

CONTRIBUTIONS ORGANIQUES NATURELLES ET ANTHROPIQUES DANS UN ENVIRONNEMENT ÉVAPORITIQUE DE LA TUNISIE ORIENTALE : SEBKHA DE MOKNINE

NATURAL AND ANTHROPIC ORGANIC CONTRIBUTION IN AN ENVIRONMENT EVAPORTIC OF ORIENTAL TUNISIA : MOKNINE'S SEBKHA

Chairi Raja

*Département de Géologie, Faculté des Sciences de Tunis,
Univ. Tunis El Manar-2092, Tunisie. Email : Chairi_ra@yahoo.fr*

RÉSUMÉ

La sebkha de Moknine fonctionne comme un système oligotrophe loin de toute action anthropique. Le flux de la matière organique autochtone ne semble pas être très important et la matière organique sédimentée est à contribution majoritaire continentale ($CO < 1\%$). Cependant, les rejets continus des eaux usées ont créé des conditions eutrophiques. Les taux assez élevés en nutriments (N_o^{3-} : 10 mg^l et P_o^{43-} : $22,87 \text{ mg}^l$, en moyenne) causent une prolifération de phytoplanctons : chlorophytes et cyanobactéries.

Les algues chlorophytes se développant dans les eaux de la sebkha sont caractérisées par une distribution de n-alcanes centrée sur les légers ($nC10$ - $nC20$) et par l'absence de n-alcanes : nC21 et nC23. La présence de cyanobactéries, indicateur d'eutrophisation est détectée dans les sédiments par la répartition des n-alcanes centrée sur nC18-nC31 sans prédominance de n-alcanes pairs ou impairs. L'eutrophisation semble atteindre les sédiments superficiels du système évaporitique de Moknine. Enfin, l'origine continentale de la matière organique ne se dégage que par l'abondance d'humine.

Mots clés : matière organique, tapis de cyanobactérie, chlorophytes, hydrocarbures, nutriments, humine

ABSTRACT

Moknine's sebkha is an oligotrophe system then autochthonous organic matter does not seem to be very important and the organic matter in sediment is for continental contribution ($CO < 1\%$). However, wastewaters diverse in the sebkha are created eutrophique conditions. High rates of nutrients (N_o^{3-} : 10 mg^l and P_o^{43-} : $22,87 \text{ mg}^l$, on average) are caused a proliferation of phytoplanc-tons: chlorophytes and cyanobacteria.

Chlorophytes developing in the sebkha are characterized by the n-alkane distribution centred on: nC10-nC20 and non-appearance of n-alkanes: nC21 and nC23.

The cyanobacteria attendance is indicated by the n-alkane distribution centred on nC18-nC31 and it's characterized only in the superficial sediments. The eutrophication conditions seem to affect the superficial sediments of the evaporator system of Moknine.

Finally, the continental origin of the organic matter is indicated only by the abundance of humine.

Keywords : organic matter, cyanobacteria, chlorophytes, hydrocarbons, nutrients, humine

INTRODUCTION

La sebkha de Moknine, une dépression endoréique saline de la Tunisie orientale, couvre 50 km² de superficie (*Fig. 1*) et constitue le seul exutoire naturel de la nappe phréatique. Elle reçoit en plus du débit des divers oueds, les eaux d'une station d'épuration située dans sa partie nord. Ce bassin est classé parmi les systèmes installés à la faveur de l'effondrement d'un dispositif structural, formé par le flanc monoclinale de plis post-villafranchiens et d'une zone synclinale. Un système de failles conjuguées découpe ses bordures en falaises rectilignes et abruptes et lui confère une forme losangique (*Paskoff et al, 1983 ; Amari, 1986*).

La cartographie de la sebkha montre que :

- le fond du bassin se trouve à -10m ;
- la partie orientale à -9m ;
- la partie nord à -6m ;
- la partie occidentale à -3m.

Aucune influence marine n'est enregistrée actuellement. En effet le bassin est séparé de la mer par une barrière de 4 km et la dernière transgression marine notée dans la région revient au Flandrien.

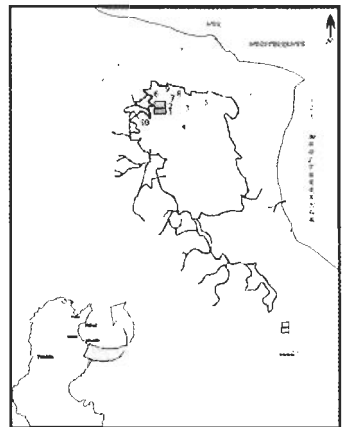


Fig. 1 : Site d'étude et localisation des points d'échantillonnage d'eau et de sédiments superficiels

L'étude sédimentologique révèle une répartition des sédiments en auréoles anisopaques (Fig. 2). La périphérie est le siège de dépôt de sables. Ils sont fins à très fins dans les parties : septentrionale, occidentale et méridionale, et moyens à fins dans la partie orientale du bassin. La zone médiane est le lieu de dépôt de sédiments à faciès mixtes (*argilo-sableux et sablo-argileux*) et le centre est le siège d'accumulation de la fraction fine (*argilo-silteuse à argileuse*) (Chairi, 2004). La dissymétrie dans la répartition des sédiments est le résultat de la concentration des cours d'eau sur la zone occidentale et la topographie du bassin.

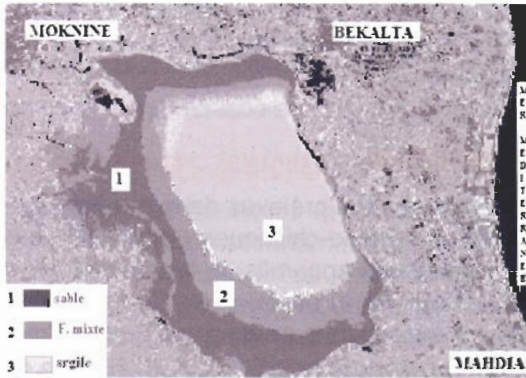


Fig. 2 : Répartition latérale des sédiments de surface de la sebkha de Moknine

L'objectif de ce travail est d'identifier l'origine de la matière organique dans la partie nord qui est la zone menacée de la sebkha. En effet, les rejets continus d'eaux usées ont engendré une pérennité d'eau non habituelle dans un tel système et une prolifération de tapis de cyanobactéries (Photo a et b).

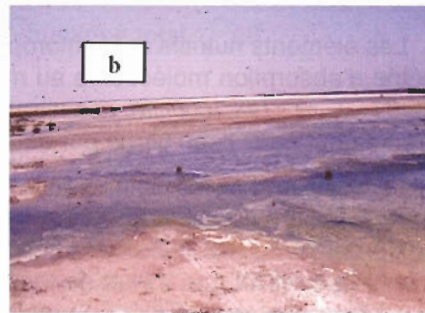
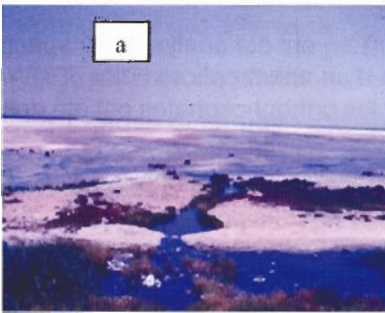


Photo a : Sortie du bassin de la station d'épuration, rejet direct des eaux usées dans la sebkha de Moknine et prolifération d'une biomasse dans les eaux de surface

Photo b : Tapis de cyanobactérie

MATERIELS ET METHODES

Dix prélèvements d'eau sus-jacente au sédiment et de sédiments de surface ont été effectués au Nord de la sebkha (Fig.1). Les eaux de surface ont fait l'objet d'une étude des paramètres physico-chimiques, de la matière organique (MO) dissoute et les produits issus de sa minéralisation (NO_3^- , PO_4^{3-}). Sur les sédiments sont analysés : le carbone organique (CO), les hydrocarbures (S1 et S2), les composés humiques et les lipides totaux.

Le choix de la zone septentrionale est basé sur la diversité de la nature des apports: (i) les rejets de la station d'épuration, (ii) les rejets de déchets divers non traités par les citoyens, (iii) et la présence de l'oued soltane qui draine la ville de Moknine.

PRÉLÈVEMENT ET FILTRATION

Les échantillons d'eau ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène de 1litre. Les paramètres physico-chimiques (pH , CE , TP et O_2 dissous) sont mesurés *in situ* en utilisant des appareils de terrain : un pH mètre WTW197, un conductimètre WTWLF 197 et un oximètre OXI 197. La température est obtenue simultanément avec la mesure du pH, CE et de l'oxygène dissous.

Les eaux de la sebkha ont été filtrées au laboratoire, sous faible pression par l'intermédiaire d'un ensemble de filtration, sur un filtre Wathman (diamètre des pores = $0,45\mu m$) pour récupérer la phase dissoute. Ensuite; elles sont conservées à basse température ($4^\circ C$), pour éviter toute évolution, sous l'action des micro-organismes.

ANALYSE DES NUTRIMENTS ET DE LA CHLOROPHYLLE

Les éléments nutritifs et la chlorophylle (Chl) ont été analysés par spectrométrie d'absorption moléculaire au moyen d'un spectrophotomètre JENWAY 6300 (gamme : $198-1000nm$). Les nitrates et les orthophosphates ont été dosés directement dans l'eau filtrée par addition des réactifs.

La Chlorophylle (Chl) est extraite à l'aide de l'acétone à 90% (pendant 48 h à l'obscurité et à $4^\circ C$). La densité optique est mesurée par spectrophotomètre à différente longueur d'onde (663, 645, 630 et 750 nm). Les concentrations de la chlorophylle total ($ChlT$) et de la chlorophylle « a » ($Chl \llcorner a \llcorner$) sont calculées à l'aide des équations de la méthode trichromatique (Jeffrey et Humphrey, 1975).

Le dosage de ($Chl \llcorner a \llcorner$) dans ces échantillons reflète indirectement les concentrations de phytoplanctons dans la sebkha.

ETUDE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

• ANALYSE DU CARBONE ORGANIQUE DISSOUS (COD) ET DU CARBONE ORGANIQUE (CO)

Les COD et CO sont analysés par coulométrie à l'aide du coulomat 702/SO/CS/E.

COD : 2ml sont prélevés de chaque échantillon et placés dans une nacelle en porcelaine forme longue, puis décarbonaté par addition de quelques gouttes de HCl (2N). La nacelle contenant l'échantillon est par la suite introduite dans le four à combustion (1300°C) après séchage. La valeur donnée par le compteur permet de calculer le pourcentage de COD de l'échantillon.

CO : même procédure est réalisée sur 100 mg de fraction fine.

• EXTRACTION DES COMPOSÉS HUMIQUES

L'extraction des composés humiques est réalisée sur 20 g de sédiment, après extraction chloroformique et décarbonatation par HCl 2N à froid pendant une nuit. Le résidu obtenu est lavé à l'eau distillée par centrifugation (3000 trs/mn pendant 15 mn) jusqu'à pH neutre. Cette extraction est conduite sous agitation pendant une heure, en présence d'un mélange de soude 0,1N et du pyrophosphate de sodium 1% (1V, 1V). 2 ml de la solution obtenue, vont servir au dosage du carbone organique par coulométrie de la fraction ainsi extraite. La valeur obtenue représente le taux de carbone des composés humiques totaux (C_{CHT}). Sur les 98 ml restants, on procède à la séparation des AH et des AF par ajout de HCl 2 N jusqu'à pH 2. A ces valeurs de pH, les AH précipitent, ils sont alors récupérés par centrifugation (3000 trs/mn pendant 20mn). Le carbone des acides fulviques solubles en milieu acide est déterminé de la même manière que celui des composés humiques totaux. Le carbone des AH est alors calculé par différence : $C_{AH} = C_{\text{humique total}} - C_{AF}$

• EXTRACTION DES LIPIDES

- **Lipides dissous** : La méthode utilisée est l'extraction liquide-liquide par le chloroforme (1V d'eau pour 1V de $CHCl_3$) dans une ampoule à décanter. Une fois extraite, la fraction lipidique est fractionnée par chromatographie en phase liquide (CPL) sur une mini colonne de gel de silice, afin de déterminer sa composition et d'évaluer les quantités des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques (HC sat.), des hydrocarbures aromatiques (HC arom.) et des composés polaires (NSO). La fraction HC sat est analysée par chromatographie en phase gazeuse sur un appareil hp 5880A Series, équipé d'un détecteur à ionisation de flamme (FID) et d'un injecteur en splitless (programmation de la température du four de 80°C-300°C, gaz vecteur : Hélium, colonne capillaire SP2100 : 30mX 0.25m).

- **Lipides totaux** : Les composés lipidiques libres contenus dans les sédiments sont extraits selon la méthode de Monin et *al.*, (1978), à l'aide du soxhlet. L'extraction est conduite pendant 18 heures à la température de 50°C.

• ELIMINATION DU SOUFRE ÉLÉMENTAIRE

Les sédiments de la sebkha de Moknine sont très riches en soufre libre. Ce dernier est gênant pour la séparation des hydrocarbures saturés et aromatiques. Pour l'éliminer il faut le fixer dans une colonne sur un amalgame de cuivre et de zinc.

- **Préparation de l'amalgame** : Cette préparation consiste à : (i) dissoudre 200 g de sulfate de cuivre cristallisé, dans 2 l d'eau distillée, avec 50 ml de HCl 2N sous agitation magnétique, (ii) dissoudre 30 g de poudre de zinc dans 50 ml d'eau distillée, (iii) verser goutte à goutte le mélange de zinc dans la solution de cuivre pour éviter que l'amalgame ne devienne pulvérulent. Le mélange obtenu est pâteux, de couleur cuivrique, permettant la fixation du soufre élémentaire.
- **Désoufrage** : L'opération est réalisée sur une colonne en verre (*pipette pasteur*) de 10 cm de long et de 5 mm de diamètre. La colonne est lavée plusieurs fois à l'acétone pour éliminer l'eau, puis rincée au CHCl_3 . L'échantillon, ensuite est placé sur l'amalgame et lavé plusieurs fois au CHCl_3 . Durant cette opération l'amalgame retient le soufre et noircit. L'extrait désoufré est récupéré dans un tube à hémolyse taré puis pesé après évaporation totale du solvant à l'air libre.

Les trois fractions de l'extrait chloroformique sont ensuite séparées par CPL. Les HC sat sont analysés par CG sur le même appareil hp 5880A Series et dans les mêmes conditions.

RESULTATS

PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX

La salinité des eaux de surface prélevées au Nord de la sebkha varie entre 3.54 à 130.62 g l^{-1} . Les concentrations les plus faibles sont mesurées dans les échantillons prélevés à la sortie de la station d'épuration et les plus fortes vers le centre (*Tab.1*). La conductivité électrique, moyen d'évaluation de la minéralisation globale des eaux est très élevée (5200-15360 μscm^{-1}) qualifiant ainsi l'eau de la sebkha comme inutilisable pour l'irrigation.

Les eaux ont une température comprise entre 25 et 34°C. Elles sont neutres à basiques (*pH entre 7.40 et 8.82*) et riche en O_2 dissous ($> 5 \text{ mg l}^{-1}$) (*Tab.1*).

ÉLÉMENTS NUTRITIFS

Les concentrations des nitrates (NO_3^- : 6.16 à 30.80 $mg\ l^{-1}$) dans la plupart des échantillons ne dépassent pas la norme du domaine public hydraulique (50 $mg\ l^{-1}$). La teneur la plus forte s'enregistre dans l'échantillon ESM6 prélevé à l'embouchure de l'oued Soltane où se déversent les rejets des eaux non traitées. Les ions orthophosphates (PO_4^{3-}) varient entre 6.80 et 42 $mg\ l^{-1}$. Les mesures de PO_4^{3-} dépassent la norme tunisienne des domaines hydraulique public (0,05 $mg\ l^{-1}$). Les plus fortes teneurs sont mesurées à la sortie de la station d'épuration (ESM1 et ESM2) et ses environs.

MATIÈRE ORGANIQUE DISSOUE

• CHLOROPHYLLE

La mesure de la chlorophylle *a* est utilisée comme indicateur de la biomasse phytoplanctonique dans les eaux naturelles. Elle représente le plus important pigment chez les organismes photosynthétiques aérobies (*excluant les cyanobactéries*) ; toutes les algues d'ailleurs en contiennent. Le contenu cellulaire en chlorophylle *a* est de 1 à 2 % en poids sec (Brient *et al.*, 2001).

Dans la littérature, selon l'espèce de phytoplanctons le taux de Chl « a » varie entre 20 $\mu g\ l^{-1}$ et 200 $\mu g\ l^{-1}$ (Codd and Bell, 1985 ; Brient *et al.*, 2001). Dans les échantillons de la sebkha de Moknine, les taux de Chl « a » varient de 3440 $\mu g\ l^{-1}$ à 18500 $\mu g\ l^{-1}$. La chlorophylle totale arrive jusqu'à 30000 $\mu g\ l^{-1}$. Ces valeurs excessivement élevées ne dénotent pas une activité photosynthétique mais une accumulation de ce pigment et un apport exogène. La présence d'une pollution organique se dégage à partir des valeurs de chlorophylle dépassant le seuil de vigilance (Tab. 1).

• COD ET EXT.T_c

Les teneurs de COD varient entre 100 ppm et 300 ppm. Cette richesse en MO est un indicateur de la présence d'une pollution organique. En effet, une abondance en extrait chloroformique ($Ext.T_c > 100\ ppm$) dans certains échantillons appuie l'idée d'une pollution organique.

La séparation des différentes fractions de Ext.T_c révèle un pourcentage important des composés polaires (70% en moyenne) montrant ainsi que l'origine des lipides dissous est biologique (Tissot et Welte, 1984) dans les eaux de la sebkha (Tab.1).

Enfin la distribution des n-alcanes analysés par CPG (Fig.3) montre que ces derniers sont centrés sur les légères (nC10–nC22), le maximum est en nC18–nC22 et l'imparité est nette avec une prédominance des n-alcanes à chaîne paire. Ce mode est caractéristique d'une origine algale (*chlorophytes*). La contribution terrigène est représentée par des n-alcanes centrés sur nC25–nC31. Cette contribution est minime comparée à l'apport algale (Fig.3). Toutefois, elle apparaît clairement dans l'échantillon ESM7.

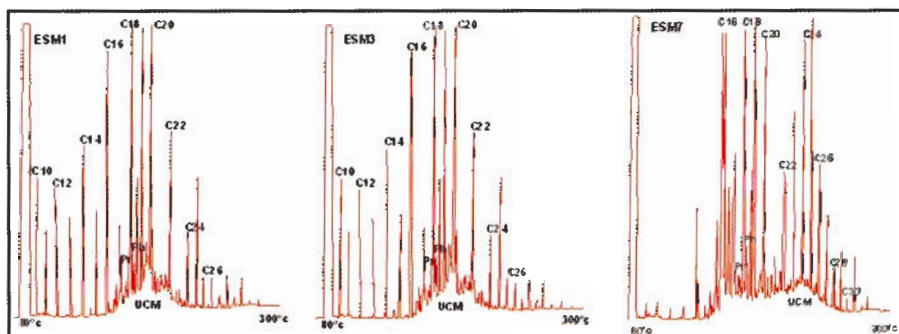


Fig. 3 : Chromatogrammes des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatisés des eaux sus-jacentes du système évaporitique de Moknine

GÉOCHIMIE DES SÉDIMENTS

• CO

Les échantillons prélevés loin de la station d'épuration présentent des teneurs en carbone organique total de l'ordre de 1%. Cependant les points prélevés près de la station, dans l'oued Soltane et dans les tapis de cyanobactéries enregistrent des valeurs très élevées arrivant à 4%. Ces valeurs exceptionnellement élevées ne sont mesurées qu'au Nord de la sebkha (Tab. 2).

• PYROLYSE ROCK EVAL

Au Nord de la sebkha les concentrations en hydrocarbures potentiels (S_2) enregistrées varient de 0.51 à 11.66 mg d'HCg⁻¹séd et celles des hydrocarbures libres (S_1) varient de 0,26 à 5,2 mg d'HCg⁻¹séd. Toujours Les valeurs les plus élevées de S_1 et S_2 correspondent aux points prélevés près de la station d'épuration et à l'embouchure de l'oued Soltane. Les valeurs très élevées en S_1 sont un indicateur de plus de la présence d'une contamination des sédiments superficielles.

La matière organique est récente au stade de la diagenèse précoce ($T_{max} < 420^\circ\text{C}$). Les valeurs de l'index d'hydrogène (IH) sont généralement élevées (Tab.2) indiquant l'origine essentiellement lacustre de MO. Certains points sont d'origine algale (SSM_2) et d'autres à contribution continentale (SSM_{10} et SSM_9) (Fig.4).

• COMPOSÉS HUMIQUES

L'extraction des composés humiques montre une abondance des composés humique totaux qui varient entre 13 et 34 en% de CO (Tab.2). Ces composés sont plus représentés par la fraction AF indiquant ainsi la faible minéralisation de MO. Cependant les taux assez élevés en humine relève d'une part de l'origine continentale de MO et d'autre part de la diagenèse précoce. MO est un mélange d'une contribution autochtone à partir d'une biomasse halophile et d'une contribution allochtone.

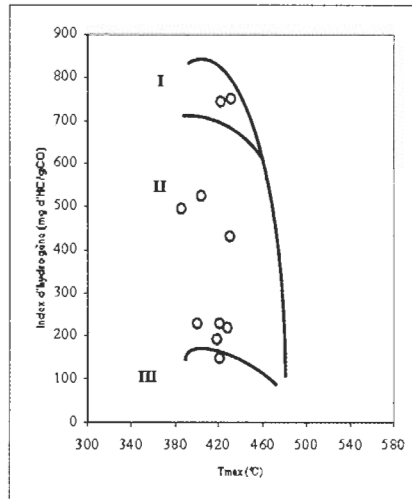


Fig. 4 : Diagramme IH/Tmax
(Origine de MO ; I : algair, II : lacustre, III : continentale)

• LIPIDES LIBRES

Les lipides libres ou bitumes sont abondants dans les échantillons qui ont donné les teneurs élevées en CO et en S1. L'extrait chloroformique dans ces échantillons atteint une concentration de l'ordre de 4000 ppm après élimination du soufre élémentaire. Cependant la fraction la plus importante dans la totalité des échantillons est la fraction polaire (NSO) prouvant l'origine biologique de la fraction lipidique et éliminant toute source de pollution par les hydrocarbures. Ceci est prouvé par la distribution des n-alcanes qui montre dans la plupart des échantillons une distribution centrée sur les lourds (nC18-nC31) sans abondance de carbone pair ou impair rappelant la distribution des n-alcanes issus des micro-algues tel que les cyanobactéries (Corné, 1982). Dans certains échantillons (SSM9 et SSM10) une répartition bimodale montrant la contribution algair et continentale (Fig.5). En effet, nous avons trouvé cette même répartition dans l'échantillon ESM7. L'origine algair et plus exprimée dans les échantillons d'eau.

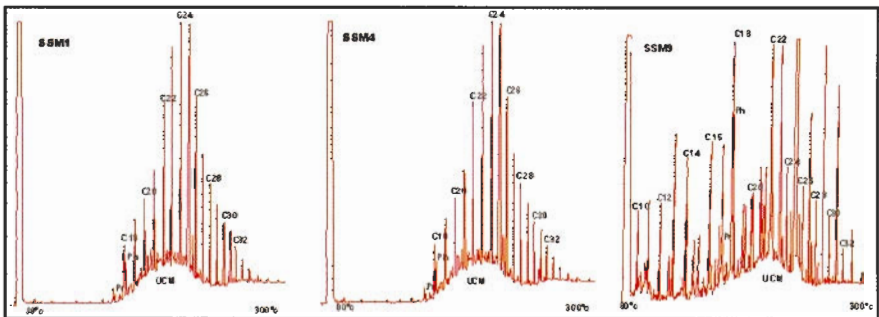


Fig. 5 : Chromatogrammes des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques des sédiments superficiels du système évaporitique de Moknine

Tableau 1 : Résultats des paramètres physico-chimiques, des nutriments, de la chlorophylle et de la géochimie organique des eaux sus-jacentes aux sédiments.

Références	pH	TP °C	O ₂ dissous mgl ⁻¹	Salinité gl ⁻¹	CE μscm ⁻¹	NO ₃ ⁻ mgl ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mgl ⁻¹	Chl T mgl ⁻¹	Chl « a » mgl ⁻¹	COD ppm	Ext.T ppm	HC Sat. %	HC Arom. %	N.S.O %
ESM1	7.46	25.5	5.30	3.72	5200	7.92	46.03	15.2	9.12	160	40	4	20	76
ESM2	7.46	25.3	5.50	3.54	4950	6.16	27.00	14.91	9.30	230	98	17	12	71
ESM3	8.82	30.2	15	111.57	131200	7.04	30.40	28.17	17.55	330	58	16	16	68
ESM4	7.46	32.4	6.10	130.62	153600	12.32	21.80	14.43	8.83	200	68	17	12	71
ESM5	7.54	31.0	18.20	111.58	131300	7.04	21.60	29.56	17.88	110	52	26	26	48
ESM6	7.40	29.9	24.20	126.37	148600	30.80	14.20	30	18.50	590	380	2	2	96
ESM7	10.34	38.40	12.8	124.65	146583	8.80	33.26	22.63	12.71	250	115	29	12	59
ESM8	10.41	34.4	10.60	118.90	139800	5.28	14.00	17.92	10.54	270	55	18	15	67
ESM9	8.18	33.7	6.90	16.58	19500	7.04	5.90	14.38	8.92	100	28	35	35	29
ESM10	8.73	32.1	5.20	14.37	16900	7.92	14.60	5.8	3.44	120	57	26	12	62

Tableau 2 : Résultats des paramètres de la géochimie organique des sédiments superficiels : pyrolyse Rock-Eval, dosage des composés humiques et extraction des lipides totaux : (S1 : mg d'HC g⁻¹ séd, S2 : mg d'HC g⁻¹ séd, IH : mg d'HC g⁻¹ CO)

Références	CO %	CHT %CO	AF %CO	AH %CO	Humine %CO	AF/AH	S1	S2	IH	Tmax (°C)	Ext.T+S (ppm)	Ext.T (ppm)	Sat %	Arom %	NSO %
SSM1	1,91	23	12	10	77	1,15	0,92	3,90	204,19	430	1993,33	1993	9	3	88
SSM2	1,22	34	25	10	66	2,50	3,06	9,15	750,00	432	3160,00	3160	11	2	87
SSM3	1,52	13	7	6	87	1,03	1,08	5,87	386,18	422	7426,67	4160	2	0	98
SSM4	2,19	17	9	8	83	1,18	1,30	4,78	218,26	428	4160,00	3467	6	1	93
SSM5	1,62	29	19	10	71	1,76	0,62	3,69	227,78	421	2540,00	2330	5	1	93
SSM6	4,83	11	6	5	89	1,20	7,83	23,38	484,06	386	12820,00	11140	2	0	98
SSM7	4,90	26	5	5	74	1,00	5,20	25,64	523,27	404	4486,67	4400	3	3	94
SSM8	1,74	29	16	13	71	1,00	1,31	3,98	228,74	401	1766,67	1373	2	0	97
SSM9	1,13	31	13	18	69	0,75	0,76	1,77	156,64	419	1260,00	1260	5	2	94
SSM10	1,02	16	7	10	84	0,7	0,26	1,51	148,04	421	720,00	620	5	23	72

DISCUSSIONS ET CONCLUSION

Dans les eaux de surface du système de Moknine, en plus de la présence d'une quantité importante de nutriments propice au développement d'une biomasse, les conditions physico-chimiques des eaux sont aussi favorables à la croissance des micro-organismes et des phytoplanctons. La température élevée a induit des odeurs désagréables dans le système mais elle est un paramètre convenable à une efflorescence des végétaux inférieurs. En effet, le taux de chlorophylle est plus important quand la température est élevée (Fig. 6).

La prolifération d'une biomasse est sujet d'une production *in situ* de l'oxygène dissous caractéristique de la photosynthèse. De ce fait, les quantités d'O₂ dissous importante dans la majorité des stations sont le résultat d'une activité photosynthétique. En effet, une corrélation positive entre (Chl) et O₂ dissous ($R2 : 0.9$) se déduit à partir de la figure 7. La valeur excessive d'O₂ dissous atteignant 24,2 mg l⁻¹ dans l'échantillon ESM6 ne peut être que le symbole de conditions eutrophiques se développant dans la sebkha.

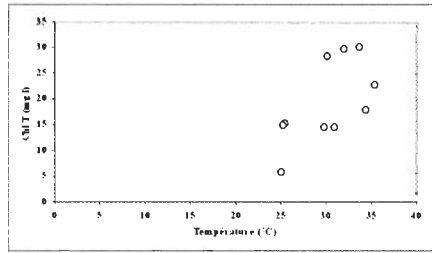


Fig.6 : La chlorophylle totale dosée dans les échantillons d'eau sus-jacente en fonction de la température

La salinité généralement élevée n'est pas un obstacle pour le développement des micro-algues et de phytoplanctons. La répartition de (Chl) en fonction de la salinité montre deux domaines (Fig.8). Un domaine de faible salinité (< 20 g l⁻¹) et où (Chl.T) varie de 5 à 15 mg l⁻¹ et un deuxième domaine de salinité très importante (100 g l⁻¹) avec des taux de (Chl.T) plus élevés arrivant à 30 mg l⁻¹. Cette distribution prouve que le type de biomasse dans la sebkha est halophile et qu'il supporte la variation de salinité. En effet, un seul mode de distribution de n-alcanes est remarqué dans la majorité des échantillons. Cette répartition est centrée sur les légers (nC10-nC22) avec une prédominance des pairs et dénote une origine algale. Les algues qui se développent dans la sebkha sont caractérisées par l'absence de n-alcanes en C21 et celui en nC23.

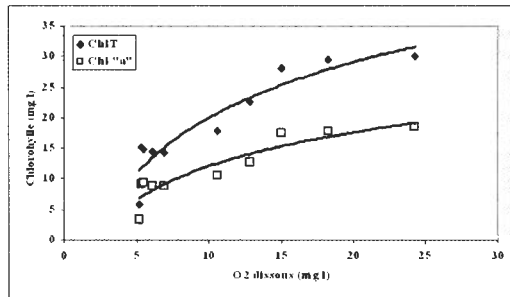


Fig. 7 : La chlorophylle (Chl.T et Chl « a ») dosée dans les échantillons d'eau sus-jacente en fonction de l'oxygène dissous

Aucune corrélation n'est enregistrée entre les composés organiques (*Chl*, *COD* et *Ext.T_e*). Ce qui conduit à penser que la (*Chl*) n'est pas uniquement issue de l'activité *in situ*, un apport à partir des eaux usées est aussi probable. Le taux de 15 mg/l¹ de (*Chl.T*) en ESM1 et ESM2 le prouve. MO provenant à partir des eaux usées est riche en pigment et enrichie la sebkha en (*Chl*). En effet, les composés polaires dans ces échantillons sont très abondants et la distribution des n-alcanes est similaire à celle notée dans les eaux de la sebkha.

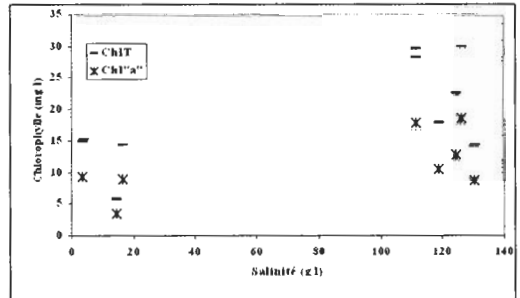


Fig. 8 : La chlorophylle dosée (ChlT et Chl« a ») dans les échantillons d'eau sus-jacente en fonction de la salinité

Les taux de Chl « a » sont très élevés et dépassent à la fois, les concentrations attribuées par Wetzel (1983) pour les différents états trophiques des lacs (Tab.3) et le seuil de vigilance qui est de 200µg. Ainsi, la partie septentrionale du système de Moknine est en état « d'hypereutrophisation ».

Tableau 3 : Classification trophique des lacs

	Oligotrophe	Mésotrophe	Eutrophe
Taux de Chl « a » (mg/l)	0,002 (0,0003-0,005)	0,005 (0,003-0,011)	0,14 (0,003-0,078)

D'après l'étude de la matière organique dissoute, le flux organique est important dans la sebkha. Les taux de COD et de *Ext.T_e* très élevés indiquent la présence d'une pollution organique résultant d'une production primaire intense via les rejets organiques à partir de la station d'épuration.

L'accumulation de MO dans les sédiments est contrôlée par la productivité primaire et la préservation (Curtis, 1980). Généralement quelque % de CO issu de la photosynthèse subsistent et s'enfuient dans les sédiments (Lee et al. 1991). À l'interface eau/sédiment, une quantité importante (30 à 99%) de MO est minéralisée. Cette interface est une zone active pour la dégradation de MO et la régénération des composés inorganiques (N, P) (Schreiber et al., 2001). L'étude de MO fossilisée dans les sédiments superficiels par les méthodes classiques de la géochimie organique révèle que la zone septentrionale est un milieu favorable à l'accumulation de MO. Celle-ci est bien préservée dans des conditions réductrices (*AF/AH* > 1 et *Pr/Ph* < 1). MO est toujours bien préservée, mais dans certains points, les taux exceptionnellement élevés ne

dénotent pas une condition de préservation seulement mais probablement une eutrophisation qui atteint les sédiments superficiels. En effet, les sédiments récents sont caractérisés par des valeurs de S1 < 500ppm. Toutefois, les valeurs élevées en S1 enregistrées à proximité de la station d'épuration et dans les zones de prolifération de tapis algaires prouvent la présence d'une pollution organique. De plus, le pic S2 correspondant aux composés hydrocarbonés associés à MO hautement polymérisée d'un sédiment, ne peut donc dériver d'une source de pollution (*Espitalié et al., 1986*) notent des taux élevés signalant un dépôt considérable de MO à partir d'une source essentiellement algair. Pareillement, le fractionnement des extraits lipidiques montrant une abondance de la fraction polaire dans les eaux de surface et dans les sédiments rejette toute idée d'une pollution par les hydrocarbures.

L'installation des tapis de cyanobactéries au Nord de la sebkha permet une rétention d'eau et conduit à un apport d'éléments organiques sources de nutriment et d'énergie. La décomposition de ces tapis augmente la charge de l'écosystème en matière organique expliquant ainsi la richesse des échantillons prélevés dans cette zone ($CO = 4\%$).

Les sources de MO sont variées dans ce système. C'est un mélange d'une fraction autochtone formée par des phytoplanctons : chlorophytes et cyanobactéries, et d'une fraction allochtone provenant des rejets des eaux usées et de MO continentale. Le caractère algair (*chlorophytes*) et continental dans les sédiments est dissimulé par l'abondance des cyanobactéries qui n'apparaît que dans les échantillon SSM 9 et SSM10 (*Fig.5*).

L'étude de l'origine de MO à partir des composés humiques montre que la contribution marine majoritaire a une fraction d'AF représentant moins de 10% du total de MO. Celle à contribution continentale quasi totale a 12% d'AF (*Pelet, 1983*). Si on applique ce résultat sur la sebkha de Moknine, nous pouvons déduire qu'au Nord, les échantillons prélevés à la périphérie où près de l'oued Soltane et renfermant des pourcentages en AF > 12% sont à contribution continentale. Cependant, les échantillons prélevés près de la station d'épuration ou dans les tapis de cyanobactéries et renfermant des pourcentages de AF < 10%, sont à contribution lacustre. Cette origine mixte de MO est déjà annoncée par le diagramme IH/Tmax où les échantillons se répartissent sur les trois domaines (I : algair, II : lacustre et III : continentale). L'hétérogénéité de point de vue origine, se dégage aussi par l'abondance d'humine dans les sédiments et l'absence de corrélation entre les différentes fractions des composés humiques (AF, AH et Humine) et CO (*Fig.9*). Ce cas est aussi remarqué dans les lacs Huron et Michigan, où l'essentiel de MO se présente sous forme d'humine (*Bourbonniere et Meyers, 1983*). L'abondance d'une forme par rapport à une autre dans ces lacs est en relation étroite avec les conditions du milieu. Cependant, l'origine de AF et AH est lacustre (*Otsuki and Hanya, 1967, Ishiwatari, 1970 ; Nissembaum and Kaplan, 1972 ; Kemp, 1973 ; Bourbonniere and Meyers, 1983*).

Dans le cas du système de Moknine, ces composés semblent provenir directement à partir de la biomasse. Ceci est prouvé par les travaux de Ertel et Hedges (1985) qui ont montré que les substances humiques ne sont pas exclusivement associées à la phase inorganique du sédiment mais peuvent être aussi obtenues directement par extraction de leur source comme les débris des plantes vasculaires ou aussi des résidus de planctons. En effet, Les plantes vasculaires fraîches peuvent libérer jusqu'à 40% de leur carbone total sous forme d'AH et AF par procédure d'extraction des composés humiques réalisé sur les sols et les sédiments. De ce fait, l'humine dosée dans les sédiments de la sebkha est d'origine continentale et AF et AH sont libérés par la biomasse halophile formée par les cyanobactéries et les chlorophytes.

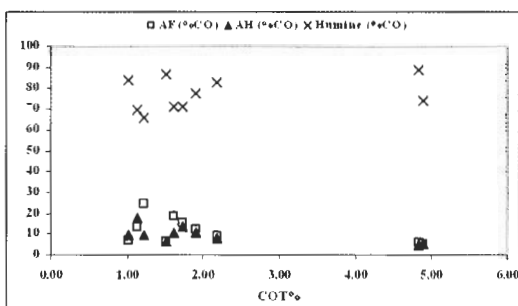


Fig. 9 : Variation des composés humiques (AF, AH et humine) en fonction du CO₂

Références bibliographiques

- [1] AMARI A., 1986 : Des oscillations du niveau marin durant le Quaternaire sur le littoral de sfax. SC. de la terre. 4 : 71 – 78.
- [2] BOURBONIERE R.A. and MEYER S., 1983: Characterization of sedimentary humic matter by alkaline hydrolysis. Org. Geochim.5, 3: 131 – 142.
- [3] BRIENT L., VEZI C. et BERTRU G., 2001 : Evaluation des efflorescences à cyanobactéries dans des eaux des cours d'eau et plan d'eau bretons. Rapport final DIREN Bretagne. 75p
- [4] CHAIRI R., 2004 : Etude du remplissage sédimentaire récent et de la matière organique associée dans la sebkha de Moknine. Thèse de Doctorat. Univ. Tunis. Faculté des Sciences de Tunis. 260p
- [5] CODD G.A. and BELL S.G., 1985 : Eutrophication and toxic cyanobacteria in freshwater. Wat. Poll. Contr. 84: 225-232
- [6] CORNEE A., 1982 : Bactéries des sources et des sédiments des marins salants des salines – de – Giraud (sud de la France). Géol. Méditerranée .9 : 369 – 389.
- [7] CURTIS C.D., 1980 : Diagenetic alteration in black shales. Org. Geochim.16 : 735 – 747.
- [8] ERTEL J.R. and HEDGES J.I., 1985: Sources of sedimentary humic substances: vascular plant debris. Geochim. et Cosmochim. Acta. 49: 2097-2107.

- [9] ISHIWATARI R., 1970 : Structural characteristic of humic substances in recent lake sediment. *Advance in Org. Geochem.* 285 – 311.
- [10] JEFFREY S.W. and G.F. HUMPHREY, 1975: New spectrophotometric equations for determining chlorophyll a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochem, Physiol. Pflanzen*, Bd. 167 : 191-194,
- [11] KEMP A.L.W., 1973: Preliminary information on the nature of organic matter in the surface sediments of lakes Huron, Erie and Ontario. *proc. Symp. On Hydrogeochemistry and Biogeochemistry.* (ed) Ingerson : 40-48.
- [12] LEE S.H. FUHRMAN J.A., 1991: Spatial and temporal variation of natural bacterial and plankton assemblages. *Limnol. Oceanogr.* 36: 1277 – 1287.
- [13] MONIN J.C., PELET R. et FEVRIER A., 1978 : Analyse géochimique de la matière organique extraite des roches sédimentaires. Extraction des roches en faibles quantités. *Revue I.F.P.* 33, 2: 223–240.
- [14] NISSEBAUM A. and KAPLAN I. R., 1972: Chemical and isotopic evidence for the origin of marine humic substances. *Limnol.Oceanogr.* 17: 570-582.
- [15] OTSUKI A. and HANYAT., 1967 : Some precursors of humic acid in recent lake sediment suggested by infrared spectra. *Geochim. Cosmo. Acta.* 31 :1505–1515.
- [16] PASKOFF R. et SANLAVILLE P., 1983 : Les côtes de la Tunisie. Variations du niveau marin depuis le Tyrrhénien. *Méditerranéenne*, 14, Ser. Géol. et Préhis. 2: 29-42.
- [17] PELET R., 1983 : Preservation and alteration of present day sedimentary organic matter . In : Bjoroy M (ed). *Advances in Org. Geochem.* John Wiley and sons, Chichester : 241-250.
- [18] SCHREIBER B.C., PHILP R.P., BENALI S., HELMAN M.L., De la PENA J.A., MAKFIL R., LANDAI P., COHEN A.D., and KENDALL C.G.ST.C., 2001: Characterization of organic matter formed in hypersaline carbonate evaporate environments: hydrocarbon potential and biomarkers obtained through artificial maturation studies. *Journal of petroleum Geology.* 24,3 : 309–338.
- [19] TISSOT B. and WELTE D.H., 1984: *Petroleum formation and occurrence.* 2nd Ed. Springer – Verlag, Berlin, 699p.
- [20] WETZEL R.G., 1983: *Limnology*, 2nd edition. CBS College Publishing, New York, 860