



HAL
open science

Interactions et relations entre dynamiques éolienne et anthropique : l'évolution récente du géosystème dunaire d'Essaouira (Maroc atlantique)

Yves Claude Simone, Jean-Louis Ballais

► To cite this version:

Yves Claude Simone, Jean-Louis Ballais. Interactions et relations entre dynamiques éolienne et anthropique : l'évolution récente du géosystème dunaire d'Essaouira (Maroc atlantique). Photointerprétation, 2006, 3, pp.39-56. hal-01570567

HAL Id: hal-01570567

<https://amu.hal.science/hal-01570567>

Submitted on 31 Jul 2017

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

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

2006 / 3
Volume 42

PHOTO INTERPRÉTATION

images et représentations spatiales
de l'environnement

ISBN 274721168-1



9 782747 211680



Editions
ESKA

ISSN 0031-8523

ISBN 2-7472-1168-1

PRIX : 50 €

INTERACTIONS ET RELATIONS ENTRE DYNAMIQUES ÉOLIENNE ET ANTHROPIQUE ; L'ÉVOLUTION RÉCENTE DU GÉOSYSTÈME DUNAIRE D'ESSAOUIRA (MAROC ATLANTIQUE)

Yves-Claude SIMONE* et Jean-Louis BALLAIS*

*CEGA-UMR ESPACE 6012 CNRS, Université d'Aix-Marseille I, UFR des Sciences géographiques et de l'Aménagement, 29 av. Robert Schuman, 13621 Aix-en-Provence cedex 1, France.
Courriel. : kemerlau@wanadoo.fr et Ballais@up.univ-aix.fr

RÉSUMÉ

La région d'Essaouira inclus un géosystème très caractéristique par son haut degré d'anthropisme. Localisé à la périphérie de la ville, ce géosystème forme un paysage de dunes et d'étendues de sables dont la dynamique est variable au cours du temps sous l'action de l'alizé NNE/SSW. Le terme d'anthropisme s'entend ici à deux niveaux d'interprétation qui se superposent : d'une part, il porte sur le désir de contrôle du phénomène dunaire en tant que « naturel » par la mise en place d'une politique de boisement pour fixer les dunes dès 1912, et d'autre part, sur la concurrence entre l'application de cette politique et les enjeux économiques liés à l'essor du tourisme et à l'extension de l'espace urbain. C'est sous cet angle que nous proposons d'analyser le géosystème à travers l'évolution morphologique du massif dunaire au contact de la ville, des types de formes qui le composent et de leur répartition, à partir de clichés aériens pris en 1953 et 1984.

MOTS CLÉS

Acteur, Aménagement, Anthropisme, Dunes, Dynamique éolienne, Géomorphologie, Géosystème, Auto-organisation.

Article remis le 15 mai 2006, accepté définitivement le 27 septembre 2006.

INTRODUCTION

L'espace géographique étudié concerne un géosystème dunaire localisé au Maroc entre 31 et 32° de latitude nord et entre 9 et 10° de longitude ouest, couvrant une plaine littorale et de bas plateaux intérieurs dont l'altitude n'excède pas 300 m (Figure 1).

Ce géosystème présente un environnement caractérisé par un contexte bioclimatique semi-aride à hiver chaud, d'après la classification d'Emberger (1952), pourvu de 279 mm de pluies annuelles en moyenne sur deux normales climatiques (1925-1976). Il est tempéré par l'alizé NNE/SSW, autre élément majeur qui joue un rôle déterminant dans le façonnement du paysage (Tableaux 1, 2, 3 et Figure 2) et dont la fréquence et l'intensité ont varié au cours de l'Holocène (Weisrock, 1993 ; Simone *et al.*, accepté).

Ce caractère climatique représente un agent morphogénique très dynamique ayant contribué à la formation de dépôts quaternaires marins dunaires consolidés recouverts de dunes vives et sables récents partiellement fixés.

C'est sur ces affleurements qu'est bâtie la ville portuaire d'Essaouira, excentrée sur la façade atlantique et qui constitue le principal centre du géosystème, à partir duquel l'anthropisme s'exerce et l'anthropo-dépendance se développe.

Par les entraves qu'ils forment et les lourdes contraintes qu'ils font peser sur la vie locale, le développement et la poussée dunaire, l'ensablement des liaisons routières aux abords de la ville ainsi qu'aux portes des habitations (Planche 1, page 69) et dans la medina, pourtant protégée par de hauts remparts, ont interpellé les responsables à plusieurs échelles. Ces phénomènes ont conduit les

Stations	Hiver	Printemps	Été	Automne
Safi	10,8	18,0	18,7	15,1
Essaouira	15,5	19,8	20,1	13,7
Agadir	8,6	12,2	8,6	9,4

Tableau 1. Vitesse moyenne des vents en km/h, d'après Chahboun (1988).

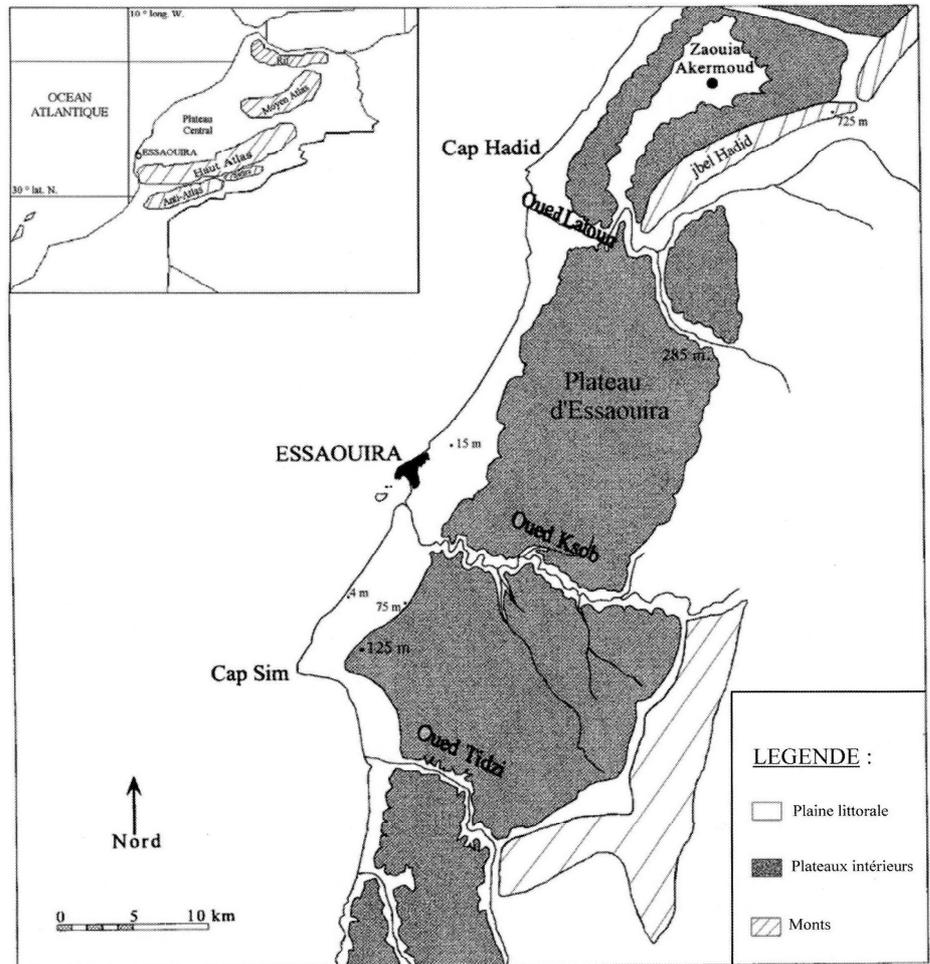


Figure 1 : Carte de localisation.

	Nombre de jours calmes sur 10 ans	Moyenne	%	% de jours venteux
Janvier	183	18,3/31	59,0	41,0
Février	139	13,9/28	49,5	50,5
Mars	99	9,9/31	32,0	68,0
Avril	62	6,2/30	20,6	79,4
Mai	89	8,8/31	28,8	71,2
Juin	86	8,6/30	28,6	71,4
Juillet	32	3,2/31	9,7	92,3
Août	52	5,2/31	15,9	84,1
Septembre	121	12,1/30	40,0	60,0
Octobre	146	14,6/31	47,0	53,0
Novembre	171	17,1/30	56,0	44,0
Décembre	144	14,4/31	46,5	53,5
Année		142,4/365	38,0	62,0

Tableau 2. Les jours calmes et venteux à Essaouira (1958-67), d'après Weisrock (1993).

pouvoirs publics à établir un plan de fixation des dunes par la plantation d'espèces allochtones telles qu'*Acacia cyanophylla*, *Acacia cyclops* et

Eucalyptus gomphocephala, pour les principales. Ainsi, les dunes ont été en partie « fixées » mécaniquement et biologiquement à partir de 1917 et en

Mois	Rang 1	2	3	4	5	6	7	8
J	NE	NNE	ENE	S	N	ESE	SW	E
F	NE	NNE	E	ENE	SSW	SW	N	ESE
M	NNE	NE	N	SW	ENE	E	ESE	SSW
A	NNE	N	NE	ENE	E	ESE	NW	NNW
M	NNE	N	NE	E	ENE	NNW	ESE	
J	NNE	N	NE	ENE	E	NNW		
J	NNE	ENE	N	NE	E	NNW		
A	NNE	NE	N	ENE	NNW	E		
S	NNE	N	NE	NNW	ENE	NW	WNW	W
O	NNE	NE	N	ENE	W	E	SW	WSW
N	NE	NNE	ENE	N	WSW	W	SW	SSW
D	NE	NNE	SW	N	ENE	S	E	SSW

Tableau 3. Classement des vents en fréquence et intensité selon les 12 mois pour les années 1958 à 1967. Seules sont prises en compte les sommes des produits ($f \times n$) supérieures à 500 des 8 vents les plus forts, f étant la vitesse du vent en m/s (de 2 à 20), n le nombre de jours venteux correspondants ; d'après Weisrock (1993).

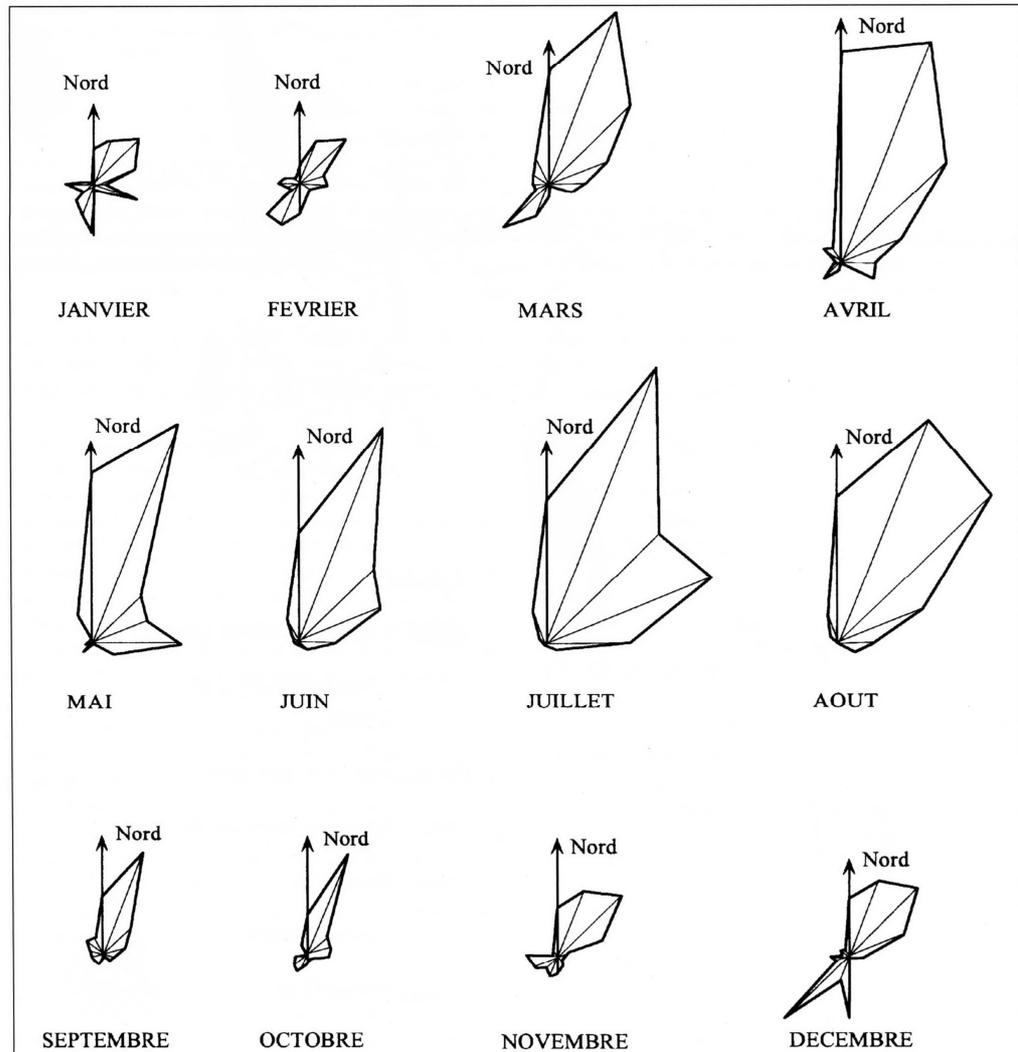


Figure 2 : Fréquence et intensité des vents efficaces à Essaouira (force > 6), relevés météorologiques de 1958 à 1967 (d'après Weisrock, 1993).

plusieurs étapes (**Figure 3**). Avec près d'un siècle d'avance sur les politiques actuelles de développement durable, cette initiative « ménagiste » et amé-

nagiste s'est poursuivie jusqu'à nos jours où l'activité sylvicole s'est peu à peu transformée en suivi et maintenance du périmètre boisé mais les planta-

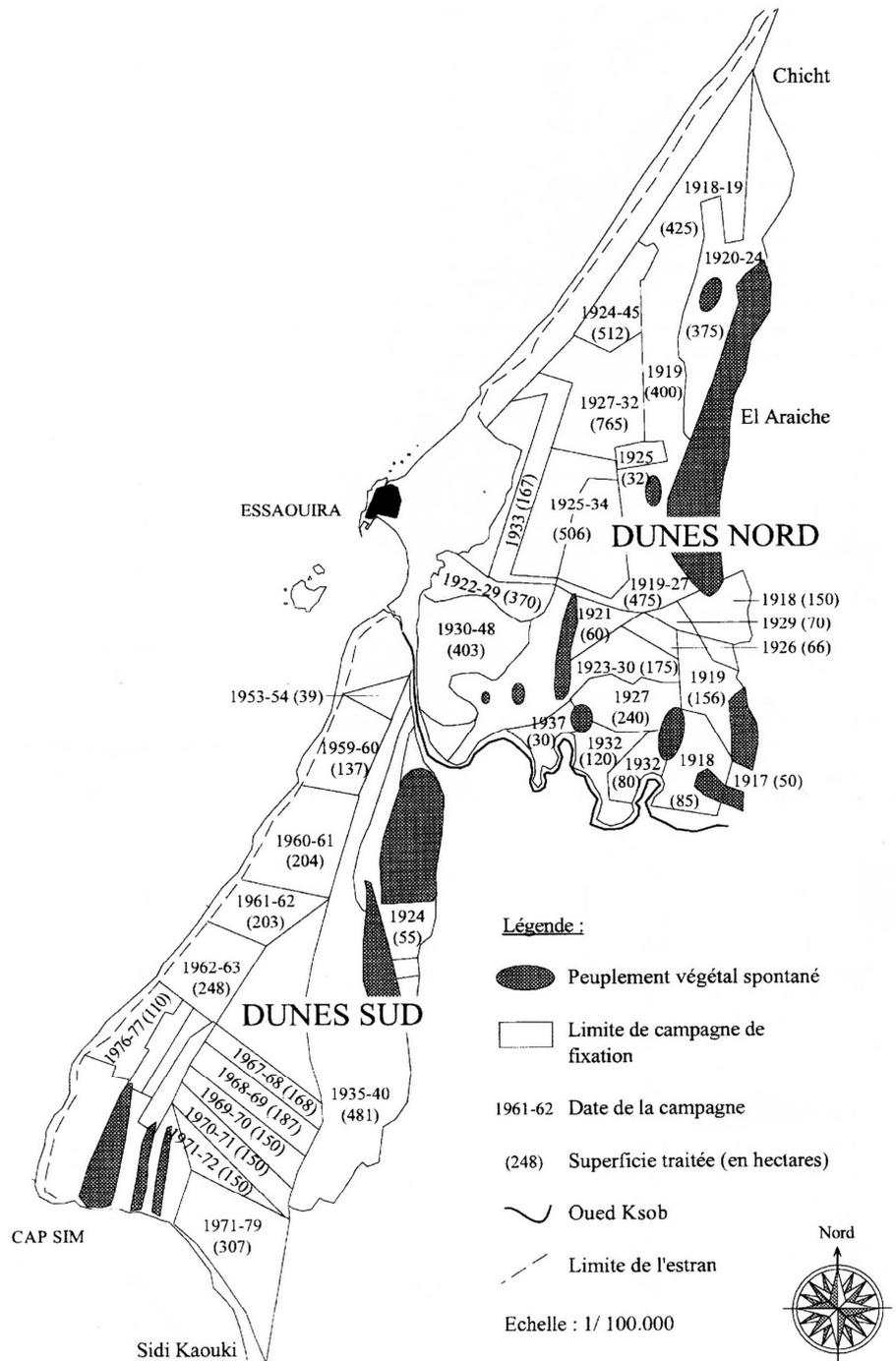


Figure 3 : Évolution des travaux de fixation des dunes littorales d'Essaouira (d'après le Service Forestier d'Essaouira).

tions continuent dans certains secteurs. Elle fut la première opération de ce genre entreprise au Maroc (Metro, 1953, in Bal, 1993).

Se pose alors la question de la morphodynamique du massif dunaire avec et sous l'(inter)action anthropique. Et, partant, celle de la prégnance de l'action éolienne agissant dans le géosystème en fonction de la place que tient l'anthropisation dans la dynamique dunaire.

Le jeu de l'action éolienne impulsé par l'alizé modèle la morphologie générale et détaillée du massif ainsi que la répartition des dunes qui le composent. Mais l'acteur social et sociétal intervient ici de manière décisive comme agent de morphogénèse à la fois par sa proximité avec l'espace dunaire et surtout par le déploiement de politiques qui, échelonnées au fil des décennies, se contredisent et se contrecarrent.

L'évolution topographique récente des dunes vives est donc analysée par photo-interprétation diachronique : morphologie du massif, types et répartition des formes dunaïres et leur mobilité (Simone, 2000). Une discussion en est issue afin de dresser un bilan transitoire et d'apporter une réflexion sur l'anthropisme et le rôle de l'homme en tant qu'agent morphogénique.

1. ANALYSE DIACHRONIQUE DU MASSIF DUNAIRE PAR PHOTO-INTERPRÉTATION

La photo-interprétation diachronique est réalisée à partir des séries de clichés aériens noir et blanc suivantes : la première est composée de photographies aériennes IGN au 50 000^e enregistrées lors de la mission n° 17 du 10 août 1953 entre 13 h 30 et 14 h dans le domaine du visible à l'altitude absolue de 6250 m et avec une focale de 125 mm ; la seconde est constituée de photographies aériennes IFN au 20 000^e, enregistrées lors de la mission n° 852 de décembre 1984 dans le domaine de l'infrarouge.

La cartographie du massif dunaire est effectuée sur le stéréoscope Stereozoom Transferscope Bosch et Lomb au STSI (Service Télédétection et Sciences de l'Image) du CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement) afin de délimiter et représenter sa structuration et ses différentes textures à son contact avec la ville aux deux dates (**Planches 2 et 3, page 70**).

Les **Planches 2 et 3, page 70** permettent d'établir des comparaisons morphologiques entre 1953 et 1984 et de montrer l'avancée du front urbain au sein de la partie occidentale du massif, partie la plus fragile car la plus fréquentée, la

plus exposée aux vents efficaces dominants et la moins boisée.

La **Planche 2, page 70** représente l'extension et la morphologie de l'espace dunaire étudié, les types de dunes et leur répartition en Août 1953, et la **Planche 3, page 70** représente les mêmes variables en décembre 1984, augmentées de l'extension du bâti, de la lagune et des mares interdunaires.

1.1. Morphologie générale résultant de l'approche diachronique

La délimitation du massif se distingue plus nettement sur la **Planche 2, page 70** que sur la **Planche 3, page 70** par un contraste de densité végétale plus marqué et des épandages sableux plus circonscrits.

En 1953 (**Planche 2, page 70**) le secteur le plus dégarni du massif dunaire s'étire sur 3,6 km de long suivant une direction NNE/SSW correspondant à celle de l'alizé et sa largeur maximale est de 1,2 km. Il jouxte la ville et son orientation générale est restée identique en 1984 (**Planche 3, page 70**) mais ses limites sont quelque peu modifiées : en 1953, le tracé plus effilé et rectiligne du massif semble être bien plus guidé par la direction de l'alizé qu'en 1984 et sa morphologie générale est plus régulière ; en 1984, ses extrémités NE et SW se réduisent alors que sa frange orientale progresse vers l'intérieur suivant une forme ballonnée. En revanche, la frange occidentale subit une incurvation en raison de la poussée urbaine vers l'est qui gagne sur l'espace dunaire.

1.2. Les types de formes dunaïres aux deux dates

Sur l'ensemble de la surface, le massif de 1953 est formé de dunes plus effilées que celles de 1984 illustrant la « jeunesse » du système.

Les formes d'accumulation dunaïres très diverses ne peuvent faire l'objet d'une typologie caractérisée dans la mesure où ce ne sont pas des formes libres, c'est-à-dire qu'elles sont coiffées par des bouquets de végétation qui tendent à limiter leur mobilité et à modifier leur géométrie par rapport à des formes très caractéristiques.

Cependant, on reconnaît sur le massif de 1953 comme sur celui de 1984 des formes barkhaniques et barkhanoïdes (barkhanes isolées, associées, cordons barkhanoïdes) et des formes atypiques et plus complexes résultant de la fixation des dunes par les végétaux. Les formes dunaïres de 1984 sont caractérisées par une plus grande convexité et les dunes sont plus larges que celles de 1953. Elles tendent à

se regrouper pour se joindre et ne former plus qu'une dune unique et massive.

La **Planche 4, page 71** illustre deux types de formes barkhaniques entre lesquelles les cuvettes sont régulièrement inondées. La première forme, photographiée suivant une direction ouest/est, est assez basse et assez dénudée, ce que montre le rapport de surfaces sables apparents/végétation. Nous reconnaissons au second plan à gauche une autre cuvette inondée ainsi que la coalescence d'autres barkhanes situées plus au nord et dont les branches viennent en contact avec la barkhane d'aval vent. Le sommet des dunes est couvert de végétation alors que les versants sous le vent en sont dépourvus. Lorsqu'elle sont clairement identifiables, comme dans ce cas, les branches de la barkhane s'étalent sous la forme de langues de sable indiquant le sens du vent efficace actuel.

La seconde forme, photographiée suivant une direction sud-ouest/nord-est, est plus massive et plus boisée en acacias et eucalyptus. Le versant sous le vent est plus redressé que le précédent et la cuvette inondée, plus profonde. Au premier plan à gauche apparaît un buisson de *Salsola longifolia*.

1.3. Répartition des formes dunaires aux deux dates

Les épandages sableux sont beaucoup plus marqués et beaucoup plus étendus en 1953 qu'en 1984. Ils forment une sorte de tapis sur lequel ondulent les dunes plus éparées qu'en 1984 et dont la répartition est plus lâche à l'amont vent qu'à l'aval vent. Ces disparités n'existent plus en 1984 et l'opposition nord/sud de la trame dunaire tend même à s'inverser comme si une sorte de bouchon dunaire se formait au nord du massif et diminuait la dynamique éolienne.

En une trentaine d'années, le massif a donc tendance à resserrer sa trame dunaire. Les dunes végétalisées sont plus nombreuses et plus larges en 1984 entraînant leur rapprochement, et les surfaces de sable nu extra-dunaire beaucoup moins étendues qu'en 1953 ; la phytomasse s'est développée et densifiée passant de bouquets de végétation à des bosquets.

Selon la terminologie employée par Cooke *et al.* (1993) qui qualifient le terme « fixé » d'ambigu et préfèrent distinguer « dunes ancrées » et « dunes stabilisées », la cartographie embrassant la période 1953-1984 montre qu'en 1953, le massif n'est composé ni de dunes stabilisées, ni de dunes ancrées. En effet, la superposition des **Planches 2 et 3, page 70** indique clairement qu'il n'y a pas coïncidence des formes dunaires donc la distribution des dunes est complètement modifiée en 1984.

Ainsi, le stade dunaire en 1953 est antérieur à celui d'un ancrage. Cependant, aujourd'hui, nous pouvons affirmer d'après le terrain que le stade d'ancrage est atteint même s'il reste fragile. La multiplication des dunes entre 1953 et 1984 ainsi que la croissance de leur superficie vont dans ce sens.

Cette évolution générale ne doit pas être interprétée comme la signification d'une baisse de fréquence et/ou d'intensité de l'alizé et de sa capacité morphodynamique, mais plutôt comme une étape de « maturité » du massif qui serait en voie de stabilisation compte tenu des boisements effectués à l'amont qui ont ralenti considérablement la dynamique dunaire et ancré, en partie, les dunes.

1.4. Orientation des dunes et direction des vents

L'étude de l'orientation des dunes apporte des indications sur le régime éolien et notamment la direction du vent. Weisrock (1982) a mis en évidence deux directions dominantes des dunes vives de la région d'Essaouira et du cap Sim, à partir du terrain et de photographies aériennes. Il s'agit de N 26° au niveau du quartier industriel à la sortie nord d'Essaouira sur « des nebkas littorales édifiées immédiatement au bord de l'estran », et de N 14° sur « des barkhanes situées davantage à l'intérieur, au Cap Sim ». L'auteur souligne que « seule la première correspond à la résultante NNE/NE qui est celle des observations anémométriques d'Essaouira : c'est celle du vent de mer non dévié. La seconde est déjà influencée par la topographie sous-jacente ».

Par comparaison, au sein du massif étudié ici, deux directions principales sont aussi relevées : une direction N 15° et une seconde de N 349° pour le massif de 1953 ; et une direction de N 15° également et une seconde de N 348° pour le massif de 1984. La direction de N 15° coïncide avec celle de N 14° relevée par Weisrock (1982) pour les barkhanes intérieures et dont l'explication est fondée sur l'orientation de la paléotopographie construite par les dunes fossiles. En revanche, la seconde direction de N 349° est nouvelle ; elle apparaît nettement en 1953 (**Planche 2, page 70**) sur la partie sud-ouest du massif jusqu'au cordon barkhanoïde, alors que la direction N 15° s'étend sur toute la partie nord et sur toute la partie est. La direction N 349° correspondant à une composante NNW, semble être *a priori*, une anomalie vu la configuration anémométrique régionale. Cependant, elle correspond à une direction de l'alizé dévié par l'urbanisation du quartier industriel situé au Nord de la ville. Par rapport à la direction « du vent de mer non dévié » qui est de N 26° cette déviation équivaut donc à un angle de 37°. Il semble, en effet, très peu probable que « la topographie sous-jacente » n'influence que très localement la direction des

dépôts dunaires sur un secteur circonscrit situé à l'aval-vent du quartier industriel alors qu'elle est orientée partout à N 14° à une échelle régionale (Weisrock, 1982).

Des changements de direction plus importants encore de vents dominants ont été observés par Battistini (1964) au sud de Madagascar à ceci près qu'il sont causés par l'obliquité des secteurs littoraux par rapport au vent, et non par des obstacles. L'auteur considère que « l'exposition est le premier facteur des phénomènes dunaires » et remarque que l'alizé issu de l'anticyclone des Mascareignes est de secteur est à nord-est sur la côte sud-orientale, qu'il suit l'orientation du littoral pour être de secteur sud-est à partir du cap Sainte Marie à l'extrême sud de l'île, avant d'être de secteur sud sur la côte sud-occidentale ; produisant un changement de direction de l'ordre de 110°.

1.5. Dynamique dunaire

Pour la période étudiée, la mobilité des dunes semble très importante et, par conséquent, la dynamique éolienne très active.

Sans pour autant être strictement identique « au fleuve de sable » du Cap Juby observé par Callot et Oulerhi (1996) dans la région de Tarfaya (Maroc), l'exemple d'Essaouira s'en rapproche assez. Ayant étudié les relations entre aérologie et géomorphologie, ces auteurs ont pu montrer et expliquer les rapports entre la forme des massifs dunaires, la répartition des dunes au sein du système et les types de dunes d'une part, et le régime éolien d'autre part. Ils ont comparé deux régions du Nord-Ouest saharien : le piémont méridional des Monts des Ksour (Atlas saharien, Algérie) situé à la limite nord du Grand erg occidental et le « fleuve de sable » du cap Juby. Par sa position littorale, l'exemple d'Essaouira est plus semblable à la seconde région étudiée par Callot et Oulerhi (1996). En effet, le haut des **Planches 2 et 3, page 70** indiqué « estran sableux et cordon littoral » constitue le secteur d'alimentation en sables qui enrichissent le massif tout en se prolongeant jusqu'au cap Sim, 15 km en direction du Sud-Ouest (**Figure 3**). De la même façon, la plage de Tarfaya située à l'est du cap Juby constitue la source de stock sableux qui alimente les « fleuves de sable », mais cette plage est presque perpendiculaire à la direction des vents efficaces dominants alors que dans le cas d'Essaouira, elle leur est parallèle. Malgré la disposition topographique différente des sources de sables, l'orientation identique NNE/SSW des massifs dunaires d'Essaouira et de Tarfaya indique la prépondérance et la direction efficace des vents qui construisent ces massifs. L'orientation identique NNE/SSW s'explique par l'absence d'obstacles (reliefs ou végétation) dans les deux cas : les premiers étant susceptibles de modifier la direction de

l'alizé et, par conséquent, celle des dunes ; et la seconde empêchant le dépôt des sédiments sous forme dunaire.

Ces remarques comparatives illustrent le sens général NE-SW de la dynamique éolienne actuelle en Afrique du nord dont la cellule anticyclonique des Açores est à l'origine. Elles vont dans le sens des résultats obtenus par Ballais *et al.* (1979), Ballais (1984, 1994 et 1996), Riser (1988 et 1999) Weisrock (1993), Benazzouz (1994, 2000 et 2001), Leroux (1995), Callot et Oulerhi (1996) et Simone *et al.* (accepté) sur l'extension du Sahara au cours de l'Holocène supérieur par des systèmes éoliens venant du nord.

L'analyse diachronique du massif dunaire entre 1953 et 1984 par photo-interprétation montre que sa partie la plus instable et la plus fragile correspond à la frange occidentale en contact avec la ville. Cette instabilité semble renforcée par la proximité du centre urbain d'Essaouira. En trois décennies la forme du massif a considérablement changé puisque son individualisation très marquée en 1953 l'est beaucoup moins en 1984 avec des limites moins affirmées en 1984. La croissance du couvert végétal joue ici un rôle majeur. La répartition des dunes a elle aussi été modifiée comme le montre la dualité nord-sud de 1953 qui s'est complètement effacée voire presque inversée en 1984. Le maillage dunaire s'est densifié témoignant d'une dynamique très active entre 1953 et 1984. Mais la superficie des dunes ayant nettement augmenté et leur forme s'étant élargie, le système aurait tendance à perdre de sa dynamique correspondant à un début d'ancrage d'autant plus que l'amont est obstrué par des dunes massives en 1984 (**Planche 3, page 70**) alors qu'il était complètement libre en 1953 (**Planche 2, page 70**).

En parallèle à la photo-interprétation, l'étude de la dynamique dunaire permet de mieux comprendre le fonctionnement du géosystème en prenant en compte les processus d'anthropisation.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.1. Sur la mobilité des sables

Sans le phénomène anthropique, les principaux facteurs agissant sur le mouvement des particules sont la vitesse et la fréquence du vent, l'humidité des sols, l'humidité relative, les paramètres du couvert végétal (rugosité de hauteur définie par la distribution spatiale de la hauteur et de la densité des plantes, épaisseur de la litière), l'évaporation, la rugosité de surface, la présence plus ou moins importante de sels et le développement de croûtes.

Ainsi, les boisements effectués depuis 1917 introduisent le rôle de l'anthropisation comme facteur supplémentaire jouant sur les paramètres du couvert végétal. Et l'on sait que les plantes isolées jouent un rôle majeur dans le transport de sable : les mesures effectuées en laboratoire et sur le terrain montrent que lorsque le taux de couvert végétal augmente de 10 à 25 %, le transport chute brusquement et qu'au dessus de 30 % il s'affaiblit nettement (Ballais, in Veyret, 1998).

L'extrême complexité de ces facteurs et des relations qu'ils entretiennent en contrôlant les mouvements de particules sous l'effet du vent, a fait l'objet de multiples recherches dont les principales ont été menées par Bagnold (1941), Chepil (1945a, 1945b et 1950), Chepil et Woodruff (1954 et 1963), Chepil *et al.* (1962), Gillette (1977 et 1979), Mainguet *et al.* (1980a et 1980b), Pye (1980), Talbot (1984), Mainguet (1986), Wasson et Nanninga (1986), Lancaster (1985a, 1985b, 1987a, 1987b, 1987c, 1988a et 1988b), in Cooke *et al.* (1993) ; et par Bagnold (1951), Capot-Rey (1963), Lettau et Lettau (1969), Clos-Arceud (1969), Glennie (1970), Tsoar (1974), Fryberger (1979), Lancaster (1982), Callot (1987), in Callot et Oulehri (1996).

Aussi, des indices de mobilité des sables ont été établis et le plus utilisé d'entre eux est celui de Chepil *et al.* (1962) :

$$C = U_{ma}^3 / (P-E)^2,$$

où C est un facteur d'érosion du vent, U_{ma} est la vitesse moyenne annuelle du vent en mph, (P-E) est l'indice climatique d'humidité selon Thornthwaite (précipitations moins évapotranspiration actuelles). Se basant sur cet indice appliqué au Sahel, Talbot (1984, in Cooke *et al.*, 1993) estime que la valeur limite d'érosion éolienne est C = 10 tandis que les nebkhas et les dunes actives isolées se forment lorsque $5 < C < 10$.

Plus récemment, Lancaster (1987d et 1988c, in Cooke *et al.*, 1993) a mis au point deux indices de mobilité des sables dont le second est exprimé par la formule :

$$M = W / (P/PE),$$

où W est le pourcentage de temps pendant lequel le vent souffle à une vitesse supérieure à celle du seuil d'arrachement des particules admise à 4,5 m/s (seuil de vélocité), P est la moyenne annuelle des précipitations en mm et PE la moyenne annuelle de l'évapotranspiration potentielle en mm également.

À partir de cet indice de mobilité, Lancaster établit qu'en Afrique australe, dans le Sud-Ouest du désert Kalahari, les dunes sont totalement actives

lorsque $M > 200$; que les bas de versants et les lettres sont stabilisés pour $100 < M < 200$; que seulement les sommets des dunes sont actifs pour $50 < M < 100$ et qu'elles sont complètement stabilisées lorsque $M < 50$.

En appliquant cette formule à Essaouira, on trouve $M = 160$ avec $W = 58 \%$ évalué sur la base d'une vitesse seuil d'arrachement de 4,5 m/s à partir de laquelle les sables fins compris entre 100 et 250 μm sont mobilisés (Petrov, 1976, in Gentile, 1997). Or le diamètre moyen de sept classes d'échantillons prélevés le long d'un transect perpendiculaire au littoral et situé sur la bordure Nord du massif étudié, est compris entre 186 et 222 μm , et l'indice de classement de ces sables indique un bon tri avec un écart-type de -1,06 σ (Chahboun, 1988). Sachant que le diamètre moyen diminue et que le tri s'améliore en allant vers le Sud comme l'a montré Chahboun (1988), la vitesse seuil d'arrachement des particules choisie (4,5 m/s) est en complète adéquation avec la taille des grains. Si l'on se réfère à la classification de Lancaster (1988a, in Cooke *et al.*, 1993), la valeur $M = 160$ [$M = 58 / (287 / 790)$] signifie donc que les hauts de versants et les sommets des dunes sont encore actifs malgré les boisements réalisés. Ces deux parties de la dune sont celles qui sont le plus exposées à un vent plus rapide compte tenu de l'aérodynamique (Coque, 1993) et qui subissent toujours la plus grande mobilité. Aussi, dans l'intervalle $100 < M < 200$, la valeur 160 est plus proche de 200 (valeur seuil au-delà de laquelle les dunes sont considérées comme totalement actives) que de 100, indiquant une activité considérable.

De plus, il faut compter avec l'inondation régulière des cuvettes interdunaires (**Planche 4, page 71**) immobilisant les particules dans les fonds et sur les bas de versants, phénomène qui n'est pas intégré à la formule de Lancaster et sans lequel la valeur de M, donc la mobilité des sables serait bien plus élevée.

Ce massif dunaire représente la manifestation de divers processus éoliens aboutissant à une accumulation considérable mais il constitue parallèlement un secteur de transit des sables qui, remobilisés par l'alizé, vont s'accumuler au sud d'Essaouira jusqu'au cap Sim (Gentile, 1997).

De façon complémentaire à cette quantification, les observations de terrain nous permettent de mieux saisir les conséquences engendrées par la mobilité élevée des particules de sable (**Planche 5, page 72**). Des couloirs de déflation se forment souvent au sommet des dunes en suivant les trouées consécutives au déboisement (**Planche 5b, page 72**) et au surpâturage caprin essentiellement (**Planche 5c, page 72**), si bien qu'un déracinement progressif s'opère et annihile les efforts accomplis

depuis des décennies dans le plan de fixation. Plus spectaculaire est l'ampleur de l'ablation sédimentaire par l'action de la déflation mesurée sur des souches d'eucalyptus plantées dans des dunes disparues aujourd'hui (**Planche 5d, page 72**). L'érosion éolienne ayant permis le dégagement de ces souches atteint la valeur de 3 cm/an (Simone, 2000) et la dénivellation entre les deux souches indique la paléotopographie. Aucun surcreusement circulaire causé par d'éventuels tourbillons du vent n'a été relevé, ce qui indique le travail rectiligne et régulier de l'alizé. Ces souches sont scellées dans la séquence sédimentaire sous-jacente constituée de limons et argiles formant une surface de discordance d'érosion sur laquelle se sont accumulées les dunes étudiées (Simone *et al.*, accepté).

Ainsi, comme l'ont montré l'analyse diachronique et, postérieurement, le calcul de l'indice de mobilité de Lancaster, la stabilisation des dunes n'est pas encore atteinte, ce qui est confirmé par le terrain.

L'ensablement régulier de la route principale n° 8a en direction d'Agadir au niveau du pont de l'oued Ksob, a été observé au cours des multiples missions ; de même, les placages actuels de sables éoliens les plus manifestes sont ceux qui recouvrent le versant gauche de la vallée du Ksob située au sud du massif étudié (**Figure 3**), suivant une direction perpendiculaire à celle de l'alizé. Ces placages s'étendent sur quelques kilomètres avant l'embouchure, en amont du pont de la route principale n° 8a. Les questions que continue de poser la dynamique éolienne (**Planche 1, page 69**) et qui remettent en cause le stade d'ancrage (**Planche 5, page 72**), sont le résultat de remobilisations causées par diverses actions liées au facteur anthropique.

2.2. Sur les remobilisations récentes

Consciente du fragile équilibre existant entre les dunes et le couvert végétal, la Direction Provinciale de l'Agriculture d'Essaouira note ses axes prioritaires en matière de développement du secteur forestier, par ordre d'importance pour l'année 1995 (ministère de l'Agriculture et de la Mise en Valeur Agricole, 1994) :

- « 1. La lutte contre l'ensablement par la réhabilitation et la mise en valeur des 12 000 ha fixés sur les dunes avoisinantes de la ville d'Essaouira.
2. La reconstitution du domaine forestier dégradé, par le reboisement et la production de plants forestiers.
3. L'aménagement des forêts...
4. La conduite des peuplements par des actions sylvicoles...
9. Les études du marché et de la filière du bois d'œuvre (thuya) et de feu pour mieux connaître

l'interdépendance entre la forêt et son milieu environnant ».

La « lutte contre l'ensablement » mentionnée en premier objectif, inscrite dans le plan de fixation des dunes, ainsi que le deuxième objectif (« La reconstitution du domaine forestier dégradé ») illustrent les difficultés auxquelles sont confrontés les acteurs locaux, régionaux et nationaux malgré les boisements réalisés (**Planche 1, page 69**). Le massif constitue en effet le stock de sables vifs le plus proche de la ville et sa partie occidentale qui cerne Essaouira est le secteur où les dunes sont les plus instables.

Pourtant, Boudy (1958) note que dès 1930 déjà on pouvait considérer comme « fixée la plus grande partie du secteur Nord ». Selon Mounir (1988), l'évolution de la fixation des dunes est marquée par deux phases : une phase de succès et une phase de régression. La phase de succès serait expliquée, d'après l'auteur, par au moins quatre facteurs :

1. la mise à profit du cadre législatif : le Dahir du 10 octobre 1917 :
 - permettant « la création de périmètres de reboisement...pour la fixation des dunes » (art. 30) ;
 - autorisant l'administration à s'opposer au défrichement des bois reconnus nécessaires à la défense contre l'érosion éolienne et l'envahissement des sables (art. 25) ;
 - sanctionnant « toute contravention ou enlèvement non autorisé de matériaux, broussailles et produits quelconques de la forêt » (art. 32) ;
 - habitant les préposés des Eaux et Forêts « à saisir les bestiaux... en délit et instruments, voitures, attelages et bêtes de somme des délinquants et à les mettre sous séquestre » (art. 61) ;
2. la continuité de la fixation de 1918 à 1964 ;
3. l'organisation de la fixation suivant le sens du vent, donc en commençant par le Nord et en allant vers le Sud de manière à abriter les nouvelles plantations pour éviter leur ensevelissement ;
4. un élément climatique favorable : le bilan hydrique de 1918 à 1964 malgré la sécheresse des années trente.

Malgré les bons résultats obtenus, Houmimyd et Allam (1990) notent que « de nombreuses contraintes continuent à s'opposer aux objectifs assignés à cette action ».

Pour Bal (1993), les dunes fixées « constituent actuellement... un boisement à haut rendement financier » : l'auteur considère qu'elles représen-

tent « une réserve naturelle à grand intérêt scientifique » et qu'elles forment un espace où « l'expansion urbaine s'effectue sans crainte ».

Des effets contradictoires apparaissent donc entre les aménagements effectués afin de stabiliser les dunes et la pratique quotidienne de ces lieux par les acteurs locaux, régionaux et nationaux.

3. CROISSANCE URBAINE ET PRESSION DÉMOGRAPHIQUE

Essaouira connaît la plus grande concentration de population de la province dont la densité est de l'ordre de 66,5 h/km² selon le recensement de 1989 représentant la plus haute valeur de tout le pays (Rafik, 1989). Aussi, le chef-lieu de province a vu sa population passer de 30 000 habitants en 1957 à 60 000 habitants en 1982 (**Figure 4**) dont plus de 50 % ont moins de vingt ans (Mounir, 1988) donnant un taux moyen de croissance urbaine de 4 % par an.

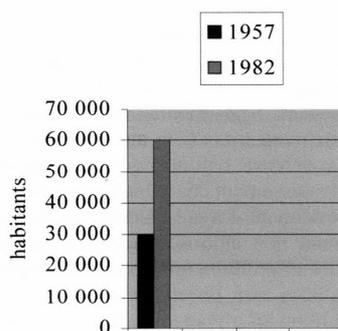


Figure 4 : Croissance de la population d'Essaouira, d'après Mounir (1988).

La pression démographique se traduit par une augmentation de population dont les structures d'accueil limitées imposent de nouvelles constructions. Aussi, l'usage de l'espace forestier dunaire, sous ses diverses formes, pose problème face aux aménagements réalisés.

La comparaison des **Planches 2 et 3, page 70** montre l'extension urbaine en direction de l'Est, transgressant les dunes occidentales du massif entre 1953 et 1984. Cette avancée s'est donc réalisée au détriment des sables vifs et partant, des aménagements effectués pour tenter de les stabiliser.

Le rythme de l'extension du bâti a considérablement modifié la morphologie de cette partie occidentale du massif : d'une part, la pénétration de la surface bâtie au sein du massif dunaire atteint 400 m en 30 ans, au Nord comme au Sud (**Planches 2 et 3, page 70**) ; d'autre part, un couloir où s'est

installée une lagune d'origine marine s'est créé (Simone, 2000), constituant la limite du front urbain en 1984 (**Planche 3, page 70**). Par effet Venturi, cette limite, qui a encore progressé depuis, forme, entre la continuité du bâti à l'Ouest et la dune bordière à l'Est, un couloir de déflation principal se conjuguant en couloir de corrosion, si bien que le surcreusement de la surface de discordance permet la stagnation de l'eau qui forme la lagune alignée sur l'axe du couloir de déflation principal (Simone, 2000).

La croissance urbaine se réalise donc par chevauchement sur l'espace dunaire si bien que les sables éoliens in situ sont faciles à exploiter, donc peu coûteux, entrant dans la composition de mortiers et bétons pour les besoins de l'industrie du bâtiment (**Planche 6, page 71**). Lorsqu'ils ne sont pas prélevés sur les épandages les plus proches (**Planche 6a, page 71**) et surtout lorsque les quantités demandées sont plus importantes, les sables sont extraits des dunes par excavation de celles-ci entraînant le déracinement des arbres et, en conséquence, la destruction de la dune dont le matériel est emporté par le vent (**Planche 6b, page 71**). La partie supérieure de la dune montre un début d'encroûtement superficiel sur une cinquantaine de centimètres qui a nécessité plusieurs décennies d'efforts grâce aux boisements effectués et aurait pu aboutir à la stabilisation définitive des dunes à plus long terme. En effet, l'exemple de la **Planche 6b, page 71** n'est pas unique ; l'entaille des dunes se retrouve tout au long de la limite occidentale du massif sur près de deux kilomètres faisant face à l'extension du bâti.

Le nouveau quartier résidentiel (**Planche 6c, page 71**) marque la limite avec le couloir de déflation principal qui montre un pavage peu abondant fonctionnant comme une sorte de reg. Des accumulations sableuses de petite taille (10 à 60 cm) se forment telles des nebkas en suivant la rugosité du terrain et les canalisations.

Les particules sont ainsi mises en mouvement facilitant leur transport par l'alizé si bien que certaines demeures situées à moins de 60 m des premières dunes se retrouvent envahies par des amas dunaires qui obturent leur entrée et recouvrent leur façade (**Planche 1, page 69**). à l'arrière-plan à gauche (**Planche 1a, page 69**) se distinguent les sommets des premières dunes coiffées de végétation ; ces dunes ont été reboisées lors du plan évoqué plus haut et illustrent la progression de l'urbanisation et son rapprochement du massif (**Figure 3**). Comme sur la **Planche 6b, page 71**, ces dunes sont entamées et excavées pour les besoins de l'industrie du bâtiment.

À ces questions d'éolisation anthropique des sables, s'ajoute celle des processus d'haloclastie

susceptibles de se manifester, à terme, sur les fondations des édifices urbains qui s'étendent à la place du massif dunaire et sont implantés, en partie, dans la séquence limono-argileuse évoquée plus haut.

Ce substratum sédimentaire, constitué de limons et argiles (Simone *et al.*, accepté), contient de la halite liée aux remontées d'eaux salées marines et qui a été évaluée par diffractométrie X sur fraction totale à un taux de cristallisation de 2 % en moyenne, mais atteint des pics de 7 % notamment en surface (Simone, 2000). La proximité de l'océan et la remontée du biseau salé favorisent la présence de chlorure de sodium de même que l'alternance de cycles de remplissage et d'assèchement, comme ils se produisent dans les lettres, facilitent la formation d'une frange de capillarité puis de cristallisation sous l'effet de l'évaporation.

L'usage forestier de l'espace dunaire est une autre déclinaison de la pression démographique comme facteur anthropique. Des ressources en bois de combustion (consommation domestique), bois d'œuvre et de construction (artisanat et marqueterie, bâtiment) sont régulièrement prélevées sur les dunes soumises au plan de fixation depuis 1917 (Simone, 1996 et 2000). Il s'agit essentiellement de *Juniperus phoenicea* (espèce endémique), *Acacia cyanophylla*, *Acacia cyclops* et *Eucalyptus gomphocephala* (espèces de boisement). Le plein essor du tourisme, international notamment, en constante augmentation depuis quelques décennies, participe doublement à cette pression : d'une part, si la fréquentation touristique atteint des pics en été, elle est régulière tout au long de l'année et, d'autre part, cette fréquentation favorise l'établissement définitif d'étrangers à Essaouira, soit en résidence principale, soit en résidence secondaire (Rafik, 1989).

Dans la répartition des essences par commune de la province, l'évaluation de la superficie forestière d'Essaouira est assimilée à celle de la superficie dunaire (D.P.A. d'Essaouira, 1988, in Rafik, 1989) soulignant ainsi le poids de l'espace dunaire dans l'extension forestière et, partant, l'équilibre précaire de la périphérie urbaine. Il est courant d'observer sur le terrain des dromadaires ou des mules parcourant les dunes, chargés de branchages utilisés ou vendus en ville et dans les douars (villages) environnants.

Dressant la liste des facteurs qui ont entraîné la phase de régression dans l'évolution de la fixation des dunes, Mounir (1988) note en deuxième point, après les « délits de pâturage » : « ...les coupes abusives de branchages pratiquées sur le genévrier. Les fagotiers, par dizaines, se servent dans les zones boisées alentour de la ville à raison de deux voyages par jour ». Dans le même sens, Houmimyd et Allam (1990) remarquent en particulier que « des prélèvements délictueux directs de ligneux

contribuent à renforcer la précarité de ces milieux ».

L'usage pastoral de l'espace dunaire accroît encore la pression, animale cette fois, mais aussi humaine, sur ce milieu très anthropisé. L'intensification du pacage sur les dunes a pour origine principale la désertification de l'arrière pays qui induit à la fois une extension et une confluence des parcours vers le chef-lieu de province où les dunes verdoyantes constituent un excellent fourrage. Ce phénomène tend à renforcer l'exode rural vers Essaouira et sa périphérie et à y concentrer les cheptels.

Dans leur étude de protection contre l'ensablement, Houmimyd et Allam (1990) notent : « ...une intense fréquentation qui se manifeste par un piétinement assez généralisé et une dégradation aéro-laire intéressant surtout les strates arbustive et herbacée ».

La **Figure 5** représente un transect décrivant le modelé dunaire et le couvert végétal en partant d'Essaouira. Il marque un gradient des effets de l'anthropisme décroissant au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'espace urbain. Ce phénomène entraîne une densification de la trame dunaire alors qu'à la périphérie proche de la ville, les dunes plus éparses ont du mal à s'ancrer autour des bouquets de végétation laissant la place à des couloirs de déflation. Avec la densification du couvert végétal et du maillage dunaire, la disparition des plans d'eau n'est que superficielle ; la perméabilité des sables permet de constituer un réservoir limité à sa base par le substratum limono-argileux nourrissant les espèces implantées dans les dunes.

CONCLUSIONS

Finalement, plusieurs points nous paraissent ressortir de ces recherches :

Le dépassement de l'opposition démarche idio-graphique (le cas particulier d'Essaouira)/démarche nomothétique (ce qui relève de lois générales) ainsi que le parallèle entre les deux afin de souligner les lacunes de l'une ou de l'autre, nous semble féconds.

En effet, la cartographie des photographies aériennes et l'interprétation qui en est issue montrent comment les formes du massif dunaire d'Essaouira, les types de formes dunaires qui le composent et leur répartition ont évolué entre 1953 et 1984. L'étude de la dynamique éolienne qui a contrôlé ces évolutions est menée sous deux angles :

- l'analyse des processus à l'œuvre ;

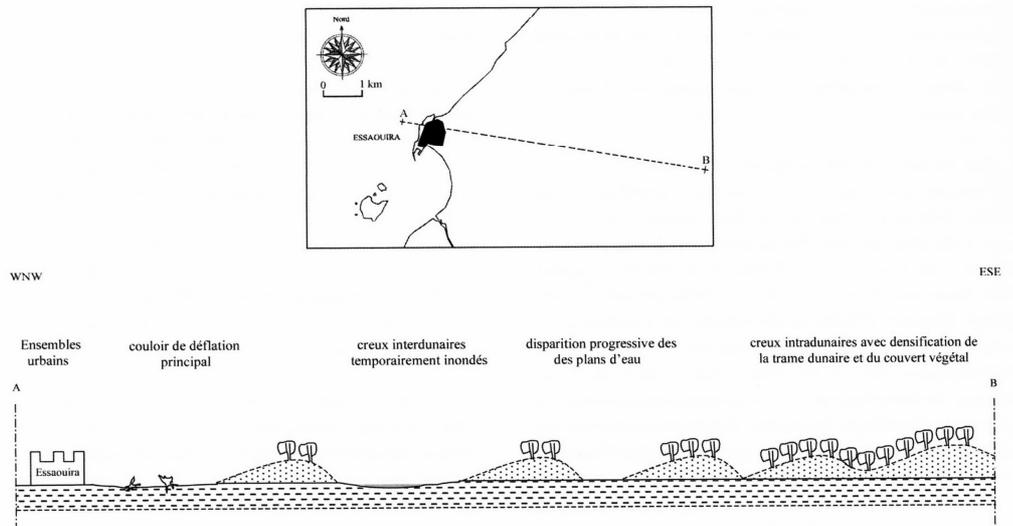


Figure 5 : Evolution du modelé dunaire en fonction du gradient de pression anthropique le long d'un transect AB perpendiculaire au trait de côte et à la direction de l'alizé.

- la comparaison d'une théorie avec le présent cas d'étude.

Dans un premier temps, il apparaît que la formule de Lancaster appliquée aux dunes d'Essaoouira fonctionne. L'indice de mobilité $M = 160$ semble correspondre aux résultats issus de l'analyse du géosystème. Cependant, si la formule intègre le facteur hydrique à travers les précipitations et l'évapotranspiration potentielle, elle ne prend pas en compte le temps de résidence des mares interdunaires formées par la lagune, ou, à l'inverse, les infiltrations des eaux superficielles qui pourraient peut-être s'exprimer par un coefficient de perméabilité de la roche sous-jacente aux dunes.

Des recherches sont en cours pour améliorer cette quantification et mieux approcher la mobilité effective des sables.

Dans cet exemple, la dynamique éolienne ne saurait se réduire à la dynamique dunaire :

- d'une part, les processus engendrés ne se limitent ni à la déflation, ni à l'évolution morphologique du massif ;
- d'autre part, si l'alizé est l'agent majeur primordial, toujours renouvelé de la dynamique façonnant le paysage dunaire, la composante anthropique constitue un autre agent morphogénique déterminant selon deux sens symétriquement opposés qui intègrent toute une échelle de nuances ; à la fois dans le ralentissement de la dynamique (boisements effectués pour fixer les dunes) et dans son accélération (coupe des dunes et prélèvements de sables, déboisements, surpâturage).

Les résultats de nos recherches s'accordent avec ceux obtenus sur d'autres espaces tant littoraux que continentaux d'Afrique du nord et saharienne, concernant l'extension du Sahara par le Nord au cours de l'Holocène récent (Ballais *et al.*, 1979, 2003 ; Ballais, 1984, 1994, 1996 ; Riser, 1988, 1996, 1999 ; Weisrock, 1993 ; Benazzouz, 1994, 2000, 2001 ; Leroux, 1995, 1996 ; Callot et Oulerhi, 1996 ; Simone *et al.*, accepté).

La prochaine étape de cette étude, orientée vers l'analyse multitemporelle avec des photographies aériennes plus récentes ou des images satellitaires, est envisagée afin de fournir un suivi plus complet du massif dunaire en même temps que son état actuel.

Remerciements

Merci au CAGEP-URA 903 du CNRS et au Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche pour leur appui matériel et financier. Les auteurs expriment leur vive reconnaissance aux Professeurs Jean Riser et Marc Côte dont le soutien a été fort apprécié, ainsi qu'aux relecteurs de la revue, pour leurs observations et suggestions qui ont permis d'améliorer sensiblement le manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- BAGNOLD R. A. 1941 *The physics of blown sand and desert dunes*, Methuen, Londres, 265 p.
- BAGNOLD R. A. 1951 Forme des dunes de sable et régime des vents, *Coll. Int. CNRS*, 35, 23-32.
- BAL M. 1993 *Dynamique de la végétation et évolution des sols des dunes maritimes d'Essaoouira*, Mém. de 3^e cycle, Ecole Nat. Forest. d'Ingén. de Salé, 98 p.

- BALLAIS J.-L. 1984 *Recherches géomorphologiques dans les Aurès (Algérie)*, ANRT, Lille, 2 vol., 626 p.
- BALLAIS J.-L. 1994 Désertification et barrage vert en Algérie : le cas des Zibans, *Revue de Géomorphologie Dynamique*, t. **XLIII**, 1, 1-8.
- BALLAIS J.-L. 1996 L'origine des limons sableux éoliens des monts de Matmata (Tunisie). *Etudes de Géographie Physique*, **XXV**, 35-44.
- BALLAIS J.-L. 1998 Rythmes et bilans de l'érosion dans les domaines arides, In *l'Érosion entre Nature et Société*. Édité par Y. Veyret (SEDES, Paris) 237-262.
- BALLAIS J.-L., MARRE A. et ROGNON P. 1979 Périodes arides du Quaternaire récent et déplacement du sable éolien dans les Zibans (Algérie), *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, **21**, 2, 97-108.
- BALLAIS J.-L., BENAZZOUZ M.T. et BENMOHAMMADI A. 2003 Environmental dynamics and land occupation in the Saharan margins of the Holocene Maghreb. In *The Mediterranean World. Environment and History*. Édité par E. Fouache (Elsevier, Paris) 341-351.
- BATTISTINI R., 1964 *Etude géomorphologique de l'extrême sud de Madagascar*, Thèse de Doctorat, 2 tomes « le relief de l'intérieur » et « le littoral », éd. Cujas, 636 p.
- BENAZZOUZ M. T. 1994 Etude des interactions relief-migrations éoliennes de sable dans la région de M'Doukal (Algérie). *Méditerranée*, **3**, 4, 51-58.
- BENAZZOUZ M. T. 2000 *Morphogénèse éolienne holocène et actuelle dans l'Atlas saharien oriental (Algérie) : conséquences sur la désertification*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Constantine, Algérie, 326 p. + annexes.
- BENAZZOUZ M. T. 2001 *Morphogénèse éolienne et désertification dans les monts des Zibans, Algérie*. rapport interne, Université de Constantine, 17 p.
- BOUDY P. 1958 *Economie forestière nord-africaine*, tome 3, Larose, Paris.
- CALLOT Y. 1987 Géomorphologie et paléoenvironnements de l'Atlas Saharien au Grand Erg Occidental : dynamique éolienne et paléolacs holocènes, *Mém. Sc. Terre Univ. P. et M. Curie*, **87-21**, Paris, 412 p.
- CALLOT Y. et OULEHRI T. 1996 Géodynamique des sables éoliens dans le Nord-Ouest saharien : relations entre aérologie et géomorphologie, *Geodynamica Acta*, **9**, 1, 1-12.
- CAPOT-REY R. 1963 Contribution à l'étude et à la présentation des barkhanes, *Travaux de l'Institut de Recherches Sahariennes*, **22**, 37-60.
- CHAHBOUN A. 1988 Les formations sableuses fluviales, littorales et éoliennes aux embouchures des oueds Tensift, Ksob, et Souss (Atlas atlantique, Maroc), Thèse de Doctorat, Géologie du Quaternaire, Paris VI., 187 p.
- CHEPIL W. S. 1945a Dynamics of wind erosion, I : nature of movement of soil by wind, *Soil Science* **60**, 305-320.
- CHEPIL W. S. 1945b Dynamics of wind erosion, III: the transport capacity of the wind, *Soil Science*, **60**, 475-480.
- CHEPIL W. S. 1950 Properties of soil which influence wind erosion, I : the governing principle of surface roughness, *Soil Science*, **69**, 149-162.
- CHEPIL W. S. et WOODRUFF N. P. 1954 Estimations of wind erodibility of field surfaces, *Journal of Soil and Water Conservation*, **9**, 257-265.
- CHEPIL W. S. et WOODRUFF N. P. 1963 The physics of wind erosion and its control, *Advances in Agronomy*, **15**, 211-302.
- CHEPIL W. S., SIDDOWAY F. H. et ARMBRUST D. V. 1962 Climatic factor for estimating wind erodibility of farms fields, *Journal of Soil and Water Conservation*, **17**, 162-165.
- CLOS-ARCEDUC A. 1969 Essai d'explication des formes dunaires sahariennes, *Études de photo-interprétation*, **4**, I.G.N., 66 p.
- COOKE R., Warren A. et Goudie A. 1993 *Desert Geomorphology*, UCL Press, 526 p.
- COQUE R. 1993 *Géomorphologie*. A. Colin, Paris, 452 p.
- EMBERGER L. 1952 Sur le quotient pluviothermique, *C.R.A.S.*, 2508-2510 (int.).
- FRYBERGER S. G. 1979 Dune forms and wind regime, *Prof. Pap.*, **1052**, 137-169.
- GENTILE W. 1997 *Caractérisation et suivi d'un champ dunaire par analyses sédimentologiques et télédétection : Essaouira – cap Sim (Maroc atlantique)*, thèse de Doctorat, Univ. d'Aix-Marseille I, Aix en Provence, 322 p. + annexes.
- GILETTE D. A. 1977 Fine particle emissions due to wind erosion, *American Society of Agricultural engineering, Transactions* **20**, 890-897.
- GILETTE D. A. 1979 Environmental factors affecting dust emission by wind erosion, In *Saharan dust*, édité par C. Morales (John Wiley, Chichester), 71-91.
- GLENNIE K. W. 1970 *Desert sedimentary environment*, Elsevier, Amsterdam, 222 p.
- HOUMIMYD M. et ALLAM M. 1990 *Etude de protection contre l'ensablement de la liaison routière entre Moulay Bouzerktoun et Essaouira*, Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire (Direction des Eaux. et Forêts et de la Conservation des Sols), 36 p.
- LANCASTER N. 1982 Dunes on Skeleton Coast, Namibia (South West Africa): Geomorphology and grain size relationships, *Earth Surface Processes and Landforms*, **7**, 575-587.
- LANCASTER N. 1985a Variations in wind velocity and sand transport on the windward flanks of desert sand dunes, *Sedimentology*, **32**, 581-593.

- LANCASTER N. 1985b Winds and sand movements in the Namib sand sea, *Earth Surface Processes and Landforms*, **10**, 607-619.
- LANCASTER N. 1987a Variations in wind velocity and sand transport on the windward flanks of desert sand dunes, reply, *Sedimentology*, **43**, 516-520.
- LANCASTER N. 1987b *Variations in surface shear stress over a small aeolian dune*, Reports of Program for Planetary Geology and Geophysics.
- LANCASTER N. 1987c Dunes of the Gran Desierto sand sea, Sonora, Mexico, *Earth Surface Processes and Landforms*, **12**, 277-288.
- LANCASTER N. 1987d Formation and reactivation of dunes in the southwestern Kalahari: palaeoclimatic implications, *Palaeoecology of Africa*, **18**, 103-110.
- LANCASTER N. 1988a The development of large aeolian bedforms, *Sedimentary Geology*, **55**, 69-90.
- LANCASTER N. 1988b Controls of eolian dune size and spacing, *Geology*, **16**, 972-975.
- LANCASTER N. 1988c On desert sand seas, *Episodes*, **11**, 12-17.
- LEROUX M. 1995 Circulation méridienne, agglutinations, anticyclones et déserts tropicaux, *Mém. Soc. Géol. de France*, **167**, 11-23.
- LEROUX M. 1996 *La dynamique du temps et du climat*, Masson, Paris, 310 p.
- LETTAU K. et LETTAU H. 1969 Bulk transport of sand by barchans of Pampa de la Joya in Southern Peru, *Z. Geomorphology N. F.*, **13**, 182-195.
- MAINGUET M., CANON-COSSUS L. et CHAPPELLE A. M. 1980a Utilisation des images Météosat pour préciser les trajectoires éoliennes au sol, au Sahara et sur les marges sahéliennes, *Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, bulletin **78**, 1-12.
- MAINGUET M., CANON L. et CHEMIN M.-C. 1980b Le Sahara : géomorphologie et paléogéomorphologie éoliennes, In *The Sahara and the Nile*, édité par M. A. J. Williams et H. Faure (Balkema, Rotterdam), 17-35.
- MAINGUET M. 1986 The wind and desertification processes in the Saharo-Saharan and Sahelian regions, In *Physics of desertification*, édité par F. El-Baz et M. H. A. Hassan (Martinus Nijhoff, La Haye), 210-240.
- Ministère de l'Agriculture et de la Mise en Valeur Agricole (MAMVA) 1994 *Programme budgétaire pour l'année 1995*, Direction Provinciale de l'Agriculture d'Essaouira, 166 p.
- METRO A. 1953 Techniques de fixation et de mise en valeur des dunes du littoral atlantique marocain, Extrait du Rapport annuel 1952 de la SRF, Rabat.
- MOUNIR O. 1988 *Forêt d'Essaouira : histoire d'une forêt marocaine*, Actes des Journées d'Etudes organisées les 15 et 16 Avril, SOMADE-Faculté des Sc. Jur. Econ. et Soc. de Casablanca, 111-114.
- PETROV M. P. 1976 *Desert of the world*, Israël program for scientific translation, Jerusalem.
- PYE K. 1980 Beach salcrete and eolian sand transport : evidence from North Queensland, *Journal of Sedimentary Petrology*, **50**, 257-261.
- RAFIK A. 1989 *Problématique du développement de l'espace socio-économique Essaouira-Haha*, mémoire de D.E.S. ès Sciences Economiques, Univ. Hassan II, Fac. Sc. Jur. Econ. Soc. Casablanca, 201 p.
- RISER J. 1988 *Le Jbel Sarho et sa retombée saharienne*. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc n°317, Rabat, 361 p.
- RISER J. 1996 (sous la direction de) *Le bassin de Tarfaya (Maroc atlantique, 28° N.) : Paléoenvironnements, Paléoanthropologie, Préhistoire*. L'Harmattan, Paris, 284 p.
- RISER J. 1999 *Géographie physique de l'Afrique occidentale et centrale*. Ellipses, Paris, 160 p.
- SIMONE Y. C. 1996 Essaouira : naissance d'une ville et impact de ses activités sur le milieu. In *Impact de l'homme sur les milieux naturels, Perceptions et Mesures*. Tèmes journées scientifiques de la Soc. d'Ecol. Hum., Aix en Provence, 19-20 mai 1995, édité par P. Baudot, D. Bley, B. Brun, H. Pagezy et N. Vernazza-Licht, (De Bergier, Châteauneuf de Grasse) 115-125.
- SIMONE Y. C. 2000 *Le géosystème dunaire anthropisé d'Essaouira-est (Maroc atlantique) : dynamique et paléoenvironnements*. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille I, 66 fig., 28 tabl., et 8 cart., 205 p.
- SIMONE Y.-C., BALLAIS J.-L., FONTUGNE M., GUENDON J.-L. et RISER J. accepté, Nouvelle occurrence et signification géodynamique d'une séquence de limons sahariens à l'Holocène moyen et récent (Essaouira, Maroc atlantique), *Quaternaire*, 25 p.
- TALBOT M. R. 1984 Late Pleistocene rainfall and dune building in the Sahel, *Palaeoecology of Africa*, **16**, 203-214.
- TSOAR H. 1974 Desert dune morphology and dynamics, Alarish, *Z. Geomorphology (suppl.)*, **20**, 41-61.
- VEYRET Y. (sous la coordination de) 1998 *L'érosion entre nature et société*, Dossiers des Images Economiques du Monde, SEDES, Paris, 339 p.
- WASSON R. J. et NANNINGA P. M. 1986 Estimating wind transport of sand on vegetated surfaces, *Earth Surface Processes and Landforms*, **11**, 505-514.
- WEISROCK A. 1982 Signification paléoclimatique des dunes littorales d'Essaouira – Cap Sim (Maroc), *Revue de Géomorphologie Dynamique*, **XXXI**, 91-107.
- WEISROCK A. 1993 *Géomorphologie et paléoenvironnements de l'Atlas atlantique (Maroc)*, Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, Rabat, n° 332, 487 p.

INTERACTIONS AND RELATIONSHIPS BETWEEN AEOLIAN AND ANTHROPIC DYNAMICS; THE RECENT EVOLUTION OF THE SAND DUNE GEOSYSTEM OF ESSAOUIRA (ATLANTIC MOROCCO)

Yves-Claude SIMONE* et Jean-Louis BALLAIS*

*CEGA-UMR ESPACE 6012 CNRS, Université d'Aix-Marseille I, UFR des Sciences géographiques
et de l'Aménagement, 29 av. Robert Schuman, 13621 Aix-en-Provence cedex 1, France.
Courriel. : kemerlau@wanadoo.fr et Ballais@up.univ-aix.fr

KEY-WORDS

Actor, Development control, Anthropism, Dunes, Aeolian dynamics, Geomorphology, Geosystem, self-organization.

ABSTRACT

The geographical area under study is a sand dune geosystem located between 31 and 32° north latitude and 9 and 10° west longitude, covering a littoral plain and low inland plateaux with an altitude below 300m (Figure 1). This geosystem presents an environment characterized by a semi-arid bioclimatic context with warm winters and receiving an average annual rainfall of 279 mm from two climatic normals (1925- 1976). It is tempered by NNE/ SSW Trade Winds, another major element which has a crucial part in shaping the landscape (Tables 1, 2, 3 and Figure 2) and whose frequency and intensity varied during the Holocene (Weisrock, 1993; Simone & al., accepted).

This climatic feature represents a very dynamic morphogenic agent, which had contributed to the formation of the consolidated sandy marine quaternary deposits topped with mobile dunes and recent sands partially settled.

It is on those outcrops that the port city of Essarouira is built, off-centred on its atlantic front and which is the main centre of the geosystem from which the anthropism works and the anthropo-dependency develops.

The recent topographical evolution of mobile dunes is analysed by diachronic photo-interpretation : morphology of the massif, types and spatial distribution of sand dune forms with their mobility (Simone, 2000). A discussion has emerged in order to make a transitory assessment and arouse consi-

deration and comments upon anthropism and the role of man as morphogenic agent.

*By the hindrances they form and the heavy constrains they have on the local living, the sand dune development and advancement, the road links getting stuck in the city outskirts and outside homes (Plate 1, page 69), and in the medina, yet protected by high battlements, have interpe- lated the actors on various scales. These phenome- na led the public authorities to set up a project to stabilize dunes with planting allochthonous species such as the *Acacia cyanophylla*, *Acacia cyclops*, and *Eucalyptus gomphocephala*, for the principal ones. Thus, the dunes have been partially settled mechanically and biologically from 1917 and in several stages (Figure 3).*

With over one century ahead of the present durable development policies, this "fitting out" and planning initiative has been going on until today when the silvicultural activity has changed little by little with the monitoring and care of the wooded perimeter but plantations are continued in some sectors. It was the first operation of its kind conducted in Morocco (Metro, 1953, in Bal, 1993).

Then, the question of the morphodynamism of the sand dune massif is raised, with and under the anthropic (inter)action. And, from there, that of the pregnancy of the aeolian action on the geosystem according to the anthropisation's place in the sand dune dynamics.

The diachronic photo-interpretation is achieved from the following series of black and white aerial negatives: the first is made from IGN aerial photo- graphs at 50,000^m recorded during the mission n°17 on 10 August 1953 between 1.30 pm and 2.00 pm in the visible band at an absolute altitude of 6,250 m and with a focal distance of 125mm; the

second is made from IFN at 20 000th, recorded during the mission n°852 in December 1984 within the infrared band.

The cartography of the sand dune massif is carried out by the Stereozoom Transferscope Bosch & Lomb stereoscope at the STSI (Remote Sensing and Image Sciences Service) of the CEREGE (Research and Teaching of Environment Geosciences European Centre) in order to determine and represent its structuring and the different textures at its contact with the city on both dates (**plates 2 and 3, page 70**).

The general morphology of the massif makes out in its delineation clearer on plate 2 (1953) than plate 3 (1984) with a more marked contrast of vegetal density and more limited sand spreadings. Its limits are somewhat modified : in 1953, the more frayed and straight layout of the massif seems to be more directed by the direction of the Trade Winds than in 1984 and its general morphology is more regular ; in 1984, its NE and SW extremities reduce whereas its eastern fringe increases inwards following a bloated shape. However, the western fringe undertakes a concavity due to the urban urge eastwards which gains ground on the sand dune space.

The many different forms of sand-dune accumulation cannot be the object of a specific typology on the grounds that they are not free shapes, that is to say they are capped with bunches of vegetation which tend to limit their mobility and modify their geometry from very characteristic shapes.

However, we can recognize on the massif of 1953 as on that of 1984 some barkhanic and barkhanoids shapes (isolated, associated barkhans, barkhanoid lines) and atypical and more complex shapes resulting from the settling of dunes by vegetals. The sand dune forms of 1984 are characterized by a bigger convexity and the dunes are larger than those of 1953. They tend to gather and merge together to form one single and massive dune. **Plate 4, page 71** illustrates two types of barkhanic shapes interspersed with regularly inundated sandy depressions.

The sand dune forms are spatially distributed over sand spreadings, much more delineated and larger in 1953 than in 1984. In about thirty years, the massif tends to narrow its sand dune weft. The vegetalized dunes are more numerous and larger in 1984, causing their coming nearer one another, and the bare extra-dune sand surfaces much less extended than in 1953; the phytomass has developed and densified from bunches of vegetation to clumps.

According to the terminology in use by Cooke & al. (1993) which qualifies the term "settled" as

ambiguous and prefers to distinguish "anchored dunes" from "stabilized dunes", the cartography covering the period 1953- 1984 shows that the massif is neither made from stabilized dunes nor anchored dunes because, when we superimpose the two plates, there is no coincidence of the sand-dune shapes. Today, we can assert from the terrain that the level of anchorage is reached even if it remains fragile (**Plate 5, page 72**). The multiplication of dunes between 1953 and 1984 as well as the growth of their area seem to confirm this trend.

This general evolution must not be interpreted as meaning a decrease in the frequency and/or the intensity of the Trade Winds and their morphodynamic capacity, but rather as a stage of "maturity" of the massif which would be stabilizing judging from the afforestation carried out windward which has slowed down the sand dune dynamics considerably and has anchored parts of the dunes.

The study of the orientation of the dunes gives indications about the aeolian regime and more particularly the direction of wind. Weisrock (1982) highlighted two major directions of mobile dunes in the Essaouira region and cape Sim, from the terrain and the aerial photographs (N 26° and N 14°). Our observations partly coincide with the authors' for the inland barkhans (N° 15) but differ for the south-west part of the massif where we can find N 349° ; this component NNW appears as soon as 1953 and corresponds to a Trade Winds direction diverted by the urbanization of the industrial area located in the north of the town.

These comparative remarks illustrate the general direction of the present aeolian dynamics in North Africa the origin of which is the anticyclonic cell of Açores. They confirm the results obtained by Ballais & al. (1979), Ballais (1984, 1994 and 1996), Riser (1988 and 1999), Weisrock (1993), Benazzouz (1994, 2000 and 2001), Leroux (1995), Callot and Oulerhi (1996), Simone & al. (accepted) about the expansion of Sahara during the upper Holocene by aeolian systems from the north.

The results from these researches branch out on a discussion about the mobility of sands on the one hand, and the recent remobilizations on the other hand. The study of the sand dune dynamics allows us to understand better the working of the geosystem taking the processes of anthropisation into account.

Lancaster (1987d and 1988c, in Cooke & al., 1993) established two sand mobility indexes the second of which is expressed by the formula : $M = W / (P / PE)$. In applying this formula to Essaouira, we find $M = 160$ meaning thus, according to the author, that the upslopes and the tops of dunes are still active, in spite of the afforestation carried out.

These two parts of the dune are those which are the most set out to wind and to a faster wind according to the aerodynamics (Coque, 1993). However, we must consider the regular filling up of the interdune basins (**Plate 4, page 71**) immobilizing particles in the bottom and on the downslopes, a phenomenon which is not included in Lancaster's formula and without which the *M* value, thus the sand mobility would be much higher.

Complementary to this quantification, the observations on the terrain allow us to understand better the consequences generated by the high mobility of sand particles (**Plate 5, page 72**). Deflation hollows are often formed at the top of dunes following the holes made by deforestation (**Plate 5b, page 72**) and due to caprine over-grazing mainly (**Plate 5c, page 72**). More spectacular is the scale of the sedimentary ablation measured on logs of eucalyptus planted on dunes blown away today by the action of deflation (**Plate 5d, page 72**).

The aeolian erosion which allowed the clearing out of these logs reaches the value of 3cm/year (Simone, 2000) and the difference in level between the two logs indicates the palaeotopography. Thus, the anchorage of the dunes remains fragile as the diachronic analysis and later the calculation of Lancaster's mobility index have shown, which is confirmed by the terrain (**Plate 5, page 72**). The questions that aeolian dynamics go on raising (**Plate 1, page 69**) are the result of remobilizations caused by various actions linked to the anthropic factor.

The recent remobilizations are the object of a close cooperation between the Provincial Direction of Agriculture and the Direction of Waters, Forests and Soils Conservation of Essaouira. The "fighting against sand-spreading" and "the afforestation of the damaged woodland" (Ministry of Agriculture and of Agricultural Development, 1994) show the difficulties faced by local, regional and national authorities, in spite of the afforestation achieved.

The urban growth and demographic pressure which goes with it are the main causes of those remobilizations. The demographic pressure is revealed by an increase of the population (**Figure 4**) the limited welcoming structures of which require new buildings. The comparison between **Plates 2 and 3, page 70** show the expansion of the urban area of 400 m over 30 years onto the sand dune massif. The urban growth is carried out by spanning over sand dune space so that aeolian sands in situ are easy to tap, and then cheap, used in the making of mortars and concretes for building needs (**Plate 6, page 71**). The particles are thus moved around, making their transport by the Trade Winds more easily so that some houses, located within 60 m from the nearest dunes

are swept over by heaps of sands which block their entrance and cover their fronts (**Plate 1, page 69**). In the same way, the regular sand spreadings of the main road n° 8a in direction of Agadir at the bridge of the wadi Ksob, has been observed on the various trips of study.

To these questions about anthropic aeolian sands, we can add that of the process of haloclasty likely to arouse in the middle term, on the foundations of urban buildings which spread on the site of the sand dune massif. They are set in parts in an underlying clay loam sequence containing sodium chloride, assessed in X diffractometry on complete fraction with a crystallization rate of 2% on average, but reaching peaks of 7%, mainly on the surface (Simone, 2000).

The forest use of the sand dune space is another declination of the demographic pressure as an anthropic factor. Resources in combustion wood (home consumption) and timber (craft and marquetry, building) are regularly extracted from dunes submitted to a project of stabilization since 1917 (Simone, 1996 & 2000). It is mainly *Juniperus phoenicea* (endemic species), *Acacia cyanophylla*, *Acacia cyclops* and *Eucalyptus gomphocephala* (afforestation species).

The pastoral use of the sand dune space increases the pressure by the intensification of grazing originating mainly from the desertification of the hinterland which induces an expansion and a convergence of the pastures towards the county town of the province where the verdant dunes constitute an excellent herbage; phenomenon which tends to intensify the depopulation.

Figure 5 represents a transect describing the sand dune pattern and the plant cover from Essaouira. It marks a gradient in the effects of the decreasing anthropism when going further and further away from the urban space.

Finally, passing over the idiographic/nomothetic method opposition together with the parallel between the two to underline the loopholes of one or the other, seems fertile to us. Researches are going on to improve Lancaster's quantification and coming nearer the effective mobility of sands.

In this example, the aeolian dynamics cannot be reduced to the sand-dune dynamics: the processes generated are neither limited by the deflation nor the morphologic evolution of the massif; moreover, we show that if the Trade Winds are the first and major agent constantly renewed in the dynamics which shapes the sand-dune landscape, the anthropic component is another determining morphogenic agent, in 2 ways symmetrically opposed, which both integrate a scale of nuances; in the slowing

down of the dynamics (afforestation carried out to stabilize dunes) and its increasing (dunes cutting and sand removal, deforestation, over-grazing).

The results of our researches coincide with those obtained on other coastal and continental spaces of North Africa and Sahara, concerning the expansion of Sahara northwards during the recent Holocene (Ballais & al., 1979; Ballais, 1984, 1994, 1996; Riser, 1988, 1999; Weisrock, 1993 ; Benazzouz, 1994, 2000, 2001; Leroux, 1995, 1996; Callot and Eulerhi, 1996; Simone & al., accepted).

Going from the diachronic to the multitemporal analysis, the study of the sand-dune massif from more recent aerial photographs or satellite images would allow to provide a more complete monitoring together with its present state.

BIBLIOGRAPHY

See French text.

LIST OF FIGURES, PLATES AND TABLES

Figure 1: Location map. Coastal plain, inland plateaux, hills and mountains.

Figure 2: Frequency and intensity of efficient winds at Essaouira (force > 6), weather reports from 1958 to 1967 (after Weisrock, 1993).

Figure 3: Evolution of settling works of Essaouira coastal dunes (after the Essaouira Forest Service). Spontaneous planting, boundary of settling works, date of settling works, processed area (in hectares), wadi Ksob, shoreline, scale, north.

Figure 4: Demographic increase of Essaouira, after Mounir (1988). Inhabitants.

Figure 5: Evolution of the sand dune landform according to the anthropic pressure gradient along a transect AB perpendicular to the coastline and to the Trade Winds direction. Urban housing schemes, main deflation hollow, interspersed sandy depressions temporarily inundated, progressive

fading of stretches of water, intradune depressions with density increase of sand-dune network and plant cover.

Plate 1: Heaps of sands blocking the entrance of homes which line the main deflation hollow (photographies: Yves-Claude Simone, the 5th VII 1996).

Plate 2: Cartography of the sand dune massif and its contact with the urbanized area in august 1953. Beach, barrier-beach ridge, Trade Winds, change of vegetation density, sand spreadings, not very wooded dunes, tree cover on consolidated dune substratum.

Plate 3: Cartography of the sand dune massif and its contact with the urbanized area in december 1984. Urban expansion between 1953 and 1984, stretches of water, clear tree-like formation on mobile dunes, clearing on mobile dunes, sand spreadings, tree-like formation with sandy breaks.

Plate 4: Leeward flanks of wooded barchans (photographies: Yves Claude Simone, the 5th VII 1996).

Plate 5: Clearing out of eucalyptus and acacias roots by deflation, a: on flanks, b and c: in deflation hollows, d: scale of the deflation in 50 years (photographies: Yves Claude Simone, the 5th VII 1996).

Plate 6: Supplying of aeolian sands used as building materials and new residential housing schemes. (Photographies: Yves Claude Simone, the 5th VII 1996 and the 8th X 1997).

Table 1: Mean velocity of winds in km/h, after Chahboun (1988). Stations, winter, spring, summer, autumn.

Table 2: Calm and windy days at Essaouira (1958-1967), after Weisrock (1993). Number of calm days for 10 years, average, percentages, percentages of windy days. January, February, March, April, May, June, July, August, September, October, November, December, year.

Table 3: Classification of wind regimes in frequency and intensity along the twelve months for years 1958 to 1967. Are only taken into account the sums of the products ($f \times n$) upper than 500 from the 8 stronger winds, f being the wind-speed in m/s (from 2 to 20), n the number of windy days corresponding; after Weisrock (1993). Month, grade.



a)



b)



c)

Planche 1 : Amas dunaires bloquant l'entrée des habitations qui bordent le couloir de déflation principal (clichés : Yves Claude Simone, le 5 VII 1996). Le fond des deux premières photographies est orienté vers l'Est et celui de la troisième vers le Sud.

Plate 1: Heaps of sands blocking the entrance of homes which line the main deflation hollow (photographies : Yves Claude Simone, the 5th VII 1996).

ARTICLE PAGE 39, Y-C SIMONE AND J.-L. BALLAIS

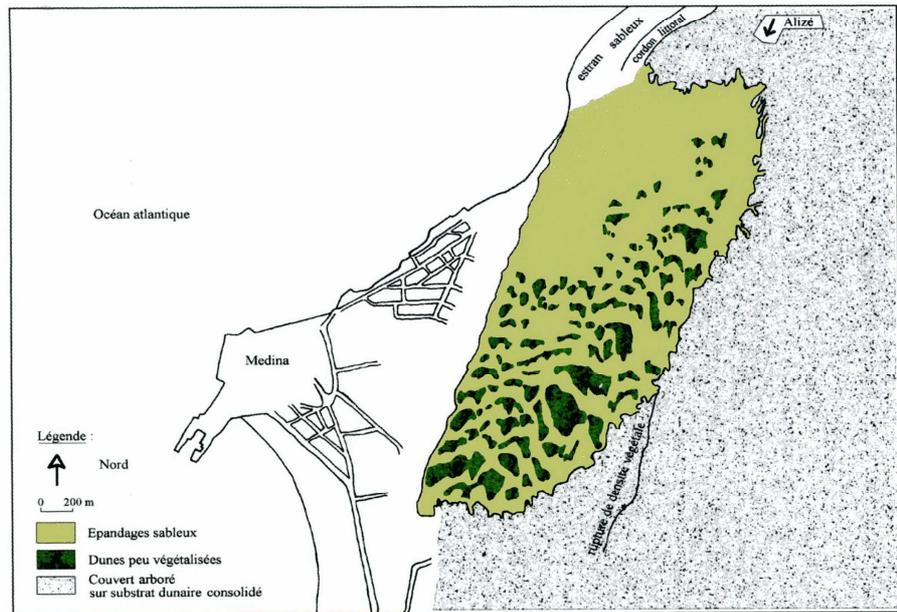


Planche 2 : Cartographie du massif dunaire et son contact avec l'espace urbanisé en août 1953. Estran sableux, cordon littoral, alizé, rupture de densité végétale, épanchages sableux, dunes peu végétalisées, couvert arboré sur substrat dunaire consolidé.

Plate 2: Cartography of the sand dune massif and its contact with the urbanized area in august 1953. Beach, barrier-beach ridge, Trade Winds, change of vegetation density, sand spreadings, not very wooded dunes, tree cover on consolidated dune substratum.

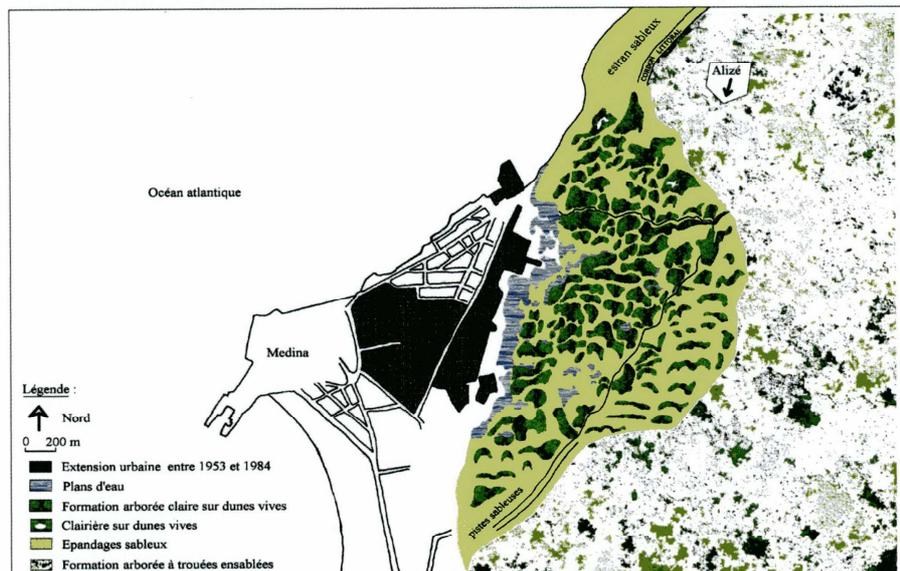
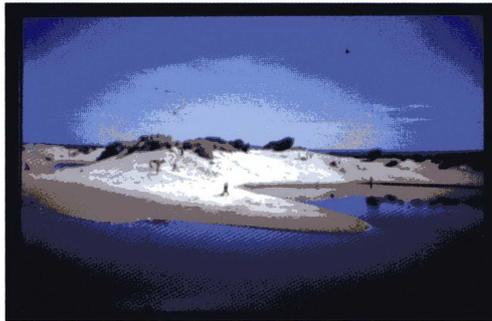


Planche 3 : Cartographie du massif dunaire et son contact avec l'espace urbanisé en décembre 1984. Extension urbaine entre 1953 et 1984, plans d'eau, formation végétale arborée claire sur dunes vives, clairière sur dunes vives, épanchages sableux, formation végétale arborée à trouées ensablées.

Plate 3: Cartography of the sand dune massif and its contact with the urbanized area in december 1984. Urban expansion between 1953 and 1984, stretches of water, clear tree-like formation on mobile dunes, clearing on mobile dunes, sand spreadings, tree-like formation with sandy breaks.



(a)



(b)

Planche 4 : Versants sous le vent de barkhanes boisées (Clichés : Yves Claude Simone, le 5 VII 1996).

Plate 4: Leeward flanks of wooded barchans (photographies : Yves Claude Simone, the 5th VII 1996).



(a)



(b)



(c)

Planche 6 : Approvisionnement en sables éoliens utilisés dans l'industrie du bâtiment et nouveaux ensembles résidentiels (Clichés : Yves Claude Simone, le 5 VII 1996 et le 8 X 1997). Le fonds des photographies est respectivement orienté vers l'Ouest, l'Est et le Nord-Ouest.

Plate 6: Supplying of aeolian sands used as building materials and new residential housing schemes. (photographies : Yves Claude Simone, the 5th VII 1996 and the 8th X 1997).

ARTICLE PAGE 39, Y-C SIMONE AND J.-L. BALLAIS

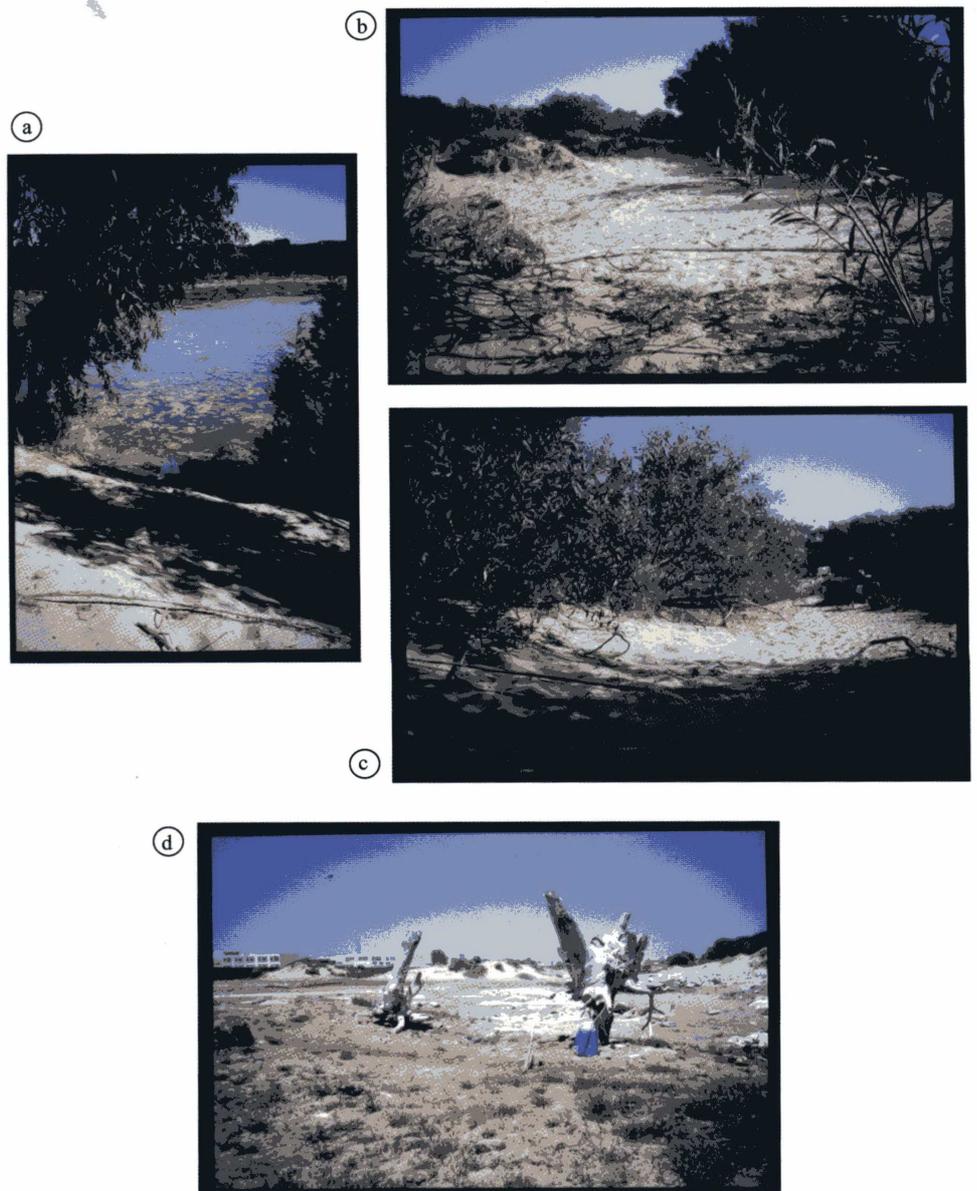


Planche 5 : Mise à nu de racines d'eucalyptus et d'acacias par la déflation, a : sur versants, b et c : dans des couloirs de déflation, d : Ampleur de la déflation en 50 ans (Clichés : Yves Claude Simone, le 5 VII 1996). Le fond des photographies a et c est orienté vers l'Est, celui de la photographie b, vers le Sud et celui de la photographie d, vers le Nord.

Plate 5: Clearing out of eucalyptus and acacias roots by deflation , a : on flanks, b and c : in deflation hollows, d : scale of the deflation in 50 years (photographies : Yves Claude Simone, the 5th VII 1996).

ARTICLE PAGE 39, Y-C SIMONE AND J.-L. BALLAIS