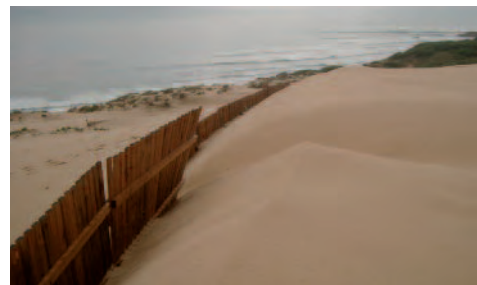




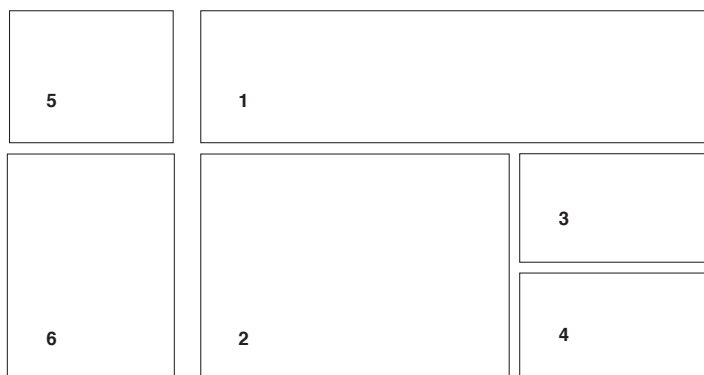
Conservation des dunes côtières

Restauration et gestion durables en Méditerranée occidentale



Conservation des dunes côtières

Restauration et gestion durables en
Méditerranée occidentale



Photos couverture:

- 1.- Junipers et savins côtiers à Cadix, Espagne. © *Carlos Ley*
- 2.- *Oenothera drumondii*, espèce exotique d'origine américaine, invasive dans les dunes du Golfe de Cádiz. © *Juan Bautista Gallego*
- 3.- *Calystegia soldanella*, liaseron des sables. © *Carlos Ley*
- 4.- Effet de palissades imperméables. © *Carlos Ley*
- 5.- Restes d'un cordon dunaire (buttes résiduelles). © *Carlos Ley*
- 6.- Réalisation d'une vaste couverture de genêts (avant plantation d'oyats) sur le chantier de réhabilitation des dunes du Cap-Ferret, terrain du Conservatoire du littoral, en Aquitaine. © *ONF/JF Office National des Forêts/Jean Favennec*

La terminologie géographique employée dans cet ouvrage, de même que sa présentation, ne sont en aucune manière l'expression d'une opinion quelconque de la part de l'UICN ou de l'AECID sur le statut juridique ou l'autorité de quelque pays, territoire ou région que ce soit, ou sur la délimitation de ses frontières.

Les opinions exprimées dans cette publication ne reflètent pas nécessairement celles de l'UICN ou de l'AECID
Le présent ouvrage a pu être publié grâce à un soutien financier de l'Agence espagnole de coopération internationale pour le développement (AECID).

Publié par: UICN, Gland, Suisse et Malaga, Espagne

Droits d'auteur: © 2012 Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources

La reproduction de cette publication à des fins non commerciales, notamment éducatives, est permise sans autorisation écrite préalable du détenteur des droits d'auteur à condition que la source soit dûment citée.
La reproduction de cette publication à des fins commerciales, notamment en vue de la vente, est interdite sans autorisation écrite préalable du détenteur des droits d'auteur.

Citation: Ley de la Vega, C., Favennec, J., Gallego-Fernández J., et Pascual Vidal, C. (eds) (2012). *Conservation des dunes côtières. Restauration et gestion durables en Méditerranée occidentale*. UICN, Gland, Suisse et Malaga, Espagne. 124 p.

Auteurs : Carlos Ley de la Vega de Seoane, Ecología Litoral S.L.
Jean Favennec, Commission UICN de la Gestion des Ecosystèmes (CEM)
Juan Gallego-Fernández Bautista, Departamento de Biología Vegetal y Ecología de la Universidad de Sevilla
César Pascual Vidal, Fundación Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria

Études de cas : Carlos Ley de la Vega, Ecología Litoral SL (annexe 2)
Hugues Heurtefeux, Amandine Bichot et Philippe Richard, EID Méditerranée, activités littorales (annexe 3)
Mohammed Melhaoui et Elhafid Latifa, Université Mohamed 1er Oujda, Maroc (annexe 4)

ISBN: 978-2-8317-1565-0

Mise en page: Simétrica S.L.

Produit par: Centre de Coopération pour la Méditerranée de l'UICN

Gestion du produit: Sonsoles San Román

Imprimé par: Solprint (Mijas), Málaga

Disponible auprès du: Centre de Coopération pour la Méditerranée de l'UICN
C/ Marie Curie 22, 29590 Campanillas, Málaga, Espagne
www.iucn.org/mediterranean
www.iucn.org/publications

Cet ouvrage est imprimé sur papier écologique sans chlore

Sommaire

1. Introduction	7
2. Processus physiques	9
2.1 Introduction.....	9
2.2. Formation et dynamique des plages et des dunes.....	9
2.3. Morphodynamique des plages.....	13
2.4. Le transport éolien.....	19
2.5. Morphologie des dunes.....	24
3. Écologie	35
3.1 Introduction.....	35
3.2 Formation de la dune côtière.....	35
3.3 Morphologie dunaire et végétation.....	36
3.4 Caractéristiques environnementales du système plage-dune et adaptations des plantes ...	37
3.5 Zonation de la végétation dans les systèmes dunaires côtiers.....	38
3.6 Description des communautés végétales des dunes côtières.....	40
3.7 Espèces exotiques.....	41
4. Usages et impacts	45
4.1 Introduction.....	45
4.2 Les impacts sur les systèmes dunaires.....	45
5. Techniques de restauration	51
5.1 Introduction.....	51
5.2 Reconstruction morphologique de la dune littorale.....	52
5.3 Végétalisation.....	62
5.4 Élimination de la végétation envahissante.....	66
5.5 Systèmes de protection.....	67
5.6 Suivi des travaux des restauration.....	71
5.7 Entretien.....	73

6. Méthodes de culture de plantes dunaires	75
6.1 Introduction	75
6.2 Types de reproduction végétale.....	75
6.3 Espèces utilisées pour la restauration des écosystèmes dunaires.....	76
6.4 Caractéristiques de la culture de plantes dunaires.....	76
6.5 Production de l'oyat	77
6.6 Production de chiendent des sables.....	85
6.7 Production du Lis maritime	86
6.8 Production d'autres espèces.....	87
6.9 Travaux d'entretien.....	88
Annexe 1. Tableau plantes	95
Annexe 2. Étude de cas : Los Enebrales (Huelva, Espagne).....	101
Annexe 3. Étude de cas : Plage en Roussillon (Pyrénées orientales, France).....	105
Annexe 4. Étude de cas : L'écosystème dunaire de l'embouchure de la Moulouya (Maroc)	109
Annexe 5. Déclaration de Valence Conservation et réhabilitation écologique des systèmes dunaires côtiers au Maghreb	115
Annexe 6. Glossaire	117
Références Bibliographiques	119



Juan López Doriga

Directeur Général de l'AECID



Glaucium flavum. © Carlos Ley

Face aux nouveaux défis mondiaux tels que le changement climatique, la sécurité alimentaire et le phénomène de l'émigration, l'Agence Espagnole de Coopération Internationale pour le Développement (AECID) a adopté une démarche de travail au sein de sa politique de coopération basée sur l'intégration des aspects environnementaux dans les stratégies de développement et la participation effective de la population. Incorporer les besoins sociaux de base, les plans de secours et les mesures d'atténuation et d'adaptation au changement climatique sont cruciales pour promouvoir le développement durable.

Les facteurs de dégradation des sols, la pauvreté, la pression pour le développement et les facteurs climatiques interagissent de manière complexe et affectent la sécurité alimentaire et les moyens de subsistance

durables. Il est donc essentiel de développer une approche intégrée pour relever ces défis.

Les pays et peuples d'Afrique du Nord sont touchés par une aridité croissante et par la désertification, ce qui entraîne des pertes économiques considérables. L'AECID travaille avec l'appui de l'UICN pour favoriser la restauration des ressources naturelles dégradées, fondamentale pour le développement social et économique de la population. Ce manuel est un exemple de l'échange d'expériences et de connaissances sur les caractéristiques des écosystèmes dunaires essentiels pour prévenir entre autre l'érosion côtière. Nous souhaitons contribuer à une meilleure planification territoriale et à la sensibilisation sur l'importance et la fragilité de ces écosystèmes.



Antonio Troya Panduro

Directeur du Centre de Coopération
pour la Méditerranée de l'IUCN

Dans le cadre d'une collaboration entre l'Agence Espagnole de Coopération Internationale pour le Développement (AECID) et l'IUCN pour mettre en oeuvre des actions pour promouvoir le développement durable et l'utilisation efficace des ressources naturelles dans la région méditerranéenne et en particulier en Afrique du Nord, il a lieu de mentionner le travail effectué pour l'analyse des impacts et des méthodes de conservation et de restauration écologique des systèmes des dunes côtières dans la Méditerranée occidentale.

L'écosystème constitué de plages et de systèmes dunaires a une grande importance dans la protection du littoral et la prévention des risques face à l'élévation potentiel du niveau des mers, ainsi que dans la conservation de nos plages. Cependant, certains écosystèmes sont très vulnérables, surtout lorsqu'il y a une mauvaise planification des activités humaines sur la côte, lesquelles, depuis longtemps, ont ignoré les nombreux valeurs des services écosystémiques fournis par les écosystèmes côtiers.



Ononis natrix spp *ramosissima*. © Carlos Ley

Les connaissances actuelles permettent d'affirmer que les écosystèmes dunaires peuvent être considérés comme notre meilleure infrastructure naturelle de protection du littoral, et jouent un rôle clé en tant que solution basée sur la nature dans la réduction des risques des catastrophes (contrôle du littoral, prévention des risques d'inondation, atténuation des effets des tempêtes, etc.).

La promotion de la recherche scientifique et le développement de plans de surveillance des systèmes dunaires pluridisciplinaires, l'établissement des méthodologies régionales comparables, ainsi que la coopération et l'échange d'expériences Nord-Sud et Sud-Sud sont quelques-unes des recommandations formulées par les experts qui ont collaboré dans ce projet.

Nous souhaitons, avec ce manuel, contribuer à diffuser une meilleure compréhension de la dynamique de ces écosystèmes fragiles, ainsi qu'à améliorer les techniques de gestion et de restauration de la part des agents publics et des experts dans la région.

1 Introduction

Les systèmes dunaires ont une distribution géographique mondiale. Cependant, ce livre est un recueil adapté aux dunes côtières de la Méditerranée occidentale. Il présente dans un premier temps un recueil de concepts de base sur la dynamique côtière, qui concerne à la fois les processus physiques (sédimentaires) et leur fonctionnement écologique, ainsi qu'une description des techniques de restauration potentielles.

Les dunes côtières sont des écosystèmes terrestres situés dans la transition entre le milieu continental et marin, qui répondent à un certain nombre de fonctions uniques telles que la protection du littoral grâce à leur capacité d'amortissement face aux tempêtes, leur rôle de prévention des risques d'inondation et le contrôle du secteur riverain.

Étant donné que les systèmes de plage-dunes jouent un rôle essentiel en matière de réduction des risques de catastrophes, ce livre vise à fournir les connaissances et les compétences nécessaires pour être intégrées dans l'approche «réduction des risques de catastrophe fondée sur les écosystèmes», qui intègre au sein d'une stratégie territoriale des solutions naturelles et la consultation des parties prenantes dans la planification du territoire face à la réduction des risques de catastrophes naturelles.

Les services de tous les éléments de cet écosystème contribuent au bien-être humain à un niveau inestimable. Les arêtes dunaires et les flèches de sable sont des éléments qui permettent un meilleur contrôle de l'hydrodynamique des estuaires, des marais salants et des lagunes côtières. Leur capacité à stocker et à purifier l'eau polluée a également



Photo 1.1 Dune côtière formée récemment sur la côte de Huelva. © Carlos Ley

beaucoup d'importance et les systèmes dunaires côtiers permettent l'accumulation de sable pour la régénération des plages. Finalement, ils présentent un autre type de service, esthétique, spirituel et récréatif, et sont liées à un lieu de repos pour des milliers de personnes chaque année. La conservation des systèmes de plage-dunes reste essentielle pour le maintien des activités socio-économiques liées au secteur touristique.

Comme d'autres habitats côtiers, les systèmes de plage-dunes sont très fragiles à la fois en ce qui concerne leur formation et leur développement et pour le maintien de leurs fonctions de base et de leurs dynamiques sédimentaires. De nos jours, la plupart des écosystèmes de dunes côtières sont dégradées en raison de la pression humaine, principalement par le biais du tourisme et de l'urbanisation du littoral.

En raison de cette situation, ce manuel vise à approfondir les techniques de restauration des dunes côtières pour un coût réduit et un meilleur impact. Pour effectuer avec succès des programmes de restauration, il est nécessaire de comprendre le fonctionnement de base du système plage-dunes, et pour cela, les premiers chapitres développent une description des processus physiques et écologiques des dunes. Les principes qui régissent le comportement des dunes sont décrits dans les chapitres 2 et 3 respectivement.

Principes généraux sur le comportement des dunes côtières :

- i. Le système plage-dunes (et, lorsque c'est le cas, les dépressions humides intradunaires) doit être considéré comme un système unique ;
- ii. Les systèmes plage-dunes sont des systèmes fragiles, mobiles et dynamiques par nature ;
- iii. L'évolution de la côte dépend du bilan sédimentaire, qui doit être évalué et suivi au sein des différentes cellules hydrosédimentaires, unités fonctionnelles de base du fonctionnement côtier ;
- iv. La résilience du système dunaire est directement liée à la largeur disponible actuelle de la dune (mobilité) et à son degré de naturalité (biodiversité).

Ils ont été décrits par des experts lors de la déclaration de Valence (voir annexe).

Ensuite, ce livre développe un chapitre consacré à la description de l'utilisation et des impacts sur l'environnement (chapitre 3) afin de développer des techniques de restauration. Ce chapitre présente certaines des techniques de restauration les plus utilisées dans la région, mais au moment de développer des actions concrètes, celles-ci doivent être basées sur trois principes fondamentaux : adapter les stratégies d'action aux processus naturels (évolution prévue et temps) ; utiliser des matériaux locaux rustiques et économiques pour la gestion et la restauration ; et créer des emplois au niveau local.

Le dernier chapitre porte sur les techniques de culture des espèces dunaires principales utilisées dans les programmes de restauration dans la sous-région. Les espèces décrites sont plus fréquentes dans la Méditerranée occidentale, mais on part de la base qu'il faut promouvoir l'utilisation d'espèces autochtones.

Parmi les annexes de ce livre on trouve un glossaire des termes qui nous l'espérons contribuera à l'homogénéisation sémantique, et aidera à réduire les malentendus fréquents qui jusqu'à présent se sont produits à cause de l'utilisation de différentes nomenclatures côtières. La dernière annexe comprend la déclaration de Valence, qui a été organisée en 2011 après la réunion d'experts de Tunisie, d'Algérie, du Maroc, de l'Espagne et de la France. Au cours de cette réunion, un certain nombre d'orientations stratégiques ont été définies, et sont recueillies dans la déclaration. Nous avons considéré intéressant d'inclure cette déclaration dans ce livre, car elle résume une vision commune de la stratégie à suivre dans la région.

Les dunes côtières sont un capital naturel précieux qui doit être préservé, leur disparition ou modification entraîne une perte de la plupart des biens et services décrits au préalable et ne peuvent être récupérés que par des programmes de restauration coûteux.

2

Processus physiques

2.1 Introduction

Les systèmes dunaires côtiers sont des accumulations sédimentaires sableuses, d'origine typiquement éolienne, et proches de zones sources de sédiment, dont ils dépendent étroitement.

Les systèmes dunaires intérieurs sont des formations géologiques dynamiques, presque toujours en mouvement et sans végétation, à l'exception de certaines espèces psammophiles. Ils se forment et se développent dans des zones où les conditions climatiques (notamment l'aridité) ne permettent pas l'établissement d'une végétation capable d'interagir avec leur dynamique.

Les sédiments des dunes continentales résultent de la météorisation de la croûte terrestre, et leur transport est presque exclusivement éolien, alors que pour les dunes côtières, les sédiments proviennent de la mer et sont mis à la disposition du vent par l'énergie de la houle.

Dans les systèmes dunaires côtiers, les conditions climatiques permettent le développement de formations végétales capables d'interagir avec la dynamique éolienne des dépôts sableux, formant ainsi des écosystèmes très dynamiques. Dans la plupart des climats, se forme une végétation caractéristique et adaptée.

Dans certains systèmes dunaires côtiers et dans certaines circonstances, l'apport sédimentaire est tellement élevé qu'il ne permet pas la colonisation végétale. Ces systèmes ont une dynamique proche de celle des dunes intérieures, ils sont dits transgressifs. Nous pouvons en citer de nombreux exemples tels que Doñana (Huelva, Espagne), El Melha (Algérie) ou Boujdour (Maroc).

Le littoral est une bande où convergent trois phases de la matière : air, eau et terre, en changement constant, et aux frontières fluctuantes. Les systèmes dunaires côtiers sont capables de s'adapter à ces changements,

notamment en se déplaçant pour s'adapter aux nouvelles conditions. La végétation dunaire peut se déplacer, avec le sable, à une vitesse très supérieure à celle des autres formations végétales.

Le plus souvent, les champs dunaires sont en continuité avec l'arrière-plage. Cependant certains dépôts sableux éoliens peuvent être actuellement déconnectés de leur zone source en raison des variations eustatiques ou épirogéniques.

Le bilan sédimentaire des plages conditionne le développement des systèmes dunaires côtiers, et permet de déterminer si le système est stable, en progression, ou en régression.

2.2 Formation et dynamique des plages et des dunes

Les dépôts de sable qui forment les systèmes dunaires côtiers proviennent en grande partie de l'érosion de la croûte terrestre et du transport sédimentaire fluvial débouchant en mer. C'est là que la houle sélectionne et transporte sur la plage les éléments fins et que l'action du vent forme les dunes.

La frange sableuse située dans la zone côtière formée par le sable submergé (jusqu'à quatre mètres de profondeur, environ), la plage proprement dite et les dunes constituent un ensemble sédimentaire en équilibre dynamique et qui est soumis à deux types de mouvements résultant de l'action de la mer et du vent.

D'une part, un mouvement perpendiculaire à la côte dont les moteurs sont la houle dans la zone immergée et le vent dans la zone émergée, et qui se produit pendant des cycles périodiques, le plus important étant le cycle annuel. Lors des tempêtes, la houle érode la plage et la dune, en transportant le sable vers la mer et le déposant dans une barre sableuse proche de la côte. Cette



Photo 2.1 Accumulation des sédiments dans la dune. Liencres, Espagne. © Carlos Ley

barre formée par les tempêtes joue un rôle protecteur important, elle provoque le déferlement des vagues avant qu'elles n'arrivent à la plage, réduisant ainsi leur action destructive. Pendant les périodes de calme, la houle de beau temps (moins haute et moins cambrée) fait remonter le sable lentement, de la barre à la haute-plage. Depuis cette zone, le vent transporte le sable vers la dune où il est retenu par une végétation caractéristique. Au cours de ce cycle annuel, la période destructive se produit en peu de temps, quelques jours par an, alors que la période constructive peut être de plusieurs mois.

D'autre part, la bande sableuse subit un transport longitudinal parallèle à la côte, produit essentiellement par la houle et les courants. Lorsque la direction de la houle n'est pas perpendiculaire à la côte, les ondes sont réfléchies vers la mer à leur arrivée sur la côte, mais avec une direction différente. Cet effet continu entraîne une dérive lente de la bande sableuse sédimentaire tout le long de la côte.

Toute activité humaine susceptible d'altérer ces mouvements perpendiculaires ou parallèles à la plage produit un changement, ayant presque toujours des conséquences négatives sur l'équilibre sédimentaire.

Malgré des différences de couverture et de densité végétale, la plupart des dunes se forment en présence de végétation. Il s'agit d'un élément clé qui influe sur les déplacements du sable et la forme de la dune. En présence de végétation dense, il se crée une surface de mouvement sous laquelle l'air est calme. La limite entre l'air en mouvement et l'air calme crée une couche dénommée « couche limite ». Elle se situe en général au 2/3 de la hauteur de végétation moyenne.

Les particules entraînées par le vent depuis la partie supérieure à cette couche limite sont absorbées vers la partie inférieure.

Les formes résultant de l'accumulation de sable sont variables selon les espèces végétales. Pour des Poacées comme l'oyat (*Ammophila arenaria*) ou le chiendent des sables (*Elymus farctus*) il existe un seuil critique de la vitesse du vent sous lequel les phénomènes de dépôts précédemment décrits ne se produisent pas. Dans des conditions de vent normales, le flux d'air s'adapte aux formes des plantes, les processus de saltation cessent et la sédimentation commence. En bordure de la zone exposée au vent, se forme le point de dépôt principal des sédiments. A partir de ce point les sédiments s'accumulent et se distribuent selon un profil d'accumulation.

2.2.1 Origine du sédiment

Les sables des plages et dunes proviennent, dans la plupart des cas, des produits de l'érosion des terres apportés par les fleuves. Au niveau de la côte, la fraction la plus fine en suspension est transportée vers la pleine mer et se dépose lentement dans le fond marin, alors que la fraction sableuse est triée et transportée par les courants et la houle, pour se déposer ensuite dans des zones où la houle diminue.

Dans une moindre mesure, les sables proviennent de l'érosion de la côte par la houle et de restes de faune marine, tels que coraux, coquilles et squelettes.

L'érosion des côtes rocheuses provoquée par les vagues est à l'origine d'environ 5% du matériel d'érosion qui arrive aux plages de la planète.

L'ensemble du sédiment du système plage sous-marine/estran/dune se comporte comme une unité cohérente et le matériel est transporté entre ces trois zones en fonction des processus

physiques (marées, houle et vent, essentiellement) prédominants dans la zone.

2.2.2 Caractéristiques du sable

La source principale de sable des dunes côtières est le sédiment sableux transporté par la houle vers la plage, il est étroitement lié au bilan sédimentaire de celle-ci. D'un point de vue global, la disponibilité de sédiment est maximale dans les côtes affectées par les glaciations, où les fluctuations du niveau de la mer ont permis le transport du matériel de la plateforme continentale vers la côte et où l'érosion côtière fournit du matériel sableux abondant.

Les dunes sont également nombreuses à proximité des embouchures des fleuves et des estuaires, où il existe une disponibilité de sédiment et une capacité de transport hydraulique et dans les secteurs de côte basses avec des barres littorales. Sous les



Photo 2.2 Différents types de sable, taille des particules et composition. © Carlos Ley

tropiques humides, il existe aussi d'importants champs de dunes côtières ; dans certaines îles tropicales, il s'agit même du seul relief.

Le sable des dunes côtières est de diverses compositions minérales : quartz, feldspath, particules calcaires (foraminifères, morceaux de coquilles et corail), petites quantités de minerais de métaux lourds et sur les côtes volcaniques, basaltes, andésites, ponces et autres roches volcaniques.

La couleur des sables de dunes côtières oscille entre les jaunâtres des sables quartzifères et les couleurs blanchâtres des sables coralliens à base calcaire. Dans les zones volcaniques, les sables sont gris ou noirs, comme les roches volcaniques dont ils proviennent. La couleur jaunâtre des sables quartzifères résulte de la précipitation d'oxyde de fer. Cette précipitation se produisant dans la dune, les sables dunaires ont tendance à s'assombrir à mesure lorsque l'on s'éloigne de la plage.

En raison de la provenance marine du sable, la fraction grossière des dunes côtières (au dessus de 0,5 mm) est normalement composée de

grains bien arrondis, cependant au dessous des 0,25 mm les grains ne subissent presque pas d'abrasion. Vu que la fraction sableuse dominante dans les dunes est celle comprise entre 0,125 et 0,250 mm, la plupart des grains oscillent entre des formes sub-angulaires et sub-arrondies.

Au microscope, nous pouvons observer des formes caractéristiques du sable des dunes telles que : 1) l'arrondissement des bords, 2) des plaques inversées résultant de la rupture du quartz au long des plans de fracture de la structure cristalline, 3) des dépressions allongées résultant de la fracture en écaille par collision entre les grains, 4) des surfaces lisses dues à la dissolution et la re-précipitation de silice et 5) des fractures arquées résultant des collisions et/ou de l'usure.

2.2.3 La formation des dunes

Les premières étapes de formation des dunes embryonnaires (ou primaires) partent de la bande de résidus accumulés tout au long de la



Photo 2.3 Laisses de mer. Pontevedra, Espagne. © Carlos Ley

ligne de marée. Ces laisses de mer fournissent les nutriments, l'humidité et l'abri qui favorisent la croissance de la végétation. Cette bande de végétation de haut de plage modifie les conditions de vent et de salinité, ce qui crée les conditions nécessaires à la formation des dunes embryonnaires.

La croissance par rhizomes souterrains des Poacées (Graminées) présentes dans les dunes peut s'étendre et ainsi augmenter la surface de zone favorable au dépôt des sédiments et à la formation des dunes embryonnaires. La croissance verticale et horizontale des dunes dépend de l'interaction entre l'approvisionnement en sable, la croissance de la végétation et les conditions de vent. Parmi ces facteurs, le plus important est sûrement l'approvisionnement en sédiments dont dépend la capacité des végétaux à provoquer des accumulations.

2.2.4 Types de dunes

Les dunes peuvent être classées selon plusieurs critères, mais il y a généralement deux types de classifications, la première en fonction de leur morphologie, liée aux processus physiques de formation et à la dynamique ; et la deuxième selon le degré d'influence des processus physiques et écologiques en œuvre.

Dans le premier cas, il s'agit plutôt d'une classification géomorphologique et dans le second, plutôt écologique.

Les deux types de classifications sont théoriques, puisque la plupart du temps les structures sont composites, sans limites définies entre elles.

Au titre de classification géomorphologique on peut citer celle de Flor en 2004, et au titre de classification fonctionnelle celle de Hesp en 1988. Les deux seront détaillées par la suite.

2.2.5 Structure transversale

En plus de ces classifications, la plupart des systèmes de dunes présentent un zonage selon la distance à la mer, en effet, des gradients de salinité, de vent, et de transport sédimentaire induisent des paysages végétaux bien distincts.

Ces types de végétation forment des bandes parallèles à la côte. En partant de la mer, on peut distinguer :

- La végétation de haut de plage. Elle se développe à partir des débris organiques apportés par la mer. Elle est éphémère et disparaît au cours de l'hiver avec les vagues de tempêtes.
- Les avant-dunes. Ce sont les précurseurs des reliefs sédimentaires permanents.
- Les dunes blanches. Après les dunes embryonnaires se forme le cordon de dunes blanches, caractérisées par une forte exposition au vent marin. Le cordon de dunes blanches abrite les dunes semi-fixées de sa partie arrière dont la diversité est supérieure.
- Les dunes grises sont celles dont les sédiments sont fixés.

Lors du développement des dunes, les processus éoliens transforment les structures «primaires» et génèrent une série de formes «secondaires». Dans la nature on peut observer une coexistence de ces divers états. S'appuyant sur l'hétérogénéité -naturelle ou anthropique- des dunes, le vent élargit les brèches et découpe des couloirs de déflation. Les sédiments arrachés sont déposés à l'arrière sous forme de langues d'accumulation de sable, ou «pourrières». Dans les systèmes dunaires peu perturbés par l'homme, la formation de couloirs de déflation («siffle-vent») est moins fréquente, et les pourrières sont rapidement colonisées par la végétation qui tend à réduire la mobilité des dunes. Mais, très fréquemment la pression de l'homme accentue l'érosion du vent, ce qui perturbe la dynamique et peut dégrader certains systèmes dunaires.

2.3 Morphodynamique des plages

Les plages subissent des variations topobathymétriques sous l'action de la houle, des courants et du vent. Dans cette section, nous définirons certains termes, concepts, processus et modèles concernant la morphodynamique des plages.

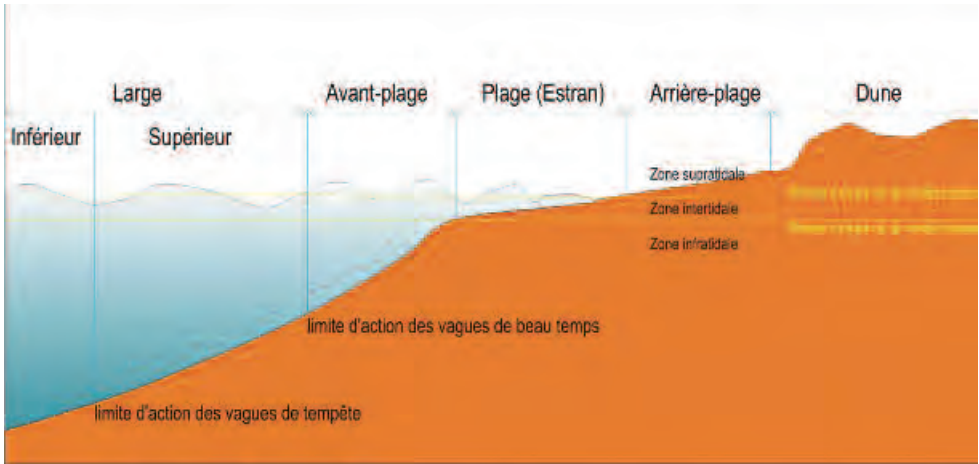


Figure 2.1 Zonation et éléments du profil de la plage. © Carlos Ley

2.3.1 Morphologie des plages

La Plage est une accumulation de sédiment non consolidé (sable, gravier, galets) qui se situe entre la ligne de haute mer de vives eaux (lors des tempêtes, et de la plus haute marée) et une profondeur qui correspond à la zone où l'agitation de sédiments par la houle s'interrompt.

Les plages sont situées au sein de la zone côtière, qui comprend la zone de la plateforme continentale et celle de la côte où les processus morphodynamiques sont déterminés par la dynamique marine. Son développement vers la terre et vers la mer dépend de la typologie de la côte, de la plateforme continentale et du climat maritime de la zone.

2.3.1.1 Le profil des plages

Pour comprendre les processus qui se déroulent sur les plages, il est nécessaire de clarifier certains concepts et définitions.

Profil de plage : c'est un transect perpendiculaire à la côte sur lequel on peut déterminer les altitudes terrestres et marines, par rapport à un point fixe connu.

Ligne de côte : ligne déterminée par le niveau de la plus haute marée.

Plage sèche : zone comprise entre la limite de la plage côté terre et le niveau atteint par la houle lors de la plus haute marée. Ce dernier coïncide souvent avec le bord de la berme ou le début du front de plage.

Berme : zone semi-horizontale de la plage sèche formée par l'accumulation de sédiment générée par la houle de beau temps. Sa limite du côté de la mer correspond au changement brusque de pente qui se produit vers le front de plage, dénommé crête de berme. Lorsque, après une période de grande activité de la houle, il se produit une période de calme, une nouvelle berme, berme d'été, peut s'ajouter à l'avant de la berme d'hiver. Une zone plus pentue peut séparer les deux bermes, c'est la trace de l'escarpement d'hiver.

Escarpement : paroi verticale dans la plage sèche formé par l'érosion de la berme produite par une tempête.

Estran (plage subaérienne) : zone de la plage comprise entre le bord de la berme et la limite extrême des plus basses marées.

Front de plage : section de la plage exposée à l'action du flux ascendant et descendant de la houle lors de la plus haute marée.

Marche d'escalier ou étape : zone avec le niveau maximum de pente qui se forme parfois en limite inférieure du front de plage lors de la plus haute marée dans les plages réfléchissantes.

Terrasse de marée basse : partie de l'estran située entre la limite inférieure du front de plage et la ligne extrême des plus basses marées.

Baïne de marée basse : dépression dans la terrasse de marée basse qui peut se former immédiatement en dessous du front de plage. Elle est normalement associée à une barre en croissant très proche du front de plage.

Barre longitudinale : accumulation de sable semi-parallèle à la côte. Il peut y avoir plusieurs barres dans le profil de la plage.

Crête de la barre : zone de plus forte altitude de la barre longitudinale.

Bâche de la barre : dépression dans le profil de plage parallèle à la ligne de côte, associée avec la barre. Elle se forme immédiatement vers l'intérieur de la barre.

Plage immergée : zone de la plage comprise entre la ligne extrême de marée basse et le limite extérieur du profil.

2.3.1.2 Variations du profil : Plages dissipatives et réfléchissantes

Le profil des plages change constamment en réponse aux variations du transport transversal de sédiments par la dynamique marine, notamment la houle. Les changements les plus

remarquables sont associés aux déplacements des barres ou à l'avancée et au repli de la berme. Parmi les différentes formes possibles de profil, il y en existe deux extrêmes : le profil dissipatif et le profil réfléchissant.

Le profil dissipatif caractérise les plages à sable fin et/ou à niveaux d'énergie élevés (voir Photo 2.4). En général, la berme n'est pas apparente et le profil commence pratiquement au pied de la dune ou de la falaise. La zone de surf est très large et possède un talus légèrement concave avec des faibles pentes et sans formations remarquables. Sous le niveau de marée basse, le profil présente une ou plusieurs barres longitudinales, avec des bâches et des crêtes peu marquées. La pente de la zone de déferlement est plus importante que celle de la zone de surf.

Le profil réfléchissant (voir Figure 2.3) est présent dans les plages à sables moyens ou grossiers, avec des niveaux d'énergie bas. Dans ce cas, la crête de la berme marque clairement le début du front de plage. Sur la plage sèche, on peut trouver des restes de bermes et d'escarpements correspondant à des profils produits par les conditions de houle plus énergétiques. Sur le front de plage, les croissants de plage *-beach cusps-* (voir Photo 2.5) sont fréquents et il existe souvent une étape (marche d'escalier) " marche d'escalier " dans la partie inférieure du front

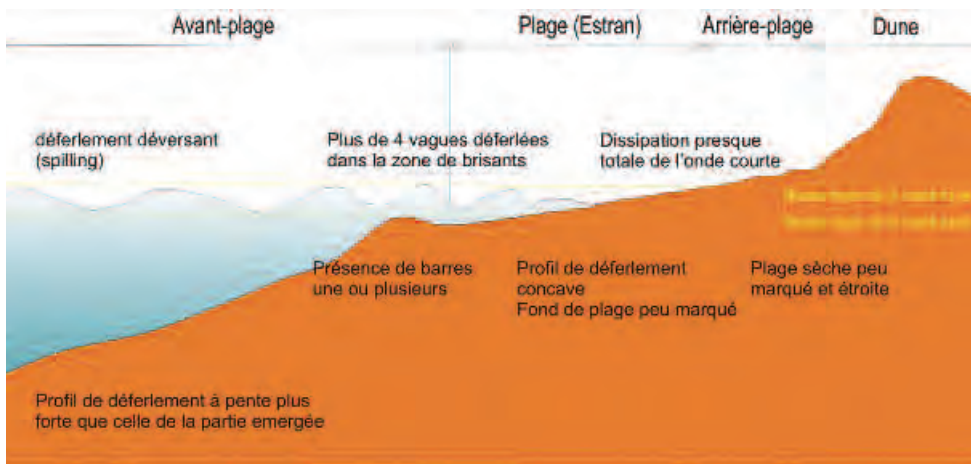


Figure 2.2 Profil dissipatif. © Carlos Ley

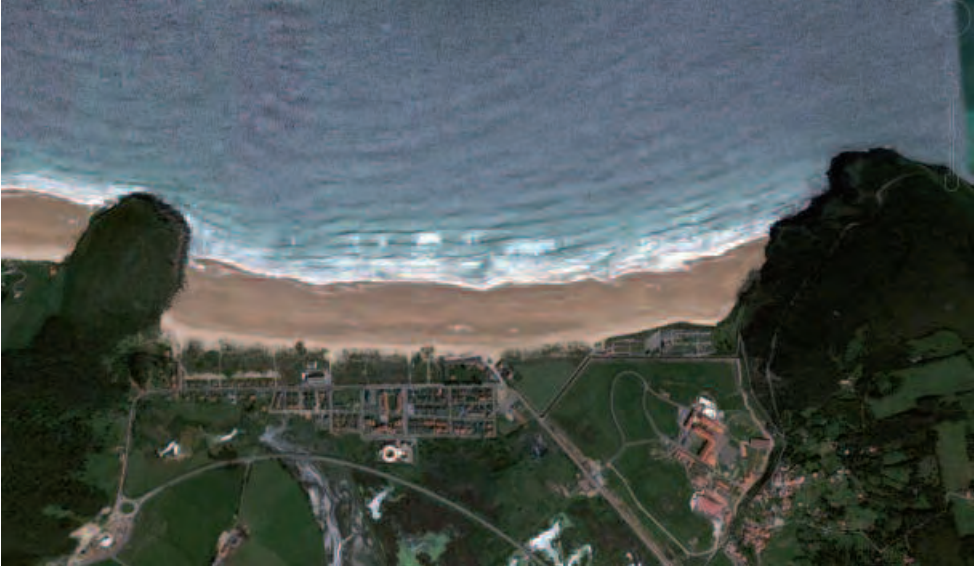


Photo 2.4 Plage dissipative. Berria. Espagne. © Google Earth

de plage formée par des matériaux plus gros, à partir de laquelle la pente du profil diminue considérablement, tout en conservant une forme concave. Une plateforme de marée basse avec une pente douce reste à découvert lors du plus bas niveau de la marée. Dans la plage immergée, on ne trouve pas de barres.

Entre ces deux types extrêmes de morphologie du profil, il existe toute une gamme d'états intermédiaires. Ces états de plage ne peuvent pas être définis avec un seul profil, étant donné qu'ils sont essentiellement tridimensionnels et que leur morphologie est fortement liée aux systèmes circulatoires établis au niveau des plages.

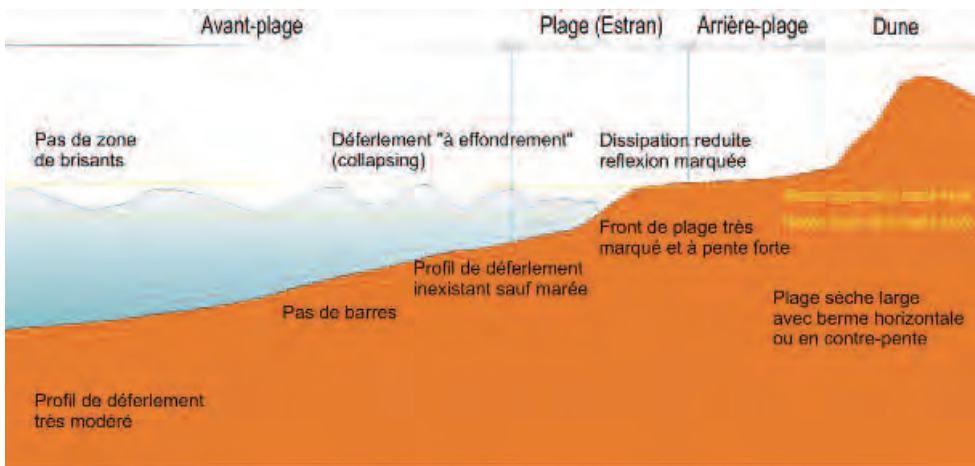


Figure 2.3 Le profil réfléchissant. © Carlos Ley



Photo 2.5 Plage réfléchissante. Tarragona, Espagne. © Google Earth

Certaines plages présentent une grande variabilité dans leur profil, en réponse à des conditions de houle fortement variables. Dans les latitudes tempérées, les plages moyennement exposées, avec des tailles de grains fins à moyens, de 0,2 à 0,3 mm de diamètre, subissent des conditions de houle caractérisées par de fortes variations saisonnières et de fortes tempêtes hivernales. Après être soumises à de nombreuses tempêtes, ces plages atteignent une position de semi-équilibre qui ressemble beaucoup à celle des plages dissipatives, et l'on dit alors que la plage a atteint son profil d'hiver. Au contraire, après de longues périodes de calme, plus fréquentes dans les mois estivaux, la plage retrouve un profil proche du réfléchissant, le profil d'été. Ces termes de «profil d'hiver» et «profil d'été» sont relatifs et peuvent ne pas correspondre à la saison, mais plutôt à l'aspect que présente la plage à un moment donné.

2.3.2 Le bilan sédimentaire des plages

Le bilan sédimentaire d'une plage détermine le développement des systèmes dunaires côtiers,

étant donné que le système peut être ou bien régressif, en équilibre ou progadant.

Dans le premier cas, le système dunaire sera soumis à un retrait, avec une érosion progressive de l'avant dune lors des tempêtes et des marées de vives eaux, érosion non compensée lors des périodes de beau temps (voir photo 2.6). L'avant-dune sera entaillée par une falaise marine, avec des éboulements fréquents.

Dans le deuxième cas, une plage sèche se maintient, avec un transport éolien vers les dunes, plus ou moins compensé par des périodes d'érosion lors des tempêtes. Pendant les périodes de beau temps, on assiste normalement à la formation d'une avant-dune bien développée.

Enfin, dans le cas d'un bilan sédimentaire positif, l'apport continu de sédiment à la plage sèche, combiné avec le transport éolien, provoque la formation de cordons parallèles successifs d'avant-dunes (voir photo 2.8). Dans ce cas, les dunes ont une hauteur réduite, et présentent plus de végétation au fur et à mesure que l'on avance vers l'intérieur.



Photo 2.6 Falaise d'érosion marine. Laredo, Espagne. © Carlos Ley



Photo 2.7 Bilan sédimentaire équilibré. Isla Cristina, Espagne. © Carlos Ley



Photo 2.8 Plage progradante. El Espigón, Huelva, Espagne. © Google Earth

Le bilan sédimentaire est le calcul, en termes de macro échelle, des apports et des pertes existants dans la zone d'étude. Ce calcul doit permettre : (1) d'établir les facteurs des modèles d'évolution, dans le cas des plages ouvertes, ou (2) de constater qu'il s'agit d'une plage fermée sans apports ou pertes externes. La première tâche à réaliser pour déterminer le bilan sédimentaire consiste à identifier les éléments clés, à savoir les sources d'entrée et de sortie des sédiments, les types de sédiments et les mécanismes de transport.

Parmi les sources habituelles, on peut citer :

- Érosion de falaises.
- Apports fluviaux.
- Apports biogéniques.
- Apports depuis la plateforme continentale.
- Apports éolien.
- Apports humains (rechargements, déversement de dragages, etc.).

Les pertes de sédiment (zones «puits») habituelles comprennent :

- Sédimentation en estuaires, ports et autres structures.

- Sédimentation dans les zones d'arrière-plage due à l'action du vent et/ou de la houle.
- Transport vers la plateforme continentale.
- Décomposition du sable.
- Extraction par l'homme.

Les mécanismes de transport essentiels sont :

- Transport longitudinal par la houle.
- Transport transversal par la houle.
- Transport par les courants de marée.
- Transport éolien.
- Transport par l'homme.

2.4 Le transport éolien

Les variations spatiales et temporelles des taux de transport de sable constituent un facteur déterminant de la morphologie et de la dynamique dunaire. C'est pourquoi il est important de comprendre les principes qui régissent le transport du sable par le vent avant d'analyser les processus qui interviennent dans la dynamique dunaire. Nous pouvons distinguer

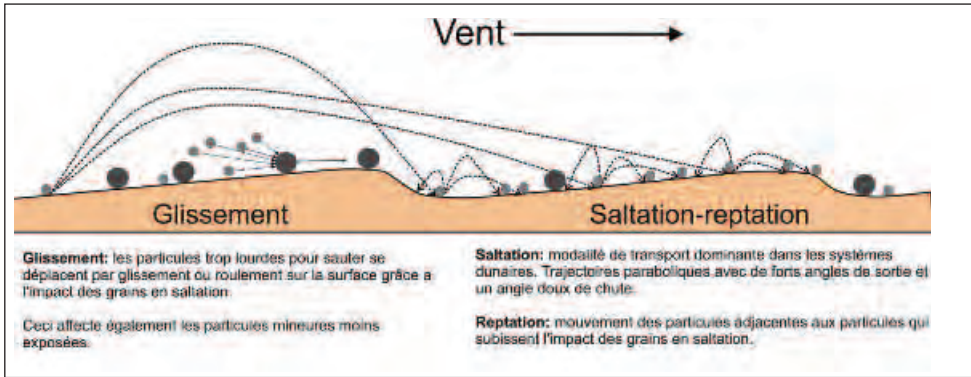


Figure 2.4 Modalités de transport éolien. © Carlos Ley

trois différents types de mouvement dans le transport éolien, qui dépendent essentiellement de la taille du grain de matériel disponible. La poussière parcourt en suspension de grandes distances en accompagnant les tourbillons turbulents de la couche limite atmosphérique. Son rôle dans la dynamique des dunes est insignifiant. Les sables fins et moyens sont transportés surtout par saltation-reptation, les sables grossiers, par glissement (voir figure 2.4).

2.4.1 Le vent superficiel

La circulation de l'air est presque toujours turbulente, sous forme de tourbillons de différentes tailles qui se déplacent avec des vitesses et des directions différentes. Ces tourbillons transfèrent une quantité de mouvement par le biais des processus de mélange turbulent entre les différentes couches du fluide, de telle sorte que chaque couche a une direction et une vitesse moyenne différentes. En raison de la friction avec la surface, la vitesse du vent proche du sol diminue.

Lorsque la surface est couverte de végétation ou par une grande quantité d'autres éléments de plus grande rugosité, le point où la vitesse du vent s'annule n'est plus la surface du sol, mais il se déplace jusqu'à une certaine hauteur qui dépend de la hauteur, de la densité, de la porosité et de la flexibilité des éléments de rugosité.

2.4.2 Mise en mouvement du sable par le vent

2.4.2.1 Seuil de mise en mouvement

Les grains de sable commencent à se déplacer lorsque les forces exercées par le fluide (charriage et suspension) dépassent l'effet du poids et de la cohésion entre particules adjacentes. Les forces de suspension sont le résultat de la diminution de la pression du fluide sur la face supérieure des grains et du fort gradient de vitesses horizontales à proximité de la surface du grain. Le poids et la cohésion des particules sont liés à leurs propriétés physiques, telles que la taille, la densité, la minéralogie, la forme, l'empilement, le contenu en humidité et la présence ou non d'agents adhésifs, comme les sels solubles.

Lorsque la vitesse de cisaillement sur la particule augmente, les forces d'élévation et de charriage augmentent aussi jusqu'à atteindre le seuil à partir duquel commence le mouvement du grain. Ce seuil est dénommé vitesse limite de mise en mouvement

Une fois que les grains sont soulevés, ils suivent une trajectoire parabolique pendant laquelle ils sont accélérés horizontalement en absorbant une quantité de mouvement du vent jusqu'à ce qu'ils heurtent à nouveau la surface. Lors de l'impact, ils transmettent leur quantité de mouvement à d'autres grains qui peuvent à leur tour être soulevés même s'ils n'ont pas atteint la vitesse de friction critique.

2.4.2.2 Processus de décollage des grains

Bagnold (1941) a suggéré qu'une fois atteinte la vitesse limite de mise en mouvement, les grains de sable commencent à rouler ou à glisser sur la surface par la pression directe du vent. Une fois que les particules acquièrent de la vitesse, elles commencent à sauter sur la surface en restant exposées à l'action du vent, c'est ainsi que commence le processus de saltation.

Une analyse méticuleuse du début du mouvement des grains montre qu'il n'est pas nécessaire que les grains commencent à rouler ou à glisser pour que la saltation ait lieu, mais que les différences de pression en surface, qui agissent comme des forces de suspension, soient suffisantes pour lever directement les grains. Au fur et à mesure qu'augmente la vitesse du vent, les particules commencent à vibrer jusqu'à ce qu'elles décollent tout d'un coup. L'impact de la chute de ces grains fait sauter d'autres grains dans un effet de cascade, de telle sorte que le nombre de grains augmente exponentiellement.

Comme les grains soulevés extraient une quantité de mouvement, il se produit une réduction de la vitesse du vent à proximité de la surface. En conséquence, à un moment donné l'on atteint un équilibre dénommé « *état de saltation stationnaire* ». Cet équilibre initial entre le vent et les grains en saltation sera atteint très rapidement, en un ou deux secondes ; le profil du vent s'ajuste plus lentement aux nouvelles conditions de rugosité de la surface, en plusieurs dizaines de secondes. Étant données les fluctuations du vent, il est très rare que les conditions d'équilibre parfait puissent être atteintes dans la nature.

2.4.2.3 Effets des conditions de la surface sur le décollage des grains

La vitesse de friction de mise en mouvement peut être définie avec assez de précision pour des grains uniformes de taille supérieure à 100 µm. Cependant, les sables naturels contiennent des grains avec des niveaux variables de taille, forme, cohésion et degré de compactage. Les seuils de mise en mouvement sont donc dépendants des variables antérieures. De plus,

d'autres facteurs comme la classification des sables, la pente ou le degré d'humidité de la surface, jouent un rôle important dans le processus de transport.

2.4.3 Processus de saltation

Le processus de transport du sable par l'action du vent peut être représenté comme un nuage de grains de sable qui sautent sur la surface. Pendant le vol, les grains détiennent une importante proportion de mouvement du vent, puis une partie de celle-ci est transférée aux grains de la surface au moment de l'atterrissage et l'autre partie permet aux grains de décoller à nouveau pour refaire le processus, en donnant lieu à ce qui a été dénommé « saltation successive ».

Les grains heurtés à la surface réalisent aussi des petits sauts et des avancées par mouvement à proximité de la surface dénommé « reptation ». Les impacts que subissent les grains les font rebondir à 50-60% de la vitesse d'atterrissage. D'autre part, après l'impact, les grains prennent seulement environ 10% de la vitesse du grain qui subit l'impact. La réaccommodation des grains sur le lit provoqué par la saltation donne lieu à un déplacement sans décollage des grains de la surface dénommé « charriage ».

2.4.3.1 Processus de décollage des grains

Les particules se déplaçant par saltation sont caractérisées par des trajectoires à de décollage pratiquement vertical, suivi d'une trajectoire parabolique, ainsi ces particules se heurtent à la surface avec des angles très faibles.

La trajectoire des grains qui sautent est fonction de quatre forces : 1) la gravité, 2) le transport aérodynamique, 3) l'effet Magnus, lié à la rotation des grains et 4) la force de sustentation. Les angles de décollage sont en moyenne de 50°. Étant donné que le gradient vertical du vent à proximité de la surface est très fort, plus le saut de la particule est haut, plus la vitesse de transport par le vent sera élevée, ce qui donne lieu à des trajectoires plus longues. Lorsque les particules ont atteint

leur hauteur maximale, elles descendent en suivant une trajectoire parabolique très linéaire, avec un impact sur la surface avec un angle d'environ 14° (entre 4° et 28°).

L'angle de l'impact diminue au fur et à mesure que la vitesse du vent et la taille des particules augmentent. En outre, la forme des grains est très importante pour la trajectoire de saltation et la nature des collisions au niveau de la surface. Les grains aplatis ont tendance à faire des sauts dans des trajectoires plus basses et longues en comparaison avec les trajectoires des particules arrondies. En outre, la collision est plus efficace pour prolonger le processus de saltation dans le cas des particules compactes.

2.4.3.2 La couche de saltation

La plupart du sédiment dans le nuage de grains en saltation et reptation est transporté très près de la surface, avec une diminution exponentielle du flux de masse par rapport à la hauteur. Sur les surfaces de sable, la plupart des grains se déplacent à 1 ou 2 cm de la surface. Cependant, cette hauteur augmente lorsque le transport de sable a lieu sur des graviers. En tout cas, la taille du sédiment transporté à une hauteur donnée a tendance à augmenter avec la vitesse de friction.

2.4.3.3 Effets de la forme du sable

La valeur du flux des sédiments dépend exponentiellement de la vitesse de friction et la valeur de l'exposant augmente avec la sphéricité des grains, allant de 2,76 pour le quartzite broyé, jusqu'à 3,42 pour le sable naturel et 4,1 pour les sphères de verre (Williams, 1964). Cet auteur a également démontré qu'à de basses vitesses de friction (<75 cm/s) il existe une tendance à l'augmentation du taux de transport au fur et à mesure que les grains deviennent plus irréguliers.

2.4.3.4 Effets de l'humidité

La proportion d'humidité a une influence sur la vitesse limite de mise en mouvement. Au fur et à mesure que la vitesse du vent augmente, l'effet de l'humidité devient moins évident, même si les taux de transport sont jusqu'à 25% inférieurs pour une vitesse de friction de 1 m/s.

2.4.3.5 Effets de la végétation

Les effets de la végétation dans le transport de sédiments restent encore peu connus. Les recherches empiriques indiquent que le transport de sédiments peut avoir lieu même avec des couvertures végétales de 45%. Une approche plus rigoureuse implique l'évaluation de la répartition de la tension tangentielle du vent entre les plantes et la surface de sable.

2.4.3.6 Effets des éléments de rugosité

Dans le cas d'une surface sans couvert végétal et avec des éléments de rugosité qui ne sont pas susceptibles d'être érodés, telle qu'une berme de plage partiellement couverte par de grandes coquilles, le rapport entre les taux de transport et la taille, la densité et l'espacement des éléments de rugosité est fortement marquée par l'effet de la géométrie des éléments de rugosité dans le seuil de début de transport.

Greeley et Iversen (1987) ont suggéré qu'en surfaces lisses le transport a lieu uniquement à de basses vitesses du vent. A vitesses intermédiaires, le transport a lieu sur les deux surfaces, étant supérieur sur les surfaces lisses. Cependant, à de hautes vitesses du vent, le transport est plus élevé sur les surfaces rugueuses.

2.4.3.7 Effet des pentes

La plupart des surfaces existantes dans les dunes ne sont pas horizontales, ce qui rend l'effet de la pente sur les taux de transport potentiellement très important. Lorsque le vent souffle vers l'aval le taux de transport augmente, tandis que lorsque le vent souffle vers l'amont le taux réduit.

2.4.4 Dynamique dunaire

La formation, le développement et la morphologie d'équilibre de toutes les dunes sont déterminés par les variations dans les taux de transport de sédiments dans le temps et dans l'espace qui donnent lieu à l'érosion et la sédimentation.

Les changements spatiaux dans le taux de transport de sédiments sont essentiels pour

contrôler la morphologie des dunes. Dans les zones où le vent change de manière saisonnière, les modèles d'érosion et de sédimentation changent avec les saisons. Par ailleurs, le développement de la dune modifie la structure du vent à son contact, en établissant ainsi un équilibre dynamique entre la morphologie de la dune et le flux local du vent.

2.4.4.1 Formation des dunes sans végétation

Les processus de formation des dunes sont encore insuffisamment compris et analysés. En l'absence de végétation, la sédimentation implique une réduction locale du débit de transport, qui se produit normalement par une convergence des lignes de courant derrière un obstacle, par une diminution de la vitesse du vent en raison d'une augmentation de la rugosité du lit ou par des variations de la microtopographie (variations de pentes, formes de lits relictuels, etc.).

Les tourbillons qui se produisent derrière les obstacles donnent lieu à des formes à différentes échelles comme les dunes girouettes (générées du côté sous le vent avec des pierres ou de la végétation) ou à des formes plus grandes telles que les langues sableuses observées du côté sous le vent dans les cratères de Mars.

Certains auteurs ont suggéré que les dunes linéaires peuvent se développer à partir d'un noyau de dunes girouettes. De grands obstacles tels que des escarpements ou des collines isolées peuvent donner lieu également à la formation de dunes linéaires dans les zones sous le vent. Ces dunes peuvent se diviser en barkhanes isolés une fois que cesse l'influence de l'obstacle.

Cependant, toutes les amorces de sédimentation ne conduisent pas forcément à des dunes, leur formation exige de grands apports sableux. De nombreuses petites proto-dunes perdent du sable avec les vents forts et certaines sont complètement éliminées.

Ce processus de croissance des dunes peut être altéré par la présence de la végétation, d'obstacles et d'autres facteurs tels que ceux déjà cités.

2.4.4.2 Construction des dunes côtières

Les dunes côtières commencent à se former sur la plage sèche de côtes en progradation en suivant un processus qui comprend les phases suivantes :

- Germination de graines ou développement de fragments de plantes, comme les rhizomes ou les stolons déposés par les marées ou le vent, provenant d'autres secteurs côtiers ou de dunes plus intérieures du même secteur.
- Les grains de sable qui se déplacent par saltation sont interceptés par la structure aérienne de la végétation et commencent à s'accumuler en formant des petits monticules qui grandissent au fur et à mesure que grandit la plante sur laquelle ils se forment.
- Si la végétation est abondante, les monticules qui se sont formés s'unissent pendant leur croissance et forment une petite dune de 50-100 cm de hauteur, dénommée dune embryonnaire (stade natif de l'avant-dune). Si la couverture végétale est faible, le degré de développement de la dune embryonnaire sera inférieur, donc aucun cordon linéaire continu ne se formera, mais une zone de monticules isolés ou *nebkas* (ou encore *shadow dune*).

Une *nebka* est une dune discrète formée autour d'une plante. Les matériaux inertes tels que des déchets de tout type, des madriers, des restes d'embarcations, etc., transportés par la houle vers la partie haute de la plage lors des tempêtes, sont aussi capables de provoquer l'accumulation de sable. Bien qu'il s'agisse de formations qui ne grandissent pas une fois que l'obstacle a été enterré, ces dépôts peuvent fournir de la matière organique qui favorise la croissance postérieure de la végétation.

La formation de la dune côtière continuera jusqu'à ce que le secteur de la côte cesse d'être progradant, ou qu'une nouvelle dune embryonnaire commence à se former. Dans les deux cas, l'apport de sable à la dune diminue, et le cordon dunaire cesse de croître à la fois en hauteur et en largeur, Hesp et Martínez (2007). Dans le cas où une nouvelle dune embryonnaire apparaît, il se produit une succession de cordons dunaires qui sont séparés par des dépressions. Cette succession, caractéristique de nombreux systèmes dunaires côtiers reflète la chrono séquence de leur formation.

2.5 Morphologie des dunes

Les dunes résultent de l'interaction entre le matériel granulaire (sable) et la force de cisaillement exercée par l'air sur la couche limite atmosphérique. La morphologie des dunes reflète : 1) les caractéristiques du sédiment, notamment la taille du grain et 2) les caractéristiques du vent superficiel, tant en ce qui concerne la tension tangentielle à la surface que la variabilité directionnelle du régime annuel.

Dans la plupart des dunes côtières, la végétation, les détritiques et les obstacles topographiques constituent aussi des facteurs de leur formation. Au fur et à mesure que la dune se développe, elle modifie le flux primaire. Ces modifications jouent un rôle très important sur la morphologie des dunes.

Les formes de dunes sont très diverses, avec des échelles de taille variables, et beaucoup de références émanent des environnements désertiques. Les dimensions des dunes littorales sont plus modérées, et présentent une géométrie spécifique en relation à la présence de végétation. En outre, l'humidité permet la stabilité de versants sous le vent avec des pentes élevées (jusqu'à 40°).

Les dunes côtières sont un élément dynamique du paysage. Elles se développent à partir du sable déposé par la houle sur les bermes de plage. Le sable de ces bermes sèche pendant les périodes de climat favorable, ce qui rend possible son transport vers l'intérieur par les vents provenant de la mer. La diminution de la vitesse du vent dérivée de l'augmentation de frottement produit le dépôt de sable. Ce processus est souvent accéléré par la présence de végétation ou d'obstacles.

L'interdépendance entre apport de sédiment sableux par la mer et la végétation conditionne le développement de dunes côtières dans les zones tempérées. Dans ces zones à précipitations suffisantes pour la croissance de la végétation, la morphologie des systèmes dunaires est corrélée à la distance à la mer. En effet, l'environnement salin et desséchant et le manque de nutriments conditionnent le type et la variété de végétation pouvant vivre dans chacune des zones.

La présence de végétation exerce une influence très importante sur la morphologie dunaire. Le couvert végétal participe à la fixation des sables et modifie les caractéristiques de la surface en relation avec le flux du vent, Packham et Willis (1997). La végétation constitue un élément nécessaire pour la genèse et le développement des systèmes dunaires méditerranéens.

La végétation peut se développer sur les dunes côtières de tout type de climats, à l'exception des zones arides où la précipitation moyenne annuelle est en dessous de 50 mm. Les facteurs principaux qui limitent le développement de la végétation sont les régimes de vent de grande intensité qui provoquent des processus d'érosion et d'accumulation de sables (Tsoar, 2001). Cependant, ces types de situations sont peu fréquents et la plupart des dunes côtières du monde présentent une végétation qui constitue un facteur de leur formation et évolution.

Les dunes côtières présentent des hauteurs très variables, de 1-2 m jusqu'à 20-30 m. Cependant, il existe des dunes de plus de 100 m de hauteur, avec des pentes au vent très variables, en fonction du couvert végétal et du caractère progradant, en équilibre ou en érosion du système dunaire.

2.5.1 Facteurs déterminant la morphologie d'un système dunaire côtier

En principe, les facteurs qui déterminent le type, l'organisation, la taille et l'espacement des dunes sont les suivants :

- Nature des sables, notamment taille et classement.
- Régime de vents et orientation de la plage par rapport à ceux-ci.
- Apports de sable au système dunaire.
- Couvert végétal.
- Topographie de la zone terrestre adjacente à la plage.
- Niveau de la nappe phréatique.
- Degré d'humidité propre de la zone côtière.

2.5.1.1 Influence de la granulométrie du sable

La granulométrie des dunes est souvent semblable à celle de la plage, généralement avec une plus forte proportion des fractions fines du fait que le vent sélectionne les grains plus fins. Cependant, les vents intenses peuvent transporter presque la totalité des classes granulométriques, les grains de taille moyenne de la plage, source de sédiments, et de la dune réceptrice sont alors semblables.

2.5.1.2 Influence du régime de vents et de l'orientation de la plage

L'action des vents qui soufflent de la mer vers la terre et leur capacité à transporter le sédiment hors de la zone d'influence (houle et marées) de la mer sont des conditions fondamentales pour la formation d'un système dunaire côtier. Les vents parallèles à la côte favorisent seulement le transport par la dérive littorale et la formation de plages progradantes, mais sans champs dunaires. C'est une orientation de la plage avec une disposition de préférence perpendiculaire ou oblique par rapport aux vents à forte capacité de transport qui permet la formation de champs dunaires plus larges.

Plusieurs composantes du vent agissent sur la côte. Les vents dominants exercent une influence plus marquée sur l'emplacement du sédiment dans les champs dunaires, leur efficacité est maximale lorsque la direction du flux résultant est perpendiculaire à la limite plage-dune. En outre, chaque composante du vent, en fonction de son intensité et direction, a tendance à générer une typologie géométrique de dune déterminée.

Le régime de vents est un facteur déterminant de la morphologie dunaire dans les zones arides. Les barkhanes et les dunes côtières se forment en présence de vents uni-modaux, les dunes linéaires apparaissent avec des vents bimodaux, tandis que les dunes en étoile se forment avec des régimes de vent multimodaux très variables. Étant donnée la prévalence de vents provenant de la mer, les barkhanes et les cordons de dunes en demi-lune sont souvent les plus habituels dans les dunes côtières des zones désertiques.

Dans les zones avec suffisamment d'humidité, la végétation a tendance à stabiliser les dunes, mais les changements dans la direction du vent et les tempêtes fortes peuvent modifier la forme des dunes, en donnant lieu à une répartition complexe des bombements et des dépressions, typiques des dunes côtières.

2.5.1.3 Relation des formes dunaires avec la disponibilité en sédiment

La disponibilité d'un volume sableux excédentaire le long de la côte et plus particulièrement sur la plage source ou solidaire du champ dunaire adjacent, est une condition indispensable pour la formation d'un champ dunaire. Une plage bien alimentée en sable sera d'autant plus efficace pour la survie du système plage-dune face aux changements marqués par un accroissement de l'érosion.

2.5.1.4 Influence de la végétation

Le sable est un milieu favorable pour la croissance de certaines plantes grâce à sa capacité de rétention de l'humidité. La végétation joue un rôle déterminant dans la formation du système dunaire côtier, notamment dans les zones suffisamment humides pour sa germination et sa croissance. La présence de végétation réduit le transport sédimentaire du fait que :

- Elle augmente la rugosité de la surface, ce qui réduit le flux de vent sur celle-ci.
- Elle intercepte les grains en saltation et agit comme une surface molle qui absorbe une grande quantité d'énergie, favorisant ainsi la sédimentation. La colonisation végétale du champ dunaire, représentée par des communautés spécifiques, disposées en bandes parallèles à la limite plage-dune, influe sur la sédimentation et sur la formation de typologies spécifiques de dunes, telles que les cordons dunaires, les monticules isolés, etc.

2.5.1.5 Influence de la topographie de la zone terrestre adjacente à la plage

Il est nécessaire que la surface d'arrière-plage soit suffisamment large pour permettre

l'existence de dunes. Les champs dunaires côtiers les plus grands occupent des zones qui réunissent cette condition ; ils présentent souvent des zones supratidales de plage ayant des bermes larges ou/et des versants à faibles pentes. Les versants les plus abrupts peuvent aussi accueillir des dunes dont la sédimentation finit par adoucir la pente initiale, pourvu que le taux de sédimentation soit très élevé et que les vents présentent une capacité de transport très haute. En tout cas, ce type de dunes occupe des zones relativement peu étendues.

2.5.1.6 Position de la nappe phréatique

Le niveau de la nappe phréatique, qui a tendance à se situer à faible profondeur dans ces zones, conditionne la fixation du sédiment sableux et sa participation au développement de certains types de dunes, tels que les dunes en parabole, pour lesquelles le long couloir plat entre les bras sédimentaires est une surface sans érosion ni sédimentation. En outre, cette nappe phréatique empêche la progression de l'érosion «par le bas», comme dans le cas des dépressions érosives (blowout) du type semi-circulaire et allongé.

2.5.2 Morphologie dunaire

Dans les dunes côtières, la dominance des vents marins, la présence de végétation et, éventuellement, l'érosion provenant du piétinement ou du pâturage, ainsi que la position de la nappe phréatique donnent lieu à des formes dunaires très diverses

Le flux du vent et du sable est modifié par les caractéristiques du couvert végétal : densité, morphologie, répartition et hauteur. Sur les côtes méditerranéennes, les denses formations végétales donnent lieu à des dunes hautes et étroites, avec une accumulation de sable de préférence sur le bord exposé au vent, suite à la forte réduction de la vitesse de l'air et, en conséquence, du transport par saltation.

Ce phénomène donne naissance à des dunes embryonnaires asymétriques à pentes plus marquées sur la face au vent. Dans d'autres zones biogéographiques, où les espèces

formatrices de dunes présentent une croissance rampante (*Spinifex* : Nouvelle Zélande ; *Ipomoea/Canavalia* : Mexique), la réduction du flux d'air et de sable est faible, ce qui donne forme à des dunes asymétriques à pente plus marquée à l'abri du vent.

La formation de cordons dunaires continus a lieu dans les zones d'accrétion relativement forte et où la végétation est dense et haute, Hesp (2002). Les cordons dunaires établis varient largement en taille, allant de 1 ou 2 mètres jusqu'à plus de 30 mètres de haut dans certaines circonstances. Le couvert végétal et le type d'espèces présentes est aussi très variable selon la région biogéographique, le climat et l'histoire, la stabilité, l'exposition et la dynamique sédimentaire existante, Hesp (1991).

Quand un système dunaire côtier est progradant, on assiste normalement à la formation d'une série de cordons dunaires parallèles, depuis le système le plus jeune, ou dune embryonnaire, situé sur la partie haute de la plage sèche, jusqu'aux plus anciens, des dunes grises ou tertiaires, qui dans les climats tempérés sont souvent complètement stabilisées par la végétation.

2.5.2.1 Zonage transversal

Dans la majorité des systèmes dunaires apparaît un zonage, en relation avec la distance à la mer, dans lequel des gradients de salinité, d'apport de sédiments et de régime de vents déterminent des types de végétation bien différenciés.

Ces types de végétation forment des bandes parallèles à la côte et, depuis la mer, on trouve les types suivants :

Avant-dunes : Elles constituent la bande immédiatement postérieure à la plage, commençant à se développer à partir de la limite des plaines mers ordinaires. Ce sont au début des monticules naissants, discontinus et très bas, de sable mobile ou vif car leur couverture végétale est très faible. Puis ces dunes embryonnaires de raccorder pour constituer une avant-dune continue.

Dans ces zones, à sables basiques à cause des carbonates, la concentration saline est

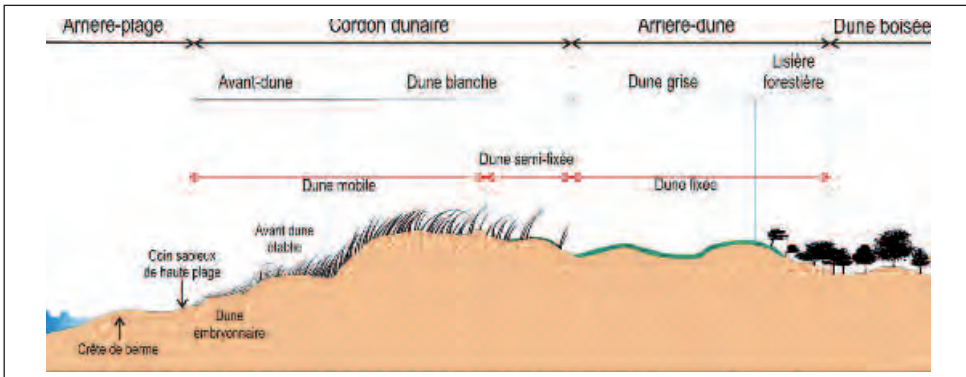


Figure 2.5 Profil d'un cordon dunaire. © Carlos Ley

inférieure à celle de la plage car la mer (sauf cas exceptionnels) n'arrive jamais à les couvrir. Néanmoins, la salinité due aux embruns y est assez élevée, au moins de 2%, conditions difficiles pour les végétaux.

Dunes blanches : Les dunes blanches se trouvent à l'arrière des avant-dunes. Ce sont des monticules de sable d'une certaine hauteur, exposés au vent et, le plus souvent, hors de la portée de la mer. Leur forme très irrégulière comprends de forts bombements, des creux ou dépressions, des zones plates, et des pentes très fortes. En général le versant au vent est de pente faible, et le versant sous le vent plus escarpé.

La végétation est plus dense que dans la zone précédente et les sables sont en partie, semi-fixés, sans exclure des secteurs de forte mobilité. Une végétation psammophile (amie du sable) peuple ces dunes, et correspondent au secteur de fort transit sableux. Ce groupe de plantes tend à fixer le sable grâce à des rhizomes très puissants, cas de l'Oyat (*Ammophila arenaria*) - nommé Gourbet dans le sud-ouest de la France -, principal responsable du développement en hauteur des dunes. Sa grande capacité de régénération naturelle, tant par semence que par de grands stolons, permet une colonisation rapide des zones de sable mobile.

La mobilité de ces dunes, leur très grande pauvreté en matière organique, leur forte teneur en carbonate de calcium et la perméabilité du sable en font un milieu écologiquement sec.

C'est pourquoi on y rencontre à la fois des plantes psammophiles, xérophiles, et quelques halophiles.

Dunes grises : Ce sont des dunes semi-fixées ou stabilisées. Leur recouvrement végétal est supérieur à 50 ou 60 %, mais il n'est pas total, ce qui sera le cas de la bande végétale suivante, plus intérieure.

Les dunes grises sont à l'arrière du cordon de dune blanche, et bénéficient de sa protection. Leur végétation comprend encore des psammophile, mais en minorité. La faiblesse de la salinité et du transit sableux permettent la croissance d'une plus grande diversité d'espèces.

Ces dunes consolidées, comme les blanches, ont des formes complexes. Elles sont en général de plus faible altitude.

2.5.3 Classifications des dunes et champs dunaires

Nous disposons de plusieurs classifications morpho-dynamiques dans lesquelles les dunes sont décrites selon leur forme et leur relation avec les vents qui en sont à l'origine et notamment en fonction de leur alignement par rapport au vecteur résultant du transport net de sédiment. Le problème de ces classifications est qu'elles supposent une connaissance complète du processus de formation de dunes, ce qui n'est pas le cas. D'autre part, le degré de couverture végétale, le niveau d'érosion marine, les

transformations éoliennes secondaires, l'activité humaine ou celle des animaux, induisent des formes complexes qui rendent impossible une classification unique.

Nous distinguons deux types de dunes ou de champs dunaires côtiers : ceux associés aux environnements désertiques, où la présence de végétation est faible et non déterminante pour la dynamique dunaire, et ceux où la végétation est déterminante pour la formation du système dunaire.

2.5.3.1 Classification des dunes côtières dans les environnements désertiques non végétalisés

Dans les zones côtières où les précipitations ne permettent pas le développement de la végétation, la typologie des systèmes dunaires est comparable à celle des zones désertiques, avec des dunes fortement mobiles. Étant donnée la prévalence des vents maritimes, dans la zone proche à la côte, les types dunaires prédominants sont ceux associés aux vents uni-modaux, tels que les dunes en demi-lune où barkhane, avec une section transversale similaire à celle détaillée dans la figure 2.6. Si le régime de vents est variable, l'on peut trouver tous les types dunaires associés aux zones désertiques : dunes transversales, linéaire et en étoile.

La classification morphologique de McKee (1979) regroupe les dunes non végétalisées en fonction de leur forme et du nombre de versants de glissement, en proposant six groupes principaux : *barkhanes*, *croissantes*, *linéaires*, *inverses*, *en étoile* et *en parabole*. Voir figure 2.7

Au sein de chacune de ces formes principales, on peut trouver trois variétés de types dunaires : *simples*, *composées* et *complexes*. Les dunes simples correspondent à chacun des six types de base indiqués auparavant. Les dunes composées sont celles qui présentent une superposition de deux échelles de dunes du même type morphologique. Par exemple, de petites dunes transverses sur les versants au vent de dunes transverses de plus grande taille. Par contre les dunes complexes sont formées de deux échelles de dunes de types différents, comme par exemple la

formation de petites dunes transverses aux côtés des grandes dunes linéaires.

Outre les types dunaires précédents, quelques champs dunaires comprennent des zones avec des surfaces sableuses relativement plates ou légèrement ondulées dénommées *lits de sable* et, dans d'autres cas, des formes de dunes basses ondulées sans versant de glissement, dénommées *zibar* (dites aussi *dos de baleine*). L'interaction entre la végétation et le sédiment ou les obstacles donne lieu à l'accumulation de sable du côté sous le vent de ceux-ci, ce qui entraîne la formation de langues de sable, ou traînées sableuses. Là où le sable reste accumulé dans les zones adjacentes à des obstacles topographiques, se forment *des dunes écho* ou *des dunes montantes*, du côté au vent ; et *des dunes de projection* ou *dunes descendantes* (*ou tombantes*), du côté sous le vent de l'obstacle. Dans d'autres situations, les obstacles ou la végétation forment *des buttes d'accumulation*, souvent à tendance longitudinale à cause de la persistance ou la dominance d'une des composantes du vent. On observe aussi *des monticules* ou *des dômes végétalisés*, dénommés «*coppice dunes*», bien représentés sur les champs dunaires avec une sédimentation déficitaire, notamment sur les côtes subarides où la végétation est principalement composée de fourrés, similaires aux côtes désertiques.

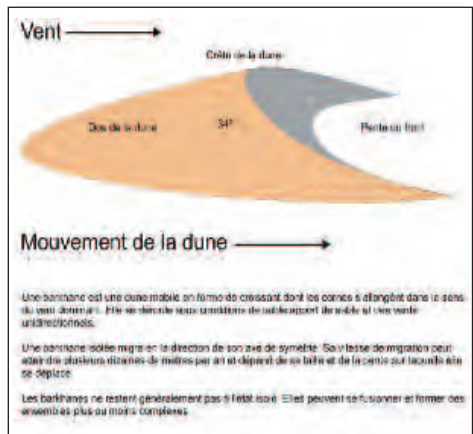
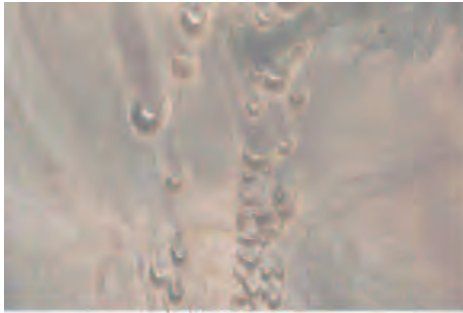
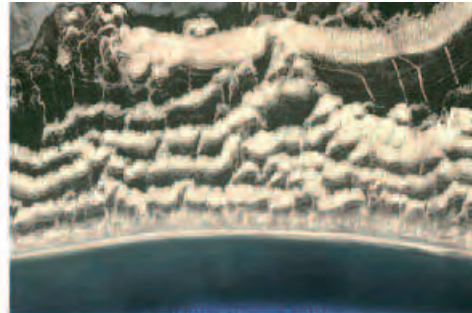


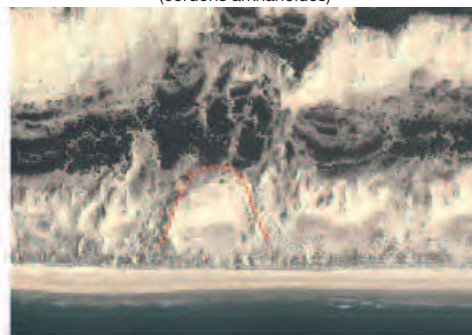
Figure 2.6 Dune barkhane ou demi-lune. © Carlos Ley



Dune barkhane

Dune croissante
(cordons arkhanoides)

Dune linéaire



Dune parabolique



Dune en étoile

Photo 2.9 Différents types de dunes. © Google Earth

Dunes en barchanes et cordons barchanoïdes

Les types de dunes les plus simples sont ceux qui se forment sous des régimes de vent caractérisés par de petites variations de direction et sens. En l'absence de végétation, les dunes en demi-lune sont les formes dominantes dans les régimes de vent quasi- unidirectionnels. Ce type

de dune a une morphologie stable jusqu'à des variations dans la direction du vent de 15° environ par rapport à la direction moyenne. Là où la disponibilité de sable est limitée, l'on trouvera des dunes isolées ou groupées, caractérisées par un versant au vent à faible pente et un versant sous le vent en croissant de lune avec les cornes orientés dans la direction du vent (voir figure 2.6) ;

CONSERVATION DES DUNES CÔTIÈRES

au fur et à mesure que la disponibilité de sable augmente, les cornes des barkhanes se joignent aux adjacentes, formant ainsi des cordons dunaires barkhanoïdes, avec la direction principale des crêtes perpendiculaire à la direction du vent ; et avec un versant clairement orienté au vent et à faible pente, et un autre versant sous le vent présentant une pente à la limite d'équilibre du sable.

Si la dune continue de croître, on peut trouver des dunes en barkhanes composées, ou des dunes en barkhanes mineures qui se forment sur le versant au vent de la dune de plus grande taille. On peut également trouver des dunes en barkhanes sur les versants des grandes dunes en étoile, donnant lieu à des dunes complexes.

Dunes linéaires

Les dunes linéaires se caractérisent par leur grande longueur, leur rectitude, leur parallélisme, leur espacement régulier et le rapport marqué entre la zone de dune et la zone interdunaire. Ces dunes sont transversalement symétriques et elles peuvent être sinueuses en plan. La position de la crête oscille en fonction de la variabilité saisonnière de la direction du vent. Les dunes linéaires se développent dans des zones avec des régimes de vent provenant d'un même secteur mais avec une importante variabilité directionnelle, ou dans des zones avec des régimes de vent bidirectionnels, et très rarement, dans des zones avec des régimes directionnels de vents complexes.



Photo 2.10 Dunes en barkhanes simples et composées.
© Carlos Ley

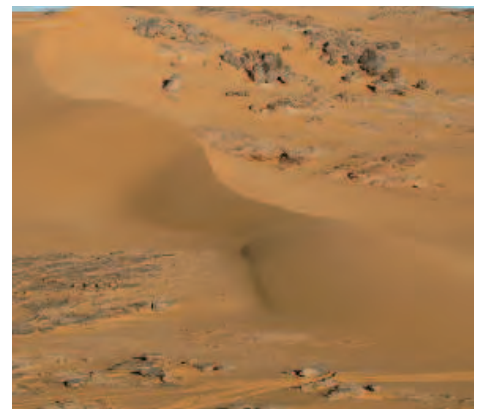


Photo 2.11 Dunes linéaires. © Carlos Ley / Google Earth

Dunes pyramidales ou en étoile

Les dunes en étoile se caractérisent par leur grande taille et leur forme pyramidale, avec trois ou quatre bras qui partent d'une pointe centrale. Chaque bras présente une crête sinueuse, avec des versants d'avalanche qui alternent en fonction de la direction du vent dominant selon la saison. La partie supérieure des dunes en étoile présente une forte pente, avec des valeurs entre 15° et 30°. La base est très large et à pente faible, entre 5° et 10°. Dans les flancs inférieurs, on peut observer la formation de dunes en demi-lune ou inverses mineures, donnant lieu à une dune en étoile complexe. Les dunes en étoile sont associées aux régimes de vent multidirectionnels, avec un transport net annuel relativement réduit.

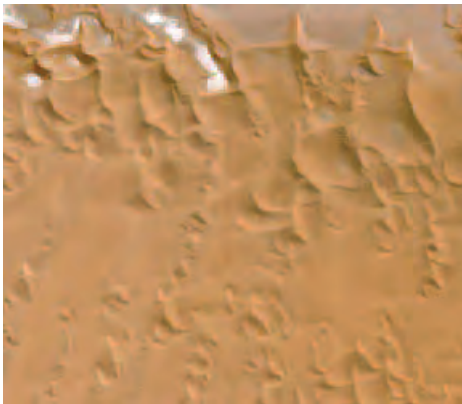


Photo 2.12 Dunes pyramidales ou en étoile.
© Carlos Ley / Google Earth

Dunes paraboliques

Les dunes en parabole sont communes dans de nombreuses zones côtières et dans les zones semi-arides. Ces dunes se caractérisent par leur forme en U, avec les bras végétalisés partiellement stabilisés et inversés par rapport au sens du vent. Elles mesurent de 100 à 500 m de longueur et de 10 à 70 m de hauteur, elles présentent une zone active dans le bassin du U et un talus frontal d'envahissement. Les conditions nécessaires pour le développement des dunes paraboliques ne sont pas clairement déterminées. Normalement, elles sont associées à des zones avec un couvert végétal modéré et avec un régime de vent unidirectionnel.

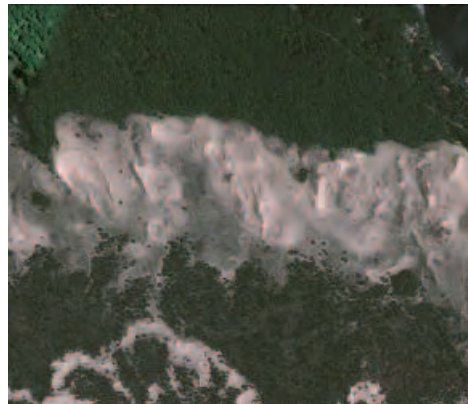


Photo 2.13 Dunes paraboliques (Lac Michigan, Etats Unis).
© Carlos Ley / Google Earth

2.5.3.2 Classification des dunes et champs dunaires côtiers végétalisés

La colonisation végétale induit des morphologies particulières qui peuvent comprendre une ou plusieurs des formes précédente, mais pas exclusivement. Certains auteurs parlent de dunes végétalisées au sens large, comme Goldsmith (1985), mais l'on peut distinguer plusieurs géométries.

En raison de la prévalence des vents marins sur la côte, la grande majorité de dunes côtières sont transverses et, lorsque celles-ci sont végétalisées, elles développent des langues de sable et des dunes paraboliques, ces dernières fréquemment associées au développement de cuvettes de déflation (ou caoudeyre, terme occitan retenu en France par les géomorphologues).

Les dépôts côtiers des sables éoliens ont donné lieu à une importante variété de formes dunaires. La classification de ces formations est aussi très riche, en incluant toute l'étendue du système dunaires ou seulement la zone d'influence marine directe (Pye et Tsoar, 1990).

Une autre typologie prend en compte seulement des aspects écologiques ou liées aux relations végétation/géomorphologie pour la caractérisation des dunes côtières : Goldsmith, 1977 et 1985 ; Hesp et Short, 1980 et Hesp, 1984, entre autres.

Hesp et Short (1980) et Hesp (1984) proposent une dichotomie basée sur les caractéristiques géomorphologiques et écologiques des dunes côtières. Un type dunaire serait donc

caractérisé par des dépôts éoliens côtiers naissants, formés à partir de l'accumulation de sable autour de la végétation pionnière, et le deuxième type dunaire inclurait les dépôts éoliens côtiers stabilisés, formés à partir de dunes côtières naissantes, où la végétation pionnière a été remplacée par un autre type de végétation, généralement ligneuse.

Les dépôts éoliens côtiers naissants peuvent être divisés en 5 types en fonction du couvert végétal (Short et Hesp, 1982) (voir figure 2.7). À un extrême de cette subdivision, l'organisation morphologique serait dominée par la composante végétale (fronts côtiers fixés, parallèles à la ligne de plage) ; et à l'autre extrême, le facteur dominant serait la dynamique éolienne (cuvettes de déflation, paraboles). Les phases intermédiaires correspondraient aux formes de transition caractérisées par une topographie fragmentée.

Les morphologies et typologies de dunes ont été notamment étudiées par Flor (1980, 1981, 1983 et 1992). Cet auteur a identifié sur le littoral cantabrique en Espagne des dunes de typologies diverses : barkhanes, dunes longitudinales et transversales, écho, en parabole, etc. Il propose alors une classification basée sur les critères qui conditionnent la géométrie résultante : formes érosives, formes d'accumulation et mixtes, composantes directionnelles du vent, structure du flux et échelle de tailles. Cette proposition de classification géomorphologique hiérarchisée de dunes éoliennes (tableau 2.1) est bien représentative des côtes à climats tempérés-humides.



Photo 2.14 Colonisation végétale des dunes. Doñana, Espagne. © Carla Danelutti

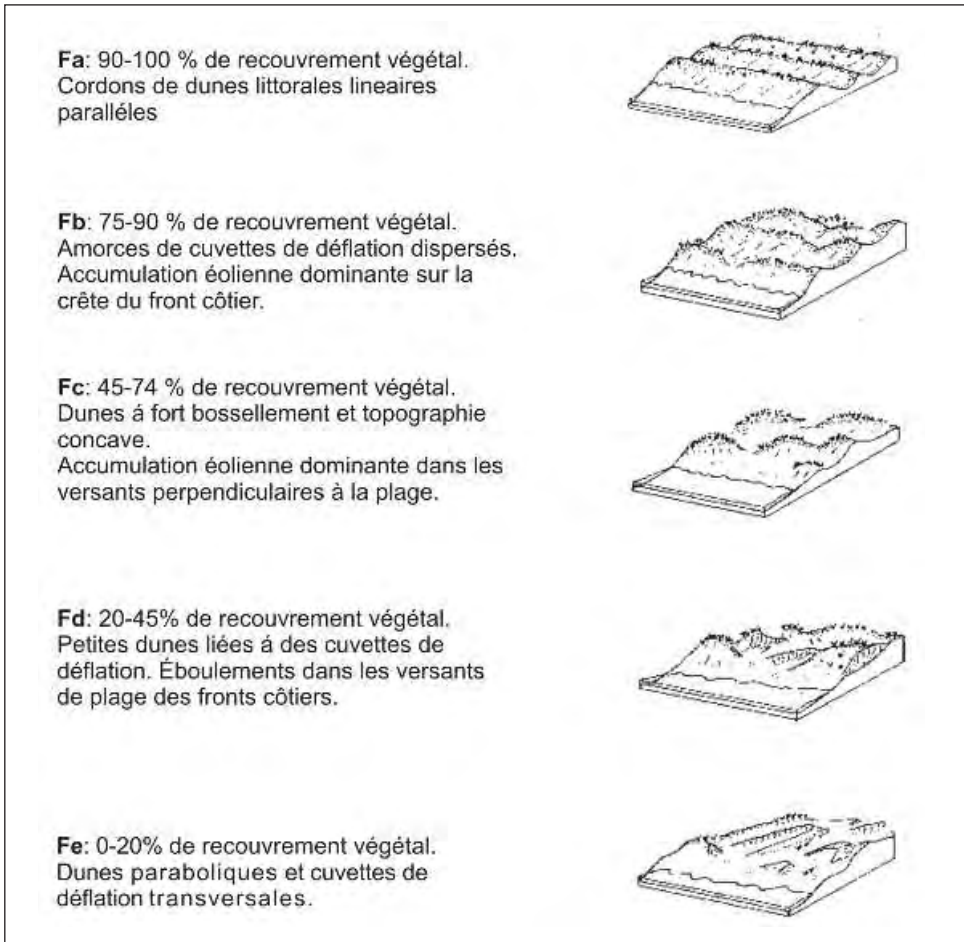


Figure 2.7 Classification des dunes en fonction du couvert végétal (Short et Hesp, 1982). © Short et Hesp



A) DUNES D'ACCUMULATION

I.- NON CONTRÔLÉES PAR LE RELIEF

- 1.- Formes tabulaires – **dunes tabulaires** [« sand sheets »] (M)
 - a.- contrôlées par la colonisation végétale – buttes d'accumulation: (M)
 - **monticules coniques** [« conical mounds »] (vents persistants) [- forme pyramidale]
 - **langues de sable** [« shadow dunes »] (vents persistants) [- forme lobée]
 - **monticules boisés** [« coppice dunes »] (vents persistants)
 - b.- non contrôlées par la colonisation végétale : - **dunes longitudinales** (vents intenses avec une direction dominante) (D et H)
 - **dunes de projection** [« lee-projection dunes »] (flux intenses unidirectionnels sur le versant/côté au vent) (M)
 - c.- indifférentes:
 - **dunes linguiformes** (vents intenses avec une direction dominante) (D et H)
 - **dunes aklé** (vents intenses avec une direction dominante (D et H*))
- 2.- Formes transversales
 - **cordons dunaires** [« foredunes »]
 - irréguliers (vents prédominants et autres : végétation irrégulière) (H)
 - symétriques (vents prédominants modérés, végétation uniforme) (H)
 - **dunes transversales** (vents prédominants) (D* et H)
- 3.- Formes mixtes – **barkhanes et champs barkhanoides** (vents prédominants) (D* et H)

II.- CONTRÔLÉES PAR LE RELIEF

- 1.- Formes tabulaires
 - **dunes «grimpantes»** [« climbing dunes »] [- angles bas (<35°) (D et H*)]
 - **dunes perchées** [«cliff-top dunes»] (M* et D) [- angle haut (>35°) (D et H*)]
 - **dunes en aval/descendantes** [«falling dunes»] (M* et D)
- 2.- Formes transversales
 - **dunes enveloppantes** [« wrap-around dunes »] (d* et M)
 - **dunes écho** (d* et M)
- 3.- Formes mixtes
 - **dunes en parabole** (vents intenses unidirectionnels, partiellement contrôlées par la végétation) (H)
 - **dunes barkhanoides** (vents intenses unidirectionnels) (H)

ÉCHELLE DE TAILLES
d = décimétrique
M = métrique
D = décamétrique
H = hectométrique
K = kilométrique
* - prédominant

B) DUNES MIXTES (Avec érosion et accumulation)

I.- NON CONTRÔLÉES PAR LE RELIEF

- 1.- Formes simples – **surface de déflation** [« deflation bassins »] (vents intenses) (H)
 - **cuvettes de déflation, caoudéyre** [« blowouts »] (un ou plusieurs vents intenses) [- semi-circulaires ou elliptiques (M et D*)]
 - **alongsées** (D et H*)
- 2.- Formes mixtes
 - **parabolique ou dunes en forme de U** (vents intenses unidirectionnels, partiellement contrôlées par végétation) (H)

C) DUNES A EROSION DOMINANTE

I.- NON CONTRÔLÉES PAR LE RELIEF

- 1.- Formes simple
 - **caoudéyre** (un ou plusieurs vents intenses) [- semi-circulaires ou elliptiques (M et D*)]
 - **buttes résiduelles** [- pinacles pyramidaux « knobs » (houles et/ou vents) (M)]
 - **prismes longitudinaux** (vents) (D et H)

3 Écologie

3.1 Introduction

On trouve des dunes côtières dans le monde entier, sous une grande variété de régimes climatiques. Les dunes côtières se forment sur des sites qui présentent trois conditions fondamentales de base : 1) des apports de sable de la plage suffisants et de taille adéquate, 2) des vents de mer capables de transporter les sédiments vers l'intérieur, au moins pendant une partie de l'année et, 3) un espace suffisant sur lequel les dunes peuvent se former et se développer. Bien que la présence de végétation ne soit pas indispensable à la formation des dunes côtières, elle a une forte influence sur leur morphologie.

La végétation participe à la fixation des sables et modifie les caractéristiques de surface des dunes du fait de son interaction avec le flux du vent. La végétation est le principal facteur naturel limitant

les régimes de vent de forte puissance qui sont à l'origine de processus intenses d'érosion et d'accumulation des sables.

3.2 Formation de la dune côtière

Les dunes commencent à se former au niveau de la haute-plage, zone hors de l'influence des houles et des marées de vives eaux. Le processus de formation suit les phases suivantes : 1) développement de la végétation par germination de graines ou croissance à partir de stolons et de rhizomes. Ce matériel provient d'autres secteurs de la côte ou de dunes intérieures à cette même zone ; 2) Les sables qui se déplacent par saltation sur la plage sont interceptés par la végétation et s'accumulent en



Photo 3.1 Coalescence de mottilles initiés par la végétation pionnière et qui formeront une dune embryonnaire.
© Juan Bautista Gallego



Photo 3.2 Végétation de haut de plage formée par des espèces annuelles comme *Salsola kali* et *Cakile maritima*. (Doñana, Huelva, Espagne). © Juan Bautista Gallego

formant de petits monticules qui se développent au fur et à mesure que croît la végétation sur laquelle ils se forment ; 3) Lorsque la végétation devient abondante, les monticules se rejoignent et forment une petite dune dénommée dune embryonnaire, c'est le stade jeune des avant-dunes. Lorsque la végétation est pauvre, les dunes embryonnaires sont moins développées et ne peuvent former un cordon dunaire continu, on trouve alors une zone de monticules isolés dénommés nebkas. Une nebka est une petite dune formée autour d'une plante.

Les espèces végétales capables de former des dunes embryonnaires continues et permanentes sur les côtes de la Méditerranée sont principalement les Graminées *Ammophila arenaria* et *Elymus farctus*, dont la croissance est stimulée par l'ensablement. Dans les zones arides l'absence de ces espèces ainsi que les conditions environnementales particulières permettent uniquement la formation de champs de nebkas ou de monticules. Par exemple, ceux développés à partir de *Traganum moquinii* sur les côtes des îles Canaries et au Nord-Ouest de l'Afrique.

La colonisation et la survie des plantes du haut de plage et des dunes embryonnaires dépendent de nombreux facteurs : naturels, comme des vents favorables, l'apport suffisant de sable, la présence d'espèces adaptées à ces écosystèmes (Maund 1998, Martínez y Moreno Casasola 1996) ; et anthropiques, comme l'impact du nettoyage des plages, la circulation des personnes à pied, à cheval ou en véhicules motorisés.

3.3 Morphologie dunaire et végétation

La morphologie des dunes côtières dépend de la vitesse du vent (et donc sa capacité de transport), de la quantité de sable disponible, de la topographie de la côte et du type de végétation. De façon secondaire, la fréquence des inondations par l'eau de mer, l'action de la houle et la direction du vent influent également sur cette morphologie.

Le flux de vent et de sédiment est modifié par les caractéristiques de la couverture végétale : densité, forme, distribution et hauteur (Hesp 2002).

Sur les côtes européennes, atlantiques et méditerranéennes, les hautes et denses formations végétales d'*Ammophila arenaria*, sont à l'origine de dunes hautes et étroites. L'accumulation de sédiments y a plutôt lieu sur le versant de la dune exposé au vent du fait de la forte réduction de la vitesse du flux d'air et donc du transport par saltation. Ce phénomène produit des dunes asymétriques avec une plus forte pente du versant exposé au vent.

3.4 Caractéristiques environnementales du système plage-dune et adaptations des plantes

Les facteurs environnementaux les plus caractéristiques des dunes côtières qui conditionnent la composition et l'abondance de

la végétation sont le vent, le mouvement des sables, la salinité, les inondations d'eau de mer, le stress hydrique et la disponibilité en nutriments (Barbour et al. 1985 ; Rozema et al. 1985 ; Clark 1986 ; Hesp 1991 ; Kumler 1997 ; Randall & Scott 1997).

Il est impossible de faire un classement des caractéristiques environnementales : les dunes côtières sont en effet des milieux hétérogènes dans l'espace et dans le temps. De plus les dunes dépendent des milieux adjacents de la zone intertidale (balancement des marées) jusqu'à l'intérieur des terres et sont également sous l'influence directe des zones marines (Hesp y Martínez, 2007). En général la salinité, la mobilité et la taille des sables, la vitesse du vent, le rayonnement solaire, la teneur du sol en carbonate de calcium et le pH diminuent vers l'intérieur, alors que la teneur en matière organique et en nutriments augmentent. (Brown et McLachlan 1990 ; Martínez et Psuty 2004).

Les perturbations quant à elles se manifestent majoritairement entre la plage sèche et le premier cordon dunaire. Il s'agit de phénomènes discrets ou graduels dont l'intensité est variable dans



Photo 3.3 Dune côtière formée récemment sur la côte de Huelva. La morphologie est déterminée par la présence d'une bande d'*Ammophila arenaria* sur le front et la zone sommitale de la dune. © Juan Bautista Gallego

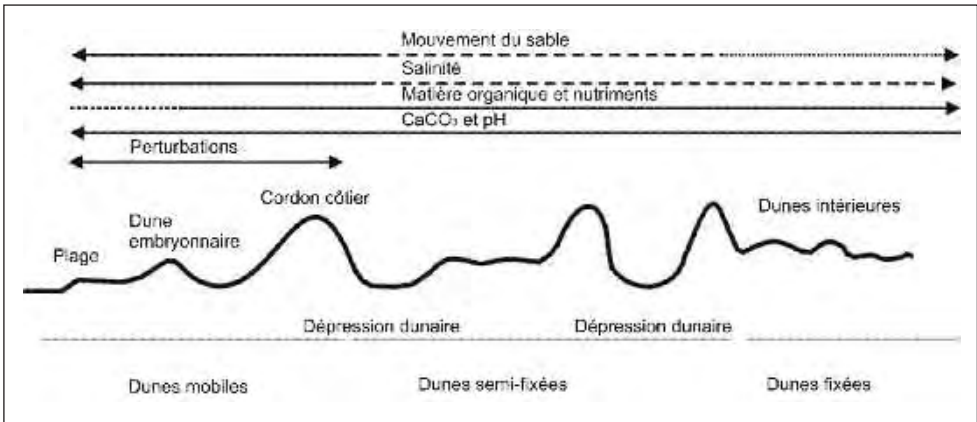


Figure 3.1 Gradients abiotiques en dunes côtières (modifié de Carter 1988 et Brown & McLachlan 1994).
Modifié de Carter 1988 et Brown & McLachlan

l'espace et dans le temps, à l'instar de la houle, des inondations d'eau de mer, de l'érosion ou de la sédimentation de sable (Hesp et Martínez, 2007). Il existe également des perturbations inhérentes au comportement animal et humain.

Il en résulte que la végétation peut présenter un nombre limité d'espèces et être dominée par certaines d'entre elles. Ces espèces résistent aux conditions difficiles grâce à des stratégies particulières d'adaptations et de réponses. Dans les régions tempérées, les plantes qu'on trouve sur les dunes côtières présentent donc une grande similitude morphologique et fonctionnelle en raison des caractéristiques physiques communes aux milieux côtiers (Akeroid, 1997).

Elaboré à partir du travail de Hesp (1991), le tableau 3.1 résume certains de ces facteurs de stress et les différentes adaptations des plantes, il donne quelques exemples d'espèces des côtes espagnoles, puis il présente quelques exemples des effets de ces conditions environnementales.

3.5 Zonation de la végétation dans les systèmes dunaires côtiers

Le milieu physique du système plage-dunes côtières varie en fonction de la distance à la mer on peut distinguer différentes unités

physiographiques et écologiques fonctionnelles dans l'espace et dans le temps. Les unités écologiques sont des habitats élémentaires qui présentent une combinaison de caractéristiques de type édaphique, de mobilité du substrat, ainsi que de conditions hydrodynamiques et de microclimat. Il s'y développe une communauté constituée par des espèces de plantes et par d'autres organismes adaptés à ces types de milieux, changeants et sévères. L'intensité variable des différents facteurs environnementaux détermine l'existence d'un gradient zonal, qui s'étend de la plage vers l'intérieur (Carter, 1990).

Les différentes zones de végétation sont faciles à distinguer lorsqu'on se déplace perpendiculairement à la mer, cette différenciation est d'autant plus nette dans les secteurs côtiers en accretion. Sur les côtes en retrait, ce zonage est également présent, principalement en lien avec la mobilité du sable. Cette mobilité est considérée comme l'un des principaux facteurs de distribution des espèces et de composition des communautés végétales des systèmes dunaires côtiers (Moreno Casasola 1986 ; Dech et Maun 2005). Il existe plusieurs schémas de zonation des dunes côtières, l'un des plus synthétiques est proposé par Van der Maarel (1997) (voir Figure 3.2).

En ce qui concerne le secteur actif sous influence marine des systèmes dunaires côtiers nous

FACTEUR ENVIRONNEMENTAL	ADAPTATION	EXEMPLES
Embruns	Résistance / tolérance / préférence pour le sel	<i>Cakile maritima</i> (résistante) <i>Salsola kali</i> (préférence)
Enfouissement dans le sable	Stimulation de la croissance	<i>Traganum moquinii</i> ; <i>Ammophila arenaria</i> ; <i>Elymus farctus</i>
	Rhizomes	<i>Ammophila arenaria</i> ; <i>Elymus farctus</i>
	Stolons	<i>Cyperus capitatus</i> , <i>Carex arenaria</i>
	Bulbes	<i>Pancreatium maritimum</i>
Inondation par l'eau de mer	Résistance à l'inondation	<i>Cakile maritima</i> <i>Salsola kali</i> <i>Elymus farctus</i> (limitée) <i>Traganum moquinii</i> <i>Zygophyllum fontanesii</i>
Sécheresse	Perte des feuilles Succulence Adaptation des racines Stratégie d'utilisation de l'eau	Quelques espèces <i>Cakile maritima</i> , <i>Carpobrotus sp.</i> Plusieurs espèces La plupart des espèces
Exposition solaire intense, températures élevées	Courbure des feuilles Couleurs claires et pubescence	<i>Ammophila arenaria</i> <i>Otanthus maritimus</i> ; <i>Medicago marina</i>
	Adaptation osmotique	Nombreuses espèces
Exposition au vent	Résistance mécanique Formes aérodynamiques	Nombreuses espèces Nombreuses espèces: <i>Euphorbia peplis</i> (rampante)
Salinité du sol	Résistance au sel	<i>Salsola kali</i>
	Accumulation de sel	<i>Salsola kali</i>
	Succulence	<i>Cakile maritima</i> ; <i>Carpobrotus sp.</i> ; <i>Traganum moquinii</i> ; <i>Zygophyllum fontanesii</i>
	Adaptation osmotique	Nombreuses espèces
Pauvreté en nutriments	Fixation d'azote	Légumineuses:
	Réseaux de micro-rhizomes	Quelques espèces: <i>Ammophila arenaria</i>
	Retranslocation de nutriments	<i>Carex sp.</i>
Erosion marine	Cycle de vie annuel	<i>Cakile maritima</i> , <i>Salsola kali</i> , <i>Linaria pedunculata</i>
	Dispersion de graines par l'eau	<i>Pancreatium maritimum</i>
	Dispersion de graines par le vent	Nombreuses espèces
	Systèmes de rhizomes	<i>Ammophila arenaria</i> ; <i>Elymus farctus</i>
	Stolonifères	<i>Cyperus capitatus</i> , <i>Carex arenaria</i>
	Bulbes	<i>Pancreatium maritimum</i>

Tableau 3.1 Facteurs d'environnement et adaptations des plantes au sein du système plage – premier cordon dunaire (Adapté de Hesp, 1991). *Adapté de Hesp, 1991*

proposons de le diviser en quatre principales zones physiographiques influencées par la mer et par la mobilité du substrat, et qui présentent des caractéristiques écologiques homogènes intrinsèques et communes à la plupart des

systèmes dunaires côtiers de la Péninsule Ibérique et des Baléares : A) Végétation annuelle pionnière ; B) Végétation de plage sèche ; C) Dune embryonnaire ; D) Crête ; et E) versant côté mer du premier cordon dunaire (voir Figure 3.3).

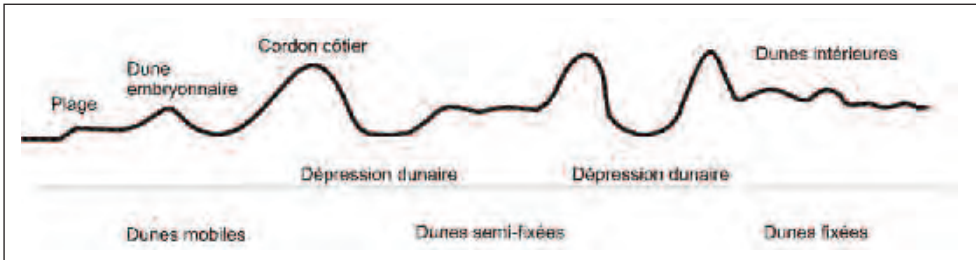


Figure 3.2 Profil transversal d'un système dunaire. © Juan Bautista Gallego

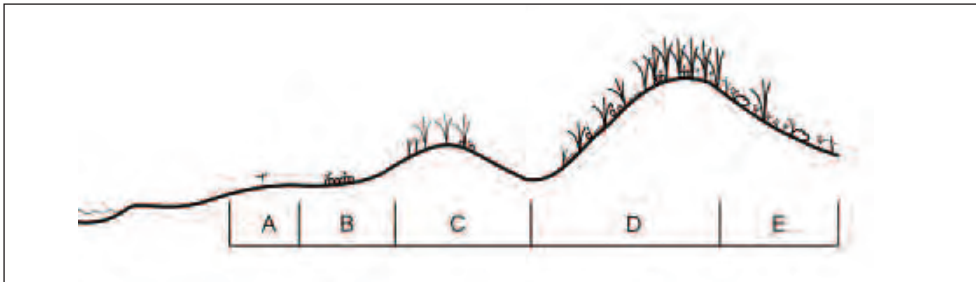


Figure 3.3 Zonation de la végétation du système Plage/premier cordon dunaire au niveau d'une côte en accrétion. © Juan Bautista Gallego

3.6 Description des communautés végétales des dunes côtières

3.6.1 Plantes du système haut de plage – premier cordon dunaire

Le système plage – premier cordon dunaire présente des communautés végétales constituées par un nombre d'espèces relativement bas. En cause, le degré d'instabilité extrême de ces écosystèmes, où les perturbations occasionnées par la houle et l'enfouissement par le sable imposent des conditions très restrictives pour la survie. García Mora (1999) a montré que sur les côtes du sud-ouest de l'Espagne, quand les conditions environnementales sont favorables à la formation de dunes (dynamique d'accrétion), la diversité des espèces du premier cordon dunaire est extrêmement faible. Dans ces conditions, les

communautés peuvent être constituées par une ou deux espèces dominantes (*Ammophila arenaria* et *Elymus farctus*) et par un petit nombre d'espèces associées. Si l'apport de sable au système dunaire décroît, c'est-à-dire si la mobilité du sable décroît, la diversité des espèces augmente. L'autre facteur susceptible d'affecter la diversité du système dunaire est la pression humaine, qui peut modifier les conditions environnementales du système, et provoque souvent une augmentation du nombre d'espèces.

3.6.2 Zonation de la végétation du système plage sèche – premier cordon dunaire

Cette zonation sera analysée selon quatre unités: A) Végétation annuelle pionnière ; B) Végétation de plage sèche ; C) Dune embryonnaire ; D) Crête et E) versant côté mer du premier cordon dunaire.

Végétation annuelle pionnière

Les espèces végétales associées à ces milieux se caractérisent par une tolérance à de fortes concentrations salines du substrat, par la capacité à croître dans des substrats riches en azote et par la faculté à s'ajuster aux conditions d'aridité et de salinité. Les plus représentatives d'entre elles sont *Cakile maritima*, *Salsola kali* et *Euphorbia peplis*. L'érosion des tempêtes hivernales est le principal vecteur de dispersion de ces espèces en disséminant les fruits, les graines et les rhizomes ainsi que les restes organiques, qui feront office de réserve de nutriments pour la génération suivante. La restauration de la communauté végétale intervient essentiellement au printemps, la végétation se développe rapidement pendant l'été grâce à la grande disponibilité d'azote et produit des graines au début de l'automne.

Végétation de plage sèche

Dans la zone plus intérieure et plus stable de la plage, la communauté végétale compte un plus grand nombre d'espèces, notamment *Honckenya peploides*, *Eryngium maritimum*, *Calystegia soldanella*, *Polygonum maritimum*, *Sporobolus pungens*, etc.

Dunes embryonnaires

Les dunes embryonnaires présentent des taux élevés d'accumulation de sable, il en résulte la présence d'un faible nombre d'espèces, adaptées à l'ensablement. A noter la relative abondance d'*Ammophila arenaria*, espèce qui contribue activement à la croissance en hauteur et largeur des dunes en question. D'autres espèces apparaissent également avec de faibles taux de recouvrement : *Euphorbia paralias*, *Otanthus maritimus* et *Eryngium maritimum*.

Premier cordon

Sur le cordon dunaire côtier, *Ammophila arenaria* est l'espèce psammophile la plus cosmopolite, qui constitue avec *Elymus farctus* le principal vecteur de la croissance du dépôt sédimentaire éolien. Les autres espèces caractéristiques sont *Otanthus maritimus*, *Medicago marina*, *Euphorbia paralias*, *Cyperus capitatus*, *Eryngium*

maritimum, *Echinophora spinosa*, *Pancratium maritimum*, etc.

Cette série complète de végétation n'est présente que sur les dunes des zones côtières en accrétion, avec apport important de sable emporté par la houle et déplacé vers l'intérieur par le vent.

Quand la dynamique sédimentaire est moins intense, il n'y a pas formation de dune embryonnaire et ce sont la fréquence et l'intensité des tempêtes qui déterminent la présence de communautés de plage sèche et de plantes pionnières (voir Tableau 3.1).

Enfin, sur les côtes en érosion, la présence de communautés végétales de plage est très éphémère. Elles sont en effet constituées par des espèces de plantes pionnières qui se développent au printemps et en été, pour disparaître pendant l'automne et l'hiver. Dans ce cas, le versant côté mer du cordon dunaire peut être très escarpé à cause de l'érosion marine. La végétation du versant externe est également atteinte par cette érosion.

3.7 Espèces exotiques

Une espèce est dite « exotique » lorsqu'elle n'appartient pas à la flore locale et qu'elle a été introduite par l'homme, que ce soit de manière volontaire ou de manière fortuite. Le mot « exotique » peut être remplacé par : allochtone, exogène, xénophyte, étrangère ou non native, entre autres.

Des introductions d'espèces exotiques ont eu lieu tout au long de l'Histoire de l'Homme, mais c'est depuis le début du 20^{ème} siècle et surtout au cours de dernières décennies que ces introductions ont augmenté de manière exponentielle. La présence d'espèces exotiques dans les écosystèmes, naturels et semi-naturels, occupés par l'homme, participe à un phénomène global d'homogénéisation de la biosphère.

Les espèces exotiques peuvent altérer les caractéristiques structurelles et fonctionnelles des écosystèmes naturels et semi-naturels : dans ce cas, on les appelle **espèces envahissantes**. Leur établissement et leur expansion peuvent menacer certaines espèces



Photo 3.4 *Carpobrotus edulis*, espèce exotique invasive sud-africaine. © Juan Bautista Gallego

et processus des écosystèmes, ce qui peut engendrer de nombreux inconvénients liés à l'économie et à la santé humaine.

Cependant, les espèces exotiques ne deviennent pas toutes envahissantes (5-20%), et les habitats ou écosystèmes ne sont pas tous susceptibles d'être envahis. Le caractère envahissant d'une espèce sera lié par exemple à sa possibilité de dispersion de propagules, à son niveau de compétition et à une prédation limitée. La susceptibilité des écosystèmes à l'invasion est directement liée au type, à la fréquence et à l'intensité des perturbations ainsi qu'aux caractéristiques structurelles (diversité) des communautés natives (Davis *et al.* 2000 ; Orinas 1986 ; Mack and D'Antonio 1998).

Les zones littorales sont celles qui hébergent le grand nombre d'espèces exotiques, elles sont donc très exposées à de futures invasions. Les écosystèmes dunaires côtiers sont hautement dynamiques, en particulier les habitats de plage sèche et de dune active, qui présentent de grandes superficie dépourvues

de végétation et qui sont soumis à de rudes conditions. C'est pourquoi ils sont susceptibles d'être envahis par des espèces exotiques de type primo-colonisateur, venant occuper les espaces ouverts.

Le cycle de vie des espèces envahissantes peut être soit court, annuel, et former en quelques années une importante banque de graines qui assure leur permanence et leur expansion (*Arctotheca calendula*, *Oenothera drummondii*), ou bien à croissance plus longue comme celle des herbacées pérennes qui constituent non seulement des banques de graines, mais qui, par le truchement de rhizomes et de stolons, assurent la survie effective et l'expansion des populations (*Carpobrotus edulis*).

Résultat du développement du tourisme soleil/plage des trente-quarante dernières années, la forte pression humaine est l'une des principales causes de l'introduction d'espèces exotiques dans les systèmes dunaires actifs (Van der Meulen and Salman, 1996). L'aménagement immobilier, la



Photo 3.5 *Oenothera drummondii*, espèce exotique d'origine américaine, invasive dans les dunes du Golfe de Cádiz.
© Juan Bautista Gallego

construction d'infrastructures à usage public et le flux élevé de personnes, en particulier en été, assurent l'entrée permanente de propagules d'espèces étrangères et dégradent certaines zones dunaires (piétinement, modification de la structure du sol et enrichissement en nutriments, etc.), où ces espèces peuvent s'installer et s'étendre.

La prolifération de zones paysagères établies sur les systèmes dunaires ou à proximité, avec des objectifs esthétiques et/ou de protection contre l'érosion marine est une autre conséquence de la pression touristique. Ces jardins peuvent être composés de plantes exotiques, dont certaines sont potentiellement envahissantes (Gallego Fernández *et al.*, 2006).

Le degré de présence d'espèces exotiques sur les dunes côtières dépend de l'intensité de la pression humaine. Le nombre et l'abondance de ces espèces introduites sont liés aux interventions de gestion réalisées dans le passé et actuellement. L'objectif des introductions était de contrôler l'érosion et stabiliser les dunes, et aussi d'améliorer

l'aspect paysager (en général, sur les plages et les systèmes dunaires urbains). Les espèces introduites sont aussi bien des plantes herbacées que ligneuses.

L'éradication d'espèces exotiques envahissantes des écosystèmes naturels en général, et des systèmes dunaires en particulier, est à prévoir dans toute action gestion, conservation et restauration des écosystèmes.

En raison de leur impact potentiel sur la biodiversité autochtone et sur les processus des écosystèmes, toute espèce exotique doit être combattue par un plan d'éradication soutenu dans le temps et dans l'espace.

Différentes organisations mènent des actions d'éradication de ces espèces. Toutefois, ces interventions ponctuelles, sans continuité dans le temps, sont très limitées dans l'espace, centrées sur une ou deux espèces exotiques (normalement *Carpobrotus edulis*), visent en majorité les espaces naturels protégés et ont donc un faible impact.



Photo 3.6 Tourisme dans la dune de Bolonia. Tarifa, Espagne. © Carla Danelutti

4 Usages et impacts

4.1 Introduction

Au cours de l'Histoire, les impacts subis par les côtes ont varié en intensité en fonction de facteurs sociaux et environnementaux. Les activités humaines ont généralement provoqué des changements écologiques et morphologiques de grande échelle. La destruction et la fragmentation des systèmes dunaires côtiers ainsi que celle des processus assurant leur formation et leur préservation ont conduit à la destruction d'un grand nombre d'habitats côtiers (plages, dunes, prairies humides) et à l'augmentation du nombre d'espèces menacées.

La vulnérabilité des écosystèmes côtiers face aux perturbations naturelles s'est accrue à cause de la pression anthropique (García Mora et al. 2001 ; Martínez et al. 2006). Ainsi, l'urbanisation croissante du littoral mais aussi la restauration artificielle de la côte (plages et promenades) ont provoqué la destruction de dunes côtières et l'altération de la dynamique sédimentaire littorale. Ces pressions conduisent, dans de nombreux

cas, à la disparition des plages, c'est à dire la disparition d'un élément de grande utilité pour l'homme, source d'opportunités de développement économique et d'emploi (Heinz III Center for Science, Economics and the Environment 2000).

4.2 Les impacts sur les systèmes dunaires

Nous continuerons en exposant les impacts environnementaux communs à tous les systèmes dunaires côtiers (Ranwell 1972, Ranwell y Boar 1986, Carter 1988) :

4.2.1 Extraction de sable

L'extraction de sable des dunes ou le dragage de la bande côtière contiguë, perturbe le bilan sédimentaire, réduit le développement des dunes.



Photo 4.1 a) et b) Extraction intensive de sables sur une dune. © Juan Bautista Gallego

Ces interventions favorisent l'érosion marine, la destruction de la végétation et la mobilisation des bancs de sables. L'extraction de sable des systèmes dunaires côtiers est pourtant interdite dans plusieurs pays. Par exemple, le protocole de Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC) de la Convention de Barcelone signé en 2008 par les pays du Maghreb central stipule (article 9) que l'extraction de sable est réglementée ou interdite si elle risque d'avoir des effets préjudiciables à l'équilibre des écosystèmes côtiers.

Les dragages ayant des répercussions sur les dunes côtières sont ceux qui sont réalisés à une certaine distance de la côte, près d'estuaires insérés dans des systèmes plage-dunes. Ces dragages exportent les matériaux sableux hors de la zone d'influence des vagues, ils ne sont alors plus disponibles pour les plages, provoquant la récession des plages et des systèmes dunaires.

4.2.2 Urbanisation

Au 20^{ème} siècle, la population humaine installée sur des zones côtières a connu une augmentation exponentielle, pour des raisons sociales et

économiques. En Espagne, 44% de la population habite les communes côtières qui représentent 7% du territoire. Si l'on ajoute les millions de touristes qui visitent la côte pendant la période estivale, le littoral espagnol est celui qui présente la densité de population la plus élevée de la planète.

Les hauts niveaux d'urbanisation et d'industrialisation font que les zones côtières méditerranéennes accueillent une des plus fortes densités de population au monde. Les pays au bord de la méditerranée comptent environ 400 millions d'habitants dont 135 millions vivent directement sur le littoral. L'exode vers les zones côtières, surtout au Sud et à l'Est de la Méditerranée, augmente la pression sur l'environnement côtier et sa biodiversité.

La pression subie par les systèmes dunaires est très corrélée à la pression urbaine sur les côtes de la Méditerranée. La forte demande pour occuper le territoire côtier a accentué la fragilité du littoral. L'urbanisation des systèmes dunaires entraîne leur destruction, et accentue la pression sur des zones adjacentes.



Photo 4.2 Destruction du système dunaire par l'urbanisation (Alicante Espagne). © Google Earth

4.2.3 Activités de loisirs

Les dunes sont des formations géomorphologiques côtières qui présentent un grand attrait pour les activités de loisirs. Le principal effet de la présence de l'homme sur les dunes est le piétinement intense subi par la végétation. C'est le cas par exemple d'un accès, ou un parking, qu'obligent à traverser la dune pour accéder à la plage, sans équipement adapté.

Le nettoyage mécanique des plages, réalisé de façon régulière sur les nombreuses plages de la méditerranée, contribue à la dégradation et à la destruction à la fois de leur végétation et des formes d'accumulation embryonnaires. De plus, le tamisage du sable supprime une partie des graines, des rhizomes et des nutriments apportés par la mer et le vent, ce qui réduit la possibilité de formation des avant-dunes.

D'autre part, le transit de véhicules sur la plage sèche augmente le tassement du sable, empêchant la germination des espèces végétales. On détruit ainsi les dunes embryonnaires et les fonctions qui leur sont

associées, notamment leur capacité à amortir l'énergie des vagues, ce qui accentue l'érosion marine.

Enfin ces nettoyages ont l'énorme inconvénient d'exporter du sable, augmentant le déficit sédimentaire qui est la cause majeure du recul des côtes.

Les promenades à cheval sont en forte augmentation sur notre littoral. Les parcours réguliers engendrent des sillons dénudés. L'absence de végétation fragmente la dune et la rend plus vulnérable à l'action du vent. Le vent crée des "couloirs" qu'il agrandi au fur et à mesure jusqu'à la disparition du cordon dunaire, ne laissant en place, dans le meilleur des cas, que des petites buttes résiduelles. Ces activités de loisirs modifient ainsi le relief de la dune et de la plage. Leur hétérogénéité morphologique diminue, le tassement du sol augmente, la végétation est altérée ou détruite, etc.

Enfin, nous ne devons point oublier la construction de terrains de golf. Cette activité détruit complètement l'écosystème, changeant la topographie et remplaçant la végétation



Photo 4.3 Fragmentation du système dunaire par la création de sentiers. © Google. Earth

psammophile typiquement dunaire, par une prairie qui demande un entretien permanent. Un autre impact négatif des terrains de golf est celui de l'exploitation des aquifères, car ces infrastructures nécessitent un fort arrosage et entraînent une importante consommation d'eau. Cette exploitation entraîne une baisse du niveau phréatique et l'infiltration d'eau salée, polluant les puits situés près de la côte.

4.2.4 Extraction d'eau de la nappe phréatique

L'extraction d'eau destinée aux usages domestique et industriel épuise, par intermittence, et parfois de manière définitive, la nappe phréatique sous-jacente, asséchant les zones humides propres aux systèmes dunaires ou à leur proximité. On peut citer l'exemple de l'assèchement des dunes péri-lagunaires du Parc National de Doñana (Serrano y Serrano 1996). L'extraction d'eau pour l'irrigation des cultures peut aussi provoquer des phénomènes d'intrusion d'eau salée.

4.2.5 Utilisation agricole

La culture directe sur les dunes a aussi un impact sur les systèmes dunaires côtiers, car elle détruit la végétation et modifie le relief, altère gravement les caractéristiques du sol, par les labours, et celles de la nappe phréatique sous-jacente suite à l'utilisation de fertilisants et de pesticides.

4.2.6 Exploitation pour l'élevage

Les dunes côtières peuvent être exploitées pour le pâturage du bétail. Le piétinement des animaux provoque l'érosion et le tassement du sol, altérant la végétation, ce qui réduit la capacité des plantes d'intercepter le sable.

Suite à la rareté des pâturages près de la côte, le pâturage des dunes est assez courant pour nourrir les troupeaux de chèvres, vaches, etc. Les conditions particulières de l'arrière-dune, notamment la proximité de la nappe phréatique, assurent un pâturage de bonne qualité.



Photo 4.4 Suppression de dunes en vue d'un usage agricole (Côte atlantique du Maroc). © Juan Bautista Gallego



Photo 4.5 Pâturage d'ovins sur les dunes (Isla Cristina, Huelva, Espagne). © Juan Bautista Gallego

Bien que le pâturage contrôlé contribue à l'augmentation de la diversité des espèces herbacées dans la zone d'arrière-dune, dans la dune proprement dite, l'activité des animaux a des répercussions graves qui augmentent la vulnérabilité de la dune.

4.2.7 Plantations forestières

Le boisement des systèmes dunaires côtiers actifs a joué un rôle stabilisateur. Traditionnellement, les systèmes dunaires ont été considérés comme des zones marginales présentant peu d'intérêt économique et social. Dans des nombreux cas ils étaient perçus comme une menace, car des zones aménagées, comme des villages, cultures, ou des installations ont été ensevelis par l'avancée des sables. Dans la plupart des cas, la mobilité des sables a été la conséquence d'un processus de déstabilisation des dunes provoqué par une intervention inadéquate de l'homme.

La fixation de champs dunaires actifs par des plantations forestières est une méthode utilisée

depuis le XIVe siècle en Grand Bretagne, le XVIIe au Japon, le XVIIIe en France et en Espagne, et s'est répandue ensuite à travers le monde.

En Espagne, le premier essai de fixation a été effectué sur le système dunaire de Doñana en 1737 avec des plantations de pin parasol, ensuite en 1850, et tout au long de la première moitié du XXe siècle (Granados et al. 1984, 1988). Pendant le XIXe siècle, le problème de la menace par les systèmes dunaires côtiers mobiles se pose dans de nombreuses zones côtières espagnoles, aussi bien atlantiques que méditerranéennes (García Novo y Marín Cabrera, 2005). Une situation qui obligea l'état à procéder à la fixation des dunes pendant les premières soixante-dix années du XXe siècle (Kitt y Tasara, 1946 ; Pipió i Gelabert, 1988). On utilisait principalement différentes espèces de pins (*Pinus pinea*, *P. pinaster*, *P. halepensis*, *P. radiata*), des arbustes comme le genêt blanc dans le Golf de Cádiz (*Retama monosperma*), l'oyat (*Ammophila arenaria*) et des plantes exotiques telles que différentes espèces des genres Eucalyptus et Acacia. Une autre espèce plantée mais avec peu de succès fut *Pinus canariensis*.



Photo 4.6 Fixation des dunes côtières par des boisements. © Juan Bautista Gallego

En général, les reboisements des systèmes dunaires sont perçus - à tort - comme des "forêts côtières", non seulement par la population, mais aussi, par les administrations nationales et régionales, des politiciens et quelques scientifiques. Une situation qui représente un obstacle important à la fois pour la restauration des écosystèmes dunaires côtiers par suppression des plantations existantes et pour la restauration des communautés et des processus géomorphologiques et écologiques caractéristiques de ces systèmes naturels.

Actuellement, la perception des systèmes dunaires actifs a changé, ils sont considérés comme un écosystème à part entière, on leur attribue des valeurs intrinsèques propres à leur état naturel et on les sait capables de générer des nombreux biens et services.

4.2.8 Autres impacts anthropiques

Bien que dans la plupart des cas elle passe inaperçue, une autre menace potentielle sur les cordons dunaires est la réduction de l'apport de sable par interruption physique du flux sédimentaire naturel. La présence de ces obstacles rigides peut avoir des répercussions sur leur environnement proche (cas des brise-lames) ou à une certaine distance de l'endroit où elles se trouvent (cas des barrages sur les fleuves). Nous analyserons les principales actions

anthropiques susceptibles de réduire l'apport de sable au système plage-dunes :

- **Construction d'ouvrages maritimes de protection et défense** (ports, digues, brise-lames, etc.). Conçus pour la prévention de l'érosion, ils modifient de façon substantielle la dynamique littorale et l'apport sédimentaire sur les plages et les systèmes dunaires. Les ouvrages transversaux - épis - bloquent le sédiment amont, et crée une pénurie à l'aval. Leur influence n'est visible que sur l'aspect de la dune, mais avec le temps, le système dunaire perd sa structure et se désintègre.
- **Construction de barrages sur les bassins hydrographiques.** Dans la plus part des cas, l'apport fluvial constitue la principale source actuelle de sédiments au littoral. Les fleuves peuvent transporter d'importantes quantités de sédiments, surtout, lors de la saison des crues. La diminution de la vitesse du cours d'un fleuve près de son embouchure, provoque le dépôt des particules transportées, puis, la sédimentation des particules en suspension. Les sédiments sont distribués, selon la dynamique littorale, tout au long de la côte, contribuant à l'équilibre sédimentaire des plages. La construction d'ouvrages, tels que des digues ou des barrages en amont des fleuves, interrompt le transport de sédiments jusqu'à leur embouchure, privant ainsi les plages d'une source importante de sédiments et perturbant leur équilibre sédimentaire.

5

Techniques de restauration

5.1 Introduction

La restauration des systèmes dunaires dégradés est obtenue par l'élimination des causes d'altérations et par l'utilisation des techniques de reconstruction topographique et de végétalisation avec des espèces autochtones. Les dunes côtières étant des systèmes très dynamiques, les objectifs de la restauration peuvent être atteints dans un délai, de quelques années.

Dans tout projet de restauration, il est essentiel de bien préciser les objectifs poursuivis, et il est souhaitable que les interventions permettent de rétablir la structure (composition d'espèces) et le fonctionnement (processus de sédimentation et écologique) qui assurent la vitalité du système.

Les projets de réhabilitation de dunes débutent par une étude détaillée de l'évolution géomorphologique du système dunaire et de son utilisation au cours des dernières décennies. Il est également important de déterminer son état actuel : écologique, géomorphologique et pression anthropique. Ceci permettra de concevoir les actions à venir, en tenant compte des capacités du milieu.



Photo 5.1 Système dunaire abîmé par la surfréquentation touristique. © Carlos Ley

Les techniques employées pour la régénération de systèmes dunaires dégradés, ou pour la construction de dunes dans les aires où elles étaient absentes, peuvent être classées dans deux grandes catégories selon l'envergure de l'intervention et son impact sur l'environnement : techniques de génie classique et techniques écologiques.

Techniques de génie classique : Elles prévoient la reconstruction de la topographie dunaire par apport de sable à l'aide de machines. La source de sable peut se trouver ou pas dans le système dunaire traité. Ce genre de techniques est mis en œuvre lorsque l'objectif de la reconstruction dunaire est la protection d'un élément de grande valeur économique, sociale, culturelle (par exemple, des sites archéologiques), voire naturelle, placé en front de mer. Généralement, ces des interventions réalisées pendant de courtes périodes (jours-semaines), dans des espaces limités et qui exigent un fort investissement financier. L'impact sur l'environnement est élevé.

Techniques écologiques : Il s'agit d'interventions qui, une fois éliminés ou réduits les facteurs qui ont provoqué la dégradation dunaire, mettent en place des systèmes d'«aide» à la reconstruction des dunes par des processus naturels. C'est une méthode relativement lente, dont les résultats sont atteints à moyen terme. Ce sont des actions peu coûteuses, dont l'investissement est très réduit par rapport aux résultats obtenus, qui, en général, sont positifs. Cependant, comme il s'agit de travaux dans lesquels c'est la nature elle-même qui œuvre (le vent transporte le sable, la végétation s'installe et se développe, etc.), les résultats ne s'apprécient pas juste à la fin de l'intervention, mais après un certain temps, selon plusieurs facteurs : climatologie, dynamique sédimentaire, efficacité de la protection, etc.

Les techniques de restauration dunaire abordées dans ce livre relèvent exclusivement des "techniques écologiques", quoique certaines interventions puissent être complétées par des techniques de génie classique.

Les deux techniques écologiques les plus utilisées en Europe sont la plantation de végétaux dunaires, et la mise en œuvre de systèmes pour capter le sable en transit : les rideaux brise-vent et les couvertures de branchages.

Les effets négatifs de la fréquentation humaine sont combattus par des systèmes de protection tels que les passerelles piétonnes d'accès aux plages, les clôtures et la suppression de la circulation routière. Lors des actions de protection et de restauration d'espaces littoraux, il est important d'informer les citoyens, pas toujours conscients des dégâts qu'ils produisent. La vulgarisation des actions réalisées amène à une compréhension et à une acceptation des travaux en cours, ce qui rend les citoyens coopératifs et améliore les résultats.

Les actions de restauration exigent un entretien très léger, mais continu, du moins pendant les premières années suivant leur réalisation. Ceci est nécessaire non seulement pour réparer les équipements de protection, comme les clôtures, les passerelles ou les panneaux, qui, pour des raisons naturelles ou liée à l'incivisme, subissent des dégâts, mais également pour corriger le processus de piégeage de sable et pour replanter les zones où la végétation ne s'est pas suffisamment installée, que ce soit à cause de la mobilité du substrat (enfouissement ou érosion), ou d'une mise en place incorrecte.

Dans les paragraphes suivants, ces techniques de restauration seront exposées en détail : reconstruction des dunes, végétalisation, systèmes de protection, communication et suivi des actions.

Il faut signaler que toutes ces actions doivent être réalisées après ou pendant l'élimination totale ou

la réduction des causes qui ont conduit à l'altération du système dunaire. C'est le seul moyen d'assurer le succès des actions réalisées et d'éviter le retour à la situation précédente de dégradation des dunes.

5.2 Reconstruction morphologique de la dune littorale

La reconstruction de la dune est réalisée dans des zones où le cordon dunaire a été totalement ou partiellement éliminé, ou est fragmenté par des couloirs d'érosion.

La construction de cordons dunaires dans des zones où il n'en existait pas auparavant est également envisageable. Ce peut être une action connexe à la réhabilitation d'une plage par rechargement, ou l'édification d'une dune de protection contre le risque de submersion.

Les situations dans lesquelles des actions de reconstruction dunaire sont réalisées communément sont les suivantes :

- Brèches dans le cordon dunaire
- Disparition de tronçons de cordon de dunes
- Disparition totale du cordon dunaire
- Construction de cordons dunaires de novo

Le cas le plus fréquent dans nos côtes, c'est la restauration de cordons fragmentés par une fréquentation excessive mal contrôlée.

Dans les brèches, l'accélération du vent augmente son potentiel érosif. La brèche s'élargit, et s'allonge, jusqu'à la rupture complète du cordon dunaire. La répétition de cette situation peut générer la disparition partielle ou totale du cordon dunaire, qui est souvent réduit à un ensemble de monticules épars, à topographie très irrégulière et végétation très endommagée.

Dans ces cas-là, la restauration de la dune commence par la reconstruction topographique du cordon, selon une morphologie aussi proche que possible de celle qui existait à l'origine ou, si elle n'existait pas auparavant, de celle des systèmes dunaires voisins. Le profil recherché est aussi aérodynamique que possible, afin d'éviter la formation de tourbillons.

- Élimination des causes d'altération
- Reconstruction dunaire
- Végétalisation
- Systèmes de protection du système dunaire
- Systèmes de communication sur les actions réalisées
- Suivi pendant les actions de restauration
- Suivi à moyen terme de la restauration
- Entretien pendant les années ultérieures

Tableau 5.1 Actions à prévoir dans les projets de restauration de systèmes dunaires côtiers.

© Juan Bautista Gallego



Photo 5.2 Brèches dans un cordon dunaire produites par le passage d'usagers. (Algeciras, Espagne). © Carlos Ley



Photo 5.3 Restes d'un cordon dunaire (buttes résiduelles). © Carlos Ley

Sur la côte aquitaine, en France, de nombreux reprofilages mécaniques ont été menés au cours des années 1960-1980, à la suite des dégâts importants de la période de guerre, et du manque d'entretien qui a suivi. Le but de ces «remodelages» était de redonner aux dunes un profil considéré comme «idéal» (plateau subhorizontal et glacis externe de pente 20%). Cet objectif était atteint par mise à blanc générale et des terrassements au bulldozer complétés par

pose de rideaux brise-vent. Une fois le profil atteint (au bout d'environ 3 ans), l'ensemble était couvert de branchages à plat et planté d'oyat.

Ce mode d'intervention a temporairement donné satisfaction, puis dans les années 1980, l'Office national des forêts a lancé un programme de recherche, en collaboration avec les géographes de l'université de Bordeaux (sous la direction du professeur Pierre Barrère), en vue d'orienter la gestion vers une meilleure prise en compte des processus globaux de fonctionnement du système plage/dune. Les inconvénients d'une pratique standard appliquée systématiquement ont été démontrés : traumatisme apporté à la végétation, perte d'une morphologie originale et surtout inadaptation de cette technique sur les côtes en retrait où l'érosion marine remet très vite en cause un profil standard basé sur une forme de résistance au vent. Cette pratique de reprofilage à grande échelle a été abandonnée, ce qui n'exclut pas des modelages ciblés et localisés. Elle est parfois inévitable à cause du manque de souplesse lié à une urbanisation trop proche du littoral.

La méthodologie actuelle la plus communément employée pour la reconstruction des cordons dunaires consiste à utiliser des systèmes passifs de piégeage de sable. Cette méthode imite la

TYPE DE RECONSTRUCTION	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Reconstruction à l'aide de machines	Rapidité	Coût plus élevé Morphologies moins naturelles Potentiellement nuisible à l'environnement
Reconstruction par systèmes de piégeage de sable	Coût inférieur Morphologies naturelles Non nuisible à l'environnement	Lenteur

Tableau 5.2 Avantages et inconvénients des divers types de reconstruction topographique. © Juan Bautista Gallego

fonction de la végétation pionnière dans la formation des dunes.

Cependant, lorsque le système dunaire est très dégradé ou que la topographie est très irrégulière on peut faire appel à des déplacements de terres à l'aide de machines. Ce mode d'action est bien adapté pour reconstruire des cordons dunaires arasés par des tempêtes exceptionnelles, ou pour fermer les grands couloirs de déflation. Dans ce dernier cas, il faudra travailler depuis la plage et éviter de pénétrer dans des zones végétalisées. La démarche consiste à remplir les couloirs de déflation avec du sable extrait des zones à proximité de la plage en utilisant des machines (retro-excavatrice, tapis transporteur, etc..) afin d'obtenir une morphologie uniforme.

5.2.1 Rideaux brise-vent

Les rideaux brise-vent sont des structures capables de provoquer le dépôt du sable transporté par le vent, en réduisant sa vitesse par la friction qu'ils exercent.

Ces systèmes sont utilisés pour 1) aider à remplir des creux ou des brèches dans les dunes, 2) créer des cordons nouveaux et 3)

créer des «cordons fusible» sur les fronts de mer à forts enjeux (cordon artificiel de haut de plage pour limiter l'érosion marine des tempêtes d'hiver).

L'emplacement sur le terrain des rideaux brise-vent dépend de l'objectif poursuivi et de la dynamique sédimentaire naturelle du système. Sur les tronçons côtiers stables ou en accrétion, on les pose sur ce qui correspondrait au cordon dunaire embryonnaire ou en position avancée. Par contre, sur les tronçons côtiers en érosion, on les pose à l'arrière.

Les rideaux brise-vent sont des palissades, constituées couramment de branches mortes de diverses espèces (osier, roseaux, buissons, etc.), ou de lattes de bois (ganivelles), ou d'autres matériaux (grillages acryliques). Les deux premiers types sont biodégradables et, dans le cas des branches mortes, ils augmentent la teneur en matière organique du sol pour la végétation qui s'installera ultérieurement. Leur fonction est de réduire la vitesse du vent par friction, ce qui diminue la capacité de transport, et provoque le dépôt de sable. Ces systèmes contrecarrent l'érosion éolienne et apportent une plus grande stabilité. Leur efficacité dépend de la porosité du du rideau brise-vent, de sa

BILAN SÉDIMENTAIRE	CONSTRUCTION DU CORDON DUNAIRE
Positif: accrétion	En zone frontale
Stable	Au même endroit que le cordon dunaire préexistant.
Négatif: érosion	En retrait vers l'intérieur, derrière le premier front dunaire.

Tableau 5.3 Modalités de reconstruction du cordon dunaire par rapport au bilan sédimentaire du secteur côtier. © Juan Bautista Gallego

hauteur, de l'orientation et de la vitesse du vent, des caractéristiques du sable, de la distance entre les rangées de rideaux, du nombre de rangées et des caractéristiques topographiques de la zone où ils sont placés. Seuls les rideaux brise-vent perméables sont efficaces.

L'utilisation de rideaux brise-vent est très répandue, en raison notamment de leur coût relativement bas, de la facilité de construction et de leur efficacité en matière de dépôts de sable.

On peut distinguer deux types de rideaux selon leur emplacement et les buts poursuivis : des systèmes de capteurs « structurants » pour les zones sans végétation et où le cordon dunaire est pratiquement absent, et des capteurs d'appoint pour stabiliser les plantations existantes et où le cordon dunaire garde encore sa structure.

Brise-vent structurants

Ce sont des lignes de rideaux brise-vent dont le rôle principal est la formation d'un cordon dunaire dans des zones où il a disparu ou dans le cas de création artificielle. Ils sont constitués d'un nombre variable de rangées de palissades parallèles, implantées verticalement sur le sol.

La distance entre les rangées de la zone centrale est plus faible, afin d'y obtenir une plus grande accumulation et d'avoir un profil semblable à celui des cordons dunaires naturels. En outre, les rangées doivent être placées perpendiculairement aux vents dominants, pour optimiser la sédimentation.

Brise-vent d'appoint

Les rideaux brise-vent d'appoint sont mis en place dans des zones où le cordon dunaire n'est pas complètement dégradé et a conservé un certain degré de végétalisation. Leur but principal est de protéger de l'érosion éolienne la couverture végétale naturelle, ainsi que les jeunes plantations. Ce genre de brise-vent peut également être utilisé dans les mêmes zones que les brise-vent structurants, mais dans une phase ultérieure, une fois que le sable a atteint une hauteur suffisante. En général, ils sont placés en rangées discontinues en quinconce, c'est-à-dire que l'espace vide entre deux rideaux coïncide avec le rideau de la rangée suivante. Le procédé d'installation et la disposition sur le terrain sont les mêmes que pour les rideaux structurants.



Photo 5.4 Rideaux brise-vent structurants. © Carlos Ley



Photo 5.5 Rideaux brise-vent d'appoint. © Carlos Ley

L'emplacement du rideau détermine le profil de la dune à construire. Lorsque les rideaux se situent parallèlement au pied de dune, le sable sec provenant de la plage se dépose directement, ce qui permet d'augmenter le volume de la dune embryonnaire. Si les rideaux se situent sur la crête de la dune, c'est la hauteur du cordon dunaire qui augmente. On rencontre aussi une disposition en réseau composé de rangées principales parallèles à la côte complétées par des rangées perpendiculaires. Dans la plupart des situations, un système de lignes parallèle est suffisant.

Avec des rideaux flexibles, comme ceux qui sont constitués de tiges d'osier, la sédimentation se produit sous le vent des

rangées de capteurs et sur une largeur huit fois supérieure à leur hauteur ; dès lors, la distance entre les rangées doit être d'environ huit mètres. Dans le cas des rideaux rigides ou peu perméables, la sédimentation de sable se produit aussi bien au vent que sous le vent et l'accumulation est beaucoup plus irrégulière qu'à l'aide des capteurs perméables.

En général, les rideaux flexibles et perméables produisent une accumulation plus homogène et une topographie beaucoup plus aérodynamique et stable que le résultat obtenu avec des systèmes rigides ou peu perméables. Par ailleurs, la végétation colonise beaucoup mieux les sables stabilisés avec des brise-vent flexibles. Cependant le choix du type de brise-vent va dépendre des objectifs et des conditions locales.

Ainsi par exemple, les rideaux brise-vent rigides sont utiles pour constituer des dépôts provisoires sur la plage sèche et pour éviter l'invasion de la mer lors de marées de vive-eau. Postérieurement, quand ces dispositifs sont enlevés, ces dépôts sont transportés par le vent vers la dune.

Brise-vent en osier

Les brise-vent en osier sont largement utilisés sur les côtes d'Espagne, en raison de leur coût relativement bas, de leur acquisition facile et de leur montage simple. Ils ont fait leurs preuves lors de nombreux travaux de restauration.



Photo 5.6 Effet des brise-vent flexibles. © Carlos Ley

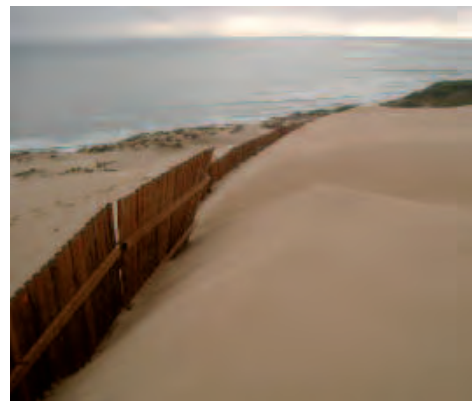


Photo 5.7 Effet de palissades imperméables. © Carlos Ley

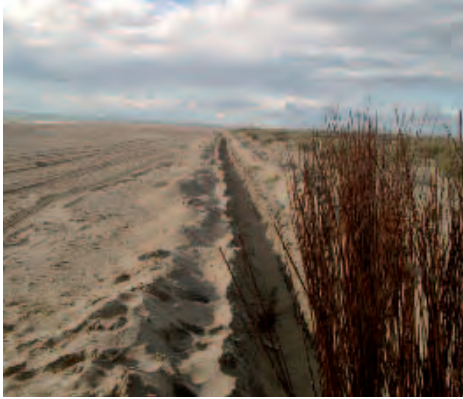


Photo 5.8 Installation des brise-vent en osier. Creusement d'un fossé et mise en place. © Carlos Ley

Ils sont composés de branches d'osier sec, plantées verticalement dans le sol, d'une longueur moyenne de 1,80 m, dont 0,60 m sont enfouis et 1,2 m restent au dessus du sol. Ils sont disposés en rangées parallèles avec une séparation entre eux de 8 mètres environ.

On creuse un fossé de 0,6 m de profondeur et d'une largeur de 0,4 à 0,6 m, selon la cohésion du sable, pour éviter que les éboulements latéraux du fossé ne le colmatent. Ce fossé peut être réalisé à l'aide de machines (trancheuse, retro-excavatrice, etc.) ou bien tout simplement d'une manière manuelle.

Les capteurs sont placés dans le fossé, avec une densité d'osier de 3 Kg/m. Le fossé est colmaté en maintenant les tiges d'osier en position verticale. Enfin, la zone colmatée est tassée.

Sur la côte méditerranéenne espagnole, on utilise souvent des brise-vent constitués de spartine bigarrée (*Spartina versicolor*), attachés par des tiges de Canne de Provence (*Arundo donax*). Il s'agit d'une matière que l'on peut récolter facilement dans des zones humides et dont la construction est artisanale, par éléments de 1 à 2 m de long. Leur hauteur est inférieure à 60 cm, dont 20 cm environ sont enfouis. Leur efficacité est bonne dans des milieux à faible transport de sable par le vent.

Ils sont mis en place selon une trame orthogonale, avec un espace entre lignes équivalent à 4 fois leur hauteur



Photo 5.9 Brise-vent en spartine bigarrée. © Carlos Ley

Leur perméabilité au vent est de 40 à 50 % et ils ont une hauteur variable de 50 à 80 cm. Au fil du temps, les palissades se couvrent de sable (2e-3e année), pourrissent (4e-5e année) et disparaissent, ce qui permet à la dune d'avoir un aspect complètement naturel à partir de la 6e-7e année.

Dans la zone sous le vent, les palissades mettent plus de temps à se dégrader puis à disparaître en raison d'une mobilité du sable plus réduite.

Une fois ensevelis, les capteurs de sable perdent leur fonction. Si l'on souhaite augmenter le volume de la dune ou bien de procéder à sa stabilisation par plantation, il faut implanter de nouvelles lignes de rideaux brise-vent.



Photo 5.10 Brise-vent en spartine installé. Le premier rang est une ganivelle de clôture. © Carlos Ley

CONSERVATION DES DUNES CÔTIÈRES

Les avantages des brise-vent en osier sont :

- Leur porosité et leur souplesse qui les rend plus efficaces que les rigides, car ceux-ci produisent des accrétions moins stables.
- Ils stabilisent la surface et activent la colonisation naturelle.
- Leur installation est plus simple.
- Leur coût est inférieur à celui des ganivelles.
- Ils sont biodégradables et augmentent la teneur en matière organique du sol.

Par contre :

- Ils ont un impact sur le paysage, du même type que celui des ganivelles.
- Ils sont moins résistants aux fortes intempéries (pluie et vent).
- Ils sont plus fragiles et moins résistants à terme que les brise-vent en bois, cependant ils sont faits pour être remplis, leur résistance à long terme n'est pas utile.

Ganivelles

Ce type de brise-vent est couramment employé en France, sur la côte atlantique et sur la côte

de Méditerranée. Les ganivelles sont utilisées pour des travaux d'entretien, et aussi pour de grandes opérations de reconstitution (principalement en Méditerranée).

Ce sont des clôtures perméables constituées de lattes de châtaignier reliées par du fil de fer torsadé. Elles sont très efficaces pour la protection en milieux naturels et pour le guidage du public, mais aussi pour la lutte contre l'érosion éolienne. Elles ont de multiples qualités : matériau local renouvelable, durabilité, biodégradabilité et bonne intégration paysagère.

On trouve sur le marché divers types de ganivelles (de châtaignier le plus souvent) : ganivelles en échelas triangulaires refendus, écorcé et époinché, ganivelles en lattes sciées... de différentes hauteurs (50 cm, 1m, 1,2 m...) et de perméabilité variable (40 à 70 %). L'expérience montre que les perméabilités de l'ordre de 60 à 70 % donnent de bons résultats.

En matière de hauteur optimale, de nombreuses expériences ont été réalisées avec des ganivelles de 1 m de hauteur. Elles donnent de



Photo 5.11 Pose de ganivelles basses en France, sur la côte d'Aquitaine, nord de la Gironde.
© ONF/JF Office National des Forêts/Jean Favennec



Photo 5.12 Pose de Ganivelles dans la partie arrière du cordon dunaire, en France sur la côte atlantique, La Coubre en Charente -Maritime. © ONF/JF Office National des Forêts/Jean Favennec

bons résultats dans les secteurs de très fort transit sableux, mais souvent elles présentent des dégradations avant d'être remplies de sable. C'est pourquoi il est préférable pour les opérations d'entretien d'utiliser des ganivelles plus basses qui présentent plusieurs avantages : transport et mise en place plus facile, adaptation plus fine des interventions, bonne résistance au vent et à la fréquentation, meilleure intégration paysagère...

Ces ganivelles basses de 50 cm de hauteur sont fixées directement sur des piquets de 1 m de hauteur espacés de 2 m.

C'est en zone frontale, dans les secteurs de côte qui connaissent une alternance entre phases d'érosion marine et phases de répit, que l'usage de brise-vents est le plus fréquent (photo 5.11).

Les brise-vents sont aussi utilisés hors de la zone frontale pour limiter l'étalement du sable en arrière dune, et/ou pour maintenir la continuité longitudinale du cordon (photo 5.12).

Sur la côte méditerranéenne française, de nombreuses opérations de réhabilitation de

cordons dunaire littoraux s'appuient sur la pose d'un maillage de ganivelles hautes (1,2 mètres). Ce réseau de brise-vent fonctionne aussi bien par vent de terre (mistral et tramontane), que par vent de mer.



Photo 5.13 Réhabilitation de dune en Petite Camargue sur la côte méditerranéenne en France. © Jean Favennec

5.2.2 Couvertures

Cette technique ancestrale, connue partout dans le monde, est très utilisée par L'Office national des forêts responsable de l'entretien d'une grande partie des dunes de la côte atlantique en France.

Les couvertures de branchages réduisent fortement la vitesse du vent au niveau du sol, ce qui modère -ou supprime- l'érosion éolienne. Dans les zones de transit sableux, elles provoquent une accumulation, ce qui permet de combler des zones déprimées pour reconstituer des profils aérodynamiques. Par ailleurs, cet apport de matière organique favorise la reprise et le développement des végétaux (nutriments et humidité)...

Matériaux : La plupart des débris et branchages végétaux sont efficaces pour freiner la vitesse du vent. Cependant, le souci de conserver au milieu un grand degré de naturalité réduit les possibilités. On doit exclure notamment les branchages verts susceptibles de bouturer, les branchages qui introduisent des espèces exogènes indésirables (Yucca par exemple...), les branchages trop grossiers et les souches dont l'action n'est pas optimale (points durs), et qui créent des nuisances paysagères. Les branchages les plus utilisés sont ceux dont on

dispose à proximité, dans les forêts à l'arrière de la dune littorale.

Les formes d'érosion à traiter par couvertures de branchages : Cette technique est efficace dans toutes les situations d'érosion. Les zones d'accumulation n'ont pas à être couvertes, leur dynamique sera contrôlée par le traitement amont des zones en érosion. Cependant on doit absolument limiter l'extension des couvertures, soit pour des raisons écologiques (rudéralisation, dégradations liées au transport...), soit pour des raisons paysagères, soit pour des raisons économiques.

Différents types de couvertures et méthodes de mise en œuvre :

La méthode de mise en place la plus courante est l'épandage en plein sur des zones de sable dénudé ou très peu végétalisées. Les modalités les plus fréquentes sont de trois types :

Les couvertures planes de branchages fins (espèces buissonnantes et arbustives) étalés manuellement

Les branchages les plus utilisés sont les rameaux de Genêt à balais (*Cytisus scoparius*), abondants en sous-bois, notamment dans les parcelles en régénération. Les rameaux sont



Photo 5.14 Etalement manuel d'une couverture plane de genêts, sur la côte aquitaine (Gironde) en France.
© ONF/JF Office National des Forêts/Jean Favennec



Photo 5.15 Réalisation d'une vaste couverture de genêts (avant plantation d'oyats) sur le chantier de réhabilitation des dunes du Cap-Ferret, terrain du Conservatoire du littoral, en Aquitaine.
© ONF/JF Office National des Forêts/Jean Favennec

coupés en forêt, puis transportés (en fagots ou en vrac) directement sur le chantier à couvrir par porteur forestier. L'épandage des rameaux se fait en quinconce, pied vers l'ouest, ramure d'une ligne recouvrant le pied de la ligne précédente, une pelletée de sable sur les ramures bien étalées au sol.

Dans le cas des couvertures avec transport en fagots de 10 kg, les densités peuvent varier de 6/8 tonnes/ha dans les amorces de déflation à 10/13 tonnes/ha (1000 à 1300 fagots de 10 kg par ha) sur un glacis externe très exposé et dénudé où ces végétaux assurent une stabilité temporaire de la surface avant plantation d'Oyat ou d'Agropyrum. La période optimale est automne/hiver, avant les tempêtes qui ensablent les couvertures.

Historiquement, ce type de couverture a connu un très grand développement, systématiquement mis en œuvre lors des plantations de versant externe et de plateau lors des remodelages mécaniques des années 1960-1980. Aujourd'hui, ces couvertures sont principalement utilisées en entretien, elles présentent une très bonne intégration paysagère.

Les couvertures de pins de dépressage étalés manuellement

C'est une technique intermédiaire entre les couvertures planes de genêt et les couvertures de branchages grossiers de Pin. Elle est très utilisée sur les dunes domaniales d'Aquitaine. Le matériau provient des opérations culturales dans les semis de Pin maritime. Ce sont des pins de dépressage, de 2 à 3 m de long. Le transport est effectué en vrac, par porteur forestier. Les pins sont étalés manuellement sur les zones de sable nu ou très peu végétalisées.

Les couvertures de branchages de ligneux épandus mécaniquement.

Ce type de couverture concerne principalement les houppiers de Pin maritime, provenant de rémanents de coupes de régénération dans la forêt dunaire. Ce sont des branchages grossiers à décomposition lente, ce qui constitue un avantage en matière de durabilité de l'action de lutte contre l'érosion éolienne. Des branchages

d'autres essences arborées (chêne, arbousier...) sont également utilisés, avec des résultats comparables. L'épandage est réalisé mécaniquement par des porteurs forestiers équipés de grues avec grappin, qui ont l'avantage d'effectuer transport et épandage sans rupture de charge. Des essais comparatifs menés ont montré qu'une couverture à 500 m³/ha est suffisante, ce qui réduit nettement le coût et les inconvénients de cette technique.



Photo 5.16 Couverture plane de pins sur zone de déflation, sur la côte aquitaine.
© ONF/JF Office National des Forêts/Jean Favennec



Photo 5.17 Couverture dense de branchages de pin, sur la côte aquitaine, en Gironde.
© ONF/JF Office National des Forêts/Jean Favennec

Le mulch

Le «mulch» est un type de recouvrement protecteur qui s'étend sur la superficie, maintient mieux l'humidité, régule la température, réduit l'érosion éolienne et améliore les caractéristiques nutritionnelles du substrat.

Il existe plusieurs types de mulchs, organiques et inorganiques, utilisés très souvent dans le jardinage traditionnel. Dans les cas de restauration de systèmes dunaires, leur utilisation est peu fréquente, entre autre parce qu'ils sont plus chers, modifient les caractéristiques du substrat sableux et limitent la capacité de colonisation des espèces naturelles. Par conséquent, leur utilisation est restreinte à des zones très réduites sans végétation naturelle comme, par exemple, les plages urbaines ayant un problème d'érosion qui empêche la régénération naturelle et l'établissement des plantations.

5.3 Végétalisation

Une fois le cordon dunaire stabilisé, pour atteindre un équilibre dynamique avec le vent il est fixé par plantation d'espèces dunaires qui, à l'état naturel, assurent la formation et la stabilisation des dunes. L'objectif est de rétablir la couverture végétale là où elle avait disparu. Cette perte de la couverture végétale est une des causes de déstabilisation du cordon dunaire et de sa remobilisation vers l'intérieur.

La dune côtière est un système ouvert dans lequel arrivent les propagules provenant de dunes voisines. Mais cette colonisation naturelle des dunes reconstruites est un processus lent. Les dunes restaurées s'érodent avant que la végétation ne s'installe spontanément et qu'elle puisse remplir la fonction de stabilisation. Par conséquent, la végétalisation doit être faite de manière artificielle en plantant des espèces dunaires.

5.3.1 Le choix des espèces

La biodiversité des cordons dunaires côtiers est relativement faible. García Mora (2000) a enregistré lors d'un échantillonnage sur 55

parcelles de 250 m² tout au long de 300 km en bordure du Golfe de Cadix un total de 55 espèces vasculaires appartenant à 49 genres et à 22 familles. La richesse spécifique s'y est avérée très hétérogène, allant de 3 à 25 espèces par parcelle.

Même si le but de la restauration écologique est de rendre à un écosystème dégradé les éléments nécessaires à un équilibre dynamique semi naturel, la réintroduction de toutes les espèces potentielles n'est pas faisable pour des raisons à la fois techniques et économiques. Il s'avère donc nécessaire de choisir un nombre d'espèces à réintroduire limité. Si toutes les espèces jouent un rôle au sein de cet équilibre dynamique théorique, certaines espèces clés remplissent une fonction edificatrice essentielle, tandis que pour d'autres, ce rôle constructeur est bien plus modeste.

Les espèces qui jouent un rôle plus marquant sur les dunes côtières actives sont celles qui favorisent une accumulation et une stabilisation adéquate du sable et celles qui permettent le maintien d'un équilibre dynamique. Sur les côtes européennes, deux espèces sont particulièrement intéressantes de ce point de vue : le chiendent des sables (*Elymus farctus*) et l'oyat (*Ammophila arenaria*), et considérées comme "structurantes" (García Mora, 2000) ou constructrices de dunes (Ranwell et Boar 1986). La première est caractéristique des dunes embryonnaires et la deuxième du premier cordon dunaire. Les deux espèces sont des Graminées (Poacées) pérennes ayant un système racinaire très développé, adapté aux conditions du milieu côtier, capables de se disséminer par le vent et par l'eau de mer et résistantes à l'enfouissement dans le sable.

Ces espèces sont les plus utilisées dans les opérations de végétalisation des cordons dunaires et celles que l'on cultive le plus souvent pour cet usage. Les deux espèces, néanmoins, ne peuvent être introduites que dans les zones où l'apport de sable est régulier, faute de quoi elles ne pourraient s'installer ni se développer (Van der Putten et Peters, 1995). L'oyat, quant à lui, ne pousse pas bien dans des zones où l'apport de sable est inférieur à 30 cm/an.

L'oyat est l'herbacée la plus utilisée pour stabiliser le sable dans les régions à climat doux (Hobbs et al, 1983 ; van der Laan et al. 1997). Il



Photo 5.18 Plantation d'oyat. Outil pour l'ouverture des trous. © Carlos Ley

est planté dans plusieurs pays européens, tels que le Danemark, depuis le Moyen Âge. Parmi les autres espèces utilisées sur les côtes nous pouvons citer *Ammocalamagrostis baltica* (un hybride entre *Ammophila arenaria* et *Calamagrostis epigejos*) aux Pays-Bas, en Allemagne et en Scandinavie (Nordstrom et Arens, 1998). Dans les zones atlantiques tièdes de l'Amérique du Nord on utilise *Ammophila breviligulata* et *Uniola paniculata* (Knutson, 1978 ; Nordstrom et Arens, 1998). En Australie, l'usage d'une autre plante de la même famille, *Spinifex longifolius*, est fréquent pour stabiliser des dépôts sableux sur les côtes.

Puisque le cordon dunaire actif est un système ouvert et que la plupart des autres herbacées (constituant à peu près 5% de la couverture, García Mora 2000) présentent des mécanismes de dispersion adaptés à ce système, il est inutile de les planter car elles arriveront spontanément. Il est toutefois souhaitable d'augmenter la biodiversité du système en introduisant d'autres espèces lorsque c'est techniquement et économiquement possible. Des espèces telles que *Eryngium maritimum*, *Helichrysum*

stoechas, *Pancratium maritimum*, *Otanthus maritimus* et *Euphorbia paralias* notamment sont utilisées en complément dans les restaurations côtières espagnoles. De bons résultats ont été obtenus lors d'essais réalisés sur les dunes méditerranéennes et sur celles du Golfe de Cadix avec des espèces telles que *Cakile maritima*, *Calystegia soldanella*, *Crucianella maritima*, *Lotus creticus*, *Malcolmia littorea*, *Medicago marina*, etc.

Une fois qu'un degré de stabilisation suffisant est atteint grâce aux espèces édifcatrices, la colonisation par d'autres espèces dunaires intervient assez rapidement (van der Laan et al., 1997). Ces réintroductions végétales doivent s'appuyer sur des études préalables de la végétation potentielles de chaque zone.

Les plantations traditionnelles d'oyat étaient faites à partir de boutures. Des semis direct ont aussi été pratiqués (van der Putten 1990, van der Putten et Kloosterman, 1991), ce procédé requérant toutefois une certaine stabilité du sable et la présence de fragments de rhizomes (van der Putten, 1990). Toutes ces méthodes



Photo 5.19 Plantation d'oyat. Mise en place des plants. © Carlos Ley

n'ont pas la même efficacité, les semis étant plus aléatoire, notamment à cause de la sécheresse, l'enfouissement ou l'érosion par le vent.

Le prélèvement de bouture par éclaircie des touffes en place n'est pas conseillée en zone méditerranéenne, car la densité des plantes y est comparativement faible (80% de couverture d'oyat en Europe centrale contre un moyenne de 40-50% dans le Golfe de Cadix) ce qui exigerait de trop grandes zones de prélèvement. D'autre part, la production de plants dunaires en pépinière à partir de semences est plus abondante et plus rentable.

Une fois que les plants obtenus en pépinière ont atteint la taille souhaitée, normalement 1 à 2 ans après le semis, ils sont plantés à la main dans un trou de 25 cm de profondeur environ. La plante devra être enterrée environ 10 cm de plus que dans son lieu de provenance.

Les semences utilisées en pépinière pour la végétalisation d'une zone doivent provenir de la même aire géographique, pour éviter une homogénéisation génétique de l'espèce.



Photo 5.20 Plantation d'oyat après un an. © Carlos Ley



Photo 5.21 Vue de la même plantation au bout de deux ans.
© Carlos Ley

5.3.2 Conception de la plantation

Dans la conception de la plantation il faut tenir compte de la distribution naturelle de ces espèces sur des bandes parallèles à la côte, avant-dunes, dunes blanches, dunes grises... L'observation de la distribution des végétaux dans les zones situées à proximité est souvent un élément essentiel pour établir le lieu exact de plantation.

Les plantes doivent être mises en place dans des zones de transit sableux. Le substrat doit toujours être constitué de sable éolien propre, sans matériaux fins ni matière organique.

En ce qui concerne l'organisation spatiale des plantations, en Europe centrale et du Nord, c'est la plantation régulière dense qui a été privilégiée, en lien avec un objectif de fixation. De plus, le climat est beaucoup plus humide dans ces zones, ce qui permet une plus grande densité de plantation.

En France, sur la côte atlantique, le dispositif le plus fréquent est la plantation en quinconces, à 80 cm x 80 cm.

La densité doit être établie en fonction des densités observées localement et de l'objectif poursuivi. Ainsi, au Nord de l'Espagne la densité naturelle se situe autour de 75% et au Golfe de Cadix à 45% environ.

5.3.3 La saison de plantation

Le moment le mieux adapté pour planter dépend de la situation géographique. En général, les plantations sont réalisées en automne ou en hiver. Si la plantation est trop tardive le développement du nouveau système racinaire risque de ne pas être assez développé pour résister aux températures extrêmes de l'été.

Sur les côtes méditerranéennes, la période optimale de plantation s'étale de la mi-novembre à la fin du mois de février. Ces dates peuvent varier, selon les conditions climatiques de l'époque. En cas d'automne précoce et humide, la plantation peut être avancée, mais lors des périodes sèches elle doit être reportée.

Au moment de la plantation, les heures de plus haute luminosité du jour et les vents forts doivent être évités. Les meilleures conditions climatiques sont un ciel couvert avec de l'humidité ambiante et en surface du sable, ce qui rend l'ouverture des trous de plantation beaucoup plus facile car les éboulements des parois du trou sont moins importants.

5.3.4 Les soins ultérieurs à la plantation

5.3.4.1 La protection

La végétation dunaire est très sensible à l'impact du piétinement du fait de la faible cohésion du substrat sableux. Les racines de l'oyat sont très fragiles, il faut donc protéger les plantations contre cette menace.

Étant donné que les systèmes dunaires dégradés ont subi une pression touristique excessive, les projets de restauration doivent comporter des systèmes de protection qui seront présentés plus loin.

5.3.4.2 L'irrigation

Si les plantations sont réalisées au moment optimal, l'irrigation n'est pas nécessaire. Toutefois, dans les cas où l'on souhaite consolider plus rapidement les plantations lors d'opérations tardives, l'irrigation accélère l'enracinement et le développement de la végétation.

Le substrat dunaire est très perméable, la quantité d'eau à fournir doit permettre d'atteindre les racines, mais sans percoler vers des couches plus profondes. D'autre part, en raison des infrastructures nécessaires, l'irrigation de vastes zones est exclue, elle sera donc limitée à des espaces réduits requérant des soins particuliers. Il est conseillé de réaliser des arrosages plus fréquents et moins abondants. L'irrigation par aspersion est le système le plus efficace sur les dunes.

5.3.4.3 Les engrais

Même si en général on considère qu'il n'y a pas besoin de fertiliser les plantations de végétation dunaire, dans certains cas cela peut s'avérer utile pour aider le développement de la végétation dans les zones qui ont besoin d'être rapidement stabilisées. De plus, tant l'oyat que le chiendent des sables réagissent très bien à la fertilisation.

Toutefois, il existe deux contraintes importantes lorsqu'il s'agit de fertiliser les plantations :

Pour pouvoir absorber l'engrais, la plante doit avoir suffisamment développé son système racinaire, il ne faut donc pas fertiliser avant un an.

Vu que le substrat sableux est très perméable, les mois des pluies donnent lieu à un lessivage et à une perte d'engrais vers le sous-sol. Pour résoudre ce problème, on fait appel à des engrais à libération lente.

L'élément le plus important pour nourrir la végétation dunaire, et plus particulièrement les graminées, est l'azote, qui constitue un facteur de croissance pour ces plantes.

Le phosphore peut également jouer un rôle nutritionnel important dans le cas de sables qui en sont peu pourvu, comme les sables siliceux.

Quant au potassium, en général, il est suffisamment abondant dans les substrats sableux côtiers en raison des apports provenant de la mer.

Il est donc conseillé d'utiliser des engrais à libération lente ayant un pourcentage d'azote élevé.

Parmi les plus utiles pour les zones dunaires on peut citer "Osmocote pro 18-9-10 + micro-

éléments" dont la période de libération peut aller jusqu'à 14 mois. L'épandage doit être réalisé au début du printemps, un an après la plantation.

Les doses conseillées sont légèrement inférieures à celles indiquées pour les sols normaux (non sableux) et oscillent entre 500 et 1.000 kg à l'hectare.

Les engrais classiques (à libération rapide) doivent être appliqués en plusieurs doses, en évitant les saisons des pluies, idéalement de trois à quatre fois par an, de préférence entre le début du printemps et la fin de l'automne.

5.4 Élimination de la végétation envahissante

L'élimination de la végétation envahissante constitue un point clé en ce qui concerne la restauration des écosystèmes dunaires côtiers. Cette végétation doit être totalement éradiquée car, si des restes ou de semences persistent, elle peut à nouveau se développer, ce qui rendrait inutiles tous les efforts réalisés.

Les campagnes d'élimination doivent se prolonger dans le temps et il est conseillé, après la première opération, de réaliser des campagnes annuelles ou biannuelles pendant une période minimum de cinq ans pour garantir l'éradication totale de la végétation et des semences.

La végétation envahissante peut être éliminée par des méthodes physiques telles que l'arrachage direct, ou par l'application d'un herbicide. L'arrachage ne s'avère efficace que pour des superficies assez petites pour garantir l'élimination totale de la plante. Si les herbicides sont appliqués correctement, leur utilisation est conseillée pour les systèmes dunaires. Les herbicides sont moins coûteux et plus efficaces puisqu'ils se diffusent à travers toute la plante en évitant ainsi l'apparition de repousses. En outre, les méthodes d'élimination physique peuvent augmenter l'érosion des dunes.

Les herbicides les plus utilisés pour éliminer la végétation envahissante sont ceux qui contiennent «glyphosate» comme substance active car, outre leur grande efficacité parmi les herbicides qui ne contiennent pas d'hormones,

ils présentent un taux de toxicité inférieur tant pour l'homme que pour la faune terrestre et aquatique. De plus, ils ne sont pas corrosifs ou inflammables. Cependant, l'usage d'herbicides est très controversé, toute autre alternative est à prendre en compte. Une législation en restreint fortement l'usage.

Dans certains cas l'invasion est telle que la seule solution est de détruire la dune pour la construire à nouveau. C'est le cas des colonisations totales par *Carpobrotus*.

Pour une efficacité maximale, l'herbicide doit être appliqué au printemps lorsque la plante commence son activité (de la mi-février jusqu'à la mi-mai sur les côtes de l'Andalousie, et de mars à juin sur les côtes cantabriques). L'application se réalise par micro aspersion en veillant toujours à badigeonner toute la plante et à épargner la végétation autochtone. La dose recommandée est de 160 ml de substance active pour une superficie de 100 m².

En tout cas, il faut à tout prix éviter la plantation d'espèces exogènes dans les systèmes dunaire.

5.5 Systèmes de protection

Le piétinement des dunes par les usagers de la plage est l'une des principales causes de la dégradation de la couverture végétale. L'affluence massive, surtout en été dans les zones côtières, entraîne la perte de végétation notamment aux alentours des parkings, des buvettes, etc.

Éliminer l'affluence de visiteurs dans la zone où l'action est menée est essentiel pour la réussite de la restauration. Il faut pour cela réaliser un certain nombre de travaux visant à protéger le cordon dunaire tels que la construction de clôtures ou de passerelles, l'aménagement des accès et l'installation de panneaux informatifs.

5.5.1 Les clôtures

La mise en place d'une clôture est nécessaire pour protéger les zones plantées. Il faut aussi réduire la pression humaine sur les zones non plantées.

Il existe de nombreux types de clôture de protection pour les cordons dunaires, selon le niveau de pression et l'esthétique désirée. Les clôtures efficaces sont celles qui réduisent les passages d'au moins 90 %.

Clôtures en bois et grillage métallique

Clôture de style rustique faite de piquets en bois traité espacés de 2 m scellés dans le sol et reliés par un grillage métallique. On la dispose en périphérie de la zone d'action.

Les matériaux sont constitués par des piquets en bois de 2,5 m de hauteur et de 10 cm de diamètre enfouis à une profondeur de 1 m maximum. La hauteur finale est de 1,5 m.

Le grillage est métallique en fil de fer galvanisé de 1,5 m de hauteur, accroché aux piquets verticaux au moyen d'agrafes métalliques tous les 30cm.



Photo 5.22 Clôture en bois et grillage métallique. © Carlos Ley



Photo 5.23 Clôture en bois. © Carlos Ley

Clôtures en bois ou plastique

Elles sont de style rustique de plusieurs types. Les plus utilisées sont composées de piquets en bois traité espacés de 2 m et reliés par des rondins en bois placés en diagonale et des barres d'appui en bois.

Les matériaux utilisés sont des piquets en bois de 10 cm de diamètre et de 1 m de hauteur libre, scellés à une profondeur de 1 m.

Les poteaux en plastique sont moins sensibles au milieu salin, aux champignons, aux bactéries et aux changements de température ; ils ne se fendent pas, ne se crevassent pas, sont faciles à nettoyer et ne se biodégradent pas.

Clôture en bois et corde

Style rural, composées de piquets en bois traité séparés 2 m les uns des autres et reliés par une ou plusieurs cordes, disposées autour du périmètre de la zone d'action. La corde peut être attachée à chaque piquet ou les traverser moyennant une perforation.

Les matériaux normalement utilisés sont des piquets en bois ou plastique de 10 cm de diamètre scellés à une profondeur de 1 m maximum. Hauteur finale de 1 m par rapport au niveau du terrain.

Dans les zones les plus fréquentées, pour éviter les conflits d'usage avec les baigneurs, il est vivement conseillé de ne pas clôturer une zone



Photo 5.24 Clôture en bois et corde. © Carlos Ley

trop étendue vers la plage, ainsi que d'aménager des chemins d'accès.

Le choix de la zone mise en protection est une des clés de la réussite d'un projet de restauration de dune. C'est dans la zone du début de formation des dunes, que l'effort doit être porté, c'est-à-dire du côté de la mer, en intégrant la plage sèche et les avant-dunes.

L'enfouissement et le déchaussement des clôtures constituent un problème très fréquent, en particulier dans des zones plus instables (en raison de la proximité de la mer ou de l'instabilité du substrat due au vent). Il est essentiel de prendre en compte ce problème dans les plans d'entretien car sinon le système perdrait son efficacité.

La distance entre la clôture et le cordon dunaire varie également selon l'équilibre sédimentaire du système. Dans des zones d'accrétion, pour prévoir un déplacement de la dune vers la mer, la distance doit être supérieure. Alors que, dans des zones en érosion, la distance peut être plus réduite et adaptée aux problèmes que la houle pourrait causer.

Souvent, même si les cordons dunaires ne présentent pas un bilan sédimentaire négatif, ils sont soumis à des changements à petite échelle provoqués par l'action de la houle et qui donnent lieu à une alternance de tendances érosives et progradantes. Dans les zones où la houle a récemment découpé la base du cordon, il est conseillé de prévoir le réajustement du profil

dunaire en s'éloignant de la base de la dune, même si cette opération augmente le risque de détérioration sous l'effet direct de la houle.

en bois montée sur des pilotis créant un espace suffisant entre la passerelle et la dune pour permettre que la végétation pousse et que le vent transporte le sable.

5.5.2 Passerelles

Pour éviter le piétinement, il est recommandé d'installer des passerelles transversales aux cordons dunaires. Normalement, des cordons dunaires continus et végétalisés séparent la plage et les arrières-dunes. C'est pourquoi des sentiers «sauvages» de traversée se développent dans les secteurs très fréquentés. Le vent érode ces chemins et transporte le sable vers l'intérieur en y créant des talus instables.

Ces talus s'agrandissent progressivement par l'action du vent et du piétinement jusqu'à fragmenter le cordon dunaire et le réduire à des buttes résiduelles. Si le processus d'érosion continue, ces monticules finissent par disparaître.

Le système le plus recommandé pour éviter ces dégradations consiste à installer une passerelle

5.5.2.1 Dimensions

La dimension des passerelles dépend de plusieurs facteurs : le caractère de la zone (plage urbaine ou rurale), le niveau d'urbanisation, les valeurs paysagères ou naturelles, l'affluence de visiteurs, les besoins de protection du système dunaire, etc.

En général, comme les systèmes dunaires ont disparu des zones urbaines, ceux qui persistent se situent dans des zones plus ou moins naturelles de sorte que l'affluence de public n'y est pas aussi massive que sur les plages très touristiques.

Alors, la largeur de la passerelle peut être de 1,5 à 2,5 m, distance nécessaire pour que deux personnes avec poussette puissent se croiser.



Photo 5.25 Passerelle d'accès à la plage. © Carlos Ley

5.5.2.2 Tracé

L'objectif des passerelles est d'éviter ou de réduire l'effet négatif sur la végétation dunaire du piétinement des personnes ainsi que du passage des animaux, notamment des chevaux.

Par ailleurs les dispositifs qui permettent une traversée confortable des dunes sont toujours bien accueillis. Par conséquent, la conception du tracé doit tenir compte non seulement de la protection de la dune mais aussi de son utilité pour les usagers.

Les passerelles de protection conduisent les usagers normalement de l'intérieur vers la plage en traversant le système dunaire et, en conséquence, elles doivent parcourir toute la largeur de la dune.

La construction doit se faire au-dessus du terrain afin de réduire l'effet négatif des structures sur la dynamique de transport éolien, et de permettre le développement d'une couverture végétale. Il est recommandé d'installer la passerelle à une hauteur allant de un à deux mètres maximum car une hauteur supérieure entraînerait des problèmes techniques et d'impact paysager.

Faire traverser le cordon dunaire par un couloir de déflation est une erreur assez fréquente dans les tracés des passerelles. Très souvent, les chemins déjà existants sont utilisés pour minimiser l'impact sur la végétation, mais on a tendance à oublier que ces chemins d'accès créent des couloirs de déflation, surtout dans la zone des avant-dunes. Dans cette partie avant de la dune, le cordon dunaire doit être traversé en suivant un profil de hauteur moyenne, ce qui permettra de corriger par ailleurs ce couloir d'érosion.

Les types de passerelles les plus utilisées sont :

Passerelle plate en bois sans main courante

Placées au-dessus du cordon dunaire avec un tracé légèrement sinueux, elles sont composées de grosses planches en bois traité sur des liteaux du même matériel. Ces passerelles peuvent être installées directement sur le sable ou au-dessus du sol grâce à des pilotis enfouis dans le sable.

Parfois, dans la dernière partie située sur la plage, des passerelles enroulables spéciales sont installées directement sur le sable et retirées après la saison de baignade. Ce type de passerelle est fait en bois ou en plastique recyclé, et relié par des câbles.

Passerelles plates en bois avec main courante

Ces passerelles pourvues d'une main courante de chaque côté. En fonction de la topographie de la zone, des rampes ou des escaliers sont installées pour y accéder. La construction d'un belvédère en bois ou d'un endroit de repos couvert d'un toit du même matériel est, elle aussi, fréquente.

Lorsque la topographie dunaire ne permet pas d'installer une passerelle inclinée car la pente est très prononcée, il est fréquent d'inclure des escaliers pourvus toujours d'une main courante de chaque côté.

Passerelles adaptées aux personnes handicapées

Ces passerelles doivent respecter les critères suivants :

- Une pente inférieure à 8% et dont la longueur ne dépasse pas les 10 m sans palier intermédiaire.
- Les escaliers sont remplacés par des rampes dont la directrice sera droite ou légèrement courbe et le rayon supérieur ou égal à 50 m.
- Largeur libre pour les rampes de 1,20 m. Dans des zones d'accès aux rampes ainsi que dans les paliers intermédiaires, un cercle dégagé de 1,50 m de diamètre pourra être inclus.
- Elles seront pourvues d'une main courante double, de chaque côté, composée de préférence d'un rondin circulaire en bois de 5 cm de diamètre et placée à une hauteur de 70cm.

5.5.3 Panneaux informatifs et systèmes de communication

L'attitude des citoyens face aux travaux de restauration est capitale car, si les usagers ne les comprennent pas ou ne les acceptent pas, le



Photo 5.26 Panneau informatif. © Carlos Ley

manque de soins et le vandalisme peuvent faire échouer ces actions. Par conséquent, dans ce genre de projet, l'information des usagers à propos des caractéristiques et de la problématique de l'écosystème dunaire, ainsi que des investissements réalisés pour le restaurer, est fondamentale. L'action est portée à la connaissance des citoyens afin d'obtenir leur collaboration pour prendre soin des travaux.

5.6 Suivi des travaux des restauration

Contrairement à ce qui se passe avec la plupart des travaux de construction, les effets des travaux de restauration dunaire ne se manifestent pas immédiatement. Il faut attendre un certain temps pour que les capteurs agissent, que la végétation s'installe et que les éléments naturels s'auto-régèrent grâce aux systèmes de protection mis en place.

Par ailleurs les résultats ne sont pas totalement prévisibles, car l'effet des travaux dépend de

plusieurs facteurs tels que la grande diversité de systèmes dunaires, le climat, les caractéristiques de la dynamique sédimentaire et éolienne, etc.

L'utilisation de systèmes passifs tels que les rideaux brise-vent capteurs de sable produit une réponse variable selon les écosystèmes dunaires restaurés, qui varie en fonction des vents ainsi que d'autres facteurs comme l'humidité du sable où la superficie de plage sèche qui peut être érodée.

De plus, l'utilisation de végétation, et la poursuite de l'objectif même de la restauration, à savoir, aider le système à régénérer les processus physiques et écologiques, impliquent une interaction intense avec les variables physiques qui produit des réponses différentes selon les situations.

Ces particularités rendent nécessaire une approche souple et pragmatique des modes de restauration dunaires. Pour cela, il est utile de faire un suivi des travaux dès le début ou même avant, c'est-à-dire lors de l'étude de l'état du système dunaire réalisée, et jusque plusieurs années après l'achèvement des travaux.

5.6.1 Le suivi dans la phase pré-opérationnelle

La fonction principale du suivi dans cette phase est d'établir un processus garantissant la mise en œuvre correcte et le respect des mesures décrites dans le projet qui sera adapté à la situation précise de la zone à restaurer.

Le suivi en phase pré-opérationnelle comprend l'étude du terrain pour vérifier son état et les éventuels changements qu'il aurait pu subir, ainsi qu'une révision des mesures projetées visant à évaluer leur utilité et leur opportunité. Compte tenu du changement permanent des conditions climatiques et administratives des travaux de restauration écologique, il est conseillé de revoir le projet et d'optimiser le calendrier.

En général, les points les plus importants des travaux de restauration sont :

L'effet des capteurs de sable

En ce qui concerne la plupart de la côte espagnole, les capteurs doivent être installés au début de l'automne, avant les tempêtes d'équinoxe, de manière à accumuler le sable pour la saison des plantations.

Les plantations

La période appropriée pour planter s'étend de mi-octobre à mi-mars, en excluant l'intervalle le plus froid, entre mi-décembre et mi-février. Cela implique qu'il y a trois mois utiles pour établir des plantations, deux en automne et un à la fin de l'hiver.

Les clôtures

Les clôtures de protection doivent être installées au moment des plantations pour les préserver de l'afflux massif de visiteurs.

5.6.2 Le suivi pendant les travaux

L'objectif du suivi ou du contrôle durant la phase des travaux est d'aider à la mise en œuvre correcte des mesures établies dans le projet, ainsi que de suggérer des changements éventuels surtout en ce qui concerne les activités ayant un impact sur les plantations d'espèces végétales (modification des mesures, de la conception, etc.).

En conséquence, en vue de garantir le respect du suivi et d'établir un contrôle de qualité, une surveillance environnementale devra être mise en œuvre sur le chantier. Outre cette surveillance, il faudra évaluer l'avancement des travaux et maintenir un contact régulier avec l'entrepreneur et le directeur des travaux.

Le suivi dans cette phase concerne toutes les unités de travail et consiste à visiter régulièrement la zone pour évaluer les activités réalisées ainsi que pour planifier de nouvelles initiatives. En outre, le suivi inclut une assistance permanente pour les aspects liés à l'optimisation des travaux et à la mise en œuvre du projet de la manière la plus efficace. Cette assistance concerne également d'autres aspects comme le lieu d'approvisionnement en matériaux, la localisation des machines, et le règlement de problèmes ou des situations nouvelles que le projet n'avait pas prévus.

5.6.3 Le suivi après les travaux

Le suivi dans la phase ultérieure à la réalisation des travaux de restauration des systèmes dunaires est souvent une tâche sous-estimée. Pourtant, il est fondamental pour comprendre les processus et améliorer les techniques car il permet une approche objective et critique des buts du projet ainsi que des résultats obtenus.

Les aspects les plus importants de ce suivi sont : l'évolution générale du système, le profil dunaire, l'établissement, le développement et la fixation de la végétation, la colonisation des espèces dunaires, l'apparition de végétation envahissante, l'efficacité des mesures de protection, les éventuels problèmes dus à des causes naturelles ou anthropiques, etc.

Pour obtenir des informations approfondies, la durée du contrôle ultérieur aux travaux doit être d'au moins trois ans de suivi intensif, deux ans de suivi régulier, et cinq ans de suivi ponctuel. Ces aspects sont essentiels pour la connaissance et l'amélioration des techniques de restauration dunaire. En conséquence, il est nécessaire de partir d'une vue d'ensemble pour étudier le comportement naturel et la réponse des systèmes dunaires face à ce type de travaux de restauration ainsi que pour définir les mesures qu'il faudra mettre en œuvre à l'avenir.

5.7 Entretien

Contrairement aux travaux d'ingénierie civile, les travaux de restauration dunaire basés sur un système de régénération écologique prennent un certain temps pour que les processus naturels agissent. De plus, ces processus sont soumis à de nombreux facteurs environnementaux déterminant une dynamique qui n'est pas toujours prévisible. En conséquence, le succès et l'homogénéité des résultats dépendent de différents facteurs environnementaux tels que les tempêtes ou le vent.

En outre, l'affluence de visiteurs pendant la période estivale dévient massive, ce qui accélère la détérioration des installations et des infrastructures. Il est donc nécessaire de réaliser, dans un délai de trois ans maximum, des travaux d'entretien et de réparation visant à garantir la viabilité des résultats.

Les travaux d'entretien consistent essentiellement à contrôler et à aider l'évolution et le développement des plantations établies en effectuant des regarnis et en vérifiant que les recouvrements et les dimensions adéquats soient atteints. Pour ce faire, il faut maintenir les conditions d'entretien et la dynamique les plus appropriées.

Il est également indispensable de réaliser un suivi continu de l'état des capteurs de sable pendant la phase fonctionnelle (environ deux ans) ainsi que de l'état général d'entretien des installations —passerelles, clôtures, panneaux, etc.- pour réparer régulièrement les dégradations et garantir ainsi l'usage et la jouissance totale de la zone.

Il est estimé que chaque année des détériorations, des manquants, etc., se produisent dans 10% des travaux de restauration.

Les points clés des travaux d'entretien sont:

Les replantations

- Les replantations sont réalisées dans des zones où une partie de la végétation dunaire a disparu à cause de la détérioration ou du piétinement quand le pourcentage des manquants dépasse 30%, ou de nouveaux processus érosifs sont apparus. Ce mécanisme pourra être appliqué également à des zones qui n'étaient pas incluses dans le projet original mais qui requièrent un processus de stabilisation.

Remplacement des capteurs de sable

- Les capteurs seront remplacés en cas de détérioration, si le vent les abat ou les casse, si les visiteurs accèdent aux zones en restauration, s'ils se sont enfouis dans le sable plus vite que prévu, s'il est nécessaire d'augmenter la hauteur du cordon dunaire, etc.

Restauration ou remplacement de la clôture

- La clôture sera remplacée en cas d'abattement, enfouissement, détérioration ou dysfonctionnement.

Restauration des passerelles piétonnières

- Les passerelles devront être remplacées le plus vite possible de manière à permettre l'accès aux plages en évitant les zones restaurées.

Remplacement des systèmes d'information

- Étant donné qu'ils constituent un élément capital pour l'acceptation, la compréhension et le respect des travaux, la réponse dans ces cas doit être immédiate.

Élimination de la végétation envahissante

- L'élimination de la végétation envahissante constitue un processus qui requiert un effort continu pour mettre fin aux repousses, aux nouvelles colonisations et à la germination des semences pouvant rester latentes pendant des années. Les travaux d'entretien se concentreront sur la prospection et l'élimination urgente des repousses pour empêcher la rapide expansion qui caractérise ce type de végétation.



Photo 5.27 Doñana, Espagne © Carla Danelutti

6

Méthodes de culture de plantes dunaires

6.1 Introduction

Ce chapitre décrit les différentes techniques de production de plantes dunaires, notamment les espèces les plus caractéristiques des écosystèmes dunaires, comme l'oyat (*Ammophila arenaria*) et le chiendent des sables (*Elymus farctus*).

La culture d'autres espèces dunaires est également possible et elle est réalisée en pépinière, en Espagne (par exemple les pépinières d'El Saler, dans la commune de Valence). Beaucoup de ces espèces dunaires sont annuelles et leur culture exige une plantation dans une période bien définie car elles meurent à la fin de leur cycle annuel. De plus, comme beaucoup de ces plantes sont de très petite taille et que leur culture est compliquée et coûteuse, les plantations sont dans la plupart des cas limitées au chiendent des sables, dans la dune embryonnaire, et à l'oyat, dans la dune blanche.

Lorsque la plantation d'autres espèces est nécessaire, leur production doit être prévue au moins deux ans à l'avance, ce qui permet de récolter les graines au meilleur moment puis de les cultiver. La production de plantes dunaires nous permet de disposer d'une végétation autochtone pour les travaux de régénération des systèmes dunaires. C'est un avantage important puisqu'il est difficile de trouver ces espèces sur le marché.

Des travaux de recherche, de culture et de restauration des écosystèmes dunaires sont pratiqués en Europe, tout particulièrement en Hollande, en France, en Angleterre et au Danemark. Depuis le début du XXe siècle, on a développé différentes techniques de culture en pépinière qui sont basées principalement sur la multiplication végétative. C'est le cas de la technique de l'éclatage, qui a recours à des méthodes d'éclaircissage dans les formations denses de ce type de végétation dunaire.

6.2 Types de reproduction végétale

La reproduction des végétaux peut être sexuée ou asexuée. La différence principale réside dans le fait que pour la reproduction asexuée, les descendants proviennent d'un seul et unique progéniteur avec les mêmes caractères génétiques.

Dans le cas de la reproduction sexuée, le matériel génétique des descendants provient de la combinaison des génomes des progéniteurs. La descendance ne possède donc pas la même information génétique et le contenu génétique présente une plus grande diversité.

L'oyat et le chiendent des sables se reproduisent naturellement selon les deux procédés : de façon sexuée, par les graines, et de façon asexuée, par stolons et rhizomes. Mais le développement de la végétation dans les systèmes naturels est surtout issu de la reproduction asexuée. En effet, la majeure partie des graines produites par les plantes sont consommées par les oiseaux et insectes, puis, sur celles qui parviennent à germer, seule une petite fraction arrive à l'âge adulte, le reste mourant à cause de l'ensablement ou de l'érosion. Par ailleurs, l'oyat présente deux sous-espèces en Europe et au nord de l'Afrique : *Ammophila arenaria* ssp. *arenaria*, qui s'étend de la Scandinavie au sud de la France et *Ammophila arenaria* ssp. *australis*, qui occupe les habitats dunaires sur la Péninsule Ibérique, le pourtour méditerranéen et la côte atlantique nord-africaine. Ces deux sous-espèces ont un comportement différent quant à leur type de reproduction. Les graines de la sous-espèce du nord de l'Europe sont beaucoup moins fertiles que celles de la sous-espèce ibérique et méditerranéenne. C'est pour cela que les techniques de reproduction et de plantation de l'oyat se sont développées par le système asexué. Néanmoins, si les systèmes de production de végétation dunaire se sont tout

d'abord basés sur les techniques de reproduction asexuée, actuellement, pour la sous-espèce *australis*, ils se réalisent à grande échelle par des méthodes sexuées, c'est-à-dire à partir des graines.

6.3 Espèces utilisées pour la restauration des écosystèmes dunaires

La plupart des plantes dunaires sont cultivables. Cependant, la culture, et surtout l'approvisionnement, nécessitent une quantité importante de graines, sont coûteux et compliqués. D'autre part, traditionnellement en Europe, l'oyat a été quasiment une des seules espèces utilisées pour la stabilisation des systèmes dunaires, voilà pourquoi c'est l'espèce la plus largement cultivée.

À la fin de ce chapitre, on trouvera une liste des espèces dunaires potentiellement cultivables sur les côtes méditerranéennes. (Annexe 1).

Les espèces plus cultivées sont les suivantes :

L'oyat (*Ammophila arenaria*)

L'oyat est une graminée dont la floraison a lieu entre mai et juillet. Sa reproduction, dans les systèmes naturels, s'effectue principalement par rhizomes souterrains. Cependant, elle peut se reproduire par graines, en pépinière.

Deux types de semis d'*Ammophila arenaria* peuvent être réalisés en pépinière : semis directs, à l'extérieur et semis en conteneurs, sous serre. Pour les semis directs, la récolte s'effectue une fois par an, au printemps ou en automne. Les semis sous serre peuvent être effectués à plusieurs reprises lors d'une année, selon l'emplacement géographique de la pépinière et les conditions de cultures (chauffage, arrosage et engrais, principalement).

Le Chiendent des sables (*Elymus farctus*)

Le système de reproduction de cette espèce, dans la nature, ressemble à celui de l'oyat, c'est à dire par rhizomes. Même si sa capacité de fixation n'est pas aussi grande que celle de

l'oyat, le chiendent des sables stabilise et recouvre les avant-dunes, en permettant à l'oyat de les coloniser par la suite, selon le phénomène de succession écologique.

En pépinière, la reproduction de cette espèce se fait normalement par bouturage, compte tenu des difficultés que pose la récolte des graines.

Le lis maritime (*Pancratium maritimum*)

En pépinière, la production peut se faire en extérieur ou en intérieur, sous serre, avec des graines. Néanmoins, il est plutôt recommandé de réaliser le semis en extérieur car cette espèce n'est adulte qu'à trois ans. De plus, la culture en conteneur est limitée par la grande taille du bulbe. Outre cette reproduction sexuée, on arrive également à obtenir de bons résultats avec la plantation de bulbes récoltés sur les plages, dans les sites en érosion marine.

6.4 Caractéristiques de la culture de plantes dunaires

Comme celle des autres espèces, la culture des plantes dunaires doit se dérouler dans un environnement proche de leur milieu naturel. Dans le cas des dunes littorales, cet environnement est caractérisé par un substrat sableux, mobile et une salinité de l'atmosphère. C'est pour cette raison que l'on doit installer les pépinières de plantes dunaires le plus proche possible de la côte, sur un substrat de sable de provenance marine et où l'on trouve une végétation dunaire.

Il est également possible de cultiver des plantes dunaires dans des pépinières éloignées du littoral, mais lorsque les plantes atteignent le stade adulte, elles doivent être soumises aux conditions environnementales dunaires. Dans le cas contraire, elles dégèneront rapidement.

L'avantage principal de cultiver sur un terrain à caractère de dune est d'éviter la prolifération de plantes exotiques, car les plantes dunaires sont les seules à être adaptées à ces conditions. Cependant, certaines plantes exotiques envahissantes arrivent à coloniser la niche des plantes dunaires, ce sont cependant des exceptions. Cette colonisation s'avère un

problème grave pour les systèmes dunaires, alors que les cultures réalisées en pépinières sont à l'abri de cette menace.

6.5 Production de l'oyat

6.5.1 Reproduction asexuée

Il existe plusieurs systèmes de reproduction asexuée de l'oyat, les plus connus sont les boutures et la propagation par rhizomes.

Prélèvement de bouture : Elle consiste à éclaircir l'oyat en réalisant une coupure à la base de la tige, sous le deuxième nœud. Ce processus a l'avantage de favoriser la croissance de nouvelles tiges à partir du système racinaire. Une fois le matériel transplanté dans la pépinière, on le divise en groupes de quelques brins dotés chacun de quelques nœuds (en Aquitaine on parle de «touffettes») qui sont introduites sous terre à 30 cm de profondeur. L'enracinement se produit à partir des nœuds situés à la base de la tige, quelques mois après.

Propagation par rhizomes : Ce système est utilisé à petite échelle. Le rhizome de l'oyat, une fois extrait du sol, est coupé en fragments de 10 à 15 cm qui sont ensuite plantés dans des sillons d'environ 25-30 cm de profondeur. Si les conditions sont favorables, les rhizomes émettent, après quelques mois, de nouveaux rejets.

6.5.2 Reproduction sexuée

Au cours de ces dernières années, tout particulièrement dans le cas de la production de la sous-espèce méridionale de l'oyat, la culture par semis a été développée et perfectionnée. Cette méthode est beaucoup plus avantageuse sur les côtes méditerranéennes que le système d'éclatage utilisé dans les pays du Nord de l'Europe, qui présente des inconvénients, notamment le faible niveau du volume de production. D'autre part, la récolte du matériel végétal inhérent au système d'éclatage exige de grandes superficies de végétation dunaire dense, cas peu fréquent sur la côte méditerranéenne.

En outre, dans le cas de la culture par semis, la récolte des graines n'endommage quasiment pas la végétation existante, car le système

principal de reproduction de ces espèces à l'état naturel se fait par rhizomes. Le système de reproduction par graines est plus rentable car il produit une plus grande quantité de plantes. De plus, les plantations obtenues par graines présentent une plus grande vigueur et une meilleure adaptation aux nouvelles conditions.

En dernier lieu, la récolte des graines permet un transport sur de longues distances sans risque de pertes. Il est ainsi possible de cultiver presque n'importe quel type de plante dunaire dans une pépinière, indépendamment de sa provenance, et d'établir un système d'action généralisé, qui convient pour tous les écosystèmes littoraux.

6.5.2.1 Récolte des graines

Pour obtenir une quantité suffisante de graines, il faut les récolter sur les formations naturelles. L'oyat est une espèce dont la fructification est irrégulière, les années de forte production et de faible production se succèdent sans raison apparente. La saison de floraison et de fructification varie en fonction des facteurs climatiques. C'est pourquoi une étape préalable à la récolte est l'observation pour déterminer les saisons de floraison et de fructification. Sur le littoral méditerranéen, la floraison commence à partir du mois de mars ou avril. Le temps de maturation de la graine est d'environ deux mois, le plus souvent entre mai et juin. Une fois la graine mûre, elle reste quelques jours dans l'épi et risque d'être consommée par de nombreux insectes et oiseaux. Il faut donc procéder à la récolte aussi rapidement que possible.

La récolte des graines doit être réalisée si possible à proximité des zones où auront lieu les travaux de régénération des dunes. Cet aspect est très important d'un point de vue écologique car la variété à introduire n'est pas une variété génétiquement pure mais un "pool génétique" identique à l'existant.

6.5.2.2 Prospection des zones de récolte

L'analyse des peuplements d'oyat où va être effectuée la récolte et l'observation du développement et de la maturité des plantes constituent la première étape du processus de récolte. À partir du moment où est détecté le

début de la floraison, des visites doivent être prévues pour déterminer le gradient de maturité le long du système dunaire et repérer les zones où la végétation est la plus mature possible. De cette façon, il est possible de déterminer le lieu pour initier la récolte et la méthode à suivre. En principe, la prise d'échantillons des graines doit être faite sur des épis éloignés les uns des autres.

Pour observer le degré de maturité des graines, il faut couper les épis environ à la moitié et les observer avec une loupe de terrain. On reconnaît la graine immature par sa couleur claire et sa texture molle. Au fur et à mesure que la graine mûrit, elle jaunit et se durcit. Lorsqu'elle est vraiment mûre, elle prend une couleur ambre clair et se décolle facilement de l'épi.

Pour faciliter sa récolte, il est recommandé de réaliser une cartographie basique de la végétation centrée sur l'oyat et le chiendent des sables, en élaborant un zonage de la surface, basé sur des facteurs tels que l'âge, la densité de la couverture végétale, le développement des plantes ou la production des épis.

Les épis de chiendent des sables sont en général moins prolifique, la récolte est plus lente et plus laborieuse. En revanche, comme la graine ne se détache pas de l'épi, la récolte peut s'espacer dans le temps.



Photo 6.1 Coupure de l'épis pour montrer le degré de maturité des grains. © Carlos Ley

6.5.2.3 Récolte

Les campagnes de récolte de graines durent en général une ou deux semaines. Si la zone de récolte se trouve éloignée de la pépinière, il est recommandé de trouver un lieu fermé, mais aéré et sec, qui puisse servir d'entrepôt provisoire pour conserver les graines jusqu'à la fin de la campagne. Si la zone se trouve près de la pépinière, le transport des graines s'effectue à la fin de la journée.

La récolte se fait manuellement, en coupant l'épi avec des ciseaux de taille. Le transfert à



Photo 6.2 Récolte d'épis d'oyat. © Carlos Ley



Photo 6.3 Épis d'oyat après leur récolte. © Carlos Ley

l'entrepôt se réalise dans des sacs aérés pour éviter l'humidité excessive des épis. Les sacs sont vidés et les épis sont étalés au sol afin d'être séchés. Pour obtenir de meilleurs résultats, les épis récoltés sont disposés sur une surface lisse et dure, de façon à ne pas perdre les graines. La surface devra être couverte pour éviter son exposition aux pluies, vents, etc.

À l'intérieur de l'installation, l'air ambiant doit être sec pour accélérer le processus et réduire le risque d'exposition à de possibles infections par des champignons. Le séchage s'effectue en général à l'intérieur des serres car elles remplissent toutes les conditions citées précédemment. Le taux d'humidité, la température ambiante, ainsi que les problèmes provoqués par les insectes, les oiseaux et les rongeurs sont relativement plus faciles à contrôler dans les serres.

L'opération a une durée de 5 à 7 jours, période durant laquelle on retourne régulièrement les épis à l'aide d'une fourche afin de les aérer et de faciliter leur séchage. Au fur et à mesure que les épis s'ouvrent, on sépare les grains par battage. Les épis des couches supérieures sont retirés au fur et à mesure qu'ils perdent la

majorité de leurs grains, laissant ainsi le matériel de germination accumulé sur la couche préalablement conditionnée, ce qui facilite le ramassage des grains avec les pelles et évite qu'il se mélange au sable.

6.5.2.4 Purification et stockage

Après le battage, l'ensemble des grains est séparé des restes d'épis et des autres impuretés par criblage avec différents maillages. La première maille est de grande taille, environ 2 mm, pour permettre le passage du grain et empêcher celui des restes d'épis. Enfin, on utilise un maillage plus fin, d'environ 1 mm, pour empêcher le passage du grain et permettre celui des particules de sable, ainsi que d'autres impuretés. De cette façon, les grains sélectionnés sont propres et secs.

Le grain obtenu durant la récolte est déposé dans un entrepôt afin d'être utilisé pour les semis de la saison à venir. Si le grain reste stocké plus d'un an, il est préférable d'utiliser une banque de semences où les entreposer pendant plusieurs années pour qu'ils ne perdent pas leur capacité de germination.



Photo 6.4 Épis étalés pour le séchage. © Carlos Ley



Photo 6.5 Grains d'oyat préparés pour leur stockage.
© Carlos Ley

Dans la banque de semences, on utilise des récipients hermétiques avec un taux d'humidité de l'ordre de 5% et une température oscillant de -20 à -25 degrés centigrades.

En plus de l'oyat et du chiendent des sables, d'autres espèces typiquement dunaires peuvent être produites en pépinière : le lis maritime (*Pancratium maritimum*), la roquette de mer (*Cakile maritima*), le liseron des dunes (*Calystegia soldanella*), l'immortelle des dunes (*Helichrysum stoechas*), etc. Comme le volume de production de ces espèces est bien plus modeste, la récolte n'exige pas de processus de séchage, ni de purification aussi méthodique. Dès leur maturité, les graines sont récoltées, plantées ou stockées après un bref séchage.

6.5.2.5 Semis d'oyats

De même que pour d'autres types de cultures sous serre, il existe deux modalités de production de plants à partir de semis : les plants en conteneurs et les plants à racines nues. Le choix d'une de ces deux options conditionne la réalisation du semis en extérieur ou sous serre.

A) Semis d'oyats sous serre

La culture sous serre permet de contrôler la température et l'humidité des semis, ce qui accélère la germination et la croissance et

permet d'obtenir en moins de temps des productions plus régulières et homogènes. En contrepartie, on obtient des plantes aux tissus plus faibles car elles n'ont pas été exposées à des conditions climatiques adverses (vents, évaporation, etc.). Elles sont donc plus susceptibles d'être attaquées par les insectes ou les champignons. Une période d'acclimatation à l'air libre est alors nécessaire.

Pour les semis sous serre, on utilise des plateaux de conteneurs aux dimensions standardisées. L'usage de ces conteneurs peut provoquer l'enroulement des racines car l'espace intérieur est très limité et les racines poussent fréquemment de façon chaotique, en formant des spirales. Pour éviter ce problème, les conteneurs disposent le plus souvent de fentes verticales latérales qui contribuent au guidage des racines et atténuent l'effet «chignon».

Avec les conteneurs, l'utilisation de substrats plus ou moins stériles réduit la contagion des agents pathogènes du sol et évite le transfert des maladies sur le lieu de repeuplement. Le substrat de semis est composé d'un mélange de sable de plage et de tourbe en proportions variables. Si la quantité de sable est plus élevée, la rétention d'eau est plus faible et les conteneurs sont plus difficiles à manipuler. La tourbe blonde de mousse de sphaigne offre une grande capacité pour retenir l'humidité (15 fois son poids sec). Elle contient une petite quantité d'azote (près de 1%) et une acidité élevée qui doit être neutralisée avec l'apport de dolomite en poudre ou d'un autre matériau neutralisant basique.

* Processus du semis

Pour procéder aux semis, après avoir placé les conteneurs sous serre, on doit les remplir au $\frac{3}{4}$ avec le substrat et déposer les graines (normalement 6 à 10 graines pour garantir une quantité supérieure à cinq plantules). Ensuite, on recouvre les graines avec une couche de substrat, en les laissant enfouies à une profondeur de 2 à 3 cm. On doit alors veiller à ce que l'humidité et la température ambiante dans la pépinière soient optimales.

La période de germination varie en fonction de la température du substrat. Plus la température

sera élevée, plus tôt se produira la germination des graines. La période qui s'écoule entre le semis et la germination des graines varie selon la saison de l'année. En hiver, comme la température extérieure est plus basse, la température du substrat baisse également et la graine germe environ 20 jours après semis. En revanche, en été, la graine peut germer en une quinzaine de jours.

Une fois que la taille moyenne des plantules a atteint 15-20 cm, on peut mettre l'engrais dans les conteneurs. L'étape suivante consiste à transférer les plantules à l'air libre pour qu'elles continuent leur développement et s'acclimentent aux conditions environnementales avant d'être transplantés.

Les premières étapes de la croissance sont également influencées par la température. Le semis réalisé à la fin de l'hiver met 3 à 4 mois à se développer, alors que le semis de printemps n'a besoin que de 2 à 3 mois. Quant au semis d'automne, même s'il reste sous serre, sa durée de croissance se prolonge de 5 ou 6 mois.

L'usage des serres permet une production plus importante en moins de temps. Cependant, comme il s'agit d'une culture d'espèces dunaires devant supporter des conditions naturelles extrêmes, la production sous serre engendre des tissus plus faibles. C'est la raison pour laquelle elles doivent passer une période d'acclimatation à l'extérieur qui retarde l'obtention des plants.



Photo 6.6 Distribution des graines dans les conteneurs. © Carlos Ley



Photo 6.8 Début de croissance des plantules dans les conteneurs. © Carlos Ley



Photo 6.7 Conteneurs ensemencés. © Carlos Ley

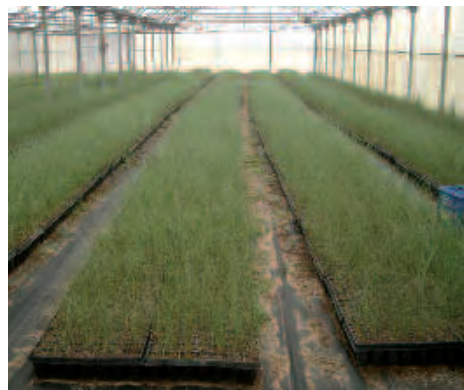


Photo 6.9 Culture de l'oyat deux mois après les semis. © Carlos Ley

CONSERVATION DES DUNES CÔTIÈRES

Il faut souligner que la production sous serre présente de plus grands risques d'attaque des champignons (notamment les champignons du sol, la rouille et l'*oidium*) et des aphididés (pucerons).

D'autre part, les plantes produites sous serre ne peuvent pas rester trop longtemps dans les conteneurs, car le développement des racines y est beaucoup plus limité et elles ne reçoivent aucun apport en sable. Si elles ne sont pas extraites une année et demie après leur arrivée en serre, elles commencent à dégénérer très rapidement.

La production sous serre est réalisée en général avec des plateaux en plastique de 28 conteneurs de 400 cm³ chacun. Ce volume de conteneur est le plus approprié car il permet un bon développement racinaire et un plus long séjour en pépinière. Ces grands conteneurs favorisent également la survie des plantules durant les transports de longue distance et permettent ainsi leur usage à grande distance de la pépinière.

Soins et entretien

Durant la phase de germination et de développement, les graines des conteneurs sont souvent exposées aux ravages causés par les champignons du sol, les micromammifères et les oiseaux. Si de telles dégradations se produisent, la cause du problème doit être traitée dans un premier temps puis, on procède au réensemencement des conteneurs détériorés.



Photo 6.10 Acclimatation des conteneurs à l'air libre.
© Carlos Ley

L'étape suivante consiste à transférer les conteneurs à l'extérieur de la pépinière pour poursuivre le développement des plantes à l'air libre, et favoriser leur acclimatation aux conditions naturelles extérieures avant qu'elles ne soient transplantées dans les zones de régénération.

B) Semis d'oyat en extérieur

Les semis directs en extérieur peuvent être réalisés au printemps ou en automne. Les semis de printemps se font entre mars/avril et mai, tandis que ceux d'automne se font à la fin du mois de septembre. En général, cette technique donne de très bons résultats. La période nécessaire pour obtenir des plants avec un système racinaire développé et une belle apparence est d'un an. Même si la croissance des plants est plus lente que dans les serres, ce type de production présente beaucoup d'avantages :

- L'avantage principal est le bas coût unitaire de production. En effet, la production de plants à racine nue exige moins d'installations et de soins que les cultures en conteneurs.
- La disponibilité et la flexibilité des plants cultivées à racine nue. On obtient une plante plus vigoureuse et mieux adaptée pour une transplantation future. D'autre part, même si elles mettent plus de temps à se développer que dans les conteneurs, elles peuvent rester au sol pendant plus longtemps car elles disposent de plus d'espace. Leurs racines ont une croissance supérieure et ne souffrent pas de spiralisation et d'étranglements.
- L'acclimatation de ces plants dans les zones de régénération est meilleure que celle des plants en conteneurs.
- La surface du terrain est mieux exploitée car on obtient une plus grande densité de plants par mètres carrés.
- Les cultures à racine nue demandent moins d'arrosage car l'évapotranspiration à laquelle elles sont soumises est plus faible.
- Les plantes sont plus résistantes à l'attaque des organismes nuisibles et aux maladies, notamment des pucerons et des champignons, car leurs tissus sont mieux développés.

- Le transport est plus simple et moins coûteux, mais exige une plus haute protection face à l'assèchement et l'insolation.

Saison des semis

Les saisons favorables au semis sont le printemps et l'automne. Pour les semis de printemps, s'ils sont réalisés trop en avance, on court le risque de perdre une partie de la récolte à cause des basses températures et des possibles tempêtes. Par contre, s'ils sont réalisés trop tard, les nouvelles plantes n'auront probablement pas le temps de se développer suffisamment pour résister aux rigueurs de l'été. Elles souffriront alors de la chaleur et s'exposeront aux risques d'insolation alors que leurs tissus seront encore trop tendres et n'auront pas encore un système racinaire assez développé qui leur permette de supporter l'évapotranspiration. Dans le cas des semis d'automne, il est nécessaire d'attendre la fin des

chaleurs de l'été et de semer rapidement pour que la plante se développe suffisamment pour résister à l'arrivée du froid.

Activités préalables aux semis

Avant de semer il faut travailler le sol :

Désherbage. Il s'agit d'éliminer totalement la végétation préexistante sur le terrain. Cette étape sert non seulement à se débarrasser des plantes compétitrices, mais également à faciliter les opérations qui suivront.

Préparation du terrain. Cette activité comprend le nivellement de la surface du sol et la mise en place d'une fumure de fond pour favoriser l'ensemencement et le développement des graines.

Semis

Une fois le terrain préparé, on trace des sillons linéaires, parallèles et séparés de plus de 50 cm pour permettre le développement du système



Photo 6.11 Parcelle prête pour les semis. © Carlos Ley



Photo 6.12 Semis. © Carlos Ley

racinaire. Il est important de laisser suffisamment d'espace entre les lignes pour faciliter les opérations d'entretien des cultures telles que les sarclages, etc.

Il est essentiel d'enfouir les graines en profondeur pour qu'elles conservent une teneur en humidité constante. Cependant, une profondeur excessive rendrait la germination difficile ou même improbable. L'expérience nous a démontré que pour la production de

l'oyat, les sillons où sont déposées les graines doivent avoir une profondeur de 10 cm. Quant à la densité de semis, elle est estimée à 1 g/m, ce qui équivaut à une moyenne de 50 plants par mètre.

Ensuite, on passe le râteau perpendiculairement aux sillons pour les reboucher et on arrose toute la surface semée.

L'opération d'ouverture des sillons peut être réalisée de façon manuelle ou mécanique. On peut utiliser un appareil de labour qui permet de creuser simultanément quatre sillons, ce qui réduit énormément le temps de travail. Il s'agit d'un outil traîné par un tracteur, pourvu d'un châssis auquel sont suspendues quatre grilles séparées de 50 cm.

Environ un mois après le semis, les plantules apparaissent. Les premiers nœuds se forment trois ou quatre mois après, sur la base de la tige, signalant l'âge adulte de la plante.

Entretien

Après les semis, il faut réaliser de temps à autre des opérations de sarclage pour éliminer les plantes compétitrices ainsi que des opérations de contrôle phytosanitaire, d'irrigation, d'alimentation en engrais, etc.



Photo 6.13 Plantules d'oyat quelques jours après leur germination. © Carlos Ley



Photo 6.14 Oyat, neuf mois après les semis. © Carlos Ley



Photo 6.15 Oyat adulte prêt à être transféré à la zone de régénération. © Carlos Ley

Réensemencement

Même s'ils sont inévitables, les ravages causés par les animaux et les champignons du sol sont moins fréquents dans les semis directs que dans les cultures en conteneurs.

Là aussi, dès que la cause a été identifiée et le problème résolu, on procède au réensemencement. Dans ce type de situation, un petit décalage, parfois de deux semaines, se produit dans la germination mais il n'est pas préjudiciable. Après les semis, il faut répéter systématiquement les opérations d'entretien citées ci-dessus. Les différentes expériences ont démontré qu'un apport de sable supplémentaire durant le développement des plantules à l'air libre favorise de façon extraordinaire leur vigueur.

6.6 Production de chiendent des sables

Le chiendent des sables se reproduit par des méthodes asexuées (rhizomes) et par des méthodes sexuées (semis). La première méthode, exigeant des températures basses,

est réalisée pendant les mois froids. La collecte de rhizomes devient rentable lorsqu'on dispose de vastes zones bénéficiant des conditions particulières nécessaires à cette méthode. Le matériel récolté est stocké dans des sacs pour son transport à la pépinière (ou à l'emplacement destiné à sa transplantation). Une fois fragmentés, les rhizomes sont enterrés à faible profondeur. Au printemps, la partie végétale aérienne des rhizomes pousse, et il se forme une couverture végétale de densité moyenne à haute.



Photo 6.16 Chiendent des sables à l'état naturel. © Carlos Ley



Photo 6.17 Épis et graines de chiendent des sables.
© Carlos Ley

Le chiendent des sables est la plante pionnière de colonisation des sables très mobiles dont l'humidité phréatique et la salinité sont plus importantes que dans les milieux colonisés par l'oyat.

La méthode à suivre est la même que celle utilisée pour les plantations d'oyat en extérieur à racine nue : on commence en éliminant les mauvaises herbes, on dépose une fumure de fond et on ratisse la surface. Ultérieurement, on créera des sillons parallèles entre eux.

Les graines sont introduites à une profondeur de 10 cm, en densité un peu supérieure à celle de l'oyat. La quantité de graines utilisées est de 1,5 g/m. Elles sont ensuite enterrées en ratissant la surface avec le râteau et arrosées copieusement.

La germination est plus lente que celle de l'oyat. Normalement, elle ne commence pas avant 40-45 jours, cette période pouvant varier selon les conditions auxquelles est exposée la plantation. Trois mois après le semis, on observe l'apparition des premiers nœuds en bas de la tige, témoin du début de la phase adulte de la plante.

La culture de chiendent des sables est moins répandue car la zone où elle est présente naturellement est plus restreinte que celle de l'oyat. Par ailleurs, il est plus difficile d'obtenir des graines et sa germination est plus lente. L'expérience indique que l'éclatage, en



Photo 6.18 Culture de chiendent des sables.
© Carlos Ley

extérieur ou sous serre, est une meilleure méthode pour obtenir une production abondante que le semis.

6.7 Production du Lis maritime

La culture en conteneur n'est pas particulièrement rentable, puisque malgré un bon pourcentage de germination des graines, le développement rapide de la plantule exige sa transplantation à l'extérieur dans un court délai pour éviter la spiralisation des racines.

La méthode de semis ou de plantation de bulbes sur des parcelles à l'extérieur est similaire à celle utilisée pour les graminées. Ainsi, après le défrichage et l'application d'engrais sur les terrains, on ratisse la surface, on sème, ou on plante, les bulbes dans des sillons. Dans les deux cas, l'écart des sillons doit être d'au moins 50 cm pour permettre un développement optimal des plants.

La période de germination et la vitesse de développement varient entre graines et bulbes. Dans le cas des bulbes, les plants peuvent être transplantés une fois passé leur premier automne. Pour les plants obtenus par semis, il est nécessaire d'attendre de 2 ans ½ à 3 ans, avant de pouvoir procéder à leur transplantation.

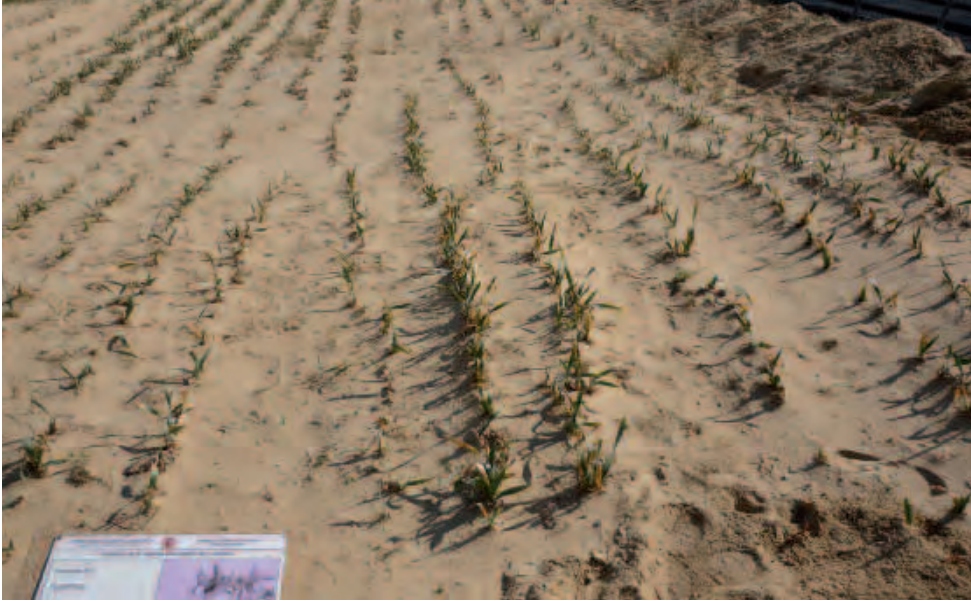


Photo 6.19 Culture de lis maritime. © Carlos Ley

6.8 Production d'autres espèces

Le chiendent des sables et l'oyat sont des plantes structurantes de la végétation des dunes. Il existe toutefois un nombre assez important d'espèces accompagnatrices qui ne rentrent pas en jeu lors de la fixation et de la stabilisation des dunes. Elles favorisent cependant la biodiversité des zones à restaurer, facilitent l'arrivée d'autres composants de l'écosystème et ajoutent de la valeur écologique, là où elles sont introduites.

Différents essais de culture avec des espèces caractéristiques des écosystèmes dunaires comme la renouée maritime (*Polygonum maritimum*), le panicaut maritime (*Eryngium maritimum*), l'immortelle des dunes (*Helichrysum stoechas* var. *maritimum*), la julienne des sables (*Malcolmia littorea*), le liseron des sables (*Calystegia soldanella*), l'œillet de France (*Dianthus gallicus*), la diotis cotonneuse (*Otanthus maritimus*) et la roquette de mer (*Cakile maritima*) ont été réalisés.



Photo 6.20 Culture de panicaut maritime. © Carlos Ley



Photo 6.21 Culture de diotis cotonneuse. © Carlos Ley

Vu la difficulté de disposer d'une quantité importante de matériel de germination, les expériences menées jusqu'à présent ont utilisé en majorité la technique de transplantation. Les résultats obtenus n'ont pas été très concluant car on n'a pas réussi à obtenir une production intensive, et seules certaines de ces espèces ont survécu suite à leur culture.

6.9 Travaux d'entretien

La production de plantes en pépinière exige la réalisation d'importants travaux d'entretien. En plus des arrosages pendant la période sèche, l'apport de fertilisants adaptés ainsi que l'application de traitements phytosanitaires sont recommandés.

6.9.1 Arrosage

Les plantes nécessitent des volumes d'eau considérables pour fabriquer leurs tissus : de l'ordre de 250 à 800 litres par kilogramme de matière sèche. Cette énorme consommation est une caractéristique propre à ce genre d'espèce mais est aussi justifiée, par les conditions climatiques, le type et l'humidité du sol. Une carence dans leur nutrition végétale, une modification du rapport évaporation/transpiration font varier sensiblement la quantité d'eau que la plante doit absorber pour produire 1 kg de matière sèche.

De plus, la distribution saisonnière des pluies est irrégulière et n'assure pas toujours un apport en eau suffisant durant la période de plus forte croissance de la végétation qui, en général, coïncide avec les mois de plus forte évaporation. La plante profite seulement d'une petite partie de l'eau de pluie, car la plus grande partie se perd par infiltration, ruissellement et évaporation en surface. Ces cultures présentent donc des besoins en eau particulièrement élevés pendant certaines périodes critiques.

La forte densité de culture et le besoin d'un développement plus rapide que dans des conditions naturelles explique le fait que ces cultures exigent davantage d'eau que les peuplements naturels. De plus, dès le début du semis, les plantes exigent des conditions

d'humidité optimales, avec des doses plus importantes pendant les premières phases du cycle de vie, et qui diminuent au fur et mesure que la plantule développe son système racinaire.

En fonction de la méthode de culture, à racine nue, ou en conteneur, c'est à dire, en extérieur ou sous serre, les besoins et les techniques d'arrosage pourront varier. Les systèmes d'irrigation les plus utilisés sont l'irrigation de surface ou par sillons, à pression (aspersion, diffusion) et sous faible pression (goutte à goutte, micro-aspersion).

En tenant compte des avantages et des inconvénients de chacun des systèmes d'irrigation, des caractéristiques du substrat utilisé pour la culture et des besoins spécifiques des espèces dunaires, il est recommandé d'utiliser l'arrosage par aspersion pour les cultures en extérieur et la diffusion, pour les cultures sous serre. L'utilisation de ces systèmes d'irrigation permet un moindre coût d'entretien, une meilleure utilisation de l'eau et, en conséquence, le coût de l'installation sera amorti plus rapidement.

Dans le cas du semis sous serre, depuis l'ensemencement jusqu'à leur transplantation en plein air, le suivi des plantes doit être constant, surtout pendant les premières phases du développement pour déterminer les besoins et garantir un taux d'humidité optimal.

Une fois les conteneurs transférés à l'extérieur, le développement des plantules permet d'espacer les arrosages, les températures étant un peu plus basses. Pour une pépinière, l'arrosage est espacé de 3 ou 4 jours pendant la période de grandes chaleurs (juillet- août) et de 6-8 jours, lorsque les températures deviennent plus douces. Néanmoins, ces périodes d'arrosages peuvent varier en fonction des conditions climatiques existantes (précipitations et températures). Dans les pépinières situées dans des régions plus chaudes les besoins en eau sont, logiquement, bien plus importants.

Le semis en pleine terre est moins exigeant en eau que celui en conteneurs, car grâce à un meilleur développement du système racinaire la plante arrive mieux à capter l'eau du sol.

Dans le cas d'une culture en extérieur, l'arrosage débute dès le moment du semis. Pendant les

premiers jours et jusqu'à germination complète, les arrosages sont espacés de 2 ou 3 jours, voire, moins fréquemment, si la pluviosité est élevée. Pendant cette première phase le sol doit rester constamment humide pour favoriser le processus de germination. Ensuite, et jusqu'à la formation des premiers nœuds, les plants seront arrosés régulièrement tous les 4 ou 5 jours.

Une fois que la plante a atteint sa taille adulte, elle est moins dépendante des arrosages, car en conditions naturelles, elle doit supporter des situations de sécheresse plus ou moins intenses. Cependant, étant donné que la densité de culture est plus élevée, ses besoins en eau sont plus élevés. L'eau est donc un facteur limitant la croissance. Dans le but d'obtenir une croissance continue pendant toute la période de sécheresse, les plants cultivés à l'extérieur seront arrosés tous les 5-7 jours, voire davantage, si les conditions d'humidité l'exigent.

Le moment le plus propice pour arroser est pendant les heures où l'évaporation est moindre, lorsque la température ambiante est plus basse, c'est-à-dire, le soir ou à l'aube.

6.9.2 Engrais

Les sels minéraux en solution dans l'eau constituent la source d'éléments essentiels pour la nutrition de la plante. Leur origine est, soit la minéralisation des réserves organiques du sol, soit l'apport sous forme d'engrais.

L'azote, le phosphore et le potassium sont les principaux macronutriments nécessaires pour le développement des plantes. Les expériences de fertilisation menées sur des zones régénérées, montrent que les besoins en azote sont quatre fois plus élevés que pour d'autres éléments (phosphore et potassium), ce qui en fait dans la nature, un facteur limitant la croissance.

Vu la tendance de certains nutriments à disparaître par lixiviation, pour garder une concentration adéquate des différents éléments, on utilise des engrais à libération lente, dont la principale caractéristique est de libérer l'azote lentement, limitant les pertes par lessivage, et s'adaptent au rythme d'absorption de la plante, en fonction de la température et l'activité des microorganismes du sol.

Pour la production de plantes typiquement dunaires, on utilise des engrais composés. Ce sont des mélanges d'engrais sous forme granulée qui contiennent les nutriments fondamentaux nécessaires à la nutrition végétale, azote, phosphore, potasse et autres éléments, comme le soufre et le calcium. Le nom du fertilisant est déterminé par sa formule, le premier chiffre étant le pourcentage en azote et le deuxième en acide phosphorique (P_2O_5), le troisième celui de la potasse (K_2O). Ainsi, l'engrais connu comme 15 - 15 - 15 indique les concentrations en N, P et K qu'il contient.

Une des qualités des engrais composés c'est leur grande teneur en nutriments ; ils renferment dans une petite quantité une grande richesse nutritive. Cela se traduit par un gain de place à l'entrepôt, une économie de transport, etc. De plus, leur présentation sous forme granulée retarde leur dissolution dans l'eau du sol, et garantit leur absorption optimale par les plantes.

Les formules les mieux adaptées de ces engrais sont les plus riches en azote, par exemple les formules 20 - 10 - 10 et 25 - 10 - 0.

Dans les cultures de plantes dunaires en pépinière, en plus de l'utilisation d'une fumure de fond d'action lente mélangée au substrat du semis, on réalise une fumure de couverture pendant les périodes de croissance. Généralement on utilise du nitrate d'ammonium (titré à 26% N). Les nitrates sont solubles, ils s'ionisent lorsqu'ils se dissolvent dans l'eau du sol, et leur anion NO_3^- , pénètre en profondeur grâce à la pluie, l'arrosage ou la rosée. Ils sont absorbés par les plantes en 24 heures. D'autre part, ils sont oxydants et apportent l'oxygène nécessaire à la respiration des racines, procurant un effet nourrissant double : azote et d'oxygène. Par ailleurs, la partie ammoniacale est retenue dans le sol et agit plus lentement, seulement une fois que l'azote nitrique ($N-NO_3$) a été absorbé ou lessivé. On apporte cet engrais plusieurs fois, en fonction des besoins des plantes, lorsque celles-ci montrent des signes de carence en azote (croissance lente, jaunissement des feuilles etc.). Les résultats sont marqués par un regain de vigueur peu après application. Il est conseillé d'apporter l'engrais en petites doses évitant ainsi un développement excessif de la partie foliaire, ce qui pourrait être cause de déséquilibre pour la plante.



Photo 6.22 Détail de substrat sableux. © UICN-Med

En ce qui concerne la fertilisation des cultures, il existe deux conditions importantes :

1. Sachant que la plante doit posséder un système racinaire bien développé pour pouvoir absorber le fertilisant, on ne doit pas ajouter des engrais avant que ce stade de développement ne soit atteint
2. Utiliser un substrat sableux car il est fortement perméable, ce qui favorise le lessivage et l'infiltration du fertilisant vers le sous-sol pendant les mois de pluies.

Une alternative aux engrais solubles est l'utilisation de fertilisants à libération lente. La durée de libération des nutriments est variable selon le produit et dépend des niveaux d'humidité du sol, la température et/ou l'activité microbiologique. Il en existe deux types : ceux qui contiennent de l'azote, présentant une solubilité lente, et ceux qui sont enrobés. L'objectif final de ce genre de fertilisants est de libérer des nutriments au rythme des besoins de la plante évitant ainsi les pertes. Cela garantit une bonne efficacité d'utilisation en optimisant la santé de la plante, et en diminuant la fréquence de fertilisation et les pertes par lixiviation.

En ce qui concerne leur formulation, l'élément le plus important pour la nutrition de la végétation dunaire, et particulièrement, des graminées, est l'azote, car il favorise leur croissance. On recommande ainsi l'application de fertilisants à libération lente, avec une teneur en azote élevée. Parmi les plus utiles pour la culture de plantes dunaires, on trouve le 18-9-10 + microéléments qui garantit une période de libération allant jusqu'à 14 mois.

Son application est conseillée au début du printemps après un an de plantation. Le dosage recommandé est un peu moins élevé que celui indiqué pour des sols normaux (non sableux), compris entre 500 et 1.000 Kg/ha.

6.9.3 Apport de sable

L'apport de sable s'est avéré d'une grande utilité aux cultures de plantes des dunes. Ce type de plantes, particulièrement celles qui colonisent l'avant-dune, et plus particulièrement l'oyat et le chiendent des sables, lesquelles nécessitent un apport constant de sable pour garder leur vitalité. Dans les conditions naturelles, un apport

d'environ 30 cm par an est nécessaire pour optimiser leur croissance et vigueur.

L'emplacement des apports de sable est déterminant, car c'est le vent qui répand le sable sur la parcelle de culture. Il faudra donc procéder à l'accumulation face au vent, sur le côté de la pépinière, afin que les vents dominants répandent le sable sur les cultures.

6.9.4 Amendement du substrat

L'amendement du substrat a pour but de neutraliser son pH. En général, les sols acides se neutralisent en ajoutant de la chaux vive ou de la dolomie en poudre. Tandis que les sols alcalins s'acidifient avec l'ajout de gypse et certains types de fertilisants (sulfate d'ammonium et de potasse) qui, grâce à leur teneur en pH acide, diminuent l'alcalinité du substrat.

Dans la pépinière, pour les plantations d'oyat sous serre, le substrat utilisé est composé d'un mélange de tourbe et de sable. Pour corriger l'acidité apportée par la tourbe on ajoute de la dolomie en poudre, ce qui fait augmenter le pH entre 8.5 et 9. L'oyat peut normalement supporter dans des conditions naturelles un pH compris entre 4 et 9, mais dans le cas où est envisagée une transplantation dans des sols naturels basiques et carbonatés, comme c'est le cas par exemple en Cantabrie, il est important d'acclimater l'oyat de la pépinière à ces conditions et donc d'alcaliniser le substrat.

Finalement, on prévient l'acidification du sol en mélangeant du carbonate de calcium (CaCO_3) inerte avec le fertilisant, aussi bien pour des cultures en conteneurs que pour celles à racine nue en extérieur.

6.9.5 Mycorhization

Les mycorhizes sont le résultat d'une association bénéfique réciproque entre des champignons et les racines des plantes. Dans le cas des systèmes dunaires, on sait que les mycorhizes apportent des bienfaits nutritionnels aux plantes colonisatrices, et en plus, elles retiennent les grains de sable formant des agrégats.

Il existe un manque important en ce qui concerne la recherche sur la mycorhization chez les espèces végétales dunaires, pourtant, il serait intéressant d'avoir plus de connaissances sur le sujet. Sur d'autres types de cultures destinées à la régénération de milieux dégradés, cette technique est utilisée avec un grand succès car les mycorhizes garantissent l'avenir de la plante qu'on essaye d'introduire.

Il existe plusieurs types de mycorhization artificielle pouvant être réalisées en pépinière :

- Incorporer du sable originaire du substrat où poussent les plantes.
- Broyer des carpophores (corps fructifères) des champignons qui nous intéressent et les ajouter à l'eau d'arrosage des plantes à mycorhizer. À certaines occasions, on ajoute des spores dans une solution aqueuse, méthode qui garantit 60% de la mycorhization.
- Une autre méthode est l'enrobage des graines à semer, avec une pâte composée d'un mélange de champignons broyés. On ajoute aussi un support inerte pour augmenter la consistance du mélange. Étant en contact avec les spores, une plante qui germe sera colonisée par les champignons plus facilement.

Pour une mycorhization efficace il faut tenir compte de certains facteurs comme le choix du champignon à utiliser, il existe, en effet, des champignons spécifiques d'une espèce déterminée et d'autres qui pouvant s'associer à presque toutes les espèces. De plus, il faut tenir compte du fait que la manipulation des champignons n'est pas exempte de difficultés, aussi bien en laboratoire qu'en pépinière mais également dans le champ, où parfois, leur culture et leur stabilité peuvent poser des problèmes.

6.9.6 Traitements phytosanitaires

Dans les écosystèmes dunaires naturels, les organismes nocifs présents dans le sol colonisent aussi bien les dunes mobiles que les dunes fixées. Pourtant, malgré la présence d'éléments pathogènes sur les dunes mobiles, l'oyat y pousse vigoureusement. En effet l'apport de sable par le vent inhibe l'action des organismes pathogènes du sol, les empêchant

d'impacter les racines de l'oyat, qui peut continuer de produire de nouvelles racines dans le sable tout juste déposé par le vent sur la dune. Lorsque le système dunaire est stabilisé, les plantes développent leur système racinaire sur un sable qui contient des éléments pathogènes qui attaquent les racines âgées d'environ un an, ils entraînent une réduction de leur longueur et intensifient leur enroulement. Les plantes sont fragilisées et plus vulnérables aux conditions extrêmes des milieux dunaires (sécheresse, carence en nutriments, etc.).

Depuis longtemps, on a constaté dans des zones dunaires l'existence de parasites Nématodes qui conditionnent et modifient la composition végétale des communautés dunaires, l'oyat étant particulièrement touché. Ces Nématodes, ou plus concrètement, ces associations champignon - nématode, sont en partie responsables de la transformation de la végétation des dunes blanches (dominées par l'oyat) en dunes grises (où l'oyat se trouve dans une phase régressive).

En plus de ces Nématodes, les attaques d'aphididés (pucerons) sont également très nombreuses, tout particulièrement sur les plus jeunes feuilles des plantes d'oyat cultivées sous serre.

Aussi, très souvent on rencontre des pathologies provoquées par des champignons, principalement du genre *Pythium* et *Fusarium*, qui nuisent particulièrement aux cultures sous serre, mais aussi aux cultures en extérieur.

Les produits phytosanitaires présents dans le marché suffisent, jusqu'à maintenant, à limiter leurs effets et à contrôler ces nuisibles. Dans ce but, les traitements se divisent en deux groupes : le traitement aphicide contre les pucerons et le traitement fongicide contre les attaques des champignons.

Traitement aphicide

Ce type de traitement est appliqué surtout sur des plantations sous serre qui sont moins résistantes aux attaques d'aphididés par rapport à celles qui poussent en plein air, à cause d'un moindre développement de l'épiderme qui rend la plante plus vulnérable. A l'intérieur des installations, les aphididés bénéficient d'une meilleure protection contre les

intempéries et contre leurs ennemis naturels, ce qui diminue leur risque d'éradication. Afin de réduire les répercussions provoquées par la présence de ces organismes nuisibles, des inspections visuelles sont régulièrement réalisées et des traitements sont appliqués lorsque leur présence est détectée.

En général, on utilise des pesticides contenant du diméthoate comme principe actif vu qu'ils donnent d'excellents résultats dans l'éradication des aphididés. Mais ils peuvent nuire aux plants, jusqu'à provoquer leur mort. Il faut donc faire très attention au dosage si on choisit d'utiliser ce type de pesticides.

Il n'est pas conseillé de traiter les plantes pendant de longues périodes. En tout cas, si le traitement est adapté, les symptômes de ces effets adverses sont légers et disparaissent, par eux-mêmes, peu de temps après son arrêt.

Traitement fongicide

Les pathologies provoquées par des champignons, surtout ceux du genre *Pythium* et *Fusarium*, touchent particulièrement les cultures sous serre, mais elles sont aussi fréquentes dans les cultures en extérieur. L'apparition de taches brunes sur la base de la tige est le symptôme de la présence du champignon. Peu de temps après, la tige de la plante perd sa résistance mécanique, se plie et finit par gésir au sol, et ceci peut même provoquer sa mort. Pour garder ces pathologies sous contrôle, on utilise des fongicides suivant des concentrations adaptées.

Les graines doivent aussi être protégées des attaques de rongeurs et d'oiseaux. Pour contrôler les dommages causés par des souris on installera des pièges dans la pépinière, ce qui n'est peut-être pas la méthode la plus efficace, mais elle n'utilise pas des substances chimiques qui pourraient avoir des répercussions négatives sur les plantations. La consommation des graines par les oiseaux peut être évitée en les traitant avec un répulsif avant qu'elles ne soient semées.

Lorsqu'à cause des maladies et malgré les traitements phytosanitaires, les plantes meurent, elles sont remplacées par de nouveaux semis. Une fois la cause traitée, on doit réensemencer le plus rapidement possible pour éviter des difficultés liées à une éventuelle compétition intraspécifique.



Photo 6.23 Conteneurs attaqués par des champignons. © Carlos Ley

Dans les cultures sous serre, les plantules poussent en conteneurs individuels et donc, en principe, ce décalage ne pose pas de problème, car il n'existe pas de compétition ni pour l'espace ni pour les nutriments, etc. En revanche, pour les cultures en extérieur, à racine nue, les plantules sont en compétition et si le décalage est trop important (quelques mois), les plus jeunes plants sont désavantagés. En effet, les plants plus âgés sont mieux armés pour faire face à la compétition pour les ressources naturelles.

6.9.7 Contrôle des mauvaises herbes

Pour éviter l'apparition des mauvaises herbes responsables d'une compétition avec les cultures de plantes dunaires, il faut réaliser un suivi constant de leur développement et effectuer un sarclage adapté. Dans le cas des cultures sous serre, le désherbage ne peut être que manuel, bien que n'étant pas tout à fait efficace, puisque souvent la plante arrachée se fragmente et repousse plus tard.

Pour les cultures en extérieur, en plus du sarclage manuel, des herbicides sélectifs pour les graminées peuvent être appliqués entre les rangs de la plantation, jamais directement. On doit continuer le sarclage manuel sélectif dans les rangs évitant ainsi la concurrence pour les nutriments. Pour obtenir des meilleurs résultats, on combine ces deux méthodes.

Une bonne méthode pour éviter ou réduire la prolifération de mauvaises herbes est l'utilisation de sel. En agriculture en général, l'utilisation de sel est totalement déconseillée car il déstructure les agrégats colloïdaux de l'argile et la majorité des plantes ne le tolèrent pas même à faible concentration dans le sol. Dans le cas des plantes dunaires, le substrat étant le sable qui ne présente pas de propriété colloïdale, le sel ne déstabilise pas les propriétés physiques ou chimiques du sol. D'autre part, les plantes dunaires sont très tolérantes vis-à-vis de la salinité.

Dans les conditions naturelles, les embruns, et même les vagues, apportent des quantités de sel considérables aux dunes, c'est pour cela qu'en général peu de plantes sont capables de coloniser les systèmes dunaires.

Dans les conditions d'une pépinière, cet apport de sel par la mer est bien plus limité, voire inexistant, et donc la colonisation des cultures par les mauvaises herbes est plus importante.

Afin d'approcher les conditions naturelles dans une pépinière, dans le but d'éviter la compétition des mauvaises herbes, et également pour limiter le développement de champignons et de nématodes, il est important d'apporter du sel à la culture.

Le meilleur moment pour faire cet apport en sel est lorsque la pluviosité est faible et quand les plantes ont un besoin plus élevé en eau, c'est-à-dire à la fin du printemps et pendant l'été.

Les quantités de sel à apporter aux cultures peuvent aller de 100 à 400 grammes par mètre carré.

Un apport à la fin du printemps et un autre à la fin de l'été sont suffisants pour réduire considérablement la prolifération des mauvaises herbes.

Le sel utilisé est du gros sel brut provenant de salines.

6.9.8 Assainissement des sols

Avec le temps, les sables mis en culture, présentent des restes de matière organique, principalement des racines des anciennes cultures, et des organismes pathogènes, particulièrement l'association Nématode-champignon. Donc, après plusieurs récoltes, on doit procéder à l'assainissement des sols. Pour éliminer l'excès de matière organique du substrat on se sert d'un engin, qui remue et tamise le sable, utilisé normalement pour nettoyer les plages. Avec cette opération on élimine une grande partie des restes de matière organique.




Cette méthode, complétée par l'apport de sable propre, permet de réaliser des récoltes continues durant plusieurs années.






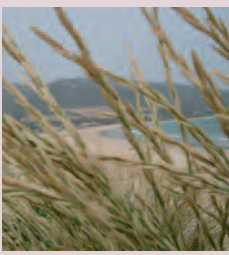
Photo 6.24 Système utilisé pour nettoyer le sable. © Carlos Ley





1 Annexe

TABLEAU PLANTES






NOM SCIENTIFIQUE	NOM COMMUN	DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE	DESCRIPTION	PHOTO
<i>Ammophila arenaria</i>	Oyat	Côtes européennes, depuis la Norvège jusqu'à la Méditerranée.	Espèce herbacée. Il s'agit de l'agent de fixation principal des dunes. Il a sa plus grande vigueur dans les dunes secondaires, mais son amplitude écologique lui permet de coloniser des dunes primaires et tertiaires. Sa grande capacité de fixation de sable est due à ses tiges souples, qui recouvrent et protègent les dépôts de sable de l'érosion, et à son puissant système racinaire.	
<i>Cakile maritima</i>	Roquette de mer	Méditerranée et Atlantique.	Espèce annuelle des zones littorales, notamment des endroits où la matière organique transportée par la mer est accumulée. Il s'agit d'une espèce pionnière caractéristique de la première ligne de plage et jusqu'à la base de la première dune côtière. La dispersion des graines peut se produire par le transport des courants marins, ce qui lui permet d'avoir une large représentation dans les communautés de plage sèche du littoral.	
<i>Calystegia soldanella</i>	Liseron des dunes, liseron des sables	Méditerranée et Atlantique.	Plante vivace, très caractéristique grâce à ses grandes fleurs rosées et ses tiges couchées, rampantes, qui poussent enracinées au sable. Elle aime les sols azotés, et est localisée dans les dunes primaires et secondaires et, en moindre mesure, dans les dunes tertiaires. Son système de tiges favorise la fixation du sable. Son port rampant et sa propagation végétative en font une espèce bien adaptée à des zones de forte mobilité de sable, en évitant leur enfouissement.	

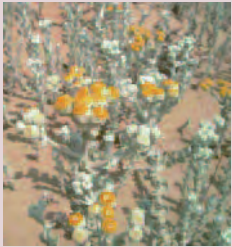
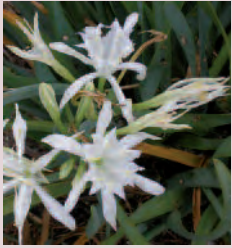


CONSERVATION DES DUNES CÔTIÈRES

NOM SCIENTIFIQUE	NOM COMMUN	DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE	DESCRIPTION	PHOTO
<i>Crucianella maritima</i>	Crucianelle maritime	Région méditerranée occidentale et littoral atlantique de la Péninsule ibérique.	Plante vivace à base ligneuse, qui apparaît fréquemment inclinée ou couchée. Bien qu'elle se reproduise par graines, elle a une croissance végétative importante. Ses touffes vivaces sont caractéristiques des dunes côtières. Leur habitat optimal est formé par les dunes situées après le premier cordon dunaire, où la mobilité du sable est basse. Cependant, elle peut se développer dans des zones de plage sèche et dans le versant exposé à la mer de la première dune dans des cas d'un apport de sable relativement faible.	
<i>Cyperus capitatus</i>	Souchet des dunes	Région méditerranée et littoral atlantique, peu présente dans la côte cantabrique. Dans les Îles Baléares elle n'est pas très fréquente.	Cette espèce vit uniquement sur les plages et dunes littorales. Elle est de couleur vert glauque et présente une inflorescence compacte, avec de grands épillets de 2 cm de longueur et 4 mm de largeur. À la base de l'inflorescence, plusieurs feuilles allongées dépassent les fleurs et lui donnent un aspect caractéristique. Les feuilles sont plates et épaisses. Cette espèce possède des rhizomes qui lui permettent de coloniser le système dunaire.	
<i>Echinophora spinosa</i>	Panais épineux	Région méditerranéenne. En Espagne, uniquement à l'Est, de Murcie à Gérone et dans les Baléares.	Plante vivace, charnue, très ramifiée, pouvant atteindre 70 cm de hauteur. Elle a des fleurs blanches et ses feuilles se terminent en épine. Il s'agit de l'une des espèces qui caractérisent le mieux les communautés végétales colonisatrices des bancs de sable maritimes dans les dunes primaires de la côte méditerranéenne.	
<i>Elymus farctus</i>	Chiendent des sables	Atlantique et Méditerranée.	Cette poacée, avec un port moindre que celui de l'oyat, est l'espèce la plus caractéristique des avant-dunes. Il s'agit de l'agent végétal principal dans le processus de construction dunaire pendant ses premières phases de développement. Bien qu'elle n'ait pas autant de capacité de fixation que l'oyat, elle stabilise et recouvre les dunes primaires ou embryonnaires, ce qui permet à l'oyat de les coloniser postérieurement selon le phénomène de succession écologique.	

NOM SCIENTIFIQUE	NOM COMMUN	DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE	DESCRIPTION	PHOTO
<i>Eryngium maritimum</i>	Panicaut maritime	Espèce exclusive des bancs de sable et des dunes côtières actives de la Méditerranée, la Mer Noire et l'Ouest de l'Europe.	Plante vivace très rigide et épineuse. Ses fleurs sont regroupées en glomérules compacts de tonalités bleues. Elle fleurit à la fin du printemps. Elle pousse dans des dunes primaires et surtout dans des dunes secondaires, où elle contribue à fixer le sable en profondeur grâce à sa racine épaisse et forte. Elle est normalement très abondante dans des zones avec une certaine pression humaine due au piétinement, notamment dans les dunes plus proches de la plage.	
<i>Euphorbia paralias</i>	Euphorbe des dunes	Méditerranée, Atlantique et nord de l'Afrique.	Espèce vivace caractérisée par un suc laiteux qui sort lorsque l'on coupe une partie de la plante. Elle fait partie des communautés de plages sèches et des dunes mobiles. Elle possède un système racinaire puissant qui contribue à fixer le sable. Elle est capable de résister à des niveaux moyens d'enfouissement, en formant des monticules dans la plage sèche. Elle pousse essentiellement dans des dunes blanches, où ses racines fixent le sable en profondeur.	
<i>Chamaesyce pepelis</i> (<i>Euphorbia pepelis</i>)	Euphorbe pepelis	Littoral méditerranéen, côte atlantique européenne et Canaries.	Plante annuelle, glauque, un peu charnue, étalée sur le sol, qui possède des feuilles asymétriques vertes, souvent rougeâtres, avec un lobe saillant à la base. Les capsules se trouvent dans la partie basse de la plante, en contact avec le sol. Elle pousse dans les dunes, dans le Nord de la Péninsule et en Catalogne. C'est une espèce difficile à trouver, probablement à cause de l'altération du littoral.	
<i>Helichrysum stoechas</i>	Immortelle des dunes	Toute la région méditerranéenne.	Espèce vivace qui pousse dans des endroits secs, ensoleillés et dégagés. Elle est très fréquente dans les dunes. Ses feuilles sont linéaires, petites et blanchâtres et exhalent une odeur très caractéristique. Les fleurs d'une couleur dorée sont également caractéristiques de cette espèce. Elle peut être très abondante. Elle pousse dans les dunes secondaires stabilisées, et surtout, dans les dunes tertiaires.	

CONSERVATION DES DUNES CÔTIÈRES

NOM SCIENTIFIQUE	NOM COMMUN	DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE	DESCRIPTION	PHOTO
<i>Juniperus phoenicea</i> <i>subsp. turbinata</i>	Genévrier de mer	Méditerranée occidentale depuis le Sud de la France jusqu'au Maroc, Sud et Est de la Péninsule Ibérique.	Le genévrier de mer est un arbre ou un arbuste, parfois couché, pouvant atteindre les 3 mètres, très ramifié, avec une tête large. Ses feuilles ressemblant à des écailles sont généralement imbriquées sur quatre rangs. Les fruits ou galbules ont une forme sphérique de couleur pourpre à maturité. Cette sous-espèce pousse dans des substrats sableux où elle peut former des colonies compactes avec des exemplaires de grande taille.	
<i>Lotus creticus</i>	Lotier de Crète	Toute la côte de la Péninsule Ibérique, bassin méditerranéen et Nord de l'Afrique.	Plante herbacée vivace, à la base ligneuse, recouverte d'une couche tomenteuse dense d'un gris argenté. Des tiges s'élevant à un mètre, rampantes, ramifiées. Espèce caractéristique des plages et des dunes côtières, adaptée à des conditions de mobilité de sable, qui évite l'enfouissement grâce à son port rampant. Elle est fréquente dans des communautés de plage sèche et dans le premier cordon dunaire actif.	
<i>Malcolmia littorea</i>	Julienne des sables	Tout le littoral de la Péninsule Ibérique.	Espèce vivace recouverte de poils. Les fleurs possèdent quatre pétales de couleur rose. Elle pousse dans des bancs de sable et des dunes littorales, tant dans des communautés de plage sèche et le premier cordon dunaire que dans des systèmes dunaires stabilisés. Il est fréquent de la trouver de manière abondante dans des zones dunaires dégradées.	
<i>Medicago marina</i>	Luzerne marine	Méditerranée et Atlantique. Très peu présente sur la corniche cantabrique.	Plante vivace, ligneuse à la base, couchée, de 10 et 50 cm de port. Recouverte de poils blanchâtres qui lui confèrent un aspect cotonneux. Ses fleurs sont jaunes et ses feuilles trifoliolées. Elle se développe essentiellement dans des dunes secondaires, mais peut également pousser dans des dunes primaires évoluées.	
<i>Ononis natrix</i> subsp. <i>ramosissima</i>	Bugrane très ramifiée	Méditerranée.	Buisson visqueux qui peut atteindre 60 cm. Tiges abondantes et ramifiées à la base. Espèce de distribution méditerranéenne qui est présente dans les bancs de sable côtiers de la Péninsule Ibérique depuis les côtes catalanes jusqu'à la zone centrale du Portugal, avec une curieuse disjonction dans la zone occidentale de la côte cantabrique, étant donné qu'elle n'est présente ni sur la côte galicienne ni sur la côte asturienne.	

NOM SCIENTIFIQUE	NOM COMMUN	DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE	DESCRIPTION	PHOTO
<i>Otanthus maritimus</i>	Diotis cotonneuse	Méditerranée et ouest de l'Europe. Toute la côte de la Péninsule Ibérique, bien qu'elle ait presque disparu dans certains endroits.	Plante vivace, avec de nombreuses tiges souterraines horizontales, d'où émanent de nombreuses tiges verticales. Elle se caractérise par un aspect cotonneux, qui lui donne une allure de velours, du fait qu'elle est totalement recouverte d'un duvet blanc. Elle est très abondante dans les communautés de plage sèche et le premier cordon dunaire. Dans les dunes intérieures, elle pousse dans des zones à faible couvert végétal et une certaine mobilité de substrat.	
<i>Pancratium maritimum</i>	Lis maritime	Côtes méditerranéennes, et remonte les côtes atlantiques uniquement jusqu'à la Bretagne française.	Plante bulbeuse, vivace, avec une tige herbacée qui colonise les plages et les dunes ne souffrant pas d'une pollution sévère. Le bulbe est de grande taille et peut arriver à atteindre 25 cm. de hauteur. Les graines sont noires et brillantes avec une taille de 1 cm. Et sont très peu denses, ce qui leur permet de flotter dans la mer pour augmenter les possibilités de déplacement vers des régions éloignées de la plante mère. Dans les cordons dunaires, elle se trouve essentiellement dans les dunes actives.	
<i>Polygonum maritimum</i>	Renouée maritime	Côtes de toute l'Europe. Région méditerranéenne, jusqu'à la Mer Noire. Toute la Péninsule Ibérique.	Espèce vivace, à forte racine, ligneuse. Elle se développe sur les plages et dunes primaires, toujours sur des sols non compactés où se produit un apport continu de matière organique grâce aux marées. Il s'agit de l'une des premières espèces qui apparaissent dans le processus de succession primaire des nouvelles zones émergées.	
<i>Silene nicaeensis</i>		Méditerranée occidentale et Grèce	Herbe annuelle ou pérenne, totalement recouverte de poils glanduleux qui la rendent visqueuse et retiennent du sable collé. Feuilles nombreuses, en rosette basale. Fleurs réunies en inflorescence rose-pâle ou blanchâtre, à pétales enroulés. Fréquente en dune stabilisée.	

2 Annexe

Étude de cas : Los Enebrales (Huelva, Espagne)

CARLOS LEY DE LA VEGA, ECOLOGIA LITORAL SL, ESPAGNE



Photo A.1 Vue aérienne de la zone d'étude, Punta Umbría, Huelva, Espagne. © Google Earth

Introduction et caractérisation

La plage et le système dunaire du site de Los Enebrales, situé à l'ouest de la localité de Punta Umbría (Huelva), s'étendent sur 2 800 m de long et une largeur moyenne d'environ 250 m, dont une cinquantaine correspond à un système dunaire actif et le reste est fixé par boisement (*Pinus pinea*). L'ensemble de ce milieu dénommé «Site naturel de Los Enebrales» bénéficie d'un statut de protection.

La haut de plage est pratiquement dépourvue de végétation et présente périodiquement une

berme de 50 cm à 1 m d'épaisseur sur une grande partie de sa longueur. La dune côtière comporte un réseau de couloirs de déflation d'origine anthropique, conduisant parfois à une rupture du cordon. La dynamique dunaire se caractérise actuellement par une nette tendance régressive résultant de la baisse de l'apport sédimentaire, qui est probablement accentuée par l'effet d'écran qu'exerce la flèche de Nueva Umbría sur ce tronçon de la côte. Le versant au vent du cordon dunaire présente des signes d'érosion marine qui se manifestent par une pente très élevée et des brèches plus ou moins marquées sur toute sa longueur.



Photo A.2 Vue aérienne détaillée du cordon dunaire. © *Google Earth*



Photo A.3 Aspect général du cordon dunaire. © *Carlos Ley*

Vers l'intérieur, le système dunaire se caractérise par la présence de genévriers (*Juniperus oxycedrus subsp. macrocarpa*), une espèce en danger d'extinction, ainsi que des sables (*Juniperus phoenicea subsp. turbinata*) et d'autres espèces d'arbustes typiques des écosystèmes dunaires de ce secteur littoral ; c'est par exemple le cas de la camarine à fruits blancs (*Corema album*), dont la population la plus au sud-ouest de la péninsule se trouve en ce lieu, du ciste jaune (*Halimium halimifolium*) ou du romarin (*Rosmarinus officinalis*). Ces arbustes se présentent sous la forme de petits peuplements forestiers ou de sous-bois dans la pinède de repeuplement fixant le système dunaire interne.



Photo A.4 Genévrier côtier (*Juniperus oxycedrus subsp. macrocarpa*). © Carlos Ley



Photo A.5 Sabine (*Juniperus phoenicea subsp. turbinata*). © Carlos Ley

La problématique

La problématique de ce secteur côtier découle de l'érosion marine et du recul de la ligne de côte vers l'intérieur, érodant le pied de la dune et engendrant des pentes élevées sur le versant du cordon orienté vers la mer.

Par conséquent, l'ensemble du front dunaire recule et des brèches ainsi que des couloirs de déflation apparaissent le long de ce secteur côtier, transportant le sable vers l'intérieur.

D'autre part, la forte pression touristique et le manque de planification conduisent à l'intensification de ces processus érosifs, en raison de la déstabilisation occasionnée par le passage d'un grand nombre de personnes sur le cordon dunaire par l'intermédiaire de ces couloirs de déflation.

Il existe un certain nombre de passerelles qui traversent l'ensemble de la pinède, mais elles se terminent juste avant le cordon dunaire que les usagers franchissent en utilisant le réseau de chemins existants.

Les actions

Les actions réalisées pour freiner le rythme de la dégradation subie par ce tronçon côtier ont eu pour objectif de diminuer l'impact anthropique caractérisé principalement par le passage de



Photo A.6 Vue détaillée du front érodé. © Carlos Ley

CONSERVATION DES DUNES CÔTIÈRES

visiteurs et de véhicules sur le cordon dunaire, de protéger le cordon dunaire pour tenter de retrouver la dynamique des processus naturels, et de coloniser le système dunaire par une partie de la végétation autochtone.

Il s'agit ensuite de concilier les besoins en matière d'utilisation de la plage avec la conservation de la dynamique naturelle.

Les actions menées sur la plage de Los Enebrales ont été les suivantes :

- Installation de capteurs passifs de sable.
- Plantation d'espèces dunaires fixant le sable, comme l'oyat (*Ammophila arenaria*).
- Construction d'accès piétonniers jusqu'à la plage grâce à des passerelles situées au-dessus des dunes, à partir du lieu où les passerelles actuelles se terminent.
- Remodelage du profil de la dune par apport de sable dans les lieux où cela est nécessaire pour relier les passerelles existantes aux nouvelles passerelles.
- Installation d'une clôture de protection dans les zones de plantation et dans les zones où il est nécessaire de limiter l'affluence des visiteurs, même si elles n'ont pas fait l'objet de plantations.
- Élimination des espèces envahissantes comme la griffe de sorcière (*Carpobrotus edulis*).
- Nettoyage et enlèvement des déchets.
- Signalisation au moyen de pancartes et de panneaux informatifs sur l'action menée et l'importance de la conservation des écosystèmes dunaires.



Photo A.7 Junipers et savins côtiers à Cadiz, Espagne. © Carlos Ley

3

Annexe

Étude de cas : Plage Nord de Canet en Roussillon (Pyrénées orientales, France)

HUGUES HEURTEFEUX, AMANDINE BICHOT ET PHILIPPE RICHARD,
EID MÉDITERRANÉE, FRANCE

Identification et caractérisation

La plage Nord de Canet en Roussillon se localise à 42°24'24'' de latitude Nord et 3°00'28'' de longitude Est : c'est une plage touristique très fréquentée l'été. Bien qu'étant adjacente aux zones Natura 2000 et à

quelques ZNIEFF (zones naturelles d'intérêt écologique floristique et faunistique) (ZNIEFF 910030023, Lido de Canet...), elle ne bénéficie pour elle-même d'aucunes mesures de protection.

Cette plage sableuse connaît un régime de marée microtidale (marnage maximum de 30 cm), elle est essentiellement contrainte par



Photo A.8 La plage de Canet en Roussillon à l'été 2007. © EID Méditerranée

CONSERVATION DES DUNES CÔTIÈRES

	SURFACES (m ²)	POURCENTAGE
Dunes embryonnaires	0	0
Dunes mobiles	3 914	16,2
Dunes fixées	9 432	39,1
Dépôts de terre	4 054	16,8
Chemins non aménagés	6 080	25,2
<i>Carpobrotus sp.</i>	200	0,8
Zone goudronnée	450	1,9
Surface totale	24 130	

deux forçages majeurs : le régime des vents (essentiellement de terre, avec la Tramontane qui souffle depuis le Nord-Ouest) et les houles de tempêtes d'Est et de sud-Est.

La superficie des systèmes dunaires de la zone où nous avons menés nos opérations de réhabilitation est résumée dans le tableau ci-dessous :

Ce massif dunaire est de faible altimétrie (2,5 m en moyenne). On y retrouve une succession d'habitats réduite aux groupements de dunes fixées en très forte proportion, aux groupements de dunes vives et de dunes embryonnaires.

Problématique

En 2007, la dune embryonnaire est peu développée puisqu'elle subit le piétinement des usagers et est impactée par les engins de nettoyage de plage. De plus, la végétation de haut de plage est inexistante sur ce secteur.



Photo A.9 Travaux de régalaage des 60 000 m³ de sables amenés par charrois suite à l'extension du port de Canet en Roussillon. © EID Méditerranée

Par contre la dune grise connaît une riche biodiversité floristique avec de nombreuses espèces patrimoniales comme *Crucianella maritima*, *Ephedra distachya*, *Eryngium maritimum*, ou encore *Echinophlo rasioposa*. En revanche, la présence d'espèces exotiques envahissantes abaisse la valeur patrimoniale du site : *Carpobrotus sp.*, *Opuntia sp.*, *Salpichroa organifolia*, *Yucca gloriosa*, *Arundo donax* et *Senecio inaequidens*. Les peuplements d'espèces autochtones s'en retrouvent donc affaiblis puisqu'il y a compétition pour l'espace et les nutriments.

Au sud du secteur, on constate une érosion du pied de dune due à la faible largeur de la plage, ne permettant pas d'absorber l'énergie des houles. On peut également observer de nombreuses formes de dégradations dunaires créées par la



Photo A.10 Reconstitution dunaire par pose de ganivelles. © EID Méditerranée



Photo A.11 Plan des aménagements proposés (en vert la revégétalisation suite à arrachage des exotiques ou à reconstitution dunaire). © EID Méditerranée

destruction de la végétation (surfréquentation) et renforcées par l'action éolienne.

Une évaluation de l'état de conservation a été réalisée en 2007 sur ce site, c'est-à-dire avant les travaux de réhabilitation dunaire. Dans sa globalité, la dune de la plage Nord de Canet-en-Roussillon a un état de conservation médiocre.

Actions réalisées

- Rechargement de la plage (à partir du sable issu de l'extension du port de Canet-en-Roussillon),
- Mise en défens de la dune et canalisation de la fréquentation par une délimitation matérielle (ganivelles) des cheminements,
- Interdiction de la plage aux véhicules à moteur,
- Arrachage des tapis de griffe de sorcières (*Carpobrotus sp*) et des mattes de figuier de barbarie (*Opuntia sp*),
- Travaux de reconstruction dunaire par la pose de ganivelles (par action de piégeage de sable), de géotextile (fixation du sable et aide à la reprise de la végétation) et revégétalisation,
- Concassage des gravats et envoi en décharge agréée.

Conclusions/résultats

Augmentation de la diversité spécifique (multipliée par 3 ou 4 sur la majorité de placettes) et une présence limitée d'espèces rudérales.

Plus précisément, en 2012, on note une très nette diminution de la surface de sable nu, les cheminements sauvages ont été recolonisés par la végétation dunaire (sur un total de 25% de la surface, ils ne représentent plus que 10% des surfaces).

Par ailleurs, on constate :

- Une bonne reprise de la végétation spontanée,
- Une augmentation de la biodiversité floristique,
- Que les ouvrages de piégeage sableux sont pour la plupart sursaturés au Nord du site, preuve d'une dynamique sédimentaire positive,
- Un état global de conservation des différents habitats dunaires amélioré : il passe de mauvais à moyen,
- Au sud, la problématique d'érosion de la dune est toujours d'actualité.

Par contre le site n'est pas assez entretenu depuis la fin des travaux (2007) et l'on constate

- Une reprise des espèces envahissantes arrachées en 2006,
- Un fort développement du muguet de la pampa (*Salpichroa oranifolia*),
- Des dégradations des ouvrages de ganivelles.

Souvent les crédits sont débloqués pour des opérations phares de réhabilitation dunaire, liés aussi dans ce cas à une possibilité de rechargement de sable suite aux travaux d'extension du port de Canet-en-Roussillon ; malheureusement une fois l'opération menée, il manque des crédits de fonctionnement qui permettent de suivre l'état de conservation du site et de mener des opérations d'entretien nécessaires.

Sur ce site, nos suivis montrent qu'une petite remise en état serait à entreprendre ; par ailleurs on constate aussi qu'il est utopiste de penser pouvoir éradiquer les espèces exotiques envahissantes juste sur une saison, même dans le cadre d'une grosse opération.

4 Annexe

Étude de cas : L'écosystème dunaire de l'embouchure de la Moulouya (Maroc)

MELHAOUI MOHAMMED – ELHAFID LATIFA

UICN CEC MAROC – UNIVERSITÉ MOHAMED 1ER OUJDA - MAROC

Identification et caractérisation

Dans l'écosystème dunaire de l'embouchure de la Moulouya au Maroc (Fig A.1), la formation des dunes littorales est la résultante de l'action conjointe du vent, du sable et des végétaux. Le sable provient de la haute et moyenne Moulouya, des roches arrachées aux montagnes de l'Atlas et transportées par les fleuves et les courants marins. Ce sable peut être siliceux ou calcaire selon la nature des roches traversées par la

Moulouya qui alimentent le système. Le vent est également une composante nécessaire à la formation des dunes (Sbai, 2004). Les vents marins qui soufflent de la mer vers la terre traversent la plage où la mobilité du substrat et l'action des vagues inhibent le développement de toute végétation. Pour que le sable transporté par vent se dépose et s'accumule il est nécessaire que la vitesse du vent soit ralentie par un obstacle. Les végétaux peuvent jouer ce rôle. Le premier obstacle rencontré par le vent est la laisse de mer (débris végétaux arrachés par la



Figure A. 1 : Localisation de l'embouchure de la Moulouya au Maroc. © Melhaoui Mohammed / Latifa Elhafid

CONSERVATION DES DUNES CÔTIÈRES

mer et déposés par les grandes vagues) qui initie la formation des dunes embryonnaires. Ces dernières seront colonisées par des végétaux pionniers (comme *Agropyron junceum*) qui contribueront à l'édification des dunes.

L'apparition d'*Ammophila arenaria* (ou oyat, communément appelé SemarLbhar) transformera ces dunes en dunes mobiles ou avant dunes.

Ainsi s'amorce l'édification du cordon littoral.

Cette graminée qui adopte une stratégie d'évitement est très adaptée au stress hydrique et salin et à l'ensablement. Elle joue plusieurs rôles écologiques dont le plus important est la fixation du sable de la zone littorale de l'Embouchure de la Moulouya (Photo A.12).



Photo A.12 Dunes bordières de l'Embouchure de la Moulouya (Maroc). © Melhaoui Mohammed / Latifa Elhafid

Problématique

Les dunes fournissent la meilleure des protections contre les tempêtes et les débordements de la mer.

Les causes de dégradation de la dune sont nombreuses :

- Les causes naturelles se traduisent par une

diminution de la fourniture en sables et en galets, diminution qui a rendu négatif le bilan sédimentaire. Les cours d'eau actuels livrent surtout à la mer des limons et des argiles, les éléments plus grossiers étant abandonnés à l'amont de l'embouchure par suite de une très faible pente.

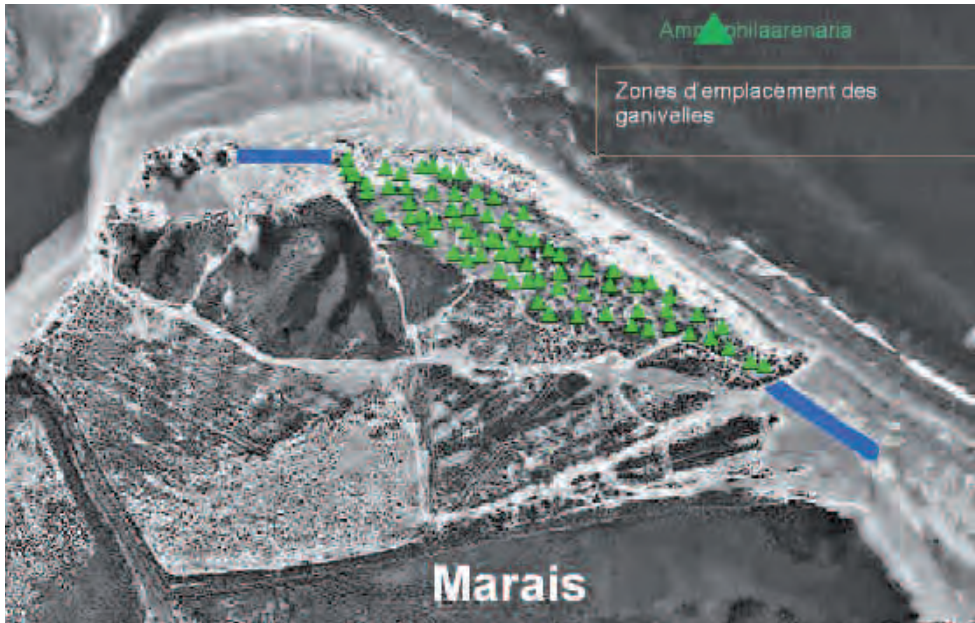


Photo A.13 Image satellite montrant les dunes bordières étudiées. © Google Earth



Photo A.14 Pillage du sable dunaire dans l'embouchure de la Moulouya. © Melhaoui Mohammed / Latifa Elhafid

- Les actions anthropiques ont un rôle perturbateur dans l'équilibre sédimentaire des rivages marins. En particulier **les travaux d'intérêt public** peuvent déclencher ou aggraver l'érosion sur des plages voisines. A cet égard, la construction de boulevards en front de mer a souvent eu des effets désastreux lorsqu'ils ont été trop

près du trait de côte. Une plage, amputée de sa partie haute, voit l'équilibre de son profil rompu. De plus, la présence d'un mur vertical sur lequel les vagues viennent déferler pendant les tempêtes renforce la turbulence de la nappe de retrait, d'où l'enlèvement du sable sur le bas de plage. Le résultat final est parfois l'ablation totale de la plage. A signaler le phénomène illégal du pillage du sable assez fréquent (Photo 3).

- **L'édification des retenues de barrages sur la Moulouya se traduit par une réduction des apports alluviaux en aval de l'ordre de 95%.** Ceci a entraîné un amaigrissement puis un recul de la plage, du fait qu'elles entravent les échanges de sable entre la plage et les dunes et que ces dernières ne peuvent alors plus assurer leur rôle protecteur face à l'érosion marine et éolienne.

Au niveau de l'embouchure de la Moulouya, le piétinement et les balades par des Quads des estivants ont également entraîné à travers le temps une disparition de la dune bordière.

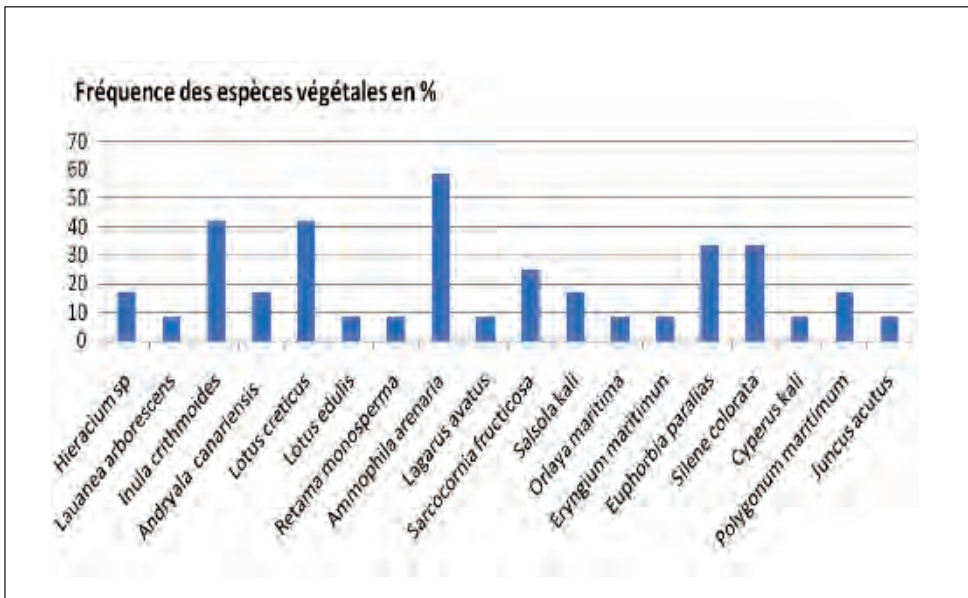


Figure A.2 : Fréquence des espèces végétales en %. © Melhaoui Mohammed / Latifa Elhafid

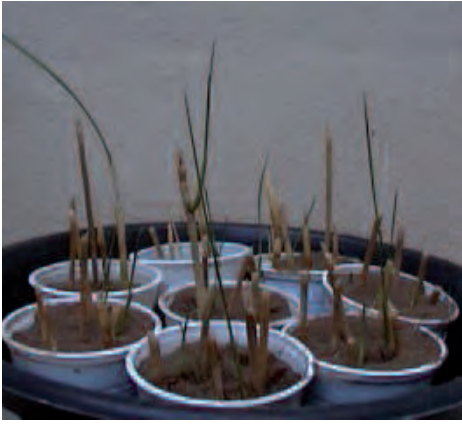


Photo A.15 Production de plants d'oyat par voie végétative. © Melhaoui Mohammed / Latifa Elhafid



Photo A.16 Repérage des dunes érodées. © Melhaoui Mohammed / Latifa Elhafid

Actions réalisées

Etude de la végétation dunaire

Cette étude a permis de mieux connaître la végétation dunaire de l'Embouchure de la Moulouya qui reste très riche et un élément important de la biodiversité de l'écosystème dunaire.

Production de plants d'oyat par voie végétative

La production de plants d'oyat par voie végétative au laboratoire a montrée des résultats rapides et intéressants (Photo A. 15). En effet, *Ammophila arenaria* a montré un grand succès au niveau mondial dans les lieux où elle a été transplantée dans le but de lutter contre la dégradation des dunes bordières.



Photo A.17 Travaux de mise en place des ganivelles. © Melhaoui Mohammed / Latifa Elhafid



Photo A.18 Ganivelles installés. © Melhaoui Mohammed / Latifa Elhafid



Photo A.19 Recouvrement des ganivelles par le sable et installation de la végétation.

© Melhaoui Mohammed / Latifa Elhafid

Repérage des dunes érodées

Pour localiser la zone d'intervention au niveau dunaire, nous avons fait sur le terrain un repérage des principales des dunes érodées. (Photo A.16).

Réhabilitation des dunes bordières érodées par les ganivelles

La mise en place d'un système de ganivelles (Photo A.18) pour protéger et reconstituer les dunes bordières dégradées et lutter contre

l'érosion des dunes est un exemple pilote à l'échelle de la Méditerranée marocaine.

Conclusions/résultats

L'Embouchure de la Moulouya abrite une flore psammophile diversifiée adaptée à son biotope dunaire. La végétation des dunes littorales appartient à quatre familles principales : Les Astéracées, les Fabacées, les Poacées et les Chenopodiacées. *Ammophila arenaria* est une espèce constante caractéristique de ces dunes, elle colonise trois zones dunaires : les dunes embryonnaires, les dunes mobiles et les dunes semi-fixées. La densité, la dominance et la flore associée à cette espèce constitue la biodiversité de l'écosystème dunaire qu'il faudra protéger. Au niveau des aménagements des ganivelles, le recouvrement a atteint 99% (Figure A.3 et Photo A.19). Le sable continuant à s'accumuler, le vent se chargeant de le déplacer vers l'arrière-pays. Cela a permis l'installation de la végétation qui va reprendre son rôle de fixatrice de sable.

La plantation de l'Oyat suite au recouvrement des ganivelles est une technique simple et rapide pour restaurer la végétation des dunes dégradées. Elle a donné des résultats positifs dès les premiers mois avec un recouvrement de 50% dans les premiers rangs des ganivelles, accompagné d'une apparition de végétation caractéristique des dunes embryonnaires.

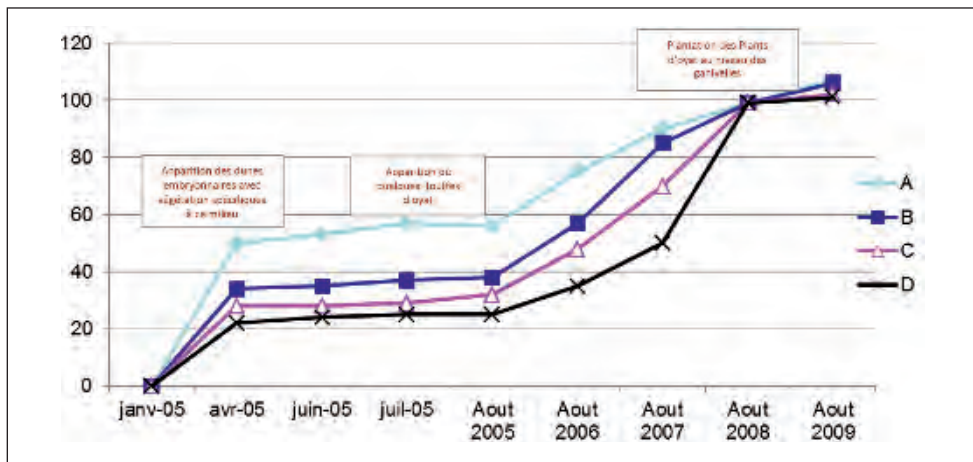


Figure A.3 : Recouvrement en sable des ganivelles de 2005 à 2009. © Melhaoui Mohammed / Latifa Elhafid

Recommandations et perspectives

Cette étude pilote a permis de formuler les recommandations et les perspectives suivantes pour le futur :

- Prendre en compte la composante des dunes bordières dans les plans d'aménagement des côtes et sensibiliser les élus du littoral.
- L'expérience des ganivelles peut être répliquée sur les bras de la lagune de Nador pour restaurer les dunes bordières dégradées et autres systèmes dunaires en dégradation.
- L'utilisation des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) et la station Total permettrait à long terme de connaître de façon fiable les tendances de l'évolution de certains phénomènes affectant l'équilibre écologique et socio-économique du littoral.

- L'installation d'une station météorologique sur le littoral permettrait, également, l'acquisition des données climatiques sur la zone pour mieux comprendre le fonctionnement des milieux dunaires.
- La protection des écosystèmes dunaires devrait s'accroître avec la nouvelle loi sur les aires protégées.
- Aujourd'hui, un Plan de gestion des systèmes dunaires est plus que nécessaire avec une sensibilisation de toutes les parties prenantes du littoral pour conserver les écosystèmes dunaires et continuer à lutter contre le pillage illégal des sables.

La biodiversité des écosystèmes dunaires de l'Embouchure de la Moulouya est actuellement menacée par la pression anthropique, d'où la nécessité d'un plan de gestion adéquat assurant un développement durable dans la zone littorale.

BIBLIOGRAPHIE

1. **BOUZIANI, O (2005)** - Etude des dunes bordières du SIBE de la Moulouya (Méditerranée marocaine). Mémoire de fin d'étude (DESA), Univ. Mohamed 1er, Oujda, 78 p.
2. **BOUZIANI, W, MELHAOUI, M & EL HAFID, L (2007)** - Réhabilitation des dunes bordières en Méditerranée marocaine : Expérience pilote au Maroc par les ganivelles. Seminar on Coastal Water Management and Sustainable Use of Marine Resources". INOC Proceedings N° 12, 2007 : 122 - 129.
3. **CHERGUI, A (2008)** - Contribution à l'étude de la végétation des dunes bordières de l'embouchure de la Moulouya : cas de l'oyat (*Ammophila arenaria*). Mémoire de fin d'étude (MASTER), Univ. Mohamed 1er, Oujda, 94 p.
4. **MELHAOUI, M, ELHAFID, L PASKOFF, R† & BOUZIANI, O (2006)** - Gestion intégrée des espaces littoraux en Méditerranée marocaine : cas du SIBE de la Moulouya. Acte du séminaire en Tunisie, Novembre 2006. En hommage à Roland Paskoff.
5. **PASKOFF R. 2005-**. Caractéristiques et gestion d'un type de dune littorale : les avants dunes. Sécheresse., vol 16, n°4, pp. 247-253.
6. **SBAI, A et AJAOUN, M (2004)** - Dynamique et évolution du trait de la côte du littoral méditerranéen oriental. 12ème Rencontre des Géomorphologues marocains. Rabat 23, 24 et 25 septembre 2004. P.109-125.

5 Annexe

DECLARATION DE VALENCE

CONSERVATION ET REHABILITATION ECOLOGIQUE DES SYSTEMES DUNAIRES CÔTIERS AU MAGHREB

Ces dernières années le littoral méditerranéen est devenu une préoccupation permanente pour les pouvoirs publics, les scientifiques et même la société civile. Une coopération internationale et régionale est donc devenue nécessaire pour la gestion des zones côtières avec pour but de faciliter l'échange de connaissances, d'expériences et d'idées en matière de coopération pour la préservation et de protection des espaces dunaires.

Dans ce contexte, un atelier international sur l'Analyse des Impacts, la Conservation et la Réhabilitation Ecologique des Systèmes Dunaires Côtiers au Maghreb, organisé par l'UICN-Med (Centre de Coopération pour la Méditerranée de l'UICN), avec le soutien financier de l'AECID (Agence Espagnole de Coopération Internationale pour le Développement), s'est tenu du 14 au 18 novembre 2011, à Cadix et à Valence, en Espagne.

Lors de ces 5 jours d'atelier technique, les participants ont souligné la spécificité des écosystèmes dunaires, domaines côtiers qui nécessitent une attention particulière du fait de leur grande vulnérabilité. Et pour cela, les recommandations suivantes ont été formulées :

Considérant que les dunes côtières présentent un certain nombre de particularités et de spécificités qui affectent leur fonctionnement et par conséquent leur gestion,

Rappelant le rôle prépondérant des dunes côtières pour l'ensemble de la Méditerranée et leur influence sur la protection du littoral : rôle d'amortisseur souple face aux tempêtes, rôle de prévention des risques d'inondation,

conservation d'écosystèmes rares et contrôle de la ligne de côte,

Conscients des activités sociales et économiques qui ont lieu dans les écosystèmes dunaires côtiers, et de la contribution des dunes côtières à l'économie touristique,

Enfin, considérant l'importance de l'information, de la communication et de l'échange des connaissances comme un aspect essentiel du développement durable pour la région,

Il est recommandé de :

1. Mettre en place un groupe de gestionnaires, de chercheurs et de personnes intéressées à la restauration des dunes ;
2. Promouvoir des relations de travail et de partenariat entre les universités /centres de recherche et les gestionnaires ;
3. Sensibiliser les bailleurs de fonds et les administrations compétentes pour une allocation de budgets suffisants pour la gestion et en conservation des dunes ;
4. Explorer les liens possibles entre la conservation des dunes et l'accomplissement d'engagements internationaux (Convention de Barcelone, UNFCCC, UNCBD, UNCCD...);
5. Élaborer une stratégie qui comprend : l'identification et le diagnostic de l'état actuel de la dune, la définition claire des objectifs de gestion et la conception de

CONSERVATION DES DUNES CÔTIÈRES

mesures de soutien à la restauration dans les secteurs affaiblis ou menacés ;

Plus spécifiquement, dans les domaines de la **connaissance**, de la **recherche** et du suivi scientifique :

6. Promouvoir la recherche scientifique et établir des plans de suivi multidisciplinaires des systèmes dunaires ;
7. Promouvoir la coopération et l'échange d'expériences Nord-Sud et Sud-Sud ;
8. Effectuer un suivi périodique des dunes, par exemple à travers la création d'observatoires du littoral, en l'associant à un suivi scientifique des données météorologiques ;
9. Etablir des méthodologies régionales comparables, par exemple en identifiant un site pilote par pays (Maroc, Algérie et Tunisie), avec un protocole commun de suivi ;
10. Actualiser la liste rouge (nationale) des espèces de flore dunaire menacées et préparer les listes rouges régionales ;
11. Produire un manuel d'identification de la flore et de la faune dunaire, ainsi que de leurs paysages caractéristiques ;
12. Etablir une cartographie qui permette une délimitation claire entre domaine forestier et

domaine public maritime, et développer un SIG sur l'état actuel des dunes ;

13. Identifier les zones dunaires dégradées et mettre en pratique des plans de restauration ;

Et enfin, dans les domaines de la **gestion** et de la **restauration** :

14. Adapter les stratégies d'action aux processus naturels (évolution prévue et temps) ;
15. Utiliser des matériaux locaux rustiques et économiques pour la gestion et la restauration, et créer des emplois au niveau local ;
16. Promouvoir l'utilisation d'espèces autochtones ;
17. Appuyer les systèmes traditionnels de gestion des dunes qui permettent de conserver les ressources, par exemple les "wiljas" de Tunisie ou les casiers à base de rachis de palmier au sud du Maroc. Aller plus loin dans l'utilisation des connaissances fournies par l'ethnobotanique ;
18. Prendre en considération les dunes embryonnaires et la matière organique lors des opérations de nettoyage des plages ;
19. Développer le cadre juridique et institutionnel relatif aux écosystèmes dunaires.

En particulier, il faut souligner que:

- i. Le système plage-dune (et, lorsque c'est le cas, les dépressions humides intradunaires) doit être considéré comme un système unique ;
- ii. Les systèmes plage - dune 8 sont des systèmes fragiles, mobiles et dynamiques par nature ;
- iii. L'évolution de la côte dépend du bilan sédimentaire, qui doit être évalué et suivi au sein des différentes cellules hydro-sédimentaires, unités fonctionnelles de base du fonctionnement côtier ;
- iv. La résilience du système dunaire est directement liée à la largeur disponible actuelle de la dune (mobilité) et à son degré de naturalité (biodiversité).

6 Annexe

GLOSSAIRE

Adaptation osmotique : échange qui se fait au niveau des cellules des plantes, dû à des différences de concentration.

Bilan sédimentaire : différence entre la quantité de sédiments entrants et sortants

Blowout : mot anglais, dépression dans la dune creusée par l'érosion du vent

Communauté végétale¹ : groupe de plusieurs espèces de plantes qui partagent un même habitat ou espace et interagissent à travers des relations spatiales et trophiques ; typiquement caractérisé en référence à une ou plusieurs espèces dominantes.

Couverture végétale : surface occupée par la végétation

Cuticule : couche mince recouvrant la paroi des végétaux.

Déflation : abaissement du niveau de la dune par l'effet du vent qui emporte le sable

Dépression interdunaire : cuvette creusée par le vent entre les dunes.

Diversité génétique : variété et différents types de gènes au sein d'une espèce ou d'une population.

Diversité végétale : elle représente à la fois le nombre d'espèces de plantes (richesse) et le nombre d'individus de chacune d'elle (abondance)

Dune : Monticule, butte, tertre, crête ou colline peu élevé de matériel granulaire libre et apporté par le vent (généralement du sable, parfois des cendres volcaniques), soit dé-

pourvu ou couvert par la végétation, capable de mouvement depuis son emplacement mais gardant toujours une forme caractéristique (Source: BJGEO)

Dune embryonnaire : accumulation de sable de faible hauteur et peu développée, fragile et à partir desquelles les dunes croissent.

Eclaircissage : arrachage d'un certain nombre de plantes

Eclatage : technique de multiplication végétative qui consiste à prélever des plants au niveau des racines pour les replanter ailleurs.

Espèce annuelle : espèce dont le cycle vital s'effectue en un an.

Espèce exotique : espèce s'étant établie à l'extérieur de son aire d'habitat naturel.

Fixation des dunes : le fait de faire perdre leur mobilité aux dunes avec l'aide le plus souvent de la végétation.

Fumure : engrais que l'on apporte au sol pour une culture

Génome : ensemble des gènes portés par les chromosomes.

Lithologie siliceuse : roche qui contient de la silice

Lixiviation : percolation lente de l'eau à travers le sol, accompagnée de la dissolution des matières solides qui y sont contenues.

Multiplification végétative : mode de propagation des plantes dans lequel la reproduction sexuée n'intervient pas.

Mycorhizes : résultat d'une association bénéfique réciproque entre des champignons et les racines des plantes.

Physiologie des plantes : caractéristiques du fonctionnement des organes des plantes

Plante pérenne : plante qui vit plus de deux ans voire beaucoup plus longtemps

Plantule : jeune plante germée, se nourrissant au dépend des réserves de la graine

Prograde : qui avance

Pubescence : présence de poils sur une tige ou une feuille

Récessif : qui recule

Rhizome : tige souvent souterraine d'une plante, des racines et des pousses partent de ses nœuds.

Saltation : transport de particules par un fluide tel que le vent ou l'eau avant d'être redéposé sur terre.

Sarclage : action de débarrasser une culture de ses mauvaises herbes

Stolons : une pousse qui courbe vers le sol ou croît horizontalement et produit des racines et des pousses à partir de ses nœuds.

Succession écologique : remplacement naturel progressif d'une espèce ou d'une communauté par une autre dans un écosystème jusqu'à son installation stable.

Système dunaire actif : ensemble des dunes qui sont mobiles du fait de la mise en mouvement de leur masse de sable par le vent, les embruns

Système plage/dune : il inclut la partie terrestre de la ligne moyenne de basse mer jusqu'à la limite à l'intérieur des terres de la dune

Végétation psammophile : végétation vivant sur des substrats sableux

Washover (ou overwash): Mot anglais, zone dans laquelle la mer a submergé les dunes laissant un dépôt de sable derrière la dune.

Références Bibliographiques

- Akeroyd, J. 1997. Interspecific variation in European coastal plant species. En : Goodall, D.W. y Van Der Maarel, E. (eds.), *Ecosystems of the world : Dry coastal ecosystems*. Elsevier, 2c : 145-162.
- Andersen, U.V. 1993. Dispersal strategies of Danish seashore plants. *Ecography* 16 : 289-298.
- Asensi, A. & Diez, B. 1993. Dry coastal ecosystems of southeastern and eastern Spain. En : Goodall, D.W. y Van Der Maarel, E. (eds.), *Ecosystems of the world : Dry coastal ecosystems*. Elsevier, 2a : 363-368.
- Bagnold, R.A., 1941. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Chapman Hall, London, 265 pp.
- Bañares, Á., G. Blanca, J. Güemes, J.C. Moreno & S. Ortiz (eds.)- (2004). *Atlas y Libro Rojo de la Flora Vasculare Amenazada de España*. Dirección General de Conservación de la Naturaleza.. Madrid. 1069 pp.
- Barbour, MG (1978). Salt spray as a microenvironmental factor in the distribution of beach plants at Point Reyes, California. *Oecologia*, 32, 213-224.
- Barbour, M.G., DeJong TM and Pavlik BM (1985). Marine beach and dune plant communities. In : *Physiological ecology of North American plant communities*. BF Chabot and HA Mooney (eds). Chapman and Hall, New York.
- Battiau-Queney Y. et Clus-Auby C. (Coordinatrices), 2010. *Les ateliers de l'EUCC-France, de la connaissance des systèmes littoraux à la gestion intégrée des zones côtières*. Editeur Union des océanographes de France. 186 pages.
- Bauer, B.O. and Sherman, D.J., 1999. Coastal dune dynamics : problems and prospects. In : Goudie, A.S., Livingstone, I. and Stokes, S., Editors, 1999. *Aeolian Environments, Sediments and Landforms*, Wiley, Chichester, pp. 71-104.
- Bird, E. C. F. (1990). Classification of European dune coasts. (In : Bakker, Th. W. & P. D. Jungerius, J. Klijn (eds.) : *Dunes of the European coasts*, 15-24. *Catena supplement* 18. Cremlingen).
- Bodere, J.C. ; Cribb, R. ; Curr, R. ; Davies, P. ; Hallegouet, B. ; Meur, C. ; Piriou, N. ; Williams, A. y Yoni, C. 1991. La gestion des milieux dunaires littoraux. Evaluation de leur vulnérabilité à partir d'une liste de contrôle. Etude de cas dans le sud du Pays de Galles et en Bretagne occidentale. *Norois*, 38, 151,279-298.
- Boyce SG (1954). The salt spray community. *Ecological Monographs*, 24, 29-69.
- Brown, A. C. y McLachlan, A., 1994. *Ecology of sandy shores*. Elsevier, Amsterdam.
- Brown, J.F. 1997. Effects of experimental burial on survival, growth, and resource allocation of three species of dune plants. *Journal of Ecology* 85 :151-158.
- Cain ML, Subler S, Evans JP and Fortin M-J (1999). Sampling spatial and temporal variation in soil nitrogen availability. *Oecologia*, 118, 397. 404.
- Campos, J.C., Herrera, M., Biurru, I., Loidi, J. 2004. The role of alien plants in the natural coastal vegetation in central-northern Spain. *Biodiversity and Conservation* 13 : 2275-2293.
- Carter, R.W.G. (1988) : *Coastal Environments. An Introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines*. Academic Press.
- Carter, R.W.G. 1990. The geomorphology of coastal dunes in Ireland. En : Bakker, Th. W., Jungerius, P.D. y Klijn, J.A. (eds), *Dunes of European coasts ; geomorphology-hydrology-soils*. *Catena Supplement*, 18 : 31-40.
- Carter, R.W.G. 1991. Near future sea level impacts on coastal dunes landscapes. *Landscape Ecology*, 6 ½, 29-39.

- Carter, R.W.G. 1995. *Coastal environments : an introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines*. 5th ed. Academic press, London.
- Clark, J.S. 1986. Coastal forest tree populations in changing environment, SE Long Island, New York. *Ecological Monograph*, 56 : 97-126.
- Cooke, R.U., Warren, A. y Goudie, A. 1993. Desert geomorphology. ECL Press, London.
- Costa, C.S.B., Cordazzo, C.V. y Seelinger, U. 1996. Shore disturbance and dune plant distribution. *Journal of Coastal Research* 12 : 133-140.
- Costa, M. & Mansanet, J. 1981. Los ecosistemas dunares levantinos : la Dehesa de la Albufera de Valencia. *Actas III Congr. OPTIMA. Anales Jard. Bot. Madrid* 37 : 277-299.
- Crespo, M.B. & Manso, M.L. 1990. Notas sobre la vegetación de las dunas de Elche (Alicante). *Ecología* 4 :67-88.
- Dalton, D.A., Kramer S., Azios N, Fusaro S., Cahill E, Kennedy, C. 2004. Endophytic nitrogen fixation in dune grasses (*Ammophila arenaria* and *Elymus mollis*) from Oregon. *Microbiology Ecology* 49 :469-479.
- Davis, M.A., Grime, J.P. and K.Thompson, 2000. Fluctuating resources in plant communities : a general theory of invasibility. *Journal of Ecology* 88 : 528-534.
- Davy, A. J. y Figueroa, M. E. 1993. The colonization of strandlines. En : Miles, J. y Walton, D. W. H. (eds.) *Primary succession on land*. Blackwell, Oxford, 113-131.
- Dech, J.P. y Maun, M.A. 2005. Zonation of vegetation along a burial gradient on the leeward slopes of Lake Huron sand dunes. *Canadian Journal of Botany* 83 : 227-236.
- Deshmukh, IK (1977). Fixation, accumulation and release of energy by *Ammophila arenaria* in a sand dune succession. In : Ecological processes in coastal environments in a sand dune succession. RL Jefferies and AJ Davy (eds). Blackwell Scientific Publications, London, 353-362.
- Devesa Alcaraz, J.A. 2006. La protección de la flora vascular en España peninsular y Baleares. *Ecosistemas*. 2006/2.
- Doing, H. 1985. Coastal fore-dunes zonation and succession in various parts of the world. *Vegetatio*, 61 :65-75.
- Dyer, K., 1986. Coastal and Estuarine Sediment Dynamics. John Wiley, Chichester.
- European Comision DG Environment 2003. Interpretation manual of European Union habitats EUR 25 - October 2003.
- European Environmental Agency 2006. The changing faces of Europe's coastal areas. EEA Report n°6.
- Favennec J. (Direction), 2002. Connaissance et gestion durable des dunes de la côte atlantique. Editeur ONF, dans la série les dossiers forestiers. 394 pages.
- Favennec J., 2007. Principes et évolutions de la gestion des dunes. Editeur ONF, Rendez-vous techniques n° 17, pages 22-30.
- Flemming, C.A. y Townend, I.H., 1989. A coastal management database for East Anglia. *Coastal Zone'89*, 4092-4107.
- Flor, G. (1980). Las dunas costeras de Cantabria : valores singulares geológicos. *Comunicaciones, 1ª Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*. 22 pp. Santander.
- Flor, G. (1981). "Las dunas eólicas costeras de la playa de Xagó (Asturias)". *Trabajos de Geología*, Univ. de Oviedo, 11, 61-71.
- Flor, G. (1983). "Las formaciones dunares eólicas del litoral asturiano". *Rev. Astura*, n° 1. Oviedo.
- Flor, G. (1992). Catalogación y tendencias de los procesos de erosión/sedimentación en los campos dunares de la costa de Galicia (NW de España). *Thalassas*, 10. 9-33.
- Flor, G. (1998). Classification and characterization of eolian dunes in temperate rocky coast. The Spanish Peninsular Eolian Fields. (En : Soares de Carvalho, G., Veloso, F.& Taveira Pinto, F. : Dunas da zona costeira de Portugal. Eurocast Portugal, 29-42).
- Flor, G. (2004). Geología Marina. Área de Estratigrafía y Sedimentología. Departamento de Geología. Universidad de Oviedo.
- Folk, R. and Ward, W.C., 1957. Brazos River bar : a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.
- Fryberger, S.G., 1979. Dune forms and wind regimes. In E.D. McKee (ed.), A study of global sand seas, 137-140, Unites States Geological Survey, Professional Paper 1052.
- Gallego Fernández, J.B., García Mora, M.R. Ley Vega de Seoane, C. 2003. Restauración de Ecosistemas Dunares Costeros. En : Rey Benayas, J.M. Espigares, T. Nicolau, J.M. (eds.) Restauración de Ecosistemas Medite-

- rráneos. Alcalá de Henares. Universidad de Alcalá de Henares.. Pag. 157-172.
- Gallego Fernández, J.B., Muñoz Vallés, S. Dellafiore, C. 2006. Flora y Vegetación de la Flecha litoral de Nueva Umbría, Lepe-Huelva. Ayuntamiento de Lepe, 134 pp.
- Gallego Fernández, J.B., Muñoz Vallés, S. Dellafiore, C. 2006b. Introduction of Exotic Plants Caused By Beach and Dune Management. Proceeding of the Second International Conference on the Management of Coastal Recreational Resources-Beaches, Yaching and Coastal Ecotourism, Malta Gozo. Euro-Mediterranean Centre on Insular Coastal Dynamics ; Foundation for International Studies. Pag. 355-365.
- García Mora, M.R., J.B. Gallego Fernández, and A.T. Williams. 1998. The coastal area of SW Spain : between conservation and tourist development. Páginas 177-186 en J.L. Monsó de Prat, editor. Proceedings of the Four International Conference Littoral'98. Barcelona.
- García Mora, M.R., J.B. Gallego Fernández, y F. García Novo. 1999. Plant functional types in relation to foredune dynamics and the main coastal stresses. Journal of Vegetation Science 10 : 27-34.
- García Mora, M.R., J.B. Gallego Fernández, y F. García Novo. 2000. Plant diversity as a suitable tool for coastal dune monitoring. Journal of Coastal Research 16 :990-995.
- García Mora, M.R., J.B. Gallego Fernández, A.T. Williams, y F. García Novo. 2001. A coastal dune vulnerability classification : SW Iberian Peninsula case study. Journal of Coastal Research 17 :802-811.
- García Novo, F., Ramírez Díaz, L. y Torres Martínez, A. 1975. *El sistema de dunas de Doñana*. Naturalia Hispánica, 5, ICONA, Madrid.
- García Novo, F. 1976. Ecophysiological aspects of the distribution of *Elymus arenarius* and *Cakile maritima* on the dunes of Tents-Muir Point.(Scotland). *Oecol.Plant.* 11(1) :13-24.
- García Novo, F. 1979. The ecology of vegetation of the dunes in Doñana National Park (South-West Spain). En : Jefferies, R.L. y Davy A.J. (eds), *Ecological processes in coastal environments*. Blackwell, Oxford, 571-592.
- García Novo, F. 1990. Origin of the Doñana ecosystem. En : *Doñana National Park*. ICONA, Madrid, 199-205.
- García Novo, F. 1997. The Ecosystems of Doñana National Park. En : García Novo, F., Crawford, R.M.M. y Díaz Barradas, M.C. (eds.) *The ecology and conservation of European dunes*. Univ. Sevilla. Sevilla, 97-116.
- García Novo, F. y Merino, J., 1993. Dry coastal ecosystems of southwestern Spain. En : Goodall, D.W. y Van Der Maarel, E. (eds.), *Ecosystems of the world : Dry coastal ecosystems*. Elsevier, 2a : 349-362.
- García Novo, F. y Merino, J., 1997. Pattern and process in the dune system of the Doñana National Park. En : Goodall, D.W. y Van Der Maarel, E. (eds.), *Ecosystems of the world : Dry coastal ecosystems*. Elsevier, 2c : 453-468.
- García Novo, F., Crawford, R.M.M. y Díaz Barradas, M.C. 1997. The ecology and conservation of European dunes. Universidad de Sevilla. Sevilla.
- García Novo, F., María Cruz Díaz Antunez-Barradas, María Zunzunegui Gonzalez, Juan Bautista Gallego Fernandez, María Rosario García Mora : Plant Functional Types in Coastal Dune Habitats. Coastal Dunes, Ecology and Conservation. Berlin, Alemania. Springer. Vol. 1. 2004. Pag. 155-169. ISBN : 3-540-40829-0.
- García Novo, F., Marín Cabrera, C. 2005. Doñana : Agua y Biosfera. Madrid, España. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Ministerio de Medio Ambiente. 353 pp.
- Gillette, D.A. and Stockton, P.H. 1989. The effect of nonerodible particles on wind erosion of erodible surfaces. Journal of Geophysical Research 94(D10) :12885-12893.
- Goldsmith, V. 1977. Coastal processes and resulting forms of sediment accumulation : Currituck Spit, Virginia/North Carolina. *Spec. Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering N° 143*. Virginia Inst. of Marine Science. Gloucester.
- Goldsmith, V. (1985). Coastal dunes. (In : Davis, R. A. (ed.), *Coastal Sedimentary Environments*, 2nd edn. Springer Verlag, New York, 171-236).
- Gómez Campo, C. (1987). *Libro Rojo de especies vegetales amenazadas de España peninsular e Islas Baleares*. ICONA. Madrid.
- Gornitz, V. y Kanciruk, P., 1989. Assessment of global coastal hazards from sea level rise. *Coastal Zone'89*, 1345-1359.

- Gornitz, V., 1991. Global coastal hazards from future sea level rise. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (Global and Planetary Change Section), 89 : 379-398.
- Granados Corona, M. ; Martín Vicente, A.& García Novo, F. ; (1988). *Long term vegetation changes on the stabilized dunes of Doñana National Park (SW Spain). Vegetatio* 75 :73-80.
- Granados Corona, M. ; Martín Vicente, A. ; Fernández Alés, R. & García Novo, F. ; (1984). *Étude diachronique d'un écosystème a longue échelle. La pinède de Marismillas (Parc National de Doñana). Mélanges de la Casa de Velazquez* XX, pp :393-481.
- Hardisty, J. and Whitehouse, R.J.S., 1988a. Evidence for a new sand transport process from experiments on Saharan dunes. *Nature*, 332, 532-534.
- Harris D and Davy AJ (1988) Carbon and nutrient allocation in *Elymus farctus* seedlings after burial with sand. *Annals of Botany*, 61, 147-157.
- Hesp, P.A. y Short, A. 1980. Dune forms of the Younghusband Peninsula, SE South Australia. *Proceeding of the Conference on Aeolian Landscapes in the semiarid region of SouthEastern Australia*, Australian Society of Soil Science, Riverina Branch, 65-66.
- Hesp, P.A. 1984. Foredune formation in Southeast Australia. En : Thom, B.G. (ed.), *Coastal Geomorphology in Australia*. Sydney : Sydney Academic, 69-97.
- Hesp, P.A. 1986. A review of coastal and desert dunes. En *Structure and function of sand dune ecosystems*. (ed. Van der Merwe, A, MacLachlan y Hesp). Univ. Port Elizabeth, Institute for Coastal Research Report 8 :18.21.
- Hesp, P.A. 1988. Foredune morphology, dynamics and structures. *Journal of Sediment Geol Special Issue : Aeolian Sediments* 55 :17-41.
- Hesp, P.A. 1990. A review of biological and geomorphological processes involved in the initiation and development of incipient foredunes. *Proc. R. Soc. Edin B-BI* :96 181-202.
- Hesp, P.A. 1991. Ecological processes and plant adaptations on coastal dunes. *Journal of Arid Environment* 21 (2) : 165-191.
- Hesp, P.A. 2002. Foredunes and blowouts : initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology* 48 :245-268.
- Hesp, P.A. y Martínez, M.L. 2007. Disturbance processes and dynamics in coastal dunes. En Johnson, E.A. y Miyanishi, K (eds.) *Plant disturbance ecology : the process and the response*. Elsevier, pp. 215-247.
- Hobbs, R.J. ; Gimingham, C.H. y Band, W.T. 1983. The effects of planting technique on the growth of *Ammophila arenaria* (L.) Link and *Leymus arenarius* (L.) Hochst. *Journal of Applied Ecology* 20 :659-672.
- Hunter, R.E., Richmon, B.M. and Alpha, T.R., 1983. Storm-controlled oblique dunes of the Oregon Coast. *Geology Society of America Bulletin*, 94, 1450-1465.
- Izco, J. 1993. Dry coastal ecosystems of northern and northwestern Spain. En : Goodall, D.W. y Van Der Maarel, E. (eds.), *Ecosystems of the world : Dry coastal ecosystems*. Elsevier, 2a : 329-340.
- Izco, J. Amigo, J. & García-San León, D. 2000. Análisis y clasificación de la vegetación de Galicia (España), II. La vegetación herbácea *Lazaroa* 21 : 25-50.
- Kawamura, R., 1951. Study of sand movement by wind. Institute of Science and Technology, Tokyo, Report 5, 3-4 Tokyo, Japan, 95-112.
- Kith y Tasara, M. 1946. El problema de las dunas del SO de España. *Revista de Montes* 11 : 414-419.
- Klijin, J.A. 1981. *Nederlandse kustduinen. Geomorfologie en bodems (The Dutch coastal dunes. Geomorphology and soils)*. Doctoral thesis, Landbouwhogeschool te Wageningen, Centrum voor Landbouwpublikaties en landbouwdocumentatie, Wageningen, 188 pp. (in Dutch).
- Klijin, J.A. 1990. Dune forming factors in a geographical context. In : Bakker, Th.W.M., Jungerius, P.D. and Klijin, J.A. (eds), *Dunes of the European coasts*, Catena, Supplement 18 :1-14.
- Knutson, P.L. 1978. Planting guidelines for dune creation and stabilization. In : *Coastal Zone. Proceedings of the Symposium of Technical, Environmental, Socioeconomic and regulatory Aspects of Coastal zone Management*. Pp. 762-779. ASCE, San Francisco, CA.
- Kumler, M.L. 1997. Critical environmental factors in dry coastal ecosystems. In : van der Maarel, E. (ed.) *Dry coastal ecosystems. General aspects*, pp. 387-409. Elsevier, Amsterdam.

- Lancaster, N., 1995. Geomorphology of desert dunes. Routledge, London, 290 pp.
- Lettau, K. and Lettau, H.H., 1978. Experimental and micro-meteorological field studies on dune migration. In K. Lettau and H.H. Lettau (eds.), *Exploring the World's Driest Climate*, 110-147. University of Wisconsin, Madison, Institute for Environmental Studies.
- Lorient Escallada, E. 1974. Vegetación y Flora de las dunas de la provincia de Santander. Institución Cultural de Cantabria, CSIC. Instituto de Ciencias Físico- Químicas y Naturales "Torres Quevedo". Diputación Provincial de Santander. 287 pags., 8 láms. Santander.
- Lubke, RA. (1983). A survey of the coastal vegetation near Port Alfred, Eastern Cape. *Bothalia*, 14, 725-738.
- Mack, M.C. & D'Antonio, C.M. (1998). Impacts of biological invasions on disturbance regimes. *Trends in Ecology and Evolution* 3 : 195-198.
- Martínez ML and Moreno-Casasola P (1996). Effects of burial by sand on seedling growth and survival in six tropical sand dune species from the Gulf of Mexico. *Journal of Coastal Research*, 12(2), 406-419.
- Martínez, M.L. and Psuty, N. (eds).2004. *Coastal Dunes : Ecology and Conservation*. Heidelberg, Germany : Springer-Verlag.
- Martínez, M.L., Gallego-Fernández, J.B., García-Franco, J.G., Moctezuma, C., Jiménez, C.D. 2006. Coastal dune vulnerability along the Gulf of México. *Environmental Conservation* 33(2) : (en prensa).
- Martínez Vázquez, M.L., Gallego Fernández, J.B., García Franco, J., Moctezuma, C, Jiménez C.D. 2006. Assessment of Coastal Dune Vulnerability to Natural and Anthropogenic Disturbances Along the Gulf of Mexico. *Environmental Conservation* : 33 :109-117.
- Maun, M.A. 1998. Adaptations of plants to burial in coastal sand dunes. *Canadian Journal of Botany* 76 : 713.738.
- Maun, M.A. 2004. Burial of plants as a selective force in sand dunes. En (Martínez, M.L. y Psuty, N.P. eds.) *Coastal dunes : ecology and conservation*. Springer. Pp. 119-135.
- McEwan, I.K., 1993. Bagnold knit : a physical feature of a wind velocity profile modified by blown sand?. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18, 145-156.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being : Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Ministère de l'Ecologie (France), 2010. La gestion du trait de côte. Editions Quae. 290 pages.
- Ministerio de Medio Ambiente 2005. Los tipos de hábitat de interés comunitario de España : guía básica. Organismo Autónomo de Parques Nacionales 11/2005. Madrid.
- Ministerio de Medio Ambiente 2006. Catálogo Nacional de Especies Amenazadas (1990-2006). Dirección General para la Biodiversidad.
- Moreno-Casasola, P. 1986. Sand movement as a factor in the distribution of plant communities in a coastal dune system. *Vegetatio* 65 : 67-76.
- Morrison, R.G. and G.A. Yarranton. 1974. Vegetational heterogeneity during a primary sand dune succession. *Can. J. Bot.* 52 :397-410.
- Morrison, R.G. and G.A. Yarranton. 1974. Vegetational heterogeneity during a primary sand dune succession. *Can. J. Bot.* 52 :397-410.
- Muñoz Reinoso, J.C. 2004. Diversity of Maritime Juniper Woodlands. *Forest Ecology and Management*, 192 : 267-276.
- Muñoz Vallés, S., Gallego Fernández, J.B. y Dellafiore, C. 2005. *Foredune fragmentation and tourist pressure in two Natural Places in the Coast of Huelva, SW Spain*. En : *Proceeding of International Conference on Coastal Conservation and Management in the Atlantic and Mediterranean, Tavira (Portugal)*.
- Muñoz-Reinoso, J. C. 2003. *Juniperus oxycedrus* ssp. *macrocarpa* in SW Spain : Ecology and conservation problems. *Journal of Coastal Conservation* 9 : 113-122.
- Musick, H.B. ; Gillette, D.A. 1990. Field evaluation of relationships between a vegetation structural parameter and sheltering against wind erosion. *Land Degradation and Rehabilitation* 2(2) :87-94.
- Nickling, W.G. and Wolfe, S.A., 1994. The morphology and origin of nabkhas, region of Mopti, Mali, West Africa. *Journal of Arid Environments*, 28, 13-30.
- Nordstrom, K.F. y Arens, S.M. 1998. The role of human actions in evolution and management of foredunes in the Netherlands and New Jersey, USA. *Journal of Coastal Conservation* 4 :169-180.

- Nordstrom, K. F. 2000. Beaches and dunes of developed coasts - Cambridge University Press, Cambridge, 338 pp.
- O'Brien, M.P. and Rindlaub B.D., 1936. The transportation of sand by wind. *Civil Engineering*, 6, 325-327.
- ONF, 2010. "Contrôle souple de la mobilité des dunes littorales de la côte atlantique, les principales techniques"
- Oostings HJ and Billings WD (1942). Factors affecting vegetational zonation on coastal dunes. *Ecology*, 23, 131-142.
- Orians, G.H. 1980. Diversidad, estabilidad y madurez en ecosistemas naturales. Páginas 174-189, en W.H. van Dobben, y R.H. Lowe-McConnel, editores. *Conceptos unificados en Ecología*. Blume, Barcelona.
- Owen, P. R., 1964. Saltation of uniform grains in air. *Journal of Fluid Mechanics*, 20, 225-242.
- Packham, J.R. y Willis, A.J. 1997. Ecology of dunes, salt marsh and shingle. Chapman & Hall, Londres, 235 pp.
- Pemasada, M.A. and Lovell, P.H., 1974. The mineral nutrition of some dune annuals. *Journal of Ecology* 62, 647-657.
- Pimm, S.L. 1991. *The balance of nature?* University of Chicago Press. Chicago.
- Pipió i Gelabert, H. 1988. Las dunas del golfo de Roses. *Catalunya Rural i Agrària* 47 :22-23 y 28-30.
- Psuty, N.P. (Ed), 1988. Dune/Beach Interaction. *J. Coastal Res. Special Issue N° 3*, 1-136. CERF, Charlottesville, Virginia.
- Psuty, N.P. (2004). The coastal foredune : a morphological basis for regional coastal dune development. In : *Coastal Dunes : Ecology and Conservation*, ed. M.L. Martínez & N. Psuty, pp. 11-27. Heidelberg, Germany : Springer-Verlag.
- Pye, K. 1983. Coastal dunes. *Progress in Physical Geography* 7 :531-557.
- Pye, K. and Tsoar, H., 1990. *Aeolian sand and sand dunes*, Unwin Hyman, London, 396.
- Queennec, R.E., 1989. The Corine Coastal Erosion Project : identification of coastal erosion problems and data base on the littoral environment of eleven European countries. *Coastal Zone '89*, 4594-4601.
- Ramírez Caro, J.L., J.J. Muñoz Pérez, y C. Ley Vega de Seoane. 1998. Restauración de ecosistemas dunares. Páginas 309-313, en J.L. Monsó de Prat, editor. *Proceedings of the Four International Conference Littoral'98*. Barcelona.
- Randall, R.E. & Scott, G.A.M. 1997. Communities of sand and shingle beaches. In : van der Maarel, E. (ed.) *Dry coastal ecosystems. General aspects*, pp. 263-274. Elsevier, Amsterdam.
- Ranwell, D. 1958. Movement of vegetated sand dunes at Newborough Warren, Anglesey. *J. Ecol.* 46 : 83.100.
- Ranwell, D.S. 1972. *Ecology of salt marshes and sand dunes*. Chapman and Hall, Londres. 258p.
- Ranwell, D.S. y Board, R., 1986. *Coast dune management guide*. Institute of Terrestrial Ecology, NERC, Norwich.
- Ridley, H.N. 1930. *The dispersal of plants throughout the world*. L Reeve, Kent, Reino Unido.
- Rivas-Martínez, S., Costa, M., Castroviejo, S. & Valdés E. 1980. *Vegetación de Doñana (Huelva, España) Lazaroa 2 : 5-189*.
- Rivas-Martínez, S., Fernández-González, F., Loidi, J., Lousã, M. & Penas, A. 2001. Syn-taxonomical checklist of vascular plant communities of Spain and Portugal to association level. *Itinera Geobotanica* 14 : 5-341 (2001).
- Rodríguez-Echeverría, C. & Freitas, H. 2006. Diversity of AMF associated with *Ammophila arenaria* ssp. *arundinacea* in Portuguese sand dunes *Mycorrhiza* 16 :543-552.
- Rozema JP, Bijwaard G., Prast G. and Broekman R. (1985). Ecophysiological adaptations of coastal halophytes from foredunes and salt marshes. *Vegetatio*, 62, 499-521.
- Salman, A.H.P.M., y M. Kooijman. 1998. Loss and decline of coastal habitats. EUCC, Leiden.
- Serrano, L., y L. Serrano. 1996. Influence of groundwater exploitation for Urban water supply on temporary ponds from the Doñana National Park (SW Spain). *Journal of Environmental Management* 46 : 229- 238.
- Sherman, D.J. y Bauer, B.O. 1993. Dynamics of beach dune systems. *Progress in Physical Geography* 17 :413-447.
- Sherman, D.J. 1995 ; Namikas, S.L. . A review of the effects of surface moisture content on aeolian sand transport. In : Tchakerian, V.P. (ed), *Desert aeolian processes*, London : Chapman and Hall, pp. 269-294.

- Short, A.D., y P.A. Hesp. 1982. Wave, beach and dune interaction in southeastern Australia. *Marine Geology* 48 :259-284.
- Silvan, F. & Campos, J.A. 2002. Estudio de la flora vascular amenazada de los arenales de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Gobierno Vasco.
- Sobрино, E., Sanz-Elorza, M., Dana, E., and A. González Moreno, 2002. Invasibility of a coastal strip in NE Spain by alien plants. *Journal of Vegetation Science* 13 :585-594.
- Tsoar, H., 1983a. Dynamic processes acting on a longitudinal (seif) dune. *Sedimentology*, 30,567-578.
- Tsoar, H. 2001. Types of Aeolian Sand Dunes and Their Formation. En N.J. Balmforth, A. Provenzale (eds.) *Geomorphological Fluid Mechanics*, 582. pp.403-429. Springer, Berlın.
- Tsoar, H. 2005. Sand dunes mobility and stability in relation to climate. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 357 : 50-56.
- van der Laan, D. ; van Tongeren, O.F.R., van der Putten, W.H. y Veenbaas, G. 1997. Vegetation development in coastal foredunes in relation to methods of establishing marram grass (*Ammophila arenaria*). *Journal of Coastal Conservation* 3 :179-190.
- van der Maarel, E. 1997. Dry coastal ecosystems : scope and historical significance. En : Goodall, D.W. y Van Der Maarel, E. (eds.), *Ecosystems of the world : Dry coastal ecosystems*. Elsevier, 2a : 1-6.
- van der Meulen, F. and A.H.P.M. Salman, 1996. Management of Mediterranean coastal dunes. *Ocean & Coastal Management* 30 :177-195.
- van der Putten, W.H. 1990. Establishment and management of *Ammophila arenaria* (marram grass) on artificial coastal foredunes in the Netherlands. In : Davison-Arnott, R. (ed.) *Proceedings Canadian symposium on Coastal sand dunes*, pp. 367-387. Associate Committee on Shorelines, National Research Council and Guelph University.
- van der Putten, W.H. y Kloosterman, E.H. 1991. Large-scale establishment of *Ammophila arenaria* and quantitative assessment by remote sensing. *Journal of Coastal Research* 7 :1181-1194.
- van der Putten, W.H. y Peters, B.A.M. 1995. Possibilities for management of coastal foredunes with deteriorated stands of *Ammophila arenaria* (marram grass). *Journal of Coastal Conservation* 1 :29-39.
- van der Valk, AG. (1974). The environmental factors controlling foredune plant communities in Cape Hatteras National Seashore, *Ecology*, 55, 1349-1358.
- VV.AA. 2000. Lista Roja de la Flora Vasculare Española (valoracion según categoras UICN). *Conservación Vegetal* 6 (extra) : 11-38.
- White, B.R., 1979. Soil transport by winds on Mars. *Journal of Geophysical Research*, 84, 4643-5651.
- Williams, A.T., J. Alverinho-Dias, F. García Novo, M.R. García Mora, R. Curr, y A. Pereira. 2001. Integrated coastal dune management : checklist. *Continental Shell Research* 21 : 1937-1960.
- Williams, A.T., P. Davies, J. Alverinho, A. Pereira, M.R. García Mora, y M. Tejada. 1994. A re-evaluation of dune vulnerability checklist parameters. *GALA, Revista de Geociencias* 8 :179-182.
- Williams, A.T., P. Davies, R. C. Curr, A. Koh, J.C. Bodere, B. Hallegouet, C. Meur, y C. Yoni. 1993. A checklist assessment of dune vulnerability and protection in Devon and Cornwall, UK. *Coastal Zone'93* : 3394-3408.
- Willians, G., 1964. Some aspects of the eolian saltation load. *Sedimentology*, 3, 257-287.
- Yaun T, Maun MA and Hopkins WG (1993). Effects of sand accretion on photosynthesis, leaf-water potential and morphology of two dune grasses. *Functional Ecology*, 7, 676-682.
- Yura H, Ogura A (2006). Sandblasting as a possible factor controlling the distribution of plants on a coastal dune system. *Plant Ecology* 185 :199-208.



Centre de Coopération pour la Méditerranée de l'UICN
C / Marie Curie 22
29590 Campanillas, Malaga, Espagne.
Tél. : +34 952 028430 - Fax : +34 952 028145
www.iucn.org/publications
www.iucn.org/mediterranee



Le Centre de Coopération pour la Méditerranée de l'UICN est soutenu par:

