



Mémoire de stage de fin d'étude

Master Sciences et Techniques *Eau et Environnement*



Rôle des crues de l'Oued Ksob dans le maintien de l'équilibre dynamique et morphosédimentaire du littoral d'Essaouira (Maroc)

Réalisé par

Larbi LAHMADI

Encadré par :

- **L. DAOUDI** (Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech)
- **A. EL MIMOUNI** (Centre Universitaire de Kelaa d'Essraghna)

Soutenu le 28 juin, devant le jury composé de :

- **L. DAOUDI** (Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech)
- **A. EL MIMOUNI** (Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech)
- **D. CHAFIKI** (Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech)
- **B. IGMOLLAN** (Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech)

2012/2013

Résumé

Le littoral d'Essaouira est situé sur la façade atlantique du Maroc. Il est fortement anthropisé (extension de la ville aux dépens des édifices dunaires, déforestation intensive, extraction des sables et des granulats sur la plage ...). L'effet combiné des facteurs hydrodynamiques et aérodynamiques et des apports anthropiques a impacté l'environnement littoral de cette zone, par la perturbation de l'équilibre sédimentaire et la dégradation du cordon dunaire. L'objectif du présent travail est de dégager les facteurs contrôlant le fonctionnement de la plage d'Essaouira, et de contribuer à une meilleure connaissance des processus mis en œuvre dans la dynamique morphosédimentaire des dépôts côtiers. Pour atteindre cet objectif, différentes techniques expérimentales ont été adoptées : l'analyse diachronique, l'étude de l'évolution topographique et l'étude sédimentologique.

Vu les résultats des différentes approches utilisées, on pourra considérer que les crues de l'oued Ksob constituent, par l'apport sédimentaire qu'elle véhicule, la principale source de sédiments de la plage d'Essaouira. Ce qui permet de subdiviser le secteur d'étude en deux zones distinctes :

- La zone qui se trouve au Nord de l'estuaire de l'oued Ksob, est occupée par des sables fins au Nord et des sables moyens apparaissant vers le Sud. A cause de sa nature fermée, cette zone reçoit la majeure partie des apports des crues de l'oued Ksob, ce qui aide au maintien de son équilibre morphosédimentaire. En effet, lors des périodes sèches, l'action éolienne conservera une tendance érosive permanente, engendrant un recul de trait de côte. Tandis que, lors des périodes de crues, la plage connaît une accumulation importante.
- La zone Sud de l'estuaire occupée généralement par des sables moyens, est marquée par une nette tendance à l'érosion suite à l'action assez agressive des vagues. Le taux d'érosion linéaire moyen enregistré au niveau de cette plage est de l'ordre de $4,23 \pm 1,4$ m/an.

Mots clés : littoral, trait de côte, démaigrissement, engraissement, morphosédimentaire, topographie, diachronique, granulométrie, crue, baie, estuaire, oued Ksob, Essaouira.

Sommaire

Remerciements	6
Résumé	1
Introduction	7
Chapitre I : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	9
I. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE	10
II. HISTORIQUE DES AMENAGEMENTS DE LA PLAGE D'ESSAOUIRA	11
1. Port de la ville.....	11
2. Fixation des dunes	13
3. Aménagements actuels et en cours de réalisation	15
III. CADRE GÉOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE DE LA REGION	16
1. Aperçu géologique	16
2. La couverture sédimentaire secondaire	16
2.1. Le trias	16
2.2. Le Jurassique	17
2.3. Le Crétacé.....	17
3. Les Formations plio-pléistocènes marines et fluviatiles.....	17
4. Géomorphologie.....	18
2. 1. Rasa	19
2. 2. Les différents systèmes dunaires littoraux du Quaternaire.....	19
2. 3. Plage et estuaire.....	20
IV. CADRE CLIMATIQUE	21
1. Températures et précipitations	21
2. Le vent.....	22
V. CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES DE LA REGION ..	24
VI. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DE LA BAIE D'ESSAOUIRA	26
1. La marée	26
1.1. Généralités.....	26
1.2. La marée dans le littoral d'Essaouira	27
2. La houle.....	27
2.1. Généralités.....	27
2.2. Génération de la houle.....	28
2.3. La houle dans la baie d'Essaouira	30
VII. LES COURANTS	31
1. Les courants généraux	31
2. Les courants générés par la houle.....	32
3. Les courants de marée	33

4.	Les courants générés par le vent.....	33
4.1.	Les phénomènes de surcotes - décotes	33
4.2.	Upwelling	33
4.3.	Downwelling	34
Chapitre II: ETUDE DIACHRONIQUE DU TRAIT DE COTE		35
INTRODUCTION.....		36
I.MÉTHODOLOGIE ET TECHNIQUE D'ETUDE.....		37
1.	Le choix d'une ligne de référence	37
2.	Rectification géométrique des images aériennes disponibles.....	38
3.	Digitalisation du trait de côte et estimation des erreurs.....	38
3.1.	Erreurs liées au géoréférencement des photos aériennes.....	38
3.2.	Erreurs liées à la digitalisation du trait de côte.....	39
3.3.	Erreurs liées aux variations du niveau des pleines mers.....	39
3.4.	Définition de la marge d'erreur globale	40
II. Résultat d'analyse		40
1.	Secteur 1	41
2.	Secteur 2.....	44
3.	Secteur 3.....	46
CONCLUSION		48
Chapitre III : ETUDE MORPHOLOGIQUE DE LA PLAGE D'ESSAOUIRA		50
INTRODUCTION.....		51
I. MESURES TOPOMÉTRIQUES		51
1.	Mesures topographiques par tachéométrie	51
1.1.	Principe de positionnement d'un point par tachéométrie	52
1.2.	La mise en station d'un tachéomètre	52
1.3.	Méthode d'échantillonnage dans la baie d'Essaouira.....	53
1.4.	Les sources d'erreur	54
2.	Traitement des données	56
IV. EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE LA PLAGE D'ESSAOUIRA		56
1.	Répartition spatiale et temporelle des levés topographiques.....	56
2.	Description et analyse des profils topographiques	57
2.1.	Secteur 1	59
2.2.	Secteur 2	62
2.3.	Secteur 3	64
2.4.	Secteur 4.....	68
II. INTERPRETATION ET DISCUSSION		70
1.	Evolution à moyen terme.....	70

2.	Evolution à court terme	70
2.1.	Variation morphologique de la plage	70
2.2.	Impact de la crue de l'oued ksob sur la morphologie de la plage.....	71
	CONCLUSION	74
	Chapitre III: ETUDE GRANULOMETRIQUE DES SABLES	76
	INTRODUCTION.....	77
	I. TECHNIQUES GRANULOMETRIQUES	77
1.	Appareil de mesure granulométrique	77
2.	Principe de mesure	79
3.	Définition des paramètres granulométriques.....	79
3.1.	Grain Moyen.....	80
3.2.	Sorting Index ou Déviation Standard	81
3.3.	Asymétrie : (le Graphic Skewness)	82
	I. EVOLUTION GRANULOMÉTRIQUE DU SECTEUR D'ETUDE.....	83
1.	Localisation et description des profils	83
2.	Analyse des résultats	84
2.1	Analyse des courbes des fréquences.....	84
2.2.	Evolution des paramètres granulométriques selon les différents profils	88
2.3.	Interprétation des résultats.....	91
	Chapitre V: SYNTHÈSE MORPHOSÉDIMENTAIRE DE LA PLAGES D'ESSAOUIRA	97
	INTRODUCTION.....	98
	I. FONCTIONNEMENT GÉNÉRAL DE LA PLAGES D'ESSAOUIRA.....	98
1.	Secteur 1	98
2.	Secteur 2.....	98
3.	Secteur 3.....	99
4.	Secteur 4.....	99
	II. COMPARAISON DES RÉSULTATS DES ÉTUDES TOPOGRAPHIQUE ET DIACHRONIQUE (2006 – 2013)	99
	Conclusion générale	101
	Références bibliographiques.....	103
	ANNEXES	110

Remerciements

Au cours de l'élaboration de ce travail, j'ai bénéficié de l'aide et conseils de nombreuses personnes, tant sur le plan scientifique et technique. Il m'est donc très agréable de leur adresser mes sincères gratitude.

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance **Mr. L. DAOUDI**, Professeur à la faculté de la science et technique, et **Mr. A. EL MIMOUNI** Professeur au Centre Universitaire de Kelaa d'Essraghna, de m'avoir encadrés tout en long de ce travail.*

***Mr. L. DAOUDI**, de m'avoir proposé ce sujet de stage et pour son encadrement et à sa confiance qu'il m'a accordée, ainsi son dynamisme et ses interventions, il m'a offert en outre de sages et généreux conseils.*

***Mr. A. EL MIMOUNI** à son enthousiasme, ses conseils depuis l'autre côté m'ont permis de prendre du recul et ses suggestions ont été d'une aide précieuse pour l'orientation de cette recherche.*

*Mes sincères remerciements à **Mr. I. AOUCHE**, Doctorant à la faculté des sciences et techniques pour leurs précieux conseils et le savoir-faire qu'ils m'ont procurés lors de ce stage.*

Je voudrais exprimer à toute ma famille, et plus particulièrement mes chers parents, ma chère femme et mes petits enfants, ma profonde reconnaissance pour le soutien qu'ils m'ont apporté en toute circonstance, ainsi que pour leur patience et leur amour. Qu'ils trouvent dans ce travail le témoignage de mon affection.

Le dernier et non le moindre des mercis va à mes professeures du département de géologie de la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech, pour les efforts déployés au cours de ma formation académique au sein de la FST, et à mes amis qui m'ont aidé sans réserve d'une façon ou d'une autre à accomplir ce travail.

Enfin ces remerciements ne seront pas complets sans citer les membres du jury qui ont bien voulu assister à ma soutenance et juger ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de ma gratitude.

Introduction

Les zones côtières forment la frontière entre les domaines continentaux et marins. Leur rôle stratégique et économique est primordial et il est nécessaire de les étudier pour comprendre leur comportement à court, à moyen et à long terme, notamment en cas d'érosion, de modification d'origine anthropique ou de remontée du niveau marin à plus long terme.

Au sein du système côtier, le domaine pré-littoral, aussi nommé plage sous-marine, prisme littoral ou avant-côte, est identifié comme la zone de transition entre le domaine intertidal (plage subaérienne, estran estuarien, domaine lagunaire) et les fonds marins du large (Cacchione et Drake, 1990). Il demeure aujourd'hui encore un secteur fort mal connu en termes de dynamique sédimentaire et d'évolution morphologique. Cette relative méconnaissance tient en partie à la difficulté technique de mettre en oeuvre divers outils de mesures en domaine très peu profond. Le prisme littoral constitue pourtant, dans le système côtier, une zone charnière au niveau de laquelle une quantité souvent considérable de sédiment est stockée, et à partir de laquelle s'opèrent des variations morphologiques et des échanges sédimentaires déterminants pour l'évolution des systèmes adjacents représentés par les fonds marins du large et les zones intertidales, en particulier les plages (Nittrouer et Kravitz, 1995 ; Short, 1999).

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 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.

Dans le but d'apporter des connaissances supplémentaires sur cette problématique, nous allons traiter le cas du littoral de la baie d'Essaouira. Ce littoral est situé sur la façade

atlantique du Maroc, s'étend sur plusieurs dizaines de kilomètres, entre My Bouzerktoun au Nord et le Cap Sim au Sud. Il présente une grande variété morphologique : estuaire, baie, lagunes, plages, flèches sableuses, falaises, estrans rocheux ... c'est un milieu fort complexe assujéti à des processus hydrodynamiques et aérodynamiques. Ces processus varient considérablement dans le temps et dans l'espace, et peuvent être profondément modifiés par la pression anthropique (extension de la ville aux dépens des édifices dunaires, déforestation intensive, exploitation de la croûte calcaire, extraction des sables et des granulats sur la plage etc.). La baie d'Essaouira, comprise entre le port d'Essaouira au Nord et l'estuaire de Ksob au Sud constitue une des zones les plus complexes de ce littoral.

L'objectif du présent travail est de dégager les facteurs contrôlant le fonctionnement de la plage d'Essaouira, et de contribuer à une meilleure connaissance des processus mis en œuvre dans la dynamique morphosédimentaire à court et à moyen terme des dépôts côtiers. Dans le but d'atteindre cet objectif, différentes techniques expérimentales ont été adoptées : l'analyse diachronique, l'étude de l'évolution topographique et l'étude sédimentologique.

Le présent mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude. Dans le deuxième chapitre seront présentés les principaux résultats obtenus relatifs aux caractéristiques topographiques de la plage d'Essaouira et de leur variabilité spatio-temporelle. Le chapitre trois sera consacré à la présentation des résultats granulométriques. Le chapitre quatre traite des résultats de l'évolution de la ligne de trait de côte. Enfin, dans le cinquième chapitre seront discutés et confrontés, sous forme d'une brève synthèse, les principaux résultats obtenus dans l'étude topographique, granulométrique et diachronique.

Chapitre I

PRÉSENTATION DE LA **ZONE D'ÉTUDE**

I. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE

La ville d'Essaouira se situe sur la façade atlantique du Maroc à 31°30' de latitude Nord et 9°50' de longitude Ouest. De par sa position duale (bordure océanique et proximité du Haut Atlas), elle appartient au secteur Nord-Ouest de l'Atlas atlantique, défini comme la région s'étirant d'est en ouest, du Haut Atlas occidental à l'océan Atlantique, et du sud au nord, de la plaine de l'oued Souss à celle de l'oued Tensift (Weisrock, 1980).

Essaouira est le centre administratif d'une province de 6335 Km² où habitent environ 433.683 habitants (dont 75.437 à Essaouira). Sa médina s'étend sur une trentaine d'hectares. Elle a été construite sur une presqu'île rocheuse dans l'océan en une suite d'îlots éparpillés sur le littoral.

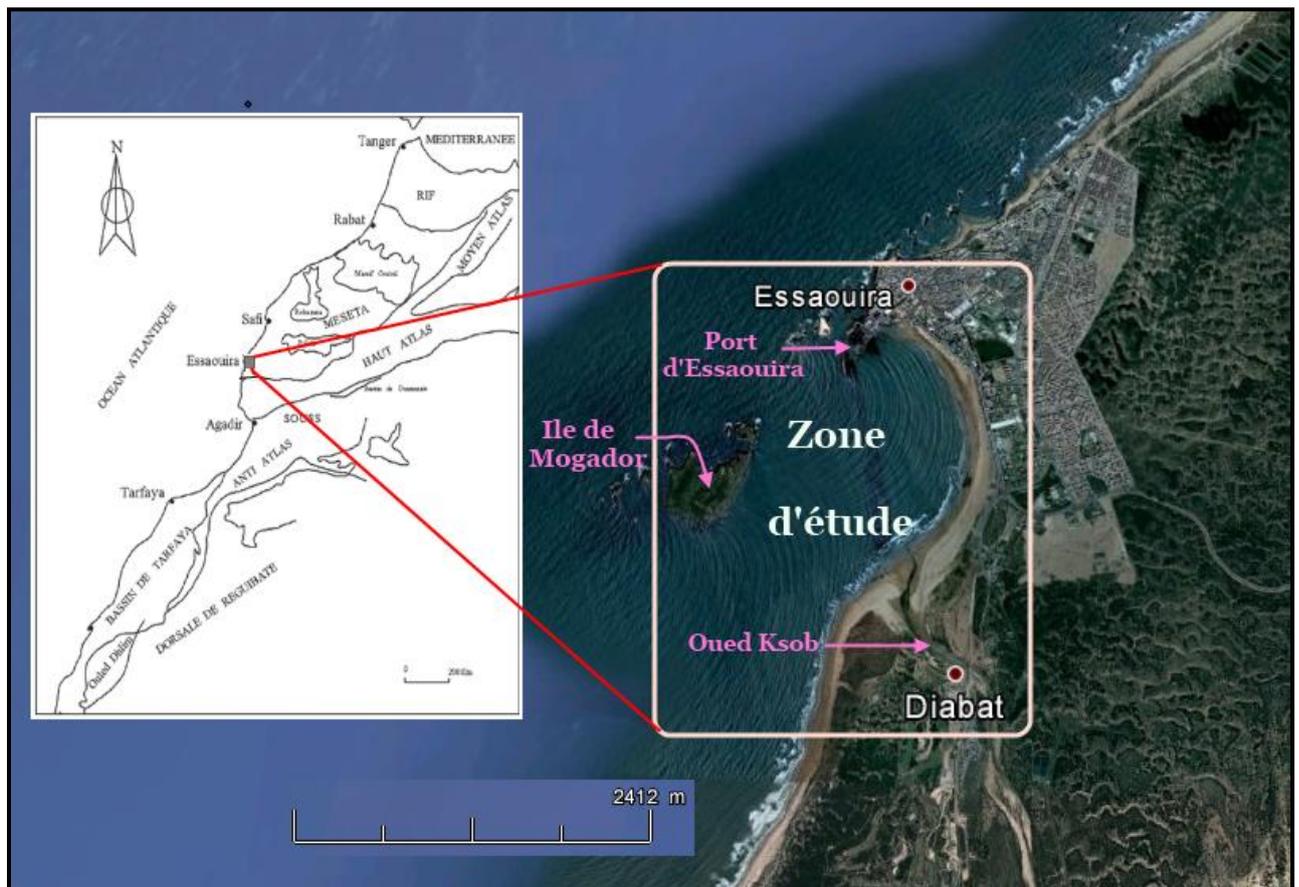


Figure 1.1 : Situation géographique de la zone d'étude (source : Google earth)

Le littoral d'Essaouira fait partie d'un domaine dunaire très développé qui s'étend sur une superficie de 11,800 ha. Ces dunes font partie du domaine forestier d'Essaouira qui a été délimité en 1922; elles occupent environ 90% du domaine territorial de la municipalité d'Essaouira.

La zone littorale d'Essaouira s'étend sur environ 34 km entre le Cap Hadid au nord et le Cap Sim au sud. Cette zone est largement ouverte sur l'Océan Atlantique, avec une forme rectiligne ayant une direction générale NNE-SSW.

Le secteur d'étude correspond à la portion de la plage qui s'étend sur environ 5 km du port de la ville au nord, jusqu'à 1 Km au sud de l'estuaire de l'Oued Ksob. (Figure I.1).

II. HISTORIQUE DES AMENAGEMENTS DE LA PLAGE D'ESSAOUIRA

1. Port de la ville

L'édification du port d'Essaouira s'est effectuée en plusieurs étapes :

- 1760 : le sultan Sidi Mohammed Ben Abdellah a décidé de construire un abri sur l'avancée rocheuse du cap Mogador, le port comportait une porte, Bab El Marsa, et des plate-formes donnant sur la mer, et conçues pour la manutention des marchandises. (Figure I.2 a et b).
- En 1863, l'ingénieur britannique Craig a débarqué dans la cité avec une mission précise qui lui avait été confiée par le Sultan: celle d'édifier une jetée et de construire une darse reliée à la mer par un canal qui pourrait être emprunté par les barcasses même à marée basse. Mais pour des raisons financières le projet est abandonné.
- La reprise des travaux s'est effectuée en 1916, avec l'amélioration des conditions de travail des barcasses. Les travaux, retardés par la Grande Guerre de 1914-18, ne sont achevés qu'en 1923. Ils se sont traduits par la construction de deux jetées de 295 m chacune pour la protection et l'amarrage des bateaux et des barcasses. La passe d'entrée a une quarantaine de mètres de large, les profondeurs à l'entrée étaient de 1.5 m à marée basse (Figure I.2 c).
- La configuration actuelle du port date de 1969, époque à laquelle la jetée principale est prolongée de 80 m, tandis que les quais avaient été consolidés allongés sur 150 m. La profondeur moyenne des bassins et de la passe d'entrée est alors portée de -2 à -3 mètres hydro (Figure I.2 d, e).

2. Fixation des dunes

Au début du protectorat l'accès à la ville allait devenir impossible. C'est pendant cette période que de grands travaux d'aménagement des dunes ont commencé sous l'égide de Dupuy, puis de Watier garde forestier que l'on fit venir de la région située au sud de Bordeaux, en 1915, qui avait entrepris des travaux similaires dans les dunes landaises du Sud-ouest de la France.

Ces travaux de fixation des dunes ont été expérimentés dès 1914 et réalisés, à partir de 1918, à grande échelle, couvrant progressivement une superficie d'environ 14 000 hectares, allant du rocher de Chicht au nord, à Sidi Kaouki au sud (Figure I.3).

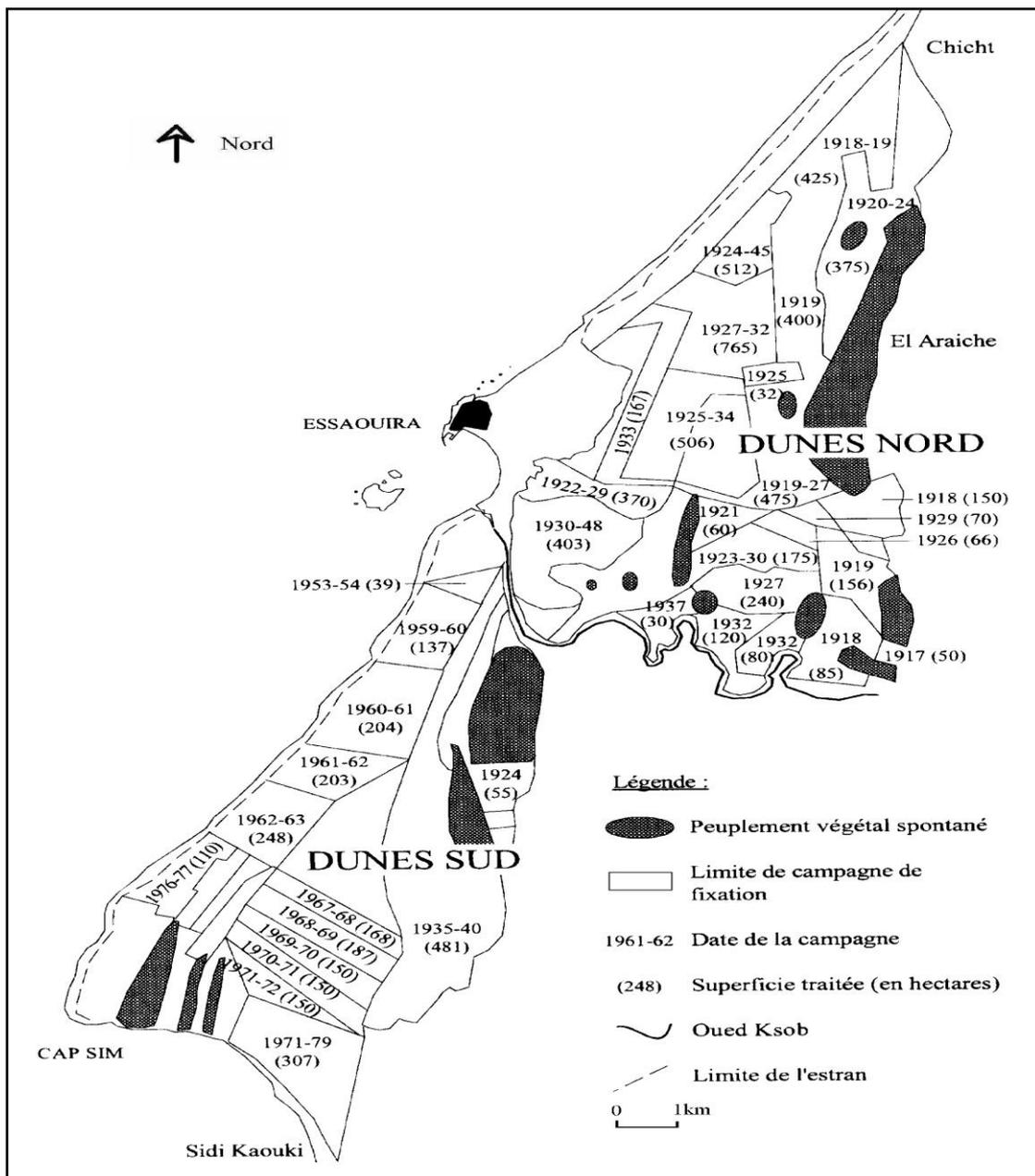


Figure I. 3 : Evolution des travaux de fixation des dunes littorales d'Essaouira, d'après le service forestier d'Essaouira, in Balm (1993)

En 1931, 30 % de la surface des dunes d'Essaouira étaient fixés et les résultats économiques attendus de la fixation étaient pleinement réalisés.

La fixation des dunes s'est effectuée en trois étapes (Figure I.4) :

- Construction d'un cordon littoral (dune artificielle destinée à casser le vent et à arrêter les sables marins).
- Dépôt de branchages afin de bloquer le sable.
- Introduction massive d'espèces locales et importées : retem, mimosa, eucalyptus d'Australie.

Le résultat fut spectaculaire, en 1960 l'ensemble de l'aire dunaire fut fixé et la ville entourée d'une ceinture verte. Avec ces grands travaux s'effectua la régénération de plus de 6000 ha : création d'un biotope (milieu favorable) pour la faune et la flore.

Actuellement les travaux de fixation se poursuivent (Figure I.4 c), cette fixation comprend aussi les berges de l'oued Ksob au niveau de l'embouchure, en vue de protéger les aménagements touristiques du projet Azur.



Figure a : Chantier de fixation. Les branches sont étalées sur le sol, en lignes parallèles. Et recouvertes de quelques pelletées de sable

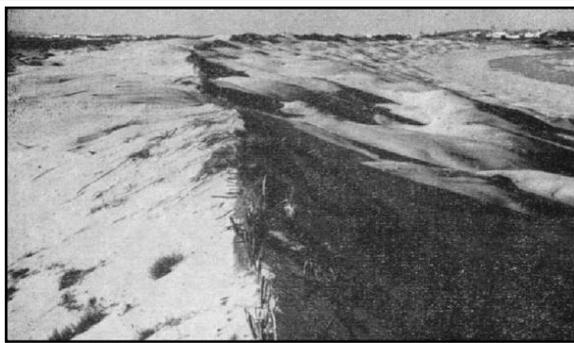


Figure b : Cordon de protection édifié le long de l'Océan (vue prise à 4 km au Sud de la ville d'Essaouira).



Figure c : Fixation actuelle des dunes par des plantations de genêts transportées à dos de chameaux.

Figure I. 4: Méthodes de fixation des dunes littorales à Essaouira.

3. Aménagements actuels et en cours de réalisation

- Pour canaliser les crues de l'oued Ksob et protéger la ville contre les inondations, un projet a été lancé, Il s'agit de la construction de quatre digues de protection sur les deux rives de l'oued Ksob :
 - une digue de protection sur la rive droite de l'Oued Ksob qui s'étendra depuis l'amont de la passerelle et jusqu'au pied du talus d'accès au pont de Diabat, sur une longueur de 524 mètres, ainsi que la construction d'une autre digue de 35 mètres qui fermera le dernier bras de l'oued qui va vers la ville d'Essaouira.
 - une digue de protection sur la rive gauche de l'oued et qui s'étendra en amont sur 300 mètres et qui permettra de protéger la station Mogador et le village de Diabat. Sans oublier une dernière digue qui protégera les jardins filtrants à l'aval du pont sur 498 mètres.
- A noter que d'autres projets sont en cours, ils ont comme principal but de protéger la ville contre les inondations. Parmi ces projets, le plus gigantesque est le vaste chantier du barrage Zerrar, situé à 30 km de la ville et qui permettra de canaliser ces crues.

Ce barrage a de nombreuses vocations telles que : le renfort des infrastructures hydrauliques au niveau de la province d'Essaouira, la régularisation d'un volume de 19 millions m³ d'eau par an, l'irrigation du périmètre de Ksob, amélioration de l'alimentation de la ville 'Essaouira et des régions avoisinantes en eau potable.
- Le projet Mogador à Essaouira fait partie du plan Azur lancé par le Maroc pour attirer 10 millions de touristes aux alentours de 2010, ce projet est implanté au sud de la ville, à moins de 3 km de la Médina, au cœur d'un immense domaine dunaire et forestier sur une superficie totale de 580 hectares.

Le projet comporte des villas, deux parcours de golf, des hôtels, des pépinières et des jardins filtrants (Figure I.5).

Parmi les initiatives écologiques de ce projet on cite:

- Préservation et valorisation du patrimoine végétal par la valorisation et la protection de la dune et par création d'une pépinière in situ de 5 ha.
 - Préservation des ressources hydriques par acheminement des eaux usées pré-traitées de la ville et des eaux usées de la station vers les jardins filtrants.
 - Introduction d'une nouvelle espèce de gazon (*Zoysia Tenifolia*) peu consommatrice en eau.
- Dans le cadre du Programme National d'Assainissement Liquide et d'Épuration des Eaux Usées (PNA) qui a été élaboré en 2005, une station d'épuration des eaux usées a été construite dans le domaine dunaire à 2 km au NNE de la ville, sur une superficie de 25 ha (type lagunage d'une capacité de 9250 m³/j).



Figure I. 5: Plan et positionnement du projet Mogador.

III. CADRE GÉOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE DE LA REGION

1. Aperçu géologique

Du point de vue géologique, le littoral d'Essaouira appartient à deux domaines:

- Le Bassin de Chichaoua-Essaouira dont 69% se trouve dans la province, il appartient au domaine mésétien et il est d'obédience atlantique.
- Le Haut Atlas Occidental représenté par le bassin versant de l'Oued Ksob, ce domaine correspond au flanc nord du Haut Atlas Occidental.

L'histoire géologique de la région a commencé avec l'ouverture de l'Atlantique Nord, à la fin du Trias. Cette rupture du socle provoque la multiplication des bassins intracontinentaux (Laville et Harmand, 1982). L'histoire géologique de ce domaine peut être résumée comme suite :

2. La couverture sédimentaire secondaire

2.1. Le trias

Le Trias est marqué par des formations continentales et une alternance des dépôts épicontinentaux et marins due à l'ouverture de l'Atlantique, le bassin triasique est couvert de fracturations structurales quasi méridiennes NNE-SSW (qualifiables d'hercyniennes ou d'atlantiques), provoquées par la rupture du socle et l'ouverture océanique, la partie supérieure est caractérisée par des épanchements basaltiques.

2.2. Le Jurassique

Le Jurassique inférieur correspond à un calme tectonique, avec une sédimentation carbonatée sous forme de matériaux fins au centre du bassin, et d'alluvions ou d'apports terrigènes deltaïques (continentaux) aux abords.

Le Jurassique moyen et supérieur sont marqués par une dominance de calcaire, de marne et de marno-calcaire en relation avec la transgression.

2.3. Le Crétacé

Il couvre les deux tiers de la superficie de l'Atlas atlantique. Trois cycles de sédimentation ont été relevés (Simone, 2000) :

- le Crétacé inférieur est marqué de dépôts franchement marins à l'Ouest (calcaires lumachelliques et marnes à faunes variées) qui passent latéralement à l'Est à un faciès de type lagunaire.
- le Crétacé moyen correspond à un maximum transgressif. Il est individualisé par l'alternance de marnes et de calcaires (calcaires à milioles et calcaires très dolomitisés dans le bassin d'Essaouira notamment).
- le Crétacé supérieur est constitué de calcaires dolomitiques et lumachelles pour un tiers et de marnes jaunes pour deux tiers. Les sédiments sont riches en huîtres et microfaune benthique marquant un milieu littoral et une phase régressive.

La sédimentation essentiellement calcaire et marneuse devient phosphatée à partir du Maestrichtien.

3. Les Formations plio-pléistocènes marines et fluviales

Elles correspondent à des phases multiples de transgression et régression formant des terrasses étagées dont les falaises mortes sont parallèles au rivage actuel (Simone, 2000).

La plus remarquable et la plus développée de ces formations est le Moghrébien (Figure I.6). C'est un étage inclus dans le Pliocène, il affleure largement d'Ouest en Est sur une bande méridienne large de 10 à 40 km. Les caractéristiques topographiques du Moghrébien correspondent à un talus externe occidental (falaise morte de 100 à 200 m), une plate forme qui se relève vers l'Est, et un talus interne oriental (supérieur à 100 m en général).

La sédimentation est grésolumachellique à la base et passe à une sédimentation grossière à tendance régressive au sommet. Le Moghrébien a été considéré comme un Pliocène régressif ou comme la première transgression quaternaire équivalent au Villafranchien.

Au Pléistocène, les cycles de transgression marine se reproduisent et sont conjugués à l'activité tectonique commencée au Pliocène qui se poursuit aujourd'hui encore. (Simone, 2000).

Dans les vallées des oueds (oued Ksob et oued Tidzi), les niveaux alluviaux sont retrouvés encaissés dans des niveaux marins très bien conservés comme le Maarifien et l'Ouljien. Le

premier serait contemporain de l'interglaciaire Günz-Mindel. Il vient s'étager au pied de la grande falaise morte moghrébienne et il se caractérise par une lumachelle concassée très consolidée associée à des graviers de roche siliceuse. L'Ouljien correspond à la transgression tyrrhénienne (Simone, 2000), il est constitué de graviers cristallins arrondis, de pétrographie variée, cimentés par des sables biodétritiques.

Les dépôts continentaux pléistocènes marquent le paysage surtout au Soltanien contemporain du Würm européen. Cette séquence est très nettement visible sur la rive droite et partiellement sur la rive gauche de l'oued Ksob. Le faciès débute par un conglomérat fluviatile à galets bien roulés et assez gros consolidés par une matrice sableuse. Ce terme est surmonté d'une accumulation calcaire consolidée aux éléments détritiques très fins (limons roses).

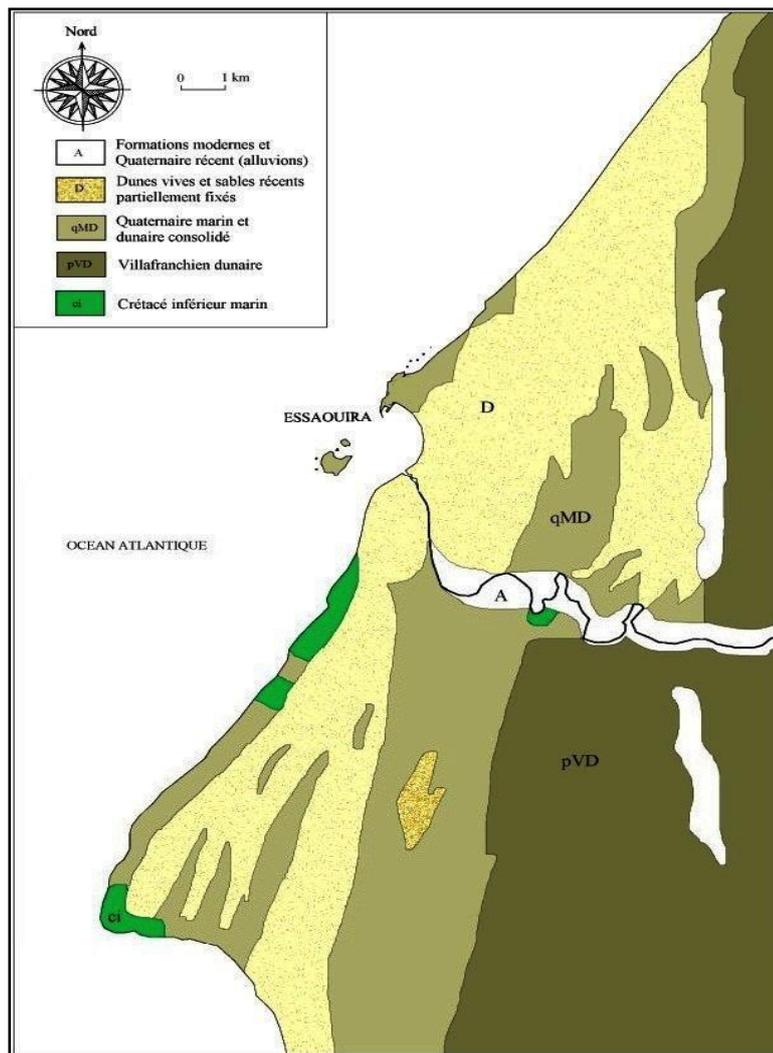


Figure I. 6: les affleurements locaux de la région d'Essaouira (d'après la carte géologique à la 500000ème feuille de Marrakech)

4. Géomorphologie

De point de vue géomorphologique, Le littoral d'Essaouira est très varié par la présence de plusieurs domaines tel que :

4.1. Rasa

Au Sud-Est d'Essaouira, entre oued Ksob et oued Tidzi, le domaine côtier présente un talus qui correspond à une grande falaise polygénique morte, séparant deux plate-formes d'abrasion marine (Figure I.7) (Hourimèche, 1988) :

- Une plate-forme supérieure (Rasa supérieure), sous forme de plateau de 25 km de largeur, représente la transition marine entre le Tertiaire et le Quaternaire (Moghrébien). Située à 25 km à l'intérieur de la terre, à une altitude généralement supérieure à 100 m, cette « rasa » du Plio-Moghrébien est couverte par des formations fluviomarines, conglomératiques et lumachelliques, ainsi que par de considérables accumulations de sables éoliens vifs à son sommet (Gentile, 1997).
- Une plate-forme inférieure (Rasa inférieure), représente une zone d'emboîtement de terrasses marines liées à des transgressions quaternaires. Les formations correspondent à :
 - Des édifices encroûtés du Quaternaire (près de la falaise morte au pied du Moghrébien).
 - Des formations vives de l'actuel (le long du littoral).
 - Des grès de Mogador (Holocène) affleurant au niveau de la ville et constituant l'île de Mogador, avec quelque affleurement près du Marabout de Sidi Kaouki.

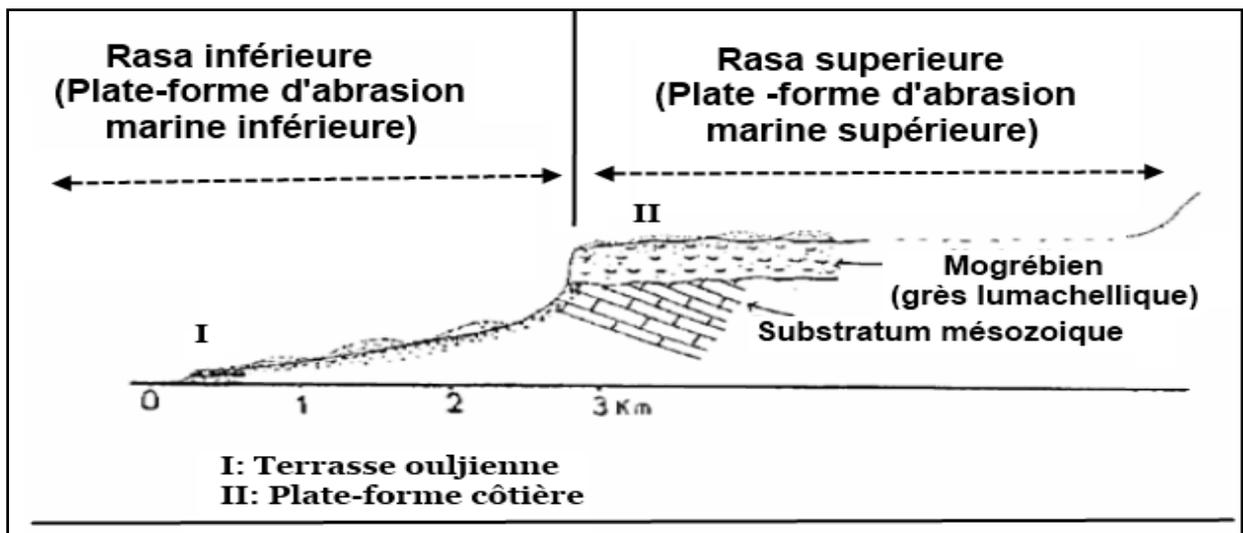


Figure I. 7: Morphologie littorale de la région d'Essaouira (Hourmèche, 1988)

4.2. Les différents systèmes dunaires littoraux du Quaternaire

Dans le secteur d'Essaouira seul l'oued Ksob qui, par son encaissement, permet d'observer la stratigraphie locale, cette dernière montre que le littoral d'Essaouira a connu cinq générations de dunes recouvrant les dunes Moghrébiennes qui constituent un soubassement bien individualisé par son degré de cimentation et de compaction (Weisrock, 1980) :

- **La dune maarifienne :**

C'est une dune post-moghrébienne lapidifiée et elle surmonte la plage fossile maarifienne en continuité directe de sédimentation, recouverte de colluvions rose clair, traversées par des encroûtements racinaires tubulaires ; le tout est scellé par une croûte calcaire lamellaire à attapulгите.

- **La dune ouljienne :**

C'est une dune également lapidifiée mais légèrement moins dure que la précédente, elle est emboîtée dans le système maarifien. Elle est ravinée en surface par une croûte lamellaire (Weisrock, 1982) et recouverte par la terrasse soltanienne. C'est celle qui correspond à ce que l'on appelle communément le grès de Mogador.

- **Les dunes de l'Holocène inférieur :**

Ce système dunaire est représenté par des dunes longitudinales de 2 à 5 km de long et espacées de 100 à 300 m. Celles-ci sont très bien développées et très nettement visibles entre Essaouira et le Cap Sim. Elles sont encroûtées superficiellement, altérées par un sol brun à nodules calcaires et coiffées par une végétation arborée à genévriers de Phénicie. La datation C14 de cette formation a donné un âge antérieur à 5700 B.P. (Weisrock, 1980). Les différents travaux qui ont suivi attribuent ces dunes longitudinales à l'Holocène inférieur.

- **Les dunes historiques :**

Ce sont des accumulations sableuses sans végétation, mêlés à de nombreux Hélicidés et à beaucoup de fragments de silex parfois taillés en pointe mogadorienne d'âge néolithique (Antoine, 1952). De multiples restes de foyers à débris de « croûte noire » sont également présents. Cette génération de dunes est appelée « dunes historiques » (Weisrock, 1982).

- **Les barkhanes et les nebkhas actuelles :**

Elles sont formées par l'accumulation des sables vifs. Dans ce secteur elles sont dépourvues de végétation mais sont colonisées à l'Est d'Essaouira et au Nord par des formations végétales. Ce sont des sables biodétritiques contenant des fragments de tests de mollusques marins. Entre Essaouira et le Cap Sim, leur teneur en carbonates et leur granulométrie diminuent suivant une direction NNE-SSW ; et leur tri s'améliore suivant la même direction (Chahboun, 1988 ; Gentile, 1997 ; Simone, 2000).

4.3. Plage et estuaire

Au Nord d'Essaouira, le littoral est grossièrement rectiligne et orienté NNE-SSW. Il forme un cap (cap de Mogador) sur lequel est bâtie la ville avant de subir, au Sud de celle-ci, une incurvation qui donne une magnifique baie longue environ cinq kilomètres. A l'Ouest de la plage d'Essaouira se situe l'île de Mogador qui joue un rôle important dans la dynamique environnementale locale de la baie (Simone, 2000).

Au sud de la baie se trouve un estuaire de l'oued Ksob, ce dernier joue un rôle très important dans l'alimentation de la baie par la charge solide. Au niveau de l'embouchure, le lit de l'oued

n'est pas stable, il change le lit de temps en temps selon les conditions hydrodynamiques, climatiques et sédimentaires de la plage.

Les sédiments qui sont modifiés et triés par l'action des vagues constituent un grand relief qui caractérise presque tout le littoral. Il ne disparaît qu'au niveau de petites zones le long de la côte d'Essaouira où les formations des calcarénites sont en contact direct avec l'océan. Les dépôts de la plage sont formés par des sable fin, jaune à brunâtre, bien trié, qui s'étend à environ 200 m vers l'intérieur du continent.

IV. CADRE CLIMATIQUE

Le climat dominant dans la région d'Essaouira est de type semi-aride, avec une diversité tant du point de vue température que des précipitations. Ceci étant dû à l'encadrement océanique (Atlantique) d'un côté et la hauteur des montagnes de l'autre.

La région d'Essaouira constitue une zone où s'altèrent les vents chauds d'été et les vents humides d'hivers. Le « chergui » et le vent du Nord-Est qui souffle presque toute l'année.

1. Températures et précipitations

La région est caractérisée par un climat doux tout au long de l'année. Les températures moyennes sont de 16,4 °C en mois de janvier et de 22,5°C en mois d'août. Quant aux précipitations annuelles, elles sont de l'ordre de 280 mm.

Le régime annuel des pluies est de type HAPE (Hiver – Automne – Printemps - Eté), ce qui est conforme au modèle méditerranéen. Deux principales saisons peuvent être distinguées (Figure I.8) :

- Une saison humide qui comporte l'hiver et l'automne, avec un maximum mensuel oscillant entre Décembre et Novembre. Les maxima de précipitations sont nettement marqués en automne et hiver, avant de diminuer graduellement de Février à Mai.

- Une saison sèche allant d'avril à septembre. Cette saison est marquée par la rareté des précipitations. Les mois de Juillet et Août sont les mois les plus secs durant toute l'année avec des précipitations pratiquement inexistantes.

L'hygrométrie est plus forte dans la zone littorale, elle est toujours supérieure à 75 %. Les brouillards estivaux sont particulièrement importants à Essaouira et aux autres sites exposés aux influences maritimes (Hander, 1988).

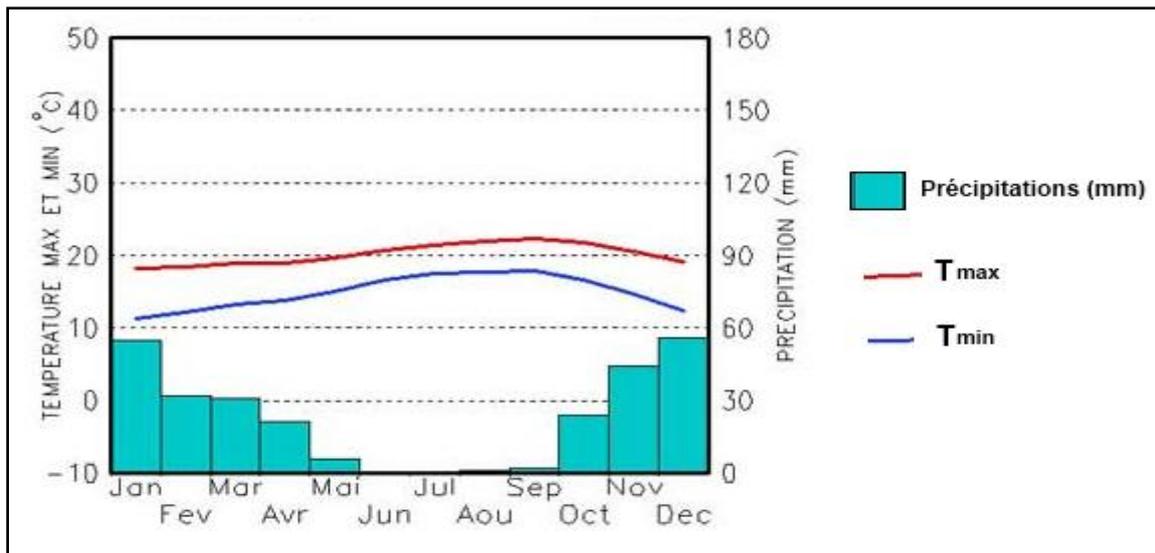


Figure I. 8: Températures et précipitations calculées sur une période de 30 ans à Essaouira (marocmeteo.ma).

2. Le vent

Depuis l'antiquité, la région d'Essaouira est considérée comme étant la ville la plus venteuse du Maroc. Le secteur principal est celui de Nord/Nord-Est (NNE), ceci est principalement due à l'anticyclone des Açores ; la position géographique de la ville d'Essaouira l'a classée parmi les régions où les alizés sont puissants et humides. Cependant, d'autres facteurs tels que la morphologie de la côte et la topographie du littoral amplifient l'action du vent.

Les variations de l'intensité du vent au cours de l'année, dans la région d'Essaouira, permettent de mettre en évidence une saison calme et une saison venteuse avec des saisons de transition (El Mimouni, 2009) :

- La saison calme (hiver) comprend les mois de Décembre, Janvier et Février (Figure I.9). Suite à la remontée de l'anticyclone des Açores vers le nord, la fréquence et l'intensité du vent sont remarquablement faibles. C'est en cette saison que les vitesses les plus faibles de l'année sont enregistrées.
- La saison des vents (été) correspond à la descente de l'anticyclone des Açores vers le sud, ce qui explique la progression de la fréquence et de l'intensité des vents pendant cette période de l'année. Les directions du vent les plus dominantes en été sont NNE (48%) et NE (30%). Les vitesses enregistrées durant cette saison sont toujours supérieures à 4 m/s et peuvent parfois dépasser les 12 m/s. Les vitesses de 8 à 12 m/s représentent 35% des mesures enregistrées, alors que les vitesses comprises entre 4 et 8 m/s constituent 43%.

Deux saisons de transition (automne et printemps) séparent la saison calme (hiver) et la saison venteuse (été). Elles sont caractérisées par des vitesses du vent assez importantes surtout en automne, notamment le mois de Septembre, où la vitesse et l'intensité du vent sont toujours élevées (Figure I.9). Il faut noter enfin que la direction générale du vent est presque constante durant toute l'année ; elle est toujours NNE parfois NE (Figure I.10).

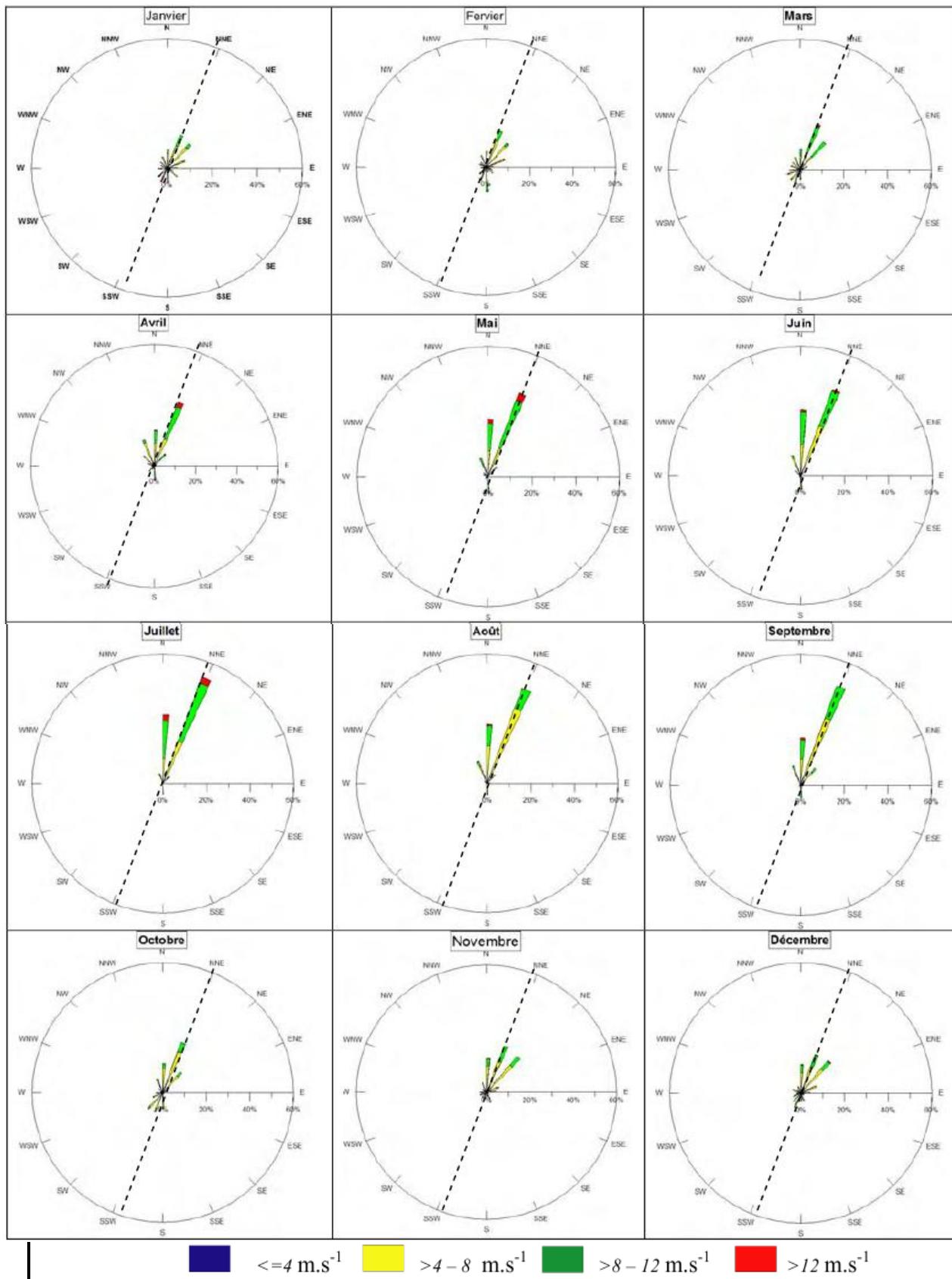


Figure I. 9: Variations mensuelles du vent dans la région d'Essaouira (El Mimouni, 2009)

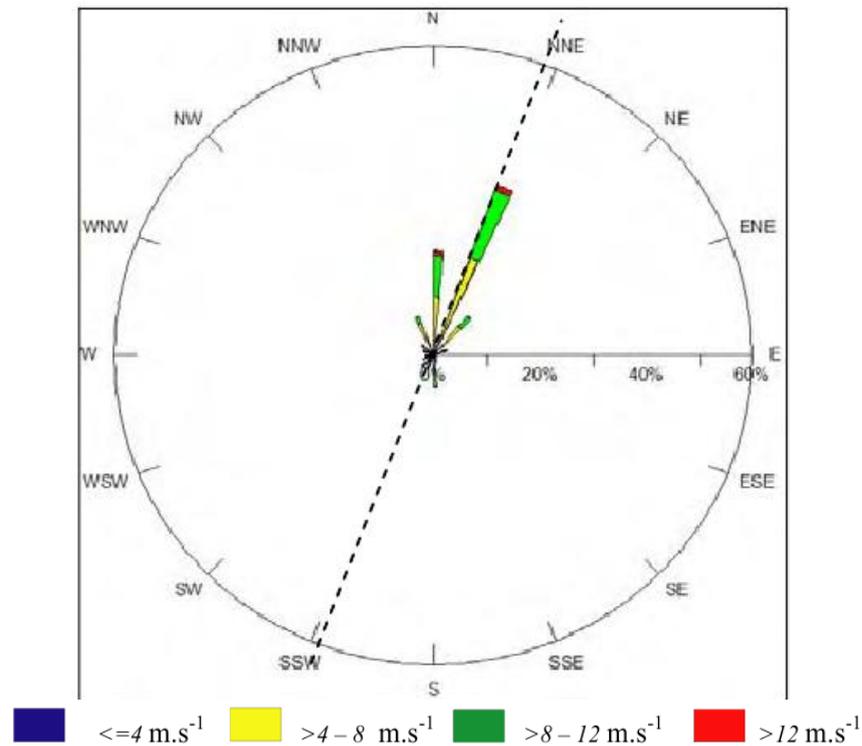


Figure I. 10: Rose générale du vent dans la région d'Essaouira (El Mimouni, 2009)

V. CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES DE LA REGION

L'oued Ksob est la principale rivière qui alimente la plage d'Essaouira lors des crues par les apports sédimentaires (Gentile, 1997; El Mimouni et al., 2007 ; El Mimouni, 2009), cet oued est formé par l'union de l'oued Igrounzar et l'oued Zelten en amont du bassin de Ksob.

Le Ksob prend sa source dans le Haut Atlas Occidental et constitue le principal collecteur d'eau de la province.

Le réseau hydrographique est dans l'ensemble assez dense avec un nombre élevé des branches, des ruisseaux et affluents, la densité de drainage s'en trouve élevée (Figure I.11).

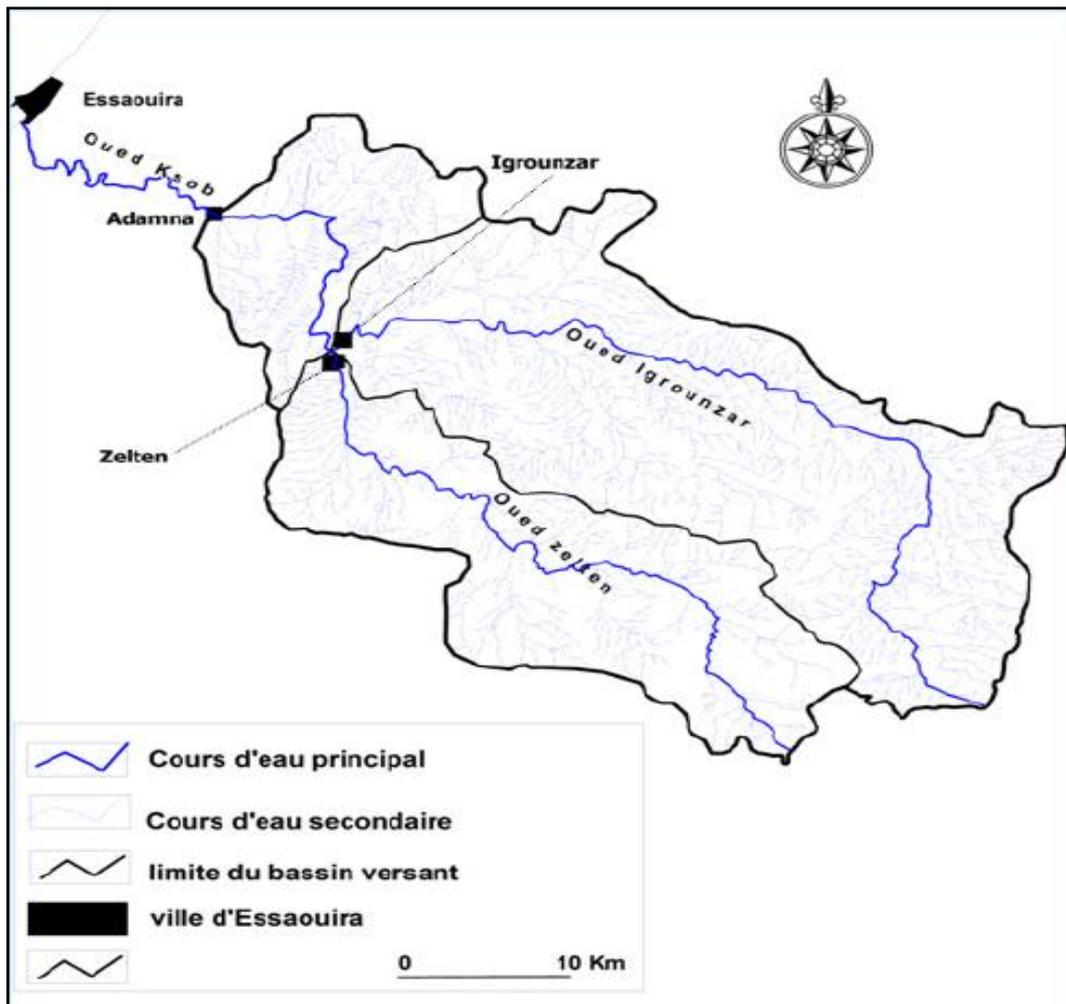


Figure I. 11: Le réseau hydrographique du bassin du Ksob (El Mimouni, 2009)

Du point de vue hydrogéologique, La région d'Essaouira comprend deux aquifères principaux superposés (Bahir et al, 2000) :

- Le Plio-Quaternaire à matrice gréseuse, dont le mur est représenté par les marnes sénoniennes. Il présente un sens d'écoulement global SE/NW et assure l'essentiel de l'alimentation en eau de la région.
- Le Turonien calcaro-dolomitique fracturé dont le mur est constitué par des marnes Cénomaniennes, Il est utilisé récemment pour l'alimentation en eau de la ville d'Essaouira.

VI. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DE LA BAIE D'ESSAOUIRA

1. La marée

1.1. Généralités

La marée est la variation du niveau de la mer due à l'action gravitationnelle de la lune et du Soleil dont les mouvements peuvent être calculés avec précision sur des périodes de plusieurs centaines, voire de plusieurs milliers d'années. L'attraction de ces astres a pour conséquence de déplacer les océans ; l'attraction de la lune est 2,2 fois plus élevée que celle du soleil. Cette différence est liée à l'éloignement du Soleil par rapport à la terre et ce, malgré la masse importante du Soleil. Comme la Terre tourne sur elle-même autour d'un axe incliné, chaque méridien occupera 4 positions caractéristiques par rapport à la Lune. La durée d'un cycle de rotation étant de 24 heures, chacune des expositions caractéristiques sera de 6 heures. Chaque position caractéristique du méridien correspond à une marée et les 6 heures correspondent à la durée moyenne d'une marée. Entre les positions extrêmes, la multitude de positions intermédiaires des 3 planètes donnent des variations journalières de l'importance des marées. A ces mouvements d'allure régulière se superposent des variations de hauteur d'eau d'origine météorologique, appelées surcotes-décotes, dont l'étude relève essentiellement de méthodes statistiques. Le coefficient des marées est exprimé en centièmes, il peut varier entre 20 et 120 (Tableau I.1).

<i>Coefficient</i>	<i>Type de Marées</i>
20	Marées de Mortes Eaux
45	Marées de Mortes Eaux Moyennes
70	Marées Moyennes
95	Marées de Vives Eaux Moyennes
120	Marées de Vives Eaux

Tableau I. 1: Types de marées en fonction du Coefficient (Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM)).

Les plus faibles marées s'enregistrent aux solstices d'été (juin) et d'hiver (décembre), alors que les fortes marées s'enregistrent aux équinoxes de printemps (mars) et d'automne (septembre). Les surcotes-décotes, correspondent aux différences entre les hauteurs d'eau observées et la marée prédite ; elles ne font donc pas partie de la marée proprement dite.

La courbe de marée d'une onde composante est une sinusoïde dont l'amplitude et la phase ne dépendent que du lieu d'observation. Ainsi la hauteur de la marée à un instant t peut s'exprimer par la formule suivante :

$$h(t) = Z0 + \text{Somme} (Ai \cos (qi t + Voi - Gi))$$

Equation I.1

- *Z0* est le niveau moyen, rapporté au zéro des cartes, autour duquel oscille le niveau de l'eau.
- *Ai* et *Gi*, appelés constantes harmoniques, sont respectivement l'amplitude et la situation à Greenwich de l'onde élémentaire et ne dépendent que du port considéré ;
- *qi* est la vitesse angulaire de l'onde élémentaire
- *Voi* est la valeur de l'argument astronomique pour $t = 0$

Les ondes semi-diurnes dont la période est voisine de douze heures sont généralement les plus importantes. Elles génèrent la forme générale de la marée en un lieu et déterminent le type de la marée. Toutefois, dans les zones de faible profondeur, les ondes supérieures et composées peuvent devenir très importantes. L'ensemble de ces ondes, chacune par sa période, son amplitude et sa phase constitue le spectre de la marée qui forme la carte d'identité de la marée dans la zone désignée. Chaque port a un spectre de marée caractéristique. Pour les sites où la marée est importante, la prise en compte de plus d'une centaine d'ondes composantes peut être nécessaire pour un calcul précis. Ce spectre est déterminé en analysant les observations réalisées pendant une longue période (au minimum 29 jours, correspondant à une lunaison, mais de préférence, plus d'une année pour obtenir une bonne précision) (El Mimouni, 2009).

La connaissance de ce spectre permet de prédire la marée astronomique. Les composantes les plus importantes de la marée semi-diurne sont les suivantes :

- L'onde M2 est la marée générée par la "Lune moyenne", astre fictif animé d'un mouvement uniforme sur une orbite circulaire située dans le plan de l'équateur et ayant la même période de révolution que la Lune réelle. Cette marée présente deux pleines mers et deux basses mers par jour lunaire (24 h 50 min).
- L'onde S2 représente la marée due au "Soleil moyen", astre fictif animé d'un mouvement uniforme, sur une orbite circulaire située dans le plan de l'équateur et ayant la même période de révolution que le Soleil réel. Elle représente deux pleines mers et deux basses mers par jour solaire (24 h). Le marnage est la différence entre une pleine mer et une basse mer successives.

1.2. La marée dans le littoral d'Essaouira

Sur le littoral d'Essaouira, le marnage maximal observé dépasse rarement le seuil de 4 m ; (la plage d'Essaouira est classée parmi les plages mésotidales) (Davies ,1964 ; Masselink et Short, 1993). La région connaît une marée semi-diurne où il y a deux pleines mers et deux basses mers d'importances sensiblement égales par jour. C'est le type de marée prépondérant sur les côtes Atlantiques.

Cette marée est un des facteurs les plus importants dans le système hydrosédimentaire du littoral d'Essaouira, qui influence directement ou indirectement la morphogénèse de la plage.

2. La houle

2.1. Généralités

On appelle houle l'ensemble d'ondulations ou de vagues parallèles presque identiques qui se propagent, à la surface de la mer, de façon sensiblement uniforme vers le rivage. Il s'agit donc d'un mouvement oscillatoire des couches superficielles d'eau dû au frottement du vent sur la

surface. Plus le vent est fort et plus la distance de frottement sur l'eau est grande, plus la houle est forte, c'est ce que on appelle le « fetch ».

Les paramètres qui caractérisent la dynamique des vagues sont (Figure I.12):

- H : la hauteur de houle (dénivellation maximale entre une crête et un creux successifs).
- L : la longueur d'onde.
- T : la période de la houle (temps qui sépare le passage de deux crêtes successives en un point fixe).
- La direction de propagation, qui suit la direction des vagues, direction selon les points cardinaux ou en degré par rapport au nord.
- La célérité (la vitesse moyenne de propagation des crêtes, L/T)
- La cambrure (le rapport entre la hauteur et la longueur d'onde = H/L)

La taille de la houle dépend plus particulièrement de la profondeur d'eau ; plus le sol s'enfonce dans l'eau, plus la houle est grande.

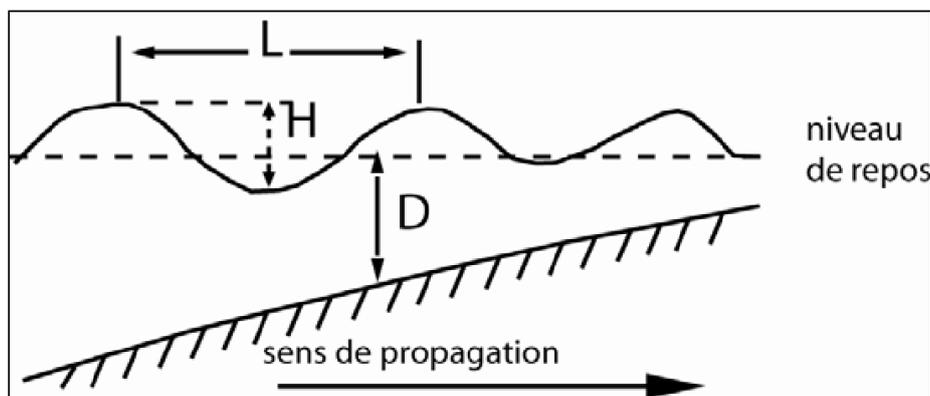


Figure I. 12: Illustration des paramètres de la houle

2.2. Génération de la houle

La génération de la houle se fait par l'action du vent sur la surface de l'eau (zone de fetch qui correspond à la surface marine sur laquelle agit le vent). Ce dernier transmet son énergie par des frottements sur l'eau qui créent de petites vagues désordonnées (le clapot). Un vent fort et constant sur une longue période peut aussi influencer la surface de l'eau côtière et induire des courants de compensation (upwelling ou downwelling) et des courants de dérive (Komar, 1998, El Mimouni, 2009).

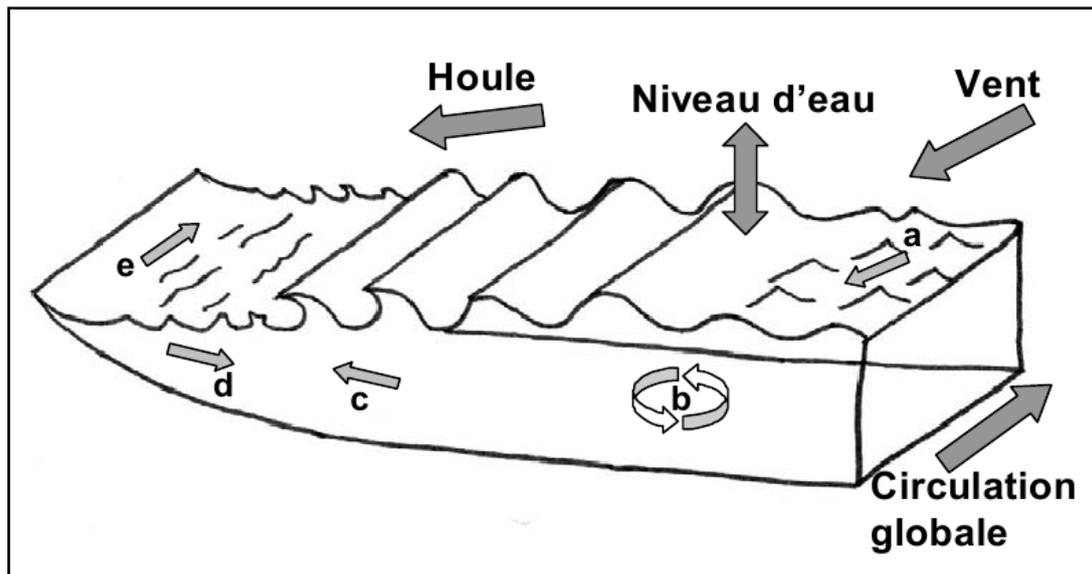


Figure I. 13: Forçages du milieu côtier : différents types de courant de la zone littorale

Les courants qui se forment dans la zone littorale est qui peuvent provoquer le mouvement des sédiments sont (Figure I.13):

- (a) courant induit par le vent.
- (b) courants rotatifs dus à la marée. Courants induits par la transformation des vagues.
- (c) transport en masse.
- (d) courant de retour.
- (e) dérive littorale.

Pour certaines côtes, la houle est un forçage primordial, car sa transformation à l'approche du rivage libère une grande quantité d'énergie. Près de la surface de la mer, la houle est une onde qui provoque la rotation des particules d'eau lors de son passage. Vers le fond, ce mouvement devient elliptique, puis se transforme en courant alternatif susceptible de déplacer les sédiments. Simultanément, les frottements et la perte d'énergie de la houle à proximité du continent modifient la forme de l'onde en augmentant la taille et la cambrure des vagues. Les courants alternatifs du fond deviennent alors asymétriques et induisent un flux moyen orienté vers la côte nommé « transport en masse ». (Figure I.13) Lorsque les vagues arrivent près du rivage, la cambrure augmente et la forme devient instable avant qu'elles se brisent en libérant une grande quantité d'énergie. La houle commence alors à déferler, dans un phénomène extrêmement complexe qui crée de la turbulence, des mélanges d'air, d'eau et de sable. Un « courant de retour » se met également en place sous le déferlement et compense les apports d'eau du « transport en masse ». De plus, dans le cas de houles qui arrivent obliques à la côte, un courant de « dérive littorale » se forme parallèlement au littoral.

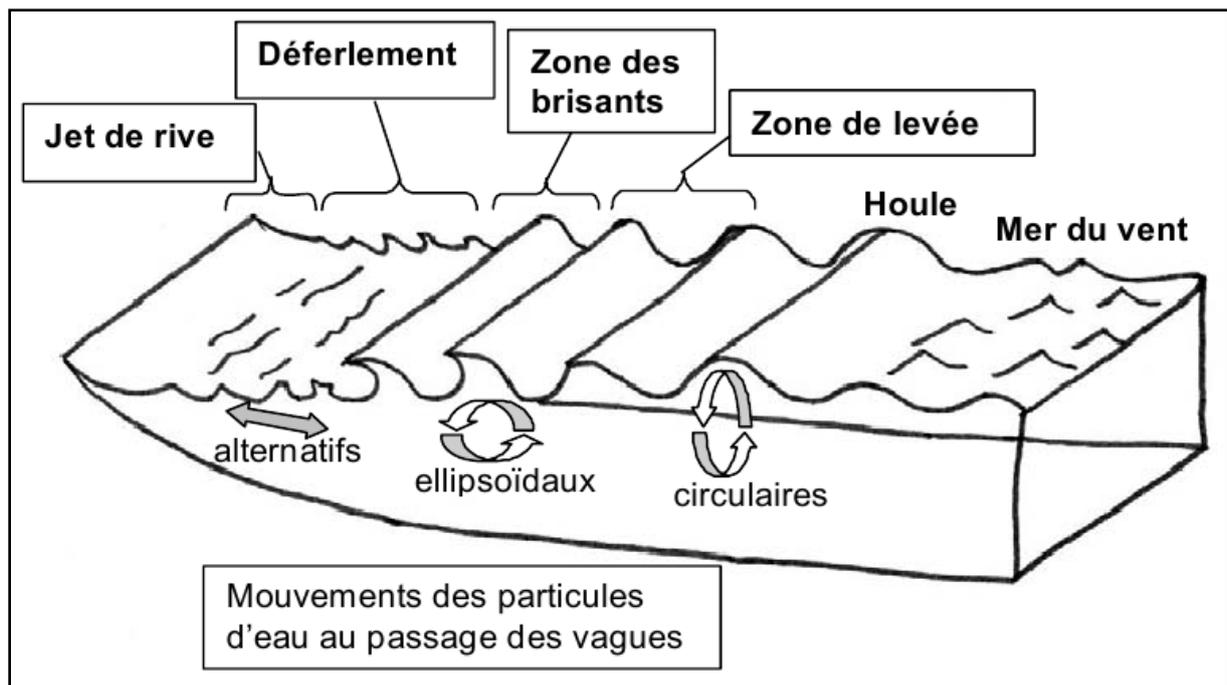


Figure I. 14: Zonation littorale : Transformation des vagues à l'approche de la côte

Les différentes phases d'évolution des vagues permettent de distinguer quatre zones au niveau du littoral, qui forment autant de sous-systèmes définis par l'approche océanographique (ou hydrodynamique). Du large vers la côte, on distingue (Figure I.14) :

- La zone de levée ; les vagues sont freinées sur le fond et commencent à être déformées.
- La zone de brisants; les vagues ne sont plus en équilibre et se cassent.
- La zone de déferlement; les vagues brisées roulent en perdant leur énergie.
- La zone de jet de rive; les vagues ne forment plus qu'une mince lame d'eau qui vient mourir sur le rivage.

2.3. La houle dans la baie d'Essaouira

La houle dans la région d'Essaouira est de direction générale NE-SW; dès son arrivée à l'entrée de la baie, et suite à l'existence des obstacles que représentent l'île de Mogador et la digue du port d'Essaouira, elle subit des divergences et change de direction. En contournant l'île de Mogador, la houle change de direction et devient W-E, puis NWW-SEE, puis NNE-SSW (Figure I.15). En rencontrant la houle issue de la baie, cela crée une zone de convergence des deux houles diffractées ainsi qu'une zone de houle gaufrée (Gentile, 1997). Cette situation entraîne une perte d'énergie de la houle et une diminution de puissance de transport des sédiments, ce qui est à l'origine de fortes accumulations de sédiments formant une avancée sableuse « ou sillon » située juste à côté de l'embouchure de l'Oued Ksob (El Mimouni, 2009).

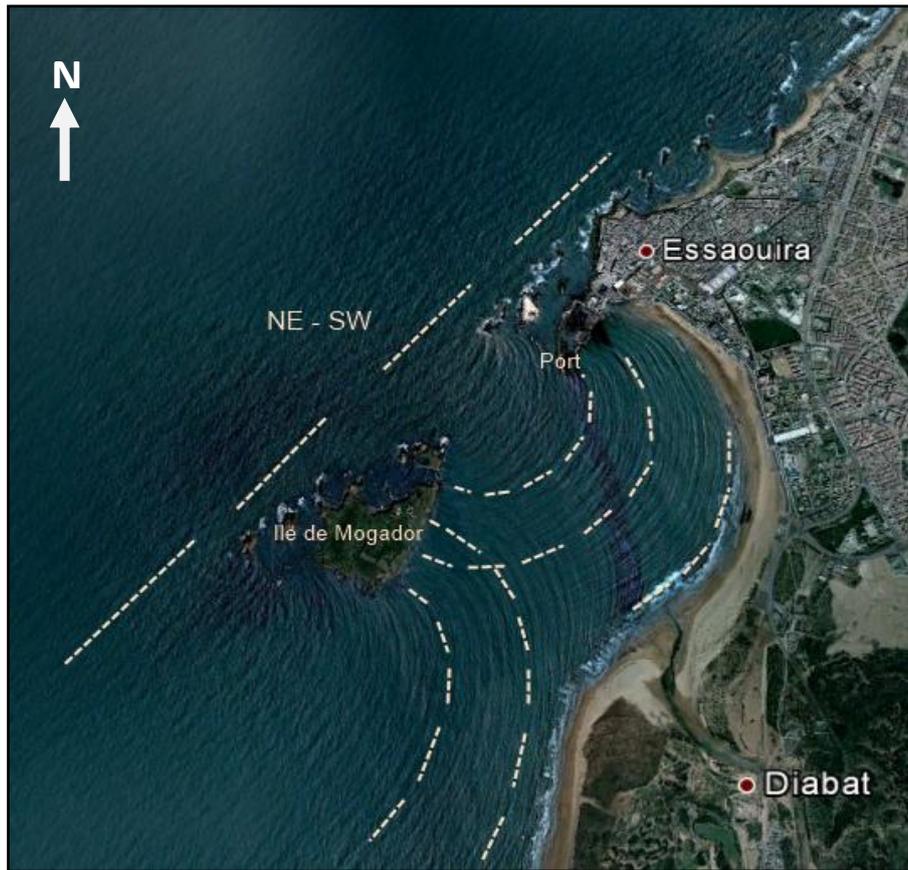


Figure I. 15: Réfraction de la houle dans la baie d'Essaouira (Google Earth 2009)

VII. LES COURANTS

Plusieurs types de courant peuvent être générés au niveau de la frange littorale (Figure I.16). Cependant, leur importance et leur influence sur le transit sédimentaire varient d'un type à un autre.

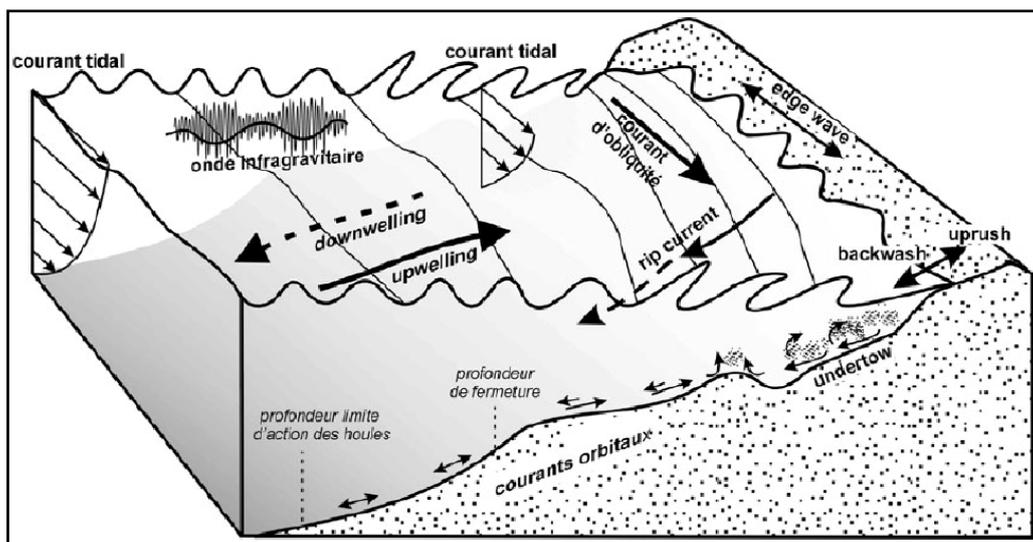


Figure I. 16: Processus hydrodynamique dans la zone côtière (Stepanian, 2002)

1. Les courants généraux

Ce sont souvent des courants océaniques qui sont d'une grande importance hydrologique marine et climatologique ; cependant, leur influence au niveau de la dynamique du littoral est négligeable.

Sur les côtes atlantiques marocaines, en particulier au large d'Essaouira, ces courants sont représentés par le courant marin froid constant des Canaries généré par le déplacement de l'anticyclone des Açores.

Ce courant circule entre 200 m et 300 m au large du Maroc avec une vitesse de 25 cm/s à 75 cm/s, mais il peut parfois atteindre 100 cm/s (Erimesco, 1969).

2. Les courants générés par la houle

Ces courants sont localisés dans la zone des brisants et dans la zone de déferlement. On distingue le courant de retour (undertow), les courants d'arrachement (rip-currents) et le plus important sur l'évolution des littoraux, le courant d'obliquité parallèle à la côte, dit courant de dérive littorale (Figure I.16).

- **Le courant de retour sur le fond (undertow)** est un courant stable dont l'intensité est relativement proportionnelle à la hauteur des vagues (Svendsen, 1984). C'est un courant dirigé vers le large dans la zone de déferlement.

- **Les rip-currents** (courants sagittaux, ou d'arrachement) sont des courants qui compensent l'afflux d'eau à la côte suivant des chenaux préférentiels (Van Rijn, 1998). Ils peuvent atteindre des vitesses très élevées et sont périodiquement répartis sur le littoral (Short, 1985 ; Short & Brander, 1999). La présence d'une onde de bord (un type d'onde d'infragravité) est considérée comme la cause la plus probable de leur répartition (Huntley & Short, 1992). Ils affectent toute la tranche d'eau.

- **La dérive littorale** correspond à un courant parallèle à la ligne de rivage généré par la houle après son arrivé à la côte avec une certaine obliquité. Ce courant joue un rôle majeur dans le transport des sédiments tout le long du littoral, surtout si ce littoral correspond à une plage sableuse. La direction de la dérive littorale au niveau de la côte atlantique marocaine est généralement du nord vers le sud, tant que la direction de la houle incidente est du NNW vers le SSE. Puisque la ligne du rivage n'est pas une ligne rectiligne, le sens et l'intensité du courant sont liés à l'angle d'incidence des crêtes de la houle par rapport à l'orientation de cette ligne de rivage.

Au niveau du littoral d'Essaouira cet angle d'incidence est d'environ 33°, ce qui est à l'origine d'une dérive assez importante.

3. Les courants de marée

Les deux principaux courants engendrés par la marée sont le flot et le jusant. Ces deux courants sont généralement perpendiculaires à la côte, alternatifs et leur vitesse décroît du large vers le rivage (Wright et al, 1982 ; Horn, 1993).

4. Les courants générés par le vent

En fonction de son incidence et de son intensité, l'action du vent sur la masse d'eau est à l'origine des variations du niveau du plan d'eau sur la côte.

4.1. Les phénomènes de surcotes - décotes

Le soufflement du vent sur les côtes est aussi responsable de surcotes et de décotes en déplaçant les eaux de surface parallèlement au sens du vent. Lors d'une forte marée, si le vent souffle de la mer vers la continent, il crée un courant de surface qui renforce la surélévation locale du niveau de la marée, et influence aussi les courants de marée (flot et jusant) ; ceci correspond au phénomène de surcotes (wind set up). Dans le cas contraire, quand le vent souffle de la terre vers la mer l'effet de la marée est atténué, on a dans ce cas le phénomène de décote (wind set down). Sur le littoral d'Essaouira, puisque les vents des alizés sont souvent de direction NNE parfois NE, parallèle à la ligne de rivage l'effet du phénomène de surcotes-décotes est atténué (El Mimouni, 2009).

4.2. Upwelling

Lors des périodes de forts vents de terre, les eaux de surface sont repoussées vers le large. Il se produit alors, au niveau du fond, un courant de compensation dirigé vers le rivage et qui remonte à la côte. Ces eaux sont ensuite entraînées vers le large, en dehors de la zone de remontée, par la dérive de surface. Le mécanisme qui donne naissance à un upwelling a lieu principalement le long des côtes bordant les océans dans les latitudes tropicales, là où soufflent les alizés et où se situe l'anticyclone permanent. Il concerne principalement les côtes du Pérou-Chili dans l'océan Pacifique sud (en relation avec l'anticyclone de Tahiti), la côte de Californie dans le Pacifique nord (anticyclone d'Hawaï), celles de Namibie (anticyclone de St Hélène) dans l'Atlantique sud et les côtes marocaines (anticyclone des Açores) dans l'Atlantique nord.

Ce phénomène est très actif en été (Juin à Octobre) où les alizés lui sont favorables, alors qu'en hiver, l'upwelling devient plus faible à cause de la faiblesse de la vitesse des vents. Ces derniers entraînent les eaux de surface vers le large qui seront remplacées à leur tour par des eaux qui viennent des profondeurs froides et enrichies en nutriments du fond.

Dans la région d'Essaouira par exemple, la température des eaux ne dépasse guère le seuil de 18°C (Chaibi, 2003). Ceci explique la fraîcheur du climat et la douceur de la température durant la saison estivale dans la région d'Essaouira.

4.3. Downwelling

Dans certains cas, les forts vents ont la même direction que la houle; les masses d'eau entraînées en surface depuis le large vers la côte sont compensées par des circulations profondes dans la masse d'eau. Ce courant peut être en partie responsable de l'érosion des fonds (Héquette & Hill, 1993).

Chapitre II

ETUDE DIACHRONIQUE **DU TRAIT DE COTE**

INTRODUCTION

L'étude des changements passés d'un littoral peut se faire par différentes méthodes d'analyse. L'interprétation de photographies aériennes, l'analyse de cartes (historiques, topographiques et hydrographiques), l'étude des images satellitaires, des relevés sur le terrain et des enquêtes auprès des gens du milieu constituent autant de sources d'information pour étudier le trait de côte (Grenier et Dubois, 1990).

Les différentes études effectuées sur le littoral d'Essaouira (Gentile, 1997; Simon, 2000; Lharti et al., 2006 ; Lharti, 2009 El Mimouni, 2009) ont fait appel à différents type de techniques pour évaluer l'évolution dynamique du littoral d'Essaouira (sédimentologie, topographie, paléoenvironnement). Cependant, jusqu'à présent aucune étude n'a fait appel à l'étude diachronique des photos aériennes. Nous avons donc le privilège d'être les premiers à utiliser cette technique sur le littoral d'Essaouira, connue pour son évolution complexe, du fait de l'interférence de plusieurs paramètres naturels et humains: situation géographique, apports sédimentaires importants de l'oued Ksob, vents forts et permanents, houle complexe, courants de différente nature, actions anthropiques de plus en plus diversifiées, morphologie complexe due à l'île de Mogador...

Afin de réaliser l'étude diachronique du trait de côte sur le littoral d'Essaouira, nous avons utilisé les campagnes de photographies aériennes disponibles suivantes : 1990, 2006, 2009 et 2012. Nous allons donc pouvoir quantifier la dynamique spatio-temporelle du trait de côte sur une période de 23 ans.

La méthodologie utilisée dans cette étude repose sur des techniques de photo-interprétation assistée par ordinateur. L'approche méthodologique comprend les étapes suivantes :

- Choix d'une ligne de référence.
- Géoreferencement sur ArcGIS des photographies aériennes disponibles à partir des points fixes (amères ou invariables) présents sur l'ensemble des photographies.
- Digitalisation du trait de côte.
- Estimation des erreurs liées : 1) - au géoréférencement des images aériennes, 2) - à la digitalisation du trait de côte, 3) - aux variations du niveau des pleines mers puis 4) - définition de la marge d'erreur globale
- Etude de la cinématique du trait de côte ; en effet, après la digitalisation et la superposition des images multidates et au traçage de transects perpendiculaires à la plage, on a procédé à la mesure de la distance qui sépare deux traits pour calculer les taux d'érosion et d'engrèvement linéaires entre chaque deux prises de vue.

I. MÉTHODOLOGIE ET TECHNIQUE D'ETUDE

1. Le choix d'une ligne de référence

De nombreux auteurs assimilent le trait de côte à la ligne de rivage à pleine mer facilement identifiable sur les photographies aériennes (Figure II.1). Ainsi, Thielier & Danforth (1994) et Douglas & Crowell (2000) prennent en compte la différence radiométrique entre les parties sèches et les parties humides de l'estran. Le trait de côte est aussi défini comme l'ados de plage (la rupture de pente entre le haut de plage et l'arrière plage). D'autres chercheurs, travaillant sur des littoraux macrotidaux où le marnage est très important, ont choisi le trait de côte comme la limite de la végétation dunaire (Robin, 2002). Pour Lambert (2006), le trait de côte est défini comme étant la ligne médiane à équidistance des limites des zones de certitude que sont la plage émergée et la mer. Cette approche permet donc le calcul d'une marge d'erreur égale à plus ou moins la demi-valeur de la distance séparant les limites des zones. Des tentatives ont été faites pour proposer des techniques de la délimitation du trait de côte (Grenier & Dubois, 1990). Cette limite y est facilement détectable du fait du sable humide qui a une couleur plus foncée que le sable sec.



Figure II. 1: Exemples des lignes de référence sur la baie d'Essaouira (source : Google earth)

La zone d'étude présente des plages aménagées, au moins dans la partie nord de la baie, par l'installation d'une corniche balnéaire qui ne nous permet pas de prendre en compte la limite de la végétation comme trait de côte. Nous avons alors choisi de définir le trait de côte comme la ligne des pleines mers précédant la prise de vue (Figure II.1), cette limite reste dépendante des conditions de marée, elle reste fluctuante d'une date à l'autre. Nous verrons néanmoins dans un paragraphe ultérieur comment la méthode que nous avons mise en œuvre a permis d'évaluer les différences de hauteurs d'eau entre une pleine mer de vive-eau et de morte-eau, et par là même, d'estimer les marges d'erreur en matière de positionnement du trait de côte.

2. Rectification géométrique des images aériennes disponibles

Les informations sur la position de la ligne de rivage proviennent des clichés des deux missions aériennes, acquis en mode panchromatique en 1990 et 2006, et des images satellitaires des deux périodes 2009 et 2012 obtenus à partir de google-earth.

Ces images ont été rectifiées géométriquement et projetées dans le système de projection cartographique Lambert Maroc (Merchich) Zone I (Essaouira). Les coordonnées de points repérés sur les images ont été déterminées à partir de google-earth. Le logiciel Arcgis 9.3 a été utilisé pour effectuer un géoréférencement de l'ensemble des photos-aériennes.

Pour valider les corrections géométriques, les images multitudes du site ont été superposées à l'écran pour vérifier la superposition des éléments remarquables et des infrastructures présentes dans la zone d'étude (route, port, île, bâtiments, etc.). En cas de mauvais résultats, l'image subit une rotation, une mise à l'échelle et une translation afin d'obtenir une superposition satisfaisante des clichés pour les assembler et extraire le trait de côte.

3. Digitalisation du trait de côte et estimation des erreurs

La digitalisation a été réalisée avec le logiciel Arcgis 9.3 sur fond d'images redressées. En dépit du redressement des images aériennes et de l'automatisation des mesures, il demeure un certain nombre d'incertitudes liées à la qualité des données de base, à la rectification des images, à l'extraction du trait de côte et à la variation à court terme de la position de la ligne de référence. Dans le cadre de synthèses diachroniques, tous ces éléments sont des facteurs de décalages supplémentaires qu'il convient d'évaluer avant de tirer des conclusions sur la cinématique littorale (Thieler et Danforth, 1994; Durand, 1998, 2000; Robin, 2002).

3.1. Erreurs liées au géoréférencement des photos aériennes

Le géoréférencement correct d'une image nécessite un nombre suffisant d'amers bien répartis sur l'ensemble de la zone d'étude. Or sur les images de base utilisées, il a été aisé de réunir ces conditions. Généralement, les erreurs pour chaque image étaient inférieures ou égales à 0,5 pixel soit 0,5 m. Toutefois, Durand (2000) estime qu'il faut ramener cette erreur à ± 1 pixel soit 2 pixels si on compare deux images.

3.2. Erreurs liées à la digitalisation du trait de côte

La digitalisation du trait de côte aux quatre dates retenues (1990, 2006, 2009 et 2012), a été répétée à plusieurs reprises de manière à estimer la marge d'erreur induite par l'opérateur lors de la numérisation à l'écran. En effet, comme l'ont indiqué plusieurs auteurs, le positionnement du trait côte au moment de la phase de digitalisation par un même opérateur peut être extrêmement variable dans le temps (Thieler et Danforth, 1994 ; Durand, 2000). Cela dépend de la perception de l'information par la personne à un moment donné. Cela peut aussi relever de considérations techniques, comme le type d'ordinateur, de luminosité d'écran, etc., qui donnent à l'opérateur une visualisation différente des objets. Ainsi, la répétition des données acquises pour un même secteur a permis de calculer l'intervalle de variation des décalages en matière de positionnement. Globalement, on obtient une précision métrique pour la ligne des pleines mers sur des prises de vue de bonne qualité et à grande échelle. En revanche, l'incertitude est plus grande sur les images anciennes. La précision est moindre pour la ligne des pleines mers si le contraste de l'image est médiocre.

Dans notre cas, nous avons trouvé une précision de $\pm 2,62$ m pour la ligne des pleines mers.

3.3. Erreurs liées aux variations du niveau des pleines mers

Une étude comparative fondée sur la photo-interprétation de la ligne des pleines mers requiert que les images soient acquises aux mêmes périodes dans des conditions de marée identiques ou proches afin de minimiser l'influence des fluctuations du niveau des pleines mers (Stafford et Langfelder, 1971). Il est donc nécessaire d'évaluer les effets des variations du niveau de marée haute sur la position de la ligne des pleines mers, d'autant plus que les dates exactes et les conditions météorologiques de toutes les prises de vues utilisées sont, comme nous l'avons précédemment mentionné, inconnues. Quantifier précisément ces effets dans une zone comme la baie d'Essaouira est délicat, car nous ne disposons pas de données concernant la pente de la plage au moment où les missions aériennes ont été réalisées. Par contre on peut avoir les données de marée basse et marée hautes pendant les mois où les photos aériennes ont été prises. Ces données sont disponibles dans le site du service hydrographique et océanographique de la marine.

La pente de la plage d'Essaouira varie dans l'espace et dans le temps, pour le calcul de la marge d'erreur, nous avons calculé la moyenne des pentes des profils topographiques que nous avons réalisés dans la plage pendant les missions de février et de mars 2013, et celles calculées durant la période (2004 – 2006) (El Mimouni, 2009). Cette pente est de l'ordre de 3° . Ainsi, comme l'on montré Thomas et Diaw (1997), en fonction de la pente (θ) et de la hauteur d'eau (h), il est possible de calculer l'écart entre les niveaux de pleines mers maximale et minimale (Δd) à partir de la formule suivante :

$$\Delta d = h / \tan (\theta)$$

Le Tableau II.1 résume les valeurs de la marée basse et celles de la marée haute pendant les mois où les photos ont été prises.

Dates des prises de vues	Maximum des Pleines mers (m)	Minimum des Basses mers (m)	Hauteur d'eau (m)	Marge d'erreur (m)
Octobre 1990	3,1	1,66	1,44	27,4
08 / 05 / 2006	3,03	1,44	1,59	30,3
18 / 04 / 2009	2,72	1,70	1,02	19,4
13 / 11 / 2012	3,33	1,85	1,48	28,2
La moyenne				26,32

Tableau II. 1: Erreurs liées à la variation du niveau de la mer

3.4. Définition de la marge d'erreur globale

Avant le calcul des taux d'évolution du trait de côte, une marge d'erreur globale a été définie. Cette marge tient compte des incertitudes liées au calage des images, à l'extraction du trait de côte et aux variations à court terme de la ligne des pleines mers. En d'autres termes cette marge d'erreur permet de définir des seuils à partir desquels on considère qu'il y a une avancée ou un recul du trait de côte. Elle est le résultat de la somme de l'ensemble des erreurs qui ont été estimées précédemment. Dans le cas de notre étude la marge d'erreur globale a été établie à $\pm 30,94$ m.

II. Résultat d'analyse

L'étude diachronique du littoral d'Essaouira, consiste à générer 11 transects perpendiculaires au trait de côte. L'avancée ou le recul du trait de côte ont été mesurés pour chacun des transects et ont permis d'appréhender l'évolution générale de la ligne du rivage. A partir du point d'intersection du trait de côte avec le transect à une date définie, nous obtenons les distances de déplacement du trait de côte.

Afin de faciliter l'analyse, la zone étudiée a été subdivisée en trois secteurs morphologiquement distincts : (Figure II.2)

- Secteur 1 : correspond à la partie de la baie; située entre le port au nord et la rive droite de l'estuaire de l'oued Ksob au sud.
- Secteur 2 : correspond à la zone située de part et d'autre de l'embouchure de l'oued Ksob.
- Secteur 3 : définie comme étant située au sud de l'estuaire de l'oued Ksob.

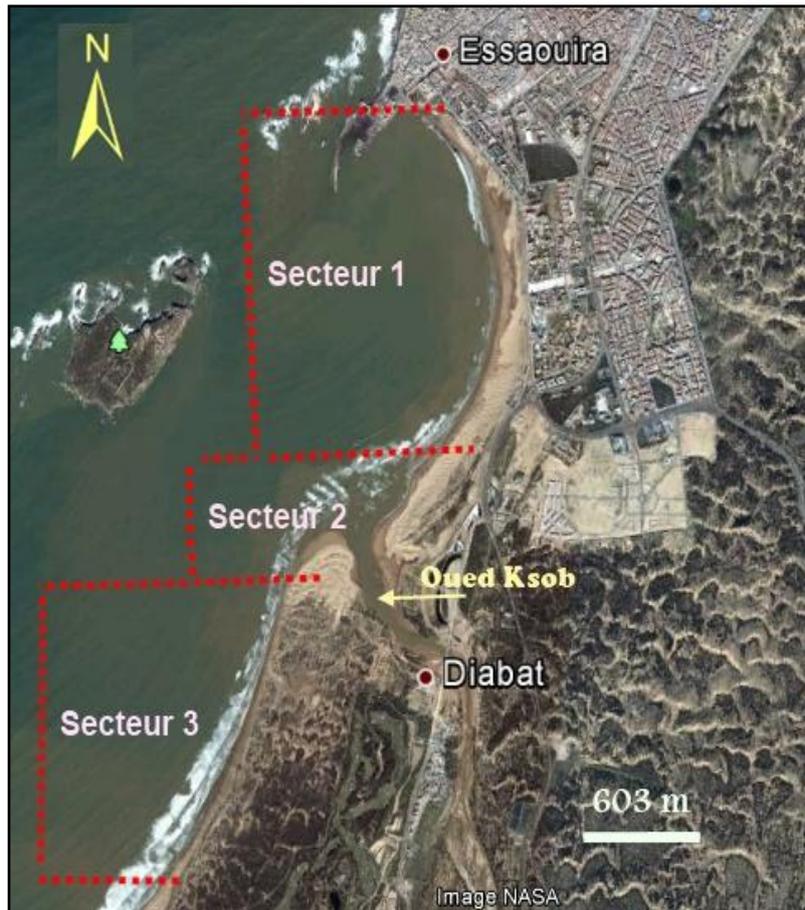


Figure II. 2: Subdivisions de la zone d'étude en 3 secteur (source : Google earth)

1. Secteur 1

Les variations de la ligne du rivage du secteur 1, sont analysées à partir de 6 profils établis perpendiculairement à la ligne de côte ; il s'agit des mêmes profils définis dans l'étude topographique (Figure II.3).

L'analyse a montrée une accrétion importante entre les années 1990 et 2006, dont le taux linéaire augmente progressivement tout en se déplaçant du profil 3 au profil 4. L'avancée maximale est enregistrée au niveau du profil 4 (Figure II.3 et Tableau II.2) qui est de l'ordre de $5,74 \pm 1,9$ m/an, puis diminue légèrement en allant vers le profil 10.

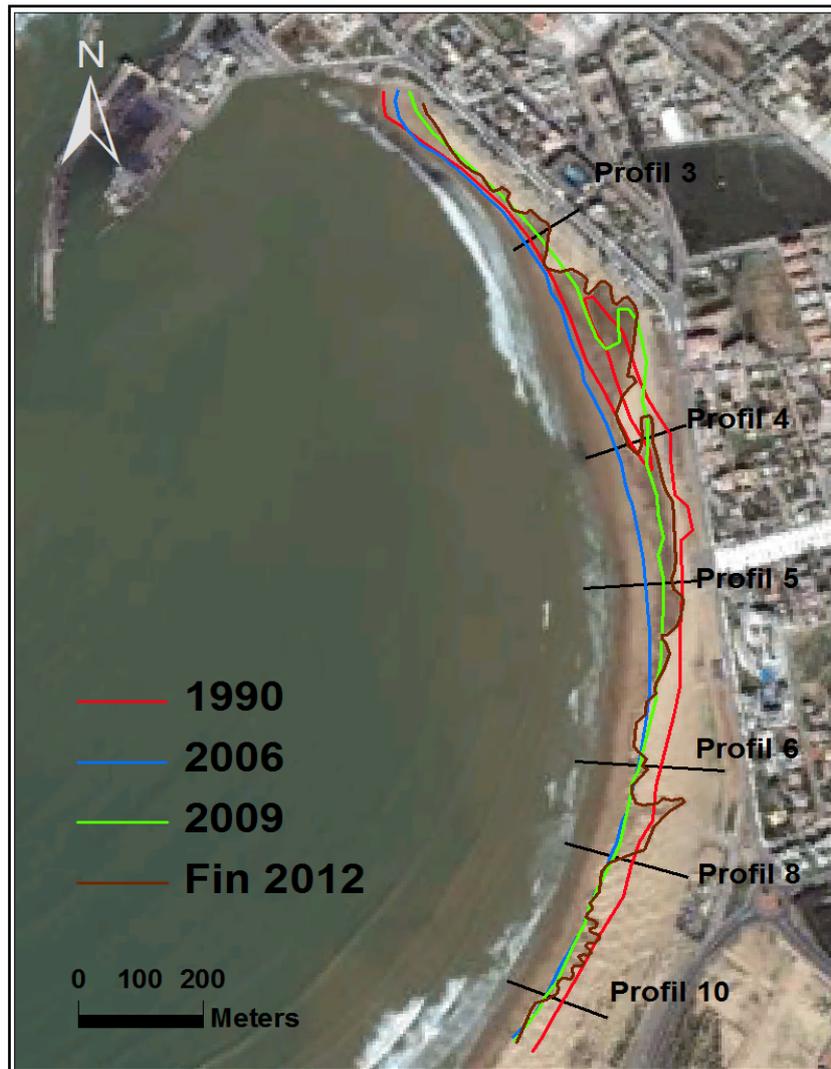


Figure II. 3: Evolution du trait de côte au niveau du secteur 1 (source : Google earth)

Cette accrétion est directement liée aux apports sédimentaires de l’oued Ksob qui représentent la principale source de sédiment pour la plage d’Essaouira (Gentile, 1997; El Mimouni et al., 2007 ; El Mimouni, 2009). Pendant les périodes de crue, on assiste à une augmentation du budget sédimentaire de la plage d’Essaouira du fait de l’importante quantité de sable susceptible d’être charriée. Lors des crues, plus le débit de l’oued augmente plus la charge solide est importante. Il faut noter qu’au 29 Novembre 2005, la date de la plus spectaculaire crue durant ces dernières décennies, le débit de pointe atteint était de 2550 m³/s d’après l’Agence de Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT) (Figure II.4) ; il s’en est suivi une immense quantité de sédiments qui a été transportée vers la baie (Figure II.5B).

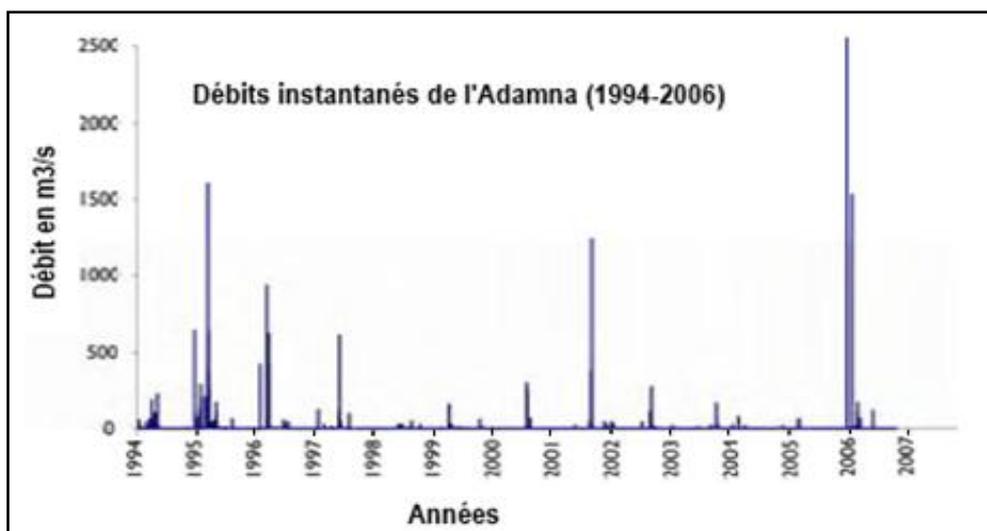


Figure II. 4: Débits de l'oued Ksob à la station d'Adamna (Source: A.B.H.T in El Mimouni et al, 2010).

L'oued Ksob constitue un obstacle morphologique vis-à-vis des sables qui, sous l'action des vents dominants du Nord et du NNE, migrent vers le Sud sous forme de dunes barkhanoïdes (Lharti et al., 2006). Ainsi, en période de sécheresse le lit de l'oued est partiellement colmaté; les sables de plage continuant leur migration vers le Sud forment un barrage à l'embouchure de l'oued. Les eaux constituent alors un petit étang au niveau de Diabet. Dès la première crue importante, le barrage sableux cède et le lit de l'oued est alors évacué (Figure II.5A) (El Mimouni et al, 2010), ce qui engendre l'accumulation de très grande quantité de matériaux au niveau de la baie, qui va être par la suite redistribuée le long de la plage sous l'action hydrodynamique (Figure II.5B), et par conséquent déplacement de la ligne de rivage vers l'avant plage (Figure II.3).

	1990 - 2006		2006 - 2012	
	<i>Distance entre les deux linges de pleine mer (m)</i>	<i>Taux d'accrétion linéaire (m/an)</i>	<i>Distance entre les deux linges de pleine mer (m)</i>	<i>Taux d'érosion linéaire (m/an)</i>
Profil 3	12,1	0,76	48,29	8,05
Profil 4	91,83	5,74	65,05	10,84
Profil 5	60,56	3,78	44,95	7,5
Profil 6	40,78	2,55	9,78	1,63
Profil 8	36,22	2,26	15,54	2,6
Profil 10	28,16	1,76	4,31	0,72
moyenne	44,94 ± 30,94	2,8 ± 1,9	31,32 ± 30,94	5,22 ± 5,19

Tableau II. 2: Evolution du trait de côte entre 1990 et 2006 et entre 2006 et 2012, au niveau du secteur 1

Entre les années 2006 et 2012, la zone montre un léger démaigrissement du trait de côte dans la partie nord qui comporte les profils 3, 4 et 5 avec un taux d'érosion moyen de l'ordre de

8,80 ± 5,19 m/an, cette érosion s'affaiblit considérablement dans la partie sud, où on peut dire qu'en tenant compte de la marge d'erreur, la ligne de rivage devient à peu près stable.

L'évolution du trait de côte pendant cette période, suggère que l'intensité de l'érosion éolienne responsable de la migration des sables du haut de plage vers le sud devient légèrement supérieure à celle des apports sédimentaires véhiculés par l'oued Ksob lors des crues, comme l'on montré El Mimouni (2009), les variations des débits de l'oued Ksob d'une année à l'autre jouent un rôle majeur dans l'évolution morphologique et morphodynamique de la plage d'Essaouira.

La différence entre la partie nord de cette zone qui est en érosion et la partie sud qui est en équilibre, s'explique par le transport d'une partie de sables du nord sous l'action éolienne qui s'accumulent en bas estran de la partie sud, en effet; en tenant compte de l'orientation du trait de côte par rapport à la direction générale du vent, une partie des sables éoliens en provenance de la mi-plage des profils 3 et 4 va s'accumuler au niveau du bas de plage des profils 5, 6 et 8. Ainsi les sables perdus de la partie nord serrent à former un champ de petites barkhanes dans le haut de plage de la partie sud, et pendant les marées hautes de vives eaux, les sables qui forment les barkhanes sont stockés dans la baie du fait de sa morphologie semi-fermée, puis redistribués de nouveau vers la plage par la houle et les courants.



Figure II. 5: Photos prises à l'embouchure de l'oued Ksob lors de la crue de Novembre 2005(El Mimouni, 2009)

2. Secteur 2

La zone située autour de l'estuaire représente une zone très complexe d'un point de vue morphologique et sédimentologique, du fait de l'interaction de plusieurs facteurs (marnage, transport éolien, dynamique fluvial, dynamique marine ...) (Gentile, 1997; Simone, 2000; El Mimouni, 2009), les variations de la ligne de rivage dans cette zone sont analysées à partir des profils 12, 13-1 et 16 (Figure II.6).

L'étude diachronique a montré un démaigrissement continu entre 1990 et 2012, de part et d'autre de l'embouchure de l'oued Ksob, avec un taux d'érosion moyen de 6,02 ± 1,4 m/an

(Figure II.6 et Tableau II.3). Ceci rejoint l'explication qu'on a avancée pour le secteur 1, à savoir que le flux de l'oued provoque un balayage de l'estuaire et prélève une importante partie de la dune sur les rives de l'estuaire (Figure II.5.A). Les sables prélevés dans cette partie de la plage, ainsi que ceux charriés par l'oued Ksob, vont s'accumuler dans la baie, puis sont redistribués sur la plage. Les processus éoliens n'arrivent pas à combler ce déficit de sable, ce qui témoigne de l'importance de l'érosion. Par ailleurs, la dynamique fluviomarine de l'estuaire permet le maintien de cette zone d'érosion.

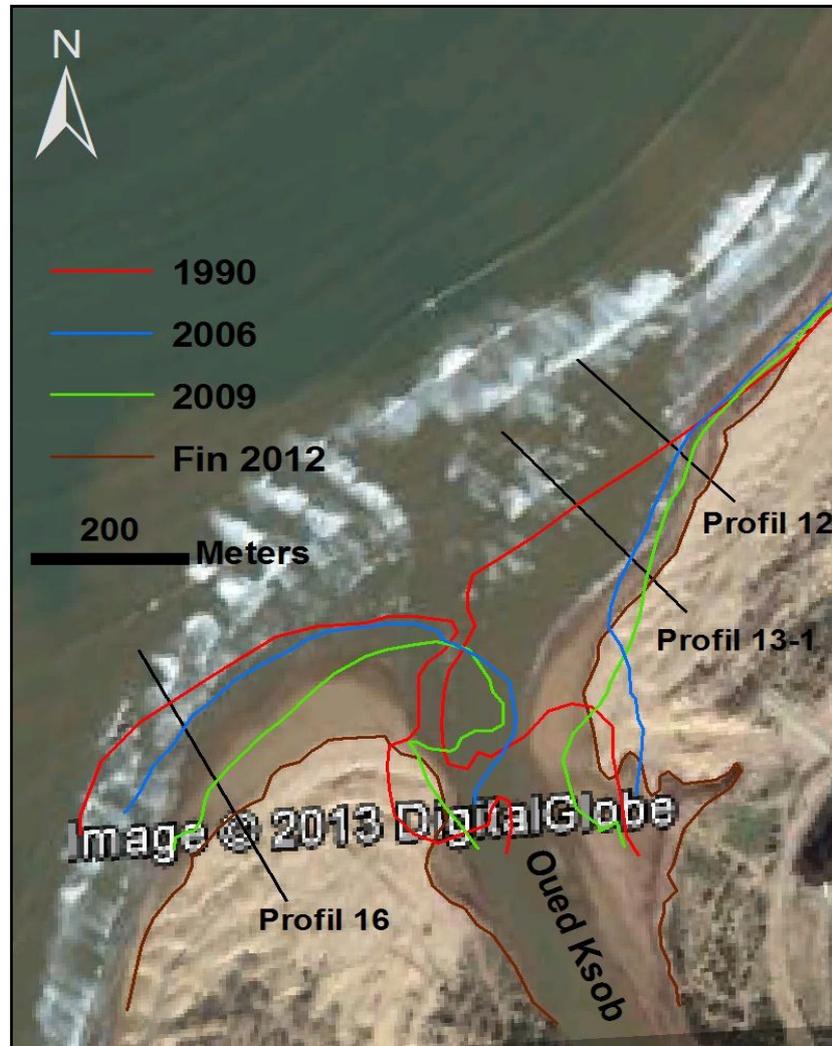


Figure II. 6: Evolution du trait de côte au niveau du secteur 2 (source : Google earth)

	1990 - 2012	
	Distance entre les deux lignes de pleine mer (m)	Taux d'érosion linéaire (m/an)
Profil 12	73,97	3,36
Profil 13-1	145,87	6,63
Profil 16	177,47	8,07
moyenne	132,44 ± 30,94	6,02 ± 1,4

Tableau II. 3: Taux d'érosion entre les années 1990 et 2006, au niveau du secteur 2

	1990 - 2006		2006 - 2012	
	<i>Distance de déplacement (m)</i>	<i>Taux de déplacement linéaire vers NE (m/an)</i>	<i>Distance de déplacement (m)</i>	<i>Taux de déplacement linéaire vers le SW (m/an)</i>
<i>Déplacement du lit mineur</i>	145,88 ± 30,94	9,12 ± 1,9	178 ± 30,94	29,66 ± 5,19

Tableau II. 4: Taux de déplacement du lit mineur au niveau de l'embouchure de l'oued Ksob entre 1990 et 2012, au niveau du secteur 2

D'autre part, on note une fluctuation du lit mineur de l'oued Ksob au niveau de l'embouchure, ce lit s'est déplacé vers le Nord d'une distance de l'ordre de $145,88 \pm 30,94$ m, c'est-à-dire avec un taux de déplacement de $9,12 \pm 1,9$ m/an (Tableau II.3) entre les années 1990 et 2006. Par contre, de 2006 à 2012, nous constatons un déplacement du lit mineur vers le Sud d'une distance de $178 \pm 30,94$ m, c'est-à-dire avec un taux de déplacement de $29,66 \pm 5,19$ m/an (Tableau II.4).

Cette fluctuation est expliquée par le débit aléatoire de l'oued Ksob accompagné de la migration des sables vers le sud. En effet, El Mimouni et al (2010) citent qu'à partir de Diabet, le lit mineur de l'oued fluctue entre les directions Nord et Ouest, ces fluctuations du lit mineur représentent un déplacement de l'embouchure de l'oued, qui est dû à l'arrivée des sables sur la rive droite de l'oued. Cette déviation correspond à un compromis entre l'avancée des sables (période de sécheresse) et les crues (périodes plus humides). Plus la sécheresse (saisonnière ou pluriannuelle) est prononcée, plus la déviation du lit mineur tend vers l'Ouest, alors qu'une déviation vers le Nord semble suggérer un retour vers des conditions plus humides.

Dans notre cas, la période (1990 – 2006) est caractérisée par les crues remarquables de 1996 et de 2005 (Figure II.4) qui semblent être responsables du déplacement du lit vers le Nord, par contre dans la période (2006 - 2012), le déplacement du lit vers le sud indique que la migration des sables vers le sud est dominante par rapport à l'évacuation du lit par les crues.

3. Secteur 3

Les variations de la ligne du rivage au niveau du secteur 3, entre 1990 et 2012, sont analysées à partir des profils 17 et 18 (Figure II.7). Ce secteur a montré en général un recul de trait de côte, avec un taux d'érosion moyen de $4,23 \pm 1,4$ m/an. (Tableau II.4).



Figure II. 7: Evolution du trait de côte du secteur 3 (source : Google earth)

	1990 - 2012	
	Distance entre les deux lignes de pleine mer (m)	Taux d'érosion linéaire (m/an)
Profil 17	111,62	5,07
Profil 18	74,32	3,38
moyenne	92,97 ± 30,94	4,23 ± 1,4

Tableau II. 5: Taux d'érosion entre les années 1990 et 2006, au niveau du secteur 3.

Dans cette zone, la totalité du rivage présente une tendance érosive dont l'intensité diminue progressivement vers le Sud du profil 17 au profil 18. Ce recul du trait de côte est vraisemblablement en relation avec :

- l'action intense de l'hydrodynamisme, du fait que la houle dans ce secteur n'est pas influencée par l'île de Mogador. Il s'agit d'une plage ouverte directement soumise à

l'action de la houle incidente caractérisant l'océan atlantique et qui génère une dérive littorale assez forte vers le Sud.

- Les travaux de fixation des dunes débutés en 2006 (Figure II.8) dans la rive gauche de l'estuaire qui constituent un obstacle vis-à-vis du transport éolien des sédiments vers le Sud, cette fixation engendre une accumulation d'une partie de sables au niveau de la dune en diminuant l'alimentation du bas de plage par les sables venant du nord, ce qui laisse l'estran exposé aux phénomènes de déflation et transport des sables vers le sud via l'action du vent fort et unidirectionnel caractérisant la région d'Essaouira et par conséquent une accélération du taux d'érosion qui passe de $4,06 \pm 1,4$ entre les années 1990 et 2006 à $4,9 \pm 1,4$ de 2006 à 2012.



Figure II. 8: Fixation des dunes opérée au niveau de la rive gauche de l'oued Ksob en 2006 (source : Google earth)

CONCLUSION

L'analyse à moyen terme à partir de l'analyse diachronique de photographies aériennes durant la période (1990 – 2012), a permis de mieux percevoir les grands changements qu'a subi le trait de côte.

Au niveau de la partie nord de l'estuaire (secteur 1), nous avons enregistré une accrétion importante au cours de la période (1990 – 2006), avec un taux d'érosion linéaire moyenne de l'ordre de $2,8 \pm 1,9$ m/an, cette accrétion est liée à l'importance des apports sédimentaires apportés par l'oued Ksob lors des crues. Alors que durant la période (2006 – 2012), ce secteur a connu un léger démaigrissement au niveau de la partie nord avec un taux d'érosion moyen de l'ordre de $8,80 \pm 5,19$ m/an, et une certaine stabilité au sud, ceci est expliqué par la dominance de l'érosion éolienne par rapport aux apports sédimentaires véhiculés par l'oued Ksob.

Au niveau de l'estuaire (secteur 2), l'analyse a montré un démaigrissement continu entre 1990 et 2012, de part et d'autre de l'embouchure de l'oued Ksob, avec un taux d'érosion moyen de $6,02 \pm 1,4$ m/an. Ceci est lié au balayage de l'estuaire par les crues de l'oued qui prélève une importante partie de la dune sur les rives de l'estuaire. D'autre part, on note une fluctuation du lit mineur de l'oued Ksob au niveau de l'embouchure, ce lit s'est déplacé vers le Nord avec un taux de déplacement de $9,12 \pm 1,9$ m/an entre les années 1990 et 2006. Par contre, de 2006 à 2012, nous constatons un déplacement du lit mineur vers le Sud, avec un taux de déplacement de $29,66 \pm 5,19$ m/an. Le déplacement vers le Nord se fait suite à l'évacuation du lit de l'oued par les crues, alors que le déplacement vers le Sud constitue un résultat d'avancement des sables vers le Sud en provenance du Nord sous l'action du vent unidirectionnel.

Enfin, la partie sud de l'estuaire (secteur 3), a subi un démaigrissement continu durant la période (1990 – 2012), dont le taux d'érosion augmente de $4,06 \pm 1,4$ m/an entre les années 1990 et 2006 à $4,9 \pm 1,4$ m/an entre 2006 et 2012. L'érosion dans ce secteur est expliquée par l'hydrodynamisme assez agité du fait que la plage est ouverte au niveau de ce secteur et directement soumise à l'action de la houle incidente caractérisant l'océan atlantique et qui génère une dérive littorale assez forte vers le Sud. Tandis que l'accélération de l'érosion enregistrée entre 2006 et 2012 est liée à la fixation des dunes opérée au niveau de la rive gauche de l'oued Ksob en 2006.

Chapitre III

ETUDE **MORPHOLOGIQUE DE** **LA PLAGE D'ESSAOUIRA**

INTRODUCTION

Le littoral d'Essaouira fait partie des plages méso-tidales avec un marnage variant de 2 à 4 m, selon la classification établie par Davies (1964) et Masselink et Short (1993). La dynamique morphosédimentaire de ce littoral a été très peu étudiée; les seuls travaux qui ont été effectués concernent la morphologie générale des dunes sableuses dans la partie haute de la plage et sur le continent (Gentile, 1997; Lharti et al., 2006; Lharti, 2009). Ces études ont montré que le système côtier d'Essaouira est complexe, du fait de l'interférence de plusieurs paramètres naturels et humains: situation géographique, apports sédimentaires importants de l'oued Ksob, vents forts et permanents, houle, courants, actions anthropiques de plus en plus diversifiées, morphologie complexe due à l'île de Mogador... Jusqu'à présent la seule étude à caractère morphodynamique sur la plage d'Essaouira a été effectuée par El Mimouni (2009).

Dans ce chapitre, nous allons mettre l'accent sur la dynamique morphosédimentaire de la plage d'Essaouira, pour se faire, des levés topographiques ont été réalisés sur le terrain à l'aide d'un tachéomètre (Lieca TC600), sous forme de profils et de modèles numériques de terrain (MNT). (Tableau III.1)

Vu que la morphologie de la plage d'Essaouira varie fortement, nous avons subdivisé le site d'étude en quatre secteurs ou zones morphologiques différentes.

Le suivi des levés topographiques entre février et juin 2013 et la comparaison de ses résultats avec ceux réalisés en mai 2006, permettront d'obtenir des informations sur l'évolution de l'estran de chacune des différentes zones morphologiques à court et à moyen terme, et de définir si ces zones ont été en accrétion, en érosion ou si elles ont été en équilibre. Par ailleurs, au cours de ces campagnes de mesure, nous avons la chance d'avoir une crue importante de l'Oued Ksob en date du 20 mars 2013. Ces différentes campagnes de mesure topographique vont permettre de suivre l'évolution et la vitesse de distribution de ces apports durant les trois mois qui suivent la crue. Pour atteindre ces objectifs, nous allons dans un premier temps, faire un rappel de la technique de mesure, puis étudier plus en détail l'évolution des différents profils topographiques et les variations de volume.

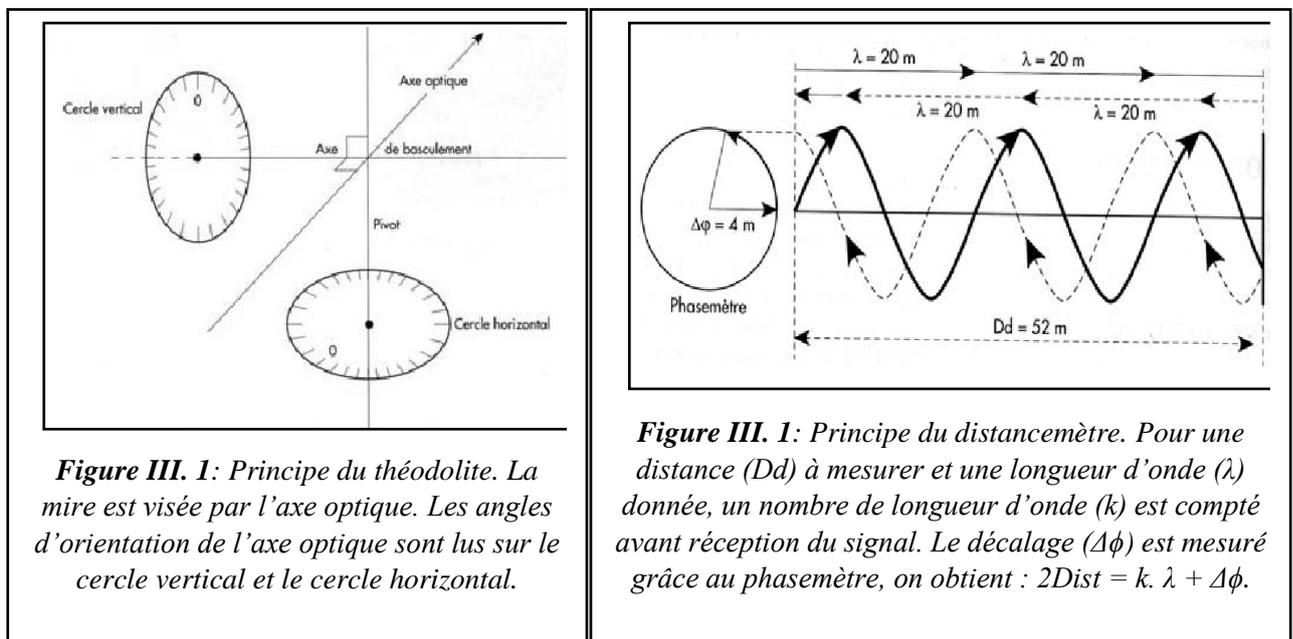
I. MESURES TOPOMÉTRIQUES

1. Mesures topographiques par tachéométrie

Afin de suivre l'évolution morphosédimentaire à court terme et à moyen terme de la plage d'Essaouira, des levés topographiques ; profils perpendiculaires au trait de côte et relevés dans l'optique de construire des Modèles Numériques de Terrain, ont été effectués avec une répétitivité suivant un intervalle de temps mensuel. Pour cela on utilise un tachéomètre électronique de type Lieca TC600 de haute précision (précision de l'ordre de $\pm 0,2$ mm et $0,2^\circ$, selon les estimations du fabricant).

1.1. Principe de positionnement d'un point par tachéométrie

Le tachéomètre est un instrument de mesure topographique de précision. C'est un outil complexe qui intègre un théodolite et un distancemètre. Son principe est basé sur le positionnement d'une mire réfléchissante, placée par un porteur de mire sur le point à mesurer. L'opérateur du tachéomètre doit avant tout viser cette mire par le collimateur de l'instrument. Une fois la visée effectuée, le théodolite, constitué de 2 cercles gradués fournit deux mesures d'angles pour positionner la mire en vertical et en horizontal (Figure III.1). Simultanément, le distancemètre détermine l'éloignement du point après émission et réflexion d'une onde lumineuse (Figure III.2). La distance est mesurée en calculant le nombre de longueurs d'onde nécessaires pour un aller et retour vers la mire. Ces 3 mesures (angle horizontal, angle vertical et distance) qui représentent les coordonnées (X, Y et Z) permettent de positionner le point observé dans un repère centré sur le tachéomètre.



La précision du positionnement dépend de la qualité de ces trois mesures. Les erreurs de distance proviennent soit d'un défaut d'étalonnage de l'appareil, soit de la réfraction du rayon dans l'atmosphère. Elles occasionnent des décalages de 2 à 5 cm sur une mesure. Les erreurs sur les angles sont dues principalement à des problèmes indirects de mise en station de l'appareil (Brabant, 2000).

1.2. La mise en station d'un tachéomètre

Sur la plage d'Essaouira, les mesures topographiques ont pour objectif de quantifier la forme de la plage, cette forme est très variable dans le temps, la collecte des données lors des missions de terrains a pour objectif de comparer et obtenir une série d'états morphologiques caractéristiques de la plage. La comparaison précise des données d'une date à l'autre nécessite d'utiliser un référentiel commun à tous les levés, ce référentiel est défini lors de la mise en

station de l'instrument, il doit être repris exactement pour garantir la qualité des observations au cours du temps.

Au cours d'un levé topographique, le porteur de mire se déplace sur la zone à mesurer tandis que l'opérateur positionne la mire grâce au tachéomètre. Ce déroulement immuable implique que la position du tachéomètre reste parfaitement fixe pendant les mesures. La mise en station consiste avant toute chose à placer l'instrument dans un endroit stable durant la durée des mesures.

Dans sa conception, le tachéomètre est déjà structuré autour d'un repère tridimensionnel orthonormé qui est défini par l'axe optique et les axes des deux cercles gradués nommés pivot et axe de basculement (Figure III.1).

La première étape de la mise en station consiste à placer le pivot à la verticale. Le centre de la Terre forme un repère fixe qui peut être réutilisé dans le temps. La verticalité de l'axe est obtenue grâce à un niveau à bulle.

La seconde étape a pour objectif d'orienter l'axe de basculement dans le plan horizontal. Pour le cas de notre zone d'étude, l'orientation est établie en visant le phare de l'île de Mogador comme repère fixe.

La troisième étape de la mise en station est cruciale, elle nécessite de définir précisément l'origine du référentiel. Cette étape ne constitue pas un souci majeur lorsque le tachéomètre est positionné exactement au même endroit à chaque levé. Il suffit alors de prendre la position de l'instrument comme origine du repère (Brabant, 2000).

1.3. Méthode d'échantillonnage dans la baie d'Essaouira

Dans notre zone d'étude, nous avons fait un suivi topographique sur les mêmes profils et MNT étudiés par Elmimouni (2009) au cours de sa thèse d'Université. Cela permettrait de comparer les mêmes levés topographiques à moyen terme c'est-à-dire sur une période décennale.

Les levés topographiques que nous avons réalisés, ont été effectués à partir de « têtes de stations » fixes. Les coordonnées de ces « têtes de stations » ont été obtenues d'après la thèse d'El Mimouni (2009).

Pendant les mesures, la position du tachéomètre doit rester parfaitement fixe, tandis que le porteur de mire doit se placer précisément sur le profil topographique. La difficulté de placement sur le profil entraîne une légère imprécision des données qui peut s'ajouter aux problèmes de mise en station, une fois en position sur le profil d'étude, le porteur de mire doit repérer les points caractéristiques de la morphologie, tels que les ruptures de pente, sommets de barres, inversions de pente, etc... C'est une étape très importante car la qualité des analyses géomorphologiques dépendront en grande partie de la pertinence des points mesurés.

Les levés topographiques ont été effectués de deux manières différentes; en profils et relevés dans l'optique de construire des Modèles Numériques de Terrain (MNT) :

- **Profils** : pour chaque profil, une tête de station a été établie, dont les coordonnées géographiques «X, Y, Z» et l'angle d'orientation par rapport au nord sont connus afin d'avoir la même position du profil dans les différentes missions, ces profils ont une direction transversal perpendiculaire au trait de côte.
- **Modèle Numérique de Terrain (MNT)**: cette méthode permet d'obtenir une vision en trois dimensions de la morphologie de la plage et de son évolution dans le temps, pour chaque site on choisi une tête de station à partir des têtes de station des profils qui permettent de prendre un grand nombre de points sur le terrain sous forme d'un quadrillage imaginaire.

1.4. Les sources d'erreur

La qualité des mesures topographiques par tachéométrie dépend en premier lieu de la précision et de la mise en station de l'instrument, car la pertinence des points mesurés est très importante pour pouvoir interpréter ultérieurement les données collectées. En plus de la marge d'erreur estimée par le fabricant qui est de $\pm 0,2\text{mm}$ et $0,2^\circ$, on peut citer trois autres origines d'erreurs lors des mesures in situ :

- 2- Le décalage angulaire de l'azimut induit par une mauvaise mise en station d'un point à l'autre (Figure III. 3).
- 3- Les erreurs instrumentales du tachéomètre qui sont dus au mauvais bullage de la base fixe qui est calé sur un plan virtuel horizontal, ces erreurs sont de nombre de quatre : (Figure III.4)
 - a)- Erreur de ligne de visée ou de collimation c (déviaton de l'angle droit entre l'axe de visée et l'axe de basculement).
 - b)- Erreur de basculement a (déviaton de l'angle droit entre l'axe de basculement et l'axe vertical).
 - c)- Inclinaison résiduelle de l'axe vertical (angle entre la ligne d'aplomb et l'axe vertical).
 - d)- Erreur d'index vertical i (angle entre la direction zénithale et la lecture "zéro" du cercle vertical), la lecture du cercle vertical en cas de ligne de visée horizontale n'est pas égale à 90° mais à $90^\circ + i$.
- 4- Le maintien non perpendiculaire de la canne et du prisme falsifie également les coordonnées X, Y et Z des points.

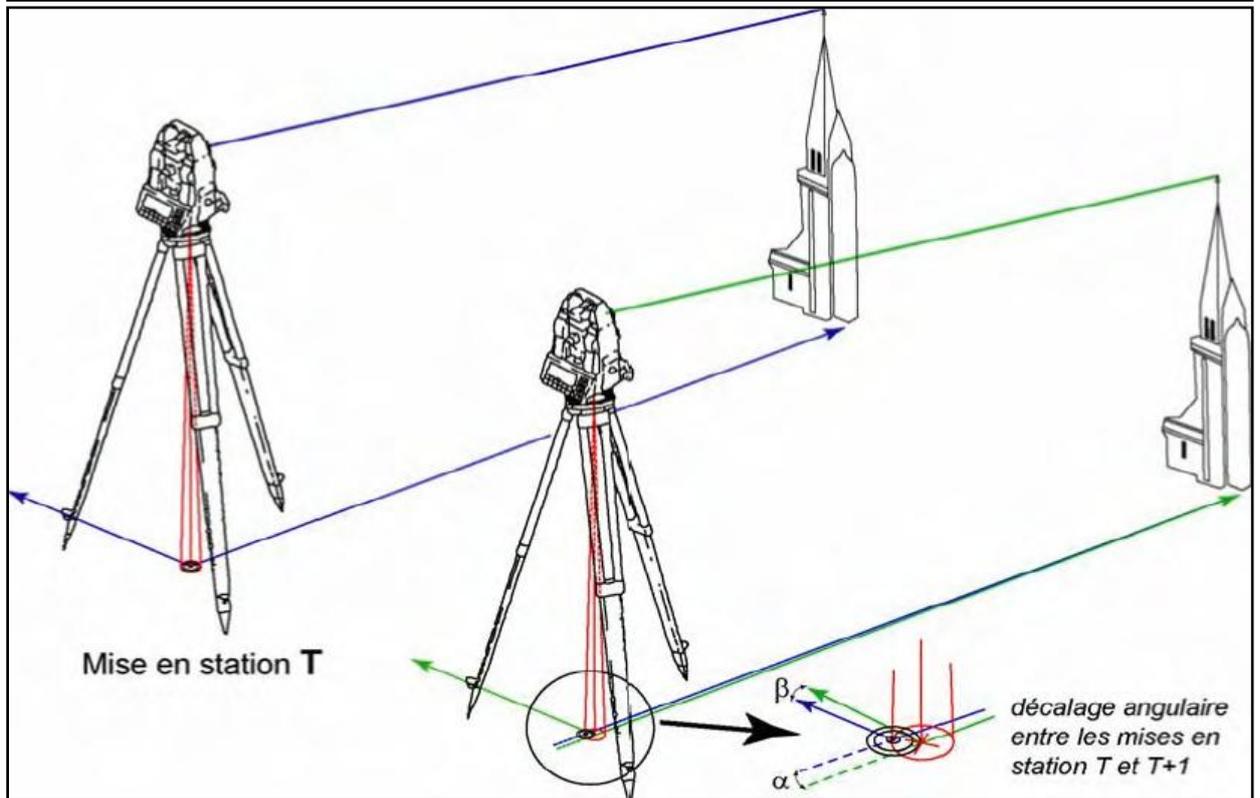
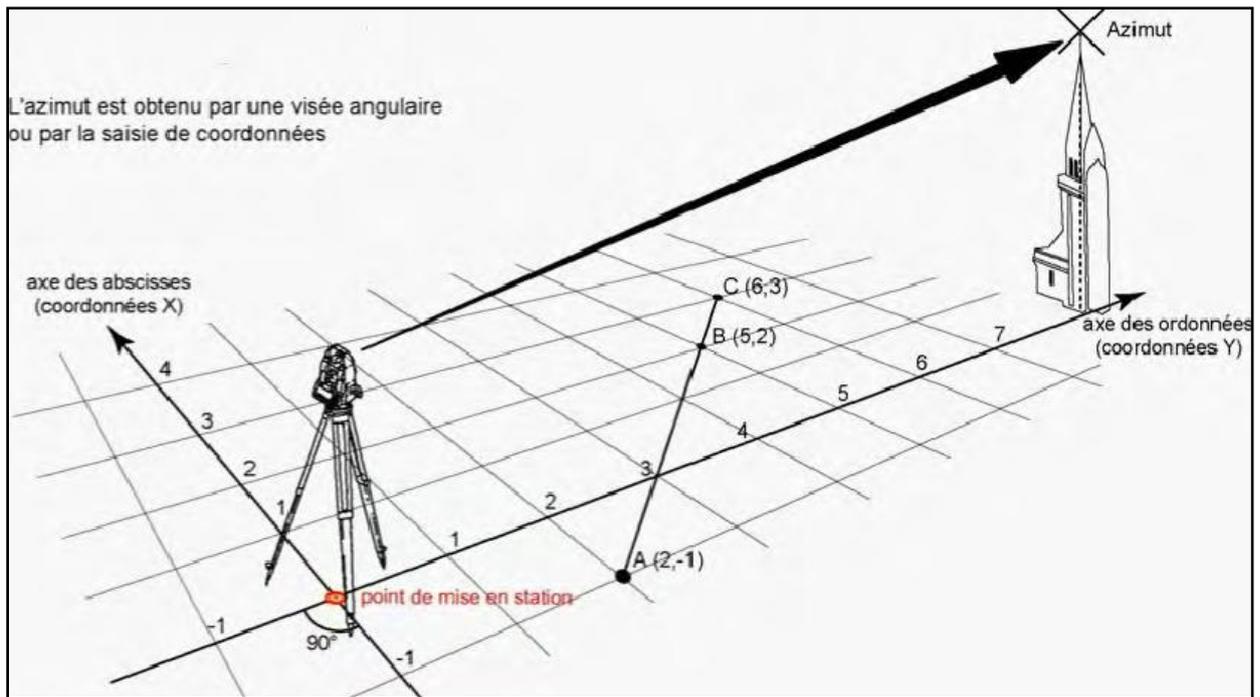


Figure III. 2: Illustration des décalages angulaires du tachéomètre (d'après Dupont, 2004 in El Mimouni, 2009)

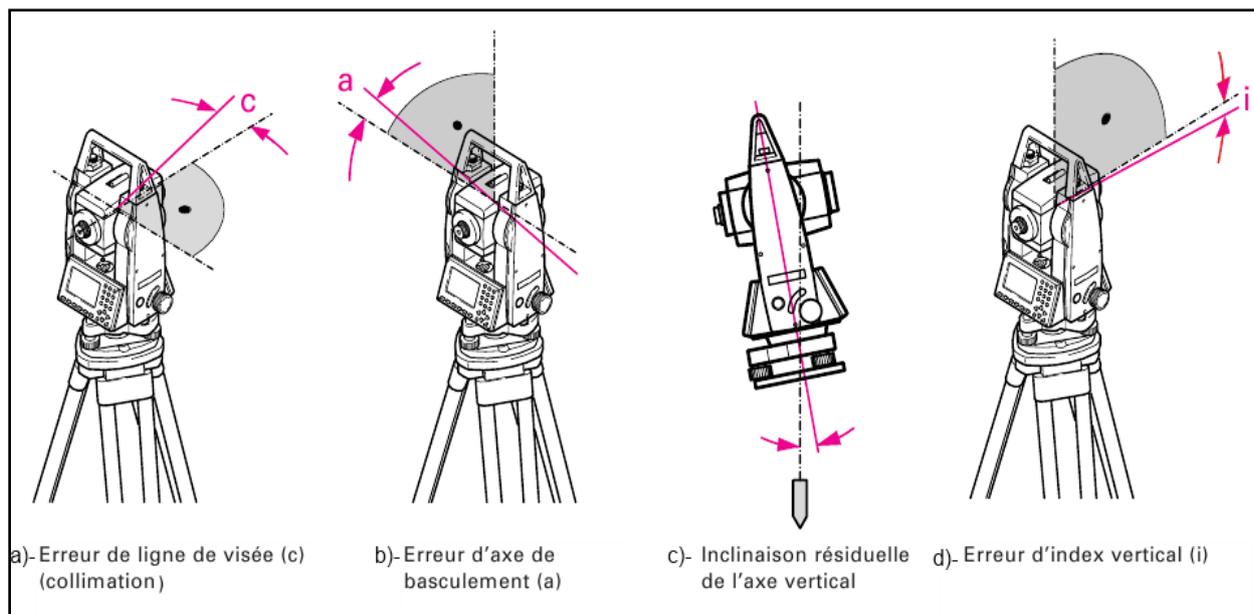


Figure III. 3: Illustration des erreurs instrumentales du tachéomètre (Karl Zeiske, 2000)

2. Traitement des données

Les données topographiques des profils et des MNT prises sur le terrain, sont stockées dans la mémoire du tachéomètre sous deux formes de fichiers (des fichiers de type "coordonnées" et des fichiers de type "observations"), après la mesure, nous procédons à un transfert de ces données sur ordinateur PC à l'aide d'une interface (PC Leica TC Tools). Ces données sont prétraitées avec un tableur Excel. Le but de ce traitement est d'avoir des fichiers simples avec des coordonnées X, Y et Z pour chaque point mesuré. Ceci permet de présenter les profils transversaux en deux dimensions ; altitude en fonction de la distance cumulée mesurée à partir des coordonnées X et Y, et de les comparer spatialement entre différents profils ou temporairement sur le même profil.

Les données brutes concernant les modèles numériques de terrains (MNT) sont prétraitées avec le logiciel Excel pour avoir des fichiers avec des coordonnées X, Y et Z, puis elles sont traitées à l'aide du logiciel Surfer (Golden Software), qui propose plusieurs techniques d'interpolation des données, et qui permet la quantification de l'évolution morphologique des zones étudiées entre deux MNT successifs par la réalisation des cartes de soustraction.

IV. EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE LA PLAGE D'ESSAOUIRA

1. Répartition spatiale et temporelle des levés topographiques

Au cours de la période suivie, l'étude morphologique de la plage d'Essaouira, consiste à suivre l'évolution de 18 profils et de 2 MNT (Modèle Numérique de Terrain) (Figure III.5); au niveau de la plage, de la dune bordière et de l'estuaire. Les profils topographiques, sont sensiblement perpendiculaires à la côte, et s'étendent depuis la digue ou la dune bordière jusqu'au bas de plage.

Les M.N.T permettent d'obtenir une représentation de l'estran en 3 dimensions. Deux relevés ont été réalisés ; un durant la première campagne de mesure et l'autre durant la dernière campagne, c'est-à-dire avant et après la crue de 20 mars 2013 qu'a connu l'oued Ksob. Nous avons utilisé la technique du semi de points consistant à effectuer un maximum de mesures, sur une surface délimitée auparavant. Un MNT est réalisé dans la partie extrême nord entre la digue du port et le profil 3 et le deuxième dans la zone de divergence au niveau du profil 6, (Figure III.5).

Au total, 5 campagnes de mesures, ont été réalisées de février à juin (Tableau III.1), afin d'avoir une vision plus précise de l'évolution morphologique de la plage d'Essaouira et de quantifier cette évolution:

- A court terme en tenant compte cette variation avant et après la crue.
- A moyen terme en comparant les résultats de la mission de mai 2013 à ceux de mai 2006.

Campagne de mesure	Période	Travaux réalisés
Mission 1	De 31 janvier à 03 Février 2013	Profils + MNT
Mission 2	De 01 à 02 Mars 2013	Profils
Mission 3	De 09 à 10 Avril 2013	Profils
Mission 4	De 16 à 18 Mai 2013	Profils + MNT
Mission 5	Le 08 juin 2013	Profils

Tableau III. 1: Répartition spatiale des campagnes de mesure topographique

2. Description et analyse des profils topographiques

Afin de faciliter et de quantifier les variations topographiques des profils, nous avons subdivisé la zone d'étude en 4 secteurs distincts (Figure III.5), chaque secteur est caractérisé par ses propres facteurs hydrodynamiques, aérodynamiques, anthropiques...

L'analyse topographique a concerné les parties de plage suivantes (Figure III.6) : Le haut de plage, situé pour notre étude au-dessus des pleines mers de vive-eau (PMVE), et soumis essentiellement à l'influence éolienne; la mi-plage, à dynamique mixte, située entre le niveau PMVE et les pleines mers de morte-eau (PMME), et le bas de plage, entre le niveau PMME et le niveau BMME, où l'hydrodynamisme est dominant. Dans cette analyse, nous allons présenter seulement les courbes des variations topographiques et volumétriques du profil 1, les courbes des autres profils seront présentées en annexe. Le cas du profil 1 présenté ici servira d'exemple pour illustrer la méthode qu'on a adopté pour comparer l'évolution topographique d'une mission à une autre et pour déterminer le bilan global au niveau du profil.



Figure III. 4: Localisation des levés topographiques et des secteurs d'étude

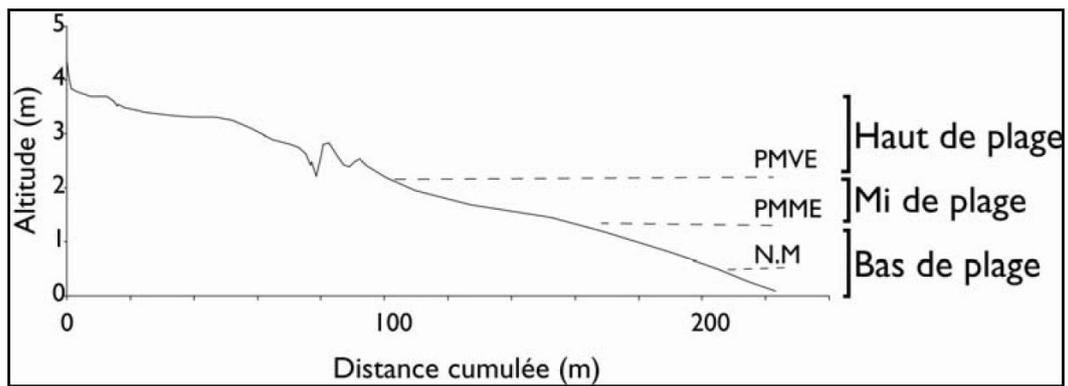


Figure III. 5: Profil type et zonation transversale de la plage d'Essaouira en fonction des niveaux de marée (El Mimouni, 2009)

2.1. Secteur 1

Le secteur 1 se situe au nord de la zone d'étude, il est traversé par 3 profils, le profil 1, 2 et 3. Le profil 1 se situe entièrement dans la zone intertidale, car la plage est entièrement submergée lors de la marée haute, le haut de plage n'existant pas, remplacé par la digue. Plus on s'éloigne du profil 1 vers le profil 3 plus la largeur de la mi-plage augmente. De point de vue hydrodynamique, l'influence éolienne ne commence qu'à partir du profil 3 ; on peut dire que cette zone est généralement protégée des influences éoliennes par la digue et par les constructions de la ville d'une part et par l'humidité permanente du sable d'autre part.

2.1.1 Evolution à moyen terme de 2006 à 2013

Dans le secteur 1, le bilan sédimentaire au cours de la période de mai 2006 effectué par El Mimouni à mai 2013 réalisé lors de la dernière campagne, est légèrement positif, avec une faible accrétion qui devient de plus en plus importante du profil 1 où on note un gain sédimentaire de $13,21 \text{ m}^3$, vers le profil 3 ($30,73 \text{ m}^3$) en passant par le profil 2 ($15,54 \text{ m}^3$), le maximum d'accumulation est enregistré au niveau du bas de plage (Figure III.7, III.8 et III.9).

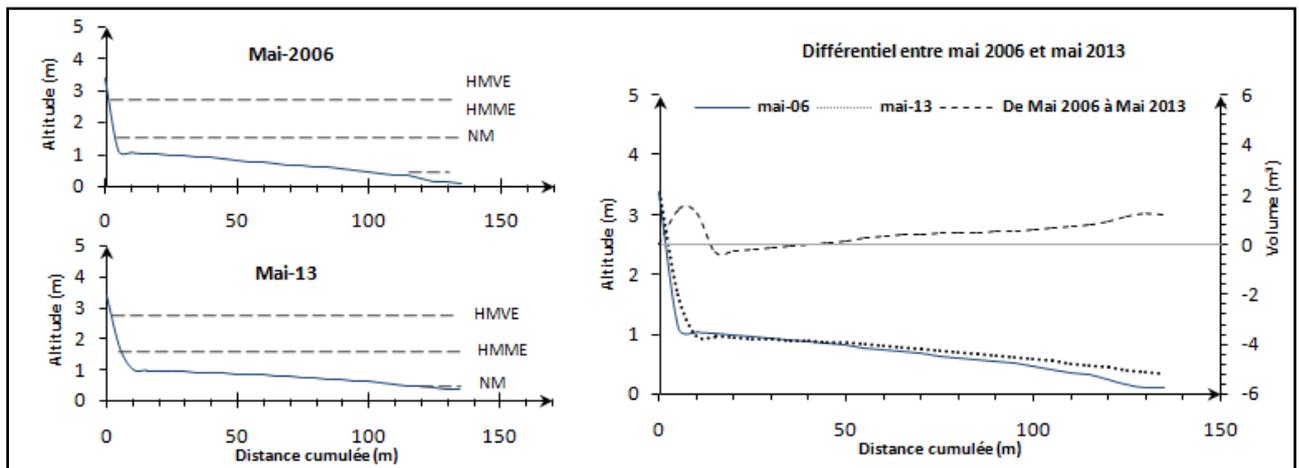


Figure III. 6: Variations topographiques et volumétriques du profil 1 entre mai 2006 et mai 2013.

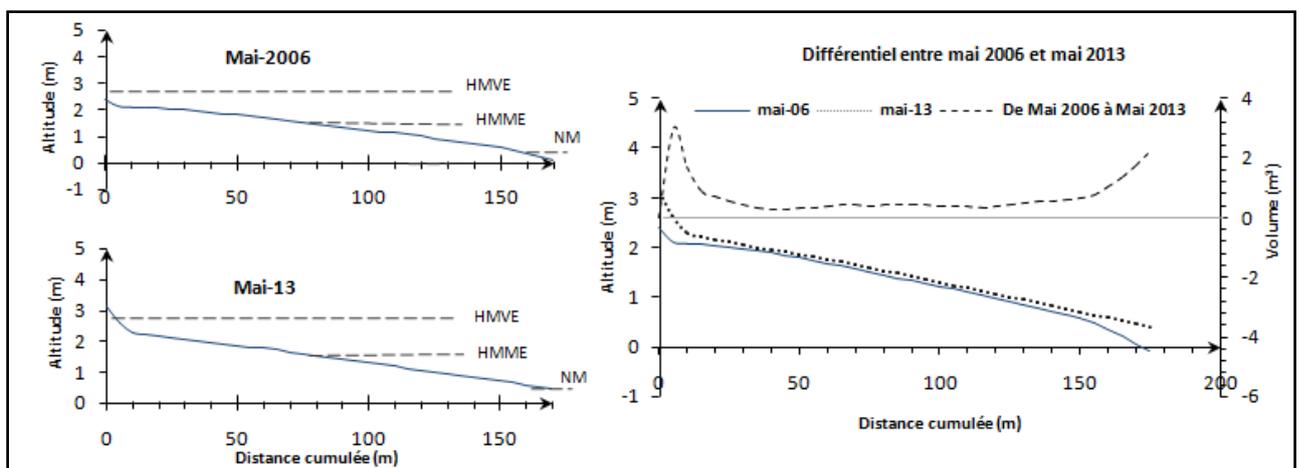


Figure III. 7: Variations topographiques et volumétriques du profil 2 entre mai 2006 et mai 2013.

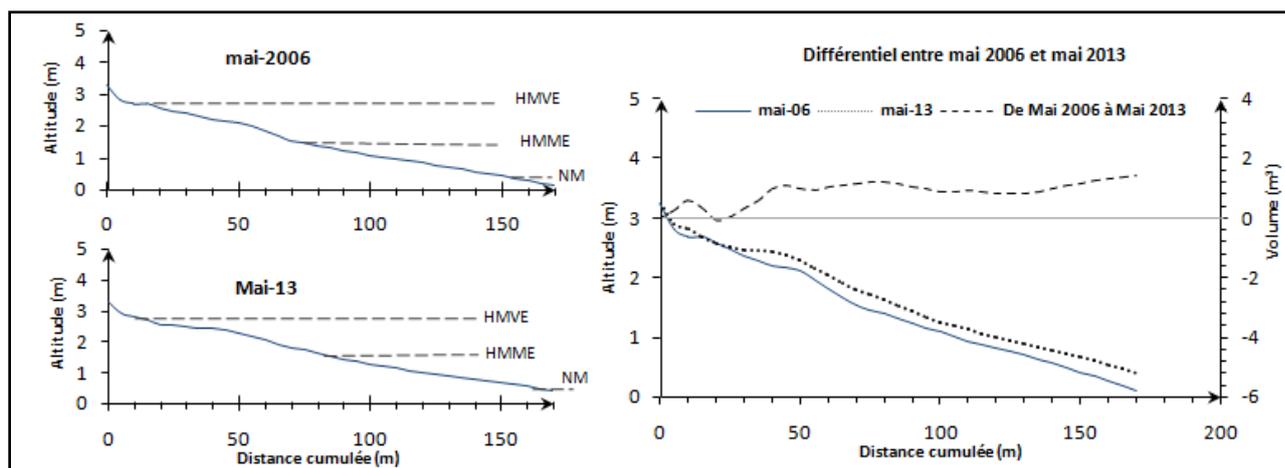


Figure III. 8: Variations topographiques et volumétriques du profil 3 entre mai 2006 et mai 2013.

2.1.2 Evolution à court terme

Sur la période suivie, le bilan sédimentaire est légèrement positif avec un gain de $24,20 \text{ m}^3$ pour le profil 1 et $21,4 \text{ m}^3$ pour le profil 3, tandis que le profil 2 reste quasi-stable avec une perte de $10,08 \text{ m}^3$ (Figures III.10, Annexes 1 et 2). Entre février et mars, le profil 1 est en accréation avec un gain de $12,17 \text{ m}^3$, s'effectuant principalement en bas de plage, alors que la morphologie générale des profils 2 et 3 est restée sensiblement constante avec une stabilité du bilan sédimentaire. Entre mars et avril, les profils 1 et 3 sont en accumulation avec un gain de $10,5 \text{ m}^3$ pour le profil 1 et $16,94 \text{ m}^3$ pour le profil 3, cette accumulation augmente progressivement de la mi-plage vers le bas de plage, tandis que la totalité du profil 2 a subi une légère érosion avec un bilan sédimentaire de l'ordre -12 m^3 . La variation de volume entre avril et mai montre une stabilité du bilan sédimentaire pour les profils 1 et 3 et une accumulation au niveau du profil 2 avec un gain de $15,97 \text{ m}^3$. Entre mai et juin les profils 1, 2 et 3 sont en légère accumulation sur la totalité des profils avec un gain maximum ($7,72 \text{ m}^3$) enregistré au niveau du profil 2 (Tableau III.2).

Période	Profils	P1	P2	P3
Différence de volume entre Février et Mars (m^3)		12,17	-1,60	3,55
Différence de volume entre Mars et Avril (m^3)		10,5	-12	16,94
Différence de volume entre Avril et Mai (m^3)		-0,92	15,97	-0,18
Différence de volume entre Mai et Juin (m^3)		2,47	7,72	1,07
Cumul des campagnes (m^3)		24,20	10,08	21,4

Tableau III. 2: Différentiels du volume entre les missions de la période suivie au niveau du secteur 1.

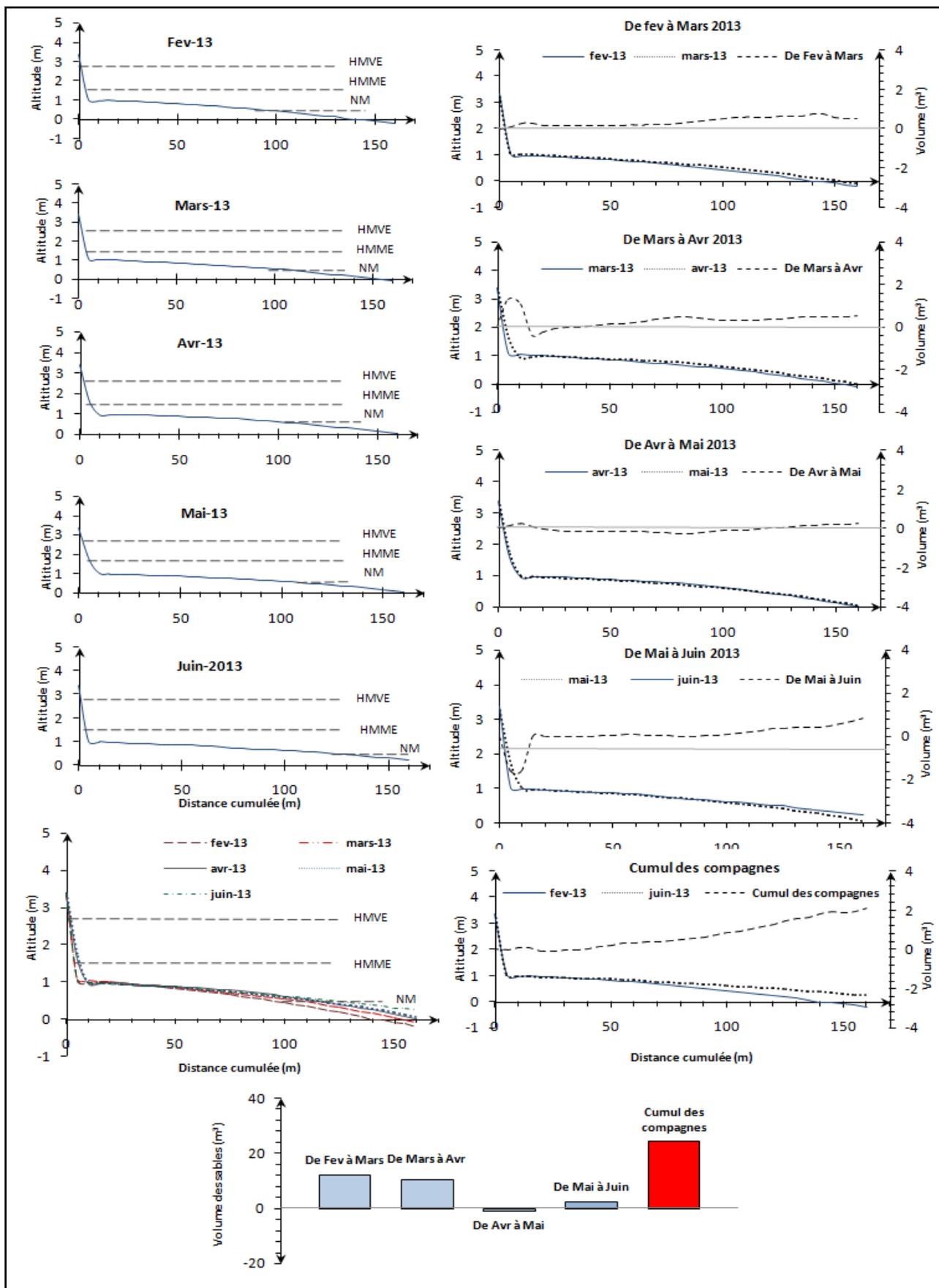


Figure III. 9: Variations topographiques et volumétriques du profil 1

2.2. Secteur 2

Correspond à la zone centrale de la plage d'Essaouira, se situe au sud du secteur1, il est traversé par les profils 4, 6, 8, 10 et 11, la partie centrale de cette zone est caractérisée par la divergence de la houle incidente et par l'influence éolienne dont l'intensité augmente du nord vers le sud.

2.2.1. Evolution à moyen terme de 2006 à 2013

Les profils topographiques de ce secteur sont analysés dans la période comprise entre mai 2006 et mai 2013, sauf le profil 6 qui a été analysé de mai 2006 à avril 2013, à cause de l'absence des données pour le mois de mai 2013.

L'analyse montre que la zone a subi une importante accrétion, dont l'intensité augmente progressivement en se déplaçant du profil 6 au profil 11, avec un gain sédimentaire de 31,5 m³ pour le profil 6, 107,74 m³ suivant le profil 8, 138,8 m³ le long du profil 10 et 195,48 m³ enregistré au niveau du profil 11. L'accumulation a concerné la totalité des profils, à l'exception du profil 6 qui a connu une érosion du haut de plage et engraissement du bas et de la mi-plage. Le bilan sédimentaire négatif est enregistré au niveau du profil 4 (-17,45 m³), avec engraissement du haut et de la mi-plage et érosion du bas de plage (Figures III.11, III.12, III.13, III.14 et III.15)

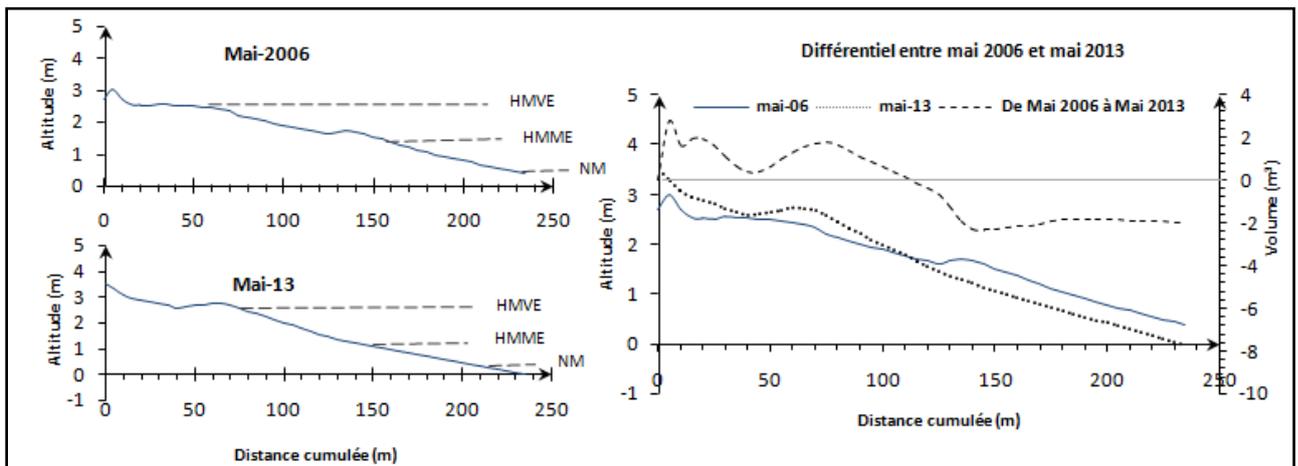


Figure III. 10: Variations topographiques et volumétriques du profil 4 entre mai 2006 et mai 2013.

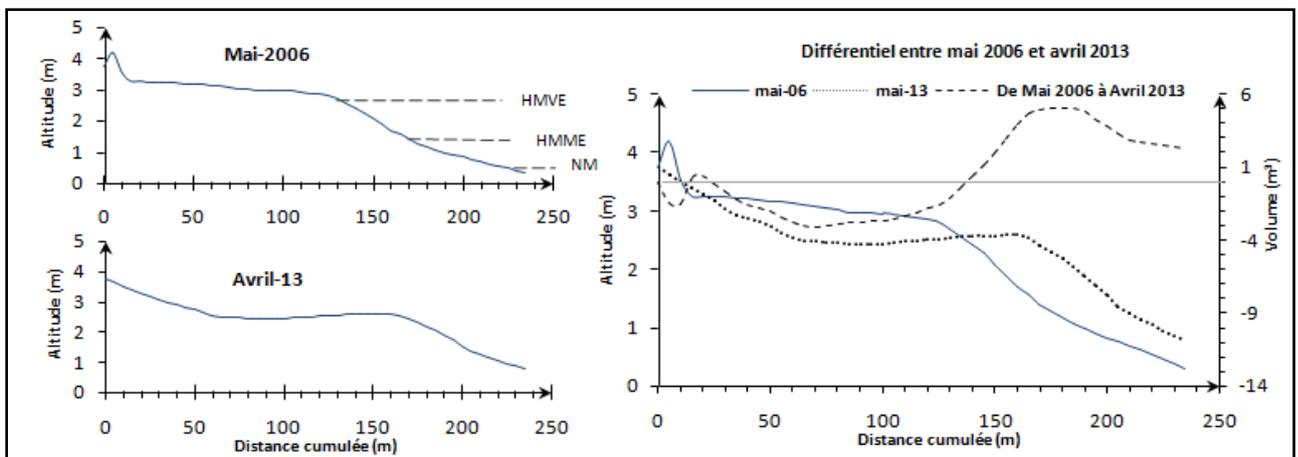


Figure III. 11: Variations topographiques et volumétriques du profil 6 entre mai 2006 et mai 2013.

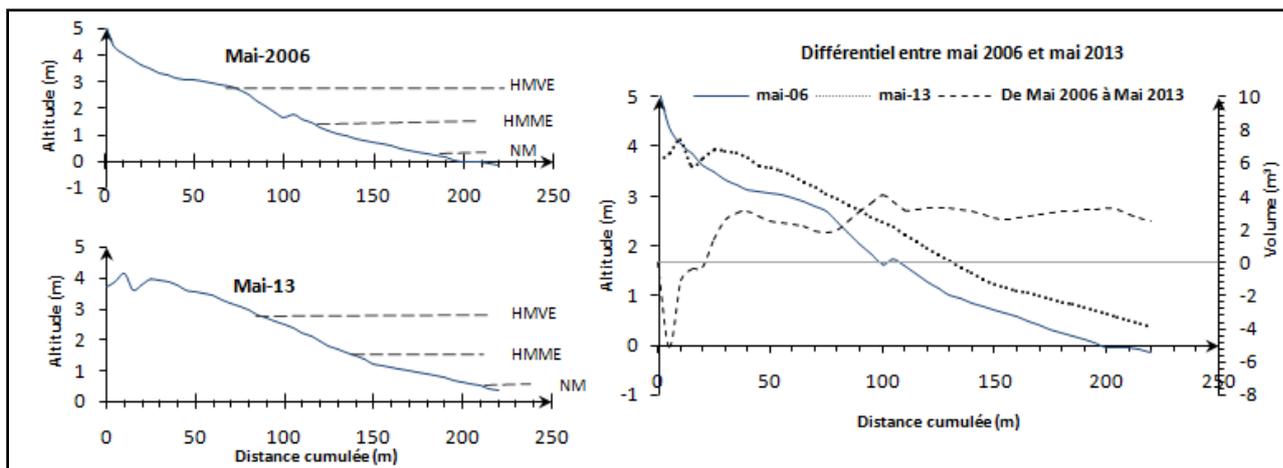


Figure III. 12: Variations topographiques et volumétriques du profil 8 entre mai 2006 et mai 2013.

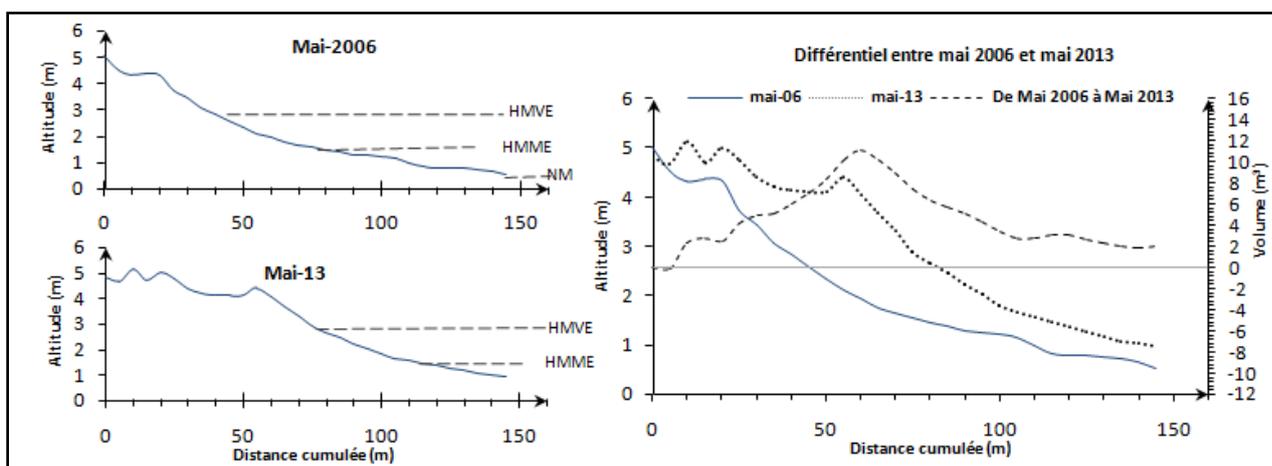


Figure III. 13: Variations topographiques et volumétriques du profil 10 entre mai 2006 et mai 2013.

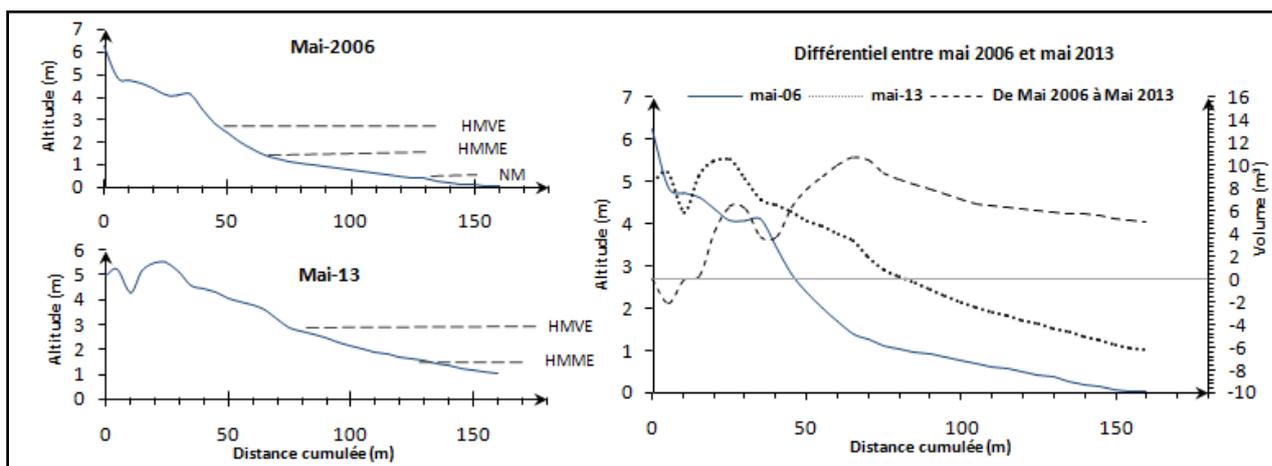


Figure III. 14: Variations topographiques et volumétriques du profil 11 entre mai 2006 et mai 2013.

2.2.2. Evolution à court terme

Lors de la période d'étude, l'analyse topographique et volumétrique de cette zone, montre un bilan positif avec un gain de $15,51 \text{ m}^3$ au niveau du profil 6, $50,06 \text{ m}^3$ le long du profil 8,

40,78 m³ le long du profil 10 et 122,44 m³ pour le profil 11. Un budget sédimentaire négatif est enregistré uniquement au niveau du profil 4, avec une perte de 25,31 m³. Nous remarquons une augmentation progressive du budget sédimentaire du nord vers le sud (Annexes 3, 4, 5, 6 et 7 ; Tableau III.3).

L'étude topographique entre février et mars, montre une érosion avec des pertes successivement de 5,65 m³, de 81,15 m³, et de 30,90 m³, le long des profils 4 et 8 et la mi-plage et le haut de plage du profil 10, et une faible accrétion sur la totalité des deux autres profils, qui est de l'ordre de 2,75 m³ pour le profil 6 et 15,83 m³ pour le profil 11.

Entre mars et avril, les profils 4, 8, 10 et 11 sont en érosion, laquelle augmente progressivement du profil 4 au profil 11 et touche surtout le haut de plage et le mi-estran, avec des bilans sédimentaires négatifs équivalent successivement à - 12,46 m³, -21,5 m³, -55,91 m³ et - 68,9 m³, sauf pour le profil 6 qui est en légère accrétion (12,76 m³).

Les variations volumétriques dans ce secteur entre avril et mai, montrent une accrétion importante sur la totalité des profils 8, 10 et 11 avec des budgets sédimentaires égales successivement à 152,71 m³, 127,60 m³ et 157,50 m³, l'analyse du profil 4 indique une légère érosion au niveau du haut de plage (- 6,08 m³).

Entre mai et juin, nous n'avons réalisé que les levés topographiques du profil 4, dont l'analyse a montré une érosion très faible qui ne dépasse pas 7,47 m³.

Profils	P4	P6	P8	P10	P11
Période					
Différence de volume entre Février et Mars (m³)	-5,65	2,75	-81,15	-30,9	15,83
Différence de volume entre Mars et Avril (m³)	-12,46	12,76	-21,5	-55,91	-68,9
Différence de volume entre Avril et Mai (m³)	-6,08	-	152,71	127,6	175,50
Différence de volume entre Mai et Juin (m³)	-7,47	-	-	-	-
Cumul des campagnes (m³)	-31,67	15,51	50,06	40,78	122,44

Tableau III. 3: Différentiels du volume entre les missions de la période suivi au niveau du secteur 2.

2.3. Secteur 3

Ce secteur correspond à la zone de l'estuaire de l'oued Ksob, qui est périodiquement submergée par les eaux du flot, elle est caractérisée par l'interaction de plusieurs facteurs (courants de marée, transport éolien, dynamique fluvial, dynamique marine ...) (Gentile, 1997; Simone, 2000; El Mimouni, 2009). Cette zone englobe les profils 12, 13-1 et 13-0 qui sont perpendiculaires au tait de côte, et les profils 13-2, 14 et 15 qui traversent l'oued Ksob.

2.3.1. Evolution à moyen terme de 2006 à 2013

Au cours de cette période, l'analyse des levés topographiques, montre que la zone est en nette accrétion avec un bilan sédimentaire positif le long de la totalité des profils, ce bilan augmente progressivement du nord vers le sud au niveau de la plage, avec un gain qui passe de 196,94 m³ pour le profil 12 à 334,31 m³ pour le profil 13-1, puis 521,03 m³ pour le profil 13-0. Concernant les profils de l'oued le budget sédimentaire est de l'ordre de 321,34 m³ au niveau du profil 13-2, 550,79 m³ le long du profil 14 et 307,05 pour le profil 15 (Figures III.16, III.17, III.18, III.19, III.20 et III.21).

Les trois premiers profils, présentent la même évolution avec une tendance accumulative observée sur la totalité des profils, sauf pour la partie distale du haut de plage où on note des parties érodées constituant les surfaces interdunaires (Figures III.16, III.17 et III.18). Les profils transversaux au lit de l'oued, montrent un engraissement plus important au niveau de la rive droite que dans la rive gauche avec un déplacement du lit de l'oued vers la rive gauche (Figures III.19, III.20 et III.21).

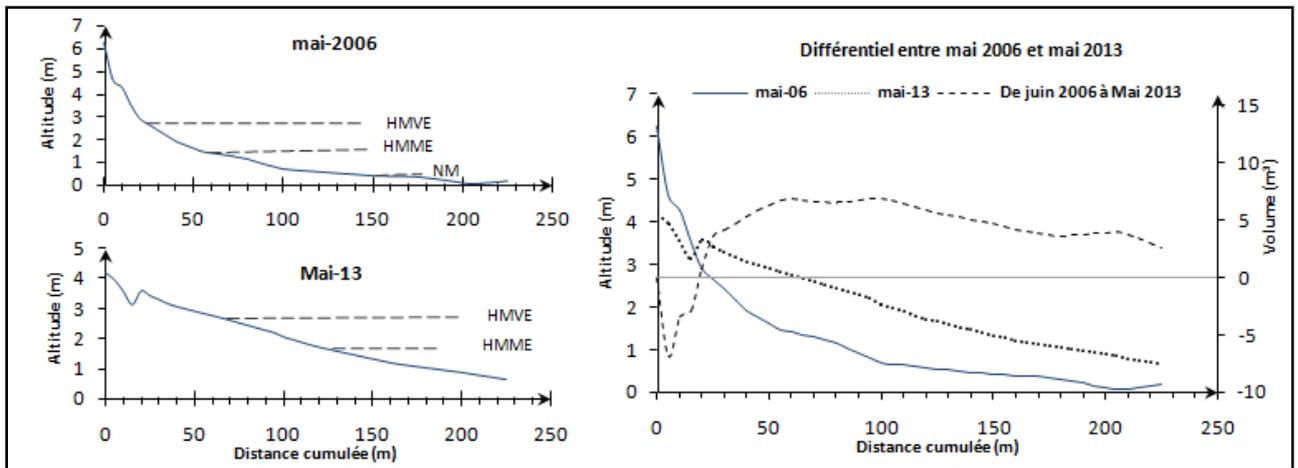


Figure III. 15: Variations topographiques et volumétriques du profil 12 entre mai 2006 et mai 2013.

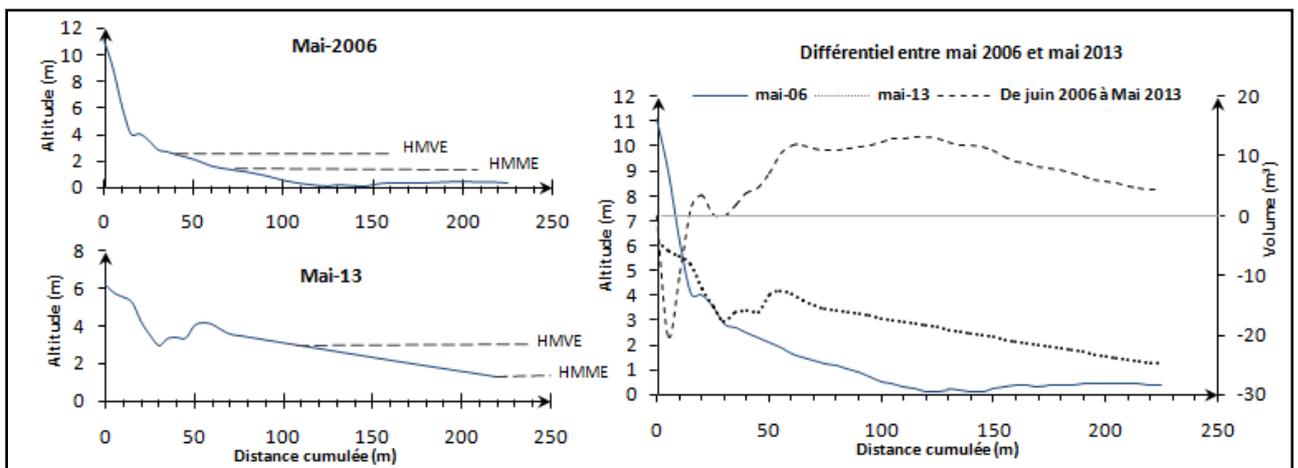


Figure III. 16: Variations topographiques et volumétriques du profil 13-1 entre mai 2006 et mai 2013.

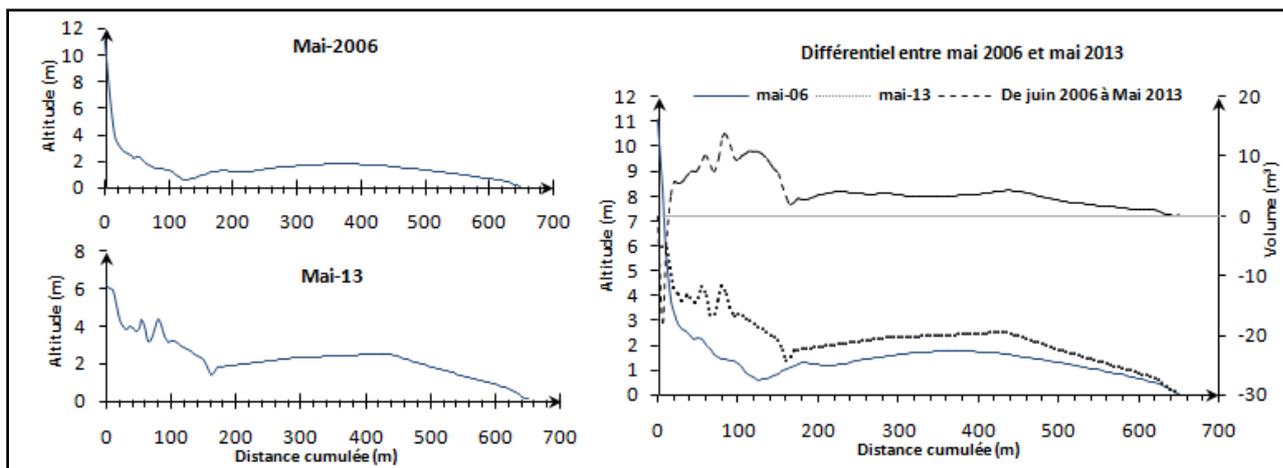


Figure III. 17: Variations topographiques et volumétriques du profil 13-0 entre mai 2006 et mai 2013.

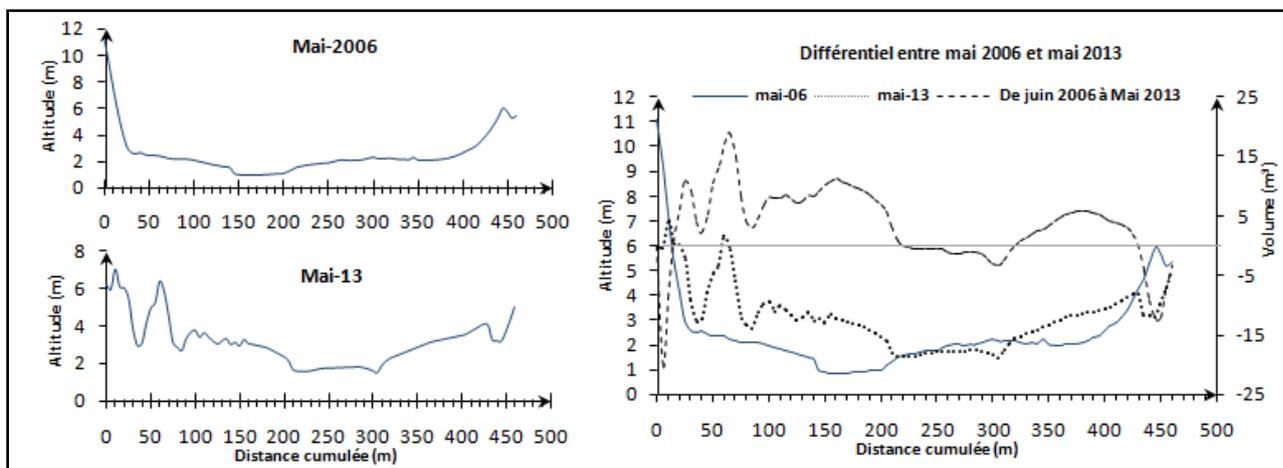


Figure III. 18: Variations topographiques et volumétriques du profil 13-2 entre mai 2006 et mai 2013.

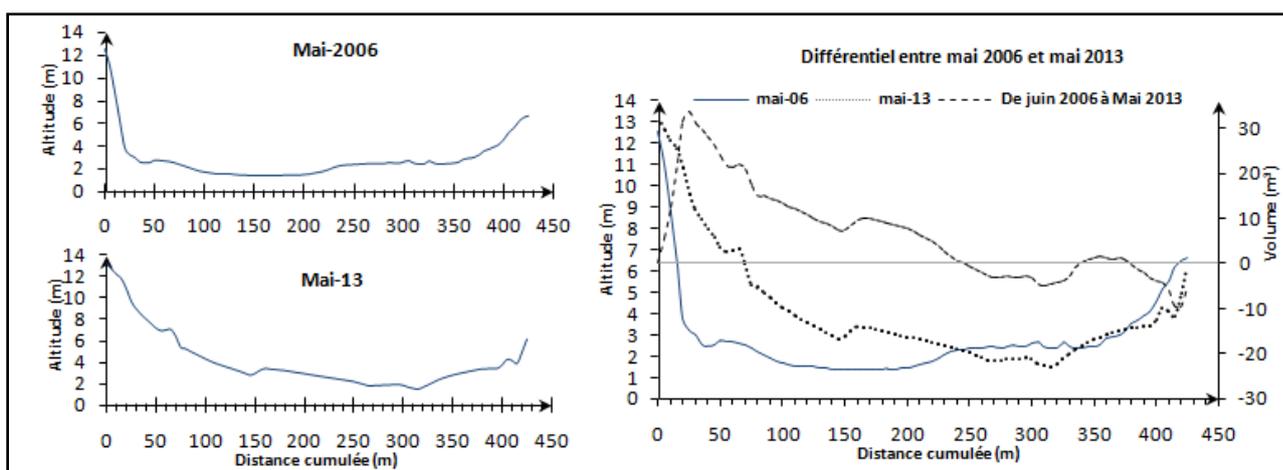


Figure III. 19: Variations topographiques et volumétriques du profil 14 entre mai 2006 et mai 2013.

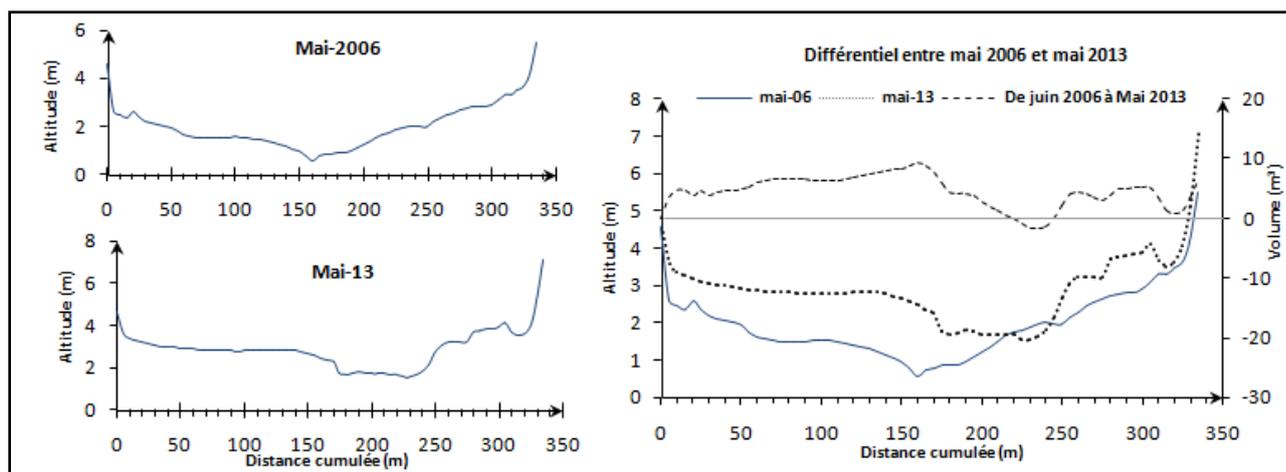


Figure III. 20: Variations topographiques et volumétriques du profil 15 entre mai 2006 et mai 2013.

2.3.2. Evolution à court terme

Au cours de la période d'étude, l'analyse des levés topographiques, montre que la zone est en nette accrétion avec un bilan sédimentaire positif le long de la totalité des profils, ce bilan augmente progressivement du nord vers le sud au niveau de la plage, avec un gain qui passe de $174,37 \text{ m}^3$ pour le profil 12 à $322,07 \text{ m}^3$ le long du profil 13-1 puis $480,19 \text{ m}^3$ pour le profil 13-0. Concernant les profils de l'oued, le budget sédimentaire est égal à $223,10 \text{ m}^3$ au niveau du profil 13-2 et $48,77 \text{ m}^3$ le long du profil 15. Une érosion est enregistrée au niveau du profil 14 avec une perte de $52,92 \text{ m}^3$ (Annexes 8, 9, 10, 11, 112 et 13 ; Tableau III.4).

Durant les périodes (février - mars) et (avril - mai), ce secteur a subi une tendance accumulative le long de tous les profils (Tableau III.2). L'engraissement est plus important durant la deuxième période et touche la totalité de chaque profil.

Entre mars et avril, une érosion a été enregistrée sur la totalité de tous les profils, avec un bilan sédimentaire négatif qui augmente en allant du nord vers le sud. Au niveau de l'oued l'érosion diminue toute en s'éloignant de l'embouchure.

Période \ Profils	Profils					
	P12	P13-1	P130	P132	P14	P15
Différence de volume entre Février et Mars (m^3)	40,85	105,48	163,37	107,97	11,40	21,77
Différence de volume entre Mars et Avril (m^3)	-34,30	-96,99	-213,45	-332,43	-146,90	10,88
Différence de volume entre Avril et Mai (m^3)	187,82	313,59	530,27	447,55	82,58	16,13
Cumul des campagnes (m^3)	194,37	322,07	480,19	223,10	-52,92	48,78

Tableau III. 4: Différentiels du volume entre les missions de la période suivi au niveau du secteur 3.

2.4. Secteur 4

Ce secteur correspond à la partie sud de l'estuaire de l'oued Ksob, elle est traversée par les profils 16, 17 et 18.

2.4.1. Evolution à moyen terme de 2006 à 2013

Le bilan sédimentaire pour ce secteur, est négatif avec une érosion significative pour les trois profils (Figures III.22, III.23 et III.24), le déficit sédimentaire est estimé à :

- 32,62 au niveau du profil 16, enregistré surtout dans le bas et la mi-plage, le haut de plage est caractérisé généralement par des zones d'accumulation et des zones d'érosion, là où il y a déplacement des barkhanes vers le sud.
- 211,6 au niveau du profil 17, cette érosion affecte le champ des barkhanes, le bas et la mi-plage.
- 124,24 affectant la totalité du profil 18.

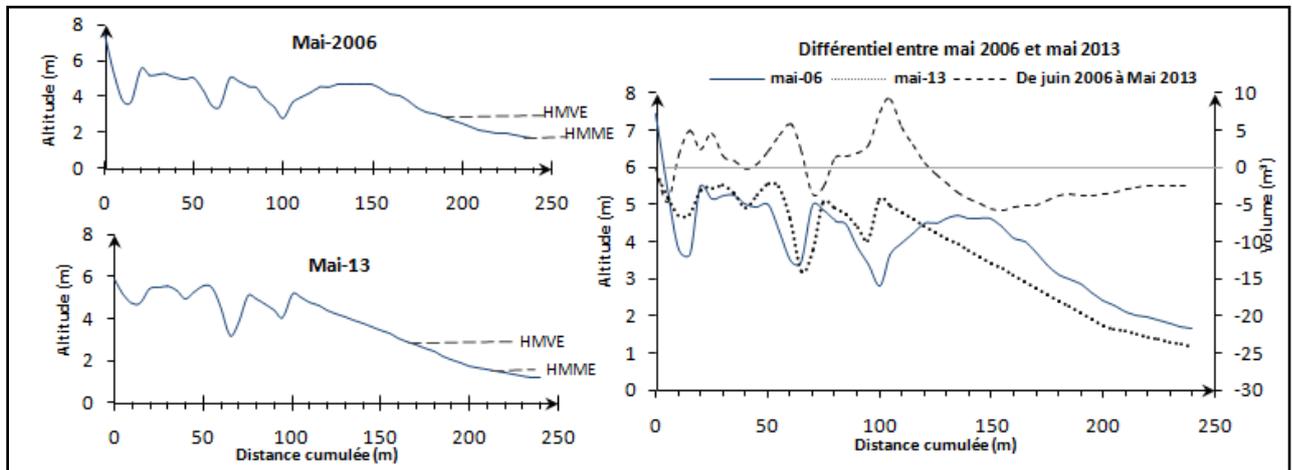


Figure III. 21: Variations topographiques et volumétriques du profil 16 entre mai 2006 et mai 2013.

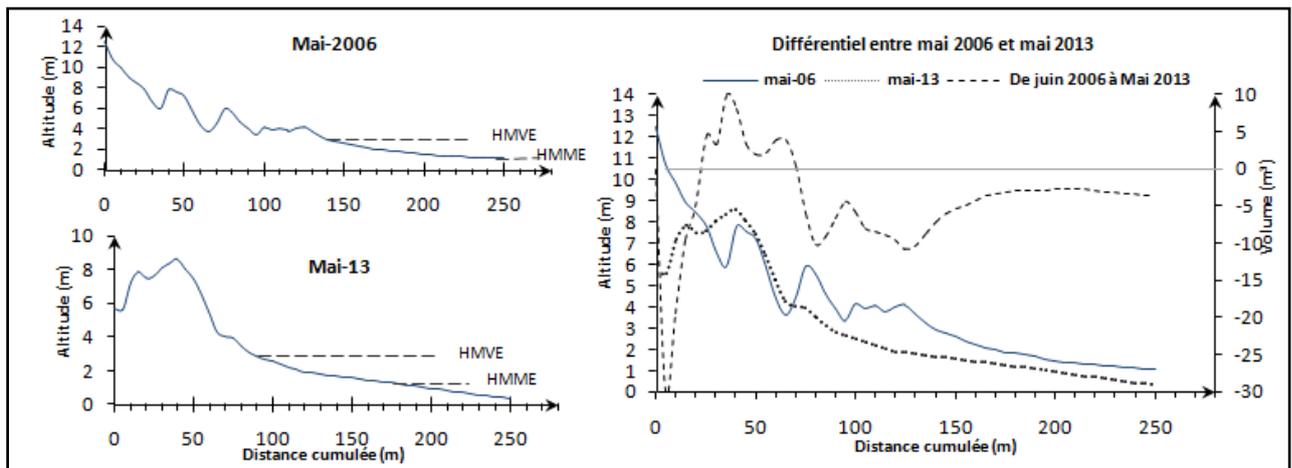


Figure III. 22: Variations topographiques et volumétriques du profil 17 entre mai 2006 et mai 2013.

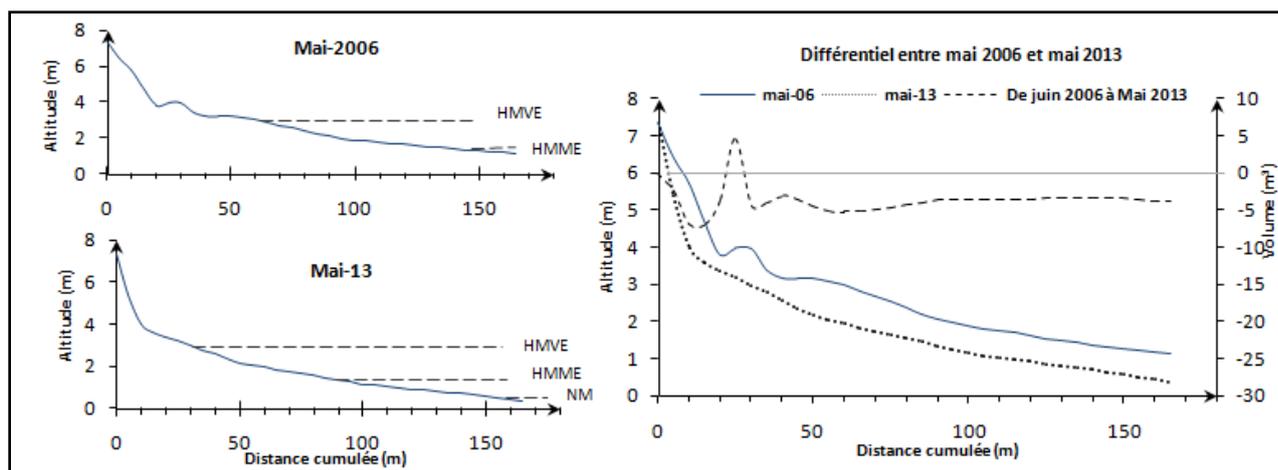


Figure III. 23: Variations topographiques et volumétriques du profil 18 entre mai 2006 et mai 2013

2.4.2. Evolution à court terme

Sur la période suivie, le bilan sédimentaire est négatif avec une tendance érosive qui diminue du nord vers le sud, c'est-à-dire du profil 16 où on enregistre une perte de $122,68 \text{ m}^3$, vers le profil 17 ($- 59,54 \text{ m}^3$) puis le profil 18 ($- 41,42 \text{ m}^3$) (Annexes 14, 15 et 16 ; Tableau III.5).

Entre février et mars, l'analyse a montré une érosion le long des profils 16 et 18 avec une perte de $54,86 \text{ m}^3$ pour le premier et $17,06 \text{ m}^3$ pour le deuxième. Le profil 17 a connu une accumulation concernant le haut de plage au niveau du champ de barkhanes.

Entre mars et avril, l'érosion affecte la totalité des profils 16 et 17 avec des déficits sédimentaires successivement de $36,88 \text{ m}^3$ et $96,12 \text{ m}^3$, tandis que le profil 18 est engraisé au niveau du haut de plage et du mi-estran, par contre le bas de plage a subi une légère érosion, le bilan global de ce profil est de 12 m^3 .

D'avril à mai, on note une érosion relative du profil 16 sur le haut de plage et une stabilité au niveau du bas et de la mi-plage avec une perte globale de $30,94 \text{ m}^3$, cette érosion a concerné la totalité du profil 18 avec un bilan sédimentaire de $-36,37 \text{ m}^3$. Le profil 17 montre une légère accumulation de $7,4 \text{ m}^3$, s'effectuant principalement en haut de plage au niveau du champ de barkhanes, les autres parties du profil restent sensiblement constantes.

Période \ Profils	P16	P17	P18
Différence de volume entre Février et Mars (m^3)	-54,86	29,16	-17,06
Différence de volume entre Mars et Avril (m^3)	-36,88	-96,12	12
Différence de volume entre Avril et Mai (m^3)	-30,94	7,4	-36,37
Cumul des campagnes (m^3)	-122,68	-59,54	-41,42

Tableau III. 5: Différentiels du volume entre les missions de la période suivie au niveau du secteur 4.

II. INTERPRETATION ET DISCUSSION

1. Evolution à moyen terme

L'analyse des données topographiques entre mai 2006 et mai 2013 sur les quatre secteurs morphologiques présents le long de la plage d'Essaouira, apporte des informations pour l'ensemble des secteurs. Les résultats obtenus permettent de distinguer deux zones distinctes :

La zone nord située au nord de l'estuaire et qui comprend les secteurs 1, 2 et 3 est caractérisée par une accrétion du bas de plage avec des zones érodées en haut de plage, cette accrétion augmente progressivement en allant du nord vers le sud jusqu'à la rive droite de l'estuaire de l'oued Ksob, cette évolution montre que le gain des sédiments pendant cette période est supérieur à la perte, ce qui est expliqué par l'importance de la charge solide apportée par l'oued Ksob pendant les crues, par rapport à l'érosion éolienne caractérisant la zone, ainsi que la nature fermée de la baie d'Essaouira par l'obstacle île de Mogador à l'ouest et le cap Mogador et le port au nord et la ville à l'est, qui joue un rôle très important dans la conservation des sédiments, car la majeure partie érodée au nord est piégée au niveau de l'oued au sud, puis apportée soit par les courants fluviomarins, soit par les crues en alimentant à nouveau la baie. Au niveau de l'estuaire, nous avons constaté un déplacement du lit mineur de l'oued Ksob vers le sud, ceci est expliqué par l'arrivée des sables sur la rive droite de l'estuaire sous l'action du vent du nord dominant dans la région (chapitre I).

La zone sud située au sud de l'estuaire et qui comprend le secteur 4, a subi une érosion, ceci pouvant vraisemblablement être expliqué par l'hydrodynamisme assez agité dans cette zone, car la plage est soumise directement à l'action de la houle sans influence de l'île de Mogador, avec une dérive littorale vers le sud, ainsi qu'à l'anthropisation des dunes de la rive gauche de l'estuaire, c'est-à-dire les travaux de fixation des dunes qui ont débutés en 2006 (figure II.8) constituant un obstacle vis-à-vis du transport éolien des sédiments vers le sud, cette fixation engendre une accumulation d'une partie de sables au niveau de la dune en diminuant l'alimentation du bas de plage par les sables venant du nord, ce qui laisse l'estran exposé aux phénomènes de déflation et transport des sables vers le sud via l'action du vent fort et unidirectionnel caractérisant la région d'Essaouira.

2. Evolution à court terme

2.1. Variation morphologique de la plage

La morphologie de la plage, durant la période d'étude, est caractérisée par des variations rapides matérialisées par une évolution morphologique qui se manifeste par une alternance de zones d'érosion et d'autres d'accumulation.

Au cours de la période de suivi, la partie extrême nord de la baie qui correspond au secteur 1 a généralement subi un léger engraissement durant toutes les campagnes de mesure, avec la présence de quelques surfaces d'érosion, cette évolution est liée à l'hydrodynamisme de la plage dominant dans cette zone, en effet; la grande partie de ce secteur (profils 1 et 2), souvent submergée pendant la marée haute, et se trouvant également à l'abri des effets éoliens (Figure III.43a), s'alimente vraisemblablement par les sédiments apportés par l'hydrodynamisme.

Au niveau du secteur 2 qui correspond à la zone de divergence de la houle incidente, le profil 4 est toujours en légère érosion, cette érosion est liée à l'influence des vents du nord qui commence à se sentir au niveau de la mi-plage de ce profil. Les profils 8, 10 et 11 sont en érosion durant les périodes de (février - mars) et (mars – avril) surtout au niveau du haut et de la mi-plage. Le profil 6 évolue d'une manière inverse que celle des profils 8, 10 et 11. Cette évolution est probablement expliquée par le déplacement de petites barkhanes vers le sud sous l'action éolienne, avec alternance de zones d'accumulation correspondant à des barkhanes et de zones d'érosion constituant des espaces interdunaires. L'engraissement de la mi-plage des profils 8, 10 et 11, se fait par les sables résultants de l'érosion de la partie nord de ce secteur (profils 4 et 6) et par la redistribution des sédiments par l'hydrodynamisme.

D'après l'analyse topographique du secteur 2 pendant la période (avril – mai), nous avons enregistré une accumulation importante sur la totalité du secteur, cette accréation est sûrement liée à la distribution de la charge solide de l'oued par l'hydrodynamisme après son accumulation au niveau de la baie.

Les sédiments érodés au niveau des secteurs précédents, vont par la suite engraisser la dune sur la rive droite de l'estuaire ainsi que le lit majeur de l'oued Ksob, ce qui explique la tendance accumulative importante dans le secteur 3 durant les périodes de (février-mars) et (avril – mai). Une partie des sédiments piégés au niveau du lit mineur de l'oued et avec l'hydrodynamisme fluvial, va rejoindre la baie et être redistribuée par la suite par la houle et les courants. Une importante érosion est enregistrée sur la majorité des profils de ce secteur, durant la période de (mars – avril), cette érosion est liée à l'action de la crue de l'oued et au vent qui devient important à partir du mois de mars (chapitre I).

Au sud de la zone d'étude (secteur 4) un démaigrissement général de la plage a eu lieu sur toute la longueur des profils, suite à l'hydrodynamisme assez agitée, avec une dérive littorale du nord vers le sud, et à la formation des couloirs de déflation à travers lesquels on assiste un déplacement des barkhanes vers le sud.

2.2. Impact de la crue de l'oued ksob sur la morphologie de la plage

Les crues de l'oued Ksob sont à l'origine d'une modification très importante de la morphologie et du budget sédimentaire de la plage d'Essaouira. Toutefois, la quantité de sédiments déposée dans la baie, la manière dont ces dépôts s'effectuent et la vitesse de distribution des sédiments dans la plage, sont encore mal connues. Afin d'étudier l'influence de ces apports sédimentaires sur la morphologie et sur le budget sédimentaire de la plage d'Essaouira, nous avons comparé la dernière mission (mars 2013) effectuée juste avant la crue de 20 mars 2013 et les trois premières missions qui suivent la crue (avril, mai et juin 2013).

Durant la période de (février – mars) avant la crue, l'analyse topographique a montré que la partie nord de la plage (secteur 1) est restée sensiblement stable, alors que la partie centrale (secteurs 2), est caractérisée par l'alternance de zones d'érosion et d'autres d'accumulation. Une légère accréation est enregistrée au niveau du secteur 3, tandis que la partie sud (secteur 4) a subi une érosion.

Durant les périodes qui suivent la crue, de mars à avril tout les secteurs ont subi une érosion à l'exception du secteur 1 où on a enregistré une légère accumulation, alors que, durant les périodes (avril – mai) et (mai – juin) la partie nord (secteurs 1, 2 et 3) sont en accumulation importante qui touche la totalité de la plage, tandis que la partie sud (secteur 4) de l'estuaire est toujours en érosion.

Cette différence d'évolution morphologique avant et après la crue sera principalement liée à cet événement. D'une façon générale, la plage a connu, durant les deux périodes (avril – mai) et (mai – juin) qui suivent la crue, une accumulation plus importante que celle des périodes précédentes au niveau de la partie nord de l'estuaire (secteurs 1, 2 et 3). Après la crue, cette accumulation croie en fonction du temps, ce qui montre que la distribution des sédiments sur les différentes parties de la plage, se fait lentement (trois mois après la crue), du fait que la majeure partie de ces sédiments a été injectée directement dans la zone subtidale de la baie, puis partiellement redistribuée sur la plage durant les périodes à forte agitation hydrodynamique. L'estuaire du Ksob quant à lui est le siège d'une érosion intense lors de la crue, le couloir créé par cette érosion persiste jusqu'à la période suivante (avril – mai) grâce aux courants de marée.

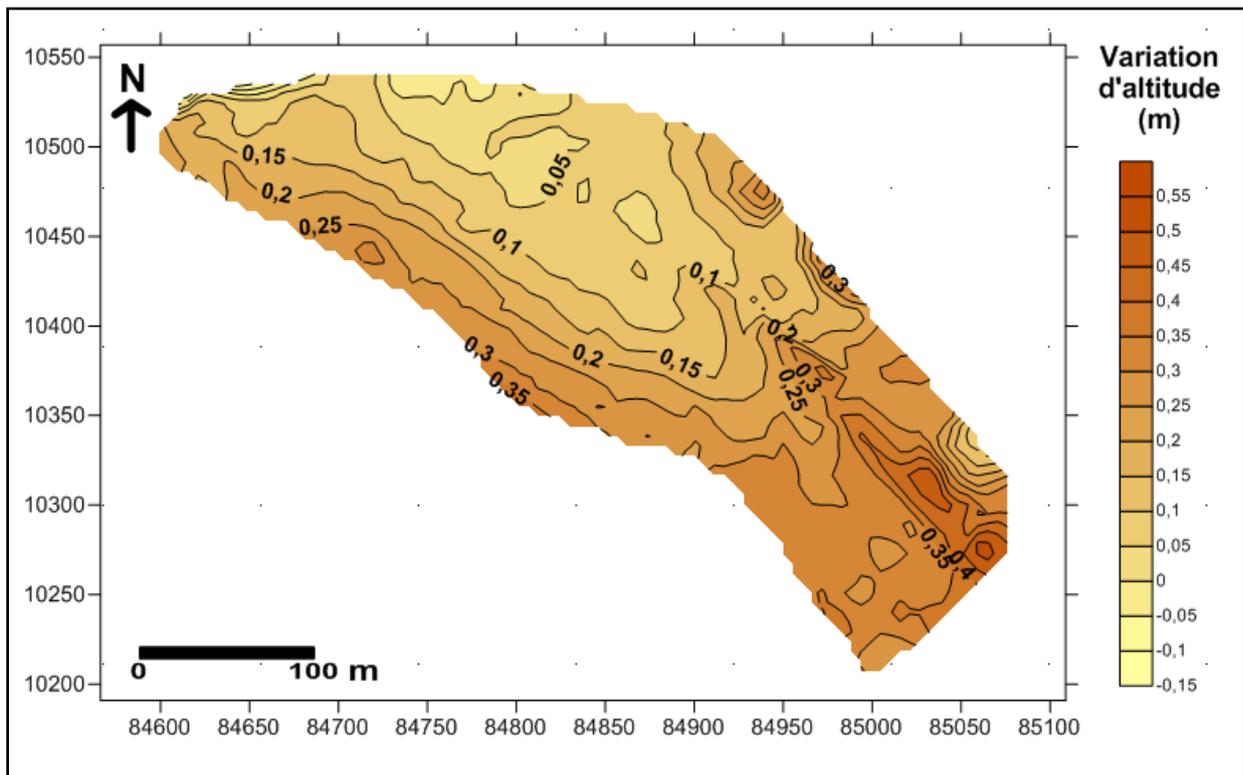


Figure III. 24 : MNT différentiel de la partie nord de la plage d'Essaouira entre mars et mai 2013.

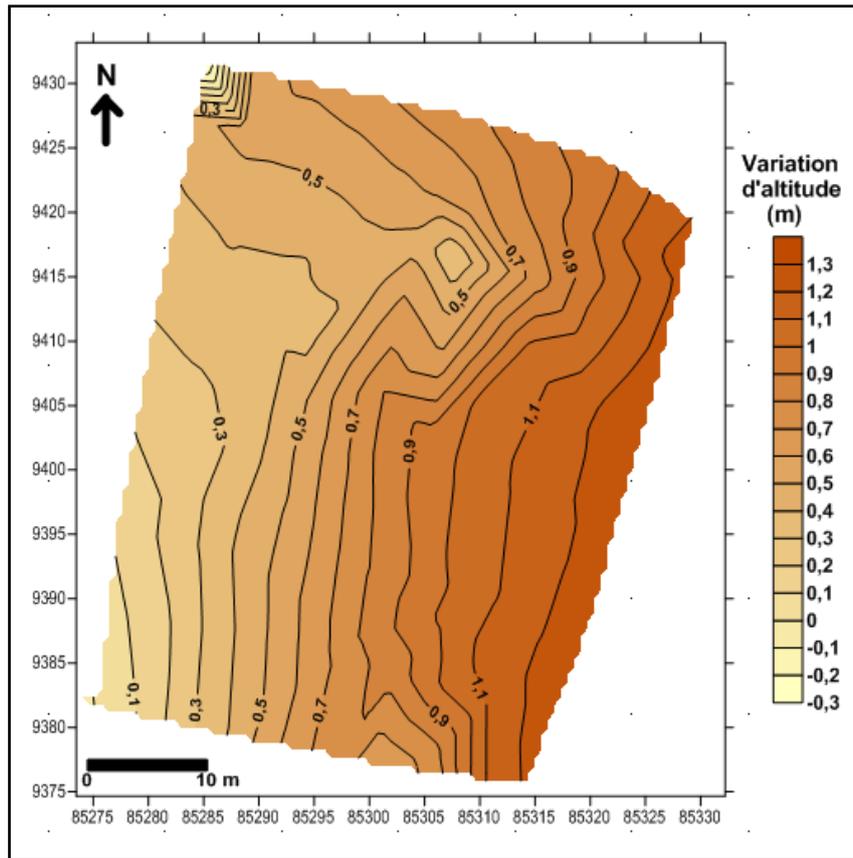


Figure III. 25: MNT différentiel de la partie centrale de la plage d'Essaouira entre mars et mai 2013.

Les MNT réalisés au niveau de la plage avant et après la crue, confirment cette évolution, en effet ; l'analyse du MNT différentiel obtenu, montre qu'un engraissement a été enregistré sur la totalité des parties, nord du secteur 1 (MNT1) et centrale du secteur 2 (MNT2). La différence d'altitude dans MNT1 varie de 0,05 m à 0,35 m au niveau de la mi-plage, et de 0,15 m à 0,35 m au bas de plage (Figure III.25). Pour le MNT2 la variation est de 0,1 m au bas de plage et 1,2 m au haut de plage (Figure III.26). En allant du nord vers le sud, nous remarquons une augmentation progressive du taux d'accumulation surtout au niveau du haut de plage, ceci est lié à l'accumulation des sables sous forme de petites barkhanes (Figure III.27b). Ainsi, la période (avril – mai) est la seule montrant une accumulation sur l'ensemble des différentes zones hormis la zone sud de l'estuaire. Ceci montre l'importance quantitative des apports liée à la crue du 20 mars 2013 (Figure III.27c).



Figure III. 26: Photos prises au niveau de la plage d'Essaouira ; a)- la partie extrême nord de la plage submergée pendant la marée haute, b)- petites barchanes dans la partie centrale de la plage d'Essaouira après la crue prise le 08 juin 2013, c)- eau de mer turbide au niveau de la partie extrême nord de la plage suite à la charge solide apportée par l'oued Ksob lors de la crue du 20 mars 2013.

CONCLUSION

La compilation des données obtenues à partir de l'analyse des levés topographiques, permet de comprendre l'évolution morphologique de la plage à court et à moyen terme.

D'après cette analyse, nous remarquons que les variations morphologiques et volumétriques au niveau du haut de plage, sont plus significatives que dans le bas de plage, Ceci est en relation avec la dynamique éolienne qui est très puissante par rapport à l'hydrodynamisme au niveau du littoral d'Essaouira, conduisant notamment à des changements morphologiques rapides et marqués par un déplacement longitudinal des sables vers le sud.

Au cours de la période d'étude (février à juin 2013), l'analyse topographique et volumétrique permet de distinguer deux zones distinctes au niveau du secteur d'étude :

- La partie nord de la plage d'Essaouira comprise entre le port au nord et la rive droite au sud. Elle est caractérisée par un bilan sédimentaire qui augmente progressivement du nord vers le sud. Ceci semble être lié aux apports sédimentaires de la crue de 20 mars 2013, Ces apports sont accumulés au niveau de la baie puis redistribués par l'hydrodynamisme sur la totalité de la plage en fonction de l'énergie de la houle. Les sables sont ensuite déplacés longitudinalement vers le sud sous l'action éolienne, efficaces durant toute l'année. Ceci n'est perceptible qu'à partir du profil 3 et dont l'intensité augmente en se dirigeant vers le sud, En effet, la partie extrême nord de la plage (profil 1 et 2) est protégée de l'action éolienne directe par les constructions de la ville et surtout par l'abri offert par la digue de la plage.
- Partie sud de la plage qui se trouve au sud de l'estuaire qui est une plage ouverte soumise à l'action de la dérive littorale du nord vers le sud et qui n'est pas influencée par l'obstacle que représente l'île de Mogador, ce qui engendre un recul permanent de trait de côte dans cette partie de la plage.

Chapitre IV

ETUDE
GRANULOMETRIQUE
DES SABLES

INTRODUCTION

La plage d'Essaouira, domaine littoral complexe, est caractérisée par des processus éoliens et hydrosédimentaires qui agissent à diverses échelles spatio-temporelles (El Mimouni, 2009).

Dans le but de comprendre la dynamique spatiale des sédiments de la plage d'Essaouira, une étude granulométrique a été effectuée sur les sables de surface.

Les études effectuées jusqu'à présent dans ce sens, sur la plage d'Essaouira sont ceux de :

- Chahboun (1988) et Gentile (1997) qui ont étudié l'évolution granulométrique approximative d'une vaste zone, comprise entre la ville d'Essaouira et la plage de Sidi Kaouki au Sud.
- Lharti et al., (2006) qui se sont surtout intéressés à l'étude de l'évolution des caractéristiques granulométriques des sables du cordon dunaire de la plage d'Essaouira entre les régions de Moulay Bouzerktone au Nord et le Cap Sim au Sud.
- El Mimouni, (2009) qui a étudié la granulométrie des sables au niveau du tronçon de la plage compris entre la jetée du port et la rive sud de l'estuaire de l'oued Ksob, ainsi que sur l'avant plage de la baie d'Essaouira (entre la plage et l'Ile de Mogador).

Dans cette étude, nous proposons d'étudier l'évolution granulométrique récente des sables de la baie d'Essaouira. Pour cela, un total de 52 échantillons de sédiment de surface a été prélevé simultanément avec les levés topographiques en février 2013, le long des profils (2, 4, 6, 10, 12, 132, 15, 16 et 18).

I. TECHNIQUES GRANULOMETRIQUES

1. Appareil de mesure granulométrique

Les analyses granulométriques du sédiment brut ont été faites avec un granulomètre Laser de type HORIBA LA-300 (Figure IV.1), qui a une gamme de mesure comprise entre 0.1 et 600 microns, et dont la configuration est composée comme suit (Figure IV.2) :

- Un système de circulation qui comporte une cuve à ultra sons, un agitateur et une pompe.
- Un système optique qui comporte un laser basse- tension, des optiques (lentilles de Fourier), une zone de cellule et des photodétecteurs (photos diodes).
- Un équipement informatique couplé au logiciel approprié.



Figure IV. 1: Photo du Granulomètre laser de type HORIBA LA-300

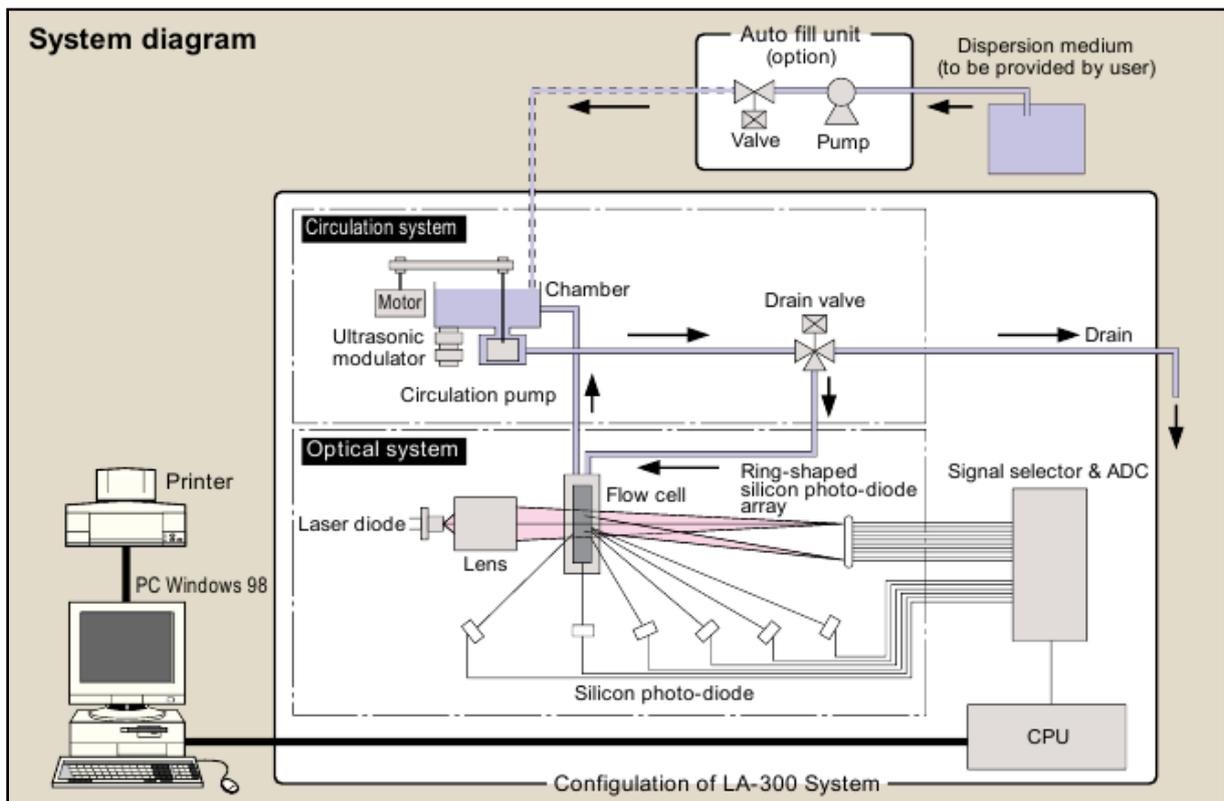


Figure IV. 2: Schéma détaillé du Granulomètre LA-300

2. Principe de mesure

Cet appareil utilise le principe de diffraction et de diffusion d'un faisceau (Figure IV.3). Lorsqu'une particule est éclairée par un faisceau de lumière cohérente et monochromatique, il apparaît un motif de diffraction sous forme de franges concentriques alternativement claires et sombres. Selon la théorie de Fraunhofer, l'intensité du rayonnement diffracté est une fonction du rayon des particules. L'angle de diffraction est d'autant plus grand que les particules sont petites.

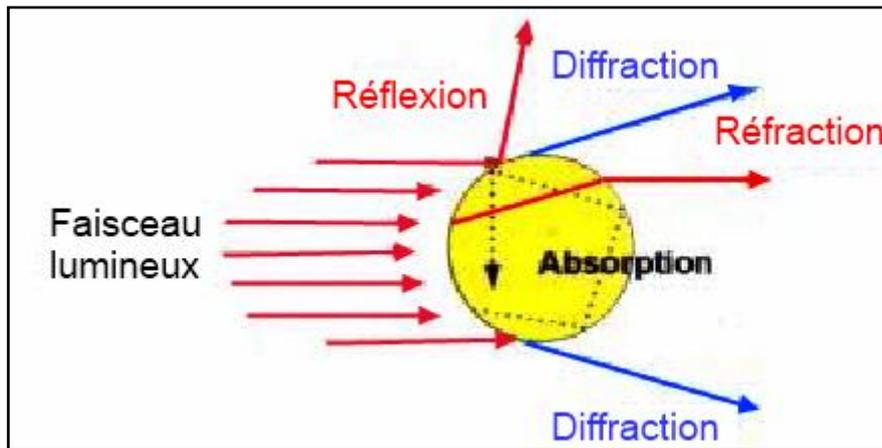


Figure IV. 3: Principe de diffraction et de diffusion de la lumière par une particule

Les particules qui doivent être mesurées sont diluées dans de l'eau distillée, puis mises en circulation par une pompe dans la cellule, les particules éclairées par la lumière laser dévient 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 dévient des quantités importantes de lumière sur des angles faibles par rapport à l'axe de propagation. Les petites particules au contraire dévient 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.).

3. Définition des paramètres granulométriques

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. Les indices les plus couramment utilisés sont la taille moyenne, le classement (σ) et l'asymétrie (Sk).

Les paramètres granulométriques peuvent être exprimés dans une échelle granulométrique en unités de phi (Φ) qui est égal à la valeur négative du logarithme à base de 2 du diamètre en millimètre $\Phi = -\log_2(\text{mm})$.

3.1. Grain Moyen

Dans la formule proposée par Trask l'échelle utilisée est l'échelle millimétrique, par contre Inman (1938) utilise l'échelle des Phi et il a proposé la formule suivante pour le calcul de la moyenne :

$$M = \frac{\Phi 16 + \Phi 84}{2}$$

Mais avec deux quartiles seulement ($\Phi 16$ et $\Phi 84$), la moyenne granulométrique ne serait pas représentative de l'échantillon. Pour y remédier, Folk et Ward ont proposé une autre expression « Graphic Mean » :

$$M = \frac{\Phi 16 + \Phi 50 + \Phi 84}{3}$$

Dans leur formule Folk et Ward (1957) ont choisi trois quartiles ($\Phi 16$, $\Phi 50$ et $\Phi 84$), dans le but d'avoir une moyenne représentative de l'échantillon.

Graphic Mean ou moyenne granulométrique permet de donner une idée générale sur la texture de l'échantillon, le calcul de cet indice est d'autant plus fiable que le nombre de données prises en compte est élevé.

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. Il permet l'individualisation d'un certain nombre de faciès (Tableau IV.1).

Phi	Grade		mm	μm
-8	Bloc	G	256	256,000
	Galet	R		
-6	Caillou	A	64	64,000
	Granule	V		
-2		I	4	4,000
		E		
-1		R	2	2,000
	Très Grossier			
0	Grossier	S	1	1,000
		A		
1	Moyen	B	0.50	500
		L		
2	Fin	E	0.25	250
3	Très Fin		0.125	125
4	Grossier		0.0625	62.5
5	Moyen	V	0.0313	31.3
		A		
6	Fin	S	0.0156	15.6
		E		
7	Très Fin		0.0078	7.8
8	Argile		0.0039	3.9

Tableau IV. 1: Classification dimensionnelle des sédiments détritiques en mm et en μm et leur équivalent dans l'échelle de Phi (Belmedrek, 2006).

3.2. Sorting Index ou Déviation Standard

Ce paramètre est connu sous le nom de « indice de classement. So », (Trask, 1930), et « Graphic Standard Deviation σG », (Otto, 1938).

Les expressions mathématiques utilisées pour définir ce paramètre diffèrent d'un auteur à l'autre. Les expressions données par Trask (1930) et par Otto (1938) sont :

$$S_0 = \sqrt{Q_{75}/Q_{25}} \quad (\text{Formule proposé par Tarsk, 1930})$$

$$\sigma G = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{2} \quad (\text{Formule proposé par Otto, 1938})$$

On remarque que seuls deux quartiles, représentant 68% de la partie centrale de la distribution, sont utilisés pour calculer ce paramètre.

Inclusive Graphic Standard Deviation est le terme utilisé par Folk et Ward (1957), cet indice est donné par la formule suivante :

$$\sigma i = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6,6}$$

Avec ces quatre quartiles 90 % de la distribution est utilisé dans le calcul de ce paramètre. Le sorting index ou indice de tri ou de classement présente une estimation de la dispersion des tailles des particules par rapport à la moyenne de l'échantillon (Tableau IV.2).

Classes granulométriques	σi en phi			
	Sédiment très bien classé	Sédiment bien classé	Sédiment moyennement classé	Sédiment très mal classé
S.T.G \Rightarrow S.M	> -1,29	-1,41 \Rightarrow -1,29	-1,57 \Rightarrow -1,41	< -1,57
SF	> -1,11	-1,20 \Rightarrow -1,11	-1,30 \Rightarrow -1,20	< -1,30
STF	> -1,15	-1,25 \Rightarrow 1,15	-1,4 \Rightarrow 1,25	< -1,40

Tableau IV. 2: Terminologie du sorting index (σi) définie par Folk et ward (1957).

Cet indice dépend généralement de trois principaux facteurs :

- 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.)

3.3. Asymétrie : (le Graphic Skewness)

Le terme utilisé par Inman pour cet indice est « Graphic Skewness », selon cet auteur ce paramètre est donné par la formule suivante :

$$SKg = \frac{(\Phi16 + \Phi84 - \Phi50)}{(\Phi84 - \Phi16)}$$

Cette formule n'inclut que 68 % de la partie centrale de la distribution.

Le meilleur calcul de cet indice est donné selon la formule proposé par Folk et ward (1957) :

$$SKi = \frac{(\Phi16 + \Phi84 - 2\Phi50)}{2(\Phi84 - \Phi16)} + \frac{(\Phi5 + \Phi95 - 2\Phi50)}{2(\Phi95 - \Phi5)}$$

Avec cette formule 90% de la distribution est pris en considération.

Dans une distribution normale symétrique, la courbe de fréquence est en forme de cloche où la médiane et la moyenne coïncident. Chaque déviation de la distribution de la normale qui mène une différence entre la médiane et la moyenne représente une asymétrie ou skewness de la courbe des fréquences (Figure IV.4).

Ce paramètre informe sur l'enrichissement de l'échantillon en particules fines (valeurs positives) ou grossières (valeurs négatives), ou une symétrie de l'échantillon lorsque la valeur du Skewness est comprise entre -0,10 et +0,10. Lorsque ce paramètre est nul, il indique une parfaite symétrie du sédiment (Tableau IV.3).

le Skewness	Asymétrie
+1,00 > SKi > +0,30	<i>forte asymétrie vers les petites tailles</i>
+0,30 > SKi > +0,10	<i>asymétrie vers les petites tailles</i>
+0,10 > SKi > -0,10	<i>symétrie granulométrique de l'échantillon</i>
-0,10 > SKi > -0,30	<i>asymétrie vers les grandes tailles</i>
-0,30 > SKi > -1,00	<i>forte asymétrie vers les grandes tailles</i>

Tableau IV. 3: Terminologie du sorting index (σ_i) définie par Folk et ward (1957).

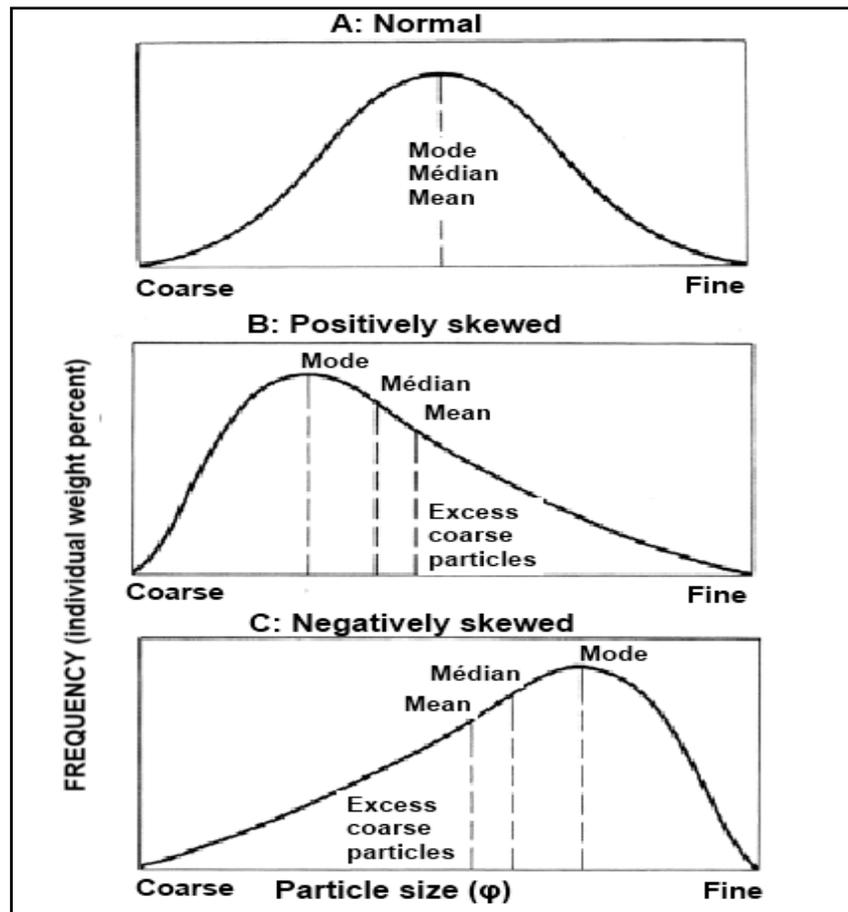


Figure IV. 4: Courbes de fréquence illustrant la relation entre le mode, la médiane et la moyenne et la différence entre une courbe normale symétrique et une courbe de fréquence asymétrique (skewed)

II. EVOLUTION GRANULOMÉTRIQUE DU SECTEUR D'ETUDE

1. Localisation et description des profils

Pour l'analyse granulométrique des sables de la zone d'étude, nous avons prélevé 52 échantillons au mois de février 2013. Les profils utilisés pour l'échantillonnage et pour l'évolution topographique sont ceux utilisés par El Mimouni (2009) au cours de sa thèse. Les prélèvements ont été réalisés simultanément avec les levés topographiques, le long des profils (2, 4, 6, 10, 12, 13-2, 15, 16 et 18) (Figure IV.5) :

- Les profils 2 et 4 se trouvent dans la partie nord de la plage, Cette zone est à l'abri des actions éoliennes causées par la digue du port. Cinq échantillons ont été récoltés le long de chaque profil.
- Les profils 6 et 10 se localisent dans la partie centrale de la plage ; c'est-à-dire dans la zone de divergence de la houle incidente (chapitre I). Le long du profil 6, sept échantillons ont été récoltés, tandis qu'au niveau du profil 10, nous n'avons prélevé que six échantillons.

- Le profil 12 se situe sur la rive droite de l'estuaire de l'oued Ksob, quatre échantillons y ont été prélevés.
- Les profils 13-2 et 15 correspondent à la zone d'estuaire de l'oued Ksob, le long de ces profils quatorze échantillons ont été récoltés ; huit au niveau du profil 13-2 et six au niveau du profil 15.
- Le profil 16 se situe sur la rive gauche de l'estuaire de l'oued Ksob, à ce niveau six échantillons ont été récoltés.
- Le profil 18 se trouve dans la partie sud de notre site d'étude, où on a prélevé quatre échantillons.



Figure IV. 5: Localisation des profils de prélèvement des échantillons (source : Google earth)

2. Analyse des résultats

2.1. Analyse des courbes des fréquences

Les échantillons prélevés le long de l'ensemble des profils transversaux cités précédemment, présentent des courbes de fréquence similaires ; ils présentent tous des distributions unimodales. Cependant, les différents échantillons analysés présentent des répartitions granulométriques qui diffèrent d'un échantillon à un autre.

Le long des profils 2, 6 et 15, les courbes de fréquences présentent la même allure, elles se localisent dans la classe granulométrique (152 - 344 μm) (Figure IV.6). La courbe moyenne indique la dominance de la fraction sableuse à granulométrie 229,08 μm avec un pourcentage de 13,89 % au niveau du profil 2. On remarque également qu'au niveau des profils 6 et 15, la même fraction granulométrique domine avec des pourcentages respectifs de 15,21 % (Figure IV.8) et 14,20 % (Figure IV.12).

Pour le profil 4, les courbes de fréquence se trouvent limitées dans une classe granulométrique très réduite (133 - 262 μm), la courbe de fréquence moyenne présente un mode de l'ordre de 14,74 % pour la classe granulométrique 200 μm (Figure IV.7).

Les courbes de fréquences des profils 10 et 16, s'étalent sur des classes granulométrique très réduite (200 μm - 344 μm), la courbe de fréquence moyenne présente un mode qui a une valeur de 16,34 % pour le profil 10 (Figure IV.9) et 16,20 % pour le profil 16 (Figure IV.13), la classe granulométrique correspondante est de 262 μm pour les deux profils.

Les échantillons prélevés le long des profils 12, 13-2 et 18, présentent des courbes de fréquences qui s'étalent sur des classes granulométrique réduite (175 μm - 344 μm), la courbe de fréquence moyenne du profil 12 montre que la fraction sableuse la plus dominante est de 262 μm , cette fraction représente 15,75 % de sable de l'ensemble des échantillons (Figure IV.10), alors que pour les profils 13-2 et 18 cette fraction est de 229 μm avec des pourcentages respectifs de 16,11 % (Figure IV.11) et 15,98 % (Figure IV.14).

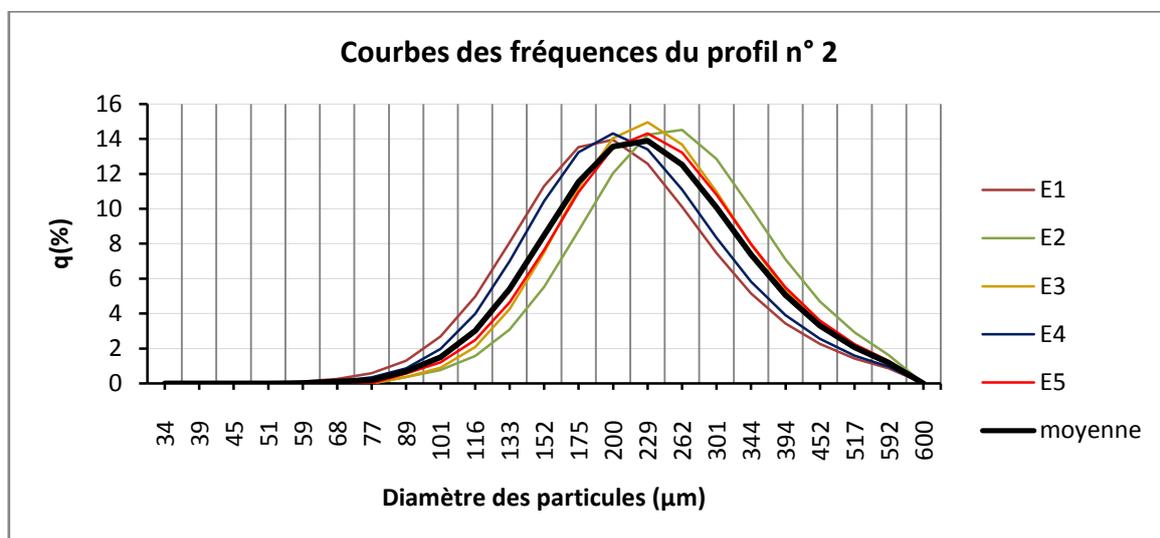


Figure IV. 6: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 1

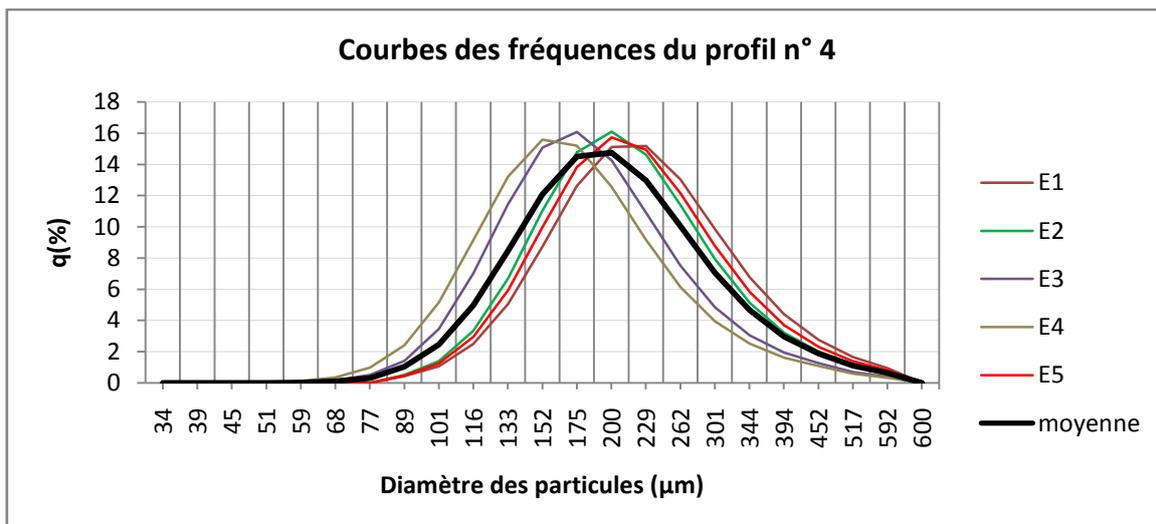


Figure IV. 7: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 4

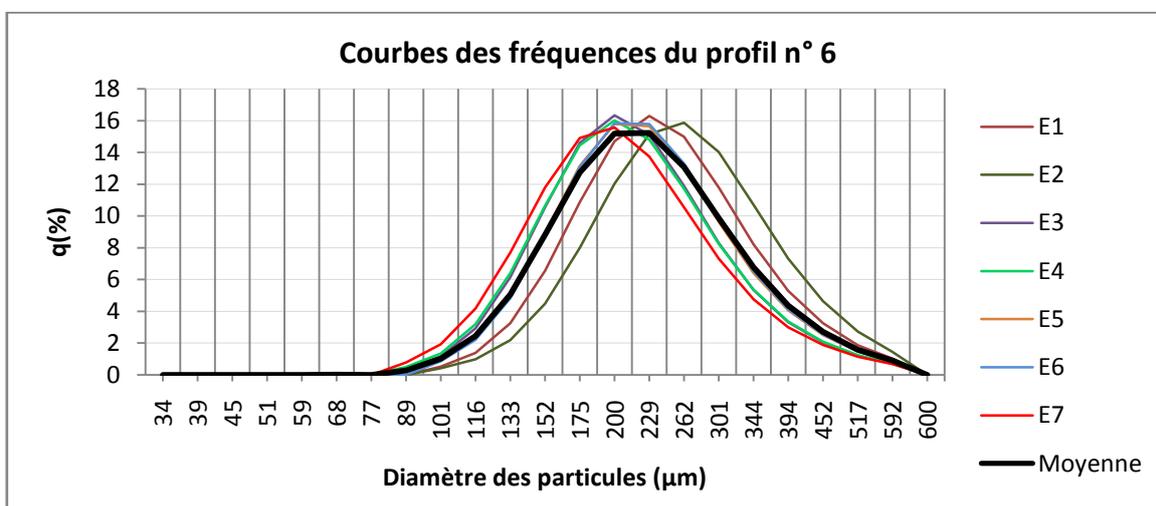


Figure IV. 8: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 6

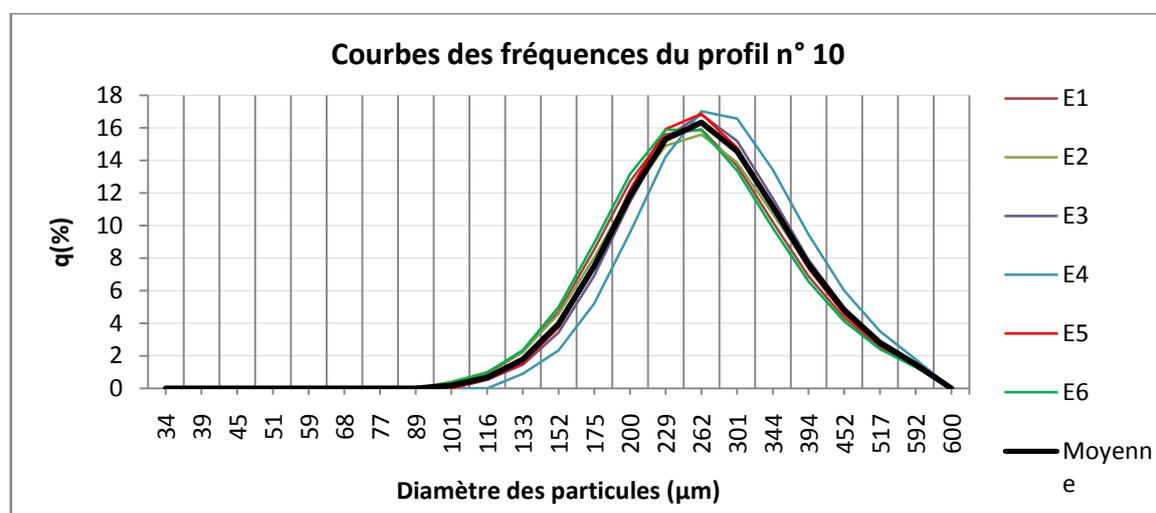


Figure IV. 9: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 10

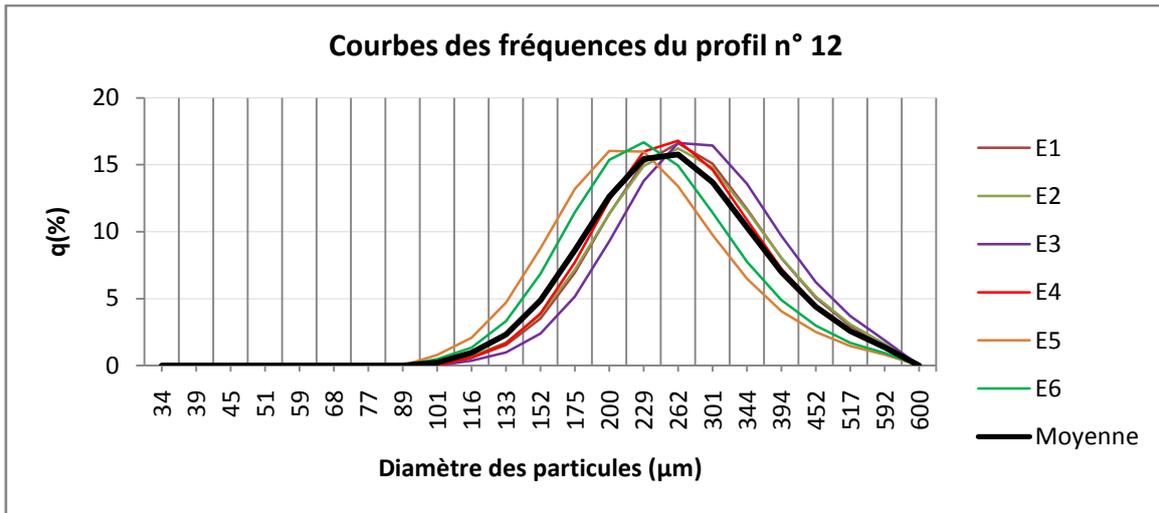


Figure IV. 10: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 12

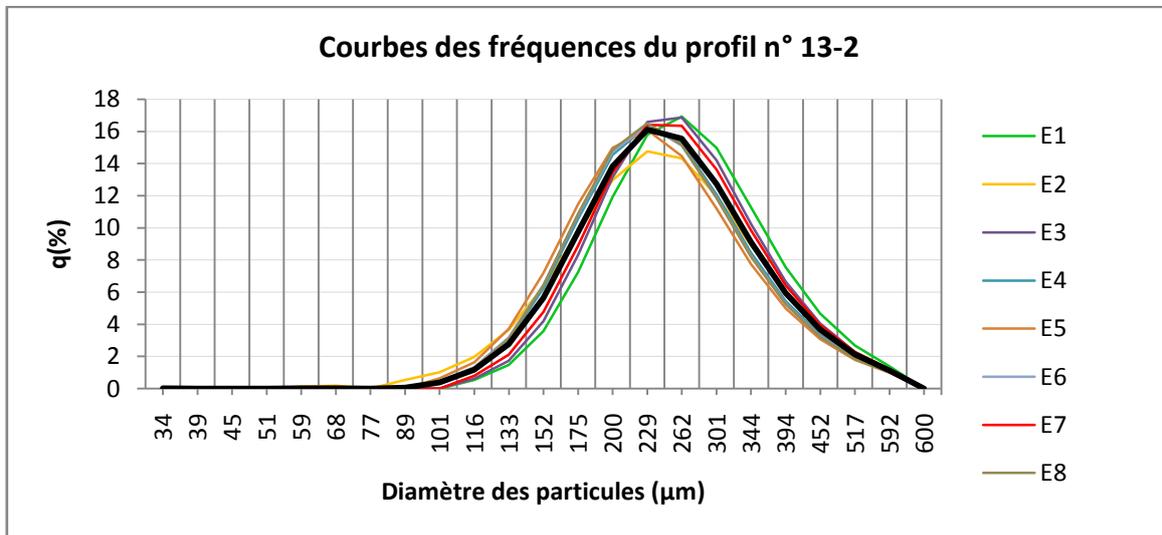


Figure IV. 11: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 132

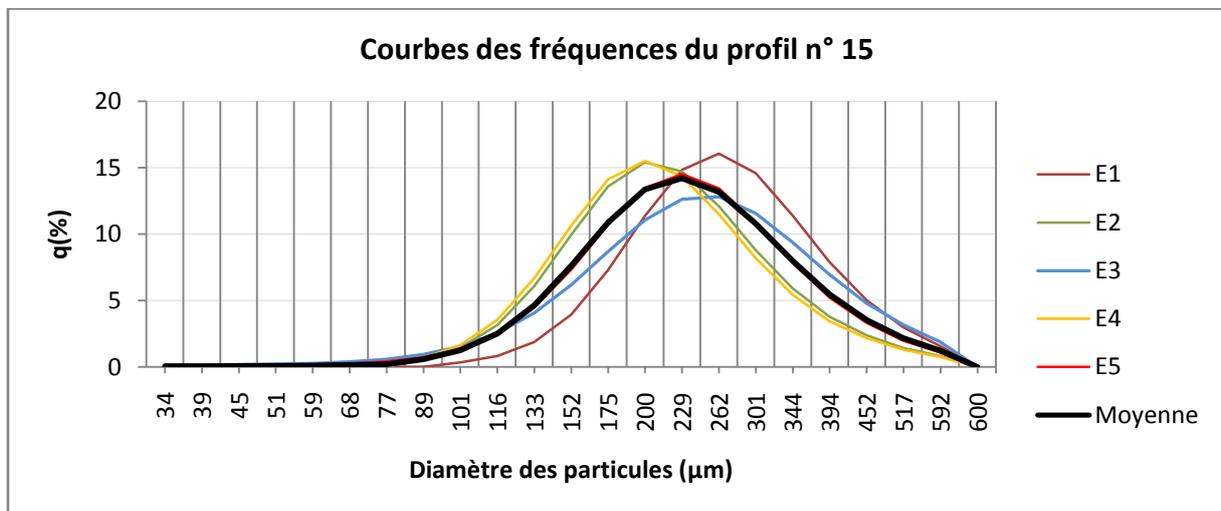


Figure IV. 12: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 15

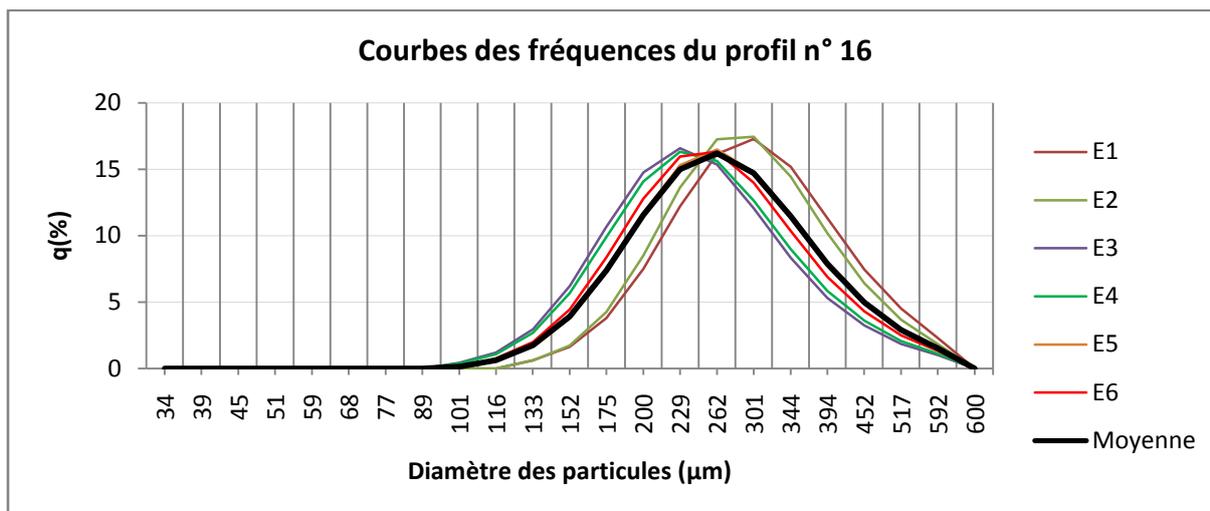


Figure IV. 13: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 16

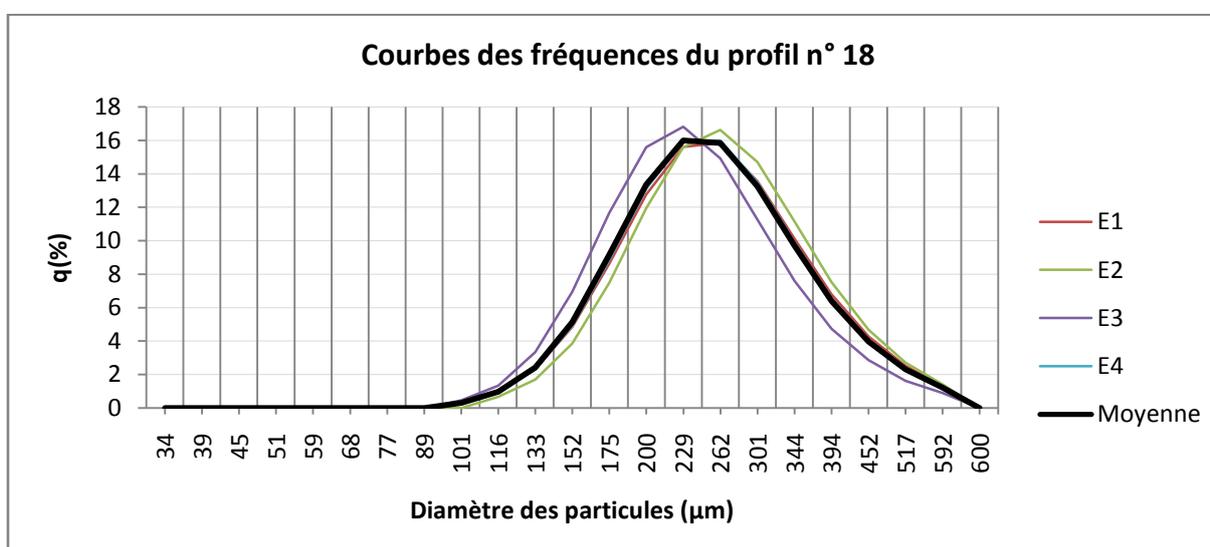


Figure IV. 14: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 18

2.2. Evolution des paramètres granulométriques selon les différents profils

Les résultats de traitement des échantillons récoltés dans la plage d'Essaouira, seront présentés pour chaque profil (Figure IV.15) :

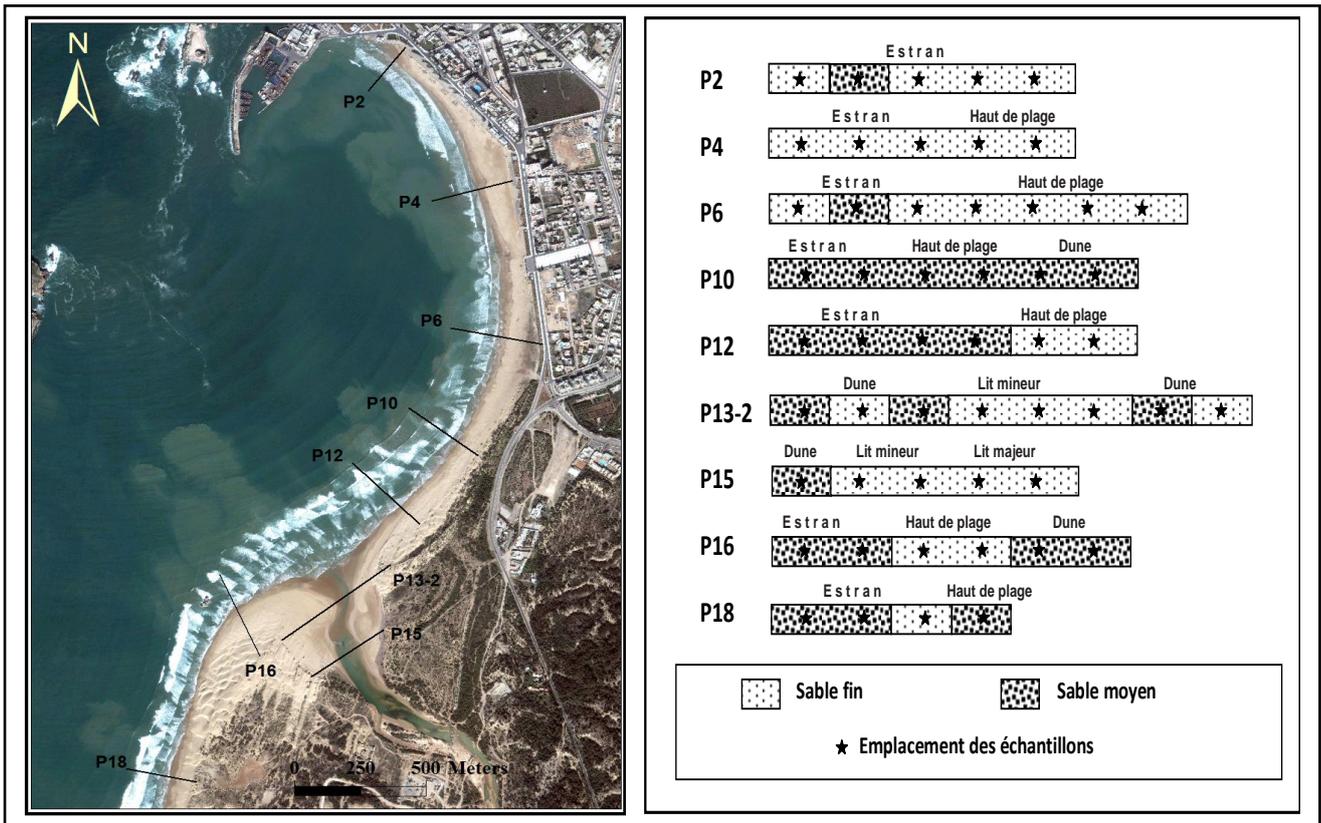


Figure IV. 15: Répartition transversale du grain moyen sur la plage d'Essaouira en février 2013

2.2.1. Profil 2

Les sables prélevés le long du profil 2, présentent un grain moyen qui varie de 206 μm à 254 μm . Les dimensions de ces grains sont un peu plus réduites sur le haut d'estran que sur le bas d'estran; cependant on n'observe pas de tendance évolutive remarquable de la granulométrie au niveau de ce profil.

Les sédiments de ce profil sont caractérisés par un très bon classement (-0.53 à -0.58 Φ), avec des valeurs d'asymétrie (0.02 à 0.07 Φ) montrant une symétrie granulométrique de l'échantillon.

2.2.2. Profil 4

Les caractéristiques granulométriques au niveau de ce profil, font ressortir des sables fins avec un diamètre variant entre 173 μm et 226 μm .

Les sédiments sont très bien classés (-0.53 à -0.50 Φ) avec une symétrie granulométrique des échantillons au niveau du bas d'estran et une asymétrie vers les petites tailles pour les échantillons du haut estran.

2.2.3. Profil 6

Les aspects granulométriques des sédiments analysés, montrent des sables fins sur la majorité du profil, avec apparition de sables moyens au niveau du bas de plage. Les grains moyens des sédiments varient entre 206 μm et 259 μm .

L'indice de classement montre que les sédiments sont très bien classés (entre -0,49 Φ et -0,62 Φ).

Les courbes de fréquences granulométriques présentent une symétrie granulométrique des échantillons du haut de plage, et une asymétrie vers les petites tailles au niveau de l'estran.

2.2.4. Profil 10

Selon le profil 10, qui s'étend de la dune jusqu'au bas de l'estran, le grain moyen montre une grande homogénéité des sables, dont la taille des grains varie de 255 μm et 279 μm avec une moyenne de 262,7 μm , ces valeurs traduisent une dominance des sables moyens.

La valeur moyenne de l'indice de tri selon les échantillons récoltés le long du profil est de -0,47 Φ , montrant un très bon classement des sables.

La valeur moyenne calculée du skewness montre que les sables du profil 10 présentent une symétrie granulométrique, sauf pour un échantillon de la dune qui présente une certaine asymétrie vers les petites tailles.

2.2.5. Profil 12

La taille du grain moyen des échantillons récoltés suivant ce profil, oscille généralement entre 225 et 280 μm . Les sables moyens (entre 260 et 280 μm) occupent l'estran, tandis que les sables fins (entre 225 et 236 μm) ont été observés au niveau du haut de plage.

Les sédiments de cette zone sont très bien classés (entre -0,48 Φ et -0,47 Φ) et présentent une symétrie granulométrique de l'échantillon dans l'estran, alors qu'au niveau du haut de plage, on note une asymétrie vers les petites tailles.

2.2.6. Profil 13-2

Suivant le profil 13-2 qui traverse l'oued Ksob, les valeurs du grain moyen varient de 235 μm à 263 μm . Ces valeurs indiquent que ces sables sont fins à moyens sur les dunes des deux rives de l'oued et deviennent de plus en plus fins en allant vers le lit mineur de l'oued.

Les valeurs d'indice de classement ou sorting index suivant ce profil sont comprises entre -0,53 et -0,46 Φ , montrant un très bon classement des sables.

L'indice d'asymétrie, présente des valeurs qui montrent clairement que les échantillons de ce profil présentent une symétrie granulométrique.

2.2.7. Profil 15

Selon le profil 15, qui représente une coupe transversale de l'Oued Ksob, les valeurs du grain moyen varient de 212 μm à 247 μm (échantillons pris du lit de l'oued), ce qui indique que ces sables sont fins et deviennent moyens lorsqu'on se dirige vers les dunes embryonnaires de la rive gauche.

Les valeurs d'indice de classement ou sorting index suivant le profil sont comprises entre - 0,37 et - 0,62 Φ , montrant un très bon classement des sables.

Les échantillons récoltés le long de ce profil ont des valeurs de skewness qui oscillent entre - 0,05 et 0,08 Φ , traduisant une symétrie granulométrique. L'échantillon de la dune a une valeur de skewness égale à - 0,43 Φ , cette valeur indique une asymétrie granulométrique vers les grandes tailles.

2.2.8. Profil 16

Le grain moyen des échantillons prélevés le long du profil 16, varie globalement entre 240 μm et 294 μm ; les prélèvements au niveau de l'estran et de la dune sur la rive gauche de l'oued sont constitués de sables moyens (entre 256 et 294 μm), tandis que les sables à dimensions plus réduites (sables fins entre 240 et 245 μm) occupent le haut de plage.

L'indice du tri présente des valeurs qui oscillent entre - 0,44 et - 0,48 Φ . On peut dire que ces sables sont très bien classés.

Le long du profil, le skewness présente toujours une symétrie granulométrique.

2.2.9. Profil 18

Les échantillons récoltés suivant le profil 18 sont dominés par une granulométrie moyenne avec des valeurs allant de 252 à 262 μm , à l'exception d'un échantillon prélevé au niveau du haut de plage qui représente une granulométrie fine (234 μm).

Les sédiments de ce profil sont caractérisés par un très bon classement (- 0,50 à - 0,47 Φ) avec toujours une symétrie granulométrique.

2.3. Interprétation des résultats

2.2.10. Evolution spatiale des paramètres granulométriques

Les valeurs obtenues pour les indices de classement et d'assymétrie ne font apparaître aucune tendance évolutive dans la zone d'étude. Dans leur globalité, les sédiments sont très bien classés pour tous les échantillons récoltés dans la plage et montrent généralement une symétrie granulométrique de l'échantillon.

L'analyse granulométrique du grain moyen des profils, nous a permis de délimiter la zone d'étude en 4 secteurs différents (Figure IV.15), chaque secteur est caractérisé par une

répartition granulométrique spécifique selon les conditions dominantes (hydrodynamiques, aérodynamiques, anthropiques):

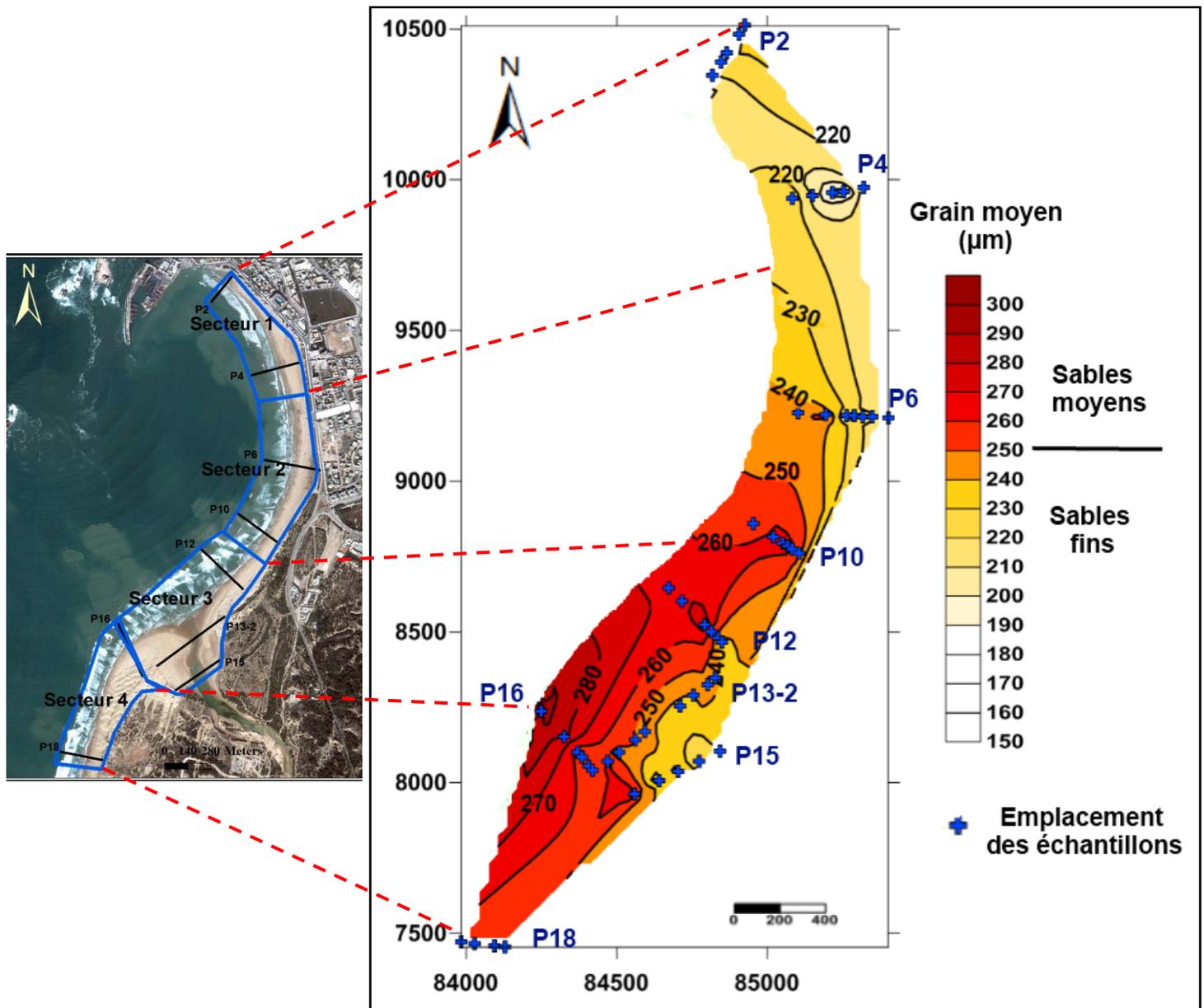


Figure IV. 16: Répartition spatiale du grain moyen sur la plage d'Essaouira en février 2013

- **Secteur 1**

Correspond à la zone qui se trouve à l'extrême nord de la plage d'Essaouira, limitée au nord par la digue du port, au sud par la corniche et les constructions de la ville, cette zone comporte les profils 2 et 4.

L'analyse du grain moyen dans cette zone montre une grande homogénéité des sables sans évolution longitudinale apparente (Figure IV.16). Les sables ont des tailles moyennes de l'ordre de 214 µm ; ce sont généralement des sables fins du fait qu'ils se trouvent dans une

zone calme, abritée derrière la digue du port d'Essaouira, véritable dispositif de protection contre l'agitation hydrodynamique. Ceci s'ajoute à la protection contre les vents d'alizés, très actifs, en provenance du nord, par les constructions de la Médina d'Essaouira.

- **Secteur 2**

Il représente la partie centrale de la baie d'Essaouira, c'est une zone de divergence de la houle incidente (chapitre I), cette zone comporte les profils 6 et 10 (Figure IV.16).

La taille du grain moyen des échantillons récoltés dans ce secteur, oscille entre 206 et 279 μm . La partie nord de cette zone est occupée par des sables fins. Vers la partie médiane de cette zone, les sables moyens, occupant des zones étroites interdunaires, commencent à apparaître, leur superficie devient plus importante en allant vers le sud où ils occupent pratiquement toute la haute plage, suite à l'accentuation de l'intensité du vent.

L'alimentation de cette partie de la plage est assurée en permanence par les sables éoliens durant les périodes de vents actifs sans négliger la contribution des sables entraînés lors des hautes mers de vives eaux et par l'hydrodynamisme lors de la période calme (El Mimouni, 2009).

- **Secteur 3**

Cette zone correspond à la zone d'estuaire de l'oued Ksob (profils 12, 15 et 16) périodiquement submergée par les eaux du flot (Figure IV.16).

Cette zone est caractérisée par un hydrodynamisme assez compliqué matérialisé par les courants liés à la houle, les courants de marée et les courants fluviaux de l'Oued Ksob. La complexité de cette zone s'explique en partie par la morphologie générale de plage due à l'île de Mogador et à l'intensification des apports éoliens. Les flux du transport sédimentaire sont sûrement l'œuvre de l'interaction de l'ensemble de ces facteurs.

Les grains moyens des sédiments prélevés au niveau de ce secteur, varient entre 217 et 294 μm . Nous remarquons l'existence des sables fins au niveau du lit de l'oued avec une augmentation progressive de la taille des grains en se dirigeant vers le large où on trouve des sables moyens. Ceci peut être expliqué par l'action éolienne qui transporte les sables fins de la partie nord vers le sud, ces sédiments sont piégés le long du lit de l'oued, mais l'évolution progressive de la fraction moyenne vers le large peut s'expliquer par la remobilisation de ces sédiments sous des conditions hydrodynamiques assez agitées (courant de flot et jusant).

- **Secteur 4**

Ce secteur correspond à la partie sud de l'estuaire de l'oued Ksob qui s'étend du profil 16 jusqu'au profil 18 (Figure IV.16).

Les sédiments de cette zone sont caractérisés par la dominance des sables moyens dont la taille moyenne est de l'ordre de 258 μm , ce tri peut être expliqué par l'hydrodynamisme qui est assez agité dans cette zone et par la déflation et le transport des grains de petite taille par les vents vers le sud.

2.2.11. Comparaison des résultats granulométriques de 2013 avec ceux de 2005

Pour avoir une idée sur l'évolution granulométrique à moyen terme, nous avons procédé à la comparaison des résultats granulométriques de février 2013 avec ceux de février 2005. L'analyse du grain moyen, a montré généralement la même évolution granulométrique avec quelques petites différences. En effet ; la partie nord de la plage (secteur 1) est caractérisée par des sables fins pendant les deux périodes. Durant la période de février 2005, les sables moyens commencent à apparaître au niveau du haut de plage du secteur 2 et au niveau de l'estran du secteur 3 près du fort portugais, tandis que le secteur sud est caractérisé par des sables moyens au niveau du pied de la dune et des sables fins à moyens au niveau de l'estran. Par contre, pendant février 2013 les sables moyens n'apparaissent qu'au sud du secteur 2 occupant généralement la partie estran avec une augmentation progressive de la taille moyenne en allant vers le sud de l'estuaire (secteur 4).

Cette comparaison montre que la répartition granulométrique de la plage d'Essaouira, ne subi pas à des grandes changements à long terme, on peut dire que la granulométrie dans cette plage obéi à une évolution à court terme.

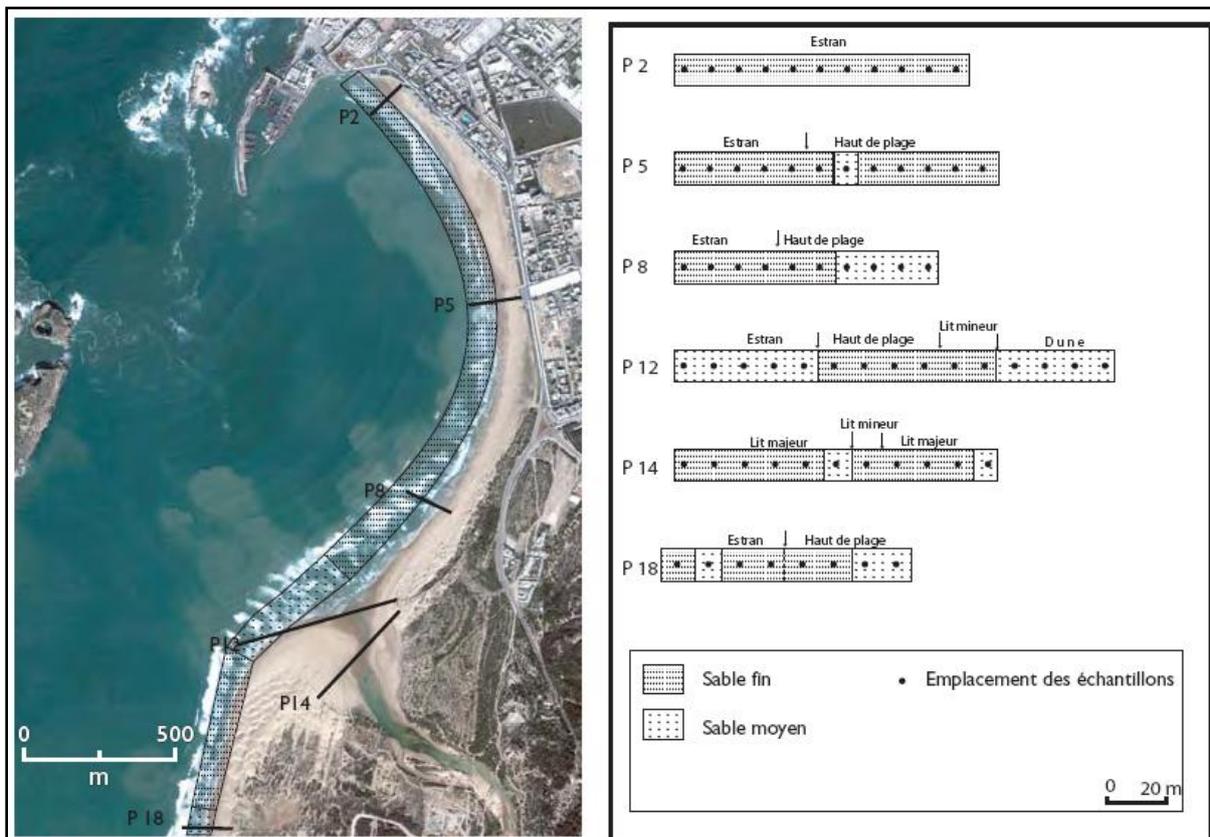


Figure IV. 17: Répartition du grain moyen sur la plage d'Essaouira (en février 2005) (El Mimouni, 2009)

2.2.12. Répartition granulométrique dans le domaine subtidale de la baie d'Essaouira

La distribution des sédiments superficiels dans la baie d'Essaouira montre deux secteurs différenciés par leur caractéristiques sédimentologiques: le centre de la baie, où le milieu sédimentaire est calme et la profondeur oscille entre - 6 et - 13 m, et qui est constitué dans sa majeure partie de sédiments fins de nature vaseuse; la zone infratidale de la plage, entourant la zone vaseuse de la baie, qui montre la prédominance d'un faciès sableux variable de taille (Figure IV.18) (El Mimouni, 2009).

La répartition des sédiments est restée quasi stable entre les années 1955 et 2005 avec de légères évolutions (El Mimouni, 2009) :

- L'extension de la zone d'argile vers le sud de la baie.
- La diminution de la zone des sables grossiers ayant occupé une superficie assez importante en 1953.

D'après l'analyse du grain moyen que nous avons fait dans la plage d'Essaouira, et celle effectuée dans la zone subtidale (baie) en 1953 et en 2005 (El Mimouni, 2009), nous remarquons qu'il y a eu une complémentarité dans la répartition des grains moyens entre le domaine subtidale et la plage (estran et haut de plage); en passant d'une zone calme où les sédiments sont très fins de nature vaseuse à une zone plus ou moins agitée avec des sédiments de taille variable (sables fins puis moyens), l'agitation est due à l'énergie hydrodynamique créée lors du déferlement des vagues s'étendant de la zone infratidale jusqu'à la ligne de pleine mer. Les sables deviennent de plus en plus fins en se dirigeant de l'estran vers le haut de plage (dunes barkhanoides), où l'action éolienne est très active.

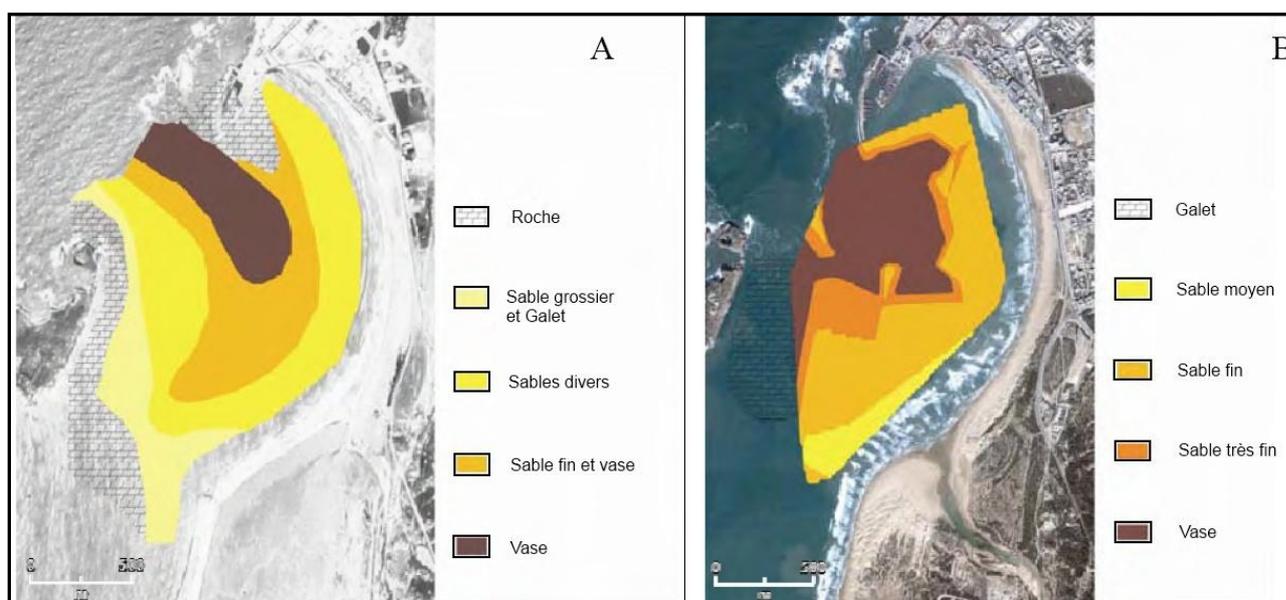


Figure IV. 18: Répartition des sédiments dans la baie d'Essaouira : A) en 1953. B) en 2005 (El Mimouni, 2009).

CONCLUSION

Les résultats obtenus de l'étude granulométrique concernant l'indice du grain moyen sur la plage d'Essaouira font état d'une dynamique sédimentaire liée généralement aux facteurs agissants sur la plage.

Le secteur 1 est caractérisé, généralement, par la présence de sables fins (214 μm) du fait qu'ils se trouvent dans une zone calme.

L'analyse du grain moyen de secteur 2, montre des sables fins au nord et des sables moyens occupant des zones étroites interdunaires, leur superficie devient plus importante en allant vers le sud où ils occupent pratiquement toute la haute plage, suite à l'accentuation de l'intensité du vent. L'alimentation de ce secteur est assurée en permanence par les sables éoliens durant les périodes de vents actifs et par les sables entraînés lors des hautes mers de vives eaux et par l'hydrodynamisme lors de la période calme.

Au niveau du secteur 3, l'analyse a montré des sables fins au niveau du lit de l'oued liés à l'accumulation des sables éoliens en provenance du nord, et des sables moyens au niveau de l'estran liés à des conditions hydrodynamiques assez agitées (courant de flot et jusant).

Au sud de l'estuaire (secteur 4), les sédiments sont généralement moyens triés sous l'action hydrodynamique assez agitée et par la déflation et le transport des grains de petite taille par les vents vers le sud.

Chapitre V

SYNTHESE
MORPHOSEDIMENTAIRE
DE LA PLAGE
D'ESSAOUIRA

INTRODUCTION

Ce chapitre a pour but de synthétiser les résultats présentés dans les chapitres précédents afin de pouvoir faire ressortir les éléments les plus caractéristiques de la morphodynamique de la plage d'Essaouira dans le contexte sédimentaire. Plusieurs points seront discutés: 1)- Fonctionnement générale de la plage d'Essaouira; (2)- Impact de la crue de oued Ksob sur la morphologie de la plage; 3)- Comparaison des résultats des études topographique et diachronique (2006 – 2013).

I. FONCTIONNEMENT GENERALE DE LA PLAGE D'ESSAOUIRA

La compilation des résultats obtenus à partir de l'étude topographique, granulométrique et diachronique du trait de côte de la plage d'Essaouira, a permis de comprendre l'évolution morphologique de la plage à court et à moyen terme.

Afin de faciliter cette compréhension, nous avons subdivisé le site d'étude en quatre secteurs ou zones morphologiques définie précédemment, chaque zone est caractérisée par une dynamique morphosédimentaire distincte, où les facteurs océaniques, climatiques, orographiques et humains jouent un rôle primordial dans cette évolution. Ces différentes méthodes d'études ont donné généralement les mêmes résultats pour les quatre secteurs :

1. Secteur 1

Ce secteur correspond à une zone calme située au nord de la plage. Elle est limitée au nord par la digue du port qui constitue un véritable dispositif de protection contre l'agitation hydrodynamique, et à l'est par la corniche et les constructions de la ville. Cette zone se trouve donc à l'abri de l'influence éolienne, dont l'effet ne commence à apparaître qu'à partir du sud de cette zone. Cette situation engendre une légère accumulation de sables fins (214 μm) sur la totalité du secteur. Par ailleurs, il est difficile de suivre l'évolution du trait de côte dans cette partie par la méthode de photo-interprétation, du fait qu'elle est limitée par la digue et l'eau de la mer atteint toujours la digue pendant la marée haute.

2. Secteur 2

Au niveau du secteur 2 (du centre de la plage à l'estuaire), l'étude topographique montre une tendance accumulative qui augmente progressivement vers le sud, alors que la taille moyenne des grains évolue en direction du sud. Ceci est lié au transport du sable qui prend une direction sud en haut de plage à partir du profil 4, où l'action éolienne commence à se sentir, puis devient de plus en plus active vers le sud. Pendant la marée basse, lors d'une température assez élevée de l'air et des vents très forts et unidirectionnels, le vent peut être à l'origine du prélèvement d'une quantité assez importante de sable à l'estran. La direction générale de ce transport éolien est vers le SSW à SW (vers la dune bordière et vers l'estuaire). La dune bordière connaît une alimentation permanente, ce qui lui assure un avancement continu vers l'estuaire, et par conséquent déplacement du lit mineur de l'oued vers le SW. Les sables accumulés au niveau du lit, seront évacués lors des crues, entraînant son déplacement vers le sens inverse, c'est-à-dire vers le NE.

3. Secteur 3

Au niveau du secteur 3 qui correspond à l'estuaire, l'interaction de plusieurs facteurs (marnage, transport éolien, dynamique fluvial, dynamique marine ...) a fait de ce dernier une zone très complexe d'un point de vue morphologique. La majeure partie des sables fins éoliens transportés sur la plage dans la partie nord de l'oued Ksob sont piégés au niveau de l'estuaire. Seuls les sables très fins transportés en suspension arrivent à rejoindre la rive sud de l'estuaire. Durant la marée haute, les eaux du flot remontent en remplissant l'estuaire, alors que durant le jusant l'estuaire se vide complètement des eaux marines, en créant un courant de retrait qui peut être très puissant. Ce courant entraîne les sables piégés dans le lit de l'oued, et les accumule au niveau de l'estran et au large. Les vents forts de la région permettent d'arracher une quantité importante de sable à l'estran (au sud de ce secteur, près du fort Portugais) pendant la marée basse, ce qui est à l'origine de la création d'une zone d'érosion sur la rive sud de l'estuaire. Ces sables sont ensuite accumulés sous forme de dunes embryonnaire. Ces dunes prennent de l'importance et subissent un déplacement rapide vers le sud.

4. Secteur 4

Au secteur 4 qui correspond à la zone sud de l'estuaire, les études ont montré que cette zone a subi une érosion permanente avec un recul du trait de côte, que se soit à court ou à moyen terme, avec une granulométrie un peu plus grossière formée généralement de sables moyens, cette évolution est liée d'une part à des conditions de forte hydrodynamisme couplée d'une dérive littorale vers le sud caractérisant l'océan atlantique marocain, et d'autre part à la fixation des dunes au niveau de la rive gauche de l'estuaire qui a débuté en 2006, ce qui engendre une accumulation d'une partie de sables, venant du nord, sur la dune, en diminuant l'alimentation de l'estran par les sables du nord, et par la suite aggraver le phénomène de déflation et transport des sables vers le sud via l'action du vent fort et unidirectionnel caractérisant la région d'Essaouira.

II. COMPARAISON DES RESULTATS DES ETUDES TOPOGRAPHIQUE ET DIACHRONIQUE (2006 – 2013)

Parmi les facteurs majeurs agissant sur la plage d'Essaouira, les apports sédimentaires de l'oued Ksob, constituent un élément principal qui alimente la plage surtout la partie qui se trouve au nord de l'estuaire (secteur 1, 2 et 3), du fait qu'après la crue du 20 mars 2013, nous avons enregistré une importante accumulation de sédiments dont le taux augmente avec le temps le long de la partie nord. Ceci semble être lié à la faible vitesse qui contrôle la distribution des sédiments sur les différentes parties de la plage (trois mois après la crue). Par contre la zone sud de l'estuaire (secteur 4) n'est pas influencée par cette crue, car elle est en érosion permanente.

L'analyse morphologique des levés topographiques réalisés par tachéométrie, l'une des méthodes fiables, du fait qu'elle a une faible marge d'erreur (chapitre I) et les mesures sont prises sur le terrain dans des périodes précises dont nous connaissons leurs conditions hydrodynamique, aérodynamique...

Par contre, l'étude de l'évolution du trait de côte basée sur les photo-interprétations, présente une marge d'erreur supérieure à celle de la première et dont on ne connaît pas les dates exactes et les conditions météorologiques de toutes les prises de vues utilisées, ainsi que le changement spatial et temporel de la pente, comme nous l'avons précédemment mentionné (chapitre IV).

Durant la période de mai 2006 à la fin 2012, l'étude de l'évolution du trait de côte d'Essaouira basée sur une analyse diachronique, a permis la quantification de cette évolution. Il en ressort que : 1) - les taux d'érosion et d'engraissement ont varié durant cette période. La totalité de la plage a subi un démaigrissement du trait de côte, qui est de l'ordre de $(8,80 \pm 5,19 \text{ m/an})$ au niveau de la partie centrale (zone de divergence) et de $(6,02 \pm 1,4 \text{ m/an})$ au niveau de l'estuaire et de $(8,80 \pm 5,19 \text{ m/an})$ dans la partie sud qui s'étend de la rive gauche vers le sud. 2) - Un déplacement du lit mineur de l'oued vers le SW, avec un taux de déplacement de $29,66 \pm 5,19 \text{ m/an}$. Par contre durant la période allant de mai 2006 à mai 2013, l'étude topographique a montré généralement une accumulation sur la totalité de la plage, à l'exception de la partie sud qui est en érosion.

Nous remarquons, que les deux méthodes donnent les mêmes résultats concernant l'évolution du trait de côte dans la partie sud de l'estuaire qui est toujours en érosion, ainsi que pour le déplacement du lit mineur de l'oued ksob qui s'effectue vers le SW, et, des résultats différents dans les autres parties de la plage, où on note des modifications très rapides même à court terme d'un mois à l'autre (chapitre II), cette différence est probablement due à ces modifications ; en effet, les études à travers ces deux méthodes n'ont pas concerné exactement la même période, lors de ce décalage on peut avoir une accumulation ou une érosion selon les facteurs dominants, par ailleurs, nous avons enregistré une accumulation sur la totalité de la baie après la dernière crue de 20 mars 2013.

Conclusion générale

Au terme de ce travail, les différentes approches utilisées, à moyen et court terme, ont permis de mieux comprendre la morphodynamique de la plage anthropisée d'Essaouira et d'en ressortir les principales caractéristiques.

L'étude à moyen terme basée sur l'analyse diachronique de photographies aériennes de la période de mai 2006 à la fin 2012, et de l'analyse des levés topographiques entre mai 2006 et mai 2013, permet d'obtenir les mêmes résultats. Dans la partie Sud, elles attestent de l'évolution du trait de côte de l'estuaire qui est en érosion permanente, ainsi que pour le déplacement du lit mineur de l'oued ksob qui s'effectue vers le SW. La partie Nord de l'estuaire est caractérisée par des variations très rapides aussi bien dans un contexte spatial que temporel.

L'analyse mensuelle des différents profils transversaux permet d'analyser les variations morphologiques de l'estran en fonction des conditions météorologiques, mais la complexité morphologique de la plage fait que chaque zone réagit différemment, avec une morphologie instable d'un mois à l'autre. Cependant, alors que certaines zones de la plage connaissent un déficit de sable (zone en érosion), d'autres connaissent un excédent (zone en accrétion). Les relevés topographiques effectués durant les premiers mois qui ont suivi la crue de 20 mars 2013 montrent une accrétion sur la totalité de la partie Nord de l'estuaire de l'oued Ksob.

La granulométrie des sédiments de la plage d'Essaouira a montré que la distribution granulométrique spatiale est due à l'emplacement des sédiments, à l'hydrodynamique marine et/ou fluviale et à la dynamique éolienne. Les résultats de l'étude granulométrique obtenus sur la plage d'Essaouira sont généralement caractérisés par la présence de sables fins au Nord et au niveau du champ dunaire et au niveau du lit de l'oued Ksob, des sables moyens n'apparaissant qu'au niveau des zones interdunaires et du haut d'estran du secteur 2. L'analyse du grain moyen à moyen terme, ne montre aucune évolution marquée dans la répartition granulométrique, ce qui indique que la granulométrie de la plage d'Essaouira obéit à une évolution à court terme.

L'analyse des résultats des différentes méthodes utilisées dans ce travail, a montré que la plage d'Essaouira constitue une zone très complexe, dont l'évolution morphologique est régie

par plusieurs facteurs (hydrodynamiques, aérodynamiques, ile de Mogador, estuaire, baie ...), ces facteurs agissent à court terme dans la partie Nord de l'estuaire, et non pas à long terme, du fait que la plage peut subir de grandes variations morphologiques perceptibles à court terme, par contre la partie Sud de l'estuaire est dominée par une évolution morphologique à long terme, car elle est caractérisée par une érosion permanente.

Au terme de cette étude, on pourra considérer que les crues de l'oued Ksob constituent la principale source qui alimente la baie d'Essaouira par les apports sédimentaires. Le projet de construction du barrage Zerrar à une trentaine de kilomètres de la plage va, en permanence, affaiblir l'alimentation de ce dernier en sédiments. Ce qui provoquera une érosion continue induisant à moyen ou à long terme la disparition des sédiments de la plage.

Références bibliographiques

- **Akouango, E. et Barusseau, J.P. (1994).** Dynamique sédimentaire d'une côte à barres : cas de la côte sableuse du Languedoc-Roussillon. session II : Dynamique sédimentaire et transports particuliers, pp.147-154.
- **Bahir, M., Mennani, A., Jalal, M. Et Youbi, N. (2000).** Ressources hydriques du bassin synclinal d'Essaouira (Maroc). Estudios Geol., 56: pp. 185-195.
- **Baiddah, A., Saidi M. E., Daoudi L., El Mimouni A. et Smaij Z. (2012).** Typologie des crues en zone montagneuse, océanique et semi aride. le cas du bassin versant du Ksob (haut atlas occidental, Maroc). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 11, pp. 79-96.
- **Brabant, M. (2000).** Maîtriser la topographie, des observations au plan, Eyrolles.
- **Bazairi, H., Harmelin, J. G., Turpin, Y., et Aghor, A. (2010).** Caractérisation des peuplements marins de l'archipel de Mogador (Atlantique, Maroc). Mission PIM 28p.
- **Bensaid, A. (2006).** SIG et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride : le cas de la wilaya de Naâma (ALGÉRIE). Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier-Grenoble 1.318p.
- **Bertier, J. (2009).** Analyse multi-échelle de la morphodynamique d'une plage artificielle, avant-port ouest de dunkerque (nord de la France). Thèse de doctorat de géographie physique, dunkerque, 315p.
- **Bonnot, C., Bassoullet, P., Lehir, P., Tessier, B., Cayocca, F. et Baltzer, A. (2006).** Evolution et mobilité des sédiments superficiels de l'estran occidental de la baie du Mont Saint-Michel. IXèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Brest, pp. 137-144.
- **Bretel, P. & Levoy, F. (2002).** Quantification théorique des transports éoliens en milieu littoral à court terme: les limites pour une intégration à moyen terme. VIèmes Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier, Anglet, France, pp.213-220.
- **Chahboun, A (1988).** Les formations sableuses fluviales; littorals et éoliennes aux embouchures des oueds Tensift, Ksob et Sous (Maroc). Thèse, Paris VI, 187 p.
- **Chaibi, M. (2003).** Dynamique sédimentaire et Morphogenèse actuelle du littoral d'El Jadida (Maroc). Thèse du doctorat, AIX-Marseille I, 235 p.
- **Davies J. L. (1964).** A morphogenic approach to word shorelines. Zeischrift für geomorphology, Mortensen Senderhelf, Vol. 8, pp. 127-444.
- **Desmazes, F. (2005).** Caractérisation des barres sableuses d'une plage de la côte aquitaine. exemple de la plage du truc vert. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, Ecole Doctorale Sciences du Vivant, Géosciences, Sciences de l'Environnement, 299 p.

- **Desmazes, F., Michel, D., Garland T., et Howa, H. (2004).** Caractérisation d'une barre sableuse de haut de plage: la berme de la plage du Truc Vert, Gironde. VIIIèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne, pp. 349-355.
- **El Abdellaoui, J. et Ozer, A.(2007).** Étude diachronique et historique de l'évolution du trait de côte de la baie de Tanger (Maroc). Revue Télédétection, vol. 7, n° 1-2-3-4, pp. 157-171.
- **El Mimouni, A. et Daoudi, L. (2012).** Evolution à moyen terme du contexte hydrodynamique et morphosédimentaire la baie d'Essaouira (Maroc atlantique). XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil Cherbourg. Editions Paralia CFL, pp.273-280.
- **El Mimouni, A., Daoudi, L., Saidi, M. E. et Baiddah, A. (2010).** Comportement hydrologique et dynamique d'un bassin versant en milieu semi-aride: exemple du bassin versant du ksob (haut atlas occidental, MAROC). Rev. C&G, 24 (1-2).14p.
- **Erimesco, P. (1969).** Observations sur l'hydrologie du plateau continental Atlantique du Maroc. (2ème note). Bulle. ESPM. Maroc, 17 : 3-10.
- **Faye, I. et al. (2008).** Évolution du trait de côte à Nouakchott (Mauritanie) de 1954 à 2005 par photo-interprétation. Norois, n° 208, 2008/3, p. 11-27.
- **Fichaut, B., Suanez, S. et Prigent, M. (2008).** Suivi morpho-sédimentaire de la plage de Sainte-Anne-du-Portzic (communes de Brest et Plouzane) dans le cadre des Operations de Réhabilitation. GEOMER – UMR LETG 6554 CNRS.24p.
- **Gentile, W. (1997).** Caractérisation et suivi d'un champ dunaire par analyses sédimentologiques et télédétection (Essaouira-Cap Sim, Maroc Atlantique). Thèse Université de Provence – Aix-Marseille I, 307 p.
- **Grasso, F., Barthelemy, E., Certain, R. et Michallet, H. (2008).** Etudes expérimentales des profils cross-shore de plages sableuses. Xèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Sophia Antipolis, pp. 91-100.
- **Grenier A., Dubois J.M.M. (1990).** Évolution littorale récente par télédétection : synthèse méthodologique. Photo-interprétation, n° 1990/6, pp 3-16.
- **Grunnet, N. et Chevalier, C. (2006).** Etude hydrosédimentaire des plages de Morgat. IXèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Brest, pp. 221-230.
- **Hander M. (1993).** Contribution à l'étude de la bioclimatologie humaine au Maroc : l'exemple d'Essaouira, Thèse de Doctorat, Paris-IV, 356 p.
- **Héquette, A. & Hill, P. R. (1993).** Storm-generated currents and offshore sediment transport on a sandy shoreface, Tibjak Beach, Canadian Beaufort Sea. Marine Geology, 113, pp. 283-304.
- **Horn, D. P. (1993).** Sediment dynamics on a macrotidal beach : Isle of Man. Journal of Coastal Research, Vol. 9(1), pp. 189-208.
- **Huntley, D. A. & Short, A. D. (1992).** On the spacing between observed rip currents. Coastal Engineering, Vol. 11, pp. 211-225.

- **Komar, P. D. (1998).** Beach processes and sedimentation. (2^{ème} edition). Prentice-Hall, New Jersey, 545 p.
- **Lambert A. (2006).** Protection durable du littoral Varois : fonctionnement hydrosédimentaire de plages microtidales équipées de systèmes de drainage. Thèse, Université Aix-Marseille I, 377 p.
- **Laouina, A. (2006).** Le littoral marocain, milieux côtier et marin. pp.187-216.
- **Laville, E. & Harmand, C. (1982).** Évolution magmatique et tectonique du bassin intracontinental mésozoïque du Haut Atlas (Maroc) : un modèle de mise en place synsédimentaire de massifs anorogéniques liés à des décrochements, Bull. Soc. geol. France 24, pp. 213–227.
- **Lharti, S. (2009).** Morfología y sedimentología del cordón dunar artificial de la costa de Essaouira (Marruecos atlántico) : impacto ambiental sobre el tránsito arenoso longitudinal. Thèse de doctorat, Facultad de Geología de la Universidad de Oviedo. 275 p
- **Lharti, S., Flor, G., Daoudi, L., Flor, G. B., El Mimouni, A. & Ben Ali, A. (2006).** Morfología y Sedimentología del complejo playa/dunas costeras de Essaouira (Marruecos atlántico) : modelo de transporte costero. Actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología, Santiago de Compostela (A. Pérez Alberti y J. López Bedoya, ed.), pp. 401-417.
- **Louati, M. et Zargouni, F. (2009).** Modélisation topo-bathymétrique et transit sédimentaire. Exemple des plages sableuses de la baie de Tunis, Nord-Est de la Tunisie. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 2009, n° 3, p. 211-222.
- **Maanan, M. (2003).** Etude sédimentologie du remplissage de la lagune de Sidi Moussa (côte atlantique marocaine) Caractérisations granulométrique, minéralogique et géochimique. Thèse de Doctorat en Géologie, Universités Chouaib Doukkali, Faculté des sciences - El Jadida.131p.
- **Masselink, G. & Short, A. D. (1993).** The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology : a conceptual beach model. Journal of Coastal Research, Vol. 9, 785-800.
- **Mhammdi, N., Achab, M., Hamoumi, N. et Azza, A., (2005).** Les sables titanifères du littoral d’Azemmour et de l’estuaire de l’Oum Er-Rbia (côte atlantique marocaine) : sédimentologie et potentiel d’exploitation. Bulletin de l’Institut Scientifique, section Sciences de la Terre, 2005, n°27, pp. 83-91.
- **Minoubi, A., Chaibi, M., Poizot, E., Ayt Ougougdal, M., Mear, Y. et Zourarah, B. (2012).** Variabilité spatio-temporelle du tarit de côte : plage de Souira Qdima (littoral atlantique marocain). XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Cherbourg. Editions Paralia CFL. Pp.339-346.
- **N’guessan, Y.A., Wognin, V., Coulibaly, A., Monde, S., Wango, T.E., Aka K. (2011).** Analyse granulométrique et environnement de dépôts des sables superficiels de la lagune Adjin (Côte d’Ivoire). Revue Paralia, Vol. 4, pp 6.1–6.14.

- **Pons, F., Sabatier, F., Tanguy J.M. et Lambert, A. (2002).** Morphodynamiques des dunes sous l'effet du vent: approches expérimentales et numériques. VIèmes Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier, Anglet, France. Pp.187-194.
- **Robbe, D. et Roger, B. (1987).** Granulométrie des éléments fins par diffraction laser Présentation et évaluation de la méthode. Bull, liaison Labo P. et Ch. - 148 - mars-avril 1987 - Réf. 31 53.pp.13-23.
- **Robin M. (2002).** Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique. Le littoral regards, pratiques et savoirs. Edition Ens, pp 95-116.
- **Saidi, H., Brahim, M., et Gueddari, M. (2004).** Caractérisation granulométrique et minéralogique des sédiments de surface de la frange littorale sidi Bou Said - la goulette. Bull. Inst. Natn. Scien. Tech. Mer de Salammbô, Vol. 31. pp.97-106.
- **Short, A. D. (1985).** Rip-current type, spacing and persistence, Narrabeen beach, Australia. Marine Geology, Vol. 65, pp. 47-71.
- **Simone, C. (2000).** Le géosystème dunaire anthropisé d'Essaouira-est (Maroc atlantique) dynamique et paléoenvironnements .thèse de doctorat de l'Universités Aix-Marseille I.199p.
- **Stafford D. B., Langfelder J., (1971).** Air photo survey of coastal erosion, Photogrammetric Engi-neering, vol. 37, p. 565-575.
- **Stepanian, A. (2002).** Évolution morphodynamique dune plage macrotidale a barres : Omaha beach (Normandie). Thèse de Doctorat de l'Université de Caen. 276 p.
- **Svendsen, I. A. (1984b).** Mass flux and undertow in the surf zone. Coastal Engineering, Vol. 8, pp. 347-365.
- **Thieler E.R., Danforth W.W. (1994).** Historical shoreline mapping (I): improving techniques and reducing positioning errors. Journal of Coastal Research, Vol. 10, 3, pp 549-563.
- **Thomas Y.-F., Diaw A. T., (1997).** Suivi (1984-1993) de la rupture de la fêche de Sangomar, estuaire du Saloum, Sénégal, Photo-Interprétation, n° 3-4, p. 199-204.
- **Van Rijn, L. C. (1998).** Principles of coastal morphology. Aqua Publications, Amsterdam, 730 p.
- **Weisrock, A. (1980).** Géomorphologie et paléo-environnements de l'Atlas atlantique (Maroc). Thèse d'état, Paris I, 931 p.
- **Weisrock, A. (1982).** Signification paléoclimatique des dunes littorales d'Essaouira – Cap Sim (Maroc), Revue de Géomorphologie Dynamique, T. XXXI, p. 91-107.
- **Wright, L. D., Nielsen, P., Short, A. D. & Green, M. O. (1982).** Morphodynamics of a macrotidal beach. Marine Geology, Vol. 50, pp. 97-128.
- **Sites Web:** - <http://www.windguru.com>
- <http://www.shom.fr>

Liste des figures

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

Figure I. 1 : Situation géographique de la zone d'étude (source : Google earth)	10
Figure I. 2 : Principales étapes de l'évolution du port d'Essaouira.	12
Figure I. 3 : Evolution des travaux de fixation des dunes littorales d'Essaouira, d'après le service forestier d'Essaouira, in Balm (1993).....	13
Figure I. 4 : Méthodes de fixation des dunes littorales à Essaouira.	14
Figure I. 5 : Plan et positionnement du projet Mogador.....	16
Figure I. 6 : les affleurements locaux de la région d'Essaouira (d'après la carte géologique à la 500000ème feuille de Marrakech).....	18
Figure I. 7 : Morphologie littorale de la région d'Essaouira (Hourmèche, 1988)	19
Figure I. 8 : Températures et précipitations calculées sur une période de 30 ans à Essaouira (marocmeteo.ma).	22
Figure I. 9 : Variations mensuelles du vent dans la région d'Essaouira (El Mimouni, 2009).....	23
Figure I. 10 : Rose générale du vent dans la région d'Essaouira (El Mimouni, 2009).....	24
Figure I. 11 : Le réseau hydrographique du bassin du Ksob (El Mimouni, 2009).....	25
Figure I. 12 : Illustration des paramètres de la houle.....	28
Figure I. 13 : Forçages du milieu côtier : différents types de courant de la zone littorale.....	29
Figure I. 14 : Zonation littorale : Transformation des vagues à l'approche de la côte.....	30
Figure I. 15 : Réfraction de la houle dans la baie d'Essaouira (Google Earth 2009).....	31
Figure I. 16 : Processus hydrodynamique dans la zone côtière (Stepanian, 2002)	31

Chapitre II : Etude diachronique du trait de côte

Figure II. 1 : Exemples des lignes de référence sur la baie d'Essaouira (source : Google earth).....	37
Figure II. 2 : Subdivisions de la zone d'étude en 3 secteur (source : Google earth).....	41
Figure II. 3 : Evolution du trait de côte au niveau du secteur 1 (source : Google earth).....	42
Figure II. 4 : Débits de l'oued Ksob à la station d'Adamna (Source: A.B.H.T in El Mimouni et al, 2010).	43
Figure II. 5 : Photos prises à l'embouchure de l'oued Ksob lors de la crue de Novembre 2005(El Mimouni, 2009).....	44
Figure II. 6 : Evolution du trait de côte au niveau du secteur 2 (source : Google earth).....	45
Figure II. 7 : Evolution du trait de côte du secteur 3(source : Google earth)	47
Figure II. 8 : Fixation des dunes opérée au niveau de la rive gauche de l'oued Ksob en 2006 (source : Google earth).....	48

Chapitre III : Etude morphologique de la plage d'Essaouira

Figure III. 1 : Principe du théodolite.....	52
Figure III. 2 : Principe du distancemètre.	52
Figure III. 3 : Illustration des décalages angulaires du tachéomètre (d'après Dupont, 2004 in El Mimouni, 2009).....	55
Figure III. 4 : Illustration des erreurs instrumentales du tachéomètre (Karl Zeiske, 2000).....	56
Figure III. 5 : Localisation des levés topographiques et des secteurs d'étude	58
Figure III. 6 : Profil type et zonation transversale de la plage d'Essaouira en fonction des niveaux de marée (El Mimouni, 2009).....	58
Figure III. 7 : Variations topographiques et volumétriques du profil 1 entre juin 2006 et mai 2013.....	59
Figure III. 8 : Variations topographiques et volumétriques du profil 2 entre juin 2006 et mai 2013.....	59
Figure III. 9 : Variations topographiques et volumétriques du profil 3 entre juin 2006 et mai 2013.....	60

Figure III. 10: Variations topographiques et volumétriques du profil 1.....	61
Figure III. 11: Variations topographiques et volumétriques du profil 4 entre juin 2006 et mai 2013.....	62
Figure III. 12: Variations topographiques et volumétriques du profil 6 entre juin 2006 et mai 2013.....	62
Figure III. 13: Variations topographiques et volumétriques du profil 8 entre juin 2006 et mai 2013.....	63
Figure III. 14: Variations topographiques et volumétriques du profil 10 entre juin 2006 et mai 2013.....	63
Figure III. 15: Variations topographiques et volumétriques du profil 11 entre juin 2006 et mai 2013.....	63
Figure III. 16: Variations topographiques et volumétriques du profil 12 entre juin 2006 et mai 2013.....	65
Figure III. 17: Variations topographiques et volumétriques du profil 13-1 entre juin 2006 et mai 2013.	65
Figure III. 18: Variations topographiques et volumétriques du profil 13-0 entre juin 2006 et mai 2013.	66
Figure III. 19: Variations topographiques et volumétriques du profil 13-2 entre juin 2006 et mai 2013.	66
Figure III. 20: Variations topographiques et volumétriques du profil 14 entre juin 2006 et mai 2013.....	66
Figure III. 21: Variations topographiques et volumétriques du profil 15 entre juin 2006 et mai 2013.....	67
Figure III. 22: Variations topographiques et volumétriques du profil 16 entre juin 2006 et mai 2013.....	68
Figure III. 23: Variations topographiques et volumétriques du profil 17 entre juin 2006 et mai 2013.....	68
Figure III. 24: Variations topographiques et volumétriques du profil 18 entre juin 2006 et mai 2013.....	69
Figure III. 25 : MNT différentiel de la partie nord de la plage d'Essaouira entre mars et mai 2013.	72
Figure III. 26: MNT différentiel de la partie centrale de la plage d'Essaouira entre mars et mai 2013.....	73
Figure III. 27: Photos prises au niveau de la plage d'Essaouira	74

Chapitre IV : Etude granulométrique des sables

Figure IV. 1: Photo du Granulomètre laser de type HORIBA LA-300	78
Figure IV. 2: Schéma détaillé du Granulomètre LA-300.....	78
Figure IV. 3: Principe de diffraction et de diffusion de la lumière par une particule.....	79
Figure IV. 4: Courbes de fréquence illustrant la relation entre le mode, la médiane et la moyenne et la différence entre une courbe normale symétrique et une courbe de fréquence asymétrique.....	83
Figure IV. 5: Localisation des profils de prélèvement des échantillons (source : Google earth).....	84
Figure IV. 6: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 1.....	85
Figure IV. 7: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 4.....	86
Figure IV. 8: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 6.....	86
Figure IV. 9: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 10.....	86
Figure IV. 10: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 12.....	87
Figure IV. 11: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 13.....	87
Figure IV. 12: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 15.....	87
Figure IV. 13: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 16.....	88
Figure IV. 14: Courbes de fréquences des échantillons prélevés le long du profil 18.....	88
Figure IV. 15: Répartition transversale du grain moyen sur la plage d'Essaouira en février 2013.....	89
Figure IV. 16: Répartition spatiale du grain moyen sur la plage d'Essaouira en février 2013.....	92
Figure IV. 17: Répartition du grain moyen sur la plage d'Essaouira (en février 2005) (El Mimouni, 2009)	94
Figure IV. 18: Répartition des sédiments dans la baie d'Essaouira : A) en 1953. B) en 2005 (El Mimouni, 2009).	95

Liste des tableaux

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

Tableau I. 1: Types de marées en fonction du Coefficient (Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM)).....	26
--	----

Chapitre II : Etude diachronique du trait de côte

Tableau II. 1: Erreurs liées à la variation du niveau de la mer.....	40
Tableau II. 2: Evolution du trait de côte entre 1990 et 2006 et entre 2006 et 2012, au niveau du secteur 1.....	43
Tableau II. 3: Taux d'érosion entre les années 1990 et 2006, au niveau du secteur 2.....	45
Tableau II. 4: Taux de déplacement du lit mineur au niveau de l'embouchure de l'oued Ksob entre 1990 et 2012, au niveau du secteur 2.....	46
Tableau II. 5: Taux d'érosion entre les années 1990 et 2006, au niveau du secteur 3.....	47

Chapitre III : Etude morphologique de la plage d'Essaouira

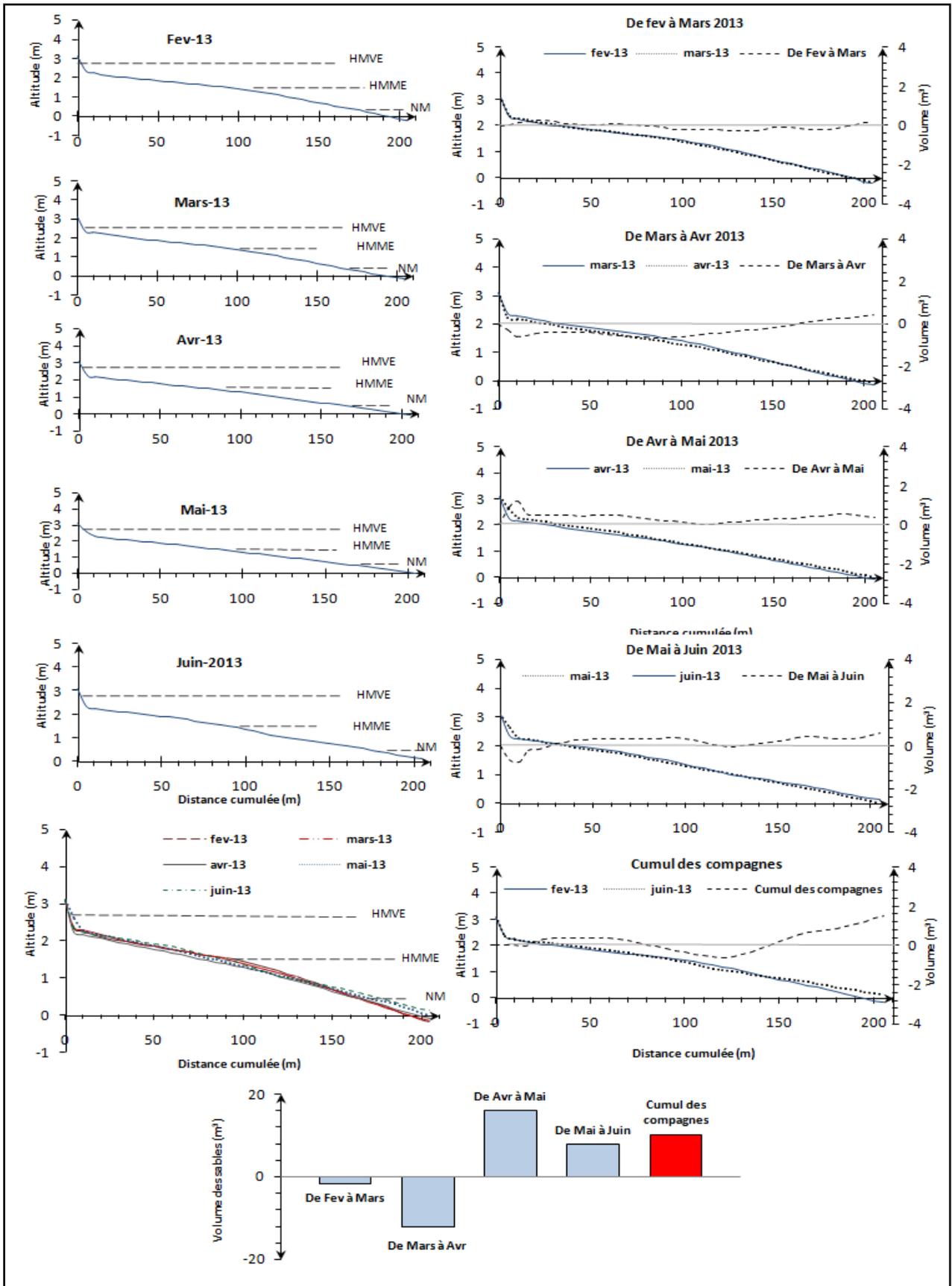
Tableau III. 1: Répartition spatiale des campagnes de mesure topographique.....	57
Tableau III. 2: Différentiels du volume entre les missions de la période suivi au niveau du secteur 1.....	60
Tableau III. 3: Différentiels du volume entre les missions de la période suivi au niveau du secteur 2.....	64
Tableau III. 4: Différentiels du volume entre les missions de la période suivi au niveau du secteur 3.....	67
Tableau III. 5: Différentiels du volume entre les missions de la période suivi au niveau du secteur 4.....	69

Chapitre IV : Etude granulométrique des sables

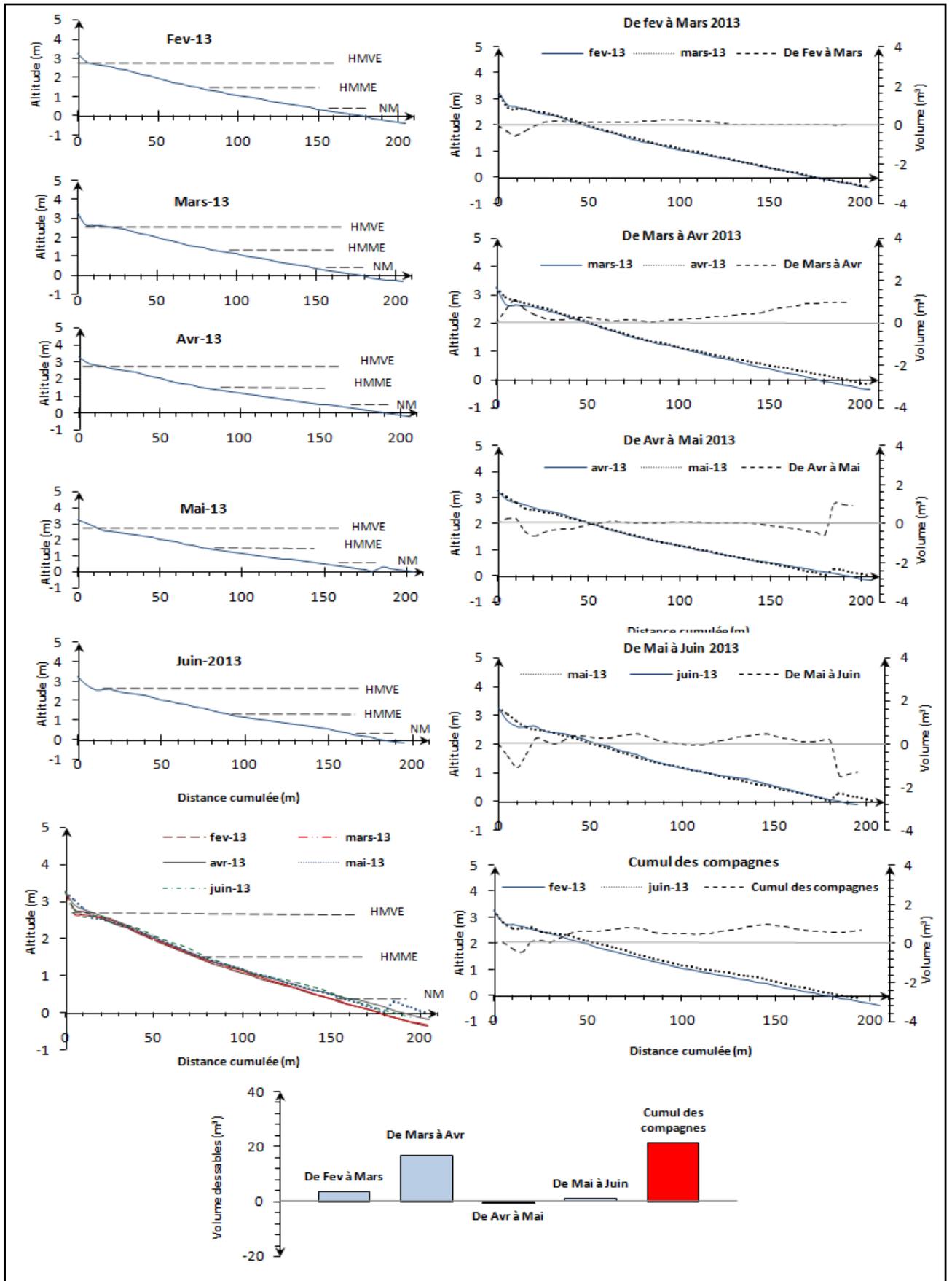
Tableau IV. 1: Classification dimensionnelle des sédiments détritiques en mm et en μm et leur équivalent dans l'échelle de Phi (Belmedrek, 2006).....	80
Tableau IV. 2: Terminologie du sorting index (σ) définie par Folk et Ward (1957).....	81
Tableau IV. 3: Terminologie du sorting index (σ) définie par Folk et Ward (1957).....	82

ANNEXES

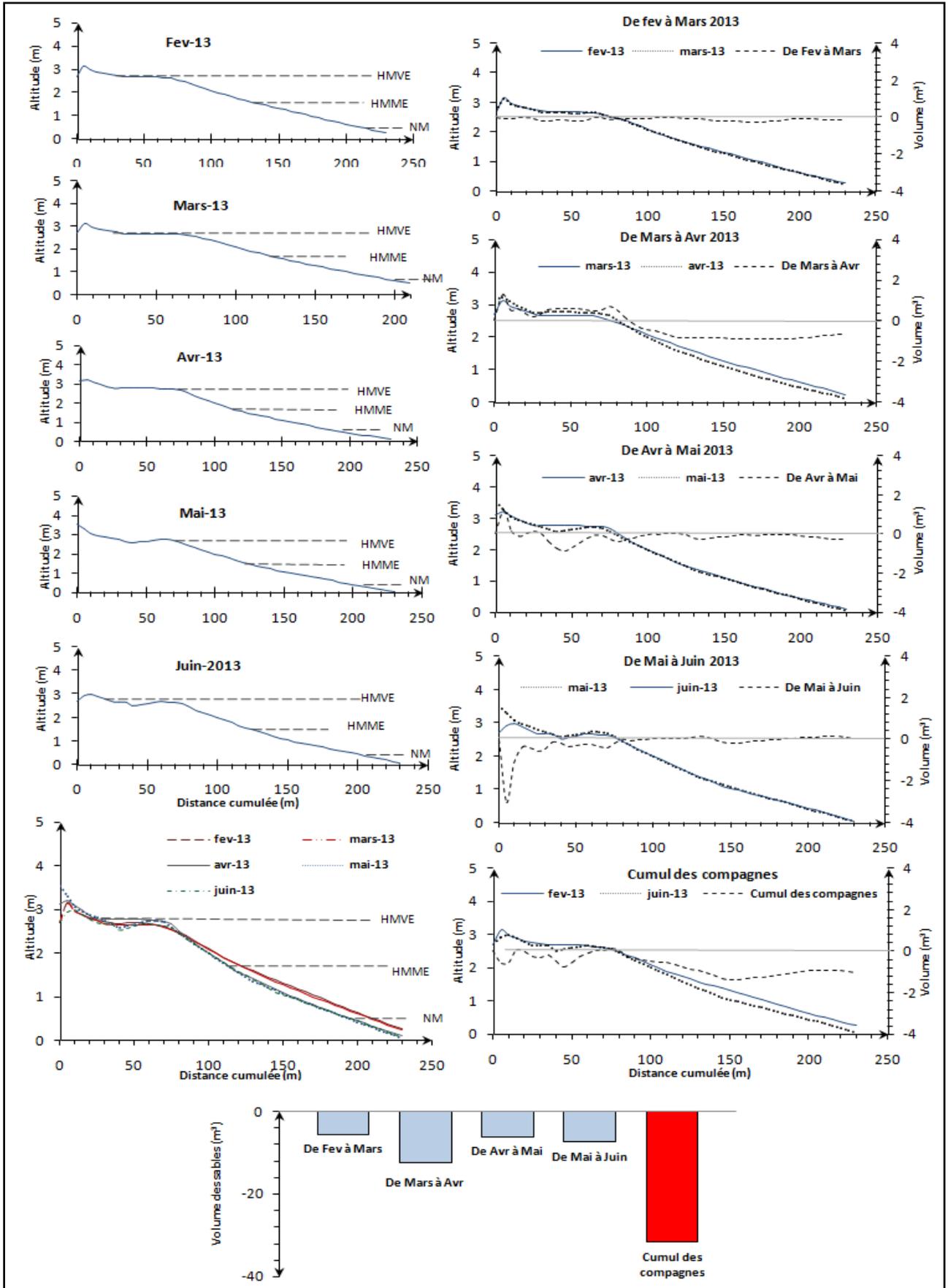
Annexe 1: Variations topographiques et volumétriques du profil 2



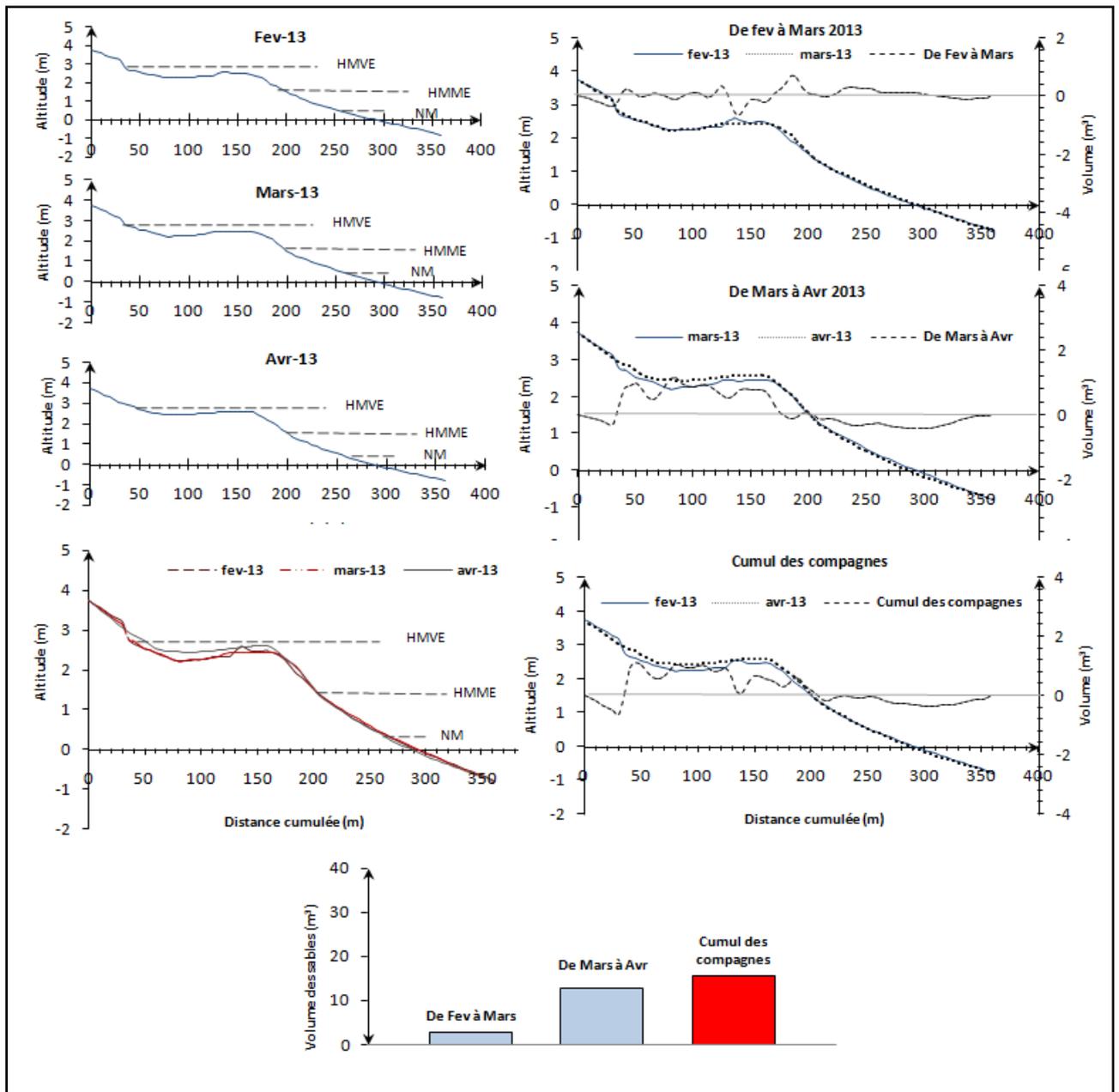
Annexe 2: Variations topographiques et volumétriques du profil 3



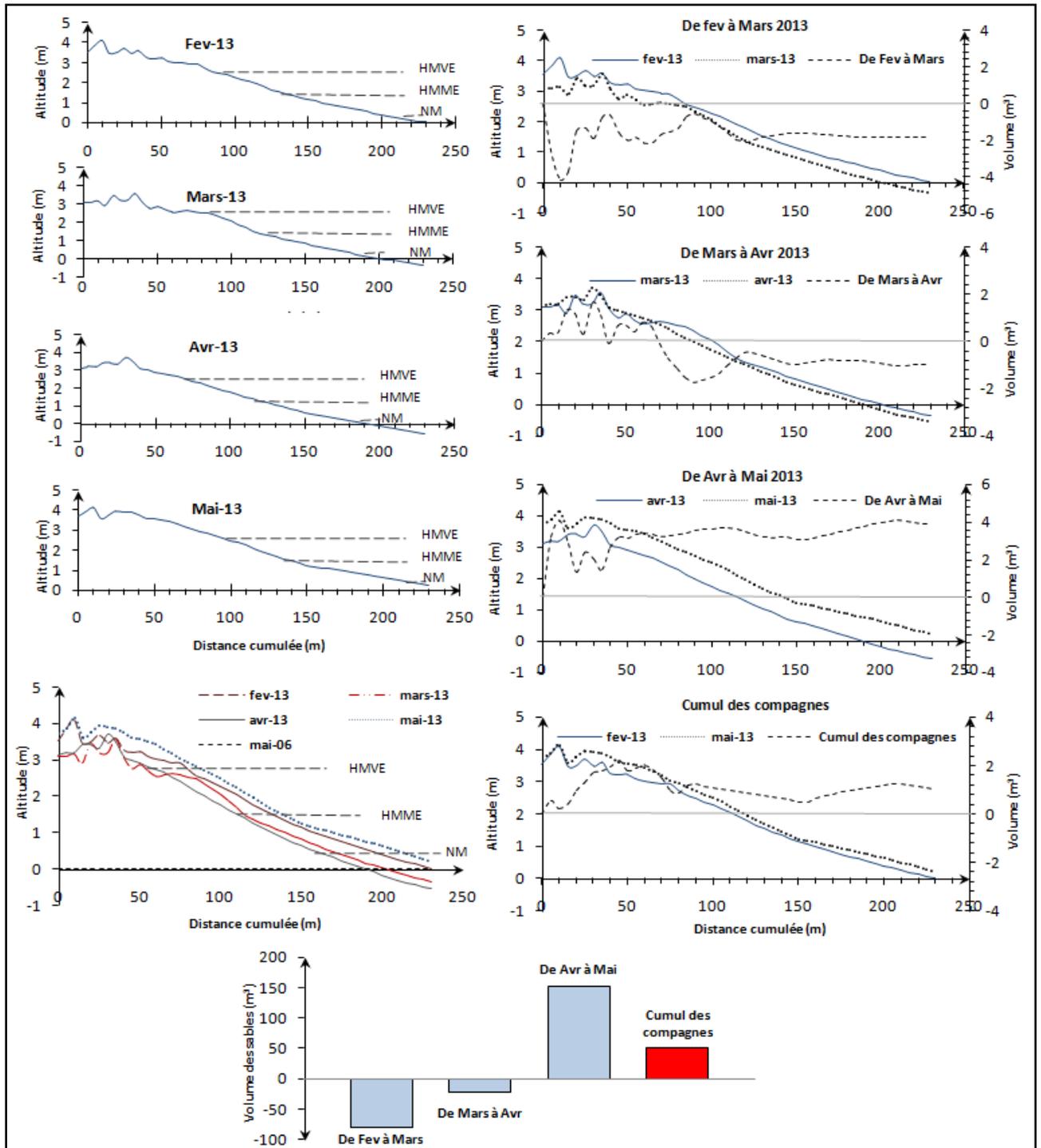
Annexe 3: Variations topographiques et volumétriques du profil 4



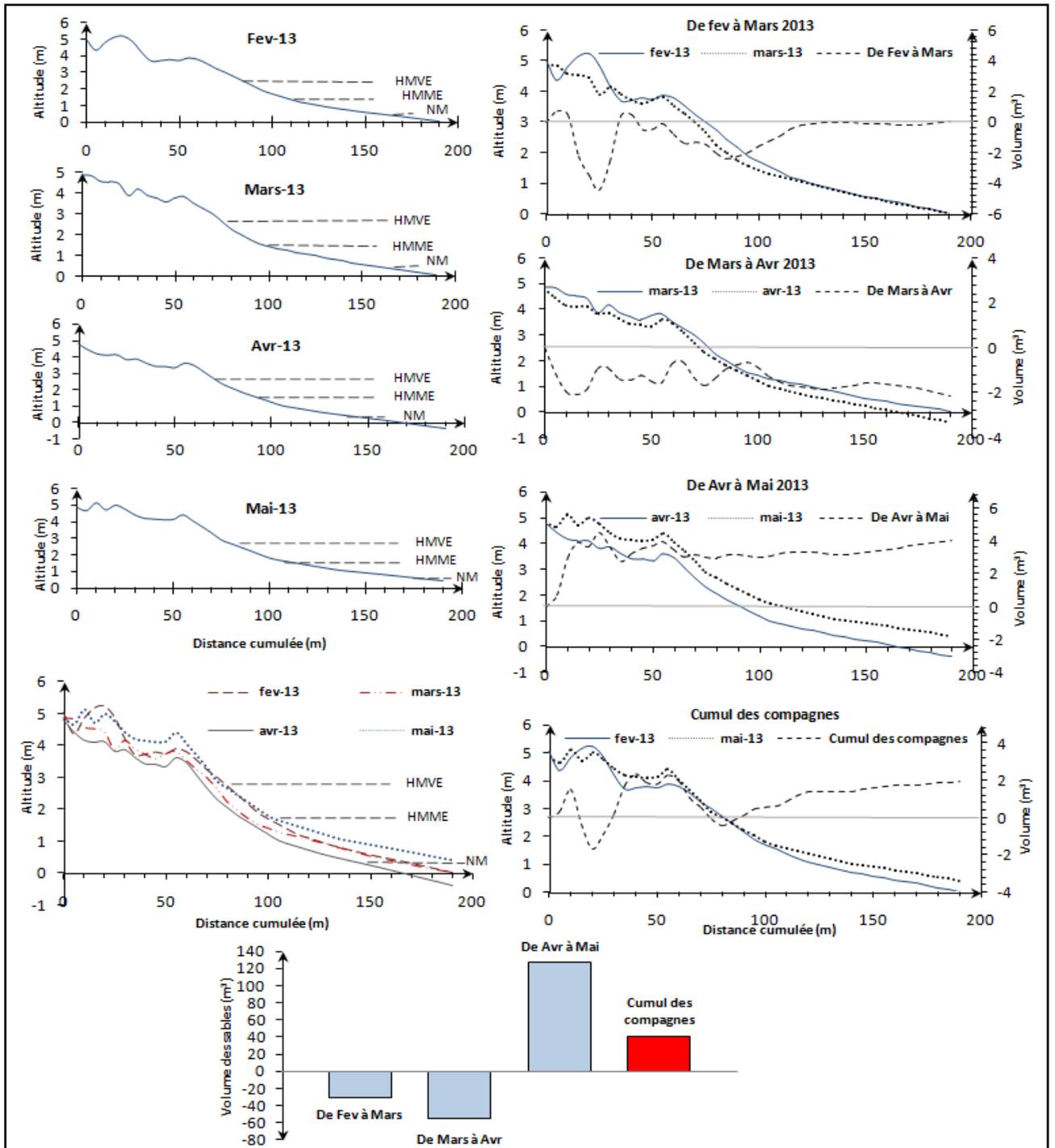
Annexe 4: Variations topographiques et volumétriques du profil 6



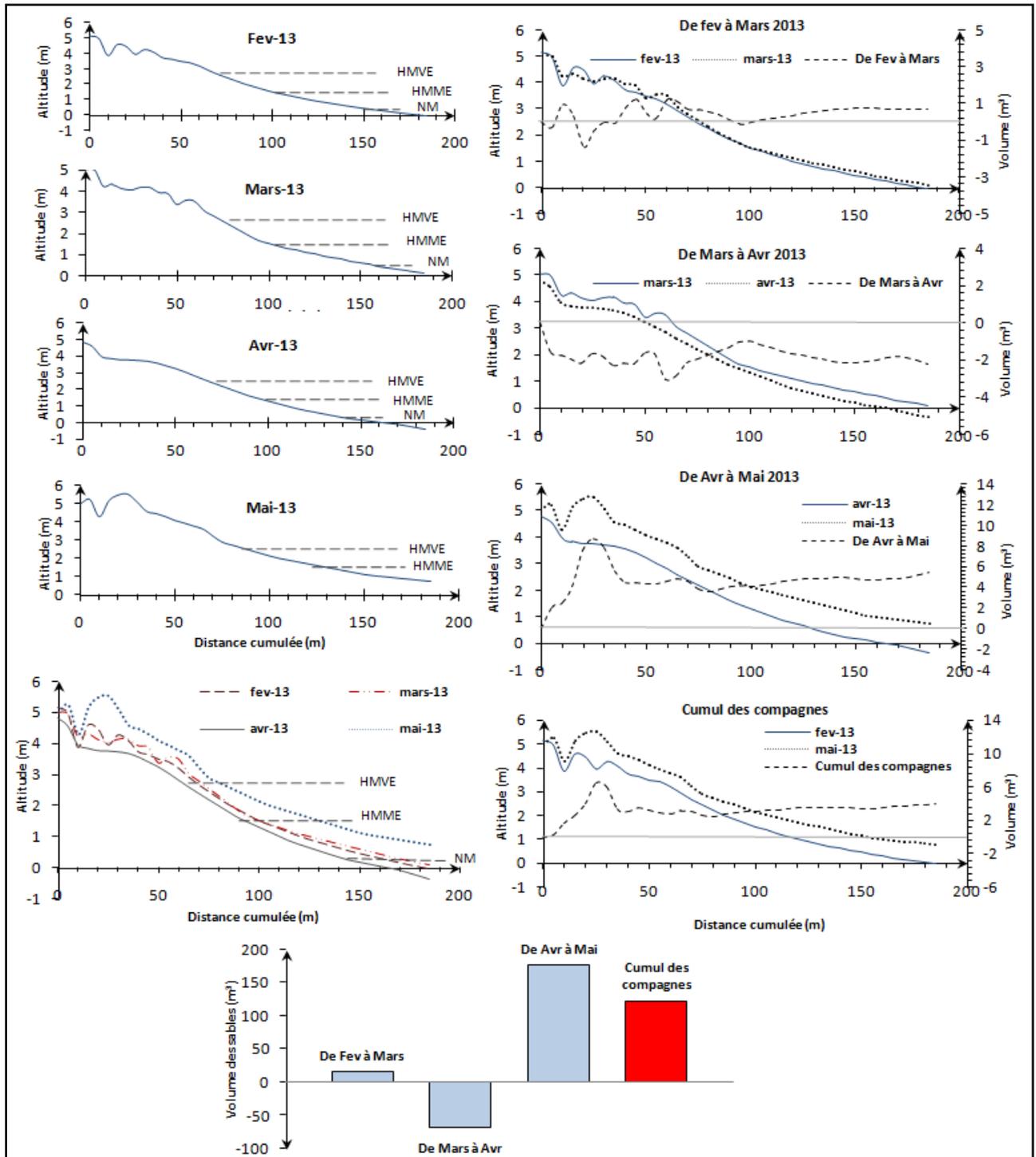
Annexe 5: Variations topographiques et volumétriques du profil 8



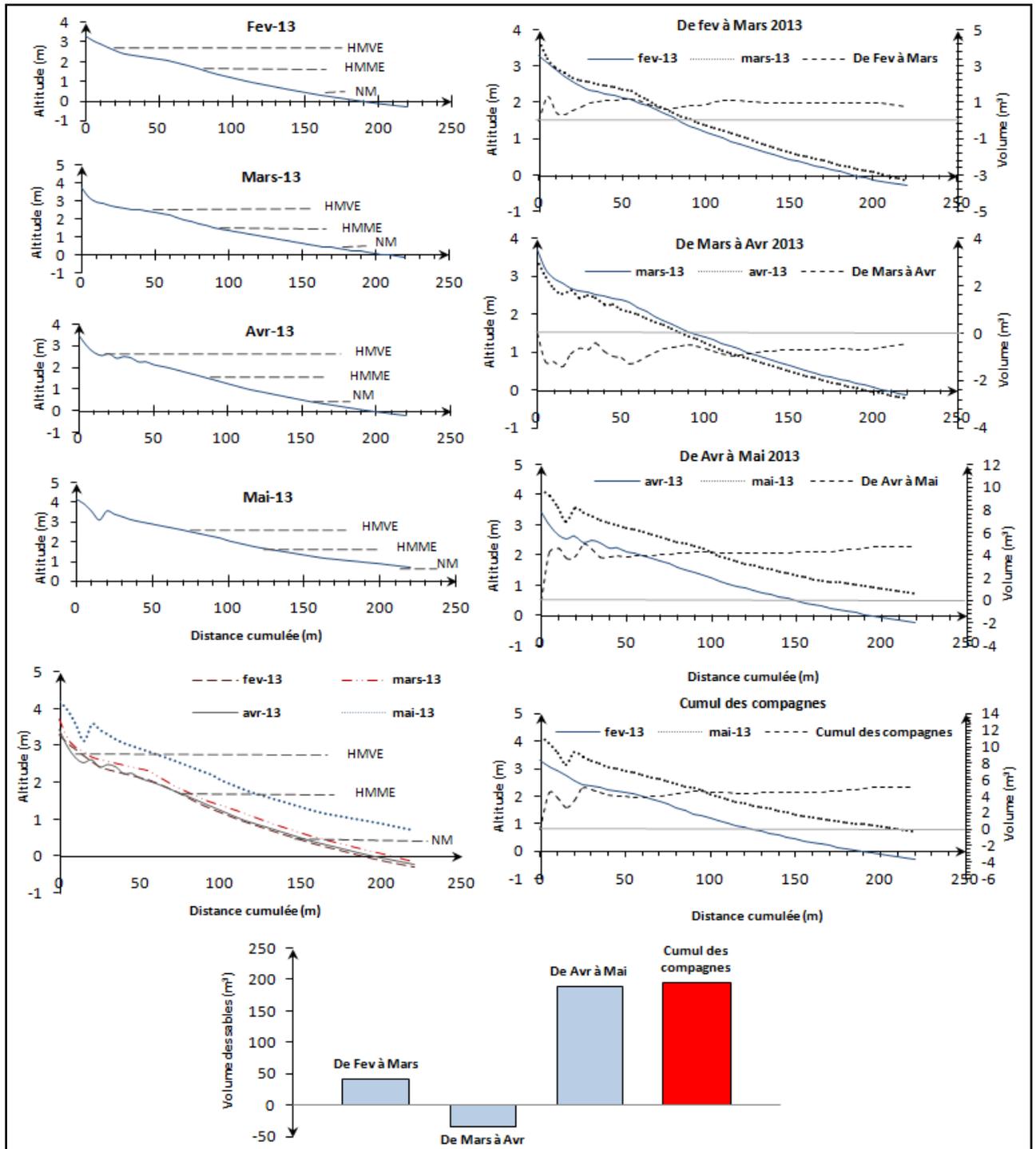
Annexe 6: Variations topographiques et volumétriques du profil 10



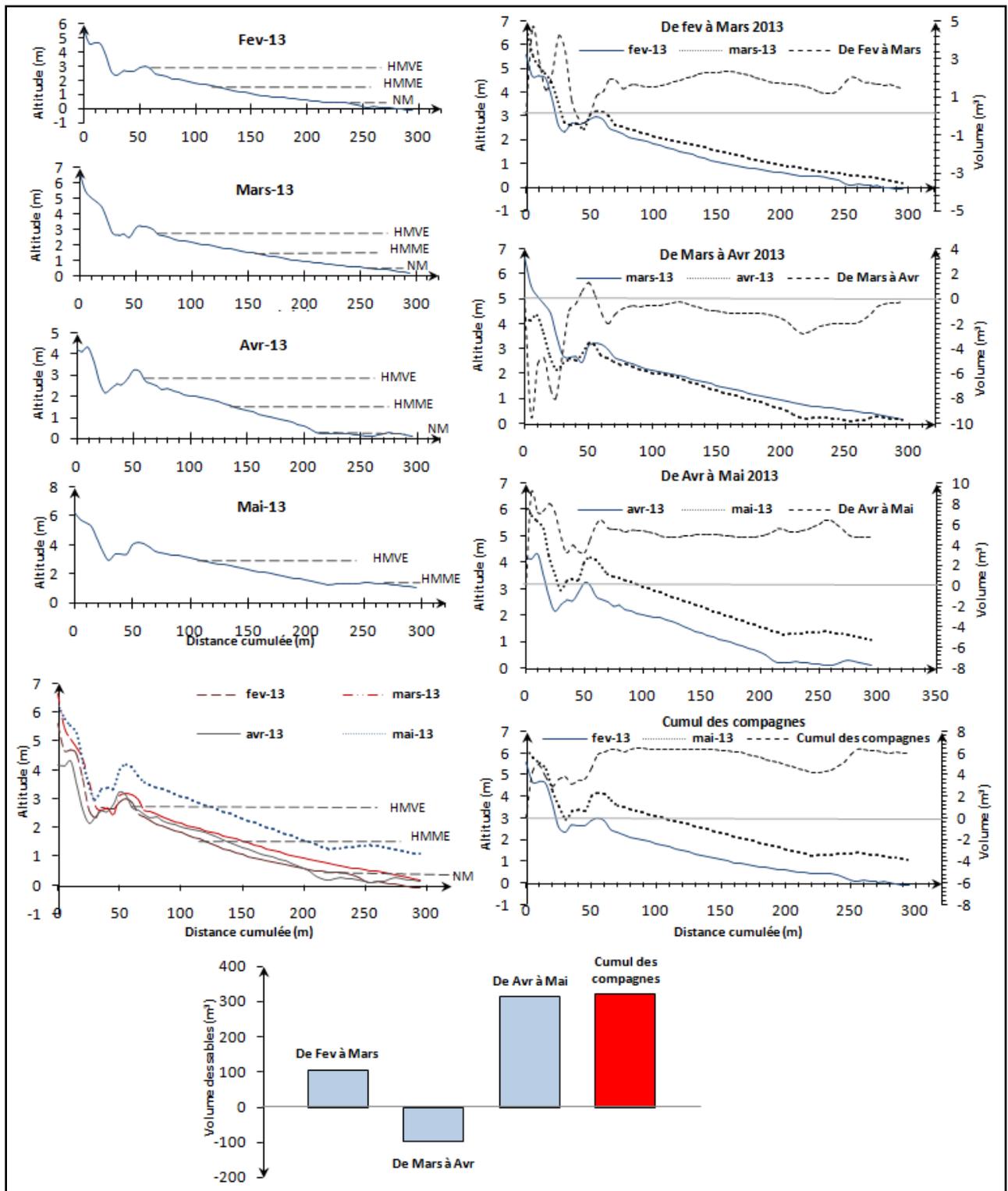
Annexe 7: Variations topographiques et volumétriques du profil 11



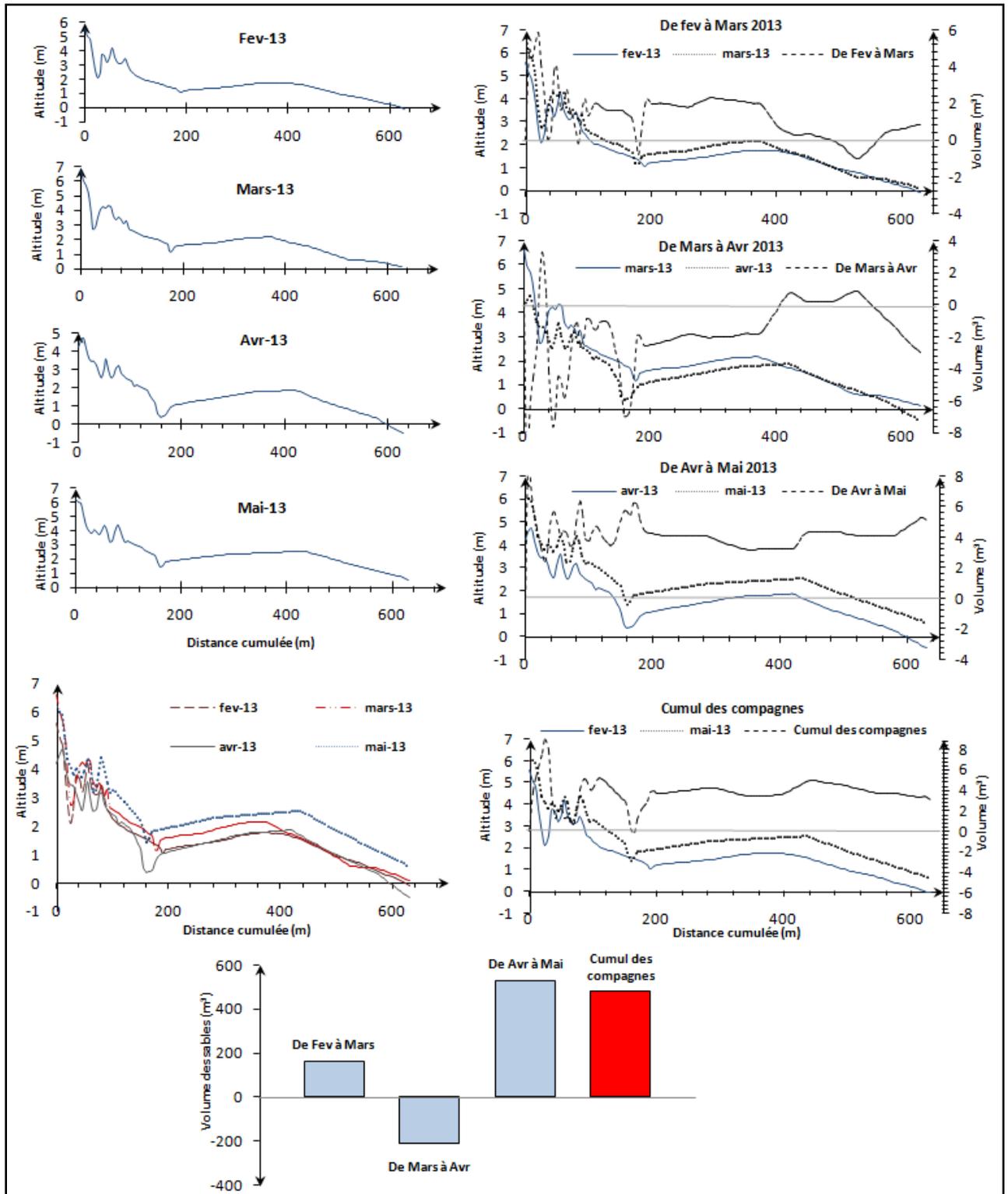
Annexe 8: Variations topographiques et volumétriques du profil 12



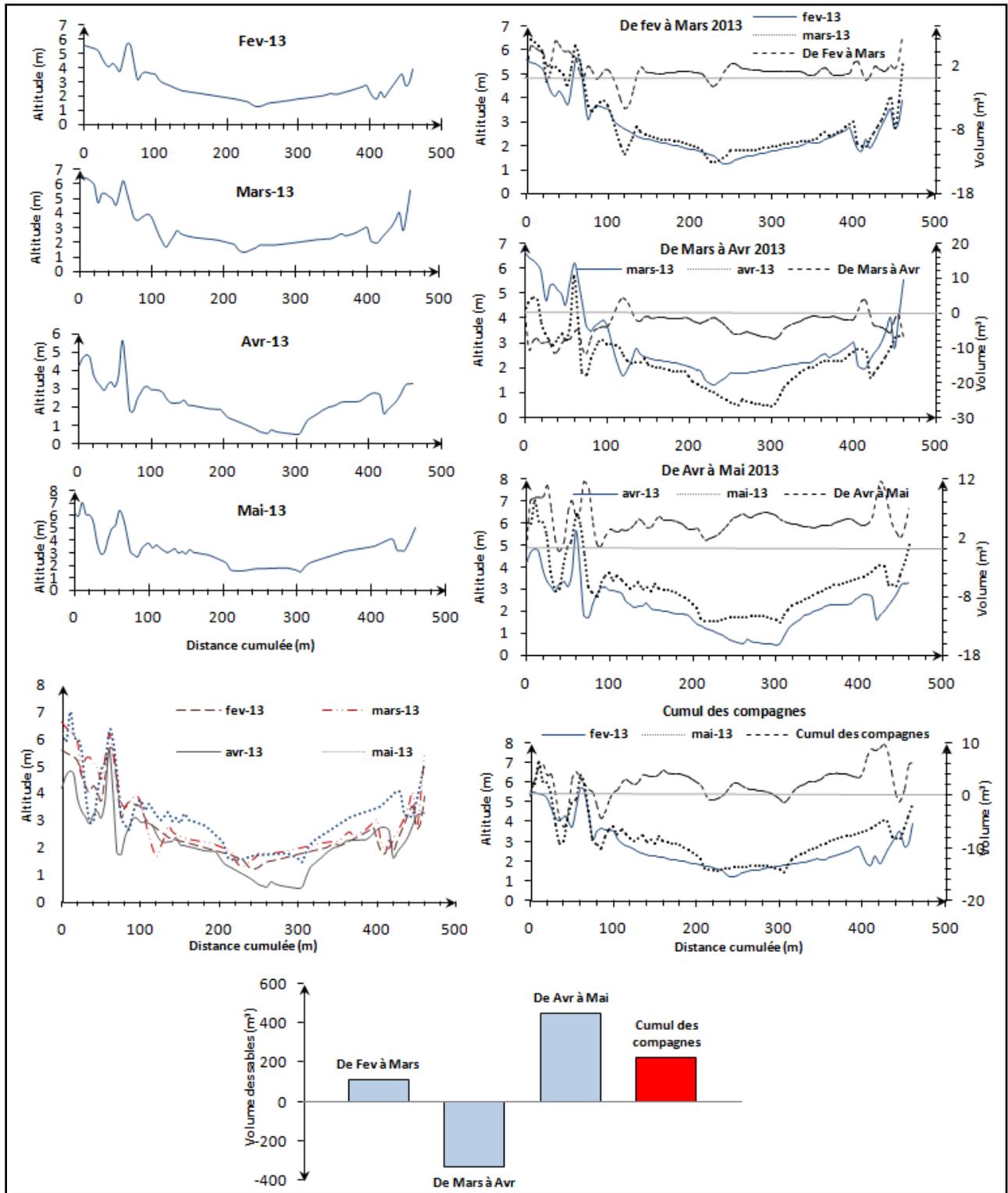
Annexe 9: Variations topographiques et volumétriques du profil 13-1



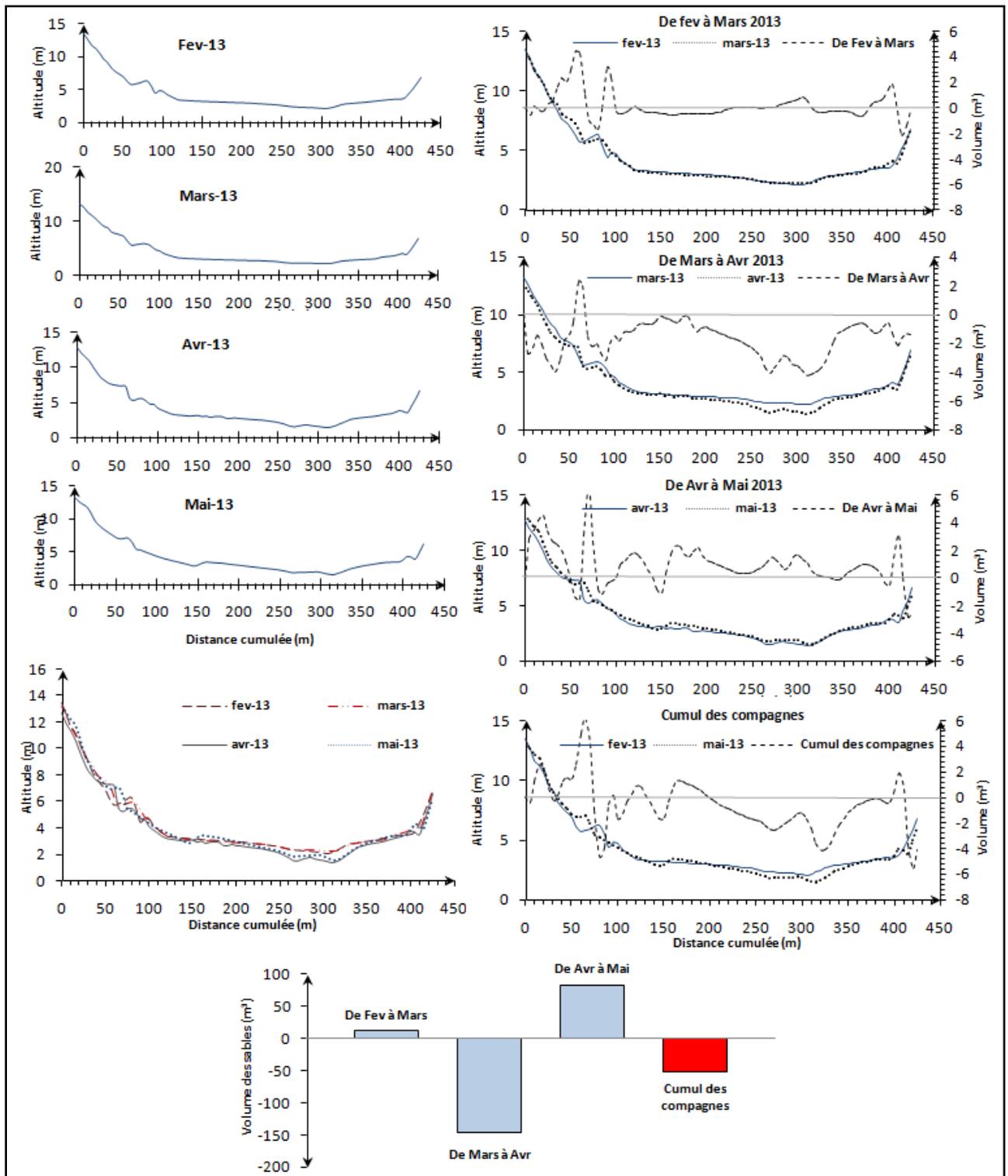
Annexe 10: Variations topographiques et volumétriques du profil 13-0



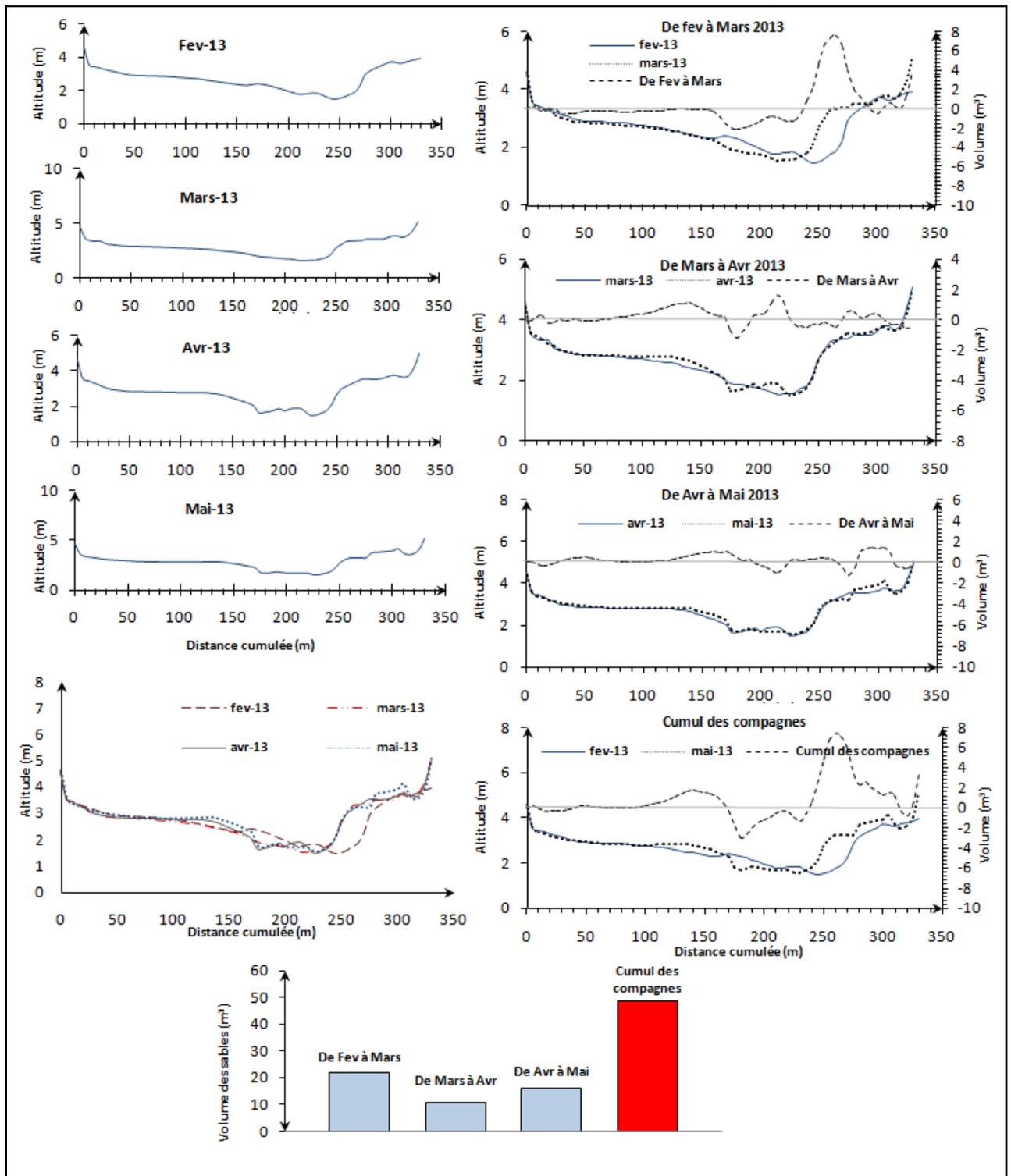
Annexe 11: Variations topographiques et volumétriques du profil 13-2



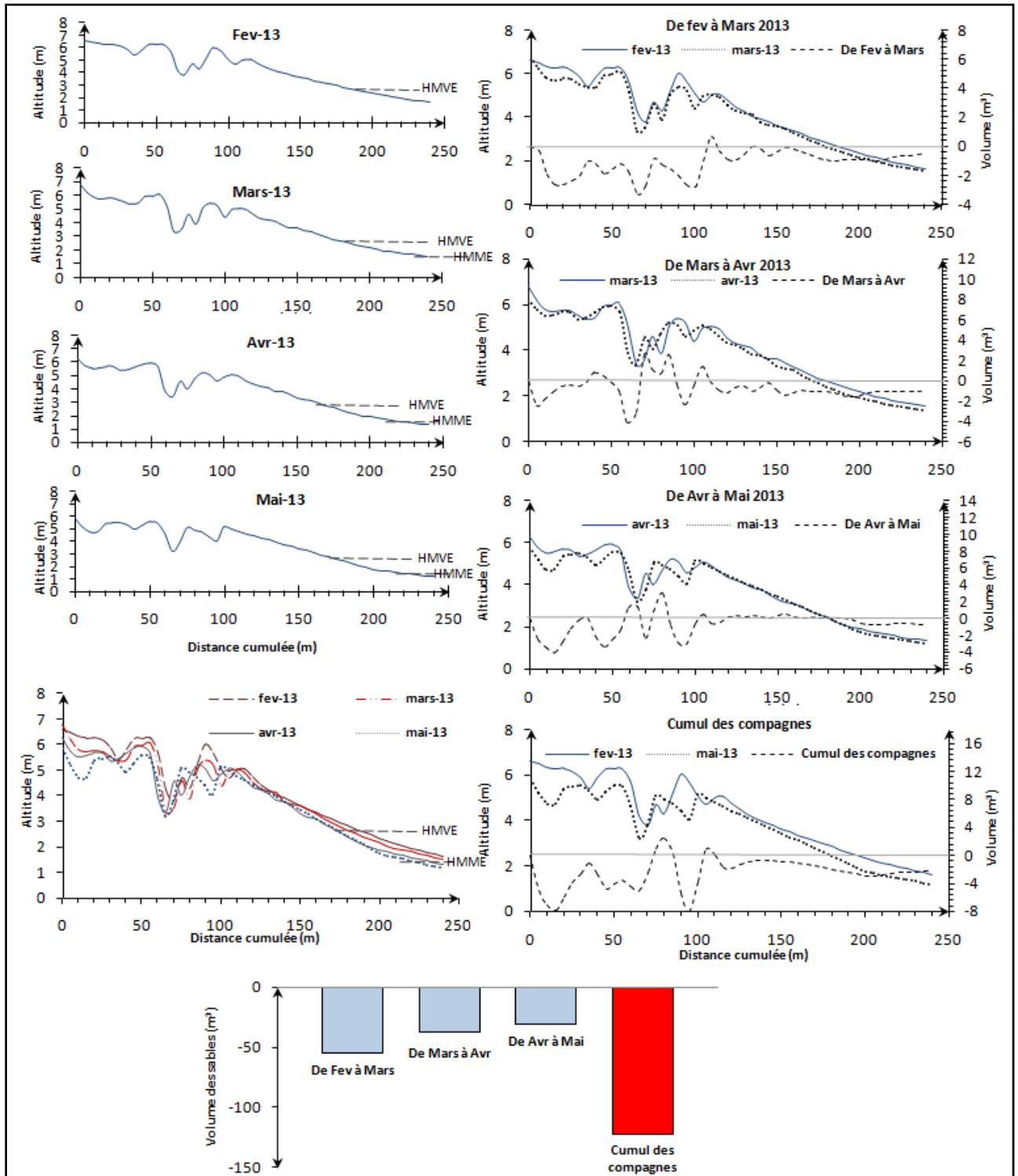
Annexe 12: Variations topographiques et volumétriques du profil 14



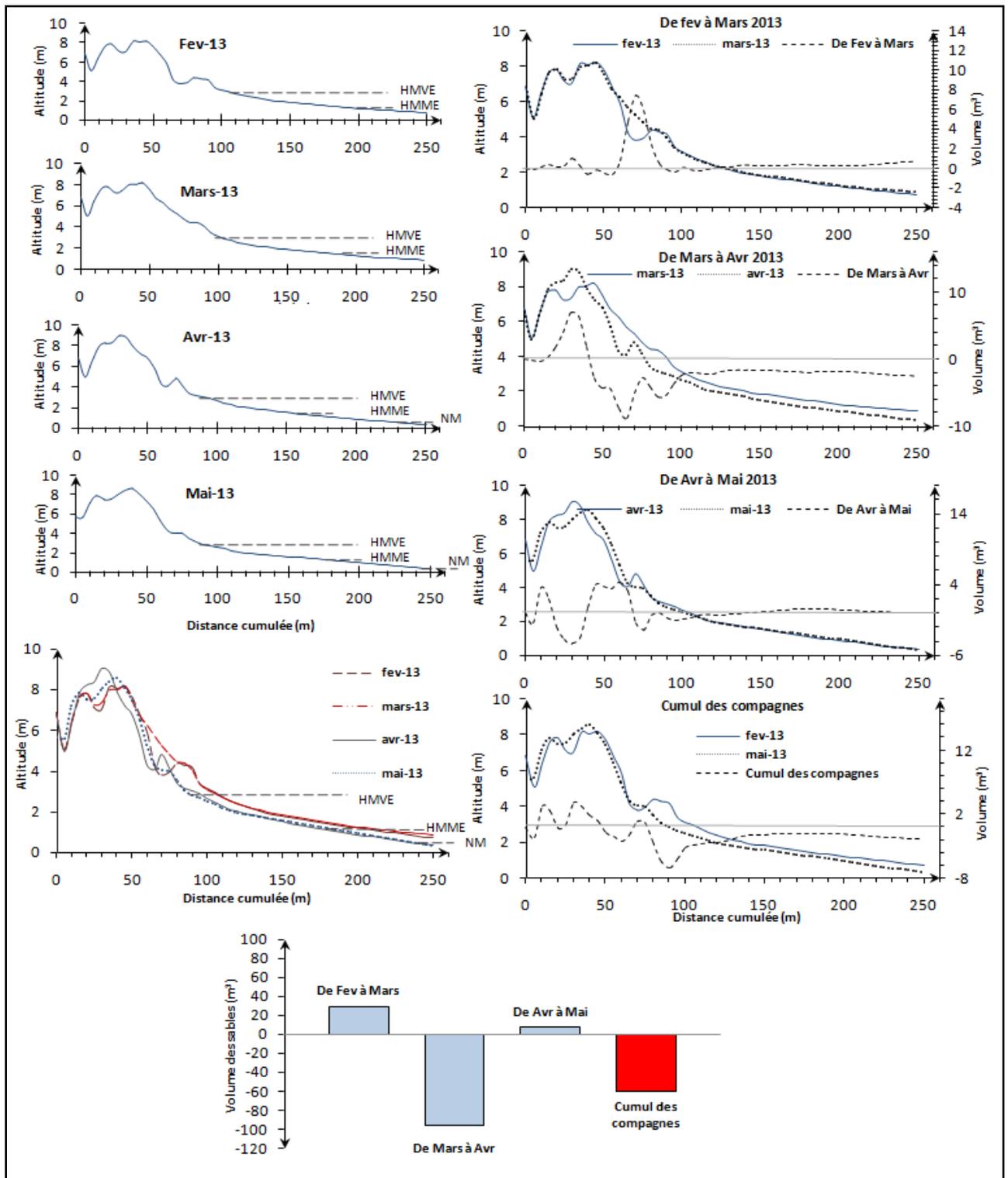
Annexe 13: Variations topographiques et volumétriques du profil 15



Annexe 14: Variations topographiques et volumétriques du profil 16



Annexe 15: Variations topographiques et volumétriques du profil 17



Annexe 16: Variations topographiques et volumétriques du profil 18

