



HAL
open science

ETUDE DU REMPLISSAGE SEDIMENTAIRE RECENT ET DE LA MATIERE ORGANIQUE ASSOCIEE, DANS LA SEBKHA DE MOKNINE

Raja Chairi

► **To cite this version:**

Raja Chairi. ETUDE DU REMPLISSAGE SEDIMENTAIRE RECENT ET DE LA MATIERE ORGANIQUE ASSOCIEE, DANS LA SEBKHA DE MOKNINE. Géochimie. Université de Tunis El Manar, 2004. Français. ⟨NNT : >. ⟨tel-03208258⟩

HAL Id: tel-03208258

<https://hal.science/tel-03208258v1>

Submitted on 26 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

UNIVERSITE TUNIS EL MANAR

FACULTE DES SCIENCES DE TUNIS

THESE

Présentée en vue d'obtenir le Grade de

DOCTEUR EN GEOLOGIE

Option : GEOCHIMIE ORGANIQUE

par Raja CHAIRI

*ETUDE DU REMPLISSAGE SEDIMENTAIRE RECENT ET
DE LA MATIERE ORGANIQUE ASSOCIEE,
DANS LA SEBKHA DE MOKNINE*

Soutenue-le 19 juin 2004.devant la Commission d'Examen

Jury :

Président : Mr Moncef GUEDDARI

Professeur. FST

Rapporteurs : Mr Habib BELAYOUNI

Professeur. FST

Mme Aicha SASSI

Maître de conférences. FST

Mr Mohamed SOUSSI

Professeur. FST

Examineur : Mr Mabrouk MONTACER

Professeur. FSS

Résumé

Mots clés : séquences lithologiques, diagenèse, matière organique, système hypersalin, interface eau/sédiment, activité bactérienne, pollution organique



Dans son histoire la sebkha est passée par deux épisodes. Le plus ancien est une phase transgressive où l'étendue de la sebkha était plus large vers l'Ouest. Cette période s'est caractérisée par une abondance du matériel organique et une bonne préservation dans la séquence argileuse. Le deuxième épisode est une phase de progradation du faciès fin et du faciès organique. L'avènement des sables par le réseau hydrographique très abondant du côté occidental a joué un grand rôle dans le comblement de cette partie. La partie ouest désormais n'enregistre que de très faible taux de matière organique résiduelle, alors que, la partie orientale siège d'accumulation d'eau et de faciès fin note une abondance du matériel organique d'origine mixte. La topographie basculée plus vers l'Est et l'écoulement des eaux dans cette direction ont joué un rôle dans la progradation du faciès organique.

L'évolution de la matière organique varie de la périphérie au centre. Les conditions oxiques régnant le faciès grossier déposé sur la bordure ont édifié un matériel organique formé de composés plus stables. Le centre siège de dépôts fins se caractérise par une abondance de faciès organique dans un état diagenétique précoce. Les conditions généralement anoxique dans cette zone ralentit la transformation des composés organiques. En effet, l'activité bactérienne est du type méthanogène. La présence du squalane le confirme.

La répartition des n-alcanes centrée sur nC25-nC31, les valeurs élevées de CPI et l'emplacement de la majorité des échantillons dans le domaine III du diagramme IH/Tmax corroborent l'origine essentiellement continentale de la matière organique fossilisée dans le système endoréique salin de Moknine. Une faible quantité de ce matériel provient de l'activité bactérienne. Les bitumes libres sont riches en composés polaires montrant ainsi l'origine biologique de la fraction lipidique.

Les niveaux noirs riches en matière organique au sein des masses sableuse sur la bordure orientale sont des marqueurs lithologique et organique, de périodes successives d'inondation de la sebkha, consécutives à des saisons où la pluviosité à été particulièrement élevée.

La sebkha de Moknine est le siège des rejets des eaux de la station d'épuration et ce depuis une vingtaine d'années dans sa partie nord. Les carottes SM9 et SM11 ont enregistré dans leurs sédiments de surface (25cm) des valeurs exceptionnellement élevées en matière organique. Ces taux sont les témoins de contamination par des produits organique d'origine anthropique.



Abstract



The lithologic sequence revealed two different episodes in the Moknine sebkha. The first is characterized by an abundance of organic material and a good preservation in a clayey sequence. The second episode is qualified by the progradation of clay and organic facies to eastern part.

Dissymmetry of topography and water drainage to the eastern direction played the role in organic facies progradation. The western part records very little quantities of organic matter while the oriental part notes an abundance of the organic material.

A significant diagenetic alteration of organic matter characterizes a periphery zone while rapid deposition of the salt on the mud in the central zone suggest a more reducing environment favorable for better preservation of organic matter.

The distribution of n-alkanes and the increase rate of CPI and a low hydrogen index value indicate that the most of the sedimentary organic matter in the sebkha is derived from continent with bacteria organic matter present in relatively small amount.

Level black rich in TOC within the sand deposit in the oriental sector are imply a successive periods of flood in the sebkha.

Moknine's sebkha is the seat of the wastewater in the north part since twenty years. SM9 and SM11 cores registered in superficial sediment (25cm) a high value of organic matter. These rates are considered the result of anthropic activities.



AVANT - PROPOS

J'adresse mes sincères remerciements à M. Habib BELAYAOUNI, Professeur à la FST et Directeur de l'Unité de Recherche Scientifique Pédologie et Géochimie Organique qui a bien voulu diriger ce travail et me faire bénéficier de son expérience, de ses conseils et de son appui.

Je tiens à remercier M. Mohamed SOUSSI. et Mme Aicha SASSI qui ont accepté de juger mon travail en tant que rapporteurs. Que M. Gaddari soit également remercier d'avoir accepté de présider mon jury. Je remercie vivement Mr Montacer Mabrouk d'avoir examiné ma thèse.

Il m'est agréable d'exprimer toute ma gratitude à Monsieur et Madame Sassi pour leur aide. Particulièrement à madame Sassi pour son appui constant qu'elle m'a apporté, pour ses conseils judicieux et sa confiance.

Au cours des années passées, j'ai bénéficié du soutien chaleureux et amical de l'ensemble du personnel de département de Géologie. J'ai trouvé auprès d'eux aide morale et matériel, et stimulation. C'est à am Rchid, Mmes Najet BEN LEMINE et Najiba OUERTANI, MM Nassar Mdellagi, Hatem et Abdessalam OUERTANI que je voudrais remercier. Mes remerciements aussi, aux membres de secrétariat Adel, Jannet, Henda, Brahim, Walid et am Taher et aux chauffeurs Néji, Am Mansour, Am lamine, Faouzi et Moncef.

Mes remerciements particuliers s'adressent à mes ami(e)s : Amel MATAR BECHA, **les BOUTIBS** : Lahsen et Fatima, Zohra El ASMI-JALLOULI, Aslam JALLOULI, Feyda SRARFI et son mari Salih, Meriem HJAIJ, Thouraya CHAHED, Salah ZAOUCH, Kamel OURFELLI, Nedja GAALOU pour leur soutien amical et moral et Moncef ESSAIDI pour son aide et ses critiques constructives.

Mes remerciements aussi à M. DISNAR qui m'a aidé dans l'interprétation des chromatogrammes d'origine bactérienne, M. Claude LARGEAU qui a corrigé l'article et M. Dominique FRANCOEUR qui a corrigé la conclusion.

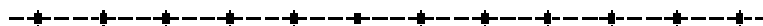
J'adresse mes remerciements aux membres de l'Unité de Recherche Scientifique de Pédologie et Géochimie Organique : MM Abdessatar Hatira, Boubaker HOUMANE, Nouredine GABTNI, Rim Ben HAMOUDA, Faiza BOUCHAKOUR, Isabelle FRANC, Monia BOUHLEL, Sameh RAISSI, Souhir JABALAH, Oum Hani, Didier, Kmar, Fatma et, Naoual.

A tous mes amis du Département de Géologie dont je cite : Malika ZAGGEF, Nouredine ESSOUNI, Am Salah, Lotfi, Mohamed, Leila, Mostpha, Boutheina, Haifa, Abir, Lamia, Helmi, Azouz, Zaineb, Amel, Sarra, Tkitek

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents, à Leila , Youssr, Kamel et Mounir, pour m'avoir soutenu et encouragé durant toutes les étapes franchies ces dernières années, à Sonia qui a broyé des échantillons, Mona qui a mis à ma disposition tout son matériel informatique, Selim qui a traité plusieurs dessins et graphiques de cette thèse, et Atef « qui a supporté les retards au bureau ».

A tous ce qui me sont chers je dédie ce travail

SOMMAIRE



	Pages
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE –I- CADRE GENERAL	
I- CADRE GEOGRAPHIQUE	6
I-1- Présentation du site	6
I-2- Conditions climatiques	6
I-2-1- Les précipitations	6
I-2-2- La température	8
I-2-3- Le vent	8
I-2-4- L'évaporation et l'humidité relative	8
I-3- La faune et la flore	8
II- CADRE GEOLOGIQUE	10
II-1- Données stratigraphiques	10
II-1-1- Le Miocène	10
II-1-2- Le Mio-pliocene	10
II-1-3- Le Pliocène	10
II-1-4- Le Quaternaire	12
II-2- Données structurales	12
II-3- Données morphologiques	14
II-4- Evolution du bassin de Moknine	15
II-5- Hydrologie générale	16
II-5-1- Hydrologie souterraine	16
II-5-2- Hydrologie superficielle	20
II-5-3- Les eaux usées	20
CHAPITRE –II- METHODOLOGIE	
I-SITE D'ECHANTILLONNAGE	24
I-1-Sédiment de surface	24
I-2-Sédiment des carottes	24
II- MODE D'ECHANTILLONNAGE	26
II-1- Sédiment de surfaces	26
II-2-Sédiment des carottes	26

III- ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE	28
III-1- Etude des lithofacies	28
III-2- Calcimétrie	28
III-3- Granulométrie de la fraction grossière	29
III-4- Diagramme de Passega	29
III-5- Microgranulométrie	31
III-6- Identification minéralogique par diffractométrie des rayons x	31
III-5-1- Diagramme de poudre	32
III-4-2- Agrégats orientés	32
IV- ETUDE DE LA MATIERE ORGANIQUE	32
IV-1- Dosage du carbone organique total	33
IV-2- Pyrolyse Rock Eval	33
IV-3- Extraction des composés humiques	34
IV-4- Extraction des bitumes libres	37
IV-4-1- Extraction des composés lipidiques	37
IV-4-2- Elimination du soufre élémentaire	38
IV-4-3- Fractionnement de l'extrait par chromatographie en phase liquide	40
IV-4-4- Etude de la distribution des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques par chromatographie en phase gazeuse	41
CHAPITRE –III- ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE	
I-COMPOSITION LITHOLOGIQUE DE LA COLONNE SEDIMENTAIRE	44

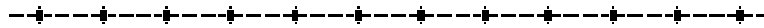
I-1- Description lithologique des sédiments de surface	46
I-2- Description lithologique des sédiments des carottes	48
II- ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE	63
II-1- Faciès détritiques	63
II-2- Faciès carbonatés	64
II-2-1- Carbonates	64
II-2-2- Carbone minéral	68
II-3- Analyse granulométrique	71
II-3-1- Sédiments de surface	71
II-3-2- Sédiments des carottes	71
II-4- Microgranulométrie	79
II-4-1- Sédiments de surface	79
II-4-2- Sédiments des carottes	81
III- COMPOSITION MINERALOGIQUE	84
III-1- Les minéraux non argileux	84
III-1-1- Quartz	87
III-1-2- Feldspaths	87
III-1-3- Carbonates	87
III-1-4- Evaporites	90
III-2- Les minéraux argileux	93
III-2-1- Kaolinite	94
III-2-2- Illite	94
III-2-3- Smectite	94
CHAPITRE –IV- REPARTITION SPATIALE DE LA MATIERE ORGANIQUE	
I- CARBONE ORGANIQUE TOTAL (COT)	107
II- ANALYSE DE LA MATIERE ORGANIQUE PAR PYROLYSE ROCK-EVAL	112
II-1- Les composés hydrocarbonés libres (S1)	114
II-2- Les composés hydrocarbonés potentiels (S2)	117
II-3- Diagramme IH/Tmax	120
III- ETUDE DES COMPOSES HUMIQUES	123
III-1- Résultats de l'étude des composés humiques	126
III-1-1- Composés humiques totaux (CHT)	126
III-1-2- Fractionnement des CHT en acide fulvique, acide humique et Humine	129
IV – ETUDES DES BITUMES LIBRES	134
IV-1- Extrait chloroformique	136

IV-2 – Analyse quantitative des différentes fractions de l'extrait lipidique	137
IV-3-1- n-alcanes	141
IV-3-2- Indice d'imparité	142
IV-3-3- Les iso-alcanes isoprénoïdes	145

CHAPITRE -V- EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LE TEMPS

I- REPARTITION DES TENEURES EN CARBONE ORGANIQUE TOTAL	154
I-1- Distribution verticale des teneurs en CO ₂	154
I-2- Distribution latérale des teneurs en CO ₂	163
II- ANALYSE DE LA MATIERE ORGANIQUE PYROLYSE ROCK-EVAL	168
II-1- Aspects quantitatifs	168
II-1-1- Les composés hydrocarbonés libres	168
II-1-2- Les composés hydrocarbonés potentiels	179
II-2- Aspects qualitatifs	189
III ETUDE DES BITUMES LIBRES	192
III-1- Extrait chloroformique total	194
III-2- Analyse Quantitative des différentes fractions de l'extrait lipidique	203
III-3- Etude de la distribution des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques	210
III-3-1- n-alcanes	211
III-3-2- Les alcanes isoprénoïdes	220
CONCLUSION GENERALE	233
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	239
ANNEXES	249

Liste des Figures et des Planches



1-Figures

Chapitre I :

Figure 1 : Situation géographique du site d'étude : Sebkha de Moknine.	p7
Figure 2 : Carte géologique de la sebkha de Moknine.	p11
Figure 3: Coupe géologique et sismique du secteur de Moknine et du graben de Mahdia.	p13
Figure 4 : Structures et fracturations des sebkhas du Sahel central.	p14
Figure 5 : Evolution du bassin de Moknine de l'Aptien au Serravelien.	p15
Figure 6 : Carte piézométrique de la nappe phréatique de Moknine.	p17

Chapitre II :

Figure 7 : Répartition des sédiments de surface prélevés dans la sebkha de Moknine.	p25
Figure 8: Localisation des points d'échantillonnage des carottes dans la sebkha de Moknine.	p27
Figure 9 : Organigramme des analyses effectuées sur les sédiments de la sebkha de Moknine.	p30
Figure 10 : Schéma analytique de l'extraction des composés humiques.	p36
Figure 11 : Schéma de la séparation des différentes fractions lipidiques.	p39

Chapitre III :

Figure 12 : Répartition spatiale des sédiments de surface de la sebkha de Moknine.	p47
Figure 13 : Description lithologique des carottes prélevées au NE de la sebkha de Moknine.	p49
Figure 14: Description lithologique des carottes prélevées au SE de la sebkha de Moknine.	p50
Figure 15: Description lithologique des carottes prélevées au N de la sebkha de Moknine.	p51
Figure 16 : Description lithologique des carottes prélevées NW de la sebkha de Moknine.	p52
Figure 17 : Description lithologique des carottes prélevées au SW.	p53
Figure 18 : Description lithologique des carottes SM8, SM7, SM11 et SM19.	p54
Figure 19a : Répartition latérale des sédiments de la séquence récente et limites actuelles du bassin évaporitique de Moknine.	p57
Figure 19b : Répartition latérale de la séquence argileuse et anciennes limites (supposées) de la sebkha de Moknine.	p58
Figure 19c : Topographie du bassin de Moknine (vue en 3D).	p61
Figure 20 (a-d) : Pourcentages des fractions fines et grossières dans les sédiments des carottes.	pp 65-67
Figure 21 : Répartition latérale des carbonates analysés dans les sédiments de surface de la sebkha de	

Moknine.	p69
Figure 22 a : Courbes cumulatives des sédiments de surface de la sebkha de Moknine.	p73
Figure 22 (b-c) : Courbes cumulatives des sédiments des carottes.	pp74-75
Figure 23 a: Diagramme de Passega des sédiments de surface.	p77
Figure 23 b: Diagramme de Passega des sédiments des carottes.	p78
Figure 24 a : Courbes microgranulométriques des sédiments de surface.	p80
Figure 24 (b-d) : courbes microgranulométriques des sédiments en subsurface.	pp81-82
Figure 25 : Diffractogrammes des minéraux non argileux présents dans la sebkha de Moknine.	p91
Figure 26 : Diffractogramme des minéraux argileux déterminés dans la sebkha de Moknine.	P95
Figure 27a : Pourcentages des minéraux argileux trouvés dans les sédiments de surface de la sebkha de Moknine.	p98
Figure 27 (b-c) : Pourcentages des minéraux argileux trouvés dans les sédiments des carottes.	pp94-100

Chapitre IV :

Figure 28 : Répartition latérale du carbone organique total dans le bassin de Moknine. (COT exprimé en %).	p108
Figure 29 : Répartition latérale des hydrocarbures libres (S1) dans la sebkha de Moknine (S1 en mg d'HC/ g séd.).	p113
Figure 30 : Variation des composés hydrocarbonés libres (S1) en fonction du COT.	p115
Figure 31 : Répartition latérale des hydrocarbures potentiels (S2) dans le bassin de Moknine. (S2 mgd'HC/g séd).	p116
Figure 32 : Variation des composés hydrocarbonés libres (S1) en fonction des composés hydrocarbonés potentiels (S2).	p118
Figure 33 : Variation des composés hydrocarbonés potentiels (S2) en fonction du COT.	p119
Figure 34 : Diagramme IH/Tmax des sédiments de surface	p121
Figure 34-1 : Evolution de la matière dans les sédiments	p125
Figure 34-2 : Humine origin : Bacterial decomposition and anabolic contribution	p125
Figure 35 : Répartition latérale des composés humiques totaux dans le bassin évaporitique de Moknine (CHT% du sédiment).	p127
Figure 36 : Variation des composés humiques totaux (CHT) en fonction du carbone organique total (COT).	p128
Figure 37: Variation de l'humine en fonction des composés humiques totaux.	p133
Figure 38 : Variation des acides humiques (AH) en fonction des acides fulviques.	p133
Figure 39 : Répartition latérale des extraits chloroformiques totaux (Ext.T) dans les sédiments de surface de la sebkha de Moknine. (Ext.T en ppm).	p135
Figure 40 : Variation de l'extrait chloroformique total en fonction du COT.	p137
Figure 41(a-b) : Pourcentages des différentes fractions de l'extrait chloroformique total. (partie immergée et émergée).	pp138-139
Figure 42(a-b) : Chromatogrammes des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques des sédiments de surface. (partie immergée et émergée)	pp143-144
Figure 43 : Diagramme de waples : Pr/nC17 en fonction de Ph/nC18. (sédiment de surface)	p148

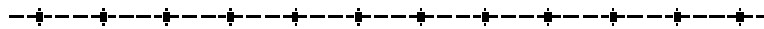
Chapitre V :

Figure 44 (a-g) : Variation du COT en fonction de la profondeur.	pp156-162
Figure 45 (a-g) : Variations des hydrocarbures libres (S1) en fonction de la profondeur dans les échantillons des carottes.	pp169-175
Figure 46 (a-g) : Variation des hydrocarbures potentiels (S2) en fonction de la profondeur	pp181-187
Figure 47(a-b) : Variation des hydrocarbures libres (S1) en fonction du COT.	pp177-178
Figure 48 : Variations des hydrocarbures potentiel (S2) en fonction des hydrocarbures libres (S1).	p180
Figure 49 : Diagramme IH /Tmax des sédiments des carottes.	p190
Figure 50 (a-f) : Variation des extraits chloroformiques totaux (Ext.T) en fonction de la profondeur.	pp196-202
Figure 51 (a-b): Variation de l'extrait chloroformique total (Ext.T) en fonction du COT.	pp204-205
Figure 52(a-b) : Pourcentages des différentes fractions de l'extrait chloroformique total.	pp208-209
Figure 53 (a-g) : Chromatogrammes des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques des sédiments des carottes.	pp214-219
Figure 54 (a-b) : Diagramme de wapels : Type de matière organique, environnement de dépôt et degrés de maturité.	pp224-225
Figure 55 : Evolution et dynamique de la sebkha de Moknine	p230

2-Planches

Planche1	p9
Planche 2	p21
Planche 3	p45
Planche 4	p86
Planche 5	p89
Planche 6	p111

Liste des Tableaux



CHAPITRE III :

Tableau 1 : Principales informations contenues dans le message sédimentaire.	p43
Tableau 2 : Principaux minéraux des sédiments lacustres	p84

CHAPITRE V :

Tableau 3a: pourcentage de la fraction minérale et de la fraction organique sédiments marins.	dans les p152
Tableau 3b: Origine, classe et principaux critères d'interprétation des hydrocarbures dans les eaux et les sédiments.	p193

ANNEXE I -1 :

Tableau 4 : Pourcentages des fractions fines et grossières et nature du faciès. (a-Sédiments des carottes, b- Sédiments de surface)	
Tableau 5 : Pourcentages des fractions : Argiles, Silts et Sables. (a -Sédiments des carottes, b- Sédiments de surface).	
Tableau 6 : Teneurs en carbonates et en carbone minéral.	
Tableau 7 : Paramètres et indices granulométriques. (a -Sédiments des carottes, b- Sédiments de surface)	
Tableau 8 : Pourcentages des minéraux non argileux des sédiments des carottes et de surface.	
Tableau 9 : Pourcentages des minéraux argileux des sédiments des carottes et des sédiments de surface.	

ANNEXE I-2 :

Tableau 10 : Variations des Paramètres de la pyrolyse Rock Eval (a -Sédiments des carottes, b-Sédiments de surface).	
Tableau 11 : Teneurs en composés humiques totaux et en humine (sédiment de surface).	
Tableau 12 : Teneurs en extrait chloroformique total, en hydrocarbures saturés, en hydrocarbures aromatiques et en composés polaires (a-Sédiments des carottes, b-Sédiments de surface).	
Tableau 13 : Valeurs de l'index CPI et du rapport Pr/Ph des sédiments des carottes et des sédiments de surface.	

Introduction Générale



La forme des cuvettes lacustres se modifie de façon continue sous l'effet des processus sédimentaires. Ces derniers se manifestent par les apports internes et externes de matériaux particuliers et par leur distribution sur les fonds des lacs (Meybeck, 1995). L'étude des sédiments lacustres avait déjà été entreprise par les fondateurs de la limnologie (Forel, 1892 et Collet, 1925). Dans leur premier ouvrage Hakanson et Janson (1983), ont cherché à caractériser les dépôts lacustres pour mieux comprendre leur dynamique de sédimentation. Les protocoles d'observation afin de surveiller la qualité de l'environnement ont été développés par Meybeck, (1995). Enfin, l'ouvrage Anadon et *al.*, (1991) fournit une bonne introduction à une discipline en plein développement : la paléolimnologie.

Les sédiments sont le seul moyen d'accéder à l'histoire des systèmes lacustres sur des longues périodes (10 à 10⁶années). Leurs niveaux superficiels (10 cm) sont un lieu d'évolution du matériel organique par les organismes vivants. Ce matériel est en majeure partie d'origine photosynthétique soit autochtone (plancton, macrophytes), soit allochtone issue des végétaux supérieurs apportés du bassin versant. Les mécanismes de transformation s'adressent aux constituants biochimiques des micro-organismes, notamment les protéines et

les pigments photosynthétiques ainsi que certains glucides cytoplasmiques facilement extractibles.

Cependant, dans les niveaux sédimentaires plus profonds, la matière organique est essentiellement formée de substances humiques ou des résidus organiques complexés. Cette dernière n'évoluera que par des processus chimiques édifiant des produits de plus en plus insolubles (Tiesen et *al.*, 1984).

L'évolution de la matière organique est dépendante de l'activité bactérienne, de l'importance et de la nature de la matière organique présente dans les dépôts. La phase minérale, par sa granulométrie et sa nature (sable, argile...), peut soit accentuer ou réduire l'ampleur des effets biologiques sur les composés organiques (Pederson et *al.*, 1990 et Mayer, 1994).

En limnologie, la matière organique est au cœur d'un faisceau de questions d'une part sur le cycle du carbone (sources, transfert, devenir) et d'autre part sur le fonctionnement des écosystèmes. Son étude est fondamentale à la compréhension des cycles biogéochimiques et leur modélisation. Les recherches menées au cours de ces dernières années en géochimie organique ont conduit à une évolution du concept de marqueur organique. L'utilisation de ces marqueurs en limnologie se révèle prometteuse. Le mode de distribution des biomarqueurs renseigne sur la source et les processus de transformation de la matière organique dans les eaux et les sédiments de surface, comme l'ont montré Henrichs et *al.*, 1987, Rielly et *al.*, 1991 Wapels et *al.*, 1991 et Lallier-verges et *al.*, 1993. Ces marqueurs permettent de déterminer les conditions physico-chimiques et par conséquent de reconstruire le paléoenvironnement de dépôt. Parmi ces derniers, on note le squalane. C'est un marqueur des milieux hypersalins, tels que les sebkhas ou lacs salés. Sa présence reflète une activité méthanogène (Risatti et *al.*, 1984 ; Rowland, 1990). En effet, dans les milieux limniques, la teneur en sulfate n'est pas suffisante pour permettre un développement conséquent des bactéries sulfato-réductrices. Les populations méthanogènes deviennent donc prédominantes et actives dès l'interface eau-sédiment et diminuent avec l'enfouissement (Mah et *al.*, 1977 ; Nedwell, 1984).

En plus de ces marqueurs, les composés organiques les plus complexes, notamment les acides fulviques et humiques sont aussi des composés indicateurs de la nature du milieu et des conditions d'évolution. En effet, dans les environnements oxiques ou oxydants, la transformation de la matière organique est plus rapide et complète, ce qui explique une

abondance des acides humiques par rapport aux acides fulviques (Schnitzer, 1978). Cependant, dans les milieux réducteurs ou anoxiques, les réactions de minéralisation sont beaucoup plus importantes que les réactions de polymérisation, reflétant une abondance des acides fulviques.

La matière organique peut être aussi le sujet d'une minéralisation totale par conséquent une dégradation poussée libérant des éléments nutritifs (N et P). Plusieurs surfaces d'eau s'enrichissent en ces nutriments, à cause des activités anthropiques. Ces derniers seront à l'origine d'une prolifération algale et d'une mauvaise qualité de l'eau, voire une eutrophisation de certains milieux (VanLuijin et *al.*, 1999).

S'inscrivant dans cette perspective, le présent travail s'intéresse à l'étude de la matière organique d'un système endoréïque salin : la sebkha de Moknine qui a pris place à la suite des accidents tectoniques du Quaternaire comme plusieurs autres écosystèmes lagunaires et dépressions endoréïques, dans le domaine de la plateforme du Sahel de la Tunisie. Plusieurs de ces écosystèmes sont utilisés de nos jours surtout comme dépotoir pour les rejets domestiques et industriels. Ces milieux deviennent de plus en plus fragiles et l'étude de leur état actuel, leur dynamique et leur type d'évolution se révèlent importants afin d'assurer leur sauvegarde.

Les apports sont très variés dans la sebkha de Moknine ce qui peut être à l'origine d'une évolution distincte dans les différentes parties du système. La partie occidentale se caractérise par l'abondance du réseau hydrographique. Au Sud, l'oued Redjel Chiba joue un grand rôle d'apport de matériel du bassin versant y compris la matière organique des sols. La bordure orientale de la sebkha se caractérise par l'abondance d'une végétation halophyle formée essentiellement de : *Zygophyllum album*, *Atriplex inflata*, *Lygeum aspartum*, *phragmites sp.* et *Salicornia arabica*. Enfin, au Nord, les eaux usées de la station d'épuration sont rejetées après un traitement biologique et les citoyens accentuent ce problème, via les rejets des déchets directement dans l'oued Moknine.

De ce point de vue, l'étude de la matière dans ce milieu s'avère importante pour montrer sa composition, suivre les variations spatiales et temporelles de ses composantes, démontrer les processus liés à sa production son transfert et son devenir, et dégager à partir de ces résultats l'évolution de la sebkha de Moknine durant l'actuel.

Afin d'établir d'une manière rigoureuse ces caractéristiques qui permettent de connaître la dynamique du système d'étude, nous avons suivi des méthodes analytiques séparatives et structurales. En effet, nous avons cherché à déterminer les origines par pyrolyse Rock-Eval, à voir la distribution quantitative (COT, S1 et S2) et qualitative (CHT, Ext.T) de la matière organique, enfin à caractériser ses différentes formes (AH, AF, humine, marqueurs biologiques ...). Ces paramètres abordés renseignent sur l'histoire de la sebkha, son état actuel et son évolution.

Cette étude organique est précédée par une étude sédimentologique fine des dépôts dans la sebkha sur une profondeur de 1,5 m. Les paramètres que nous avons considérés sont la granulométrie, les minéraux argileux et non argileux et le taux des carbonates. Cette étude est entreprise dans le but de caractériser le remplissage sédimentaire dans la sebkha en relation avec l'évolution structurale de la région et le régime des apports détritiques. Les résultats de l'étude sédimentologique seront aussi un support capital pour l'interprétation de ceux de l'étude organique et la compréhension des conditions physico-chimiques se développant en dessous de l'interface eau/sédiment. De tels renseignements (sédimentologiques et organiques) constitueront des données précieuses pour la réalisation d'études d'impact.

Chapitre I:
CADRE
GENERAL

I- CADRE GEOGRAPHIQUE

I-1- PRESENTATION DU SITE

La sebkha de Moknine, objet de ce travail, est une dépression côtière située au Sud-Est de la ville de Moknine et au Nord-Ouest de la ville de Mahdia. Ce système communique avec deux autres sebkhas ; Kotaïa et Eliana, situées à l'Ouest de Mahdia par l'oued Redjel Chiba (Fig.1). Une barrière littorale de 4 km la sépare de la mer Méditerranée. En été, le fond de la sebkha peut être accessible par temps sec jusqu'à la côte -1,75m. Au-delà, s'étend une zone vaseuse recouverte par une couche de sel. En hiver, en période de pluie, elle se remplit partiellement sans jamais dépasser toutefois la côte -9m. Encore, cette côte est atteinte le plus souvent par l'effet du vent qui sur le fond très plat du bassin, arrive à pousser l'eau de la partie centrale vers la périphérie sur des distances considérables.

I-2- CONDITIONS CLIMATIQUES

Le climat de la région est de type aride supérieur. Il est caractérisé par une saison relativement pluvieuse en automne, hiver et printemps et une saison estivale relativement sèche. Bien que le climat soit maritime, le Sahel est caractérisé par un endoréisme quasi-total. Les eaux d'écoulement superficiel affluent vers un chapelet de sebkhas où elles s'évaporent.

I-2-1- Les précipitations

La moyenne annuelle de la pluviométrie, entre les années 1914 et 1998 dans la région de Moknine est supérieure à 300mm/an (320,2 mm/an).

Les pluviométries mensuelles moyennes montrent que l'automne est la saison la plus pluvieuse (44%), où octobre est le mois le plus pluvieux (52,9 mm). L'hiver est aussi pluvieux ; il contribue avec 34% à la pluviométrie annuelle alors que, l'été faiblement pluvieux (3%), voire même sec, est caractérisé par des averses à caractère orageux.

Cette période est caractérisée par des années sèches (1914, 1940 et 1983) où les précipitations ont enregistré des valeurs inférieures à 200 mm et des années humides (1958, 1969, 1989) où les précipitations étaient supérieures à 500 mm.

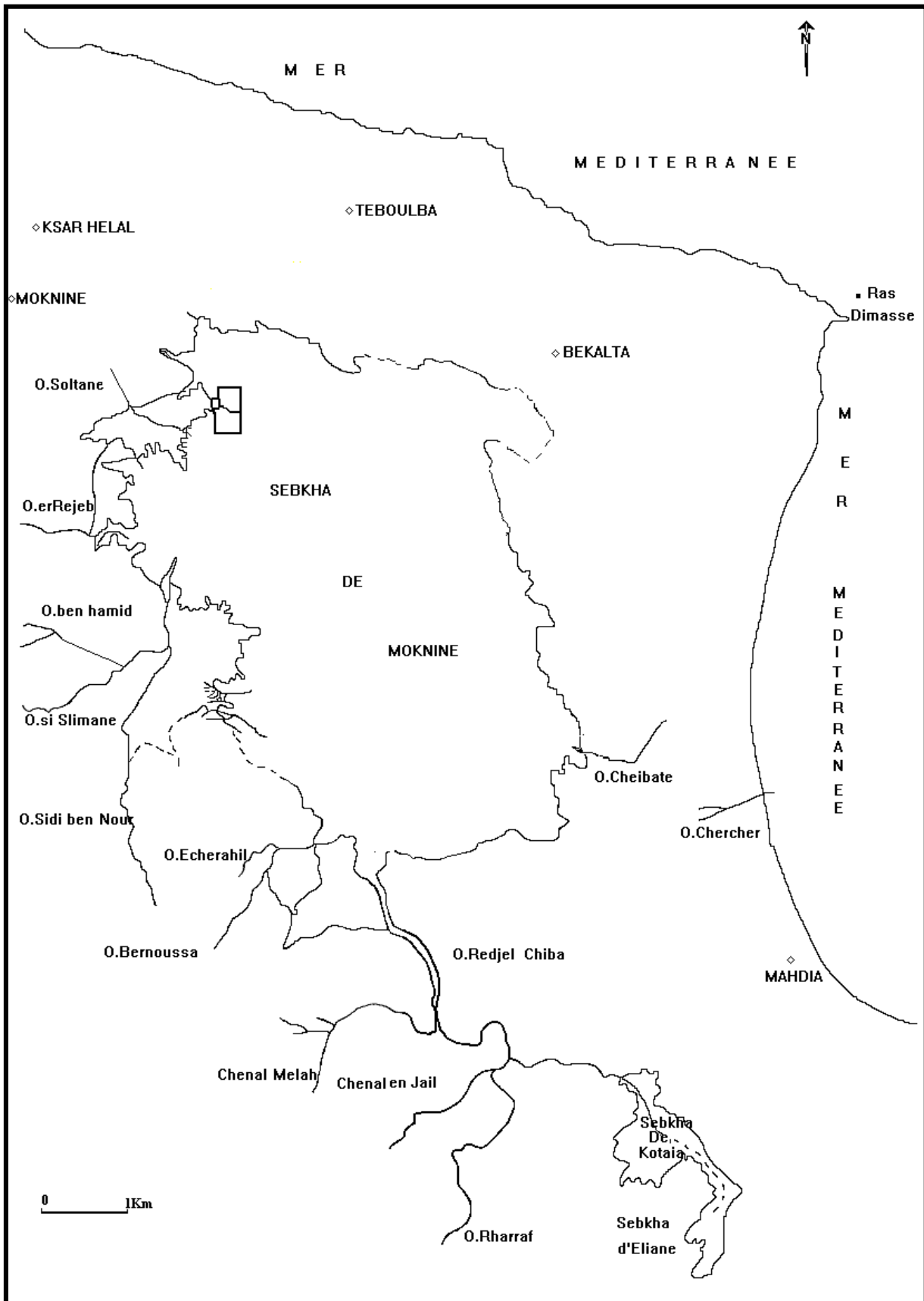


Figure 1 : Situation géographique du site d'étude : Sebkhka de Moknine.

I-2-2- La température

Les températures de la région de Moknine montrent un contraste thermique annuel marqué entre le mois de janvier (7,5°C) et le mois d'août (32°C). La moyenne annuelle est d'environ 19°C.

I-2-3- Le vent

Dans la région de Moknine, toutes les directions peuvent exister au cours d'une année ; c'est la traduction d'une instabilité du vent au cours des saisons. De l'automne à l'hiver, les vents dominants sont de secteur ouest et nord-ouest, leur vitesse varie de 10 à 15 m/s. Au printemps et en été, les vents dominants sont de direction NE, N et NNE.

I-2-4- L'évaporation et l'humidité relative

L'évaporation est favorisée par l'insolation et la température. Par contre, l'humidité relative tend à la diminuer. Durant les mois de juin, juillet et août, l'évaporation est importante, en raison des températures élevées. La moyenne annuelle de l'évaporation est de 1723 mm/an. L'humidité relative est toujours élevée et varie généralement entre 65 et 71 %.

I-3- LA FAUNE ET LA FLORE

La sebkha est entourée par des champs d'olivier et de cultures maraîchères. Sur le sol de la sebkha, la flore est caractérisée par des espèces qui supportent l'excès de sel. On y trouve des plantes halophiles ; telles que : *Zygophyllum album*, *Atriplex inflata*, *Lygeum aspartum*, *Salicornia arabica* et *phragmites sp.* (planche 1).

La faune retrouvée dans la sebkha de Moknine est caractérisée par la présence des oiseaux migrateurs tels que les flamants roses indicateurs des milieux salés et des gastéropodes terrestres enfouis dans les sédiments ; notons : *Rumina decollata*, *Helicella idia*, *Eobania vermiculata*, *Helicella variabili* (planche 4).

Planche 1



Photo 1 : tapis de cyanobactérie au Nord de la sebkha près de la station d'épuration



Photo 2 : plante halophile au Nord de la sebkha : *Zygophyllum album* (partie immergée)



Photo 3 : prolifération de *phragmites sp* sur la bordure est et nord de la sebkha

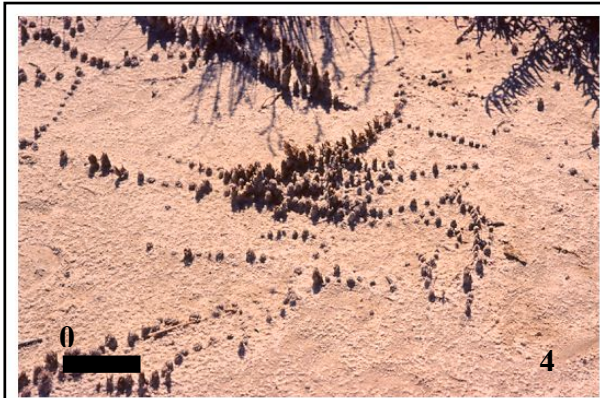


Photo 4 : développement de *Salicornia arabica* à l'Ouest de la sebkha

II- CADRE GEOLOGIQUE

II-1- DONNEES STRATIGRAPHIQUES

La sebkha de Moknine apparaît comme une ancienne dépression d'érosion. Elle a pris place dans la plaine de Mahdia, qui s'étend entre la retombée des flancs est des anticlinaux de Bodeur et de Zarmedine, et la côte est de Mahdia. Cette région est difficile à étudier en raison du manque d'affleurements. D'après, la carte géologique réalisée par Kamoun en 1981 (Fig.2), et la coupe géologique proposée par Amari et Bedir en 1988 dans la région de Moknine et Mahdia (Fig.3), la série lithostratigraphique comprend de bas en haut, les étages suivants :

II-1-1-Le Miocène

Les affleurements du Miocène apparaissent au cœur des anticlinaux du Sahel. Ils sont représentés par des alternances d'argiles et de sables à passées de lignites et de gypse, d'âge serravallien et tortonien (Bedir,1988), et des calcaires oolithiques fossilifères, parfois d'aspect conglomératique de couleur blanc beige, d'âge messinien (Bésème et Kamoun,1988). Ces derniers sont l'équivalent des calcaires de la formation melquart du Golfe de Hammamet et de la formation béni Khiar au Cap Bon. Ces ensembles sont turbiditiques, déposés dans un environnement marin plus profond.

II-1-2-Le Mio-Pliocène

Il forme le sous-sol de la colline séparant la sebkha de Moknine de la mer. C'est un complexe essentiellement argileux dont les assises marneuses sont réduites et les niveaux argilo-sableux se présentent sous forme lenticulaire. Ces affleurements d'origine continentale dominant toute la région sud de Moknine (Bedir et *al.*, 1986 ; Rekaya et Amri,1992).

II-1-3- Le Pliocène

Le Pliocène est discordant sur les niveaux miocènes. Il est caractérisé par des sables et parfois des argiles fossilifères d'origine marine, surmontés par des assises argilo-sableuse d'origine continentale d'âge plio-quadernaire.

Sur toute la zone est du plateau de Moknine et le long des falaises de Ksour Essef, s'étendent des grès de faciès oolithique. Ce même faciès s'observe en quelques points au sud de la sebkha de Moknine (Kamoun,1981).

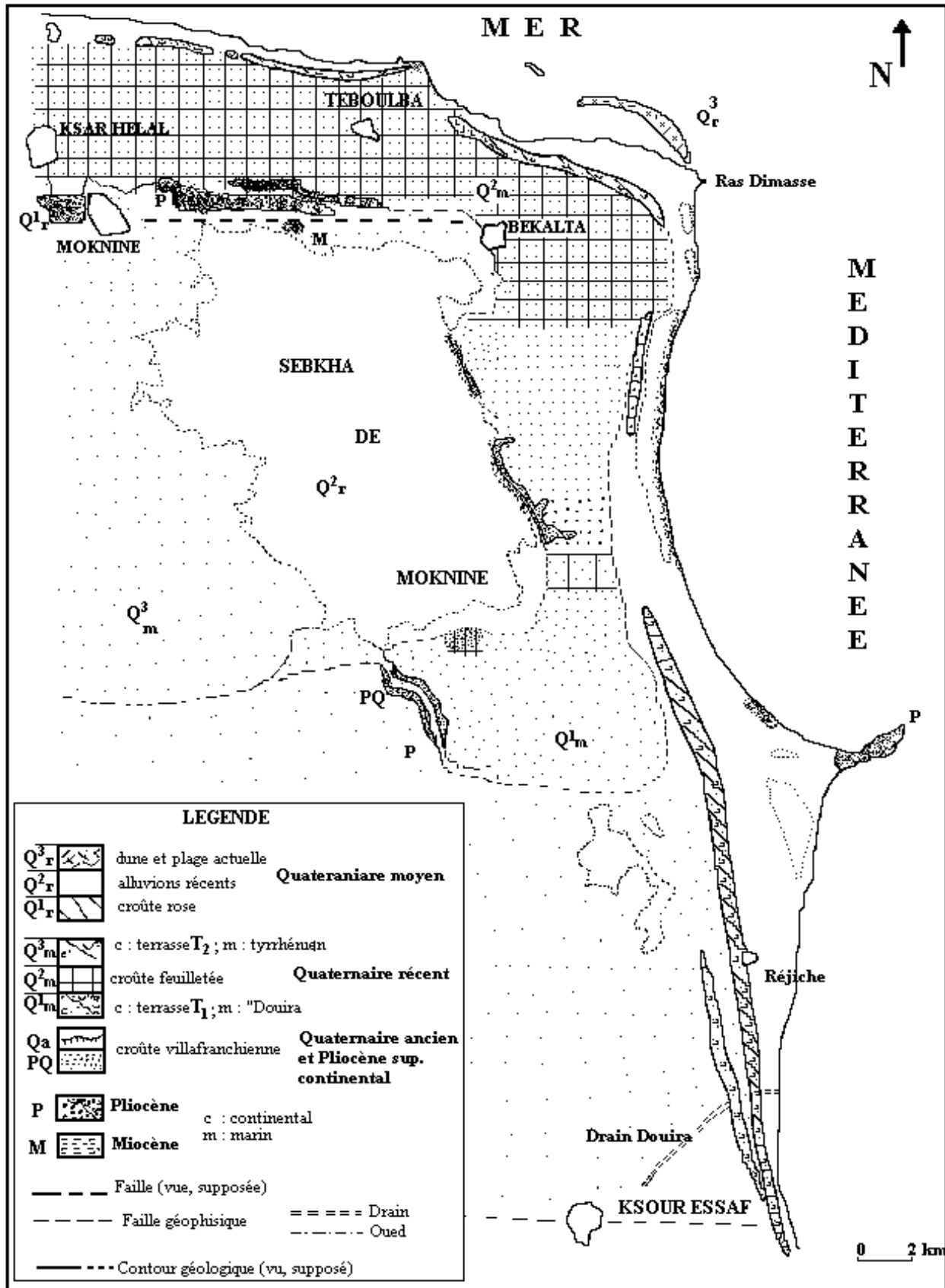


Figure 2 : Carte géologique de la sebkha de Moknine. (D'après Kamoun, 1981)

II-1-4- Le Quaternaire

* *Le Villafranchien* :

Il est formé d'une épaisse croûte calcaire à Hélicidés (Paskoff et Sanlaville, 1983 et Amari, 1986) tantôt feuilletée, tantôt compacte ou en pilier. Elle est surmontée par un sol rouge argileux à la base et sableux au sommet, daté aussi du Villafranchien (Bedir, 1988).

* *Le Tyrrhénien* :

Deux cordons marins littoraux d'âge tyrrhénien se sont successivement installés sur le sol rouge villafranchien. Le plus externe et le plus ancien constitue la formation Douira, formée par un cordon de sable oolithique. Le second, plus récent constitue la formation Réjiche, représentée également par des sables oolithiques. Ces deux formations sont séparées par un horizon très mince d'argile rouge.

La dernière formation transgressive du Quaternaire est la formation Chebba, formée de grès coquillier d'aspect conglomératique. Au-dessus de cette formation, on rencontre un sol limoneux rouge d'âge würmien surmonté d'un horizon limono-sableux beige, à tessons de poteries romaines, indiquant la période historique (Amari et Bedir, 1988).

Ces trois formations reposent généralement en discordance sur les dépôts antérieurs. La base est ravinée.

Une épaisse série quaternaire alluviale affleure au niveau des sebkhas et des plaines du Sahel. Elle est constituée par un ensemble argilo-silteux et conglomératique.

II-2- DONNEES STRUCTURALES

Le Sahel central depuis 1884 et jusqu'à 1951 (Pomel et Castany) était considéré comme une plate-forme stable, et un pays de plaine et de basse steppe. Les travaux de Kamoun (1981) et Bedir (1988) ont mis en évidence le rôle de la néotectonique dans la structuration de cette plate-forme. Les sebkhas et les lagunes du Sahel central, sont aussi le résultat de la superposition de deux régimes tectoniques quaternaires.

Les études géologiques et les profils sismiques montrent que c'est au niveau des couloirs de synclinaux ou sur les flancs de structures anticlinales effondrées que s'ébauche le dispositif des sebkhas de Kelbia, Sidi El Heni, Chérta, Moknine et la lagune de Monastir (Amari et Bedir, 1988). La sebkha de Moknine a été classée parmi celles installées à la faveur de l'effondrement d'un dispositif structural, formé par le flanc monoclinale de plis post-villafranchiens et d'une zone synclinale. Le plateau de Moknine la limite du Nord et celui de Ksour Essaf du Sud (Fig. 4).

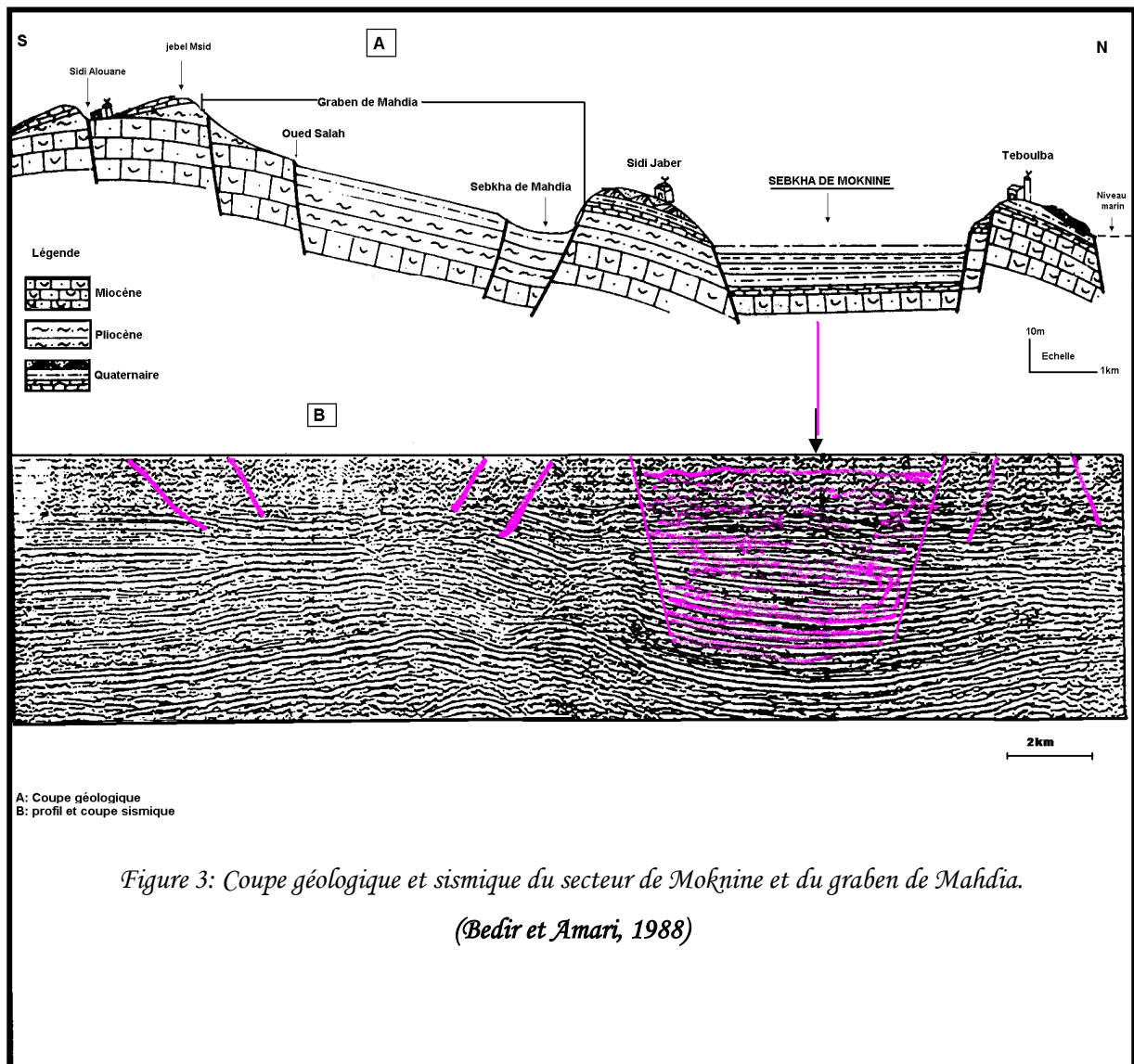


Figure 3: Coupe géologique et sismique du secteur de Moknine et du graben de Mahdia.

(Bedir et Amari, 1988)

Ses bords nord et est sont rectilignes et paraissent façonnés par des directions tectoniques (Kamoun, 1981 et Bedir, 1988). En effet, un système de failles conjuguées en découpe les bordures en falaises rectilignes et abruptes et lui confère une forme losangique (Paskoff et Sanlaville, 1983 ; Amari, 1986).

La coupe sismique de la figure 3, permet de mettre en rapport les failles décrochantes de direction est-ouest de surface, avec des accidents géophysiques majeurs enracinés dans les niveaux assez profonds du Crétacé inférieur.

Les failles normales N160-170 s'enracinent dans la série miocène du bassin de Moknine et constituent les fractures du pli post-villafranchien de Sidi Jaber (Bedir et *al.*, 1986). Ces failles conjuguées ont joué à plusieurs reprises durant l'histoire du bassin de Moknine. Le dernier jeu est d'âge néo-tyrrhénien.

II-3- DONNEES MORPHOLOGIQUES

La sebkha de Moknine appartient au groupe des sebkhas, dont la morphostructure a une géométrie en réseau losangique installées sur les flancs de plis. La superficie de bassin losangique est de 50 km². Son grand axe dirigé NNW-SSE, est parallèle à ses bordures orientale et occidentale. Les bordures septentrionale et méridionale sont également parallèles et orientées est-ouest.

Le fond de la sebkha de Moknine, se trouve actuellement à -10 m au-dessous du niveau de la mer et à -40 m par rapport au point culminant de la région. Les bordures orientale, septentrionale et méridionale sont représentées par des falaises. La plus marquée dans la topographie est la falaise orientale, longue d'environ 6 km et haute de 2 à 4 m. Ces falaises sont formées par des calcaires oolithiques fossilifères du Miocène supérieur (Messinien).

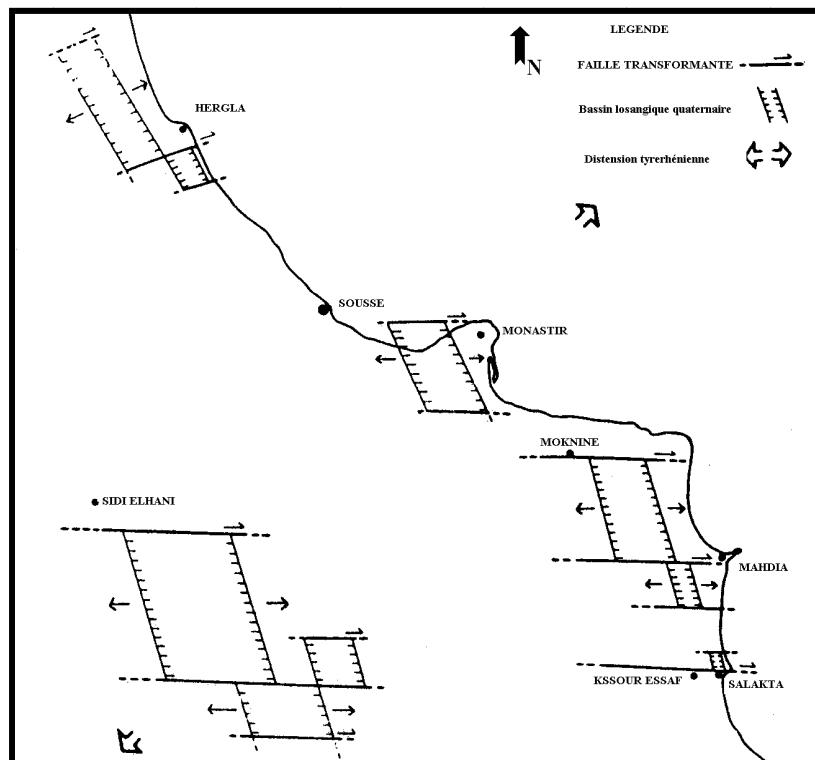


Figure 4 : Structures et fracturations des sebkhas du Sahel central.

(Bedir et Amari 1988)

II-4 EVOLUTION DU BASSIN DE MOKNINE

Les données morphologiques, structurales et sismiques montrent que le bassin de Moknine est de forme losangique et permettent de suivre l'évolution de cette sebkha depuis le Crétacé (Fig.5).

Le bassin de Moknine a évolué en cuvette subsidente depuis l'Aptien et jusqu'à l'Oligocène. Le Miocène transgressif est discordant sur les niveaux oligocènes.

Au Messinien, se déposent des grès calcaires oolithiques fossilifères, affleurant le long des falaises nord et est de la sebkha. A la fin du Miocène, la zone de Moknine émerge.

Du Néogène au Quaternaire la couverture du bassin a connu une phase majeure de plissement. Après le plissement post-villafranchien, la zone de Moknine émerge définitivement. Durant le Tyrrhénien, la mer a fait de brèves incursions cantonnées près de la côte actuelle matérialisée par les trois cordons tyrrhéniens. Lors de l'extension tyrrhénienne, la cuvette synclinale édifiée au Post-Villafranchien, très dissymétrique vers l'Est sera modelée. Cette distension, caractérisée par le rejeu des accidents est-ouest et N160, en transtension permet l'ouverture et l'effondrement de la partie orientale de la cuvette synclinale et de la partie occidentale du pli de Sidi-Jaber, formant ainsi le bassin losangique de la sebkha de Moknine (Bedir, 1988).

II-5- HYDROLOGIE GENERALE

II-5-1- Hydrologie souterraine

Dans la région de Moknine, il y a lieu de distinguer les entités aquifères suivantes : les nappes de Moknine, la nappe de Teboulba, et la nappe de Zarmedine- Beni Hassen.

a- Nappes de Moknine

* **Nappe profonde** : les résultats (débit, rabattement, durée et salinité) obtenus à partir des forages de Touza et El Baher montrent que les aquifères profonds du bassin de Moknine ne présentent aucun intérêt hydrologique en raison de la mauvaise qualité des eaux (Amri, 1991). En effet la résistivité de l'aquifère est trop faible (50 ohm/m), indiquant une salinité relativement élevée des eaux ($RS > 5$ g/l).

* **Nappe phréatique** : la nappe phréatique de Moknine est contenue dans des dépôts quaternaires constitués d'argiles-sableuses, de marnes et d'alluvions. Elle s'étend sur une superficie d'environ 80 km² et fait partie d'un bassin versant ayant pour exutoire la sebkha de Moknine.

Le captage d'eau se fait par des puits de surface dont la profondeur varie de quelques mètres à 30 mètres.

- Profondeur du plan d'eau : en général, la profondeur du niveau de la nappe suit sensiblement la topographie. Dans les zones proches de l'exutoire, la profondeur de la nappe est inférieure à 5 m, alors que dans la zone médiane, cette profondeur se situe aux environs de 15 m.

- Piézométrie et écoulement : l'écoulement de la nappe s'effectue de l'Ouest vers l'Est en direction de la sebkha (Fig.6), qui constitue le seul exutoire naturel de cet aquifère. Les deux failles, limitant le système aquifère, n'ont aucun rôle sur l'hydraulique de la nappe phréatique. Ainsi, l'alimentation de la nappe de Moknine semble se faire presque exclusivement à partir de l'infiltration directe des eaux pluviales.

Les isopièzes négatifs résultent d'une diminution notable de la perméabilité et de l'altitude relativement basse de la région puisque la sebkha de Moknine se situe à -9 m par rapport au niveau géodésique.

Le gradient hydraulique est de 2% près de la zone d'exutoire, ces fortes valeurs ne sont pas le signe d'un écoulement rapide mais plutôt de perméabilités faibles.

- Salinité des eaux : la minéralisation des eaux de la nappe phréatique varie de 1,5g/l à 5g/l et elle peut atteindre 10g/l dans les zones proches de l'exutoire.

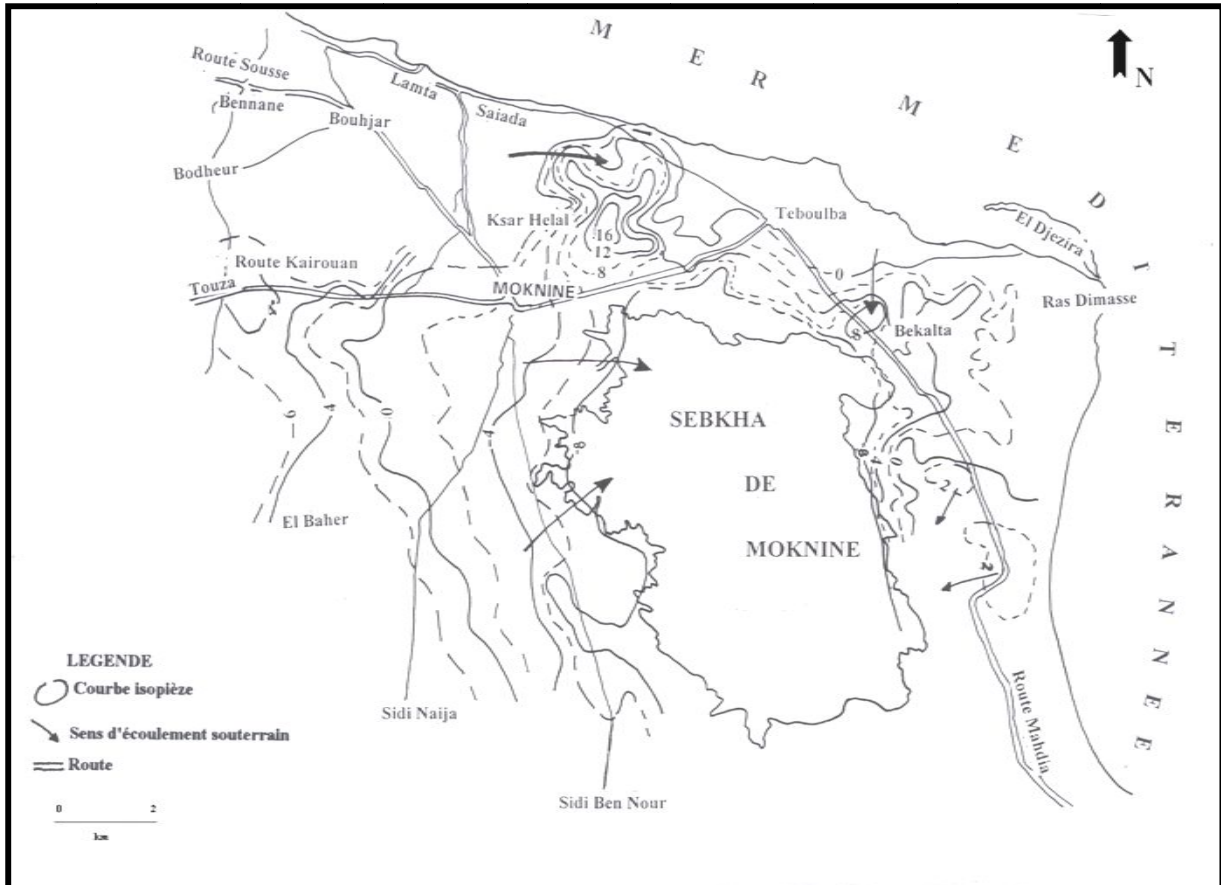


Figure 5 : Carte piézométrique de la nappe phréatique de Moknine
(D.R.E. Monastir, 1994)

b- Nappe de Teboulba

Elle couvre le plateau qui constitue la région comprise entre Moknine et Teboulba. L'altitude du plateau varie d'une trentaine de mètres vers l'Ouest à une vingtaine de mètres vers l'Est. Ce plateau plonge assez brutalement vers la mer, alors qu'une pente relativement douce le relie à la sebkha du côté sud.

La nappe de Teboulba s'étend sur une superficie d'environ 35 km², longeant la côte sous forme d'une bande entre la mer au Nord-Est et la sebkha de Moknine au Sud-Ouest.

Malgré, sa contiguïté aussi bien avec la mer qu'avec la sebkha de Moknine, cette nappe est caractérisée par une faible salinité.

La roche réservoir est constituée de lentilles de sable fin, intercalées dans les lits d'argile sableuse du Plio-Quaternaire.

L'exploitation de la nappe de Teboulba est excessive et prolongée. Elle est supérieure à $10^6 \text{ m}^3/\text{an}$, alors que les ressources provenant essentiellement de l'infiltration ne font que $0,65 \text{ Mm}^3/\text{an}$ (Rekaya et Amri, 1992).

Une série de campagne de recharge artificielle menée entre 1972 -1976 ont permis une remontée spectaculaire de la piézométrie, jusqu'à la côte de 10 m au-dessus du zéro, alors qu'elle était à moins 40 m (Amri,1992). Depuis 1978, la piézométrie baissait régulièrement, elle s'est rétablie suite aux volumes d'eau injectée à l'issue de la campagne de recharge entreprise en 1992.

c- Nappe de Zarmedine-Beni Hassen

C'est une nappe libre mais dont la surface piézométrique est très profonde. Le niveau aquifère n'est généralement accessible que par forage.

Les travaux de Hubert (1968) montrent une certaine continuité de la nappe phréatique sur toute la plaine qui entoure les hauteurs de Zarmedine et une nette divergence radiale des écoulements à partir des affleurements.

Les exutoires du système phréatique sont :

- la sebkha de Moknine et la mer Méditerranée à l'Est,
- la sebkha de Sidi El Hani au Sud-Est
- la plaine de Jemmal au Nord-Est.

Au niveau de Ksar Helal, un raccordement est possible avec la nappe de Teboulba qui rejoint ensuite la sebkha de Moknine. Les gradients hydrauliques sont très variables : 16 % en bordure de la plaine de Jammel et 8 % à l'Ouest de la sebkha de Moknine. Les fortes valeurs du gradient ne sont pas le signe d'un écoulement rapide mais plutôt des faibles perméabilités des formations continentales.

Les eaux de la nappe sont de bonne qualité. La majorité des eaux de la nappe enregistrent une salinité de 1g/l (Beni Akhi,1998). En moyenne, 73% des eaux de la nappe servent à l'irrigation des périmètres publics irrigués, alors que, 27% de ces eaux sont exploitées directement par la SONEDE et distribuées comme eau potable.

Les prélèvements dans la nappe ne sont pas homogènes. En moyenne, 69% des volumes exploités sont prélevés au centre (Beni Hassen, Cherahil, Henchir Louza) et 31% sont pompés à l'Est (Sidi Bennour, Chiba, Ben Khamla).

La nappe s'alimente exclusivement par infiltration directe des eaux de précipitation au niveau des affleurements sableux, au Sud de Zaremdine et entre Zaremdine et Beni Hassen. L'alimentation est de 3 millions m³/an sur les 86 km² d'affleurement.

II-5-2- Hydrologie superficielle

La sebkha de Moknine reçoit en plus des eaux de pluies, les eaux de divers oueds : Redjel Chiba, Echrahil, Er Rejeb, Ben Hamid, Si Slimane, Bernoussa, Cheibat et Soltane (Fig.1). La superficie totale du bassin versant, sebkha déduite, est de 862 km². La plus grande partie de ce bassin, soit 537 km², est drainée par l'oued Redjel Chiba, exutoire des sebkhas Eliana et Kotaia et des oueds Glat et Rharraf.

Le niveau de la sebkha est toujours inférieur au niveau de la mer ; son fond est asséché pendant les mois d'été. Cette situation prouve que l'alimentation est déjà inférieure à l'évaporation (Lojeau, 1941 et Kervan, 1955). En fait, les oueds alimentant la sebkha coulent rarement avec un débit important.

Cela est en relation avec la nature assez peu accidentée du bassin versant, formé de terrains perméables et intensément cultivés. En effet, les plantations d'olivier jouent un grand rôle dans la rétention des eaux. L'apport moyen annuel est d'environ 50.10⁶ m³.

II-5-3- Les eaux usées

La mise en place, d'une station d'épuration (planche 2) sur le sol de la sebkha a pour but la protection de la zone contre la pollution par les eaux usées, dont 50% sont des eaux d'origine industrielle. Ces eaux usées proviennent en majorité des villages de Moknine, Ksar Helal, Bekalta et Teboulba. La station d'épuration fonctionne par le procédé de lagunage. Ses capacités maximales sont de 6400 m³/j avec 3000 kg de DBO5/j. L'exploitation actuelle permet de traiter 3300 m³/j avec un taux de DBO5 correspondant à 2100 kg/j.

Le suivi annuel des eaux usées rejetées directement dans la sebkha de Moknine a montré une richesse en nutriment qui généralement dépassent les normes tunisiennes des domaines hydrauliques publics : NO₃⁻ : 8.57mg/l, NO₂⁻ : 0.17mg/l, NH₄⁺ : 16.16mg/l et PO₄³⁻ : 15.35mg/l. Les eaux rejetées sont aussi riches en COD (250ppm). Les rejets de la station d'épuration jouent le rôle d'un apport continu en éléments nutritifs et de COD ce qui induira une prolifération d'une biomasse halophile et enrichir les sédiments au Nord en carbone organique (Chairi et Bélayouni, 2002,2003).

Planche 2



Photo 1 : Sortie des eaux de la station d'épuration dans la sebkha de Moknine



Photo 2 : Rejets des eaux et des déchets dans la sebkha de Moknine

CONCLUSION

La sebkha de Moknine est le résultat de la superposition des deux régimes tectoniques quaternaires. Elle a pris naissance par effondrement d'un flanc monoclinal de plis post villafranchien et d'une zone synclinale. Le découpage des bordures en falaises rectilignes par un système de failles conjuguées est à l'origine de la forme losangique du bassin.

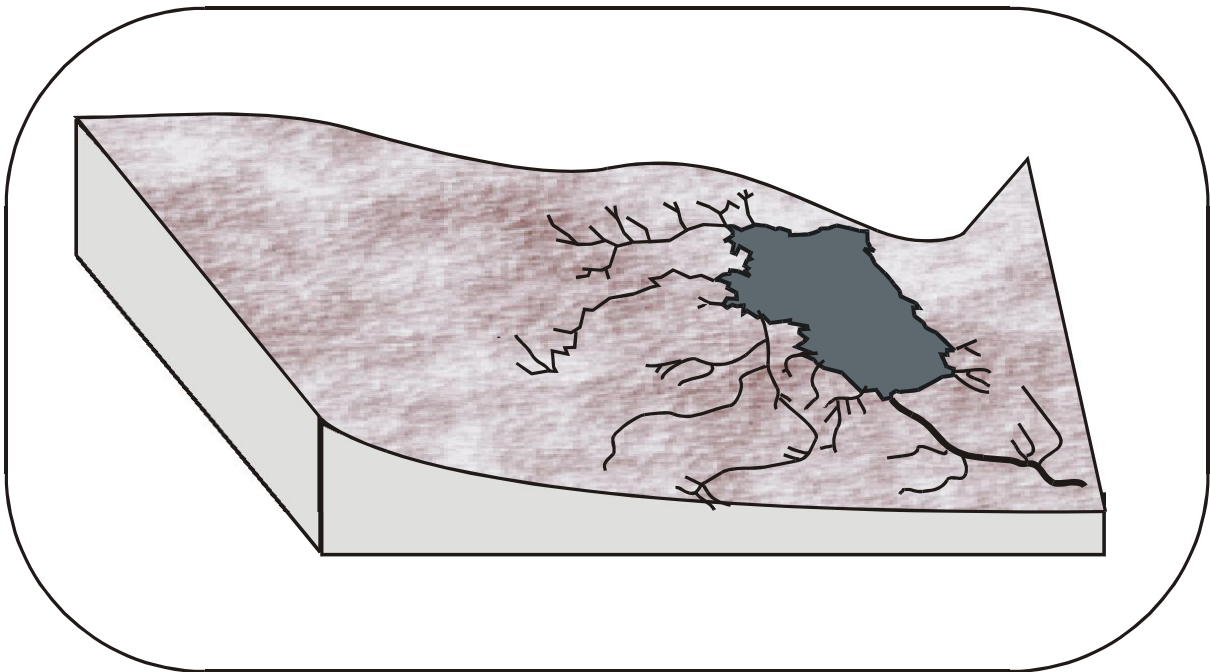


Figure 6 : Vue de la sebkha de Moknine

La sebkha joue le rôle d'exutoire de plusieurs entités aquifères. Elle reçoit le débit de divers oueds concentrés essentiellement sur sa partie occidentale du bassin. Le climat aride supérieur caractérisant toute la région du Sahel de la Tunisie ne permet un écoulement important qu'occasionnellement. Les eaux de la sebkha sont toujours le siège d'une évaporation intense en été résultant une couche de halite qui occupera le centre et la partie orientale du bassin zone d'accumulation d'eau.

Cependant, depuis l'installation de la station d'épuration une pérennité des eaux se remarquait au Nord de la sebkha. Les eaux rejetées seront à l'origine d'un développement d'une

biomasse et d'un apport continu en matière organique ce qui augmentera le stock organique sédimenté dans cette zone.

Chapitre II :

METHODOLOGIE

I- SITE D'ECHANTILLONNAGE

Quatre campagnes d'échantillonnage ont été réalisées dans la sebkha de Moknine entre les années 1996 et 1999. Une première campagne a été effectuée au mois de novembre 1996 dans le côté oriental, pour le prélèvement des sédiments en sub-surface. Une autre au mois de juin 1998 au Nord de la sebkha. Une troisième campagne était consacrée pour les sédiments de surface au mois de mars 1999. Enfin, une quatrième était effectuée au mois d'août 1999 pour l'exécution des carottes au Nord-Ouest, au Sud-Ouest et au Sud de la sebkha.

I-1-Sédiments de surface

Les sédiments de surface sont récoltés en différents points de la sebkha sur 10cm environ (Fig. 7)

L'analyse des sédiments de surface est menée dont le but:

- * de décrire et caractériser la composition du remplissage de la sebkha dans l'espace qui permettra la répartition des sédiments en évoluant de la périphérie au centre ;
- * de voir l'évolution de la matière organique dans les premiers centimètres
- * enfin, de montrer l'état actuel de la sebkha.

I-2-Sédiments des carottes

Dix neuf carottes ont été prélevées au cours de trois missions (novembre 1996, juin 1998 et août 1999) dans la sebkha de Moknine (Fig.8).

L'emplacement des carottes a été choisi de manière à permettre des corrélations dans l'espace. L'objectif est multiple :

- * décrire et caractériser la composition du remplissage sédimentaire de la sebkha en évoluant de la périphérie au centre,
- * corréler la composition lithologique des sédiments dans l'espace en optant pour l'implantation des carottes le long des axes nord-sud, est-sud et ouest-sud,
- * suivre l'évolution dans le temps du remplissage sédimentaire de la sebkha en essayant d'identifier les différents cycles ou séquences sédimentaires de remplissage,

* identifier les niveaux ou épisodes riches en matière organique et déduire de leur étude détaillée, l'origine de la biomasse (continentale, lacustre, marine), son degré d'évolution et le type d'environnement (oxique, anoxique, hypersalin) dans lequel elle a évolué.

* voir l'action anthropique au Nord de la sebkha, en mettant en évidence l'interférence des matières organiques d'origine anthropique.

Au total, 4 carottes ont été prélevées au Nord (SM9, SM10, SM11 et SM12) de la sebkha, huit à l'Est (SM1, SM2, SM3, SM4, SM5, SM6, SM8 et SM19), 3 carottes au Nord-Ouest (SM13, SM14, SM15), entre les cônes de déjection des oueds Er Rejeb, Ben Hamid et Soltane, 3 autres (SM16, SM17, SM18) au Sud-Ouest entre les cônes de déjection des oueds Sidi Ben Nour et Echerahil, enfin une au sud (SM7) dans l'embouchure de l'oued Rejel Chiba.

II- MODE D'ECHANTILLONNAGE

II-1- Sédiments de surface

Les sédiments de surface ont été prélevés dans des sachets en plastique sur une profondeur de 10 cm en moyenne. Les sédiments de surface et des carottes sont séchés à l'étuve à une température de 40°C.

II-2-Sédiments des carottes

Le carottage a été effectué à l'aide de tubes en PVC de 75 mm de diamètre sur une profondeur moyenne de 1 m.

Après avoir défini le site d'implantation, l'opération consiste à enfoncer le tube en PVC dans le sédiment, en appliquant avec précaution des secousses au moyen d'une masse. Un système de manchette est placé dans la tranche dégagée du tube et par des mouvements de rotation-translation, on fait sortir la carotte. Une fois dégagée, on ne garde que la partie du tube remplie de sédiment, qu'on bouche à ses deux extrémités à l'aide de sacs en plastique ; enfin on marque le sommet et la base de la carotte.



Figure 8 : Localisation des carottes prélevée dans la sebkha de Moknine

III- ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE

III-1- Etude des lithofaciés

Chaque carotte est coupée longitudinalement en deux moitiés au moyen d'une scie électrique. Une moitié est gardée intacte pour l'étude des lithofaciés, l'autre est consacrée aux différentes analyses (Fig. 9).

La description des lithofaciés recoupés par les carottes est basée sur la nature lithologique, la granulométrie ainsi que la variation de la couleur.

III-2 Calcimétrie

Le but de cette technique consiste à déterminer le taux de carbonate contenu dans un sédiment. Pour cela on utilise le calcimètre Bernard, composé d'une burette graduée de 0 à 100 ml et contenant une solution colorée et salée, un statif et une ampoule de niveau, un erlenmeyer muni d'un tube destiné à recevoir l'acide et dans lequel va avoir lieu la réaction. Un tube flexible relie l'erlenmeyer à la burette graduée. Pour déterminer le taux de carbonate, 250 mg d'un échantillon finement broyé sont placés dans l'erlenmeyer et une solution d'acide chlorhydrique 2 N est versée dans le tube en verre.

Le taux de carbonate de calcium est calculé ainsi :

$$\% \text{CaCO}_3 = \frac{L1 - L2}{I1 - I2} \times 100$$

I1-I2 : Volume de CO₂ dégagé par le carbonate de calcium pur

L1-L2 : Volume de CO₂ dégagé par l'échantillon

Le taux de carbone minéral est déterminé par calcimétrie et par coulométrie :

III-3- Granulométrie de la fraction gossière

Après tamisage par voie humide, nous avons isolé la fraction $< 63 \mu\text{m}$. Les subdivisions de la fraction sableuse sont obtenues par tamisage à sec sur une série de tamis de la norme AFNOR, dont les mailles sont en progression géométrique du bas vers le haut. La proportion en poids de chacune des classes est exprimée en pourcent par rapport au poids total de la fraction sableuse. Les résultats obtenus sont représentés sous forme de graphique, avec une échelle logarithmique. En abscisse on porte les différentes classes granulométriques par ordre de taille décroissant exprimées en mm et en ordonnées, le poids cumulé des différents tamis exprimés en pourcent.

Cette courbe cumulative est interprétée à l'aide de plusieurs paramètres : fractiles, coefficient d'uniformité et indices granulométriques (M_z , S_{ki} et σ), d'après Folk et Ward (1957).

III-4- Diagramme de Passega

Les recherches poursuivies par Passega (1957), ont permis aux géologues et aux sédimentologues d'établir une liaison entre la granulométrie d'un sédiment, son mode de transport et les conditions de dépôt.

La construction est faite sur un " Diagramme de Passega" où on porte :

- * Sur l'axe des ordonnées la valeur logarithmique du premier centile.
- * Perpendiculairement au point ainsi défini, on porte en abscisse la valeur logarithmique de la taille du grain médian.

La répartition des points ainsi obtenus sur un " Diagramme de Passega" permet de distinguer les différents modes de transport.

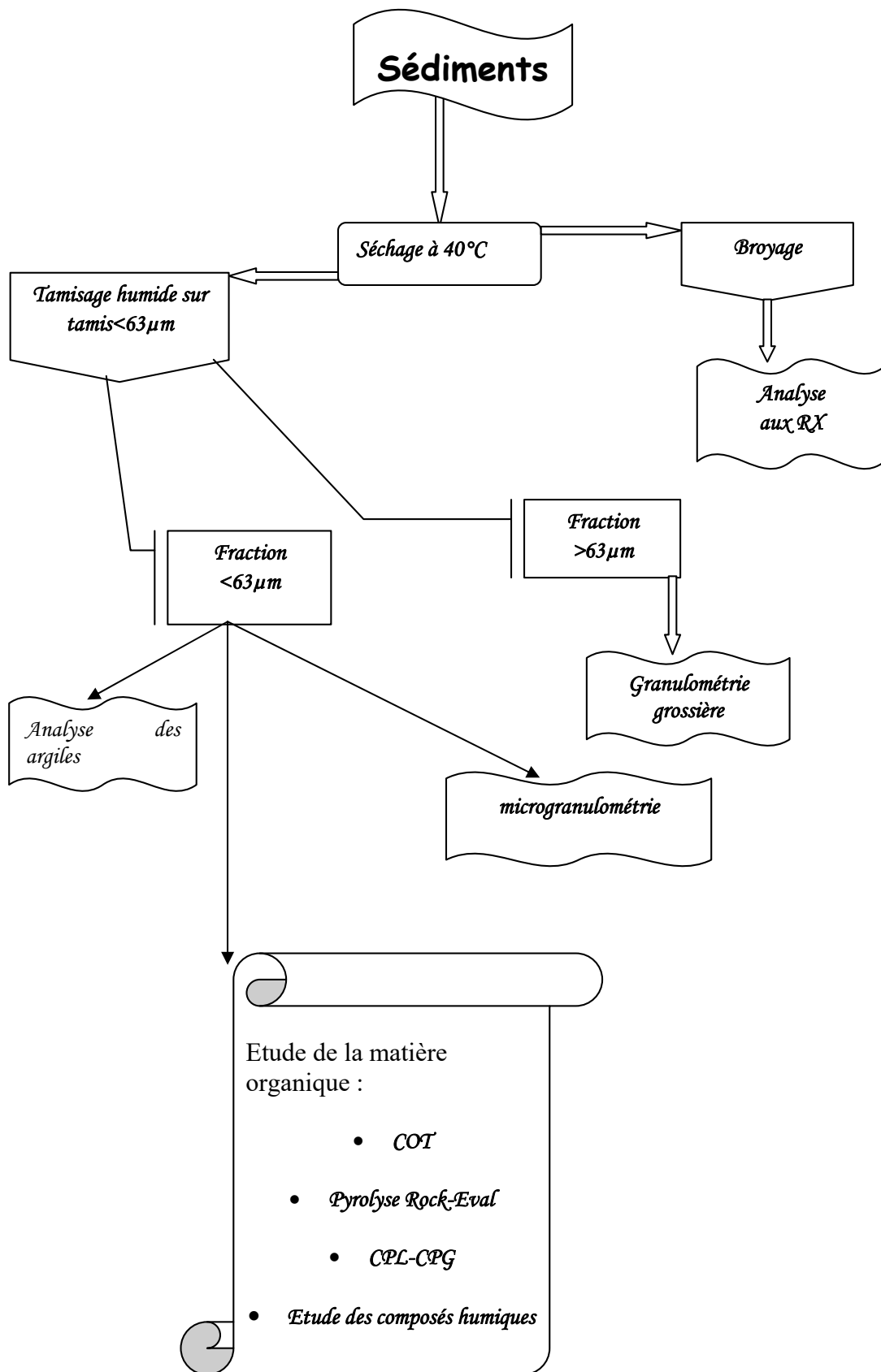


Figure 9 : Organigramme des analyses effectuées sur les sédiments de la sebkha de Moknine.

III-5- Microgranulométrie

Les analyses microgranulométriques ont été effectuées à l'aide d'un Sédigraph 5000D. Cet appareil permet d'analyser le diamètre des particules d'un sédiment fin, en se basant sur la loi de Stocks.

Les résultats sont exprimés sous forme de courbes cumulatives semi-logarithmiques. Le liquide support utilisé est une solution d'hexamétaphosphate de sodium 0,1%.

Expérimentalement on distingue trois types de courbes semi-logarithmiques :

- * Faciès parabolique
- * Faciès logarithmique à sublogarithmique
- * Faciès hyperbolique

Un passage progressif existe entre ces différents faciès.

Barusseau (1973), propose un indice représentant un rapport entre les différentes catégories granulométriques. Il a choisi de déterminer un indice de courbure du tracé représentatif de la granulométrie, grâce à la formule suivante :

$$i_D = F/R \text{ (indice d'intensité dynamique), } R = h/L$$

Les paramètres h, L et F se mesurent directement sur la courbe granulométrique.

III-6- Identification minéralogique par diffractométrie des rayons x

L'étude minéralogique du cortège argileux et des minéraux non argileux a été faite par diffractométrie aux rayons X. Cette méthode consiste à utiliser la propriété de diffraction d'un faisceau monochromatique de RX par les plans réticulaires selon la loi de bragg :

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

λ = longueur d'onde en Å

d = distance entre deux plans réticulaires en Å

θ = angle d'incidence en degrés

n = nombre entier

III-6-1- Diagramme de poudre

L'échantillon doit être finement broyé dans un mortier en agate, avant d'être placé sur un porte échantillon spécialement confectionné pour le passage aux rayons X. La technique consiste à irradier l'échantillon dans l'espace angulaire compris entre 3° et 60° en utilisant la radiation $K\alpha$ du cuivre. Les minéraux sont identifiés grâce à leurs raies caractéristiques.

III-6-2- Agrégats orientés

L'échantillon est tout d'abord attaqué à l'eau oxygénée (H_2O_2 : 110 volumes), à chaud (70°C), pour éliminer la totalité de la matière organique et faciliter aussi la défloculation des argiles. Les carbonates sont éliminés par addition de quelques gouttes de HCl 2N à froid. L'échantillon est ensuite lavé par centrifugations répétées (3000 tr/mn pendant 15 mn), afin d'éliminer les sels jusqu'à l'obtention d'une suspension stable.

Enfin, une aliquote de la partie supérieure de la suspension est étalée sur une lame en verre, à l'aide d'une pipette pasteur, puis sécher à l'air libre.

IV- ETUDE DE LA MATIERE ORGANIQUE

L'étude de la matière organique a été menée dans le but de déterminer sa nature, son origine et éventuellement de suivre la distribution des apports organiques. Elle permet également de comprendre l'évolution et le devenir de cette dernière dans cet environnement évaporitique particulier, qui est la sebkha de Moknine.

L'étude effectuée comprend :

- 1- des analyses de carbone organique total (COT) des sédiments de surface et de profondeur,
- 2- des analyses des composés hydrocarbonés libres et potentiels par la méthode de pyrolyse Rock-Eval,
- 3- l'extraction des composés humiques
- 4- et enfin, l'extraction des composés lipidiques libres solubles dans les solvants organiques.

IV-1- DOSAGE DU CARBONE ORGANIQUE TOTAL (COT)

La teneur en matière organique est estimée par dosage de son élément constitutif majeur, qui est le carbone. Ce dosage est réalisé par coulométrie à l'aide de l'appareil Coulomat 702.

L'analyse s'effectue sur 30 mg à 40 mg de sédiment broyé pour les échantillons riches en matière organique (couleur noire) et sur 80 à 100 mg pour les échantillons pauvres. L'échantillon est placé dans une nacelle en porcelaine forme longue, puis décarbonaté par addition de quelques gouttes de HCl 2N, à froid pour éliminer les calcaires, ensuite à chaud à 80°C pendant une nuit pour détruire la dolomite.

La nacelle contenant l'échantillon est par la suite introduite dans le four à combustion (1300°C). La valeur donnée par le compteur permet de calculer le pourcentage de COT de l'échantillon.

Les teneurs en carbone exprimées en % sont déterminées par la formule suivante :

$$COT(\%) = \frac{\text{compteur} \times 0.02}{\text{poids de l'échantillon}}$$

IV-2- Pyrolyse Rock Eval

La pyrolyse a été développée sur un appareil Rock-Eval III appelé Oil Show Analyser (O.S.A).

La méthode a été mise au point par Espitalié et *al.*, en 1977. Elle permet une analyse quantitative des composés hydrocarbonés et oxygénés (CO₂) libérés de la pyrolyse de la matière organique contenue dans 100 mg de sédiment sous atmosphère inerte (hélium) et en programmant la température de chauffe de 300°C à 600°C à raison de 25°C/mn.

Le résultat est un pyrogramme sur lequel sont enregistrés 2 pics P1 et P2:

* le pic P1 dont la surface S1 est proportionnelle à la quantité des composés hydrocarbonés libres présents dans le sédiment. Ces hydrocarbures sont libérés à une température maintenue à 300°C pendant 3 minutes.

* le pic P2 dont la surface S2 est proportionnelle à la quantité des composés hydrocarbonés potentiels, obtenus par craquage thermique de la matière organique insoluble (kérogène) et des composés polaires (résines et asphaltènes), dans l'intervalle de température compris entre 300°C et 600°C.

L'évaluation des quantités représentées par les deux pics P1 et P2 se fait automatiquement à l'aide d'un microprocesseur qui calcule les surfaces respectives S1 et S2 et les compare à celles des surfaces des pics donnés par la pyrolyse d'un standard analysé dans les mêmes conditions.

Le COT est obtenu en additionnant le carbone organique résiduel dosé et le carbone organique pyrolysable. Cette valeur est proportionnelle à la surface du pic P4 au niveau du thermogramme.

Cette analyse permet aussi de calculer l'index d'hydrogène (IH, exprimé en mg d'HC/g de COT), qui représente la quantité de composés hydrocarbonés potentiels S2 rapportés à celle du carbone organique total.

Une autre donnée fournie par pyrolyse Rock-Eval est la température atteinte au sommet du pic de pyrolyse P2 (Tmax) qui renseigne sur la maturité thermique de la matière organique.

IV-3- 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).

L'extrait est récupéré après centrifugation (3000 trs/mn pendant 15mn). Cette opération est répétée jusqu'à décoloration du liquide surnageant, indiquant ainsi que le maximum des matières humiques a été extrait. Les extraits successifs sont additionnés les uns aux autres (Fig. 10).

Afin de flocculer les argiles, on ajoute à l'extrait total un certain volume de NaCl ou KCl à 2% et on laisse reposer pendant 15 mn. Après centrifugation, on récupère le surnageant qui représente les composés humiques totaux. On réduit le volume de cette solution à 100 ml à l'aide d'un évaporateur rotatif (60°C sous vide). 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}).

* Séparation des composés humiques

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 : $C_{\text{AH}} = C_{\text{humique total}} - C_{\text{AF}}$

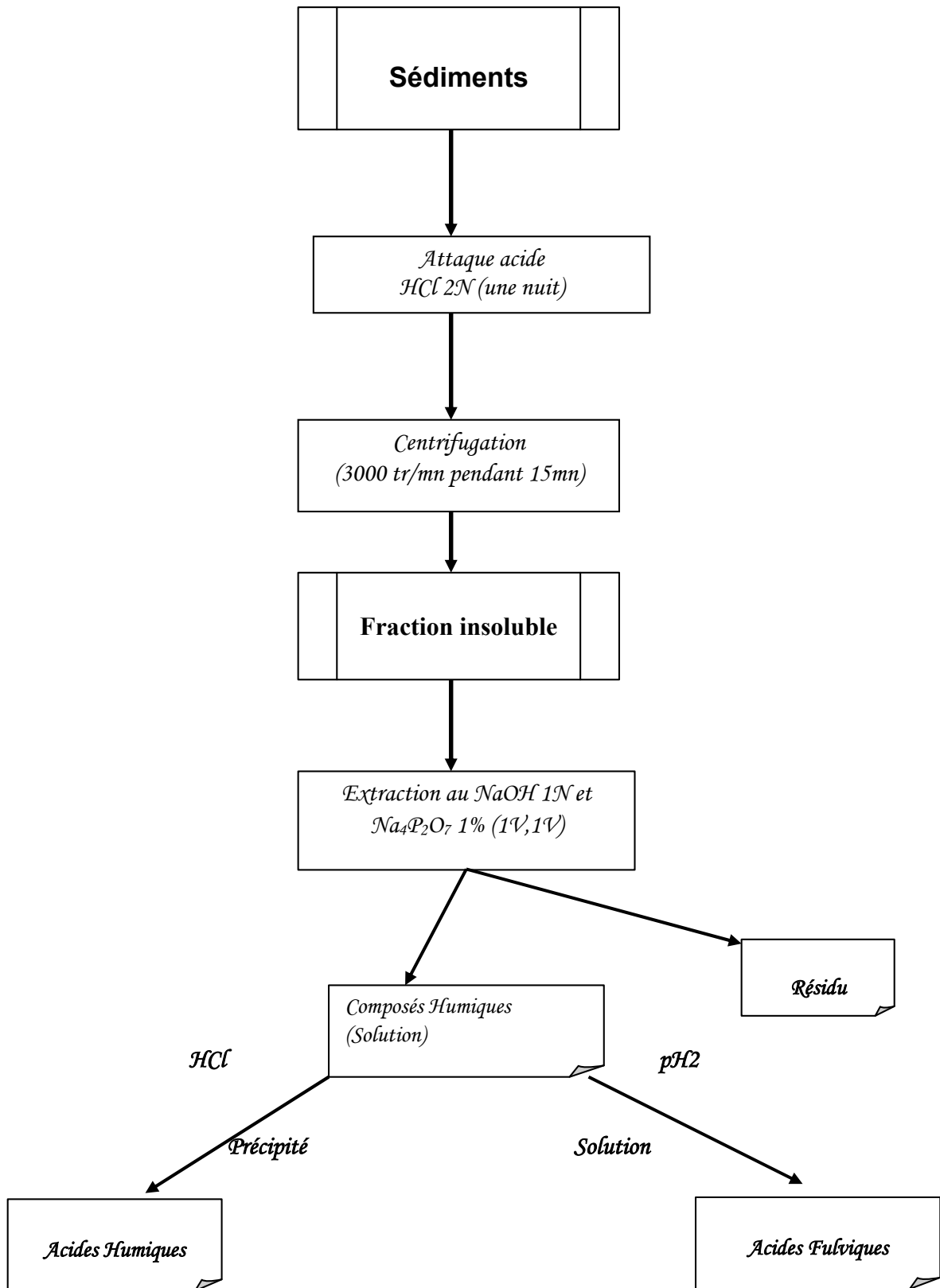


Figure 10 : Schéma analytique de l'extraction des composés humiques.

IV-4- Extraction des bitumes libres

Cette méthode consiste à isoler la fraction lipidique libre (soluble dans les solvants organiques, tel que le chloroforme), puis d'en déterminer la composition par fractionnement à l'aide de la chromatographie en phase liquide. Celle-ci permet d'évaluer (Fig. 11), les quantités des hydrocarbures saturés, des hydrocarbures aromatiques et des composés polaires (résines et asphaltènes).

IV-4-1 Extraction des composés lipidiques

Les composés lipidiques libres contenus dans les sédiments sont extraits selon deux méthodes : une méthode rapide décrite par Huc (1976) et une autre lente à l'aide du soxhlet (Monin et *al.*, 1978). Pour les deux méthodes nous avons prélevé 20 g de sédiment finement broyé.

* Extraction rapide (Huc, 1976) :

Le sédiment est placé dans un bêcher de 1l (forme haute) et additionné d'un volume de chloroforme dans les proportions 100 ml/g de sédiment. Après y avoir introduit un barreau aimanté, le bêcher est couvert d'une coupelle contenant de l'eau servant de réfrigérant, puis placé sur un agitateur magnétique chauffant. L'extraction est conduite pendant une heure à une température de 50°C.

L'extrait chloroformique est alors séparé du résidu de sédiment par filtration sous vide à travers un filtre en fibre de verre (Whatman GF/A) dans des tulipes en verre munies d'un fond en verre fritté. Il est ensuite évaporé à l'aide d'un évaporateur rotatif. L'extrait est repris dans un faible volume de chloroforme (5 ml maximum) et transvasé dans un tube en verre (h = 1 cm, ϕ = 6 mm), taré au préalable et laissé à l'air libre jusqu'à évaporation totale du solvant. Le poids de l'extrait chloroformique total est déterminé par double pesée.

*Extraction lente au soxhlet :

L'extraction lente est faite selon la méthode de Monin et *al.*, (1978), à l'aide du soxhlet. L'échantillon est placé dans une cartouche en fibre de verre, puis introduit dans le tube extracteur. 250 ml de chloroforme sont versés dans un ballon. Ces derniers s'évaporent et remontent par l'intermédiaire d'un tube et coulent sur l'échantillon une fois condensés.

Lorsque le tube extracteur est plein, le chloroforme s'écoule dans le ballon par un tube siphonné, permettant au cycle de recommencer.

L'extraction au soxhlet est conduite pendant 18 heures pour chacun des échantillons à la température de 50°C. L'extrait est alors récupéré dans le ballon. Enfin, le poids de ce dernier concentré est déterminé par double pesée.

IV-4-2 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 :

- dissoudre 200 g de sulfate de cuivre cristallisé, dans 2 l d'eau distillée, avec 50 ml de HCl 2N sous agitation magnétique,
- dissoudre 30 g de poudre de zinc dans 50 ml d'eau distillée,
- verser goutte à goutte le mélange de zinc dans la solution de cuivre pour éviter que l'amalgame ne devienne pulvérulent.

A la fin, 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 et effilée à une extrémité :

Avant de remplir la colonne d'amalgame, un petit morceau de laine de verre est introduit au fond de la mini colonne. Celle-ci est lavée ensuite plusieurs fois à l'acétone pour éliminer l'eau. Enfin on effectue un rinçage au chloroforme avant de verser l'extrait.

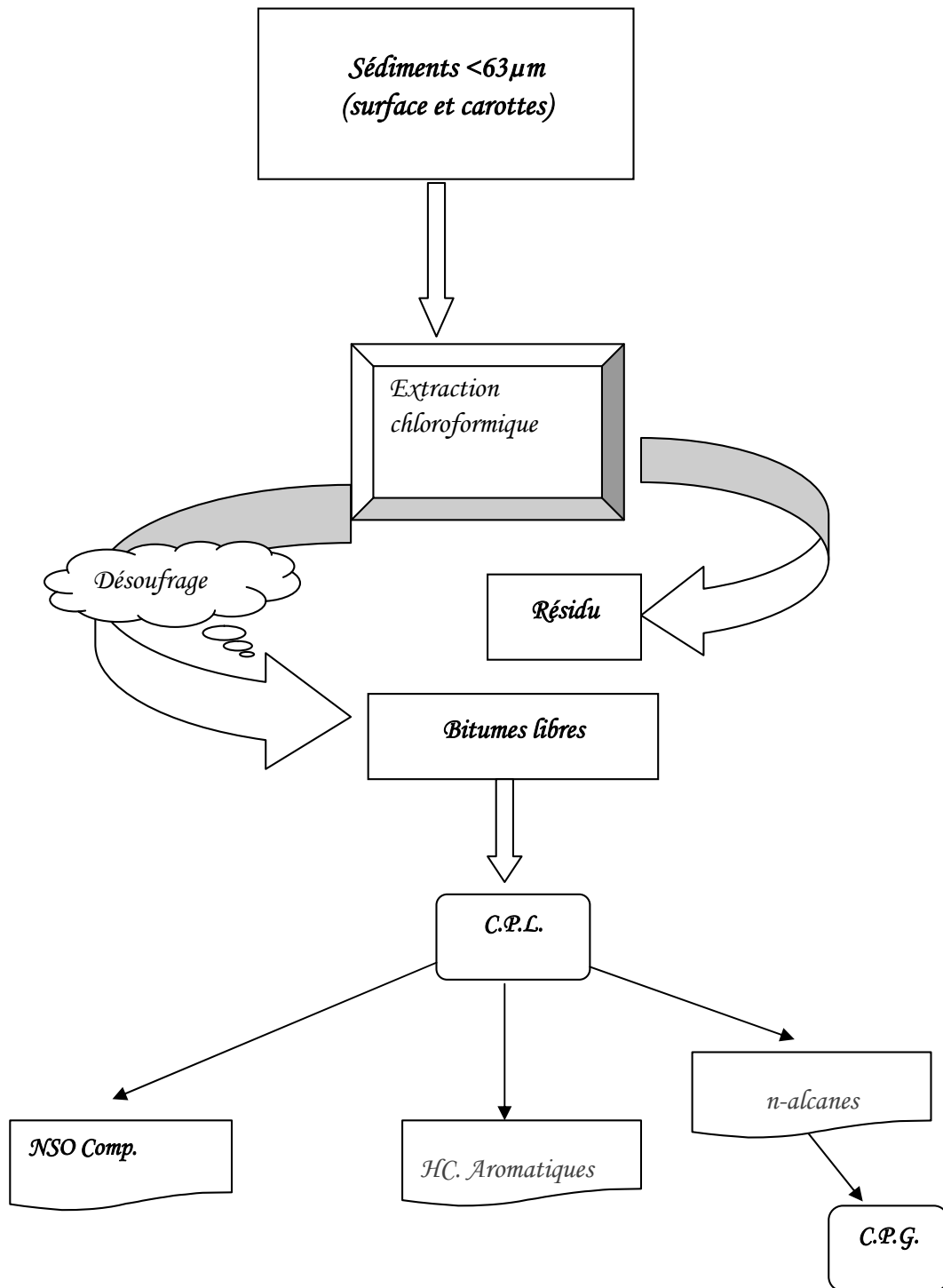


Figure 11: Schéma de la séparation des différentes fractions lipidiques.

L'extrait dissout dans un peu de chloroforme, est placé sur l'amalgame, puis lavé plusieurs fois au chloroforme afin de le récupérer. 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.

IV-4-3- Fractionnement de l'extrait par chromatographie en phase liquide

La chromatographie en phase liquide est une technique, qui permet de séparer sur une mini-colonne de silice, les différents composés constituant l'extrait désoufré à savoir les hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques, les hydrocarbures aromatiques et les composés polaires (résines et asphaltènes).

* Préparation de la colonne de silice:

La silice utilisée est le silica gel 60. Elle est nettoyée avant utilisation par le cyclohexane et le dichlorométhane. Une fois les solvants évaporés, la silice est conditionnée sous vide à 140°C pendant une nuit.

La colonne utilisée pour la séparation des différentes fractions de l'extrait est une pipette pasteur : c'est un tube de verre de 6 mm de diamètre, 10 cm de hauteur et effilé à une extrémité.

* Protocole analytique:

L'extrait chloroformique désoufré est repris dans un petit volume de chloroforme et ensuite déposé sur la colonne de silice préalablement mouillée avec de l'hexane.

Les hydrocarbures saturés sont élus au début avec un certain volume d'hexane; les hydrocarbures aromatiques sont ensuite élus par un mélange hexane/ chloroforme dans les proportions 2/3-1/3. Ces deux fractions sont recueillies dans des tubes en verre (h = 1 cm, ϕ = 6 mm), préalablement tarés. Le poids des hydrocarbures saturés (HCsat) et aromatiques (HC arom) est déterminé après évaporation du solvant. Les composés polaires (résines et asphaltènes) sont fixés par la colonne de silice et leur poids est déterminé par différence :

Poids composés polaires = Poids extrait chloroformique total - (Poids HC sat + Poids HC arom).

IV-4-4 Etude de la distribution des hydrocarbures saturés par chromatographie en phase gazeuse :

La fraction des HC saturés a été analysée par chromatographie en phase gazeuse au moyen d'un appareil 5880 A SERIES GAS CHROMATOGRAPH, équipé d'un détecteur à ionisation de flamme et d'un injecteur en splitless, dans les conditions suivantes :

- ☞ programmation de la température du four : 80 à 300 °C à raison de 4°C/mn puis 10 minutes à 300°C
- ☞ température de l'injecteur : 250°C
- ☞ température du détecteur à ionisation de flamme (FID) : 300°C
- ☞ gaz vecteur : hélium en splitless
- ☞ colonne capillaire SP2100 : (30m x 0,25m)
- ☞ dissolution de l'échantillon dans le cyclohexane ou l'hexane: 100µl
- ☞ injection : 0,5µl
- ☞ enregistreur /intégrateur : déroulement du papier 0,25 mm/mn

L'injection se fait en mode splitless en gardant la split valve fermée pendant environ 60 secondes (jusqu'à apparition du pic solvant :cyclohexane ou hexane).

Les pics correspondant aux n-alcanes et iso-alcanes sont identifiés par comparaison de leur position sur le chromatogramme à celle des pics d'un échantillon standard.

Chapitre III :
**ETUDE
SEDIMENTOLOGIQUE**

Afin d'identifier l'évolution spatio-temporelle de la sebkha de Moknine et de trouver les moyens pour reconstituer sa paléogéographie, une étude sédimentologique a été réalisée. Elle est également le support de l'étude de la diagenèse de la matière organique. Les sédiments déposés au fond des lacs sont la résultante de toutes interactions s'exerçant dans et sur le système lacustre. La distribution spatiale, latérale et verticale des sédiments et leur nature physique, minéralogique et chimique sont déterminées par l'ensemble des caractéristiques du bassin versant et de la cuvette lacustre (Berner, 1971 ; Berthois, 1975 ; Reineck et *al.*, 1980 ; Leeder, 1982 ; Gall, 1994 ; Cojan et *al.*, 1995 ; Chamley, 2000). L'étude des sédiments permet d'extraire les informations figurant dans le tableau 1.

Tableau 1 : Principales informations contenues dans le message sédimentaire (Meybeck, 1995).

<i>Etude des sédiments</i>	<i>Informations obtenues</i>
<i>Caractéristiques du bassin versant</i>	
Diatomées, pollens Minéraux allochtones Profils sismiques Traceurs géochimiques Granulométrie	Climat local, végétation et climat régional Erosion mécanique et chimique, érosion éolienne Origine et âge de la cuvette, taux de remplissage Climat régional, géologie Origine des sédiments, événements catastrophiques
<i>Hydrologie et dynamique</i>	
Granulométrie Minéralogie Marqueurs organiques	Dynamiques des eaux Bilan hydrique, Oxygénation Oxygénation
<i>Production biologique</i>	
Pigments Diatomées Characées Profils des traceurs dans les sédiments	Production primaire Eutrophisation Production secondaire Bioturbation par des benthos
<i>Impacts anthropiques</i>	
Diatomées	Acidification

I- COMPOSITION LITHOLOGIQUE DE LA COLONNE SEDIMENTAIRE

La colonne sédimentaire se compose de deux parties :

la fraction superficielle comprise entre 0-15 cm de sédiment (sédiments de surface et sommet des carottes), et la fraction sub-superficielle et récente à partir de 15 cm jusqu'à la base de la carotte.

Les sédiments de surface sont prélevés dans toute la sebkha (Fig.7), et les carottes sont implantées sur des radiales parallèles (Fig.8) et se repartissent ainsi :

Numéro et Position des radiales	Périphérie	Zone médiane	Centre
radiale 1: Nord-Est	SM1	SM2	SM3
radiale 2 : Sud-Est	SM4	SM5	SM6
radiale3 : Oued Rejel Chiba	SM 7	*	*
radiale 4 : Est	SM 8	*	*
radiale 5 : Nord	SM9	SM10	SM12
radiale 6 : oued Soltane	SM11	*	*
radiale 7 : Nord-Ouest	SM13	SM14	SM15
radiale 8 : Sud-Ouest	SM16	SM17	SM18
Radiale 9 : Sud	SM19	*	*

Les radiales 3, 7, 8 et 9 sont prélevées dans la partie émergée localisée à l'Ouest (photo 1) et les radiales 1, 2, 4, 5 et 6 sont exécutées dans la zone immergée répartie au Nord et à l'Est (photo 2).

Planche 3

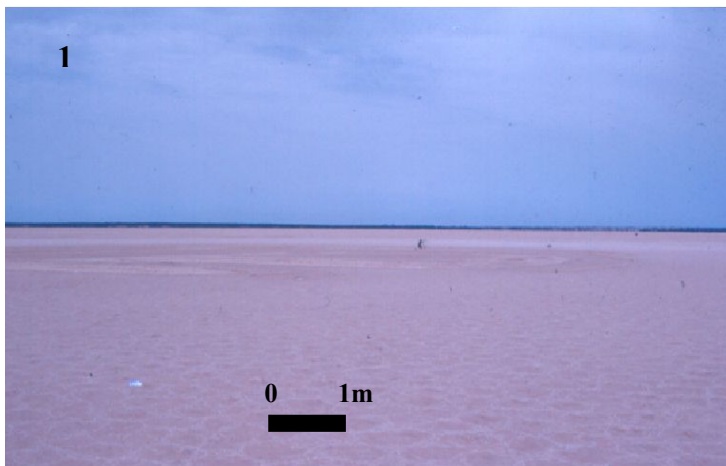


Photo-1- Vue de la zone émergée : **large**



Photo-2- Vue de la zone immergée :
accumulation d'eau près de la dalle
villafranchienne à l'Est de la sebkha.

I-1- Description lithologique des sédiments de surface

L'examen de la composition lithologique des sédiments de surface de la sebkha de Moknine montre :

1- Une répartition des faciès en auréoles anisopaques : un dépôt de sable à la périphérie de toute la sebkha, plus étendu sur le côté ouest que sur les côtés nord, est et sud ; ensuite un faciès mixte plus fin se dépose. Celui-ci est plus étendu du côté sud et enfin le centre de la sebkha est occupé par un faciès fin silto-argileux à argileux (Fig.12).

2- Une diminution progressive des sables et une augmentation progressive des argiles s'observent depuis les zones les plus externes jusqu'aux zones les plus internes. Ceci traduit l'existence d'un granoclassement décroissant dans la distribution latérale des matériaux détritiques (Fig.12).

3- La présence des sables quartzeux sur une large étendue à l'Ouest est en relation étroite avec l'importance des apports par les courants d'eau abondants de ce côté. La plus grande partie du bassin versant se localise à l'Ouest. Le drainage de ce dernier par les oueds permet l'accumulation des dépôts détritiques et joue un rôle dans le comblement et le vieillissement du bassin.

Au sud, le grand oued Redjel Chiba apporte vers la sebkha un sédiment de texture fine. L'analyse des sédiments à l'amont et en aval de cet oued montre un dépôt de sables fins à la périphérie est et une vase argileuse dans le lit de l'oued.

4- Des cristaux de gypse lenticulaire et des petites roses de sable sont retrouvés dans les échantillons SSM12-2 et SSM15-6.

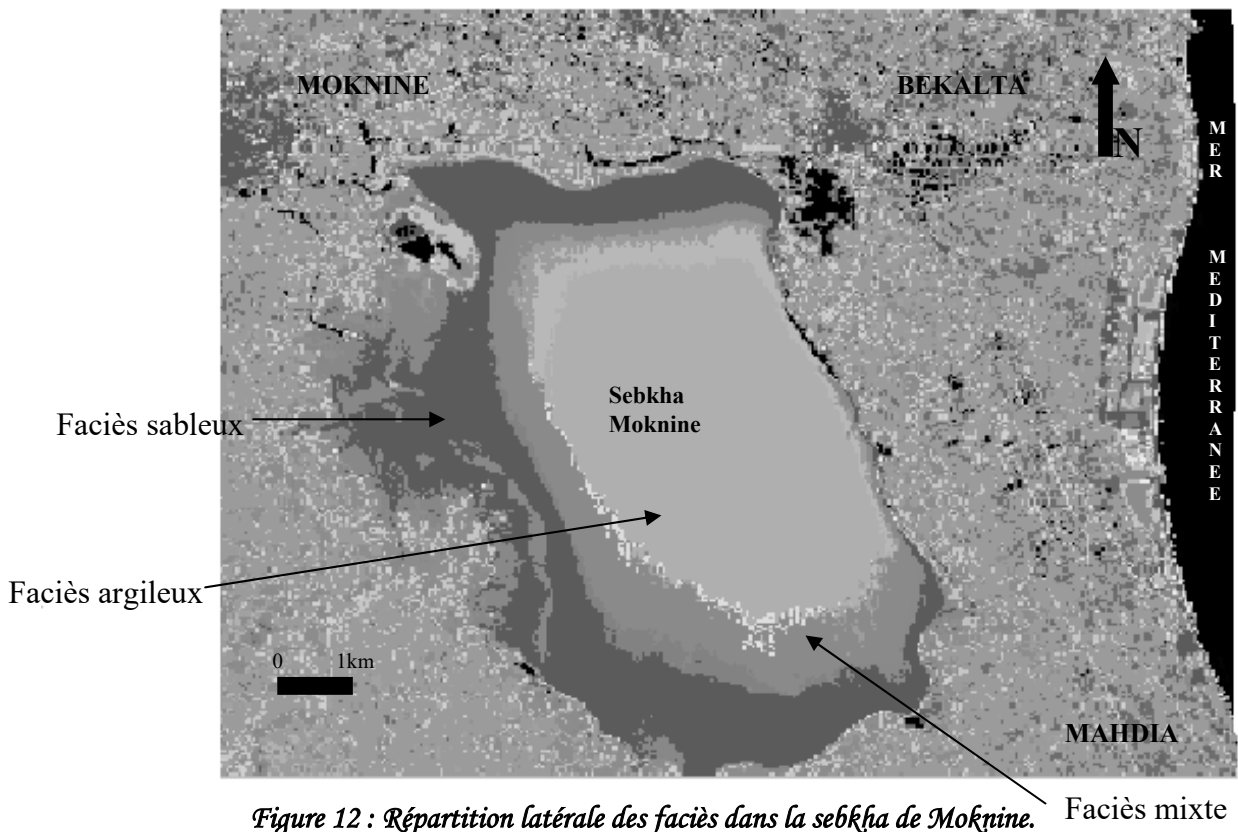


Figure 12 : Répartition latérale des faciès dans la sebkha de Moknine.

I-2- Description lithologique des sédiments des carottes

La description des différents horizons traversés par les carottes effectuées dans la sebkha de Moknine est reportée sur les figures 13,14, 15, 16, 17 et 18.

L'examen de la composition lithologique des différentes carottes exécutées dans la sebkha permet de dégager les observations suivantes:

1-Les carottes sont composées de trois types de faciès :

- un faciès sableux moyen à très fins;
- un faciès mixte : sablo-argileux et argilo-sableux
- un faciès fin : argilo-silteux à argileux.

Une telle composition indique que le matériel de remplissage est d'origine détritique. Celui-ci comprend toutes les subdivisions granulométriques allant des sables aux argiles.

Il est très significatif de noter que les couches traversées dénotent toutes un dépôt effectué dans un environnement continental (lacustre). Les niveaux traversés n'ont montré aucun indice faunistique ou lithologique permettant l'attribution d'un caractère de dépôt franchement marin quelle que soit la profondeur de la carotte. En effet, la présence d'une faune caractérisée essentiellement par des gastéropodes de milieu continental : *Rumina decollata*, *Helicella idia*, *Eobania vermiculata*, *Helicella variabili* confirme et appuie cette observation.

Par ailleurs, la dalle villafranchienne à l'Est forme une barrière séparant la sebkha de la mer et la protégeant de la dynamique marine.

2-L'organisation de ces dépôts détritiques dans l'espace et dans le temps montre un agencement séquentiel où s'individualisent nettement des séquences élémentaires granocroissantes formées de un à trois termes.

Les séquences les plus complètes commencent à la base par des argiles auxquelles succède un terme argilo-sableux ou sablo-argileux ; elles se terminent par des sables comme le montrent les carottes SM13 et SM16 (Fig16-17).

La séquence montrant deux termes est caractérisée soit par :

-un terme basal argileux surmonté par un terme sommital sablo-argileux. C'est le cas surtout des carottes situées en position médiane (SM10, SM14 et SM17, Fig 15-16-17).

-ou, un autre modèle constitué par une base argileuse et un sommet argilo-sableux. Ce modèle où le faciès fin est plus répandu caractérise les carottes prélevées au centre du côté ouest (SM15 et SM18, Fig. 16-17).

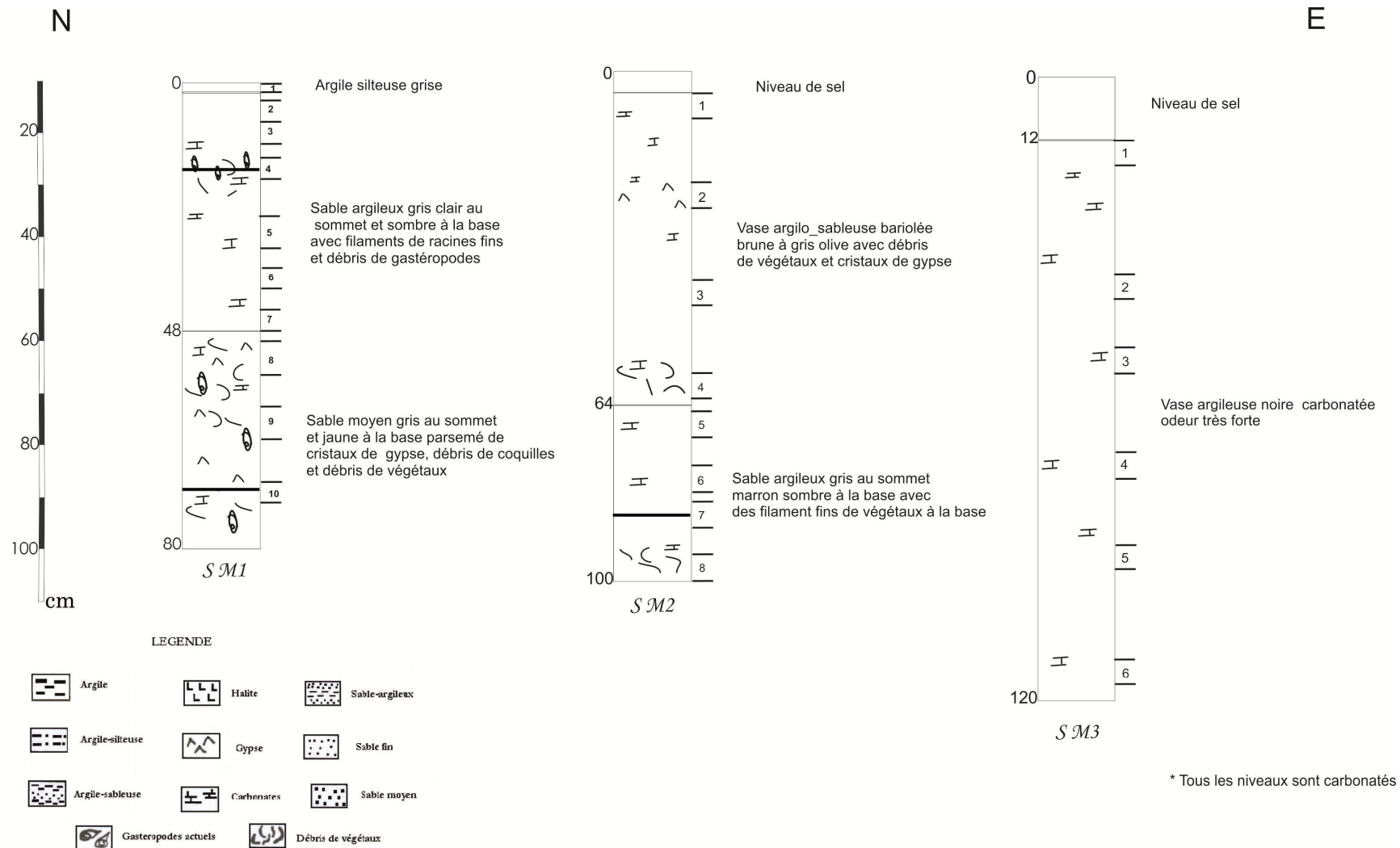


Figure 13 : Description lithologique des profils prélevés au Nord-Est de la sebkha de Moknine

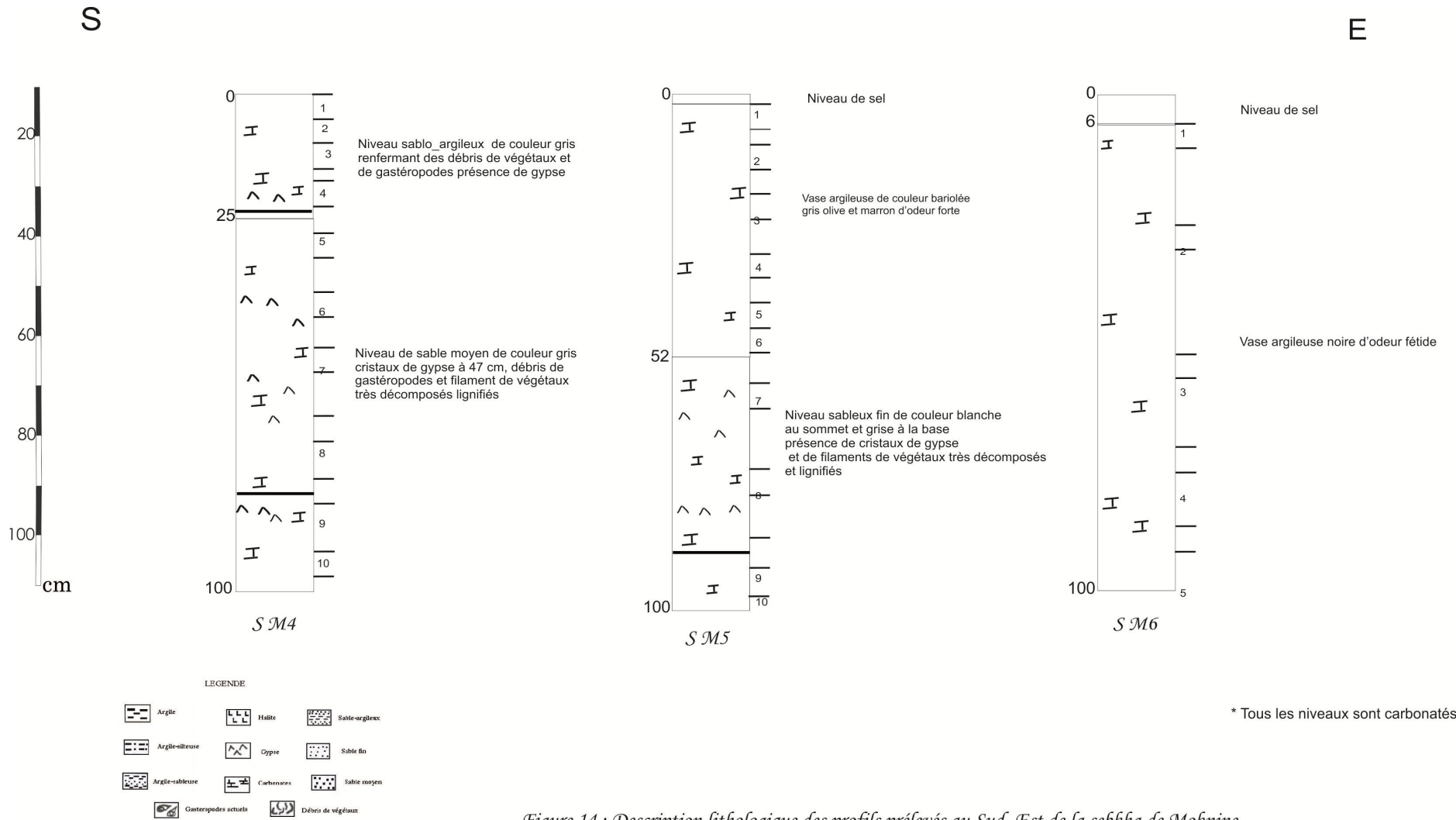


Figure 14 : Description lithologique des profils prélevés au Sud_Est de la sebkha de Moknine.

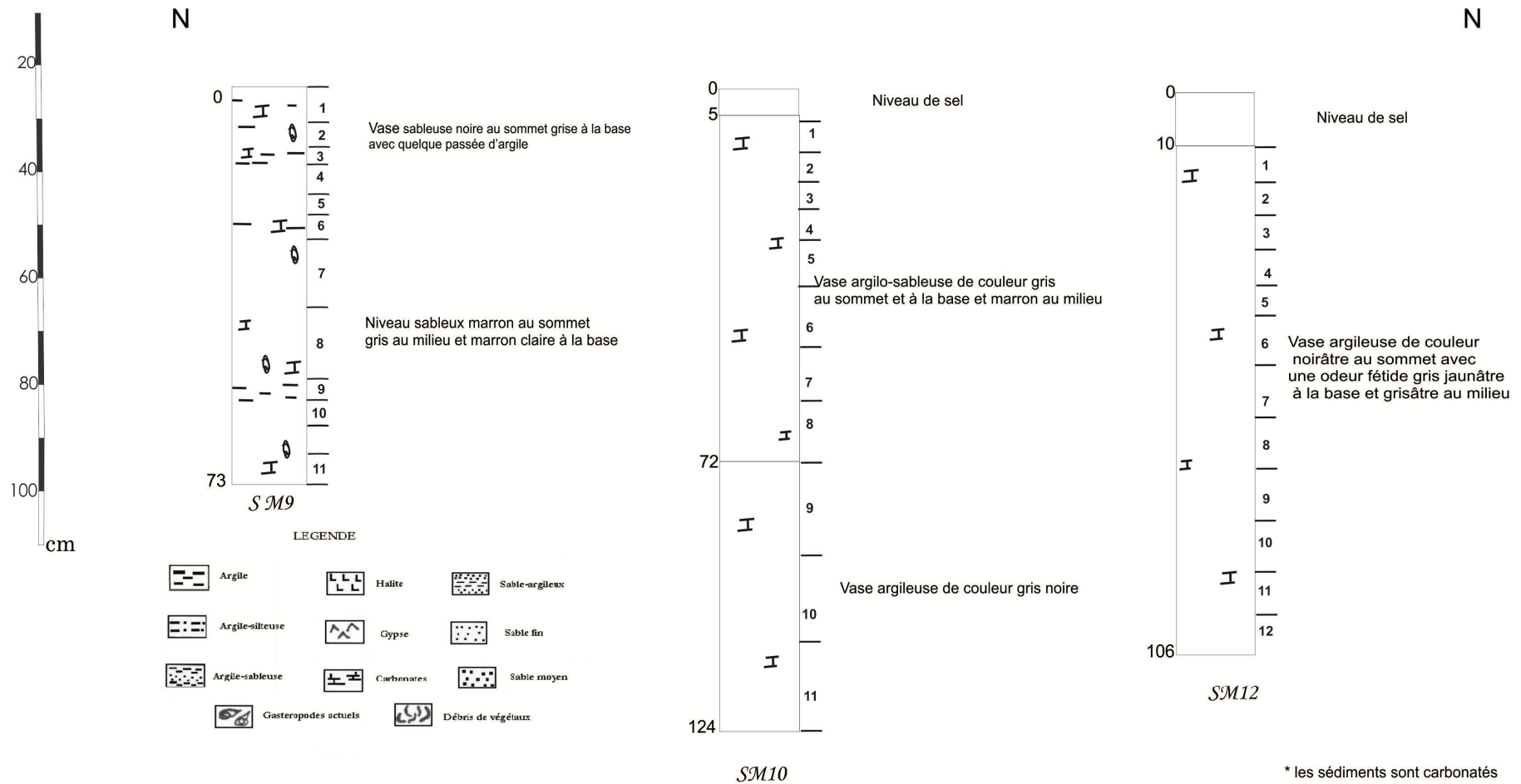


Figure 15 : Description lithologique des profils prélevés au Nord de la sebkha de Moknine .

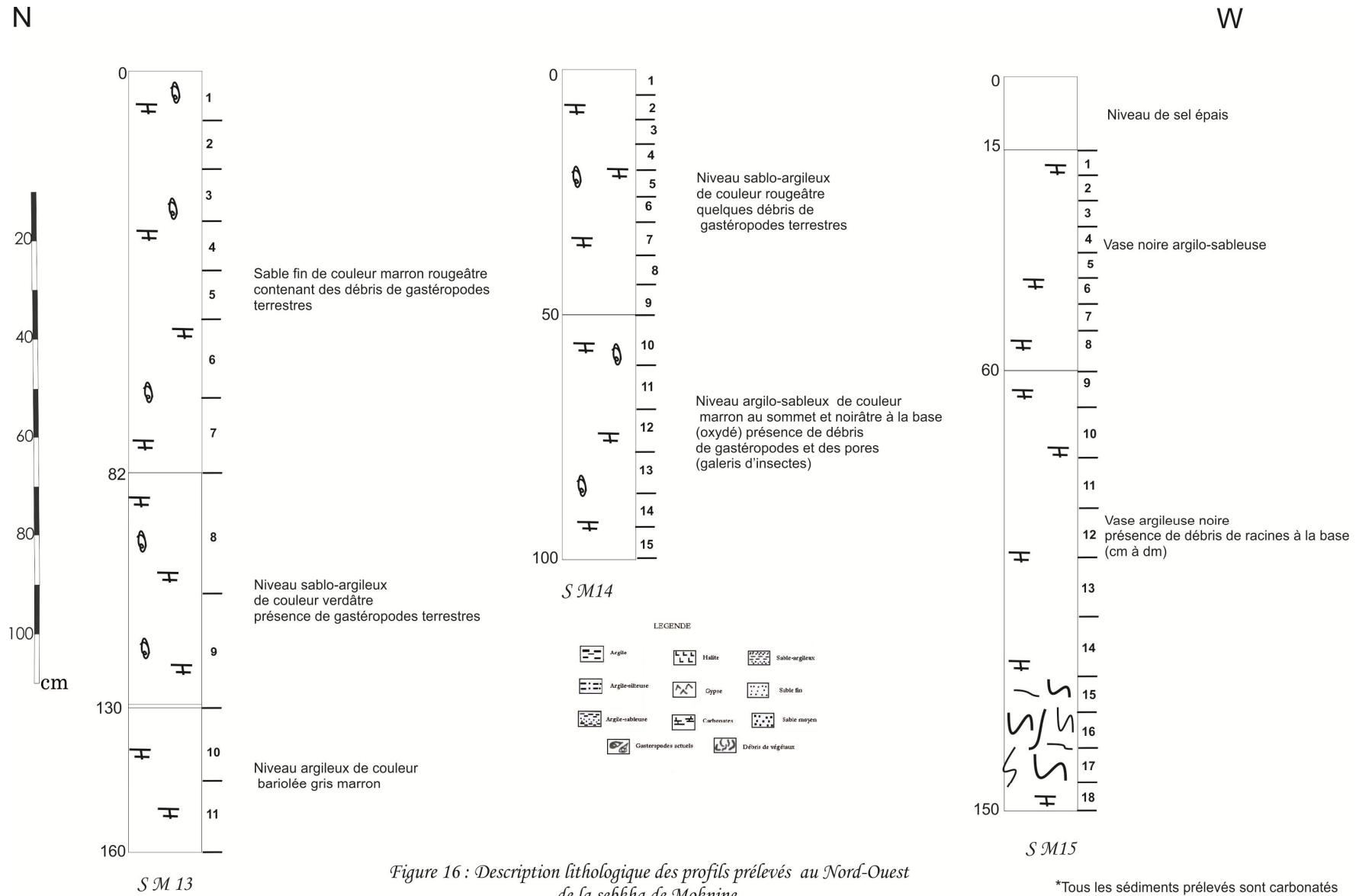


Figure 16 : Description lithologique des profils prélevés au Nord-Ouest de la sebkha de Moknine.

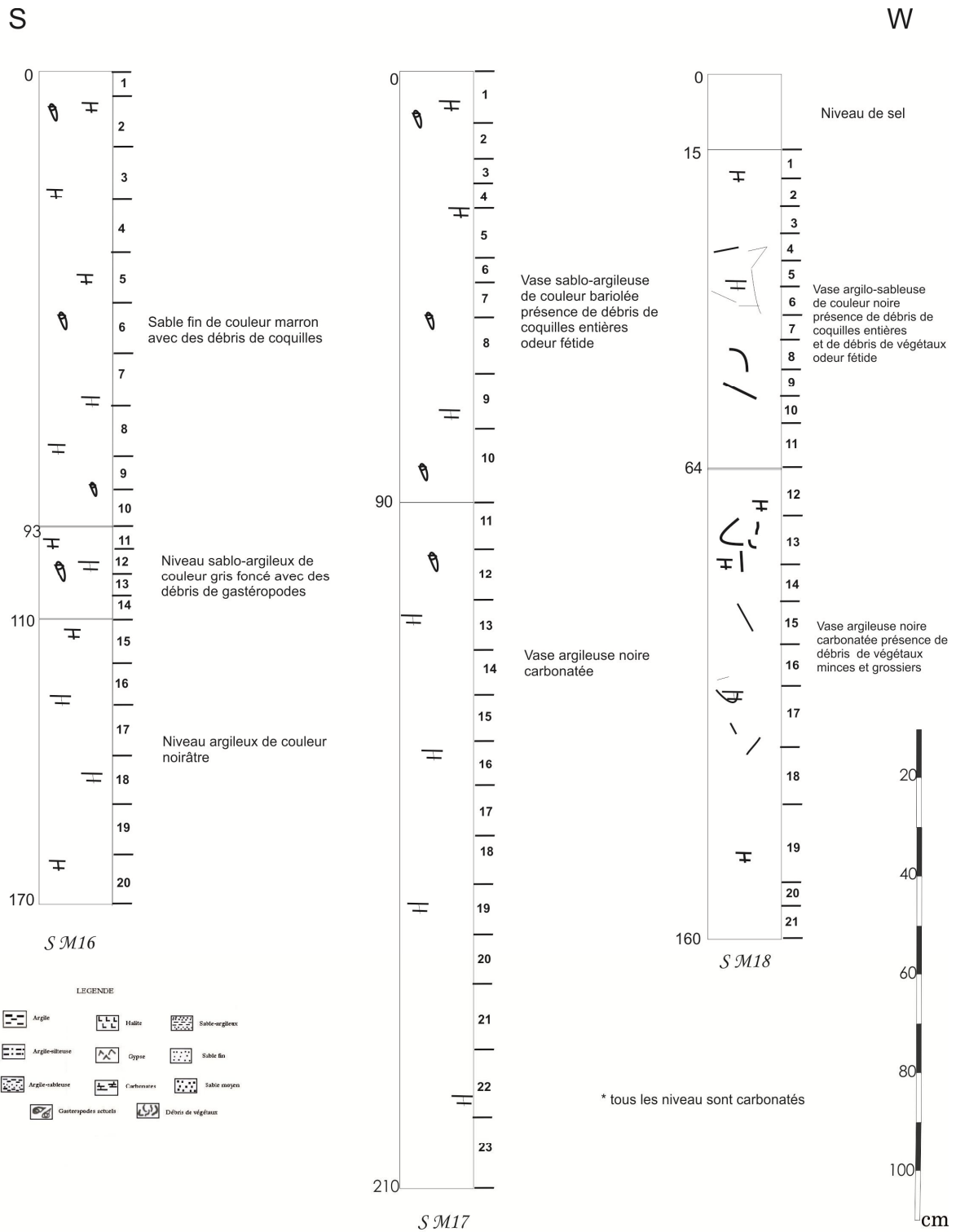


Figure 17 : Description lithologique des profils prélevés au Sud-Ouest de la sebkha de Moknine.

Enfin, le centre de la sebkha est caractérisé par une séquence homogène formée par un terme argileux unique. Ce modèle est caractéristique des carottes prélevées au Nord (SM12) et à l'Est (SM3 et SM6).

De telles séquences granocroissantes indiquent des dépôts de progradation dans une dépression continentale et une énergie hydrodynamique qui a progressivement augmenté avec le temps.

L'observation des différentes séquences lithologiques autorise à penser que les argiles occupant la base des séquences, correspondent à un épisode où la sebkha était couverte d'eau en totalité.

3- La distribution latérale des faciès détritiques de l'intervalle sommital des carottes montre un remplissage de type concentrique. Cet intervalle est variable d'une carotte à une autre (0-20cm, 0-50cm, 0-70cm, 0-90cm).

Les dépôts les plus grossiers (sables moyens à fins) occupent les zones périphériques de la sebkha. Vers le centre du bassin les dépôts deviennent fins formés d'une vase argileuse ou argilo-silteuse.

Cette observation est illustrée par les carottes périphériques SM1, SM4, SM7, SM8, SM9, SM11, SM13, SM16 et SM19 qui montrent toutes à leur partie supérieure, une composition lithologique dans laquelle dominant des sables moyens à très fins associés parfois à des matériaux fins : silt ou argile.

Les carottes internes (SM15 et SM18) montrent dans les mêmes intervalles sommitaux une composition lithologique où dominant les argiles associées à de très faibles proportions de matériaux de sable très fin à l'Ouest. Par contre, les carottes en position interne au Nord et à l'Est sont formés d'une vase argileuse aux même niveaux.

Les carottes SM2, SM5, SM10, SM14 et SM17 se situent géographiquement entre le centre et la périphérie. Leur remplissage ultime se compose d'argiles sableuses ou de sables argileux. Ce terme est un état intermédiaire entre les deux modes de dépôt au centre et en bordure.

4- La corrélation de la distribution latérale des niveaux à la base des carottes montre que ces derniers sont caractérisés par une composition lithologique homogène où dominant les argiles. Quelle que soit la position des carottes (externes, interne ou intermédiaire) les niveaux de la base sont principalement argileux.

Ce niveau de base argileux observé dans presque toute la sebkha est quasi-constant. Son absence dans certaines carottes (SM1, SM4 SM5 SM8 SM9 SM11 et SM14) ne signifie pas qu'il ne s'est pas déposé mais plutôt qu'il se situerait à une profondeur supérieure.

Si on considère que les niveaux argileux de la base des carottes sont constants à travers la sebkha, que les niveaux sommitaux sont au contraire variables et montrent une distribution concentrique, la répartition des niveaux sommitaux traduit parfaitement l'aspect progradant de la sédimentation détritique dans le bassin évaporitique de Moknine à travers le temps (Fig.19a). De ce fait le niveau argileux basal reflète un épisode antérieur de la sebkha lorsqu'elle était recouverte en totalité d'eau (Fig.19b).

Ces quatre observations permettent de considérer que le mode de remplissage de la sebkha s'est effectué d'une manière concentrique. Le comblement est net dans les espaces les plus externes. Il continue progressivement vers les domaines les plus internes. Ce mode de remplissage centripète est du à l'existence de plusieurs directions des apports détritiques. Il témoignerait également d'une physiographie particulière du bassin, constitué par un domaine central profond évoluant vers un domaine périphérique de moins en moins profond (Fig.19c).

Ceci est clairement exprimé par la distribution zonée des matériaux détritiques de remplissage des sommets des carottes et des sédiments de surface. En effet, les niveaux de croûte de sel existant dans les carottes les plus internes est un indice supplémentaire confirmant ce mode de remplissage centripète.

Cette distribution lithologique pose le problème de la présence quasi-constante des argiles à la base de toutes les carottes.

Il semble qu'au moment du dépôt de ces niveaux argileux, la sebkha possédait une plus grande superficie. Ces argiles correspondent à la zone la plus interne. De ce fait, les parties périphériques et intermédiaires, sièges de dépôts détritiques plus grossiers argilo-sableux et sableux sont localisés plus loin. En d'autres termes, au moment où la sebkha déposait exclusivement un faciès argileux, sa périphérie sableuse était probablement plus éloignée.



Figure 19a : Répartition latérale des sédiments de séquence récente et limites actuelles de la sebkha de Moknine

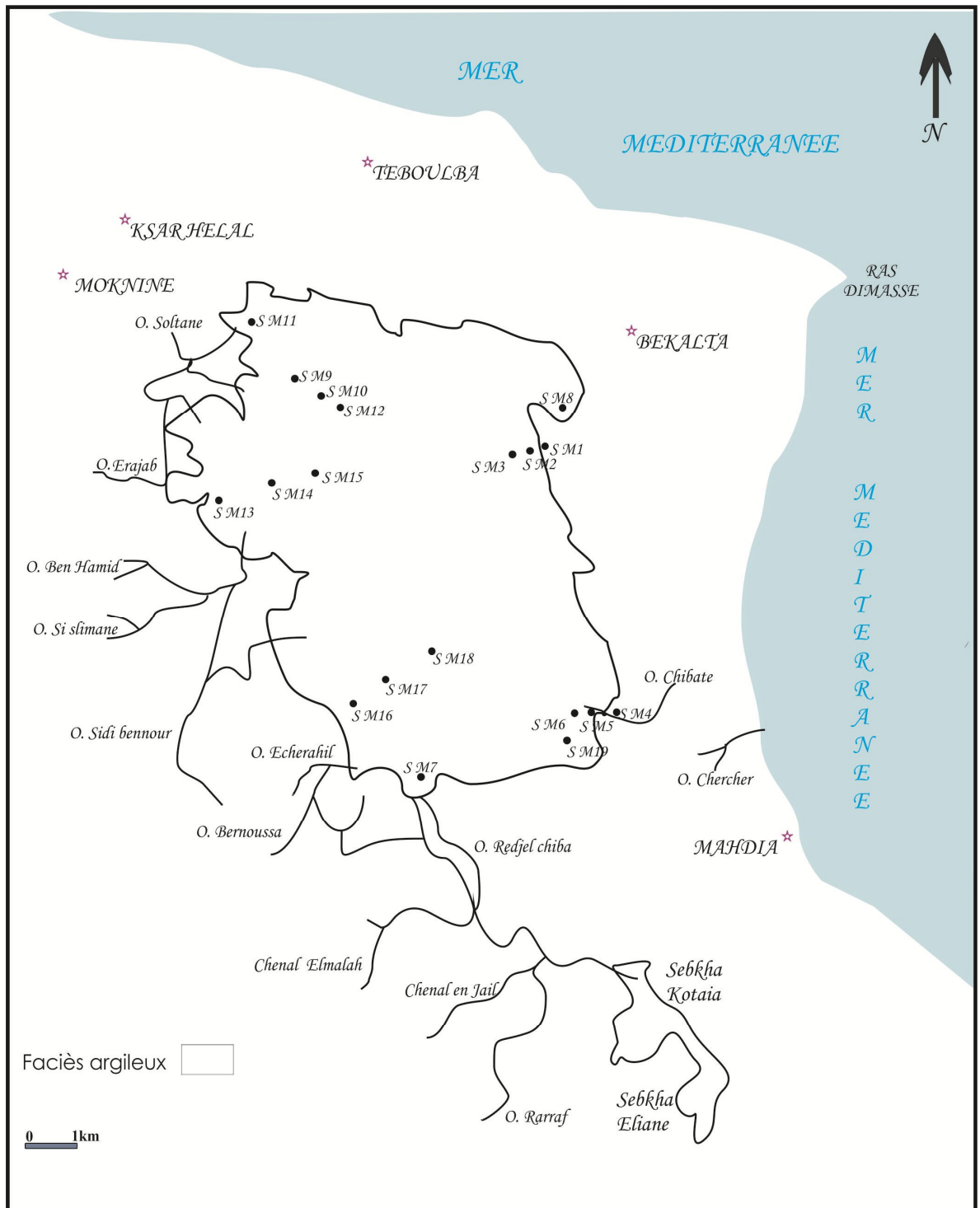


Figure 196 : Répartition latérale de la séquence argileuse et anciennes limites de la sebkha de Moknine

Mais, aucune confirmation directe ne peut être apportée à l'état actuel. En effet, cela nécessite l'exécution de carottes plus profondes à l'extérieur des limites actuelle de la sebkha. Ces carottes devraient traverser un terme sableux équivalent à des dépôts argileux. Toutefois cela nous paraît bien vraisemblable, comme nous le montrerons plus tard à l'aide d'une étude quantitative et qualitative de la distribution de la matière organique, qui apportera des éléments pour appuyer cette observation.

5- La comparaison de la composition lithologique des carottes situées à l'Est de la sebkha (SM1, SM4, SM8 et SM19) avec celles situées au Nord SM9 et SM11 et à l'Ouest SM13 et SM16, montre un net déséquilibre à l'Ouest dont le comblement est bien plus rapide comparé à celui s'opérant à l'Est.

Les carottes SM3 et SM6 situées à proximité de la limite est, révèlent la même composition lithologique que SM12 et ressemblent à SM15 et SM18 situées vers le centre du bassin du côté ouest. Ceci signifie que les apports détritiques sont plus importants à l'ouest et que le comblement progressent rapidement de ce côté.

Ceci sera étayé par des analyses granulométriques ayant pour but la détermination du niveau d'énergie, du mode de transport et de la nature des sables déposés à l'Est, au Nord, à l'Ouest et au Sud.

Deux raisons peuvent être avancées pour expliquer cette hypothèse:

* La topographie actuelle du bassin (Fig.19c) montre que la partie orientale est entre -9 et -8m par rapport au niveau de la mer alors que les parties nord et ouest sont entre -6 et -4m. Cette topographie basse du côté oriental et relativement haute du côté occidentale explique la dissymétrie du bassin qui ne se limite pas à la topographie mais intervient aussi dans la bathymétrie de la dépression. En effet, les conclusions dégagées de l'étude des sédiments de surface montrent une partie émergée à l'Ouest à l'exception de la zone la plus interne et une partie immergée à l'Est pendant la saison humide.

* Le réseau hydrographique est plus abondant à l'Ouest en comparaison avec celui à l'Est et au Sud. Ceci se traduira par des apports plus fréquents et plus intenses dans cette direction. Les apports du bassin versant à l'Ouest ont enrichi la périphérie en fraction grossière. Seule la fraction fine arrive au centre expliquant la présence du seul terme argileux relevé dans les carottes internes SM3, SM6 et SM12.

Cependant, les sables occupant la périphérie du côté oriental ont probablement une autre origine. Ces derniers ont été transportés par l'eau ou par voie éolienne après érosion des sols formés sur la dalle villafranchienne.

L'oued Chibat joue probablement un rôle dans les apports de la zone orientale. Enfin, au Sud, oued Rejel Chiba est le principal moteur d'apport.

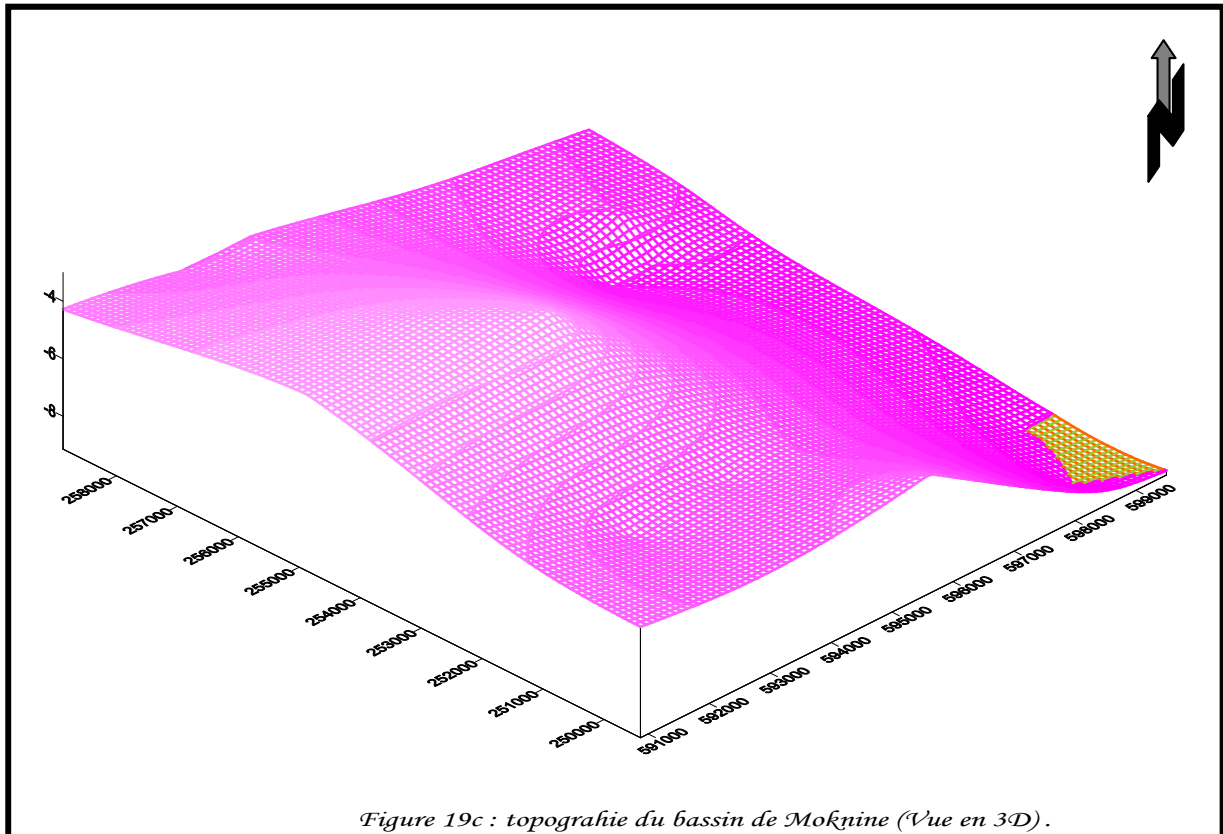
6- La présence de cristaux de gypse dispersés dans les niveaux sableux et sablo-argileux dans la partie est de la sebkha et leur absence au centre traduisent aussi cet effet de rétrogradation de la sebkha. Par leur position éparpillée le long de la colonne lithologique, les cristaux de gypse ne sont pas formés suite à une précipitation directe à partir de la colonne d'eau mais plutôt sont nés tardivement au sein du sédiment grossier par cristallisation à partir des eaux interstitielles. Ce sont des cristaux d'origine diagénétique.

Leur présence en grande quantité dans les sédiments des carottes les plus externes correspondant à l'évaporation totale des eaux interstitielles. Par contre dans les carottes médianes, ces cristaux n'apparaissent, généralement qu'en dessous de 20cm. Ici le sédiment contient encore l'eau interstitielle en cours d'évaporation. Les cristaux de gypse se forment donc au fur et à mesure de cette évaporation.

Quant aux carottes les plus internes, l'évaporation des eaux interstitielles est encore insuffisante pour permettre la cristallisation de gypse ; ce qui explique leur absence dans la colonne sédimentaire.

L'absence des cristaux de sulfates sur les périphéries occidentale et septentrionale est une conséquence de l'absence d'eau et/ou d'emersion.

L'existence de cristaux de gypse éparpillés dans les sédiments est un moyen de plus confirmant la présence d'eau interstitielle et/ou de surface dans certaines parties du bassin de Moknine ; donc la présence de deux zones distinctes : une immergée et une autre émergée (comblée).



CONCLUSION

Trois points sont dégagés de cette étude lithologique :

1- Les sédiments sont répartis en auréoles anisopaques dans la sebkha de Moknine. Ce résultat rend compte de la répartition inégale du faciès sableux à la périphérie, plus abondant à l'Ouest en raison des apports importants de ce côté.

La sebkha de Moknine, a connu une évolution marquée globalement par un recul continue du niveau d'eau au cours de son histoire récente. L'apport terrigène considérable du côté ouest accentue le phénomène de comblement de la sebkha de ce côté. Cependant l'accumulation d'eau de surface se fait préférentiellement sur le côté oriental où la dalle villafranchienne forme une barrière. L'analyse de cette évolution, faite à partir de l'étude lithologique, montre que le système est en voie d'assèchement et de comblement. La sebkha présente aujourd'hui une zone émergée (ouest) et une autre immergée (Nord et Est).

La phase argileuse remarquée à la base des carottes périphériques SM13 et SM16 et l'abondance du faciès argileux dans les autres carottes à partir de 1 m de profondeur, corrobore le phénomène de vieillissement de ce bassin. Cette phase indique le changement de l'état de cette sebkha et donne une idée sur ses anciennes limites. L'étendue du système endoréique de Moknine était plus importante et totalement immergée.

Enfin, la nature lithologique des sédiments, et le granoclassement décroissant enregistré dans la distribution latérale de ces matériaux détritiques appuient l'origine continentale héritée des matériaux de remplissage. Ces derniers sont transportés vers la sebkha par l'oued Rejel Chiba au Sud, l'oued Soltane au Nord et l'oued Chibet au Sud-Est.

II- ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE

II-1- Faciès détritique

Les résultats de l'analyse granulométrique de la colonne sédimentaire montrent l'existence de deux types de faciès : un faciès sableux et un autre argileux. Les faciès mixtes (argilo-silteux, argilo-sableux et sablo-argileux) sont très subordonnés (tab.4: a-b, Fig20: a-f).

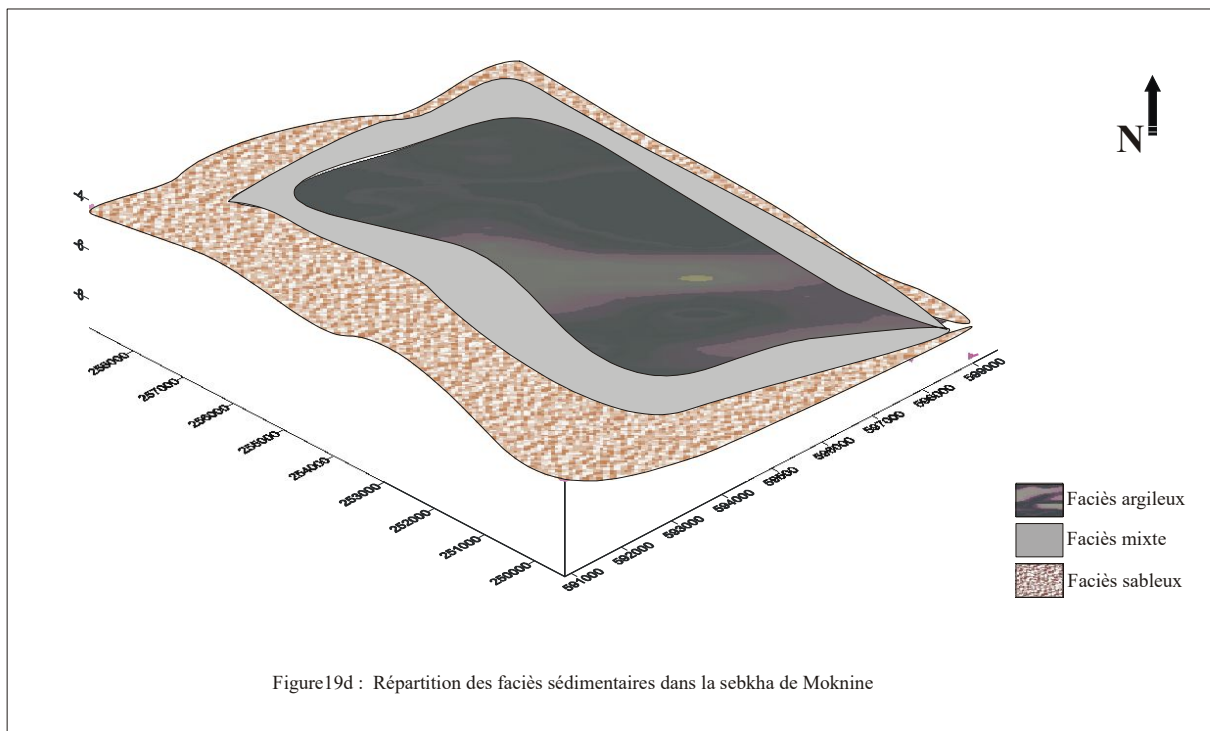
Les faciès sableux (fraction grossière >60%) caractérisent les sédiments de surface et les carottes prélevées sur la périphérie de la sebkha (SM1, SM4, SM8, SM9, SM13 et SM16), où ils représentent l'essentiel du sédiment. Par contre, dans les carottes médianes (SM2, SM5, SM10, SM14 SM17 et SM19), la fraction sableuse diminue au profit du faciès argileux et/ou argilo-silteux ; cette fraction devient majoritaire (jusqu'à 100%) dans les carottes internes (SM3, SM6, SM12, SM15 et SM18) et les sédiments de surface prélevés au centre (Fig19 : a, b, c et d).

Les faciès mixtes sablo-argileux et argilo-sableux, sont plus abondants dans les sédiments des carottes médianes. Les carottes SM7 et SM11 prélevées aux embouchures des oueds Rejel Chiba et Soltane présentent une composition comparable aux carottes médianes. Ces oueds au Nord et au Sud transportent donc vers la sebkha un faciès plus fin que celui qui arrive de l'Ouest. Ceci explique en partie la différence de la répartition des faciès dans le bassin et l'enrichissement de la partie orientale en argile.

L'étude des faciès prouve de plus l'existence d'une séquence décroissante de granoclassement caractérisée par une abondance de fraction grossière à la périphérie et une augmentation progressive de la fraction fine vers le centre.

Cette répartition granodécroissante est le résultat du comblement de la sebkha et par conséquent un recul du niveau de l'eau dans la sebkha donnant à cette dernière de nouvelles limites. En effet, nous avons remarqué une augmentation de l'épaisseur du faciès fin à la base de toutes les carottes (Fig.20 :a-f).

Cette conclusion nous permet d'appuyer encore l'idée que durant son histoire la sebkha a connu un appauvrissement en fraction fine à la périphérie et une augmentation en ce faciès vers le centre. La périphérie, siège d'un dépôt fin au passé s'est transformé en zone de dépôt grossier qui ne peut être que le résultat d'une phase de progradation et de comblement voir même un état de vieillissement de la sebkha. Cependant le centre continue à recevoir des matériaux fins.



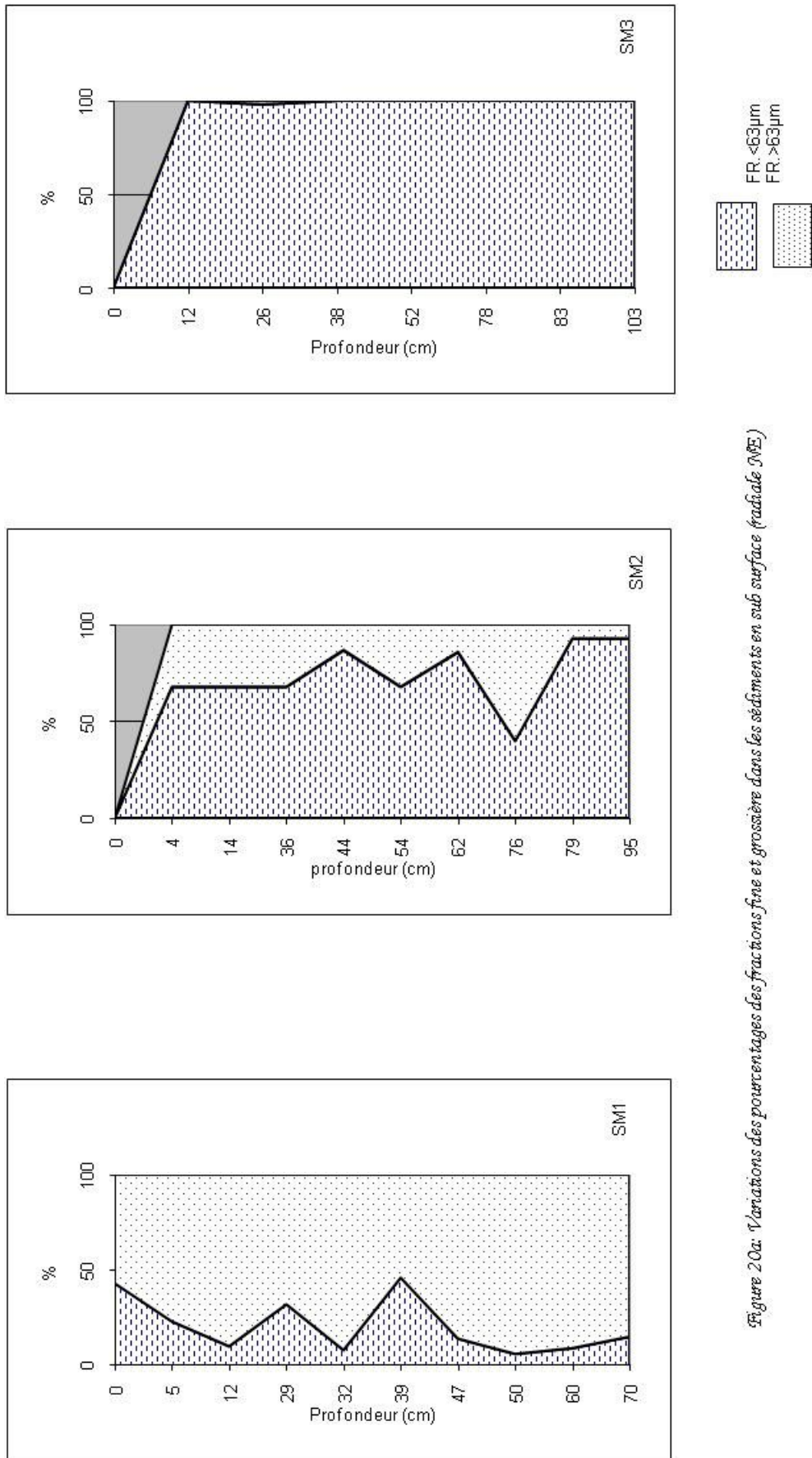


Figure 20a: Variations des pourcentages des fractions fine et grossière dans les sédiments en sub surface (radiale NE)

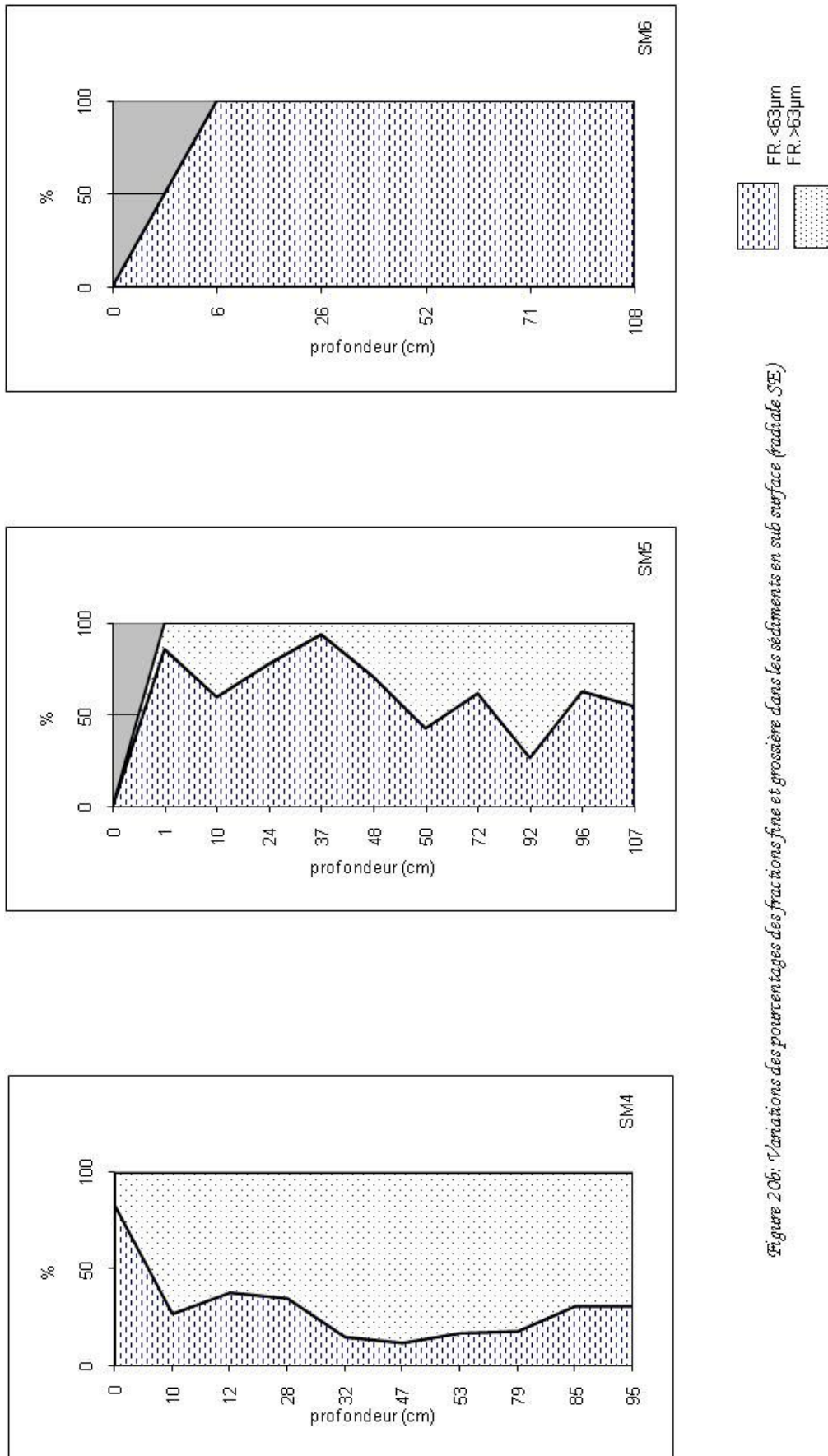


Figure 2.06: Variations des pourcentages des fractions fine et grossière dans les sédiments en sub surface (radiale SE)

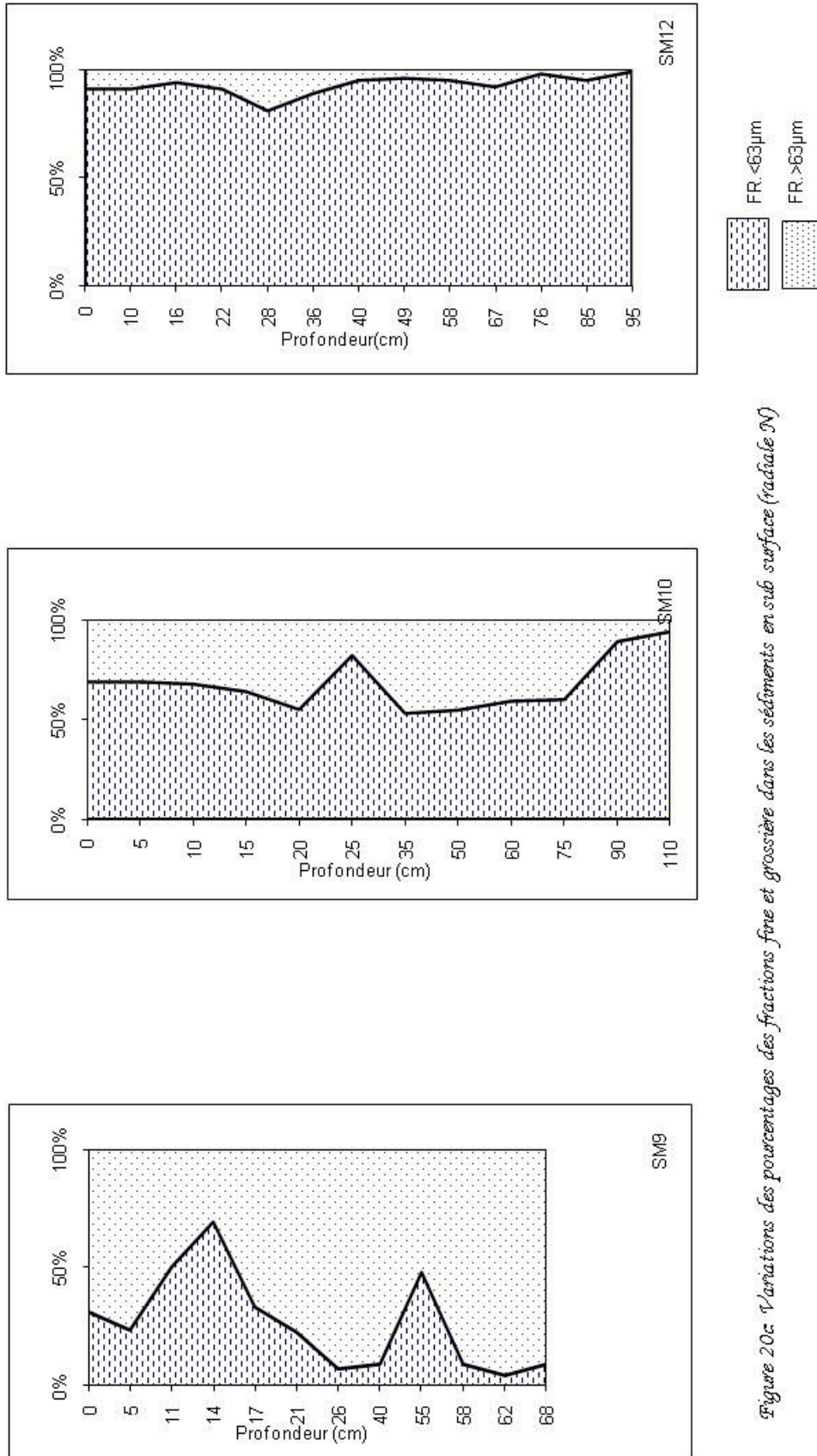


Figure 20c: Variations des pourcentages des fractions fine et grossière dans les sédiments en sub surface (radiale N)

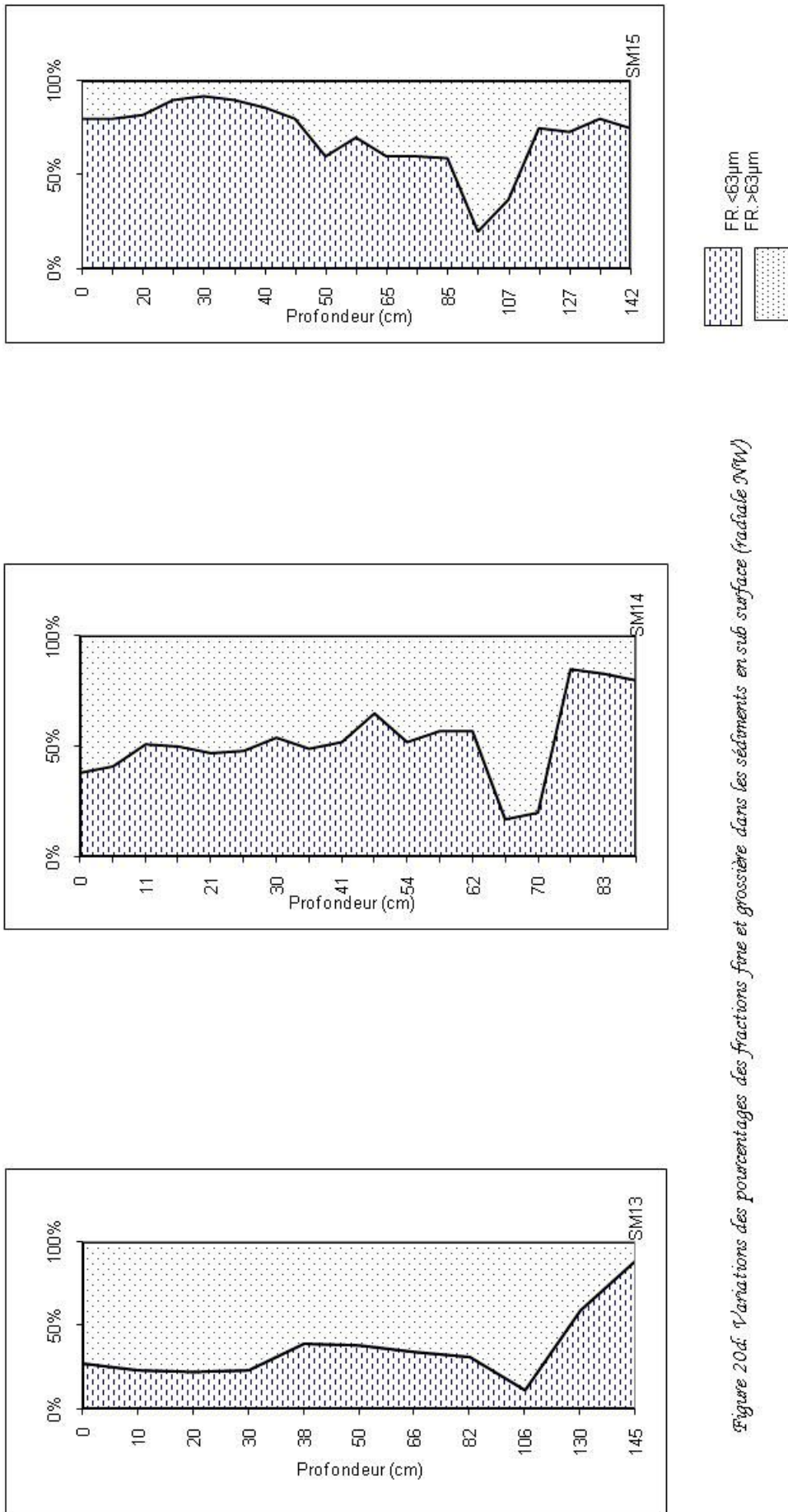
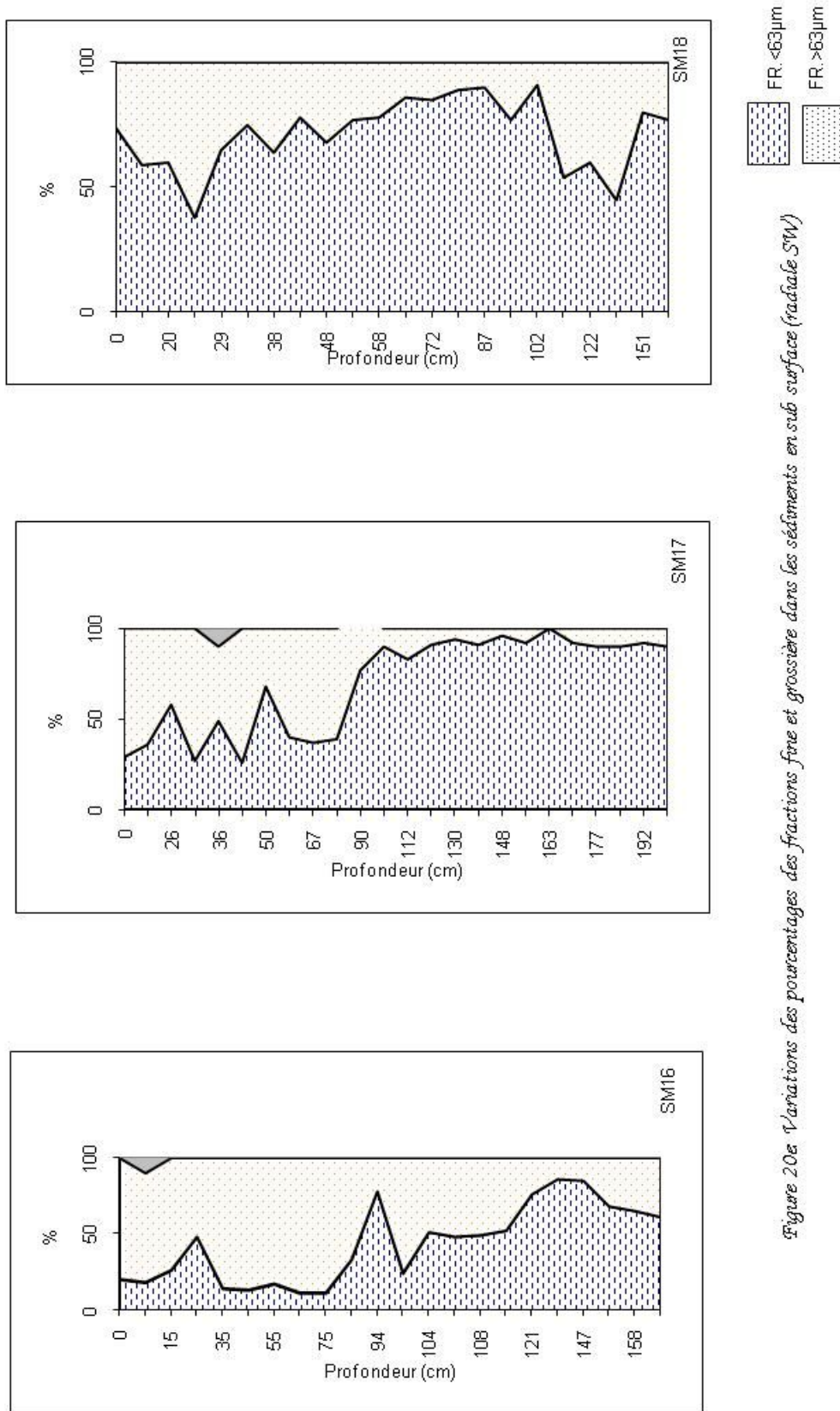


Figure 20d. Variations des pourcentages des fractions fine et grossière dans les sédiments en sub surface (radiale NW)



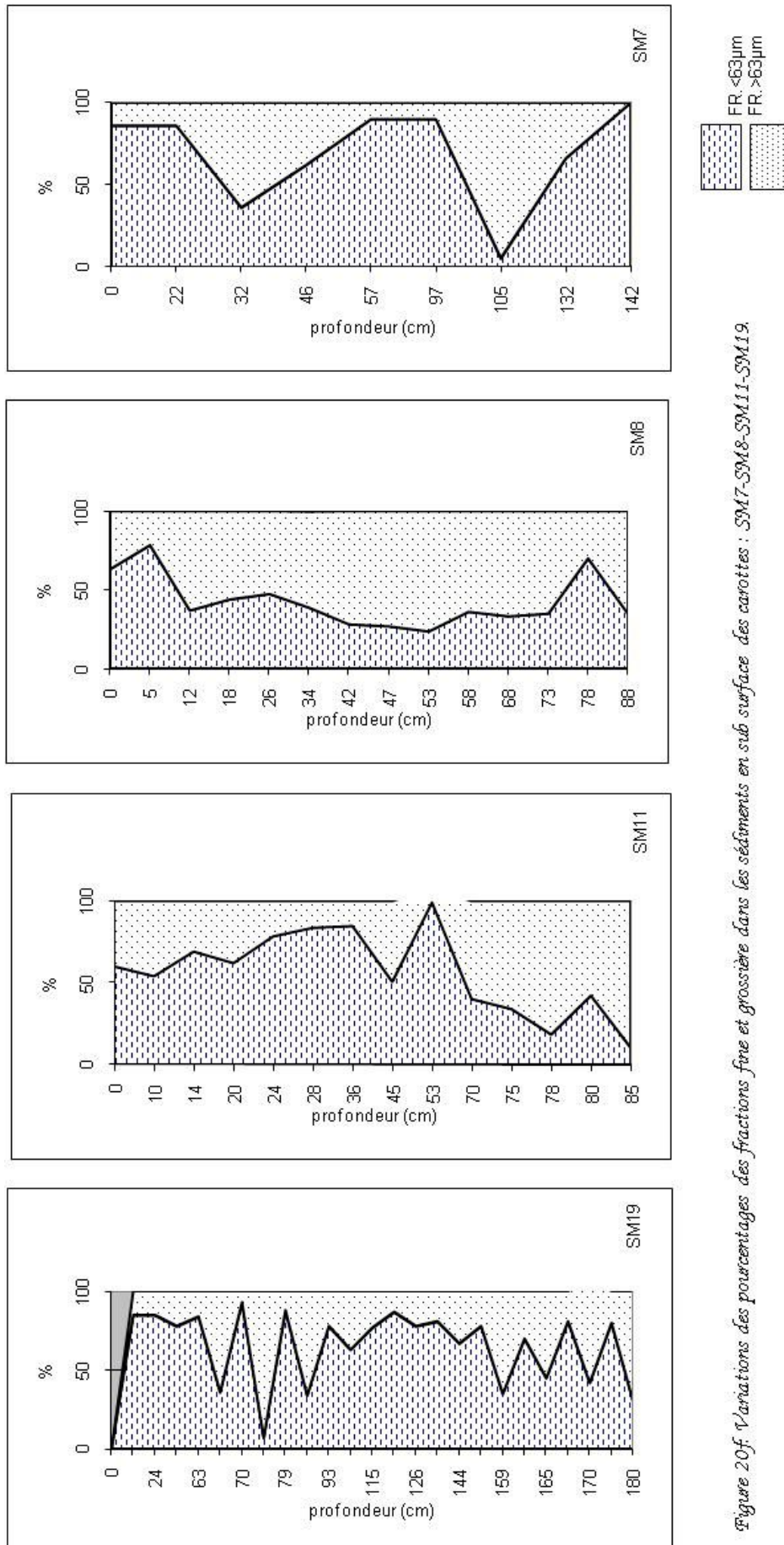


Figure 20f Variations des pourcentages des fractions fine et grossière dans les sédiments en sub surface des carottes : SM7-SM8-SM11-SM19.

II-2- Faciès carbonaté

II-2-1- Carbonates

Les apports sableux actuels se déposent rapidement à la périphérie de la sebkha et aux embouchures des oueds et sont distribués à l'Ouest en une large "plage". Leur fraction fine (<63 μ m) est caractérisée par des teneurs en CaCO₃ relativement faibles (2 à 22%). Dans les sédiments à faciès mixte, les teneurs en carbonate ne dépassent pas 24%. Vers le centre, les quantités de carbonate enregistrées varient de 2 à 20%.

Les sédiments de la partie orientale (tab.6) renferment des teneurs élevées en carbonate allant de 2 à 44%. En effet, sur une profondeur de 53 cm, les teneurs en CaCO₃ vont de 19 à 44 % dans la carotte SM8.

L'évolution verticale en CaCO₃ montre dans toutes les carottes prélevées une diminution vers la profondeur (tab.6).

Latéralement, le taux de carbonates dans les sédiments de surface varie de 6 à 86% (tab.5 et Fig. 21). Les pourcentages les plus élevés ont été relevés dans les sédiments au Nord de la sebkha près de la station d'épuration, à l'Est près de la dalle villafranchienne, et au Sud dans l'oued Rejel Chiba. Tous ces sédiments renfermant des valeurs élevées, sont prélevés à la périphérie. Le taux de carbonate diminue vers le centre.

Le mode de répartition et les quantités des carbonates sont liés à l'origine. Les valeurs relativement faibles dénotent d'une origine chimique et/ou biogénique. Cependant, les taux élevés indiquent l'existence d'un apport exogène. Les eaux de la station d'épuration, et celles prélevées à proximité des sources carbonatées allochtones (dalle villafranchienne) sont chargées en carbonate et jouent un rôle dans l'enrichissement des sédiments en ces minéraux.

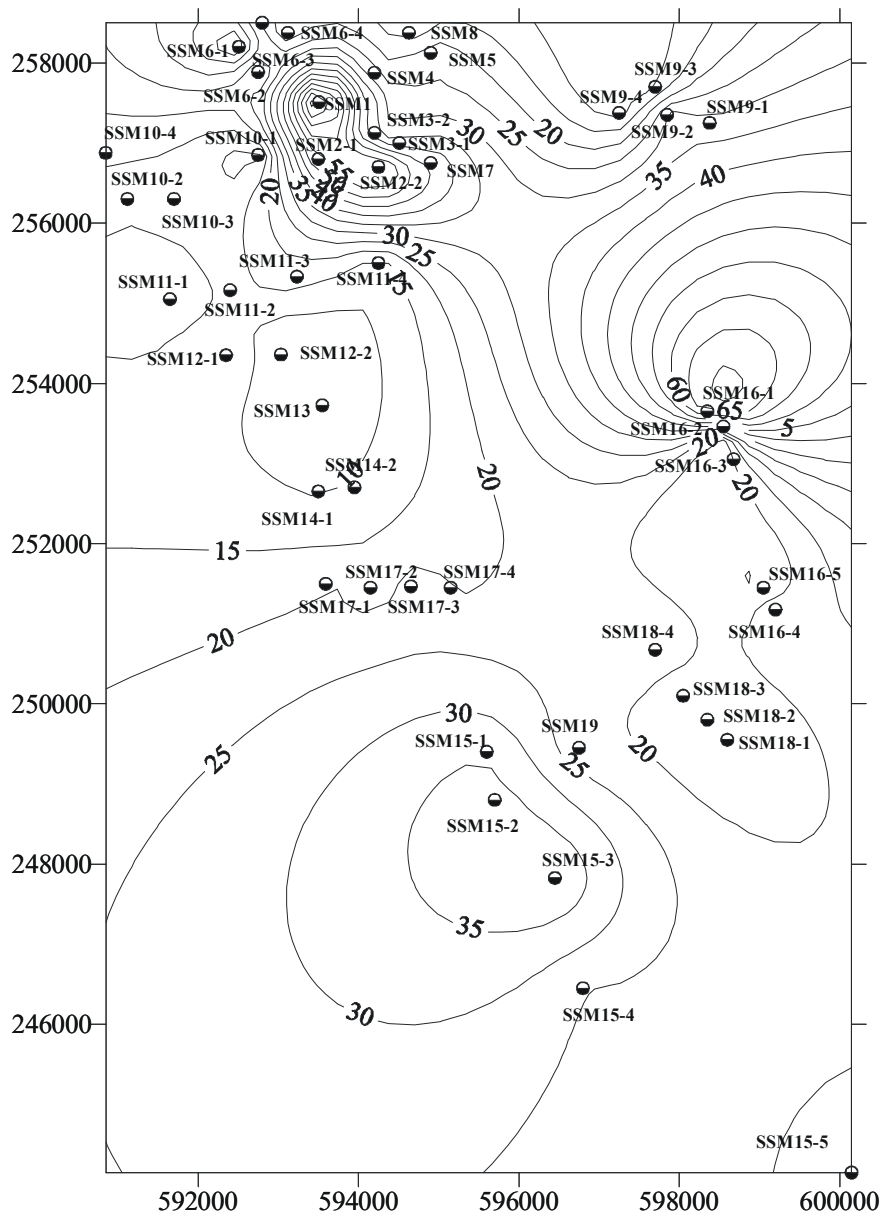


Figure 21 : Répartition latérale des carbonates analysés dans les sédiments de surface de la sebkha de Moknine.

II-2-2- Carbone minéral

Nous avons procédé à l'analyse du carbone minéral à l'aide de deux méthodes : par coulométrie et calcimétrie.

* Coulométrie :

Les valeurs du carbone minéral varient de 0,43 à 8,4% dans les sédiments de surface et de 0,23% à 2,93% dans les carottes (tab.6). Sa répartition est presque homogène, de l'ordre de 1% en moyenne en sub-surface. Il se retrouve essentiellement sous forme de calcite (CaCO_3). Ceci est bien confirmé par l'analyse de la calcimétrie et par la diffractométrie des rayons X.

* Calcimétrie :

Les teneurs en carbone minéral dans les sédiments récents de la sebkha vont de 0,72 à 10,32% (tab. 5) dans les sédiments de surface et 0,12% à 5,28% dans les carottes (tab.6). Les valeurs les plus élevées sont relevées dans la carotte SM8 et dans les sédiments superficiels des autres carottes. L'analyse diffractométrique aux RX des minéraux non argileux montre bien que la calcite des sédiments récents de la sebkha est à l'origine du carbone minéral dosé.

CONCLUSION

L'analyse comparée par calcimétrie et par coulométrie du faciès carbonaté dans les sédiments de surface et des carottes prélevées dans la sebkha de Moknine montre que :

- les résultats obtenus par les deux méthodes sont comparables,
 - latéralement, le taux de CaCO_3 diminue en allant vers le centre,
 - l'évolution verticale montre une diminution de la surface vers la profondeur,
 - le dépôt des carbonates se fait essentiellement par voie chimique et biogénique,
 - la fraction fine est plus riche en carbone minéral qu'en carbone organique. Il s'y présente essentiellement sous forme de calcite.
-

II-3-Analyse granulométrique

Les méthodes de mesure de la granulométrie sont variées (tamisage par voie sèche et analyse automatique au moyen d'un appareil de type Sedigraph). La présentation des résultats se fait par des courbes granulométriques (courbes cumulatives) permettant le calcul des paramètres et des indices granulométriques (Folk et Ward, 1957 ; Rivière, 1977, Chamley, 1988, 2000). Ces derniers donneront une idée sur les conditions de transport, le mode de dépôt des sédiments et permettent de caractériser et de différencier le corps sédimentaire de la sebkha de Moknine.

La distribution des particules dépend de plusieurs facteurs : la taille du matériel, l'origine, les processus hydrodynamiques pendant le transport et le dépôt et les processus diagénétiques qui peuvent agir sur la taille de certaines catégories de particules (Folk, 1980 ; Lewis et *al.*, 1994 ; Cojan et Renard, 1995).

Pour ce faire, nous avons choisi les carottes renfermant les plus fortes proportions de fraction grossière (SM1, SM2, SM4, SM5, SM7, SM8, SM9, SM10, SM11, SM13, SM14, SM16 et SM19), ainsi que les sédiments de surface prélevés à la périphérie. Les résultats sont reportés sur les tableaux 7a et 7b et les figures 22 a, b et c.

II-3-1- Sédiments de surface

Les sables retrouvés sont répartis surtout à la périphérie de la sebkha. L'analyse granulométrique de ces derniers montre qu'ils sont essentiellement fins exceptés en bordure de oued Rejel Chiba et oued Chibat où les sables sont moyens. Le coefficient S_{ki} d'asymétrie calculé varie entre -0.38 à 0.75 et montre une asymétrie ou presque une asymétrie vers les particules fines. Ce résultat prouve la prédominance des particules fines (Lewis et *al.*, 1984 ; Chamley, 2000). Le coefficient d'uniformité (U) est inférieur à 2, indiquant une uniformité de granulométrie. L'indice de classement (σ) montre un classement modéré indiquant un milieu peu agité (Folk, 1980 ; Reineck et *al.*, 1980). En effet, les valeurs sont généralement inférieures à 1. Enfin la médiane (M_d) calculée est faible ($105-500\mu m$) et reflète une diminution d'énergie de transport (tab.7b).

II-3-2- Sédiments des carottes

L'analyse des sables prélevés des carottes exécutées au Nord (SM9 et SM10) et à l'Ouest (SM13, SM14, SM15, SM16, SM17 et SM18) montre qu'ils sont de texture fine à la

périphérie et très fine en zone médiane. Par contre, au Sud (SM19) et tout au long de la partie orientale (SM1, SM2, SM4, SM5 et SM8) ils sont moyens à la périphérie et fins en zone médiane.

Seule la carotte SM19 a donné un horizon (SM19-4) renfermant des sables grossiers et des graviers. Enfin à l'embouchure des oueds [O.Soltane (SM11) et O.Redjel chiba (SM7)] les sables arrivant du bassin versant sont moyens à fins.

Le classement des sables est aussi variable. Les faciès moyens à fins analysés à l'Est sont bien à très bien classés ($0.35 < \sigma < 0.5$) exceptée la carotte SM8 où le classement des sables est modéré ($0.5 < \sigma < 1$).

Au Nord les sables sont modérément à bien classés ; enfin dans la partie occidentale ces derniers sont mal classés ($\sigma > 1$).

L'indice de classement (σ) donne une idée sur le niveau d'énergie du milieu. Ce dernier est un moyen de distinguer les différents états d'énergie dans notre système d'étude. La sebkha est agitée à l'Ouest, peu agitée au Nord et calme à l'Est.

Le coefficient d'asymétrie (S_{ki}) montre que plus les sables sont fins, plus sont abondantes les particules fines. Les sables moyens affiche une asymétrie vers les grossiers.

L'énergie de transport de ces particules dans toute la sebkha est faible ($U < 2$). En effet la sebkha se trouve sous un climat semi-aride où la pluviométrie n'est pas très abondante et l'écoulement de l'eau est modéré. L'agitation du milieu de sédimentation à l'Ouest est due essentiellement à la présence des embouchures des oueds et non aux crues inexistantes.

L'absence de crues est prouvée par d'autres indices, comme la présence d'un niveau grossier et à graviers uniquement dans la carotte SM19. En effet, une crue recouvrirait l'ensemble de la sebkha par un sédiment homogène. Donc une autre source d'apport à proximité de la sebkha est à rechercher.

Les résultats obtenus à partir des diagrammes de Passega des sédiments sableux montrent un seul mode de dépôt et de transport. Ainsi, ces derniers sont transportés par roulement et par suspension gradée (Fig.23 : a-b). Les sédiments récoltés à l'Ouest de la sebkha ont été déposés sur un fond où les courants sont assez rapides, causant ainsi un entraînement de la fraction fine en suspension pour se déposer plus loin.

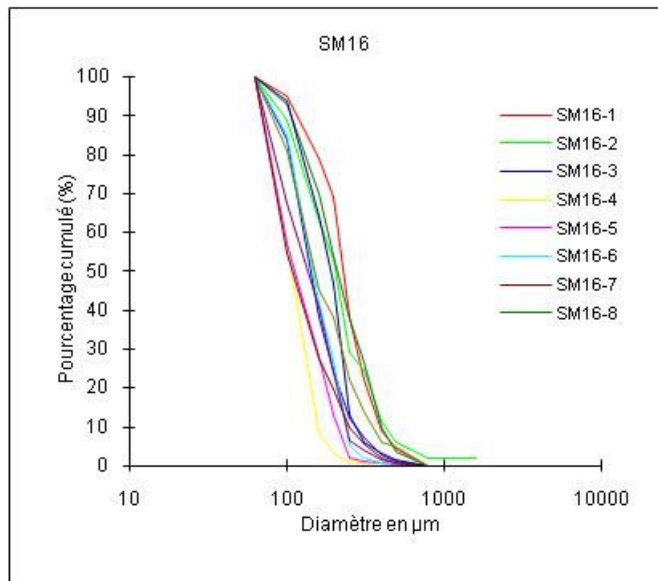
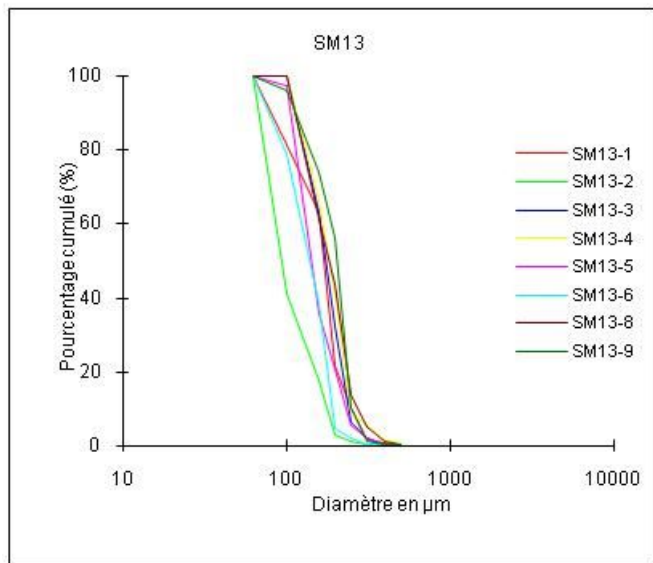
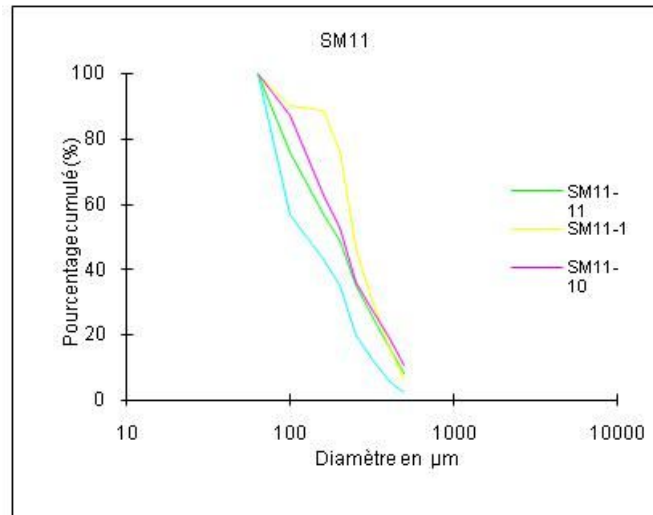


Figure 22 : Courbes cumulatives

CONCLUSION

L'examen et la description lithologique des différents composants des dépôts actuels dans le bassin de Moknine montrent une répartition presque concentrique des faciès sédimentaires ou en auréoles anisopaques.

Les faciès se trouvant dans le bassin de Moknine varient légèrement de l'Est vers l'Ouest. Les sables arrivant du bassin versant vers la sebkha dans sa partie occidentale par le réseau hydrographique très abondant, sont fins à la périphérie et très fins en zone médiane et forment une large « plage » de 1km. Le carottage a montré l'accumulation d'un terme sableux de 1m dans SM13 et SM16. Ils sont moyens à fins ailleurs là où le réseau hydrographique est très peu abondant. Les bordures Nord-Est et Sud-Est sont alimentées par les oueds : O.Chibat à l'Est, O.Soltane au Nord et O.Redjel Chiba au Sud. En effet, la topographie de la sebkha favorise un écoulement en direction de l'Est.

Sur le côté oriental, l'étendue de la frange sableuse se réduit à quelques mètres. Dans la zone sud-est (SM4) les sables semblent provenir de l'oued Chibat et de l'érosion des sols villafranchiens. Cependant les dépôts sableux de la partie nord-est (SM1) résultent essentiellement de l'érosion de ces sols en raison de la topographie légèrement plus haute de cette zone.

Les courbes cumulatives obtenues par analyse des faciès sableux périphériques superficiels et sub-superficiels, ceux trouvés dans les carottes en position médiane ont une forme généralement parabolique à pente forte (Fig. 22 : a, b et c).

C'est la forme théorique correspondant à l'immobilisation globale par diminution de la capacité de transport. Cette dernière est liée à une diminution de la vitesse du courant du matériel transporté à proximité du fond à l'état de "suspension gradée" au sens de Passega.

Certains horizons (SM8-4 et SM10-3) renferment des faciès paraboliques présentant une fraction fine excédentaire de caractère hyperbolique.

A l'embouchure de l'oued Soltane (SM11) et l'oued Redjel Chiba (SM7) et dans certains échantillons de SM13, le faciès sableux est caractérisé par des courbes cumulatives sublogarithmiques (Fig : 22b et 22c) typiques des cours inférieurs, des embouchures, des lagunes et des vases littorales dans les zones protégées.

Enfin le faciès plurimodal retrouvé dans les échantillons (SM1-8, SM1-10, SM4-7, SM4-8, SM4-10, , SM15-9, SM16-2, SM16-7, SM17-6 et SM19) correspond aux mélanges de stocks différents s'exprimant parfois sous forme de faciès à "turbidités" continentales (Rivière et *al.*, 1977).

Le transport de la fraction sableuse dans le bassin de Moknine s'est fait par roulement et par suspension gradée à la périphérie alors qu'en zone médiane et dans l'embouchure de O. Rejel Chiba, il s'est fait par suspension gradée suivie d'un roulement.



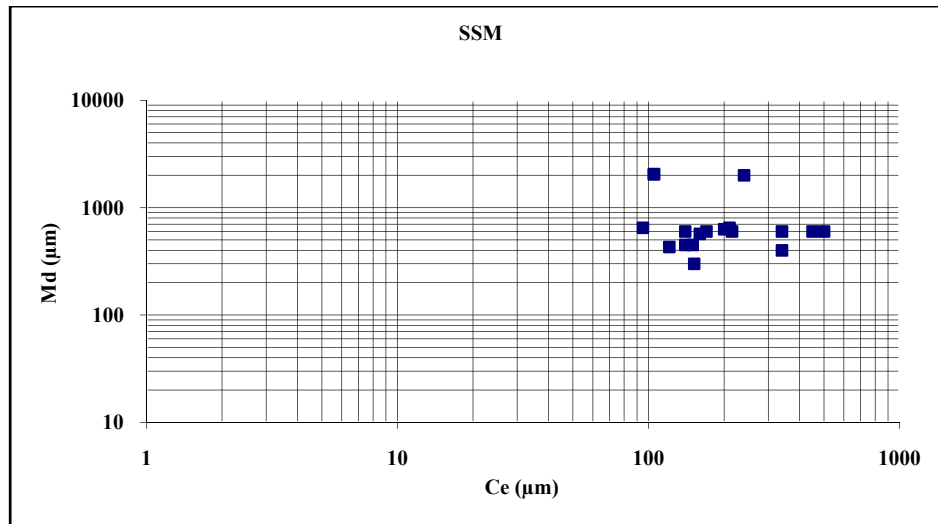


Figure 23 a : Diagramme de Passega (sédiment de surface).

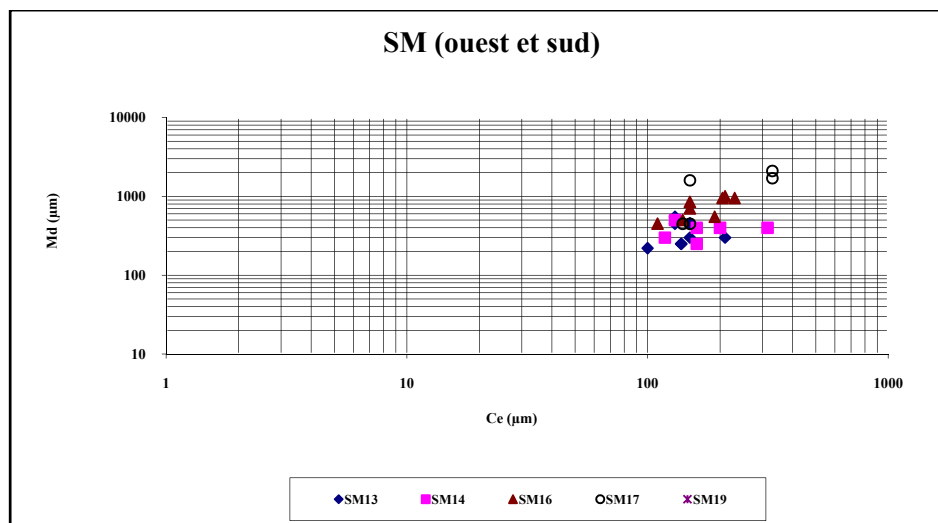
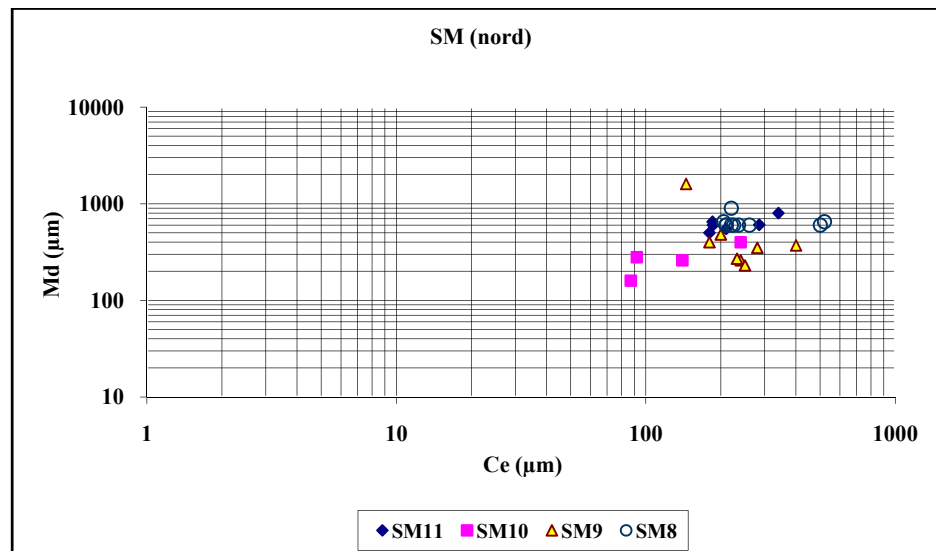


Figure 23 b : Diagramme de Passega (sédiment des carottes)

II-4- Microgranulométrie

Dans tous ses travaux sur l'évolution des sédiments, Rivière et *al.*, (1977) ont utilisé des courbes cumulatives semi-logarithmiques. La méthode mise au point par ces auteurs s'applique principalement aux sédiments fins dont la granulométrie est faiblement influencée par les phénomènes de dispersion.

Les échantillons de surface et de subsurface dont la fraction fine est assez élevée (plus de 30%) ont fait l'objet d'une étude microgranulométrique à l'aide du Sédigraph.

Cette analyse est menée dans le but de compléter l'analyse granulométrique de la fraction grossière, et ce afin de mieux caractériser et même comprendre le mode de transport et de sédimentation dans la sebkha de Moknine. Outre le pourcentage de la fraction fine dans chaque échantillon, l'étude des courbes microgranulométriques a permis l'identification des trois types de faciès (Fig. 24 : a, b, c et d - tab.5a et 5b.) : parabolique, hyperbolique et logarithmique.

II-4-1- Sédiments de surface

- Faciès hyperbolique

Ce faciès caractérise la majorité des sédiments de surface prélevés dans la sebkha de Moknine. Il s'agit donc d'une sédimentation par décantation de matériel apporté par les courants en "suspension uniforme".

- Faciès parabolique

Ce faciès caractérise les échantillons SSM14-2 et SSM2. Le faciès parabolique correspond à des dépôts de courant de toute nature mais souvent rapides. La rareté des crues ou leur caractère occasionnel dans la région du Sahel appuie de ce fait l'idée d'un dépôt par décantation.

- Faciès logarithmique

Le faciès logarithmique ou sublogarithmique représente l'ultime évolution des sédiments transportés par les courants et déposés par excès de charge. Ce faciès caractérise les

échantillons SSM5-2, SSM13, SSM6-2 et SSM6-1. Il est marqué par un indice dynamique nul.

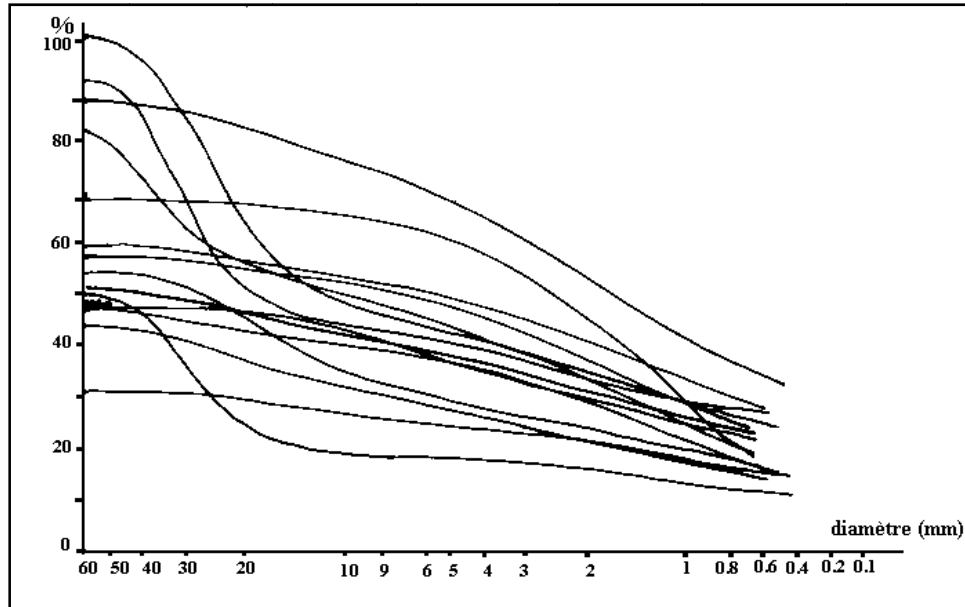


Figure 24a : courbes microgranulométriques des sédiments de surface.

II-4-2- Sédiments des carottes

- Faciès hyperbolique

Ce faciès caractérise les sédiments en sub-surface à l'Est (SM2, SM3, SM5, SM6), au Sud (SM7, SM19) et au Nord dans les carottes (SM9 et SM10). Il est aussi détecté dans quelques horizons des carottes localisées à l'Ouest. Il s'agit donc d'une sédimentation par décantation d'un matériel apporté par les courants en "suspension uniforme".

- Faciès parabolique

Il est mis en évidence plus au Nord dans les carottes SM12 et SM11 et dans la radiale NW (SM13, SM14 et SM15). Il reflète des courants de toute nature mais souvent rapides.

- Faciès logarithmique

Caractérisé par un indice dynamique légèrement positif ou nul, ce dernier est le symbole d'une sédimentation du matériel apporté par excès de charge. Il a été détecté dans tous les horizons de la carotte SM8 et dans les horizons des carottes exécutées au NW et au SW.

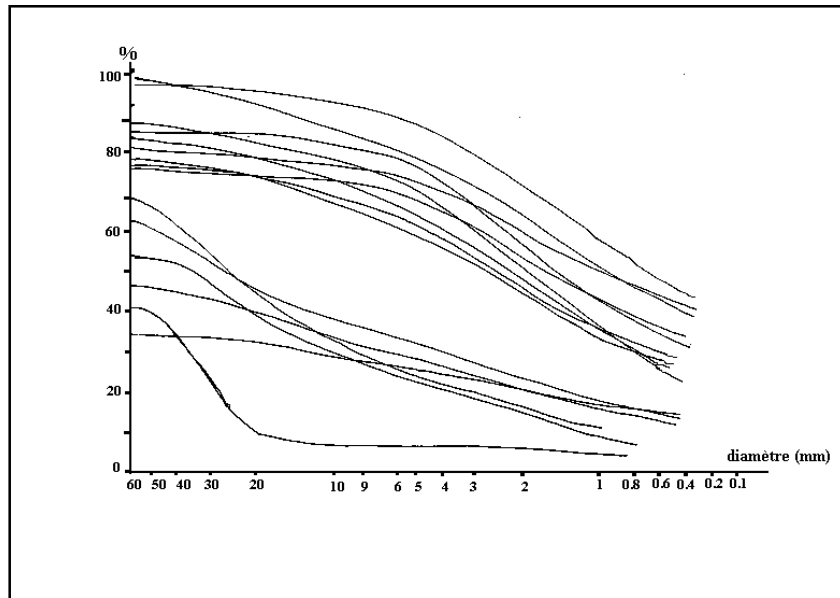


Figure 24 b : courbes microgranulométriques des sédiments en subsurface de la partie orientale de la sebkha.

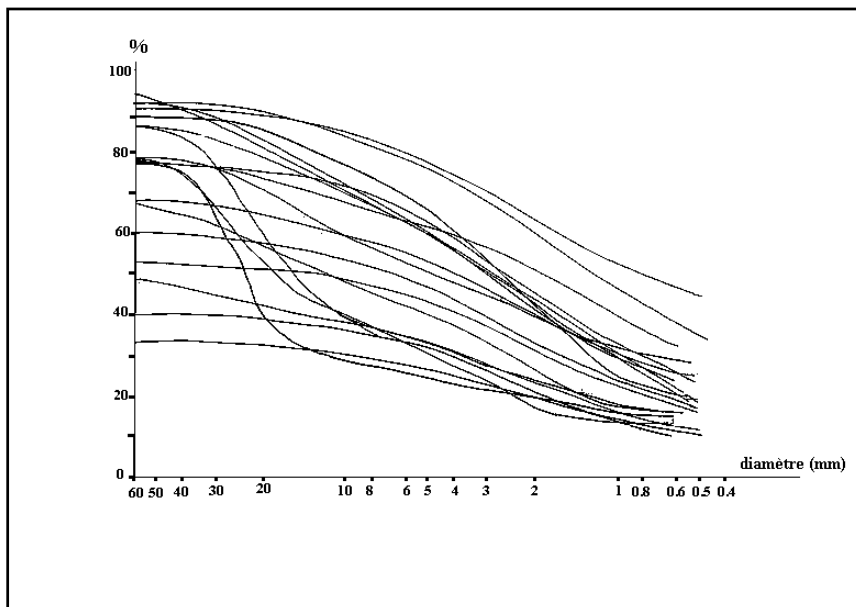


Figure 24c : courbes microgranulométriques des sédiments en subsurface de la partie ouest de la sebkha.

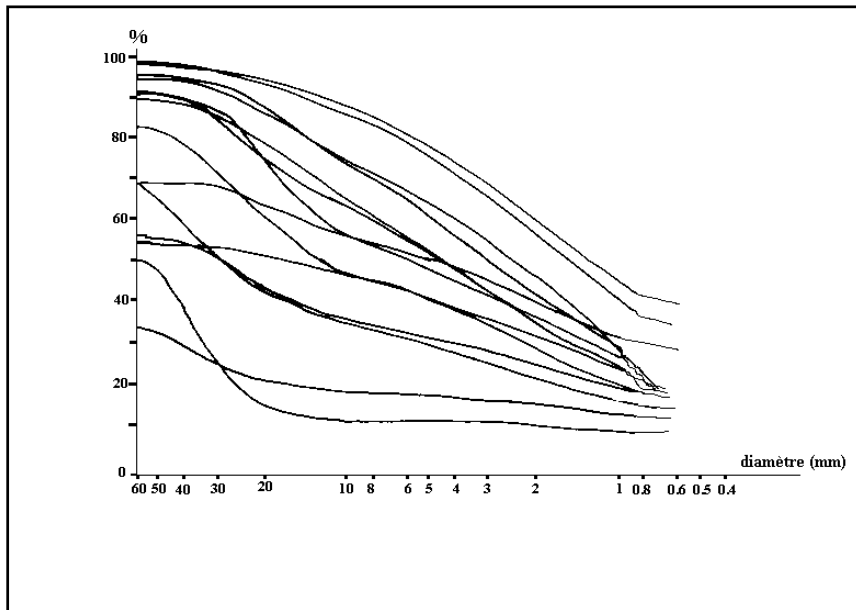


Figure 24 d : courbes microgranulométriques des sédiments en subsurface de la partie nord de la sebkha.

CONCLUSION

L'examen des courbes microgranulométriques a permis de montrer que le matériel apporté à la sebkha par les courants suit trois modes de transport et de dépôt.

Nous avons parfois identifié dans un même profil lithologique, deux ou trois modes de transport ; mais dans certains cas, un seul caractérise les horizons déposés.

La diversité de modes de transport reflète le changement de type de dépôt dans la sebkha.

En effet, si les courants sont rapides le matériel détritique fin se dépose par excès de charge d'où le faciès logarithmique. Ce dernier est détecté dans la zone ouest (NW et SW) où le réseau hydrographique est très important.

En l'absence de phénomènes exceptionnels, une "suspension uniforme" se dépose dans la sebkha par simple décantation caractérisée par le faciès hyperbolique. Ce dernier a été obtenu essentiellement dans les sédiments à l'Est, au Sud et au Nord du bassin.

Enfin le faciès parabolique englobe tous les types de dépôts. Dans le système de Moknine il caractérise une simple décantation vers le centre et un dépôt de courant rapide à la périphérie au NW et à l'embouchure de O.Soltane.

L'indice I_D est variable. Les valeurs négatives ou nulles à l'Est, au Nord et dans certains horizons des radiales NW et SW traduisent un milieu calme de faible énergie. Cependant, les valeurs positives calculées dans les échantillons collectés à l'Ouest, traduisent un milieu de forte énergie.

La sédimentation dans la sebkha de Moknine montre une variation dans les dépôts de surface et de subsurface que l'on peut expliquer par :

- une concentration des cours d'eau préférentiellement dans la partie occidentale,
 - une variation dans la topographie de la bordure,
 - et enfin, une variation dans le degré d'énergie des eaux.
-

II- COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

Tableau 2 : Principaux minéraux des sédiments lacustres (Meybeck,1995)

Minéraux allochtones		Minéraux autochtones		
Apports éoliens	Erosion Du bassin versant	Endogènes non Evaporitique	Evaporitiques	Authigènes
QUARTZ KAOLINITE Gypse Calcite	ILLITE SMECTITE KAOLINITE QUARTZ CALCITE FELDESPATH Amphibole pyroxène Dolomite mica Goethite, magnétite Apatite	OPALE CALCITE	Calcite Calcite Mg GYPSE HALITE Silicates magnésiens Fluorures Bromures Natron trona	GOETHITE Sidérite Dolomite Calcite Mg

III-1- Les minéraux non argileux

Les analyses minéralogiques déduites de la diffraction des RX effectuées sur les poudres des échantillons bruts ont permis d'identifier les principaux minéraux présents dans la sebkha. Six minéraux ont été déterminés ; se sont par ordre d'abondance : le quartz, la halite, la calcite, le gypse, les feldspaths et la dolomite (Fig.25).

Les pourcentages semi-quantitatifs déterminés à partir des différents diffractogrammes sont portés dans le tableau 8.

Photo 1 : (Q) : Cristaux de quartz sub angulaire, (o) : graine d'olive (G) : Coquille de gastéropode (partie ouest).

Photo 2 : (GY) : Cristaux de gypse, (CG) : concrétion gypseuse- (sable très fin échantillonné au sud de la sebkha de Moknine).

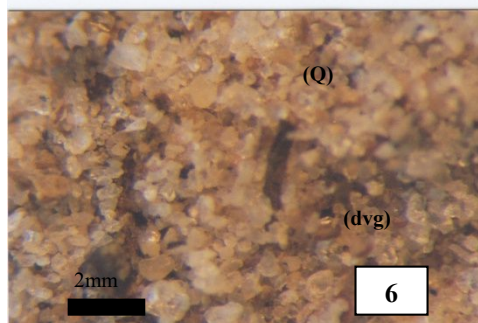
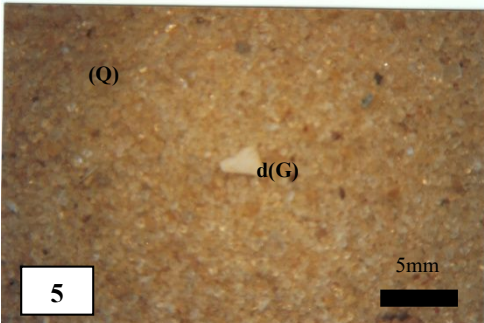
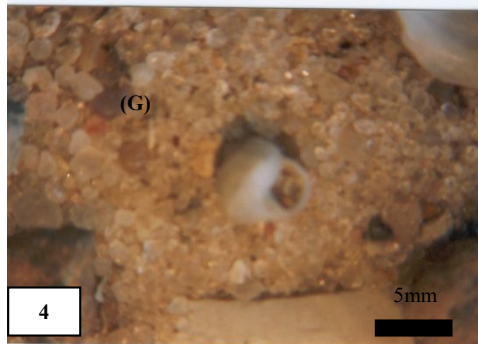
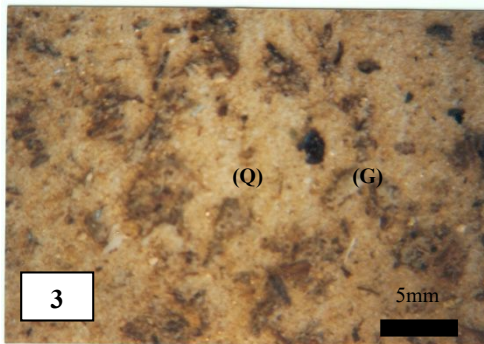
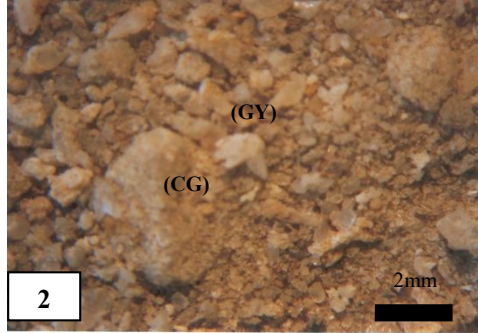
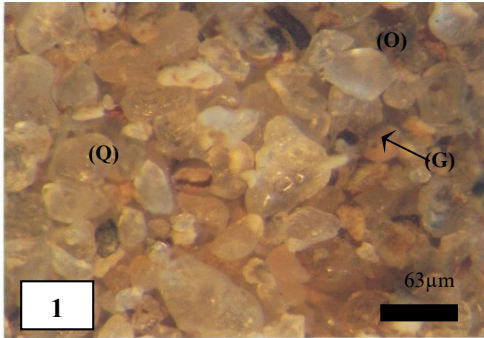
Photo 3 : Cristaux de quartz très fin (Q), avec abondance de débris de végétaux fin à moyen (mm à cm)- (sable fin prélevé à l'Ouest de la sebkha de Moknine),.

Photo 4 : (G) : Coquille entière de gastéropode, (Q): Cristaux de Quartz, (dg) : débris de coquille.

Photo 5 : Cristaux de quartz fins et débris de coquille (d(G)), sable très fin.

Photo 6 : (Q) : grains de quartz (sable fin) , (dvg) : débris de végétaux

Planche 4



III-1-1- Quartz

Le quartz est présent partout aussi bien en surface qu'en subsurface depuis les zones de bordures jusqu'aux parties les plus internes. Les variations vont de 16 à 97% dans les sédiments de subsurface et de 3 à 89% dans les sédiments de surface. Les valeurs les plus fortes se trouvent sur la bordure et essentiellement du côté ouest (Planche 4-5). En effet les sédiments de ce côté sont essentiellement sableux et limono-sableux comme on l'a vu précédemment.

Ce résultat confirme le rôle des oueds dans l'apport des matériaux détritiques terrigènes. Une évolution aussi bien verticale que latérale des pourcentages en quartz est remarquée dans la colonne sédimentaire. Ces pourcentages augmentent systématiquement, du bas vers le haut dans chacune des carottes (tab.10).

Latéralement, une diminution de la fraction quartzeuse est distinguée de la périphérie vers l'intérieur de la sebkha.

III-1-2- Feldspaths

Il est très accessoire dans l'ensemble des échantillons. Le pourcentage varie de 0 à 5% dans les sédiments de surface et 1 à 26% dans les carottes (tab.8). Sa distribution est indépendante de celle du quartz. En effet, la valeur la plus élevée (26%) relevé dans l'horizon SM10-11 ne correspond pas au taux de silice les plus élevés. L'origine des feldspaths est détritique continentale.

III-1-3- Carbonates

* Calcite :

Le pourcentage en calcite varie de 1 à 33% dans les carottes et de 2 à 38% dans les sédiments de surface. Les pourcentages les plus faibles sont remarqués à la périphérie et dans la radiale NW (SM13, SM14 et SM15). Cependant les valeurs les plus élevées sont notées dans les carottes SM9 (près de la station d'épuration), SM12 (sur la même radiale que SM9 mais en direction du centre) et SM8 (près de la dalle villafranchienne). De fortes teneurs caractérisent également les sédiments de surface prélevés à la sortie de la station d'épuration (SSM1 et SSM2) et dans le lit algaire (SSM3 et SSM4). L'origine de la calcite peut être mixte (authigène et terrigène).

Photo 1 : Cristaux de gypse (C) lenticulaire avec des taches de matière organique mal décomposé et des cristaux de rose de gypse (bordure nord-est)

Photo 2 : Cristaux de forme et de taille variable, arrondis, translucides, imprégnés aussi de taches de matière organique (bordure sud-est)

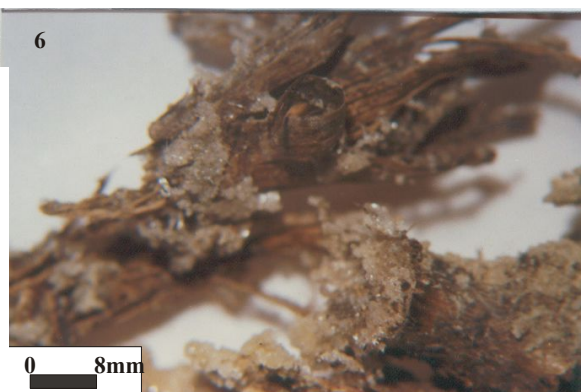
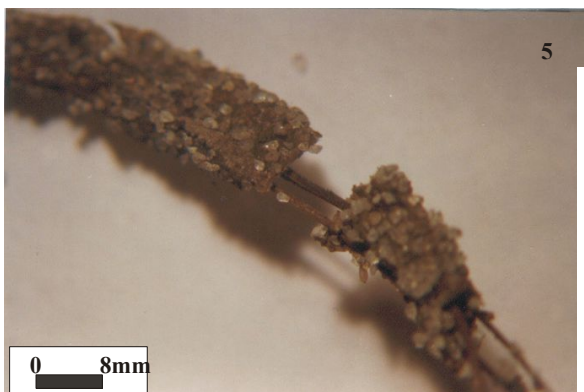
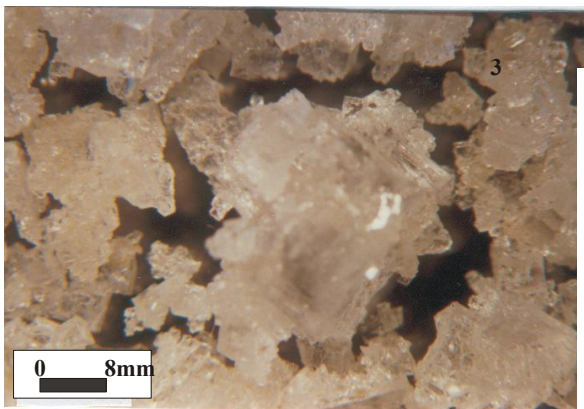
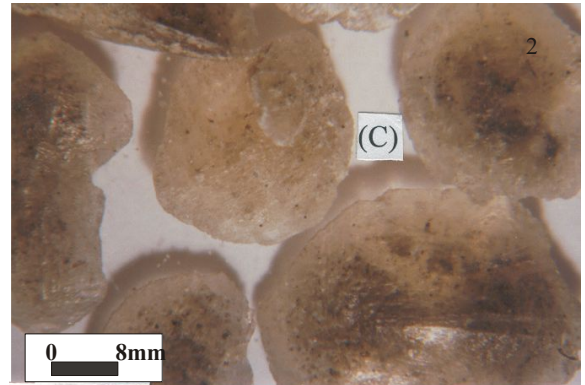
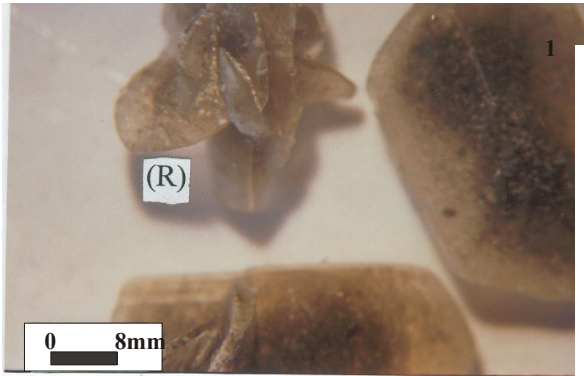
Photo 3 : Cristaux de Halite de taille et de forme variable (centre de la sebkha)

Photo 4 : Macrocristaux de Halite cubique transparents (centre de la sebkha-partie est)

Photo 4 : Grains de quartz fixé sur des racines mortes (bordure nord)

Photo 5 : Fixation de grains de quartz sur des débris de végétaux mal décomposés (bordure est de la sebkha)

Planche 5



***Dolomite :**

Ce minéral est détecté uniquement dans les sédiments des carottes SM10, SM11 et SM12 (tab.8). Le pourcentage en dolomite varie de 0 à 8% dans ces sédiments. Il ne peut être que d'origine terrigène comme le montre l'examen microscopique.

III-1-4- Evaporites

***Gypse :**

Le gypse prend naissance dans les sédiments du bassin. Nous n'avons pas relevé la présence de croûte gypseuse. Il est absent sur les rivages NW et NE , peu abondant au SW et au N, abondant à l'Est. Les teneurs variant de 1 à 24% à l'Ouest et de 6 à 28% à l'Est. Des cristaux de gypse et de roses de sable se forment (planche 5) dans les sédiments sub-superficiels sur la bordure orientale. Dans les sédiments de surface, ce minéral ne dépasse pas 29%. Le gypse analysé dans le bassin de Moknine est d'origine authigène.

*** Halite :**

Lors d'une évaporation complète, on assiste à la production des minéraux chlorurés telle que la halite (planche 5).

Ce minéral constitue une partie importante du sédiment brut de surface vers le centre et des sédiments superficiels des carottes en position interne (SM3, SM6, SM12, SM15 et SM18) où le pourcentage s'échelonne entre 10 et 64%. Cette valeur ne dépasse pas 11% à la périphérie. Enfin dans les carottes en position médiane, les teneurs élevées se trouvent à la surface de la colonne (tab.8).

Latéralement, le taux de sel varie de 2 à 86% (tab.8) avec une augmentation de la teneur, de la périphérie vers l'intérieur.

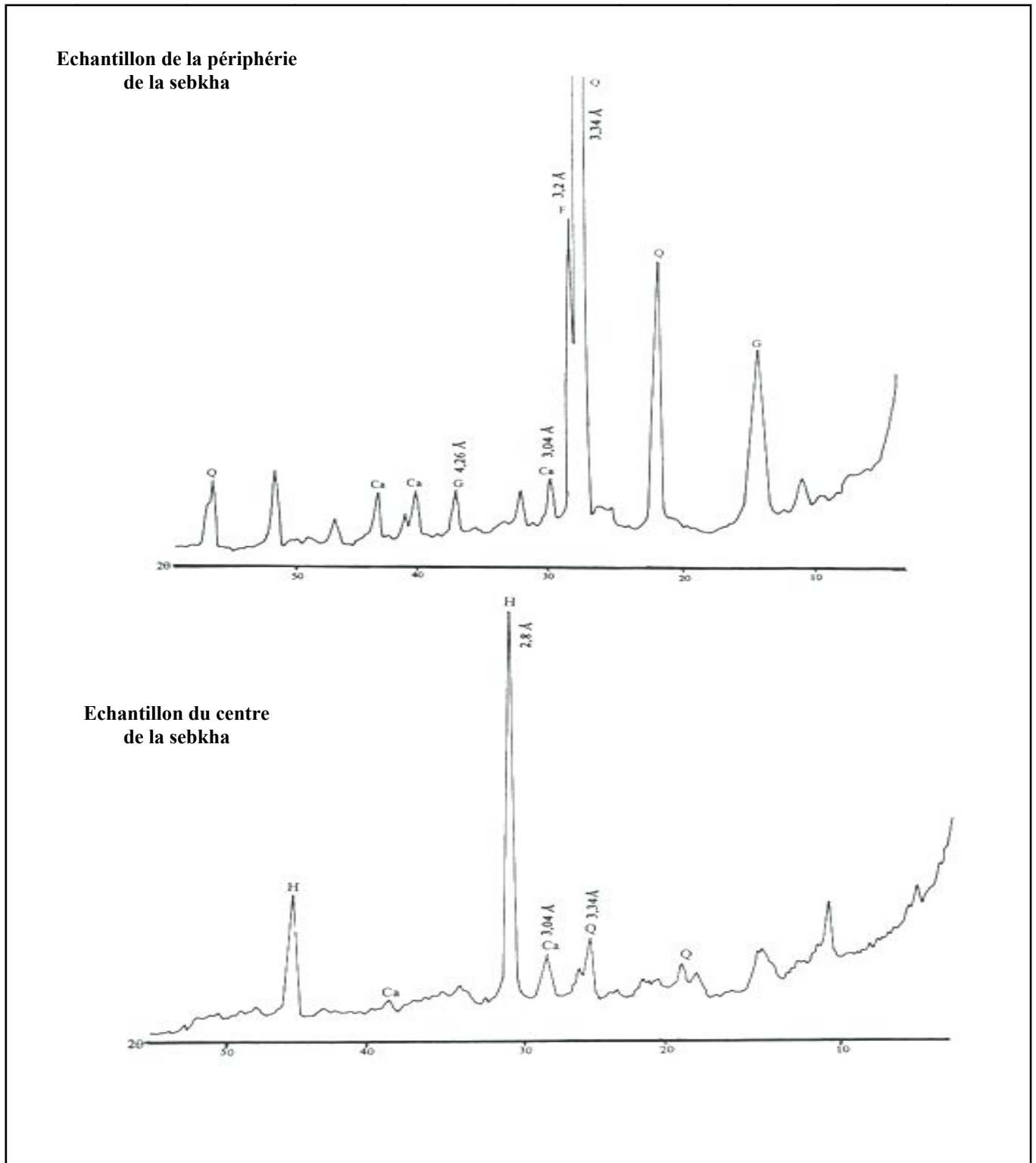


Figure 25 : Diffractogramme des RX des minéraux non argileux présents dans la sebkha de Moknine.

(G : gypse, Ca : calcite, Q : quartz, H : halite et F : feldspaths)

CONCLUSION

La diffractométrie a confirmé la prépondérance de la silice en bordure du bassin. Ce qui confirme les descriptions lithologiques avec un faciès essentiellement sableux à la périphérie. Les feldspaths sont présents mais généralement en très faibles teneurs. L'absence de corrélation positive entre ces minéraux et le quartz plaide en faveur de sources d'apport multiples.

Les évaporites analysées dans la sebkha de Moknine sont formées de gypse et de halite. Ils sont authigènes et se présentent en proportions importantes.

Le domaine de distribution de la halite est distinct de celui du gypse. Les résultats de la diffractométrie X ne permettent pas d'expliquer cela.

Par ailleurs, la teneur de la halite diminue de la surface vers le fond. Cette diminution peut être interprétée de deux manières :

- Soit la concentration des eaux n'était pas importante pour autoriser la précipitation de cet halogénure,
- ou bien qu'une dissolution ultérieure ne soit à l'origine de taux peu élevé en ce minéral.

Les valeurs élevées à la base des carottes périphériques peuvent être expliquées par une remontée des eaux chargées en sel.

Le gypse se présente en cristaux. Il prend naissance dans les sédiments et correspond à une diagenèse tardive et non à une précipitation chimique comme le cas de la halite. L'absence d'une croûte gypseuse confirme cette idée.

Les carbonates analysés dans la sebkha ont montré une abondance de la calcite par rapport à la dolomite. Ce dernier est probablement d'origine terrigène. Cependant la calcite a plusieurs origines :

- La première origine est terrigène ; ce sont des fragments de calcaires provenant de l'érosion, apportés par voies éolienne et aquatique.
- La deuxième est chimique comme le cas des systèmes du Sud–Est de la Tunisie (Ben Aissa, 1988 et Lakhdar, 1987) et du Sahel de la Tunisie (Tagorti, 1990). En effet dans les lacs salés la précipitation des sels commence généralement par CaCO_3 .
- La troisième est biogénique, les sédiments de la sebkha renferme des débris de coquilles des gastéropodes actuels terrestres (Planche 4).

III-2- LES MINERAUX ARGILEUX

Le bassin versant détermine le mode de répartition des minéraux argileux dans les systèmes aquatiques (Trauth, 1977 ; Naidu et *al.*, 1995). Ces particules très fines ont une taille inférieure à 2 μ m et sont déposées généralement par une suspension gradée dans les bassins d'accumulation. Dans la littérature, l'origine des argiles se limite à trois sources : l'héritage, la transformation et la néogénèse (Brown, 1961 ; Caillère et Hénin, 1963 ; Millot, 1964 ; Grim, 1968 ; Caillère et *al.*, 1982). Dans la sebkha de Moknine les argiles accumulées sont d'origine détritique. Elles proviennent du bassin versant et des formations environnantes.

L'examen des diffractogrammes des RX (Fig.26) révèle l'existence des trois minéraux : kaolinite, illite et smectite toujours présents ensemble mais à des taux variables. L'allure des spectres de diffraction montre une bonne cristallinité de la kaolinite et de la smectite dans la plupart des échantillons ce qui prouve que ces argiles sont en équilibre dans le milieu interstitiel.

Sur les diffractogrammes sans traitement les réflexions principales apparaissent à : 7,2 Å la kaolinite, à 10-10,2 Å pour l'illite et la smectite à environ 15,5 Å. Seul le pic de l'illite ne varie pas avec les différents traitements.

Les quantités relatives des différentes argiles estimées à partir des pics principaux des différents minéraux figurent dans le tableau 9 et se résume ainsi :

		<i>Kaolinite</i>	<i>Illite</i>	<i>Smectite</i>
Bordures :	<i>Nord</i>	5% - 20%	11%-38%	45%-74%
	<i>Orientale</i>	15%-47%	18%-49%	29%-47%
	<i>Occidentale</i>	6% - 27%	21%- 38%	51%-72%
Zone intermédiaire		5% - 33%	16%-51%	29%-67%
Centre		4% - 15%	19%-35%	57%-76%

Dans les sédiments de surface, la kaolinite varie entre 13 et 45%, l'illite oscille entre de 18 à 44% et la smectite entre 11 et 63% (tab.9, Fig.27a).

L'analyse de ces résultats permet de montrer la répartition suivante.

III-2-1-Kaolinite

Généralement, il est convenu de considérer que c'est un minéral d'origine détritique héritée. La kaolinite se qualifie de minéral résistant à l'altération (Millot, 1964 ; Chamley 1989 ; Hambrey et *al.*, 1991 et Ehrman 1991). Sa structure autorise difficilement les substitutions dans les tétraèdres et les octaèdres. Sa bonne cristallinité est mise en évidence par la forme aigue des pics obtenus par diffractométrie X (Fig.26).

Elle se trouve à tous les niveaux dans les horizons de sub-surface et les sédiments de surface ; mais elle est plus abondante dans la partie orientale où les quantités arrivent à 47%. Au Nord et à l'Ouest, la kaolinite est moins abondante. Les apports des argiles sont différents dans la sebkha mais les fortes concentrations (47%) sont toujours associées aux faciès grossiers ou mixtes, riches en quartz détritique. La kaolinite est toujours accompagnée de smectite et d'illite (Fig 27 :a,b). Les taux diminuent vers le centre de la sebkha.

III-2-2-Illite

Elle est présente dans tous les horizons à différentes proportions. L'analyse des diffractogrammes de RX (Fig.26) indique une bonne cristallinité de ce minéral (Grim ; 1968 ; Caillère et Hénin, 1963 ; Caillère et *al.*, 1982) dans les échantillons prélevés à l'Est. Cependant à l'Ouest, la mauvaise cristallinité est associée à la présence d'une illite dégradée. Cette différence de cristallisation est probablement en étroite relation avec la source d'apport. Les teneurs en illite ont tendance à décroître de la bordure vers le centre. L'enrichissement en illite et accompagné d'un appauvrissement en smectite.

III-2-3-Smectite

La smectite est une argile susceptible de se former aux dépens d'autres minéraux phylliteux dans des milieux bien particuliers (Millot, 1964 ; Chamley, 1989), bien qu'elle puisse être authigène dans certains milieux diagénétiques ou issues de remplacement dans d'autres milieux (Caillère et *al.*, 1982).

Elle apparaît dans tous les diffractogrammes d'une manière constante et avec la même position angulaire. Comme pour la kaolinite et l'illite, la smectite n'apparaît jamais seule aussi bien à la surface qu'en profondeur. Elle se trouve toujours associée à ces deux minéraux dans la sebkha, ce qui permet de constater qu'elles ont toutes les trois une même origine détritique.

La smectite se répartit dans toute la sebkha, mais les pourcentages les plus élevés sont mesurés à l'Ouest (63%). Son importance relative diminue dans la partie orientale. La variation des taux entre les zones occidentale et orientale est liée à la nature des apports différents.

Les phyllites déposés vers l'intérieur de la sebkha sont essentiellement smectitiques. La smectite a tendance de se déposer plus vers l'intérieur du bassin (Fig.27 : a,b).

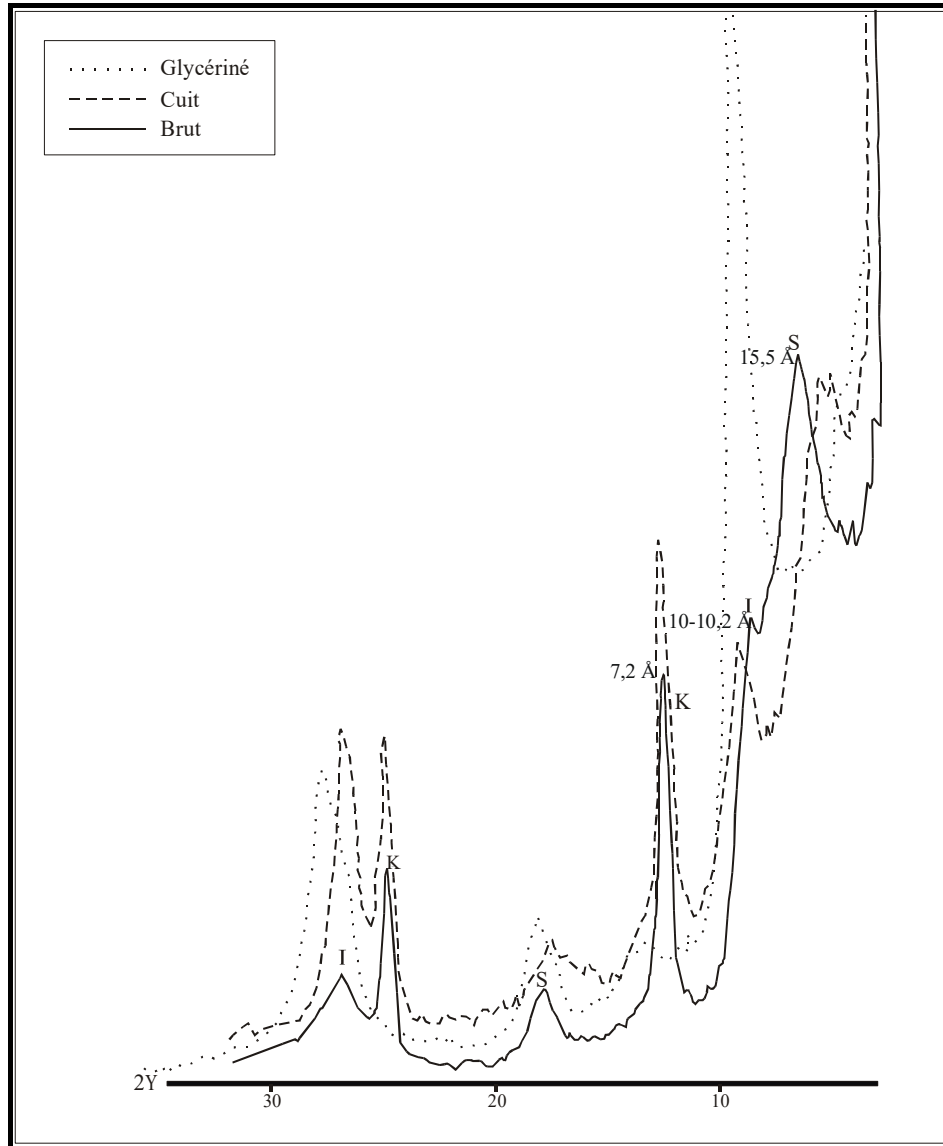


Figure 26 : Diffractogramme des RX des minéraux argileux déterminés dans la sebkha de Moknine.

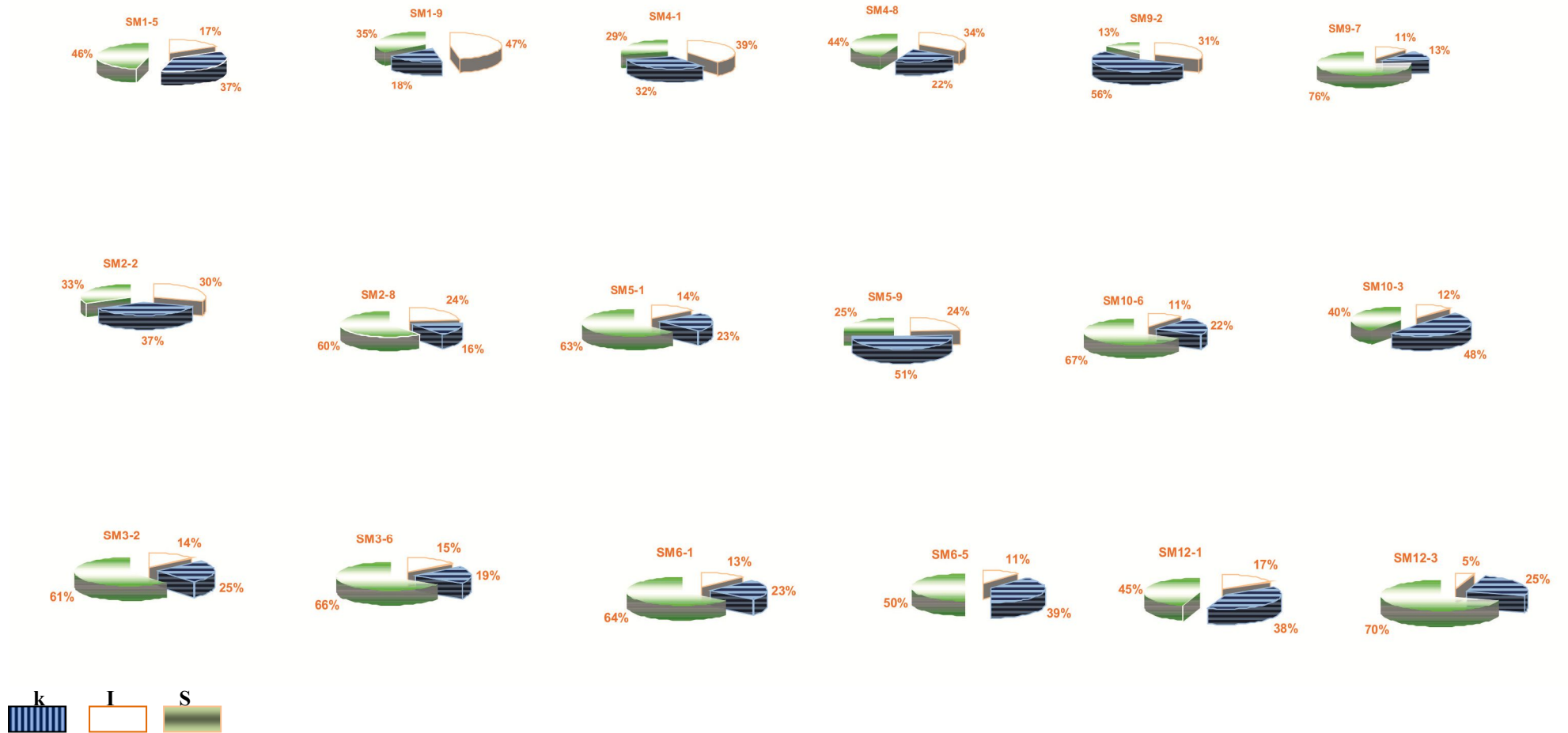


Figure 27 a: *Pourcentage des agriles dans les sédiments de surface*

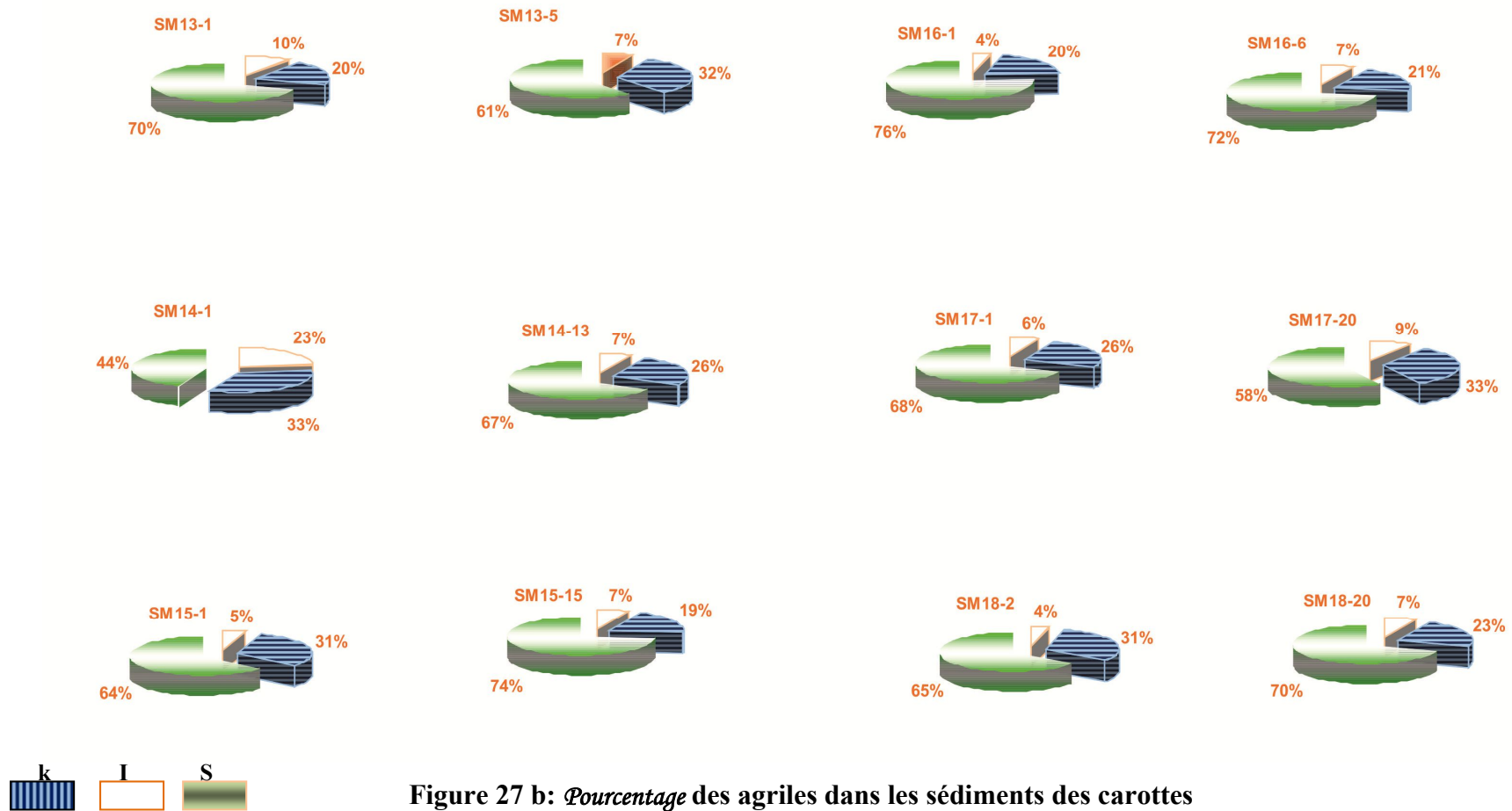


Figure 27 b: Pourcentage des agriles dans les sédiments des carottes

CONCLUSION

Les argiles déposées dans la sebkha de Moknine sont représentées par la kaolinite, l'illite et la smectite.

Les pourcentages respectifs de ces trois argiles montrent un gradient de concentration. Ces phyllites se trouvent toujours associées mais avec différentes proportions créant ainsi une zonation dans ce système évaporitique qui dépend de la nature des apports, des conditions de dépôt et de l'influence du milieu sur la nature de l'argile en question.

La kaolinite se trouve en plus grande quantité sur la bordure orientale. Les fortes quantités sont toujours associées au faciès sableux. L'illite se répartit sur toute l'étendue de la sebkha. L'enrichissement en illite est suivi d'une diminution des taux de smectite qui se trouve en abondance au centre.

La répartition verticale de la smectite dans les séquences sédimentaires du bassin de Moknine, montre une augmentation dans les faciès fins caractéristiques de l'ancien épisode où la sebkha était plus étendue vers l'Ouest.

L'analyse des argiles dans les échantillons prélevés aux embouchures des oueds et à l'amont montre que ces derniers sont toujours formés de kaolinite d'illite et de smectite. Ces trois minéraux apparaissent également ensemble, mais en proportion différente dans la sebkha. Elles proviennent toutes du bassin versant mais les sources d'apports sont différentes. Les apports provenant du côté ouest sont riches en smectite et illite. Ceux du côté orientale sont formés d'un mélange de ces trois minéraux.

L'assemblage et la distribution des minéraux argileux dans les milieux actuels sont sous la dépendance de deux phénomènes contemporains : le mécanisme de transport et le processus de dépôt (Chamley, 1971 et Naidu et *al.*, 1995). Dans notre cas d'étude s'ajoute l'effet de la nature chimique des eaux hypersalines pour le mode de distribution de la smectite dans le bassin de sédimentation de Moknine.

Cependant la répartition de la kaolinite et de l'illite n'est conditionnée que par les modes de transport et de dépôt. En effet, les conditions de néoformation sont très particulière et difficile à se réaliser dans ce système.

L'illite se forme en climat tropical alors que la kaolinite nécessite dans certains cas une diagenèse de profondeur pour sa néoformation. Se trouvant dans un milieu de dépôt leur structure ne permet pas facilement les substitutions chimiques. La structure de la smectite permet la pénétration de certains ions tel que le sodium (Na). De ce fait les ions Na se trouvant en excès dans les eaux de la sebkha de nature chlorurée sodique peuvent pénétrer dans les feuillets de la smectite induisant un gonflement qui empêchera sa sédimentation dès son arrivée à la sebkha. La smectite reste alors en suspension et ne se dépose que plus loin. Les taux élevés mesurés dans certains échantillons à la périphérie sont le résultat d'un dépôt du stock d'argile par excès de charge.



CONCLUSION

Le mécanisme et le dynamisme de la sédimentation dans la sebkha de Moknine révèlent l'existence de deux événements importants.

- Un découpage de la sebkha en deux zones bien distinctes une immergée et une autre émergée apparaît à partir d'une analyse fine des sédiments de surface. La zone émergée se caractérise par une plage sableuse de 1 km de large, cependant la partie immergée renferme plus de faciès fins.
- Deux unités se distinguent dans les profils lithologiques. La plus récente forme une colonne de 1 m, détectée dans toutes les carottes et reflétant la même répartition que les sédiments de surface à savoir un faciès sableux à la périphérie suivi d'un faciès mixte (sablo-argileux, argilo-sableux) dans la partie médiane et enfin en faciès fins (argile) au centre. L'unité la plus ancienne n'est signalée que dans les carottes prélevées à l'Ouest et au Sud. Elle est formée uniquement par un faciès argileux.

La périphérie fut dans un premier stade le siège d'un dépôt fin. Ultérieurement, elle a évolué en zone de dépôts grossiers, résultat d'une phase de comblement voire même un état de vieillissement de la sebkha. Cependant le centre continue à recevoir des matériaux fins.

Deux facteurs importants sont responsables de cette évolution. La dissymétrie de la cuvette basculée vers l'Est et l'abondance du réseau hydrographique à l'Ouest ont joué un grand rôle dans le comblement de la sebkha. Ce dernier s'est réalisé sur une période assez longue, en raison de la rareté des averses et de l'écoulement peu abondant durant l'année dans la région de Moknine. En effet, le Sahel de la Tunisie est sous un climat aride supérieur caractérisé par une précipitation annuelle minimale de l'ordre de 300 mm.

Toutes les caractéristiques granulométrique témoignent d'un stock sableux transporté par roulement et par suspension gradée. L'énergie de transport de ces particules est faible. Leur sédimentation est attribuée aux dépôts de courant se produisant en fin de crue par excès de charge, une fois la vitesse du fluide transporteur s'atténue. En effet, l'analyse microgranulométrique témoigne que l'essentiel du faciès fin s'est déposé dans la sebkha par simple décantation.

Le milieu de sédimentation de Moknine est qualifié d'un environnement calme et de faible énergie.

Le quartz détritique est très abondant à la périphérie où se dépose les faciès grossiers. L'évolution spatiale de ce minéral montre un gradient décroissant des teneurs vers la partie la plus interne. Le quartz est abondant à la surface. Son importance diminue avec la profondeur. Par ailleurs, cette évolution caractérise les carottes périphérique et médiane (SM13, SM14, SM16 et SM17) dans lesquelles un changement de faciès est noté à la base correspondant au passage vers une unité plus ancienne et différente.

Au cours de son histoire la sebkha a connu deux phases. Une phase ancienne de transgression, au cours de laquelle toute la sebkha était couverte d'eau et siège d'un dépôt argileux. Une deuxième phase de régression et de comblement comme en témoigne aujourd'hui par la présence de deux parties. Une zone comblée vers l'Ouest et une autre immergée représentant la nouvelle sebkha de Moknine.

Aucun indice marin n'est signalé dans la colonne étudiée, renseignant sur la période de l'isolement de la sebkha de la mer, comme c'est le cas des sebkhas côtières de Tunisie : Boujmal, Ariana, Bou Zid où les dépôts ont enregistré l'influence marine ainsi que la période de régression et de fermeture du bassin.

Le modèle de Moknine révèle des dépôts détritiques reflétant l'influence continentale, comme c'est le cas des sebkhas de Kalbia et Sijoumi. Toutefois la sebkha de Moknine est plus

proche de la Méditerranée et une communication avec la mer a existé dans le passé. La passe semble être vers le Sud par l'intermédiaire des deux petites dépressions Eliane et Kotaï, sebkhas communicantes avec le système de Moknine par oued Rejel Chiba.

Une exécution de carottes est recommandée dans ces deux dépressions pour déterminer les sédiments d'origine marine qui sont recouverts par une colonne de dépôt d'origine continental dépassant 2 m dans la sebkha de Moknine.

L'étude minéralogique révèle la présence des minéraux authigènes représentés essentiellement par la halite et le gypse. La première s'est déposée par précipitation chimique. Elle est plus abondante vers l'intérieur de la sebkha où elle forme des pellicules atteignant 30 cm d'épaisseur. La précipitation de la halite résultant d'une évaporation des eaux indique l'évolution du système vers un pôle évaporitique.

Cependant le gypse se présente sous forme de cristaux correspondant à une diagenèse tardive. La présence des cristaux se limite à la partie orientale. En effet, la forme en rosettes et les cristaux en fer de lance est une caractéristique de l'évaporation des eaux de mer dans les sebkhas littorales (Chamley,2000).

On note que les encroûtements gypseux caractéristiques des bassins évaporitiques anciens sont absents dans la sebkha. En effet, les milieux modernes ne livrent pas d'exemple de bassin évaporitique de milieu et d'extension comparable à ceux des périodes géologiques marquées par de grands gisements salins. Cependant la sebkha de Moknine correspond à un système peu profond évoluant actuellement en bassin évaporatoire par une cristallisation d'une grande masse de sel.

Les carbonates se trouvent essentiellement sous forme de calcite dont l'origine est mixte (chimique, biogénique et détritique) et d'une fraction très subordonnée de dolomite provenant du bassin versant.

Les phyllites sont d'origine détritique et sont représentées par trois minéraux caractéristiques des dépôts de la région du Sahel de la Tunisie. Ce sont la kaolinite, l'illite et la smectite. Selon les sources d'apport et le mode de répartition dans la sebkha, une zonation des argiles s'est créée. Les faciès fins sont essentiellement smectitiques alors que les faciès grossiers révèlent une abondance de la kaolinite.

Chapitre 4 : Répartition Spatiale de la matière organique

L'hydrodynamisme est un des paramètres gérant le confinement. Les courants agissent

en effet sur la répartition des organismes peuplant les systèmes aquatiques. Ces courants peuvent être régis par divers facteurs (tels la forme du bassin, le sens de l'écoulement, le vent dominant, les différences de densité de la masse d'eau) ; ils sont souvent très variables à l'échelle temporelle. Etant des lieux à sédimentation rapide et importante les écosystèmes sont appelés à évoluer souvent dans le sens d'un comblement du milieu

Ces milieux ont la capacité d'accumuler et de conserver les matériaux sédimentaires (minérale et/ou organique). La nature du substrat de ces bassins dépend donc de la qualité des matériaux accumulés. Ces sédiments, au contact avec les masses d'eaux sont alors susceptibles d'interagir avec elles et de modifier leurs caractéristiques. Les interactions peuvent être d'autant plus importantes pour l'écosystème que la surface de contact est élevée en regard du volume d'eau concerné. La présence, la qualité et la quantité de matière organique dans les milieux constituent ainsi de bons indicateurs du fonctionnement des écosystèmes (Aycard et *al.*, 2001).

La productivité primaire et la préservation de la matière organique sont les facteurs dominants qui contrôlent l'accumulation de cette dernière dans les sédiments et les roches sédimentaires (Curtis, 1980). Plusieurs sites géographiques sont favorables à une productivité organique importante, mais la préservation de ce matériel est en relation étroite avec les conditions du milieu (oxydant ou réducteur).

Les quantités de matières en solution et en suspension qui sont transportées vers un lac sont très sensibles à la pluviosité et par conséquent, varient au cours du temps. L'énergie primaire transmise au lac est l'énergie solaire directe (absorption des radiations lumineuses) ou indirecte (énergie mécanique du vent). Dans certains cas, le flux de chaleur provenant du sous-sol (causé par le gradient géothermique local) constitue un apport important. Ces contributions énergétiques changent également au cours des saisons.

Les réactions qui se produisent dans ces milieux sont dominées par les processus biologiques :

- La photosynthèse : c'est la production primaire. Les microalgues se développent en surface sous l'action des radiations solaires à partir des composés minéraux dissous.
- Diagenèse précoce :

* la dégradation aérobie : la durée de vie d'une cellule algale est de l'ordre de la semaine ; les algues mortes sédimentent ensuite dans la colonne d'eau où des micro-organismes vont minéraliser cette matière organique en consommant de l'oxygène. Les processus de dégradation aérobie constituent la principale cause de disparition du carbone sédimentaire.

* la dégradation anaérobie : au fond du lac, les bactéries anaérobies prennent place. Les voies de la minéralisation anaérobie et la fermentation sont moins efficaces et une matière organique mieux préservée, arrive au niveau du sédiment. Ces composés organiques continuent à être lentement dégradés dans les premiers centimètres du sédiment. C'est uniquement quelque % du carbone organique issu de la photosynthèse qui subsiste et s'enfuit dans les sédiments. Ce type de signal résiduel enfoui dans les sédiments continentaux ou marins permet d'obtenir une information concernant les environnements du passé. Les biotopes anaérobies, essentiellement les sédiments marins côtiers sont davantage considérés comme des sites privilégiés pour la préservation de ce carbone (Lee et *al.* 1991). La similitude des vitesses de décomposition de la matière organique observée récemment dans des systèmes oxygénés ou non (Schreiber et *al.*, 2001) implique d'obtenir de plus amples indications sur l'importance relative des métabolismes bactériens sédimentaires s'exprimant en présence et/ou en absence d'O₂.

Une quantité importante (30 à 99%) de la matière organique qui atteint la surface du sédiment est minéralisée à l'interface eau/sédiment. Cette interface est une zone active dans la dégradation de la matière organique et la régénération des composés inorganiques (Schreiber et *al.*, 2001). Dans cette dernière, plusieurs processus sont couplés : hydrodynamique, biologique et sédimentaires. En effet, dans les sites littoraux ou côtiers de faibles profondeurs

l'interaction entre la diagenèse précoce et les processus hydrodynamiques peut profondément altérer la nature et l'intensité des échanges à l'interface eau-sédiment.

L'étude de la matière organique dans les sédiments de surface était dans le but de voir la distribution latérale de la matière organique, les facteurs intervenant dans cette distribution, le taux de matériel organique sédimenté en surface : son origine et sa nature. Et d'essayer de comprendre les mécanismes et les paramètres jouant un rôle à l'interface eau/sédiment.

CARBONE ORGANIQUE TOTAL (COT)

I-1-Résultats

Les teneurs en carbone organique total enregistrées dans les sédiments de surface sont variables. Elles oscillent entre 0,20 et 4,90% (Tab.10b). Les valeurs les plus élevées sont mesurées dans les échantillons prélevés au Nord de la sebkha près de la station d'épuration, aux embouchures de l'oued Soltane et à l'Est près de la dalle villafranchienne.

Les sédiments de surface présentent une zonation de richesse montrant une évolution irrégulière de la sebkha (Fig.28). Cette différence de répartition est en relation étroite avec l'hydrodynamisme et la stagnation des eaux dans la sebkha.

Au Nord et à l'Est, la topographie basse de la sebkha permet une accumulation d'eau dans ces deux secteurs. Les parties occidentale et méridionale sont hautes, ne permettant pas la stagnation des eaux.

La topographie, l'hydrodynamisme et la pérennité des eaux ont induit une répartition spatiale des teneurs de la matière organique différente de l'Est à l'Ouest.

Au Nord, les échantillons prélevés loin de la station d'épuration présentent des teneurs en carbone organique total ne dépassant pas le 1%. Cependant les points prélevés près de la station, dans l'oued Soltane et dans les tapis de cyanobactéries enregistrent des valeurs très élevées atteignant 4%.

A l'Est, les zones très abritées de la sebkha où l'eau peut stagner d'avantage avant son évaporation renferment plus de matière organique et le taux de COT dépassent 2%. Les échantillons éloignés de ces zones, renferment un taux de l'ordre de 1%.

Dans la partie émergée, à l'Ouest et au Sud, la matière organique est moins importante et les teneurs varient entre 0.2% et 0.78%.

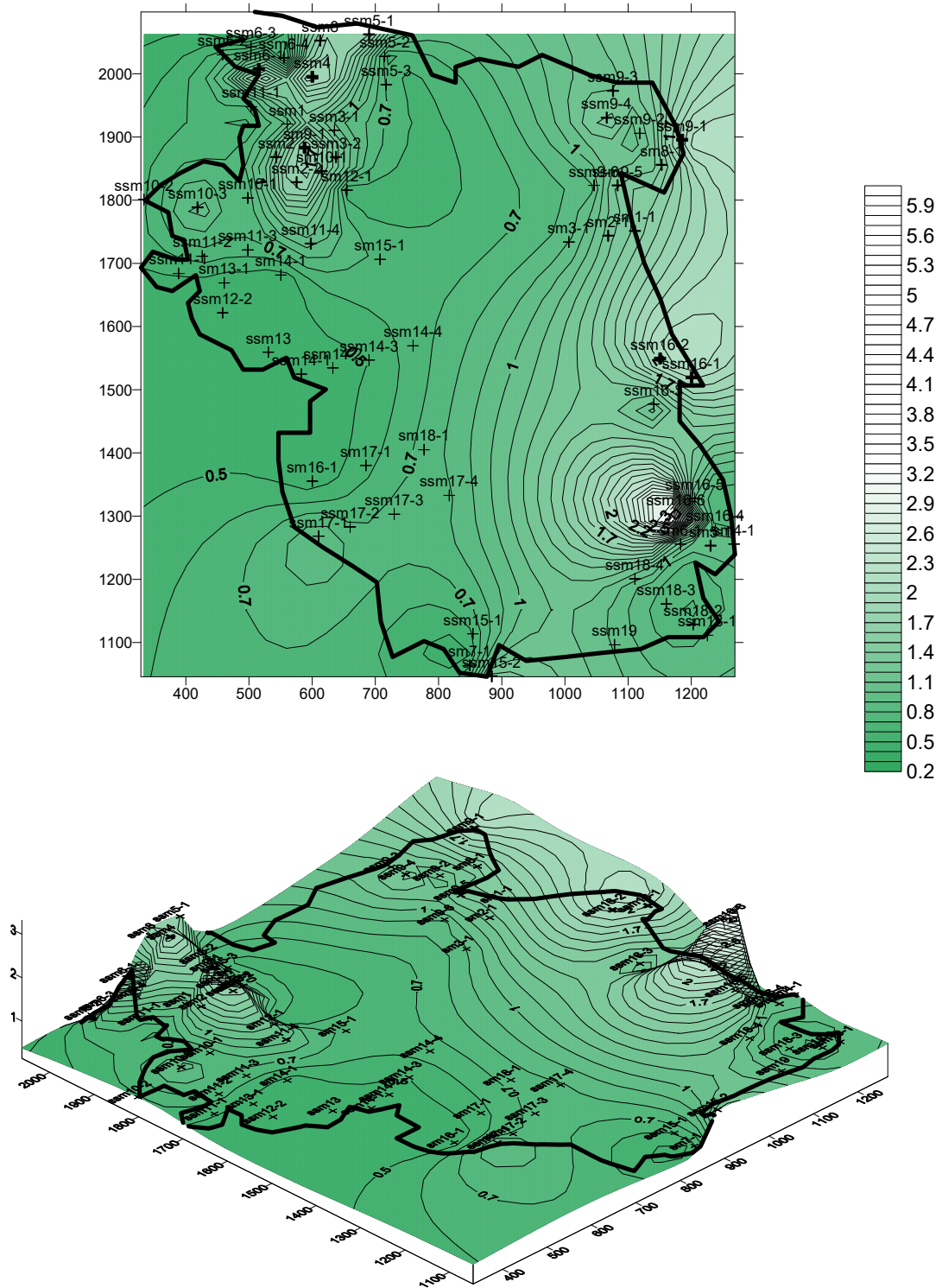


Figure 28 : Répartition latérale du carbone organique total dans la sebkha de Moknine. (COT exprimé en %)

I-2-Interprétation

La matière organique est un mélange complexe dont le devenir est variable selon les conditions environnementales. Il est difficile de distinguer clairement l'origine du carbone organique sédimentaire et de connaître les différentes étapes et les différents mécanismes qui interviennent dans sa dégradation.

La fraction organique contenue dans les sédiments superficiels (0-15cm) présentent des valeurs maximales dans les points (SSM1, SSM2, SSM3, SSM7 et SM11-1). Les valeurs diminuent dans l'ensemble en allant vers l'Ouest et au Sud de la sebkha (Fig.28).

La richesse des sédiments est en relation avec la qualité et la quantité de la matière organique. La répartition du matériel organique dans la sebkha de Moknine est en relation étroite avec l'accumulation de l'eau. Cette dernière est influencée par la topographie et par le sens du vent dominant.

A l'Est et au Nord, le niveau d'altitude de la sebkha varie entre -5 m et -9 m (Fig.19c). Cependant à l'Ouest et au Sud, il est compris entre -3 m et -6 m. Cette topographie, tantôt basse, tantôt haute de la sebkha est aujourd'hui la responsable de la présence de l'eau dans les parties est et nord et son absence dans les parties ouest et sud. La sebkha présente ainsi, un côté émergé et un autre immergé.

L'eau dans les zones immergées a joué le rôle d'une barrière vis à vis de la dégradation et de la minéralisation de la matière organique. En effet, ces eaux de surface ont un double rôle. D'une part, elles permettent le développement de la biomasse de type halophile et d'autre part, elles ralentissent les processus de sa biodégradation. L'eau joue donc un rôle dans la préservation du stock organique (allochtone et autochtone). A l'interface eau/sédiment, elle joue aussi un rôle de contact permettant le passage d'un flux de matière organique vers les sédiments. A cette interface, il y a un échange et une interaction plus importants ce qui enrichissent les sédiments superficiels à l'Est et au Nord en matière organique. Une fois cette eau évaporée, la pellicule de sel qui prend sa place accentue ce phénomène de préservation et joue encore le rôle de barrière vis-à-vis de la dégradation et de la minéralisation de la matière organique.

La zone émergée se trouvant en position haute, ne permet pas une accumulation d'eau. De ce fait, les sédiments sont toujours aérés. L'aération et le phénomène d'érosion activent la dégradation de la matière organique. Ces deux paramètres interviennent dans les réactions d'oxydation et de minéralisation. En effet, nous avons mesuré des valeurs très basses à l'Ouest de l'ordre de 0.20%, reflétant la mauvaise préservation et l'origine essentiellement continentale. Dans cette zone la matière organique est en dilution continue. Seuls les sédiments situés vers le centre et où la topographie permet à une très fine tranche d'eau (quelques cm) de stagner, montrent des valeurs assez élevées comparées à la bordure.

L'installation des tapis de cyanobactéries (planche 6) au Nord et à l'Est permet une rétention d'eau et conduit à un apport d'éléments organiques sources de nutriment et d'énergie (Malam Issa *et al.*, 2001). La décomposition de ces tapis augmente la charge de l'écosystème en matière organique expliquant ainsi la richesse des échantillons prélevés dans cette zone (COT =4%).

Planche 6

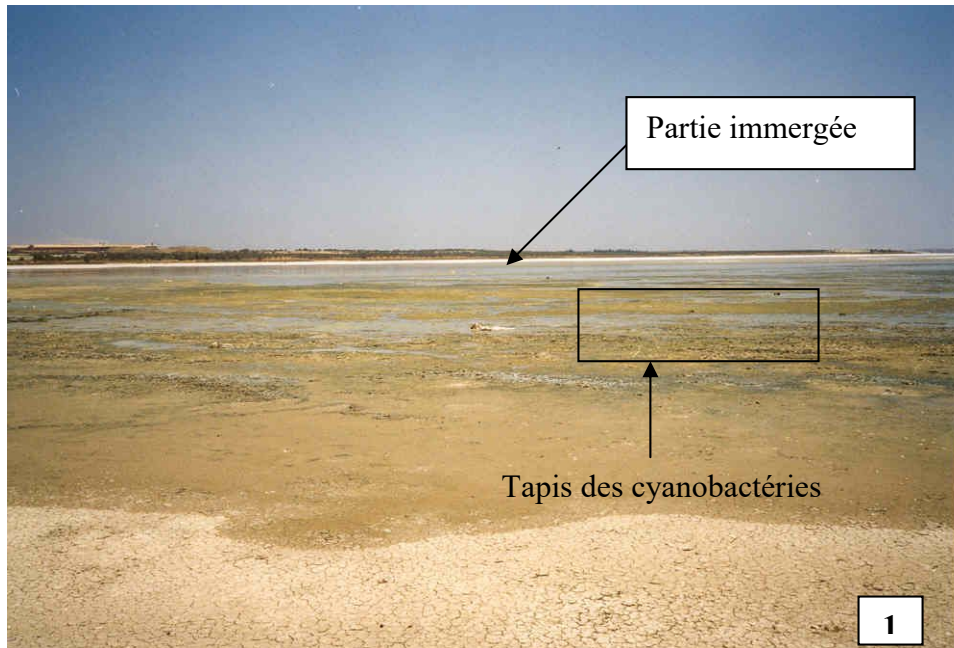


Photo 1 : Vue de la zone immergée de la sebkha de Moknine montrant la prolifération des tapis de Cyanobactéries

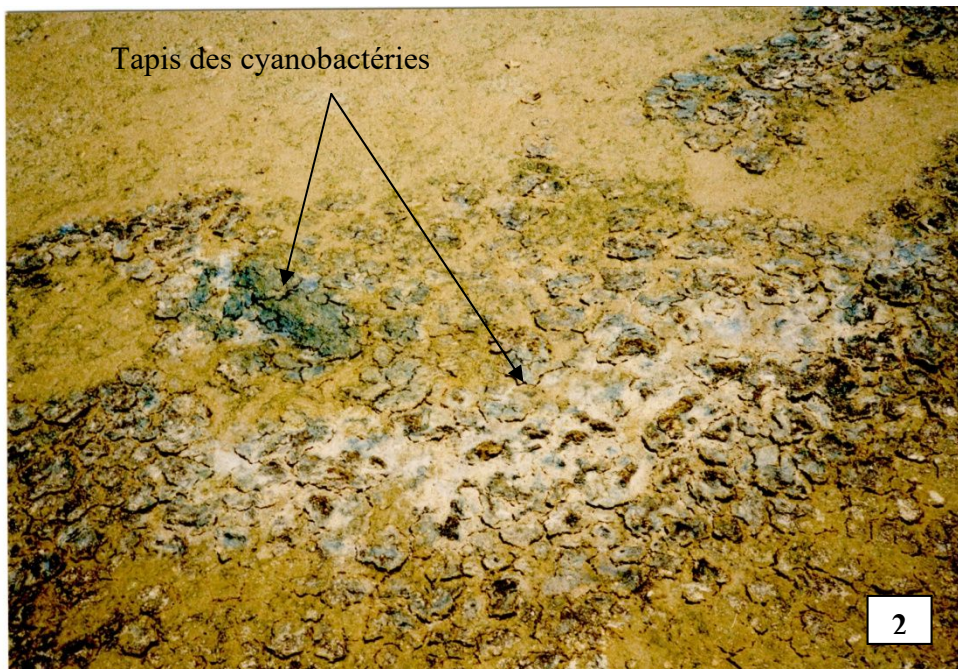


Photo 2 : Tapis de cyanobactérie

II – ANALYSE DE LA MATIERE ORGANIQUE PAR PYROLYSE ROCK-EVAL

La matière organique est composée de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, d'azote et de soufre en proportions variables suivant sa typologie (continentale, lacustre ou marine) et la nature du milieu au sein duquel elle évolue (oxique, anoxique, réducteur).

La technique de pyrolyse Rock-Eval, permet, à partir de l'évaluation des composés hydrogénés, de recueillir des informations précieuses sur les critères d'origine et de milieu de dépôt (Peters, 1986).

Une matière organique riche en composés hydrogénés, provient d'un matériel algaire ou planctonique déposé dans un milieu restreint favorable à la préservation de ces composés. Par contre une matière organique pauvre en composés hydrogénés, provient d'un matériel ligneux continental riche en phénols. Une oxydation poussée de cette dernière fournit un matériel dépourvu de composés hydrogénés.

La technique de pyrolyse Rock-Eval consiste en une pyrolyse programmée de la matière organique sous atmosphère inerte. Elle permet d'obtenir une évaluation quantitative de deux composés:

* Les composés hydrogénés ou hydrocarbonés libres (pic S1) correspondant dans les sédiments récents et actuels, aux hydrocarbures hérités de la biomasse ou accumulés à partir d'une source de pollution anthropique.

* Les composés hydrocarbonés potentiels (pic S2) qui correspondent à la part de la matière organique sédimentaire où l'hydrogène et le carbone sont les constituants majeurs. De ce point de vue, la matière non pyrolysable (résidu après pyrolyse) correspond à la matière organique oxygénée et résiduelle.

S2 est d'autant plus élevé que la matière organique est d'origine algaire ou planctonique (Espitalié et *al.*, 1986) et qu'elle a évolué dans un milieu anoxique-réducteur.

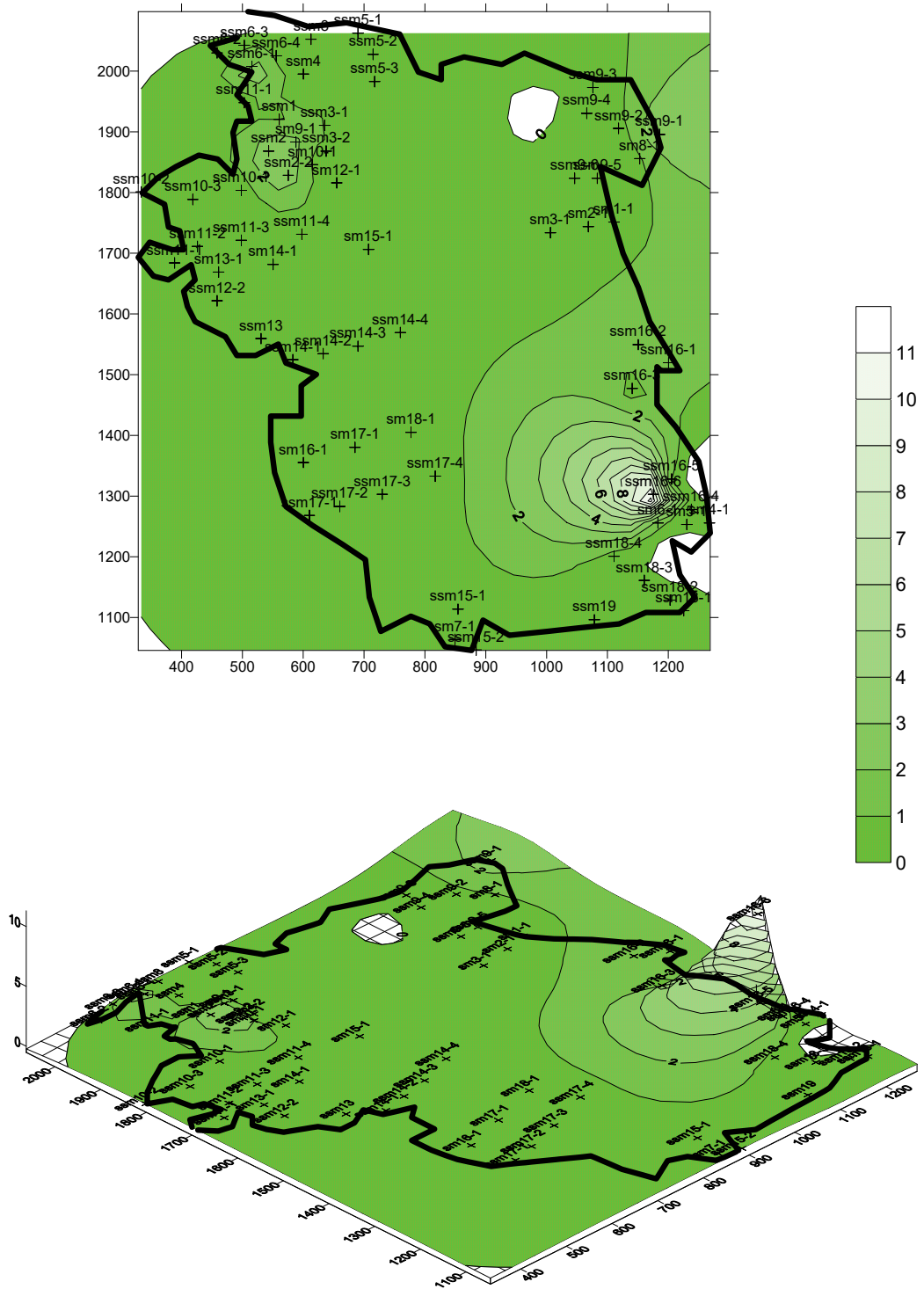


Figure 29 : Répartition latérale des hydrocarbures libres (S1) dans la sebkhja de Moknine (S1 en mg d'HC/g séd.).

La température maximale (Tmax) est calculée au sommet du pic de S2. Elle est un indicateur de la maturité de la matière organique. Normalement elle est considérée comme un paramètre de rang de celle-ci. Cependant dans le cas du charbon très mature, elle est considérée comme un paramètre d'oxydation (Copard et Disnar, 2001).

L'index d'hydrogène (IH) est défini comme étant la quantité de composés d'hydrocarbures par rapport au COT.

La matière organique est dite d'origine terrestre pour des valeurs de IH < 110 mg d'HCg⁻¹COT et un taux de carbone compris entre 0.5% et 1%. Les valeurs faibles de IH peuvent être aussi attribuées à une dégradation très poussée de la matière organique et à une importante activité bactérienne (Stein et *al.*, 1989). Dans le plateau continental N-W de l'Afrique, Stein et *al.*, (1989) ont montré que malgré les valeurs élevées de COT (1% à 4%) les IH sont faibles. Ils ont attribué ce résultat à l'importance de la contribution continentale qui est pauvre en composés hydrogénés.

Les résultats de la pyrolyse Rock-Eval effectués sur tous les échantillons sont reportés sur le tableau 10b.

II-1- Les composés hydrocarbonés libres (S1)

Une zonation de répartition des hydrocarbures libres (S1) apparaît dans les sédiments de surface. Cette dernière suit celle du COT (Fig.29).

Au Nord, S1 varie de 0.10 à 7.43 mg d'HC g⁻¹ séd. Les valeurs les plus élevées correspondent aux points prélevés près de la station d'épuration et à l'embouchure de l'oued Soltane (Tab.10b).

A l'Est, S1 varie de 0.17 à 4.65 mg d'HC g⁻¹ séd. Les teneurs élevées correspondent aux points prélevés dans la zone abritée.

A l'Ouest et au Sud, les valeurs sont très faibles comparées à celles mesurées à l'Est et au Nord. Elles ne dépassent pas 0.50 mg d'HC g⁻¹ séd.

Les hydrocarbures libres <0,50 mg d'HC g⁻¹séd ne correspondent pas à une origine à partir d'une source de pollution. Cependant, les quantités élevées sont des indicateurs d'une source algale et donc de l'activité de la biomasse halophyle. En effet, ces valeurs sont mesurées dans les sédiments prélevés dans le tapis de cyanobactéries.

La répartition spatiale de S1 (Fig.29) est comparable à celle du COT (Fig.28). Cependant, les coefficients de corrélation calculés entre les composés hydrogénés et le COT dans chaque zone, montre l'absence d'une bonne corrélation indiquant ainsi l'hétérogénéité du stock organique de surface (Fig.30).

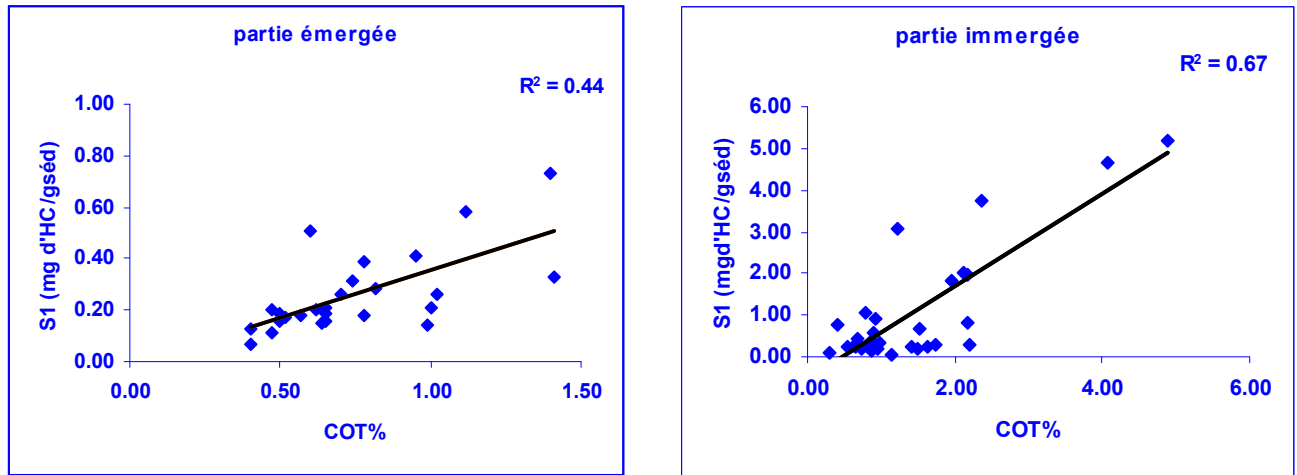


Figure 30 : Variation des composés hydrocarbonés libres (S1) en fonction du COT.

II-2- LES COMPOSES HYDROCARBONES POTENTIELS (S2)

Les valeurs relatives aux composés hydrogénés potentiels (S2), montrent aussi des zones de richesse qui suit celle du COT et des hydrocarbures libres (Fig. 31).

Le Nord de la sebkha est caractérisé par des concentrations en hydrocarbures potentiels allant de 0.30 à 11.66 mg d'HCg⁻¹séd. A l'Est les valeurs varient de 0.29 à 8.57mg d'HC g⁻¹séd. Enfin, dans la zone émergée (Ouest et Sud), les teneurs oscillent entre 0.09 et 2.23 mg d'HC g⁻¹ séd (Tab.10b).

Le pic S2 correspond aux composés hydrocarbonés associés à la matière organique hautement polymérisée d'un sédiment, et ne peut donc dériver d'une source de pollution (Espitalié et *al.*, 1986).

Une très bonne corrélation est calculée entre S1 et S2 (Fig.32), prouvant que ces entités sont issues d'une origine biologique. Ainsi, les valeurs élevées mesurées en S1 reflètent la présence d'une prolifération de la biomasse qui se manifeste par des tapis de cyanobactéries.

L'absence d'une bonne corrélation entre les hydrocarbures potentiels et le COT est expliquée par une hétérogénéité du matériel organique sédimenté dans les deux domaines (Fig. 33)

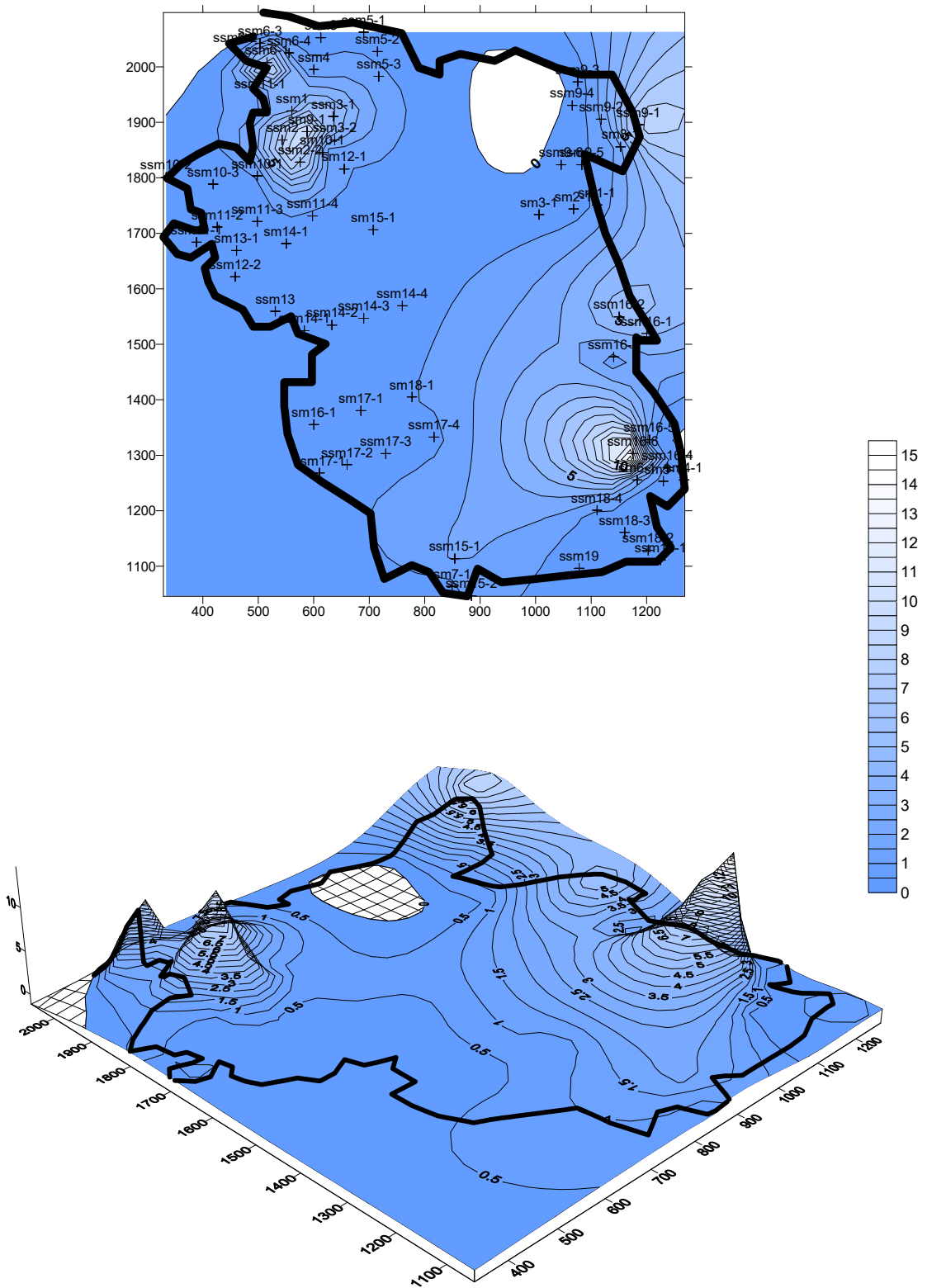


Figure 31 : Répartition latérale des hydrocarbures potentiels (S2) dans la sebkha de Moknine.
(S2 mgd HC/g séd).

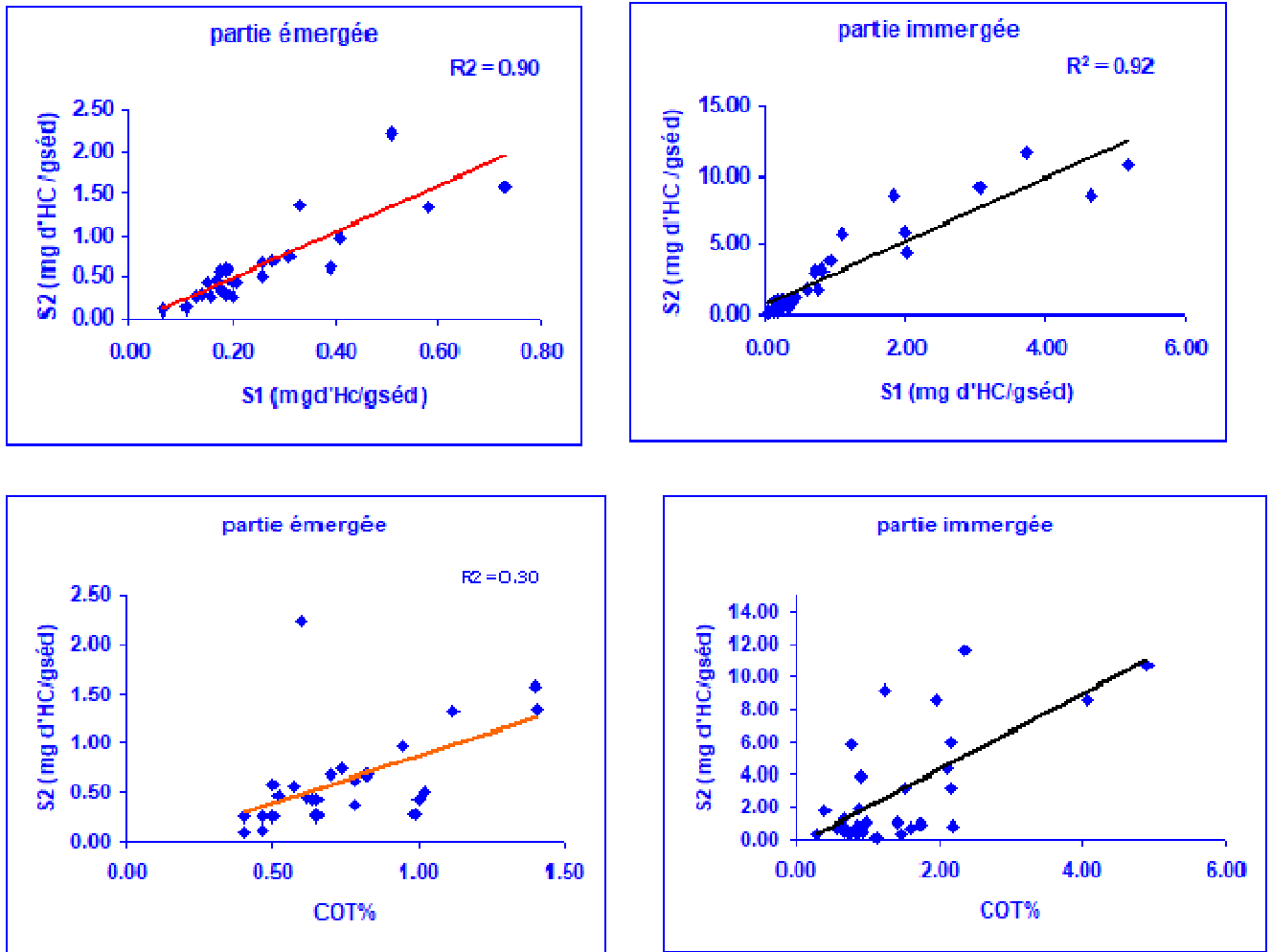


Figure 32 : Variation des composés hydrocarbonés libres (S1) en fonction des composés hydrocarbonés potentiels (S2).

II-3- DIAGRAMME IH/TMAX

Les valeurs de l'index d'hydrogène (IH) varient de 8 à 750 mgd'HC g⁻¹COT dans les sédiments de surface. IH très élevé correspond aux échantillons qui ont renfermé les teneurs les plus élevées en S2 et les taux les plus importants en COT (Tab.10b). Ils montrent l'existence d'une source algale (Clart et al., 1981) et d'un apport important de phytoplancton (Pederson et al., 1992) de la matière organique se trouvant dans la zone immergée. Les quantités faibles sont le résultat d'une dégradation très poussée du matériel organique (Littke et Sachenhofer, 1994) et d'un apport massif d'origine continentale.

Dans la zone émergée, IH est faible et caractérise à la fois l'origine continentale (Huc et *al.*, 1992) et la dégradation poussée de la matière organique.

Les températures maximales atteintes au sommet du pic de pyrolyse (Tmax) varient de 376 à 420°C dans le domaine immergé et de 375 à 423°C dans le domaine émergée. Dans toute la sebkha elles sont caractéristiques d'une matière organique au stade de diagenèse précoce. La variation des valeurs trouvées dans les deux domaines à une profondeur (15cm) ne peut être attribuée qu'à l'hétérogénéité du stock organique de point de vue origine et degré de maturité.

Enfin le diagramme IH/Tmax montre l'existence de trois sources de matière organique : algaire, marine et continentale.

Dans la zone immergée de la sebkha au Nord, le matériel organique est riche en composés hydrogénés caractéristiques d'une source algaire et marine. Alors qu'à l'Est, les valeurs variables en ces composés reflètent l'origine mixte de la matière organique. Quant à la zone émergée, aussi bien à l'Ouest qu'au Sud, la matière organique sédimentée est généralement pauvre en composés hydrocarbonés prouvant l'origine continentale et/ou une mauvaise préservation du stock organique (Fig.34).

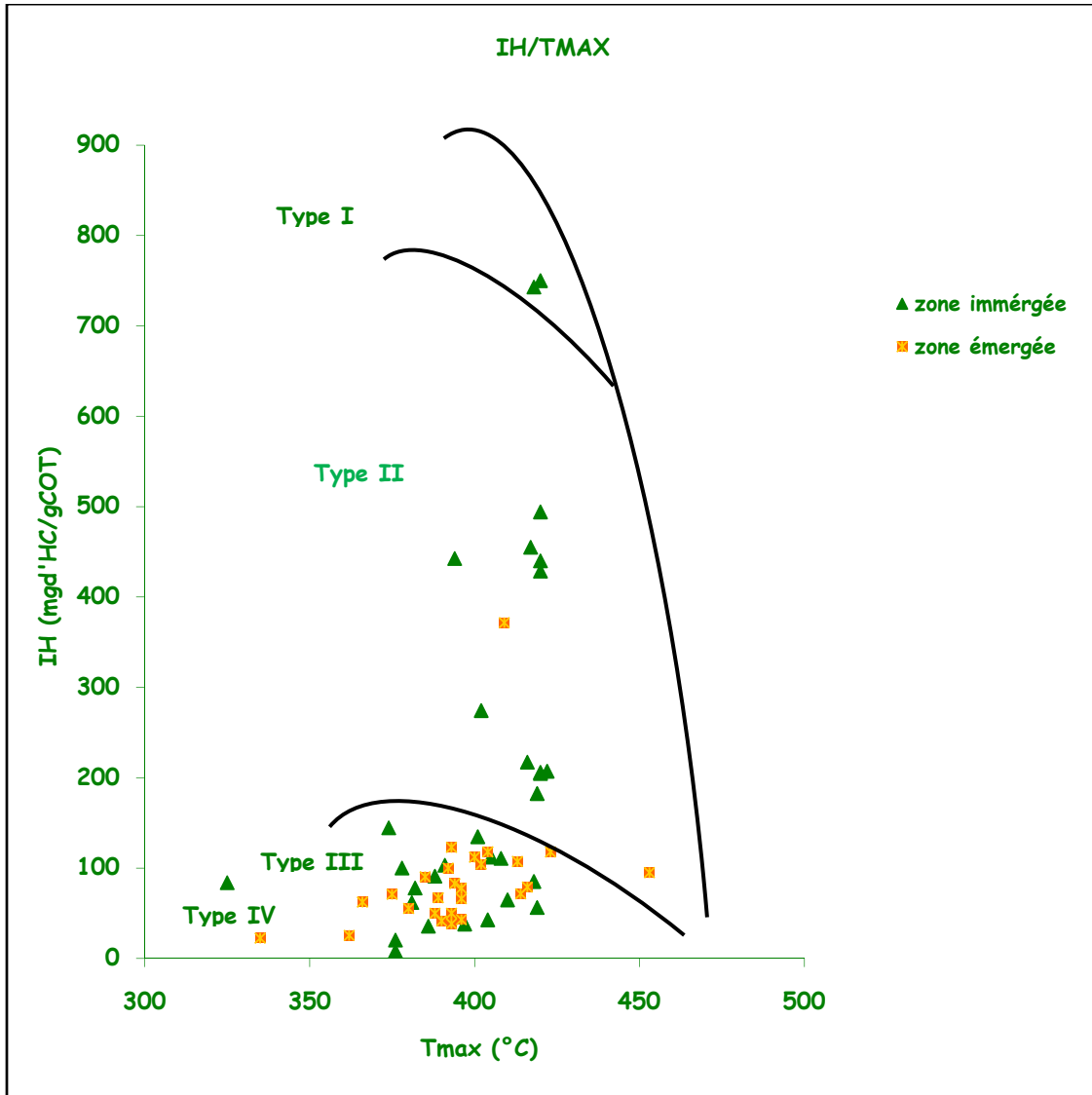


Figure 34 : Diagramme index d'Hydrogène (IH) en fonction de la température (Tmax) (sédiments de surface).

II-4-INTERPRETATION

La répartition latérale de la matière organique montre que cette dernière est sous la dépendance de l'hydrodynamisme du bassin qui est influencé par la topographie et le sens du vent dominant.

Deux zones sont distinctes dans la sebkha : la première est émergée et la seconde est immergée. La zone émergée est le résultat du comblement de la sebkha. Elle est caractérisée par un très faible taux de matière organique, pauvre en composés hydrocarbonés libres et potentiels et par un index d'hydrogène < 110 mg d'HC/gCOT. L'eau dans cette zone haute ne

peut pas s'accumuler et draine vers la zone basse en augmentant la dilution de la matière organique à l'Ouest. Seule la matière organique allochtone provenant du bassin versant et bien fixée qualifie le stock du domaine émergée. L'absence de la pérennité des eaux s'accompagne d'une absence de biomasse. Cependant quelques échantillons prélevés dans l'oued Rejel Chiba ou près de cet oued au Sud renferment une quantité assez élevée en composés hydrocarbonés et un index d'Hydrogène >110mg d'HC/gCOT.

Ce domaine est caractérisé essentiellement par une matière organique d'origine continentale ayant subi une dégradation très élevée.

Dans le domaine immergé, le taux de la matière organique est très élevé dans les tapis de cyanobactéries. Dans les autres échantillons, les teneurs restent élevées mais moins importantes que celles des tapis des cyanobactéries. La matière organique analysée est riche en composés hydrocarbonés libres et potentiels. L'index d'hydrogène est généralement supérieur à 110mg d'HC/gCOT. Cependant quelques points sont pauvres en composés hydrocarbonés (SSM9-3, SSM9-4, SSM9-5, SSM9-6 et SSM18-1).

Le matériel organique dans ce domaine est hétérogène de point de vue origine et degré d'évolution. L'eau s'accumulant dans cette zone a joué plusieurs rôles. Ainsi, elle permet la prolifération d'une biomasse originelle halynne et de ce fait augmente le flux de la matière organique. Aussi, elle est une barrière vis-a-vis de la dégradation du stock organique, ce qui va diminuer la dégradation présédimentaire. Une fois cette matière est sédimentée, elle sera toujours protégée par la tranche d'eau pendant la saison humide et par la couche de sel pendant la saison chaude. De ce fait, le sédiment est abrité et les conditions du milieu sont favorables à une préservation de la matière organique.

III – ETUDE DES COMPOSES HUMIQUES

III-1- INTRODUCTION

Les sédiments reçoivent des particules néoformées par des processus biologiques (photosynthèse) dans les eaux de surface ainsi que des particules terrigènes transitant par les courants d'eau ou par voie atmosphérique. L'évolution de ces particules, après leur dépôt dépend d'une balance entre la minéralisation et l'enfouissement, phénomènes qui varient selon la nature du composé et les caractéristiques physique et chimique du sédiment. 70 à 80% de ces particules sont formées de substances humiques (Zumstein et Buffle, 1989). Ces derniers sont plus abondants dans le sol (Hatcher et al., 1981 et Buffle, 1988).

Les composés humiques sont des polymères organiques représentant la fraction extractible par les solvants alcalins. Ils sont les constituants majeurs de la matière organique sédimentée et représentent 40% à 70% du carbone organique total (Nissebaum et Kaplan, 1972). La structure chimique des composés humiques est très complexe (groupements carboxyliques, hydroxyliques et phénoliques). Leurs poids moléculaires sont élevés ; de quelques centaines à plusieurs millions de masse atomique (Rashid et King, 1969 ; Schnitzer et Khan, 1972). Parmi ces composés, nous distinguons les acides fulviques (AF) solubles à la fois dans les bases et dans les acides et les acides humiques (AH) solubles dans les bases mais insolubles dans les acides.

Ces deux fractions possèdent une structure et une composition chimique comparables et ne diffèrent l'une de l'autre que par leurs poids moléculaires, leur composition élémentaire et notamment leur richesse en groupements fonctionnels (Schnitzer, 1978). Les acides fulviques ayant une masse atomique plus faible sont plus riches en groupements fonctionnels. Les substances humiques possèdent des propriétés d'échangeuses d'ions et des propriétés complexantes ; elles jouent le rôle d'un véhicule pour la plupart des substances toxiques (métaux lourds, pesticides) (Mazet et al., 1990).

Les acides humiques et fulviques marins ou lacustres sont souvent présents dans les sédiments récents (Degens et al., 1977 ; Huc, 1978). Ces derniers contiennent des débris de plantes vasculaires (Hedges et al., 1982), qui à la suite de transformations diagénétiques (Ertel et al., 1984), libèrent des AF et des AH. Ces produits possèdent des caractéristiques propres

qui les différencient de celles des humus continentaux, une faible abondance des groupements phénoliques et des rapports atomiques H/C, N/C et S/C élevés. les AH contiennent 5% de leur carbone sous forme de lignine et 1% sous forme de glucides neutres (Cowie et Hedges, 1984).

L'essentiel de la matière organique, se trouve sous forme humique à l'interface eau/sédiment avec une prédominance des acides fulviques. Ces composés humiques se trouvant dans les sédiments récents sont exclusivement le produit de transformation diagénétique (Ertels et *al.*, 1985), ils se trouvent essentiellement associés à la fraction fine (<63µm) (Prahl et Carpenter, 1983). Dans les environnements côtiers, les substances humiques sont riches en composés ligneux indicateurs de la présence et des conditions diagénétiques terrestres (Ertel and Hedges, 1984 ; Ertel, 1985).

Une matière organique à contribution marine majoritaire a une fraction d'acide fulvique représentant moins de 10% du total de la matière organique. Celle à contribution continentale quasi totale a 12% d'AF (Pelet, 1983).

Les sédiments récents contenant de la matière organique, même en quantité réduite (<0.5%), présentent une teneur en composés humiques notables (Debyser et *al.*, 1975). Ces composés constituent dans la plupart des cas une fraction importante de la matière organique totale pouvant représenter jusqu'à 70%, ce qui réduit considérablement la partie non extractible (humine).

Par contre, les dépôts anciens contiennent peu ou pas de substances humiques (Debyser et *al.*, 1975, 1983) et sont peu hydrolysables. Dans ces derniers, l'essentiel de la matière organique appartient au kérogène (Fig.35).

Selon Nissebaum and Kaplan (1972) l'origine de l'humine est une condensation des groupements fonctionnels des acides humiques. Cependant Casagrande et *al.*, (1980) montrent que l'humine est composée de matériel organique décomposé et non décomposé. elle est considérée d'une part l'ancêtre des acides humiques et d'autre part peut provenir de la condensation ou la perte des groupements fonctionnels des acides humiques (Fig.36).

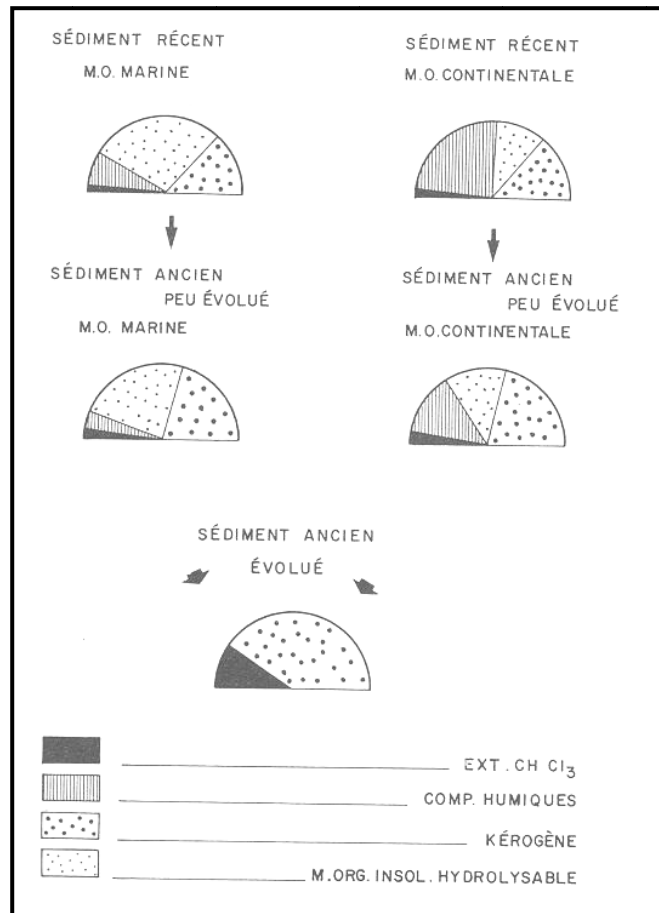


Figure 35 : Evolution de la matière dans les sédiments (Debyser et al., 1975)

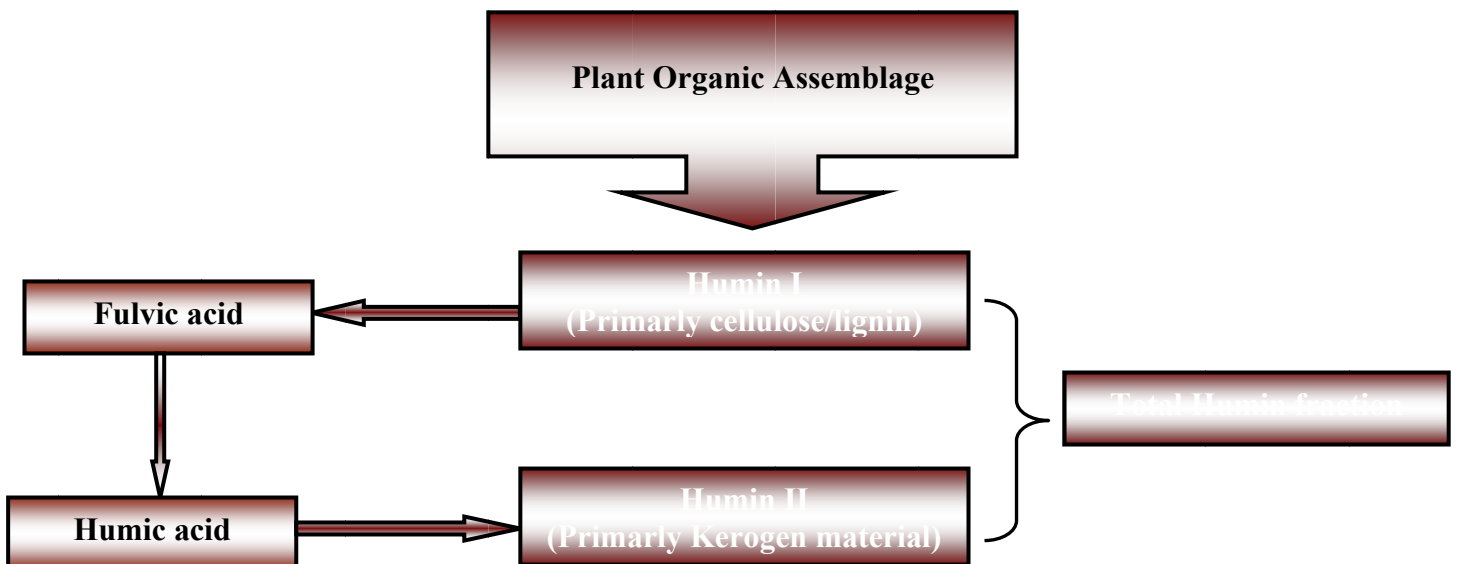


Figure 36 : Humin origin : Bacterial decomposition and anabolic contribution (Casagrande et al., 1980).

III-2- RESULTATS DE L'ETUDE DES COMPOSES HUMIQUES

Les teneurs en composés humiques totaux, en AF et en AH sont exprimées par la part de carbone organique (Tab.11b).

III-2-1- COMPOSES HUMIQUES TOTAUX

Les composés humiques totaux varient de 0.07% à 0.80% dans les sédiments superficiels. Des zones de répartition de richesse de ces composés sont remarquées et illustrées sur la carte de la figure 37. Les composés humiques totaux sont abondants à l'Est et au Nord ($0.20\% < \text{CHT} < 0.80\%$) et très peu abondants à l'Ouest et au Sud ($0.10\% < \text{CHT} < 0.30\%$).

Cette zonation est conforme à celle du COT de S1 et de S2. Elle reflète aussi les changements des conditions du milieu et la nature de la matière organique. En effet, la zone immergée est riche en composés humiques, alors que la zone émergée est pauvre en composés humiques (Fig.37). Ceci confirme encore l'idée du rôle de l'eau dans la préservation et l'enrichissement du matériel organique sédimenté.

Rapportés au carbone organique total, ces pourcentages illustrent pareillement la richesse de la zone immergée par rapport à la zone émergée (tab.11b).

Ce contraste entre les deux zones de la sebkha montre la présence d'une évolution différente de la matière organique dans les premiers centimètres, ainsi que la différence du type de la matière organique sédimentée.

D'une manière générale, les teneurs en composés humiques solubles dans les solvants alcalins sont inférieurs à 50% du COT. Cependant les échantillons prélevés dans les tapis des cyanobactéries ont des composés humiques totaux de l'ordre de 50%. En effet, le contenu organique est essentiellement formé de composés humiques prouvant que la matière organique est récente en phase de diagenèse précoce. Ce résultat est caractéristique des sédiments récents (Mazet et *al.*, 1990).

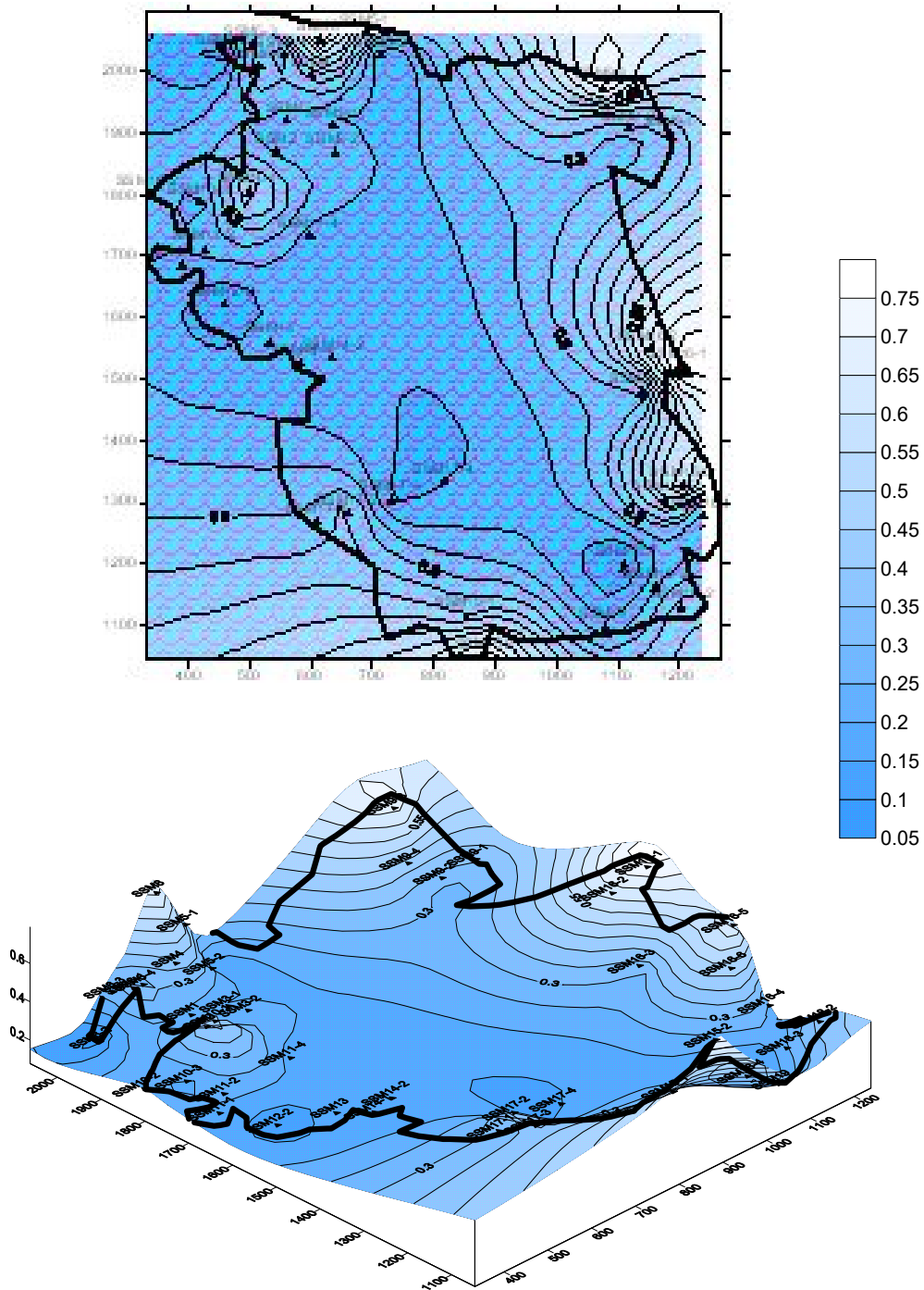


Figure 37 : Répartition latérale des composés humiques totaux dans le bassin évaporitique de Moknine (CHT% du sédiment).

Dans la zone immergée, la variation de la richesse en composés humiques totaux est en relation étroite avec la présence du tapis algaire. Cependant, dans le domaine émergé le taux diminue en allant de l'extérieur vers l'intérieur de cette zone. Ceci est en relation avec la nature lithologique. En effet, dans cette zone plus le sédiment est sableux plus les composés humiques sont abondants et vice versa.

La figure 38 représentant la variation des composés humiques en fonction du carbone organique total montre une bonne corrélation entre ces entités dans la zone émergée uniquement. En effet, le stock organique sédimenté à l'Ouest provenant du continent est homogène. Cependant, au Nord et à l'Est le matériel organique fossilisé est hétérogène. Il est constitué d'une partie allochtone et d'une partie autochtone issu de l'activité de la sebka.

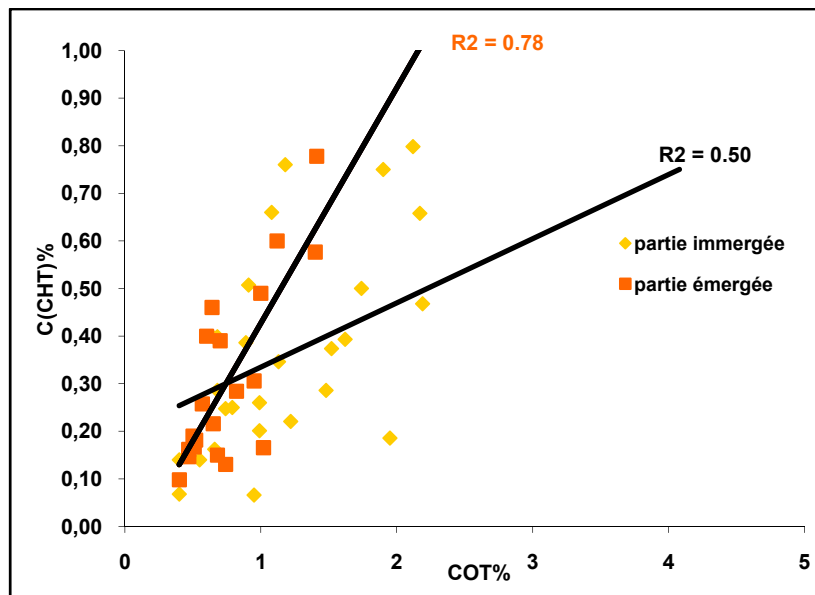


Figure 38 : Variation des composés humiques totaux (CHT) en fonction du carbone organique total (COT).

III-1-2- Fractionnement des composés humiques : acide fulvique (AF), acide humique (AH) et humine (H)

Le fractionnement des composés humiques en acides fulviques (AF), acides humiques (AH) et en humine (H) a donné les résultats suivants.

Dans la zone immergée (zones Nord et à l'Est), l'essentiel de la fraction est sous forme d'humine (H>60%). Seuls les échantillons prélevés dans les tapis de cyanobactéries présentent un faible taux d'humine (<50%).

Dans toute cette zone, les AH sont plus abondants que les AF. Le rapport AF/AH<1 montre que les réactions de polymérisation sont rapides prouvant ainsi l'importance de l'activité bactérienne. Le taux des AF est variable. Il est inférieur à 10% dans certains échantillons et est supérieur à 12% dans d'autres, appuyant l'hypothèse de l'hétérogénéité de la matière organique de point de vue origine dans un même domaine.

A l'Est, le taux d'AF est inférieur à 10%, les composés humiques sont d'origine lacustre c'est-à-dire de la biomasse originelle. Au Nord, les échantillons prélevés à la périphérie où près de l'oued Soltane renferment des pourcentages en AF>12% montrant la contribution continentale. Cependant, les échantillons prélevés près de la station d'épuration ou dans le tapis de cyanobactéries renferment des pourcentages de AF <10%, ce qui appuie encore l'idée de l'origine lacustre de la fraction humique.

Dans la zone émergée, le taux des AF est généralement supérieur à 12%, excepté quelques échantillons de la partie intérieure où les AF<10%. Ce résultat confirme l'hétérogénéité dans l'origine des composés humiques (continentale et lacustre) analysés dans la sebkha de Moknine.

III-1-3-Interprétation

Plusieurs études ont montré que dans les sédiments lacustres, l'origine de la matière organique est mixte et son devenir est en relation étroite avec son origine (Zumstein et Buffle, 1989). La matière organique d'origine lacustre est plus riche en composés aliphatiques alors que celle d'origine continentale est plus riche en substance humique (Hatcher et al., 1981, Buffle, 1988).

L'étude des composés humiques totaux (CHT) montre une répartition similaire à celle du COT et des hydrocarbures (S1 et S2). Cette répartition divise la sebkha en deux parties émergée et immergée. Cette zonation est conforme à celle démontrée par l'étude sédimentologique.

Le fractionnement des CHT en AF et AH montre des quantités différentes selon l'emplacement en zone émergée ou immergée.

Les composés humiques totaux analysés dans la zone émergée sont plus importants à l'extérieur et diminuent vers l'intérieur où l'humine devient abondante. Les AF dans toute la zone sont supérieurs à 12% montrant que cette fraction est issue des végétaux supérieurs. A l'intérieur de cette partie, le sédiment est formé par une vase argileuse renfermant plus de résidu stable (humine > 60%).

Le matériel organique sédimenté dans les deux zones révèle une abondance d'humine et montre l'absence d'une bonne corrélation entre les différentes fractions des composés humiques (AF, AH et Humine). Ceci prouve que l'hétérogénéité est non seulement de point de vue degré d'évolution mais aussi de point de vue origine. Ce résultat trouvé dans la sebkha de Moknine est comparable à celui indiqué dans les lacs Huron et Michigan. En effet, Dans les sédiments récents de ces lacs, l'essentiel de la matière organique retrouvée se présente sous forme d'humine, une faible quantité sous forme d'acide humique et très peu d'acide fulvique (Bourbonniere et Meyers, 1983). Cependant, l'origine de ces composés est hétérogène (lacustre et continentale). L'abondance d'une forme par rapport à une autre et en relation étroite avec les conditions du milieu, mais l'origine des acides fulviques et humiques est lacustre (Otsuki and Hanya, 1967, Ishiwatari, 1970 ; Nissebaum and Kaplan, 1972 ; Kemp, 1973 ; Bourbonnière and Meyers, 1983).

Les études menées sur les sources des substances humiques montrent que la matière organique sédimentée est formée de composés terrestres et marins (Rashid et Prakash, 1971) et qu'elle peut être le mélange entre des composés issus de la production ou des conditions diagenétiques (Ertel et al., 1984). Cette observation est aussi remarquée dans les sédiments récents de la sebkha de Moknine.

Ainsi et d'après Hedges et al. (1982), la quantité extractible des substances organiques dans les dépôts côtiers et lacustres contenant des débris de plantes vasculaires, n'est pas nécessairement une mesure de diagenèse et les fractions humiques (AH et AF) ne sont pas exclusivement le produit de transformations diagenétiques. Ces résultats sont confirmés par d'autres travaux réalisés sur le sol (Stevenson, 1982). Ces substances humiques sont obtenues aussi par des cultures de bactéries (Fili et al., 1974). Cette hypothèse est confirmée 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. Cette hypothèse explique l'origine de l'hétérogénéité dans les sédiments de la sebkha de Moknine qui est le siège de développement de bactérie et de phytoplancton dans sa partie immergée et de végétaux supérieurs sur sa bordure et lieu d'accumulation de débris de végétaux supérieurs ramenés par les cours d'eau..

L'évolution de la matière organique dépend des conditions biophysico-chimique du milieu. Ces conditions actives ou ralentissent le processus de dégradation et de transformation de ce matériel dans les premiers centimètres. La matière organique subit une évolution différente, selon qu'elle est à la périphérie ou au centre. De ce fait, la faible quantité d'AF vers l'intérieur de la zone émergée peut être liée à une origine lacustre et/ou à une évolution de la matière organique. Il semble que la tranche d'eau au centre et dans la partie immergée joue un rôle dans l'augmentation du flux organique et la protection d'une dégradation poussée. Cependant, l'édification des tapis de cyanobactéries dans la partie orientale qui ont augmenté le taux de la fraction humique. En effet, les échantillons prélevés dans ce tapis ont renfermé le taux le plus élevé en composés humiques totaux.

Dans les deux domaines le rapport faible de AF/AH est dû à la présence d'une activité bactérienne dans l'importance est considérable. La décomposition rapide de cette matière organique et la transformation de ces produits dès l'interface eau/sédiment en composés plus stable est la principale cause donnant un taux faible de composés humiques et en revanche une élévation de la fraction d'humine. Cette fraction provient de la transformation sur place des composés humiques totaux et d'autre part, elle est livrée à cet état du continent. Ce qui explique l'hétérogénéité et l'absence de corrélation entre les différents composés humiques dans les deux domaines (Fig 39 et 40).

Les conditions du milieu différentes dans les deux zones ont édifié une qualité similaire de matière organique. Elle est riche en fraction stable (humine) et pauvre en composés humiques totaux. C'est uniquement les points prélevés dans les tapis algaires qui présentent un taux élevé en composés humiques d'origine autochtone.

La matière organique livrée au sédiment est immature dans la zone de diagenèse précoce. Ce résultat est typique des sédiments récents où la fraction humique représente l'essentielle des composés humiques.



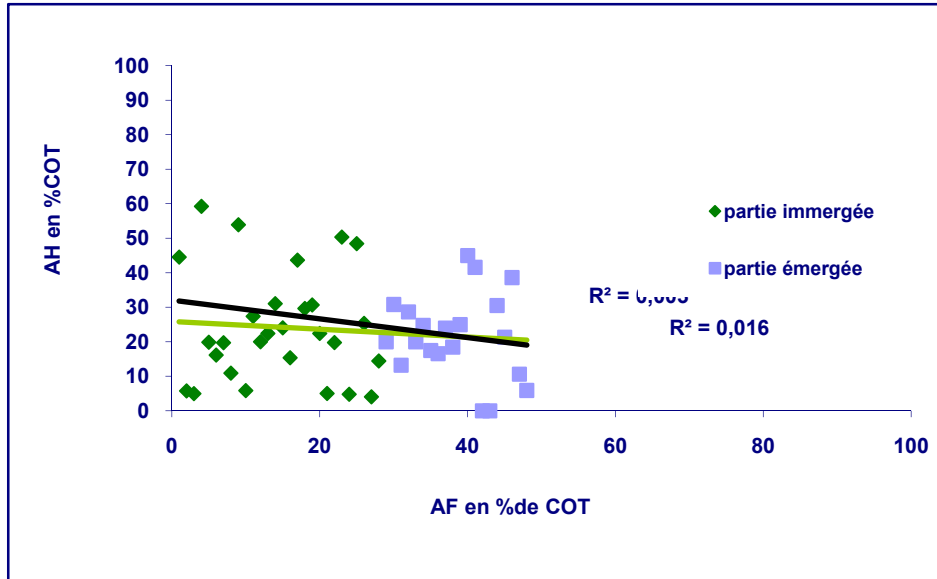


Figure 39 : Variation de l'humine en fonction des composés humiques totaux.

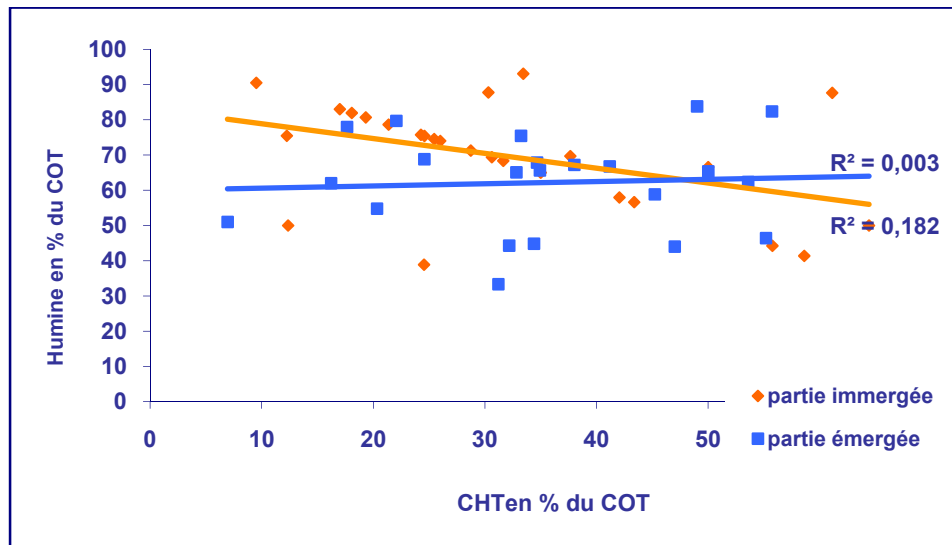


Figure 40 : Variation des acides humiques (AH) en fonction des acides fulviques.

IV – ETUDES DES BITUMES LIBRES

IV-1- INTRODUCTION

La fraction lipidique "libre" désigne la partie de la matière organique, extractible par les solvants organiques (le chloroforme, le dichlorométhane...) (Tissot et Welte, 1978 ; Fevrier, 1981).

Les composés lipidiques (acides gras libres ou combinés, hydrocarbures, terpènes, stérols, pigments, etc.), sont faiblement dégradés au cours de la diagenèse. Souvent, ils persistent dans les sédiments à la suite d'une altération minime (transformations chimiques ou biochimiques de la biomasse originelle par les bactéries) formant la fraction directement héritée des organismes vivants (Eglinton, 1972).

Dans cette fraction lipidique, un accroissement de la fraction hydrocarbure peut être remarqué aux dépens des acides gras et/ou des alcools et des autres composés constituant les lipides totaux (Pelet, 1978). Ainsi des transformations précoces par décomposition microbienne et par synthèse des chaînes d'hydrocarbures peuvent être notées (Tissot et Welte, 1978), entraînant ainsi un changement dans la longueur des chaînes aliphatiques. Les chaînes courtes sont rapidement dégradées par rapport aux chaînes longues (Cranwell, 1984 ; Kawamura et Ishiwatari, 1984 ; Meyers et *al.*, 1984).

Dans les sédiments récents, les hydrocarbures ne constituent qu'une fraction faible des composés lipidiques totaux qui à leur tour ne représentent qu'une fraction subordonnée de la matière organique sédimentaire (environ 10% du carbone organique) (Denant et *al.*, 1990).

L'étude de ces composés, renseigne non seulement sur l'origine du matériel organique (marine ou terrestre) et la nature des différents organismes qui composent celui-ci (phytoplanctons, zooplanctons, bactéries, etc.) (Lajat et *al.*, 1990), mais aussi, sur les conditions bio-physico-chimiques ayant régnées dans le milieu ainsi que sur le degré de dégradation de la matière organique (Saliot et *al.*, 1983).

L'étude de la composition des bitumes libres a porté :

- en premier lieu, sur le fractionnement et l'évaluation des quantités relatives aux trois fractions principales constituant l'extrait chloroformique total dessouffré : les hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques, les hydrocarbures aromatiques et les composés polaires (résines et asphaltènes),

-et en second lieu, sur l'analyse de la composition et de la distribution des n-alcane et des iso-alcane.

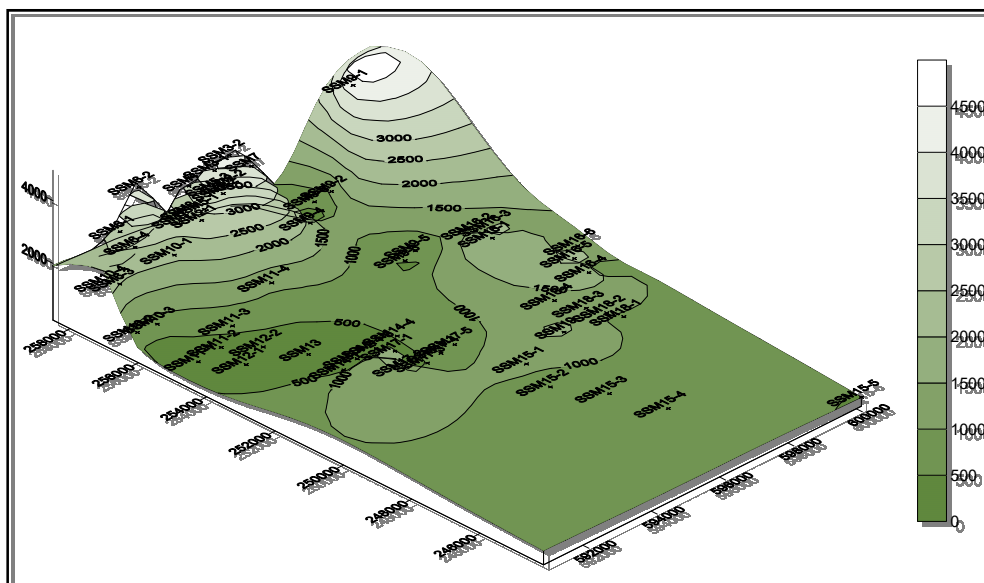
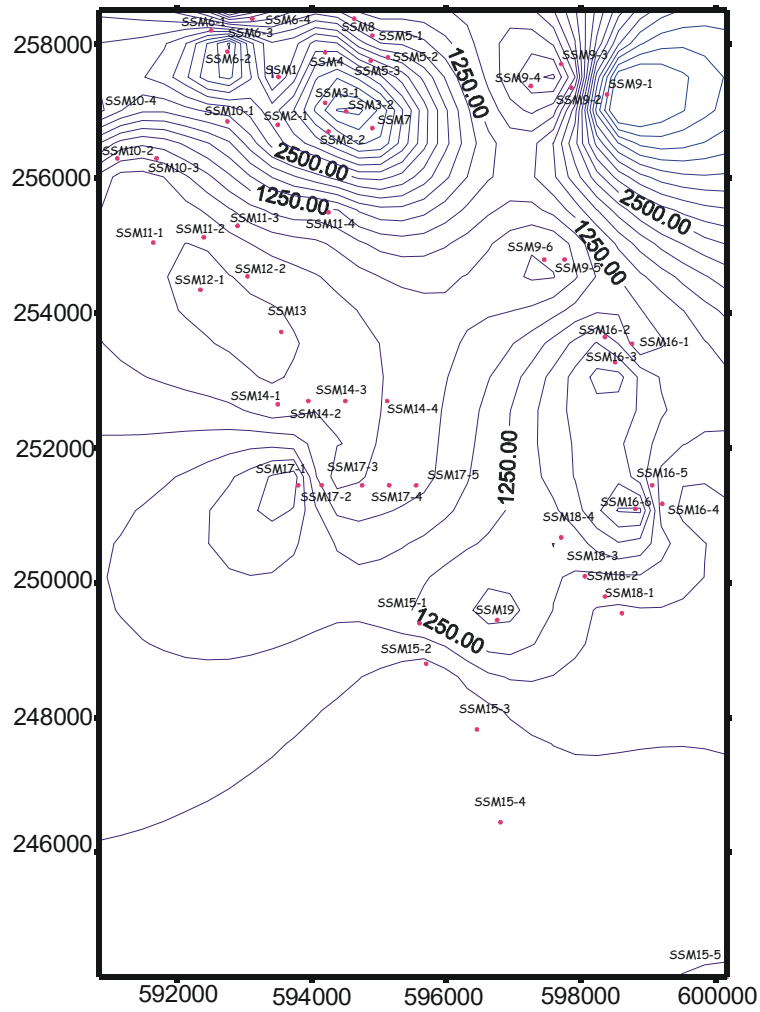


Figure 41 : Répartition latérale des extraits chloroformiques totaux (Ext.T) dans les sédiments de surface de la sebkha de Moknine. (Ext.T en ppm)

IV-2- EXTRAIT CHLOROFORMIQUE

Les échantillons de surface ont été extraits par un solvant organique (le chloroforme) afin d'analyser la fraction lipidique.

Les teneurs en extrait chloroformique exprimées en ppm varient de 133ppm à 11140 ppm (soit entre 2 et 43% du COT) dans les sédiments superficiels. Ils sont répartis dans la sebkha sous forme de zone de richesse (Fig. 41).

la zone immergée renferme également les teneurs les plus élevées. Les échantillons les plus riches en COT, S1, S2 et CHT renferme pareillement les valeurs les plus élevées en extrait chloroformique (Tab.12b). Rappelons que ces échantillons ont été prélevés dans les tapis de cyanobactéries au Nord et à l'Est. Ils sont ainsi le symbole d'une eutrophisation et non d'une pollution.

La zone émergée qui semble ne plus recevoir de matériel organique allochtone ou autochtone, renferme les taux les plus faibles. Ces derniers sont le témoin d'une origine essentiellement continentale et/ou d'une mauvaise préservation de ce matériel. Encore une fois de plus la zonation de l'extrait chloroformique total prouve l'effet de l'hydrodynamisme et la pérennité des eaux sur le mode de répartition et de préservation de la matière organique dans le bassin de Moknine.

Dans les deux zones immergées et émergée, nous avons remarqué l'absence de corrélation entre le COT et l'extrait chloroformique total (Fig. 42). Le matériel organique est très hétérogène dans toute la sebkha. En effet, celle ci semble être le résultat d'une origine différente, d'une nature différente et du degré d'évolution des composés organiques.

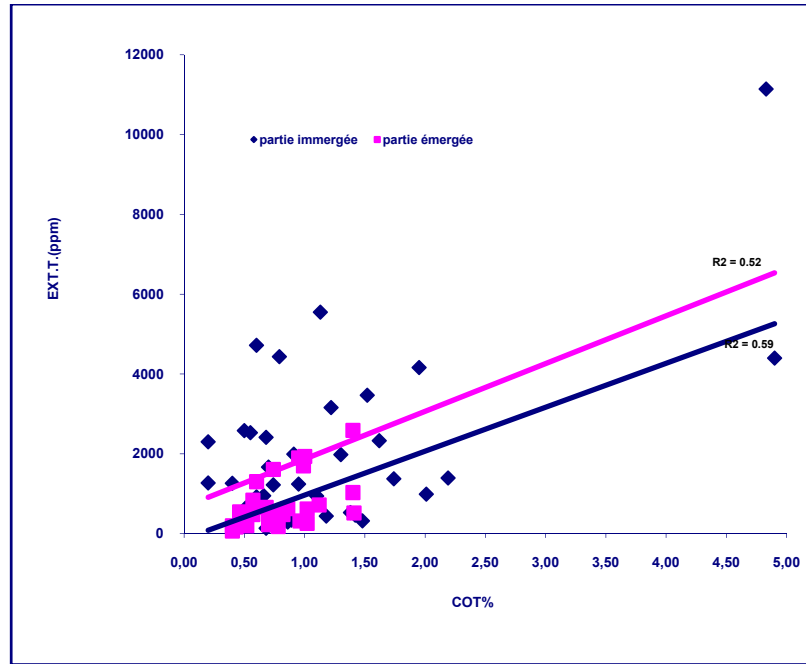


Figure 42 : Variation de l'extrait chloroformique total en fonction du COT.

IV-3-ANALYSE QUANTITATIVE DES DIFFERENTES FRACTIONS DE L'EXTRAIT LIPIDIQUE

Le taux des différentes fractions constituant l'extrait chloroformique total de chaque échantillon est reporté sur les figures (43 et 44) et le tableau 12b. L'examen de ces résultats montre que les composés polaires représentent l'essentiel de l'extrait chloroformique total (40 à 90% en poids).

Ce résultat est le témoin de l'origine biologique de la fraction lipidique, même dans les échantillons les plus riches en extrait chloroformique (Tab.12b et figures 41a et 41b).

Ceci confirme l'absence de pollution par les hydrocarbures. En effet, ces NSO compounds ou composés polaires représentent 80% des composés lipidiques totaux dans les fractions lipidiques héritées de la biomasse marine.

Ces derniers ne représentent qu'une fraction subordonnée dans les hydrocarbures provenant de sources de pollution, comme l'ont présenté Tissot et Welte (1984). Cependant nous avons mesuré dans certains échantillons des teneurs élevées en hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques >30% de l'extrait total (Tab.12b).

IV-4-CONCLUSION

La fraction des bitumes libres est très subordonnée. Elle fournit a priori un indice sur une origine biologique des hydrocarbures et non sur une origine à partir d'une quelconque source de pollution.

La même zonation de richesse trouvée aussi bien pour les paramètres quantitatifs (COT, S1 et S2) que les paramètres qualitatifs (CHT, Tmax et IH) est prouvé par la fraction lipidique. Une zone immergée riche en lipides libres et une zone émergée pauvre en cette fraction.

Les échantillons renfermant les quantités les plus élevées en COT, en S1, en S2 et en CHT sont également riches en lipides libres. Aussi bien au Nord qu'à l'Est, ces derniers ont été prélevés dans les tapis des cyanobactéries symbole d'eutrophisation des milieux.

En effet les échantillons prélevés au Nord montre bien ce phénomène. Dans cette partie, la sebkha reçoit les rejets de diverses origines (eaux usées, rejets d'industrie, domestique...) qui ont pour effet un enrichissement des eaux en éléments nutritifs d'où une prolifération algale voire même une eutrophisation. Ceci a pour effet un enrichissement des sédiments en matière organique halophile formée de microalgues et cyanobactéries, plus riches en lipides libres.

Loin de cette action anthropique, l'activité naturelle du bassin en présence d'eau permet la prolifération d'une biomasse qui après sa mort, augmente le flux du carbone organique sédimenté.

Le fractionnement de l'extrait chloroformique total de tous les échantillons aussi bien prélevés dans la zone immergée que la zone émergée, montre l'abondance des résines et d'asphaltènes. Ce résultat prouve que la richesse en extrait total dans la zone immergée est la conséquence d'une activité biologique et d'un apport d'une matière organique allochtone.

L'accumulation d'eau dans cette partie basse de la sebkha a joué un rôle dans l'enrichissement du flux par la production primaire et une augmentation d'échange à l'interface eau/sédiment. Cependant, la zone émergée ne recevant plus d'eau, ne peut plus fournir de matériel organique autochtone. Ceci explique la faible quantité d'extrait lipidique de la matière organique sédimentée.

IV-5- DISTRIBUTION DES HYDROCARBURES SATURES

IV-5-1– n-alcane

Une distribution bimodale se dégage de l'arrangement des n-alcane des sédiments de la zone immergée.

Le premier mode est centré sur les n-alcane légers de C15 à C21, avec une prédominance des n-alcane impairs et un maximum en nC15, nC17 et nC21. Cette disposition atteste de l'origine phytoplanctonique de la matière organique (Saliot et Tessier.,1977). Elle marque encore l'importance de l'activité de la biomasse dans cette partie basse (Fig.45 et 46).

Le deuxième mode est centré sur les n-alcane lourds de C23 à C33. Ce dernier montre aussi une imparité, avec prédominance des atomes de carbone impairs : nC27, nC29 et nC31. Une telle distribution atteste de l'origine des végétaux supérieurs de la matière organique.

Cette distribution bimodale est détectée aussi dans les échantillons prélevés à l'intérieur de la zone et dans l'oued Redjel Chiba.

Certains échantillons de la périphérie ou encore zone d'humectation ont donné des chromatogrammes unimodaux. Les n-alcane centrés en nC24-nC26 sans prédominance paire ou impaire indiquent la présence des tapis microbiens essentiellement de cyanobactéries. Par ailleurs, la présence d'isoalcane répartis entre les n-alcane (nC22- nC29) conforte ce résultat. Ces composés sont habituellement considérés comme marqueurs bactériens (Connan et *al.*, 1986).

La partie haute se caractérise par une distribution des n-alcane centrée sur les n-alcane lourds (C23-C33), attestant une fois de plus l'importance de la contribution continentale dans cette zone émergée.

La présence du docosane nC22 est attribuée selon Ten Haven et *al.* (1985) et Meyers et Ishiwatari (1993) à des micro-algues des milieux salés. Il est reconnu dans les sédiments des deux lacs salés Quero et Tirez en Espagne (Scheiber et *al.*, 2001).

Le docosane peut être aussi un indicateur d'une altération microbienne et d'une altération des déchets algaires.

Dans les échantillons prélevés au Nord de la sebkha le nC22 se présente en quantité très importante. Il est généralement accompagné d'une diminution des quantités de n-alcane nC15, nC16 et nC17 (Fig.45).

Il caractérise à la fois la présence des micro-algues des milieux salés, l'importance de l'activité bactérienne et la dégradation des déchets algaires dans le domaine immergé. Alors que dans le domaine émergé il reflète l'importance de l'activité bactérienne. En effet, les résultats des analyses précédentes confirment cette constatation.

IV-5-2- Indice d'imparité

Les CPI faibles indiquent une origine bactérienne comme il a été démontré par Blumer et *al.*, 1971 ; Gomez-Belinchon et *al.*, 1988 et Lipiatou et *al.*, 1992. Cependant les CPI élevés reflètent l'importance de la contribution terrigène à la sédimentation.

Dans la zone immergée CPI varient de 1.13 à 3.90. Les valeurs faibles et proches de l'unité sont calculées dans les échantillons prélevés au Nord près de la station d'épuration et à l'Est près de la zone abritée. Quelques échantillons à la périphérie de cette zone montrent des valeurs élevées.

A l'inverse, la zone émergée révèle des CPI plus élevées allant de 1.13 et 6.15. Cependant quelques échantillons prélevés à l'intérieur de cette zone et où l'eau peut parfois stagner ont des CPI proches de l'unité.

Dans les deux zones, le matériel organique est d'origine terrestre et lacustre. La présence de deux modes de répartition et des CPI variables est une preuve que le matériel organique sédimenté dans la sebkha est hétérogène de point de vue origine.

La partie émergée est plus influencée par les apports continentaux expliquant ainsi l'abondance de la matière organique ligneuse et le comblement de cette zone. En effet, cette zone est un lieu de stockage uniquement. Alors que la partie immergée, recevant une matière organique allochtone et une autre autochtone provenant essentiellement des phytoplanctons et des cyanobactéries joue le rôle de la nouvelle sebkha de Moknine.

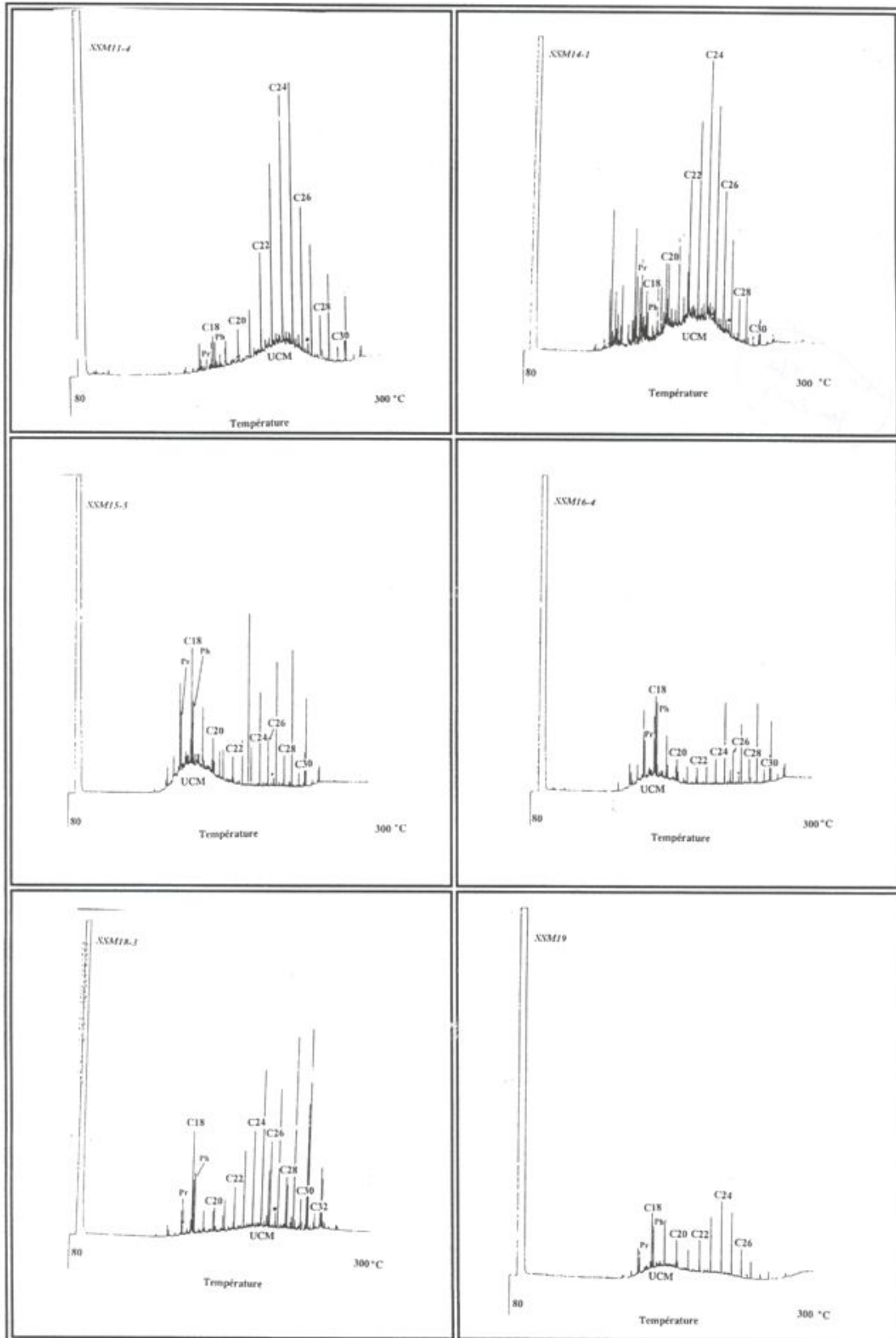


Figure 45 : Chromatogrammes des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques des sédiments de surface de la partie émergée.

(UCM : composés non résolus, Pr : pristane, Ph : phytane, * squalane)

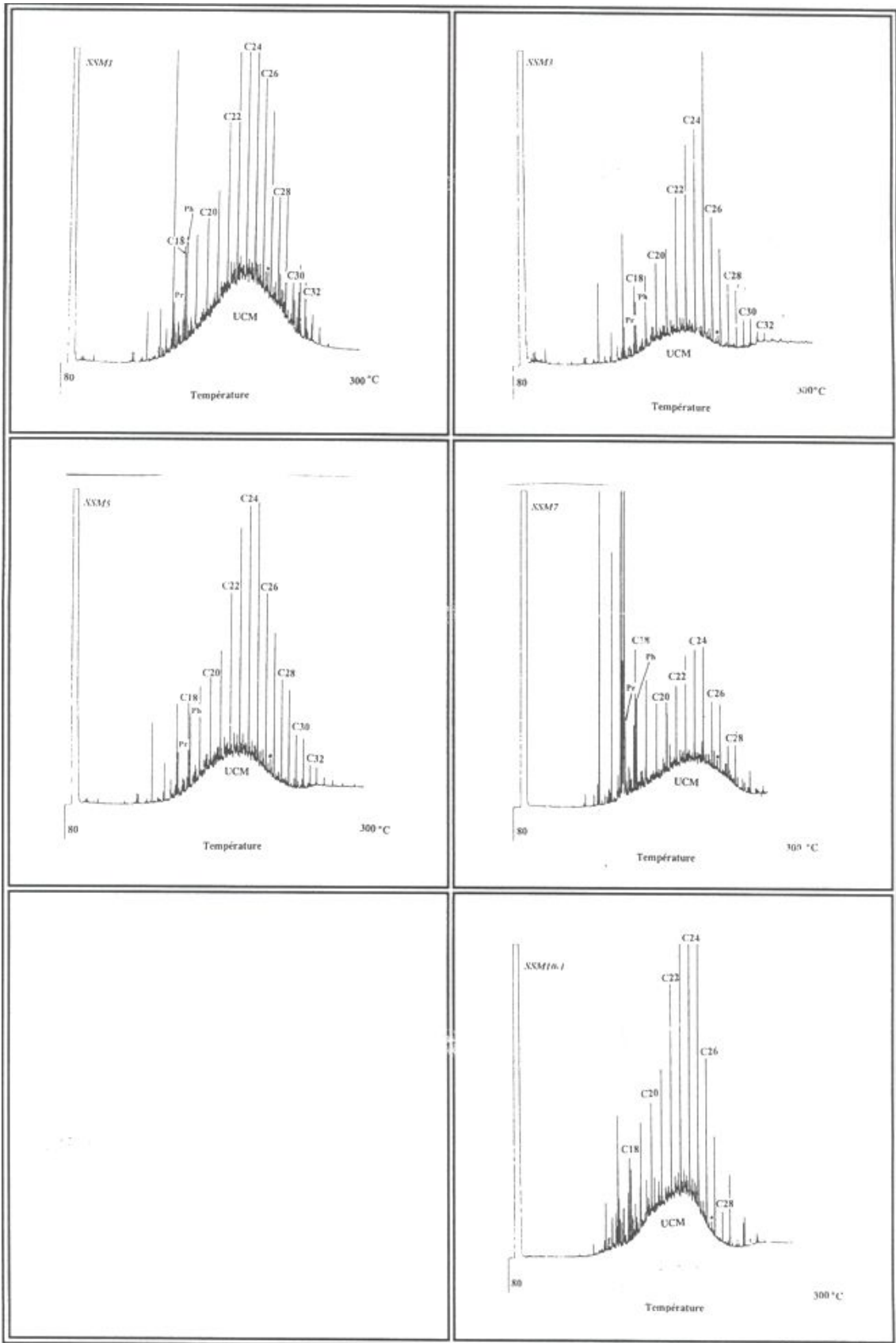


Figure 46 : Chromatogrammes des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques des sédiments de surface de la partie immergée.

(UCM : composés non résolus, Pr : pristane, Ph : phytane, * squalane)

IV-5-3- les iso-alcanes isoprénoidiques

Généralités

Les iso-alcanes incluent les iso-alcanes sensu stricto, les antéiso-alcanes et les isoprénoïdes.

Les isoprénoïdes sont parmi les composés les plus étudiés. Les isoprénoïdes acycliques de C15 à C30 ont été identifiés par Mc Kirdy et *al.*, 1984 comme lipides neutres constituants des bactéries méthanogènes et thermophyles. La présence d'une proportion d'isoprénoïdes acycliques considérable est un signe d'une biodégradation partielle.

Les isoprénoïdes les plus abondants sont le pristane (C19) le phytane (C20), l'isoprénoïde irrégulier en C25 et le squalane (C30).

Le pristane et le phytane sont des marqueurs biologiques significatifs de la présence de végétaux chlorophylliens dans les sources de la matière organique. En effet, ils sont des produits de diagenèse de la chaîne phytol de la chlorophylle (Brooks et *al.*, 1976). Ainsi, le pristane correspond à l'évolution de la chlorophylle dans un milieu oxydant alors que le phytane correspondrait à l'évolution de celle ci dans des conditions réductrices. Leur présence peut être attribuée aussi à des synthèses organiques à partir de la biomasse planctonique (Blumer et Thomas, 1965 ; Clark et Blumer, 1967) ou des bactéries et des archéobactéries (Chappe et *al.*, 1982 ; Illich, 1983 ; Goosens et *al.*, 1984 et Rowland , 1990).

Le rapport pristane (Pr) sur phytane (Ph) et les rapports Pr/nC17 et Ph/nC18 peuvent indiquer les conditions d'oxydation ou de réduction régnant dans le milieu durant la diagenèse précoce (Zhou et *al.*, 1990). Ce rapport serait inférieur à 1 dans un milieu réducteur et supérieur à 1 dans un milieu oxydant.

Dans les sédiments anciens, le rapport Pr/Ph >3 indique une origine terrestre de la matière organique ayant évolué dans des conditions oxiques. Cependant, un milieu hypersalin, anoxique est caractérisé par un rapport faible (< 0,6) (Peters et Moldowan, 1993). Le rapport Pr/Ph <1 peut être aussi un indicateur d'une activité bactérienne très importante (Duan, 1999 et Venkatesan et *al.*, 1982).

La présence de l'isoprénoïde irrégulier en C25 et de squalane sont des indicateurs de présence de bactéries halophiles et de salinité très élevée ou d'un milieu méthanogène des sédiments récents (Waples et *al.*, 1991 ; Brassel et *al.*, 1981 ; Rowland et *al.*, 1982 ; Jiang et Fowler, 1985 et Ten Haven et *al.*, 1988, Peters et Moldowan, 1993).

Dans un milieu sédimentaire, le squalane peut provenir de la réduction totale de son précurseur biologique le squalène. Des résultats récents sur les lipides d'archéobactéries (Ten Haven, 1988) telles que certaines bactéries halophiles ou méthanogènes suggèrent que le squalène et ses analogues de réduction progressive ont été détectés récemment dans ces organismes. Ils semblent jouer un rôle de régulateur dans le processus de transfert d'hydrogène en fonction des conditions oxydo-réductrices du milieu.

Le squalane pourrait être simplement un fossile moléculaire de telles archéobactéries. Ils correspondraient au terme ultime de la réduction du squalène (Brassell et *al.*, 1981). Tornabène (1978) a montré que les bactéries halophiles renferment des lipides constitués de phytanyl (C20) diethers et une concentration importante en squalène et en hydrosqualène. Dans les sédiments récents, l'isoprénoïde irrégulier en C25 est un marqueur biologique spécifique des bactéries méthanogènes (Brassel et *al.*, 1981 ; Rowland et *al.*, 1982).

Pristane (C19) et Phytane (C20)

L'examen des iso-alcanes montre que dans les sédiments de la sebkha le pristane et le phytane sont en général présents en quantités plus ou moins importantes (Tab.13). Une richesse supérieure en phytane par rapport au pristane est remarquée dans les échantillons. Ce résultat renforce l'idée de l'origine biologique des hydrocarbures.

Le rapport Pr/Ph varie de 0.22 à 0.89 dans la partie immergée et de 0.20 à 1.75 dans la zone émergée (tab.13).

Ce rapport est généralement inférieur à 1 (moyenne =0,5), dans les deux domaines immergé et émergé. Cependant, il illustre une évolution de la chaîne du phytol de la chlorophylle dans un milieu réducteur et un héritage de la biomasse dans la zone immergé. Ceci est bien représenté sur le diagramme de Waples (1985) où tous les échantillons sont placés dans le domaine anoxique (Fig.47). Par contre, les valeurs faibles et proche de l'unité dans la zone émergée sont dues à un héritage de la biomasse.

Ces deux composés peuvent être aussi des produits de synthèse biologique (Tissot et *al.*, 1977).

Les hydrocarbures analysés dans les sédiments de surface prélevés dans le domaine émergé sont essentiellement d'origine continentale. Cependant, les échantillons de la zone immergée sont répartie entre le domaine mixte (terrestre et lacustre et le domaine franchement lacustre (Fig.47).

Le Squalane

Dans les sédiments superficiels des deux zones nous avons remarqué l'apparition du squalane, pic assez important avant le nC27 (Fig45 et 46). C'est un indicateur d'une activité méthanogène. Dans la zone émergée, ce pic est remarqué uniquement dans les échantillons prélevés à l'intérieur où on note la présence d'une fine pellicule de sel. La présence de ce biomarqueur est le témoin des conditions environnantes anoxiques dans les sédiments superficiels.

Composés non résolus

Les hydrocarbures ramifiés et cycliques désignés sous le nom UCM (unresolved complexe mixture), se manifestent par une bosse ou « hump » dans les chromatogrammes, au-dessus de la ligne de base.

La présence d'UCM dans les chromatogrammes est un signe d'activité bactérienne. Il est d'autant plus important que cette activité soit intense (Giger et *al.*, 1980 ; Bigot et *al.*, 1990 ; Killips et Al-Juboori, 1990 ; Peters et Moldowan, 1993).

Le hump important sous nC19-nC25 avec un maximum en nC22 ou nC23, sans prédominance de n-alcanes pairs ou impairs implique une altération de détritux algaires par voie microbienne (Venkatesan et *al.*, 1982).

Dans les sédiments de surface de la sebkha de Moknine plusieurs modes de distribution d'UCM peuvent être distingués.

a- Les échantillons prélevés dans le domaine immergé montre deux modes de distribution (Fig.46).

Une bosse très importante apparaît dans les chromatogrammes des échantillons : SSM1, SSM5, SSM6, SSM7, SSM8, SSM16-4 dans la gamme C17-C25 avec un maximum en C23, C24 et C25.

Une bosse réduite, dans la gamme C19-C25 avec un maximum en C23, est remarquée dans les chromatogrammes des échantillons : SSM2, SSM3, SSM9-1.

b- Trois modes de distributions apparaissent dans les échantillons du domaine émergé (Fig.45).

Une bosse très importante apparaît dans les chromatogrammes des échantillons : SSM10-1, SSM10-4, SSM11-1, SSM11-4, SSM12-2 dans la gamme C17-C25 avec un maximum en C23, C24 et C25.

Une bosse réduite, dans la gamme C19-C25 avec un maximum en C23, est remarquée dans les chromatogrammes des échantillons : SSM9-1, SSM14-1 et SSM17-1.

Une bosse réduite, dans la gamme C17-C21, avec un maximum en C18 est observée dans celles de SSM15-4, SSM15-5 et SSM19.

L'absence de « hump » dans le reste des échantillons de surface indique l'absence des composés cycliques et d'une activité bactérienne réduite.

Les résultats ainsi obtenus montrent l'importance de l'activité bactérienne dans les sédiments de la sebkha de Moknine et la variation de type des UCM. Cette variation montre une fois de plus l'hétérogénéité du matériel organique sédimenté dans les premiers centimètres de la sebkha de Moknine. Elle confirme les résultats obtenus par l'analyse des n-alcanes, des composés humiques et des indices d'hydrogène.

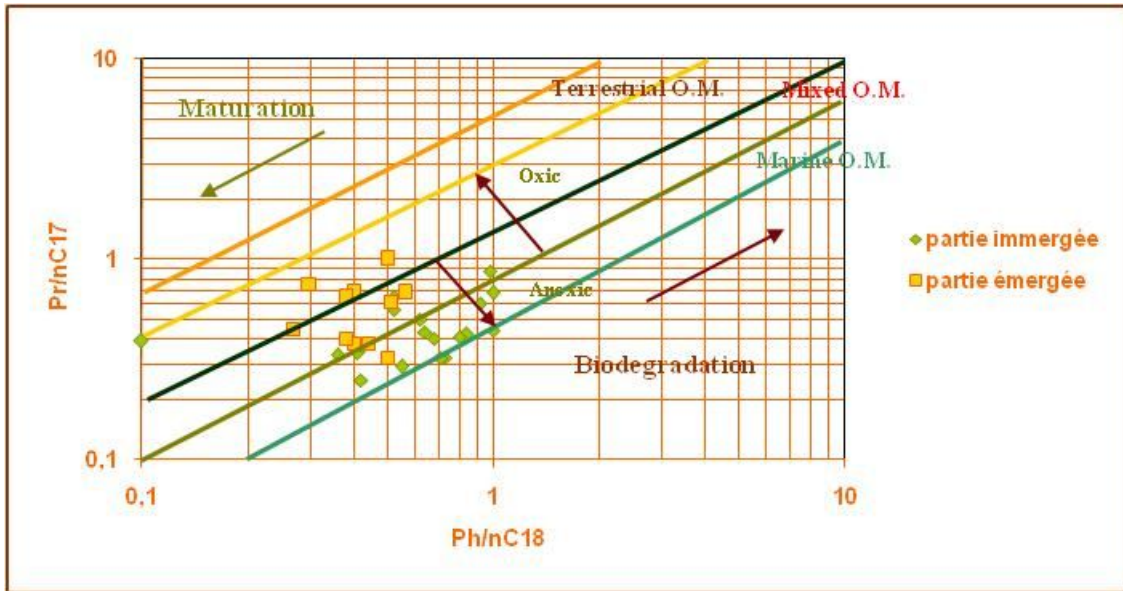


Figure 47 : Diagramme de Waples : $Pr/nC17$ en fonction de $Ph/nC18$ (sédiment de surface)

V- CONCLUSION

La répartition spatiale de la matière organique et de ces différents composés prouve la présence de deux domaines dans la sebkha de Moknine. Ces derniers se distinguent par une topographie, un hydrodynamisme et une accumulation d'eau différents. Ces paramètres ont influencé la distribution et l'évolution de la matière organique dans les premiers centimètres au cours de la diagenèse précoce.

Le domaine émergé est pauvre en COT, hydrocarbures libres (S1), hydrocarbures potentiels (S2), composés humiques (CH) et lipides totaux. Alors que le domaine immergé est riche en COT, S1, S2, CH et les lipides totaux.

La zone immergée accumule pendant la saison humide une quantité d'eau suffisante, induisant une productivité primaire manifestée par le développement des cyanobactéries et des bactéries photosynthétiques. Cette activité augmentera le flux organique. Ce flux est donc formé par le mélange d'une matière organique autochtone et allochtone ramenée par les eaux courantes. Ce matériel est mieux préservé. En effet, la couche d'eau joue aussi le rôle d'une barrière vis-à-vis de l'oxygène de l'air.

La zone émergée et découverte, subit une érosion superficielle par l'écoulement de l'eau et par l'action du vent dominant. L'eau est poussée vers la partie immergée ; le stock organique allochtone sédimenté est de ce fait dilué et dégradé.

La pyrolyse Rock-Eval montre que la matière organique dans la zone émergée est essentiellement de type III est donc ligno-cellulosique ; alors que celle de la zone immergée est hétérogène. Trois types de matière organique sont distingués sur le diagramme IH/Tmax : I (algair), II (lacustre) et III (ligno-cellulosique).

La matière organique ligno-cellulosique ou continentale ne provient pas uniquement du continent par le biais des cours d'eau, mais aussi grâce aux végétaux supérieurs de type halophile développés sur le sol de la sebkha.

La matière organique sédimentée dans la sebkha est immature. En effet, la température maximale est de quoi inférieure à 426°C.

L'étude qualitative des deux stocks organiques des zones immergée et émergée montre généralement une matière organique de qualité similaire.

L'analyse des substances humiques prouve la richesse du résidu stable (humine). Seuls les points prélevés dans les tapis algaires sont très riches en composés humiques totaux.

Le pourcentage des AF < 12% dans la zone émergée indique l'origine continentale de cette fraction. Le pourcentage de AF ne dépassant pas 10% dans la partie immergée montre l'origine lacustre des composés humiques totaux.

Les composés humiques sont en partie allochtones et en partie issu de l'activité de la sebkha. L'absence de corrélation entre ces composés montre l'hétérogénéité du matériel organique sédimenté.

La présence d'une activité dans la sebkha est corroborée par l'analyse des lipides libres. En effet, cette fraction est formée essentiellement par des composés lourds (résines et asphaltènes) confirmant l'origine biologique de bitumes libres et prouvant encore que la richesse dans la zone immergée est le résultat d'une activité de la biomasse originelle (cyanobactéries et bactéries photosynthétiques).

La distribution bimodale des n-alcanes dans la partie basse (mode C15-C21 et mode en C23-C33) montrent que ces composés proviennent d'une matière organique mixte lacustre et continentale. Cependant dans la zone émergée, un mode centré sur les lourds (C23-C33) est distingué. Cette répartition est typique des végétaux supérieurs. Quelques échantillons prélevés à l'intérieur de cette zone et dans l'oued Redjel Chiba, montrent une distribution bimodale. Dans ces points où l'eau a pu s'accumuler, il y a eu des traces d'activité lacustre. Rappelons la sebkha étant l'exutoire de la nappe phréatique, certaines zones restent humides.

Les conditions régnant dans la sebkha sont anoxiques dans la zone immergée et oxiques dans la zone émergée. Ceci se dégage du diagramme de Waples.

Le rapport AF/AH < 1 calculé dans la zone immergée n'est pas le symbole d'une oxicité du milieu. Il résulte plutôt d'une transformation rapide des composés labiles vers des composés plus stables qui s'échappent à la dégradation bactérienne. Cette activité bactérienne est très importante. Elle est du type méthanogène (présence du squalène). En effet la microfaune anaérobie fonctionne comme la microfaune aérobie et dégrade la matière organique avec la même efficacité. Ces composés ne sont pas toujours le résultat des processus de diagenèse mais aussi peuvent être issus de la biomasse qui synthétise des substances humiques.

L'importance de l'activité bactérienne se dégage de la présence d'UCM et du docosane nC22. Ces derniers sont identifiés sur tous les chromatogrammes et sont largement présents dans la partie immergée.

Le faciès organique évolue de la même manière que le faciès minéral. En effet, l'affinité de la matière organique au faciès fin se montre par la migration de celle-ci et son abondance vers l'Est et par conséquent l'apparition d'une zonation dans la sebkha.

CHAPITRE 5 :

Evolution de la Matière Organique dans le temps

INTRODUCTION

Les particules biologiques et sédimentaires interviennent directement dans la composition du sédiment, surtout en zone côtière où a lieu la plus grande partie de la production biologique. De plus, les particules sédimentaires agissent sur la production biologique par l'augmentation de la turbidité lors de la remise en suspension, surtout dans les zones peu profondes (Venkatesen, 1988).

Les sédiments (la vase) déposés au fond des lacs de quelques fractions de millimètre à quelques centimètres par an, enregistrent en permanence les changements des conditions de l'environnement (changement atmosphérique, érosion du bassin versant, changement de végétation, contamination accidentelle, etc.).

Les environnements récents, où les eaux sont riches en sels nutritifs sont des sites ayant une productivité biologique très importante. Ces milieux se caractérisent par l'abondance d'une matière organique d'origine marine essentiellement formée de cyanobactéries prolifiques dans ces lieux (Schreiber et *al.*, 2001).

Les sédiments dans les systèmes hypersalins sont riches en matière organique produite largement par les halobactéries (*Dunaliella* sp.) et les cyanobactéries telles que les *Microcoléus* (Cornée, 1982).

L'altération présédimentaire joue un rôle déterminant pour la sédimentation organique. Seule une fraction minime de la productivité primaire est fossilisée dans les sédiments. On conçoit alors que des variations minimales des conditions de cette minéralisation présédimentaire puissent conduire à des variations considérables des concentrations sédimentaires (Wapels et *al.*, 1980). La matière organique continentale subit une altération présédimentaire lors de son transport ce qui explique les faibles concentrations organiques initiales des sédiments d'origine continentale.

Tableau 3a: Pourcentage de la fraction minérale et de la fraction organique dans les sédiments marins (Orgon II)

Sédiment	Fraction minérale	Fraction organique	Total
Origine continentale	79%	1%	80%
Origine autochtone	18%	2%	20%

Dans les milieux évaporitiques où les sulfates et la halite sont prépondérants, la matière organique est peu abondante (0.5% et 0.25%). Ceci est dû au phénomène de dilution. Dans la sebkha de Abu Dhabi, Kenig et al. (1990) ont mesuré un taux très faible en COT de l'ordre de 0.1%. Dans les lacs salés Tirez et Quero (Espagne), Schreiber et al., (2001) ont noté que la matière organique subit une dégradation importante et qu'une faible quantité est préservée au centre. Elle est de l'ordre de 1% dans les sédiments de Quero et inférieure à 0.78% dans les sédiments de Tirez.

Dans le lac de Tanganyika, ce sont les sédiments profonds qui sont les plus riches en matière organique (Huc, 1988). Ce résultat est retrouvé dans les sédiments de la Mer Noire. Dans les sédiments récents de Nausha sea (Song et Li, 1995 ; Duan, 1999), le taux de COT varie entre 0.18% et 0.42%. Ces valeurs faibles sont attribuées à plusieurs facteurs : la productivité biologique, la nature du sédiment, le taux de sédimentation et l'environnement de sédimentation (Duan, 1999).

La richesse des sédiments en matière organique dans un lac est très variable et dépend de la richesse des eaux en nutriments apportées par les rivières et déversées dans le lac, mais aussi de la circulation de ces eaux dans le bassin et de la stratification des eaux dans le lac.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les conditions et les mécanismes qui ont présidé l'accumulation de la matière organique dans les sédiments de la sebkha de Moknine. Par ailleurs, les processus de dégradation/préservation des composés organiques dans les sédiments jouent également un rôle clef dans l'accumulation de la matière organique. Nous proposons ainsi d'évaluer l'influence et l'importance relatives de ces processus dans le temps et dans l'espace en vue d'expliquer la distribution spatio-temporelle du faciès organique sédimentaire dans les différents transects.

I- REPARTITION DES TENEURS EN CARBONE ORGANIQUE TOTAL

Les teneurs en carbone organique total (COT) enregistrées dans les différents échantillons des carottes sont reportées sur le tableau 10a.

L'examen de la variation de ces teneurs (Fig.44 a,b,c) permet de relever une grande hétérogénéité dans la distribution verticale et latérale de ces teneurs.

I-1 - Distribution verticale des teneurs en CO₂

L'examen de la distribution verticale des teneurs en COT dans toutes les carottes permet de noter les trois observations suivantes :

❶- D'une manière générale et quelle que soit la composition lithologique du sédiment, les teneurs en COT enregistrent des valeurs relativement élevées dans les niveaux de surface

0-20cm comparées à celles des niveaux profonds. Les teneurs chutent parfois sévèrement, surtout dans les carottes de la périphérie occidentale de la sebkha (SM13, SM16, Fig.44 b).

Ce résultat est habituel dans la mesure où il traduit l'effet de la dégradation de la matière organique dans les premiers centimètres du sédiment.

Les taux relativement élevés de la surface correspondent à la matière organique fraîchement déposée, tandis que les faibles taux enregistrés à partir de 20 cm de profondeur, correspondent aux résidus organiques issus de la dégradation bactérienne et microbienne de la matière organique de surface.

❷- Les deux carottes SM11 et SM9, enregistrent des teneurs exceptionnellement élevées en COT dans les horizons de surface (Fig.44c) ; celles-ci atteignent respectivement dans les trois premiers échantillons de chaque carotte : 2,01%, 1,72% et 1,04% pour SM9 et 4,83%, 1,9 9%, 4,33% pour SM11. Ces valeurs ne sont pas habituelles dans un tel milieu et ne peuvent s'expliquer que par une contamination organique à partir des rejets urbains de la ville de Moknine et ses enivrants, et qui précisément se font directement dans la sebkha. Les emplacements des carottes SM9 et SM11 correspondent au lieu de déversement de ces eaux usées.

Ces deux carottes seront donc considérées dans le reste du travail, comme des témoins de sédiments contaminés par des produits organiques allochtones et dont il serait intéressant de suivre l'évolution en fonction de la profondeur.

③- Le troisième paramètre contrôlant les richesses en COT est la nature lithologique du sédiment. En effet, les sables enregistrent des teneurs en COT plus faibles que celles enregistrées dans les sédiments argileux. Ceci est clairement exprimé dans les horizons profonds, où le passage à un niveau argileux s'accompagne d'une augmentation des teneurs en COT (Fig.44c). C'est le cas par exemple des carottes 13, 16, 10 et 17 où des pics de COT sont enregistrés au passage des sables vers les argiles.

Ce type d'évolution s'explique ainsi :

- les sables, sédiments grossiers poreux et perméables, favorisent la diffusion des agents oxydants qui entraînent une oxydation sévère de la matière organique,
- tandis que les argiles, sédiments fins non poreux et imperméables, s'opposent à la diffusion des agents oxydants et favorisent une meilleure préservation de la matière organique.

Trois principaux paramètres contrôlant les richesses de la matière organique dans les carottes peuvent être :

1 ➤ la nature lithologique dont les effets s'illustrent surtout dans les horizons de profondeur non contaminés par les apports organiques,

2 ➤ la contamination d'origine anthropique qui introduit d'importantes quantités de matière organique dans les sédiments de surface des carottes situées à proximité de la source de contamination,

3 ➤ la production organique naturelle qui aura tendance, à enrichir les horizons de surface en matière organique, par rapport aux horizons de profondeur.

Ces deux derniers paramètres s'expriment surtout dans les horizons de surface non encore profondément affectés par les processus diagénétiques ; leur effet s'atténue en profondeur où ils vont être relayés alors par le troisième paramètre qui est la lithologie.

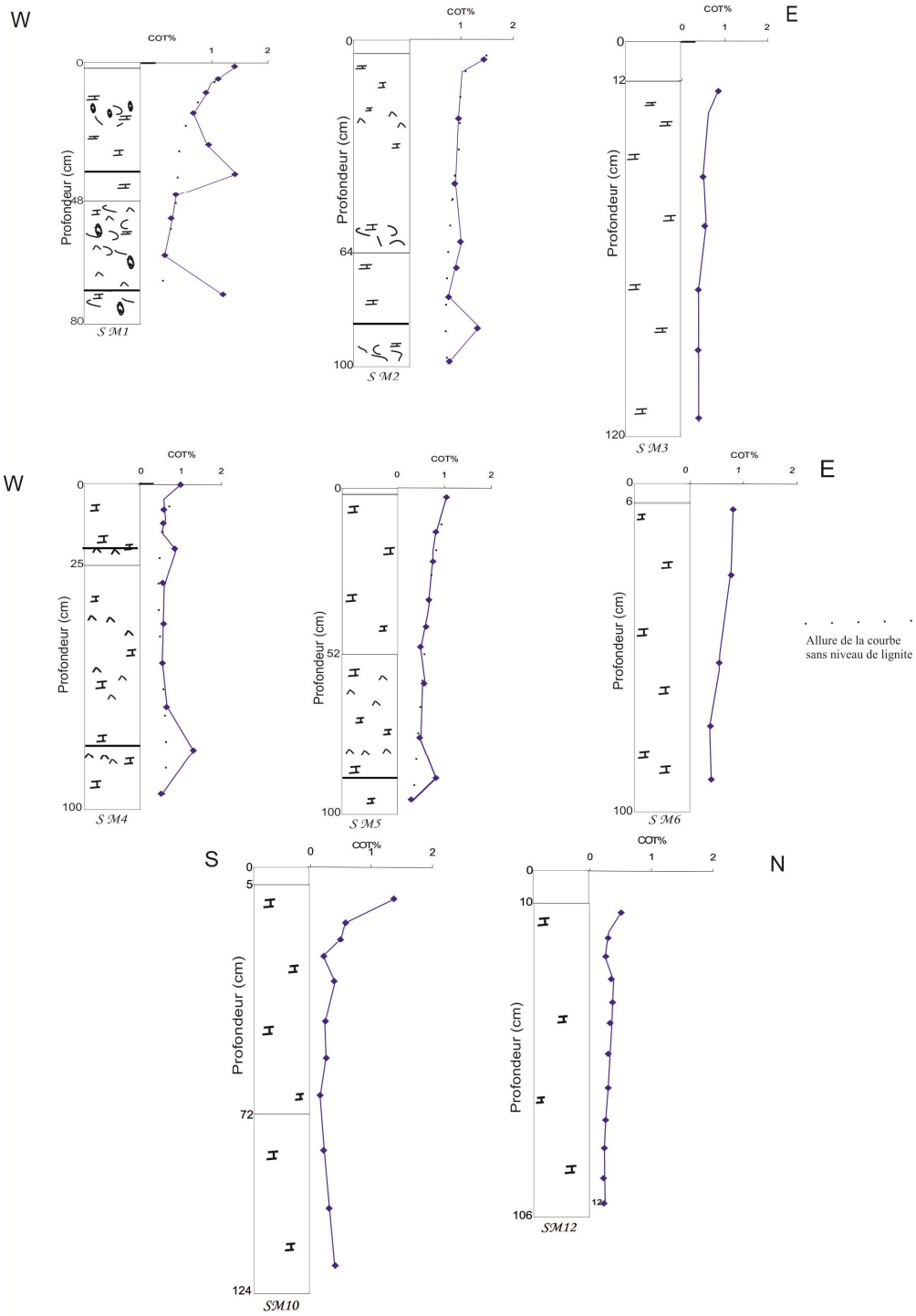


Figure 44 a : Variation du COT en fonction de la Profondeur

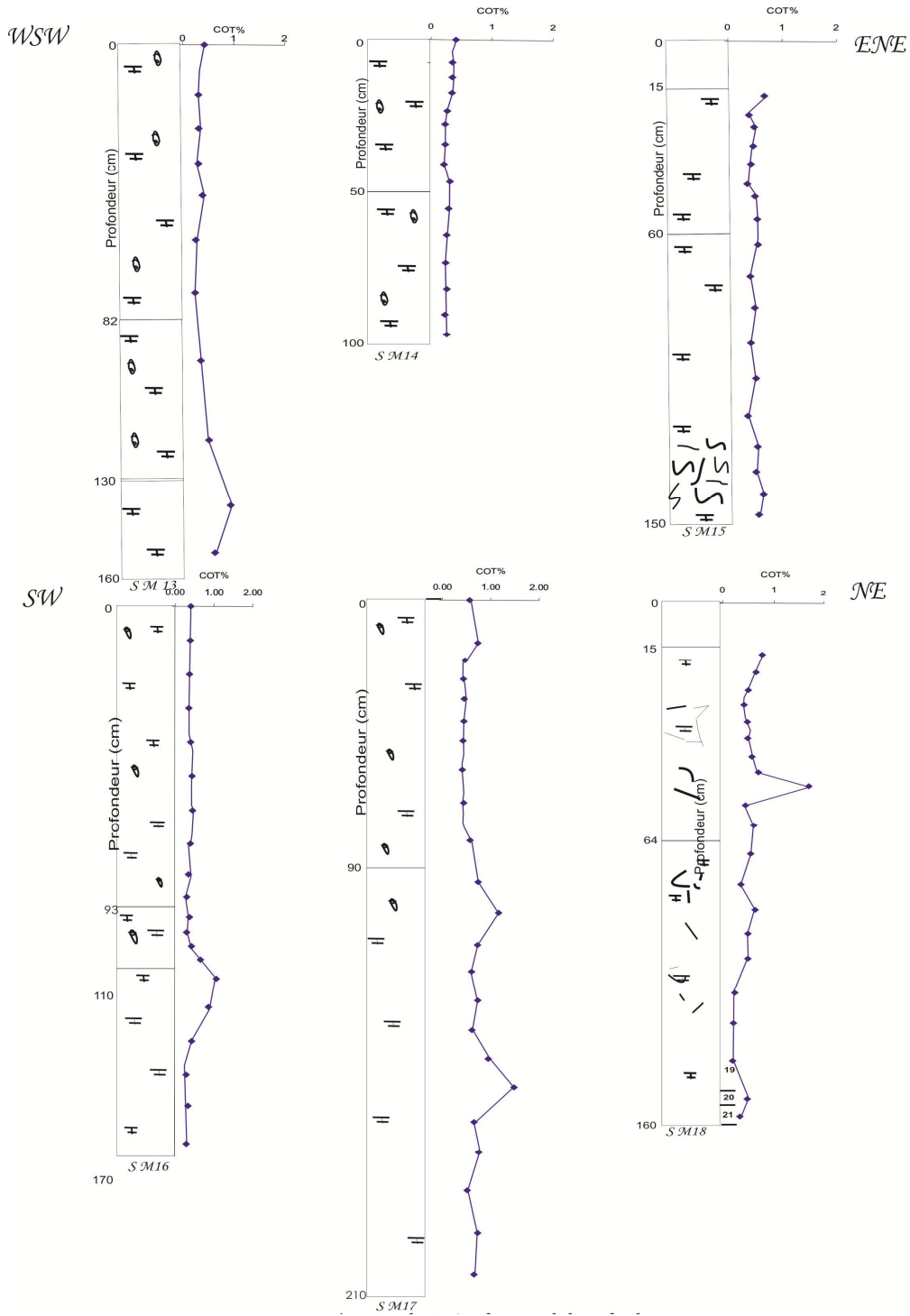


Figure 44 b: Variation du COT en fonction de la Profondeur

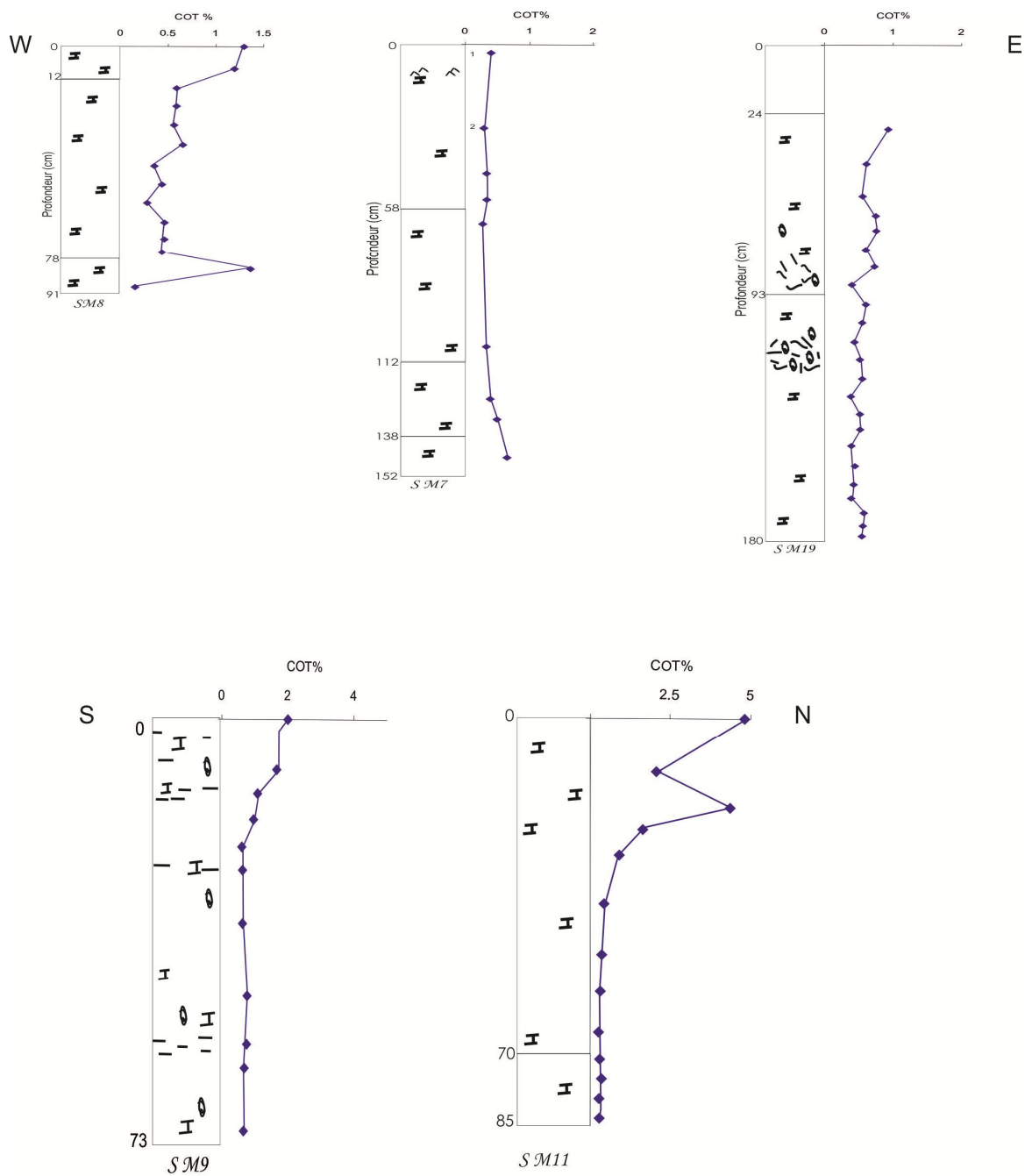


Figure 44c: Variation du COT en fonction de la Profondeur

i-2- Distribution latérale des teneurs en CO₂

L'examen de la distribution des teneurs en COT latéralement d'une carotte à une autre, à travers le bassin permet de relever les observations suivantes :

❶- Les richesses globales en COT dans les sédiments d'une carotte, sont généralement fonction de sa position dans la sebkha (Tab.10a et Fig.44 : a-c). Trois groupes différents peuvent être alors individualisés :

a) le premier est représenté par les carottes situées à la périphérie de la partie occidentale (SM13, SM16 et SM14) ; elles se distinguent par des niveaux pauvres en COT. Les teneurs restent en dessous de 0.5%,

b) le deuxième est représenté par les carottes situées à la périphérie de la partie orientale (SM1, SM4, SM8 et SM19) dont les niveaux lithologiques sont relativement plus riches en COT avec des teneurs comprises entre 0.43% et 1.16% en moyenne. Ces teneurs sont dans tous les cas supérieures à celles de la partie occidentale.

c) enfin, le troisième est représenté par les carottes en position centrale (SM3, SM6 SM12, SM15 et SM18,) dont les niveaux lithologiques enregistrent également une richesse relative en COT avec des teneurs comprises entre 0.30 % et 0.80% en moyenne.

Cette différenciation organique latérale dans la sebkha, rappelle les conclusions déduites de l'étude lithologique et de l'étude organique des sédiments de surface, où nous avons attiré l'attention sur le caractère progradant de la sédimentation, et sur la direction de la progradation qui s'effectue de l'Ouest à l'Est.

Les résultats de la distribution des teneurs en COT nous montrent que les richesses en matière organique sont plutôt liées aux matériaux fins, argileux et argilo-silteux déposés au centre ou à l'Est de la sebkha c'est à dire dans les zones couvertes d'eau (Fig.44 :a-c).

La bordure ouest qui se comble progressivement par les dépôts détritiques sableux n'est pas favorable à l'accumulation et la préservation de la matière organique. Elle restera en suspension sous l'effet de l'agitation et du vannage et ne se décante que plus loin vers le centre où l'action des courant se fera moins sentir.

C'est la raison qui explique la pauvreté en matière organique des faciès sableux déposés sur la bordure occidentale de la sebkha.

②- La deuxième observation qui mérite d'être relevée concerne l'allure différente des courbes d'évolution des teneurs en COT en fonction de la profondeur dans les carottes étudiées.

Dans les carottes SM1, SM4, SM8, SM9 et SM11, les teneurs en COT diminuent brutalement à une profondeur relativement faible (20cm) pour garder une valeur faible et constante en profondeur.

SM3, SM6, SM15 et SM18 montrent un profil différent avec des teneurs en COT gardant en profondeur des valeurs proches de celle de la surface. Une telle différence d'évolution de COT est interprétée comme étant le résultat d'une cinétique de la dégradation de la matière organique en dessous de l'interface eau/sédiment rapide dans le premier cas et lente dans le deuxième cas.

La cinétique rapide se traduit par :

⇒ une dégradation biologique rapide de la matière organique dans les premiers centimètres du sédiment se traduisant par une chute brutale des teneurs en COT à une profondeur relativement faible (20cm),

⇒ une stabilisation des composés organiques par polymérisation et insolubilisation entraînant la soustraction du résidu organique insoluble formé aux processus de la dégradation microbienne,

b) par contre une cinétique lente se traduit par :

⇒ une dégradation lente de la matière organique d'où un profil de COT qui ne montre pas de chute brutale en profondeur mais au contraire une allure uniforme où les teneurs en COT en profondeur restent comparables à celle en surface,

⇒ un maintien des composés organiques à un stade relativement instable labile, expliquant l'allure en « dent de scie » du profil du COT en profondeur et illustrant parfaitement que la matière organique n'a pas encore atteint son stade d'insolubilisation définitif, comme c'est le cas pour le premier lot.

De telles différences sont interprétées comme étant le résultat des conditions physico-chimiques du milieu de dépôt qui ne sont pas les mêmes dans les différentes parties de la sebkha.

L'évolution des teneurs en COT dans le cas du premier lot à cinétique d'évolution rapide est typique d'un milieu oxydant où la dégradation aérobie de la matière organique entraîne une minéralisation et une recombinaison rapide des résidus de dégradation. Par contre l'évolution des teneurs en COT dans le cas du deuxième lot à cinétique d'évolution lente est typique d'un milieu anoxique où la dégradation anaérobie moins efficace que dans le cas du milieu oxydant entraîne une meilleure préservation de la matière organique et son maintien à un stade moins évolué diagenétiquement. Ce phénomène est amplifié par la formation d'une pellicule de sel au-dessus des sédiments. Le sel empêche la diffusion de l'oxygène dissous à travers l'interface eau/sédiment et donc accentue les processus anaérobies dans les eaux interstitielles. En effet, la plupart des profils de COT illustrant une cinétique lente d'évolution correspondent aux carottes coiffées d'une pellicule superficielle de sel qui scelle le sédiment.

③- La troisième observation concerne l'évolution des profils de COT dans les carottes ayant atteint la couche argileuse profonde et qui montrent une augmentation des teneurs en COT au passage des sables vers les argiles.

Nous avons déjà discuté de ce problème dans la partie lithologique où nous avons conclu que ces niveaux argileux surmontés par les niveaux argilo-sableux puis sableux se sont déposés à une époque où la sebkha était plus étendue qu'actuellement. De ce fait, les sables qui les recouvrent correspondent à une phase de comblement. Cette phase a entraîné un recul de la sédimentation argileuse vers les parties centrale et orientale de la sebkha, plus profondes que la partie occidentale.

L'avènement des sables dans cette partie occidentale de la sebkha s'est accompagné par une migration de la matière organique. Le « Shift » négatif enregistré de bas en haut des argiles vers les sables dans les carottes SM13 et SM16 traduit bien cet état de fait et confirme les conclusions dégagées lors de l'étude lithologique quant à l'évolution de la sebkha dans le temps.

④- La dernière observation concerne les minces niveaux noirâtres intercalés en profondeur dans les sables des carottes périphériques de l'Est de la sebkha (SM1, SM2, SM4 et SM5). Ces niveaux noirâtres sont systématiquement enrichis en COT par rapport aux niveaux sableux qui les contiennent et constituent donc une véritable singularité lithologique et organique au sein de ces faciès (Chairi, 1997). Ces niveaux sont enregistrés dans les carottes : SM1 à 27 cm et 70 cm de profondeur, SM4 à 24cm et 85cm, SM2 à 74cm et SM5 à 94cm.

Ils correspondent visiblement à des niveaux d'accumulation in situ de végétaux supérieurs profondément transformés par la dégradation microbienne mais dont une large part restée préservée.

Tenant compte du mode de remplissage de la sebkha et de la dynamique qui s'y est développée au cours du temps, ces "accidents" organiques sont probablement les témoins de périodes d'inondation maximum de la sebkha, par les eaux douces, correspondant vraisemblablement à des saisons exceptionnelles de forte pluviosité. L'augmentation de la tranche d'eau qui en résulte a détruit le couvert végétal qui s'y était développé, le couvrant par la même occasion d'une pellicule de sable détritique. Ce phénomène a entraîné une meilleure préservation de la matière organique issu de ce couvert végétal détruit. La couverture sableuse a soustrait partiellement le matériel organique des processus de dégradation biologique, donnant ainsi un faciès organique sous forme de niveau lignifié.

La présence de ces niveaux riches en matière organique au sein des masses sableuse sera interprétée comme un marqueur lithologique et organique, de périodes successives d'inondation de la sebkha, consécutives à des saisons où la pluviosité à été particulièrement élevée.

L'évolution, dans le temps d'un tel système est expliquée ainsi :

⇒ en période d'inondation, un cycle sédimentaire s'initie par un niveau organique correspondant à la destruction soudaine d'un couvert végétal qui est surmonté par une couverture sableuse dont l'épaisseur sera proportionnelle à celle de la tranche d'eau.

⇒ le comblement total d'une partie de la sebkha par les sables, permet alors le retour du couvert végétal et l'arrêt de la sédimentation sableuse.

Une telle situation se maintiendra jusqu'à la prochaine inondation de la sebkha, qui donnera lieu à une nouvelle séquence de dépôt de même type.

Ce mode est remarqué sur la bordure orientale qui jusqu'à la période actuelle permet le développement d'un couvert végétal halophile. Cependant les profils de la bordure ouest n'ont pas donné le même type de séquence. Le réseau hydrographique plus abondant de ce côté, le drainage des eaux vers l'Est et l'apport continu de sédiment détritique sont les causes de l'absence du développement des végétaux et par conséquent des séquences : faciès organique-faciès détritique sableux. Les teneurs en COT sur cette bordure sont plus faibles que celles enregistrées à l'Est et au Nord

II – ANALYSE DE LA MATIERE ORGANIQUE PAR PYROLYSE ROCK-EVAL

Les résultats de la pyrolyse Rock-Eval effectuée sur tous les échantillons sont reportés sur le tableau 10a et les figures 45 et 46.

II-1- Aspects quantitatifs

II-1-1- Les composés hydrocarbonés libres

L'examen de la distribution des teneurs en composés hydrocarbonés libres (S1) dans les échantillons des différentes carottes permet de dégager les observations suivantes (Fig.45 a-c):

❶- Les échantillons des carottes SM9 et SM11 prélevés à proximité des zones de rejets d'eaux usées montrent dans les horizons de surface de très fortes teneurs en composés hydrocarbonés libres atteignant jusqu'à 7430 ppm dans le cas de SM9 et 7000 ppm pour SM11.

Nous avons déjà attiré l'attention sur la particularité de ces deux carottes et nous avons déjà mis en évidence à travers les analyses du COT la forte contamination par les rejets de la station d'épuration qui a affecté les sédiments des zones correspondantes.

Cette observation est clairement confirmée par la distribution des teneurs en S1 qui avec des teneurs de plus de 7000 ppm, montre un fort degré de contamination des sédiments par des composés hydrocarbonés libres provenant des rejets effectués dans la sebkha.

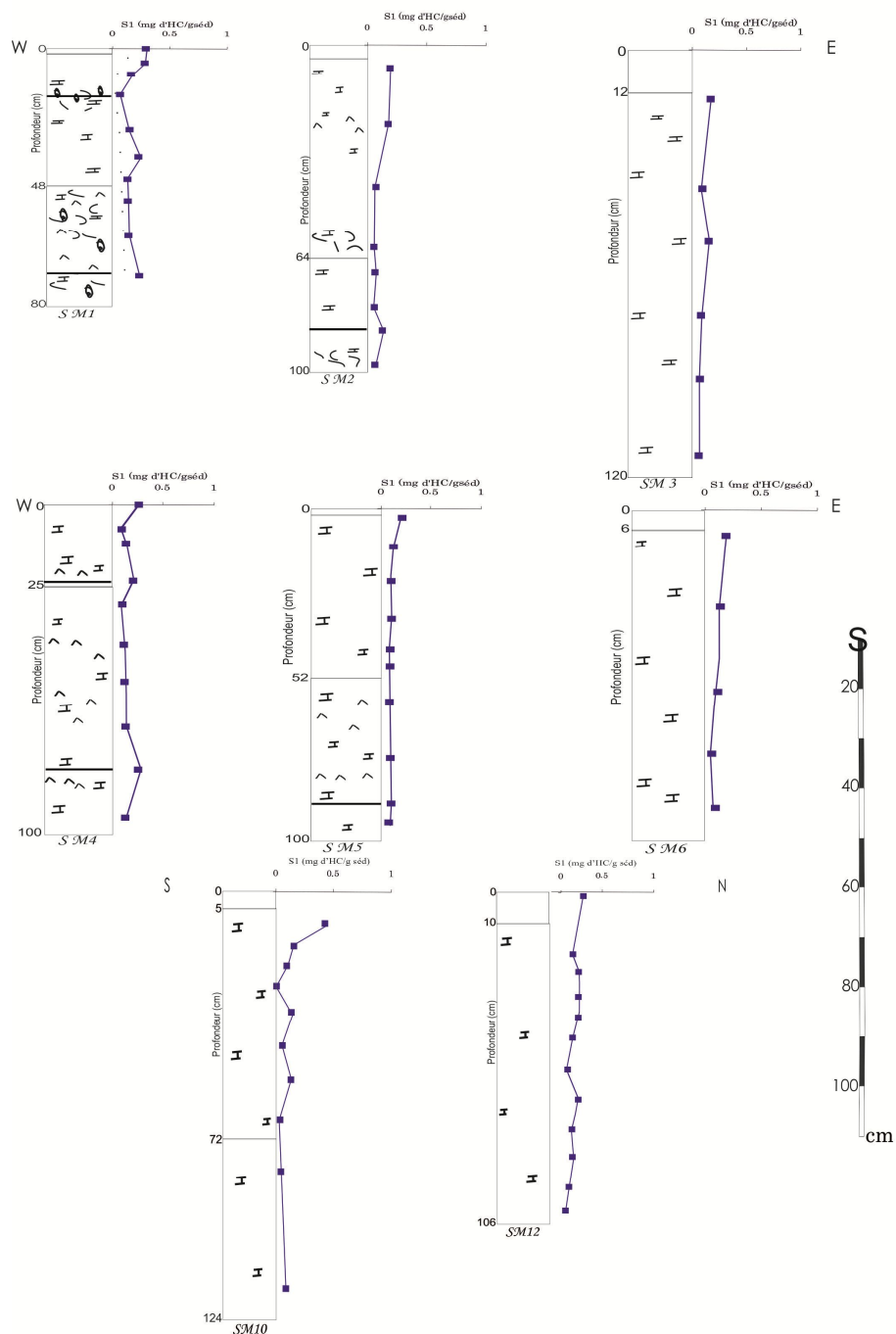


Figure 45a: Variation des hydrocarbures libres S1 en fonction de la Profondeur

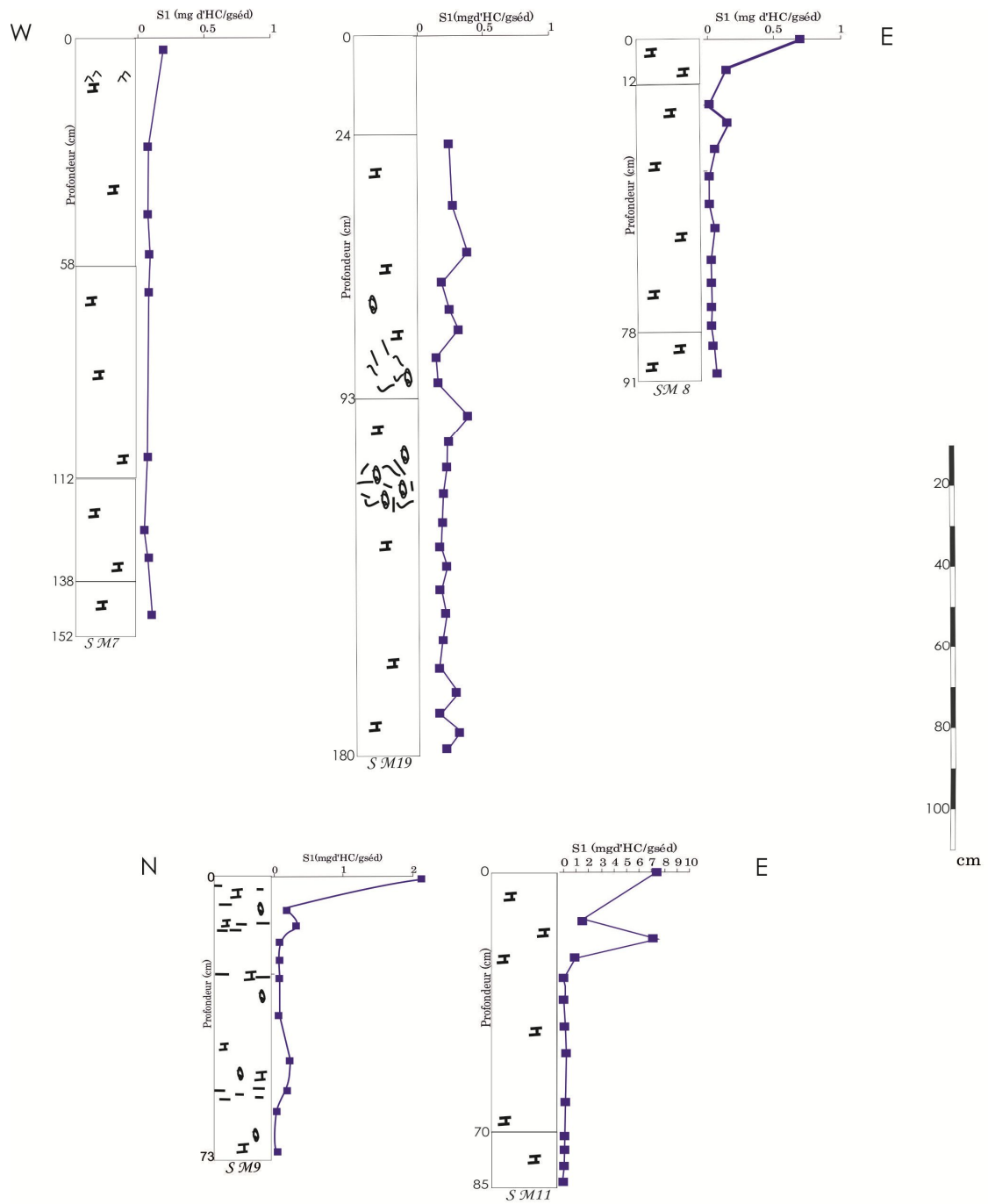


Figure 456 : Variation des hydrocarbures libres S1 en fonction de la Profondeur

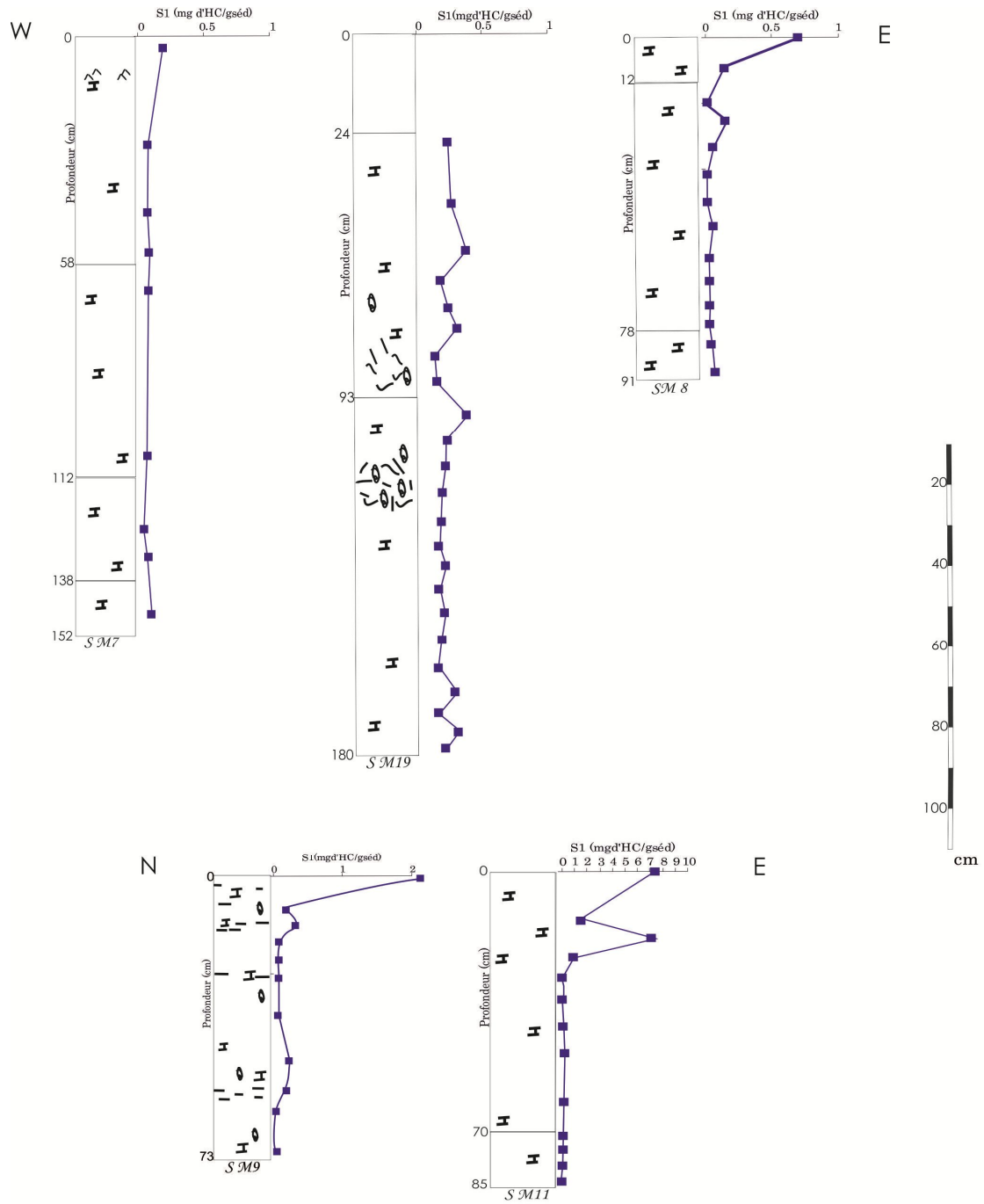


Figure 45c: Variation des hydrocarbures libres S1 en fonction de la Profondeur

②- A l'exception des carottes SM9 et SM11 tous les échantillons des autres carottes enregistrent généralement des teneurs inférieures à 500 ppm. Ces teneurs restent comparables à celles caractérisant les sédiments actuels et montrent que les composés hydrocarbonés S1 sont pour la plupart hérités de la biomasse.

③- La variation des teneurs en S1 en fonction de la profondeur dans les différentes carottes montre une évolution dans l'ensemble comparable à celle des teneurs en COT. Les teneurs sont relativement élevées en surface et diminuent rapidement vers 20 cm de profondeur, illustrant la cinétique rapide de dégradation de ces composés dans les sédiments interstitiels.

④- Quel que soit l'emplacement de la carotte, les niveaux sableux enregistrent généralement les teneurs les plus faibles en S1 tandis que les faciès argileux enregistrent les teneurs les plus élevées en S1, reflétant la grande affinité des argiles avec les composés hydrocarbonés. Les faciès intermédiaires argilo-sableux et sablo-argileux occupent une position intermédiaire avec des teneurs également intermédiaires entre celles des argiles et celles des sables.

Cette affinité entre les argiles et les composés hydrocarbonés libres s'observe également clairement dans certaines carottes périphériques où le passage en profondeur des sables vers les argiles s'accompagne souvent d'une augmentation des teneurs en S1. La même situation s'observe au passage des sables vers les niveaux noirâtres.

⑤- La plupart des carottes montrent une bonne corrélation positive entre les teneurs en S1 et celle en COT reflétant une bonne homogénéité de la matière organique du point de vue origine (Fig.47 a-b).

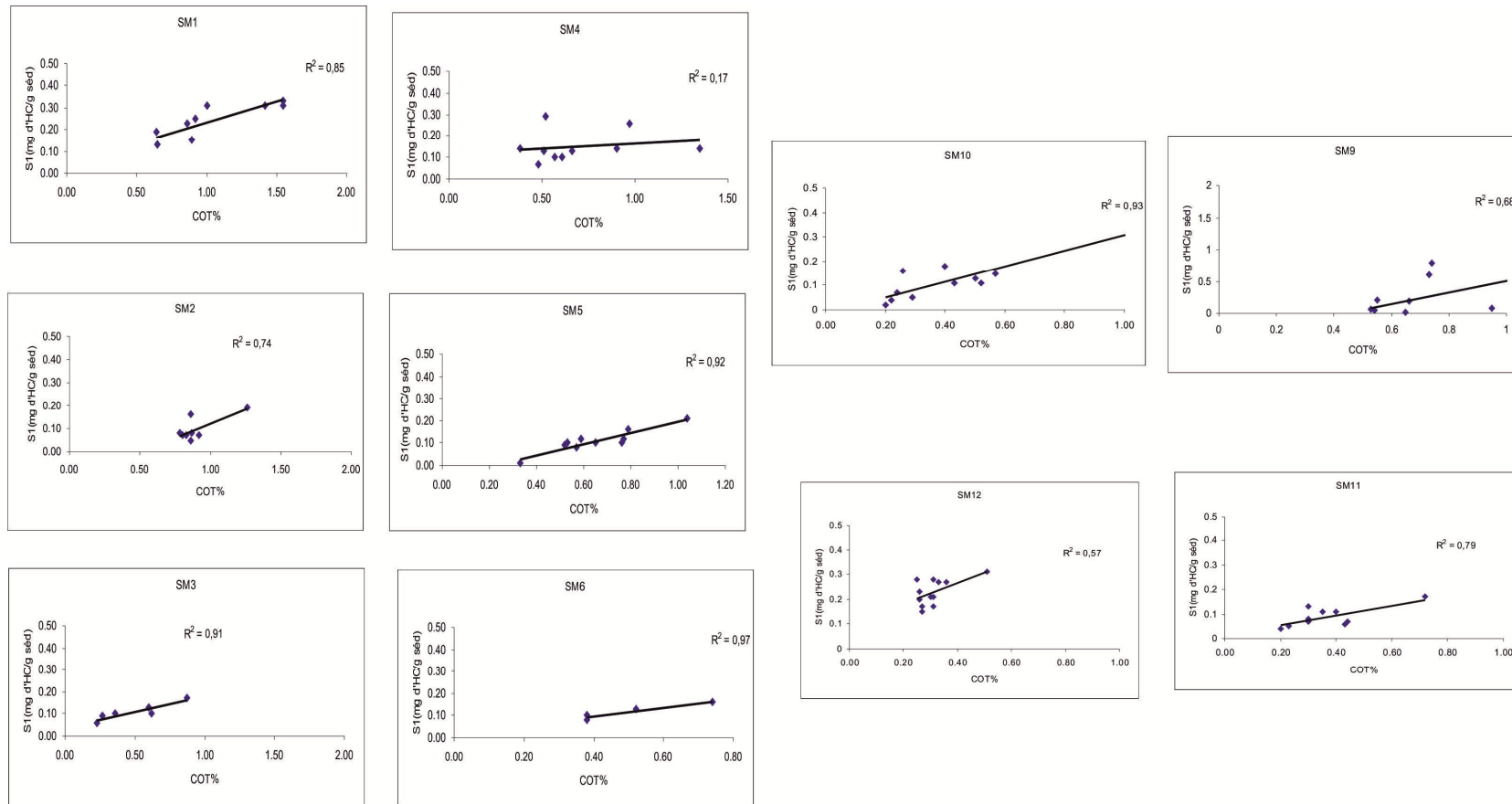


Figure 47a : Variation des hydrocarbures libres (S1) en fonction du COT.

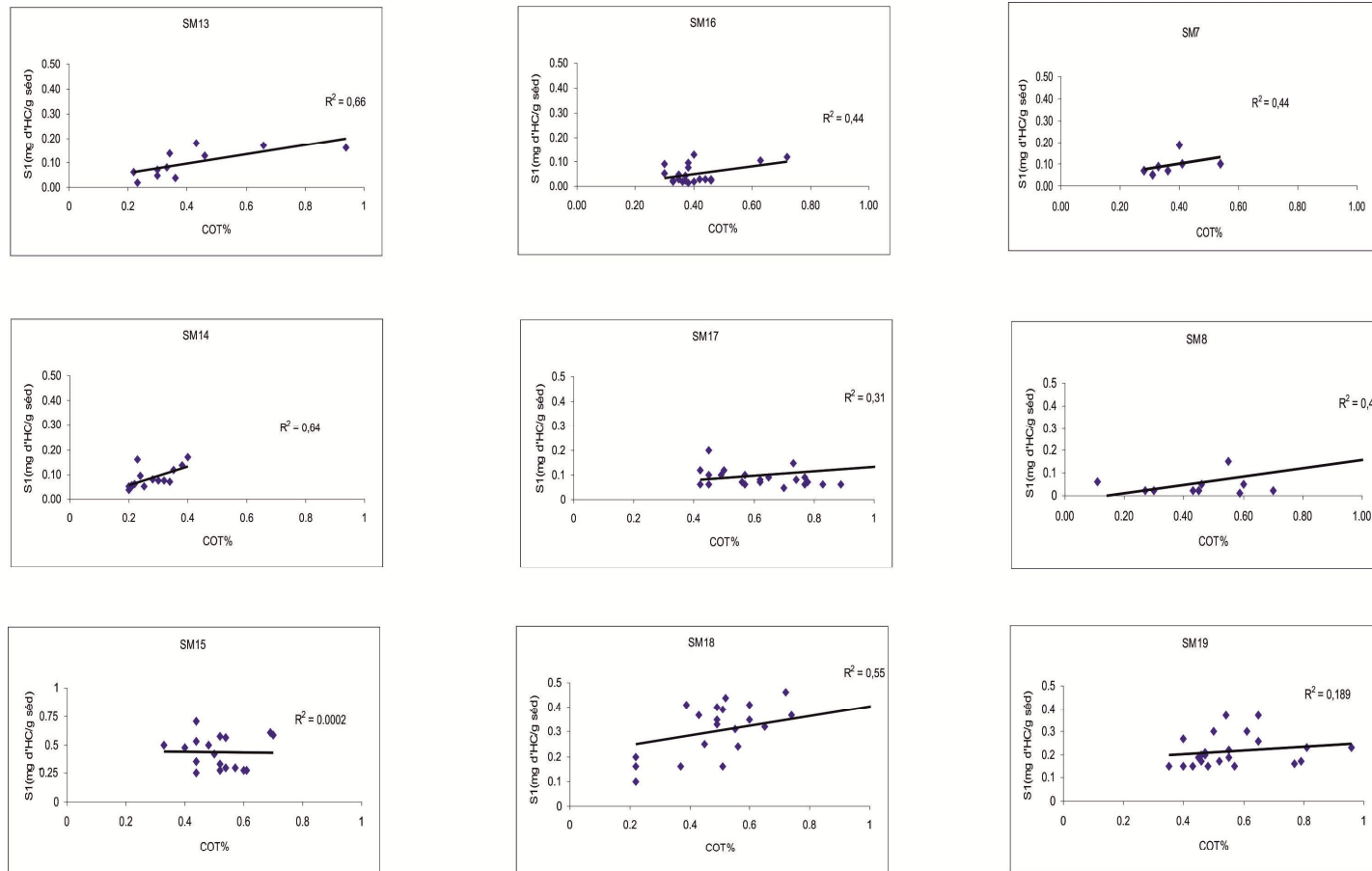


Figure 476 : Variation des hydrocarbures libres (S1) en fonction du COT.

II-1-2- Les composés hydrocarbonés potentiels

L'observation des profils de l'évolution des hydrocarbures potentiels dans les différentes carottes prélevées dans la sebkha de Moknine montre (Fig46 : a-c):

❶- Les horizons de surface des carottes SM9 et SM11 enregistrent également des valeurs très élevées en composés hydrocarbonés potentiels de l'ordre de 10mg HC/g séd pour SM9 et 23mg HC/g séd pour SM11. Ces teneurs sont le symbole de la contamination des horizons de surface au Nord par les rejets des eaux usées des bassins de traitement de la station d'épuration.

❷- Les valeurs relatives aux composés hydrocarbonés potentiels (S2) sont en générales moyennes et ne dépassent pas 0.5mg HC/g séd. Elles sont caractéristiques d'une matière organique essentiellement d'origine continentale.

❸- En général les valeurs de S2 corrélient positivement avec celles de S1 dans toutes les séquences lithologiques de la sebkha (Fig.48). Elles montrent un gradient de concentration croissant de la périphérie vers le centre de la sebkha. En effet comparé à la partie centrale, les sédiments de la périphérie sont pauvres en matière organique. Celle ci est moins bien préservée en bordure où les sédiments sont sableux.

❹- La variation verticale des composés hydrocarbonés potentiels montre une diminution de la surface vers la profondeur dans la totalité des carottes. Cette diminution est toujours plus remarquable dans les carottes représentatives de la périphérie où dominent les sables.

L'affinité entre le faciès fin et le matériel organique s'exprime également bien dans le passage des sables vers les argiles dans les carottes périphériques dans lesquelles les valeurs augmentent comme dans le cas du COT et de S1.

⑤- Les niveaux noirâtres de lignite renferment des valeurs élevées en S2 expliquant la richesse de la colonne sableuse déposée à l'Est en composés hydrocarbonés. Cependant la bordure occidentale siège du maximum d'apport de matériel détritique se caractérise par une matière organique sujette à une oxydation très importante. Les valeurs enregistrées dans les carottes SM13 et SM16 ne dépassent pas 0.2mg d'HC/g séd dans les horizons sableux. Elles reflètent l'état d'un matériel organique résiduel ayant subi une dégradation pré-sédimentaire lors de son transport et une oxydation intense après son dépôt.

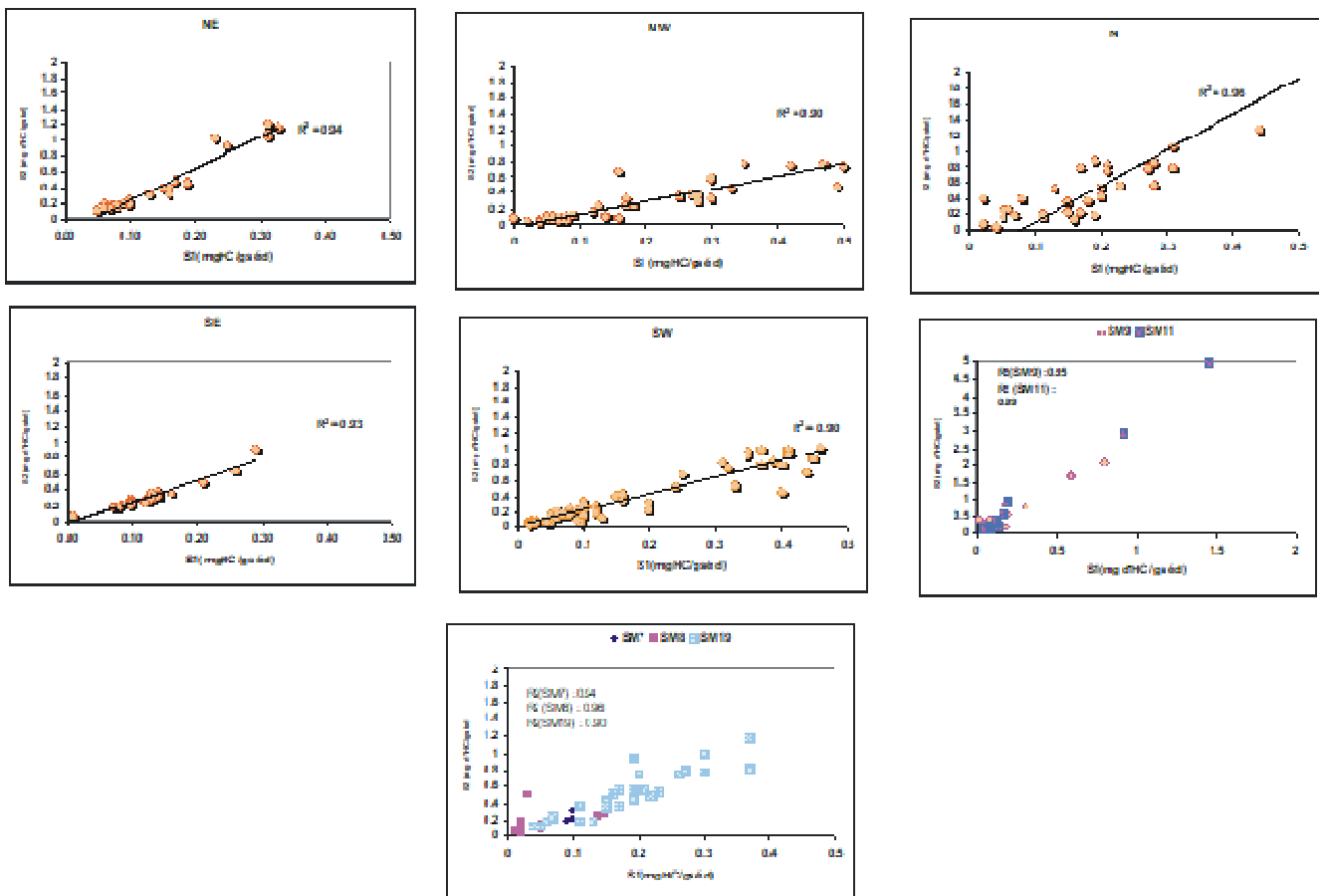


Figure 48 : Variation des hydrocarbures potentiels (S2) en fonction des hydrocarbures libres (S1)

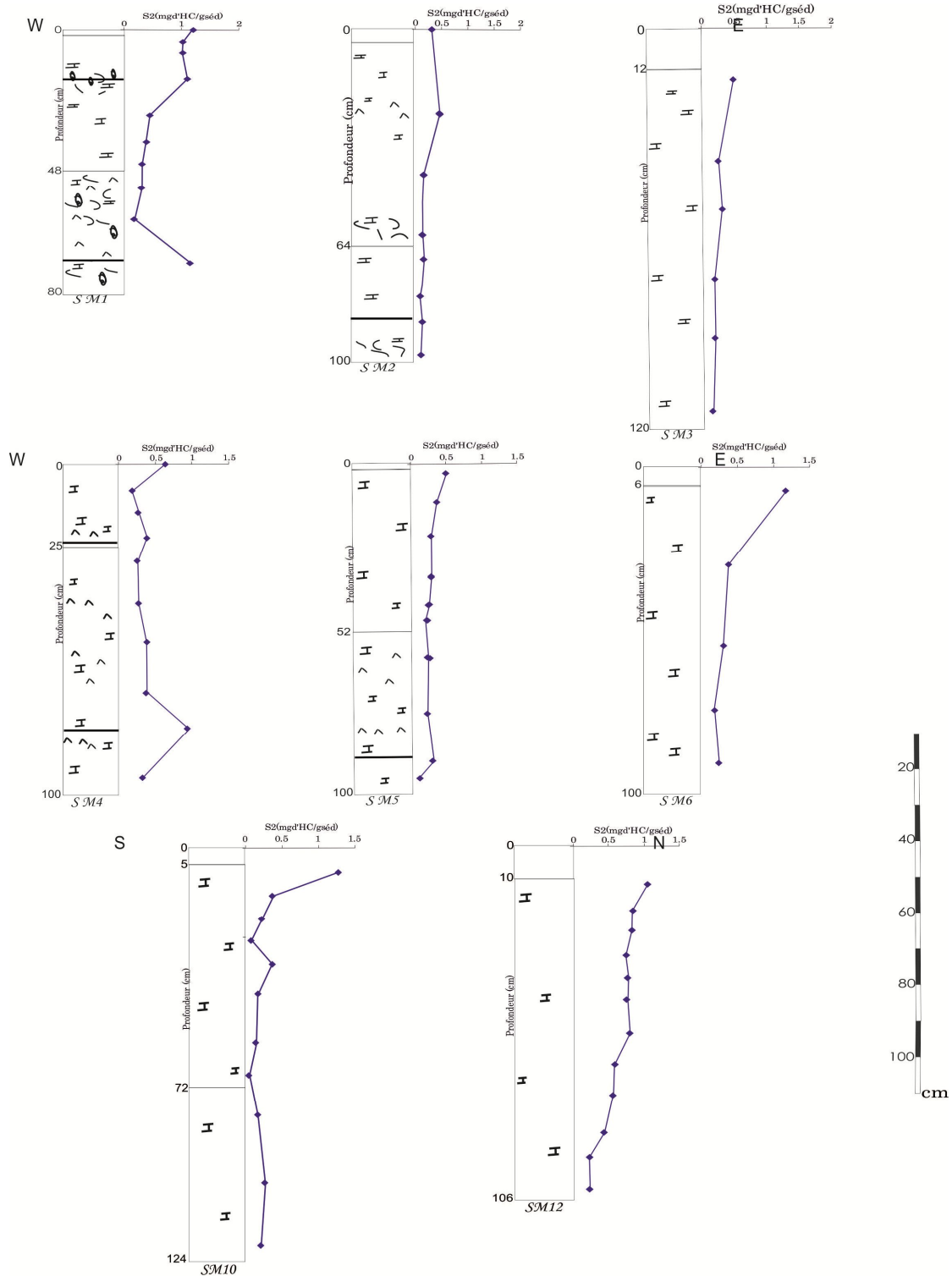


Figure 46a : Variation des hydrocarbures potentiels en fonction de la profondeur

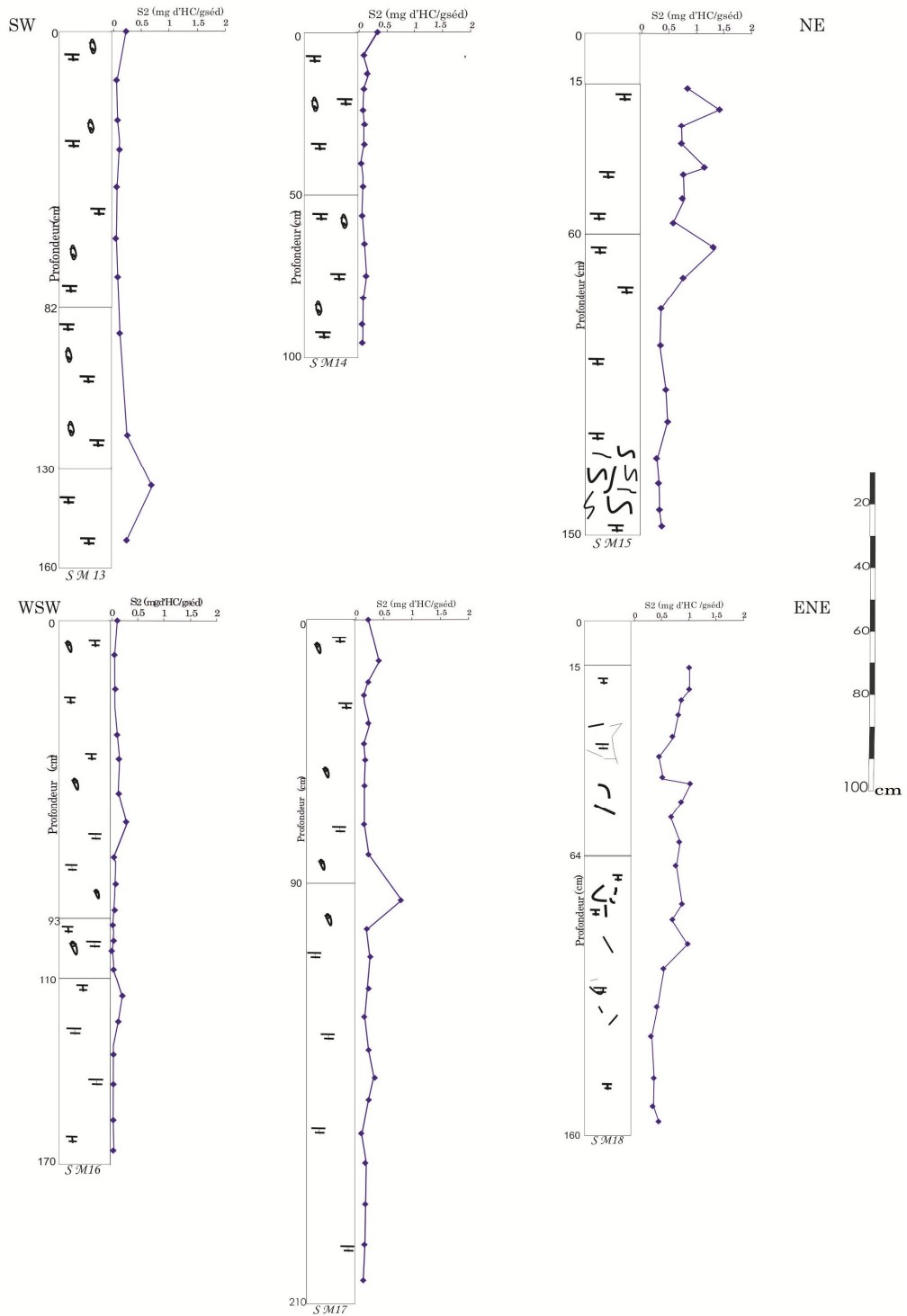


Figure 466 : Variation des hydrocarbures potentiels en fonction de la profondeur

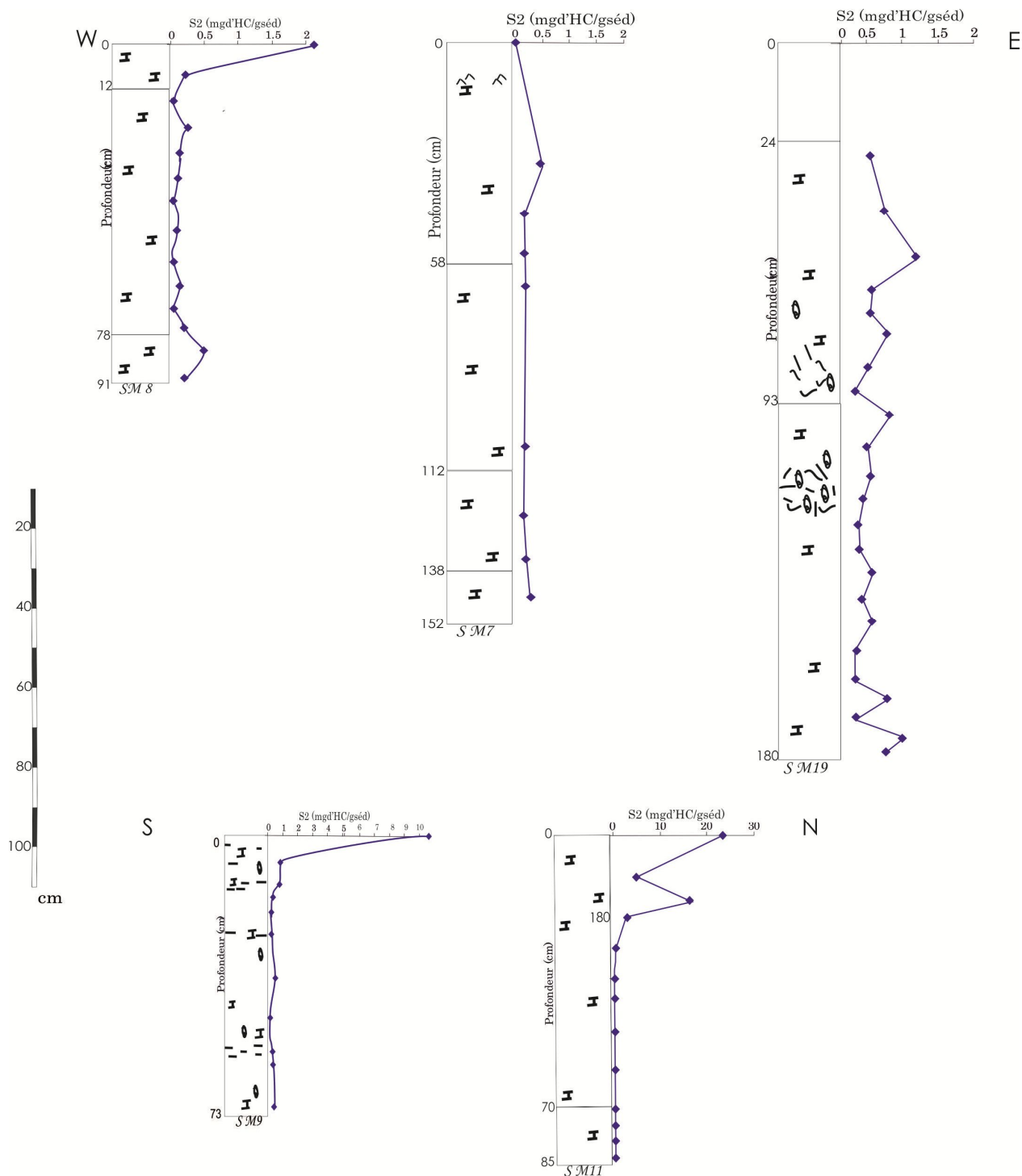


Figure 46c: Variation des hydrocarbures potentiels en fonction de la profondeur

II-2-Interprétation

Les composés hydrocarbonés libres analysés dans les sédiments de la sebkha de Moknine correspondent généralement à des composés lipidiques hérités de la biomasse et non à des hydrocarbures d'origine pétrolière. Leur distribution quantitative est proportionnelle aux quantités de matières organiques fossilisées dans le sédiment ; plus celles-ci sont élevées plus le sédiment sera riche en lipides libres. D'où la très bonne corrélation observée entre les teneurs en S1 et S2. Ces deux entités sont donc de même origine et sont issues d'une même biomasse. Par ailleurs, les faibles valeurs enregistrées pour les teneurs en S1 et S2 montrent que la matière organique fossilisée n'est pas très riche en lipides et donc serait principalement d'origine continentale issue des végétaux supérieurs.

Enfin, les faibles valeurs en S1 et S2 enregistrées dans les carottes périphériques comparativement avec celles enregistrées dans les carottes centrales illustrent une fois de plus, la grande affinité des faciès fins (argiles) avec les composés lipidiques et témoigne de la meilleure préservation de ces composés dans les faciès au centre de la sebkha qu'au niveau de ses bordures où l'oxydation rapide de la matière organique s'accompagne également d'une oxydation des composés lipidiques.

Comme les teneurs en COT, celles des composés lipidiques libres et potentiels enregistrent une répartition spatiale concentrique avec des teneurs faibles sur les périphéries augmentant de plus en plus au fur et à mesure qu'on se déplace vers le centre.

La réduction du domaine des argiles détritiques de la sebkha mis en évidence s'accompagne d'un déplacement du matériel organique associé. A la périphérie où le sédiment est principalement sableux le matériel organique est faiblement préservé et son évolution en fonction de la profondeur reflète une cinétique de dégradation très rapide. Par contre au centre où le faciès est argileux, le matériel organique est mieux préservé et son évolution en fonction de la profondeur reflète comparativement une faible cinétique de dégradation.

II-3- ASPECTS QUALITATIFS

D'une manière générale, les teneurs en S1 +S2 dans toutes les carottes sont faibles à moyennes et semblent être typique de matière organique type III (ligno-cellulosique) et/ou une matière ayant subi une importante dégradation et altération.

Les figures 49, sur lesquelles sont reportés tous les échantillons dans un diagramme IH/Tmax, illustrent l'origine ligno-cellulosique et résiduelle de la matière organique fossilisée dans la sebkha de Moknine (Fig.49).

A la périphérie, l'importance de l'activité bactérienne dans cette sebkha ne laisse qu'une fraction résiduelle en quantité massive. Dans les zones médiane et interne, le caractère continental est plus remarqué. La matière organique issue du continent est mieux préservée dans les faciès fins au centre de la sebkha et à la base des carottes périphériques. En effet, sur le graphique les carottes formées par une seule colonne homogène (SM3 –SM12) présentent les valeurs les plus élevées en IH reflétant une bonne préservation de la matière organique. Les échantillons caractéristiques de la phase argileuse renferment aussi des valeurs élevées de IH confirmant la bonne préservation de la matière organique sédimentée dans un épisode plus ancien.

Quelques échantillons se placent autour de la lignée I, prouvant l'origine algaire de la matière organique sédimentée au Nord de la sebkha, dans les horizons de surface de SM9 et SM11. Ces échantillons sont le signe d'une contamination des sédiments de la sebkha par un apport exogène de matière organique provenant des rejets de la station d'épuration.

Enfin, les valeurs des températures maximales atteintes au sommet du pic de pyrolyse (T_{max}) ne dépassent pas 420°C (Tab.10a). Dans tous les échantillons, elle est caractéristique d'une matière organique récente n'ayant pas dépassé le stade de la diagenèse précoce.

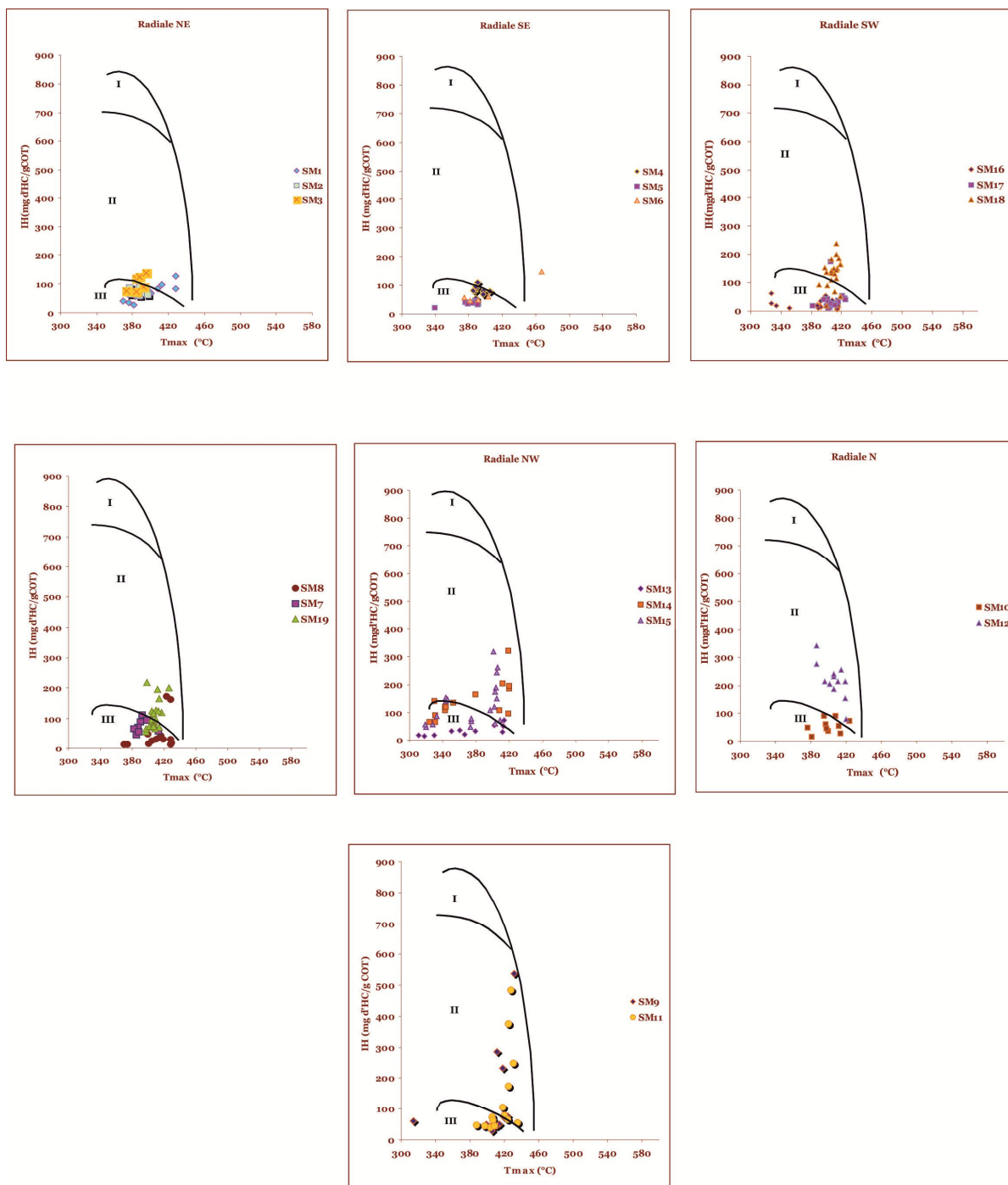


Figure 49 : Diagramme IH/T_{max} des sédiments des carottes exécutées dans la sebkha de Moknine

II-4- CONCLUSION

La pyrolyse Rock-Eval révèle l'existence d'une même origine biologique des hydrocarbures libres et potentiels. L'hypothèse proposée pour expliquer la différence de répartition de la matière organique est que la composition de celle-ci relève pour une part de l'état de sa préservation, l'autre part étant due à son origine taxonomique (terrestre/marine/lacustre) ou type suivant la classification classique de la géochimie pétrolière (type I, II et III). De ce fait, les valeurs faibles reflètent l'importance de la contribution continentale et/ou l'importance de la dégradation bactérienne.

Les IH sont généralement <110mg d'HC/gCOT dans les zones périphérique et médiane montrant que l'essentiel de la matière organique a subi une dégradation poussée. C'est vers le centre de la sebkha que la matière organique est bien préservée et la contribution continentale est bien illustrée.

La progradation du faciès minéral ou détritique est accompagnée d'une progradation du faciès organique associé. La périphérie riche en sable détritique est pauvre en faciès organique. En effet, elle s'est concentrée vers la partie interne du bassin et à l'Est où elle était entraînée par les eaux qui coulent de l'Ouest vers l'Est et où se concentre le faciès fin.

La richesse en S1 et S2 de certains échantillons est expliquée par une eutrophisation donc une activité photosynthétique importante. Ce phénomène se remarque au Nord de la sebkha où les eaux rejetées à partir de la station d'épuration enrichissent les sédiments de la sebkha en matière organique d'origine phytoplanctonique. Ce résultat serait étayé par l'analyse des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques.

III – ETUDE DES BITUMES LIBRES

La distribution des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques non volatils permet de discriminer les diverses origines des hydrocarbures (autochtone ou allochtone). Dans les milieux naturels les principales sources de ces composés sont :

Les végétaux aquatiques phytoplanctons, macrophytes et les organismes hétérotrophiques (zooplancton, bactérioplancton).

Les végétaux supérieurs terrestres via la matière organique détritique des sols, résultant du drainage des bassins versants.

Les hydrocarbures sont essentiellement issus de la biosynthèse récente dans les systèmes aquatiques.

Le phytoplancton biosynthétise des hydrocarbures aliphatiques de 15 à 33 atomes de carbone et comportant des chaînes saturées, mono et poly-insaturées : linéaires, ramifiées, isoprénoides et cycliques (Meybeck, 1995).

Les bactéries dégradent la matière organique dans les sédiments, l'huile dans les réservoirs et les points contaminés par le pétrole (Moldovane et *al.*, 1995). Les microorganismes dégradent différentes classes d'hydrocarbures surtout les structures linéaires. Les composés cycliques sont les familles les plus résistants à cette dégradation (Mille et *al.*, 1991). Les biomacromolécules telles que protéine et carbohydrate sont facilement dégradées par les bactéries (Seifert et Michaelis, 1991 ; Arnosti et *al.*, 1994).

Les bactéries sont aussi capables de transformer les geomacromolécules en particulier en alcanes linéaires (Adam, et *al.*, 1993). Cette biodégradation est importante mais son rôle dans le cycle du carbone organique est encore mal connu (Jenisch Anton et *al.*, 2000).

Un des critères de distinction souvent utilisé pour reconnaître le caractère terrestre ou planctonique des mélanges d'hydrocarbures aliphatiques consiste à calculer le : Carbone Preference Index (CPI) pour une gamme de molécule comprise entre n et m atomes de carbone. m et n sont respectivement les nombres pairs maximum et minimum de la série considérée (Matsumoto, 1982).

$$CPI_{nm} = \frac{\sum C_{m+1} - C_{n+1}}{\sum C_m - C_n} + \frac{\sum C_{m+1} - C_{n+1}}{\sum C_{m+2} - C_{n+2}}$$

Les n alcanes à nombre impair de carbones prédominent chez les plantes vasculaires (CPI >5), alors que des répartitions de n-alcanes sans prédominance impaire-paire entre C23 et C25 sont communément trouvées (CPI =1) dans de nombreuses espèces phytoplanctoniques et les bactéries. Les végétaux supérieurs, source principale de la matière organique allochtone dans les écosystèmes aquatiques synthétisent essentiellement des hydrocarbures à longues chaînes avec des maxima en C27, C29 et C31 d'où des fractions d'hydrocarbures particulières et dissous possédant souvent des CPI compris entre 1 et 5 dans les lacs (Tab.3b).

Tableau 3b: Origine, classe et principaux critères d'interprétation des hydrocarbures dans les eaux et les sédiments (Meybeck, 1995).

Origine	Composés	Critère
Algues	n-alcane	CPI >5, CPI=1
	Isoprénoides	Pristane, phytane
Végétaux supérieurs	n-alcanes	CPI>5-10
Pétrole brut ou essence raffinée	n-alcanes	CPI = 1
	isoalcanes	C15-C33
Pétrole dégradé	alcanes	Perte des alcanes <C20

Afin de qualifier la matière organique sédimentée dans le bassin d'étude une analyse fine des lipides libres était établie. Cette étude va étayer les résultats obtenus par étude du carbone organique total et par pyrolyse Rock Eval.

L'étude des lipides libres permet de distinguer l'origine de la matière organique sédimentée à la périphérie et celle du centre du bassin et de déterminer la composition des bitumes libres des niveaux noirâtres, dans la phase argileuse et les autres faciès. C'est un moyen pour relever des indications sur les conditions de l'évolution du matériel organique sédimenté.

III-I- EXTRAIT CHLOROFORMIQUE TOTAL

Des échantillons bien répartis à travers les carottes ont été extraits par le chloroforme. Les résultats de cette étude sont portés sur le tableau 12a et les figures 50 : a-c.

Les teneurs en extraits chloroformiques exprimées en ppm varient de 100 à 990 ppm au Nord, de 85 à 735 ppm à l'Est, de 67 à 1000 ppm à l'Ouest et 50 à 320 ppm au Sud. Rapporté au carbone organique total, le pourcentage de l'extrait chloroformique total est généralement inférieur à 10%.

Les teneurs calculées montrent des valeurs généralement faibles caractéristiques d'une origine biologique des hydrocarbures. Dans d'autres points les teneurs mesurées sont assez élevées (> 10%).

L'enrichissement de certains niveaux en extrait chloroformique est expliqué par plusieurs phénomènes selon l'emplacement du niveau dans le temps et dans l'espace :

▼ La richesse des sédiments des carottes SM11 et SM9 en lipides libres est en relation étroite avec la contamination des sédiments par les rejets des eaux de la station d'épuration et les rejets domestiques.

▼ Dans les carottes SM13, SM17, SM15 et SM18 les taux élevés coïncident avec la phase argileuse qui a enregistré des valeurs élevées en COT et en hydrocarbures libres et potentiels. Cet enrichissement est le résultat d'une bonne préservation de la matière organique dans un sédiment fin remontant dans le temps à une ancienne époque où la sebkha était plus étendue vers l'Ouest.

▼ La carotte SM8 présente une colonne riche en extrait chloroformique ($8\% < \text{Ext.T} < 16\%$). Les taux assez élevés ne sont pas des indicateurs d'une source exogène d'hydrocarbure. En effet, SM8 est prélevée à l'Est dans une zone de marécage. Ce résultat sera mieux étayé par l'analyse des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatique par CPG.

▼ Dans les carottes SM1, SM2, SM4 et SM5 les niveaux noirâtres correspondant à un cycle organique révèlent des valeurs assez élevées en extrait chloroformique total.

▼ L'évolution verticale des extraits totaux coïncide avec celle du COT et de S1 montrant ainsi une augmentation des taux au passage du faciès grossier au faciès fin dans le temps et dans l'espace. Une zonation des quantités de l'extrait chloroformique se manifeste par une périphérie pauvre et une zone centrale riche. La progradation sédimentaire du bassin se remarque pour les deux faciès minéral et organique.

Dans la sebkha de Moknine les sédiments prélevés aussi bien à la surface qu'à une profondeur de 1,5m en moyenne ne montrent aucune corrélation entre les teneurs en carbone organique total et les quantités d'extrait chloroformique total (Fig.51 :a-g). Une hétérogénéité essentiellement due à l'origine et qui influence la composition de l'extrait est le facteur prédominant de l'absence de corrélation.

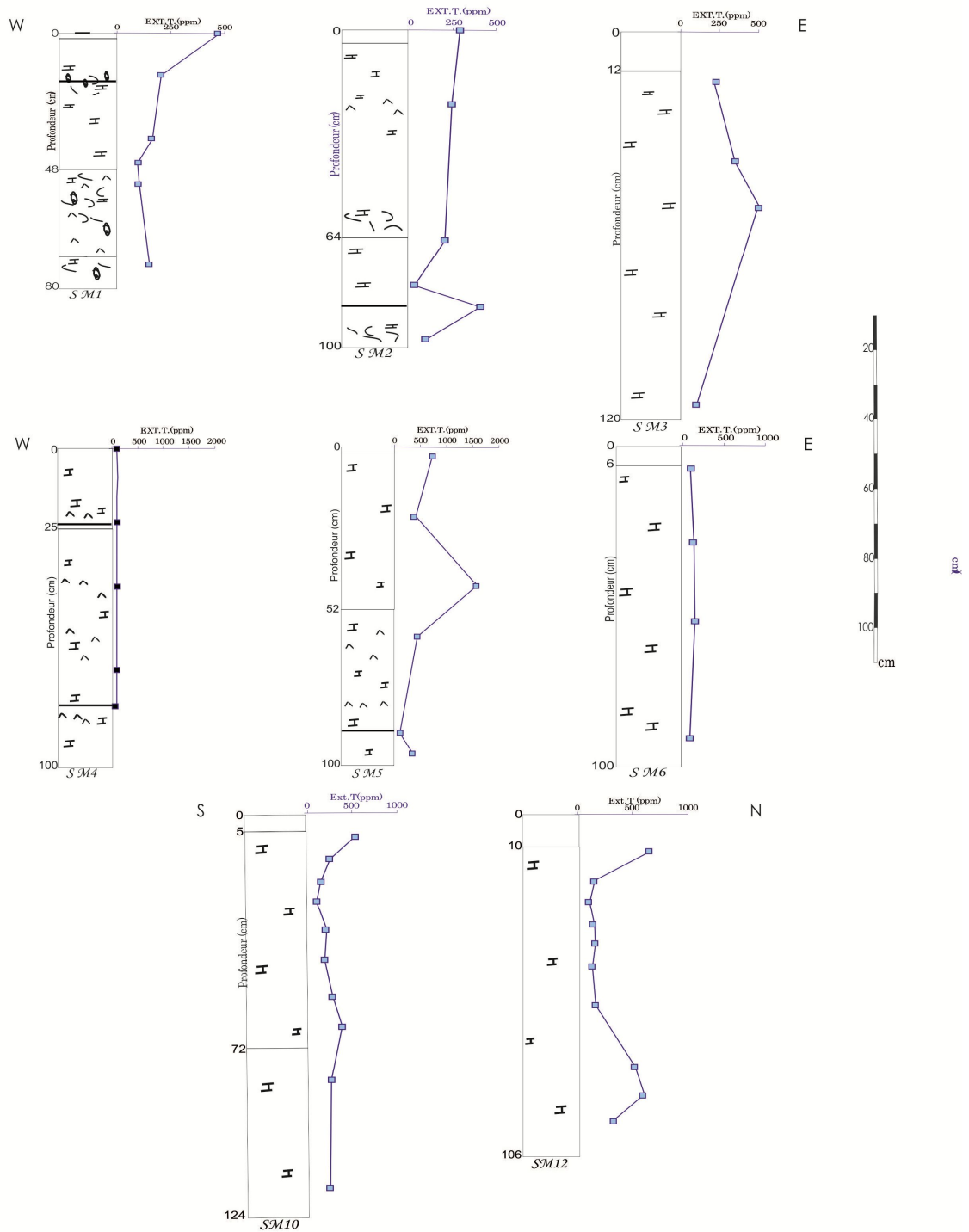


Figure 50 a : Variation des Extraits lipidiques dans les sédiments de la sebkha de Moknine

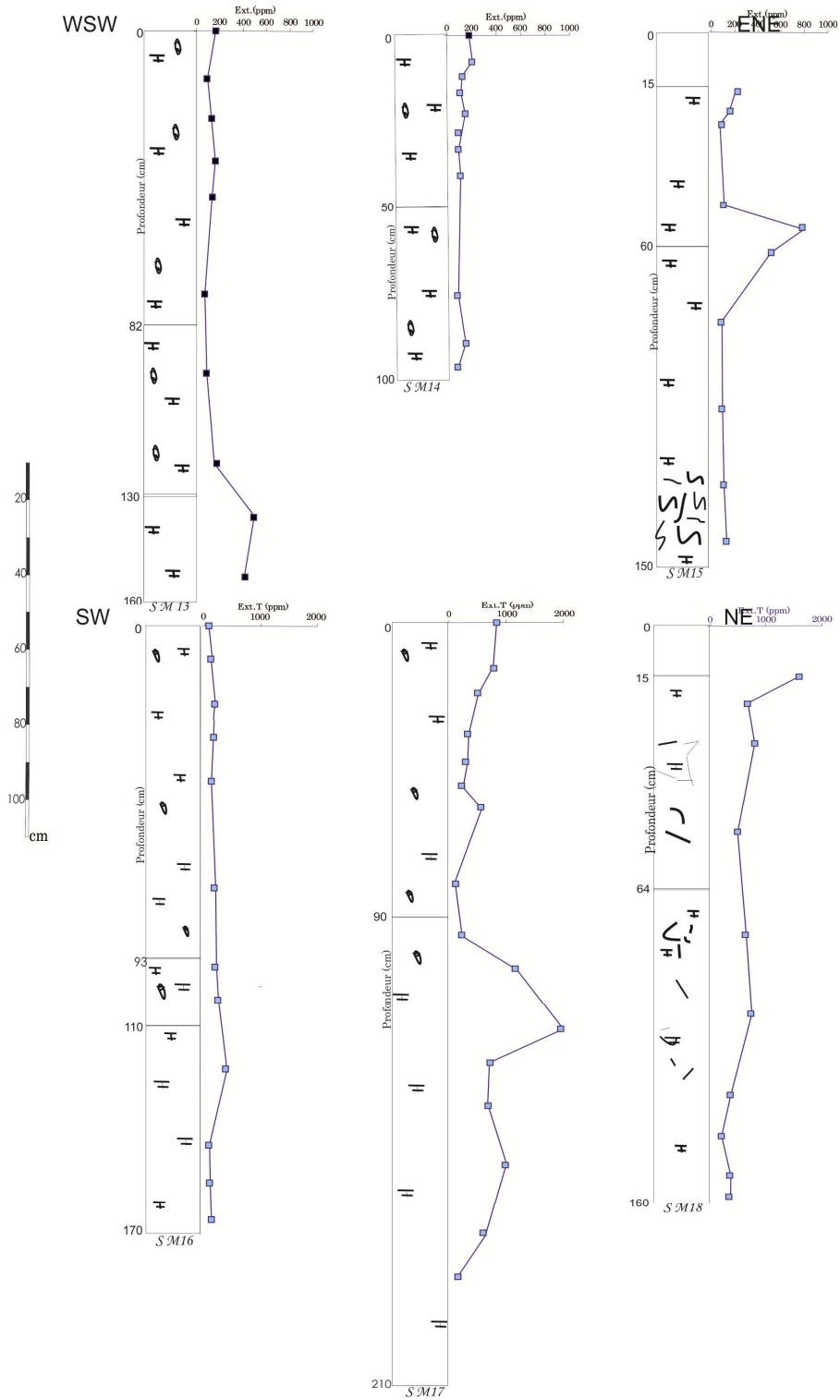


Figure 50 b : Variation des Extraits lipidiques dans les sédiments de la sebkha de Moknine

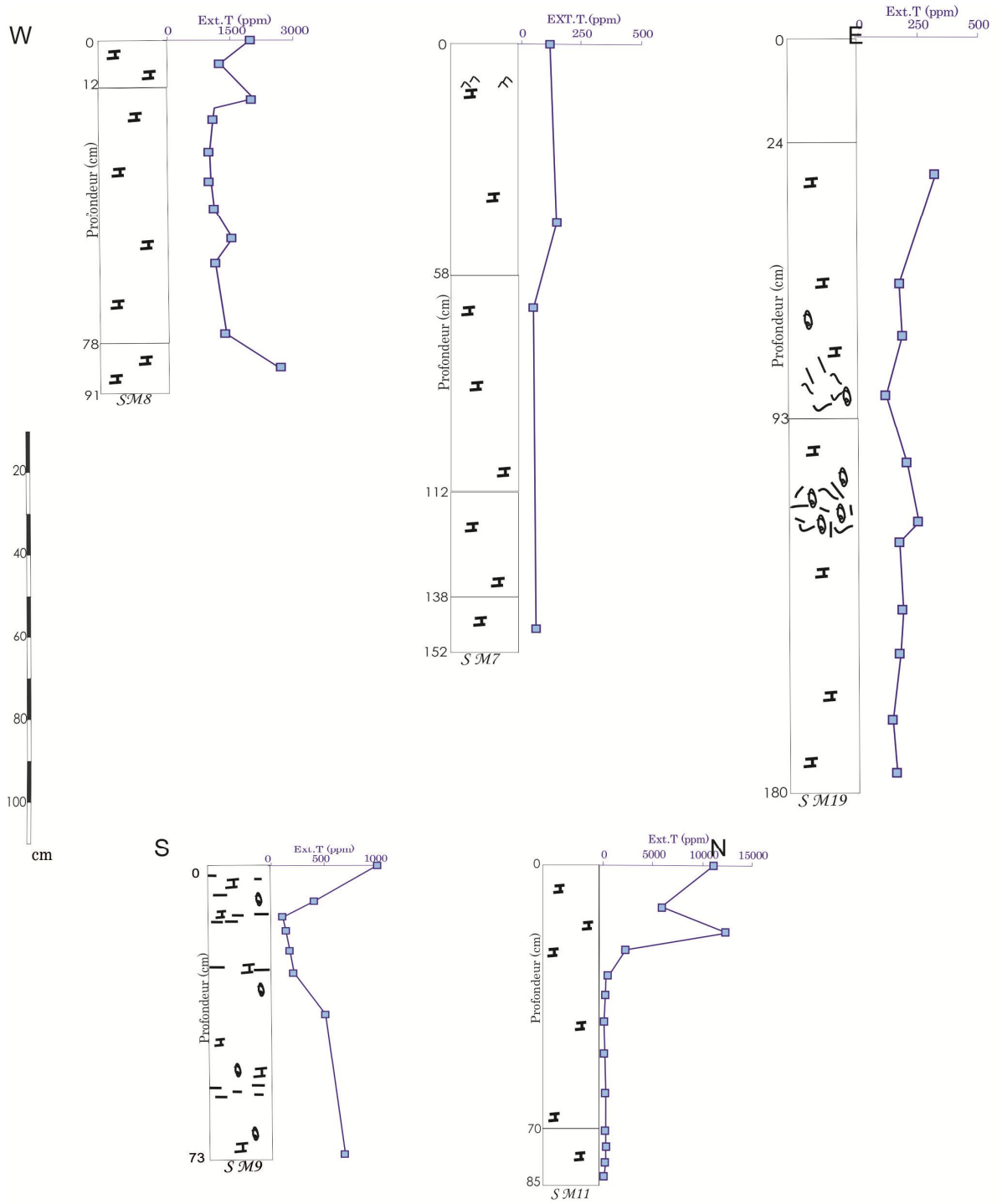


Figure 50 c: Variation des Extraits lipidiques dans les sédiments de la sebkha de Moknine

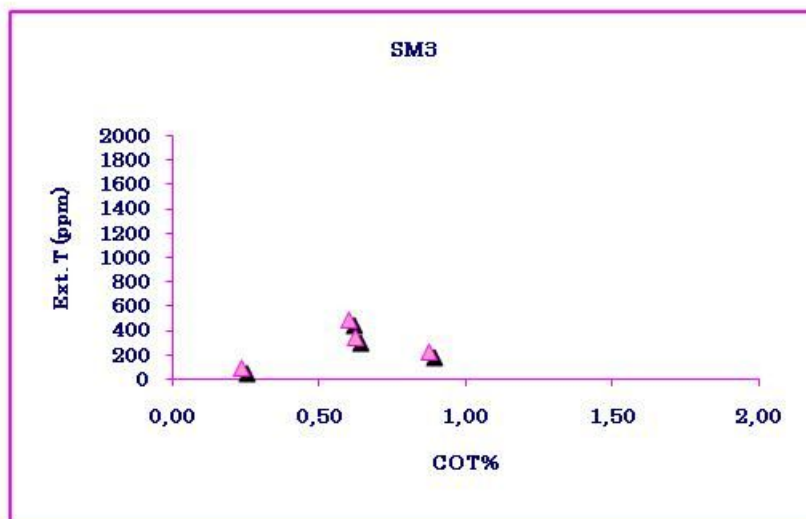
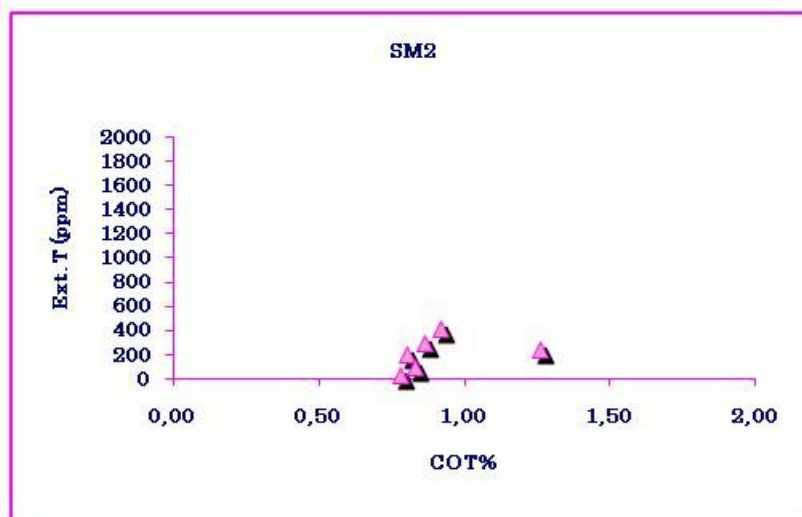
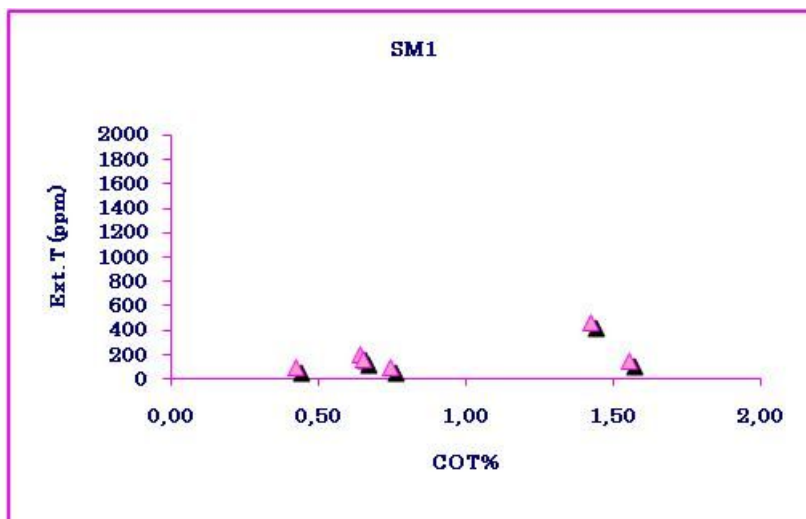


Figure 5 1a : Variation de l'extrait chloroformique total (Ext.T) en fonction du COT Radiale NE

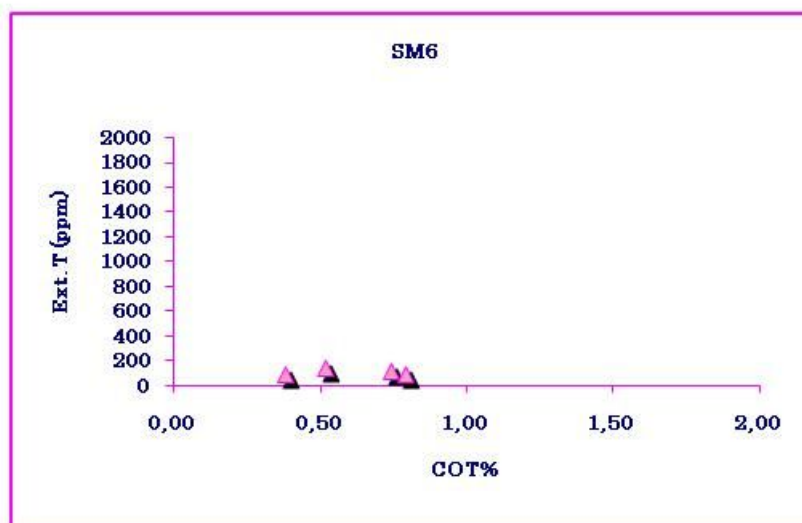
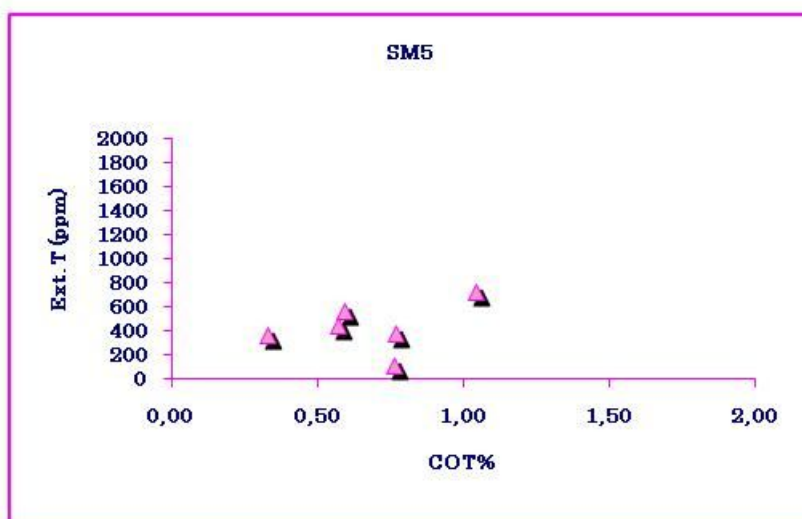
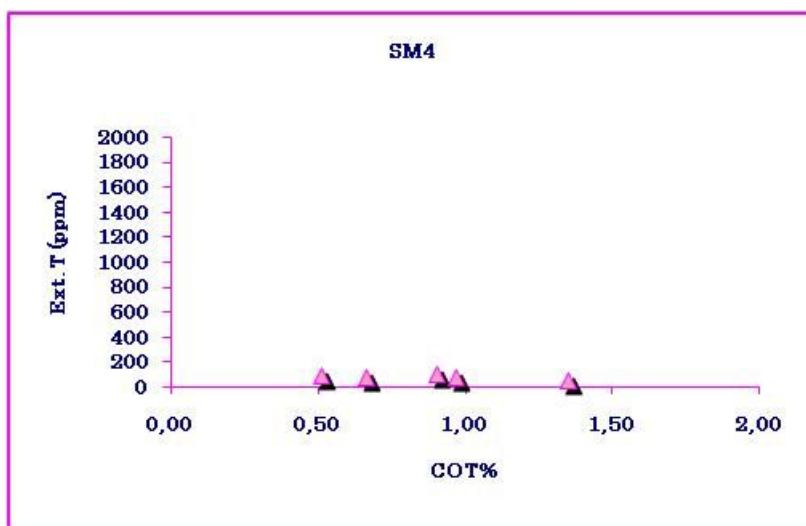


Figure 5.16 : Variation de l'extrait chloroformique total (Ext. T) en fonction du COT.
Radiale SE

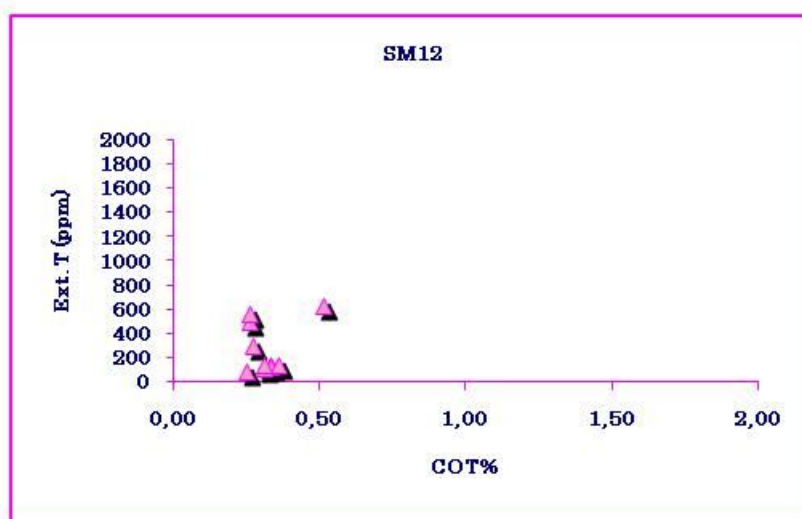
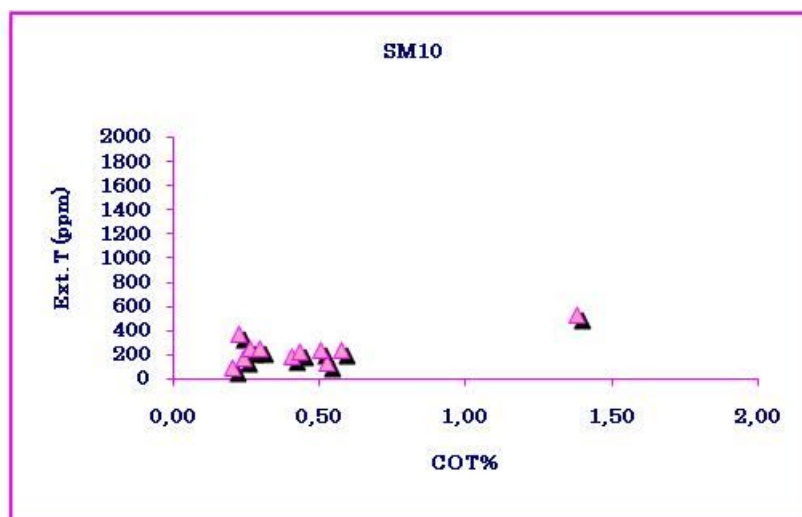


Figure 51c : Variation de l'extrait chloroformique total (Ext.T) en fonction du COT.
Radiale N

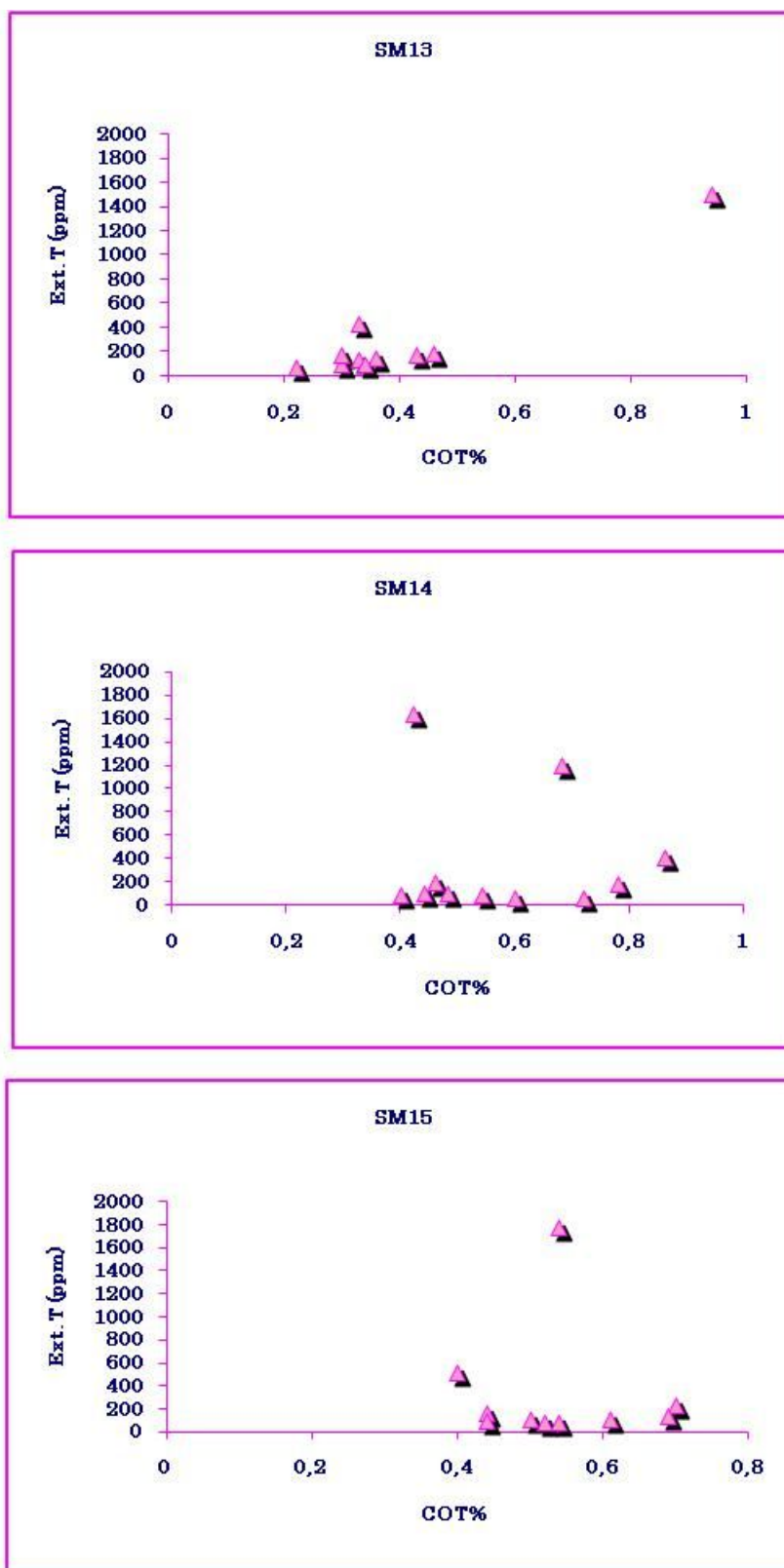


Figure 51d: Variation de l'extrait chloroformique total (Ext. T) en fonction du COT. Radiale NW

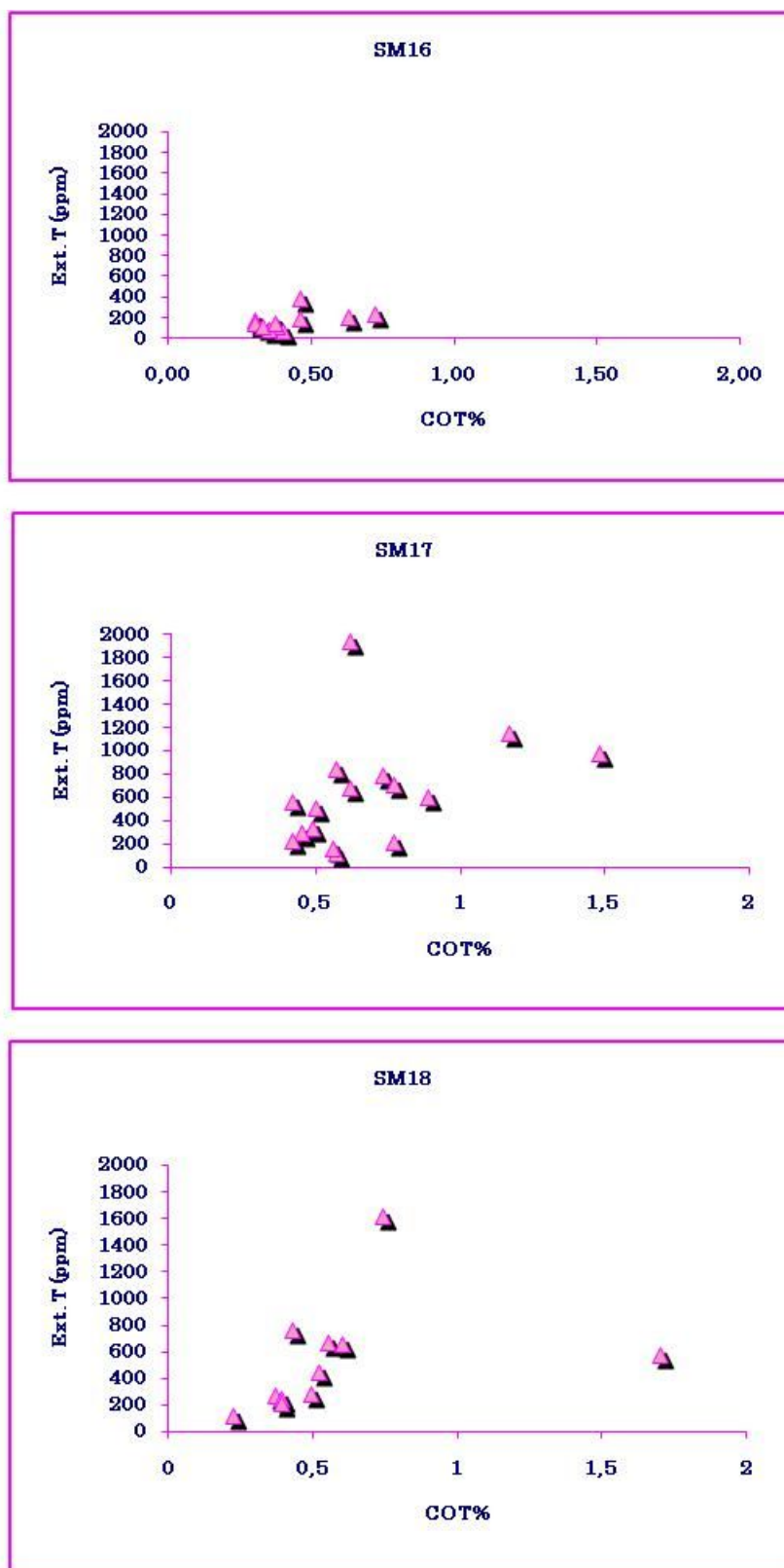


Figure 51e : Variation de l'extrait chloroformique total (Ext.T) en fonction du COT Radiale SW

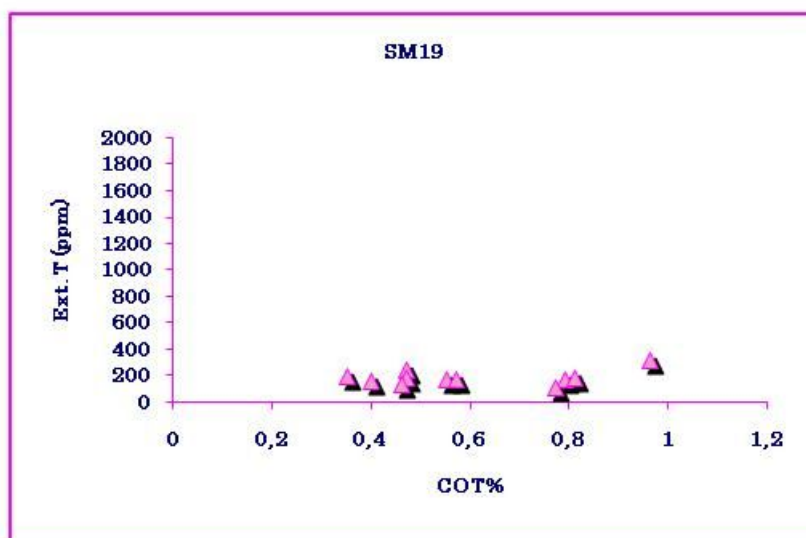
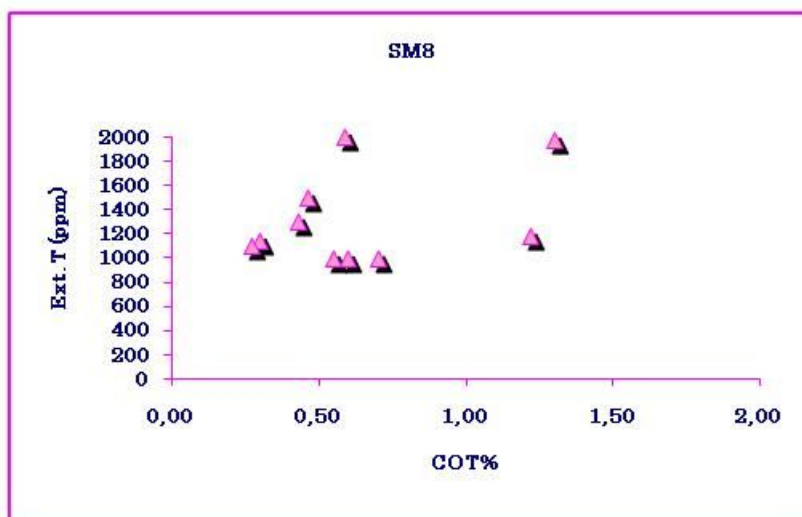
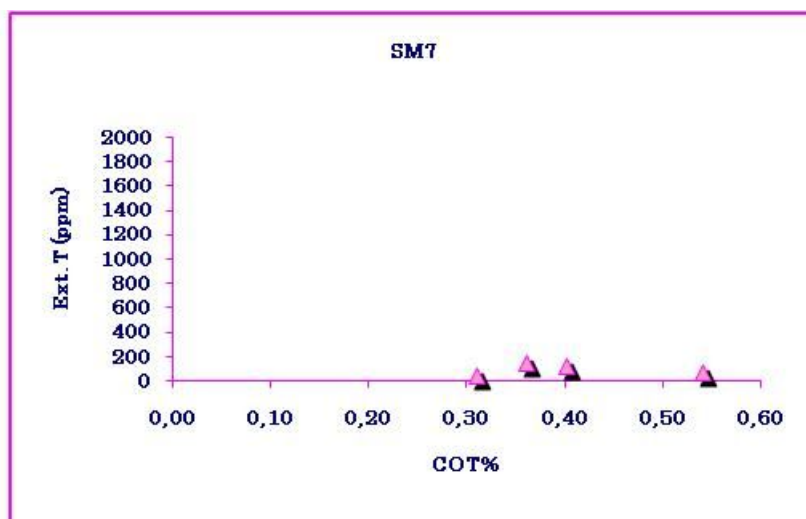


Figure 51f: Variation de l'extrait chloroformique total (Ext. T) en fonction du COT SM7-SM8-SM19

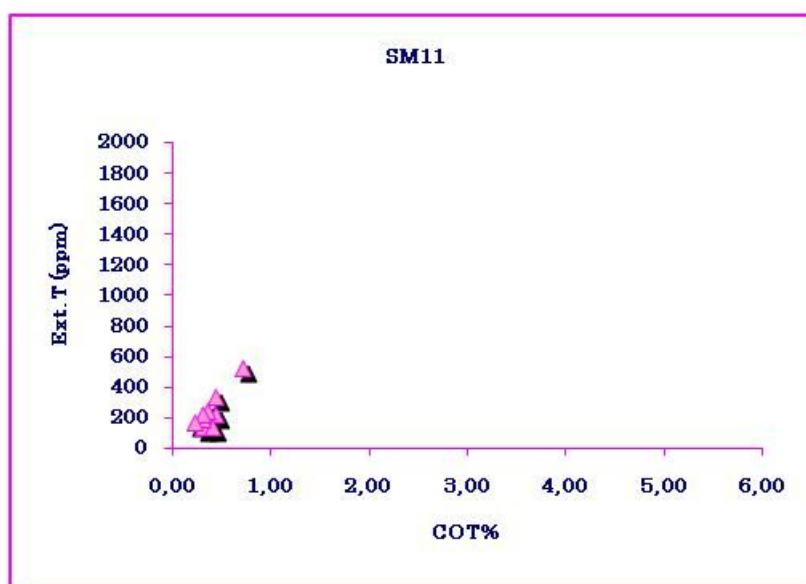
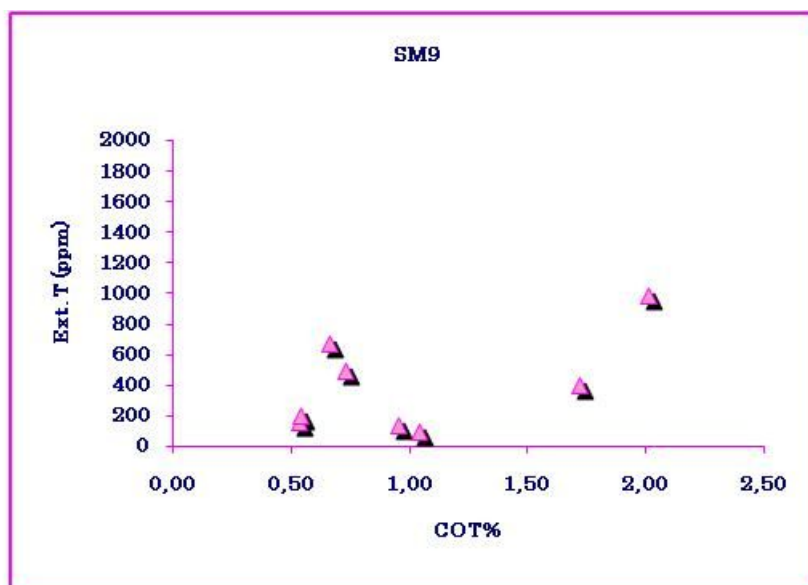


Figure 5 1g : Variation de l'extrait chloroformique total (Ext. T) en fonction du COT. Radiale SW

III- 2- ANALYSE QUANTITATIVE DES DIFFERENTES FRACTIONS DE L'EXTRAIT LIPIDIQUE

Le taux de chaque fraction séparée dans l'extrait chloroformique total de chaque échantillon est reporté sur les figures : 52 (a-b), et le tableau 12a. L'examen de ces résultats montre que les composés polaires représentent dans l'ensemble des échantillons, l'essentiel de l'extrait chloroformique total (40 à 90 % en poids). C'est un autre indicateur de l'immaturation de la matière organique (Tissot et Welte, 1978 ; Espitalié et al., 1977, 1985 ; Curial, 1987 et Moretto, 1987) et le témoin une fois de plus de l'origine principalement biologique de la fraction lipidique associée aux sédiments.

Les horizons superficiels de SM9 et SM11 ont aussi renfermé des quantités élevées en composés polaires prouvant ainsi l'absence d'une contamination d'origine pétrolière. Ce résultat sera mieux étayé par l'analyse de la fraction saturée et insaturée non aromatique par CPG.

En effet, les NSO compound ou composés polaires représentent 80% des composés lipidiques totaux dans les fractions lipidiques héritées de la biomasse marine. Ces derniers ne représentent qu'une fraction subordonnée dans les hydrocarbures provenant de sources de pollution, comme le présentent Tissot et Welte (1984). Cependant nous avons mesuré dans certains échantillons des teneurs élevées en hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques >10% de l'extrait total (Tab.12a). Cet enrichissement en fraction saturée ne peut être attribué qu'à une prolifération bactérienne (Baranger and Disnars, 1988) ce qui sera corroboré par analyse de cette fraction par chromatographie en phase gazeuse.

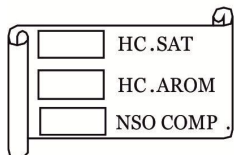
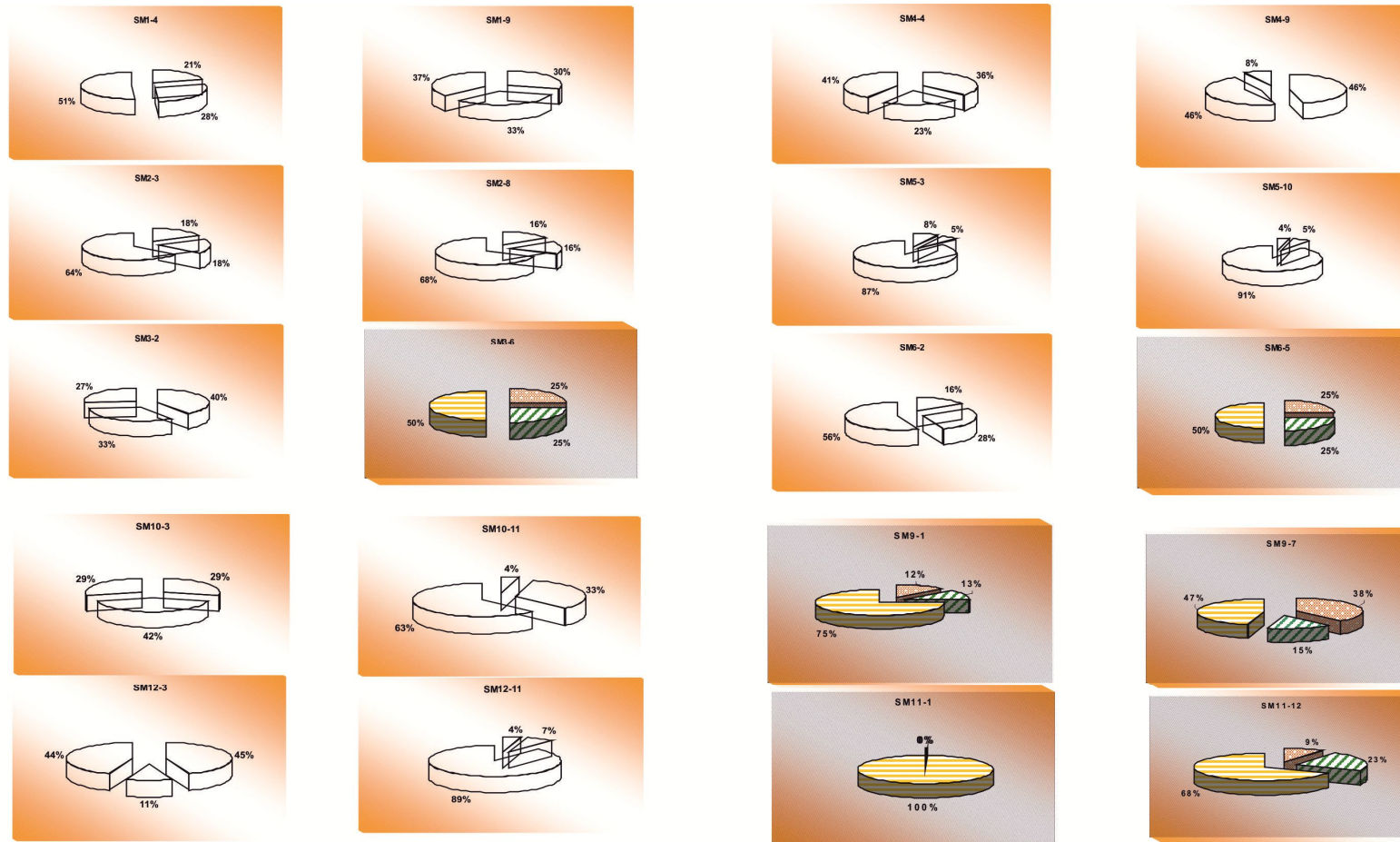


Figure 52a : Pourcentages des fractions de l'extrait chloroformique total

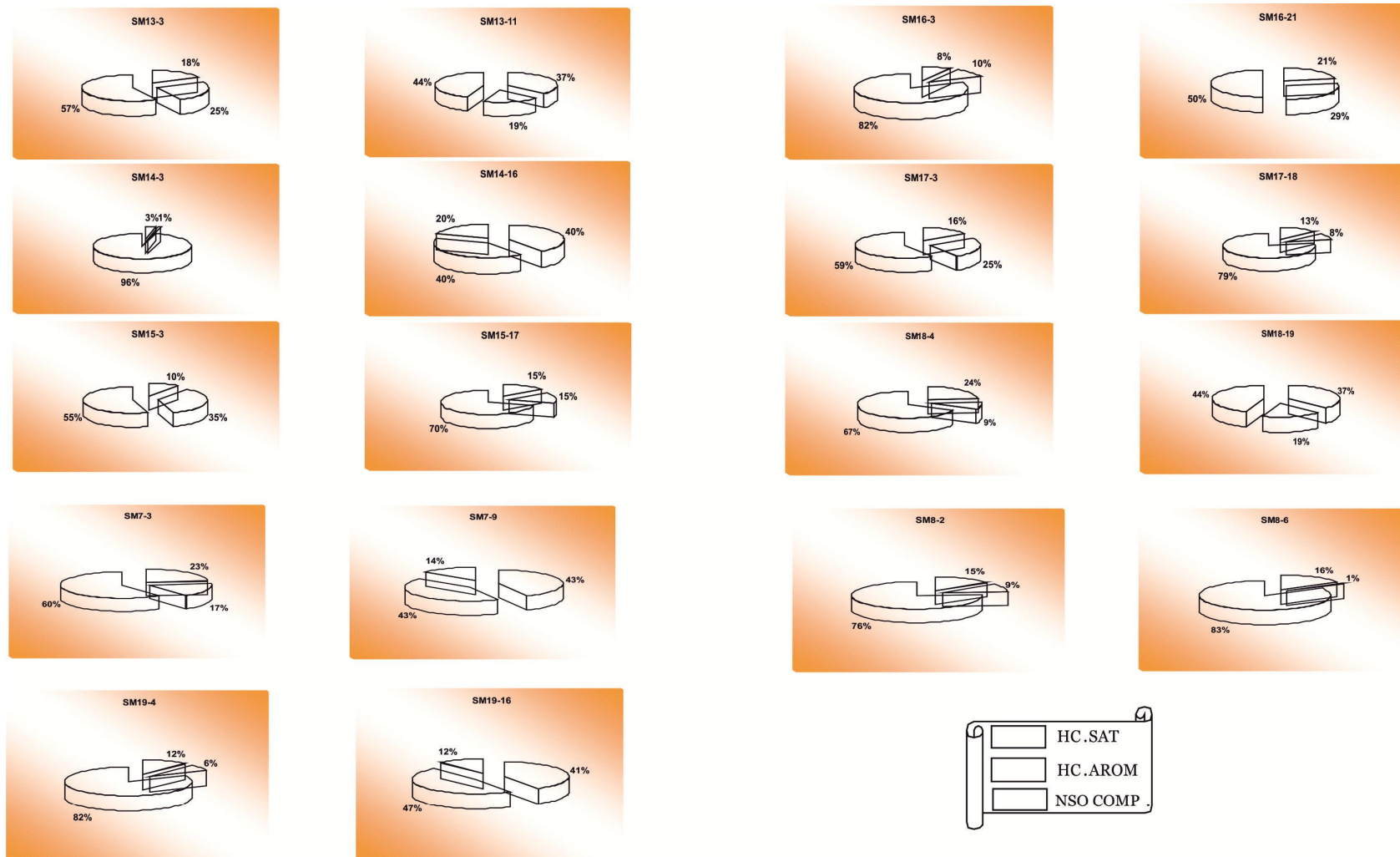


Figure 526 : Pourcentages des fractions de l'extrait chloroformique total

III-3-CONCLUSION

La fraction des bitumes libres est très subordonnée. Elles fournissent a priori un indice sur une origine biologique des hydrocarbures et non sur une origine à partir d'une quelconque source de pollution. Les sédiments renfermant des quantités très élevées peuvent indiquer la présence d'une bonne préservation de la matière organique. Ils renferment également les valeurs les plus fortes en COT, en hydrocarbures (libres et potentiels) et en composés humiques totaux.

La répartition latérale des extraits chloroformiques des deux séquences détectées dans la sebkha montre deux mode d'évolution différents dans le temps et dans l'espace:

✓ Une zonation de richesse en extrait chloroformique concordant avec celle remarqué à la surface et qui est liée étroitement à la nature lithologique. La périphérie se caractérise par des valeurs faibles loin de toute action anthropique et une zone interne riche ou le maximum de matière organique se concentre.

✓ Un domaine argileux couvrant toute la sebkha caractérisant une époque plus ancienne et renfermant des taux élevés dans différents points de la sebkha.

L'absence de corrélation entre le COT et la fraction lipidique peut être attribuée à l'hétérogénéité du stock organique. Cette hétérogénéité ne se limite pas à l'origine mais englobe aussi la nature de la composition de la matière organique du au changement des conditions de dépôt.

Dans les domaines limniques, les concentrations des lipides diminuent avec la profondeur (Cranwell, 1981 ; Kawamura et Ishiwatari, 1984 ; Matsuda et Koyama, 1977, Meyers et *al.*, 1980 ; Nistimura, 1977). Dans la sebkha de Moknine l'évolution verticale des lipides n'est pas nette. C'est aussi le cas des sédiments du lac Heart, (New York) (Meyers et *al.*, 1984) et du lac Walker (Nevada) (Meyer et *al.*, 1988), où les auteurs l'attribuent à la

quantité de la matière organique sédimentée, sa préservation dans les sédiments et probablement à un changement de sa composition (Meyers et *al.*, 1988).

Les composés polaires (NSO) représentent l'essentiel de la fraction lipidique extraite, ce qui témoigne encore de l'origine biologique de cette fraction. Ceci se précisera par l'analyse de cette fraction saturée par chromatographie en phase gazeuse (C.P.G.). En effet, l'étude de la distribution des hydrocarbures par C.P.G, permet de reconnaître l'origine et de conclure la nature de la source de contamination (Tissot et Welte, 1984).

II- 4 - ETUDE DE LA DISTRIBUTION DES HYDROCARBURES SATURES ET INSATURES NON AROMATIQUES

Les alcanes appelés aussi paraffines, sont des composés saturés de formule générale C_nH_{2n+2} . Ces molécules peuvent être linéaires (n-alcanes), ramifiées (iso-alcanes et isoprénoides) et polycycliques (alicycliques ou naphéniques ou cyclo-alcanes) (Oudot et *al.*, 1984).

Les organismes marins et les plantes terrestres peuvent être une des sources d'alcanes qui seront libérés dans le milieu par activité métabolique de ces êtres vivants ou encore par décomposition de leurs cadavres (Zhou et *al.*, 1990).

L'étude des modèles de répartition des hydrocarbures aliphatiques et cycliques dans les sédiments récents est un moyen infaillible qui permet de les rattacher à leur origine. Ainsi, une contribution terrigène dans la matière organique déposée est confirmée par la présence de n-alcanes, dont la distribution est comparable à celle observée pour les végétaux supérieurs : une prédominance des n alcanes lourds à nombre impair d'atome de carbone centré autour de C25-C35 (Blumer et *al.*, 1971 ; Gomez Belinchon et *al.*, 1988 ; Lipiatou et *al.*, 1992) ; avec un maximum du C29 pour les arbustes et les arbustives et du C31 pour les plantes herbacées (Simoneit et *al.*, 1984 ; Heras et *al.*, 1989). Cette distribution est liée à la décarboxylation des acides gras lourds à nombre pair d'atomes de carbone (supérieur à C24), synthétisés par les végétaux supérieurs.

Une distribution caractérisée par la prédominance des n-alcanes à faibles poids moléculaires ($C < 21$) avec un mode centré sur : nC15 et nC17, indique une origine phytoplanctonique de la matière organique (Saliot et *al.*, 1977, Meyers et *al.*, 1988).

Souvent, la matière organique dans les sédiments récents est hétérogène (autochtone d'origine marine et allochtone d'origine terrestre). Ceci s'exprime par une distribution bimodale sur les chromatogrammes, avec deux modes, l'un centré au niveau du nC17 et l'autre au niveau du nC29 (Blumer et *al.*, 1971 ; Tissot et Welte, 1978).

Chez les bactéries, la distribution des n-alcanes, présente une répartition régulière des n-alcanes à nombre d'atomes de carbone élevé sans prédominance de composés à nombre impairs d'atomes de carbone et un maximum entre C25 et C33 avec parfois la présence de composés légers centrés sur nC17 et nC18 ou nC20 (Grimat et *al.*, 1988). Cette répartition a été retrouvée dans les sédiments marins de la côte du Pérou (Volkman et *al.*, 1983) et dans les sédiments de la mer Nansha (Chine) (Duan, 1999).

Il faut signaler aussi que la fraction soluble des sédiments récents ne comprend pratiquement aucun composé de faible masse moléculaire (<C12) à l'exception du méthane. Tous les types de structures y compris les plus complexes montrent des distributions très irrégulières (pétroles et des roches anciennes). Les n-alcanes dans certains cas montrent une certaine teneur en C1, des traces de C2 à C14 et deux modes ; un en C17 suivi d'un creux et un deuxième en C29 (Tissot et *al.*, 1977).

L'imparité observée peut être mesurée par le "Carbon Preference Index" (CPI) ou indice d'imparité, qui représente le rapport caractéristique entre la somme des alcanes impairs et des alcanes pairs (Matsumoto, 1982). Dans les sédiments récents, le CPI dépend de l'origine de la matière organique. Il est d'autant plus important que la matière organique soit issue de plantes terrestres. En effet, dans ces dernières, le CPI est élevé et varie de 3 à plus de 20 (McCaffrey et *al.*, 1991). Dans le lac d'Ellesmere les valeurs retrouvées sont entre 6,9-8,2. Pour les bactéries et le phytoplancton, le CPI est généralement voisin de l'unité.

III-4-1- n- Alcanes

Les chromatogrammes des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques des échantillons des carottes (Fig.53a-f), montrent de grandes similitudes entre elles. Celles-ci ne présentent à travers ces chromatogrammes aucune évolution verticale. En effet, la distribution des n-alcanes reste très semblable, d'un niveau de profondeur à un autre dans une même carotte. Généralement, ces spectres présentent une distribution bimodale.

Cependant, dans les sédiments des carottes SM9 excepté l'horizon de surface et dans les horizons : SM10-8, SM10-9, SM18-3, SM18-20, SM18-22, la distribution des n-alcane et unimodale, centrée sur les atomes de carbones légers de C16 à C22 sans prédominance des atomes de carbone pair ou impair et un maximum en nC16, nC18, nC20 et nC22 atteste d'une origine bactérienne (Blumer *et al.*, 1971 ; Tissot et Welte, 1984). Cette répartition est typique d'une matière organique immature ou d'un stade précoce de génération d'hydrocarbure d'origine marine (Powell, 1984). Ce résultat est déjà avancé dans le chapitre 4 où nous avons montré la présence de tapis de cyanobactérie dans la sebkha de Moknine.

Dans le reste des échantillons nous avons observé une distribution bimodale :

❶ - Le premier mode est caractérisé par une répartition centrée sur C17 et C23 avec un maximum en nC18 et nC22 sans prédominance d'atomes de carbone pair et impair. Cette répartition reflète une activité bactérienne dans les sédiments, qui sera à l'origine d'une modification de la distribution des composés aliphatiques déjà présents dans le milieu, accompagnée d'une production de composés paraffiniques sans prédominance paire ou impaire (Grimat *et al.*, 1988).

Dans les sédiments de la sebkha de Moknine, l'abondance du nC22 apparaît relié à la présence des micro-algues des milieux salins, l'altération des déchets algaires et l'intensité des processus d'altération microbienne de la matière organique. En effet, les chromatogrammes obtenus montrent que la prédominance du nC22 est accompagnée généralement d'une diminution des quantités relatives des n-alcane à faible nombre d'atomes de carbone (nC15, nC16 et nC17). Le même résultats étaient remarqués en Espagne dans les lacs salés de Quero et Tirez (Scheiber *et al.*, 2001).

❷ - Le deuxième mode se caractérise par une distribution centrée sur C25-C33, avec un maximum des n-alcane lourds en nC29 et nC31 et une forte prédominance des composés

à nombre d'atomes de carbone impair. Cette distribution est typique des cires cuticulaires des végétaux supérieurs (Albercht et *al.*, 1983).

La carotte SM8 prélevée au Nord est caractérisée par un faciès essentiellement fin (silteux) montre une répartition particulière des n-alcane. Un seul mode apparaît avec un maximum en nC23 et nC25, sans prédominance des n-alcane impairs ou pairs (Fig.53).

Tous les chromatogrammes obtenus de ce profil ont donné cette répartition unimodale qui traduit la diagenèse de reste bactérienne (Tissot et Welte, 1978, Baranger et Disnar, 1988).

En effet cette carotte présente des horizons noirâtres. Les valeurs des extraits chloroformiques totaux sont élevées (1000-2670 ppm) et la part des hydrocarbures saturés est en moyenne 1,62 mg. L'emplacement de cette carotte et les analyses géochimiques et sédimentologique prouve que ce sont les conditions de l'environnement de Moknine qui ont édifié ce type de répartition d'hydrocarbure et il ne s'agit pas d'apport exogène.

* Indice d'imparité

L'indice d'imparité (CPI), montre des valeurs variant entre 1.2 et 3.76. sur la bordure orientale, de 2.17 à 3.84 au Nord et de 1.29 à 3.71 sur la bordure occidentale. La zone médiane se caractérise par des valeurs qui oscillent entre 1.19 et 5.72 et le centre indique des valeurs allant de 1.6 à 5.14. Les valeurs de CPI calculées dans le bassin reflètent l'importance de la contribution terrigène à la sédimentation organique de la sebkha.

Les CPI proches de l'unité trouvés dans certains échantillons indiquent une origine bactérienne (Blumer et *al.*, 1971 ; Baranger et Disnar, 1988 ; Gomez-Belinchon et *al.*, 1988 ; Lipiatou et *al.*, 1992).

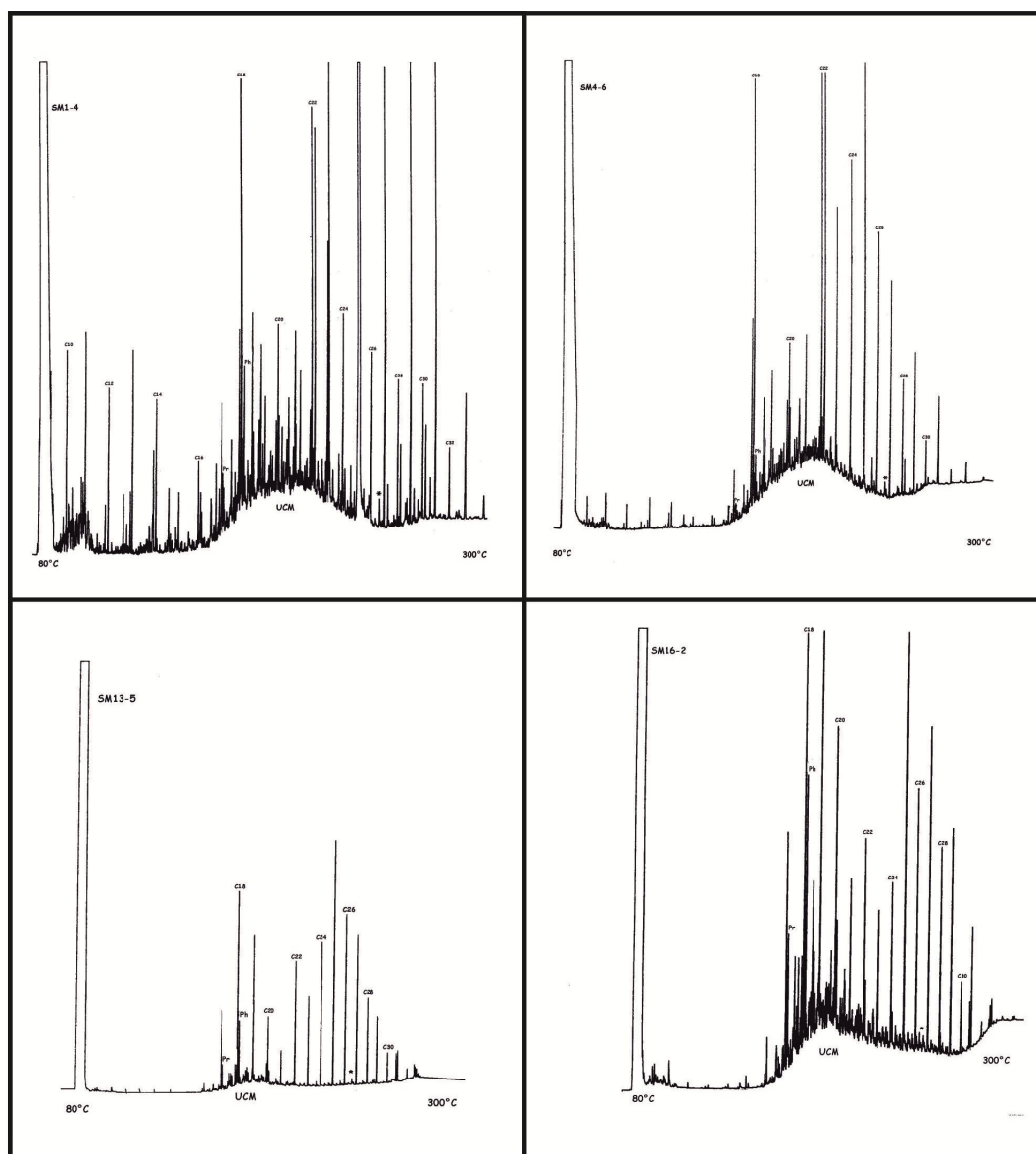


Figure 53a : chromatogrammes des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques des sédiments (en sub-surface) prélevés à la périphérie de la sebkhja de Moknine.
(UCM : composés non résolu, Pr: pristane, Phi: phytane, *: squalane)

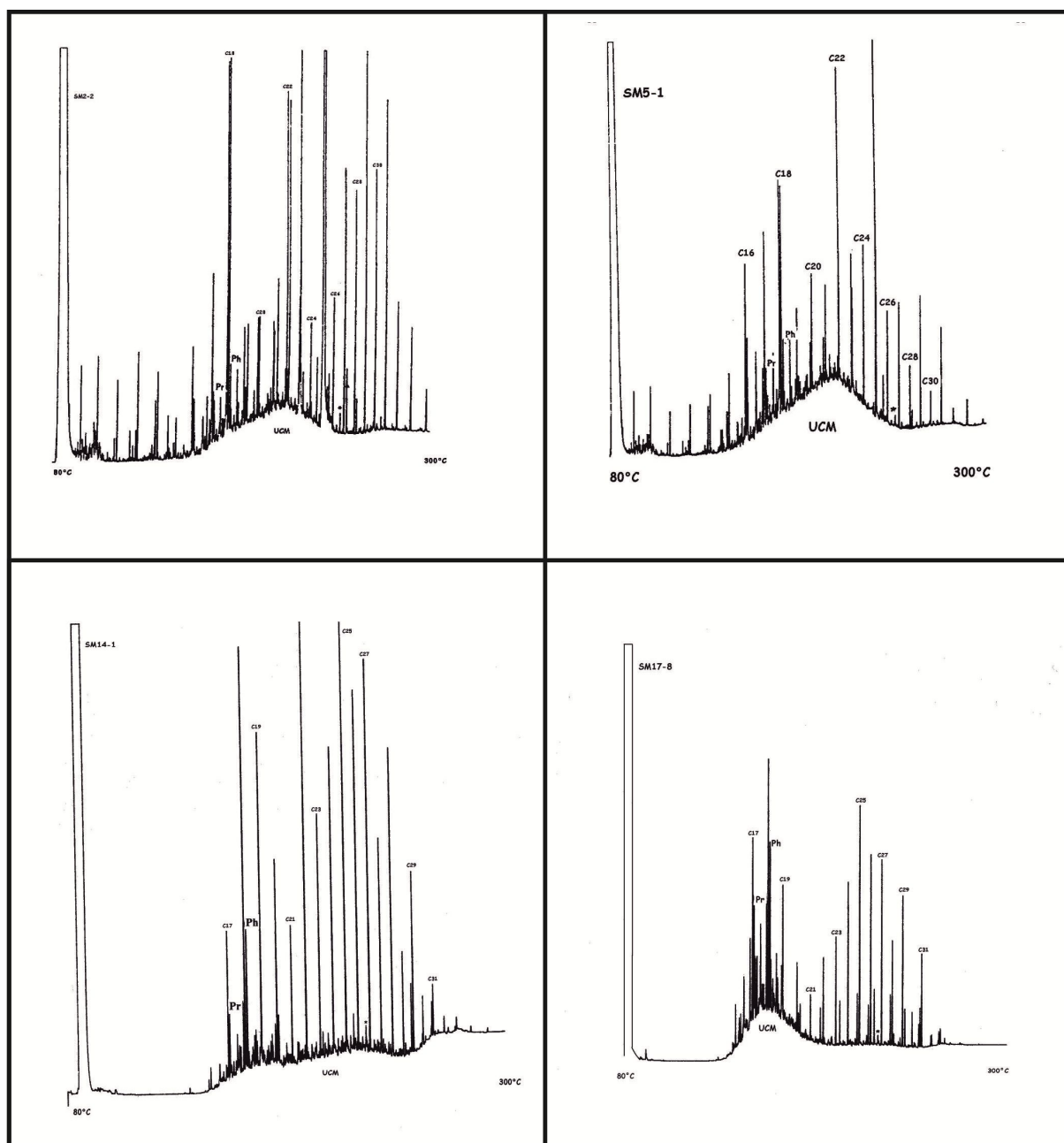


Figure 53b : chromatogrammes des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques des sédiments (en sub-surface) prélevés dans la zone médiane de la sebkha de Moknine.
(UCM : composés non résolus, Pr: pristane, Ph: phytane, *: squalane)

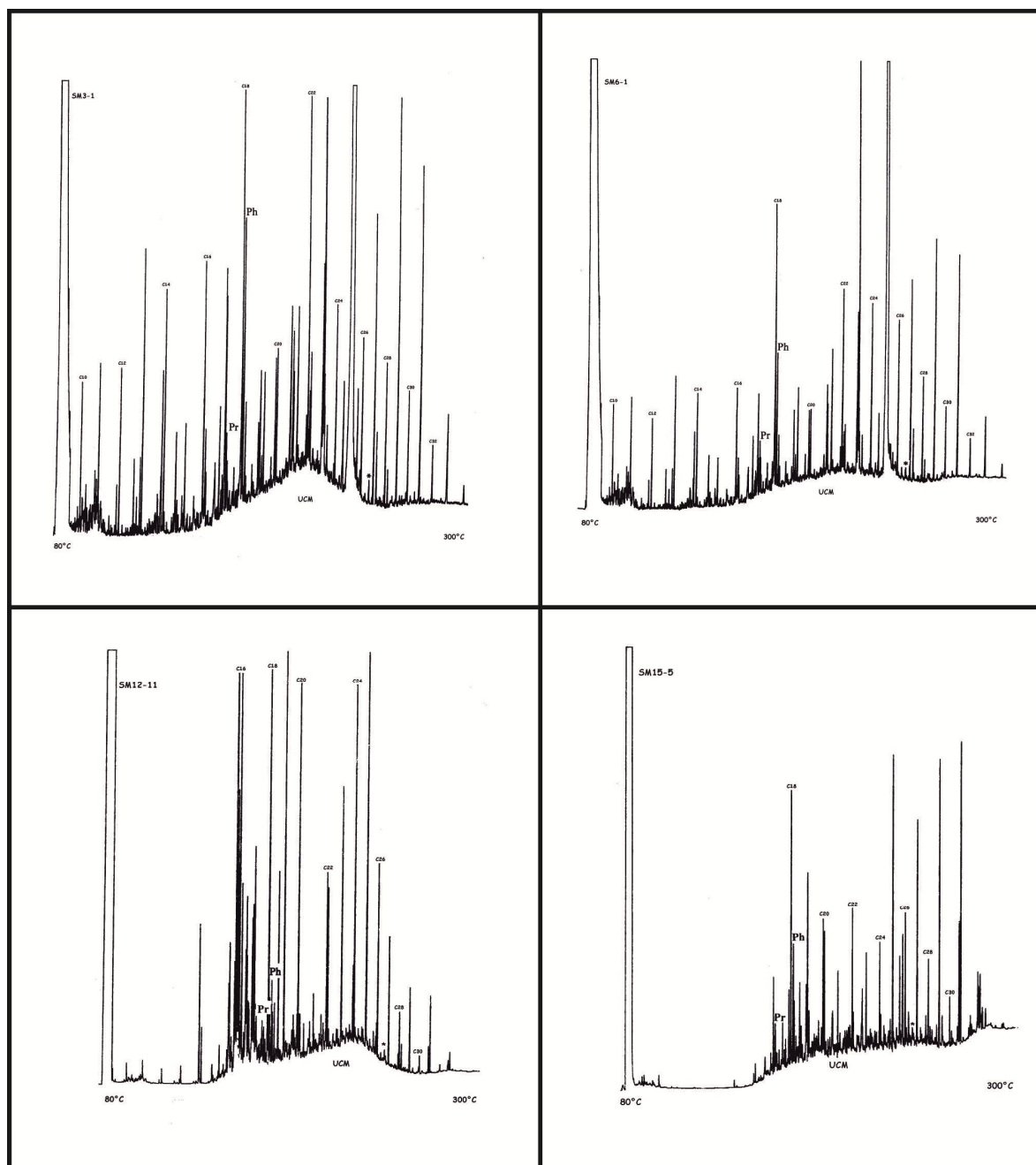


Figure 53c : chromatogrammes des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques des sédiments (en sub-surface) prélevés au centre de la sebkha de Moknine.
(UCM : composés non résolus, Pr: pristane, Ph: phytane, *: squalane)

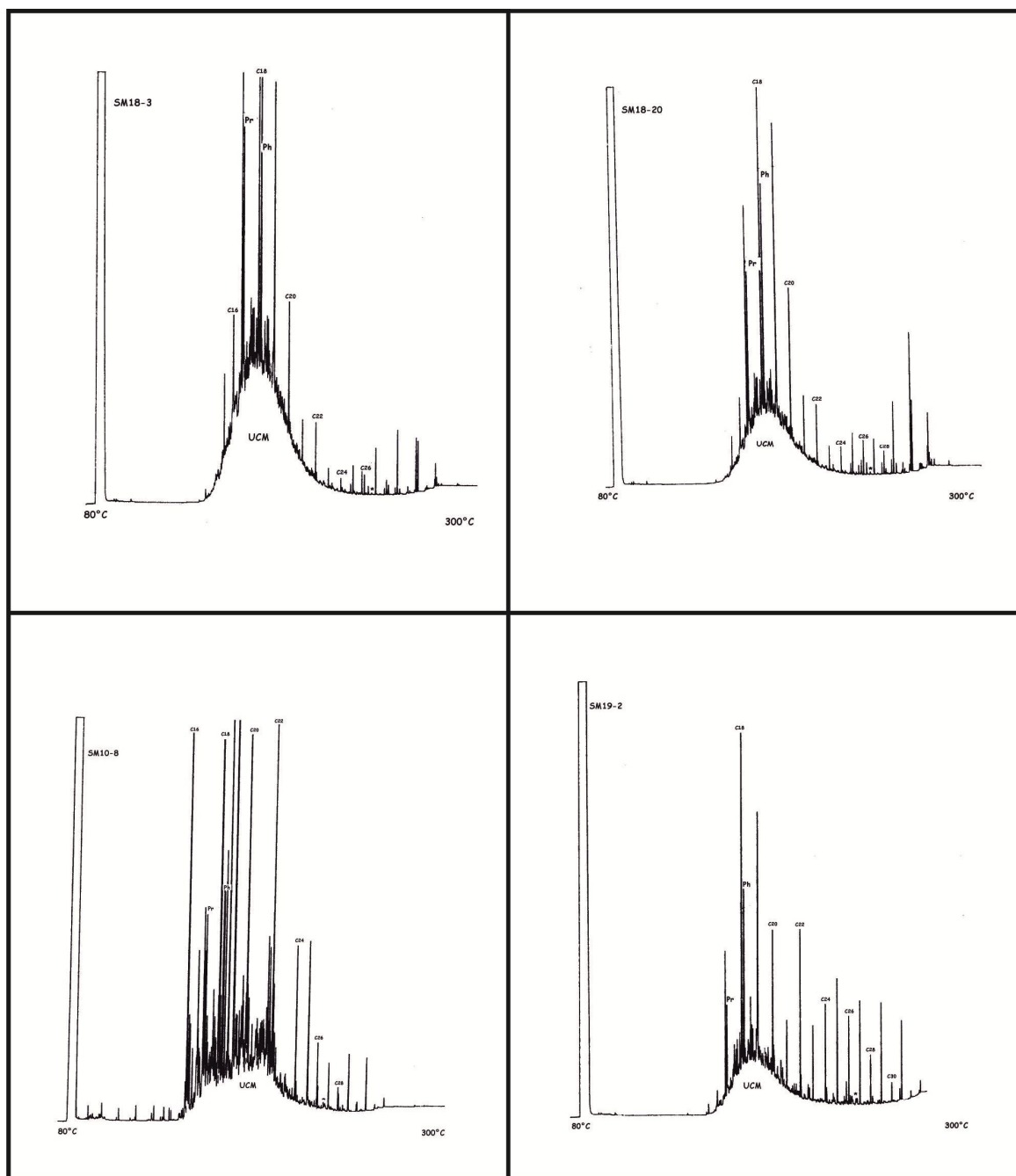


Figure 53d : chromatogrammes des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques des sédiments (en sub-surface) montrant une répartition unimodale (UCM : composés non résolus, Pr: pristane, Ph: phytane, *: squalane)

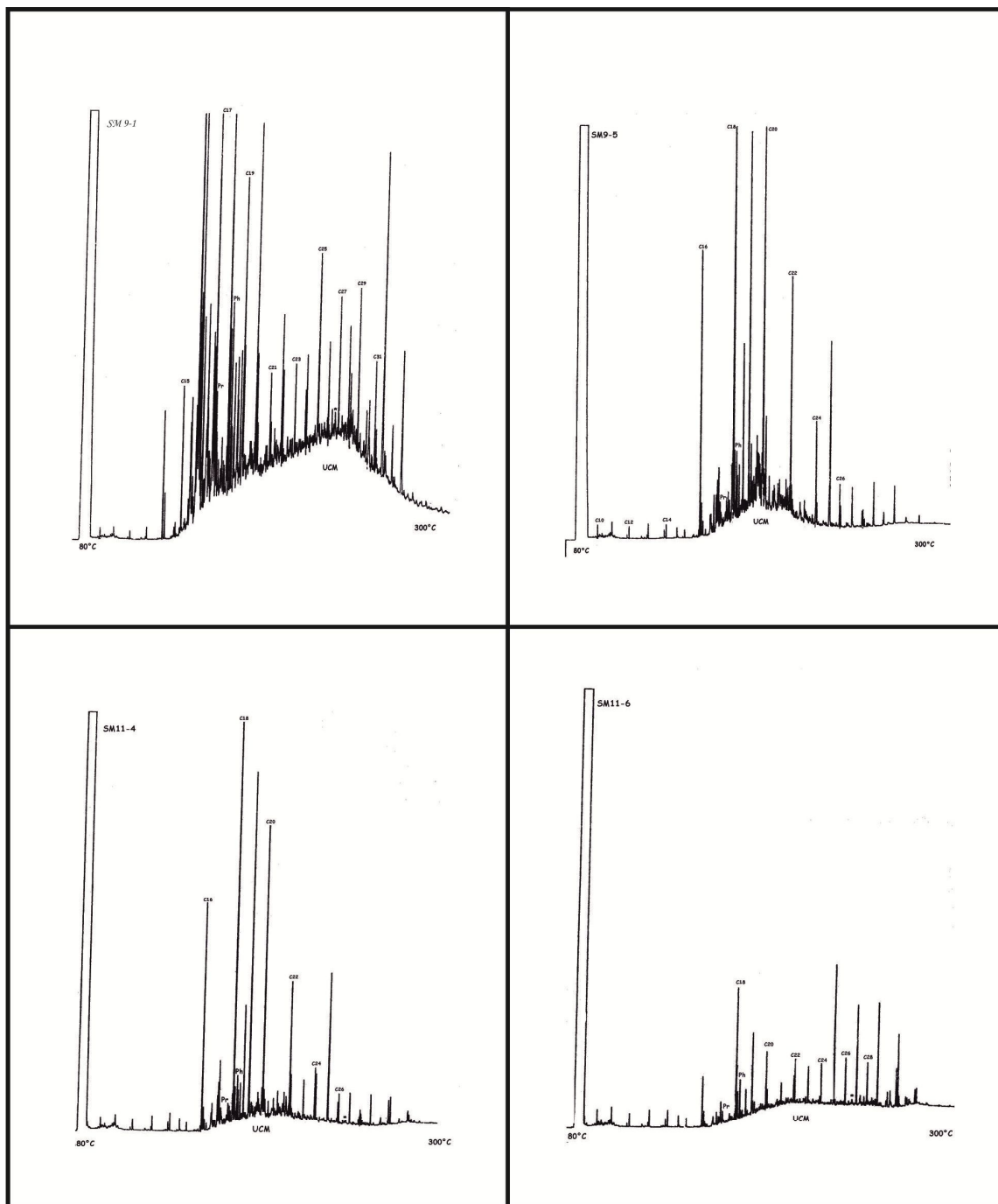


Figure 53e : chromatogrammes des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques des sédiments (en sub-surface) des carottes SM 9 et SM 11.
(UCM : composés non résolus, Pr: pristane, Ph: phytane, *: squalane)

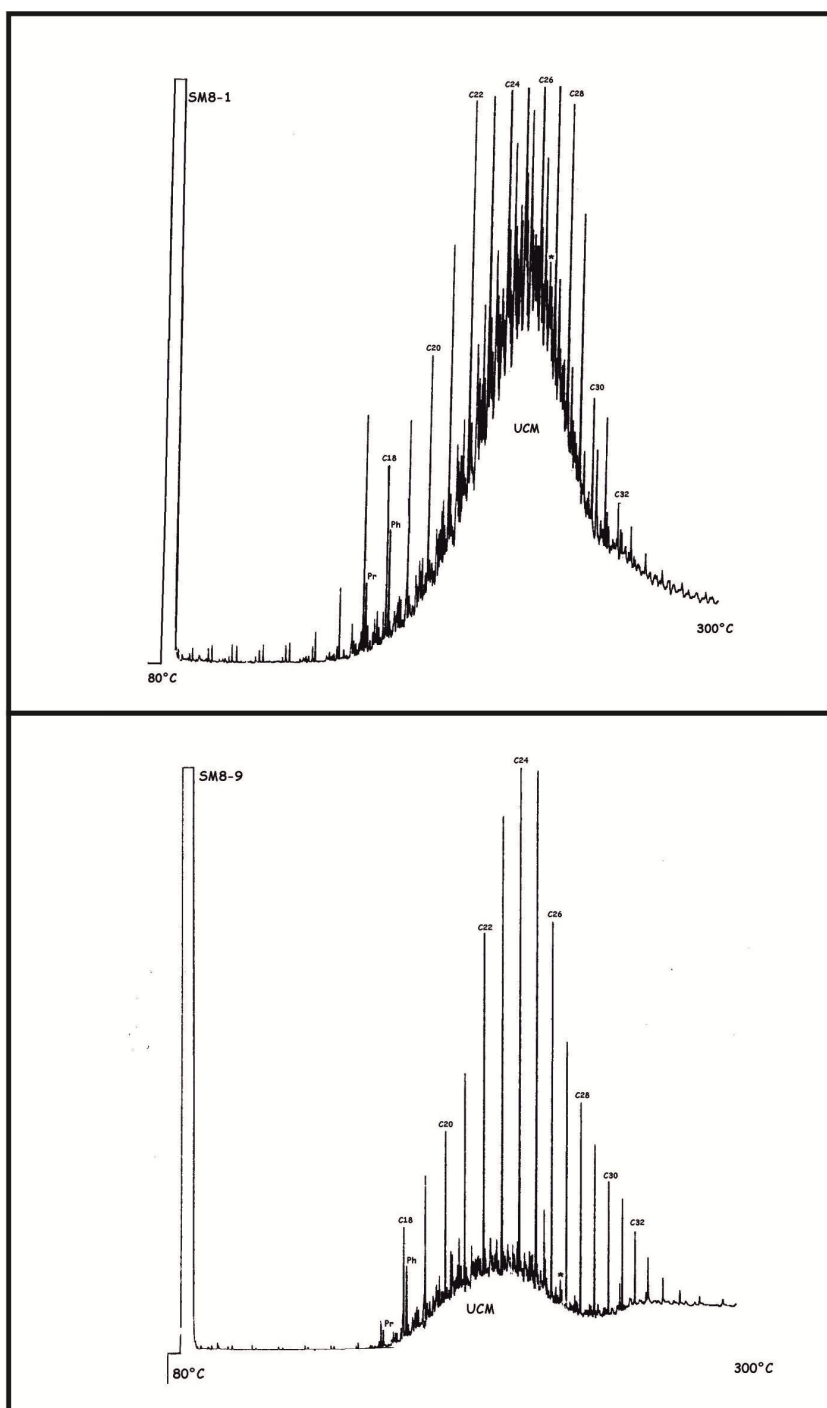


Figure 53f: chromatogrammes des hydrocarbures saturés et insaturés non aromatiques des sédiments (en sub-surface) de la carotte SM 8 montrant une répartition unimodale (diagenèse des restes bactériens). (UCM : composés non résolus, Pr: pristane, Ph: phytane, *: squalane)

III-4-2- Les iso-alcanes isoprénoïdiques

Les hydrocarbures isoprénoïdes les plus fréquemment mis en évidence dans les sédiments sont sans doute le phytane et le pristane dont le précurseur est le phytol issu de la chaîne latérale de la chlorophylle a (Tornabène et *al.*, 1978 et Saliot, 1981).

D'autres marqueurs biologiques sont aussi d'une importance dans les milieux hypersalins : le squalane et l'isoprénoïde en C25. Ces derniers sont les indicateurs de l'activité méthanogène.

* Pristane (C19) et Phytane (C20)

L'examen des iso-alcanes montre que dans les sédiments de la sebkha le pristane et le phytane sont en général présents en quantités plus ou moins importantes (Tab.13). Une richesse supérieure en phytane par rapport au pristane est remarquée dans les échantillons. Ceci renforce l'idée de l'origine biologique des hydrocarbures.

Le rapport Pr/Ph est comparable dans toute la sebkha aussi bien à la périphérie qu'au centre de la sebkha.

Ce rapport généralement inférieur à 1 (moyenne =0,5) prouve une évolution de la chaîne du phytol de la chlorophylle dans un milieu réducteur. Certains échantillons de profondeur présentent un rapport voisin de l'unité. Ceci est dû à un héritage de la biomasse. En effet, ces deux composés peuvent être aussi des produits de synthèse biologique (Tissot et *al.*, 1977).

L'utilisation de ce rapport en terme d'environnement est sujet de nombreuse limitation (ten Haven et *al.*, 1988) car le phytane peut provenir de chaînes biphytanils des membranes d'archéobactéries, méthanogènes, thermophiles ou halophiles (Brassel et *al.*, 1983, Goosens et *al.*, 1984) et comme nous le montrerons plutard la sebkha de Moknine et aussi le siège d'une prolifération bactérienne halophile jouant un double rôle dans la sebkha. D'une part ces bactéries dégradent la matière organique et d'autre part enrichissent le stock organique fossilisé en hydrocarbures.

Dans certains échantillons, nous avons remarqué une prédominance du pristane sur le phytane et d'un rapport voisin de l'unité (SM18). Ceci n'est pas du à des apports à partir d'une source de pétrole brut (Gomez *et al.*, 1988). Car la distribution des n-alcanes de ces échantillons montre bien l'origine biologique de ces hydrocarbures.

Le rapport Pr/nC17 et Ph/nC18 reportés sur le diagramme de Waples (1985) permet de prélever les points suivants (Fig.54 a- b):

✓ La fraction lipidique analysée dans les coupes prélevées au Nord et à l'Est, est issue d'une matière organique hétérogène : Continentale, mixte et marine. Donc différents apports sont livrés aux sédiments (Fig.54a). Les conditions sont plutôt anoxiques.

✓ La fraction lipidique trouvée dans la radiale NW et SW provient d'une matière organique mixte. Les conditions sont plutôt oxiques (Fig.54b).

Le caractère marin ou plutôt limnique qui était caché apparaît mieux suite à l'analyse de la fraction lipidique. A partir de ce diagramme de Waples nous avons aussi une idée sur l'environnement de dépôt du bassin de Moknine. Au Nord et à l'Est les conditions sont anoxiques alors que les conditions qui règnent dans la partie ouest sont oxique.

Les sédiments de la sebkha enregistrent des changements des conditions de dépôt. Ce qui a influencé sur la répartition de la matière organique et le taux préservé dans ces sédiments.

* Squalane

La présence du squalane reflète une activité méthanogène (Rowland, 1990). Les bactéries méthanogènes constituent un groupe hautement spécialisé de bactéries anaérobies strictes ; celles-ci présentent différentes morphologies, dont la caractéristique commune est la production obligatoire de méthane, comme métabolite final. Les bactéries méthanoducs sont largement disséminées dans la nature et constituent le chaînon ultime de la minéralisation

dans de nombreux environnements anoxiques où la matière organique est vigoureusement décomposée (Woese et *al.*, 1978 ; Vogels, 1979, Jiamo et *al.*, 1990a, 1990b).

En milieu limnique, la teneur en sulfate n'est pas suffisante pour permettre un développement conséquent des bactéries sulfato-réductrices. Les populations méthanogènes deviennent prédominantes et actives dès l'interface eau-sédiment et diminuent avec l'enfouissement (Mah et *al.*, 1977 ; Nedwell, 1984).

Dans les sédiments de la sebkha l'apparition du squalane est remarquée généralement dans les sédiments de surface avec un pic assez important avant nC27 (Chairi et Belayouni, 2001). Ce pic disparaît vers la profondeur. C'est un indicateur d'une activité méthanogène qui se restreint dans les sédiments de surface sous la pellicule de sel. Dans les niveaux profonds, où nous avons retrouvé ce marqueur, l'environnement est à tendance anoxique.

* Composés non résolus

Les hydrocarbures ramifiés et cycliques désignés sous le nom UCM (unresolved complex mixture), se manifestent par une bosse ou hump dans les chromatogrammes, au-dessus de la ligne de base.

La présence d'UCM dans les chromatogrammes est un signe d'activité bactérienne. Il est d'autant plus important que cette activité soit intense (Giger et *al.*, 1980 ; Bigot et *al.*, 1990 ; Killops et Al-Juboori, 1990 ; Peters et Moldowan, 1993).

Le hump important sous nC19-nC25 avec un maximum en nC22 ou nC23, sans prédominance de n-alcane pairs ou impairs implique une altération de détritux algaires par voie microbienne (Venkatesan et *al.*, 1982 et 1987).

Les composés non résolus dans les carottes sont très importants à la surface mais leur importance diminue en profondeur.

Dans toutes les carottes prélevées au Nord et à l'Est, une bosse bien visible dans la gamme C17-C25 avec un maximum en C23, C24 et C25 dont l'importance diminue avec la profondeur.

Quant à la carotte SM9 une bosse assez importante apparaît sous les légers C16-C22, avec un maximum en nC18 et nC20.

Une gamme nC18-nC25 avec un maximum en C25 se remarque dans les échantillons prélevés dans les carottes SM10 et SM11.

Dans les échantillons de la carottes SM12, deux bosses apparaissent dont une sous les légers nC16-nC20 avec un maximum en C16, C18 et C20 et une autre plus importante sous les lourds nC22-nC31 avec un maximum en C22 et C25.

Dans les échantillons des carottes prélevées à l'Ouest, nous avons remarqué une bosse assez importante sous les légers nC17-nC23, avec un maximum en C18 et C22 et une très réduite sous les lourds dans la carotte SM13.

Dans la carotte SM14 la bosse sous les légers et celles sous les lourds sont plus importantes. Une bosse très particulière en nC29 se remarque dans les échantillons SM14-3 et SM14-16.

Les échantillons de la carotte SM15 renferment une bosse sous les légers nC17-nC23 avec un maximum en nC18 et nC19.

En ce qui concerne les carottes SM16, SM17, SM18 et SM19 une bosse importante sous les légers nC17-nC23 avec un maximum en nC18, nC19 et nC20 et une autre légère et large sous les lourds avec un maximum en C25.

La variation de la nature des composés cycliques, l'intensité de l'activité bactérienne et l'absence d'une similitude dans les différentes radiales prouve que l'évolution du stock organique dans l'environnement de Moknine est variable.

L'hétérogénéité du stock organique fossilisé dans le bassin évaporitique de Moknine ne se restreint pas à la nature ou à l'origine de la matière organique, mais englobe aussi la composition de cette dernière.

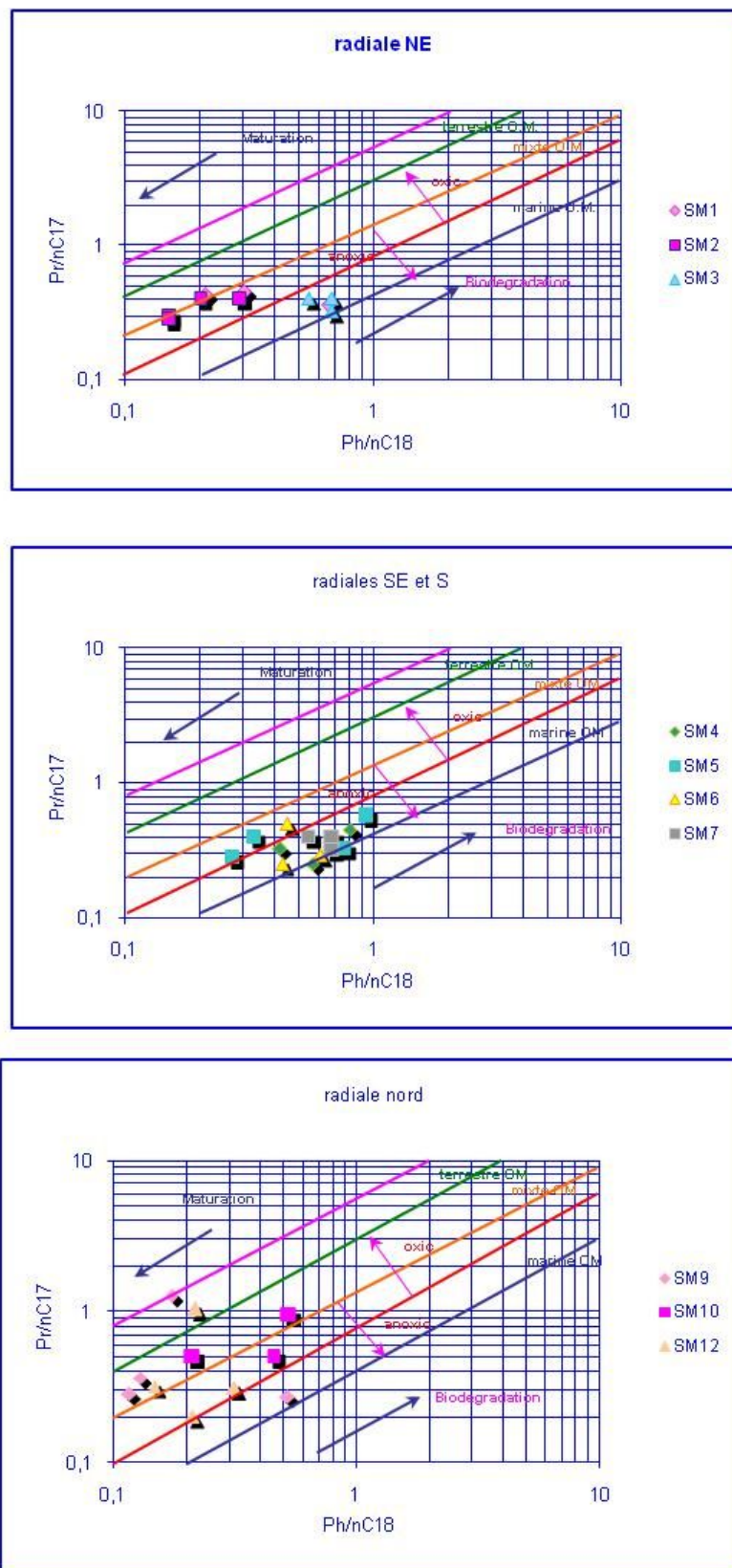


Figure 5 4a : Diagramme de waxels : Type de matière organique, environnement de dépôt et degrés de maturité.

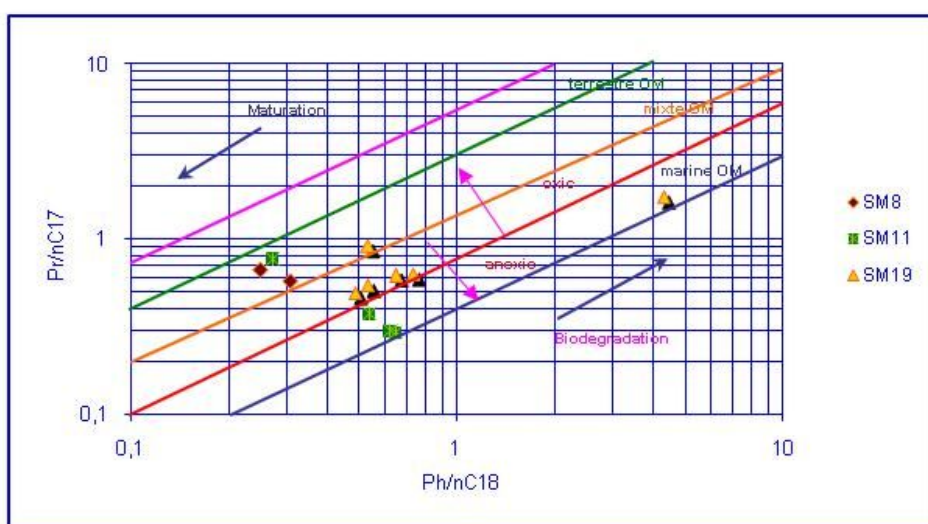
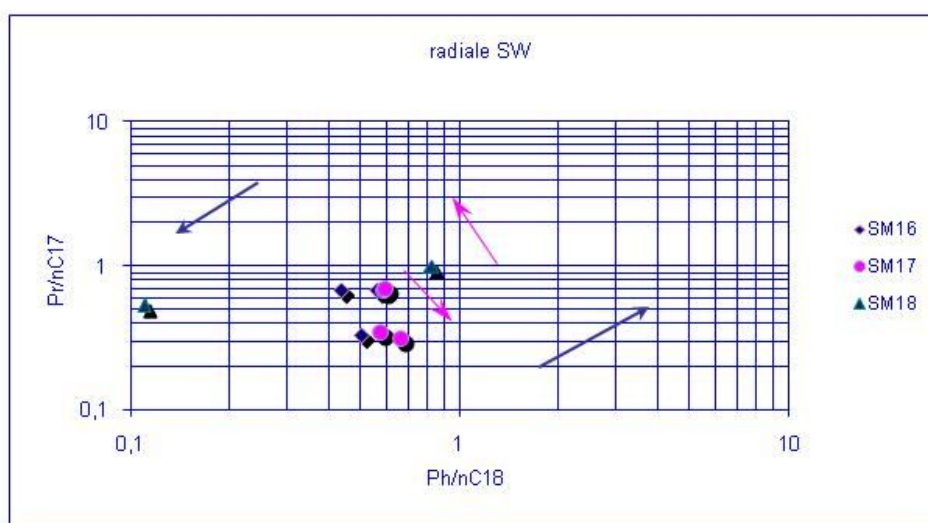
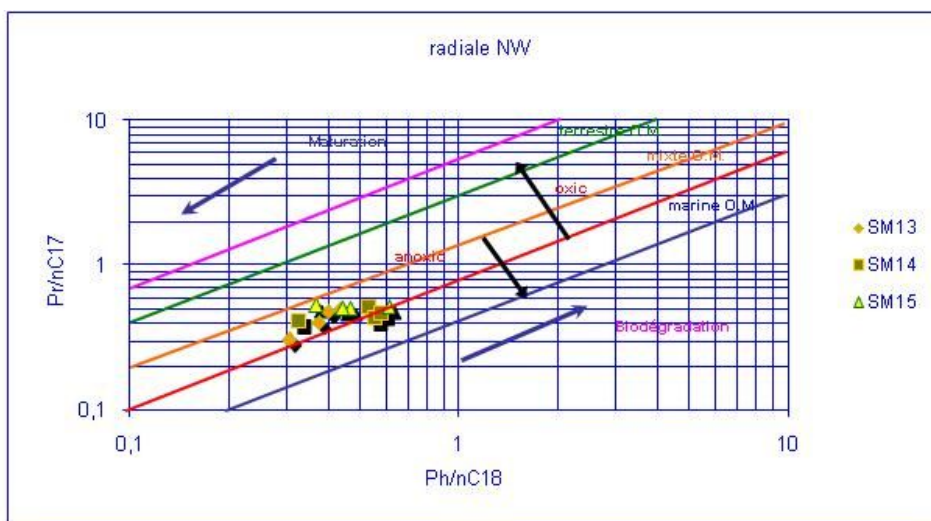


Figure 5 46 : diagramme de wapels : Type de matière organique, environnement de dépôt et degrés de maturité.

IV-4-4-Interprétation

L'étude des bitumes libres était un moyen pour confirmer les résultats précédents, aussi bien quantitatifs que qualitatifs. L'extrait chloroformique est faible généralement et ne dépasse pas les 10% du COT. Nous avons marqué la présence de niveaux riches dans la colonne sédimentaire reflétant la bonne préservation de la matière organique et le changement des conditions du milieu. L'absence d'une bonne corrélation entre le COT et l'extrait chloroformique prouve tant l'hétérogénéité du stock organique sédimenté. Ce dernier reflète à la fois la variation d'origine (continentale et lacustre) et des conditions du milieu de dépôt qui sont responsables de la variation de la composition et des constituants de cette matière organique.

La fraction lipidique libre se trouve essentiellement sous forme de résine et d'asphéltène prouvant l'origine biologique des lipides libres. Toutefois les échantillons où nous avons trouvé plus de fractions saturées et aromatiques appuient l'idée de la variation des conditions du milieu et de la nature de la matière organique. En effet, celle d'origine marine ou algale renferme plus de fractions saturées.

L'analyse de la fraction saturée est insaturée non aromatique par CPG révèle l'existence d'un caractère généralement ubiquiste de la distribution des n-alcanes dans les sédiments. Ce qui suggèrent l'existence d'un ou plusieurs précurseurs identiques.

Le mode de distribution des n-alcanes montre trois origines de la matière organique sédimentée :

- Un mode en nC15 à nC21 avec un maximum en C15, C17 et C22 qualifiant l'origine phytoplanctonique.
- Un autre, en nC23 à nC33 avec un maximum en nC27, nC29 et nC31 caractéristique des végétaux supérieurs.

➤ Et enfin, un mode étalé de nC17-nC30 avec un maximum en C23 et C25 sans prédominance paire ou impaire. Cette répartition unimodale reflète l'existence de prolifération bactérienne. La présence d'isoalcanes qui se répartissent entre les n-alcane du nC22 au nC29 conforte par ailleurs une telle hypothèse car ces composés sont habituellement considérés comme marqueurs bactériens (Connan *et al.*, 1986).

Les valeurs de CPI montrent l'importance de la contribution continentale, qui par son abondance cache le caractère ou lacustre de la matière organique sédimentée dans le bassin de Moknine.

La présence du docosane nC22 dans tous les chromatogrammes obtenus indique la présence d'une activité des micro-algues des milieux salés, donc la présence d'une productivité de la sebkha qui a contribué au stock organique sédimenté. Ce n-alcane (nC22) est un indicateur aussi d'une activité bactérienne importante et de la dégradation de la matière organique.

Les isoprénoides (Pr, Ph et squalane) révèlent encore l'origine mixte de la matière organique (autochtone et allochtone), l'hétérogénéité du stock de point de vue composition et degré d'évolution et aussi le changement des conditions de dépôts (oxiques et anoxiques).

Le bassin de Moknine marque dans sa colonne lithologique la présence de période oxique et d'autres anoxiques qui sont en relation étroite avec la variation des saisons par conséquent la quantité du matériel organique livré et produit par la sebkha.

Ce milieu est régi par une activité bactérienne très importante qui est de type méthanogène surtout en surface sous la pellicule de sel. Enfin, les UCM confirment encore l'importance de l'activité bactérienne et l'hétérogénéité de point de vue composition.

V- CONCLUSION

La distribution des faciès organo-sédimentaires dans la sebkha de Moknine est influencée par plusieurs facteurs. Ils incluent d'une part l'hydrodynamisme, la topographie et les apports détritiques minérales et d'autre part la production, l'apport et les conditions de préservation de la matière organique.

Le modèle d'évolution de la sebkha de Moknine prend en compte la variation du niveau d'eau dans le bassin s'exprimant en terme du déplacement de la zone immergée et le taux de la matière organique sédimentée.

Ce modèle peut être subdivisé en trois temps (t_0 , t_1 et t_2).

► Au temps t_0 :

La sebkha plus étendue vers l'Ouest est couverte d'eau et les dépôts sont de texture argileuse. Les apports organiques sont variés une part est livrée par le continent et une autre est produite dans la tranche d'eau épaisse. Le transport vertical de la matière organique est effectué dans un corps d'eau stratifié à l'abri d'oxygène. La stratification est due à la présence d'une eau sursalée et une autre douce (Fig.55)

Le cheminement des apports organiques dans la tranche d'eau sursalée et anoxique s'effectue à la suite des arrivées successives d'eau douces, provoquant une désaturation momentanée du milieu. Cette dilution est suivie immédiatement d'une reconcentration des sels afin de protéger de l'oxydation les particules organiques par reconstitution d'un nouveau système stratifié.

La présence d'une matière organique bien préservée dans la phase argileuse ne peut être expliquée que par la présence des conditions anoxiques dans le milieu évaporatoire de Moknine. Cette matière organique est d'origine mixte. En effet, la répartition bimodale des n-alcanes caractérisant les échantillons prélevés dans la phase argileuse le prouve, et la répartition unimodale centré sur les légers dénote la participation d'une biomasse originelle.

► Au temps t_1 :

L'avènement des sables dans la partie ouest s'accompagne par une migration du faciès organique vers la zone orientale (Fig.55). En effet, le réseau hydrographique est très abondant dans la zone occidentale.

Les sables sont un milieu de dépôt non favorable à la préservation de la matière organique. Le milieu de dépôt est ainsi très oxygéné et ne permet qu'une sédimentation faible de matériel organique terrestre.

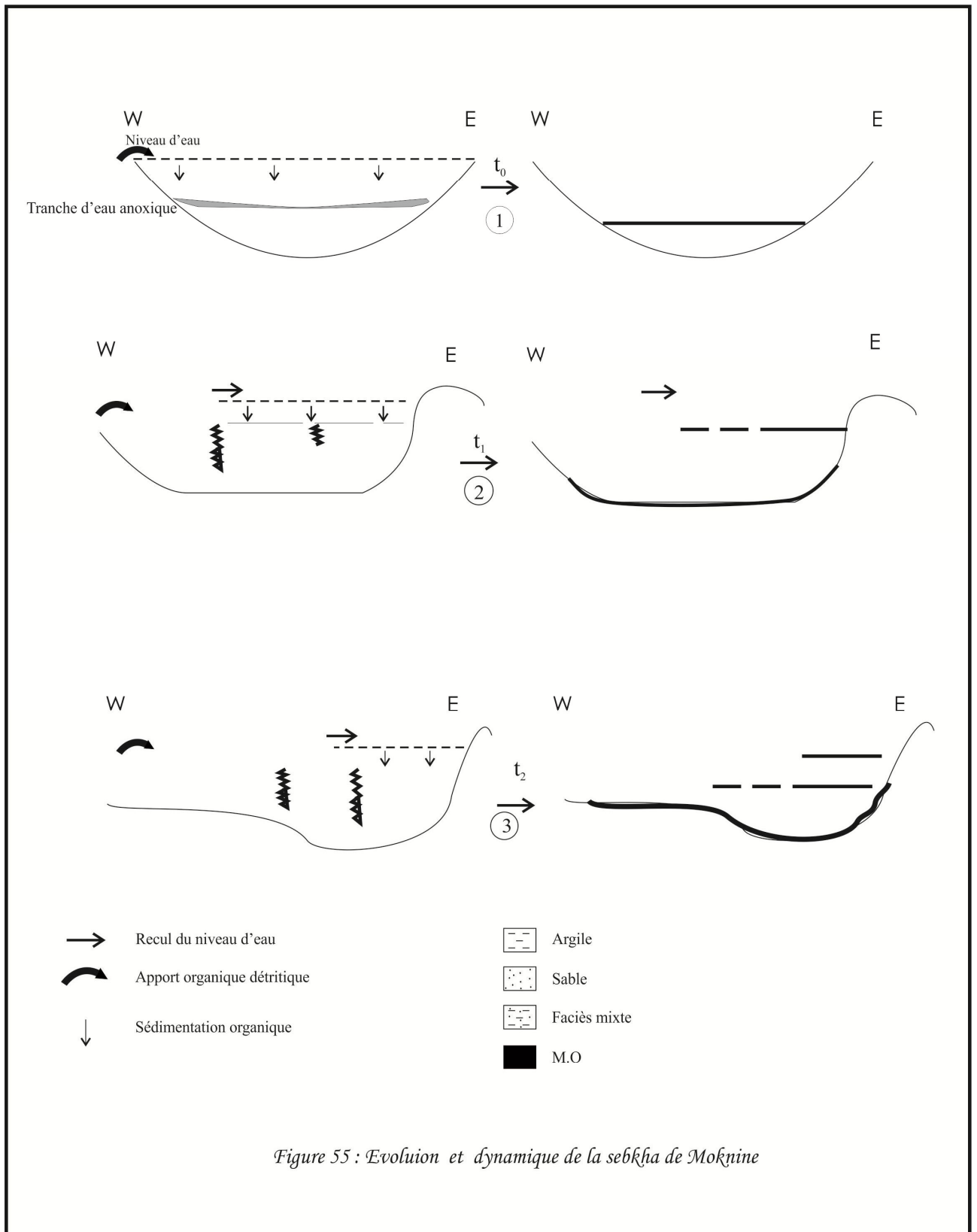
Le phénomène décrit au temps t_0 sera restreint sur la zone d'accumulation d'eau et milieu de dépôt des argiles. La partie orientale et le centre sont caractérisée par une sédimentation organique mixte bien préservée.

► Au temps t_2 :

Seule la partie orientale est immergée (Fig.55). Elle se caractérise par une accumulation de matériel organique essentiellement détritique. Le stock organique est bien préservé dans un milieu à tendance anoxique. En effet, la présence du squalane le prouve.

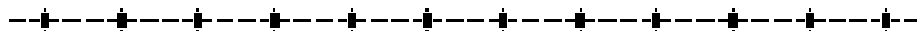
La tranche d'eau peu épaisse aujourd'hui ne permet pas une stratification des eaux. Cependant l'évaporation totale et l'édification d'une pellicule très épaisse de halite en saison chaude soustrait la matière organique d'une oxydation et favorise sa préservation.

Les bordures orientale et septentrionale se caractérisent par la production de tapis de cyanobactéries. En effet, les n-alcanes des échantillons prélevés à la bordure révèlent la présence d'une répartition unimodale avec un maximum en nC23 et nC25, sans prédominance des n-alcanes impairs ou pairs.



CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale



Les lacs d'origine tectonique peuvent avoir des origines très anciennes. L'importance et la régularité de la subsidence ont permis l'accumulation de très puissantes séquences sédimentaires enregistrant les échelles chrono-climatiques parfois depuis le Tertiaire. Le volume et l'épaisseur des sédiments accumulés n'y sont souvent connus que par des mesures indirectes, de type géophysique mais aucun forage ne traverse l'ensemble des remplissages, ce qui limite leur étude.

Le bassin de Moknine est formé à la suite d'accidents tectoniques d'âge quaternaire. Depuis la dernière transgression marine datée Néothyrien, les dépôts de la sebkha sont exclusivement d'origine continentale. En effet, un cordon littoral la sépare de la mer à l'Est. Les sédiments indicateurs de cette transgression semblent être effondrés et recouverts par la vase qui dépasse trois mètres de profondeur. Ainsi, éloignée de la mer, la sebkha de Moknine est influencée uniquement par le continent. Le comblement de cette cuvette par les matériaux, que l'érosion arrache au bassin versant, est le seul phénomène qui se produise. Ces apports sont très variés et formés de sable, de silt et d'argile. Ces matériaux sont transportés vers la sebkha par oued Redjel Chiba au Sud, oued Soltane au Nord et oued Chibet au Sud-Est. Ils sont déposés et répartis en auréoles anisopaques

Les faciès déposés dans le bassin de Moknine varient légèrement de l'Est vers l'Ouest. Les sables arrivant du bassin versant vers la sebkha dans sa partie occidentale par le réseau hydrographique très abondant sont fins à la périphérie et très fins en zone médiane et forme une large plage (1 km). Ils sont moyens à fins ailleurs où le réseau hydrographique est peu abondant, et la frange sableuse n'est que de quelques mètres. Dans la zone sud-est, les sables semblent provenir de l'oued Chibat et de l'érosion des sols villafranchiens. Cependant les dépôts sableux de la partie nord-est résultent essentiellement de l'érosion de ces sols en raison de la topographie légèrement plus haute de cette zone.

Au cours de son histoire récente, la sebkha a connu une évolution marquée globalement par une rétrogradation continue. Celle-ci rétrograde et le continent prograde. L'apport terrigène, considérable du côté ouest, accentue le phénomène de comblement de la sebkha. L'analyse de cette évolution, faite à partir de l'étude lithologique, montre que le système est en voie d'assèchement et de comblement.

La phase argileuse remarquée à la base des carottes périphériques SM13 et SM16 et l'abondance du faciès argileux dans les autres carottes à partir de 1 m de profondeur, corrobore le phénomène de vieillissement de ce bassin. Cette phase indique le changement de l'état de cette sebkha et donne une idée sur ses anciennes limites. L'étendue du bassin endoréique de Moknine était plus importante et totalement immergée.

La présence de niveaux millimétriques lignifiés au sein des séries montre que la sebkha est passée par des courts épisodes d'inondation. Dans certains endroits, ce niveau est épais.

L'analyse granulométrique et microgranulométrique des sables déposés dans la sebkha a donné des courbes cumulatives généralement paraboliques à pente forte. C'est la forme théorique correspondant à l'immobilisation globale par diminution de la capacité de transport. Cette dernière est liée à une diminution de la vitesse du courant de transport de matériel transporté à proximité du fond à l'état de «suspension gradée» au sens de Passega. La sédimentation correspond à des dépôts de courant se produisant en fin de crue, par excès de charge lorsque s'atténuent la vitesse et la turbulence du fluide transporteur.

Les faciès fin argilo-silteux et argileux sont plus abondant dans la partie médiane et représentent l'essentiel des sédiments vers l'intérieur de la sebkha. Ces matériaux suivent trois modes de transport et de dépôt. La variation de la sédimentation dépend de la concentration des cours d'eau dans la partie occidentale, la variation de la topographie de bordure et le degré d'énergie des eaux.

L'étude minéralogique a révélé l'existence de trois minéraux argileux : kaolinite, illite et smectite et six minéraux non argileux. Il s'agit de : quartz, feldspaths, calcite, dolomite, gypse et halite. Tous ces minéraux sont pour la plupart hérités des formations bordant la sebkha, alors que la halite, le gypse et une fraction de la calcite sont authigènes.

La répartition spatiale du faciès organique fossilisé dans les sédiments superficiels de la sebkha est en relation avec la circulation et l'accumulation des eaux. Deux domaines de richesses sont distingués :

Une partie orientale caractérisée par une richesse en COT, S1, S2, CHT et en Ext.T. C'est une zone immergée où l'eau accumulée durant la saison humide joue un rôle dans la production et la préservation de la matière organique. Elle représente la nouvelle sebkha de Moknine. Deux types de matière organique sont distingués dans cette zone : lacustre et ligno-cellulosique. En effet, la répartition des n-alcanes est bimodale (léger et lourd). Ce stock organique hétérogène a évolué dans des conditions anoxiques.

Une partie occidentale représentant la zone comblée ou émergée de la sebkha. Elle est caractérisée par de très faible taux de COT, S1, S2, CHT et en Ext.T. Le stock organique sédimenté est homogène, formé essentiellement de matière ligno-cellulosique. La répartition des n-alcanes est centrée sur les lourds nC25-nC31 et la matière organique est concentrée dans le domaine III dans le diagramme IH/Tmax. Les conditions environnantes sont oxiques.

En dessous de l'interface eau/sédiment, la cinétique de la dégradation de la matière organique varie de la périphérie au centre du bassin.

La périphérie lieu de dépôt grossier se caractérise par une dégradation biologique rapide du matériel organique typique des milieux oxydants. Il est sujet à une minéralisation et à une recombinaison rapide des résidus de dégradation.

Le centre, siège d'accumulation de vase argileuse, est un milieu favorable à la préservation de la matière organique. En effet, en sus de l'affinité faciès fins faciès organique, la vase argileuse est imperméable à la diffusion de l'oxygène. L'allure en « dent de scie » des courbes d'évolution du COT, S1 et S2 illustre une évolution lente typique de milieu anoxique. Dans ces milieux, la dégradation anaérobie entraîne une meilleure préservation de la matière organique et son maintien à un stade diagénétique moins évolué qu'un milieu oxique.

Le passage des sables vers les argiles est accompagné d'une augmentation des taux de stock organique. Les niveaux argileux détectés à la base des carottes remontent à une époque où la sebkha était plus étendue vers l'Ouest et où les conditions étaient favorables à une préservation du matériel organique. L'avènement des sables dans la partie occidentale est accompagné par une rétrogradation de la matière organique.

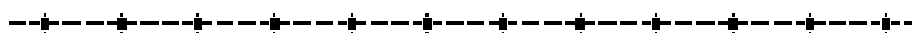
Les minces niveaux noirâtres intercalés en profondeur dans la colonne sableuse à l'Est sont des accidents organiques et témoins de saisons exceptionnelles de forte pluviosité et constituent une véritable singularité lithologique et organique. Ces niveaux riches en matière organique correspondent à une accumulation *in-situ* des végétaux supérieurs profondément transformés par la dégradation microbienne et bien préservée. En effet, la couverture sableuse a soustrait partiellement le matériel organique des processus de dégradation biologique, donnant ainsi un faciès organique sous forme de niveaux lignifiés qui rappellent une situation de la sebkha au Miocène.

La sebkha de Moknine est le siège des rejets des eaux de la station d'épuration et depuis une vingtaine d'années dans sa partie nord. Les carottes SM9 et SM11 ont enregistré dans leurs sédiments de surface des valeurs exceptionnellement élevées en matière organique. Ces taux sont considérés comme des témoins de contamination par des produits organiques d'origine anthropique.

Enfin, ce qui résulte de cette étude est le fait que la sebkha de Moknine est en voie de comblement et d'assèchement, d'où de nouvelles limites. Cette dernière se restreint de plus en plus vers l'Est. L'action anthropique est très remarquable dans cette zone, ce qui a favorisé une eutrophisation des eaux et peut être une pollution du milieu au Nord. Ce bassin produit encore des couches importantes de halite qui peuvent être exploitées et commercialisées. Un assainissement du milieu est conseillé et une étude d'impact doit être réalisée en vue de la protection de ce milieu naturel.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



ADAM P., SCHMID J.C., MYCKE B., STRAZIELLE C., CONNAN J., HUC A., RIVA A. and ALBERCHT P. (1993) - Structural investigation of nor polar cross – linked macromolecules in petroleum. *Geochim. Cosmo. Acta*. Vol. 57, pp 3395-3419.

ADAMS M.S. and PRENTIKI T.R., (1982) - Biology, metabolism and function of littoral submerged weed beds of lake wingra, Wisconsin - a summary and review. *Arch. Hydrobiol., suppl.* 62 pp 333-409.

ALBERCHT P., DASTILLUNG M., CORBERT B. et RIOLO J. (1983) - Etude de l'origine et de la transformation des marqueurs moléculaires dans les sédiments marins profonds. In : *Géochimie organique des sédiments marins profond*. Orgon à Misedor. Synthèse ORGON. Ed. C.N.R.S., Paris. pp 407- 420.

AMARI A. (1986) - Des oscillations du niveau marin durant le quaternaire sur le littoral de sfax. *SC. de la terre*. Vol.4 Tunisie, pp 71 – 78.

AMARI A. et BEDIR M. (1988) - Les bassins quaternaires du Sahel central de la Tunisie. Genèse et évolution des sebkhas en contexte décrochant compressif et distensif. *Géodynamique*. Vol.4, N°1, pp 49-65.

AMRI R.(1992) - Notes hydrogéologiques du bassin de Moknine. Fev. 1991, D.R.E. 14 p.

ANADAN P., CABRGRE L. and KELTS K. (1991) - Lacustrine facies analysis. *Int.Ass. Sedimentologist. Spl.Pub.*13 Blackwell Scientific, 318p.

ARNOSTI C., REPETA D.J. and BLOUGH N.U. (1994) - Rapid bacterial degradation of polysaccharides in anoxic marine sediments. *Geochim. Cosmo. Acta*. Vol.58, pp 2639 2652.

- AYCARD M., TRIBOUILLARD N., BAUDI F., DERNNE S., LERGEAU C. (2001)** – Caractérisation des mécanismes de préservation de la matière organique des sédiments récents du bassin de Cariaco Venezuela. 8^{ème} Congrès français de sédimentologie. Orléans. France 2001, 3p.
- BARANGER P. and DISNAR J.R. (1988)** - Non-aromatic biomarkers associated with a Paleogene salt formation (Bresse, France). *Org. Geochem.* Vol.13, N4-6, pp 647-653.
- BEDIR M. et ZARGOUNI F. (1986)** - Structuration post – Miocène du Sahel de Mahdia, analyse géométrique et cinématique des données de sub-surface. *Sci. de la terre* , Vol.4, pp 55-69.
- BEDIR M. (1988)** - Géodynamique des bassins sédimentaires du Sahel de Mahdia (Tunisie orientale) de l'Aptien à l'Actuel. Sismostratigraphie, sismotectonique et structurale. *Thèse 3ème. Cycle. Univ. Tunis II. Fac. Sci. Tunis*, 235p.
- BELIN S. (1992)** - Distribution microscopique de la matière organique disséminée dans les roches mères. Techniques d'étude, interprétation des conditions de dépôt et de diagenèse. *Thèse Univ. Orsay*, 371p.
- BEN AISSA L. (1985)** - Géochimie des eaux et des sédiments de la lagune d'El Kantara (Sud-Est de la Tunisie). Approche thermodynamique de la précipitation des carbonates. *Mém. D.E.A. Univ. Tunis Fac. Sci. Tunis*, 63p.
- BENI EKHI R. (1998)** - Etude des impacts Anthropiques sur les eaux souterraines du Sahel oriental Tunisien. Caractérisation hydrogéologique. Modélisation mathématique et cartographique de la vulnérabilité environnementale. *Thèse. Doc. es. Science Géologique. E.N.I.S Univ. Tunisie du Centre* 230p.
- BERNER R.A. (1971)** - Principles of chemical sedimentology. *Mc Graw-Hill Book company*. New York; 240p.
- BERTHOIS L. (1975)** - Les roches sédimentaires. Etude sédimentologique des roches meubles. Ed. doin place de l'Odéon Paris VI, 170p.
- BESEME P. et KAMOUN Y. (1987)** - Le Messimien marin Ksour – Essaf (Sahel, Tunisie orientale) : Une étude stratigraphique, sédimentologie et paléontologique. *Rev. Sc. de la Terre* . Vol.8 pp 129- 142.
- BIGOT M., SALIOT A., QUIY J., YANG Z. and TANG Y. (1990)** - Hydrocarbons in superficial sediments from the Changjiang estuary and adjacent east China sea. In Biogeochemical study of the Changjiang estuary. Proceedings of the international symposium and biogeochemical study of the changjiang estuary and adjacent coastal waters of the east China sea : study of fatty acid composition, March 21-25, 1988. Ed China Ocean Press, pp. 667-675.
- BLUMER M., GUILLARD R. R. L., & CHASE T. (1971)** - Hydrocarbons of marine phytoplankton. *Mar. Biol.* Vol.8, pp 183 –189.

- BLUMER M. and THOMAS D.W. (1965)** - "Zamen" isomeric C19 monoolefins from marine zooplankton, fishes and mammals. *Sci.* Vol.148, pp 370-371.
- BOURBONIERE R.A. and MEYER S. (1983)** - Characterization of sedimentary humic matter by alkaline hydrolysis. *Org. Geochim.* Vol5, N° 3, pp 131 – 142.
- BRASSEL S.C., WARDROPER A.M.K., THOMPOSON I.D., MAXWELL J.R. and EGLINTON G. (1981)** - Specific acyclic isoprenoids as biological markers of methanogenic bacteria in marine sediments. *Nature.* Vol.290, pp.693-696.
- BRASSELL S.G, HOWELL V.J., GOWAR A.P. and EGLINTON G. (1983)** - Lipid geochemistry of cretaceous sediments recovered by the deep sea drilling project. In: Bjonoy M. et al. (Eds.). *Advances in Org. Geochem.* (1981). Wiley, New York. Vol.21, pp 440-484.
- BROOKS P.W., EGLINTON G., GASKELL S.J., MEHUGH D.J., MAXWELL J.R. and PHILIP R.P. (1976)** - Lipids of recent sediments, part I : Straight chain hydrocarbons and carboxylic acids of some temperate lacustrine and sub-tropical lagoonal /tidal sediment. *chem. Geol.* Vol.18, pp 21-38.
- BROWN G. (1961)**- The X-ray identification and crystal structure of clay minerals. Mineralogy society London.
- BUFFLE J. (1988)** - Complexation reactions in aquatic systems. An analytical approach. (eds) Ellis Horwood Chichester.786 p.
- CAILLERE S. et HENIN S. (1963)** - Minéralogie des argiles 1. Structure. Ed. Masson et Cie, 210p
- CAILLERE S. et HENIN S. et RAUTUREAU M. (1982)** - Minéralogie des argiles 2. classification et nomenclature. Ed. Masson et Cie, 324p.
- CASAGRANDE J.D., GRONLI K. and SUTTON N. (1980)** - The distribution of sulfur and organic matter in various fractions of peat- origins of sulfur in coal. *Geochim. Cosmochim. Acta.* Vol.44, pp 25 –32.
- CASTANY G. (1951)** - Paléogéographie et orogénèse de la dorsale tunisienne. *C. R. Acad. Sci. Paris,* t. 232, N° 1, pp 88 –90.
- CHAIRI R. (1997)** - Etude de la matière organique dans les sédiments de la sebkha de Moknine. *Mém.D.E.A. F.S.T. Univ. Tunis El Manar,* 136p.
- CHAIRI R. et BELAYOUNI H.(2001)** - Résultats préliminaires de l'étude de la matière organique dans les sédiments récents de la sebkha de Moknine. *Rapp.Com.int.Mer Médit.* Vol.36, pp117
- CHAMLEY H. (1971)** – Destruction d'argile dans les sapropels de méditerranée orientale.*C.R. Acad. Sci. Paris,* Vol.274, pp 2837 – 2840.
- CHAMLEY H. (1988)** - les milieux de sédimentation. Ed. Tec & Doc et BRGM. Paris et Orleans, 168 p.

- CHAMLEY H. (1989)** - Clay sedimentology. Ed. Springer, New York, 623p.
- CHAMELY H (2000)** - Bases de sédimentologie 2^{ème} éd Dunod 178 p.
- CHAPPE B., ALBRECHT P. and MICHAELIS W. (1982)** - Polar Lipids of Archaeobacteria in sediments and petroleums. *Sci.* Vol.217, pp 65-66.
- CLARET J., JARDINE S. and ROBERT P. (1981)** - La diversité des roches mères pétrolières : aspects géologiques et implications économiques à partir de quatre exemples. In : Geology of Coal, oil shales and kerogens. Proc. Int. Comm. Coal. Petrol.Conf. (1981). *Bull. Cent. Rech. Explor. Prod., Elf-Aquitaine*, pp.383-417.
- CLARK R.C. and BLUMER M. (1967)** - Distribution of n-paraffins in marine organisms and sediments, *Limnol. Oceanogr.* Vol.12, pp 87-97.
- COLLET L. W. (1925)** - les lacs. Coin Ed. Paris, 320 p.
- COJAN I. & RENARD M. (1995)** – Sédimentologie. Ed. Masson, 418 p.
- COPARD Y. and DISNAR J. R. (2001)** – Le “Tmax” est un paramètre d’oxydation des charbons matures. 8^{ème} congrès français de Sédimentologie. Orléans. France, 1p.
- CORNEE A. (1982)** - Bactéries des sources et des sédiments des marins salants des salins – de – Giruad (sud de la France). *Géol. Méditerranée* . Vol.9, pp 369 – 389.
- COWIE G.L. and HEDEES J.I. (1984)** - Carbohydrate sources in a coastal sediments marine environment. *Geochem. Cosmo. Acta.* Vol.48, pp 2075-2087.
- CRANWELL P.A. (1981)** - Diagenesis of free and bound lipids in terrestrial detritus deposited in a lacustrine sediment. *Org. Geochem.* Vol.3, pp 79-89.
- CRANWELL P.A. (1984)** - Lipid geochemistry of sediments from Upton Broad, a small productive lake. *Org. Geochem.* Vol.7, pp 25-37.
- CURIAL A. (1987)** - La sédimentation salifère et suprasalifère du Paléogène bressan (France) : comparaison entre les données diagraphiques et lithologiques. Etude diagraphique du champ d’Ertez et synthèse du bassin. *Doc. Lab. Géol. Lyon* N100, 192p.
- CURTIS C.D. (1980)** - Diagenetic alteration in black shales. *Org. Geochim.* Vol.16, pp 735 – 747.
- DEBYSER Y., GADEL F., REBELLE R., LE BLOND C., OKHIMIAN D., CAMBON F., COWE T.G. et CAMBON J.P. (1975)** - Géochimie des composés humiques et des kérogènes. In géochimie organique des sédiments marins profonds. Organ I de Norvège. (eds), pp 248 – 268.
- DEGENS E.T. and MOPPER K. (1977)** - Factors controlling the distributions and early diagenesis of organic material in marine sediment, In "Cher oceanogr" Ed. by Riley I.R. and Chester R., Academic Press ed., Vol.6, pp 59-111.
- DENANT V. and SALIOT A. (1990)** - Organic biogeochemistry of suspended matter in the Changjiang estuary and adjacent coastal waters of the east china sea: study of fatty acid composition in biogeochemical study of the changjiang estuary. Proceeding of the international symposium,

biogeochemical study of the changjiang estuary and adjacent coastal waters of the east china sea: study of fatty acid composition, March 21-25, 1988. Ed.by China. Ocean Press. pp 540-556.

DUAN Y. (1999) - Organic geochemistry of recent marine sediments from the Nausha sea, china. *Org. Geochem.* Vol.31, pp 159-167.

EGLINTON G. (1972) - Laboratory simulation of organic geochemical process. Adv. In : *Org. Geochem.* 1971, Pergamon Press, Oxford, Branschweig (1972), pp 29-48.

EHRMANN W.U. (1991) - Implications of sediment composition on the Southern kergueleu Plateau for Paleoclimate and depositional environment. *Proc. ODP, Sci. Results*, Vol.119, pp 185 – 210.

ERTEL J.R. (1985) - lignin geochemistry of sedimentary and aquatic humic substances. Ph.D. dissertation, *Univ. Washington.* Seattle.

ERTEL J.R. and HEDGES J.I. (1984) - The lignin component of humic substances - Distribution among soil and sedimentary humic fulvic and base – insoluble fractions. *Geochim. Cosmochim. Acta.* Vol.48, pp 2065 – 2074.

ERTEL J.R. and HEDGES J.I. (1985) - Sources of sedimentary humic substances: vascular plant debris. *Geochim. et Cosmo.Acta.* Vol.49, pp2097-2107.

ERTEL J.R., HEDGES J.I. and PERDUE E.M. (1984) - Lignin signature of aquatic humic substances. *Sci.* Vol. 223, pp. 485-487.

ESPITALIE J., LEPORTE J.L., MADEC M., MARQUIS F., LEPLAT P., PAULET J. et BOUTTEFEN A. (1977) - Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution, *Rev. Inst. Fr. Pétrole*, Vol.32, pp 23-42.

ESPITALIE J., DEROO G. et MARQUIS F. (1985) - La pyrolyse Rock Eval et ses applications. *Rev. I.F.P.* Vol.40, N°6, pp755-784.

ESPITALIE J., DEROO G. et MARQUIS F. (1986) - La pyrolyse Rock Eval et ses applications. I.F.P. Rapport Ref. 34190. 69p +annexes.

FEVRIER A. (1981) - Les matières organiques à structure complexe des eaux de mer et des sédiments. Interaction avec les traceurs géochimiques. *Thèse de Doctorat es-Sci.* Univ. P. et M. Curie, Paris (France), 160p.

FILI Z., HAIDER K., BEUTEL SPACHE H. and MARTIN J.P. (1974) - Comparisons of IR – spectra from melanins of microscopic soil fungi, humic acids and model phenol polymers. *Geoderma.* Vol.11, pp37-52.

FOLK R.I. and WARD W.C. (1957) - Brazors rivers bars, a study in the signifiante of grains size parameters *J. Sedim. Petro.*, Tulsa (O.K.L.), Vol.27, pp3-27.

FOLK R.L. (1980) - Petrology of sedimentary rocks. Hemphills Austni, 182 p.

FOREL F.A. (1892) - Le léman. Monographie limnologique. F. Rouge. Ed. lansanne. 3 Vol., T.1, 543p.

- GALL J.C. (1994)** - Paléocéologie, paysages et environnements disparus. Ed. Masson, 239 p.
- GIGER W., SHAFFNER C. and WAKEHAM S.G. (1980)** - Aliphatic and olefinic hydrocarbons in recent sediments of Greifensee, Switzerland. *Geoch. Cosmo. Acta*. Vol. 44, pp 119-129.
- GOMEZ-BELINCHON J.I., LOP R., GRIMALT J.U. and ALBAIGES J. (1988)** - The decoupling of hydrocarbons and fatty acids in the dissolved and particulate water phases of deltaic environment. *Mar. Chemi.* Vol.25, pp325-348.
- GOOSENS H., DELEEUW J.W., SCHENCK P.A. and BRASSEL S.C. (1984)** - Tocopherols as likely precursors of pristane in ancient sediment and crude oils. *Nature*, Vol.312, pp.440-442.
- GRIM R.E. (1968)**- Clay mineralogy –Mac Grow-Hill Book Company sd Ed.
- GRIMALT J.O., TORRAS E. and ALBAIGES J. (1988)** - Bacterial reworking of sedimentary lipids during sample storage. Advances in organic geochemistry. *Org. Geochem.* Vol.13, N°4-6. pp 741-746.
- HAKANSON L. and JANSON M. (1983)** - Principals of lakes sedimentology. Springer verlag (eds) *J. Geol. Soc.* Vol.137, pp 189 – 194.
- HAMBREY M.J., EHRMANN W.U. and LARSEN B. (1991)**- Cenozoic glacial record of the Prydz Bay continental Shelf, East Antarctica. *Proc. ODP, Sci. Results*, N° 119, pp77 – 132
- HAN J. and CALVIN M. (1969)** - Hydrocarbon distribution of algae and bacteria and microbial activity in sediments. *Process National Academy of Sciences (USA)*, Vol.64, pp 436-443.
- HATCHER P.G., MACIEL G.E. and DENNIS L.W. (1981)** - Aliphatic structure of humic acids, a clue to their origin. *Org Geochim.* Vol.3, pp 43-48.
- HEDGES J.I., ERTEL J.R. and LEOPOLD E.B. (1982)** -**Lignin geochemistry of a late quaternary sediment core from lake Wasington.** *Geochim. Cosmo. Acta.* Vol.46, pp. 1869-1877.
- HENRICHS S.M. and REEBURGH W.S. (1987)** - Anaerobic mineralization of marine sediment organic matter: rates and the role of anaerobic processes in the oceanic carbon economy. *Geomicrobiol.J.*, Vol.5, pp 191-237.
- HERAS X., GRIMALT J.O., ALBAIGES J., JUHH R. and ANADON P. (1989)** - Origin and diagenesis of the organic matter in miocene freshwater lacustrine phosphat (Ceranday Basin, Estern Pyrencos). *Org. Geochem.* Vol.14, pp 667 – 677.
- HUBER C. (1968)** - Etude hydrogéologique du vindobomien dans la region de zarmdine – Beni – Hassen. Rapport interne du bureau de l'inventaire et des Ressources hydrauliques, 53p.
- HUC A.Y. (1978)** - Géochimie organique des shistes bitumeux du toarcien du bassin de Paris, *Thèse Doc. es-Sci, Univ. L. Pasteur, Strasbourg (France)*, 210p.
- HUC A.Y. (1988)** - Sedimentology of organic matter. In - F.H. Frimmel and R.F. christman (Eds), Humic substances and their Role in the environmental. 5. Bernhard, Dahlerm conf. (1988) pp 215 – 243.

- HUC A.Y., DURAND N. and JAQUIN F. (1974)** - Caractérisation des acides humiques des sédiments marins récents et comparaison avec leurs homologues terrestres. *Bull. E.N.S.A.I.A.* Nancy 16 (1-2), pp 59-75.
- HUC A.Y., LALLIER-VERGES E. BERTRAN D.P. and CAEPENTIER B. (1992)** - Organic matter response to change of dispositional environment in Kimmeridgian Shales, Dorset U.K. In: J. Whelan and J. F. Arrington Ed. *Productivity, Accumulation and Preservation of organic matter in Recent and Ancient Sediments.* Columbia Univ. Press, New York, pp 469-486.
- ILLICH H.A. (1983)** - Pristane, Phytane and lower molecular weight isoprenoid distributions in oils. *American Association of Petroleum Geologist Bull.*, Vol.67, pp385-393.
- ISHIWATARI R. (1970)** - Structural characteristic of humic substances in recent lake sediment. *Advance in Org. Geochem.* pp 285 – 311.
- JENISCH-ANATON A., ADAM P., MICHAELIS W., CONNAN J., HERRMANN D., ROHMER M. and ALBERCHT P. (2000)** - Molecular evidence for biodegradation of geomacromolecules. *Geochim. Cosmo. Acta.* Vol.64, N° 20, pp 3525 – 3537.
- JIAMO F., GUOYING S. JIAYOU X. EGLINTON G., GOWAR A.P., RONGFEN J., SHANFA F. and PINGAN P. (1990)** - Conclude that most useful parameters for distinguishing Chinese rocks deposited in freshwater, brackish and hypersaline lacustrine environments include relative abundances of n-alkanes, acyclic isoprenoids, 4-methylsterane the hopane sterane ratio, and gammacerane and homohopane indices, samples from each of these groups were distinguished using principal component analyses of these data. *Org. Geochem.* Vol.16, pp 679-689.
- JIAMO F., GUOYING S. JIAYOU X. EGLINTON G., GOWAR A.P., RONGFEN J., SHANFA F. and PINGAN P. (1990)** - Application of biological makers in the assessment of paleoenvironments of Chinese non-marine sediments. *Org. Geochem.*, Vol.16, pp.769-779.
- JIANG Z. and FOWLER M.G. (1985)** - Carotenoid-derived alkanes in oils from north western China. In *Advances in Org. Geochem.* 1985. Vol. 10, pp831-839. Pergamon Press, Oxford.
- KAMOUN Y. (1981)** - Etude néotectonique dans la région de Monastir Mahdia (Tunisie orientale). *Thèse Doc. 3ème. cycle*, Univ. Paris XI. Centre D'ORSAY, 175p.
- KAWAMURA K. and ISHIWATARI R. (1984)** - Fatty acid geochemistry of a 200 m sediment core lake Biwa, Japon. Early diagenesis and paleoenvironment information. *Geochim. Cosmo. Acta.* Vol.48, pp. 251-266.
- 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. pp 40-48.
- KENIG F., SINNINGHE DAMSTE J.S., FREWINN.L. and DE LEEUW J.W. (1995)** - Molecular indicator for paleoenvironmental change in a messinian evaporitic sequence (Vena del gesso, Italy) II.

High resolution variations in abundance and contents of free and sulphur bound carbon skeletons in a single marl bed. *Org. Geochem.* Vol.23, pp 42 – 47.

KENIG, F. HUC A. YPURSER B. H. and OVDPN J.L. (1990) - Sedimentation distribution and diagenesis of organic matter in a recent carbonate environment, Abou Dhahbi, U.A.E. *Org. Geochem.* Vol.13, pp 42 – 47.

KERVAN M. (1955) - Avant projet d'une usine hydroélectrique-témoin utilisant la dépression de la sebkha de Moknine. Collection B.I.H.R., 1955, 13p.

KESWANI S.R., DUNHAM K.W. and MEYERS P.A. (1984) - Geochemistry of late Cenozoic sediments from the Sub-tropical South Atlantic. *Ocean. Mar. Geol.* Vol.61, pp 25-42.

KILLOPS S.D. and AL JUBOORI M.A.H.A. (1990) - Characterization of the unresolved complex mixture (UCM) in the gas chromatograms of biodegraded petroleum's. *Org. Geochem.*, Vol.15, pp 147-160.

LAJAT M., DENANT V., et SALIOT A. (1990) - Selected organic matter source indicator in the Changjiang estuary and adjacent east China sea : sterol and fatty acid distributions in surface sediments. In Biogeochemical study of the Changjiang estuary. Proceedings of the international symposium on biogeochemical study of the Changjiang estuary and adjacent coastal waters of the east China : Study of fatty acid composition, March 21-25, 1988 Ed. China Ocean Press. pp 688-704.

LAKHDAR R. (1987) - Contribution à l'étude sédimentologique et géochimique des sédiments superficiels de Sebkhat Boujmel (Sud-Est de la Tunisie). *Mém. D.E.A.*, Univ. Tunis II, F.S.T., 178p.

LALLIER-VERGES G., BERTRAND P. and DESPRAIRIGS A. (1993) - Organic matter composition and sulfate reduction intensity in Oman Margin sediments. *Mar. Geol.* Vol.112, pp 57-69.

LEE S.H. FUHRMAN J.A. (1991) - Spatial and temporal variation of natural bacterial and plankton assemblages. *Limnol. Oceanogr.* Vol.36, pp 1277 – 1287.

LEEDER M.R. (1982) - Sedimentology. Process and Product Allen and Unwin Ed. Boston, 344 p.

LEWIS D.G. and Mc CONCHIE D. (1994) - Analytical sedimentology. Chapman et Hall Ed. London, 360p.

LIN C.F. LIN T.Y. and HAO O.J (2000) - Effects of humic substance characteristics on of performance. *Wat.res.* Vol.34, N°4, pp1097-1106.

LIPIATOU E., COLOM-ALTES M., GRIMALT J.O. and ALBATIGES J. (1992) - Particle association of lipids in the western Mediterranean aerosol. Water pollution Research Reports "EROS 2000". Third workshop on the North-West Mediterranean sea. pp 237-246.

LITTKE R. and SACHENHOFER R.F. (1994) - Organic petrology of deep sea sediments- a compilation of result from the Ocean Drilling Program and Deep sea Drilling Project. *Energy and Fuels*, Vol.8, pp 1498 – 1512.

- LOJEAU R. (1941)** - Note d'utilisation du lac de Moknine et de ses dépendances, 22 Avril 1941. D.R.E. 13p.
- MAH R. A., WARD D. M., BARESI L. and GLASS T. L. (1977)** - Biogenesis of methane. *Ann. Rev. Microbiol.* Vol.31. pp 309-341.
- MALAM ISSA O., Le BISSONNAIS Y., DEFARGE C. et TRICHET J. (2001)** – Role of a microbial cover on structural stability of a sandy soil in Sahelian part of western Niger. *Geoderma.* Vol.11, pp 15-30.
- MATSUDA H. and KOYAMAT. (1977)** - Early diagenesis of fatty acids in lacustrine sediments identification and distribution of fatty acids in recent sediment from a fresh water lake. *Geochem. Cosmo. Acta.* Vol. 41, pp 777-783.
- MATSUMOTO G. (1982)** - On organic constituents polluted and unpolluted in land aquatic environment. I. Features of hydrocarbons for polluted and unpolluted water. *Water Res.* Vol.16, pp 1521 – 1527.
- MAYER L.M. (1994)** - Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments. *Geochim. Cosmo. Acta.* Vol. 58, N°4, pp.1271-1284.
- MAZET M., ANGBO L. and SERPAUD B. (1990)** - Adsorption of humic acids into preformed. Aluminium hydroxyde floes. *Wat. Res.*, Vol.24, N°12, pp.1509-1518.
- Mc CAFFREY M.A., FARRINGTON J.W. et REPETA D.J. (1991)** - The organic geochemistry of Peru margin surface sediments II. Paleoenvironmental implications of hydrocarbons and alcohol profile. *Geochem. Cosmo. Acta.* Vol.55, pp 483-498.
- Mc KIRDY D.M., KANTSLER A.J., EMMETT J.K. and ALDRIGE A.K. (1984)** - Hydrocarbon genesis and organic facies in Cambrian carbonates of the Eastern Officer Basin, South Australia. In: *Petroleum Geochemistry and Source Rock Potential of Carbonate Rocks.* (J.G. Palacas, ed.). American Association of Petroleum Geologist, Studies in : *Geology*, N°18, pp.13-31.
- MEYBECK M. (1995)** - Global lake distribution. In : *Lakes*, Vol II A. Lerman, D. Imboden, J Gatl (eds), Springer, 350 p.
- MEYERS P.A., BOURBONNIERE R.A. and TAKENCHI N. (1980)** - Hydrocarbons and fatty acids in two cores of Lake Huron sediments. *Geochem. Cosmo. Acta.* Vol.44, pp. 1215-1221.
- MEYERS P.A., KAWKA O.E. and WHITEHEAD D.R. (1984)** - Geolipid , pollen and diatom stratigraphy in post glacial lacustrine sediment. In: *Advances in Org. Geochem.* 1983 (Edited by Schenck P.A., Leeuw J.W. and Lijmbach G.W.M). *Org. Geochem.* Vol.6, pp.727-732.
- MEYERS P.A. and BENSON L.V. (1988)** - Sedimentary biomarker and isotopic indicators of the paleoclimatic history of the Walker Lake basin, Western Nevada. In: *Advances in Org. Geochem.* 1987. *Org. Geochem.* Vol.13, pp.807-813.

- MEYERS P.A. and ISHIWATARI R. (1993)** - The early diagenesis of organic matter in lacustrine sediments. In : Engel, M.E . Mack, S.A. (eds). *Organic Geochemistry*. principles and applications. Plenum Press. New York, pp 199 – 209.
- MILLE G., ALMALLAH M., BIANCHI M., VAN WANBEKE F. and BERTRAND J.C. (1991)** - Effect of salinity on petroleum biodegradation. *Fresenius J.Anal. Chem.* Vol.339, pp 788–791.
- MILLOT G. (1964)** - Géologie des argiles. Ed. Masson et Cie , Paris 320p.
- MOLDOVAN M., DAHL J., MCCAFFREY M.A., SMITHW J. and FETZER J.C. (1995)** - Application of biological marker technology to bioremediation of refinery by products. *Energy Fuels*. Vol.9 pp 155–162.
- 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 de l'institut Français du Pétrole*, Vol.33, N° 2, pp 223–240.
- MORETTO R. (1987)** – Etude sédimentologique de la série salifère paléogène du bassin de Bourg en Bresse (France). *Mém. Sci. de la Terr.* Nancy N.50, 252p.
- NAIDU A.S., HAN M.W., MOWA T.C. and WADJA W. (1995)** - Clay minerals as indicators of sources of terrigenous sediments, their transportation and deposition: Bering Basin, Russian-Alaskan Artic. *Mar. Geol.* Vol.125, pp 87-104.
- NEDWELI D.B. (1984)** - The input and mineralization of organic carbon in anaerobic aquatic sediment. *Advances in Microbiology*. Vol.7, pp 93-132.
- NISSEMBAUM A. (1972)** - The organic geochemistry of marine and terrestrial humic substances: implication of carbon and hydrogen isotope studies. In : *Advances Org. Geochem.*, 1973, pp.39-52.
- NISSEMBAUM A. (1979)** - Phosphorus in marine and non marine humic substances, *Geochem. Cosmo. Acta.*, Vol.43, pp 1973-1978.
- NISSEMBAUM A. and KAPLAN I. R. (1972)** - Chemical and isotopic evidence for the origin of marine humic substances. *Limnol.Oceanogr.* Vol.17, pp. 570-582.
- NISSEMBAUM A., BAGDECKER M.J. and KAPLAN I. R. (1972)** - Studies on dissolved organic matter from interstitial water of reducing marine fjord. In: *Advances in Org. Geochem.*, 1971, Ed H.R. von Gaertner and H. Wehner pergamon Press, pp 427-440.
- NISTIMURA M. (1977)** - The geochemical significance in early sedimentation of geolipids obtained by saponification of lacustrine sediments. *Geochim. Cosmo. Acta.* Vol.41, pp 1817–1823.
- OTSUKI A. and HANYAT. (1967)** - Some precursors of humic acid in recent lake sediment suggested by infrared spectra. *Geochim. Cosmo. Acta.* Vol.31, pp 1505–1515.
- OUDOT J., FUSEY P., ABDELOUAHID D.E., HALOUI S. and ROQUEBERT M.F. (1984)** - Capacités dégradatives de bactéries et de champignons isolés d'un sol contaminé par un fuel. *Can. J. Microbiol.* Vol.33, pp 232–243.

- PASKOFF R. et SANLAVILLE P. (1983)** - Les côtes de la Tunisie. Variations du niveau marin depuis le tyrrhénien. *Médit.* N°14, *Ser. Géol. et Préhis.* Vol.2, pp 29-42.
- PASSEGA R. (1957)** - Texture as characteristic of clastic deposition. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.* Vol.41, pp 1952-1984.
- PEDERSON T.F. and CALVERT S.E. (1990)** - Anoxia Productivity : what controls the formation of organic-carbon-rich sediment and sedimentary rocks ? *Amer. Ass. Petrol. Geol. Bull.* Vol.74, pp 454-466.
- PEDERSEN T.F., SHIMMIELD G.B. and PRICE N.B. (1992)** - Lack of enhanced preservation of organic matter in sediments under the oxygen minimum on the Oman Margin. *Geochim. Cosmo. Acta.* Vol.56, pp 545-551.
- PELET R. (1978)** - Le bilan organique au niveau des sédiments dans les substances organiques naturelles dissoutes dans l'eau de mer. Ed. by C.N.R.S., Paris, pp 33-60.
- 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. pp 241-250.
- PETERS K.E. (1986)** - Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis. *Amer. Assoc. of Petrol. Geol. Bull.*, Vol.70, pp.318-329.
- PETERS K.E. and MOLDOWAN J.M. (1993)** - The biomarker guide. Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and ancient sediments. (Ed.) Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. USA. 363p.
- POMEL A. (1884)** - Une mission scientifique en Tunisie en 1877. Géologie de la côte orientale, jusqu'à la petite syrte. (Le lac Triton, la mer intérieure et les anciens rivages). *B. Ec. Sup. Sci. Algérie*, 1^{er} fasc., 105p, 22 coupes.
- POWELL T.G. (1984)** - Some aspects of there hydrocarbon geochemistry of a middle devonian barrier-Reep complex western Canada. Petroleum geochemistry and source Rock potential of carbonate Rocks. (ed) Jares G. Palacas. *A.A.P.G. studies in Geology* Vol.18, pp 18-45.
- PRAHL F.G. and CARPENTER R. (1983)** - Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)- Phase associations in Washington coastal sediments. *Geochim. Cosmo. Acta.* Vol.47, pp 1013-1024.
- RASHID. M.A. and KING. L.H. (1969)** - Molecular weight distribution measurements on humic and fulvic fraction from marine clays on the Scotland shelf. *Geochim. Cosmo. Acta.*, Vol.34, pp193-202.
- RASHID M.A and KING L.H. (1970)** - Major oxygen-containing functional groups present in humic and fulvic acid fractions isolated from contrasting marine environments. *Geochim. Cosmo. Acta.* Vol.34, pp 193-201.
- RASHID M.A and KING L.H. (1971)** - Chemical characteristics of fractionated humic acids associated with marine sediments. *Chem. Geol.* Vol.7, pp.37-43.

- RASHID M.A. and PRAKASH A. (1971)** - Chemical characteristics of humic compound isolated from decomposed marine algae. *J.Fish.Res. Board Can.* Vol.29, pp 55–60.
- REKAYA M. et AMRI M. (1992)** - Note sur les possibilités de recharge artificielle de nappes de Teboulba et de Moknine à partir des eaux usées. *Note interne D.R.E.*, Mars,1992, 8p.
- REINECK H.E. and Sing I.B. (1980)**- Depositional sedimentary environment. Springer- Verlags. Ed.Berlin, 549 p.
- RIELLY G., COLLIER R.J., JONES D.M. and EGLINGTON G. (1991)** - The biochemistry of Ellesmere Lake UK source correlation of leal was inputs to the sedimentary lipid record. *Org. Geochem.* Vol.17, pp901-912.
- RISATIT J.B., ROWLAND S.J., YAN D.A. and MAXWELL J.R. (1984)** - Stereochemical studies of acyclic isoprenoids XII. *lipids of organic Geochemistry.* Vol.13, pp 671–675.
- RIVIERE A. (1977)** - Méthodes granulométriques techniques et interprétation. Ed. Masson, Paris, 167p.
- ROWLAND S.J., LAMB N.A., WILKENSON C.F. and MAXWELL J.R. (1982)** - Confirmation of 2,6,10,15,19 pentamethyleicosane in methanogenic bacteria and sediment. *Tetrahedron Lett.*, Vol.23, pp101-104.
- ROWLAND S.J. (1990)** - Production of acyclic isoprenoid hydrocarbons by laboratory maturation of methanogenic bacteria. *Org. Geochem.* Vol.5, pp 9-16.
- ROWLAND S.J. and ROBSON J.N. (1990)** - The widespread occurrence of highly branched acyclic C20, C25, C30 hydrocarbons in recent sediments and biota. *Mar. Environ. Res.* Vol.30, pp 191-216.
- SALIOT A. (1981)** Natural hydrocarbons in sea water. In *Marine Org. Chemistry*, E.K. Duursma R. Dawson (eds), Elsevier Amsterdam, pp327–374.
- SALIOT A., BOUSSUGE C., FEVRIER A., GOUT M., TISSIER M.J. et TUSSEAU D. (1983)** - Origine et bilan des apports verticaux de matières organiques de l'océan superficiel à l'interface eau-sédiment. *Géochimie organique des sédiments marins profonds. ORGON à MISEDOR.* Ed. C.N.R.S., Paris, pp 397-406.
- SALIOT A. et TISSIER M.J. (1977)** - Interface eau-sédiment, acides gras et hydrocarbures dissous et particulaires dans l'eau de mer. *Géochimie organique des sédiments marins profonds. ORGON 1 Mer de Norvège (Août, 1974).* Ed. C.N.R.S.Paris, pp 197-208.
- SCHINTZER M. and KHAN S.U. (1972)** - Humic substances in the environment. Ed. by Dekker. M., New York, 237p.
- SCHNITZER M. (1978)** - Humic substances chemistry and reactions. In "Soil organic matter", Ed. by Schnitzer M. and Khan S.U., *Development in Soil Sc.* Vol.8, pp 1-64.
- SCHNITZER M. and KHAN S.U. (1972)** - Humic substances in the environment. Marcel Dekker Ed. 316p.

- 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*. Vol.24, N°3, pp309–338.
- SEIFERT R. and MICHAELIS W. (1991)** - Organic compounds in sediments and pore waters of sites 723 and 724. In *Proc. ODP, Sci. Results* 117. Ed. W.L. Prell, N. Niitsuma et al., pp 529–545.
- SIMONEIT B.R.T., VUCHEV V.T. and GREMALT J.O. (1984)** - Organic matter along the sedimentary sequences of the Moroccan continental margin. Leg 79 sites 545 and 547. In: Hinz K., Winterer F.I. et al. (Eds.) – Initial Report of the Deep Sea Drilling Project 79. Gout Printing Office, Washington, Dc. pp 807-824.
- SONG J.M. and LIP C. (1995)** - Sediment environments and Fe, Mn in intergranular water in the Nausha island sea area. In: *Chemica association of Sciences and Technology*. Ed. Resources Exploitation. Global Change and Continuous Development and Yang Scientist Annual Symposium. Scientific and Technological Publishing House of China. Beijing, pp 349-358.
- STEIN R., TEN HAVEN H.L., LITCKE R., RULLKOTTER J. and WELTE D.H. (1989)** - Accumulation of marine and terrigenous organic carbon at upwelling site 658 and non upwelling site 657 and 659. Implications for the reconstruction of paleoenvironment in the eastern subtropical Atlantic through late cenozoic times. In: Ruddiman W, Sarnthein Metal., (eds) proceedings of the ocean Drilling program. *Sci Results*. Vol.108, pp 361–385.
- STEVENSON F.J. (1982)** - Humus chemistry - Genesis, composition, reactions. Wiley – interscience, NY.Ed. 145p.
- TAGORTI M. A. (1990)** - Dynamique de couverture, genèse et évolution du complexe lagunaire Sebkhath Halk El Mengel et Sebkhath Assa El Jeriba (Sahel de Sousse). Analyse Sismo-stratigraphique, Géochimie et échange hydrologiques saisonniers. *Doct. de Spéc., Univ. Tunis II, Fac. Sc. Tunis*, 162p.
- TEN HAVEN H.L., DELEEUWJ.W. and SCHENK P.A. (1985)** - Organic geochemical studies of a Messinian evaporate basin, Northern A pennines (Italy). In Hydrocarbon biological markers for a hypersaline environment. *Geochim. Cosmo. Acta*. Vol.49, pp 2181-2191.
- TEN HAVEN H.L., DELEEUW J.W., SINNIHGE DAMSTE J.S., SCHENK P.A., PALMER S.E. and ZUMBERGE J.E. (1988)** - Application of biological markers in their recognition of paleohypersalin environment. In - Fleet A.J. Keltes K., Talbots M.R (Eds). *Lacustrine Petroleum Source Rockes Geol. Soc.*, London spec.Publ. Vol.40, pp 123-130.
- TIESSEN H., STEWART J.W.B. and HUNT H.W. (1984)** - Concepts of soil organic matter transformation in relation to organo-mineral particle size fractions. *Plant and Soil* Vol.76, pp.287-295.

- TISSOT B. and WELTE D. (1978)** - Petroleum Formation and occurrence. Ed. Springer verlag, NY. 538p.
- TISSOT B. and WELTE D.H. (1984)** - Petroleum formation and occurrence. 2nd Ed. Springer – Verleg, Berlin, 699p.
- TISSOT B., PELET R., ROUCACHE J. et COMBAZ A. (1977)** - Utilisation des alcanes comme fossiles géochimiques indicateurs des environnements géologiques. In : *Adv. Org. Geochem.*, 1975, Ed. by Campos R. Goni J., Empr. Nac. Adaro. de Investig. Min. Madrid (Espana). pp 117-154.
- TORNABENE T.G. (1978)** - Non-aerated cultivation of halobacterium cutirubrum and its effects on cellular squalanes. *J. Mol. Evol.* Vol.11. pp 253-257.
- TORNABENE T.G., WOLF R.S., BALCA W.E., HOLOZER W.E., FOX G.E. et ORO J. (1978)** - Phytanyl-glycerol ethers and squalenes in the archaebacterium thermoantotrophicum. *J. MOL. Evol.* Vol.11. pp 259-266.
- TRAUTH N. (1977)** - Argiles évaporitiques dans la sédimentation carbonatée continentale et épicontinentale tertiaire. Bassin de Paris, de Mormoiron et de Salinelle (France), Jbel Ghassoul (Maroc). *Mém. Sci. Géol.* Inst. Géol.U.L.P. Strasbourg ed, N°49, Vol.195, 76 Fig., 51 Tab.
- VAN LUIJN F., BOGRS P.C.M., LIKLJEMA L. and SWERTS J.P.R.A. (1999)** – Nitrogen fluxes and processes in Sandy and Muddy sediments from a shallow Eutrophic lake. *Wat. Resh.*, Vol.33, N°1, pp 33-42.
- VENKATESEN M.I. and KAPLAN J.R. (1982)** - Distribution and transport of hydrocarbon in surface sediments of the Alaskan Outer Continental Shelf. *Geochim. Cosmo. Acta.* Vol.46 pp 2135-2149.
- VENKATESEN M.I. and KAPLAN J.R. (1987)** - The lipid geochemistry of Antarctic marine sediments: Brans field strait. *Marine Chemistry.* Vol.21, pp 347-375.
- VENKATESEN M.I. (1988)** - Organic geochemistry of marine sediment in Antarctic region: Marine lipids in Mc Murdo sound. *Org. Geochem.* Vol.12, pp.13-27.
- VOGELS G.D (1979)** - The global cycle of methane. *Anatomie van Leeuwenhoek.* Vol.45, pp 347-352.
- VOLKMAN J.K., FARRINGTON J.W., GAGOSIAN R.B. and WAKEHAM S.G. (1983)** - Lipid composition of coastal marine sediments from the Peru up welling region. In: Bjonoy M; et al. (Eds.). *Advances in Org. Geochem.* (1981). Wiley, New York. Vol.21, pp 228-240.
- WAPLES D.W. and MACHIHARA T. (1991)** - Biomarkers for Geologists. American Association of Petroleum Geologist, Methods in Exploitation series, N°9, 91p.
- WAPLES D.W. (1985)** - Geochemistry in petroleum Exploration. Reidel Publishing company, Ed., Boston, 232p.

WAPLES D.W. and SLOAN J.R. (1980) - Carbon and nitrogen diagenesis in deep-sea sediment. *Geochem. Cosmo. Acta.* Vol.44, pp 1463-1470.

WOESE C.R., MAGRUM L.J. and FOX G.G. (1978) - **Archaeobacteria.** *J. Molecular Evolution*, Vol.11, pp 245-252.

ZHOU J. and TANG Y. (1990) - Alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the Changjiang estuary and its adjacent coastal waters of China sea. In Biogeochemical study of the Changjiang estuary and adjacent coastal waters of the east China sea : study of fatty acid composition March 21-25. 1988. Ed., China Ocean Press. pp 705-711

ZUMSTEIN J. and BUFFLE J. (1989) - Circulation of pedogenic and aquagenic organic matter in an eutrophic lake. *Wat.Res.* Vol.23, N°2, pp229-239.

ANNEXES

Annexe I – 1 : Tableaux de Résultats : Etude sédimentologique.

Annexe I – 2 : Tableaux de Résultats : Etude de la matière organique (sédiments de surface et des carottes).