

## Etude descriptive de l'évolution saisonnière des dunes bordières de la plage de Korba (façade orientale, Cap Bon) par la méthode des Modèles Numériques de Terrain Résiduel

Zouhour YAHYAOU<sup>1</sup>, N. RBAI<sup>2</sup> et A. SAADI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculté des Sciences de Tunis Université Tunis El Manar, 2092, Tunis, E-mail : [zouhour80@yahoo.fr](mailto:zouhour80@yahoo.fr);  
[saadi.abdeljaoued@fst.rnu.tn](mailto:saadi.abdeljaoued@fst.rnu.tn)

<sup>2</sup> Université Tunis El Manar/Faculté des Sciences de Tunis Département de Géologie. Unité de recherche UR 11ES14  
Dynamiques des bassins sédimentaires-et structures géologiques. [rebainoamen@gmail.com](mailto:rebainoamen@gmail.com)

### ملخص

دراسة وصفية للتطور الموسمي للكثبان الرملية الحديثة المحيطة بشاطئ قرية (الواجهة الشرقية، البرج الطيب) بمنهج نموذج التضاريس الرقمي المترس : دراسة ديناميكية الكثبان الرملية التي تحد شاطئ قرية من الأعلى تتمحور حول تحليل وقياس تطوّرهم الموسمي من خلال منهجية رقمية و توبوغرافية. هذه الأخيرة تتبلور في تمثيل مورفولوجية الكثبان الرملية الحديثة ووصف تطوّرهم من خلال نماذج التضاريس الرقمية.

أهم النتائج التي تحصلنا عليها من خلال هذه المتابعة، تثبت أنّ التطور المورفولوجي للكثبان الرملية الحديثة يتجسد في ثلاث مناطق، بنوعين من المقاطع: مقطع شتوي، يتميز بعجز في المخزون الرمي في كل من الشاطئ و الكثبان الرملية التي تحدّه من الأعلى و مقطع صيفي و يتميز بتضخم في الشاطئ و إعادة بناء للكثبان.

نتائج هذه القياسات التوبوغرافية خلال موسمين متشابهين و أخرى خلال موسمين مختلفين، مكنتنا من إحداث نماذج تضاريسية رقمية مترسبة و هم بمثابة حساب الفرق بين نموذجين رقميين اثنين. هذا المنهج، مكنتنا من قياس التغير التوبوغرافي للكثبان الرملية المحيطة بفعل العوامل المناخية (الرياح، الأمواج،...) و الإحيائية (نباتات، حيوانات، الإنسان...) كما مكنت من تقدير حجم حركية الكثبان الرملية الموسمية. فهو يقدر ببعض المليمترات بين فترات صيفية متباعدة في الزمن إلى بعض السنتيمترات ثم المتر إثر العبور من فترة شتوية متقلبة إلى فترة صيفية هادئة.

المغزى من هذه الدراسة، يتمثل في إضافة معلومة موثوق بها و دقيقة حول الديناميكية الموسمية للكثبان الرملية الحديثة التي تحيط بشاطئ قرية قصد إمداد خاصيات هذه الوحدة الجيومورفولوجية في سياق التخطيط لحماية الشريط الساحلي  
**لمفاتيح :** شاطئ قرية، الكثبان الرملية، نماذج التضاريس الرقمية، نماذج تضاريسية رقمية مترسبة، الديناميكية الموسمية.

### RESUME

L'étude de la dynamique des dunes bordières de la plage de Korba consiste à analyser et quantifier leur évolution saisonnière en se basant sur une approche numérique et topographique. Celle-ci se traduit par une représentation de la morphologie des dunes bordières et la qualification de leur évolution par la création des Modèles Numériques de Terrain (MNT). Les principaux résultats obtenus au cours de cette étude montrent que l'évolution morphologique des dunes s'exprime, suivant trois zones, par deux types de profils : un profil d'hiver avec l'amaigrissement de la plage et des dunes bordières et un profil d'été marqué par l'engraissement et la reconstitution des dunes. Nous avons généré à partir des levés topographiques, sur deux époques différentes, les Modèles Numériques de Terrain Résiduels. Ces derniers ont permis de quantifier la variation topographique des dunes bordières contrôlée par les facteurs climatiques (houles, vents, tempêtes,...) et écologiques (faune et flore). Cette démarche, a permis l'estimation de l'ampleur du mouvement dunaire au cours des saisons. Il est de l'ordre de quelques millimètres entre deux périodes estivales successives et de l'ordre de quelques centimètres à un mètre en passant d'une période hivernale agitée à une période estivale calme. L'objectif de cette étude est de fournir une information fiable et facilement accessible sur la dynamique et la cinématique saisonnière des dunes bordières afin d'intégrer les spécificités de cette unité géomorphologique dans la politique de planification de la protection du littoral.

**Mots-clés:** Dunes bordières, Modèles Numériques de Terrain (MNT), Modèles Numériques de Terrain Résiduels (MNTR), Évolution saisonnière, Plage de Korba

### ABSTRACT

**Descriptive Study of the seasonal evolution of bordering dunes of Korba beach (Northern East of the Cap Bon - Tunisia) using Residual Digital Terrain Model Method :** The study of the dynamic of bordering dunes of the beach of Korba consist of analyse and quantify their seasonal evolution according to numerical and topographic approach. This is defined by representation of the morphology of bordering dunes and the qualification of their evolution by using the Digital Terrain modeling (DTM). The principal results obtained show that the morphological evolution of dunes can be synthesized according to two profiles, in reaction to

hydrodynamic variability. The winter profil, when the conditions of agitations increase in autumn, bordering dune and beach are destructed and summer profil when the conditions of agitation are week, we marqued an accretion of both of dune and beach. We have generated from the topographic sunrises, on two different periods, the Residual Digital terrain Model. The latter allowed quantifying topographic variation of bordering dunes controlled by climatic and ecological factors. This approach allowed the estimation of the scale of seasonal dune mobility. It is of the order of few millimeters between two different summer periods and some centimeters in one meter between winter and summer periods.

The aim of this study is to provide reliable information of dynamics and seasonal kinematics of bordering dunes in order to integrate specificities of this geomorphologic unit in the politics of planning to protect the coast.

**Key words:** bordering dunes, Digital Terrain Model, Residual Digital Terrain Model (RDTM), seasonal Evolution, Korba beach

## INTRODUCTION

Les dunes côtières, à l'échelle de la planète, subissent en permanence des pressions d'origine naturelle ou anthropique (Carter, 1988 ; Paskoff, 1983). La mise en évidence de l'action de ces forçages est difficile car ces milieux sont naturellement très dynamiques et les modifications morphosédimentaires sont le résultat d'interactions complexes entre la topographie, le couvert végétal et les processus éoliens et hydrauliques (Hesp, 2002 ; Andrew *et al.*, 2002 ; Vallejo *et al.*, 2006 ) auxquelles s'ajoute l'action anthropique (Pye., 1990). L'évaluation de leur vulnérabilité et de leur potentiel de résilience constitue un enjeu surtout lorsqu'elles jouent un rôle de défense des côtes basses fortement aménagées (Suanez et Stéphan, 2006).

En outre, si un consensus est aujourd'hui établi autour de la nécessité de préserver la mobilité naturelle des milieux dunaires (Durand, 1999), ce principe n'est pas toujours appliqué et des zones où des dunes côtières sont en voie d'urbanisation : c'est le cas d'une partie du littoral de Korba (fig.1). Cette étude portant sur la dynamique côtière des dunes bordières repose sur trois levés topographiques successifs (hiver et été) qui sont traités et représentés par un MNT à chaque cycle de mesures (mesures en été et en hiver).

Le MNT Résiduel est la différence entre deux MNT représentant les secteurs en érosion et en accretion entre 2 levés topographiques. Cette approche souvent appliquée est considérée intéressante pour l'étude des dunes bordières. Elle se traduit par la quantification de l'évolution spatio-temporelle des dunes basée sur les levés topographiques en X, Y, Z. Ainsi, l'objet de notre étude est d'analyser et d'estimer l'évolution physiographique des dunes bordières sur de courtes périodes (entre 2 saisons : été et hiver) en utilisant les MNT résiduels. L'analyse de la mobilité des dunes, étant un facteur déterminant dans la compréhension de l'évolution du littoral (Demba *et al.*, 2006 ; Psuty and Silveira, 2009), afin d'anticiper les changements

physiographiques des dunes sur de longues périodes pluriannuelles et delà optimiser les plans d'aménagement et de protection des littoraux.

## SECTEUR D'ETUDE

### 1 Localisation et cadre géomorphologique

La ville de Korba se situe sur le littoral Nord oriental du Cap Bon à environ 20 Km au nord de la ville de Nabeul (entre les parallèles 36°30' et 37°3' de latitude Nord et entre les méridiens 10°52' et 10°55' de longitude Est).

Le littoral de Korba présente une morphologie côtière relativement homogène (fig. 1). Il est notamment marqué par l'extension de deux Km environ du cordon dunaire et d'une plage large entre 40 à 100 m et à faible pente (< 1%) (Oueslati, 2004) délimitée par les oueds « Chiba » au nord et « Korba » au sud (fig. 2). Le cordon dunaire y est assez régulier et ; celui-ci est recouvert par une végétation diversifiée (Exemple : *Amophila arenaria*, *Eruquim maritimum*, *Salsola Kali*, *Mesembrianthemum edule*, *Saccharum..*) dont le taux de recouvrement est de l'ordre de 35% (Yahyaoui, 2006).

Sur une linéaire côtier de 2 Km, la côte est rectiligne, sableuse, adossée, à un système de dunes bordières actives plus ou moins stabilisé par la végétation. Du sud au nord, son profil passe de la simple avant-dune (foredune) à des structures polygéniques présentant plusieurs générations de dunes (Fig. 1 et 2).

Leurs altitudes ne dépassent pas 4 m. En allant vers la partie sud du secteur d'étude (direction Oued Korba), les dunes sont fortement dégradées et leurs altitudes ne dépassent pas 1 m. Les causes de dégradation sont principalement : le régime nettement dominant des vents de terre, limitant le développement des avant-dunes, des sables difficilement mobilisables par les vents de mer et la forte fréquentation estivale ayant engendré une dégradation importante des avant-dunes (E.R.I, 2000).

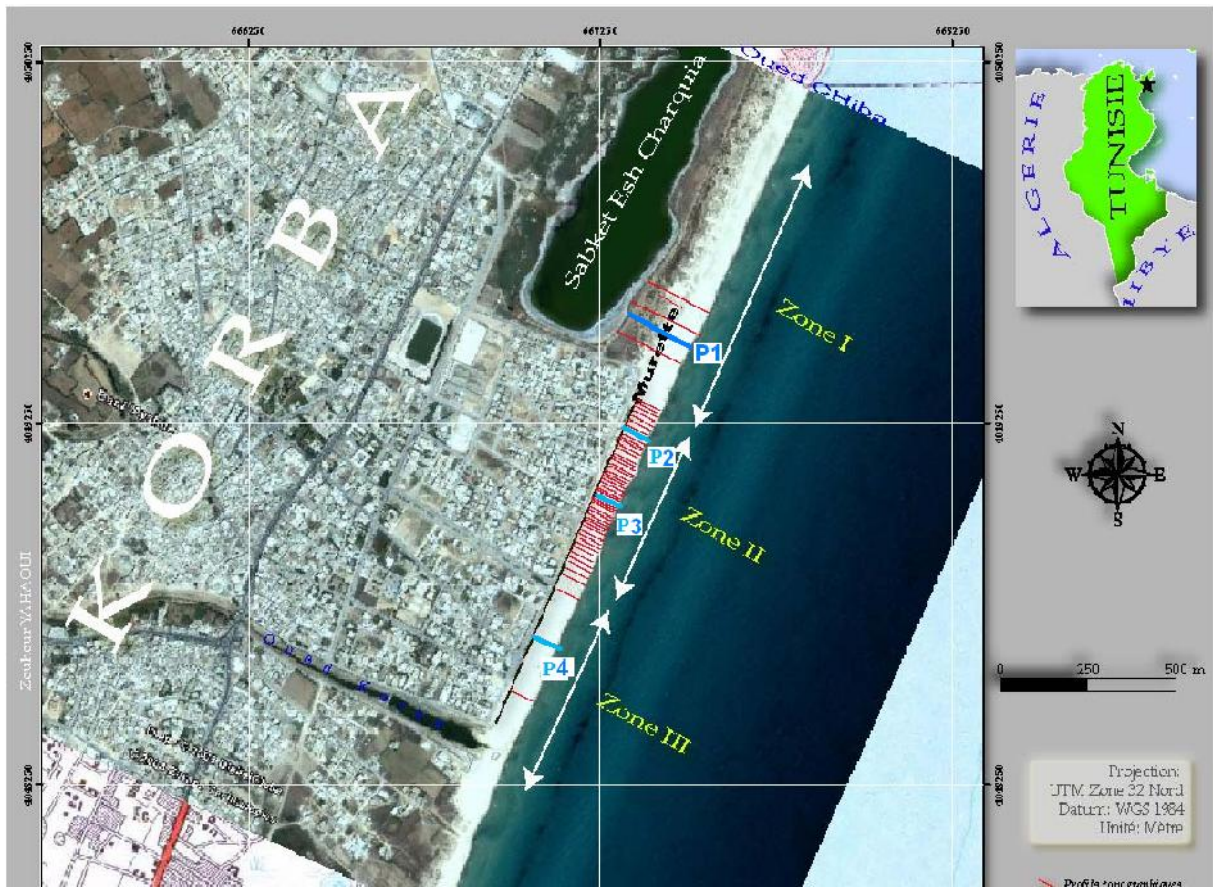


Fig. 1 : Découpage de la zone d'étude et localisation des profils topo-morphologiques

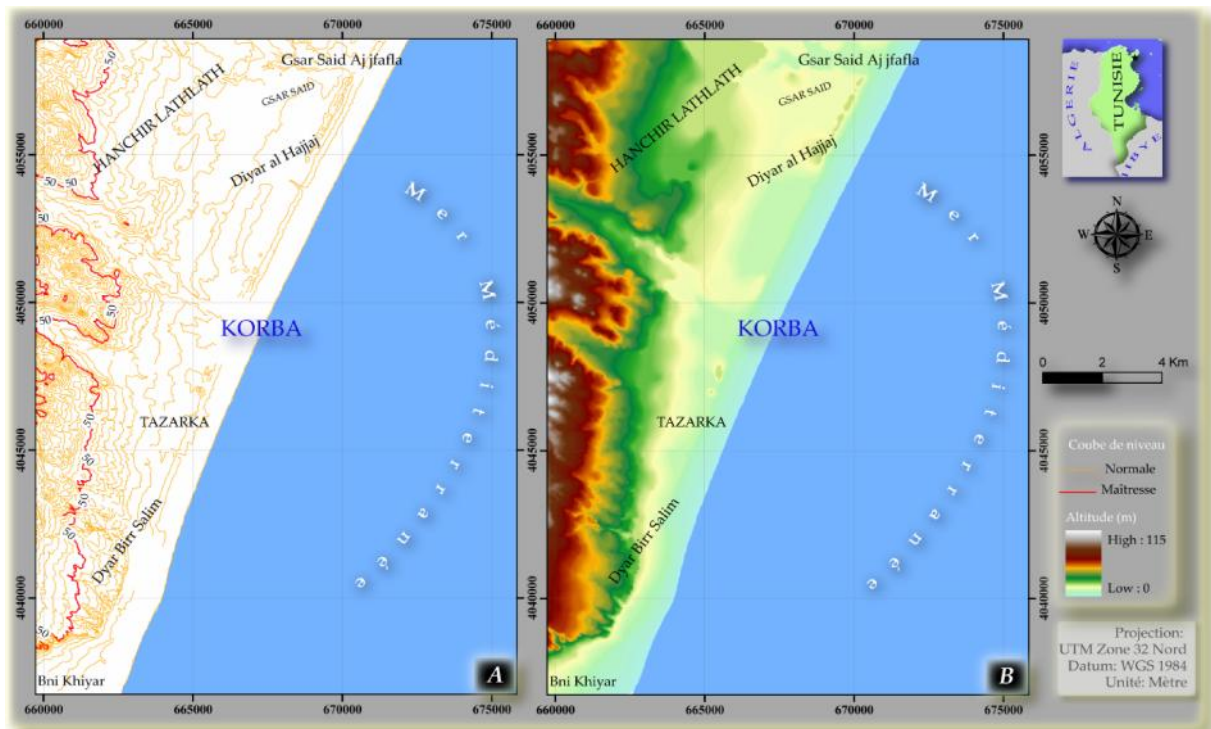


Fig. 2 : Contexte morphologique du terrain : A : couverture topographique B : Modèle Numérique de Terrain (MNT)

## 2 Conditions hydro-climatiques

La région de Korba se classe dans l'étage bioclimatique méditerranéen semi - aride à hiver chaud. Comme toutes les régions méditerranéennes, le climat est caractérisé par quatre saisons. La région de Korba est caractérisée par un été chaud et sec débute en mai et se prolonge jusqu'à fin septembre et un hiver humide et frais à pluviométrie irrégulière qui s'étend d'octobre à avril.

La région côtière de Korba forme une entité hydrologique drainée principalement par trois cours d'eau descendant de Djebel Sidi Abderrahmane et se déversant en Méditerranée. Ainsi, le réseau hydrographique est caractérisé principalement par les trois Oueds Abidis, Ed Dine et Chiba (fig. 3).

Le vent dominant de la région est du secteur Ouest à Nord-Ouest avec une vitesse de 2 à 20 m.s<sup>-1</sup> (fig. 4). En effet, les vents provenant du Nord-Ouest amortissent la propagation des vagues, en réduisant leur hauteur et en ralentissant leurs avancées. D'autre part, il existe une tendance des vents en provenance de la mer pendant l'été. En revanche, pendant l'hiver, c'est le vent de terre qui est dominant.

Les hauteurs de la marée, semi-diurne et de type microtidal, varient de 30 centimètres aux mortes eaux à 45 cm en période de vives eaux (Baccar et al., 2001). A cette marée d'allure régulière et périodique, se superposent des variations de hauteur d'eau d'origine météorologique, appelées surcotes et décotes, dont l'étude relève essentiellement de méthodes statistiques. La moyenne des surcotes maximales varie de 0,30 m pour une période de retour de 5 ans, jusqu'à 0,40 m pour une période de retour supérieure à 10 ans. La moyenne des décotes maximales estimées en ce point ne dépasse pas -0,30 m (Baccar et al., 2001).

Étant donné l'orientation de la côte, les houles qui atteignent le rivage ont des directions Nord-Est, Est à Sud-Est en hiver, du Nord-Est, de l'Est et Sud-Est en printemps, de Nord-Est à Sud-Est en été et de direction Nord-Est, Est à Sud-Est en automne. Leur hauteur varie de 1 à 2,5 m pour la plupart des cas et peuvent atteindre 5 m pour des périodes de 1 à 10 s (Baccar et al., 2001 ; Zâara, 1996). Les courants principaux se dirigent du sud vers le nord tandis que, durant la période estivale, on observe une direction prédominante vers le Sud/ Sud-Est, avec une vitesse de 0,68 m.s<sup>-1</sup>.

## MATERIELS ET METHODES

Lors de cette étude le suivi topo-morphologique est réalisé par l'intermédiaire d'une station totale de type Leica et la stratégie d'échantillonnage est basée sur le suivi dans le temps de profils cross-shore (2D). Cette méthode permet une observation très simplifiée des morphologies et correspond à une vision classiquement rencontrée dans l'étude des plages microtidales (Certain, 2002 ; Amrouni et Abdeljaouad 2009 ; Ferrer, 2010). Ce travail d'observation consiste à positionner les ruptures de pente, sommets des dunes et les siffles-vent (déflations éoliennes). C'est une étape capitale car la qualité des analyses géomorphologiques dépendront en grande partie de la pertinence des points mesurés.

Les profils cross-shore s'étalent de la mer jusqu'aux dunes bordières (ou avant-dunes) (fig. 1).

Le premier levé a été réalisé en novembre 2004 au début de la saison hivernale et après une tempête, le deuxième en juin 2005 au début de la période estivale et le troisième en septembre 2005 à la fin de la période estivale. Ces transects doivent permettre d'évaluer les changements saisonniers, l'impact des tempêtes, la vitesse de reconstruction sur la face marine de la dune et la plage et de détecter l'évolution de l'altitude des dunes.

Après le transfert des données sur un ordinateur, grâce au logiciel Geosys®, le traitement et l'exploitation sont réalisés avec Excel®. Sous le Microsoft Surfer® on a pu représenter, en 2D et 3D, la topographie de la plage et d'approcher par le calcul les volumes sédimentaires déplacés (érosion, engraissement).

### 1 Calcul des Modèles Numériques de Terrain

Le MNT consiste en un échantillon de données spatiales qui donne une représentation partielle du terrain réel : la représentation des valeurs de l'altitude par un MNT est effectuée de manière discontinue et par intention. Or, le relief est un phénomène géographique quantitatif spatialement continu, il représente des valeurs distinctes en chaque point de l'espace (Charleux-Démargne, 2001).

L'altitude d'un point quelconque sera alors calculée par interpolation ou extrapolation à partir des altitudes connues des points voisins : les altitudes sont dites alors distribuées. La fonction mathématique

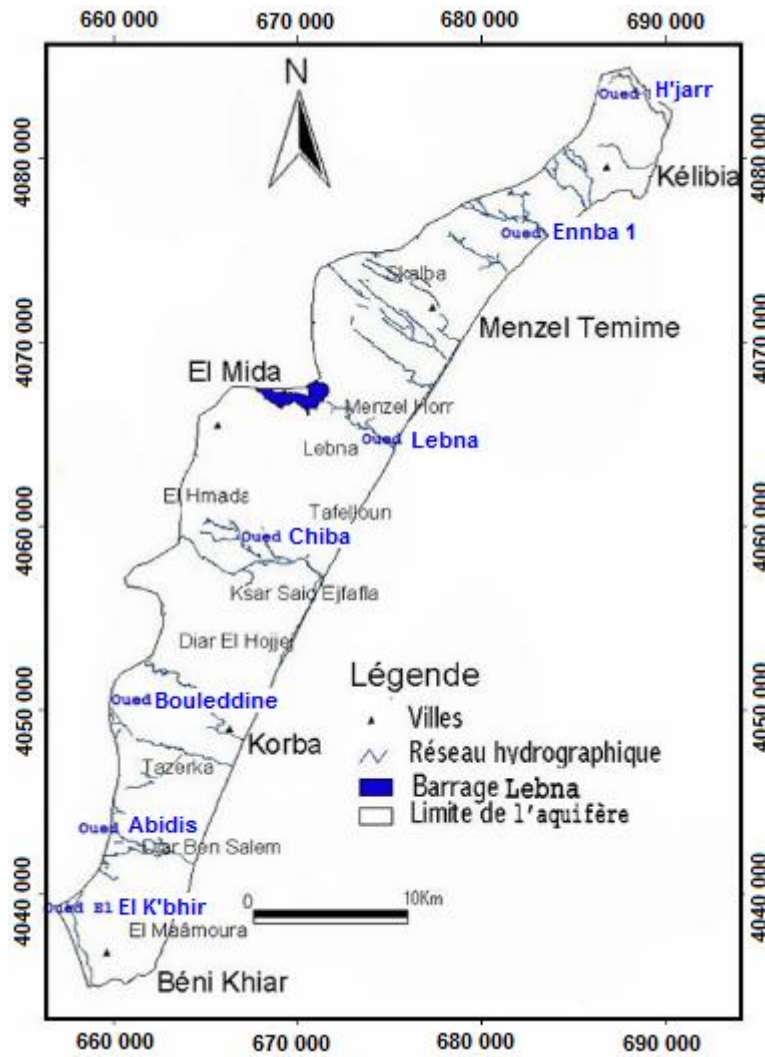


Fig. 3 : Réseau hydrographique du secteur d'étude (Zgibi, 2007 in Ben Hammouda, 2008)

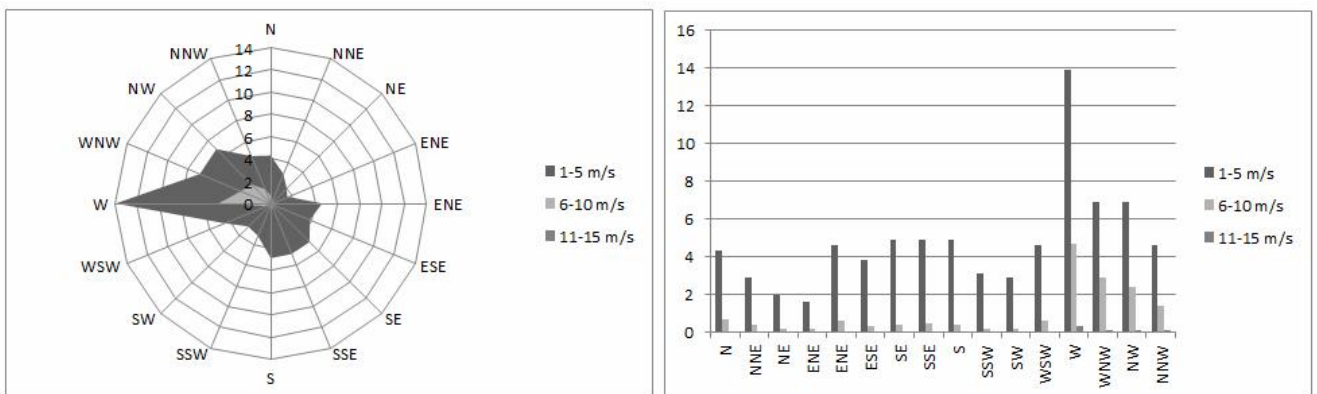


Fig. 4 : La vitesse des vents enregistrées à la station Kélibia entre 1993 et 2004 ainsi que la rose des vents (STEG, 2009).

d'interpolation ou d'extrapolation est choisie pour reproduire à partir de l'échantillon les informations altimétriques nécessaires à une application donnée, et si possible pour un maximum d'applications différentes. L'échantillon des points X, Y, Z constituant la donnée initiale acquise suite à un levé topographique sur terrain, avec Z l'altitude du point de coordonnées planimétriques (X, Y) dans une projection définie. Dans notre cas, c'est la projection Lambert Nord IGN.

Le format de MNT utilisé est en profils ; l'altitude est représentée par des points situés le long de profils dans une direction horizontale donnée. L'intervalle entre deux points côtés d'un même profil est variable et s'est adaptée à la morphologie locale.

Lors de son élaboration, le calcul des points du MNT final est basé sur l'interpolation des coordonnées tridimensionnelles des points à partir du jeu de points de référence (les points de nivellement connus en X, Y et Z).

Le cadre de cette étude est alors de valoriser l'information des MNT pour le suivi de la variation spatio-temporelle du comportement du système plage/dune du littoral étudié vis-à-vis de la variation des conditions du milieu. L'élaboration de ces MNT est faite suite à l'exploitation des mesures topographiques effectuées sur les avant-dunes ainsi que sur la plage qui la bordent tout le long du littoral de Korba. La création des MNT s'est effectuée à l'aide du logiciel Surfer® (Golden software). La méthode de maillage choisie est une interpolation triangulaire linéaire (*triangular linear interpolation*). Ce choix est fonction de plusieurs facteurs incluant la pertinence de la représentation graphique et la qualité des levés qui incluent les points hauts et les points bas. Ce choix se trouve être le meilleur compromis entre ces facteurs. La maille d'interpolation choisie est de 5 m suivant la distance long-shore et de 5 m suivant la distance cross-shore.

A partir des MNT, on a pu extraire les profils significatifs (les plus complets) perpendiculaires au rivage. La superposition des différents profils appartenant à des périodes de levés distinctes permet d'évaluer l'évolution spatio-temporelle du cordon littoral émergé, en particulier d'évaluer la mobilité des sommets des dunes et la variation de la largeur de la plage en allant du nord au sud de la zone d'étude. Ainsi trois profils ont été choisis : P1 situé au niveau de la zone I, P2 et P3 au niveau de la zone II et P4 situé au niveau de la zone III. Les deux zones II et III sont marquées par l'activité anthropique par contre la zone I semble être à l'état naturel. Cette dernière (que l'on peut considérer comme "dune témoin" est censée représenter la tendance naturelle de l'évolution de l'unité géomorphologique du système dunaire.

Afin de répondre à cet objectif et dans le but de mettre en évidence les zones érodées et les zones

engraissées on a eu recours à un calcul différentiel entre les différents MNT appartenant à des périodes distinctes et des périodes similaires (fig. 5).

Ainsi, on a pu déterminer la variation altimétrique des crêtes et des creux qui composent le prisme littoral y compris les avant-dunes, le haut de plage et la plage proprement dite.

La validation des MNT élaborés pour chaque période est basée sur l'estimation de l'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE) de chaque MNT (Charleux-Demargne, 2001 ; Rebai et al., 2007) en appliquant la formule suivante:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$$

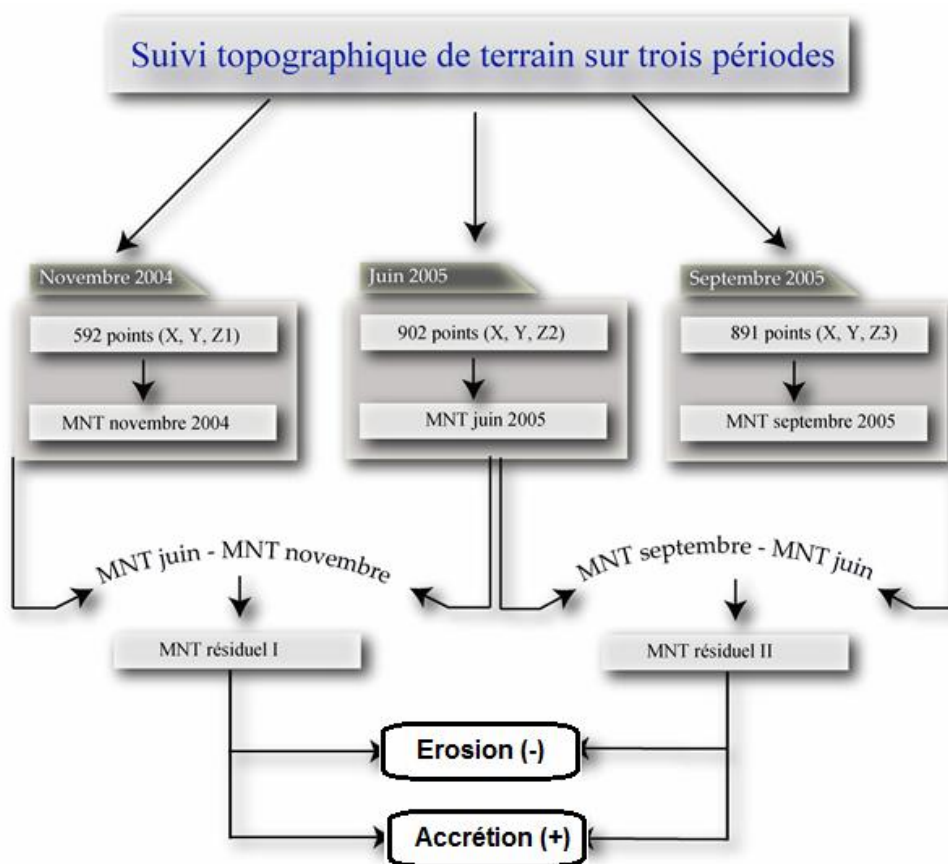
**n** est le nombre des points échantillonnés; **O<sub>i</sub>** et **P<sub>i</sub>** sont respectivement les valeurs mesurées sur le terrain et les valeurs calculées après interpolation dans un emplacement **i** de coordonnées (**x**, **y**) dans l'espace géographique bidimensionnel.

Les résultats du calcul du RMSE pour chaque MNT de la période novembre, juin et septembre montrent une cohérence avec une valeur plus importante pour le MNT du mois de novembre mais la moyenne des RMSE pour les trois époques reste relativement faible de 0.019 (Tab. I), sachant que plus la valeur du RMSE est faible plus l'interpolateur est crédible. Pour notre cas pour exploiter les résultats des MNT résiduels nous avons utilisé l'interpolateur TIN.

Les marges d'erreur inhérentes à la mesure tachéométrique, calculées par méthode statistique, sont comprises entre 5 et 7 cm en X et Y et restent inférieures à 3 cm en Z (Suanez et al., 2005).

## 2 Spécificités des modèles numériques mathématiques (MNT et MNTR)

Pour chaque campagne de levé topographique on a pu créer des cartes présentées en 2D et 3D (MNT), d'où l'obtention d'une base de données assez complète qui permettra d'en tirer les informations nécessaires qui entre dans le cadre d'étude du système dune/plage. A partir de cette base de données, on peut évaluer les mouvements de sables enregistrés entre deux relevés topographiques. Cette information a permis de créer des cartes résiduelles (MNTR) d'une mission à l'autre afin de déterminer les variations altimétriques au niveau des avant-dunes, du haut de plage et de la plage et de quantifier les changements volumétriques mis en jeu en évaluant les bilans sédimentaires enregistrés.



**Fig. 5 :** Organigramme de la création des MNT Résiduels : la différence de nombre de points entre novembre, juin et septembre est liée à la période de suivi (période de morte eaux ou vives eaux et à l'inondation de la plage en période de tempête ce qui empêche le levé d'un certain nombre de points au niveau de la plage)

**Tableau I :** Estimation de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) des MNT pour les mois de novembre 2004, juin 2005 et septembre 2005

MNT novembre 2004		MNT juin 2005		MNT septembre 2005	
Oi (m)	Pi (m)	Oi (m)	Pi (m)	Oi (m)	Pi (m)
1.38	1.3961	3.01	3.0166	2.81	2.801
2.28	2.2803	2.94	2.9272	2.3	2.3024
1.42	1.4185	1.9	1.9062	2.66	2.6524
1.5	1.5015	1.94	1.9404	1.7	1.7026
2.67	2.668	2.7	2.7028	2.71	2.7107
2.68	2.671	2.64	2.6483	2.36	2.3687
2.67	2.14	1.83	1.8338	1.54	1.5564
4.14	4.1377	3.27	3.3002	3.28	3.253
1.36	1.3605	3.23	3.2049	2.48	2.4253
RMSE=0.028		RMSE=0.01		RMSE=0.02	

Cette démarche a permis de définir les zones érodées et les zones engraisées.

## RESULTATS ET INTERPRETATION

### 1. Analyse descriptive de la morphologie dunaire

Ce qui valorise le secteur d'étude, c'est la coexistence sur une courte distance (de l'ordre de 2500 m) de trois zones qui se caractérisent chacune par un stade d'évolution et des entités morphologiques différentes.

La zone I, située au nord du site d'étude, représente le domaine le plus stable et se caractérise par la présence des différents stades d'évolution des dunes côtières en passant de la dune lette fixée par une végétation dense et dont le taux de recouvrement est de l'ordre de 60 %, jusqu'aux avant-dunes mobiles dont le taux de recouvrement de la végétation est moins important (de l'ordre de 30 % de recouvrement). Ces dernières sont soumises à l'action des facteurs naturels (en particulier vent, houle) et sont à l'abri de l'action anthropique (absence de constructions au dépend des dunes). Le haut de plage est bien développé et la plage large de 80 à 100 m en moyenne.

La zone II correspond à un secteur anthropisé où le cordon dunaire est affecté par des constructions balnéaires (maisons, route, murette de protection (1.5 m) ce qui explique la mobilité du matériel sableux en dehors du cordon dunaire vers l'intérieur de la route et la dégradation du couvert végétal protecteur de l'écosystème dunaire. Les avant-dunes sont donc plus ou moins fixées et les crêtes sont assez développées marquées par une végétation dunaire assez dense dont le taux de recouvrement est de l'ordre de 30% (*Eryngium maritimum*, *Diotis maritime*, *Ammophila arenaria*). En allant vers le sud les avant-dunes disparaissent progressivement et la végétation est beaucoup moins dense avec un taux de recouvrement de l'ordre 15% (*Agropyrum*, *Ammophila arenaria*) (Jaballah, 2003 ; Yahyaoui 2006). La plage large de 65 m en moyenne a reculé d'environ 25 m par rapport à la largeur de la plage mesurée au niveau de la zone I.

Au niveau de la zone III, le cordon dunaire est quasi absent. Le profil de la plage se présente sous la forme d'un bourrelet qui domine un secteur d'érosion limité en arrière par une murette de protection de 1 m d'hauteur. La largeur de la plage est moins importante (de l'ordre de 50 m en moyenne).

De point de vue sédimentologie, l'évolution de la morphologie dunaire du secteur nord au secteur sud, marque un tri granulométrique. L'essentiel du matériel sableux à calibre fin est situé au niveau des avant-dunes alors que celui à calibre fin à moyen intéresse la plage et principalement la zone de haute et basse mer (zone de Swatch) où l'on note la

présence de sables grossiers et de débris de coquilles. Donc, la taille des grains des sédiments sableux diminue avec des sables grossiers au niveau des zones dépressionnaires et des sables fins au niveau des crêtes (zone dunaire) (Yahyaoui, 2006).

### 2. Suivi de l'évolution saisonnière de la plage aérienne (novembre 2004-juin 2005)

#### IV.2.1. Evolution transversale

Cette évolution est mise en évidence pour la période qui s'étale de novembre 2004 à juin 2005 (fig. 8). Ces levés ont été réalisés avant l'implantation des dispositifs de ganivelles afin de révéler le comportement du système dune/plage dans les conditions d'évolution naturelle.

Le premier levé a été réalisé juste après une tempête alors que le second l'a été dans des conditions climatiques très calmes.

Du point de vue morphologie, le profil d'été (juin 2005) montre la présence d'une plage large (100 m en moyenne) avec un haut de plage développé suite à un apport de sédiment du côté mer en faveur du cordon dunaire. Aussi, il est caractérisé par la présence d'une berme en bas de plage sous l'action de la houle de beau temps de direction NE. En revanche, le profil d'hiver (novembre 2004) montre, un rétrécissement de la plage suivi d'un abaissement du profil, résultat prévisible après un épisode tempétueux survenu en mois de novembre (13 novembre 2004) pendant la période des vives-eaux. Cette tempête est caractérisée par une vitesse de vent de l'ordre de 300 Km/h et une direction Sud Est au Nord Est (INM, 2004). Cette épisode a engendré une surcote qui a provoqué la submersion de la plage. Par conséquent, la comparaison des relevés topographiques effectués en novembre 2004 et en juin 2005 (fig. 7) s'avère très intéressante, à la fois pour localiser désormais les zones de faiblesse morphologique du cordon des dunes bordières et pour déterminer son comportement lors des tempêtes, en l'absence d'ouvrage de protection perturbant les processus naturels.

Au niveau de la zone I, pour l'ensemble de la période de novembre 2004 à juin 2005, le cordon des avant-dunes a enregistré un gain sédimentaire équivalent à  $+10.95 \text{ m}^3/\text{m.l}$  pour le profil P1.

Au niveau de la zone II, une accrétion sédimentaire respectivement équivalente à 11 et 6  $\text{m}^3/\text{m.l}$ , a été enregistrée, au niveau des profils P2 et P3 au profit des avant-dunes.

Au niveau de la zone III, le calcul des bilans sédimentaires au niveau du profil P4 a enregistré une accumulation des sédiments de l'ordre de 3  $\text{m}^3/\text{m.l}$  au niveau du haut de plage.

Ainsi, un fonctionnement saisonnier a été marqué au niveau des trois zones (fig. 6). Il est caractérisé par des phases de perte sédimentaire essentiellement pendant l'hiver alors que le système enregistre un gain sédimentaire au cours de la période estivale et où le cordon des avant-dunes est de nouveau réalimenté.



Cet engraissement est maximal durant l'été avec des hauteurs d'eau faibles et où la dynamique éolienne de direction NE plus efficace assure un transit sédimentaire important de la plage vers l'avant-dune. Ce résultat répond au modèle classique de variation saisonnière du système dune/ plage élaboré par Sonu (1973) et Bowen *et al.* (1980).

#### IV.2.2. Bilans sédimentaires

Le MNT, réalisé par comparaison des deux levés topographiques réalisés entre novembre 2004 et juin 2005, montre que la racine dunaire marque tout le long du secteur d'étude une tendance à l'évolution positive traduite par une accumulation du sédiment au niveau du haut de plage et des sommets (crête) des dunes bordières (fig. 7). Ces niveaux d'accrétion sont interrompus par quelques stades d'érosion observés en particulier au niveau des siffle-vents et au niveau de la dépression inter-dunaire qui constitue un grau de communication entre la lagune (Sabkhet Ech Charquia) et la mer (zone I) (fig. 7).

Au niveau de la zone I, la crête des avant-dunes marque une variation altimétrique négative de l'ordre de -0.4 à -1.2 m avec une accrétion du haut de plage de l'ordre de 0.8 à 1.2 m.

Au niveau de la zone II, nous avons enregistré un abaissement altitudinal, de l'ordre de 80 cm en moyenne au niveau des avant-dunes sur une distance d'environ 300 m. Néanmoins, la majeure partie de cette zone a bénéficié d'un exhaussement du haut de plage par accumulation du sédiment provenant du large sous l'action de la houle oblique de direction nord-est et déplacé par déflation par les vents dominants du secteur Nord-Est vers la racine dunaire permettant ainsi l'édification du nouveau bourrelet de haut de plage.

Au niveau de la zone III, nous avons enregistré une accumulation de sédiments de l'ordre 20 cm, en front de la murette permettant la formation d'un bourrelet de haut de plage.

Au cours de cette période, la racine dunaire a montré une stabilité assez importante (zones colorées en blanc). Le sommet de la dune, bien fixé par l'oyat et l'agropyrum n'a connu aucune évolution. Seul le haut de plage a subi un exhaussement. Au niveau du secteur central (zone II), les anciennes déflations, ne sont ré-ouvertes à l'occasion de cette tempête, même si localement la crête a connu un abaissement de l'ordre de 40 à 80 cm en moyenne.

D'où sur l'ensemble du site d'étude, nous avons enregistré, au niveau du cordon des dunes bordières, une accumulation de l'ordre de  $+0.89 \text{ m}^3/\text{m}^2 \pm 0.5$  et une perte de sédiments de l'ordre  $-0.65 \text{ m}^3/\text{m}^2 \pm 0.5$ . Au niveau de la plage, une perte de l'ordre de  $-0.07 \text{ m}^3/\text{m}^2 \pm 0.5$  et un gain de  $+1.9 \text{ m}^3/\text{m}^2 \pm 0.5$ , ont été enregistrés. D'où l'obtention d'un budget sédimentaire positif de l'ordre de  $+2.79 \text{ m}^3/\text{m}^2 \pm 0.5$  sur la totalité du site d'étude.

### 3. Suivi de l'évolution intra-saisonnière de la plage aérienne (juin 2005-septembre 2005)

#### Evolution transversale

Cette évolution est mise en évidence pour la période qui s'étale de juin 2005 à septembre 2005 (fig. 8).

La morphologie du profil P1 montre l'existence d'une dépression (bâche) entre la berme et la dune (fig. 8-A). D'où la pente calculée entre le pied de dune et la berme est de l'ordre de 0.75 %. Cette morphologie particulière ressemble à celle décrite par Augustinus *et al.* (1990), sur les plages du golfe de Beauduce, Suanez et Provansal (1993), sur celles de Piémanson et de Napoleons et Sabatier *et al.* (2007) sur le site de Rousty en France.

Au niveau de la zone I, le calcul du bilan sédimentaire sur le profil P1 (fig. 8-A) indique un gain en sédiment équivalent à  $4.5 \text{ m}^3/\text{m}$ . Cet engraissement se traduit par une avancée du front de dune estimée à 1.4 m/an.

Au niveau de la zone II, les profils P2 (fig. 8-B) et P3 (fig. 8-C) montrent une morphologie ressemblante à celle de P1 sauf que les pentes ainsi calculées entre le pied de dune et la berme sont moins faibles que celles calculées sur P1. Elles sont de l'ordre de 0.56 % sur P2 et 0.51 % sur P3.

A ce niveau, le cordon des avant-dunes a enregistré un gain en sédiments de l'ordre de 11 et 5  $\text{m}^3/\text{m}$  respectivement sur les profils P2 et P3. Cet engraissement se traduit par une avancée du front de dune égalant 0.9 m/an. D'autre part, le budget enregistré au niveau du P2 est beaucoup plus important que celui calculé au niveau de P3.

Le profil P4, montre une morphologie du haut de plage relativement ressemblante à celle observée sur P1, P2 et P3, mais la pente ainsi calculée entre le haut de plage et la berme de l'ordre de 2.5 % est considérée relativement importante par rapport à celles calculées au niveau des profils P1, P2 et P3.

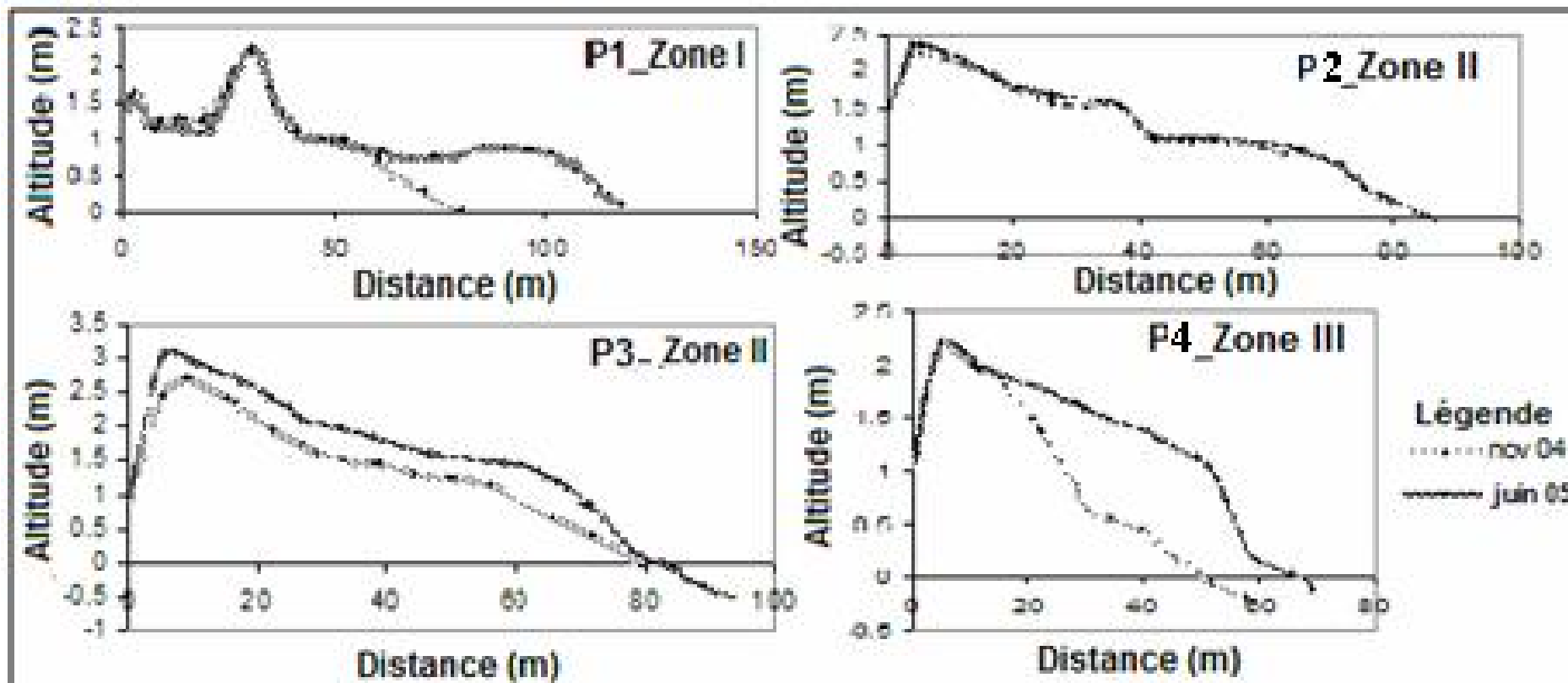
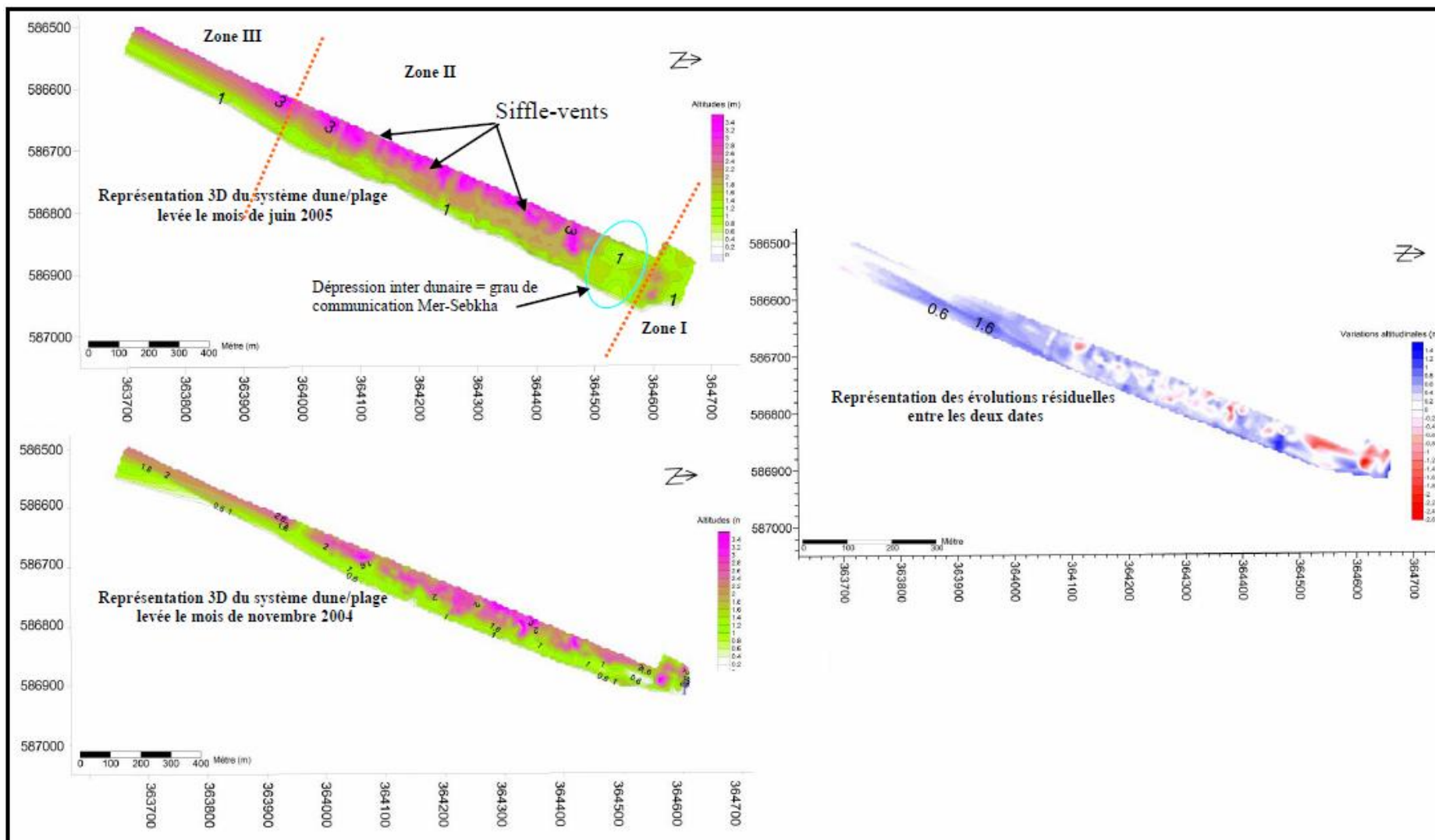
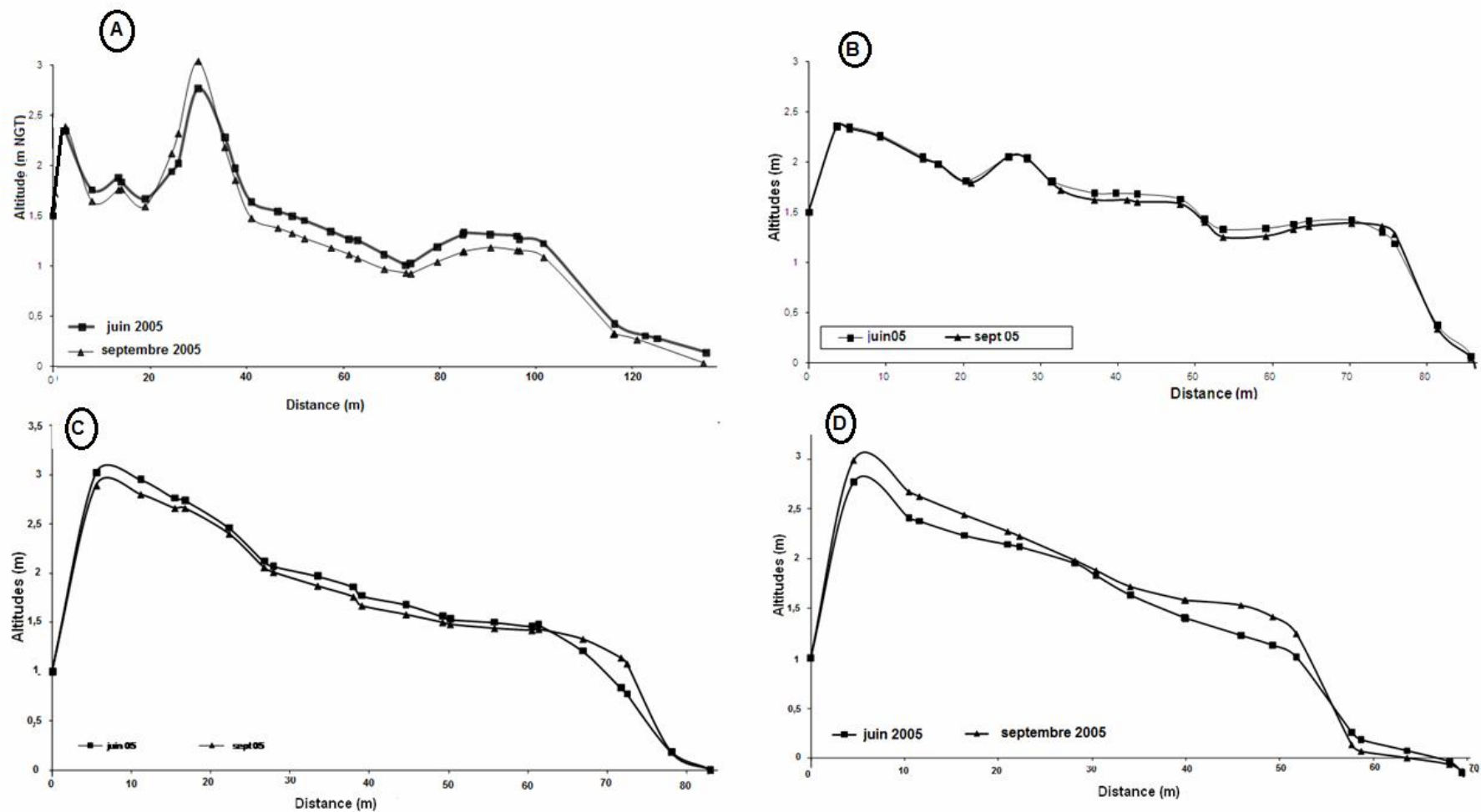


Fig. 6 : Evolution saisonnière du profil dune/plage au niveau des trois zones entre novembre 2004 et juin 2005



**Fig. 7 :** Représentation des MNT et des évolutions résiduelles entre les mois de novembre 2004 et juin 2005 utilisant les calculs différentiels des volumes afin de visualiser les principales zones de changement morphologiques. Les zones en rouge sont les zones d'érosion et les zones en bleue sont les zones d'accrétion et les parties blanches représentent les zones où l'évolution topographique n'est pas considérée.



**Fig. 8 :** Evolution intra-saisonnière du profil dune/plage au niveau des trois zones entre juin 2005 et septembre 2005 : A- évolution de profil P1 situé au niveau de la zone I ; B et C- évolution des profils P2 et P3 situés au niveau de la zone II ; D- évolution de profil P4 situé au niveau de la zone III.

### Bilans sédimentaires

La comparaison des relevés de septembre 2005 et juin 2005 ne montre pas une variation morphologique majeure tout le long du cordon dunaire (fig. 9).

Au niveau de la zone I, nous avons enregistré une évolution altimétrique positive de l'ordre de 80 cm en moyenne au niveau de la crête des avant-dunes ainsi qu'au niveau du pied de dune. Ce résultat est effectif de la dérive littorale de direction dominante Nord-Est et des vents de mer de direction Nord-Est qui ont permis le transport par déflation du matériel sableux sur une certaine distance et l'ont déposé au profit du haut de plage.

Au niveau de la zone II, on constate une légère érosion sur l'ensemble de la plage tournée vers l'Est. Les sédiments viennent s'accumuler à la pointe des avant-dunes d'où une légère évolution altimétrique positive de l'ordre de 40 cm en moyenne. En revanche, on note une érosion importante de l'ordre de 60 cm au niveau de la dépression inter-dunaire liée au piétinement intense des estivants pendant la période estivale.

Au niveau du secteur sud, on constate une érosion traduite par un abaissement altitudinale de l'ordre de 20 à 40 cm en moyenne tout le long du profil de la plage. Cette érosion semble être liée à l'action du piétinement intense pendant l'été.

Enfin, la racine dunaire ainsi que la plage ne connaissent aucun recul durant cette période. Cette situation est confirmée par les profils transversaux décrits précédemment. Pour autant, aucun épisode tempétueux ni submersion marine ne sont venues menacer la stabilité de l'édifice sédimentaire.

Les budgets sédimentaires calculés au cours de cette période estivale montre que le cordon des avant-dunes a bénéficié d'un gain de sédiment de l'ordre de  $+0.44 \text{ m}^3/\text{m}^2 \pm 0.5$  suivi d'une perte de l'ordre de  $-0.23 \text{ m}^3/\text{m}^2 \pm 0.5$ , alors qu'on a enregistré un gain faible de l'ordre de  $+0.01 \text{ m}^3/\text{m}^2 \pm 0.5$  et une perte de l'ordre de zéro  $\text{m}^3/\text{m}^2$  au niveau de la plage. En conclusion, sur la totalité du site d'étude, nous avons enregistré un budget sédimentaire excédentaire de l'ordre  $+0.44 \text{ m}^3/\text{m}^2 \pm 0.5$ .

### CONCLUSION

L'étude réalisée sur la dégradation de la plage de Korba montre un intérêt particulier par rapport à d'autres secteurs du littoral Tunisien, cas de la plage de Mahdia situé au littoral oriental à 120 km de Korba vers le sud, qui est plus dégradée avec un apport de sédiments assez faible (Amrouni et al., 2007, Amrouni et Abdeljaouad, 2009). Une approche méthodologique a été développée et basée sur la génération des MNT à partir des levés topographiques pour la surveillance de la dynamique des avant-dunes.

Les MNT résiduels 3D obtenus permettent de quantifier l'évolution saisonnière et intra-saisonnière des avant-dunes et de la plage. En effet, cette étude confirme l'utilité de cette approche dans le but de prévoir l'évolution à court et à long terme des avant-dunes par une série d'observations de terrain intra ou inter saisonnières.

Le suivi quantitatif en 3D des avant-dunes a particulièrement pour objectif l'évaluation de la capacité d'adaptation du cordon dunaire à tout changement d'origine naturelle ou anthropique. En fonction de l'évolution de tout le dispositif, qui se manifeste soit par une dégradation soit par un enrichissement en sable, il est donc nécessaire de prendre des mesures préventives pour assurer la protection de ce littoral. Les MNT résiduels obtenus suite à un ensemble d'observations répartis dans l'espace et dans le temps, constituent donc une base d'informations spatio-temporelles nécessaires et importante pour le suivi de la dégradation du littoral d'une manière générale. L'exploitation des résultats fournis par les MNT résiduels, permet de circonscrire les zones fragiles et sensibles à l'érosion. Ceci constitue une approche éventuelle d'optimisation et de réhabilitation des dunes bordières par la mise en place d'un dispositif de protection et de conservation de celles-ci. Cette approche pourrait se trouver améliorée avec un découpage saisonnier strict et une modélisation des échanges entre les parties marines (Shallow) et terrestres, ainsi que l'intégration de la bathymétrie des petits fonds, des effets de la houle et des apports solides.

Dans le cas du site de la plage de Korba, nos résultats montrent que la variation de la hauteur des avant-dunes est de l'ordre d'une dizaine de centimètres. L'estimation du volume en accretion et en érosion au niveau du cordon dunaire peut être envisageable avec des levés plus denses. En effet, le MNT résiduel reste un moyen fiable pour représenter et exprimer l'évolution morphosédimentaires des dunes. Cette fiabilité dépend de certaines précautions à prendre au niveau des levés et des traitements en considérant que la soustraction de deux MNT absorbe l'erreur absolue répartie d'une manière homogène sur chaque campagne.

### Remerciement

Nous tenons à remercier Monsieur François Sabatier, Maître de conférence au Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géoscience de

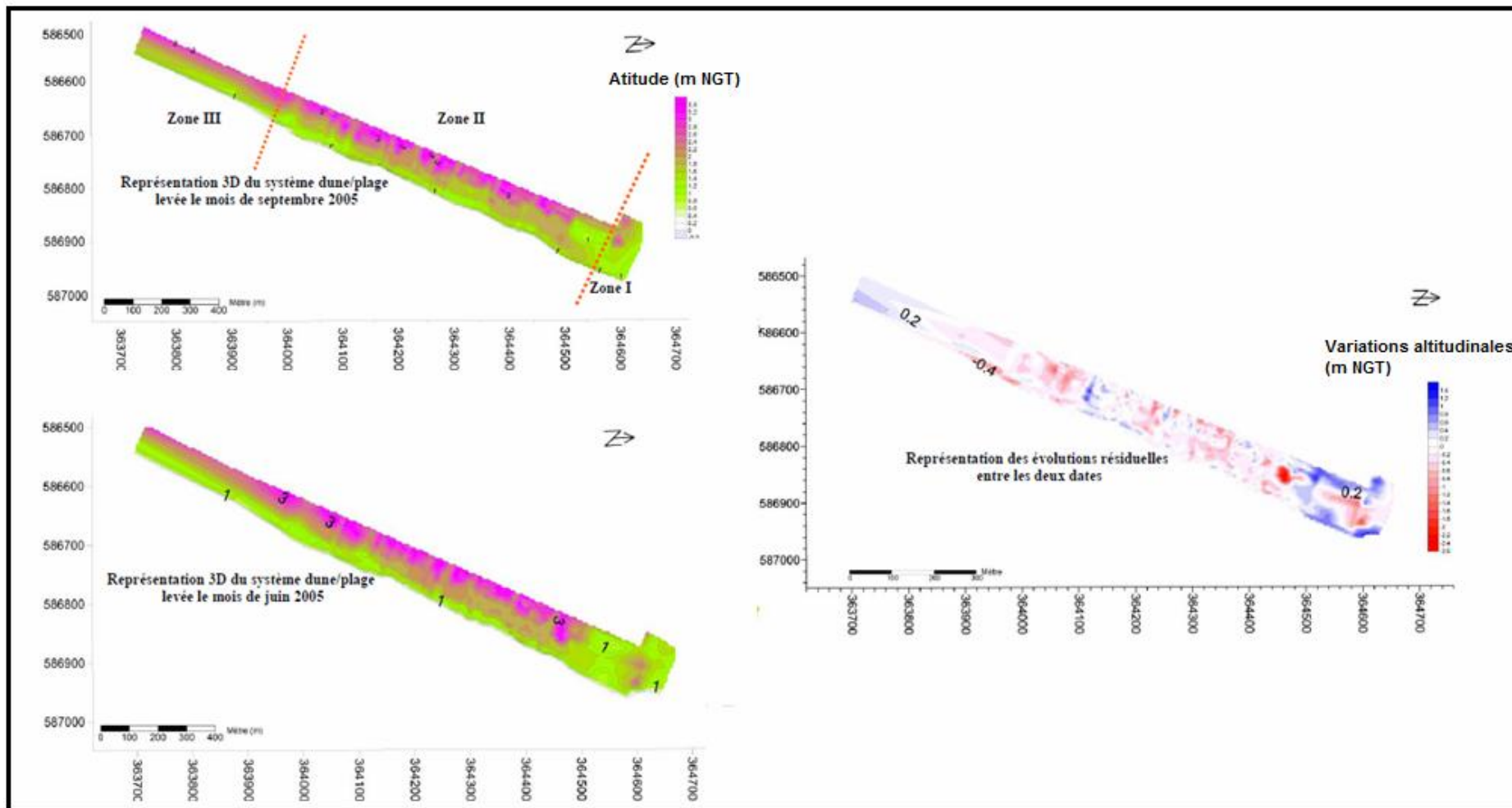


Fig. 9 : Représentation des MNT et des évolutions résiduelles entre les mois de juin 2005 et septembre 2005 en utilisant les calculs différentiels des volumes afin de visualiser les principales zones de changement morphologique.

l'Environnement, pour ses remarques et suggestions qui ont permis d'améliorer le manuscrit. Nous remercions aussi tous ceux qui nous ont accompagnés dans les missions de terrain, en particulier, M. Hedi Ben Romthan et M. Hichem Trabelsi.

## BIBLIOGRAPHIE

- Amrouni Bouaziz O., Souissi R., Barusseau J.P., Abdeljaouad S., Pauc H., and Certain R. (2007). Grain-size and morphodynamical state of the bay-of-Mahdia shoreface (Tunisia). Contribution to the assessment of Coastal sensitivity. *GeoEcoMarina*, n°13, p. 5-19.
- Amrouni O., Abdeljaouad S., (2009). Etude de la dynamique sédimentaire spatio-temporelle à court terme du système dune/plage de la côte nord de Mahdia (Sahel Tunisien) : rôle des agents de transport et de granulométrie. *Revue Méditerranéenne de l'Environnement* 3, p. 1-15
- Andrew B.D., Paul A. Gares, Geoffrey D. Colby, (2002), Techniques for GIS modelling of coastal dunes, *Geomorphology*, 48, 289-308.
- Augustinus P.-G.-E.-F., Leaven M.-P., Ruwuwe J., de Vries J.-B., (1990). Dune formation and dune degradation in the Camargue, France, *Littoral 90*, 1er Symposium International EUROCOAST, Marseille, p. 115-119.
- Baccar L., Moussa M., Ben Hamaza C. (2001). Conservation des zones humides littorales et des écosystèmes côtiers du Cap Bon, Partie relative à : l'hydraulique des zones humides de Maamoura, Tazarka et Korba, Rapport de diagnostic des sites, 106 p.
- Ben Hammouda M.F., 2008. *Approche hydrogéochimique et isotopique des systèmes aquifères côtiers du Cap Bon. Cas des nappes de la côte Orientale et d'El Haouria*. Tunisie, thèse de Doctorat, Institut National Agronomique de Tunisie, 290 p.
- Bowen A.J., Inman, D.L., and Simmons, V.P., (1980). Simple models of nearshore sedimentation: Beach profiles and longshore bars. *Costline Can.*, 80 (10), p. 1-11.
- Carter R.W.G., (1988), *Costal Environnements*, Academic Press, London, 617 p.
- Certain R., (2002), *Morphodynamique d'une côte sableuse microtidale à barres : le golfe de Lion (Languedoc- Roussillon)*, Thèse, université Perpignan, 199 p.
- Charleux-Demargne J., (2001), *Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'hydrologie Application à la caractérisation du régime des crues des bassins versants*. Thèse, Univ.Marne-La-Vallée, 240 p.
- Demba M., Pennober G., Creuseveau J.G., THIAM A., OULD SENHOURY A., LEVOY F., (2006), *Préservation des défenses naturelles du littoral mauritanien: démarche de l'Observatoire du Littoral autour du suivi du cordon dunaire*, Université de Nouakchott, Interactions Nature-Société, analyse et modèles.UMR6554 LETG, La Baule, 1-7.
- Durand P., (1999), *L'évolution des plages de l'Ouest du Golfe du Lion au XX<sup>ème</sup> siècle*, Unpublished Thesis, Université Lumière- Lyon 2, 462 p.
- E.R.I., (2000), *Plan d'occupation des plages, quatrième tranche, plage de Korba*, rapport de phase I, APAL, 40 p.
- Ferrer P., (2010), *Morphodynamique à multi-échelles du trait de côte (prisme sableux) du golfe du Lion depuis le dernier optimum climatique*, Thèse, Université de Perpignan Via Domitia, 385 p.
- Hesp P., (2002), Foredune and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, 48. pp. 245-268.
- Jaballah M., (2003), *Approche pour la réhabilitation des dunes bordières de la plage de Korba*, DEA, Faculté des Sciences de Tunis, 128 p.
- Oueslati A., (2004), *Littoral et aménagement en Tunisie* ; Ed. ORBIS Impression; Tunis 2004, 534 p.
- Paskoff R., (1983), *Les dunes littorales*. « La recherche », volume 20. N° 212, 888-889.
- Psuty N.P., and Silveira T.M., (2009), Trend in foredune crestline displacement, Fire Island National Seaschore, New York, USA, 1976-2005. *Journal of Coastal Research*, SI 56 (Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Coastal Symposium), 15-19
- Pye K., (1990), Physical and human influences on coastal dune development between Ribble and Mersey estuaries, orthwest England . In NORDSTROM, K.F. et al (ed): *Coastal dune. Forms and process*. John Wiley & Sons. London. pp. 339-359.
- Rebai N., SLAMAT., et TURKI M.M., (2007), *Evaluation de différentes méthodes d'interpolation spatiale pour la production d'un MNT à partir des données topographiques dans un SIG*. *Revue XYZ*, n° 110, v, 29, 23-32.
- S.T.E.G. (2009), Société Tunisienne de l'Électricité et du Gaz, Réalisation d'une ligne électrique aérienne 90 KV/Sidi Daoud, Menzel Temime, étude d'impact sur l'environnement, 65p.
- Sabatier F., Chaibi M., Chauvelon Ph., (2007). Transport éolien par vent de mer et alimentation sédimentaire des dunes de Camargne, *Méditerranée*, N°108, p. 83-90.
- Sonu C.J., (1973). Three-dimentional beach changes. *Journal of Geology*, 81, p.42-64.
- Suarez S., Provansal M., (1993). Étude des modifications morpho-sédimentaires du littoral à l'embouchure du Rhône : plages de Piémanson et Napoléon. *Méditerranée*, 3-4, p.

- Suanez S., Stéphan P. (2006) - Forçages météorologiques et dynamique morphosédimentaire saisonnière des cordons dunaires. Exemple de la baie de Saint-Michel-en-Grève (Côtes d'Armor, Bretagne), *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n° 2, p. 91-110.
- Suanez S., Dehouck A., Stéphan P., Fichaut B., Cuq V. (2005) – *Estimation par traitement statistique des marges d'erreur inhérentes à la mesure tachéométrique en géomorphologie*, Séminaire de l'UMR LETG 6554 CNRS : Instrumentation et mesures de terrain, 30 janvier 2004 à Rennes 2 (<http://letg.univnantes.fr/SeminaireUMR30012004MP.pdf>), 1-10. 43-56.
- Vallejo I.; Ojeda J. and Malvarez G., (2006), Characterization and classification of the beach-dune system of the Doñana National Park, Southern Spain. *Journal of Coastal Research*, SI 48 (Proceedings of the 3rd Spanish Conference on Coastal Geomorphology), 112-117. Las Palmas de Gran Canaria – Spain, ISSN 0749-0208
- Yahyaoui Z., (2006), *Eventuelle approche pour la réhabilitation des dunes bordières le long de la plage de Korba*, DEA, Faculté des Sciences de Tunis, 104 p.
- Zâara Ch., (1996). *Etude de la stabilité du littoral du golfe de Hammamet. Impact de la dynamique sédimentaire sur la morphologie côtière*, D.E.A., 96 p.