

B) Photo-interprétation diachronique et dynamique dunaire

Le jeu de l'activité éolienne est donné par l'alizé, aéromasse très dynamique et élément abiotique faisant partie intégrante du géosystème. Il en modifie sa morphologie, la répartition des dunes au sein de celui-ci et les formes dunaire qui le composent.

La photo-interprétation diachronique est réalisée à partir de clichés aériens IGN en noir et blanc, au 50 000^e, pris lors de la mission n° 17 du 10 Août 1953, entre 13 H 30 et 14 H, dans le domaine du visible ; l'altitude par rapport à la mer est de 6250 m et la focale de 125 mm ; et de clichés IFN en noir et blanc, au 20 000^e, enregistrés 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 commun du Traitement et des Sciences de l'Image) afin de représenter ses différents états de surface et de délimiter avec précision son contact avec la ville, sa morphologie et les formes dunaire qui le composent aux deux dates.

Les cartes n° 5 et 6 sont réalisées afin d'établir des comparaisons morphologiques entre 1953 et 1984 et notamment de la partie occidentale, la plus fragile car la plus exposée aux vents dominants efficaces et la moins boisée ; c'est le secteur qui jouxte la ville.

La première indique les états de surface, l'extension et les formes du massif dunaire au 10 Août 1953 et la seconde représente les mêmes variables en 1984, augmentées de l'extension du bâti et des lagunes et mares interdunaires.

Le premier document (carte n° 5) montre la délimitation très nette d'un secteur très dégarni du massif alors que tout autour, les couleurs plus sombres rendues par la photographie aérienne indiquent une végétation plus développée avec une densité plus élevée et des particules éoliennes moins présentes. En revanche, la photographie de 1984 ne montre pas une telle démarcation (cf. carte n° 6).

En 1953 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.

Les épandages sableux sont beaucoup plus marqués et beaucoup plus larges en 1953 qu'en 1984 où leur extension a fortement réduit. Ils forment une sorte de tapis sur lequel ondulent les dunes 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 » tendrait même à s'inverser comme si une sorte de « bouchon » dunaire se formait au Nord du massif et ralentissait la dynamique dunaire.

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

Les formes d'accumulation dunaire 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 touffes de végétation qui tendent à limiter leur mobilité et à modifier leur géométrie. 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 dunaire de 84 sont caractérisées par une plus grande convexité et les dunes sont plus larges que celles de 53. Elles tendent à se joindre pour ne former plus qu'une dune unique et massive.

La figure 28 illustre deux types de formes barkhaniques entre lesquelles les cuvettes d'inondations s'intercalent. La première forme a été photographiée suivant une direction

Ouest/Est ; elle est basse et assez dénudée (la surface de sables apparents est supérieure à la surface couverte) et on devine 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 de la dune est couvert de végétation alors que les versants en sont dépourvus et s'étalent parfois vers l'aval-vent sous la forme de langue de sable indiquant le sens du vent efficace actuel (branches de la barkhane).

La seconde forme a été photographiée suivant une direction Sud-Ouest/Nord-Est ; elle 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*.

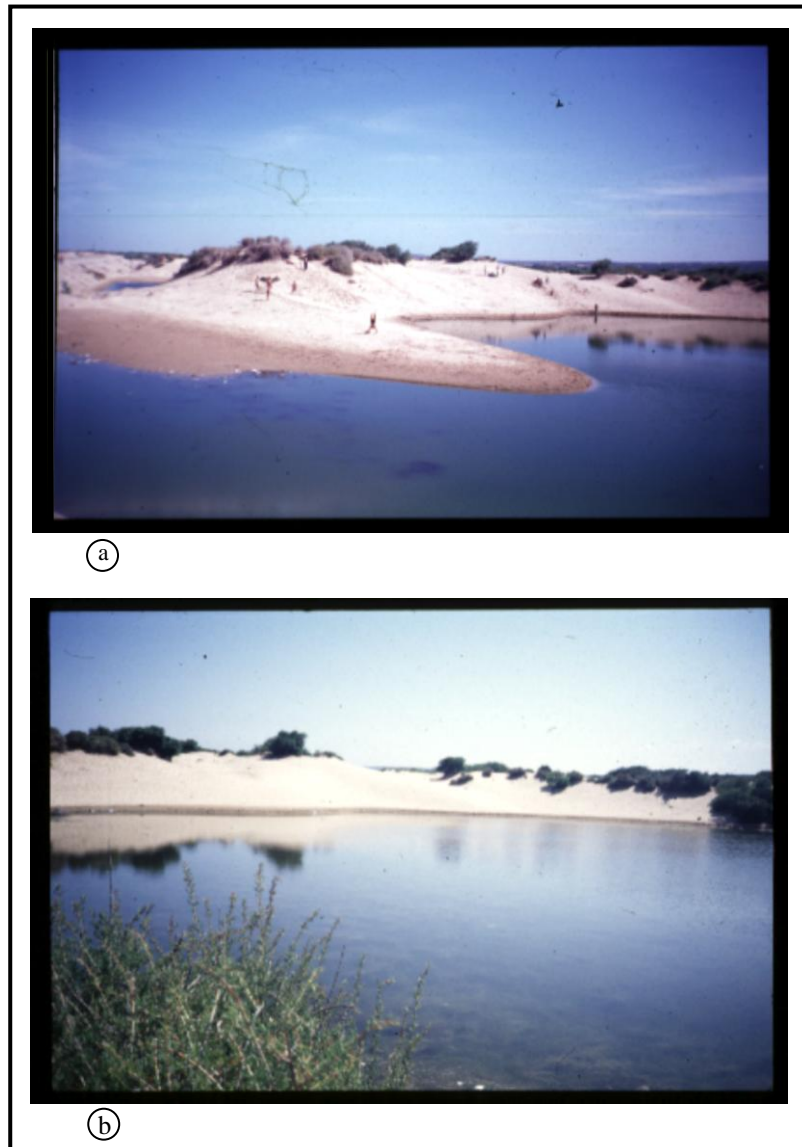


Fig. 28 : Versants sous le vent de barkhanes boisées ; Clichés : Claude SIMONE, le 5 VII 1996.

En une trentaine d'années, le massif dunaire a donc tendance à se « resserrer ». En effet, la végétation prend le pas en 84 sur les zones de sable nu beaucoup moins étendues qu'en 53 ; elle s'est développée et densifiée en même temps que la répartition des dunes au sein du massif est devenue plus dense. Selon la terminologie employée par COOKE et al. (1993) qui estiment que le terme « fixé » est ambigu, la cartographie embrassant la période 53-84 montre que le massif n'est composé de dunes ni ancrées ni stabilisées. En 53, le stade dunaire est

antérieur à celui d'un ancrage, celui-ci a pu se produire en fin de période (au début des années 80 par exemple) et une cartographie de la période actuelle (fin des années 90) à la même échelle serait nécessaire pour savoir si cet ancrage a réellement débuté autour de 84 et si les dunes ont atteint aujourd'hui le stade de stabilisation.

Cependant, le rapprochement des dunes et la croissance de leur superficie entre 1953 et 1984 (cf. cartes n° 5 et 6) indique, malgré tout une tendance à la stabilisation.

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

L'exemple d'Essaouira-Est, sans pour autant être comparable « au fleuve de sable » du Cap Juby (région de Tarfaya, Maroc) observé par CALLOT et OULERHI (1996), s'en rapproche beaucoup. 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. Etant littoral, l'exemple d'Essaouira-Est est plus semblable à la seconde région étudiée par CALLOT et OULERHI (1996). En effet, les cartes n° 5 et 6 illustrent la zone d'alimentation du stock sableux (estran et cordon littoral) et la localisation du dépôt (massif dunaire). De la même manière la plage de Tarfaya située à l'Est du Cap Juby constitue la source de stock sableux qui alimente les « fleuves de sable », à l'exception près que cette plage est presque perpendiculaire à la direction des vents dominants efficaces alors que dans le cas d'Essaouira-Est elle est parallèle.

Les types de dunes observés et surtout leur orientation apportent des indications sur le régime éolien et notamment la direction du vent. Ainsi A. 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 dunaire d'Essaouira-Est deux directions principales sont aussi relevées : une direction N 15° et une seconde de N 349° pour le massif de 53 ; et une direction de N 15° également et une seconde de N 348° pour le massif de 84. La direction de N 15° coïncide avec celle de N 14° relevée par A. 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 sur la carte n° 5 (1953) sur la partie Sud-Ouest du massif jusqu'au cordon barkhanoïde environ, alors que la direction N 15° s'étend sur toute la partie Nord du massif et sur toute sa partie orientale. 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 (A. WEISROCK, 1982).

Des changements de direction plus importants encore des vents dominants ont été observés par BATTISTINI (1964) au Sud de Madagascar à la différence 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°.

Le massif dunaire d'Essaouira-Est représente la manifestation d'un processus d'accumulation relativement importante mais il constitue parallèlement une zone de transit des sables qui, remobilisés par l'alizé, vont s'accumuler au Sud d'Essaouira jusqu'au Cap Sim (GENTILE, 1997).

L'ensablement de la route principale n° 8a en direction d'Agadir au niveau du pont de l'oued Ksob situé au Sud du géosystème a été régulièrement vérifié au cours des missions scientifiques ; de même, les placages de sables éoliens les plus manifestes sont ceux qui recouvrent la rive gauche de la vallée du Ksob suivant une direction à peu près perpendiculaire à celle de l'alizé sur quelques kilomètres avant l'embouchure, en amont du pont de la route principale n° 8a.

Dans la région d'Essaouira l'aéromasse est caractérisée par un élément climatique majeur : l'alizé qui constitue le vent dominant efficace.

La dynamique éolienne dont il est à l'origine se traduit par des phénomènes d'érosion importants dont les processus de déflation et de corrasion sont le moteur.

Aussi, l'analyse diachronique du géosystème dunaire entre 1953 et 1984 par photo-interprétation montre que sa partie la plus instable et la plus fragile correspond au secteur occidental qui borde la ville ; son existence est directement liée à une zone d'alimentation qui le jouxte constituée par l'estran sableux et le cordon dunaire. Mais elle semble renforcée par la proximité de la concentration urbaine d'Essaouira. En trois décennies la forme du massif a considérablement changé puisque son individualisation très marquée en 53 l'est beaucoup moins en 84 et puisque les limites très nettes de 53 sont moins affirmées en 84. La croissance du couvert végétal joue ici un rôle majeur. La répartition des dunes a elle aussi été modifiée car la dichotomie Nord-Sud de 53 s'est complètement effacée voire presque inversée en 84. Le « maillage » dunaire s'est densifié témoignant d'une dynamique dunaire très active entre 53 et 84. Mais la superficie des dunes ayant nettement augmenté et leur forme s'étant élargies, le système aurait tendance à se stabiliser d'autant plus que l'amont vent est obstrué par des dunes massives en 84 (carte n° 6) alors qu'il était complètement libre en 53 (carte n° 5).

Une télé-analyse à partir d'images satellitales ou de photographies aériennes récentes permettrait de passer de l'analyse diachronique à l'analyse multitemporelle et de préciser si actuellement les dunes sont seulement ancrées ou véritablement stabilisées.

Malgré la faiblesse des précipitations à Essaouira les eaux météoriques exercent une influence notable sur le géosystème. Mais les actions hydriques semblent avoir une double origine.

3) L'hydrodynamisme superficiel et souterrain

Indispensable au développement de la vie donc d'éléments biotiques, l'eau n'a pas la même dynamique et par conséquent le même impact au sein du géosystème suivant qu'elle provient de l'atmosphère, du réservoir océanique ou du réservoir phréatique. Ce troisième élément abiotique ou hydromasse rassemble les trois origines dans toute étude géosystémique et ici en particulier.

Les eaux météoriques remplissent régulièrement les cuvettes interdunaires mais dans quelle mesure les eaux océaniques et/ou celles d'un aquifère alimentent les dépressions ?

A) Des eaux météoriques très variables

Comme il est décrit au chapitre II Aa, la variabilité des précipitations est triple : elle est saisonnière, annuelle et pluriannuelle. Fortement accusée durant l'année puisque les pluies d'été sont nulles, la variabilité est moins prononcée aux échelles annuelle et pluriannuelle mais elle peut être à l'origine d'inondations majeures, parfois catastrophiques, telles celles qui sont survenues pendant l'hiver 96, sur tout le littoral atlantique, causant des dégâts humains et matériels considérables.

Ces précipitations intenses ont renforcé en quelques jours, à la fois la variabilité saisonnière, annuelle et interannuelle. Elles ont permis de vérifier que le substrat limono-argileux constitue une strate quasiment étanche (cf. fig. 23) puisque depuis Janvier 96, même si le niveau a baissé, certaines dépressions étaient encore remplies en Juin 98 et d'autres formaient des bas-fonds humides.

Cependant, à défaut d'être saisonnier, le temps de résidence de ces nappes d'eau superficielles est, sinon annuel, pluriannuel mais assurément temporaire puisque l'ablation du fond de la dépression a été démontrée.

Si elles ne permettent pas de constater une périodicité pluriannuelle du temps de résidence des plans d'eau, les cartes n° 5 et 6 rendent compte de l'empreinte saisonnière ; la première correspondant à la photographie aérienne prise en milieu d'été (le 10 Août 1953) ne mentionne aucun point d'eau au sein du massif dunaire ; alors que la seconde relative au cliché pris en fin d'automne ou en début d'hiver (Décembre 84) laisse apparaître une multitude de plans d'eau.

Les dunes étant perméables filtrent les eaux précipitées qui s'accumulent à leurs bases et remplissent les dépressions. La diffractométrie des rayons X indique la présence de calcite dans les sables dunaires (cf. fig. 22) et les valeurs indiquées étant des rapports de surface de diffraction qui correspondent à des indices de cristallinité, le tableau n° XIV indique la valeur relative des teneurs en calcite. Elles ont été obtenues par dissolution à l'acide chlorhydrique dilué. La dissolution préalable de la matière organique, trop faible, n'a pas été nécessaire.

Protocole d'analyses suivi :

- séchage des échantillons en étuve à 105 ° C pendant 48 H,
- pesée nette à 20 g de matière par échantillon,
- mélange de 20 g d'échantillon avec 40 ml de HCl 1 N dans un tube à essai,
- passage au secoueur jusqu'à ce que la réaction tombe,
- ajout de quelques gouttes de CaCl pour les échantillons argileux,
- passage à la centrifugeuse à 3000 tours / mn pendant 15 mn,
- évacuation du surnageant,
- ajout de 40 ml de HCl 1 N,

- nouveau passage au secoueur,
- etc...jusqu'à ce que l'échantillon ne réagisse plus lors de son immersion dans le HCl,
- rinçage de l'échantillon à l'eau distillée,
- séchage à 105 ° C pendant 48 H,
- pesée nette des échantillons.

Tableau XIV : Taux de carbonates de calcium contenus dans les dunes et le substratum.

<i>Topogr.</i>	<i>Dunes</i>					<i>substratum</i>										
<i>Ech.</i>	Sne	Vso	Vne	Sso	Sd	dep 5	dep 10	dep 15	dep 20	dep 25	dep 30	dep 35	dep 40	dep 45	dep 50	dep 55
<i>Taux de CaCO₃ en % de la masse</i>	41	42	40	43	38	20	26	32	21	19	17	17	14	12	13	12

Les valeurs les plus élevées sont celles des dunes et de l'échantillon sd prélevé dans le sol d'une dépression intradunaire (cf. fig. 13, chapitre II3B) située quelques dizaines de mètres plus à l'Est de la dépression interdunaire où a été extraite la carotte sédimentaire (plus de 40 % en moyenne).

Les eaux de pluie s'infiltrent à travers les dunes et exercent une action de décalcification en surface à l'origine de la migration en profondeur des carbonates. Si aucun encroûtement n'est apparu à la base des dunes, sur leur pourtour, un début de cimentation a déjà pu se produire en leur centre.

La relative richesse en calcium issu des carbonates contenus dans les sables dunaires (cf. tabl. XIV) et la taille relativement gossière d'une proportion de particules (sables grossiers) semblent empêcher le phénomène de battance puisque qu'aucun début de croûte superficielle n'a été observé au cours des diverses missions de terrain.

Suivant le total pluviométrique annuel, les dépressions interdunaires restent inondées pendant une période plus ou moins longue durant laquelle elles tendent à se combler. Mais la minéralogie des argiles montre qu'en réalité ces périodes de comblement ne sont pas suffisamment longues pour être effectives et que l'alizé prend le pas sur les précipitations en creusant les dépressions qui constituent des formes d'érosion et non des formes d'accumulation.

Aussi, comme le montre la figure 10 (chapitre I2C), le massif dunaire est situé au pied de la falaise morte ouljienne. Il ne fait pas de doute qu'une action de ruissellement de direction Est-Ouest sur le talus de la falaise morte arrache et entraîne des sédiments dans la plaine littorale envahie par les dunes. Ces particules circulent avec l'eau et vont se déposer entre les dunes. A. WEISROCK (1980) a déterminé les cortèges de minéraux argileux des croûtes dunaires relatives aux dunes accumulées sur les terrasses marines respectives. Il relève :

- sur le Moghrébien des croûtes à smectite,
- sur le Maarifien des croûtes à attapulgate,
- et sur l'Ouljien et le post-Ouljien, des croûtes à illite-chlorite.

Ainsi, ces données sont compatibles et corroborent nos analyses et nos observations sur la surface de contact formation limono-argileuse/sables dunaires ; une discussion sur la construction du soubassement peut alors s'engager.

Une autre conséquence du remplissage interdunaire par les précipitations est l'asphyxie d'une végétation « hydrofuge » telle les acacias et les eucalyptus au contact dunes/mars. Leur système racinaire se retrouve complètement immergé suffisamment longtemps pour être asphyxié par manque d'oxygène lors des processus de photorespiration. La figure n° 29a, b et c illustre ce phénomène. Sur la première, apparaît au premier plan un organisme mort après une inondation prolongée ; au second plan, la mare vient border la dune qui porte une végétation arborée tant sur son sommet qu'à la base du versant où quelques arbustes ont également succombé ; l'arrière-plan de la photographie est orienté vers l'Est.

A la surface du plan d'eau se développent un nombre important d'organismes algaires, résultat non seulement d'un endoréisme marqué mais aussi d'une stagnation d'eaux mortes qui entraîne ce développement. Souvent une odeur nauséabonde causée par le phénomène d'eutrophisation envahit ces milieux.



Fig. n° 29 : Arbres et arbustes asphyxiés à la suite d'inondations prolongées

Clichés : Claude SIMONE, le 5 VII 1996.

La figure n° 29b et c montre des secteurs inondés dont le couvert végétal est relativement épais. La conjonction eaux-végétation morte forme un fond marécageux riches en matières organiques. Les arrière-plans respectifs correspondent également à l'Est.

Un autre apport d'eaux météoriques beaucoup moins visible que celui des eaux de pluie est favorisé par l'alizé qui est un vent maritime donc chargé d'humidité comme il est précisé plus haut mais aussi par les brumes côtières périodiques totalisant à eux deux, un régime hygrométrique moyen annuel supérieur à 80 % (cf. fig. n° 6, chap. II Aa).

Cette quantité de vapeur d'eau, à défaut de permettre un encroûtement des dunes en profondeur, réduit sensiblement la mobilité des grains de sable alors que celle-ci serait plus élevée si les masses d'air étaient plus sèches, comme en domaine saharien et aride.

Elle ralentit aussi le processus d'évapotranspiration de la flore et favorise ainsi sa photosynthèse donc son développement ; augmentant son efficacité à stabiliser les dunes.

Les dépressions interdunaires connaissent un temps de résidence d'eau météorique dont les cycles annuels ou pluriannuels sont irréguliers. Ainsi, les cuvettes peuvent rester une année, voire plusieurs années à sec puisque l'érosion du fond a été démontrée par la présence de kaolinite sur le versant sous le vent des dunes.

Si les eaux météoriques forment des nappes superficielles temporaires, elles sont aussi, avec l'océan, à l'origine d'un apport hydrique souterrain matérialisé par les aquifères et le biseau salé qui alimentent le géosystème.