



Impact morpho-sédimentaire de la tempête du 6 janvier 2014 sur le cordon dunaire de la plage de Diabet à Essaouira (Maroc)

Morpho-sedimentary impact of the storm of January 6, 2014 on the dunes at the beach of Diabet in Essaouira (Morocco)

Driss DOGHMI¹ & Mostafa OUADRIM²

Abstract: The 6th of January 2014 recorded an exceptional storm that affected the Moroccan Atlantic coastline. This episode caused great damage to the natural environment by the erosion of coastal dunes and damage to the port infrastructure. The impact of this storm is very determining on the morpho-sedimentary evolution of the sandy beaches, because its action intervenes in the changes of the quotation line in the short term. The Diabet dune ridge plays the role of the first natural rampart against the marine submersion of a socio-economic area that is the tourist resort of Mogador. In addition, this element protects rear areas, which are home to a significant flora and fauna. The question of the erosion of the dune belt of Diabet and the risks of submersion no longer arises in simple environmental terms, but imposes political decision-making with which the managers responsible for coastal development must draw up a plan of action rehabilitation and preservation of the coastal dune of Essaouira.

Keywords: dune, sediment balance, DSAS, erosion, progradation, vegetation

Résumé : Le 6 Janvier 2014 a enregistré une tempête exceptionnelle qui a touché le littoral atlantique marocain. Cet épisode a provoqué de grands dommages sur les milieux naturels par l'érosion des dunes bordières et des dégâts au niveau des infrastructures portuaires. L'impact de cette tempête est très déterminant sur l'évolution morpho-sédimentaire des plages sableuses, car son action intervient dans les changements du trait de côte à court terme. Le cordon dunaire de Diabet joue le rôle de premier rempart naturel contre la submersion marine d'un espace à fort enjeu socio-économique qui est la station touristique de Mogador. En plus, cet élément protège des zones arrière qui abritent un patrimoine floristique et faunistique important. La question de l'érosion du cordon dunaire de Diabet et des risques de submersion ne se pose plus en simples termes environnementaux, mais impose des prises de décision politique avec lesquelles les gestionnaires chargés de l'aménagement du littoral doivent élaborer un plan d'action de réhabilitation et de préservation de la dune bordière du littoral d'Essaouira.

Mots-clés : cordon dunaire, bilan sédimentaire, DSAS, érosion, progradation, végétation

INTRODUCTION

Les tempêtes océaniques qui menacent souvent le Maroc sont dues principalement à des dépressions atmosphériques et des anticyclones qui déterminent la direction des vents et des vagues. Durant 335 jours par an, les houles qui touchent les côtes marocaines ne dépassent pas 3 mètres de haut et possèdent en moyenne une période de 11 secondes. Plus précisément, à raison de 218 jours, la période est comprise entre 9 et 12 secondes ; et les houles de plus de 16 secondes apparaissent en moyenne 3 jours. De manière générale, les fortes houles sont associées à des périodes supérieures à 15 secondes. En hiver, les vents d'Ouest engendrent la houle au niveau des Açores qui atteint le littoral après un voyage de 72 heures. Lors d'une tempête, les vagues sont alors particulièrement agressives et le transport sédimentaire est maximal. La hausse transitoire du niveau de la mer permet aux houles de se briser sur la plage et d'éroder le cordon dunaire. De plus, ces épisodes rares et violents s'accompagnent de submersions marines, qui peuvent potentiellement causer des dégâts aux infrastructures humaines.

1 : Docteur en géographie
Laboratoire : Dynamique des espaces et des sociétés (LADES)
Département de géographie
Faculté des lettres et des sciences humaines – Mohammedia
Université Hassan II de Casablanca
Auteur : drissdoghmi@yahoo.fr

2 : Enseignant-chercheur

Le 6 Janvier 2014 a enregistré une tempête exceptionnelle qui a touché le littoral atlantique marocain. Son action se manifeste par un transfert sédimentaire énorme entre les trois compartiments du système côtier (dune, haut-plage et avant-côte). Ceci met en évidence le rôle capital de la dune bordière dans le maintien de l'équilibre du système littoral.

Le cordon dunaire de Diabet, situé au sud de l'embouchure de l'oued Ksob, assure une protection naturelle de son arrière-pays à fort enjeu socio-économique. En plus, cet élément protège des zones arrière, qui abritent un patrimoine floristique et faunistique très important. L'impact morpho-sédimentaire de cet épisode de forte énergie se concrétise aussi par la formation de brèches dans la dune par lesquelles les eaux marines envahissent alors les milieux naturels situés en arrière. Ces formations sont le résultat du sapement de la dune par la marée de tempête submergeant complètement le haut de plage.

La question du bilan sédimentaire sera traitée en privilégiant l'étude des processus morpho-sédimentaires agissant à l'échelle de l'épisode du 6 janvier 2014 et son impact géomorphologique sur le cordon dunaire de la plage de Diabet à Essaouira. Il s'agit d'analyser son action sur le fonctionnement et l'évolution de ce cordon. Les conditions de réponse morphologique du système plage/dune face aux forçages hydrodynamiques sont analysées à différentes échelles spatio-temporelles par deux approches méthodologiques complémentaires visant à évaluer le degré d'érosion du cordon dunaire suite à cette tempête. Dans un premier temps, les vitesses de recul du front dunaire matérialisé par la végétation ont été mesurées par analyse photogrammétrique à l'aide du programme DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*). Dans un second temps, un suivi topo-morphologique par tachéomètre du secteur d'étude selon trois radiales a été effectué avant et juste après cet épisode exceptionnel pour évaluer l'impact morpho-sédimentaire dû à cette tempête ainsi que des mesures étalées sur une année après pour savoir si l'équilibre sédimentaire de la dune se rétablit ou non.

CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE DU SITE ÉTUDIÉ

Le littoral de Diabet se présente sous la forme d'une petite baie, longue de 2,5 Km, et largement ouverte vers le nord et le nord-ouest. Elle est limitée au nord par l'embouchure de l'oued Ksob, à l'est par la station touristique de Mogador et à l'ouest par l'océan Atlantique.

Edifié durant le Quaternaire récent comme la plupart des dunes du littoral d'Essaouira, la plage de Diabet est caractérisée par un complexe dunaire massif, qui longe du côté du continent, suivant une direction Nord-Sud, une zone arrière de dépression au contact direct de la station touristique de Mogador. Le cordon dunaire culmine à près de 8 mètres d'altitude (NGM), caractérisé par une plage sableuse de morphologie générale dissipative (d'après la classification de WRIGHT & SHORT, 1984). A basse mer, l'estran en faible pente (0,8 à 1%) est dégagé sur une distance intertidale de 200 à 250m.

Lors des grandes houles, la mer taille la dune en falaise vive d'une hauteur moyenne de 6 à 8 m et la végétation se trouve par conséquent en position avancée au niveau du trait de côte. De plus, en certains endroits, on assiste à la formation de brèches par lesquelles la mer communique avec la zone arrière en dépression lors de la marée haute par la formation de marais. Celui-ci constitue des biotopes naturels d'une richesse floristique et faunistique importante.



Figure 1 : Carte de localisation du cordon dunaire de la plage de Diabet à Essaouira.

Jusqu'en 2012, date à laquelle notre travail de recherche a débuté, il n'existait aucune étude quantitative exhaustive sur la morpho-dynamique du cordon dunaire de la plage de Diabet malgré le fort enjeu socio-économique qui se cache derrière (La station touristique de Mogador). De même, il n'y a aucune étude d'expertise pour élaborer un schéma de protection de ce cordon et de sa restauration malgré le risque naturel qui menace : Ce cordon constitue le point de convergence de la houle Nord-Ouest réfractée sur l'île de Mogador et détournée vers la plage de Diabet d'une part, et d'autre part la forte déflation éolienne du côté de la flèche sableuse près de l'embouchure de l'oued Ksob, qui s'avance progressivement sur la végétation. La limite de végétation est clairement identifiée sur le versant externe de la dune très redressé (figure 1). Cet abrupt subvertical qui correspond à une falaise d'érosion dunaire, illustre bien la tendance érosive de cette plage (photo 1).



Photo 1: Falaise dunaire entaillée par la marée de la tempête (Clichés D.DOGHMI 10/01/2014).

METHODES ET MATERIELS UTILISES

Deux approches complémentaires sont présentées et permettent de quantifier le bilan sédimentaire entre les différentes composantes du système côtier, en particulier la dune bordière et le haut-plage :

Une première approche cartographique retrace la cinématique du front dunaire matérialisé par la végétation a été réalisée par l'analyse diachronique à partir de trois missions de photos aériennes (1973, 2010 et 2014) à des échelles comprises entre 1/7500 et 1/20.000 (Tableau 1). Après avoir numérisé à très haute résolution les photos aériennes, celles-ci ont été corrigées géométriquement en utilisant la méthode de saisie de points d'amers et en prenant comme référence la mission la plus ancienne. Ce traitement permet d'éliminer les déformations liées aux effets du relief et à l'angle de prise de vue.

Tableau 1 : Liste des missions aériennes utilisées pour l'analyse de la cinématique du front dunaire de Diabet à Essaouira.

<i>Date de la mission</i>	<i>Echelle</i>	<i>N° Clichés</i>	<i>Source</i>
Essaouira 1973	1/20.000	(02-01) (02-03) (02-5)	ANCFCC
Essaouira 2010	1/20.000	(B16-087-002)(B16-079-079) (B16-080-003)	ANCFCC
Essaouira 2014	1/7500	(B05-02)(B05-04)(B06-02)(B07-02)	ANCFCC

ANCFCC : Agence Nationale de la Conservation Foncière du Cadastre et de la Cartographie-Rabat-Maroc.

Pour quantifier et analyser les mécanismes à l'origine du recul de ce cordon, il était important de réaliser une étude de la cinématique du front dunaire, matérialisé soit par la pente entre le haut-plage et la dune, soit également par la végétation. Cette dernière sera choisie comme ligne de référence pour le traitement des photos aériennes, puisqu'elle assure la stabilité du cordon face aux conditions hydro-dynamiques marines locales. Pour chaque photo, la limite de la végétation a été tracée au format "shapefile" sur le logiciel Arc GIS 9.1. Toutes ces lignes ont été ensuite exportées dans une seule et même géodatabase contenant également des informations sur la date de chaque ligne de végétation afin de pouvoir effectuer des calculs grâce à l'outil DSAS

(*Digital Shoreline Analysis System*) . L'utilisation de cette extension nécessite de définir une ligne de base fictive, une longueur pour les transects (350m), ainsi que l'espacement entre eux (50m) projetés dans le même système géographique. Le DSAS génère automatiquement des transects (111 transects) perpendiculaires au front dunaire et calcule les écarts entre les différents traits correspondants aux différentes missions aériennes.

Par la suite, les tables attributaires obtenues renferment plusieurs critères dont nous nous intéressons aux plus importants, qui sont définis comme suit :

- ❖ Shoreline Change Enveloppe (SCE) : Cette option permet de calculer la distance entre le trait de côte le plus éloigné et le plus proche de la ligne de référence (Baseline). Cette valeur correspond à l'amplitude des fluctuations de la végétation sans tenir compte des dates.
- ❖ Net Shoreline Movement (NSM) : Cette option permet de calculer la distance entre la limite la plus récente et la plus ancienne.
- ❖ Méthode des points extrêmes ou End Point Rate (EPR) : Cette valeur correspond au taux moyen d'évolution par an entre deux positions du front dunaire pour deux dates différentes.

$$EPR = NSM / \text{nombre d'années}$$

Une deuxième approche expérimentale basée d'abord sur l'analyse des impacts morphogéniques de la tempête du 6 janvier 2014 sur le système plage/dune de la plage de Diabet. Pour ceci, quatre campagnes de mesures de profils topographiques de plage-dune ont été effectuées. Ces mesures pré- et post-tempête sont réalisées le long de trois radiales réparties sur le cordon dunaire de Diabet au moyen d'un théodolite (Photos 2 et Tableau 2).

Du nord au sud, trois profils plage-dune (P1, P2 et P3) choisis sur le cordon dunaire de la plage de Diabet sur une distance moyenne «cross-shore» de 80 à 90 m. Le premier profil a été effectué à 150 m au sud de l'embouchure de l'oued Ksob et près d'une brèche. Le profil 2 a été effectué à 100m au sud du profil 1, au niveau du centre de la baie de Diabet, tandis que le profil 3 a été placé à 150 m au sud de P2.

Cette étude a pour but d'analyser et de quantifier les phénomènes d'érosion, notamment de submersion marine, liés à la disparition de la dune et d'apporter des mesures de protection aux gestionnaires.



Photo 2 : Suivi expérimental des levés topographiques par tachéomètre des radiales plage/dune du cordon dunaire de Diabet-Essaouira (Clichés L.HOUARI, 5/2/2014).

Tableau 2 : Coordonnées des profils plage-dune étudiés.

	X	Y	Z(m)	Distance (m)	Direction
Profil 1	31°28.939'	009°46.544'	8	95	NW-SE 290°N
Profil 2	31°28.916'	009°46.549'	7	80	NW-SE 270°N
Profil 3	31°28.737'	009°46.582'	7,6	80	NW-SE 280°N

Ensuite une quantification des changements morphologiques et volumiques selon une approche tridimensionnelle (3D) par méthode d'interpolation. Etant donné que, les profils bidimensionnels de plage réalisés par l'instrument de théodolite permettent de suivre uniquement la variabilité longitudinale des plages : l'altitude en fonction de la distance suivant une fonction $y = f(x)$. Toutefois, une étude en trois dimensions (x, y, z) s'avère très utile, puisqu'elle permet de suivre d'une part l'évolution des formes sédimentaires (berme, barre,...) à l'échelle tridimensionnelle, non aperçues par l'approche 2D, d'autre part cette approche tient compte des transferts sédimentaires sur le plan transversal. Ainsi, une telle approche va permettre de localiser les zones érodées et celles engraisées et l'observation de l'extension du changement morphologique (ANDREWS *et al.*,

2002 ; STEPANIAN, 2002 ; RUGGIERO *et al.*, 2005). De plus, cette méthode permet le calcul des volumes sédimentaires entre deux modèles numériques de terrain (MNT) successifs par l'obtention d'un modèle différentiel sous l'application du logiciel Surfer 9.

Les données topographiques de différentes missions de mesures sont traitées dans ce logiciel suivant des grilles d'interpolation. Ces dernières sont calculées à partir des données, avec un même espacement avec une densité de 20 m pour que la comparaison soit possible. La comparaison entre deux missions de levés est possible en réalisant un MNT combinant deux dates, c'est-à-dire en soustrayant le plus récent au plus ancien pour obtenir une carte d'évolution de la topographie. Cette opération permet la quantification et son évolution dans le temps. Les cartes MNT sont soumises à la précision de (0,05 m) tandis que l'incertitude liée au calcul des volumes est obtenue en multipliant cette précision par l'aire des MNT : une incertitude de +/- 2850 m³.

HISTORIQUE ET FACTEURS ASSOCIÉS AUX TEMPÊTES

Exemple de la tempête du 6 janvier 2014

La tempête du 6 janvier 2014 résulte d'une forte houle qui s'est déchainée sur le littoral atlantique marocain. Ce phénomène est dû essentiellement à une dépression atmosphérique au large de l'Atlantique, associée à des vents violents variant de 60 à 100 Km/h de direction NW (figure 2). Ceci a engendré des vagues géantes atteignant 6 à 7 mètres, avec des pics par endroit de 13m. Ces valeurs importantes s'expliquent aussi par la coïncidence de cette houle avec une marée haute de 3 à 3,5 mètres.

L'analyse des conditions météo-atmosphériques relatives à la tempête du 6 Janvier 2014 a été réalisée à partir de données acquises auprès de la station météorologique nationale.

Les processus physiques mis en jeu lors de la tempête du 6 janvier 2014 sur le littoral atlantique en général et sur le littoral d'Essaouira en particulier, sont liés principalement à l'action de la pression atmosphérique et du vent sur le plan d'eau :

-La chute de la pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau. C'est le phénomène de baromètre inverse. Une diminution de 1hPa équivaut approximativement à une élévation de 1cm du plan d'eau ;

-Le vent a un double effet sur le plan d'eau d'abord, il est à l'origine de l'agitation du plan d'eau et de la formation des vagues dont les caractéristiques (hauteur, période et secteur de provenance) sont directement liées à celles du vent et au fetch du bassin maritime atlantique. Ensuite, il exerce une contrainte à la surface de l'eau en général par une modification du niveau du plan d'eau statique (surcote ou décote) et des courants ;

-Les vagues générées au large par le vent, se propagent vers la côte et déferlent. Elles transfèrent alors leur énergie sur la colonne d'eau, ce qui provoque une surélévation moyenne du niveau de la mer (le « wave set-up », ou « set-up », ou surcote liée aux vagues)

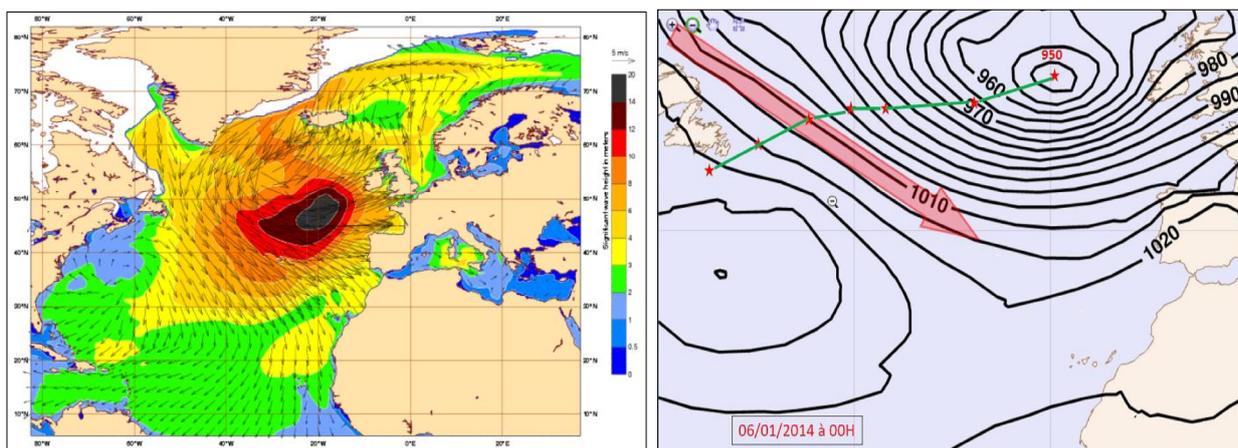


Figure 2 : Analyse de la hauteur et de la direction de propagation des vagues (06/01/2014 à 00H)
(Source : Rapport du Ministère de l'équipement, 2014).

Historiquement, en ce qui concerne les hauteurs exceptionnelles qui ont marqué le littoral marocain, on cite la tempête de 1937 qui a frappé l'extrémité de la grande jetée de Casablanca avec un maximum enregistré de 10,4 m. Le 28 décembre 1951, une houle régulière de 6,7 m de creux immobilise la navigation portuaire. Le 21 février 1966, une mer déchainée ébranle les ports atlantiques (Safi, Essaouira, Agadir) et se distingue par des vagues de direction ouest-nord-ouest, d'amplitude allant de 9 à 15 m, selon des périodes pouvant atteindre 18 secondes, ce qui est énorme. Ce phénomène fait suite à une vaste dépression qui a persisté pendant deux jours dans l'Atlantique nord (CHERFAOUI., 2014).

Les côtes sableuses basses sont menacées par la submersion marine lors des tempêtes durant lesquelles le niveau de la mer au rivage s'élève suffisamment haut pour qu'il y ait franchissement ou débordement du cordon littoral (CARIOLET & SUANEZ 2009). De plus, les côtes subissent les conséquences des menaces liées aux changements du climat et à l'élévation du niveau de la mer (ENM). Elles sont très vulnérables aux événements extrêmes comme les tempêtes et les cyclones (GIEC/IPCC, 2007). Le caractère exceptionnel de l'événement tempétueux du 6 janvier 2014 s'inscrit dans le contexte de l'augmentation de la fréquence des tempêtes et des submersions marines à l'échelle universelle, comme le montre la figure 3 au Québec. En effet, il résulte essentiellement de la combinaison de trois facteurs indépendants : Une surcote importante, une houle puissante et une pleine mer de vive-eau. Il est cependant très difficile d'évaluer la probabilité d'occurrence d'une telle conjonction car ce type de situation est rare.

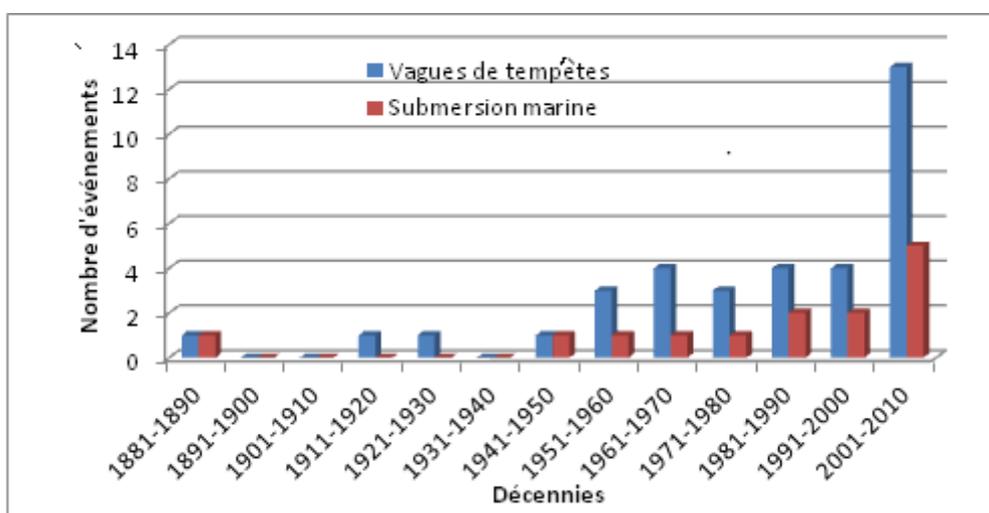


Figure 3: Augmentation de la fréquence des tempêtes et des submersions marines entre 1881 et 2010 au Québec (BERNATCHEZ. *et al.*, 2012).

Les risques vont se multiplier dans les prochaines décennies : on s'attend à enregistrer une accélération de l'ENM (0,6m ou plus en 2100), une augmentation de la température de la surface de la mer de 3°C, une intensification des cyclones, de plus fortes vagues de tempêtes, un équilibre pluie/ruissellement altéré et une acidification plus prononcée de l'eau de mer.

Concernant les projections du niveau de la mer, le quatrième rapport d'évaluation du GIEC publié en 2007 (AR4), a donné de nouvelles estimations pour l'élévation du niveau de la mer qui se situent entre 18 et 59 cm jusqu'à la fin du siècle. Ce rapport a corrigé le précédent (GIEC/IPCC, 2001) qui avait montré une plus grande incertitude entre 9 et 88 cm. Une moyenne entre les différents modèles et scénarios peut être calculée à environ 40 cm d'élévation globale du niveau de la mer. Les principaux effets physiques attribués à l'ENM qui sont couramment admis sont : une érosion côtière accrue, une submersion marine des zones topographiquement basses, une intrusion saline dans les aquifères côtiers et la salinisation des eaux douces (GIEC, 2007 ; NICHOLLS *et al.*, 2008). Au Maroc, malgré le manque de données sur l'ENM, une première estimation de ses impacts a été réalisée sur certains secteurs côtiers (NIAZI, 2007 ; KHOUAKHI, 2013).

RÉSULTATS

Analyse diachronique

L'étude diachronique du trait de côte en respectant les protocoles de correction géométrique, de géoréférencement et de traitement sous SIG a permis l'acquisition de résultats très précieux sur la cinématique du front dunaire de la plage de Diabet, matérialisé par la limite de la végétation.

Ainsi, pour mettre l'accent sur la tempête du 6 janvier, objet de cette étude, et de son impact morphogénique, on a procédé à un traitement de la cinématique de la limite de la végétation selon deux échelles temporelles différentes : une première période longue (1973-2010) de trente-sept ans, pour mieux apprécier le taux d'évolution sans tenir compte des épisodes ponctuels durant cette phase, et une deuxième échelle de temps sur une courte période (2010- 2014) y compris la tempête afin de mieux cerner son impact morphogénique. A signaler que la couverture correspondante à 2014, les prises de vue sont du mois de mars 2014 c'est-à-dire après la tempête. De plus, cet événement est le seul enregistré durant la période (2010-2014), car l'avant dernière tempête date du 04/01/2008.

Période (1973-2010)

D'après le modèle cartographique (Figure 4) de l'évolution de la cinématique du trait de côte durant la période (1973-2010), le cordon a enregistré globalement un bilan positif avec un taux moyen d'évolution d'une avancée de +0,32 m/an de la végétation et d'un gain en terme de superficie de (+1354,06 m²/an). Par ailleurs, l'évolution diffère d'un secteur à un autre, ainsi les secteurs 1 (T₁ au T₁₂), 2 (T₁₂ au T₂₉), 3 (T₂₉ au T₅₅), 4 (T₅₅ au T₅₉), 5 (T₅₉ au T₇₁), et 6 (T₇₁ au T₈₅) ont enregistré respectivement une évolution, pour le secteur 1, d'une avancée de +0,52 m/an linéaire et de +10571m² surfacique ; pour le 2 : un recul moyen de -1,78 m/an linéaire et de - 1424 m² de surface, pour le 3, une avancée moyenne de +2,48 m/an linéaire et de +114737m² de surface ; pour le 4 un recul moyen de -0,39 m/an linéaire et de -2158,5 m² de surface ; pour le 5 : une avancée moyenne de +0,59 m/an linéaire et +11990 m² de surface et pour le 6 : un recul moyen de -1,31 m/an linéaire et de -31486 m² de surface.

Période (2010 – 2014)

D'après le modèle cartographique basé sur le calcul de l'End Point Rate du front pour la période (2010-2014) (Figure 5) qui comprend l'épisode du 6 janvier, les résultats obtenus mettent en évidence le caractère morphogénique avec un bilan global d'un taux moyen de recul de l'ordre de -4,05 m/an linéaire et une dégradation, en terme de superficie de végétation, de -21941m²/an. En effet, l'analyse diachronique a montré que le trait de côte a évolué suivant 5 secteurs, mais dont deux (1 et 3) ne sont pas pris en considération puisque les valeurs d'évolution correspondantes sont incluses dans la marge d'erreur (inférieures à 10m).

Ainsi, on ne retient que les secteurs 2 et 4 caractérisés par des avancées importantes mais très localisées dans l'espace (moins de 150 m de long) et le secteur 5 caractérisé par une érosion très étendue sur 3,4 Km. Le secteur 2 (T₁₉ à T₂₃) a enregistré une progradation avec un taux moyen annuel de 8,07 m. Le secteur 4 (T₄₀ à T₄₃) a enregistré aussi une progradation de 8,93m/an. Tandis que le secteur 5, qui correspond à la plage de Diabet (T₄₃ à T₁₁₁), est caractérisé par un recul important de 6,67 m/an.

En termes de surface durant cette période, les secteurs 2 et 4 ont gagné respectivement une superficie de 6458 m² (1614 m²/an) et 5359,5 m² (1340 m²/an). Tandis que le secteur 5 a perdu une superficie de l'ordre de 9 hectares et 7 ares (2,26 ha annuel).

En termes de bilan, le trait de côte durant la période (2010-2014) a enregistré une érosion avec un taux de 4,05 m/an et la perte d'une superficie de 1,9 ha annuellement.

Période globale (1973-2014)

Les résultats obtenus à partir du modèle cartographique montrent que le cordon dunaire de Diabet, sur la période 1973-2014 (Figure 6) est caractérisé par l'alternance de phases de recul et d'avancée. Le calcul de vitesse d'évolution du trait de côte, a montré 6 secteurs majeurs d'évolution : ces tronçons 1, 2, 3, 4, 5 et 6 du cordon ont enregistré des valeurs respectives de (+0,33 m/an), (-1,38 m/an), (+1,02 m/an), (-0,43 m/an), (0,42 m/an) et (-2,55m/an). Ces valeurs indiquent un maximum d'avancée au niveau de la flèche sableuse (secteur 3) et un maximum de recul au niveau du secteur sud de la plage de Diabet (secteur 6). Pour une quantification d'ordre global du site, le cordon de Diabet, durant cette période, est caractérisé par une érosion avec un taux moyen annuel 0,6m.

En termes d'évolution de surface, les résultats obtenus montrent des reculs et des avancées de superficie de la végétation selon les secteurs durant la période (1973-2014), sont comme suit ; le secteur 1 dont les transects sont compris entre T₁ et T₁₀ a enregistré une avancée de 6174 m² (0,62 ha), le secteur 2 (T₁₀ au T₂₈) a enregistré un recul de végétation d'une superficie de 49266 m² (4,9 ha), le secteur 3 (T₂₈ au T₅₅) a enregistré une avancée de 55900 m²(5,6 ha), le secteur 4 (T₅₅ au T₆₈) a perdu une superficie de 11850 m², le secteur 5 (T₆₈ à T₈₂) a enregistré un gain d'une superficie de 12500 m² et le secteur 6 (T₈₂ à T₁₁₁) une érosion d'une superficie de 153700 m² (15,4 hectares).

En termes de bilan, le trait de côte du cordon de Diabet durant la période (1973-2014) a enregistré un recul de 0,6 m/an, avec une perte d'une surface de 140242 m² (3420 m²/an).

Mais il faut signaler que les résultats obtenus présentent l'évolution du cordon dunaire de Diabet au fil du temps, y compris l'événement tempétueux du 6 janvier, objet de notre étude, et même d'autres tempêtes qui ont lieu durant cette période. Or puisque l'échelle du temps est assez grande, l'effet des événements de court terme se trouve démasqué. Ainsi, les facteurs responsables de cette évolution sont donc multiples : facteurs naturels (hydrodynamiques et aérodynamiques) et facteurs anthropiques (reboisement, fixation et défrichement).

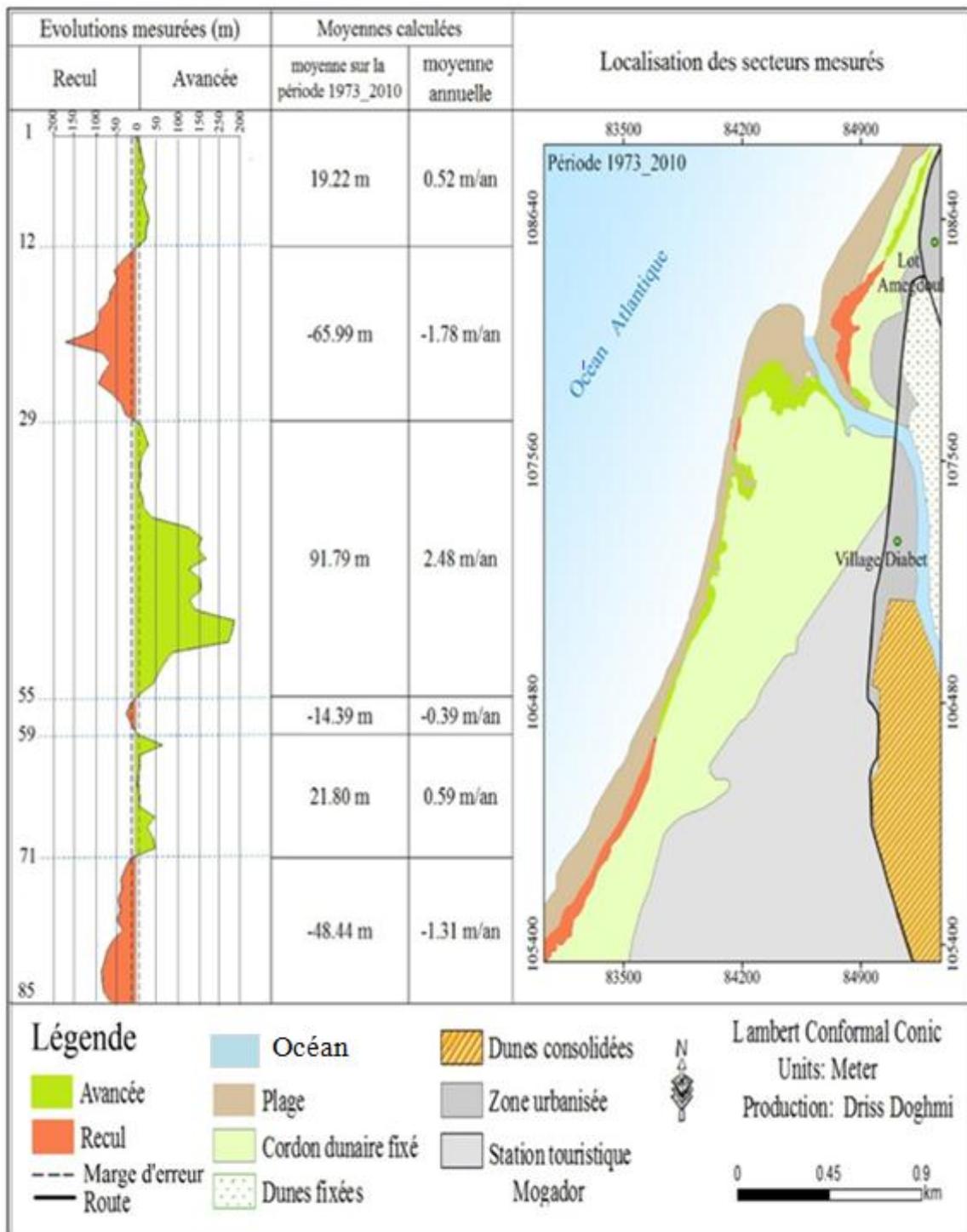


Figure 4 : Modèle cartographique de la cinématique du front dunaire de la plage Diabet entre 1973 et 2010

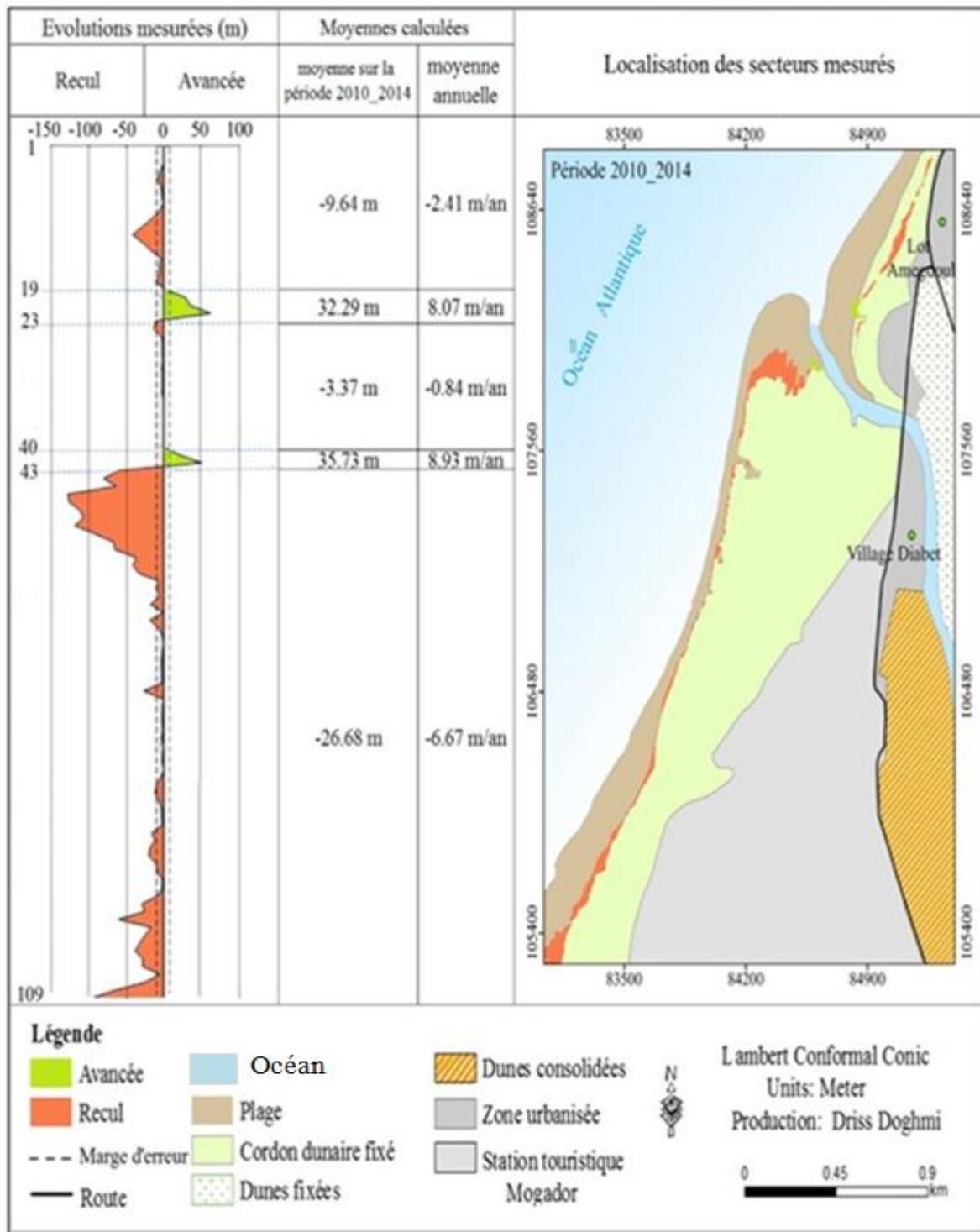


Figure 5 : Modèle cartographique de la cinématique du front dunaire de la plage Diabet entre 2010 et 2014.

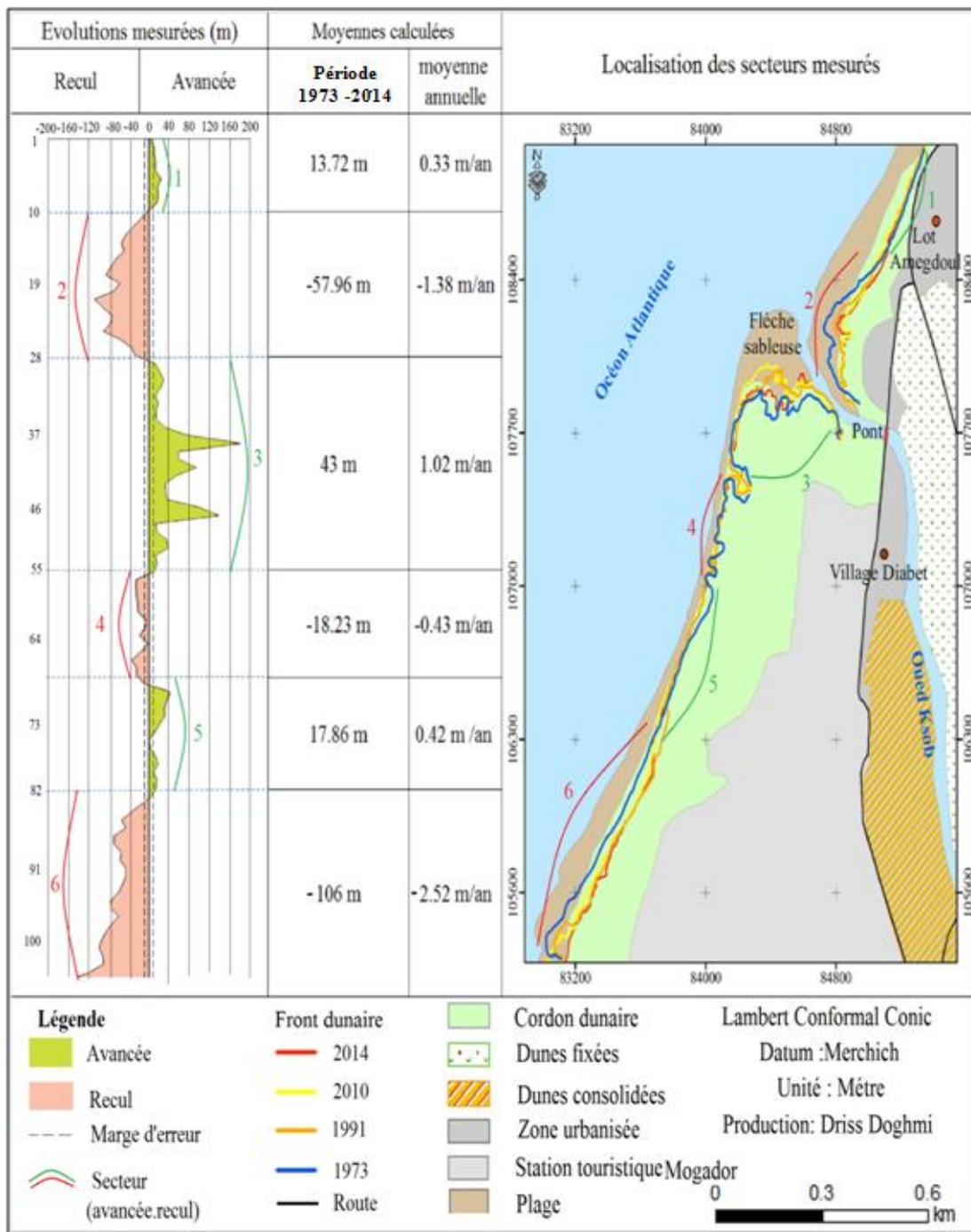


Figure 6 : Modèle cartographique basé sur le calcul de l'End Point Rate du front dunaire de Diabet à Essaouira entre 1973 et 2014

Synthèse et discussion

D'après le tableau 3, les résultats obtenus montrent que le front dunaire de Diabet est caractérisé par une tendance érosive durant toute la période (1973-2014), avec un recul moyen annuel de 0,6 m et de 3420 m²/an en termes de superficie. Cependant la période (1973-2010) a enregistré une avancée annuelle de 0,32 m de la végétation, avec un gain annuel de 1354 m²/an. Quant à la période (2010-2014), y compris la tempête du 06/01/2014, a enregistré un impact morphogénique énorme, avec un recul du front dunaire de 4,05 m/an, et une perte d'une grande surface de végétation de 1,9 ha annuellement.

Evolution de la cinématique du front dunaire de Diabet à Essaouira			
Période	1973-2014	Période pré-tempête (1973 – 2010)	Période y comprise la tempête 2010-2014
Taux moyen annuel d'évolution linéaire (m/an)	-0,6	+ 0,32	- 4,05
Taux moyen annuel de gain/perte surfacique (m ² /an)	-3420	+1354	-19000

Tableau 3 : Synthèse des principaux résultats de la vitesse de recul du front dunaire de Diabet à Essaouira, avant et après la tempête.

Les efforts de fixation, fournis localement par les Eaux et Forêts, pour maintenir la stabilité du cordon dunaire justifient une avancée de la végétation durant la période (1973-2010), mais l'érosion marine de la plage de Diabet et la déflation éolienne au niveau de la flèche sableuse de la rive gauche de l'oued Ksob se conjuguent pour faire reculer le front dunaire. Il faut noter aussi que les valeurs d'évolution du front dunaire pendant la période (2010-2014) restent inférieures à une quantification réelle de l'érosion puisqu'on ne dispose pas de clichés aériens qui cernent de plus près la tempête du 6 janvier 2014 (par exemple des clichés de décembre 2013 et de février 2014). Cependant les valeurs correspondantes à la période (2010-2014) donnent au moins une idée approximative si on les compare aux valeurs de la phase pré-tempête.

De plus, à travers cette étude diachronique du trait de côte, le message essentiel qu'on voulait transmettre d'après notre choix de deux périodes d'analyse largement différentes en terme de durée : une longue période (1973-2010) et une courte (2010-2014), juste pour montrer que malgré les travaux de fixation étalés sur une longue période, les tempêtes peuvent créer des dommages et neutraliser ces efforts dans un laps de temps qui ne dépasse pas quelques heures.

Suivi expérimental

Analyse bidimensionnelle

Les mesures de profils de plage/dune effectuées le long des trois radiales ont montré un recul significatif de la dune. Les calculs des volumes sédimentaires effectués sur les deux sections du profil (dune et haute plage intertidale) ont indiqué que pour le profil 1, la quantité de matériel perdu par la dune (-39,20 m³/ m.l) avait en partie alimenté le haut de plage dont le gain sédimentaire atteignait (+104,4 m³/ m.l) (Figure 7). Tandis que les profils 2 et 3 enregistraient quant à eux un déficit affectant l'ensemble du système plage/dune.

Les processus d'érosion observés ont montré que le principe d'ajustement du profil d'équilibre décrit par VAN DER WAL (1999) pouvait s'appliquer dès lors que les transferts sédimentaires transversaux n'étaient pas influencés par d'autres dynamiques. Ainsi, pour le profil 1 de la plage de Diabet, les volumes érodés à la dune ont bien alimentés la haute plage intertidale, à la différence des radiales 2 et 3 pour lesquelles les deux sections du profil sont déficitaires.

Le premier résultat du suivi topographique post-tempête a mis en évidence la forte saisonnalité du fonctionnement morpho-sédimentaire du cordon dunaire de Diabet-Essaouira : la période allant de novembre 2013 à février 2014 s'opposait nettement à la période du février à août 2014. Durant l'hiver, les fortes houles de tempête associées à des surcotes élevées étaient fortement corrélées à l'érosion du cordon. Inversement, au printemps et en été, l'action conjuguée des faibles houles et du transit éolien favorisé par un temps sec est propice à l'engraissement des dunes.

Les mesures étalées sur six mois après la tempête, avaient indiqué qu'après la période d'érosion intense sous l'impact de l'événement tempétueux enregistré entre la campagne de mesure du mois de novembre 2013 et celle du mois de février 2014, une phase d'ajustement post-érosive avait permis aux dunes de la plage de Diabet de se régénérer.

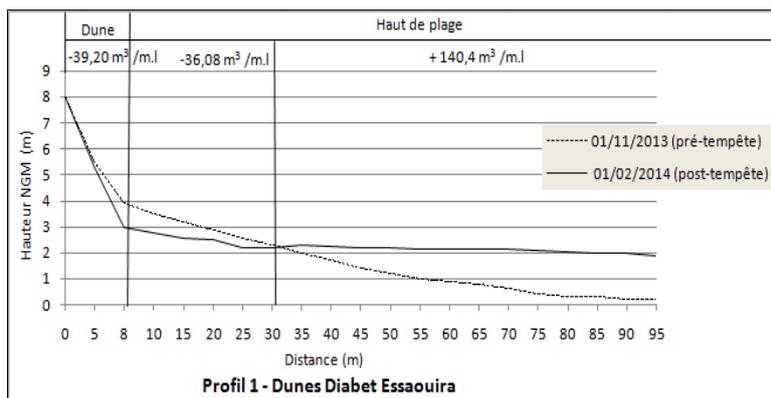


Figure 7: Comparaison des profils de plage/dune pré et post-tempête du 6 janvier 2014 sur la plage de Diabet à Essaouira.

Analyse tridimensionnelle (Modèles Numériques de Terrain)

Pour la quantification tridimensionnelle via les modèles numériques de terrain différentiels par l'application du logiciel Surfér (figure 8), le bilan net de la cellule morpho-sédimentaire de la plage de Diabet, comprise entre les radiales 1 et 3 et traversée au centre par la radiale 2 (d'une superficie de 21650 m²) durant la période de suivi (novembre 2013-août 2014) indique une valeur négative de (-5213,4 m³), qui correspond à une érosion de 0,24 m³/m².

La phase comprenant la tempête (novembre 2013-février 2014) a enregistré un bilan positif (+4786,4 m³) ; cela expliquerait que le volume de sédimentaire mobilisé à partir de la dune, est déposé directement au niveau de la zone intertidale. De même, la cellule a bénéficié aussi des sédiments mobilisés latéralement des autres cellules juxtaposées. D'après le MNT différentiel (novembre 2013- février 2014), l'érosion est bien localisée dans le compartiment dunaire tandis que le compartiment intertidal a connu un engraissement.

La phase post-tempête correspond à deux phases d'évolution différentes (février –juin 2014) et (juin- août 2014) malgré que le bilan sédimentaire correspondant soit négatif, respectivement de l'ordre de (-4540,7 m³) et (-5459,2 m³). En effet, la première phase indique une légère progradation de la dune (MNT (février-juin 2014)) et une érosion accentuée de l'estran, tandis que la deuxième a enregistré une tendance inverse, c'est-à-dire une importante érosion de la dune, suite à une mobilisation intense du sable par les vents violents de l'été, et une légère progradation de l'estran.

Le bilan sédimentaire net de la cellule morpho-sédimentaire de la plage de Diabet est négatif, cela met en évidence l'effet conjugué de l'action morphogénique de la tempête du 6 janvier 2014 pendant l'hiver et de celle de la déflation éolienne exercée au niveau du pied de la dune pendant l'été (Tableau 4 et Figure 8).

	Cordon dunaire de la Plage de Diabet			
	Phase de tempête	Phases post-tempête		Période de suivi
	nov2013-fèv2014	fév.-juin 2014	juin-août 2014	Bilan global (Nov2013-Juin 2014)
Volume déposé (m ³)	+3996,6	+7549,9	+1349,9	+6704,8
Volume érodé (m ³)	-9455,8	-2763,5	-5890,6	-11918,2
Bilan net /période (m ³)	-5459,2	+4786,4	- 4540,7	-5213,4
Bilan net (m ³ /m ²)	-0,25	+0,22	-0,2	-0,24

Tableau 4: Evolution du budget sédimentaire du système plage-dune de la plage de Diabet sous l'effet de la tempête du 6 janvier 2014.

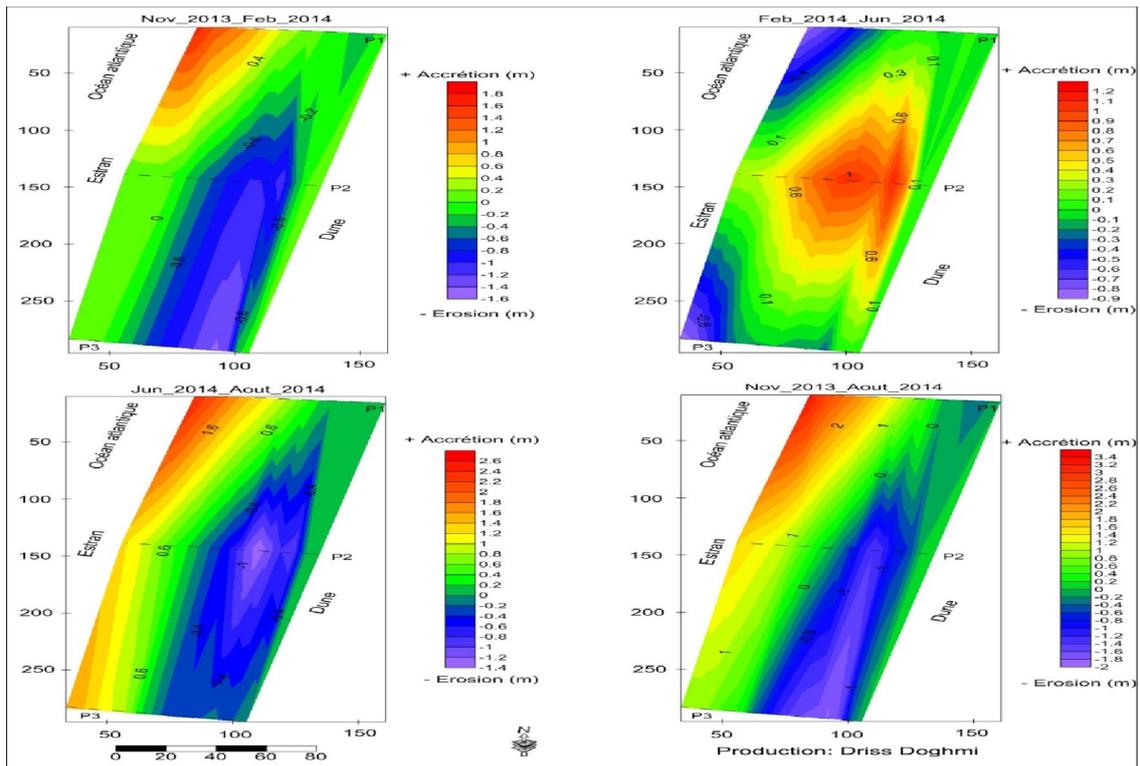


Figure 8 : Séquence d'évolution morpho-sédimentaire et variation altimétrique du système plage-dune du littoral de Diabet à Essaouira durant les quatre campagnes de mesures.

CONCLUSION

A travers l'analyse diachronique et le suivi expérimental de l'évolution du cordon dunaire de la plage de Diabet à Essaouira, il s'est avéré qu'il existe des relations étroites entre le recul du rivage et les événements exceptionnels comme les tempêtes. De plus, les techniques utilisées ont démontré le rôle important assuré par le cordon dunaire, en tant qu'unité fondamentale et zone tampon du système côtier, dans l'amortissement des événements exceptionnels et la protection de l'arrière-dune.

Les profils de plage mesurés démontrent bien la mobilisation des volumes de sable du sommet de la dune vers le bas-estran pour les trois radiales étudiées. Une érosion de la dune qui atteint un volume moyen de $(-30,5 \text{ m}^3/\text{m.l})$ et du haut-plage d'un volume moyen de $(-98,76 \text{ m}^3/\text{m.l})$. Ces résultats traités à l'échelle bidimensionnelle sont confirmés par la méthode 3D à l'aide du logiciel Surfer, par une érosion globale d'un volume net de $(-5459,2 \text{ m}^3)$ au niveau de la plage délimitée par la radiale 1 et 3, sur une superficie de $21664,08 \text{ m}^2$ (soit une érosion moyenne de $-0,25 \text{ m}^3/\text{m}^2$).

La réponse morphologique des profils face à cet événement se traduit par 2 types de profils : des profils en gain ou en érosion constante. La disponibilité du matériel sableux aux embouchures adjacentes (oued Ksob) et la morphologie du profil anté-tempête sont des éléments qui influencent largement la réponse morphologique des profils face à cette tempête. Ainsi le forçage climatique ne doit donc pas être considéré comme le seul paramètre qui contrôle la morpho-dynamique du profil plage/dune, ce qui complexifie l'analyse de l'impact du changement climatique sur les phénomènes érosifs du littoral d'Essaouira en général, et sur le cordon dunaire de Diabet en particulier.

A long terme (1973 -2010), l'analyse diachronique des photos aériennes a mis en évidence une tendance à l'engraissement. Cependant, sous l'effet de l'événement exceptionnel de 2014, cette tendance a été modifiée vers une érosion malgré le bref délai (2010 -2014) y compris la tempête. Par conséquent, cette analyse a mis en évidence l'impact morphogénique que peut causer une catastrophe naturelle comme la tempête. Des brèches ont eu lieu au niveau du cordon, ce qui menacera l'arrière-dune où est installée la station touristique de Mogador lors d'une prochaine tempête associée à une submersion marine. Ainsi, les aménagistes doivent considérer que la situation actuelle ne pourra que s'aggraver si les tendances passées observées continuent et qu'ils devront faire face à ce dysfonctionnement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDREWS, B.D., GARES, P.A & COLBY, D.C., 2002. Techniques for GIS modeling of coastal dunes. *Geomorphology*, 48: 289-308.
- BERNATCHEZ.P, HÉTU.B, BUFFIN-BÉLANGER.T, GUILLAUME.M , BÉLANGER.S, CHAILLOU, G., SENNEVILLE.S, DUMONT.D, ST-ONGE.G & NEUMEIER.U. 2012 – Nombre d'événements météorologiques et géologiques par décennie qui ont provoqué des dommages à la côte entre 1880 et 2010 basé sur des archives. Actes-Proceedings du colloque sur la sécurité civile et incendie en 2015, p19.
- CARIOLET JM & SUANEZ, S., 2009 – Approche méthodologique pour une cartographie du risque de submersion des côtes basses. *La Houle Blanche 2* : 52-58.
- CHERFAOUI. N, 2014 – Vagues dans l'Océan, p11. http://rusibis.com/TMG/pdf/Vagues_dans_l_Ocean_-_Maroc.
- GIEC/IPCC, 2001. Climate change 2001 Impacts, Adaptations and vulnerability. Rapport working Group II. Résumé à l'intention des décideurs. Genève/ Nairobi : OMM.
- GIEC/IPCC, 2007. Groupe de travail I du GIEC. Quatrième Rapport d'évaluation, Bilan 2007 des changements climatiques les bases scientifiques physiques, Résumé à l'intention des décideurs 25p.
- KHOUAKHI, A., 2013 – Contribution au développement d'outils scientifiques d'aide à la gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC) dans le contexte du changement climatique : Cas du littoral d'Al Hoceima, *Thèse de doctorat en géosciences de l'Environnement, faculté des sciences-Rabat, université mohamed V-Agdal*, 295p.
- NIAZI S., 2007- Evaluation des impacts des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer sur le littoral de Tétouan (Méditerranée occidentale du Maroc) : Vulnérabilité et Adaptation. Thèse de doctorat, université. Med V, Faculté des sciences, Rabat. 296p.
- NICHOLLS, R J. WONG, P P. BURKETT, V., WOODROFFE, C D. & HAY, J. 2008 –Climate change and coastal vulnerability assessment scenarios for integrated assessment, *Sustainability Science*, 3, 89-102.
- RAPPORT DU MINISTERE DE L'EQUIPEMENT (2014) – Impacts de la houle exceptionnelle du 06-07 janvier 2014 sur les infrastructures portuaires, 32p
- RUGGIERO, P., KAMINSKY, M.G., GELFENBAUM, G. & VOIGT, B., 2005. Seasonal to interannual morphodynamics along a high-energy dissipative littoral cell. *Journal of Coastal Research*, 21: 553-578.
- STEPANIAN, A., 2002. Evolution morphodynamique d'une plage macrotidale à barres : Omaha beach (Normandie). Thèse de doctorat, Université de Caen, 276pp.
- VAN DER WAL, D. 1999 - Aeolian transport of nourishment sand in beach-dune environments. Thèse de Doctorat de Géographie Physique, Université d'Amsterdam: 157 p.
- WRIGHT, L.D & SHORT, A.D., 1984 – Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56: 93 – 118.