température et la salinité de l'eau (Pearson, $r = 0,77$, $n = 18$, $p = 0,05$). La variabilité de la température est influencée donc, d'une part, par le climat général et par la salinité des eaux, d'autre part. L'augmentation de la température et de la salinité entre les bassins A5 et M2 est directement liée au processus évaporatoire, celles du pH et des matières en suspension seraient, en revanche, plutôt liées à l'activité biologique. Le développement des macro-algues (*Cladophora*, *Enteromorpha*, *Ulva*, etc.) et de phanérogames (*Ruppia*) au niveau des bassins A5, A16 et C4-1 (Ayadi et al., 2004), contribue, sans doute à l'alcalinisation des eaux par photosynthèse, mais aussi à l'augmentation des particules en suspension liée probablement à la dégradation bactérienne des produits de cette photosynthèse. Les valeurs minimales du pH sont enregistrées au niveau du bassin M2 au cours des deux saisons étudiées. Ceci pourrait être dû à l'absence des macro-algues aboutissant à une forte activité biologique et l'abondance des bactéries sulfato-réductrices acidifiantes dans les bassins sursalés (Abid et al., 2008). Toutefois, on a enregistrés des valeurs faibles du pH au niveau du bassin A5 durant la saison estivale ($7,75 \pm 0,75$) et au niveau du bassin C4-1 en automne ($7,93 \pm 0,85$). Cette acidification des eaux des différents bassins peut être liée à l'action anthropique et de l'environnement avoisinant (la SIAPE, l'ONAS et l'Oued El Maou). Les concentrations des matières en suspension augmentent en allant de l'amont vers l'aval de la saline. Cette augmentation est peut être due à la dégradation de la matière organique algale provenant des avant-pièces riches en macro-

algues (Ayadi et al., 2004) et à la resuspension de la matière sédimentée vu la faible profondeur et la grande étendue des masses d'eau dans la saline (Nishri et al., 1996).

Les éléments nutritifs peuvent être considérés comme l'un des facteurs majeurs contrôlant la composition et la biomasse de la communauté phytoplanctonique. Les fortes concentrations en ion orthophosphate et en phosphore total enregistrées au niveau des trois bassins suivants (A1, C4-1 et M2) peuvent être attribuées aux rejets des eaux de l'usine d'industries chimiques (SIAPE) et aux rejets de l'ONAS. Au niveau du bassin A16, ces concentrations diminuent suite probablement à l'activité biologique intense. En fait, les diatomées qui se développent assimilent le phosphore (Sommer, 1984). En plus, les macrophytes aquatiques, figurant bien dans les bassins de salinité moyenne (Ayadi et al., 2004), accumulent le phosphore. Le rapport N/P témoigne que l'azote est un facteur limitant, le surplus du phosphore est dû à une contribution terrigène, des rejets anthropiques (SIAPE) (Moussa et al., 1984) et la rapidité de la régénération du phosphore par rapport à l'azote (Ryther et Dunstan, 1971). Les concentrations élevées du silicate observées peuvent être expliquées par une prolifération des diatomées. En effet, Conley et al. (1988) ont montré que le frustule des diatomées subit une dissolution de nature physique sous l'action de la variation de la température et du pH ce qui constitue une source de silice. Toutefois, on n'a pas enregistrés des corrélations significatives entre les concentrations en silicate et la biomasse des diatomées ($r = -0,25$, $n = 18$, $p < 0,05$).

La dynamique et la biomasse de la communauté microphytoplanctonique sont contrôlées par une combinaison de facteurs physiques et chimiques qui changent avec la saison (Abid et al., 2008; Masmoudi et al., 2014). Dans la saline de Sfax, depuis l'eau de mer jusqu'au bassin C4-1 dont la salinité avoisine 108 p.s.u., la composition spécifique du microphytoplancton est variée en genres et en espèces. Cette variation du peuplement microphytoplanctonique selon les bassins est significative. Elle se traduit par une raréfaction d'espèces dans les bassins des partènements intérieurs. La diversité taxonomique diminue quand la salinité augmente (Masmoudi et al., 2014). En effet, au niveau des bassins A5 et M2, on assiste à 53 et 25 espèces phytoplanctoniques respective-

ment. La diminution de la richesse spécifique microphytoplanctonique conjointement à l'augmentation de la salinité est aussi observée par Ayadi et al. (2002, 2004) et Khemakhem et al. (2010). En effet, l'augmentation progressive de la salinité rend chaque bassin un environnement contraignant quant au développement des eucaryotes (Baati et al., 2008). Le bassin A5 à tendance marine, appartient à une série de bassins à faible salinité et qui reçoivent directement l'eau de mer. Le pompage constant de l'eau de mer semble créer un hydrodynamisme, la température élevée et les concentrations importantes en azote et phosphore favorisent le développement des populations de diatomées comme les *Nitzschia* sp. et *Navicula* sp. (Masmoudi et al., 2014). La succession saisonnière du phytoplancton dans le bassin A5 ressemble à celle de l'environnement marin caractérisée par le développement des diatomées suivi par une dominance des dinoflagellés (Rekik et al., 2015, 2016). Au niveau du bassin A16 durant la saison estivale, des dinoflagellés sténohalins (*Gymnodinium* sp., *Prorocentrum micans*) dominant. L'assimilation des phosphates par les dinoflagellés permet un développement important de cette classe dans les eaux de ce bassin (Masmoudi et al., 2014). En aval, et au niveau des bassins plus confinés (bassin M2), les cyanobactéries (*Oscillatoria salina*, *Aphanothece halophytica*, *Phormidium versicolor* et *Spirulina subsalsa*) et essentiellement les chlorophycées (*Chlamydomonas rubrifilum* et *Dunaliella salina*) se développent. Ceci corrobore avec les observations de (Masmoudi et al., 2014) qui montrent cette même zonation avec les principaux représentants respectifs.

5. CONCLUSION

Les résultats de cette étude montrent une relation entre la biodiversité du milieu avec les facteurs environnementaux. Notons particulièrement, l'importance de la température et de la salinité dans la répartition du phytoplancton. La diversification et la biomasse des espèces microphytoplanctonique dans les bassins de la saline diminuent au fur et à mesure que la concentration de sel augmente. La variation spatiale et saisonnière de la biomasse microphytoplanctonique montre une dépendance des facteurs abiotique du milieu et essentiellement

les éléments nutritifs. En plus de la caractérisation physico-chimique des eaux de la saline de Sfax, l'étude des peuplements microphytoplanctoniques nous a permis de dresser un inventaire qualitatif au niveau des quatre bassins prospectés. Le microphytoplancton montre des biomasses importantes principalement au niveau des bassins à tendance marine et de salinité inférieure à 150 p.s.u. Au niveau des bassins sursalés, le phytoplancton n'est représenté que par quelques taxons (~6 espèces) halotolérantes appartenant à la classe des chlorophycées et des cyanobactéries.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à exprimer leurs remerciements spéciaux au personnel du COTUSAL qui ont facilité notre tâche ainsi que pour leur aide inestimable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABID O., SELLAMI-KAMMOUN A., AYADI H., DRIRA Z., BOUAÏN A., ALEYA L. (2008). Biochemical adaptation of phytoplankton to salinity and nutrient gradients in a coastal solar saltern, Tunisia. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 80, 391-400.
- AYADI H., TOUMI N., ABID O., HAMMAMI M., SIME-NGANDO T., AMBLARD C., SARGOS D. (2002). Etude qualitative et quantitative des peuplements phyto- et zooplanctoniques dans les bassins de la saline de Sfax, Tunisie. *Rev. Sci. Eau.*, 15, 123-135.
- AYADI H., ABID O., ELLOUMI J., BOUAIN A., SIME-NGANDO T. (2004). Structure of the phytoplankton communities in two lagoons of different salinity in the Sfax saltern (Tunisia). *J. Plankton Res.*, 26, 669-679.
- BAATI H., GUERMAZI S., AMDOUNI R., GHARSALLAH N., SGHIR A., AMMAR E. (2008). Prokaryotic diversity of a Tunisian multipond solar saltern. *Extremophiles*, 12, 505-518.
- BALECH E. (1959). Tintinninea del Mediterraneo. *Trabajos del Instituto Espanol de Oceanografia*, 28, 1-88.
- BOURRELLY P. (1985). Les Algues d'Eau Douce, Initiation à la Systématique, Tome II, Les Algues bleues et rouges, Les Euglénieins, Peridiniens et Cryptomonadines, Société Nouvelle des Editions Boubée, 450 p.
- BOORMAN L., HAZELDEN J., BOORMAN M.

- (2002). New Salt Marshes for Old – Salt Marsh Creation and Manangement, Littoral 2002, 6th International Conference of Eurocoast Federation, Porto, Portugal, The Changing Coast, ISBN 972-8558-09-0, 35-45 p.
- CAMPBELL E.E., DAVIS J.S. (2000). Diatoms as indicator of pond condition in solar saltworks, In: 8th World Salt Symposium, Geertman, R. M. (Ed.). Elsevier, 2, 855 - 860.
 - CHAKER K., ELHABEIB A., DHIEB M., DLENSI H. (2000). Production des colonies avifaunes nicheuses des salines de thyna, Sfax: Fonds pour l'environnement mondial, Programme des nations unies pour le développement (FEM/PNUD), Diagnostic et plan d'action, 47 p.
 - CONLEY D.J., QUIGLEY N.A., SCHELSKE C.L. (1988). Silica and phosphorus flux from sediments: importance of internal recycling in Lake Michigan. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 45, 1030-1035.
 - DOLEDEC S., CHESSEL D. (1989). Rythmes saisonniers et composantes stationnelles en milieu aquatique. Prise en compte et élimination d'effets dans un tableau faunistique. *Acta Oecol. Oecol. Gen.*, 10, 207-332.
 - ELLOUMI J., CARRIAS J.F., AYADI H., SIME-NGANDO T., BOUKHRIS M., BOUAIN M. (2006). Composition and distribution of planktonic ciliates from ponds of different salinity in the solar saltwork of Sfax, Tunisia. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 67, 21-29.
 - ELLOUMI J., GUERMAZI W., AYADI H., BOUAÏN A., ALEYA L. (2009 a). Detection of Water and Sediments Pollution of An Arid Saltern (Sfax, Tunisia) by Coupling the Distribution of Microorganisms With Hydrocarbons. *Water Air Soil Pollut.*, 187, 157-171.
 - ELLOUMI J., GUERMAZI W., AYADI H., BOUAÏN A., ALEYA L. (2009 b). Abundance and biomass of prokaryotic and eukaryotic microorganisms coupled with environmental factors in an arid multi-pond solar saltern (Sfax, Tunisia). *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.*, 89, 243-253.
 - ESTRADA M., PETER H., GASOL M.J., CASAMAYOR O.E., PEDRÓS-ALIO C. (2004). Diversity of planktonic photoautotrophic microorganisms along a salinity gradient as depicted by microscopy, flow cytometry, pigment analysis and DNA-based methods. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 49, 281-293.
 - GHANNAY S., KHEMAKHEM H., AYADI H., ELLOUMI J. (2015). Spatial distribution and community structure of phytoplankton, ciliates and zooplankton coupled to environmental factors in the Sousse Saltern (Sahel of Tunisia). *Afr. J. Mar. Sci.*, 37, 53–64. DOI:10.2989/1814232X.2015.1018944.
 - KHEMAKHEM H., ELLOUMI J., MOUSSA M., ALEYA L., AYADI H. (2010). The concept of ecological succession applied to phytoplankton over four consecutive years in five ponds featuring a salinity gradient. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 88, 33-44.
 - KHEMAKHEM H., ELLOUMI J., AYADI H., ALEYA L., MOUSSA M. (2013). Modelling the phytoplankton dynamics in a nutrient-rich solar saltern pond: predicting the impact of restoration and climate change. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 20, 9057-9065.
 - KOBBI-REBAI R., ANNABI-TRABELSI N., KHEMAKHEM H., AYADI H., ALEYA L. (2012). Impacts of restoration of an uncontrolled phosphogypsum dumpsite on the seasonal distribution of abiotic variables, phytoplankton, copepods, and ciliates in a man-made solar saltern. *Environ. Monit. Assess.*, 185, 2139-2155.
 - LADHAR C., TASTARD E., CASSE N., DENIS F., AYADI H. (2014). Strong and stable environmental structuring of the zooplankton communities in interconnected salt ponds. *Hydrobiologia*, DOI 10.1007/s10750-014-1998-y.
 - MADKOUR F.F., GABALLAH M.M. (2012). Phytoplankton assemblage of a solar saltern in Port Fouad. *Egypt Oceanol.*, 54, 687–700.
 - MASMOUDI S., TASTARD E., GUERMAZI W., CARUSO A., MORANT-MANCEAU A., AYADI H. (2014). Salinity gradient and nutrients as major structuring factors of the phytoplankton communities in salt marshes. *Aquat. Ecol.*, DOI 10.1007/s10452-014-9500-5.
 - MENDEN-DEUER S., LESSARD E.J. (2000). Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms, and other protist plankton. *Limnol. Oceanogr.*, 45, 569–579.
 - MOUSSA D., CRISPEL J.J., LEGRAND C.L., THENOZ B. (1984). Laboratory study of the structure and compactibility of Tunisian phosphogypsum (Sfax) for use in ankment construction. *Resour. Conserv.*, 11, 95-116.
 - NISHRI A., HERMAN G., SHLICHTER M. (1996). The response of the sedimentological regime in lake Kinneret to lower lake levels. *Hydrobiologia*, 339, 149-160.
 - PEDROS-ALIO C., CALDERON-PAZ J.I., MACLEAN M.H., MEDINA G., MARRASÉ C., GASOL J.M., GUIXA-BOIXEREU N. (2000). The microbial food

-
- web along salinity gradients. *FEMS Microb. Ecol.*, 32, 143-155.
- QUINTANA X.D., MORENO-AMICH R. (2002). Phytoplankton composition of Empordà salt marshes, Spain and its response to freshwater flux regulation. *J. Coast. Res.*, 36, 581 – 590.
 - REKIK A., ELLOUMI J., CHAARI D., AYADI H. (2015). Microphytoplankton and ciliate communities' structure and distribution in a stressed area of the south coast of Sfax, Tunisia (eastern Mediterranean Sea). *Mar. Freshwater Res.*, DOI: 10.1071/MF15057.
 - REKIK A., BEN SALEM Z., AYADI H., ELLOUMI J. (2016). Spring phytoplankton variability along a south coast of Sfax at the water-sediment interface (Tunisia, Eastern Mediterranean Sea). *J. Coast. Life Med.*, 4, 121-127.
 - RYTHER J.H., DUNSTAN W.M. (1971). Nitrogen, Phosphorus, and Eutrophication in the Coastal Marine Environment. *Sci.*, 171: 1008-1013.
 - SOMMER U. (1984). Sedimentation of principal phytoplankton species in lake constance. *J. Plankton Res.*, 6, 1-14.
 - SUNDARARAJ T.D., AMBIKA DEVI M., SHANMUGASUNDARAM C., RAHAMAN ABDUL A. (2006). Dynamics of solar saltworks ecosystem in India, Proceedings of the 1st International Conference on the Ecological Importance of Solar Saltworks (CEISSA06) Santorini Island, Greece, 122-128 p.
 - Thabet R., Leignel V., Ayadi H., Tastard E. (2018). Interannual and seasonal effects of environmental factors on the zooplankton distribution in the solar saltern of Sfax (south-western Mediterranean sea). *Cont. Shelf Res.*, 165, 1-11.
 - TOMAS C.R., HASLE G.R., STEIDINGER A.K., SYVERTSEN E.E., TANGEN C. (1996). Identifying marine diatoms and dinoflagellates, Academic Press, Inc, 598 p.
 - UTERMÖHL H. (1958). Zur vervollkommen der quantitativen phytoplankton 1 Methodik. Mitteilungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte. *Limno.*, 9, 1-38.
 - VADRUCI M.R., CABRINI M., BASSET A. (2007). Biovolume determination of phytoplankton guilds in transitional water ecosystems of Mediterranean Ecoregion. *Transitional Wat. Bull.*, 2, 83-102.