



HAL
open science

ÉTUDE SÉDIMENTOLOGIQUE DU REMPLISSAGE DE LA LAGUNE DE SIDI MOUSSA, MAROC

Mohamed Maanan

► **To cite this version:**

Mohamed Maanan. ÉTUDE SÉDIMENTOLOGIQUE DU REMPLISSAGE DE LA LAGUNE DE SIDI MOUSSA, MAROC. Etudes de l'environnement. Faculte des sciences El Jadida, 2003. Français. NNT: . tel-00124571

HAL Id: tel-00124571

<https://theses.hal.science/tel-00124571>

Submitted on 22 Jan 2007

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.

THESE

Présentée pour obtenir le diplôme de
Doctorat en GEOLOGIE
Spécialité : GEOSCIENCES MARINES

Par

Mohamed MAANAN

**ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DU REMPLISSAGE
DE LA LAGUNE DE SIDI MOUSSA
(CÔTE ATLANTIQUE MAROCAINE)**

**CARACTERISATIONS GRANULOMETRIQUE, MINERALOGIQUE
ET GEOCHIMIQUE**

Soutenue le 24 octobre 2003 devant la commission d'examen :

M. M. OUADIA , Professeur à la Faculté des Sciences – El Jadida	Président
M. C. CARRUESCO , Maître de Conférence HDR à l'Université de Bordeaux I	Rapporteur
M. M. LABRAIMI , Professeur à la Faculté des Sciences – Rabat	Rapporteur
Mme. R. MAHJOUBI , Professeur à la Faculté des Sciences – Meknès	Rapporteur
M. A. AAJJANE , Professeur à la Faculté des Sciences – El Jadida	Examineur
M. B. ZOURARAH , Professeur à la Faculté des Sciences – El Jadida	Examineur

Titre de la thèse: ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DU REMPLISSAGE DE LA LAGUNE DE SIDI MOUSSA (CÔTE ATLANTIQUE MAROCAINE): CARACTERISATIONS GRANULOMETRIQUE, MINERALOGIQUE ET GEOCHIMIQUE

Nom et Prénom : MAANAN Mohamed

U.F.R. : Géosciences et Environnement (Spécialité : Géosciences Marines)

RESUME

La lagune de Sidi Moussa (côte atlantique marocaine) est séparée de l'océan par un cordon de dunes consolidées. Son bassin versant est constitué des terrains de crétacé et de plioquaternaire. Le régime hydrologique se caractérise par une alimentation essentiellement marine qui prédomine sur les apports continentaux. Le climat est de type méditerranéen sous influence océanique.

L'approche morphologique de la lagune, basé d'une part, sur les photos d'interprétions et d'autre part, par les observations *in situ* montre l'existence de quatre unités morphologiques : 1- la zone de la passe principale et le delta interne de marée, 2- Chenal, la zone intertidale et les schorres, 3- les marais salants et 4- le cordon littoral.

L'étude sédimentologique, minéralogique et géochimique de la couverture récente montre l'existence de deux domaines :

- Un domaine à influence marine prépondérante, situé dans la zone aval de la lagune, caractérisé par des faciès sableux pauvres en éléments métalliques et en matière organique et riches en strontium et en carbonates d'origine biogénique.
- Un domaine typiquement lagunaire, situé dans la zone amont de la lagune, caractérisé par des faciès silteux à silto-argileux riches en métaux lourds et en matière organique et pauvres en strontium et en carbonates.

L'étude des caractères sédimentologiques, minéralogiques et géochimiques des carottes permet de retrouver les deux ensembles précités superposés dans les carottes avec à la base un faciès à dominance marine littorale qui caractérise un milieu ouvert et au sommet un faciès typiquement lagunaire qui caractérise un milieu relativement fermé. Cette évolution verticale des faciès tend vers un comblement lagunaire, ce qui est en accord avec le schéma évolutif des lagunes proposées par Bird 1994.

Toute fois les teneurs en éléments métalliques des sédiments restent inférieures aux teneurs observées dans d'autres systèmes lagunaires similaires au Maroc tel que Oualidia, la lagune de Nador, ou en Europe (lagune de Venise, lagune d'Arcachon). Ces faibles teneurs sont l'expression d'une pollution faible ou nulle de cet écosystème.

Mots clés : Maroc, lagune de Sidi Moussa, sédimentation, minéralogie, géochimie, modèle de Bird (1994), pollution métallique, bruit de fond géochimique.

Jedéleœmœnoireà:

M esparents

M a grandemère

M esfrèreset sœurs

M abellefamille

M esprofesseurs

M esamis

Tousœux qui mesont chers

Avant propos

Après avoir obtenu le diplôme de Licence en 1998 en Géologie Appliquée à la Faculté des Sciences d'El Jadida. J'ai ensuite suivi mes études de troisième cycle pour préparer le Diplôme des Etudes Supérieures Approfondies «Environnement Marin et Valorisation des Ressources » au Département de Biologie. Monsieur le Professeur B. Zourarah m'a proposé dans la première année un sujet sur l'évolution morpho-sédimentaire des plages du littoral des Doukkala au sein du Laboratoire de **Géosciences Marines** « un laboratoire actif de réseau national des sciences et techniques de la mer REMER ». Pour la deuxième année j'ai travaillé sur la lagune de Oualidia et les plages adjacentes. J'ai soutenu mon mémoire de Diplôme des Etudes Supérieures Approfondies intitulée : " Etude morpho-sédimentaire de la lagune de Oualidia : Evolution récente et historique" en octobre 2000.

Après ces deux ans, je me suis inscrit au Département de Géologie au sein de l'Unité de Formation et de Recherche (Géosciences et Environnement). J'ai suivi le même tracé de Géologie marine, Monsieur B. Zourarah m'a proposé alors un sujet original portant sur la lagune de Sidi Moussa, un écosystème paralique mal connu et important au point de vue économique et scientifique. Ce travail était sous la direction du Professeur Ahmed Ajjane. La première année m'a permis d'avoir une vue d'ensemble sur les caractéristiques, les origines et les classifications des lagunes du monde et ainsi classer la lagune de Sidi Moussa dans ce contexte mondial. Cela ne m'a pas empêché de travailler sur d'autres écosystèmes avec nos professeurs de laboratoire surtout sur l'estuaire de l'Oum Er Rbia, les plages de littoral des Doukkala, la lagune de Oualidia et le plateau continental des Doukkala Abda dans le cadre du projet PROTIT.

J'ai commencé ma deuxième année par une mission à l'Université de Bordeaux I, sous la responsabilité du Professeur C. Carruesco. Ca m'a permis de discuter l'état d'avancement de ce travail et les nouvelles démarches surtout pour la stratégie d'échantillonnage au sein du remplissage lagunaire. Une mission d'échantillonnage des échantillons de surface et des carottes est réalisée par la suite au mois de décembre 2001.

En Mars 2002, j'étais en stage au département de Géologie et de la Géographie à l'Université Catholique de Louvain-La-Neuve (Belgique), durant lequel, j'ai pu faire les analyse des échantillons de la lagune par la méthode de Diffraction aux RX et la méthode de Fluorescence aux RX avec Monsieur le Professeur J. Naud.

En octobre 2003, j'ai soutenu ma thèse devant un jury composé de Monsieur M. Ouadia comme président, Monsieur C. Carruesco, Monsieur M. Labraimi et Madame R. Mahjoubi comme des rapporteurs de thèse et Messieurs A. Ajjane et B. Zourarah comme des directeurs de thèse.

Ce travail nous a permis sur le plan sédimentologique, d'identifier la nature et l'origine de remplissage lagunaire et sur le plan géochimique, d'établir un état de lieu de la lagune et de mettre en évidence le bruit de fond géochimique. Il a en plus fait l'objet de deux publications sous presse, d'autres publications soumises et des communications dans des colloques et des congrès nationaux et internationaux.

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont prodigué leurs aides, leurs soutiens, leurs conseils et leurs amitiés.

Mes premiers et sincères remerciements vont tout d'abord au défunt Monsieur le Professeur **A. SADEL** et le Professeur **B. MERNARI**, respectivement Doyens de la Faculté des Sciences d'El Jadida, pour l'intérêt qu'ils ont toujours porté à la recherche scientifique au sein de notre établissement. Qu'ils trouvent ici, l'expression de mes sentiments les plus respectueux.

Je remercie profondément Messieurs les Professeurs **Ahmed AAJJANE** et **Abdellatif SOUHEL**, responsables de l'Unité de Formation et de Recherche « Géosciences et Environnement » pour m'avoir accepté de m'y inscrire et de leurs aides scientifiques et logistiques.

Mes recherches ont été effectuées au Laboratoire de **Géosciences Marines** du **REMER**. Je tiens à remercier vivement, pour leur aide et assistance, les Professeurs **Khalid MEHDI**, **Mohammed SAHABI**, et les coordinateurs du Réseau **REMER** : **Salem BAKKAS**, **Mohamed MONCEF** et **Omar ASSOBBEL**.

Je remercie Monsieur **Mohamed OUADIA**, Professeur à la Faculté des Sciences d'El Jadida qui a toujours su m'écouter et me donner de bons conseils et d'orientations. Ses connaissances en Géologie du Quaternaire de la région des Doukkala en font un spécialiste éclairé. Je le remercie profondément d'avoir accepté de juger ce mémoire et de présider le jury.

Je remercie Monsieur **Ahmed AAJJANE**, Professeur à la Faculté des Sciences d'El Jadida, qui a accepté de diriger ce travail, à qui je dois une reconnaissance particulière pour sa grande qualité humaine, ses conseils et pour la confiance qu'elle m'a toujours accordée.

Ce travail a pu être à terme grâce aux encouragements et au soutien de mon directeur scientifique de thèse Monsieur **Bendahhou ZOURARAH**, Professeur à la Faculté des Sciences d'El Jadida. Il m'a initié à la géologie marine et a toujours su me conseiller efficacement sur les orientations que je devais donner à mon travail. Qu'il trouve ici la preuve de toute ma reconnaissance et mes remerciements pour sa grande disponibilité et pour le temps qu'il a consacré à la critique de mes résultats en me faisant bénéficier de sa grande expérience.

Je remercie Monsieur **Christian CARRUESCO**, Maître de conférence HDR à l'Université de Bordeaux I, qui a accepté de juger ce travail dont il est le rapporteur ; il m'a accueilli dans son laboratoire et m'a apporté une aide précieuse dans les analyses microgranulométriques et de la matière organique. J'ai pu bénéficier de sa grande compétence et de ses observations pertinentes en tant que spécialiste des écosystèmes côtiers. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude d'avoir accepté d'être rapporteur de ce travail et d'avoir bien voulu m'honorer de sa présence au jury.

C'est également à Monsieur **Mustapha LABRAIMI**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat que j'adresse mes remerciements les plus respectueux pour sa grande qualité humaine, pour ses critiques et pour ses encouragements. Nos conversations ont été toujours pour moi une source d'enrichissement. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde reconnaissance de m'avoir aidé à la réalisation de ce travail, d'en être un des rapporteurs et d'avoir participé au jury.

Je remercie Madame **Rachida MAHJOUBI**, Professeur à la Faculté des Sciences de Meknès, qui a accepté de juger ce travail et qui a toujours témoigné d'une grande bienveillance ; elle me fait l'honneur d'être un rapporteur de ma thèse. Elle a bien voulu suivre la progression de ce travail et l'enrichir par ses suggestions et ses remarques précieuses.

Ce travail a bénéficié d'une bourse AGCD (Belgique) dans le cadre du projet CAMG, entre l'Université Chouaïb Doukkali (El Jadida, Maroc) et l'Université Catholique de Louvain (Louvain-La-Neuve, Belgique). Je tiens à remercier profondément Monsieur le Professeur **Dominique LADURON** et Monsieur le Professeur **Nasser ENNIH** coordinateurs du projet.

Mes vifs remerciements vont aussi à Monsieur **Jean NAUD**, Professeur à l'Université Catholique de Louvain (Louvain-La-Neuve, Belgique), qui a bien voulu m'accueillir dans son laboratoire où j'ai réalisé les analyses minéralogiques et géochimiques. Sa gentillesse, sa disponibilité, ses critiques et son savoir-faire m'ont permis de mieux valoriser ce travail.

Mes vifs remerciements à **Mes Professeurs de Département des Sciences de la Terre** de la Faculté des Sciences d'El Jadida, pour leur aide, leur gentillesse, leur soutien, leur permanente disponibilité, leurs nombreux conseils et leurs encouragements. Merci à tous. Je remercie aussi Mademoiselle **Fatima KHARMOUCHE** secrétaire du Département.

Ma reconnaissance s'adresse également à Monsieur le Professeur **Larbi EL ACHHAB**, Vice doyen de la Faculté des Sciences pour son soutien et ses encouragements et par là je ne saurais oublier de remercier le corps administratif de la Faculté des Sciences d'El Jadida.

Je tiens à remercier Monsieur **Hocein BAZAIRI**, Professeur assistant à la Faculté des Sciences de Casablanca I, pour ses encouragements et son soutien. Son aide concernant la mise en forme de l'exposé de ce travail était considérable.

Un grand merci à mes chers amis **Mohamed CHAIBI**, Professeur assistant Centre Universitaire de Safi, et **Driss INANI**, Cadre Supérieur, pour leur encouragement et leur soutien dans les plus pénibles moments.

Il est difficile de trouver des mots assez forts pour exprimer mon immense gratitude et ma plus grande affection à deux personnes, à qui je dois tout : **mes parents**, pour leur amour, leurs sacrifices, leur dévouement et leur encouragement inlassable ; qu'ils acceptent que je leur dédie ce travail.

L'achèvement de ce travail est l'occasion de remercier vivement ma grand-mère, mes frères (*Abdeladim, Ayoub et Mehdi*) et mes sœurs (*Mina, Meryem et Imane*), mes oncles (*Abdelkader, Abdellah et Abdelrahim*) et leurs épouses et tous les membres de la famille.

Rana, Rim, Khalid, Anouar, Rachid, Moubarek et toute la famille **BENABBOU**, qu'ils trouvent ici l'expression de ma grande affection. Je les remercie vivement pour leur sympathie, leur soutien moral et leur conseil incessant.

Un grand merci à tous mes amis surtout *Abdelali, Abdelilah, Abdelkabir, Amina, Atif, Fatima, Hicham, Ilyasse, Khadija, Loubna, Mehdi, Youssef, Younes* et *tous les étudiants de troisième cycle de la Faculté des Sciences d'El Jadida* et à toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Si par hasard, je venais d'oublier certaines personnes, qu'elles sachent que ma reconnaissance va bien au-delà de ces remerciements.



TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

INTRODUCTION.....1

GENERALITE SUR LES LAGUNES

I - INTRODUCTION.....6

II - DEFINITION DES LAGUNES7

 II-1-Qu'est ce qu'une lagune ?7

 II-2- Forces en jeu dans l'évolution des lagunes.....8

III - ORIGINES DES LAGUNES.....10

IV - CLASSIFICATION DES LAGUNES11

V- PLACE DE LA LAGUNE DE SIDI MOUSSA DANS LES MILIEUX LAGUNAIRES.....15

PRESENTATION GENERALE DE LA LAGUNE DE SIDI MOUSSA

I- SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA LAGUNE DE SIDI MOUSSA.....18

II- CLIMATOLOGIE DE LA LAGUNE.....20

 II-1 Les précipitations20

 II-2 Les températures21

 II-3 Les vents.....22

 II-4 Classification climatique..... 25

III- L'ENVIRONNEMENT CONTINENTAL ET MARIN.....25

 III-1 Environnement Continental.....25

 III-1-1. Cadre géologique de l'arrière pays lagunaire.....25

 III-1-1. 1. Le Paléozoïque.....26

 III-1-1. 2. Le Permo - Trias..... 26

III-1-1. 3. Le Jurassique.....	28
III-1-1. 4. Le Crétacé.....	28
III-1-1. 5. L'Eocène.....	29
III-1-1. 6. Le Miocène.....	29
III-1-1. 7. Le Pliocène.....	29
III-1-1. 8. Le Quaternaire.....	31
III-1-2. Pédologie des formations encaissantes.....	40
III-2 Environnement marin.....	41
IV- L'ENVIRONNEMENT LAGUNAIRE.....	45
IV-1 Morphologie lagunaire.....	45
IV-1-1. Cadre général.....	45
IV-1-2. La lagune proprement dite.....	45
IV-1-2-1. Les passes.....	46
IV-1-2-2. Les chenaux et la zone intertidale.....	46
IV-1-2-3. Les marais salants.....	46
IV-1-2-4. Le cordon littoral.....	47
IV-1-3. Les côtes de part et d'autres de la lagune.....	47
IV-2 Le contexte hydrologique.....	48
IV-2-1. Hydrologie marine.....	48
IV-2-1.1 La marrée.....	48
IV-2-1.2 La houle.....	49
IV-2-1.3 La circulation océanique et les upwellings.....	56
IV-3-2. Hydrologie continentale.....	59
IV-3-3. Bilan hydrologique de la lagune.....	60
IV-3 Milieu biologique de la lagune de Sidi Moussa.....	60
IV-3- 1 La faune.....	60
IV-3- 2 La flore.....	61
IV-3- 3 la salubrité de la lagune de Sidi Moussa.....	61
IV- INTERETS SOCIO-ECONOMIQUES DE LA LAGUNE DE SIDI MOUSSA.....	62

METHODES D'ETUDES

I - CONDITIONS D'ECHANTILLONNAGE	64
II- MATERIEL ETUDIE.....	64
II-1 Sédiments superficiels.....	64
II-2 Sédiments carottés.....	64
II- METHODES ANALYTIQUES.....	66
II – 1. Analyses granulométriques.....	66
II – 2. Minéralogie des Argiles.....	72
II – 3. Analyses géochimiques.....	73
II – 4. Calcimétrie.....	74
II – 5. pH des sédiments.....	75
II – 6. Analyses statistiques.....	75

APPROCHE SEDIMENTOLOGIQUE

I - CARACTERES SEDIMENTOLOGIQUES DES DEPOTS SUPERFICIELS.....	77
I-1- le pH et les teneurs en CaCO ₃	77
I-2- Etudes granulométriques.....	78
I-2-1 Répartition des faciès.....	80
I-2-1-1. Faciès sableux.....	80
I-2-1-2. Faciès silto-sableux.....	83
I-2-1-3. Faciès silto-argileux.....	84
I- 2-2 Analyse et interprétation des variations granulométriques... 85	
I- 2-3 Test Passega.....	88
I- 2-4 Méthode des moments linéaire.....	91
I- 2-4-1 signification et mode d'utilisation des paramètres.....	92
I-2-4-2 Test : Moyenne – Médiane.....	93
I- 3- Conclusion.....	93

II - CARACTERES SEDIMENTOLOGIQUES DES DEPOTS CAROTTES.....	95
II-1 Description des carottes.....	95
II.2 Granulométrie des dépôts.....	96
II.2.1 Faciès silteux.....	96
III.2.2 Faciès sableux.....	100
III.2.3 Conclusion.....	100
III.3 Variations granulométriques et dynamique du dépôt	100
III.4 Conclusion.....	104
III- CONCLUSION.....	104

APPROCHE MINERALOGIQUE

INTRODUCTION.....	107
I- MINERALOGIE DE LA PHASE ARGILEUSE LAGUNAIRE.....	107
I-1 Variations spatiales.....	107
II-2 Variations verticales.....	112
III- MINERALOGIE DE LA PHASE ARGILEUSE DE L'ENVIRONNEMENT CONTINENTAL.....	114

APPROCHE GEOCHIMIQUE

INTRODUCTION.....	116
I- LA MATIERE ORGANIQUE.....	116
I-1 Introduction.....	116
I- 2. Répartition spatiale.....	117
I-2-1. Evolution de la matière organique.....	117
I-2-2. Evolution de carbone organique particulaire.....	119
I- 3. Répartition verticale.....	119
I-3-1. Evolution de la matière organique	119
I-3-2 Evolution du carbone organique particulaire.....	119
I-4 Conclusion.....	121

II – ANALYSES CHIMIQUES.....	122
II-1 Introduction :	122
II-1-1. Les éléments chimiques dans l’environnement marin.....	122
II-1-2. La répartition des contaminants dans les sédiments.....	123
II-1-3. Les facteurs de contrôle de la répartition du contaminant.....	125
II-1-4. Les paramètres physico-chimiques.....	125
II-1-5. La fraction minérale.....	127
II – 2. Répartition spatiale des éléments chimiques dans la lagune	128
II-2-1. Les éléments majeurs.....	128
II-2-2. Les éléments mineurs et traces.....	130
II – 3. Répartition temporelle des éléments chimiques dans la lagune	134
II – 4. Facteur d’Enrichissement et Indice de Géo-accumulation.....	137
II – 5. Conclusion.....	142
CONCLUSIONS & PERSPECTIVES.....	144
<hr/>	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIES.....	148
LISTE DES FIGURES.....	165
LISTE DES TABLEAUX.....	169
ANNEXES.....	172

INTRODUCTION



INTRODUCTION

Depuis toujours, on dit que le littoral représente un enjeu fort pour nos sociétés. Beaucoup d'entre nous, enfants et adultes, connaissent la mer, comme étant un espace de vacances et de liberté. La prise de conscience que le littoral est aussi un espace vulnérable à protéger est plus récente mais s'accroît fortement.

Territoire mal défini, mal délimité, le littoral se caractérise par des équilibres écologiques et paysagers complexes et fragiles soumis à de fortes pressions anthropiques. La définition du littoral obéit à des critères éminemment variables. Il est toutefois admis que le littoral constitue un espace caractérisé par l'influence maximale et réciproque des milieux terrestres et maritimes qui ne produit pas les mêmes effets d'un endroit à un autre. Aux contrastes géologiques et climatiques viennent s'ajouter des différences qui résultent du rattachement ou non de ces territoires à des systèmes urbains proches, à des infrastructures de communication, supports du développement économique, à des environnements agricoles spécifiques.....etc. Son extension spatiale, vers le large ou vers le continent, est donc fonction des critères utilisés.

Le littoral est aussi un lieu où se cristallisent des logiques concurrentes, voire même antagonistes. Le littoral est modelé par de nombreuses activités humaines : urbanisation, agriculture, industrie, transport, tourisme, aquaculture, etc., alors que ces mêmes activités dépendent, très souvent, du milieu naturel pour pouvoir se développer. L'agriculture, sous des formes plus traditionnelles, préserve les paysages, l'espace rural, la faune et la flore, et participe à l'aménagement du territoire. Cependant, une mauvaise maîtrise des pratiques agricoles intensives affecte la qualité des sols, de l'eau et de l'air. Un tourisme mal encadré peut aussi engendrer des dommages, souvent irréversibles, sur le milieu alors que la qualité de cet environnement est à l'origine de ce développement touristique. De même l'aquaculture, dépendante pour son installation d'un environnement de qualité provoque des nuisances importantes si elle est surdimensionnée, notamment par l'importance des rejets de matières organiques qu'elle génère.

L'environnement littoral, défini par ses composantes des milieux physiques et biologiques, varie de façon naturelle aux contrastes de temps interannuels et séculaires où les effets anthropiques se font sentir. Le spectre de variabilité spatiale et temporelle étant complexe, on ne peut suivre et comprendre ces variations qu'en disposant des observations systématiques pour séparer les différentes échelles d'espace et de temps, et en appréhender les processus de transformation et leurs causes, qu'elles soient d'origine naturelle ou humaine. La préservation de ce milieu fragile, d'intérêt socio-économique important, nécessite donc une connaissance des processus contrôlant son évolution.

Le Royaume du Maroc, est un pays littoral par excellence dont les 2/3 de la population sont installés sur la frange côtière du pays. Cette seule référence souligne l'importance des potentialités socio-économiques de cette zone.

Outre la pêche, le littoral attire et regroupe diverses activités souvent nécessitées par des impératifs économiques tels que les activités portuaires, industrielles mais aussi l'aquaculture et le tourisme. Ces activités sont à l'origine d'une dense exploitation des ressources, non seulement continentales, mais de plus en plus marines et littorales dont une grande partie représente des sources majeures de nourriture pour l'Homme.

Le littoral peut être considéré comme une limite difficilement maîtrisable par l'Homme, dont la nature est liée à des évolutions à long terme. C'est également un milieu où entrent en contact la mer, l'atmosphère et le continent selon l'importance prise par l'un ou l'autre de ces milieux, les formes de terrain, l'écoulement et la vie. On distingue classiquement différentes formes : estuaires, lagunes, deltas, côtes sableuses, falaises etc.

Les lagunes sont des étendues d'eau de mer comprises entre la terre ferme et un cordon littoral généralement percés de passes et elles apparaissent comme des systèmes littoraux hautement évolutifs sous la dépendance de multiples facteurs naturels et anthropiques, elles révèlent une grande variabilité des conditions hydrodynamiques et sédimentologiques, une rapidité d'évolution de leur cadre morphologique, une grande vulnérabilité ainsi qu'une diversité considérable dans les écosystèmes qu'ils abritent.

Les lagunes se rencontrent à toutes les latitudes et sous différents types de climats et tout particulièrement sous climats tempérés, tropicaux et équatoriaux. Bien qu'elles n'occupent que de faibles superficies par rapport à la grande longueur de la

bande littorale qui entoure les continents et les grandes îles, les lagunes possèdent des atouts écologiques qui en font des écosystèmes hautement productifs.

Ces milieux se présentent comme une cible d'expansion économique dont la connaissance profonde de son fonctionnement s'impose dans le but d'une exploitation rationnelle. La préservation de ce milieu fragile, d'intérêt socio-économique important, nécessite une connaissance des processus contrôlant son évolution.

Les études scientifiques sur les lagunes sont devenues dans plusieurs pays une priorité et des programmes de recherches, de suivi, de gestion et d'aménagement sont identifiés. Au Maroc, la prise de conscience sur les lagunes comme des zones humides d'importance nationale et internationale est acquise par les départements ministériels compétents et des coordinations est assurée à plusieurs niveaux. Parmi les cinq sites marocains classés comme des zones humides d'importance nationale pour la conservation des oiseaux dans le cadre de la convention Ramsar, figure, Merja Zerga, Khnifiss, Sidi Moussa et Oualidia. La lagune de Sidi Moussa est connue aussi par son grand intérêt de la préservation des oiseaux rares. Et si les niveaux de connaissance scientifique des autres lagunes au Maroc sont déjà élaborés, la lagune de Sidi Moussa, à part des études sur les populations phytoplanctoniques, reste le seul site demeurant un manque d'informations surtout sur la plate forme géologique, d'où l'originalité de ce travail.

L'objectif du présent travail est de :

- Dégager les facteurs contrôlant le fonctionnement de la lagune de Sidi Moussa, à partir d'une connaissance de l'ensemble des composantes du milieu (facteurs hydrodynamiques, facteurs climatiques et apports continentaux).
- Etablir le bruit de fond géochimique de la lagune.
- Mettre en évidence un diagnostic de l'impact de la pollution métallique sur le fonctionnement de cet écosystème.
- Identifier le rôle que joue le flux de matière transférée dans la lagune, par le biais des ruissellements, dans l'évolution de ce système.
- Proposer un schéma général de l'évolution prospective de cette lagune en relation avec les variations des conditions naturelles du milieu.

GENERALITES SUR LES LAGUNES

I - INTRODUCTION.....	6
II - DEFINITION DES LAGUNES	7
II-1-Qu'est ce que c'est une lagune ?	7
II-2- Forces en jeu dans l'évolution des lagunes.....	8
III - ORIGINES DES LAGUNES.....	10
IV - CLASSIFICATION DES LAGUNES	11
V- PLACE DE LA LAGUNE DE SIDI MOUSSA DANS LES MILIEUX LAGUNAIRES.....	15



GENERALITES SUR LES LAGUNES

I - INTRODUCTION

Les lagunes sont des plans d'eau, allongées parallèlement au littoral, peu profonds, isolés de la mer souvent par un cordon meuble de sables et de galets. La communication avec la mer se fait par des ouvertures plus ou moins nombreuses dans le cordon. Cette ouverture sur la mer n'est pas indispensable car il existe des lagunes fermées de façon permanente ou temporaire.

Les lagunes représentent environ 13% de la longueur des côtes du monde. On les trouve sous toutes les latitudes, aussi bien dans les régions polaires que dans les régions tropicales ou tempérées, que les marées soient fortes ou faibles, encore que les marnages moyens ou peu marqués soient favorables à leur existence. Certains rivages ont, sur de longues distances, des lagunes bien développées : façade atlantique des USA, golfe du Mexique, Mer Baltique, Mer Méditerranée, littoral sud oriental de l'Australie et côte orientale de l'Inde.

Les lagunes et plus généralement les milieux paraliques (étymologiquement à côté de la mer) sont des écosystèmes originaux qui participent à la fois au domaine marin et au domaine continental. Foyers d'occupation humaine depuis les premiers temps, en raison de leur fonction d'abris et de leurs fortes ressources halieutiques, les lagunes sont plus que jamais l'objet de pressions liées aux méthodes modernes d'exploitation des ressources vivantes et minérales, aux développements du tourisme, à l'urbanisation et à la construction des ports et des zones industrielles. Ces différentes activités ont, chacune, leurs contraintes propres souvent contradictoire parfois génératrices de graves conflits.

En effet, une lagune est souvent un milieu productif réputé sensible et d'une stabilité toute relative même à l'état naturel. Son organisation et ses caractéristiques sont étroitement dépendantes de l'équilibre entre influences marines et continentales. Des irrégularités climatiques ou l'érosion et la sédimentation dans la zone de communication avec la mer peuvent modifier rapidement cet équilibre. Souvent les modifications dues à l'activité humaine rendent parfois moins perceptible l'évolution naturelle. Celle-ci mérite, cependant, d'être également prise en compte dans l'étude globale des

caractéristiques d'un écosystème lagunaire. Une telle étude est préalable à tout aménagement utilisant d'une façon ou d'une autre les propriétés remarquables des lagunes. Devant la variété des milieux paraliques, le besoin de comparaison et de classification s'est vite fait sentir. L'un des objectifs de cette classification est de pouvoir transférer sur un milieu nouveau, les connaissances déjà acquises sur des milieux semblables.

II - DEFINITION DES LAGUNES

II-1-Qu'est ce qu'une lagune ?

Il s'agit d'une étendue d'eau de mer comprise entre la terre ferme et un cordon littoral généralement percé de passes. Les lagunes de la façade atlantique étudiées par Carruesco, (1989) peuvent être définies comme étant un milieu comprenant trois unités morphologiques :

- une barrière sableuse ;
- une étendue d'eau ;
- des chenaux.

Lankford (1977) propose une définition fondée sur quelques aspects morphologiques communs :

«Une lagune est une dépression côtière située au-dessous du niveau moyen des océans ayant une communication permanente ou temporaire avec la mer mais isolée de celle-ci par un cordon ou tout autre type de barrière littorale».

Si la barrière littorale est constituée d'une bande de sédiments permettant une communication régulière avec la mer au niveau de quelques passes (appelé aussi grau, exutoire ou émissaires) dont l'existence est conditionnée par le transit sédimentaire le long du littoral, on parle alors de bassin lagunaire. On parle parfois d'étang littoral lorsque les liaisons avec la mer sont plus épisodiques et liées aux actions conjuguées des vents, des marées ou des tempêtes. Avant d'entreprendre tout aménagement dans ces milieux fragiles, il convient de mettre en œuvre des études d'impacts solides. Ces études permettent de hiérarchiser les zones sensibles de l'ensemble du domaine lagunaire.

Les lagunes côtières, selon la définition de Phleger (1969), modifiée par Kjerve (1994), sont des plans d'eaux habituellement allongés parallèlement à la ligne de côte, et

séparés de la mer par une barrière où se localisent un ou plusieurs chenaux de communication avec l'océan ouvert. Ces ouvertures peuvent être permanentes ou temporairement fermées. En suivant E.C.B. Bird (1994), on peut distinguer trois parties dans une lagune assez vaste qui communique avec la mer et qui reçoit des tributaires.

a- La partie externe se trouve à proximité des passes ouvertes dans le cordon qui isole la lagune de la mer. Dans cette partie, où les eaux sont salées et le marnage notable, les bords de la lagune sont occupés par des chenaux de marée. De part et d'autre de la passe, aussi bien du côté de la mer que du côté de la lagune, s'accumulent des sables qui constituent des hauts-fonds appelés deltas de marée.

b- La partie moyenne : l'eau est saumâtre et il arrive que les bords soient érodés en petites falaises ou, au contraire, festonnés par de petites flèches à pointe libre, dues aux courants qui se produisent dans la lagune.

c- La partie interne : les eaux sont très peu salées et les variations du niveau de la lagune sont faibles. Là où débouchent les cours d'eau s'édifient de petits deltas à croissance rapide. Ailleurs les marécages recouverts de roseaux constituent une marge amphibie.

II-2- Forces en jeu dans l'évolution des lagunes

Elles sont liées à l'agitation de la mer (houle, marée), à l'écoulement de l'eau continentale et au mouvement de l'air.

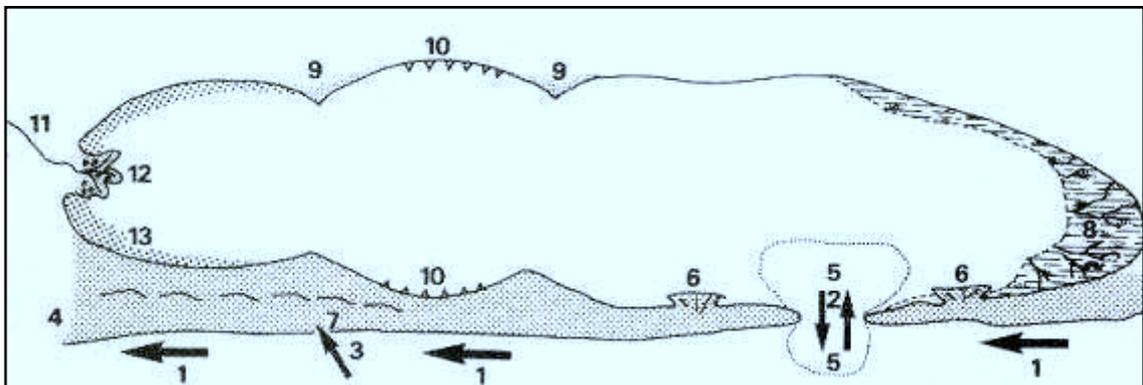
La houle qui arrive obliquement par rapport au rivage donne naissance à un transit côtier de sables et de galets qui nourrit les flèches en arrière desquelles se situent les lagunes. Ce transfert sédimentaire, lié à la dérive littorale, joue un rôle essentiel dans le maintien des cordons lorsqu'elles existent, dans l'évolution des passes. Si ces cordons sont trop étroits, il y a débordement de l'eau de mer dans la lagune. Ce débordement apporte du sable qui participe au colmatage des lagunes mais aussi à la migration des flèches en direction de la terre.

La marée intervient d'autant plus que le marnage est plus grand et que les passes sont plus nombreuses et plus larges. Au fur et à mesure qu'elle pénètre plus en avant dans l'intérieur des lagunes, la marée voit son amplitude diminuer et sa propagation être retardée. D'une façon générale, le flot est plus court, plus rapide aussi, que le jusant. Les courants de marée qui atteignent leur vitesse maximale dans les passes, jusqu'à plusieurs

mètres par seconde, s'amortissent vers l'intérieur où ils sont canalisés par des chenaux. La marée peut provoquer des échanges d'eau considérables entre la mer et les lagunes.

Les rivières qui se jettent dans les lagunes créent des courants de décharge vers la mer dont l'effet de chasse contribue, avec le va-et-vient des courants de marée au maintien des passes. Ces courants de charges renforcent les courants de jusant.

Le vent se manifeste diversement. Lorsqu'il souffle vers la terre et que sa vitesse est suffisante, il transporte, par saltation et par roulage, des sables depuis les cordons littoraux jusque dans les lagunes situées en arrière, contribuant ainsi, en particulier dans les régions arides, à leur remblaiement. Sur les lagunes assez vaste, quelle que soit sa direction, le vent crée des vagues qui peuvent éroder les berges et faire naître, dans les tranches d'eau peu épaisses, des turbulences, responsables de la remise en suspension de sédiments fins, et des courants, générateurs d'une nouvelle répartition de ces matériaux. Dans les régions où les marées sont faibles et les apports d'eau fluviale peu importants, le vent joue un rôle primordial dans l'agitation de l'eau dans les lagunes (Figure I-1).



- 1- dérive littorale; 2- courants de marée; 3- vent dominant; 4- flèche ou barrière;
5- delta de marée; 6- cône débordement; 7- dunes; 8- vasière et chenaux de marée;
9- petite flèche intérieure; 10- petite falaise; 11 -rivière; 12- delta.

Figure I-1 : les différentes unités morphologiques et les facteurs agissant sur une lagune (Bird, 1994).

III - ORIGINES DES LAGUNES

Les lagunes actuelles occupent une place très importante parmi les environnements côtiers. Elles sont, plus fréquemment, rencontrées dans les environnements microtidaux bien que des exemples soient cités dans les environnements mésotidaux et plus rarement macrotidaux (Hayes, 1975).

Les lagunes constituent un trait éphémère des côtes. Leur évolution est rapide à l'échelle géologique. Les lagunes actuelles sont apparues il y a 5 ou 6000 ans à la fin de la transgression postglaciaire. Elles ont été formées à la fin de la transgression postglaciaire, vers 5000-6000 ans B.P. (Zenkovitch, 1969 ; Hume et Herdendoif ; 1987), selon les mécanismes décrits par Curray (1964), Nichols et Allen (1981), Moslow et Tye (1985) et Carruesco (1989) notamment dans les régions où le plateau continental est large et plat et où la remontée du niveau marin est lente (Emery, 1967). Le modèle de formation des lagunes serait le suivant (Curray, 1964) : la remontée du niveau marin, avant 7000 ans B.P., a causé une translation de la ligne de rivage sur le plateau continental. Quand la remontée du niveau marin s'est ralentie, la transgression s'est trouvée localement équilibrée par un dépôt de sable le long du rivage vers 3600 - 4750 ans B.P. Cet apport de sable a pu provoquer, localement, une progradation du littoral, alors que le niveau eustatique continuait sa lente remontée.

Une dérive littorale intense, prévalant pendant la progradation du littoral, a permis l'édification de cordons-barrières ou de flèches sableuses (spits), selon les mécanismes décrits par Zenkovitch, (1969), Rosen (1973), Martin et Domingues (1994), isolant les lagunes. La pérennité de ces systèmes au cours de l'Holocène supérieur résulte d'un équilibre décrit par Lucke (1934) :

a) Le régime des houles : Tout changement de l'orientation de la houle aura une conséquence sur le rythme d'édification du cordon-barrière. Une accélération du processus d'édification pourra entraîner une fermeture partielle ou totale des lagunes (Zenkovitch, 1969 ; Phleger, 1969 et Orme, 1972).

b) Les apports d'eaux douces : Une diminution des apports d'eaux douces et/ou un comblement rapide en arrière du cordon, provoquera une diminution du volume d'eau dans la lagune et ainsi une baisse de l'intensité des échanges au niveau de la communication océan-lagune. Bird (1994) considère que les lagunes sont actuellement en voie de comblement par sédimentation, ce qui peut les transformer en plaine côtière

transgressive.

c) Les variations climatiques et la néotectonique : Subsidence et soulèvement pourront interférer sur la vitesse de comblement.

Le destin d'une lagune est de disparaître, à plus ou moins brève échéance, par colmatage lorsque le niveau de la mer est relativement stable. Si celui-ci s'élève rapidement, la barrière peut être submergée et la lagune devient une baie. S'il s'abaisse la lagune tend à s'assécher. Les lagunes sont le siège d'une sédimentation active et continue. Les sédiments piégés dans la lagune dépassent de loin, en volume, ceux qui s'en échappent. Ces sédiments sont fins et sont des sables venus de la mer, mais aussi des limons et argiles apportés par les rivières auxquels s'ajoute une quantité importante de matière organique. C'est la présence de la végétation et des êtres vivants qui permet la retenue de ces sédiments dans la lagune.

IV - CLASSIFICATION DES LAGUNES

Postma (1969) définit les différents types de lagunes en fonction de leurs hydrologies : il compare la salinité de la lagune à celle de l'eau de mer voisine pour voir la qualité et le caractère des échanges des masses d'eau entre la lagune et l'océan. On a ainsi défini trois types principaux (Figure I-2) :

- **type estuarien (A)** : L'eau de la lagune a une salinité inférieure à l'eau de mer. Le climat est humide et les apports en eau douce d'origine continentale en sont la cause. La circulation est du type normal estuarien. L'eau lagunaire est évacuée dans les niveaux de surface et l'eau de mer pénètre dans les niveaux inférieurs. Le mélange des eaux est assuré par le jeu des marées.
- **type neutre (B)** : La salinité de la lagune est égale à celle de l'eau de mer. Le mouvement de l'eau est assuré seulement par les marées. Le flot est égal au jusant, pas de stratifications des eaux.
- **type anti estuarien (C)** : L'eau de la lagune est plus dense (> à 35 ‰) que l'eau de mer. La salinité, plus forte des eaux lagunaires, le climat est sec, est la conséquence de l'évaporation élevée des niveaux de surface. L'évacuation de ces eaux denses s'effectue dans les niveaux inférieurs alors que les eaux océaniques pénètrent dans les niveaux supérieurs.

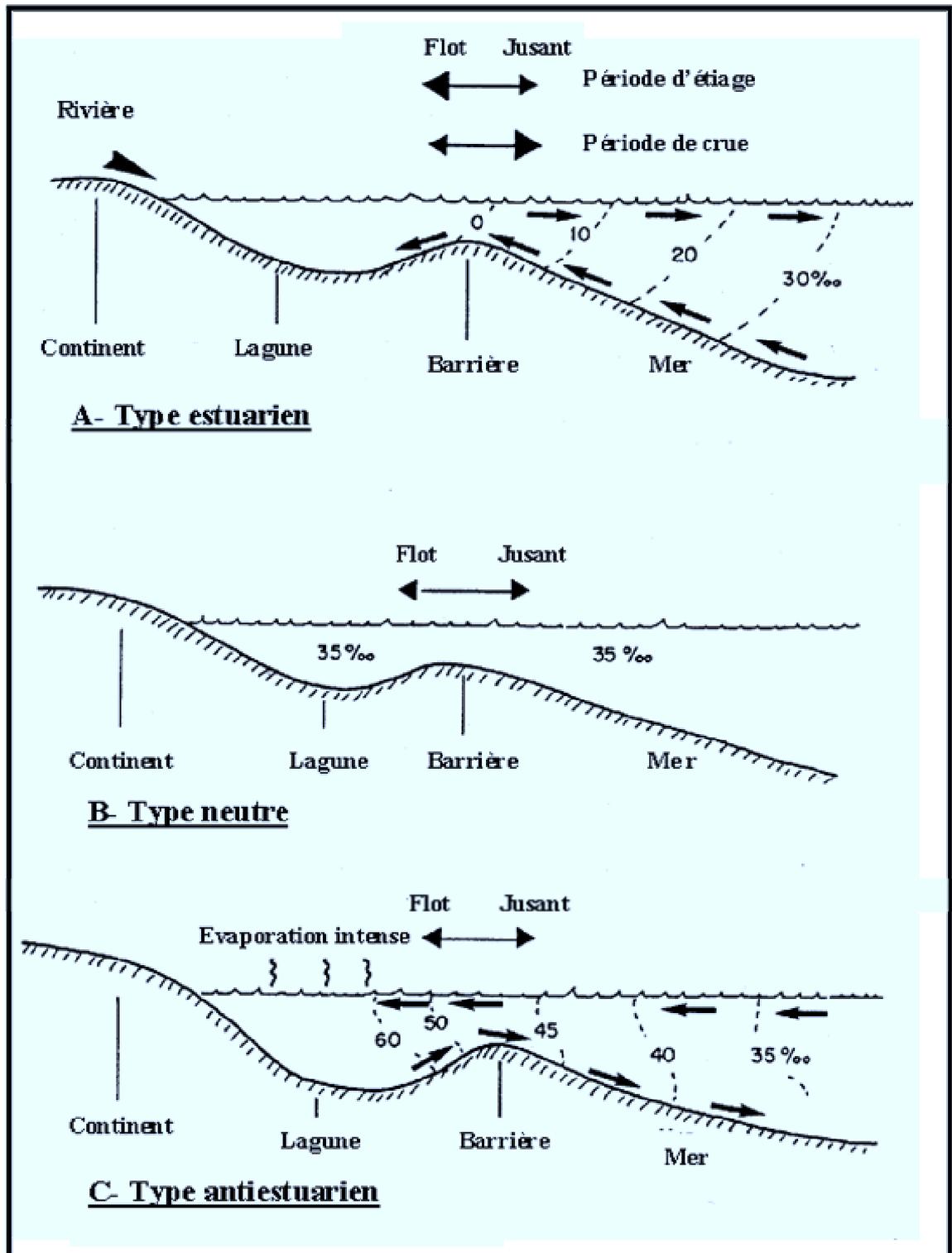


Figure I-2 : Les différents types de lagunes (Postma, 1969)

Entre ces trois types principaux il y a un grand nombre de types intermédiaires à cause des variations de marnage et du degré d'isolement de la lagune par rapport à l'océan et du climat. Si le marnage est faible, les courants de marées sont faibles, cela se traduit par un relief faible des chenaux de marée et des zones intertidales, des échanges lents entre lagune et océan et une stratification des eaux fortes. Si le marnage est élevé, les courants de marée sont forts. Dans ce cas, les chenaux ont un fort relief et les zones intertidales sont étendues. Les échanges sont rapides entre l'océan et la lagune et la stratification des eaux est faible.

Hayes (1975) classe les lagunes en fonction du marnage comme facteur contrôlant les paramètres morphologiques des lagunes. Il définit trois types :

- type microtidal (marnage < 2m) : Ce type est caractérisé par des phénomènes de "washover", des passes (souvent comblées) et des deltas de marée sont de taille mineure et des faciès intertidaux développés.

- type mésotidal (2m < marnage < 4m) : Ce type est caractérisé par une barrière courte, les zones de passes sont larges et les deltas de marées ainsi que les faciès intertidaux sont importants. L'influence des vagues est importante sur la façade océanique. Les courants de marées deviennent forts.

- type macrotidal (marnage > 4m) : Il existe peu de systèmes lagunaires quand le marnage est supérieur à 4m.

Lankford (1977), pour sa part, fait appel à des paramètres morphologiques induits par l'origine de la sédimentation. Sa classification décrit cinq types morphologiques principaux, quatre où la sédimentation joue un rôle essentiel, le cinquième étant régi par des facteurs tectoniques (Figure I-3) :

- type 1. Il est caractérisé par une dépression fluviale où les apports fluviatiles sont faibles et par une barrière issue de la dérive littorale (sédimentation côtière).

- type 2. Caractérisé par une dépression fluviale comblée ou plaine maritime où les apports fluviatiles sont importants et par une barrière construite par le fleuve ou par reprise littorale de ses apports (sédimentation fluviatile ou deltaïque prédominante).

- type 3. Caractérisé par l'absence de dépression fluviatile et par une barrière construite par la mer (bancs, crêtes pré-littorales, tombolos etc.) (Sédimentation marine).

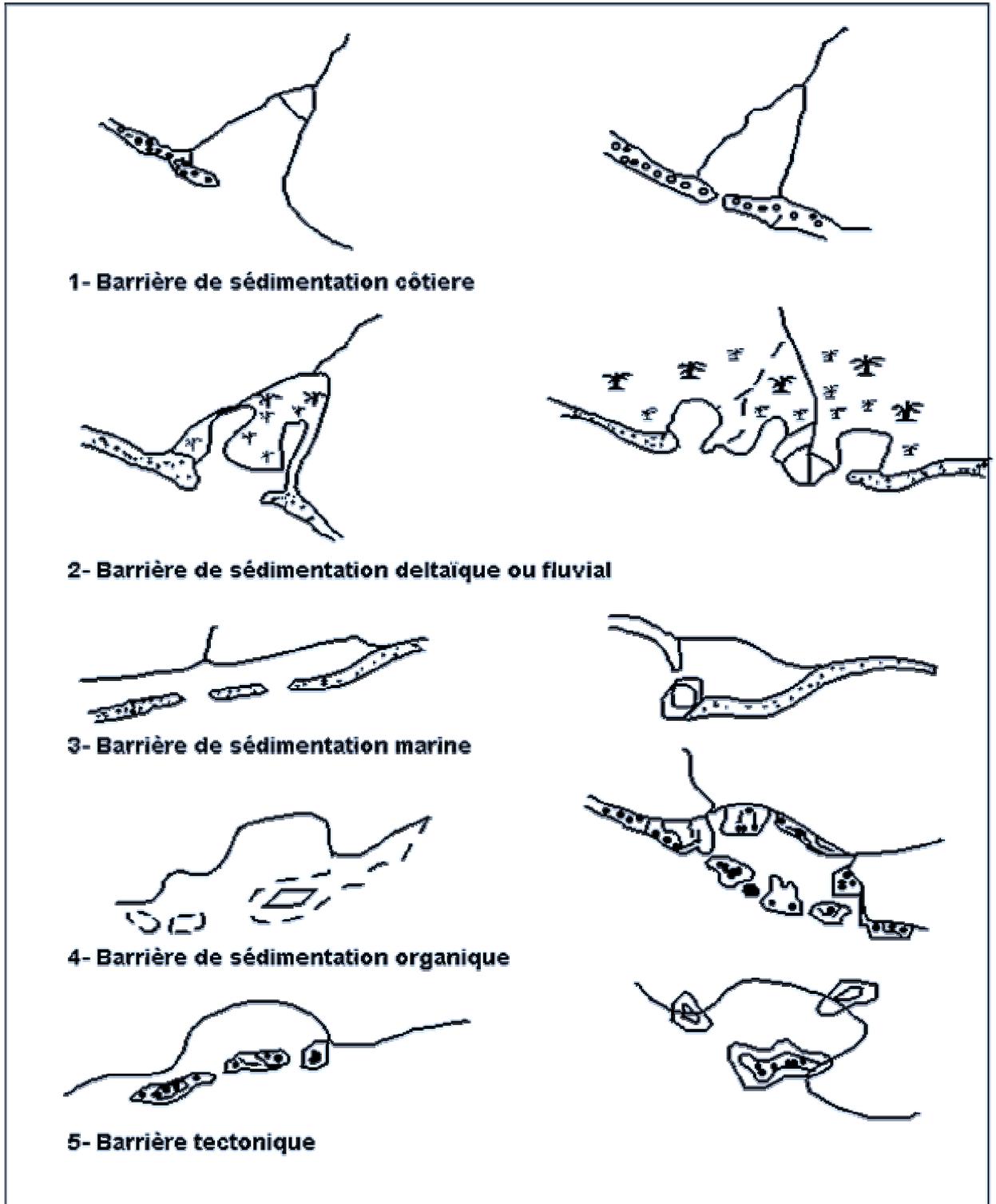


Figure I-3: Types morphologiques principaux des systèmes lagunaires

(Lankford, 1977)

-type 4. Caractérisé par une dépression et par une barrière de construction organique généralement récifale (sédimentation organique).

-type 5. Caractérisé par une dépression et une barrière d'origine structurale.

Si chaque type peut être distingué, le passage de l'un à l'autre est possible. Par exemple, le passage du type 1 au type 2 (et réciproquement) est conditionné par l'importance des apports fluviaux. Une modification, d'origine quelconque, des débits solides aura donc une incidence sur l'évolution du système lagunaire de type 1 et 2.

Nichols et Allen (1981) basent leur classification en fonction de leur degré d'ouverture sur le domaine océanique et en fonction du processus hydrodynamique dominant. Ces auteurs ont proposé une classification des lagunes et quatre catégories ont été distinguées (Figure I-4) :

- Les lagunes estuariennes dans lesquelles le courant fluvial et les courants de marée jouent un rôle prépondérant.
- Les lagunes ouvertes dans lesquelles la marée a un marnage suffisant pour que le flot et le jusant assurent un autdragage des passes qui échappent à l'obturation,
- Les lagunes semi fermées témoignent d'un apport de forces inverses ; les apports de la dérive littorale tendent à colmater les passes qui se maintiennent difficilement,
- Les lagunes fermées caractérisées par l'absence de courants de marée, ce qui est l'indice d'un faible marnage et par des effets de chasse d'origine fluviale.

V- PLACE DE LA LAGUNE DE SIDI MOUSSA DANS LES MILIEUX LAGUNAIRES

On retrouve dans la lagune de Sidi Moussa les trois unités morphologiques lagunaires précédemment décrites avec la barrière sableuse du Marckchia, une dépression d'eau renfermée et une zone de passes permettant la communication avec l'océan. Cette lagune se situe dans un type mésotidal selon la classification de Hayes (1975), neutre selon Postma (1969) complété par le type estuarien de Nichols et Allen (1981). Cet exemple montre bien les liens existants entre ces différentes classifications d'où l'intérêt de replacer chaque système étudié dans celles-ci et de faire la synthèse en hiérarchisant les facteurs responsables de l'état actuel du modèle étudié.

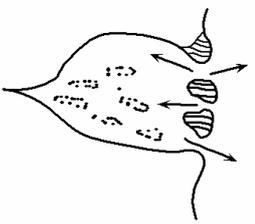
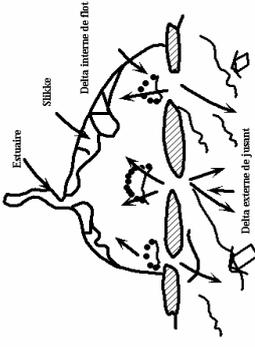
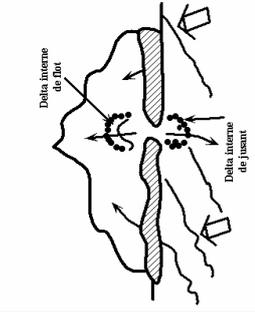
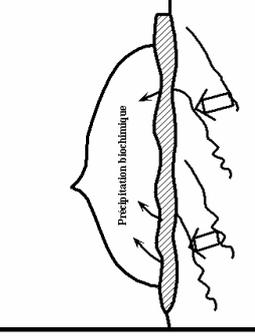
				
	A - LAGUNE ESTUARIE marées et apports d'eau douce avivés	B - LAGUNE OUVERTE Marées et vagues avivés	C - LAGUNE PARTIELLEMENT FERMEE Vagues et courant littoral dominant	D - LAGUNE FERMEE Vagues et vent dominant
CARACTERE	<i>FORT</i> ←	← <i>Marees et apports d'eau douce</i>	← <i>FAIBLE</i>	← <i>FAIBLE</i>
	← <i>FAIBLE</i>	← <i>Vagues</i>	← <i>FORT</i>	← <i>FORT</i>
	← <i>OUVERTE</i>	← <i>Communication</i>	← <i>FERMEE</i>	← <i>FERMEE</i>
MORPHOLOGIE	Barrière courte Chenaux profonds et zone intertidale Courants de marées et apports fluviaux	- Barrière allongée - Larges passes - Deltas de marées (flot et jusant) développés Courants de marée	- Barrière allongée - Passes étroites - Delta externe (jusant) réduit Vagues "Washover" et courants côtiers.	Barrière continue - Washover", vent. - Production organique - précipitation chimique
PROCESSUS DOMINANTS				
TYPE DE SEDIMENT		- Sable marin (Océan) - Vase (Lagune)	- Sable marin (passes-océan) - Vases (lagune)	- Vases lacustres organiques - Evaporites
ECHANGE OCEAN-LAGUNE	Elevé	Intermédiaire	Faible	Pas d'échange (percolation à travers barrière)

Figure I-4 : Différents types de lagunes d'après les processus dominants (Nicholls et Allen, 1981).

PRESENTATION GENERALE DE LA LAGUNE DE SIDI MOUSSA

I- SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA LAGUNE DE SIDI MOUSSA...	18
II- CLIMATOLOGIE DE LA LAGUNE.....	20
II-1 Les précipitations	20
II-2 Les températures	21
II-3 Les vents.....	22
II-4 Classification climatique.....	25
III- L'ENVIRONNEMENT CONTINENTAL ET MARIN.....	25
III-1 Environnement Continental.....	25
III-1-1. Cadre géologique de l'arrière pays lagunaire.....	25
III-1-2. Pédologie des formations encaissantes.....	40
III-2 Environnement marin.....	41
IV- L'ENVIRONNEMENT LAGUNAIRE.....	45
IV-1 Morphologie lagunaire.....	45
IV-1-1. Cadre général.....	45
IV-1-2. La lagune proprement dite.....	45
IV-2 Le contexte hydrologique.....	48
IV-2-1. Hydrologie marine.....	48
IV-3-2. Hydrologie continentale.....	59
IV-3-3. Bilan hydrologique de la lagune	60
IV-3 Milieu biologique de la lagune de Sidi Moussa.....	60
IV-3- 1 La faune.....	60
IV-3- 2 La flore.....	61
IV-3- 3 la salubrité de la lagune de Sidi Moussa	61
IV- INTERETS SOCIO-ECONOMIQUES DE LA LAGUNE DE SIDI MOUSSA.....	62

Partie I :

PRESENTATION GENERALE DE LA LAGUNE DE SIDI MOUSSA

I- SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA LAGUNE DE SIDI MOUSSA

La lagune de Sidi Moussa se situe sur la côte atlantique marocaine. Ses coordonnées géographiques sont (Figure I-5) :

- 32° 52' 0'' de latitude Nord
- 8° 51' 05'' de longitude Ouest

Elle s'inscrit sur un rectangle de 5,5 Km de long sur 0,5 Km de large. La superficie totale est estimée à 4,2 Km². Trois domaines y sont distingués :

1. Les passes permanentes et le delta interne de marée
2. Les chenaux (5 m de profondeur maximale), les zones intertidales et les schorres envahis par une végétation halophyte ;
3. Les marais salants au fond du plan d'eau, séparés par une digue.

Cette lagune possède la particularité d'être séparée du domaine océanique par un cordon de dunes consolidées qui assure la stabilité de la communication lagune- océan.

Travaux antérieurs ayant concernés la lagune de Sidi Moussa :

Ce sont les anglais qui ont découvert plus tôt que le petit estuaire de Sidi Moussa et la zone des poêles à sel contiguë offre des possibilités magnifiques de capture des limicoles au moyen des filets-extrafins.

Plusieurs expéditions ont été organisées au Maroc ; expédition de l'université d'Est Anglia au Maroc en 1971 (University of Est Anglia Expedition to Morocco 1971 Report). Elle s'est essentiellement intéressée aux observations d'oiseaux aquatiques dans les zones humides les plus importantes au Maroc. Puis l'expédition de l'université du Durham à Sidi Moussa en 1980 pour effectuer des marquages visant à montrer le « taux de passage » des différentes espèces d'oiseaux dans leur migration plus au Sud. La migration des limicoles le long de la côte Atlantique du Maroc en Mars 1981 : rapport de l'expédition Ornithologique Hollande au Maroc-1981.

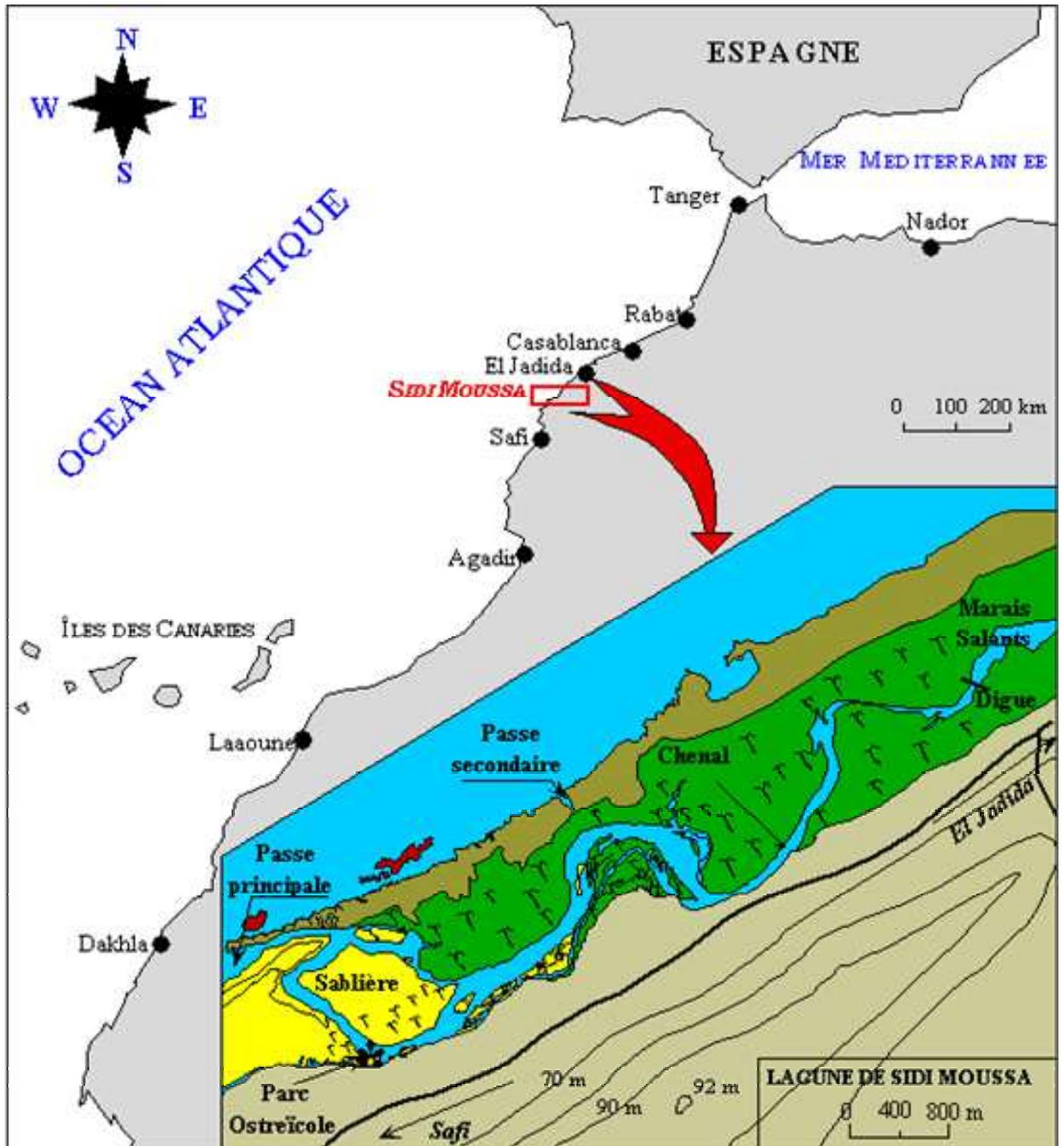


Figure I-5 : Localisation géographique de la lagune de Sidi Moussa

Sarf et Labraimi (1997) ont pu établir une carte de la répartition des faciès au sein du remplissage lagunaire. Une étude plus récente (Bennouna, 1999) s'est intéressée à l'évaluation quantitative et qualitative des populations phytoplanctoniques de la lagune de Sidi Moussa. Kaimoussi (2002), a établi une étude sur la contamination métalliques dans la colonne d'eau, dans les sédiments, dans les moules et dans les algues sur le littoral des Doukkala.

II- CLIMATOLOGIE DE LA LAGUNE

La lagune de Sidi Moussa est située dans la région des Doukkala à la latitude moyenne du Maroc (32-33° N). L'arrière pays lagunaire a un relief négligeable et influence peu la climatologie.

Même si la région est classée dans l'étage semi-aride, la sécheresse d'été et les pluies concentrées sur l'hiver et l'intersaison impriment au climat un caractère méditerranéen. Cependant, la région bénéficie des caractéristiques des régions situées dans les parties orientales des océans aux latitudes subtropicales, et se caractérise par une nuance océanique créant des conditions thermiques originales telles que la faible amplitude thermique annuelle et la douceur des hivers (Atillah, 1994). Cette nuance océanique est induite surtout par la présence des eaux marines fraîches liées au courant des Canaries en hiver et au phénomène d'Upwelling en été. Néanmoins, cette influence océanique diminue rapidement dès qu'on s'éloigne des côtes pour s'atténuer vers l'intérieur.

II-1 Les précipitations :

La région d'étude se situe entre les deux isoètes 300 mm et 500 mm de la carte des précipitations du Maroc. Vu la latitude méridionale, la quantité pluviométrique moyenne annuelle demeure médiocre et ne dépasse guère 380 mm, ce qui la situe dans l'étage semi-aride du climat. Il convient, néanmoins, de signaler l'importance des condensations et des rosées « précipitations occultes » le long des côtes.

Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations (entre 1964 et 2002) mettent en évidence (Tableau I-1) :

Un maximum des précipitations en décembre (63 mm)

Un minimum aux mois de juillet et août (0 mm)

La courbe des fréquences pluviométriques montre une saison des pluies qui s'étend de l'automne (octobre) jusqu'au printemps. La sécheresse débute en juin pour se poursuivre jusqu'en septembre. Au cours de cette période, les précipitations sont exceptionnelles.

Tableau I-1 : Précipitations moyennes mensuelles et annuelle dans le sahel des Doukkala (1964-2002) (ORMVAD)

Pluviométrie moyenne mensuelle en mm												P. annuelle moyenne
Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	
4,32	31,18	45,55	60,68	50,6	44,82	36,42	29,82	12,14	1,3	0,01	0,26	317,09

II-2 Les températures :

La température est un facteur climatique beaucoup plus régulier que les précipitations (Figure I-6). Le régime thermique de la plaine côtière des Doukkala traduit clairement l'influence des eaux océaniques, malgré la présence d'un hiver frais et humide et d'un été relativement chaud. La température moyenne annuelle (Moyenne des températures moyennes mensuelles) est de l'ordre de 18,7 °C. Le mois le plus froid (Janvier) n'enregistre en moyenne que 11,8 °C, alors que le mois le plus chaud (août) n'excède guère la valeur moyenne de 25,9 °C (Tableau I-2). Des températures maximales absolues de 40 °C peuvent être relevées, ces températures extrêmes sont atteintes lorsque souffle le « Chergui » originaire des dépressions sahariennes. On n'observe jamais de gelée en bordure océanique.

Tableau I-2 : Températures moyennes mensuelles et annuelles dans le sahel des Doukkala (1964-2002) (ORMVAD)

Moyennes des températures moyennes mensuelles (°C)												Moyenne annuelle
Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	
24,0	20,5	16,8	13,1	11,8	13,2	14,9	16,3	19,3	22,5	25,8	25,9	18,7

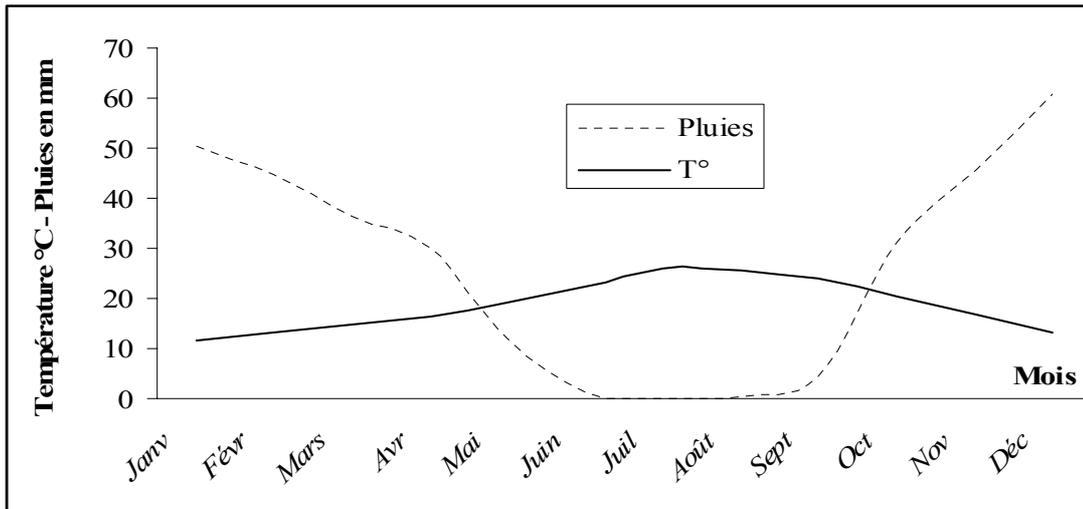


Figure I-6 : Diagramme pluviothermique de littoral des Doukkala (1964-2002)

II-3 Les vents :

Les vents au Maroc sont sous la dépendance de deux systèmes de circulation atmosphériques, ce qui explique les deux phases climatiques annuelles ; l'une humide (climat tempéré) et l'autre sèche (climat tropical). Les variations saisonnières du climat marocain sont liées à la présence et aux déplacements latitudinaux de l'anticyclone des Açores. En été et au printemps, l'anticyclone se déplace vers le Nord, jusqu'au delà de la latitude de 35°, permet par la suite la remonté des cellules atmosphériques tropicales et il engendre des vents de NE (Secs). En hiver, l'anticyclone est situé plus au Sud, les dépressions de l'Atlantique Nord atteignent le Maroc. Pendant cette période les vents de secteurs SW succéderont les vents de secteur NW pendant le mois de septembre.

Vents de l'alizé: on assiste à la dominance du régime de l'Alizé de mars à octobre. Entre le mois de novembre et le mois de février, c'est le vent de NE qui domine. La descente hivernale de l'anticyclone, vers le Sud, entraîne la modification de la composante NNE en NE. La composante Nord est particulièrement forte lorsque l'anticyclone gagne sa position septentrionale, en avril, mai et juin (Weisrock, 1987).

Vents pluvieux: de novembre à février s'établit un vent de direction SW, c'est un vent pluvieux qui est lié au flux perturbé de SW lors de l'effacement de l'anticyclone (Delannoy, 1973 cités par Weisrock, 1987). En septembre, c'est la composante NW qui prend la relève.

Les données des caractéristiques des vents, dans la lagune de Sidi Moussa, ne sont pas suffisantes. Cela nous a conduit à compléter les données d'El Jadida par l'étude des enregistrements des stations météorologiques les plus proches : El Jadida, située à 35 km au Nord de la lagune de Sidi Moussa et la lagune de Oualidia 35 km au Sud. La comparaison des enregistrements de ces deux stations météorologiques va permettre de dégager les principales caractéristiques de chaque station.

- Les vents à El Jadida

La figure I-7 présente les résultats des enregistrements du vent effectués entre 1950 et 1961. Dans la zone littorale d'El Jadida, les vents dominants soufflent du Nord ou des directions voisines. Cette direction est constante presque durant toute l'année, mais elle est interrompue pendant la saison des pluies et stable en été. Les vents d'origine continentale (de secteurs E et S) sont relativement un peu fréquents pendant l'été. Cependant, ils marquent tout le climat marocain d'un caractère particulier. Ce sont des vents secs et chauds, connus sous le nom de « Chergui ». A l'opposé de ces vents de terre, la brise de mer rafraîchit quotidiennement l'atmosphère de la côte et des plaines littorales. Le littoral d'El Jadida est plus venté pendant l'hiver, durant la période humide (de novembre jusqu'à avril), les vents dominants proviennent des secteurs N, NE et des secteurs NW. Ces vents froids rentrent en contact avec les vents de provenance océanique (SW et W) amenant les pluies. En plus de leur influence sur la dynamique morpho-sédimentaire, ces vents ont une action contraignante sur la croissance du couvert végétal, relativement peu dense, sur toute l'extension du littoral.

- Les vents à Oualidia

Dans la lagune de Oualidia, la direction des vents est perturbée par la présence de la falaise dominant la lagune qu'ils heurtent et longent la plupart du temps (Figure I-8). En fait, la direction du vent de cette région est induite par l'anticyclone des Açores et par sa position latitudinale (Carruesco, 1989). Les caractéristiques communes aux différentes stations sont résumées dans les points suivants :

- la prédominance des vents modérés de secteurs W, N et NE sur toute la longueur du littoral de Safi à Casablanca.
- les vents forts (11 à 16 m/s) proviennent toujours des mêmes secteurs (W et SW).

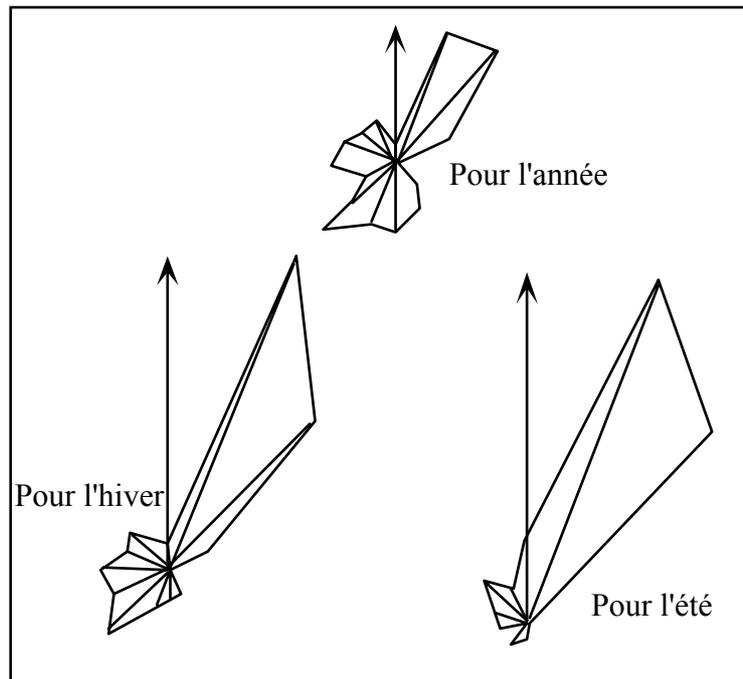


Figure I-7 : Principales directions moyennes du vent enregistrées à El Jadida (entre 1950 et 1961) (In Boulanoir, 1999)

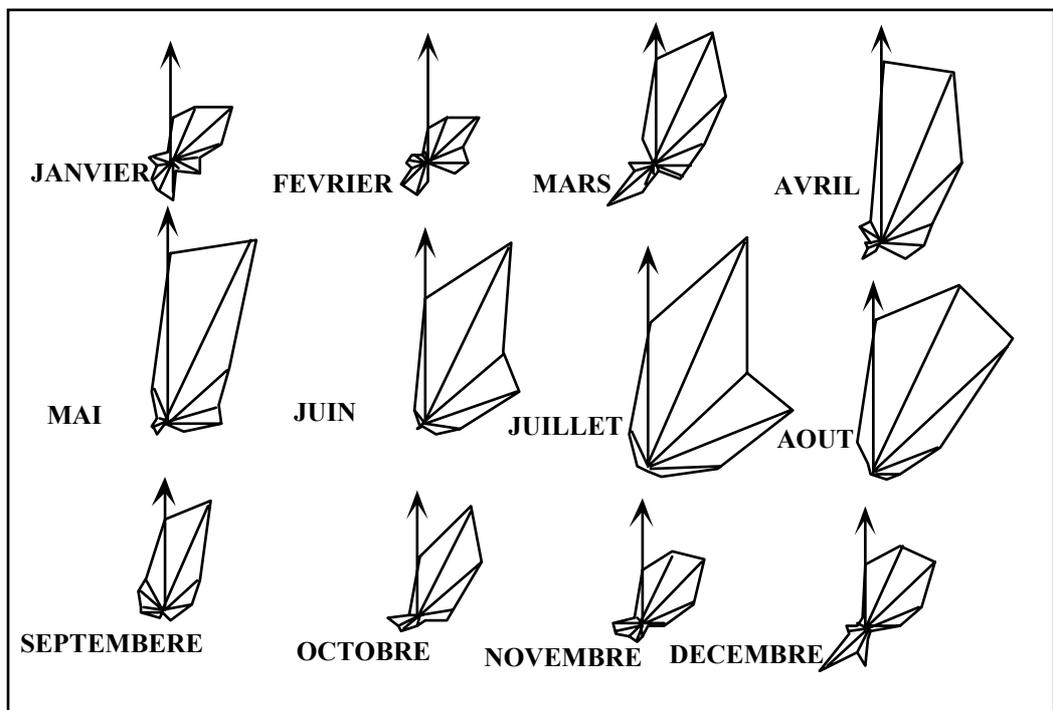


Figure I-8 : Principales directions des vents dans la zone de la lagune de Oualidia entre 1931 et 1961 (Carruesco, 1989)

La variation saisonnière des vents a été confortée par une étude pour la détermination du processus et structure de l'Upwelling estival des côtes marocaines (Atillah, 1994) ; cet auteur, en examinant la naissance, le développement et la dissipation de l'upwelling, et grâce à l'étroite liaison de ce dernier avec la direction des vents, nous présente encore une fois les relations établies par Weisrock (1987).

II-4 Classification climatique

La région de Sidi Moussa, est une zone où la pluviométrie est faible et l'évaporation élevée. Elle est classée en zone semi-aride (Martonne), appartient au type subhumide sec à semi aride (Thornthwaitte) au domaine semi aride à conditions subhumides sèches (Dubief), à l'étage semi aride (Emberger, 1964) et en sous zone sèche de la zone II maritime du Maroc (Bryssine, 1949).

Ce climat appartient bien au type méditerranéen tel qu'il a été défini par Emberger (1964). C'est-à-dire type de zone tempérée à pluviosité concentrée sur les mois froids ou relativement froids de l'année (de l'automne au printemps), alors que l'été est sec.

III- L'ENVIRONNEMENT CONTINENTAL ET MARIN

III-1 Environnement Continental

III-1-1. Cadre géologique de l'arrière pays lagunaire :

La lagune de Sidi Moussa et son bassin versant appartiennent à la grande unité structurale nommée Meseta Marocaine occidentale, et plus précisément aux plateaux et plaines des Doukkala-Abda. La Meseta occidentale comporte des séries sédimentaires du primaire (socle) jusqu'au Miocène sur lesquelles on trouve des dépôts transgressifs plio-quadernaires. Le profil des dunes impose au littoral une morphologie caractéristique faite de longues coupes parallèles à la côte, séparées par les sillons à fond plats s'allongeant en dépressions plus ou moins marécageuses. A l'Ouest, il constitue une barrière naturelle à l'écoulement des eaux superficielles issues des plaines des Doukkala, des Abda et du massif des Rehamna vers l'Océan (Figure I-9).

III-1-1. 1. Le Paléozoïque

Il forme au Nord de Bir Jdid, le substratum. Il est constitué de schistes acadiens ou ordoviciens et de quartzites auxquelles s'associent des grès attribués à l'Acadien et à l'Ordovicien (Lecointre et Gigout, 1950 ; Destombes et Jeannette, 1966). Entre les schistes et les quartzites vient s'insérer une série psammitique visible à El Hank à Casablanca. L'épaisseur de ces niveaux est d'environ 1000 m pour les schistes psammitiques et de 170 m pour les quartzites.

Dans la partie centrale de la chaîne, cette série est recoupée par des granites, des microgranites, des gabbros et des dolérites en forme de batholithes, et par filons minéralisés. Dans le massif des Rehamna (in. Combe et al., 1975), le Paléozoïque est essentiellement constitué par des formations sédimentaires fortement plissées au cours de l'orogénèse hercynienne. Le Paléozoïque affleure aussi dans la vallée de l'Oued Oum Er Rbia et dans les Jbilet occidentaux sous forme de schistes et de grès cambriens et très probablement aussi ordoviciens. A l'exception du pointement cambrien d'El Jadida, partout ailleurs, il est masqué par des dépôts postérieurs plus récents.

III-1-1. 2. Le Permo - Trias

Il affleure dans le massif des Rehamna et aussi dans les Chaouia et la plaine de Berrechid sur les bordures, notamment au Nord dans la vallée de l'Oued Mellah ; mais bien qu'il soit généralement masqué par des dépôts plus récents, le Trias constitue le substratum d'une partie importante de la plaine de Berrechid. Il est rencontré sous son faciès assez habituel d'argiles pélitiques et de grès rouges de conglomérats et de coulées basaltiques (basaltes et dolérites) ; par ailleurs, on note fréquemment la présence de niveaux gypsifères importants. Dans la vallée de l'Oued Oum Er Bia (entre Talmest et Sidi Saïd Mâachou). Il est représenté par des dépôts d'argiles et pélites rouges avec des coulées basaltiques. A M'Tal, ces formations sont associées à des conglomérats rouges carbonifères.

Le socle primaire plissé par l'orogénèse hercynienne est constitué d'une lithologie très variée (grès, quartzites, schistes, calcaires, rhyolites et dolomies) appartenant au Cambrien, Ordovicien, Silurien et au Dévonien. Les terrains secondaires sont caractérisés par de faibles épaisseurs (placage discontinu d'argiles) et par un basalte très altéré du Trias.

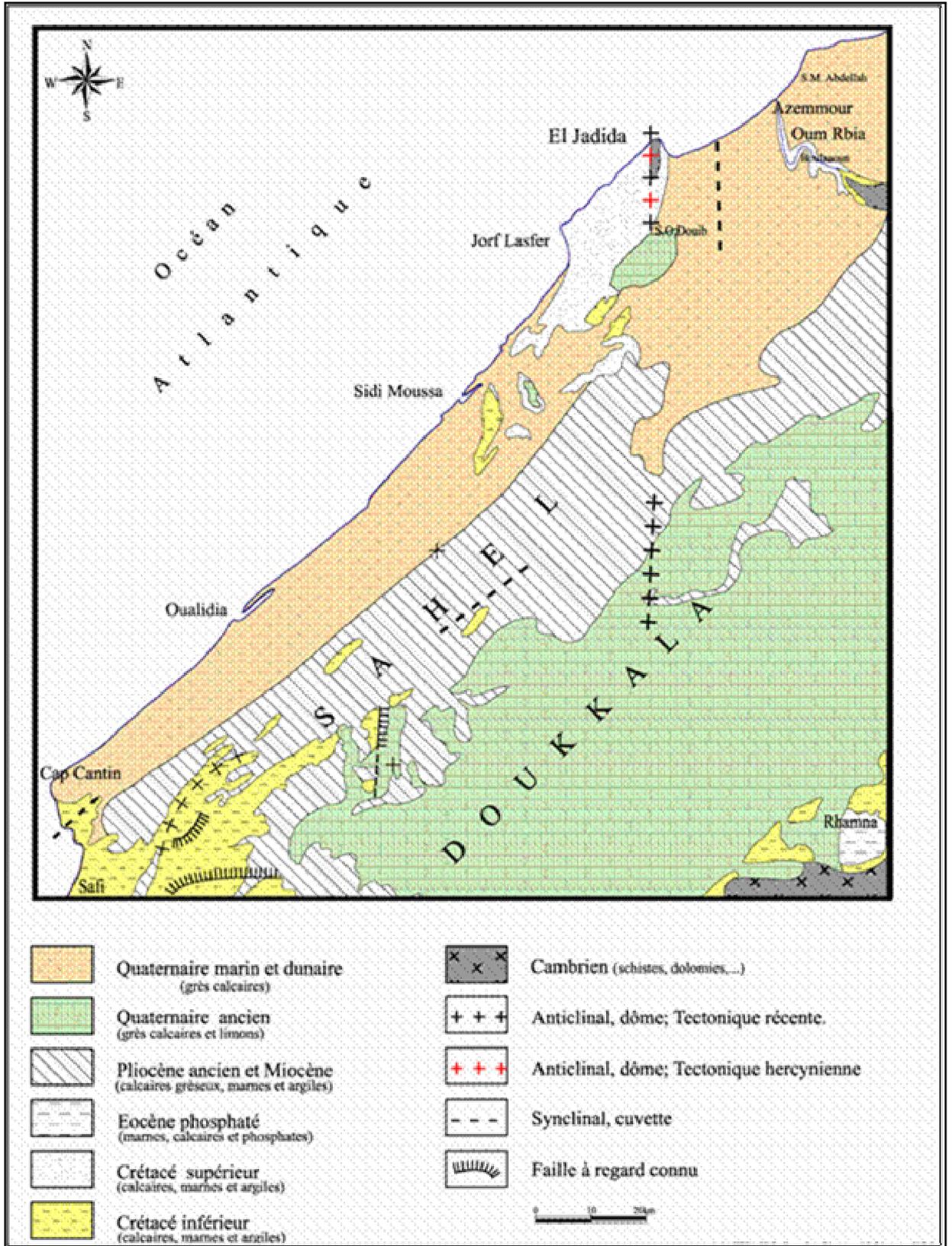


Figure I-9 : Carte Géologique simplifiée de la région étudiée (d'après la carte géologique du Maroc au 1/1000000)

III-1-1. 3. Le Jurassique :

Il n'est présent qu'au Sud des Doukkala, il constitue les collines des Mouissate. On le retrouve sous le Pliocène en affleurement dispersé dans la région de Tlète Sidi Embarek et de Jemâa Shim. Il forme aussi la base des falaises qui s'étendent jusqu'au Nord de Safi. Seul le Jurassique supérieur est représenté. Ses dépôts sont constitués des calcaires et des marno-calcaires jaunâtres à lits argileux contenant de nombreux bancs de gypse (in. Ferré et Ruhard, 1975).

III-1-1. 4. Le Crétacé :

Il est extrêmement important dans les Doukkala-Abda et constitue le substratum presque continu de terrains plio-quadernaires (Figure I-10). Le Cénomaniens, composé de marnes calcaires et de grès, s'étale sur toute la région entre le Cap d'El Jadida et l'embouchure de l'Oued d'Oum Rbia. Ces terrains secondaires, sont ondulés en plis très larges, courts, sans direction privilégiée. Ils sont aussi corrodés par l'érosion karstique. Il affleure également dans la zone limitrophe du plateau des phosphates. Dans les Doukkala-Abda, la puissance totale peut être estimée à 100 m ou 200 m et témoigne d'une légère subsidence.

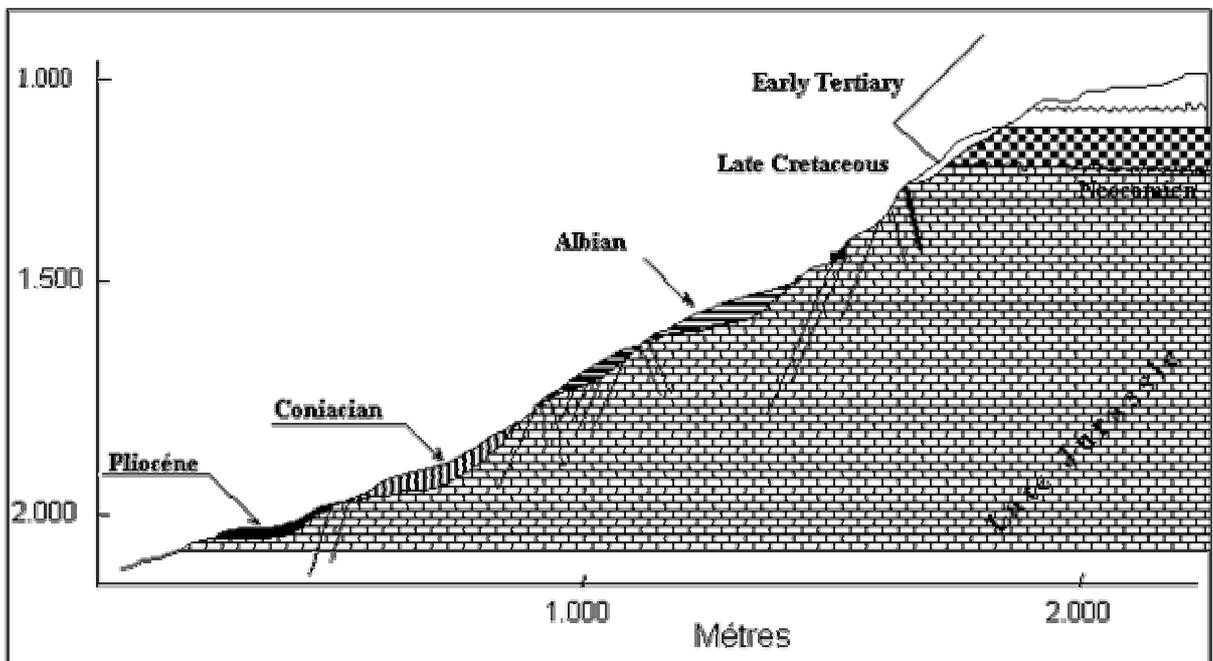


Figure I-10 : Coupe lithostratigraphiques synthétiques de l'escarpement d'El Jadida (Cymaz, 1984)

III-1-1. 5. L'Eocène :

Les terrains éocènes, célèbres par leurs gisements de phosphate sont très bien représentés dans le plateau des Gantour, ils n'intéressent la région étudiée que sous forme de quelques témoins conservés en bordure du massif des Rehamna.

III-1-1. 6. Le Miocène

Le Miocène affleure particulièrement au Cap d'El Jadida et n'est conservé que dans des cuvettes indépendantes du tracé actuel du trait de côte. De manière générale, il est très érodé et est constitué de marne jaune, de sable et parfois des argiles rouges ou brunes avec une base un peu conglomératique.

III-1-1. 7. Le Pliocène :

Le Pliocène est formé par des calcaires gréseux. Ces sédiments marins consolidés, qui ont été repris en dunes, constituent la partie interne de la région, communément, appelée le Sahel. A l'occasion de recherches d'eau plusieurs forages (Combe, 1975) ont traversé des formations plioquaternaires, des formations crétacées et jurassiques (Figure I-11). Lors de la régression pliocène, se sont édifiées des dunes côtières qui constituent la partie Est du Sahel ; leurs crêtes émergent encore des "limons" au Nord d'une ligne Tnine Rharbia, Khémis-M'Tal, Boulaouane.

Pendant le Pliocène ancien, la mer était transgressive sur presque toute la bordure Atlantique du Maroc. Le relief était en faible pente vers l'Ouest et la mer s'étalait sur toute la surface de la Meseta côtière. Au moment de la transgression, le littoral était parallèle au rivage actuel à une distance moyenne de 60 km. A cette période, l'Oued d'Oum Rbia déversait ses apports à Bou Laouane. Une phase orogénique induisant, avec le recul de la mer, déformait la Meseta. D'après Gigout (1942), pendant le Pliocène supérieur (Villafranchien inférieur), le recul de la mer fut progressif. Il était marqué par une très importante activité des agents érosifs. Les dépôts dunaires pliocènes étaient constitués de sables calcaires riches en fragments de coquilles triturées, souvent consolidés aujourd'hui.

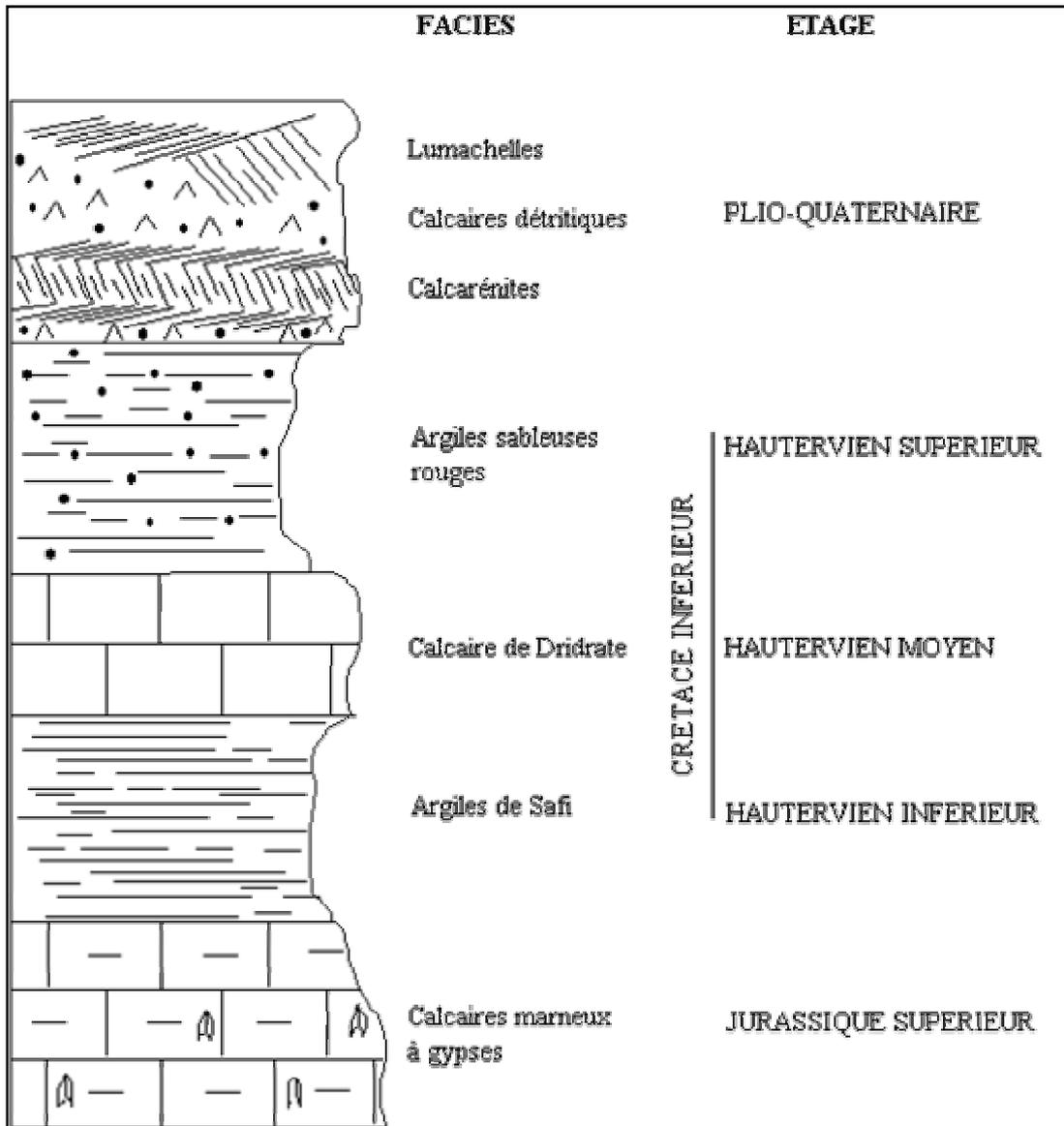


Figure I-11 : Log synthétique des principales formations géologiques de l'environnement de la lagune de Oualidia (Carruesco, 1989)

Récemment, Lefèvre (2000) a montré que les plus anciennes unités stratigraphiques associées aux plates-formes qui s'étagent au dessus de 100 m (NGM) dans la région de Casablanca appartiennent au Pliocène. Ces conclusions sont obtenues grâce aux données bio-stratigraphiques déduites de l'étude des faunes dans cette région datées autour de 2,4 Ma.

De manière générale, le Pliocène est considéré, sur toute la partie occidentale marocaine, comme un cycle sédimentaire simple. La transgression est accompagnée d'un conglomérat de base peu important. En revanche, la phase de régression est marquée par l'édification de dunes littorales et par l'apport des limons et des alluvions.

III-1-1. 8. Le Quaternaire :

Les changements climatiques qui ont marqué le Quaternaire ont provoqué des variations de l'extension des calottes glaciaires et des lignes de rivage. Ces variations peuvent être liées aussi à l'exhaussement de la Meseta côtière qui a fait reculer considérablement le rivage pendant la période post-Moghrébinne. Cela peut expliquer pourquoi le jeu des transgressions et régressions quaternaires n'a pas pu avoir lieu plus à l'Est par rapport à la côte de la mer Moghrébienne (Choubert et Ambrouggi, 1943).

Plusieurs auteurs (Ruhlmann, 1936 ; Baudet 1967 ; Bourcart 1948 ; Neuville et Biberson, 1961 ; Choubert et al, 1953 ; Saidi, 1979, Aboumaria, 1993 et Ouadia 1998) ont étudiés les formations quaternaires de la Meseta côtière du Maroc.

Baudet (1967) a proposé une échelle stratigraphique du littoral marocain (Tableau. I-3). Les différents "étages" quaternaires définis au Maroc n'ont pas partout la même signification (Texier et al. 1985). La définition de ces étages est basée sur l'alternance de phases climatiques humides (pluviaux) et sèches (interpluviaux). Elles correspondent aux glaciations et aux interglaciations d'Europe. Ces concepts climatiques sont imprécis et leurs paramètres sont mal définis (Tableau I-4). Ainsi le Quaternaire marin est subdivisé en six étages correspondant à six transgressions sur la frange littorale de l'Atlantique. Chaque épisode a raviné le précédent, déjà consolidé (Figure I-12). Ces séries de transgressions/régressions correspondent à des étages définis par les auteurs plus au moins corrélés aux étages méditerranéens associant des dépôts marins et des dunes.

Tableau I- 3 : La stratigraphie marine du littoral atlantique marocain (Beudet, 1967)

ETAGES	Altitudes atteintes par les transgressions	Faunes Malacologiques		Datations absolues (C14)
		Espèces caractéristiques	Signification	
Mellahien	+ 2m	<i>Cardium edule</i> Patelles	Faune actuelle	4010 130 av. J.C
Régression				
Ouljien	+ 5 – 8 m	<i>Purpura haemastomosa</i> <i>Patella safiana</i>	Faune actuelle + quelques éléments (Sénégalien)	
Régression				
Rabatien-Harounien	+18 – 20 m	<i>Purpura haemastomosa</i> <i>Patella safiana</i>	Faune actuelle + quelques éléments (Sénégalien)	
Régression				
Anfatien	+ 30 m	<i>Trochatella trochiformis</i> <i>Purpura haemastoma</i> <i>Patella safiana</i>	Faune chaude avec quelques éléments (Sénégalien)	
Régression		<i>Purpura plessisi L</i>	Faune en voie de refroidissement	
		???		
		<i>Littorina litorea</i> <i>Purpura lapillus</i>	Faune froide	
Maarifien	+ 50 – 60 m	<i>Trochatella trochiformis</i> <i>Acanthina crassilabrum</i>	Faune chaude (Chilo-péruvienne) où (Sénégalienne)	
Régression				
Messaoudien	+ 90 – 100 m	<i>Trochatella trochiformis</i> <i>Acanthina crassilabrum</i>	Faune chaude (Chilo-péruvienne) où (Sénégalienne)	

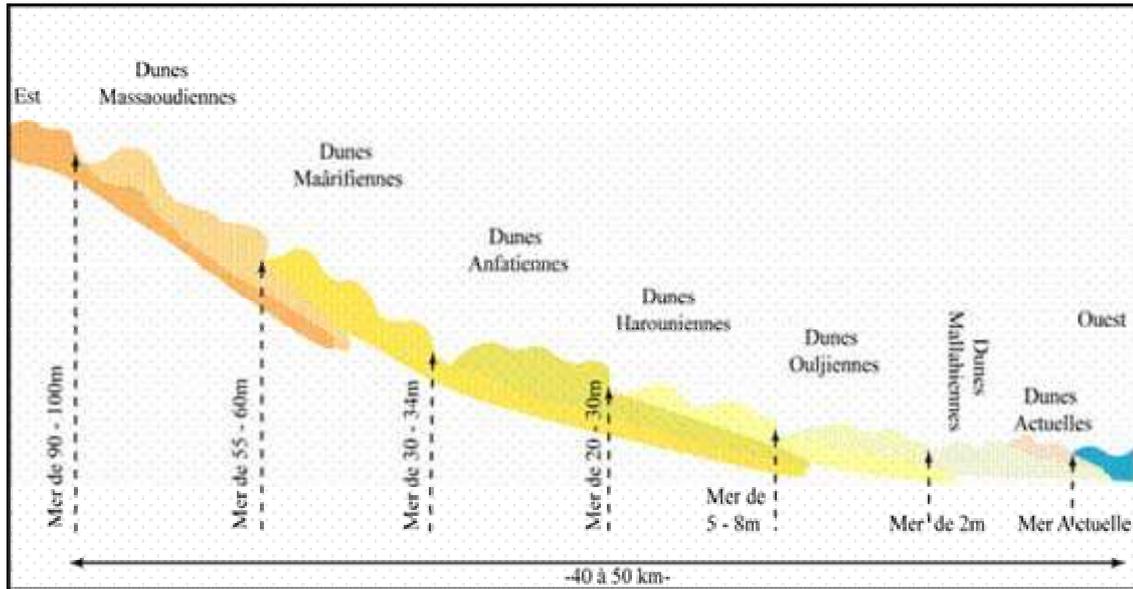


Figure I-12 : Coupe théorique schématisant les différents niveaux marins relatifs et les dunes Quaternaires (*in.* Chaïbi, 2003)

- *Moghrébien inférieur/Messaoudien* : La transgression Moghrébienne atlantique est localisée sur plusieurs zones de la frange littorale marocaine avec une altitude maximale de 100 m. Elle représente la première transgression quaternaire décrite sur le littoral Atlantique. Les dépôts de cette transgression ressemblent à ceux du Pliocène.

- *Maârifien*: Les dépôts laissés par la transgression maârifienne sont localisés à une altitude de 44 m. Cette formation est constituée de lumachelles et d'un conglomérat, surmontés par de grès de plage et de grès dunaires. Cette phase a été caractérisée par un léger refroidissement qui a favorisé l'invasion d'une faune nordique et la disparition d'autres espèces de mer chaude.

- *Anfatién*: Ce troisième niveau marin a été reconnu à des altitudes voisines de 30 à 34 m. Les dépôts sont consistés en couches de lumachelles. La faune de cet étage indique trois niveaux. Un niveau inférieur (l'Anfatién transgressif) à faune de climat chaud (*Thais haemastoma* et *Patella safiana*) (Baudet, 1971) semblable à celle de l'étage maârifien régressif. Un niveau moyen exprimant un refroidissement des eaux océaniques et enfin un niveau supérieur à faune sub-actuelle qui témoigne d'un réchauffement. D'après Lefèvre (2000), il serait corrélatif du stade isotopique 11 (376 ± 34 ka). Il correspondrait au Paléotyrrhénien en Méditerranée (Brebion, 1978). Suivant le support sédimentaire, la chronologie de cet étage varie selon les auteurs.

Tableau I-4 : Nouvelles propositions chronostratigraphique pour le Quaternaire marocain (Texier, Raynal et Lefevre, 1985).

LITTORAL		CONTINENT				PALEO-CLIMATS	PREHISTOIRE					
CHRONOLOGIE		Géologie - Morphol.		CHRONOLOGIE		FRAIS CHAUD SEC HUMIDE						
GEOLOGIE MORPHOLOGIE		CASABLANCA MESETA		Pédologie Casablanca Meseta								
GEOLOGIE MORPHOLOGIE		CASABLANCA MESETA		Pédologie Casablanca Meseta								
PLEISTOCENE SUPERIEUR	HOL. Dunes, Dépôts d'estuaire, Dépôts de plage, Calcaires roses	Mellahien	Remblais superficiels locaux	All. limoneuses, crèusement	sols lessivés peu évolués	Rharbien	Néol.					
	Remplissage des grottes.	27-30000 BP	Déflation, Colluvions	sables beiges		III	Paléo sup					
	Dunes	Ouljien sup.	Colluvionnements	Erosion	Alluvions Fx, puis Glacis G1	sols lessivés peu évolués		II-III				
	Rivage, Formation de grottes	75000 BP				II		SOLTANEN				
	Dunes	100000 BP					I	I-II	MOUSTERIEN			
	Rivage, Crèusement de grottes.	Ouljien moyen					I					
	Complexe dunaire avec 2 (rivage local) sols bruns calc. intercalés loc.	Harounien du Nord 45000 BP	OULJEN INF.	Croûtes calc. pulv. et démant. des reliefs	Erosion	Gypcrete Glacis G2	Alluvions Fw2		INTER TENSIFTIEN SOLTANEN	ACHEULEEN		
	Rivage	Harounien du Sud 260000 BP							II = Présoltanien			
	Complexes dunaires.	Anfatien sup.		Cr. calc. pulv. et démant. des reliefs	Cr. litées, Dalle hélicoides	Colluvions	Calcrete Glacis G3	Alluvions Fw1				TENSIFTIEN I (s.s.)
	Rivages	Anfatien moyen										INTER AMIRIEN TENSIFTIEN
Eolinite grise.	Anfatien										Amirien II	
Rivage	Pulsation de Sidi Abderrahmane										I-II	
Complexe de calcarénites.	inférieur										Amirien I	
Rivage	Messaoudien sup.										Inter Moulouyen Amirien	
Dunes	Messaoudien inf.										II MOULOUYEN	
Rivage											I-II	
Dunes	>T =19MA										I MOULOUYEN	
Plioc. Form. deltaïques	<R =2,4 MA	MOGHREBIEN SUP.	Complexe dunaire								I MOULOUYEN	

-*Harounien*: Le Harounien a été défini comme l'étage compris entre l'Anfatien et l'Ouljien. Les dépôts de cet étage ont été entaillés par une falaise au Sud d'El Jadida à des hauteurs qui varient entre 20 et 30 m. La malacofaune est bien caractérisée, chaude, analogue à celle de l'Anfatien (*Thais haemastoma* et *Patella safiana*). Ce paléorivage serait corrélatif au stade isotopique 9 (303 ± 30 ka) (Raynal et al., 1986).

- *Ouljien*: Les restes de la transgression ouljienne, corrélatrice du stade isotopique 4, sont connus sur toute la côte Atlantique. C'est à Gigout (1949) que revient le mérite d'avoir défini pour la première fois cet étage marin du Pléistocène supérieur. Les formations de ce paléorivage se rencontrent le long de littoral Atlantique marocain entre les altitudes de 4 à 8 m. Cela fait dire à Brébion (1977) que l'Ouljien est l'étage le mieux représenté, après le Moghrebien, et le plus riche en fossiles de toute la série quaternaire. D'après Baudet (1971), les falaises ouljiennes sont souvent entaillées dans des dunes consolidées pouvant appartenir à la régression post-Anfatienne ou post-Harounienne. Il arrive que l'océan ouljien remanie toutes les formations harouniennes précédentes pour atteindre les falaises Harouniennes elles-mêmes. Tous ces éléments expliqueraient l'absence de dépôts harouniens dans plusieurs sites de l'Atlantique marocain. Les premières datations radiométriques effectuées par Stearns et Thurber (1964) par la méthode $\text{Th}^{230} / \text{U}^{234}$ apportent des âges qui s'échelonnent entre 80 000 et 74 000 an BP. Ainsi, la transgression Ouljienne prendrait place durant l'inter-glaciaire Riss-Würm. Les variations des niveaux marins pendant ce stade, ont été attribuées à la combinaison de ces trois facteurs (Gigout, 1946) : à l'oscillation climatique, à la régression d'ensemble et aux mouvements tectoniques. Plus récemment, d'autres datations faites par Hoang et al. (1978), avec la même méthode, ont permis d'individualiser trois sous-unités stratigraphiques Ouljiennes :

- *l'Ouljien 1* vers 140 000 et 120 000 BP. Cette phase transgressive est la plus puissante du cycle. Il est donc normal qu'elle soit responsable des remaniements de dépôts harouniens. Ces remaniements pendant cette première phase ouljienne expliquent la ressemblance entre les dépôts du Harounien et ceux de l'Ouljien I.

- *l'Ouljien 2*, ce dernier se compose de quatre épisodes de stabilisation de l'océan (97 000, 84 000 et 60 000 ans BP). Ces phases de transgression auront permis la constitution répétitive de cordons dunaires littoraux parallèles au trait de côte actuel.

- *l'Ouljien 3* entre 44 000 et 40 000 ans BP.

Brebion (1978) a montré que la faune est relativement proche de celle de l'actuel. Parmi les espèces de cet étage figurent *Purpura Haemastoma*, *Thais Haemastoma* et *Patella Safiana*. Le climat a connu un réchauffement par rapport au Harounien.

Les dunes consolidées du Quaternaire constituent des grands alignements de crêtes et des sillons parallèles ou sub-parallèles au rivage actuel. La direction et l'élargissement de ces alignements ne sont pas toujours les mêmes et varient sur toute la Meseta côtière. En partant de l'intérieur vers la côte on rencontre ainsi des cordons dunaires successifs de plus en plus récents. Le sable des dunes est très calcaire, à grain fin (mélange de quartz et de fragments de coquilles), le plus souvent consolidé en grès calcaire vacuolaire jaune. Ce stock dunaire n'est pas utilisé actuellement par le littoral sauf au Nord de la zone d'étude (entre El Jadida et Jorf Lasfer). Ces édifices dunaires sont, la plupart du temps, entrecoupés par des paléosols rouges remaniés ou in situ (Figure I-13). Trois niveaux marins ont pu être repérés. Ils sont respectivement, du plus ancien au plus récent, M1, M2 et M3.

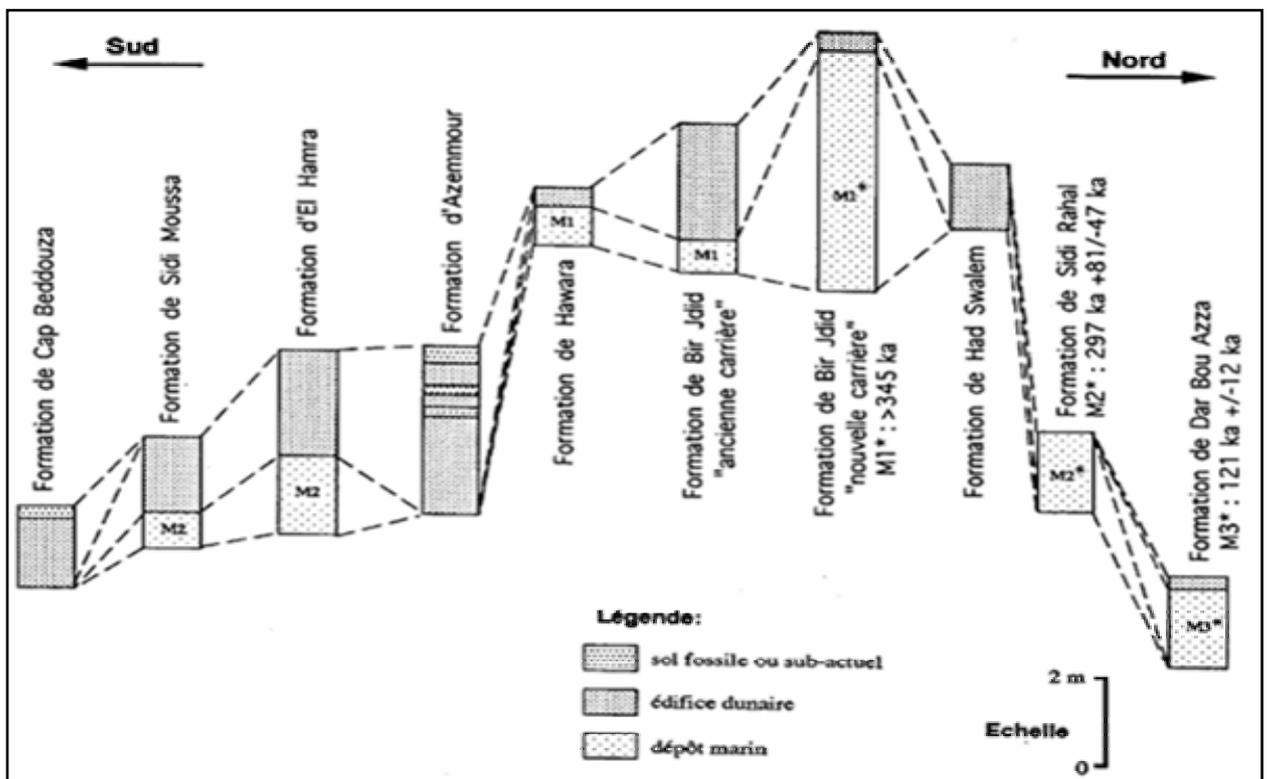


Figure I-13 : Corrélation entre les principales coupes de la zone littorale de la Meseta occidentale (Ouadia, 1998)

Ouadia, (1998), pour cette bande littorale, a montré que ce sont surtout les dynamiques, marine littorale et éolienne qui jouent le rôle principal dans la mise en place des formations quaternaires. Au niveau des embouchures, la dynamique fluviale peut s'ajouter. La mise en place des dépôts lumachelliques a fait appel à une dynamique essentiellement marine littorale, témoignée de l'abondance des bioclastes marins, du bon tri des sédiments et de l'abondance des grains de quartz émoussés luisants. La fréquence des coquilles marines brisées et la présence de stratification plane à légèrement oblique vers la mer témoignent d'une dynamique de dépôt moyenne à forte et par conséquent d'un milieu relativement peu profond (intertidal ou "fore shore").

Le dépôt des calcarénites a eu lieu sous l'action d'une dynamique essentiellement éolienne témoignée de l'abondance des grains de quartz ronds mats, qui a remobilisé les sables de plage et par les grandes stratifications obliques. La séquence de toutes les formations littorales étudiées montre le passage de dépôts de milieu marin intertidal "fore shore" aux dépôts éoliens de l'arrière-plage "back shore" ou milieu dunaire. Les mêmes constatations ont été faites sur les formations quaternaires littorales du Rharb (Aberkan, 1989) et de Casablanca (Texier et al., 1994). La plupart du temps, ces dépôts dunaires sont surmontés par des paléosols ou des sols, parfois, affectés par une activité anthropique.

Quant au degré de classement, relativement accusé, des sédiments des formations littorales, il est en relation avec le degré de maturité des dépôts. Le bon tri relatif des sédiments des édifices dunaires. Vis à vis celui des sédiments des niveaux lumachelliques, est en relation avec une dynamique éolienne.

Il faut noter également que de l'Ouest vers l'Est de la région étudiée la dynamique éolienne tend à l'emporter sur la dynamique marine littorale. Ce que témoigne la tendance à l'enrichissement des sédiments en grains de quartz ronds mats et à la diminution de la proportion des bioclastes marins et pourrait aussi provenir des traces de chocs et de la diagenèse (dissolution dans les calcarénites). Au cours de leur mise en place, en plus des formations pliocènes, les formations quaternaires ont été affectées par une néotectonique qui pourrait être une continuité des mouvements anté-quaternaires (hercyniens et atlasiques) (Aboumaria, 1993) (Tableau I-5).

Tableau I-5 : Tableau récapitulatif résumant les données chronologiques, néotectoniques et paléoclimatiques plioquaternaires de la Meseta occidentale (Ouadia, 1998)

Age B.P.	Chronologie	Formations littorales	Formations fluviales	Depôt de comblement des plaines	Tectonique	Datation relatives et absolues	Climat
10 Ka	HOLOCENE	Cacarenite dunaire	T0 creusement T1 Creusement T2	Coluvions récentes ou "limon" des plaines			Sec?
	0,48 Ma	PELISTOCENE SUPERIEUR	Biocalcarenite marine ?	Creusement		Failles normales et inverses	
Calcarenite dunaire			T3 début de creusement des vallées secondaires T4	Coluvions anciennes des plaines			Sec avec au moins 4 phases humides
Biocalcarenite marine		Creusement		121 ka ± 12 ka	Temp. hum.		
Calcarenite dunaire		T5	?	Failles normales et inverses	Sec avec au moins 1 phase humide		
0,88 Ma	PELISTOCENE MOYEN	Biocalcarenite marine	Creusement			297 ka ± 81-47 ka	Temp. hum.
		Calcarenite dunaire	T6			Sec avec au moins 1 phase humide	
		Biocalcarenite marine	Creusement			> 345 ka	Temp. hum.
		calcarenites dunaires				Sec avec au moins 1 phase humide	
1,9 Ma	PELISTOCENE INFÉRIEUR	Biocalcarenite marine?	Creusement				Temp. hum.
	PLIOCENE SUPERIEUR	Calcarenites dunaires	Terrasse fluvio-marine pliocène		Inclinaison et failles normales et inverses		Sec avec au moins 1 phase humide
		Biocalcarenite marine	début de creusement de la vallée de l'Oum Er Rbia		inclinaison et failles normales et inverses		Temp. hum.

Cette activité néotectonique est comparable à celle signalée dans d'autres zones du littoral de la façade atlantique marocaine (Aberkan, 1989 et Ouadia, 1998). Ce qui nous laisse conclure que le domaine mesetien occidental du Maroc, dont fait partie la région étudiée, n'a donc pas été une zone stable au cours du Quaternaire comme cela a été avancé dans les travaux antérieurs (Gigout, 1951).

Les formations géologiques qui affleurent dans la zone lagunaire et dans l'arrière pays sont d'âge plioquaternaire. Elles sont constituées principalement de calcaires détritiques jaunes, formés de débris coquilliers et de sables identiques à ceux rencontrés dans la lagune de Oualidia (Carruesco, 1989).

La série des transgressions/régressions se termine par la transgression mellahienne (Raynal et al., 1986). Cette dernière a dépassé de 2 m d'altitude le niveau actuel, comblant partiellement les lagunes de sables et de grès coquilliers. Elle a laissé deux types de dépôts ; les remblaiements des plaines côtières et les plages littorales faites de sables coquilliers jaunes, vases, cordons de galets.... Les dépôts de cette transgression varient en fonction du dispositif morphologique de chaque zone. Le dépôt des sables gris (les dunes) et leur évolution pédogénétique peuvent être attribués à une légère régression antérieure à l'exhaussement subactuel du niveau marin, provoquant ainsi l'épandage de sables coquilliers.

D'après Raynal et al. (1986), la remontée du niveau marin qui s'amorce vers 14 000 BP caractérise le début de ce cycle et sa première remontée s'achève vers 6400 BP. Les dépôts intertidaux dans la formation de Reddad Ben Ali, sur le littoral de Casablanca, ont enregistré le haut niveau marin de l'Holocène récent de 3700 – 3400 BP. Ce résultat est basé sur des analyses au C¹⁴ (Lefèvre, 1994). La faune de ce stade est identique à la faune actuelle. Cet étage est caractérisé aussi par la migration de quelques espèces vers le Sud et par la disparition définitive d'autres espèces. Cette transgression mellahienne correspond au stade isotopique 1 (Brébion, 1979), c'est l'équivalent du Versilien en Méditerranée.

Des traces d'une activité anthropique ont été repérées dans la région étudiée. C'est à Dar Bou Azza, à Khénzira et à Oualidia qu'une activité anthropique est témoignée par la présence d'un niveau à "Kjôkkenmôddings", d'âge 4680± 140 ans BP, dans la région d'Oualidia par Carruesco, (1989), ce niveau est riche en charbon de bois et avec un taux élevé de matière organique (4,5 %), ce sont des accumulations noires

avec des coquilles brisées, souvent associées à des pierres noircies et à des débris de poterie. Ce niveau, est attribuée au Néolithique et a été trouvée en relation avec le mellahien, (Gigout et Beudet, 1969). Ces "Kjökkenmöddings" font la succession au niveau des dunes côtières de la lagune de Sidi Moussa.

En résumé les faits marquants de l'environnement de la lagune de Sidi Moussa, est l'homogénéité de la composition des différents formations de l'encaissant lagunaire à savoir du matériel détritique, des bioclastes, des débris biogéniques d'origine marine et continentale (gastéropodes pulmonés) le tout consolidé par un ciment calcaire.

III-1-2. Pédologie des formations encaissantes :

La lithologie des formations plioquaternaires est variable avec des faciès imbriqués: calcaires gréseux, calcaires détritiques, marnes schisteuses. Les lapiazs sont abondants sur les crêtes dunaires dénudées par l'érosion et les dolines alignées ou en grappes sont nombreuses.

Ces formations donnent un relief vallonné avec des ondulations plus ou moins larges et de vastes dépressions. Les pentes sont faibles à moyennes. L'érosion hydrique reste faible. La pierrosité de surface est un facteur limitant d'érosion et seules les pluies violents peuvent provoquer une érosion par ravinement ou favoriser l'apparition de griffes d'érosion sur les sols nus dans les terrains cultivés. L'érosion éolienne, quand à elle, est beaucoup plus importante, du fait de la texture très légère du sol en surface alliée au surpâturage. La végétation naturelle est extrêmement dégradée et ne subsiste que par des îlots, elle est a base d'oléolentisque. La strate herbacée, est représentée par des graminées (*Lolium rigidum*, *Bromus rigidus*, *poa annua*) des légumineuses (*Lotus marocamus*, *Medicago lacinata* et *Sulfruticosa*, *Trifolium campestre*, *Vicia sativa*), des ombellifères. La zone du sahel est connue par une agriculture extensive à la base de céréales

Au cours des divers périodes pluviales et interpluviales du quaternaire, une couverture végétale s'est développée aboutissant au développement de sols isohumique. Ces sols renferment des accumulations calcaires, dont l'épaisseur dépend de l'âge et de la nature des dépôts, de la forme du relief ancien, de la position géomorphologique, des apports et des érosions successives.

Les sols du Sahel des Doukkala, sont squelettiques et peu profonds, sont généralement sableux ou sableux limoneux; les versant et les sommet dunaires sont recouverts de sols squelettiques alors que les dépressions et les bas fonds renferment des sols plus épais (Badraoui et al., 1993).

Selon Carruesco (1989), quatre groupes de sols peuvent être distingués :

- les sols R'mel ou peu évolués d'apports très sableux ;
- les sols Hrach sols calcaires caillouteux ;
- les sols Hamri rouge ou fersiallitiques occupent les dunes consolidées de l'arrière pays. La roche mère est une calcarénite peu consolidée. Ces sols sont caractérisés par l'absence des carbonates des horizons supérieurs et par accumulation de fer et d'argile en profondeur ; le sol se repose sans transition sur une calcarénite dure et lapiazée.
- les sols Tirs ou vertisols.

Pour la lagune de Sidi Moussa, les sols de « *merja* », localisés dans la dépression interdunaire de part et d'autre de la lagune au sud et au nord, sont des sols gris souvent noirs avec parfois des taches de rouilles de pseudo- gley, en profondeur. Par contre les sols environnants de la lagune sont constitués en grande partie de sols rouges méditerranéens sur les dunes consolidées orientales. Sur les formations littoral du cordon dunaire se développe à des sols pauvres de type rendzine.

II-2 L'environnement marin

Le proche plateau continental de la lagune de Sidi Moussa s'étend entre 0 et 200 m de profondeur avec une largeur qui varie de 34 à 44 km. Il est caractérisé par une pente faible (0,4 %) et une topographie peu accidentée. Sur toute sa surface, une couche de dépôts silto-sableux récents non consolidés de 10 m d'épaisseur s'est déposée. D'après Tooms et al. (1971) et Bee (1973) in Ruellan (1984) sous ces dépôts, on trouve une couverture sédimentaire monoclinale sous-jacente, d'âge Crétacé et Tertiaire.

Jaaidi et Cirac (1987) distinguent trois types de faciès : les sables terrigènes, les vases et les sables bioclastiques. Les dépressions entre les affleurements rocheux sont occupées par des sédiments fins, ce sont des sables biogènes vaseux constitués de débris coralliens et coquilliers, de foraminifères actuels dominants, tandis que le quartz et le feldspath sont les éléments terrigènes (Mathieu, 1986).

La couverture sédimentaire du proche plateau se compose principalement de trois types de faciès (Figure I-14) :

Des sables moyens et grossiers bioclastiques : les sables terrigènes occupent presque toute la zone pré-littorale jusqu'à -50 m, sont constitués de quartz, de micas et de fragments de calcarénites. La texture des sables dans l'ensemble est assez homogène, semblable à celle reconnue sur le continent (Cirac et al.1979).

Les sables bioclastiques sont formés par des débris de diverses macrofaunes et sont caractérisés par un taux de carbonates supérieur à 70 %. Ces sables prédominent sur toute la partie externe du plateau continental, où ils correspondent aux littoraux des maximums régressifs pléistocènes.

Des sables fins : Disposés en lambeaux plus ou moins parallèles au rivage actuel.

Des vases sableuses : commencent à s'étendre à partir de la profondeur de -50 m. Elles sont appelées «vase médiane» du fait que les faciès plus grossiers en vase sableuse, en sable vaseux et en sable fin, l'auréolent en bandes de part et d'autre.

Elles sont caractérisées par des fortes teneurs en lutites (70 %) et de 10 à 30 % de carbonates. Ces vases sont conservées localement dans des dépressions entre les affleurements rocheux.

Les sédiments superficiels du proche plateau continental pourraient constituer des sources sédimentaires pour la côte, surtout dans la zone d'échange entre les hauts-fonds pré-littoraux et les plages.

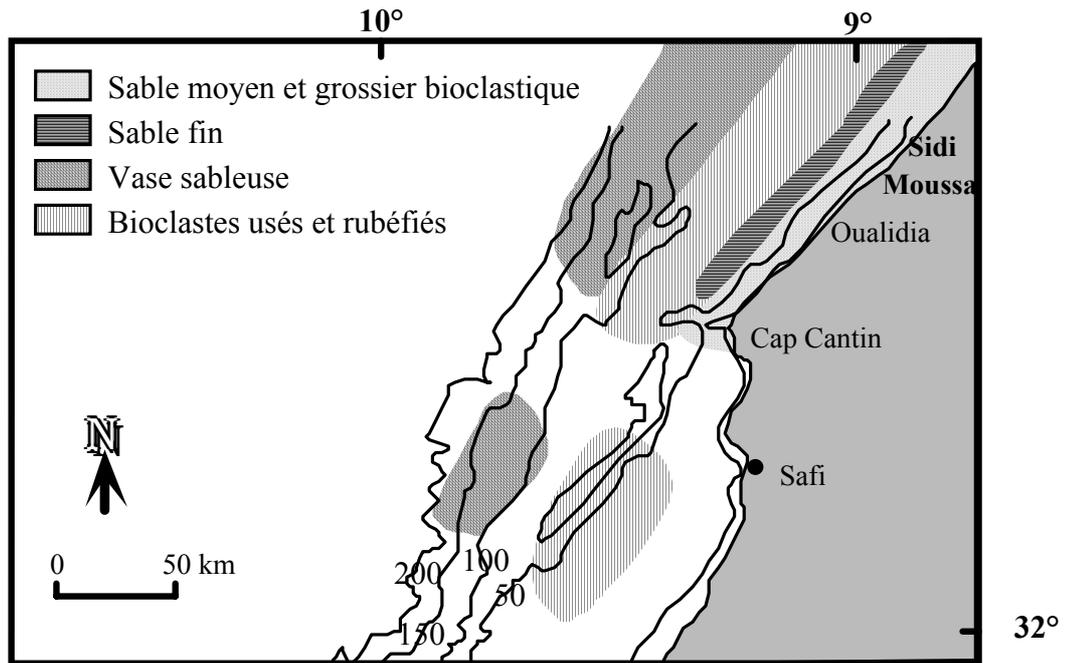


Figure I-14 : Couverture sédimentaire sur le plateau continental au large de la lagune du Sidi Moussa (Cirac et al., 1979)

La topographie du proche plateau de Sidi Moussa est donc essentiellement héritée des variations eustatiques du niveau marin qui ont façonné une large plate-forme continentale au cours des périodes de bas niveau marin. La marge continentale atlantique du Nord Ouest du Maroc constitue le symétrique africain de la marge ibérique du golfe de Cadix. Elle est le siège d'interactions de plusieurs phénomènes aéro et hydrodynamiques (houles, courants, vents,...) qui participent à différents degrés à la morphogenèse de notre littoral. Cette partie des fonds marins marocains a fait l'objet de plusieurs études géologiques, bathymétriques et sismiques. Le segment de notre région d'étude (entre 33° et 34° latitude Nord) fait partie des quatre segments qui composent la marge continentale marocaine : le segment du Rharb, le segment d'Agadir - Essaouira et le segment de Tarfaya. Physiographiquement, en allant de la Meseta marocaine (ESE) vers la plaine Abyssale (WNW), les fonds de la marge Atlantique d'El Jadida nous offrent une diversité de configuration. On peut distinguer quatre sous-ensembles : le plateau continental, la pente continentale, le glacis et la plaine abyssale (Fig. I-15 et Fig. I-16).

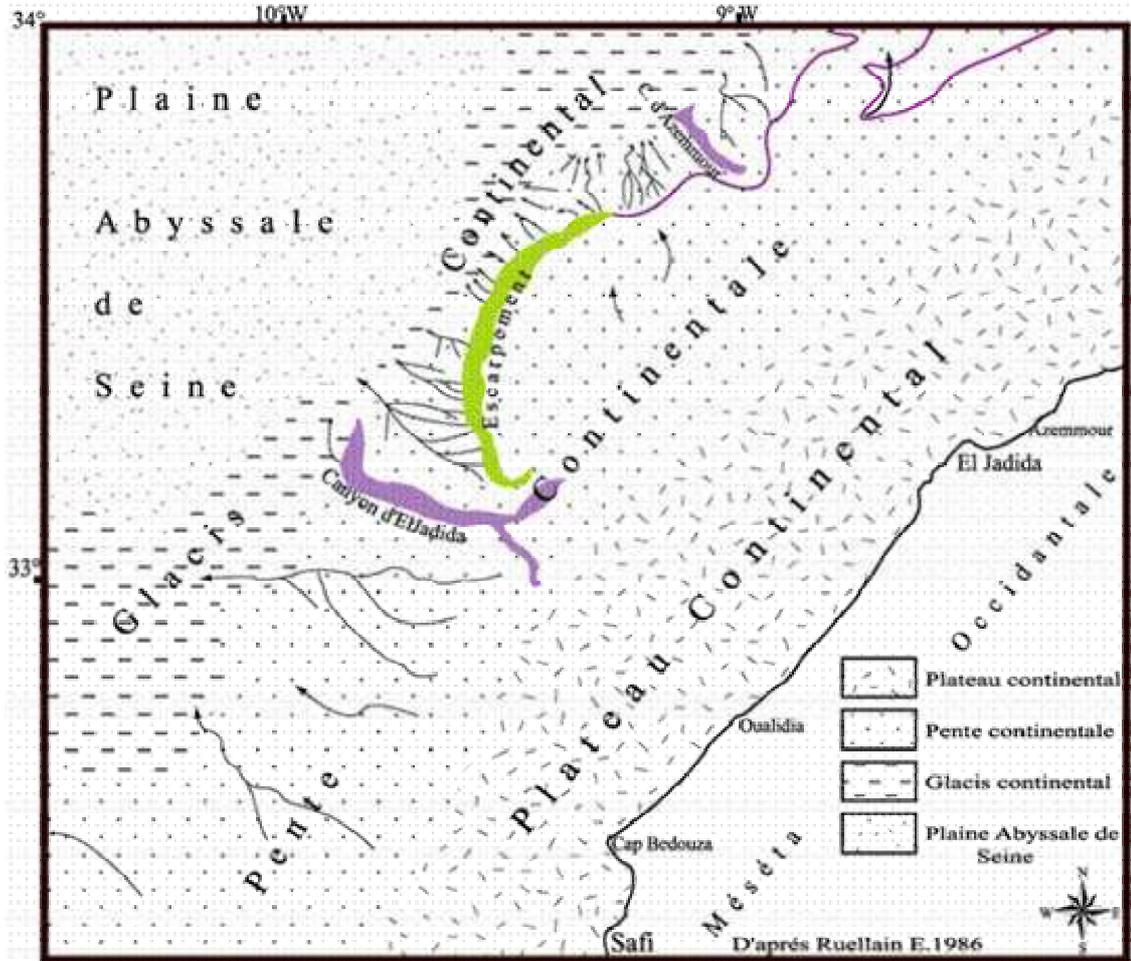


Figure I-15 : Morphologie de la marge continentale dans le segment de Safi - El Jadida (d'après Ruellain, 1986)

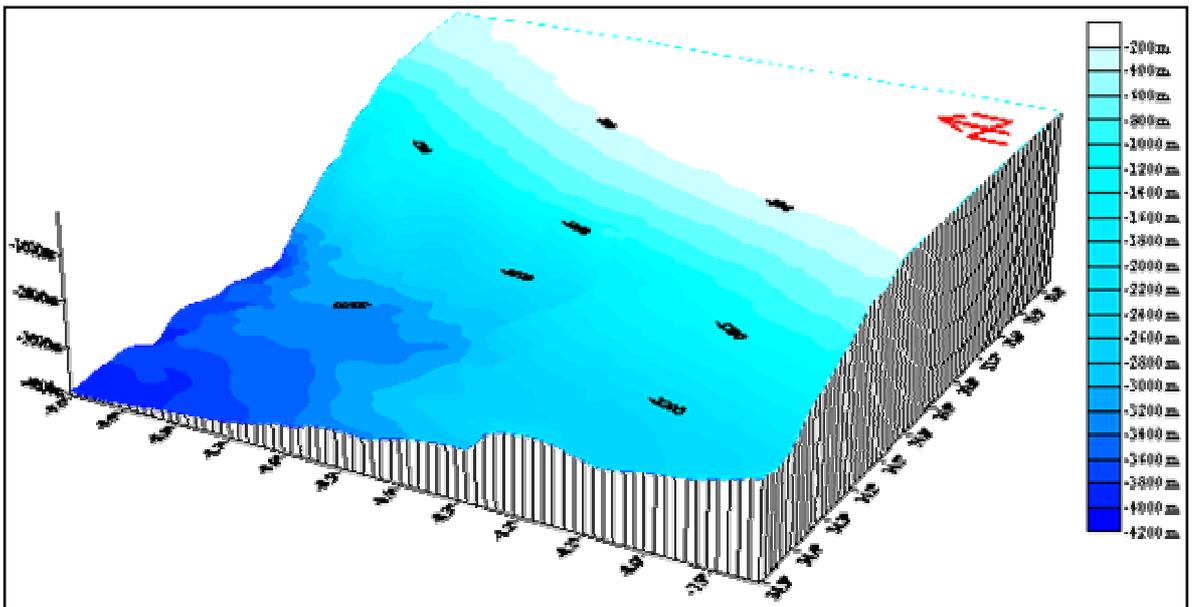


Figure 1-16 : Modèle numérique présentant la pente continentale de Safi - El Jadida (Chaibi, 2003)

IV- L'ENVIRONNEMENT LAGUNAIRE

IV-1 Morphologie lagunaire

IV-1-1. Cadre général

Du côté continental la lagune est dominée par de puissantes formations plioquaternaires de calcarénites définies précédemment. Les crêtes et les dépressions interdunaires de l'arrière pays ont une direction générale NE- SW. La mise en place de ces cordons dunaires anciens a été favorisée par des alizés NE plus puissants qu'actuellement sur les côtes marocaines (Weistrock, 1982).

Les observations faites sur des dunes vives de la lagune de Oualidia (Carruesco, 1989) ont permis de constater que ces dunes ont la forme de barkhanes qui se disposent en chapelet sous la dépendance de vent dominant NNE. La mise en place de ces systèmes côtiers de type « Seif dunes » est due probablement à des forces éoliennes plus puissantes et de direction voisine aux vents d'actuel (Glennie, 1970). Du côté de prisme littoral adjacent à la lagune, des coupes sériées de la topographie sous marine rendent compte de ruptures de pentes à -50m et -90m attribuées à la marque de paléorivage, témoins du stationnement de la mer lors de sa remontée au Flandrien (El Foughali, 1982). La pente moyenne du plateau est de 5 ‰. Elle subit des variations, 10 ‰ jusqu'à -50m, 8 ‰ jusqu'à -80m et faibles à nulles sur près de 10 km de -80 à -90m.

La bathymétrie reflète une morphologie tourmentée et découpée avec des escarpement et des buttes témoins qui résultent de la quasi permanence des affleurements rocheux, en particulier ceux présents depuis la côte 0 jusqu'à -50m témoignage de la continuité des formations littorales sur le proche plateau.

IV-1-2. La lagune proprement dite

L'étude morphologique a été réalisée par photo-interprétation des images aéroportées de la lagune au cours de la mission organisée en Avril 1996 (1/7500).

L'analyse des photo-interprétations, montre que la forme actuelle de cette lagune a été imposée par la morphologie de la dépression interdunaire entre les dunes consolidées continentales et littorales. Cela se traduit par une forme allongée qui s'inscrit dans une bande rectiligne parallèle à la côte de 5,5 Km de long sur une largeur de 0,5 Km en moyenne. La superficie totale de la lagune est évaluée à 4,2 Km². Quatre unités morphologiques peuvent être distinguées dans la lagune:

IV-1-2-1. Les passes

Deux passes inégales existent à l'extrémité aval de la lagune. La passe principale au Sud, (150 à 200m environ de large) est permanente alors que la passe secondaire située un peu vers le Nord de la passe principale (50m de large) est temporaire.

A l'arrière de la passe principale, une vaste cuvette peu profonde est remplie d'eau à chaque marée. A basse mer, un important banc de sable (delta interne de marée) émerge ne laissant que quelques chenaux peu profonds (de 0,5 m à 1,5 m). Ces derniers ont des tracés en constance évolution. En effet, en 1946, le delta interne de marée se retrouve vers le Nord (Figure I-17), laissant le chenal principal qui se propage au niveau du Schorre. Ce delta de marée se présente sous formes de lobes successifs. Il s'agit d'accumulations sableuses progradantes avec des figures sédimentaires (*ripples marks*). Ces accumulations sableuses sont appelées aussi delta de flot. Il est mis en place grâce à l'action conjuguée des courants de marée et du transit littoral extralagunaire. L'hydrodynamique induite par les courants de marée commande la morphologie du delta interne de marée. Carruesco (1989) et Zourarah (2002), ont signalé la présence d'une certaine cyclicité de 15 à 20 ans dans l'évolution du delta interne de marée au niveau de la lagune de Oualidia.

IV-1-2-2. Les chenaux et la zone intertidale

Le chenal principal avec une profondeur qui ne dépasse que rarement les 5 à 6m, serpente au milieu d'un schorre de 4 km de long sur près de 0,5 km à 1km de large. D'une largeur moyenne de 300 m ce chenal s'étend sur une longueur de 5 Km. Sur ce chenal principal, doublé parfois des chenaux secondaires (de profondeur maximale de 1 à 2m), se greffe un réseau de chenaux dendritiques très étroit envahi à marée haute.

Les schorres sont bien développés dans toute la lagune et envahis par une végétation halophile constituée en partie de Salicornes.

IV-1-2-3. Les marais salants

A l'extrémité amont du chenal principal, une digue a été construite, menée d'un système d'écluse rudimentaire qui ouverte à marée haute assure le remplissage d'un réservoir de décantation de 0,5 Km de long. L'eau y est maintenue pendant le jusant afin de la purifier par décantation, puis pompée et déversée dans des bacs d'évaporation des marais salants.

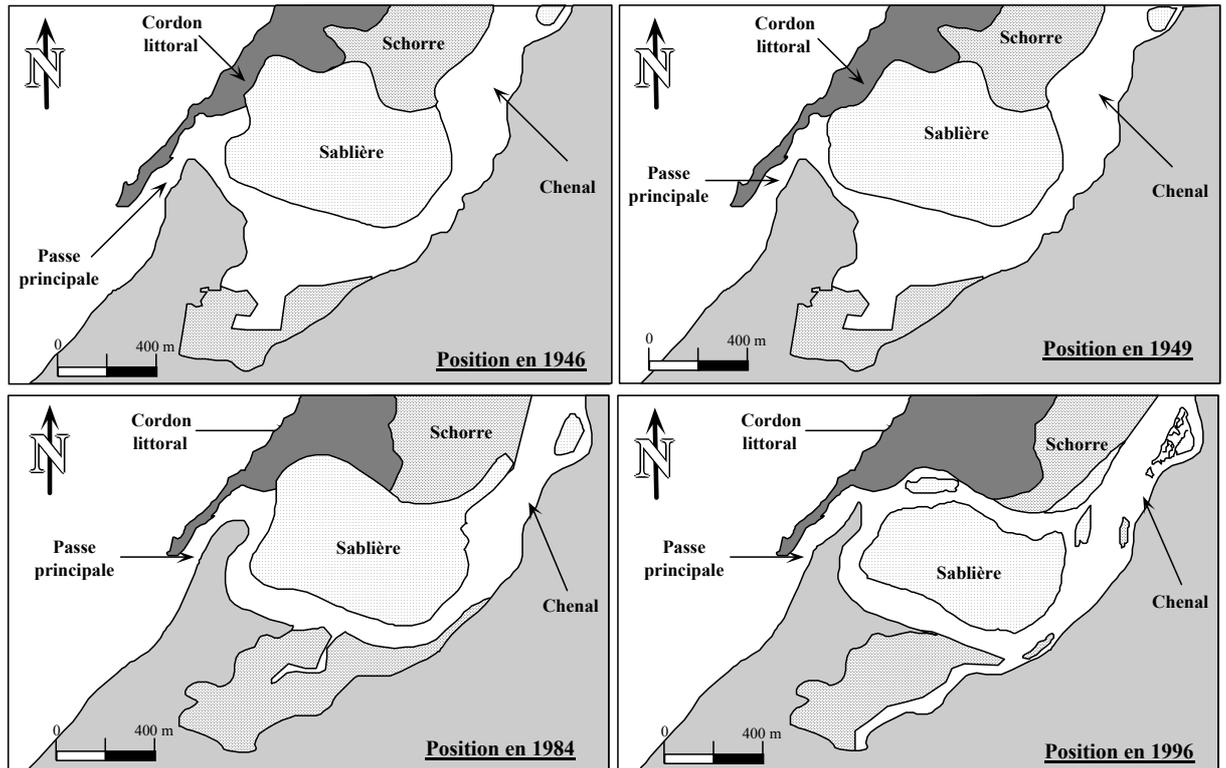


Figure I-17 : Evolution du delta de marée interne de la lagune de Sidi Moussa
(de 1946 à 1996)

IV-1-2-4. Le cordon littoral

Le cordon littoral au niveau de la lagune de Sidi Moussa, montre une barrière contre les actions marines (houle), il est constitué de calcaire détritique d'âge plioquaternaire. Ce cordon est pressé par des passes qui assurent la communication océan-lagune.

IV-1-2-5. Les côtes de part et d'autres de la lagune

La lagune de Sidi Moussa est caractérisée par l'existence de côtes relativement différentes :

- La côte située au Nord Est de la passe principale. C'est une côte rocheuse (des dunes consolidées) qui s'étend sur une dizaine de kilomètres. Après des plages sableuses apparaissent avec alternance de côtes rocheuses jusqu'à Cap Blanc (port de Jorf Lasfar) ;

- La côte située au Sud Ouest de la passe principale. Il s'agit d'une flèche sableuse qui évolue vers le Nord et qui pourrait causer la fermeture de la passe principale, cette flèche est marquée par des systèmes dunaires occupés par une végétation. Ces plages se poursuivent vers le Sud Ouest avec des interruptions par des côtes rocheuses.

IV-2 Le contexte hydrologique

IV-2-1. Hydrologie marine

IV-2-1.1 La marée :

La marée constitue un élément important dans le système hydro-sédimentaire des littoraux de l'Atlantique marocain et elle intervient directement ou indirectement sur leurs morphogénèse. Les variations cycliques de pression d'eau provoquées par la marée peuvent causer aussi de grands changements dans l'état de contraintes, une diminution notable des forces inter-granulaires, et des déformations significatives jusqu'à des ruptures locales ou globales des aménagements côtiers (Rezzoug, 1994).

La marée est une oscillation du niveau de la mer de période et d'amplitude variable dans le temps et dans l'espace. Ses effets sont d'autant plus importants que le marnage est élevé. Son action se conjugue aux effets de la houle, entraînant la modification des processus de sédimentation dans l'environnement littoral qui peuvent se manifester, soit par des accumulations, soit par des érosions (Duncan, 1964).

La marée dans la lagune est de type semi diurne avec un marnage entre 2 et 4m. Les courants de marée sont les principaux courants intralagunaires. Ils sont généralement plus importants en aval et diminuent d'intensité en avançant vers l'amont de la lagune. En aval, les courants sont plus importants en période de vives eaux. Les intensités enregistrées au niveau des passes sont de l'ordre de 86 cm/s (Hilmi et al, 2002). Pendant les marées de mortes eaux, les courants sont plus faibles révélant des intensités de l'ordre de 10 à 20 cm/s. A l'intérieur de la lagune, les courants s'affaiblissent en direction de l'amont.

En terme de direction, le courant dans la lagune de Sidi Moussa est alternatif avec la dominance d'un courant bidirectionnel, tantôt entrant ou tantôt sortant selon les rythmes des marées. Les variations spatiotemporelles au niveau de la passe principale des composantes Nord- Sud et Est- Ouest du courant. La composante Est- Ouest du courant y est plus dominante et due à l'orientation du chenal à cette station par rapport au Nord géographique.

L'analyse spectrale élaborée sur ces deux composantes de courant confirme ces résultats où l'on note, d'une part, la composante Est- Ouest qui présente plus d'énergie que la composante Nord- Sud et, d'autre part, l'existence des composantes de hautes

fréquences (de période inférieure ou égale à 25h) qui sont attribuables à la marée semi-diurne (M3, M4, M6) de périodes inférieures à 10h et qui se manifestent souvent dans les eaux peu profondes suite à la distorsion de l'onde de marée (Hilmi et al, 1997 ; 2000 ; 2002). On note particulièrement une périodicité observée entre 22- 23h que l'on peut attribuer aux périodes inertielles (phénomène non périodique) généralement observées dans les enregistrements du niveau d'eau ou du courant à une altitude donnée. Cette « pseudo- période a été également observée dans les enregistrements du courant dans la lagune d'Oualidia (Hilmi et al, 1999).

IV-2-1. 2- La houle

La houle, une fois générée dans la zone génératrice, prend son trajet vers le proche atlantique marocain, s'atténue ou s'intensifie en fonction des vents et des mers de vents rencontrés sur son chemin. Les paramètres de la houle qui intéressent le proche atlantique marocain dépendent de la position de la zone génératrice, de l'intensité, de la direction et de la durée d'action des vents soufflants sur cette zone et sur son chemin. Ils sont aussi en relation avec le *fetch* (l'espace sur lequel soufflent ses vents) et la distance parcourue par cette houle avant d'atteindre le proche atlantique marocain.

La visualisation des zones génératrices de la houle ainsi que leur suivi nous donne une idée sur l'évolution de la houle et son trajet sur le proche atlantique marocain (Figure I-18 et Figure I-19).

Comme sur l'ensemble de la côte occidentale d'Afrique, il existe presque en permanence une houle assez forte, généralement sans rapport avec le temps qui fait sur la côte. Elle est liée soit à de forts vents continus de directions peu variables (Roux, 1949 ; Lacaze, 1954 ; Gelci et al. 1957), à de lents déplacements de fronts froids (Lacaze, 1954) ou le plus souvent à des dépressions barométriques passant très au large entre les Açores et l'Islande (Gain, 1918 ; Montagne 1922). Les plus grosses houles se font sentir une à deux fois par an et atteignent 7 à 9 mètres. Celles dépassant les 9 mètres sont très rares et n'apparaissent que tous les deux ou trois fois par an (Furnestein 1957). Les fortes houles ont lieu surtout en automne et en hiver notamment à l'époque des syzygies. Elles ont un déplacement très brutal et parviennent à leurs maxima de puissance en quelques heures.

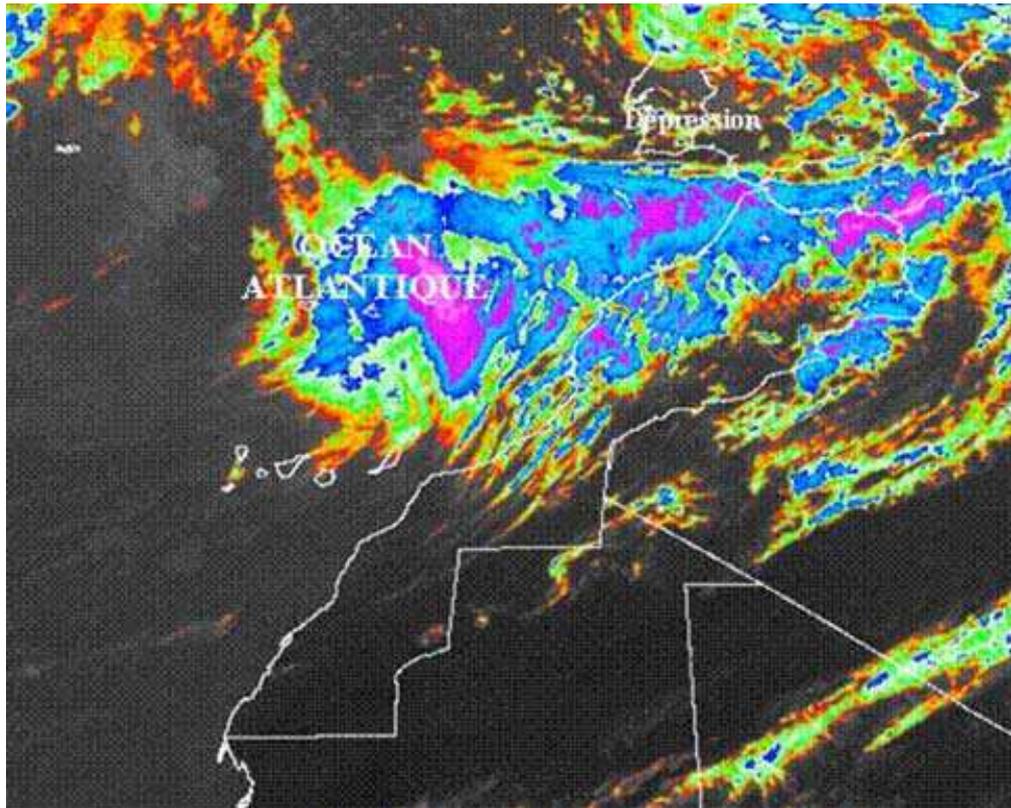


Figure I-18 : Image satellitaire montrant la zone génératrice de la houle très proche au Maroc (DMN) Situation du 31 oct 2002

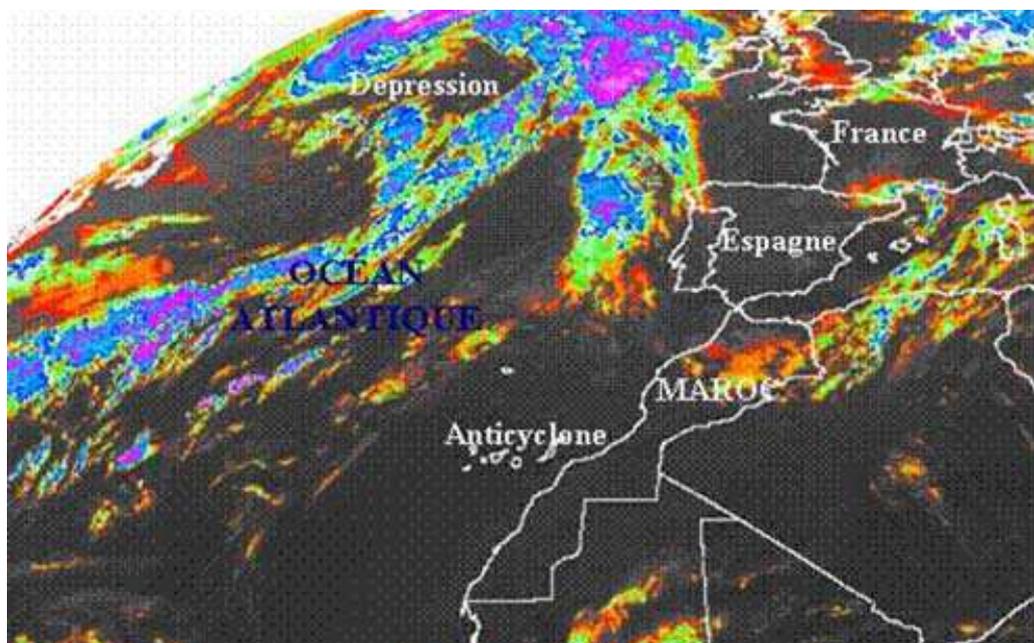


Figure I-19 : Image satellitaire montrant la zone génératrice de la houle lointaine au Maroc (DMN) Situation du 11 nov 2002.

Les houles affectant le littoral des Doukkala proviennent généralement de l'Atlantique Nord. Elles sont issues soit des dépressions passant entre les Açores et l'Islande, soit des dépressions passant sur les Açores, en direction du Portugal, du Golfe de Gascogne ou du Sud de l'Irlande (Figure I-20). Elles prennent exceptionnellement naissance de dépressions secondaires liées à des dépressions principales se dirigeant vers le Sud entre l'Islande et la Norvège. L'influence de ces houles touche différentes parties de ce littoral macrotidal. Leur action est à l'origine des mouvements sédimentaires parallèles et transversaux au rivage qui modifie ainsi la morphologie de celui-ci. Suivant la force de la dépression qui leur donne naissance, les houles mettent entre 2 à 4 jours pour atteindre les côtes marocaines. Leur période, variant de 7 à 18s, renseigne sur leur aire d'origine (Tableau I-6).

Tableau I-6 : Périodes des houles au large des côtes atlantiques marocaine en relation avec leurs origine (Gain, 1918 ; Montagne, 1922)

Origine	Périodes en secondes
Açores/Portugal	7 à 10 s
Sud ligne Terre-Neuve/Açores	10 à 13 s
Nord ligne Terre-Neuve/ Açores	13 à 18 s
Entre Terre-Neuve et Bermudes	Supérieures à 18 s

Il existe deux types de données de houles sur les côtes marocaines :

1. il s'agit en général de données de mesures des paramètres de houle mesurée au large par des bateaux. Ces mesures peuvent être traitées par études statistiques et avec des models de propagation de houles.

2. des mesures in situ, dans le cas de notre zone d'étude, un certain nombre de mesures ont été réalisées et qui ont fait l'objet d'analyse et interprétation (LHCF, *in* Charrouf. 1989).

Selon l'emplacement de la dépression qui l'a provoquée, la houle met deux à trois jours pour atteindre le littoral marocain. Les houles prédominantes sont celles du secteur NW et alternent avec des houles moins fortes mais plus fréquentes. Pour le secteur étudié, les stations de mesure les plus proches sont celles du Jorf Lasfar. Les amplitudes maximales significatives observables ou prévisibles sont illustrées sur le tableau I-7.

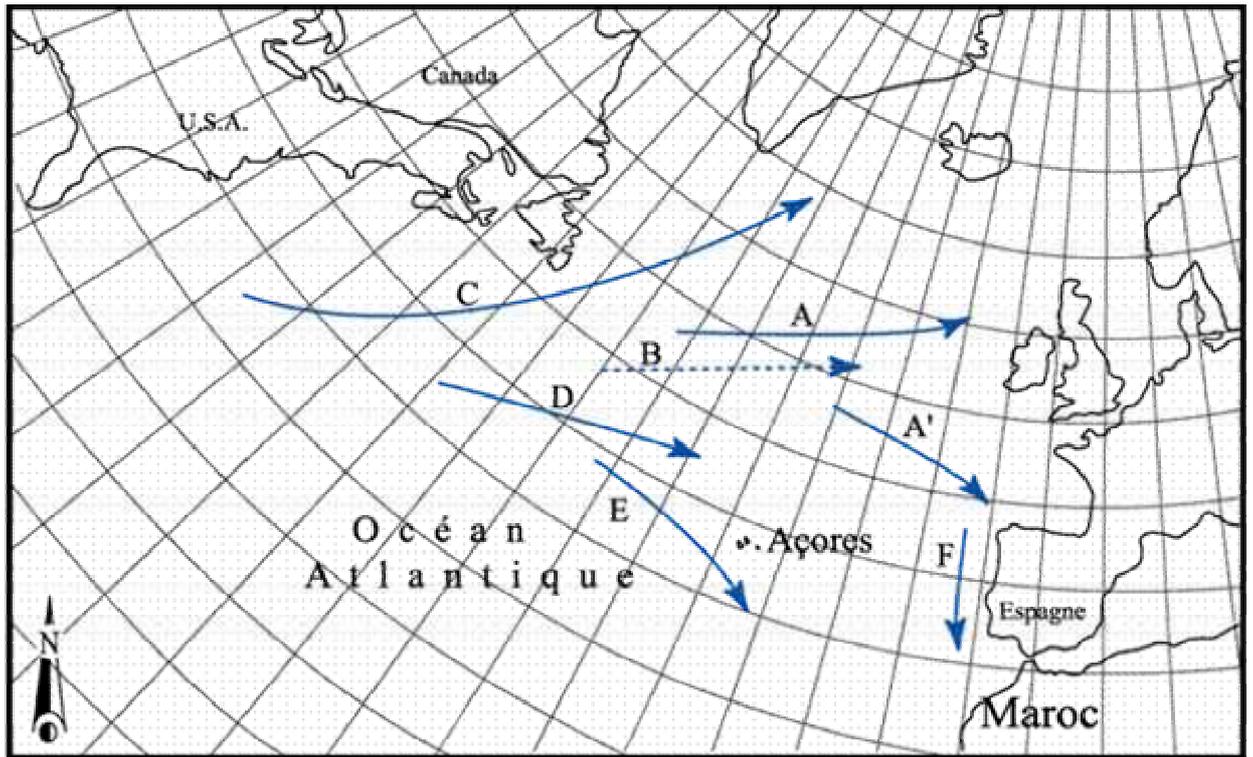


Figure I-20 : Les trajectoires des houles rencontrées sur le littoral Atlantique Marocain (d'après Montagne, 1922 in Zakaria, 1994, modifié)

A et A' : les houles NW, proviennent de la dépression entre l'Islande et l'Espagne.

B : la même trajectoire (A et A') avec un stationnement sur l'Atlantique.

C et D : les houles W et SW, proviennent des dépressions qui longent la côte américaine et abordent l'Irlande ou les Açores.

E : les houles SW, même trajectoire que D avec une direction plus au Sud.

F : houles N ou NNW, dépressions stationnaires au Sud de la France.

Tableau I-7 : Amplitudes significatives observables à Jorf Lasfar, source de la Houille blanche (in Boulanoir, 1999)

Houle	Amplitudes
Houle annuelle	5,50 m
Houle bisannuelle	6,30 m
Houle quinquennale	7,50 m
Houle décennale	8,50 m
Houle cinquanteuple	9,30 m

Dans L.C.H.F pour le ministère des Travaux Publics marocain (in Charrouf 1989),

deux natures de houle ont été distinguées :

1. les houles océaniques, de période longue et couvrant le secteur NW à WSW.
2. l'agitation soulevée par le vent local, de courte période, du secteur W à SW, cette agitation enregistrée à Jorf Lasfar est bien locale.

Les houles de direction W à NW sont quasi-permanentes (Figure I-21). Les amplitudes varient de 0,5 à 7 mètres (on enregistre exceptionnellement des houles de 9 mètres). Les périodes vont de 8 à 18 secondes, les plus fortes amplitudes sont associées à des périodes de 10 à 16 secondes.

L'agitation du Sud-Ouest est associée aux vents locaux et apparaît uniquement en hiver. Le nombre de jours de houle de SW a été estimé à 21 jours par an, avec des amplitudes de 1 à 3m et une période de 7s.

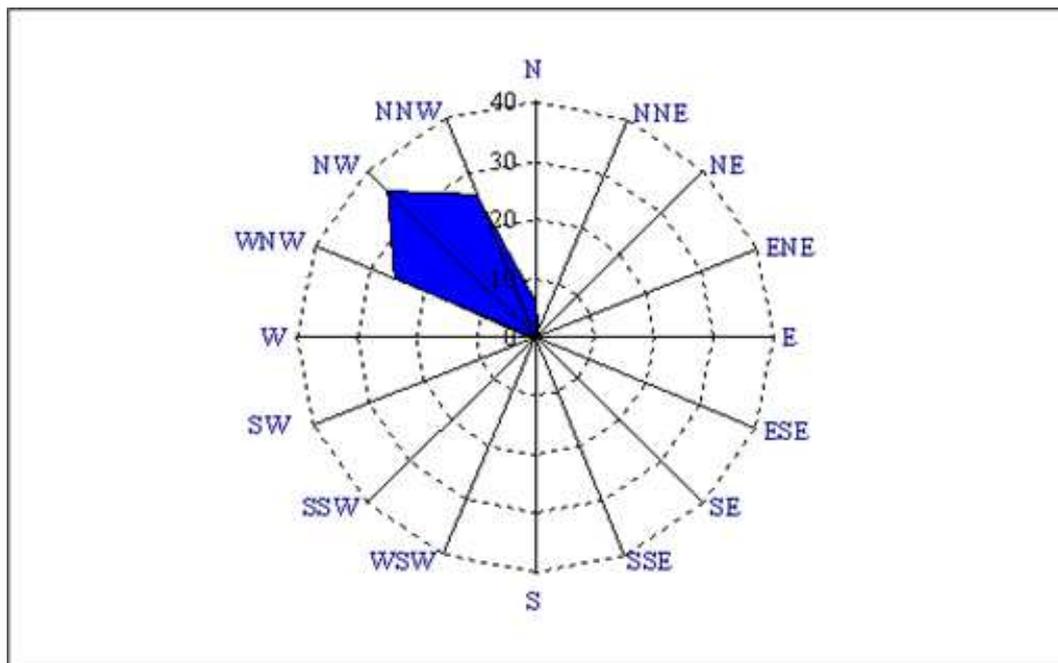


Figure I-21: Distribution fréquentielle des directions de provenance de la houle (%)

Jorf Lasfar 1991-2001 (Station météorologique de Casablanca)

La variabilité saisonnière des houles en fonction de leur hauteur, nous a permis de distinguer les caractéristiques suivantes (Figure I-22) :

- Les houles les moins fortes (inférieures à 2 m) sont les plus fréquentes pendant toutes les saisons. Les maxima d'occurrences sont enregistrés (46,99 % pour des houles significatives <1,5 m) durant la période estivale, ce qui fait apparaître l'été comme une saison d'accalmie avec des houles peu agressives.

- les houles "fortes" (entre 2 et 4 m) affectent le littoral étudié pendant l'automne, l'hiver (avec une légère dominance) et le printemps. Leur fréquence est caractérisée par une décroissance par rapport aux houles moins fortes.

- les houles très fortes (supérieure à 4 m) caractérisent essentiellement la période automnale et la période hivernale. Se sont les périodes au cours desquelles se déroulent les plus grandes tempêtes. La distribution saisonnière des périodes significatives au cours de l'année 1999, présentée dans la figure 2-16 permet de mettre en évidence l'existence de deux régimes de houles, correspondant à l'été et à l'hiver :

- une période estivale où les houles courtes (<7s) prédominent.

- une période d'automne et d'hiver (octobre à mars) comportant la majorité des houles longues.

- le printemps qui correspond à une période de transition au cours de laquelle les deux régimes sont représentés (48,86 % de fréquences pour les houles courtes et 50,15 % pour les houles longues).

En conclusion, la prédominance des longues houles pendant les mois d'hiver dans la région septentrionale est due à l'exposition frontale de la côte (orientée NE-SW) aux longues lames en provenance des dépressions du front polaire. Leur absence dans le secteur Sud est causée par l'orientation générale de la côte (NW-SE) qui empêche l'arrivée des longues houles de direction NW, alors que cette région est complètement ouverte aux longues houles d'été engendrées par les vents qui dérivent de l'anticyclone des Açores.

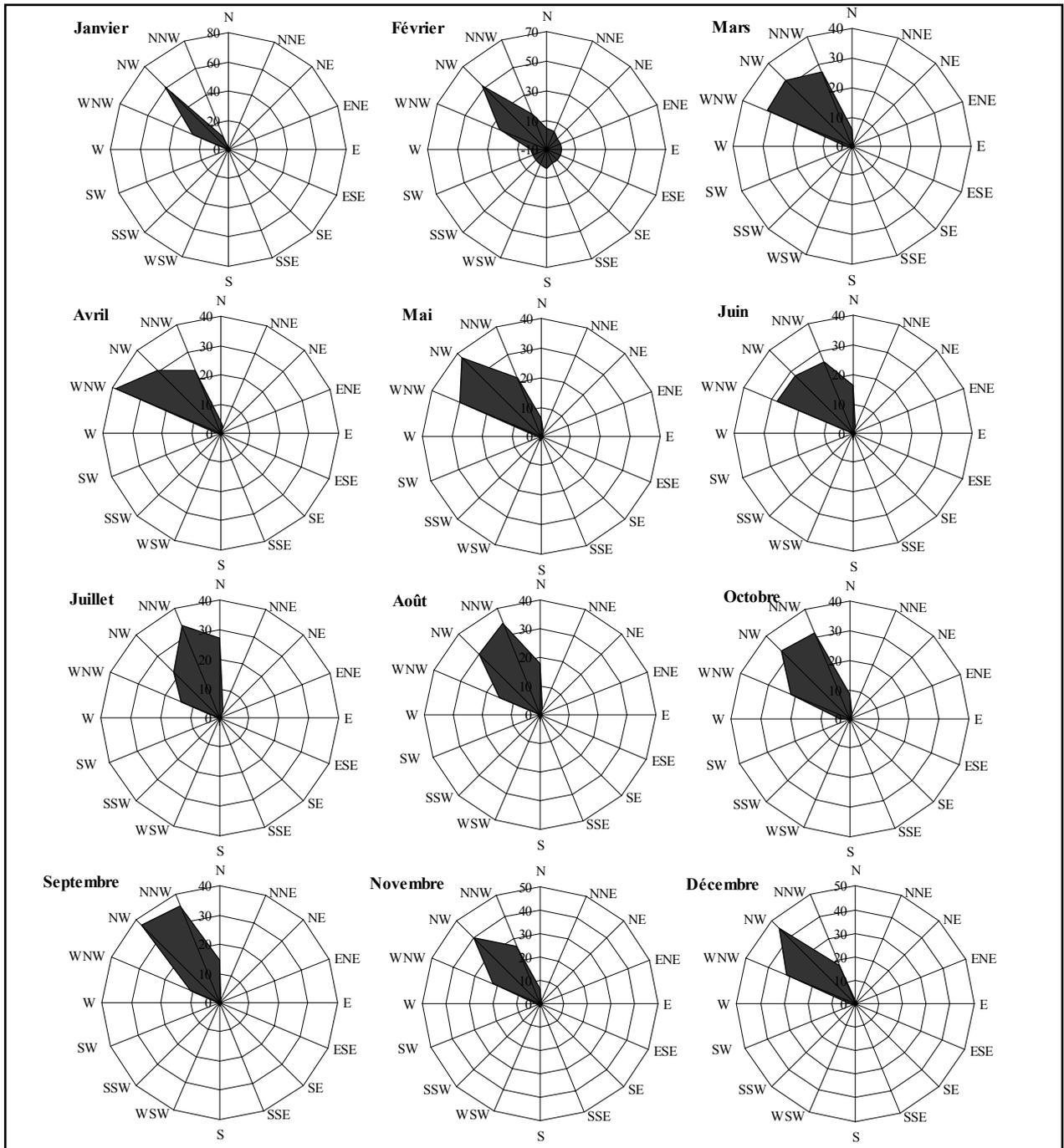


Figure I-22 : Distribution fréquentielle mensuelle des directions de provenance de la houle (%) au large de Jorf Lasfar durant la période de 1991-2001

IV-2-1. 3. La circulation océanique et les upwellings

Les courants côtiers : (Figure I-23)

La circulation océanique atlantique marocaine est complexe. Elle se place dans le gyre de l'Atlantique Nord sur ce qu'il est convenu de désigner sous le nom de courant de Canaries (vitesse de 25 – 75 cm/sec. 0,5 à 1,5 nœud) U.S. Naval Oceanographic Office ; 1965). En effet, la circulation générale de surface dans l'Atlantique Nord se fait suivant un circuit qui, tournant dans le sens des aiguilles d'une montre, comprend, à partir de l'Amérique, le Cuit Stream, puis vers l'Europe la branche descendante de la "dérive Nord atlantique" qui se prolonge au large des côtes Ibérique et Nord-Ouest africaine par le courant des Canaries. Ce cycle se boucle par ce qu'on appelle le courant Nord-équatorial qui s'écoule en gros de l'Est vers l'Ouest, et ramène les eaux de surface vers la mer des Antilles et l'Amérique du Nord (Lacombe, 1965).

Malgré des fluctuations saisonnières et même annuelles du courant des Canaries, les océanographes lui attribuent un caractère permanent. Ils le définissent comme un large courant général profond, constant et froid, de direction Nord-Est, sud-ouest, qui, après avoir longé la zone ibérique s'écoule parallèlement à la côte marocaine en direction du Sud. Ce courant est caractérisé, au large de la côte marocaine, par une faible vitesse moyenne de 0,6 nœuds (Lacombe, 1950).

Ne dépassant pas 20 °C (Rouch, 1931, 1948), la température de ce courant s'abaisserait jusqu'à 18°C en surface au voisinage de la côte marocaine et, jusqu'à 15°C avant d'atteindre la profondeur de 100 m. D'après Rouch, la température du courant des Canaries serait basse d'une part du fait de sa provenance nordique et, d'autre part, parce qu'il serait partiellement alimentée par les montées d'eaux froides (upwelling) se produisant sur la côte marocaine.

Il est indispensable de noter que la circulation générale du courant des Canaries est plus complexe et se trouve fortement perturbée sur la bordure continentale atlantique marocaine au moins jusqu'à 100 km au large, tel que le montrent les travaux de Furnestin (1948) dans le secteur marocain. D'après cet auteur, les mouvements des eaux froides qui se manifestent dans la zone atlantique marocaine ne prennent pas partout l'allure d'un écoulement continu du Nord-Est au Sud-Ouest, mais plus souvent celle de déplacements latéraux perpendiculaires à la côte, des eaux de pente qui, périodiquement, envahissent le plateau continental au printemps et en été, puis

l'évacuent en automne et en hiver. On peut considérer que le phénomène d'upwelling est en grande partie responsable de cette complexité de la circulation générale sur la bordure atlantique marocaine (Allain, 1970).

Les mouvements décrits par Furnestin (1948), en se produisant dans les zones où l'eau plus froide et plus dense, des profondeurs est ramenée vers la surface, déterminent des courants tourbillonnaires cycloniques.

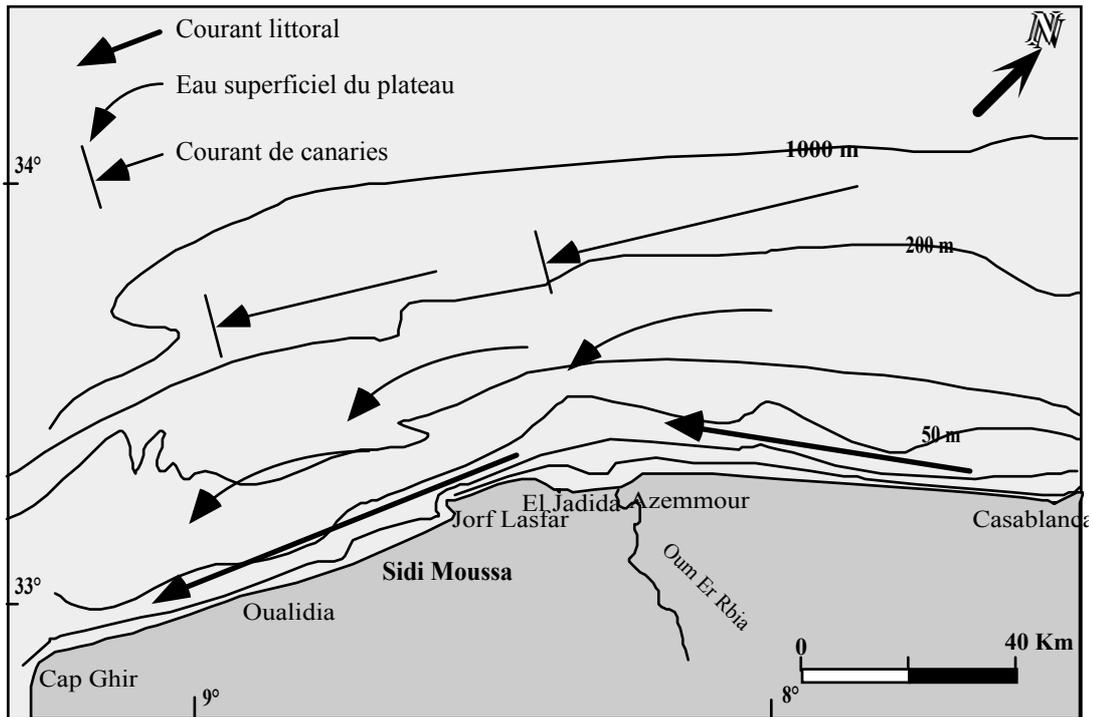


Figure I-23 : Répartition des courants de surface sur le plateau continental entre Casablanca et Cap Ghir (*in* Jaaidi, 1981)

Les phénomènes d'Upwellings : (Figure I-24)

L'upwelling est un phénomène qui caractérise la circulation océanique sur une grande partie de la plate-forme continentale marocaine. Il est engendré par l'interaction complexe des Alizés et du courant des Canaries dont le mécanisme s'explique par la théorie de Eckman (1905). Les eaux de surface sont entraînées vers le large par l'Alizé et remplacées par des eaux froides riches en éléments nutritifs venues du fond. Le phénomène d'upwelling côtier est considéré comme formé d'une composante climatique permanente et de fluctuation à différentes échelles d'espace et de temps. L'accent est mis sur les perturbations globales inter-annuelles. Des variations de type *El*

Nino se produisent dans les alizés et modifient les courants équatoriaux et les upwellings côtiers des cotes de convergence intertropicale (Hagen, 2001).

En effet, des vents dominants du Nord-Est, soufflant de terre produisent un déplacement vers le large des eaux de surface et créent ainsi une diminution du niveau au voisinage de la côte. Un afflux d'eaux sous-jacentes provenant des profondeurs de 100 à 300 mètres tend alors à compenser le déficit en amenant des eaux froides profondes vers la surface (Grall et al., 1974 ; Minas et al., 1974). La venue de ces eaux froides abaisse d'une manière notable les températures de surface. Ce sont d'ailleurs ces températures, anormalement faibles au voisinage de la côte, qui permettent de les repérer facilement. C'est ainsi que des enregistrements des vents et des températures de l'eau effectués à la jetée du Port de Safi (Roux, 1947) ont conduit à remarquer que la température de l'eau est très sensible à l'effet du vent, puisque à chaque inversion de la courbe du vent, correspond une inversion de celle de la température avec un décalage de temps compris entre 0 et 3 jours.

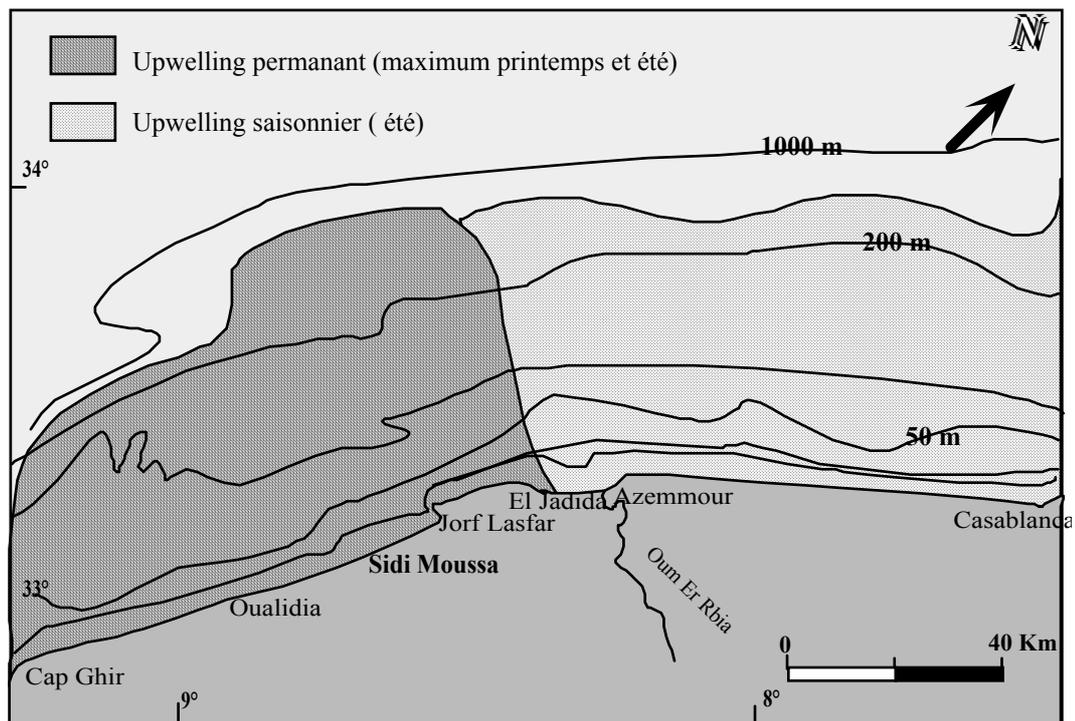


Figure I-24 : Répartition des zones d'Upwelling sur le plateau continental entre Casablanca et Cap Ghir (*in* Jaaidi, 1981)

L'Upwelling se manifeste le long de la côte marocaine dans la couche superficielle au-dessus du plateau continental, d'une manière permanente au voisinage du Cap

Spartel et dans le secteur d'El Jadida au Cap Ghir, en passant par Safi et Essaouira (Furnestin, 1948). Cet upwelling peut ramener en surface des eaux d'une température minimale de 15 à 16°C et d'une salinité minimale de 36,30 ‰ correspondant aux caractéristiques trouvées vers -200 m. de profondeur au large.

Des variations saisonnières et des fluctuations annuelles ont été observées ; elles affectent aussi bien l'eau d'upwelling que celle du large (Lacombe, L 1965 ; Guilcher, 1965 ; Le Floch, 1974). Au cours de l'hiver, les vents dominants provenant d'Ouest et Nord-Ouest rendent le phénomène d'upwelling plus faible. Par contre, il est particulièrement actif de juin à octobre, période correspondant au maximum de puissance des Alizés. Selon Mathieu (1986) les remontées les plus intenses se localisent au voisinage des Caps Spartel (au Nord du Maroc), Blanc (Jorf Lasfer), Beddouza (à 90 Km d'El Jadida) et Cap Ghir.

Ces remontées d'eaux froides induisent une diminution des températures des eaux de surface, se traduisant par la remontée des isothermes 15 et 16 C° et une diminution de la teneur en O₂ (5,1 ml/l) (Kabbachi et al., 2001). Cette remontée des eaux froides affecte une zone s'étendant de la côte jusqu'à l'isobathe -200 m de profondeur.

La structure thermohaline liée aux résurgences côtières peut être perturbée par le brassage intense des eaux superficielles, provoqué par l'agitation des houles. Dans la couche limite, les courants dus à la houle peuvent transporter vers la zone côtière la matière mise en suspension par les mouvements verticaux (Zakaria, 1994).

IV-2-2. Hydrologie continentale

La topographie beaucoup moins tourmentée, permet l'existence de véritables nappes de plateaux s'écoulant conformément à l'inclinaison générale de la topographie de l'Est vers l'Ouest. Les nappes sont peu profondes et liées à la frange d'altération et aux fractures, elles sont pauvres en général (El Achheb, 1993).

Le plioquaternaire d'épaisseur, qui peut atteindre 30 m (Gigout, 1951, 1954 et 1956), recèle des nappes d'importance diverse qui s'écoulent vers l'Ouest, le Nord-Ouest ou le Nord. Généralement laminaire, l'écoulement y est parfois karstique (Combe et al. 1975). Au niveau de la lagune de Sidi Moussa, la nappe du calcaire de Dridrate et celle du plioquaternaire de Sahel se réunissent pour n'en former qu'une seule. De

nombreuses émergences de sources en amont sur les bords de la dépression interdunaire sont la manifestation en période humide de ce système aquifère qui un écoulement karstique bien caractériser.

IV-2-3. Bilan hydrologique de la lagune

Les apports en eau douce dans la lagune sont la manifestation des résurgences de la nappe du Plioquaternaire de la façade continentale de la lagune de Sidi Moussa. Ces apports sont naturellement plus forts en période humide, quand la nappe est en charge, d'où des variations des salinités par rapport à la période estivale.

Au niveau des passes, les vitesses de flots sont toujours supérieures à celles du jusant et ceci pour des périodes plus courtes. Cela se traduit dans la morphologie par un transit plus important de matériaux en flot créant ainsi un delta interne marée important manifestée par la sablière. Le delta de marée externe est pratiquement inexistant : la forte dynamique côtière (courants littoraux et dérive littorale Nord-Sud) par son action reprend les sédiments expulsés de la lagune à basse mer pour les répartir plus au Sud.

IV-3 Milieu biologique de la lagune de Sidi Moussa

IV-3- 1 La faune

La lagune de Sidi Moussa abrite un certain nombre de poissons présentant une variabilité saisonnière à savoir la sole, le bar et le dentx, etc et certains invertébrés : Des décapodes « *Carcinus maenas* », des isopodes « *Idotea baltica* ; *Cymadusa sp* ; *Perineris sp.* », des cnidaires « *Actina equina* », des gastéropodes « *Monodonta sp* ; *Turbinata sp* ; *Cympium sp* ; *Gibbula sp* ; *Gibberulina sp.* », des tintinides et les bivalves : les coques, les couteaux, la palourde *Ruditapes decussatus* L., Solen et *Cardum edule* L. Ce dernier bivalve est l'espèce dominante de la zone intertidale de la lagune, et par conséquent, il constitue un compétiteur important d'espace avec la palourde. On trouve aussi, certains crustacés tels que le crabe vert *Carcinus maenas*, qui constitue un prédateur redoutable de la palourde à côté de gastéropode *Cympium sp* (Bennouna, 1999).

IV-3- 2 La flore

Ce sont les phanérogames halophytes caractéristiques des eaux saumâtres « les zostères », qui prédomine la zone intertidale et au niveau des schorres de la lagune de Sidi Moussa, aussi on retrouve les algues vertes « les ulves ». Ces algues présentent une croissance intense en été ce qui induit des mortalités chez les palourdes par asphyxie (Rafik, 1991).

Bennouna (1999) a pu identifier cinq grands groupes de phytoplancton :

- les diatomées et les dinoflagellés sont les groupes les plus dominants au niveau de la lagune de Sidi Moussa. Les diatomées sont essentiellement représentées par les genres *Leptocylindrus*, *Chaetoceros*, *Navicula*, *Rhizosolenia*, *Pleurosigma*, *Nitzschia* et *Lauderia*. Les genres de groupe des dinoflagellés les plus fréquemment rencontrés sont par ordre décroissant : *Prorocentrum*, *Protoperidinium*, *Scrippsiella*, *Peridiniella*, *Ceratium*, *Dinophysis*, *Pentapharsodinium*, *Gonyaulax*, *Gyrodinium*, *Pyrophacus* et *Alexandrium*,
- les silicoflagellés et les coccolithophoridés qui ne se présentent que par une ou deux espèces avec une fréquence très faible,
- les cyanophycées, qui se présente qu'en mois de juin.

IV-3- 3 La salubrité de la lagune de Sidi Moussa

La lagune de Sidi Moussa, présente des résultats conformes aux normes internationales adoptés par (CEE/91/492), elle est donc classée en zone salubre zone A (Idrissi et al. 1994), ceci est probablement dû au caractère du site, zone peu peuplée, et par conséquent, l'agression de la pollution urbaine reste faible.

Toutefois récemment Bernoussi (1996) a reclassé la lagune en zone peu salubre (Zone B), ceci est dû par la suite à l'intensification des activités agricoles et de pâturage au bord de la lagune et par conséquent à l'augmentation d'intrants (fumiers, fertilisants...) lesquels infiltrés ou/et drainés se retrouvent en partie dans les eaux de la lagune.

IV- INTERETS SOCIO-ECONOMIQUES DE LA LAGUNE

La lagune de Sidi Moussa est identifiée au Maroc comme un site d'intérêt écologique et biologique, et a été proposée récemment comme site Ramsar (= convention internationale portant le nom de la ville où elle a été signée (Ramsar = ville en Iran) visant à protéger les zones humides d'intérêt internationale pour les oiseaux).

Outre que la pêche au niveau de la lagune et l'exploitation des sels au niveau des salines en amont de la lagune, la récolte des coquillage reste l'activité principale de la population au voisinage de la lagune de Sidi Moussa, cette activité est plus intense dans le cas des palourdes *Ruditapes decussatus*, la production annuelle enregistrée par les mareyeurs locaux est d'environ 27 tonnes (Rafik, 1991).

Au niveau de bassin versant bordant la lagune de Sidi Moussa, un développement important de l'agriculture irriguée, technique agricole, qui certes, a permis l'amélioration des rendements surtout des cultures maraichères.

Sur le plan industriel, des efforts importants ont été déployés pour industrialiser rapidement la région, sans que la protection du littoral ait été prise en considération, ceci a donné une implantation des unités industrielles importantes au niveau de Jorf Lasfar « 15 Km au Nord de la lagune ».

La primauté jusqu'à une date récente du tourisme balnéaire, s'est traduite par une forte littoralisation de cette activité. En effet, le séjour balnéaire tant pour le tourisme international que le tourisme national constituait la principale forme d'agrément. Activité récemment importée, le tourisme balnéaire est venu accuser le basculement des centres d'intérêt économique de l'intérieur vers les côtes. Malheureusement la lagune ne possède pas encore des infrastructures pour attirer un tourisme plus accentué malgré que ces potentialités naturelles soient très développées.

METHODES D'ETUDES

I - CONDITIONS D'ECHANTILLONNAGE	64
II- MATERIEL ETUDIE.....	64
II-1 Sédiments superficiels.....	64
II-2 Sédiments carottés.....	64
II- METHODES ANALYTIQUES.....	66
II – 1. 1. Analyses granulométriques.....	66
II – 2. Minéralogie des Argiles.....	72
II – 3. Analyses géochimiques.....	73
II – 4. Calcimétrie.....	74
II – 5. pH des sédiments.....	75
II – 6. Analyses statistiques.....	75

Partie II :

Méthodes d'études

I - CONDITIONS D'ECHANTILLONAGE

Afin de répondre au double objectif fixé : caractériser qualitativement le matériel sédimentaire et déterminer l'origine des flux sédimentaires exportés dans la lagune de Sidi Moussa, Cinquante (50) échantillons de sédiments superficiels, Cinq carottes (Csm-1, Csm-2, Csm-3, Csm-4 et Csm-5) ont été implantées au niveau de la zone intertidale et les schorres de la lagune de Sidi Moussa (Figure II-1). Sur ce matériel, une approche multiméthodique a été adoptée en mettant en œuvre des analyses granulométriques, minéralogiques et chimiques.

II- MATERIEL ETUDIE

II-1 Sédiments superficiels :

Les sédiments superficiels ont été prélevés en Décembre 2001 dans la lagune au niveau de la zone intertidale et du chenal. L'échantillonnage a été effectué par une benne VanVeen. L'échantillonnage a été fait sur les 4 cm de la surface.

II-2 Sédiments carottés :

Cinq carottes numérotées de Csm-1 à Csm-5 ont été prélevées en 2001, dans la zone intertidale et les schorres de la lagune de Sidi Moussa. Les sondages ont été effectués à l'aide des tubes en PVC à peaux d'oranges et manipulés à la main. Le choix de positionnement des carottes est basé sur la nature des faciès superficiels et celle des faciès du bassin versant. Les cinq carottes prélevées montrent des épaisseurs variables. La carotte la plus longue est Csm-4, qui atteint 110 cm, se situe dans la zone centrale au niveau des schorres, la carotte la plus courte se situe au niveau de delta de marée interne. Après une description détaillée des coupes sédimentaires, chaque niveau visualisé à l'œil nu a été échantillonné.

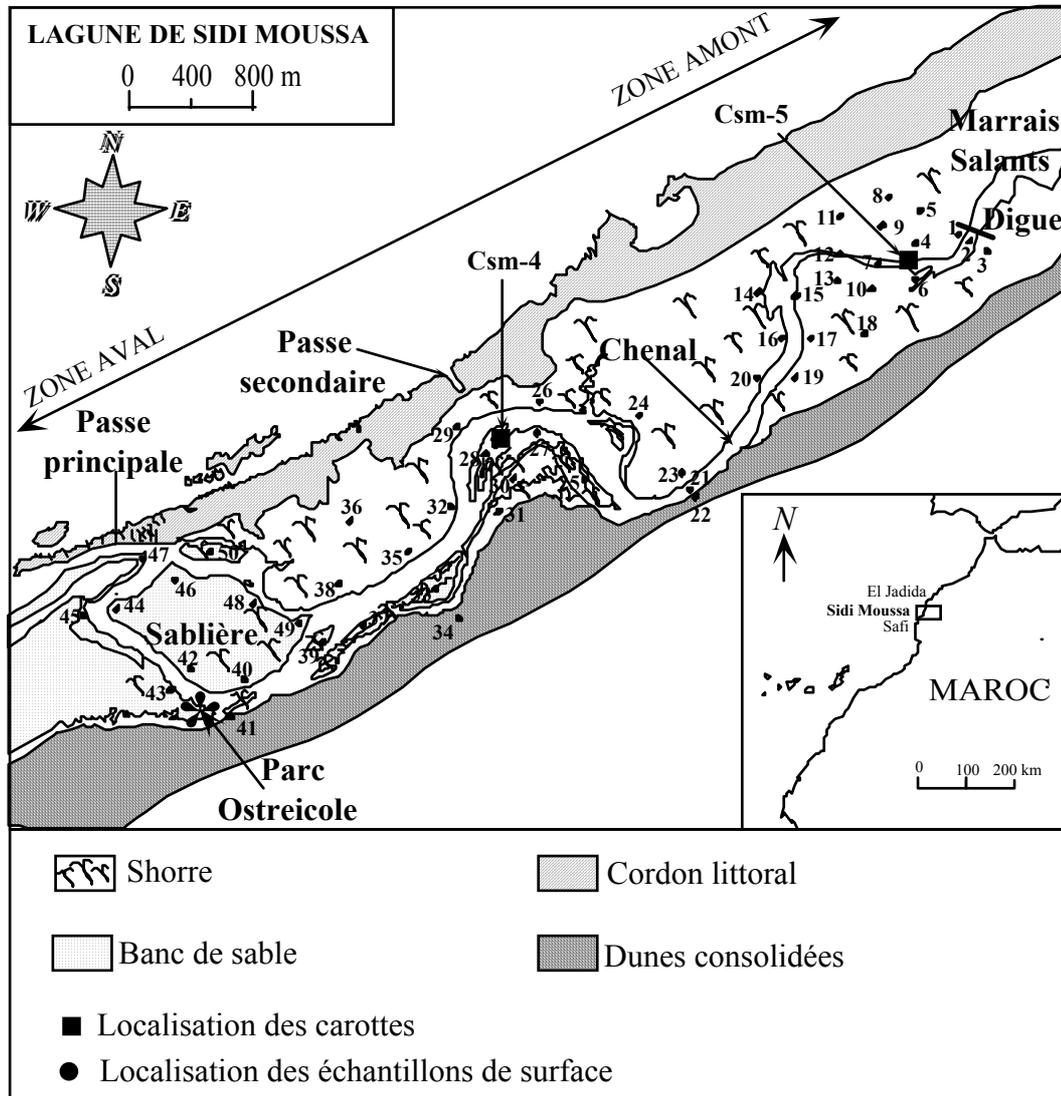


Figure II-1 : Localisation des échantillons de surface (n= 50) et des carottes (n=2) dans la lagune de Sidi Moussa

II- METHODES ANALYTIQUES

II-1 Analyses granulométriques

Les analyses granulométriques du sédiment brut ont été faites avec un diffractomètre Laser Mastersize Malvern 2600 E (Figure II-2) :

- Tailles mesurées de 50 nanomètres à 900 microns
- un laser basse- tension
- des optiques (lentilles de Fourier)
- une zone de cellule (cellule)
- des photodétecteurs (photos diodes au nombre de 42 + 3 pour le Mastersize).
- une cuve à ultra sons, à agitateur et pompe
- un ordinateur + logiciel.

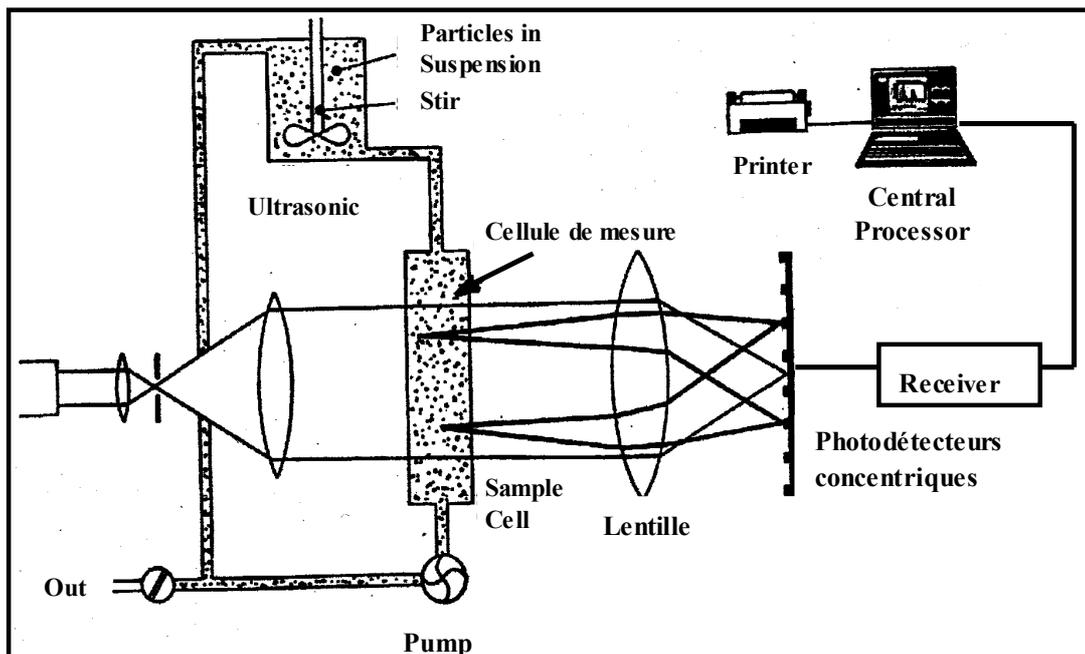


Figure II-2: Schéma général du Granulomètre Malvern

Principe de mesure

Les particules qui doivent être mesurées sont diluées dans de l'eau puis mises en circulation par une pompe dans la cellule. Les particules éclairées par la lumière laser deviennent son axe principal. La quantité de lumière, déviée et l'importance de l'angle de déviation permet de mesurer la taille des particules. Les grosses particules deviennent des quantités importantes de lumière sur des angles faibles par rapport à l'axe de propagation. Les petites particules au contraire deviennent des quantités infimes de lumière sur des angles plus larges.

Les intensités sont recueillies par des photodiodes en silicium puis sont numérisées, analysées par calcul sur des matrices inverses et le résultat du calcul mis à l'ordinateur, est représenté sous différentes formes (courbes, tableaux granulométriques etc.). La théorie mathématique représentant la lumière diffusée par l'échantillon est modélisée pour des équivalences sphériques. Sur cet appareil, nous pouvons intégrer l'indice de réfraction des particules mesurées afin de pouvoir mesurer les plus petites particules (problèmes de transparence). Les courbes obtenues en coordonnées semi-logarithmiques du pourcentage cumulé en fonction des diamètres des grains donne des courbes granulométriques de différentes formes. Ceci permet de définir trois faciès principaux selon Rivierre (1952) (Figure II-3) :

1- Le faciès parabolique : Le faciès parabolique qui caractérise des apports par un courant turbide rapide avec un bon classement du matériel. Le mode de transport se fait donc par suspension graduée et on observe un gradient vertical de densité au sein du courant transporteur.

2- Le faciès logarithmique : Il résulte d'un dépôt par excès de charge à la suite d'une diminution de la compétence de l'agent de transport. Ce transport se faisant par suspension uniforme (S.S.) (courant de turbidité de faibles densité et vitesse). Ce faciès traduit une ébauche de classement du sédiment par transport.

3- Le faciès hyperbolique : Il reflète un dépôt par décantation ; le transport se fait par suspension pélagique et hemipélagique. Le quartile le plus grossier (Q1) de la fraction inférieure à 63µm est utilisé pour traduire l'importance des silts et des argiles, pour mettre en évidence ces différents faciès.

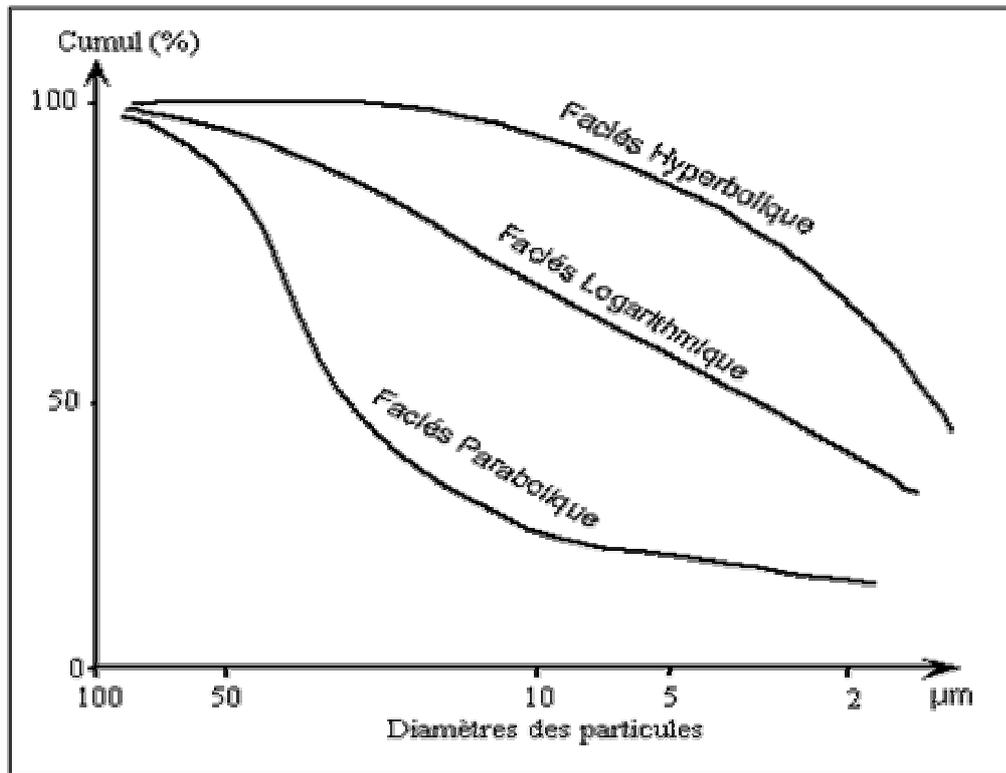


Figure II-3 : Différents faciès et modes de dépôts des sédiments fins (Rivierre, 1952)

Les résultats des analyses granulométriques sont exprimés en courbes semi-logarithmiques et en histogrammes de fréquence. Nous avons adopté, pour ce travail, les formules de Folk et Ward (1966) pour le calcul des indices granulométriques. Ces différents indices granulométriques ont été utilisés pour établir des diagrammes de dispersion.

La moyenne granulométrique (ϕ) : Elle représente la distribution granulométrique moyenne des sédiments et elle est déterminée par la formule suivante :

$$Mz = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

Cet indice dépend de plusieurs facteurs : l'intervalle de taille du matériel de la roche mère, l'énergie du milieu, et la distance du transport (J.PERRIAUX, 1961). Il permet l'individualisation d'un certain nombre de faciès (Tableau II-1)

Tableau II-1 : Répartition des faciès sédimentaires en fonction de la moyenne (Folk, 1966)

Valeur de Mz en phi	Classement
Mz < 1,00	Sables grossiers et graviers
1,00 <Mz <2,31	Sables moyens
2,31<Mz<3,32	Sables fins
3,32 <Mz <4,00	Sables très fins
Mz> 4,00	Silts et argiles (lutites)

Standard déviation ou écart-type : C'est le coefficient de classement, il est donné par la formule :

$$Et = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6}$$

FOLK (1966) propose pour les valeurs du Standard Déviation des caractéristiques de classement (Tableau II-2).

Tableau II-2 : Répartition des faciès sédimentaires en fonction de l'écart-type (Folk, 1966)

Standard Déviation	Classement
>4	Extrêmement mal classé
4>Sd>2	Très mal classé
2>Sd>1	Mal classé
1>Sd>0,7	Modérément classé
0,7>Sd>0,5	Moyennement bien classé
0,5>Sd>0,35	Bien classé
0,35>Sd	Très bien classé

Il dépend de trois principaux facteurs en général :

- l'intervalle des tailles du matériel initial (classement de la roche mère)
- le taux de sédimentation.
- Les caractéristiques physiques du courant (vitesse énergie, turbulence, fluctuations, etc. ...)

Skewness ou indice d'assymétrie (Sk) : Il mesure le degré d'obliquité de la courbe de fréquence, autrement dit, l'asymétrie de cette courbe par rapport à la médiane et son sens (Tableau II-3), Il est calculé par la formule :

$$Sk = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

Tableau II-3 : Répartition des faciès sédimentaires en fonction de l'indice d'assymétrie (Folk, 1966)

Sekwness	Classement
1>Sk>0,3	Très asymétrique vers les fins
0,3>Sk>0,1	Asymétrique vers les fins
0,1>Sk>-0,1	Presque symétrique
-0,1>Sk>-0,3	Asymétrique vers les grossiers
-0,3>Sk>-1	Très asymétrique vers les grossiers

Test de Passega

En mettant en relation la médiane et l'unpercentile dans un diagramme logarithmique, Passega (1964) propose une interprétation en terme de dynamique de transport des variations granulométriques des sédiments. Ce digramme permet d'identifier les types de courants transporteurs du matériel. Cette méthode est largement utilisée dans l'étude de la distribution spatiale des sédiments fluviaux. Ce diagramme sera également utilisé pour la discrimination entre les sédiments des différentes zones et carottes lagunaires (Figure II-4).

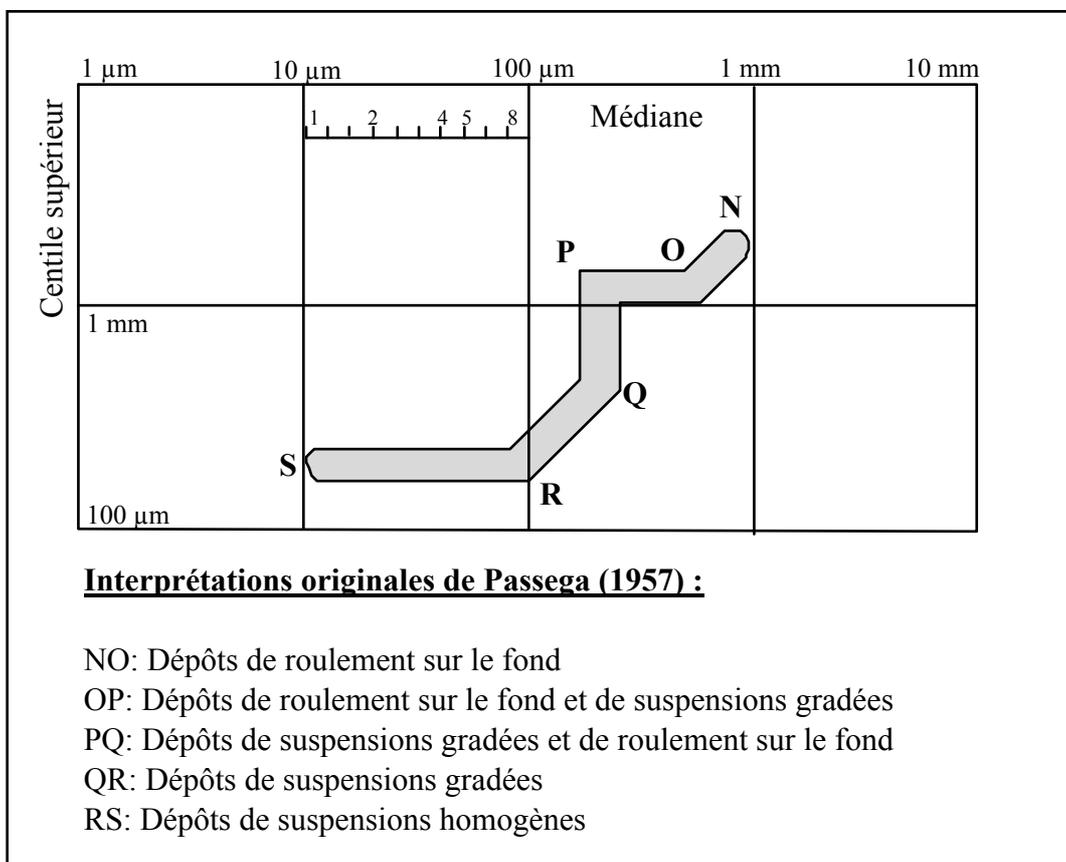


Figure II-4 : Image C/M théorique des dépôts fluviaux d'après Passega (1964)

II – 2. Minéralogie des Argiles

Cette étude a été réalisée sur tous les échantillons du remplissage lagunaire, sur des formations de substrat de l'arrière pays et sur les échantillons de cordon littoral. Les analyses minéralogiques des échantillons bruts et des fractions argileuses.

III – 2. 1. Préparation des échantillons :

La technique utilisée est celle décrite par HOLTZAPPEL (1985). Le sédiment fin est délité dans l'eau distillée et défloculé à l'eau oxygénée, décarbonatée à HCl et homogénéisé par agitation. Après centrifugation le culot obtenu est étalé sur une lame de verre en agrégats orientés. Trois lames sont préparées :

- Lame normale
- Lame glycolée : gonflement à l'éthylène glycol pendant 24 heures
- Lame chauffée : chauffage à 450°C pendant 40mm

III – 2. 2. Analyse à la diffraction X:

Les mesures ont été effectuées pour les argiles sur des lames avec dépôt orienté par sédimentation de l'échantillon.

Les mesures XRD ont été réalisées à l'aide d'un diffractomètre SIEMENS type D500 avec anode de cuivre, longueur d'onde=1,5418 angström, avec monochromatisation du rayonnement diffracté sur un cristal de graphite pour éliminer l'effet de fluorescence provenant de l'échantillon. Le détecteur est du type scintillateur. La vitesse de balayage du goniomètre est de 1° par minute pour un intervalle de mesure de 2° à 30° en 2 thêtas. La tension appliquée au tube est de 45Kv et 35 mA.

Les analyses minéralogiques totales sont réalisées sur des préparations désorientées sur support en quartz monocristallin (type zéro background). L'intervalle de mesure est de 4° à 90° en 2 thêtas. La vitesse de balayage est de 0,5° par minute. La gestion et le traitement des mesures sont identiques à ceux des argiles.

II – 3. Analyses géochimiques

II – 3. 1. Géochimie organique

La matière organique s'associe aux particules minérales des sédiments marins, particulièrement aux argiles en formant des complexes argilo- humiques. Bien qu'elle soit en quantité réduite, elle détermine les principales propriétés des complexes. Les complexes minéraux qui leurs sont associés orientent ou catalysent l'ensemble des transformations de la matière organique qui constitue l'humification. Par ailleurs, la matière organique conditionne la solubilité, la mobilité et la concentration de certains éléments métalliques (Manskaya et al, 1968 ; Pillai et al. 1971 ; Rashid, 19714 ; Rashid et Leonard, 1973). Elle constitue, en effet, un vecteur essentiel de certains éléments métalliques en milieu aqueux (Duursma et Stevenhysen, 1966). Les liens, plus ou moins stables, qui aboutissent à la formation de complexes organominéraux caractérisent un état d'équilibre (Debyser, 1959). De plus, Cauwet (1985) montre que la matière organique participe activement à plusieurs mécanismes physico-chimiques dont certains ont des conséquences directes sur la sédimentation côtière. Ainsi l'approche géochimique peut offrir des informations complémentaires dans la compréhension des mécanismes sédimentaires.

Les teneurs en carbone organique particulaire (COP %) et total (COT %) ont été mesurées par la méthode coulométrie à l'aide du coulomat 702. Ces analyses ont été effectuées au département de Géologie et d'Océanographie de Bordeaux I (France).

II – 3. 2. Géochimie minérale

La composition chimique du sédiment brut a été obtenue à partir des mesures effectuées à l'aide d'un spectromètre de fluorescence des rayons- X de marque Siemens type SRS 3000 équipé d'un tube avec anode de rhodium. Les conditions opératoires sont celles décrites par Lapaquellerie. Deux types d'analyses ont été réalisés :

Les éléments majeurs (Si, Al, Fe, Ti, Ca, Mg, K, Mn, F, P, Na et Cl) par la technique de dilution ; les échantillons broyés sont ensuite fondus à 1050 °C. Les teneurs exprimées sont celles des oxydes.

Les éléments traces (Ni, Cu, Zn, Pb, Cr, Br, V, Y et Rb) sont analysés directement sur les échantillons finement broyés et séchés à 105 °C.

Les droites d'étalonnage des différents éléments chimiques ont été calculées à partir des mesures des étalons suivants: AC-E, AL-I, AN-G, BE-N, BR, BX-N, DR-N,DT-N, FK-N, GA, GS-N,GXR-1, GXR-3, IF-G,MA-N,Mica-Fe,Mica-Mg,SO-1, SO-2,SO-4,Sy-2, Sy-3,UB-N et VS-N. La précision est de 1% relatif et l'erreur est de +/- 0,4% relatif. La limite de détection pour les éléments en traces est de 5 mg/kg.

La teneur en eau des sédiments mesurée par la perte de feu à 1000 °C. En effet, il existe deux types d'eau :

1- L'eau hygroscopique (H₂O) qui se fixe sur les composés en conservant son individualité, elle correspond à la perte au feu subie à l'étuve à 200 °C.

2- L'eau de constitution (H₂O⁺) qui se combine avec les composés, elle correspond à la perte de feu à 1000 °C.

A partir des teneurs des métaux mesurées au fond de la carotte, nous avons calculé le degré de contamination (C_d) des dépôts selon la formule de Hakanson (Hakanson L., 1980) définie pour les sédiments lacustres. Le facteur de contamination calculé correspond au rapport des concentrations mesurées à la surface sur les concentrations mesurées au bruit de fond géochimique de la carotte. Le C_d est la somme de tous les facteurs de contamination (Tableau II-4).

Tableau II- 4 : Degré de Contamination "C_d" selon Hakanson (1980)

Degré de Contamination (C_d)	Etat de la Contamination
< 6	Contamination faible
6 – 12	Contamination modérée
12 - 24	Contamination considérable

II – 4. Calcimétrie

La teneur en carbonates des sédiments bruts a été déterminée à l'aide d'un calcimètre de Bernard. Le principe est de décarbonater une masse de 500 mg d'échantillon broyé par l'acide chlorhydrique (N/2).

L'essai s'effectue sur 500 mg d'échantillon finement broyé et bien représentatif de la totalité de la fraction fine. Après attaque à l'acide chlorhydrique (N/2) qui réagit avec les carbonates selon la formule suivante :



Ce qui entraîne un dégagement de CO₂ proportionnel à la quantité de carbonates présents dans le sédiment en tenant compte de la température ambiante lors de chaque manipulation. Un échantillon référence (100% de CaCO₃) a été dosé. Le pourcentage de carbonates dans les sédiments est calculé par rapport à l'échantillon de référence.

II – 5. pH des sédiments

Le pH est un paramètre complexe dont la valeur dépend de nombreux facteurs chimiques (présence de carbonates..), physique (échange air-océan..) et biologiques (balance entre l'activité photosynthétique du milieu et son activité saprophytique..). Le pH des sédiments a été déterminé à l'aide d'un ph-mètre électronique sur des échantillons bruts trempés dans l'eau distillée pendant quatre heures et mélangés de temps en temps par un agitateur magnétique.

II – 6. Analyses statistiques

Afin d'établir les corrélations entre les différentes variables régissant le fonctionnement de système lagunaire, de grouper les individus en populations homogènes et de dégager les tendances générales, nous avons appliqué un traitement statistique aux nombreuses données acquises tout au long de cette étude. L'analyse des corrélations a été utilisée pour traitement statistique des données des 30 échantillons du sédiment d'après les recommandations de Basilevsky (1994). Les analyses statistiques ont été faits en utilisant le logiciel STATISTICA.

APPROCHE SEDIMENTOLOGIQUE

I - CARACTERES SEDIMENTOLOGIQUES DES DEPOTS SUPERFICIELS.....	77
I-1- le pH et les teneurs en CaCO ₃	77
I-2- Etudes granulométriques.....	78
I-2-1 Répartition des faciès.....	80
I-2-1-1. Faciès sableux.....	80
I-2-1-2. Faciès silto-sableux.....	83
I-2-1-3. Faciès silto-argileux.....	84
I- 2-2 Analyse et interprétation des variations granulométriques...	85
I- 2-3 Test Passega.....	88
I- 2-4 Methode des moments linéaire.....	91
I- 2-4-1 signification et mode d'utilisation des paramètres..	92
I-2-4-2 Test : Moyenne – Médiane.....	93
I- 3- Conclusion.....	93
II - CARACTERES SEDIMENTOLOGIQUES DES DEPOTS CAROTTES.	95
II-1 Description des carottes.....	95
II.2 Granulométrie des dépôts.....	96
II.2.1 Faciès silteux.....	96
III.2.2 Faciès sableux.....	100
III.2.3 Conclusion.....	100
III.3 Variations granulométriques et dynamique du dépôt	100
III.4 Conclusion.....	104
III- CONCLUSION.....	104

Partie III :

APPROCHE SEDIMENTOLOGIQUE

L'étude des dépôts de la lagune de Sidi Moussa a pour but de préciser les caractéristiques sédimentologiques des principaux faciès, afin de déterminer les conditions du milieu de dépôt. L'examen de leur répartition dans l'espace et dans le temps nous permettra de proposer une reconstitution paléogéographique de cette lagune. Les différents résultats d'analyses sont présentés sous forme de cartes de répartition des divers paramètres sédimentologiques.

I - CARACTERES SEDIMENTOLOGIQUES DES DEPOTS SUPERFICIELS

Les caractères sédimentologiques des dépôts de lagune de Sidi Moussa permettront de comprendre la répartition spatiale des sédiments lagunaires.

I-1- pH et les teneurs en CaCO₃

I-1.1- pH des sédiments

Les pH dans les sédiments lagunaires sont basiques. Quelques variations sont enregistrées dans la zone intertidale en particulier au niveau des schorres (7,9 à 8,6) alors que les valeurs, dans les chenaux sont toujours supérieures à 8.

I-1.2- Teneurs en carbonates

Les carbonates ont plusieurs origines possibles :

- Origine biodétritique, donnant des débris de divers organismes notamment ceux de mollusques sous forme d'aragonite et de calcite, tests de foraminifères, maërl, etc.... ces débris constituent souvent une part importante des sédiments dans les zones côtières. Ils s'accumulent parfois dans les aires à thanatocénose où ils constituent la quasi intégralité des sédiments.
- Origine biogénique, dans ce cas, ils sont essentiellement bactériens (Castanier, 1987).
- Une origine détritique, sous forme de carbonates particulières issus de l'extérieur du bassin lagunaire.
- Une origine chimique, en très faible part, de la précipitation des carbonates dissous d'origine marine ou continentale.

Cette précipitation est provoquée par l'augmentation de pH du milieu aquatique sous l'effet des phénomènes biochimiques. Selon Debyser (1961), les sédiments constitués par un mélange de coquilles et de vases, ce qui est le cas en de nombreux endroits de la lagune de Sidi Moussa, dépendent pour la teneur en carbonates de l'abondance des organismes à tests carbonatés.

La répartition des teneurs en carbonates montre une différenciation entre la zone amont et la zone avale de la lagune (figure III-1), les sédiments peuvent être très carbonatés avec des teneurs allant de 16,32 % à 80,56 % selon les lieux de prélèvement.

Dans la zone aval « zone de l'embouchure », où se déroule une activité conchylicole, les carbonates sont notamment d'origine biodétritique. Ils proviennent de la sédimentation des débris coquilliers et des tests de la microfaune calcaire. Les valeurs sont élevées et peuvent atteindre jusqu'à 80,56 %.

Dans la zone amont « vers les marais salants », les teneurs en carbonates sont moyennement faibles (16,32 %). Elles sont surtout liées aux activités biologiques, ainsi qu'à la précipitation des apports continentaux parvenus dans le système par ruissellement.

Les sédiments de la lagune de Sidi Moussa renferment des teneurs en carbonates toujours supérieures à 20%. Les teneurs les plus faibles se rencontrent dans la zone des marais salants.

I-2- ETUDES GRANULOMETRIQUES

L'étude des sédiments superficiels de la lagune de Sidi Moussa, à l'aide d'un microgranulomètre laser, nous a permis d'une part, de caractériser en détail la granulométrie de la couverture sédimentaire actuelle au sein de la dépression et, d'autre part, d'établir les variations spatiales de ces caractères.

Les distributions granulométriques sont regroupées en 7 fractions : $<5\mu\text{m}$, 5-15 μm , 15-30 μm , 30-63 μm , 63-125 μm , 125-250 μm et $>500\mu\text{m}$. Les teneurs de ces différentes fractions granulométriques montrent des variations notables au sein de la lagune permettant de distinguer trois types de faciès qui sont de la zone de la passe principale vers la zone des marais salants (figure III-2) :

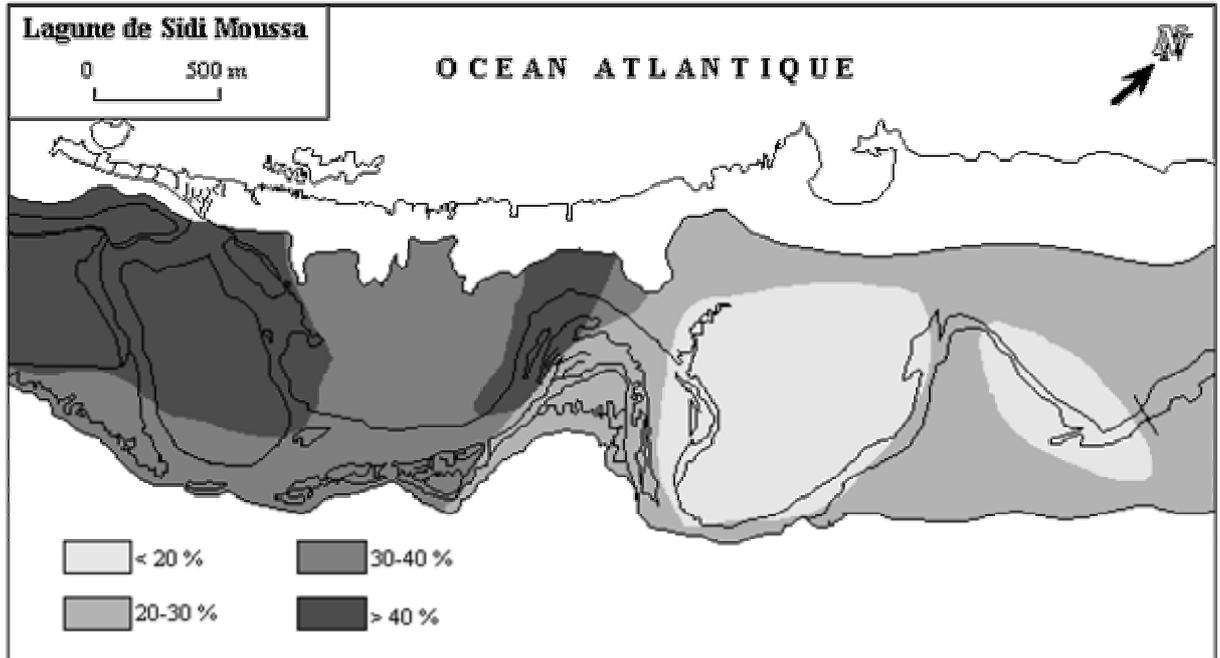


Figure III-1 : Teneur en carbonates dans les sédiments superficiels de la lagune de Sidi Moussa

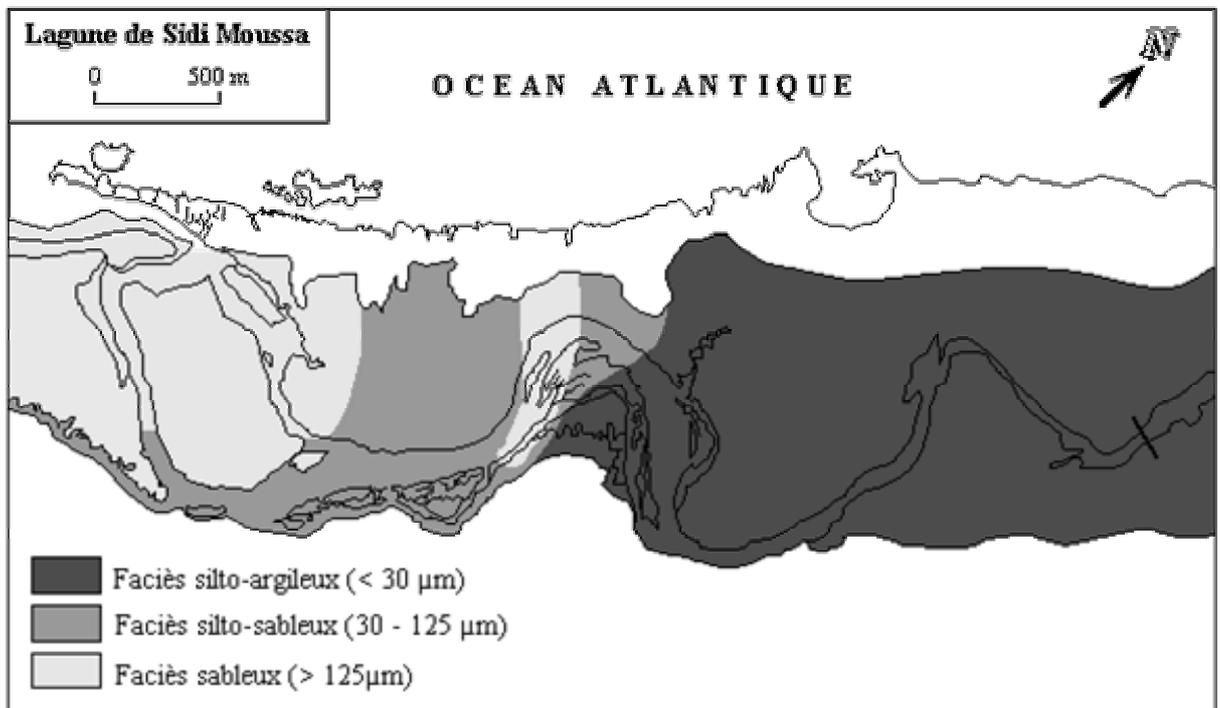


Figure III-2 : Répartition des faciès sédimentaires dans la lagune de Sidi Moussa

- Un faciès sableux, qui occupe la zone de la passe et le delta de marée interne, il s'agit d'un sable fin à moyen (125-250 μm) riche en débris coquilliers de lamellibranches et de gastéropodes. Ce faciès représente 30 % des dépôts de la lagune.

- Un faciès silto-argileux, le plus répandu dans la lagune et représente 55%. Ce faciès caractérise la zone intertidale et les schorres (zone amont). Il est riche en débris ligneux des plantes halophiles. Cependant, on note un enrichissement de la fraction fine (<15 μm) vers l'amont de la lagune.

- Un faciès silto-sableux, se localise au niveau des chenaux de marée et des slikkes au niveau de la zone médiane de la lagune. Ce faciès représente 15 % des dépôts lagunaires.

I-2-1 Répartition des faciès :

I-2-1-1. Faciès sableux :

Il caractérise la zone des passes, la sablière et le chenal principal ; avec des valeurs entre 45% et 90%. Dans le secteur médian de la lagune des accumulations de sable sont signalées en bordure du cordon littoral.

L'étude granulométrique de la fraction sableuse permet de caractériser les dépôts et de se renseigner, par conséquent, sur les facteurs régissant le transport des sédiments ainsi que sur les conditions de leur mise en place.

2-1-1-1. La moyenne granulométrique

La moyenne granulométrique des sables se situe entre 120 et 430 μm (figure III-3). Il est à noter qu'au niveau de la passe la moyenne enregistre son maximum (430 μm).

2-1-1-2. Le mode granulométrique

L'analyse des modes granulométriques montre deux types de dépôt :

- un sable unimodal avec des modes supérieurs à 310 μm , c'est un sable grossier qui caractérise la zone de la sablière et la partie amont du chenal. Le transport est régi essentiellement par la dynamique marine.

- un sable bimodal avec des modes principaux de 100 μm et 250 μm , c'est un sable moyen, qui se localise aussi bien au niveau du chenal principal de la lagune. Le transport des particules est aussi bien régi par les courants de marée que par la dynamique intralagunaire.

2-1-1-3. L'écart type

La carte de répartition de l'écart type (figure III-4) montre des dépôts présentant un classement modéré (0,5 à 1) qui caractérise essentiellement la zone de la sablière et la zone des passes. Les sables mal à très mal classés (l'écart type est supérieur à 1) sont localisés essentiellement au niveau du secteur amont de la lagune et au niveau de la zone longeant le cordon dunaire, à proximité, de la passe.

2-1-1-4. Le Skewness

Globalement, la carte de répartition du skewness, montre deux types de dépôts (figure III-5) :

- Des sables à asymétrie négative forte localisés au niveau de la sablière ;
- Des sables à assymétrie positive qui longent le cordon dunaire vers le NE et des sables à asymétrie positive qui caractérisent le chenal de la lagune et les zones intertidales avales.

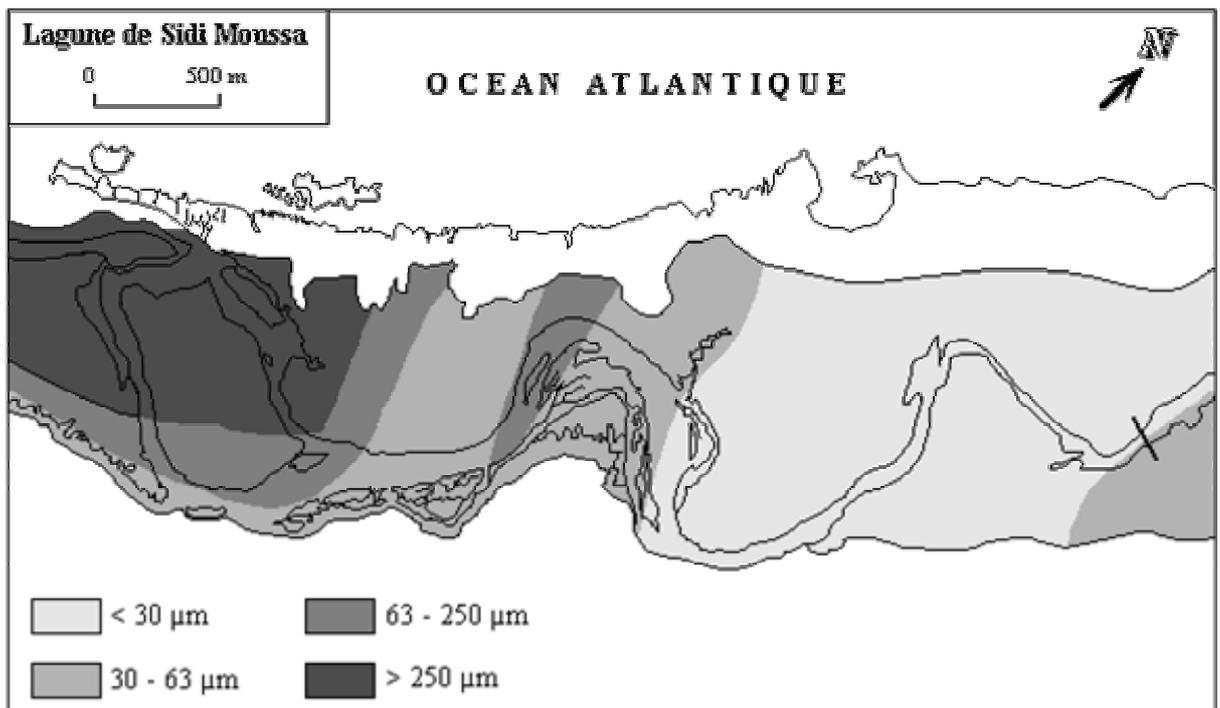


Figure III-3 : Répartition spatiale de la moyenne granulométrique dans la lagune de Sidi Moussa

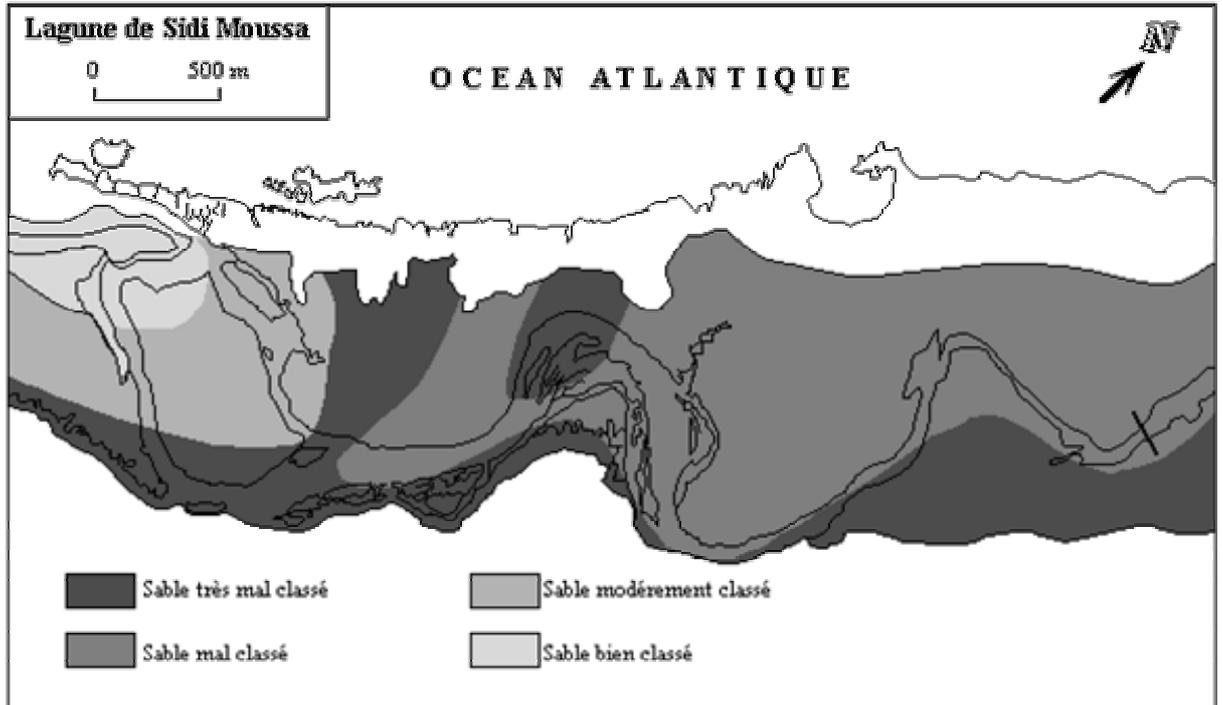


Figure III-4 : Répartition spatiale de l'écart-type granulométrique dans la lagune de Sidi Moussa

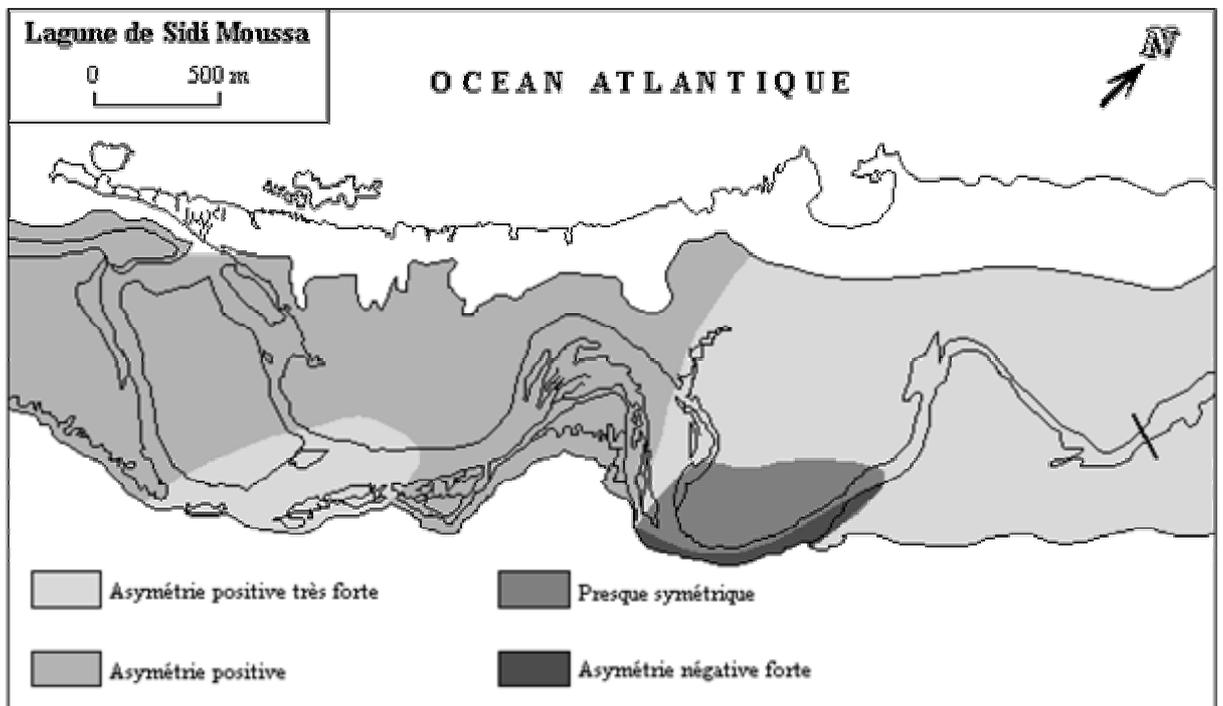


Figure III-6 : Répartition spatiale de Skewness dans la lagune de Sidi Moussa

I- 2. 1. 5. Conclusion

L'analyse des indices granulométriques de la fraction sableuse des sédiments superficiels de la lagune de Sidi Moussa montre que la répartition de cette fraction dépend essentiellement de deux facteurs hydrodynamiques.

Le faciès sableux, qui caractérise la zone de la passe et la sablière, est généralement constitué de sables, qui présentent les mêmes caractéristiques que les sables des plages de part et d'autre de la passe (Mzari, 2002). Ils peuvent être divisés en deux groupes :

- Des sables moyens (78%) bioclastiques qui forment le delta de marée interne, l'écart type montre que ces dépôts présentent un classement modéré (0,5 à 1). Ces sables qui peuvent avoir comme origine le littoral adjacent sont remobilisées par la dérive littoral dominante orientées SW-NE (Zourarah, 2002). Ils sont repris par la dynamique intralagunaire et repartis à l'intérieur pour former la sablière ;

- Des sables fins (18%), mal à très mal classés, qui occupent la bordure lagunaire et une partie de la zone amont. Ces sables fins rappellent les sables des cordons dunaires. Le vent pourrait jouer un rôle important dans l'alimentation de la lagune en sables de ce type de sable. Ainsi, l'érosion éolienne, quand à elle, est beaucoup plus importante, du fait de la texture très légère du sol en surface alliée au surpâturage.

2-1-2. Faciès silto-sableux :

Ce faciès se localise au niveau des chenaux de marée et des slikkes au niveau de la zone amont de la lagune, à la suite de diminution de la profondeur et l'augmentation de l'énergie du milieu. Se sont généralement des sédiments bimodaux avec un mode principal qui se situe entre 120 et 180 μm ; la moyenne est d'environ 40 à 120 μm . le taux de CaCO_3 se situe entre 30 et 60 %. Ils sont mal classés à modérément classés. Leur Skewness indique des courbes cumulatives asymétriques vers les sédiments fins, ce qui marque une grande hétérogénéité des sédiments et qui par la suite montre une dynamique très variée.

2-1-3. Faciès silto-argileux :

La fraction silteuse est bien représentée au sein de la lagune. Aussi, les teneurs les plus faibles sont observées dans la zone des passes et de la sablière, en relation avec l'hydrodynamique importante, liée au courant de marée. Au niveau des chenaux, la fraction silteuse augmente et passe à des valeurs comprises entre 10% et 75%. Au niveau des slikkes et des schorres, les silts sont les plus élevés. Le taux des carbonates est de 10 à 30 %, il est surtout d'origine biogène. L'analyse de cette fraction par microgranulomètre montre qu'elle est formée de quatre classes granulométriques : les silts grossiers ; les silts moyens ; les silts fins et les argiles définies par Rivierre (1977).

2-1-3-1. Les silts grossiers (63 μ m et 30 μ m)

Les silts grossiers sont peu représentés (11%) et sont localisés au niveau de la zone aval du chenal. Les faciès paraboliques sont dominants, et les taux des argiles sont très faibles (< à 5%). La médiane se situe entre 40 μ m et 50 μ m.

2-1-3-2. Les silts moyens (entre 15 μ m et 30 μ m)

Les silts moyens sont bien représentés dans la zone du chenal et dans les slikkes de la zone aval de la lagune, ils représentent 12,82% de la répartition des faciès lagunaires. Ce sont des silts plurimodaux avec des taux des argiles relativement faibles (< 10%). La comparaison des courbes cumulatives avec les courbes canoniques de Rivierre (1977) montre que le faciès logarithmique est dominant ; ce qui témoigne d'un dépôt par excès de charge, à la suite de la diminution de la compétence de l'agent de transport. La médiane se situe généralement entre 16 μ m et 22 μ m.

2-1-3-3. Les silts fins (entre 15 μ m et 5 μ m)

Les silts fins se localisent essentiellement dans la majeure partie des slikkes et schorres de la lagune, ils représentent 14,42% des sédiments lagunaires. Au niveau du secteur amont se sont des silts unimodaux à plurimodaux. La comparaison des courbes cumulatives avec les courbes canoniques de Rivierre (1977) montre que le faciès hyperbolique domine avec, toute fois, un faciès logarithmique qui apparaît. Le taux des argiles varie entre 10% et 29% et la médiane se situe entre 10 μ m et 12 μ m.

2-1-3-4 Les argiles (< 5µm)

Les argiles sont bien représentées dans la zone intertidale et les schorres de la zone la plus en amont de la lagune. Ce faciès représente 12,73% des faciès lagunaires. Le taux des argiles dépasse les 25% et la médiane se situe entre 3,9µm et 2,5µm. La comparaison des courbes canoniques de Rivière (1977) montre qu'il s'agit d'un faciès hyperbolique. C'est une vase très évoluée déposée dans un milieu calme par excès de charge sans remaniement ultérieur.

2-1-3-5. Conclusion

La zone intertidale de la lagune est caractérisée par un faciès argilo silteux. Ces zones peuvent être considérées comme des dépressions à faible hydrodynamisme avec une sédimentation procédant par décantation et floculation des argiles. Il s'agit d'une vase dont on enregistre, depuis la zone de la passe principale vers les marais salants, une nette diminution de la médiane et une augmentation des taux des silts fins, marquant ainsi un gradient énergétique décroissant dû à la diminution de la compétence des courants de marée.

I-2-2 Analyse et interprétation des variations granulométriques

L'analyse des courbes cumulatives permet de distinguer trois types de faciès :

1-Faciès logarithmiques à sublogarithmiques, à dominance argileuse, caractérise surtout les milieux calmes, les sédiments sont déposés par excès de charge lors de la diminution de la vitesse de transport (figure III-7, B2).

2-Faciès hyperbolique, à dominance silto-argileux, caractérise surtout les milieux calmes ou les zones protégées, les sédiments sont déposés par décantation de «suspensions uniformes» (figure III-7, A1 ; B2).

3-Faciès parabolique, à dominance sableuse, caractérise surtout les milieux agités. Les formes des courbes cumulatives permettent de distinguer les types suivants :

1- Des courbes de caractère parabolique à indice $N > 0$, correspondent à des sédiments cheminant essentiellement par roulement et saltation courte. C'est un faciès régressif (Figure III-8, C2).

2- Des courbes qui ont le même caractère que les précédents mais de maturation plus accentuée pour la même moyenne (Figure III-8, D2).

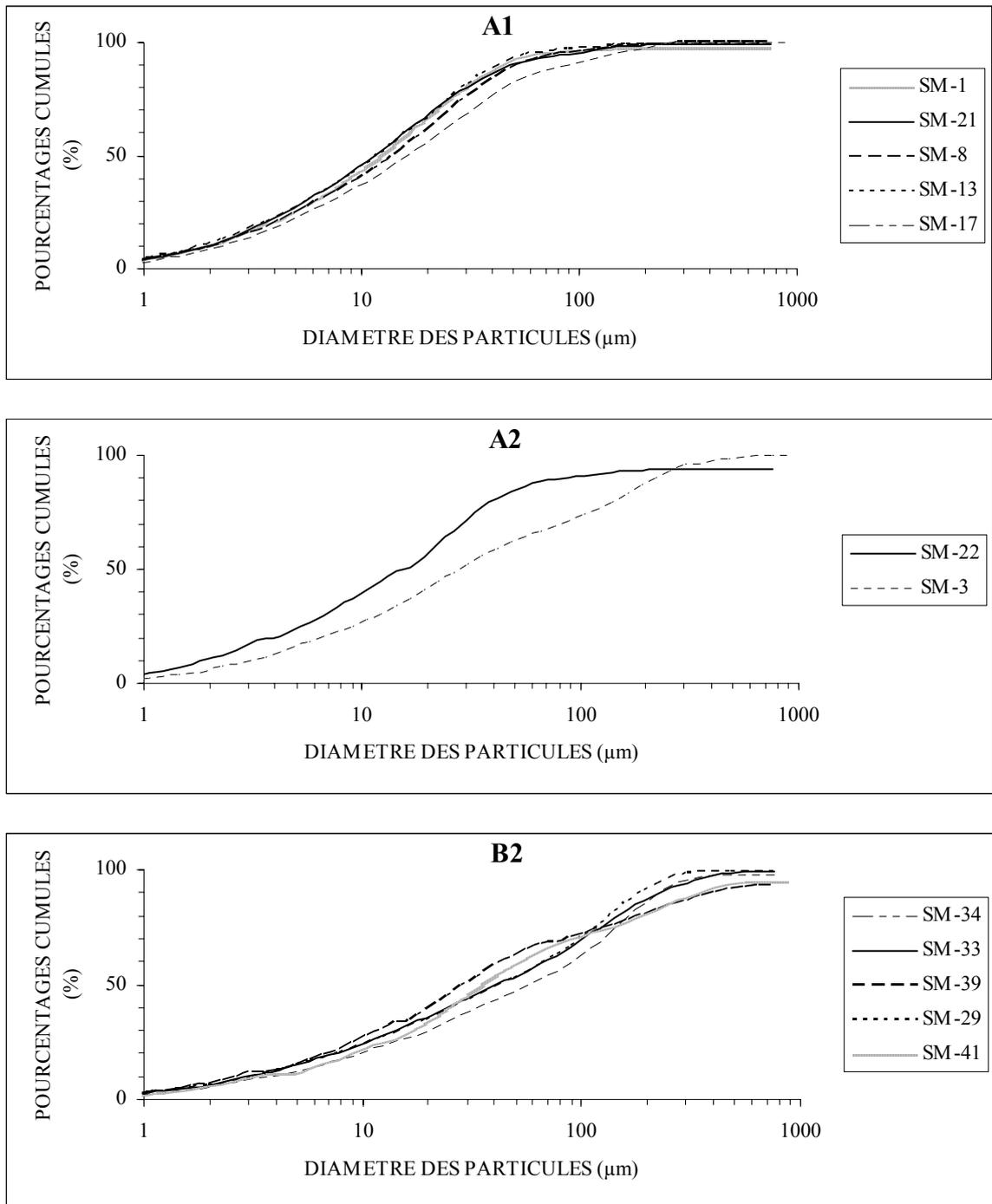


Figure III-7 : Exemples de courbes cumulatives des sous-classes (A1, A2 et B2) des sédiments superficiels de la lagune de Sidi Moussa

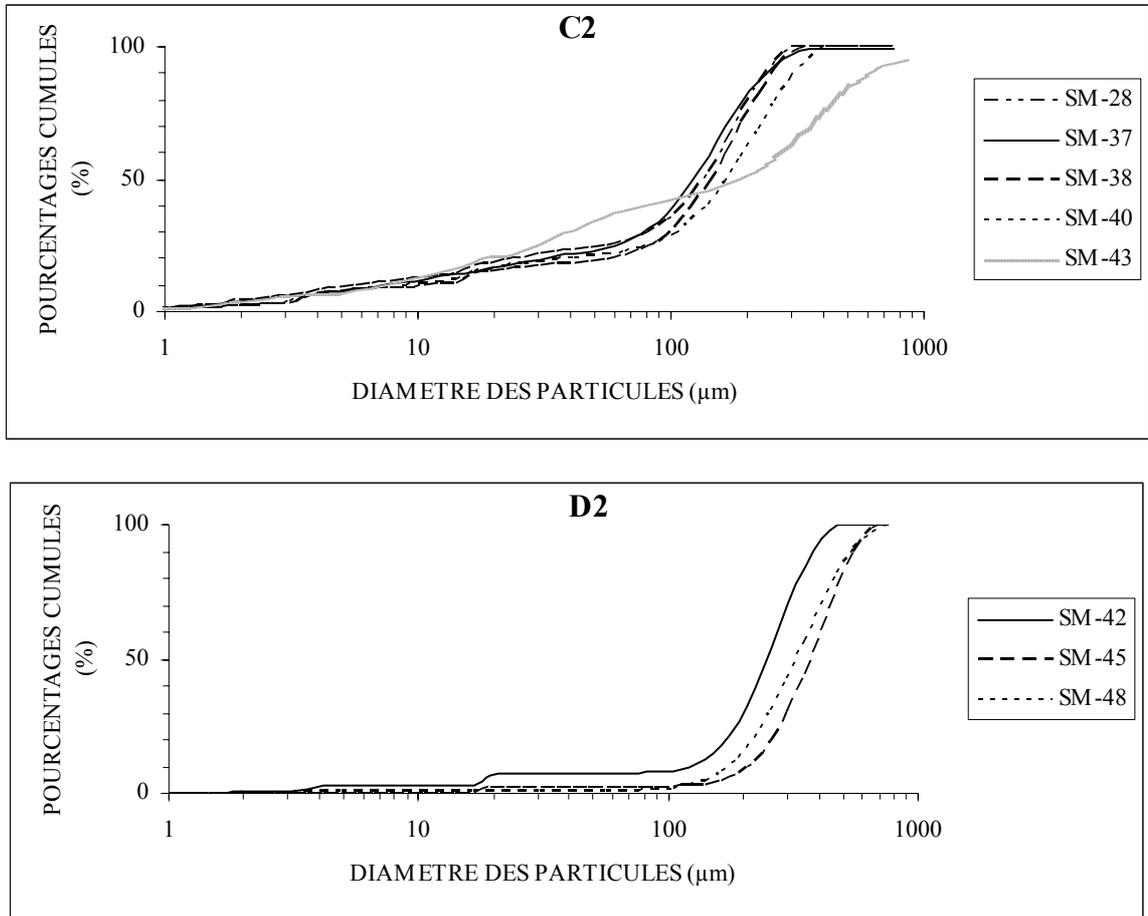


Figure III-8 : Exemples de courbes cumulatives des sous-classes (C2 et D2) des sédiments superficiels de la lagune de Sidi Moussa

I-2-3 Test Passega

La méthode développée par Passega, pour l'interprétation des données granulométriques et appliquée aux échantillons superficiels de la lagune de Sidi Moussa a permis de retrouver les principaux faciès granulométriques.

Pour chaque échantillon les différents paramètres et indices statistiques granulométriques ont été calculés à partir des courbes cumulatives. Chaque échantillon a été ensuite positionné dans un diagramme C/M (Figure III-9). à partir de l'image C/M, les échantillons ont été regroupés en 2 classes par tranches croissantes de l'unpercentile. En fonction des valeurs de la médiane, on a défini quatre sous-classes : entre 15 et 30µm, entre 30 et 100µm, entre 100 et 250µm et > 250µm. A ces sous classes, sont attribués les lettres : A, B, C et D par ordre croissant de la médiane.

Le tableau III-1 présente les valeurs moyennes de différents paramètres statistiques pour chaque classe ainsi définie :

Tableau III-1 : Indices granulométriques des différentes classes granulométriques des sédiments superficiels de la lagune de Sidi Moussa

Sous classe	Echantillons	Q 25	Q 50	Q75	Q 99	Moy.	Ecart-type	Skew.	SI (trask)
A1	SM-1, SM-8, SM-13, SM-17 et SM-21	4,2	14,6	25,3	190,8	14,5	2	0,1	2,46
A2	SM-3 et SM-22	6,8	23,1	67,1	581,8	25,7	2,3	0,1	3,14
B2	SM-29, SM-33, SM-34, SM-39 et SM-41	10,5	48,1	115,4	477,0	38,4	2,4	0,6	3,32
C2	SM-28, SM-37, SM-38, SM-40 et SM-43	65,5	168,5	205,1	351,5	99,1	1,9	1,9	1,77
D2	SM-42, SM-45 et SM-48	232,7	380,8	443,2	754,2	356,7	0,9	4,2	1,38

Sous classe A1 : la médiane, Q 25, Q 75 et l'unpercentile sont faible. L'indice de classement indique un bon classement. Le Skewness indique une asymétrie positive, les courbes de fréquences sont unimodales et le mode principal se situe au niveau de la fraction argileuse et des silts fins. L'image C/M permet de les situer dans les suspensions homogènes uniformes au dessus de l'action du fond. Les courbes cumulatives montrent un faciès hyperbolique, ce qui caractérise les sédiments fins des vases lagunaires. Ceci montre que le dépôt se fait par décantation dans un milieu calme.

Sous classe A2 : la médiane, Q25, Q 75 sont faibles et l'unpercentile est plus élevé, il indique un enrichissement en particules plus fines. L'indice de classement indique un classement maximum de la fraction grossière. Le Skewness indique une asymétrie positive, les courbes de fréquences sont plurimodales et le mode principal se situe surtout dans les classes des argiles et les silts fins. L'image C/M permet de les situer dans les suspensions uniformes. Cependant, leur richesse en éléments grossiers montre que ces sédiments se sont déposés dans des conditions hydrodynamiques plus fortes que celles de la sous-classe A1.

Sous classe B2 : la médiane, Q25 et Q 75 sont faible et l'unpercentile est plus élevé, il indique un enrichissement en particules plus fines. L'indice d'asymétrie indique un classement maximum de la fraction grossiere, le Skewness montre une asymétrie positive très forte. La médiane se situe dans la fraction des silts moyens. Les courbes de fréquence sont plurimodales et le mode principal se situe dans la fraction de sables fins, ce qui montre que un transport des sédiments par des courants et dépositions par excès de charge lors de diminutions de vitesses. L'image C/M permet de se situer dans les suspensions homogènes.

Sous classe C2 : la médiane, Q25, Q 75 et l'unpercentile sont élevés. L'indice d'asymétrie indique un bon classement. Le Skewness montre une asymétrie positive très forte. Les courbes de fréquences sont plurimodales et le mode principal si situe dans la fraction de sables moyens, ils montrent que la déposition des matériaux transportés par des courants de marées. L'image C/M permet de se situer dans les suspensions gradées et de roulement sur le fond.

Sous classe D2 : la médiane, Q25, Q 75 et l'unpercentile sont plus élevés. L'indice d'asymétrie indique un bon classement. Le Skewness montre une asymétrie positive très forte. Les courbes de fréquences sont paraboliques. L'image C/M permet de se situer dans les dépôts par suspensions gradées et roulement sur le fond.

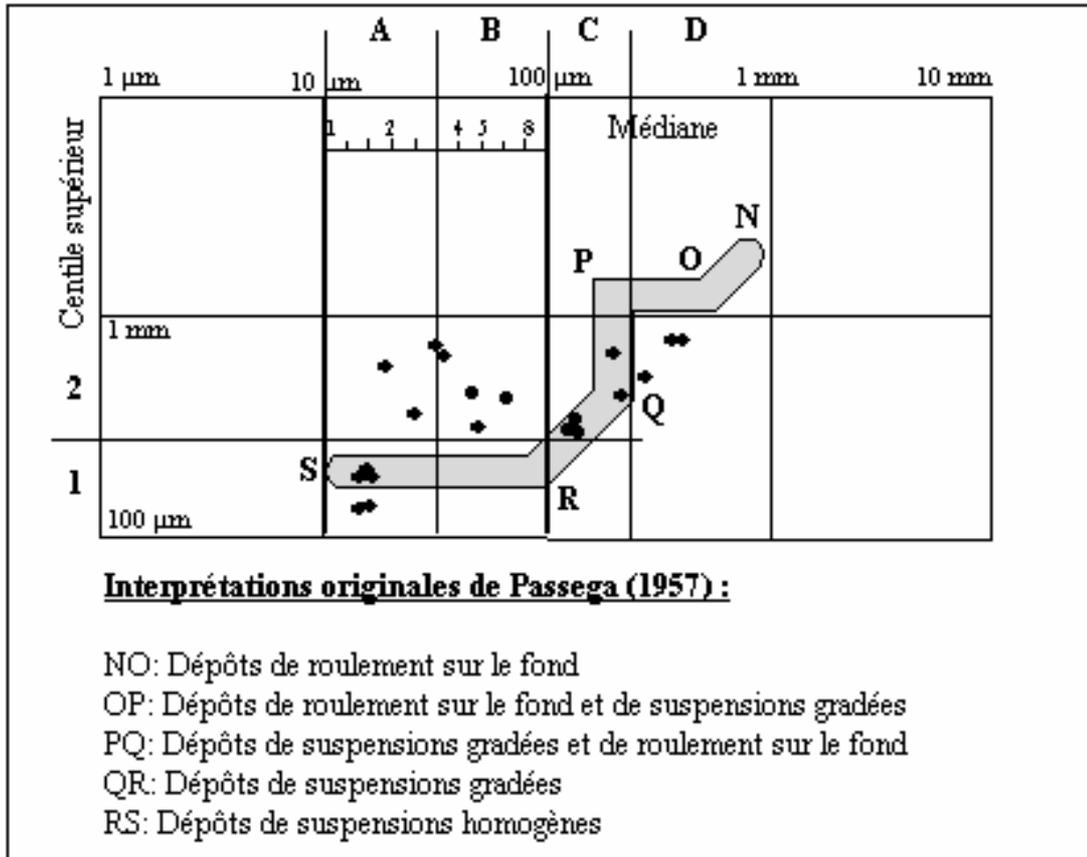


Figure III-9 : Relation entre la médiane et l'unpercentile pour les échantillons superficiels de la lagune de Sidi Moussa.

L'examen de ces données montre que, dans la lagune, les sédiments de la zone intertidale et des chenaux secondaires se déposent surtout sous forme de suspensions uniformes, ils semblent correspondre à des conditions de décantation dans lesquelles la vitesse du fond est nulle ou trop faible pour produire un classement quelconque. Ces dépôts de suspension uniformes sont caractérisés par une diminution de médiane non nécessairement corrélative d'une diminution de centile supérieur, et les points représentatifs se grouperont surtout au voisinage de la branche horizontale RS du digramme.

Les sédiments de la zone de la passe et delta de marée, sont caractérisés par des roulements sur le fond engendrés par des turbulences du fond, cette dynamique devient plus importante et correspond à une augmentation des éléments plus grossiers capable de produire un relèvement marqué du centile supérieur mais encore trop faible pour que la médiane soit modifiée. Ces grains auraient été transportés par roulement à la surface de la suspension gradée.

Les différentes sous-classes granulométriques distinguées dans le digramme de PASSEGA permettent de mettre en évidence les différents environnements de dépôts distingués dans la lagune de Sidi Moussa (tableau III-2).

Tableau III-2 : Environnements de dépôt des différentes sous-classes granulométriques distinguées d'après l'image de PASSEGA dans les sédiments superficiels de la lagune de Sidi Moussa.

Sous classe	Environnements de dépôt
A1	Courants tractifs, suspensions uniformes au-dessus de l'action directe du fond, le dépôt des sédiments par décantation «la vitesse du fond est nulle».
A2	Courants tractifs, suspensions homogènes perturbées par des apports légèrement grossiers, le dépôt des sédiments par décantation.
B2	Courants tractifs, suspensions dégradées liées à la turbulence du fond,
C2	Courants tractifs, transport par roulement sur le fond qui s'ajoute au transport en suspension, augmentation relative du pourcentage des éléments les plus grossiers.
D2	Courant tractif fort, transport par roulement des particules sur le fond.

La méthode de Passega est toutefois efficace, malgré quelque dispersions des points représentatifs des échantillons vraisemblablement liée à la perte relative d'information résultant du fait qu'elle utilise que deux paramètres punctiformes. Cette efficacité semble trouver son explication dans d'autres tests.

I-2-4 Méthode des moments linéaire

Les paramètres dérivés des moments statistiques ont l'avantage, par rapport aux paramètres empiriques traditionnels, de dépendre de l'ensemble de la distribution et non plus de points particuliers de celle-ci, ce qui réduit la perte d'information. Et on a intérêt à prendre comme référence des distributions théoriques plus proches des granulométries réelles. L'une des approches, la méthode des moments linéaires est purement statistique, la seconde, la méthode des indices d'évolution granulométriques repose maintenant sur la dynamique des phénomènes de transport et de sédimentation.

2 4-1. Signification et mode d'utilisation des paramètres

a- la moyenne

La moyenne caractérise la «grossièreté» moyenne des sédiments, et intervient comme variable indépendante ; elle ne donne lieu à aucun commentaire particulier sinon qu'en raison des corrélations signalées, les formes des distributions granulométriques sont statistiquement très dépendantes de cette moyenne.

La moyenne étant définie comme dans la méthode des moments statistiques et qui est égale à la largeur d'un rectangle dont la hauteur serait égale à $y = 100$ et la surface à l'aire comprise entre l'axe des ordonnées d'abscisse $X = 0,8$ ($x = 6,31 \mu\text{m}/100$) et la courbe granulométrique cumulative.

b- l'écart logarithmique moyen Elgm :

L'écart logarithmique moyen serait d'après l'analyse factorielle, le paramètre statistiquement le plus significatif. Par définition l'Elgm correspond à la largeur d'un rectangle dont la surface est l'aire comprise entre la courbe et sa corde. Cette aire se trouve être la différence entre la courbe et l'axe des y ($X=0$), c'est-à-dire 100 Moyenne et l'aire comprise entre l'axe des y et la corde, laquelle est égale :

$$100 \times \left[X_0 + \frac{(X_{100} + X_0)}{2} \right]$$

L'Eglm est égal :

$$\text{Elgm} = \text{Moy} - \frac{(X_{100} + X_0)}{2}$$

Dans les sédiments de chenal et de la zone intertidale de la lagune de Sidi Moussa, les valeurs de Elgm inférieures à 0 correspondent essentiellement aux dépôts par décantation. Au niveau de la zone de la marée interne les valeurs de l'Elgm sont proches de 0, caractérisant en principe l'évolution ultime de sédiments transportés par des courants et déposés par excès de charge. Elles correspondent au faciès logarithmiques. On notera qu'une fois atteint, ce type de faciès n'évolue souvent que lentement en milieu lagunaire littoral protégé.

2-4-2 Test : Moyenne – Médiane :

Le haut degré de corrélation linéaire liant en milieu fluvio-lacustre la moyenne à la médiane semble faire de ces deux paramètres un couple particulièrement intéressant.

Pour les sédiments transportés par suspension uniformes et déposés par décantation, la différence Moyenne – Médiane est négative ainsi que l'Elgm. Ce sont des faciès hyperbolique et au sens de Passega, ce sont des sédiments déposés par décantation en eaux calmes correspondant à des milieux lagunaires suffisamment étendus et profonds. Ce sont des sédiments très fins, vases et argiles, généralement caractérisés par la forme des courbes cumulatives semi-logarithmiques réellement amodale, à concavité vers le bas et caractérisées par des valeurs négatives de N qui définissent les faciès granulométriques hyperboliques. Ces derniers sont liés à une élimination préférentielle des particules les moins fines abandonnées les premiers au cours des phases ultimes du transport.

I-3- CONCLUSION

La couverture sédimentaire de la lagune de Sidi Moussa, bien abritée des houles et des courants de large, est constituée de deux types de dépôts, des sables bioclastiques mal classés, qui occupent le delta de marée interne d'origine marin, et des matériaux argileux terrigènes qui se localisent dans la zone amont de la lagune.

Le faciès sableux, qui caractérise la zone de la passe et la sablière, est généralement constitué de sables, qui présentent les mêmes caractéristiques que les sables des plages de part et d'autre de la passe (Mzari, 2002). Ils peuvent être divisés en deux groupes :

- Des sables moyens bioclastiques qui forment le delta de marée interne. Ces sables peuvent avoir comme origine le littoral adjacent et le proche plateau. Ils sont repris par la dynamique intralagunaire et repartis à l'intérieur pour former la sablière ;
- Des sables fins qui occupent la bordure lagunaire et une partie de la zone amont. Ces sables fins rappellent les sables des cordons dunaires. Le vent pourrait jouer un rôle important dans l'alimentation de la lagune en ce type de sables.

La zone intertidale de la lagune est caractérisée par un faciès argilo-silteux. Cette zone peut être considérée comme des dépressions à faible hydrodynamisme avec une sédimentation procédant par décantation et floculation des argiles. Il s'agit d'une vase dont on enregistre, depuis la zone de la passe principale vers les marais salants, une nette diminution de la médiane et une augmentation des taux des silts fins, marquant ainsi un gradient énergétique granodécroissant dû à la diminution de la compétence des courants de marée.

Le troisième faciès est silto-sableux. Il concerne les chenaux de marée où se manifeste la faiblesse de la bathymétrie avec une augmentation de la dynamique de milieu.

La méthode développée par Passega, pour l'interprétation des données granulométriques et appliquée aux échantillons superficiels de la lagune de Sidi Moussa a permis de retrouver les principaux faciès granulométriques :

- Les sables de la zone de la passe et de la sablière sont déposés par suspension gradée et par charriage, il s'agit, en effet, d'une zone de haute énergie.
- Les sables du chenal principal de la lagune sont apparentés aux segments PQ et QR du diagramme de Passega. Les dépôts sont effectués par suspension gradée : définie par l'auteur comme étant un dépôt de chenaux fluviaux où la charge a dépassé la capacité de transport. La vitesse sur le fond étant non négligeable c'est donc la suspension gradée qui domine dans le chenal.
- Les vases des slikkes et zones intertidales de la lagune sont transportées par suspension uniforme caractéristique des milieux de faibles profondeurs et de faible énergie.

Le test de Passega a permis de retrouver les milieux énergétiques déjà définis précédemment ; à savoir une zone de passe et un chenal avec une dynamique importante et une zone intertidale et les shoores avec une dynamique faible avec la mise en évidence d'un gradient énergétique décroissant, en allant de la zone de la passe vers l'extrémité NE de la lagune.

Les paramètres dérivés des moments statistiques, ont l'avantage d'être individuellement sédimentologiquement significatifs et renforcent les résultats déjà définis par la méthode de Passega. L'écart logarithmique moyen a pu déterminer deux milieux de dépôt ainsi définis précédemment :

- dépôts par décantation, au niveau de la zone intertidale et les schoores ;
- dépôts par excès de charge, au niveau de la zone de la passe et la sablière.

II - CARACTERES SEDIMENTOLOGIQUES DES CAROTTES PRELEVEES

Cinq carottes ont été prélevées, dans la zone de schorre actuel à l'aide de tubes plastiques manipulés à la main. La plus longue des carottes mesure 110 cm (Csm-4), la plus courte 65 cm (Csm-1). L'étude de l'évolution sédimentologique a porté sur deux carottes, l'une au niveau d'un schorre dans la zone intertidale de la lagune de Sidi Moussa (Csm-4) et l'autre dans l'extrémité amont près de la digue qui sépare les marais salants de la lagune (Csm-5).

II-1 Description des carottes

La carotte Csm-4

Elle est de 110 cm de longueur, l'évolution est marquée par un passage de la base au sommet d'une sédimentation grossière associée à des débris bioclastiques et des débris de coquilles de lamellibranches (de 110 cm à 90 cm) à une sédimentation plus silteuse (de 90 cm à 60 cm) avec une intercalation d'un niveau sableux riche en débris de coquilles, puis s'enrichit en débris végétaux et des coquilles de lamellibranches dans sa partie sommitale, formant une vase noire.

La carotte Csm-5

Sa longueur est de 85cm, elle atteint un substratum rocheux constitué de grès rouge. A la base de cette carotte, la sédimentation est grossière constituée des faciès de sables fins à moyens riche en débris bioclastiques, surmonté d'un niveau sableu-vaseux, puis les dépôts deviennent progressivement plus vaseux et riches en débris de mollusques et de végétaux avec un aspect noirâtre à la vase vers le sommet de la carotte.

II.2 Granulométrie des dépôts

Les deux carottes Csm-4 et Csm-5 ont fait objet d'une étude granulométrique plus détaillée. Les différents faciès reconnus dans la répartition spatiale de la lagune sont observés le long de la carotte. Globalement on observe un passage de vases argilo-silteuses à sablo-silteuse au sommet, à des sables bioclastiques à la base. Ainsi on rencontre dans les différents niveaux de la lagune :

II.2.1 Faciès silteux :

La fraction silteuse est bien représentée le long des carottes (62,45 % en moyenne). Elle marque des taux très élevés dans la partie sommitale (80,6 %) et commence à enregistrer des faibles pourcentages (44,3 %) dans la partie basale. L'analyse de cette fraction par microgranulomètre laser, montre qu'elle est formée de quatre classes granulométriques : les silts grossiers ; les silts moyens ; les silts fins et les argiles définies par Rivierre (1977).

II.2.1.1. La carotte Csm-4

II.2.1.1.1. Les silts grossiers (entre 30 μm et 63 μm)

Les silts grossiers sont bien représentés au niveau de la partie sommitale de la carotte (22,6%), le pourcentage des silts grossiers commence à enregistrer une diminution en passant vers la base de la carotte (5,6 %).

II.2.1.1.2. Les silts moyens (entre 15 μm et 30 μm)

Ils représentent 14,7 % de la répartition moyenne. Ils sont aussi bien représentés dans la partie sommitale (20,8 %) et commence à enregistrer légèrement des faibles pourcentages à la base de la carotte (8,9 %).

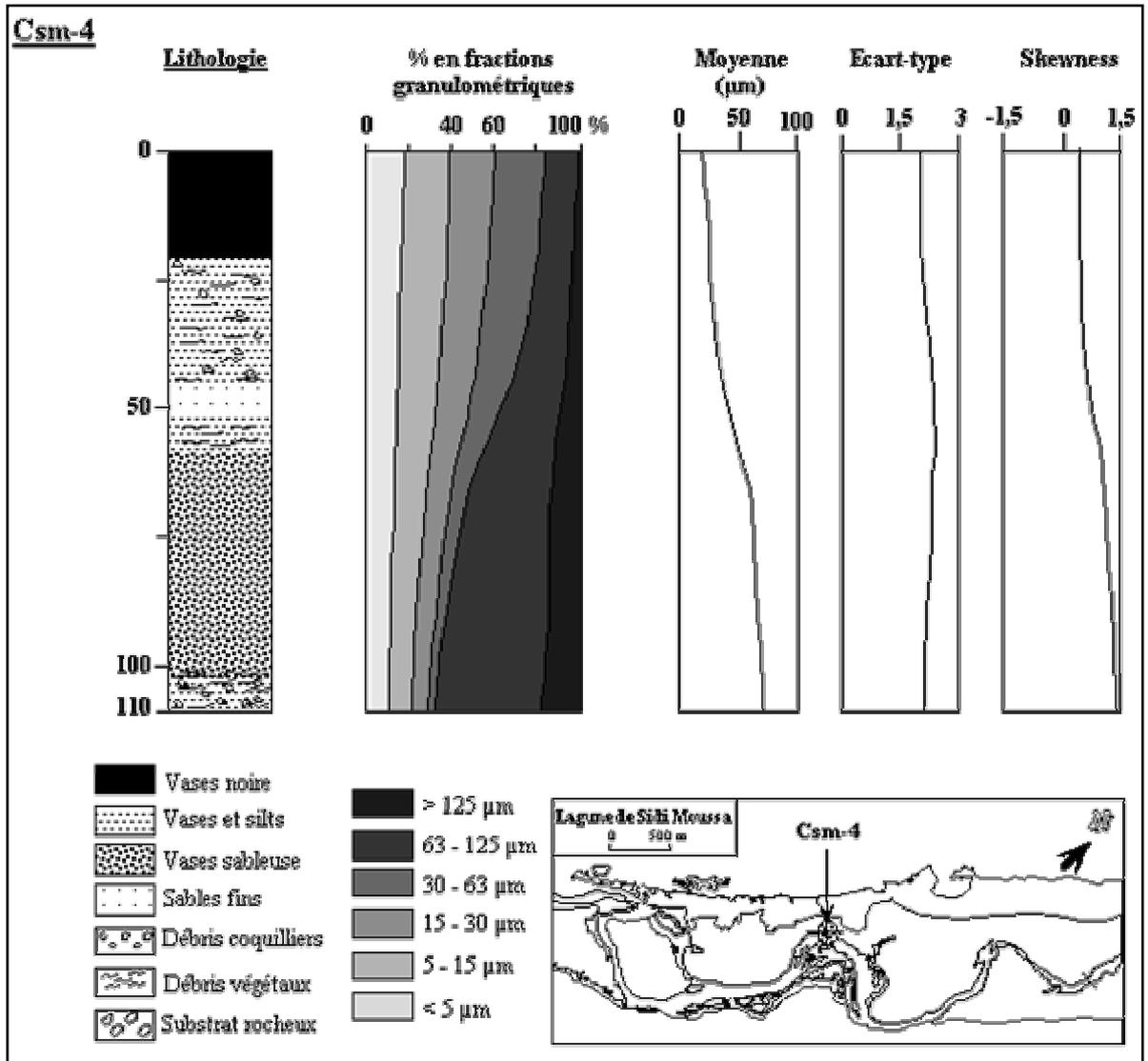


Figure III- 10 : Caractéristiques lithologiques et sédimentologiques de la carotte Csm-4

II.2.1.1.3. Les silts fins (entre 15 μ m et 5 μ m)

Ils se montrent la même répartition que les silts moyens, ils représentent 16,9 % de la répartition moyenne des faciès de la carotte. Ils sont bien représentés dans la partie sommitale (20,3 %) et marquent une régression au niveau de la partie basale (12,1 %).

II.2.1.1.4. Les argiles (< 5 μ m)

Elles sont bien représentées tout le long de la carotte (14,6 %), ce faciès ne marque pas une grande différence entre les pourcentages de la partie sommitale (16,9 %) et ceux de la partie basale (12,4 %).

II.2.1.2. La carotte Csm-5

II.2.1.2.1. Les silts grossiers (entre 30 μ m et 63 μ m)

Les silts grossiers représentent au niveau de la partie sommitale de la carotte 19,8% et commencent à enregistrer une diminution vers la base de la carotte (5,7 %).

II.2.1.2.2. Les silts moyens (entre 15 μ m et 30 μ m)

Bien représentés le long de la carotte, ils représentent 16,2 % de la répartition moyenne. Ils sont aussi bien représentés dans la partie sommitale (23,5 %) et commencent à enregistrer de faibles pourcentages à la base de la carotte (8,6 %).

II.2.1.2.3. Les silts fins (entre 15 μ m et 5 μ m)

Ils représentent 20,2 % de la répartition moyenne des faciès de la carotte. Ils sont bien représentés dans la partie sommitale (27,4 %) et marquent une régression au niveau de la partie médiane et basale (11,8 %).

II.2.1.2.4. Les argiles (< 5 μ m)

Elles sont bien représentées tout le long de la carotte (17 %), ce faciès ne marque pas une grande différence entre les pourcentages de la partie sommitale (21,7 %) et ceux de la partie basale (11,9 %).

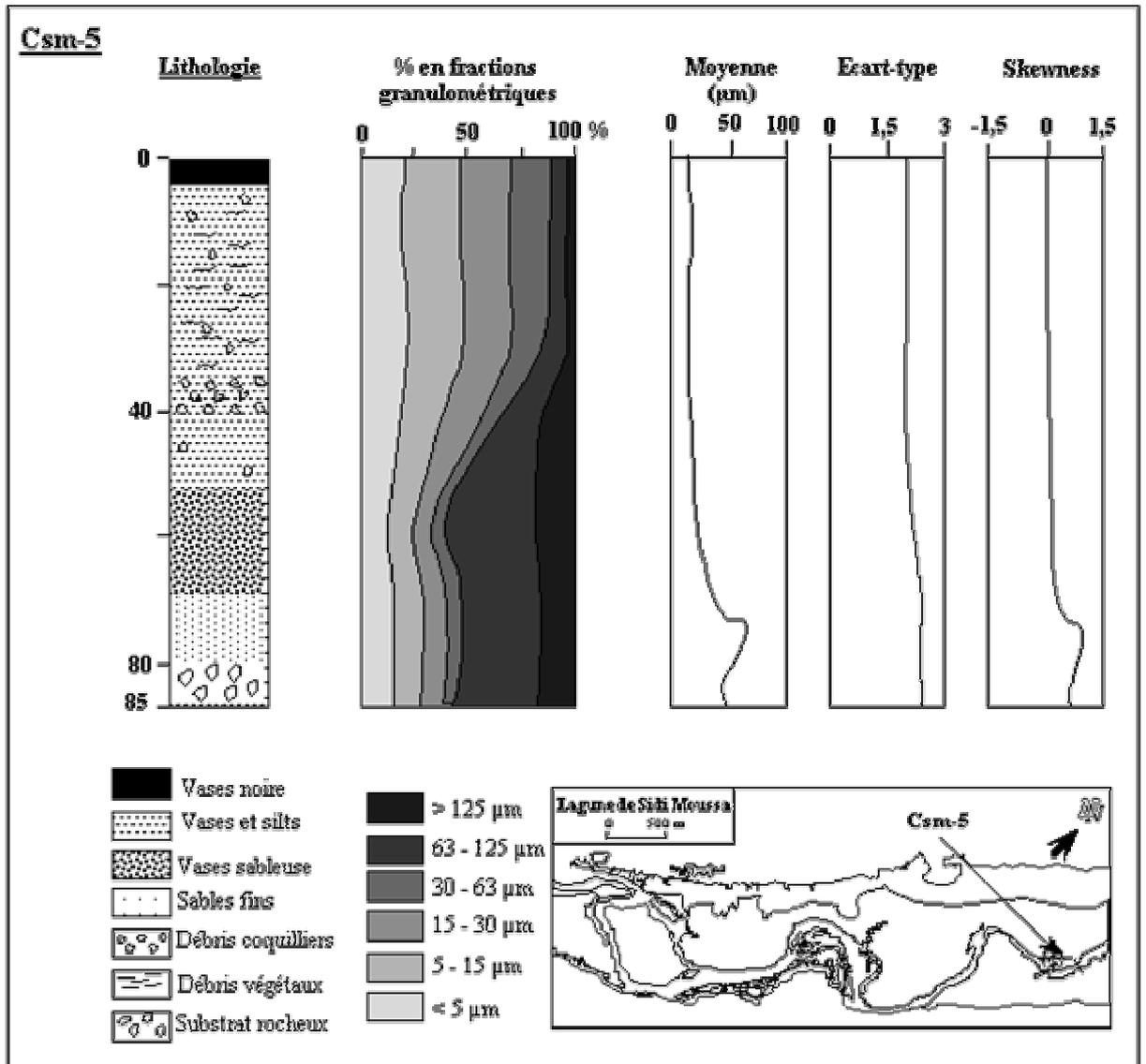


Figure III- 11 : Caractéristiques lithologiques et sédimentologiques de la carotte Csm-5

II.2.2 Faciès sableux :

L'étude granulométrique de la fraction sableuse permet de caractériser les dépôts et de renseigner, par conséquent, sur les facteurs régissant le transport des sédiments ainsi que sur les conditions de dépôt.

Le long de la carotte et surtout dans la partie basale, le faciès qui caractérise cette partie est sableuse fin et bioclastique (31,9 %). La moyenne se situe entre 65 et 125 μm . L'écart-type montre que le sable est mal à très mal classer. Le Skewness déduit une asymétrie positive forte ou très forte signifiant que le sédiment est brutalement et sans remaniement ultérieur par excès de charge et/ou par une diminution de la compétence de l'agent de transport.

II.2.3 Conclusion :

Les caractères granulométriques soulignent la présence de deux grands types de faciès auxquels des conditions différentes de dépôts peuvent être associées :

1- Unité supérieure : La sédimentation des premiers centimètres est fine et intralagunaire ce qui traduit une constance de l'environnement. Les courbes cumulatives sont de type « Logarithmique » pour les niveaux supérieurs (Figure III-12). Elles caractérisent un dépôt par décantation de matériel en suspension c'est un milieu «lagunaire».

2- Unité inférieure : Dans les niveaux de base, des courbes de type « Paraboliques » caractérisent des sédiments déposés par excès de charge après transport sur le fond d'un milieu ouvert aux actions marines.

II.3 Variations granulométriques et dynamique du dépôt

Pour chaque niveau des carottes, les différents paramètres et indices statistiques granulométriques ont été calculés à partir des courbes cumulatives. Chaque échantillon a été ensuite positionné dans un diagramme C/M. A partir de l'image C/M, les échantillons ont été regroupés, en fonction des valeurs de la médiane, en deux sous-classes : entre 15 et 63 μm et > 63 μm . A ces deux sous classes, on a attribué les lettres : A et B par ordre croissant de la médiane.

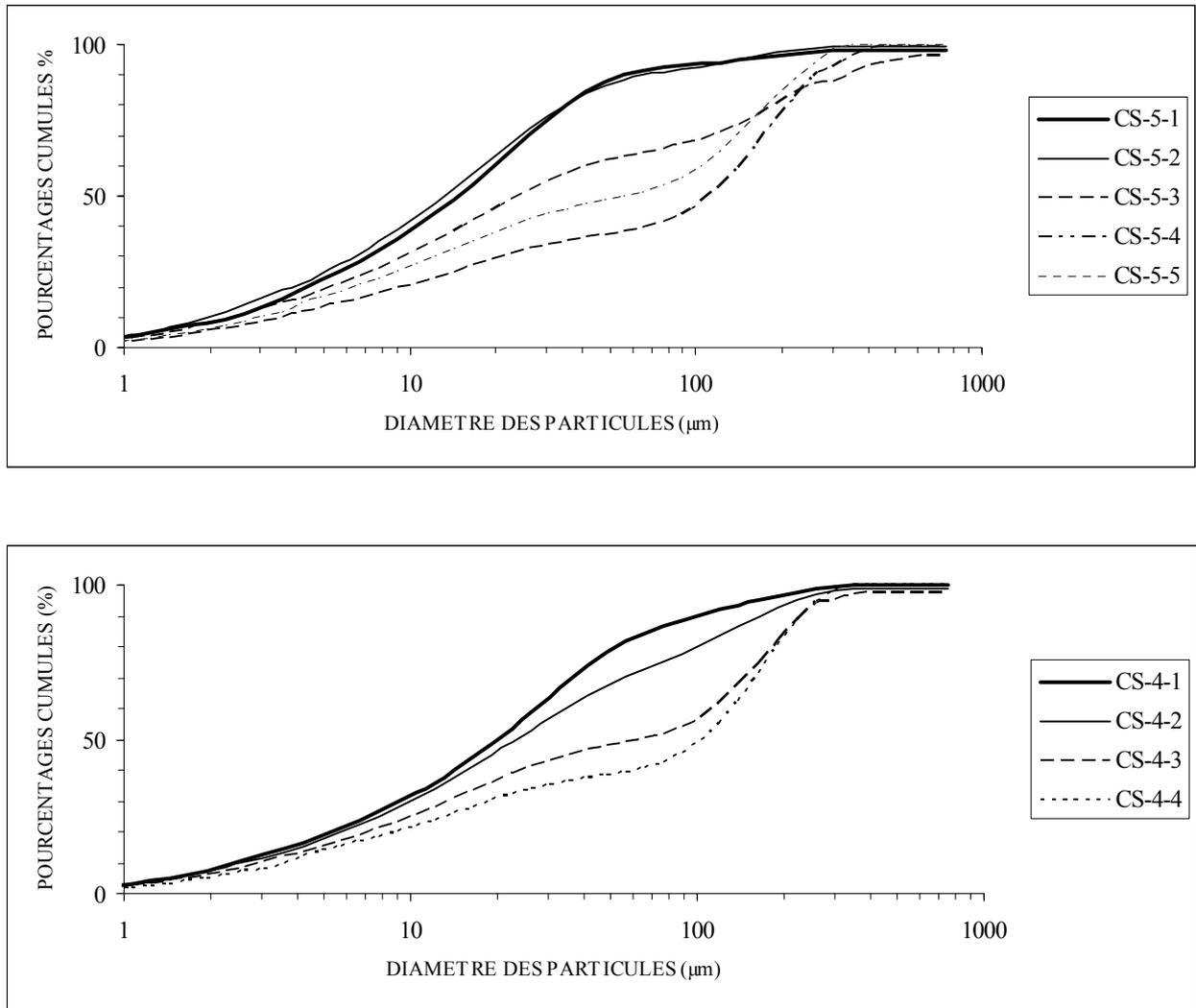


Figure III-12 : Exemples de courbes cumulatives des sédiments des carottes de la lagune de Sidi Moussa

Le tableau III-3 présente les valeurs moyennes de différents paramètres statistiques pour chaque classe ainsi définie :

Tableau III-3 : Indices granulométriques des différentes classes des sédiments carottés

Sous classe	Echantillons	Q 25	Q 50	Q75	Q 99	Moy.	Ecart-type	Skew.
A	CS 4-1; CS 4-2; CS 5-1; CS 5-2 et CS 5-3	6,4	22,3	65,9	338	24,1	2,2	0,2
B	CS 4-3; CS 4-4; CS 5-4 et CS 5-5	12,1	97,9	175,6	380,5	56,5	2,4	0,9

L'image C/M montre clairement les deux principaux faciès discutés dans la partie de granulométrie ; les échantillons sont groupés en deux sous-classes (Figure III-13) :

Sous-classe A : la médiane, Q 25, Q 75 et l'unpercentile sont faibles. L'indice de classement indique un bon classement. La médiane se situe au niveau de la fraction argileuse. Le Skewness indique une asymétrie positive, le sédiment s'est déposé par excès de charge. Les courbes de fréquence sont unimodales et le mode principal se situe dans la fraction argileuse et des silts fins. L'image C/M permet de les situer dans les suspensions homogènes uniformes au dessus de l'action du fond. Les courbes cumulatives montrent un faciès sublogarithmique, ce qui caractérise les sédiments fins des vases lagunaires. Ce qui montre que le dépôt est par décantation dans un milieu calme.

Sous-classe B : la médiane, Q25, Q 75 et l'unpercentile sont élevés. L'indice d'asymétrie indique un bon classement. Le skwness montre une asymétrie positive très forte, qui signifie que le sédiment est déposé par décantation. Les courbes de fréquences sont plurimodales et le mode principal si situe dans la fraction de sables moyens. L'image C/M permet de se situer dans les suspensions gradées et de roulement sur le fond.

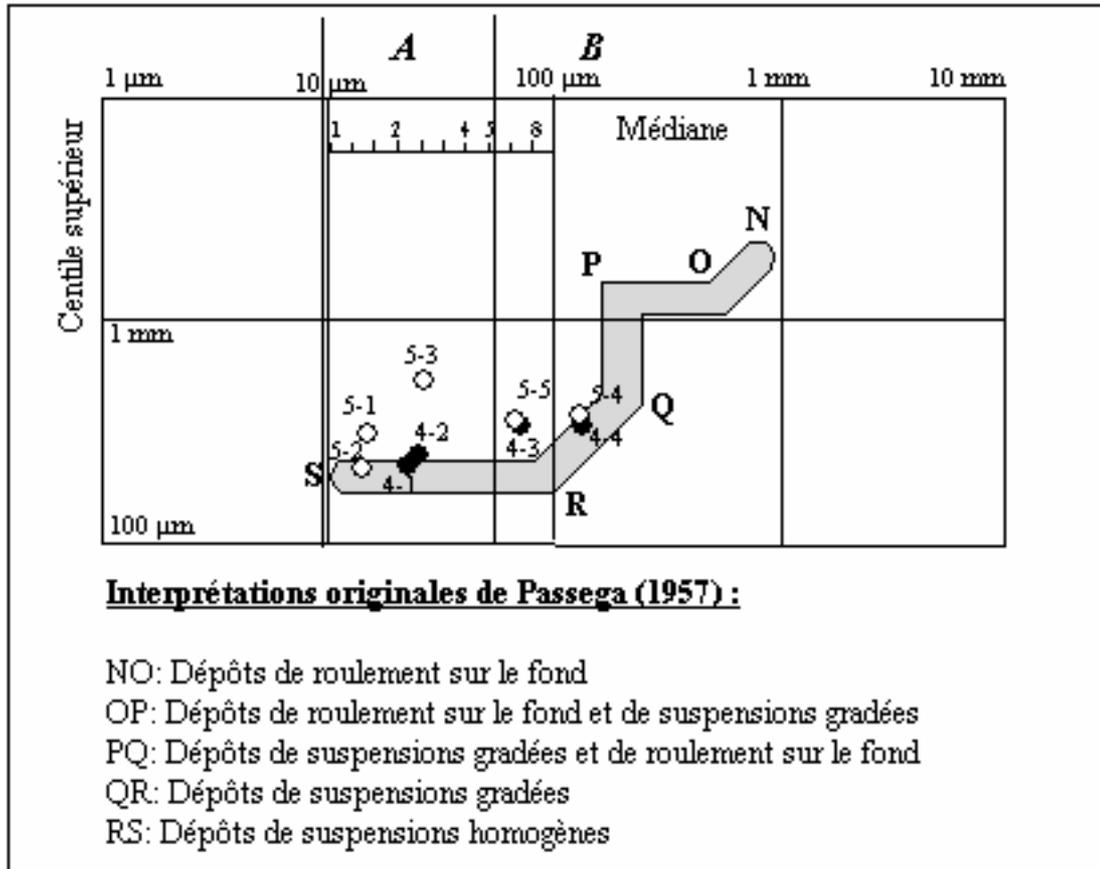


Figure III-13 : Relation entre la médiane et l'unpercentile pour les échantillons carottés de la lagune de Sidi Moussa

Les différentes sous-classes granulométriques distinguées dans le digramme de PASSEGA permettent de mettre en évidence les différents environnements de dépôts distingués dans la lagune de Sidi Moussa (tableau III-4).

Tableau III-4 : Environnements de dépôt des différentes sous-classes granulométriques distinguées d'après l'image de PASSEGA dans les sédiments carottés de la lagune de Sidi Moussa

Sous classe	Environnements de dépôt
A	Courants tractifs, suspensions uniformes au-dessus de l'action directe du fond, le dépôt des sédiments par décantation. Ces suspensions sont perturbées par des apports légèrement grossiers.
B	Courants tractifs, transport par roulement sur le fond qui s'ajoute au transport en suspension, augmentation relative du pourcentage des éléments les plus grossiers.

II.4 Conclusion

La répartition des faciès dans les carottes montre une variation du milieu de dépôt. A la base de la carotte Csm-5, la sédimentation est grossière constituée des faciès sableux à sablo-vaseux riche en débris bioclastiques, qui deviennent progressivement plus fins vers le sommet de la carotte. Tandis que pour la carotte Csm-4, qui est faite près de la passe secondaire, l'évolution est marquée par un passage de la base au sommet d'une sédimentation grossière à une sédimentation plus silteuse avec une intercalation d'un niveau sableux, le taux des argiles augmente de la base vers le sommet de 10% jusqu'à 19%.

Le Test de Passega a été appliqué au sédiment total. L'image C/M a permis de distinguer deux groupes de dépôts :

- un groupe formé des sédiments vaseux de la partie sommitale des carottes, qui caractérise un dépôt allant de sédiments transportés par une suspension uniforme à des dépôts de suspension homogènes ;
- un groupe formé des sédiments sableux de la partie basale, il s'agit de dépôt transporté par une suspension et par tractations sur le fond. Ce type de dépôt caractérise essentiellement le faciès sableux.

L'évolution temporelle du milieu de sédimentation de la lagune de Sidi Moussa, est passée d'un milieu ouvert sur l'influence océanique, à un milieu plus fermé typiquement lagunaire à l'abri de la barrière littorale consolidée. Ceci est en accord avec le schéma évolutif lagunaire (Carruesco, 1989 ; Bird, 1994).

III- CONCLUSION GENERALE

Les analyses granulométriques des sédiments superficiels montraient une liaison étroite entre la nature sédimentaire des apports et celle des dépôts de la lagune. La répartition spatiale des différents faciès est régie essentiellement par la dynamique marine et les courants intralagunaires et met en évidence deux milieux de sédimentation bien différents :

- un ensemble à dominance marine littorale (zone de la sablière et des passes) ;
- un ensemble lagunaire proprement dit (zone des chenaux et du schorre).

Ces deux ensembles se retrouvent superposés dans les carottes avec à la base un faciès à dominance marine littorale et au sommet un faciès «lagunaire». Ceci est en accord avec le schéma évolutif lagunaire (Carruesco, 1989 ; Bird, 1994).

En effet, l'environnement bioclimatique de type semi-aride, conditionne fortement l'action des vents dominants, de direction Nord-Ouest (Carruesco, 1989), dans l'alimentation de la couverture sédimentaire lagunaire par des sédiments fins de l'arrière pays. Ce matériel allochtone est redistribué dans le milieu lagunaire par la dynamique propre du système lagunaire. Le vecteur essentiel des apports est le ruissellement sur les formations encaissantes. En période sèche, l'action du vent doit participer au transport des particules les plus fines vers le plan d'eau lagunaire.

APPROCHE MINERALOGIQUE

INTRODUCTION..... 107

I- MINERALOGIE DE LA PHASE ARGILEUSE LAGUNAIRE..... 107

 I-1 Variations spatiales.....107

 II-2 Variations verticales.....112

**III- MINERALOGIE DE LA PHASE ARGILEUSE DE L’ENVIRONNEMENT
CONTINENTAL.....114**

Partie IV : APPROCHE MINÉRALOGIQUE

Introduction :

Les minéraux argileux sont des phyllosilicates hydratés de petite taille. Cependant des minéraux comme les illites ou les chlorites sont fréquents dans la fraction silteuse.

L'identification des minéraux argileux est réalisée grâce aux positions et aux intensités des pics des diffractogrammes naturels, glycolés et chauffés (Eslingere et Peaver, 1988 ; Moore et Reynolds, 1997).

On notera dans les diffractogrammes chauffés, une augmentation du nombre des impulsions (*counts*). Ceci peut être dû à l'augmentation de l'intensité du pic 001 des illites par écrasement des smectites. Le bruit de fond (background) du diffractogramme a été soustrait dans l'ensemble des diffractogrammes présentés dans cette étude. L'axe des abscisses correspond à l'échelle 2θ , alors que les pics sont en angström (Å°).

I- Minéralogie de la phase argileuse lagunaire

I-1 Variations spatiales

Le choix de ces stations de prélèvements a été guidé par les zones les plus favorables à la décantation des éléments fins (Zone intertidale).

Le tableau IV-1 montre que la phase argileuse des sédiments superficiels de la lagune de Sidi Moussa est formée, par ordre d'importance décroissant, d'illite (43% à 66 %), chlorite (17 % à 38 %), kaolinite (4 à 8 %) et de la smectite associée avec des interstratifiés gonflants du type illite- smectite ou chlorite- smectite (0 à 13 %).

La répartition horizontale des paragenèses argileuses dans la lagune ne montre pas d'évolution différentielle notable, les teneurs semblent homogènes et constantes (Figure IV-1). Il apparaît quelques différences entre le cordon littoral et les dunes continentales ; l'illite est légèrement plus importante sur les dunes littorales que sur les formations continentales. Ces résultats sont identiques à celles trouvées par Carruesco (1989) au niveau de la lagune d'Oualidia (35 km au Sud de la lagune de Sidi Moussa).

Ces résultats confirment les travaux de Weisrock (1983) qui, sur le même type de formations, un peu plus au sud d'Oualidia trouve l'illite et la chlorite comme minéraux dominants. SCHOEN (1969), pour sa part, note des pourcentages en illite élevés dans des sols recouvrant les formations dunaires, la chlorite est également présente. Cet auteur déduit de ses études que l'illite et la chlorite sont stables vis à vis des altérations à caractère physique et en particulier dans les zones à fortes déflations éoliennes.

Tableau IV-1 : Cortège des minéraux argileux de sédiments superficiels de la lagune de Sidi Moussa

		Illite %	Chlorite %	Kaolinite %	Smectite + ISG %
AMONT  AVAL	SM 01	64	29	7	T
	SM 02	64	28	8	T
	SM 09	48	38	4	10
	SM 10	52	36	5	7
	SM 13	53	38	6	T
	SM 14	64	28	6	T
	SM 15	64	30	6	T
	SM 16	62	31	6	T
	SM 23	65	17	6	T
	SM 26	59	26	6	9
	SM 30	59	26	6	9
	SM 32	43	38	6	13
	SM 37	62	32	6	T
	SM 43	66	28	6	T
Moyenne de la lagune		59	30	7	4
Max		66	38	8	13
Min		43	17	4	0

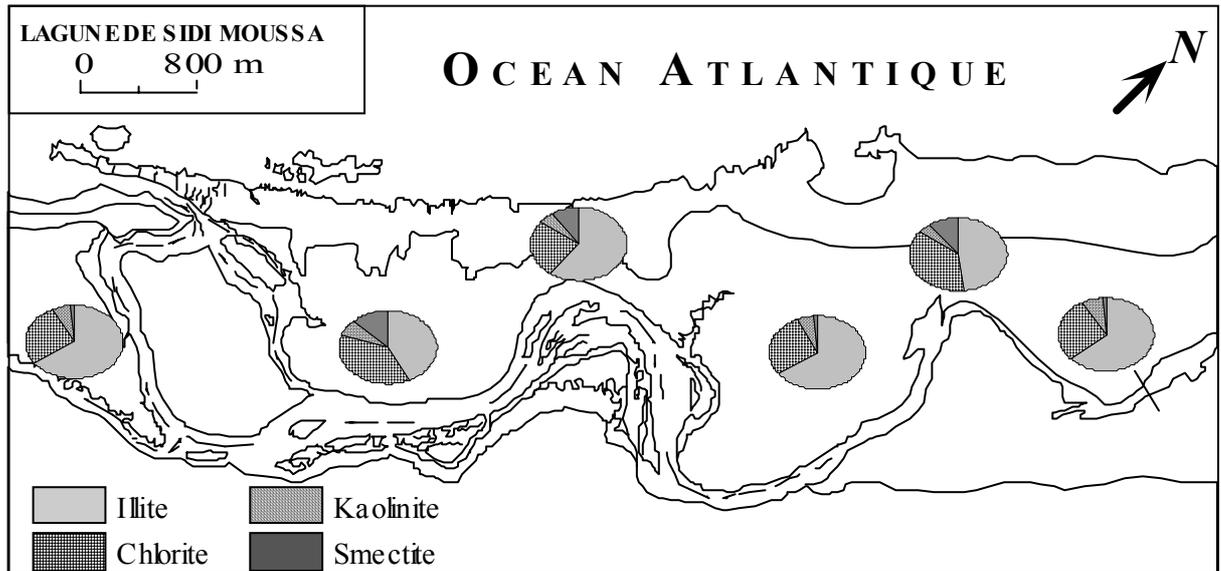


Figure IV-1 : Répartition spatiale des teneurs en minéraux argileux dans le remplissage lagunaire de la lagune de Sidi Moussa

Afin de caractériser la répartition des minéraux argileux dans la lagune, nous avons établi des cartes de répartition pour chaque minéral (Figure IV-2). Ces cartes montrent que :

L'illite est le minéral ubiquiste (59 % en moyenne), indiqué par la présence des pics naturels suivants : 10 A° (001) et $4,9 \text{ A}^\circ$ (002) (Figure IV-3). Les fortes teneurs sont atteintes à l'aval de la lagune (66 %) et les faibles teneurs sont enregistrées dans la partie médiane de la lagune (43 %). Ce minéral est bien cristallisé et confirme les résultats trouvés par Carruesco (1989) au niveau de la lagune d'Oualidia.

La chlorite représente 30 % en moyenne, elle est présente dans tous les sédiments de la lagune. Les teneurs les plus élevées (38%) sont enregistrées au niveau du chenal. La cristallinité de ce minéral est aussi parfaite.

La kaolinite, indiquée par le pics naturels : $7,14 \text{ A}^\circ$ (001) et $3,57 \text{ A}^\circ$ (002), et leur disparition à 90 % après chauffage. Elle représente (6 % en moyenne). Les teneurs sont homogènes sur toute la lagune. Ce minéral ne présente pas une bonne cristallinité.

La smectite, indiquée par le pic naturel 14 A° se déplace à 17 A° après glycérolage et son écrasement à 10 A° après le chauffage. Elle est moins représentée (5 % en moyenne), on rencontre le taux le plus élevé (13%) près des marais salants. La smectite n'est pas observée dans tous les sédiments superficiels de la lagune ce qui montre qu'ailleurs de ces deux zones la cristallinité de ce minéral est mauvaise.

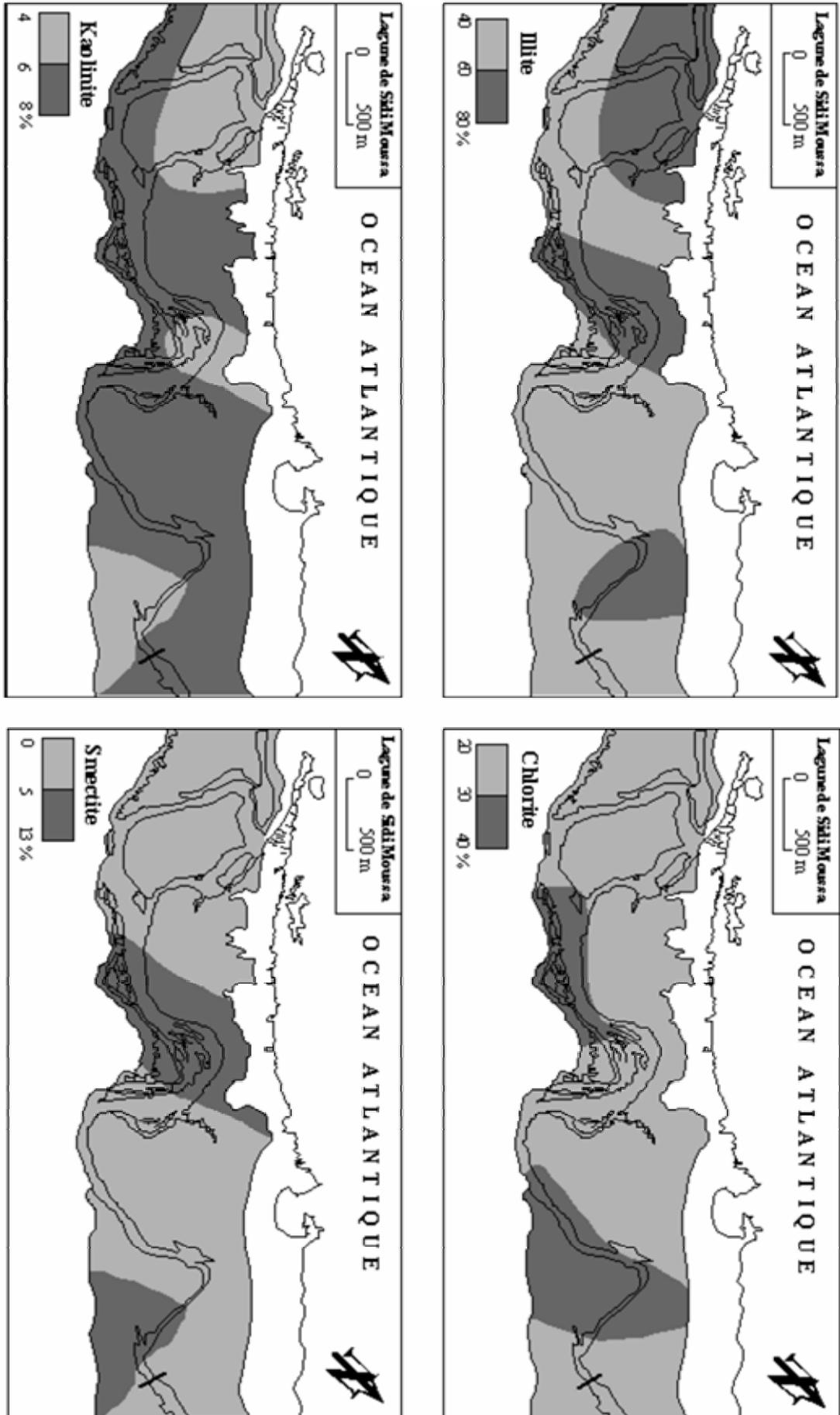


Figure IV-2 : Carte de répartition de s teneurs en minéraux argileux au sein des sédiments sup efficiels de la lagune de Sidi Moussa

L'illite, la chlorite et la kaolinite, sont toujours présents dans les dépôts lagunaires, ils sont stables vis-à-vis des altérations à caractère physique. Ces minéraux ont pour origine les colluvions qui remanient les dépôts encaissants. La smectite pourrait être acheminée des terrains carbonatés du crétacé qui affleurent dans le bassin versant de la lagune de Sidi Moussa. Elle pourrait aussi indiquer une néoformation au cours de l'altération des terrains de l'environnement continental, dont le remaniement et la sédimentation dépendraient du développement de flocons smectiques par floculation organo-minérale, ainsi observé dans plusieurs lagunes méditerranéennes (Mahjoubi, 1991 ; Mahjoubi et al., 2003).

En conclusion, la répartition superficielle des cortèges argileux reste homogène et le cortège moyen rencontré au sein de la lagune est le suivant :

$$I_x = 59 \% \quad C_x = 30 \% \quad K = 7 \% \quad Sm + ISG_x = 4 \%$$

Ces cortèges sont comparables à ceux observés au niveau de la lagune de Oualidia (35 Km au sud) et le bassin versant proche de la lagune de Sidi Moussa (Carruesco, 1989) ce qui suppose une filiation continent lagune :

$$I_x = 58 \% \quad C_x = 27 \% \quad K = 8 \% \quad Sm + ISG_x = 7 \%$$

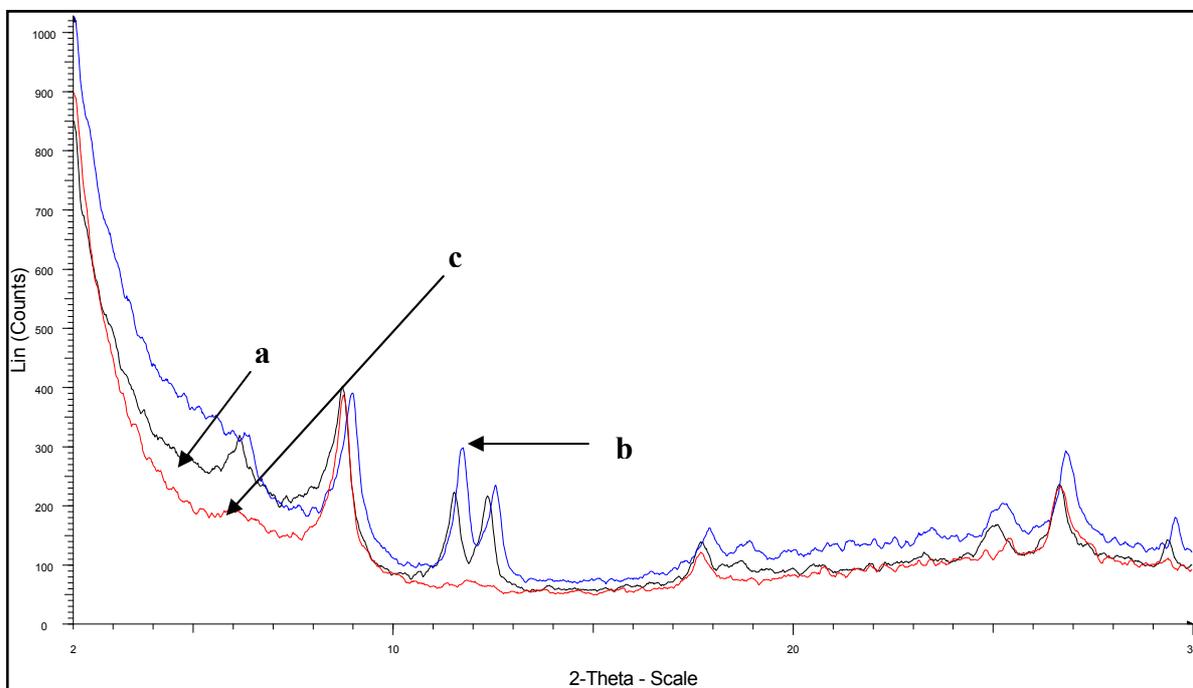


Figure IV – 3 : Exemple de diffractogramme naturel (a), glycolés (b) et chauffé (c) d'un sédiment superficiel de la lagune de Sidi Moussa.

II-2 Variations verticales

L'étude minéralogique aux RX a été faite systématiquement sur deux carottes. Le but est, d'une part, de suivre les variations minéralogiques à la fois verticale dans chaque carotte et, d'autre part, discriminer les minéraux liés aux phases biogènes, authigènes et terrigènes. Ce qui permettra de corrélérer les variations granulométriques aux variations minéralogiques.

Comme pour les sédiments de surface, le cortège argileux se compose des quatre espèces le long des carottes (Figure IV-3).

Carotte Csm-4 : Le cortège argileux est généralement homogène sur toute la coupe constitué par ordre d'abondance moyen d'Illite (51%), la chlorite (39%), la kaolinite (5%) et de la smectite (8%) qui apparaît vers la partie sommitale de la carotte (vers 55 cm).

Carotte Csm-5 : Les minéraux argileux dans cette carotte sont dominés par l'Illite (55%) le minéral cardinal, la chlorite (38%), la kaolinite (5%) et de la smectite (10%) qui apparaît vers la partie sommitale de la carotte (vers 40 cm).

La minéralogie des argiles dans les niveaux supérieurs est caractérisée par un cortège du type :

$$I x = 58 \% C x = 28 \% K = 10\% Sm + ISG x = 4 \%$$

Ces résultats sont tout à fait comparables avec ceux obtenus dans les sédiments actuels de la zone intertidale ($I x = 59 \% C x = 30 \% K = 7 \% Sm + ISG x = 4 \%$).

Les argiles sont mal cristallisées et difficilement identifiables. Les fortes teneurs en matière organique sont probablement la cause (Carruesco, 1989).

Les niveaux carbonatés sont pauvres en matériel argileux. Ils présentent des minéraux très mal cristallisés. Certains niveaux révèlent dans un cas (80-85 cm) un cortège semblable aux niveaux supérieurs et dans l'autre cas (niveau 67-72 cm) un cortège légèrement différent ($I x = 52 \% C x = 43 \% K = 5 \%$).

L'étude des argiles souligne la similitude du cortège dans les niveaux supérieurs des sondages avec celui des zones intertidales actuelles. Ce phénomène traduit, pour les quarante premiers centimètres, ce qui souligne une constance de l'alimentation terrigène.

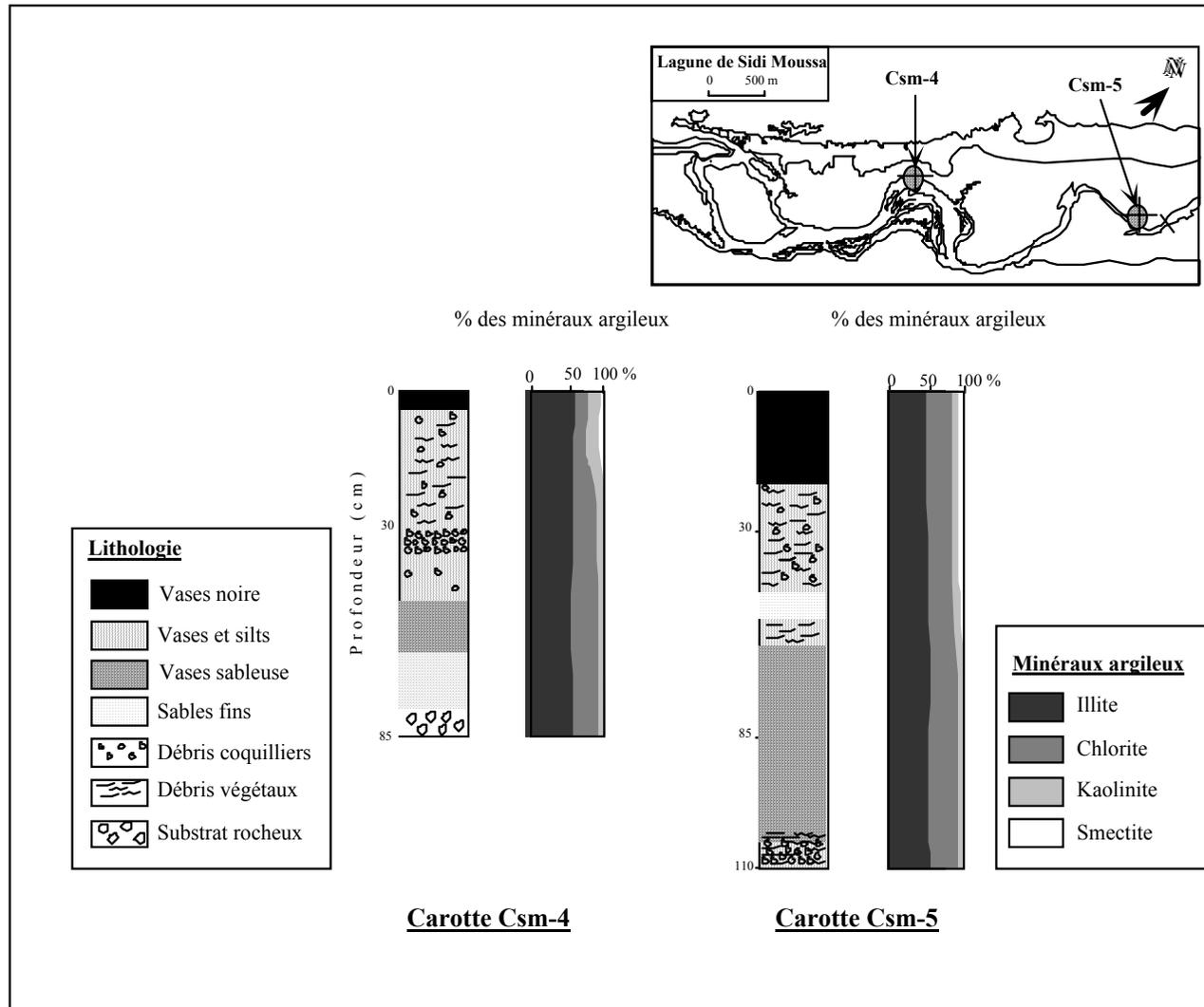


Figure IV-4 : Distribution des teneurs en minéraux argileux au niveau des sédiments carottés de la lagune de Sidi Moussa

II- Minéralogie de la phase argileuse de l'environnement continental

L'analyse de principaux minéraux argileux des sols montre l'illite comme le minéral cardinal, puis la chlorite et la kaolinite, les smectites et les interstratifiés gonflants (ISG) de type CM (chlorite- montmorillonite), IM (illite- montmorillonite) et IC (illite- chlorite) interstratifiés non gonflant.

Il apparaît quelques différences entre le cordon littoral et les dunes continentales ; l'illite est légèrement plus importante sur les dunes littorales que sur les formations continentales.

Ces résultats confirment les travaux de Carruesco (1989) qui sur le même type de formations, un peu plus au sud « la lagune de Oualidia », trouvent l'illite et la chlorite comme minéraux cardinaux.

Les similitudes des cortèges argileux de l'environnement et des dépôts lagunaires suggèrent que l'alimentation en argiles du système se fait par l'intermédiaire des dépôts encaissants. Donc il existe une filiation directe environnement- lagune des argiles des sédiments intralagunaires.

APPROCHE GEOCHIMIQUE

INTRODUCTION.....	116
I- LA MATIERE ORGANIQUE.....	116
I-1 Introduction.....	116
I- 2. Répartition spatiale.....	117
I-2-1. Evolution de la matière organique.....	117
I-2-2. Evolution de carbone organique particulaire.....	119
I- 3. Répartition verticale.....	119
I-3-1. Evolution de la matière organique	119
I-3-2 Evolution du carbone organique particulaire.....	119
I-4 Conclusion.....	121
II – ANALYSES CHIMIQUES.....	122
II-1 Introduction :	122
II-1-1. Les éléments chimiques dans l’environnement marin.....	122
II-1-2. La répartition des contaminants dans les sédiments.....	123
II-1-3. Les facteurs de contrôle de la répartition du contaminant..	125
II-1-4. Les paramètres physico-chimiques.....	125
II-1-5. La fraction minérale.....	127
II – 2. Répartition spatiale des éléments chimiques dans la lagune	128
II-2-1. Les éléments majeurs.....	128
II-2-2. Les éléments mineurs et traces.....	130
II – 3. Répartition temporelle des éléments chimiques dans la lagune	134
II – 4. Facteur d’Enrichissement et Indice de Géo-accumulation.....	137
II – 5. Conclusion.....	142

Partie V

APPROCHE GEOCHIMIQUE

INTRODUCTION

Le sédiment est un dépôt de matériaux détritiques minéraux et organiques. La composition et la nature de ce dépôt sont partiellement liées à la constitution pétrographique des bassins versants et à la structure du couvert végétal. Ces dépôts sont d'origine allochtone quand ils sont issus de l'érosion du bassin versant par des agents dynamiques externes comme l'eau ou le vent et d'origine autochtone quand ils sont constitués par la précipitation de composés minéraux (carbonates, évaporites,...) et organique (fragments végétaux aquatiques, algues planctoniques mortes,...) (Ramade, 1998). L'occupation humaine de bassins versants peut influencer cette composition naturelle. Le sédiment peut être décrit par sa composition et sa structure.

Le sédiment est une matrice relativement hétérogène constituée d'eau, de matériaux inorganiques et organiques et de composés anthropiques (Power et Chapman, 1992). Les sédiments sont composés d'éléments chimiques « principaux » (Si, Al, K, Na, Mg) et d'éléments carbonatés (CaCO_3 , MgOCO_3 ...) de nutriments (carbone organique, N, P) et d'éléments mobiles (Mn, Fe, S). Les éléments traces représentent souvent moins de 0,1 % des éléments présents dans les sédiments (Garrivier, 1995).

L'objectif de cette étude est de comprendre la répartition des caractères géochimiques des sédiments, et de les comparer à celles de l'environnement proche afin de rendre compte des filiations chimiques pouvant exister entre les sources et les dépôts et établir un bruit de fond géochimique de la lagune. L'étude géochimique a été réalisée sur des sédiments bruts. Dix stations superficielles ont été choisies pour définir la répartition spatiale et deux carottes pour la répartition temporelle.

I- LA MATIERE ORGANIQUE

I-1 Introduction

La matière organique représente une composante essentielle du sédiment en raison de son rôle trophique vis-à-vis du compartiment microbien et des invertébrés et de son

rôle dans l'adsorption des contaminants et le contrôle de leur biodisponibilité (Landrum et al., 1987 ; Kukkonen et Landrum, 1996 ; Razak et al., 1996 ; Tye et al., 1996).

La matière organique naturelle est classée, selon sa taille, en carbone organique particulaire (COP), colloïdale (COC) et dissous (COD). C'est un matériel macromoléculaire différent (de protéines, des polysaccharides, des lipides, des acides humiques et fulviques). Cette matière offre l'intérêt de posséder à la fois des sites hydrophiles et hydrophobes qui lui permettent de s'adsorber à la surface des particules minérales et de complexer, dans les phases aqueuses et particulaires, des contaminants organiques hydrophobes, des métaux sous forme ioniques et des molécules non chargées (Santschi et al., 1999).

La matière organique, dosée dans les sédiments, est composée d'une partie particulaire ainsi que la matière organique dissoute dans l'eau interstitielle. Cette matière organique présente dans les sédiments a trois origines essentielles : la sédimentation des particules biogéniques résultant de la production primaire phytoplanctoniques et du développement de la production benthique constituée principalement du développement du microphytobenthos et de la production primaire des macrophytes.

I- 2. Répartition spatiale

I-2-1. Evolution de la matière organique

Depuis l'aval à l'amont (Figure V-1) l'évolution de la matière organique dans les sédiments de surface de la lagune est assez régulière. Ces distributions des valeurs montrent l'existence d'un gradient croissant de l'aval vers l'amont. Les valeurs sont toujours très importantes en amont et peuvent atteindre 9,40 % ; ceci nous suggère de souligner l'importance surtout des apports continentaux (débris végétaux). A l'inverse dans les stations avales où la faible teneur (3,15 %) peut être expliquée par la conjugaison de deux facteurs : la pauvreté de la couverture végétale de la zone intertidale et l'importance des courants qui ne favorisent ni la sédimentation de particules fines ni le piégeage de la matière organique. Dans les sédiments de la lagune, les apports terrigènes constituent une source supplémentaire de matière organique qui peut devenir prépondérante en amont de la lagune.

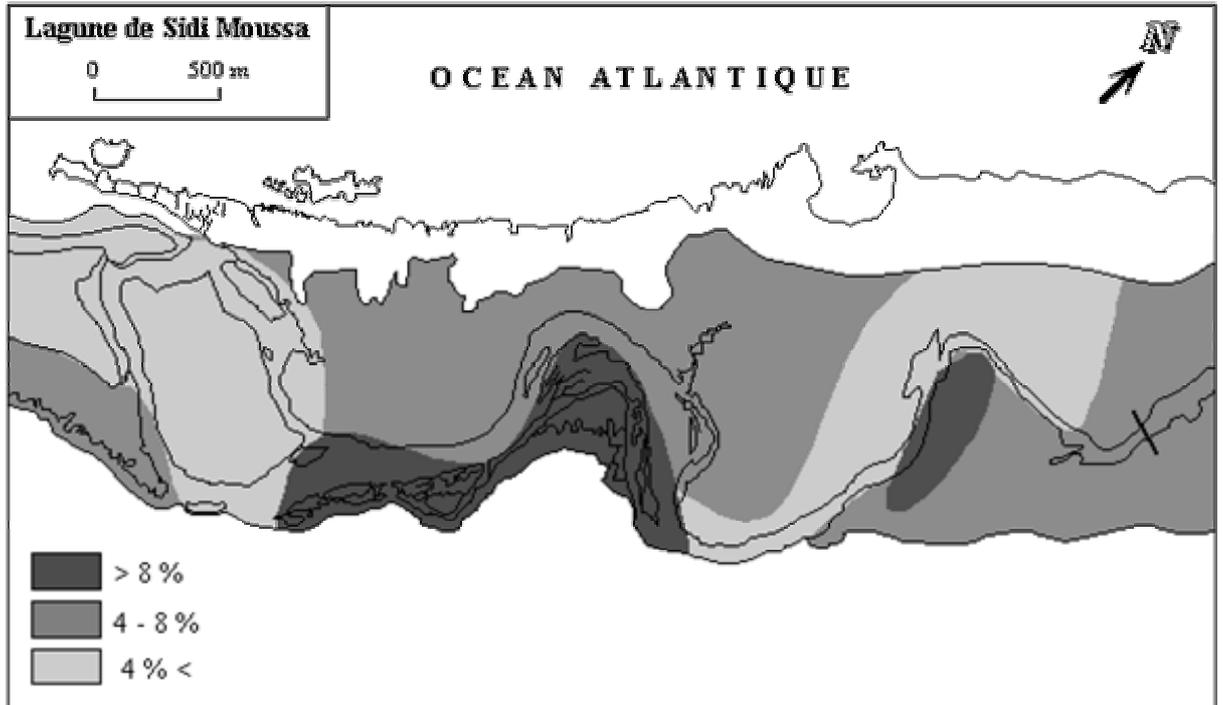


Figure V-1 : Répartition spatiale des teneurs en matière organique dans les sédiments de la lagune de Sidi Moussa

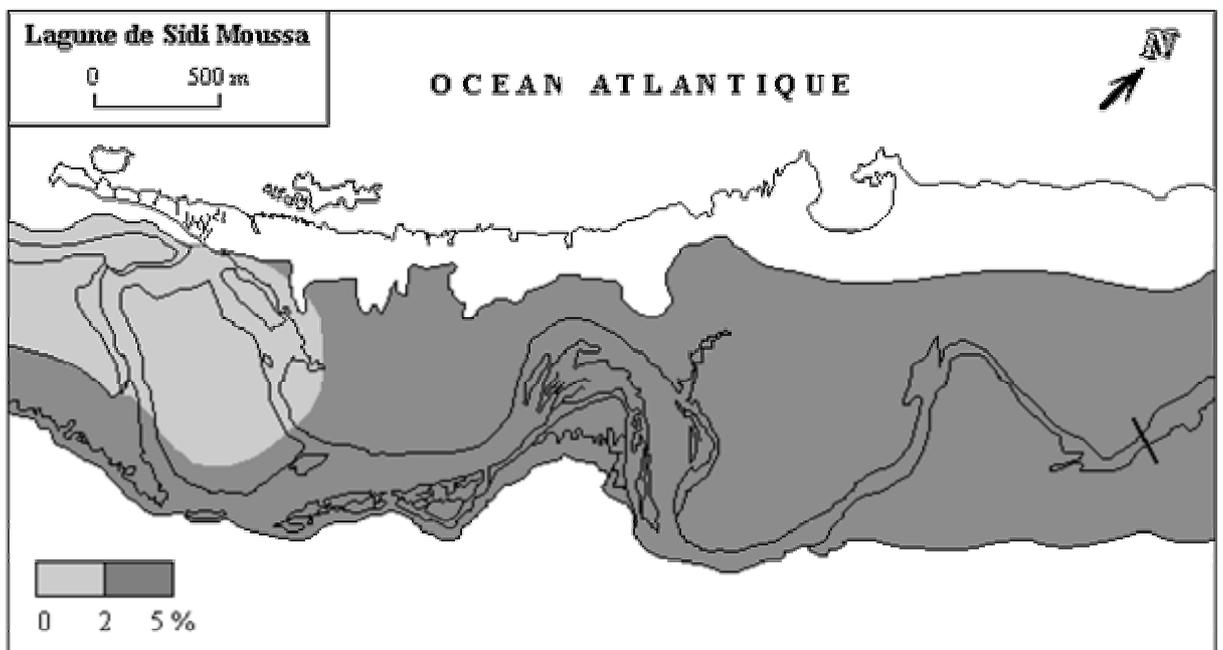


Figure V-2 : Répartition spatiale des teneurs en carbone organique particulaire dans les sédiments de la lagune de Sidi Moussa

I-2-2. Evolution du carbone organique particulaire

La répartition du carbone organique particulaire montre que les teneurs sont variables entre 0,75 % et 4,85%. Elles sont le reflet de l'activité des organismes vivants dans le système et des apports organiques détritiques d'origine continentale.

La répartition des teneurs en carbone organique particulaire, (Figure V-2), permet de dégager deux remarques, les valeurs les plus faibles sont localisées dans le chenal et au niveau du delta interne de marée alors que les teneurs les plus élevées sont localisées au niveau des slikkes et de la zone intertidale.

I-3. Répartition verticale :

I-3-1. Evolution de la matière organique

Les concentrations en matière organique sont plus élevées (7,33 – 8,36 %) dans les niveaux de surface de toutes les carottes (Figure V-3). Ces valeurs sont très proches de celles de la zone intertidale lagunaire (4,9 %). Les niveaux inférieurs ont des concentrations (2,12 - 2,84 %) proches de celles des chenaux actuels (3,15 %).

I-3-2 Evolution du carbone organique particulaire:

Le taux de carbone organique particulaire présente une nette évolution verticale vers le sommet, il passe de 1,89 % à la base de la carotte Csm-4 (faciès carbonaté) à des teneurs plus élevées (4,25%) vers le sommet (faciès vaseux). Les concentrations en matière organique sont liées à la granulométrie du sédiment et à la dynamique du milieu.