



OPÉRATION CADRE RÉGIONAL BEACHMED-e

La gestion stratégique de la défense des littoraux pour un développement soutenable des zones côtières de la Méditerranée



ICRAM

PROVINCE DE PISA

UNIVERSITÉ DE FERRARA

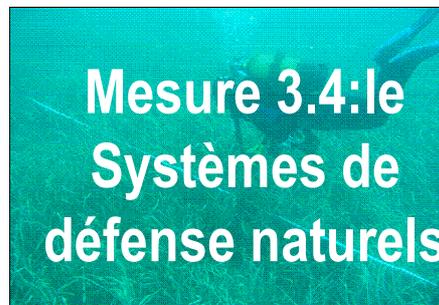
UNIVERSITÉ DE BOLOGNA – CIRSA & DiSTA

EID MÉDITERRANÉE

IACM/FORTH

PHASE C

Cahier Technique



POSIDUNE

Interactions de Posidonia Oceanica et Sable avec l'Environnement des Dunes Naturelles



INDEX

1.	CARACTERISATION DES DUNES COTIERES – REGION LAZIO	4
1.1.	Introduction	4
1.2.	Description du site d'étude	4
1.3.	Matériels et Méthodes	7
1.4.	Résultats et discussion	9
1.5.	Considérations finales	19
1.6.	Bibliographie	21
2.	CARACTERISATION DES BIOMASSES VEGETALES DE PLAGE	22
2.1.	Introduction	22
2.2.	Description du site d'étude	23
2.3.	Matériels et Méthodes	25
2.4.	Résultats et discussion	29
2.5.	Considérations finales	40
2.6.	Bibliographie	44
3.	RECUPERATION ET RECONSTRUCTION DES SYSTEMES DE DUNES DANS LA LOCALITE GOMBO	47
3.1.	Introduction	47
3.2.	Description du site d'étude – San Rossore, loc. Gombo (Pise).....	49
3.3.	Matériels et Méthodes	52
3.4.	Résultats et discussion	58
3.5.	Considérations finales	66
3.6.	Bibliographie	69
4.	TRANSPORT EOLIEN	71
4.1.	Introduction	71
4.2.	Description du site d'étude	73
4.3.	Matériels et Méthodes	85
4.4.	Résultats et discussion	90
4.5.	Considérations finales	105
4.6.	Bibliographie	107
5.	NAPPE PHREATIQUE	108
5.1.	Introduction	108
5.2.	Description du site d'étude	112
5.3.	Matériels et Méthodes	116
5.4.	Résultats et discussion	119
5.5.	Considérations finales	127
5.6.	Bibliographie	128
6.	VEGETALISATION DE LA DUNE ARTIFICIELLE DE FOCE BEVANO (RAVENNA, ITALIE)	131
6.1.	Introduction	131
6.2.	Description de la zone d'intervention	132
6.3.	Matériels et Méthodes	135
6.4.	Résultats et discussion	142
6.5.	Considérations finales	146
6.6.	Bibliographie	147

7.	EXPERIMENTATION DE DIFFERENTES TECHNIQUES DE VEGETALISATION EN MILIEU DUNAIRE (GRANDE MAÏRE)	149
7.1.	Introduction	149
7.2.	Description du site d'étude	150
7.3.	Matériels et Méthodes	156
7.4.	Résultats et discussion	164
7.5.	Considérations finales	166
7.6.	Bibliographie	166
8.	CARACTERISATION DES DUNES COTIERES - REGION CRETE	168
8.1.	Introduction	168
8.2.	Description du site d'étude	169
8.3.	Matériels et Méthodes	170
8.4.	Résultats et discussion	172
8.5.	Considérations finales	176
8.6.	Bibliographie	177

1. CARACTERISATION DES DUNES COTIERES – REGION LAZIO

Sapienza, Université de Roma - G.B. La Monica - giovannibattista.lamonica@uniroma1.it

APAT - V. Campo - valentina.campo@apat.it

ICRAM - E. Pallottini, S. Cappucci - e.pallottini@icram.org; s.cappucci@icram.org

1.1. Introduction

La caractérisation des dunes côtières revêt une importance stratégique pour la planification et la gestion intégrée de la zone côtière pour la défense des littoraux.

L'utilisation de l'analyse photo-interprétative est considérée une technique efficace et appropriée pour le relevé de détail des éléments morphologiques caractéristiques côtiers, dans lequel se développent les systèmes dunaires. Cette analyse et l'observation attentive des traits côtiers sableux présentant des cordons dunaires bien formés, précédemment observés à l'échelle 1:10.000, a permis déterminer de deux zones du littoral du Latium, un au nord, l'autre au sud, caractérisés par des phénomènes de dépôt de plage et de formation de banquettes de *Posidonia oceanica*. Notre attention s'est concentrée sur ces zones, caractérisées par une largeur de plage variable et par la présence d'un herbier à *Posidonia oceanica*, car elles sont retenues plus aptes à une expérimentation de récupération morphologique des dunes. De plus, ayant à disposition des images satellitaires de 2005, une comparaison avec une situation précédente relative à la période 1998-99 a permis d'évaluer les variations survenues au cours d'une période de 7 ans environ, tout en étant conscients que cette période ne soit pas suffisante pour déterminer des modifications significatives pour un éventuel monitoring des morphologies typiques de cet environnement.

Il est connu que les dépôts de *Posidonia oceanica* sont fréquemment considérés comme « déchet ». Leur déplacement, effectué à l'aide de gros moyens mécaniques, provoque souvent une augmentation de l'instabilité de la plage, alors que leur utilisation, visant à la récupération morphologique des milieux vulnérables, peut représenter une solution éventuelle d'intervention dans les zones examinées (Bovina et al, 2007a, b).

1.2. Description du site d'étude

Le premier site se situe dans la partie septentrionale du littoral du Latium et s'étend sur une longueur de 7 km environ. Il est caractérisé par des plages sableuses, larges de quelques mètres à plus de 60 mètres, bordées par de vastes systèmes dunaires continus, actifs et/ou en

réactivation, recouverts principalement d'une végétation d'arbre et/ou arbustive plutôt épaisse, qui apparaissent à première vue dans un bon état de conservation (Campo et La Monica, 2006).

En particulier la zone située dans la province de Viterbo, entre Montalto Marina et Rivage dei Tarquini (fig. 1), situé au nord du Lido de Tarquinia, couvre une superficie d'environ 400 ha et, comprend l'embouchure du torrent Arrone. En raison de son importance naturaliste elle a été reconnue Zone de Protection Spéciale (ZPS - Directive 92/43/CEE "HABITAT") pour la présence d'espèces d'intérêt naturaliste, comme la végétation dunaire, la pinède littorale, les forêts de chêne pubescent et chêne liège.



Figure 1 - Le littoral au Nord du Lido de Tarquinia.

De plus, des prairies de *Posidonia oceanica*, d'une certaine étendue et consistance, se développent sur les fonds marins (Ardizzone et al, 1994a, b, c; Diviacco et al, 2001a, b). Ces plantes, une fois accumulées sur la plage, peuvent représenter une ressource importante, utilisable pour la sauvegarde des systèmes dunaires.

La seconde zone située dans le secteur méridional du littoral du Latium, dans la province de Latina, entre le Lido de Latina et le Promontoire de Circeo, s'étend sur une longueur de 8 km environ et couvre une superficie de 250 ha environ en comprenant le Lac de Fogliano (Lido di Capo Portiere), le Lac des Monaci/Torre di Fogliano et un trait situé au nord du Lac de Caprolace (fig. 2).



Figure 2 - Le littoral des Lacs de Fogliano et Monaci.

Même dans ce cas, le site retombe à l'intérieur d'une Zone Humide d'importance internationale (RAMSAR) faisant partie du Parc National du Circeo. Ce dernier, reconnu comme « réserve de la biosphère » par l'Unesco, est un des rares parcs côtiers à posséder des exemples significatifs d'habitats très différents en raison de la présence d'un promontoire, d'une dune côtière avec des lacs retro-dunaires, et d'une ancienne dune avec des restes de forêts mixtes à chêne liège, chêne frêne et chêne chevelu et des forêts à chêne pédonculé et frêne; il est en outre l'unique Parc National Italien et européen entièrement situé dans une plaine en milieu marin.

Même dans ce cas, le site a été choisi en raison de la présence d'une plage bordée par des cordons dunaires, large de quelque mètres à quelque dizaine de mètres, et d'un fond marin caractérisé par la présence d'un herbier qui, même si de consistance inférieure par rapport à celui de la zone située plus au nord, présente un développement croissant du sud vers le nord (Ardizzone et al, 1994a, b, c; Diviacco et al, 2001a, b).

Dans ce trait de littoral sableux se développe un système dunaire très étendu, qui s'élève progressivement toujours plus sur la mer, jusqu'à atteindre plus de 20 m de haut près de Torre Paola, à proximité du promontoire de Circeo: il s'agit d'un cordon en large partie consolidé par une végétation spécialisée, bloqué dans sa dynamique et dans son mécanisme d'autoprotection (c'est-à-dire libre avancement et recul qui lui permettrait de limiter les dommages dus à l'action érosive des tempêtes de mer) par la route littorale, réalisée au cours des années trente, en correspondance de son axe longitudinal. Les conditions de dégradation de cette dune sont évidentes: la végétation est assez discontinue, de nombreux passages sont présents

et le degré d'anthropisation est élevé. On ne peut pas parler de l'existence de véritables centres urbains, toutefois une urbanisation diffuse est présente (Campo et La Monica, 2006).

En ce qui concerne la définition sommaire du régime des vents qui agissent sur le littoral du Latium, en prenant référence à la station anémométrique de Civitavecchia pour la zone nord et celle de Fiumicino (considérée plus représentative du Tyrrhénien central) pour la zone sud, dans le premier cas les données indiquent que les vents de S sont dominants, puis les vents de S et de NW avec des fréquences élevées.

Pour la seconde station on observe la prédominance en hiver des vents des IV et I cadrans, une rotation horaire vers SE au printemps, une ultérieure rotation vers ouest en été, avec une intensité plus modérée; ensuite, de l'été à l'hiver la rotation devient antihoraire, en passant de nouveau au II cadran pendant l'automne (Noli et al, 1996).

Pour toutes les deux zones il a été en outre vérifié qu'aucune intervention de rechargement des plages sableuses n'a été réalisée au cours de ces dernières années.

1.3. Matériels et Méthodes

Le relevé des formes s'est basé principalement sur l'interprétation de photographies aériennes de basse altitude et sur l'analyse d'ortho-images numériques du Vol Italie et d'images du satellite Quickbird 2 en appliquant le protocole méthodologique développé dans le cadre du projet « les dépôts éoliens des côtes italiennes et le flux de sédiments plage- dune » « i depositi eolici delle coste italiane e il flusso di sedimenti spiaggia-duna » (AA. VV., 2005), visant à la connaissance de la situation des dunes côtières italiennes.

L'interprétation des photographies aériennes de haute (Vol Italie 1988-89, en échelle nominale 1:70.000) et basse altitude a permis de relever les dunes de 1998-99, la caractérisation des dunes a toutefois été réalisée à l'aide des images de basse altitude. Il s'agit plus précisément d'environ 300 photogrammes de 1998, à l'échelle nominale 1:13.000, appartenant à des couvertures aéro-photographiques stéréoscopiques panchromatiques b/n réalisées par différentes entreprises (Rossi - Brescia e Alisud - Portici).

La bonne qualité des photogrammes et, surtout, la haute résolution à terre (environ 50 cm) ont permis de relever les principaux éléments des cordons dunaires, en distinguant l'état d'activité, la densité et la typologie de la végétation, l'anthropisation et l'état de dégradation (GNRAC, 2006).

La perception tridimensionnelle des objets photographiés et l'effet conséquent de l'exagération verticale du relief, caractéristiques particulières de la photo-interprétation, se sont révélés assez utiles dans un contexte territorial caractérisé par une morphologie presque plate, en

permettant de reconnaître des formes difficilement identifiables par la vision non-stéréoscopique des ortho-photographies, sur lesquelles les données observées ont été représentées en phase finale.

La classification des éléments résultant de la photo-interprétation se base sur une légende à échelle 1:10.000, déjà définie et élaborée dans le cadre du projet d'intérêt national concernant l'étude des dépôts éoliens (AA. VV., 2005).

Dans une phase successive (du projet national), les données observées sur les photographies aériennes ont été directement transférées sur les ortho-photographies géo-référencées à l'intérieur d'une banque de données d'un SIG afin de pouvoir organiser et élaborer toutes les données des côtes italiennes, ainsi que d'effectuer des éventuelles intégrations et des ajournements périodiques.

En ce qui concerne le relevé des dunes en 2005 des deux sites pilotes, les images acquises par le capteur installé sur le satellite Quickbird 2 de la DigitalGlobe, actuellement le satellite civil avec la meilleure définition spatiale, ont été analysées.

Lancé en orbite le 18 octobre 2001, le Quickbird 2 a une orbite héliosynchrone et acquiert les images à une hauteur de 450 km. Celles de la côte du Latium, acquises en juin 2005, ont une résolution géométrique au nadir de 0.61 m dans le panchromatique (intervalle de longueurs d'onde 0,45-0,90 μm), de 2.44 m dans le multi-spectral (Bleu 0,45 - 0,52 μm ; Vert 0,52 - 0,60 μm ; Rouge 0,63 - 0,69 μm ; NIR - proche infrarouge - 0,76 - 0,9 μm) et une résolution radiométrique de 11 bit.

Dans ce cas l'analyse a été exécutée à l'aide de la photo-interprétation à vidéo, supportée par des relevés de terrain, et de l'utilisation de données complémentaires.

Les images utilisées, caractérisées par une haute définition et e haute résolution thématique, se sont révélées extrêmement riches de détails. Compte tenu de l'échelle de restitution finale du travail, il a été nécessaire d'élaborer une synthèse des informations à reporter avec une extrême attention.

En effet, la photo-interprétation à vidéo a été réalisée à une échelle non supérieure à 1:10.000, avec un niveau de détail cohérent puisque le but poursuivi était de comparer ces données au données précédentes (1998-999). La grande quantité d'informations des images qui permet d'accomplir des agrandissements jusqu'à une échelle de 1:1000 avec un bon résultat, a toutefois permis de résoudre des incertitudes liées au manque de vision stéréoscopique.

Les contrôles de campagne ont été programmés après avoir déterminé les points incertains ou particuliers, dérivant de la photo-interprétation, afin d'améliorer la précision de la donnée.

Compte-tenu de l'importance que la végétation assume dans la dynamique des systèmes dunaires du point de vue écologique et physique (interaction avec les processus de déposition/érosion éolienne, ...) et compte tenu du fort impact des activités anthropiques croissantes (réduction de la couverture végétale liée au piétinement, à l'urbanisation, etc), deux tests supplémentaires visant à déterminer le degré de la couverture végétale ont été réalisés à partir de l'image satellitaire QuickBird de 2005 relative au seul site pilote du projet POSIDUNE situé au niveau des Lacs de Fogliano et Monaci.

Le premier test a consisté à délimiter « manuellement » les zones végétalisées (Pallottini et al, 2008).

Le second test s'est basé sur l'élaboration de l'image afin de discriminer automatiquement les zones végétalisées des zones « nues ». La méthodologie utilisée, réalisée à l'aide d'un software d'analyse SIG (ARCGIS ESRI®), est brièvement décrite ci-dessous :

- Conversion du file de l'image du format tiff au format grid.
- Reclassification de l'image pour réduire à 10 le nombre de classe des valeurs à l'intérieur de chaque cellule.
- Association des 10 classes à seulement deux conditions de zones végétalisées ou non végétalisées par un processus d'approximation successive, réalisé par l'opérateur en superposant les deux images de la zone: celle modifiée (grid) et celle originale (tiff).
- A la fin du processus seulement deux classes sont obtenues, 0 et 1, qui indiquent l'appartenance ou non à la zone végétalisée.
- Calcul de la superficie végétalisée et non végétalisée.

Cette approche, bien que pas encore validée, simplifierait énormément l'évaluation relative aux analyses multi-temporelles de la couverture végétale des dunes côtières (Rossi, *pers. Comm.*; Grignetti et al, 2005).

1.4. Résultats et discussion

L'étude de la zone côtière a concerné quelques éléments principaux permettant de définir la situation des dunes des deux sites étudiés.

L'analyse photo-interprétative a permis de caractériser les systèmes dunaires en délimitant les superficies des cordons (polygone *dune*), en reconnaissant l'état d'activité (dans le sens d'apport de sédiments), la direction d'allongement (*crête*) avec les altitudes relatives (observées sur la CTR de la Région Latium).

Une importance particulière a été donnée à la détermination des éléments de discontinuité (*passages*) soit naturels que anthropiques, indicatifs du niveau de dégradation de la dune. De

plus, les structures adhérentes qui influencent le budget sédimentaire plage/dune, réalisées pour atténuer l'érosion côtière, classifiées comme *œuvres*, et les autres types d'infrastructures, tels que les installations de type touristique-balnéaire, représentés comme précédemment par des éléments linéaires, distincts par le terme de *utilisation plage*, ont été identifiés.

De plus, la couverture du sol (*anthropisation*) a été définie en mettant en évidence la présence de zones urbanisées, de différent type d'utilisation.

Compte tenu du rôle important de la couverture végétale pour les fonctions de consolidation et d'accroissement des dépôts éoliens, les principales communautés végétales et leur densité ont été déterminées.

Enfin quelques caractéristiques de la plage située en face des systèmes dunaires, en termes de tendance évolutive (recul, avancement, stabilité) et de largeur (< 20 m, 20 - 60 m, > 60 m), ont été définies.

Littoral de la zone comprise entre Montalto Marina et Riva dei Tarquini (Latium Septentrional, Annexe 1).

L'étude effectuée dans la zone de Montalto Marina/Riva dei Tarquini, a mis en évidence un environnement dunaire discrètement conservé. La donnée plus importante issue de la comparaison des différentes images utilisées est l'accroissement de la superficie des dunes plus récentes, observées en 2005, qui apparaît environ 10 % supérieure à celle de 1998-99.

Il n'a pas été observé de différences significatives pour les autres éléments relevés, à l'exception de la végétation qui montre une augmentation consistante des types arbustifs et herbacés (graph. 1-2-3-4).

En ce qui concerne la forme et les dimensions, les cordons dunaires, avec une superficie globale d'environ 157 ha (en 2005), présentent une orientation subparallèle au trait de côte et un développement longitudinal régulier et généralement continu. De petits sentiers et passages d'origine naturel sont également présents.

Parfois il existe seulement quelques restes de dunes, initialement plus étendues, aujourd'hui réduites à quelques mètres de longueur.

La largeur varie de quelques dizaines de mètres à plus de 200 mètres, mais elle est souvent supérieure à 100 mètres. Les dunes plus larges, au sud de l'embouchure du torrent Arrone (fig. 3), avec des valeurs qui atteignent 400 mètres, bien qu'elles soient indiquées comme un cordon unique, correspondent probablement à une série de dunes et de dépôts inter-dunaires, non plus identifiables singulièrement, recouverts par une épaisse végétation arbustive à laquelle suit, vers l'intérieur, une vaste zone à pinède.

En ce qui concerne les hauteurs des cordons, les valeurs proviennent de la CTR du Latium et sont moyennement comprises entre le 2-3 mètres.

Sur une grande partie de ces dunes, principalement actives, il a été reconnue une couverture végétale plus ou moins dense, principalement de type arborescente (*Pinus pinea* et/ou *Pinus pinaster*), et avec les formations typiques des zones de plaine, constituées de forêts de chêne vert (*Quercus ilex*) et/ou de chêne liège (*Quercus suber*); secondairement de type arbustif et de buisson, caractéristiques du maquis méditerranéen, avec des épais arbustes à feuilles permanentes de hauteur variable de 1 à 2 m.



Figure 3 - Dunes au sud de l'embouchure du torrent Arrone.

Par ailleurs il a été reconnu quelques dunes sporadiques mobiles du cordon littoral, avec une végétation surtout herbacée, caractérisée essentiellement par la roquette de mer (*Cakile maritima*), espèce qui donne le nom à la première bande de végétation, le « *Cakileto* ».

La plage bordant les dunes, apparemment stable du point de vue érosif selon la comparaison entre les deux situations étudiées, présente une largeur principalement comprise entre 20 et 60 mètres. Il est opportun de rappeler que par rapport aux autres provinces du Latium, celle de Viterbo présente un pourcentage majeur de recul des côtes, soit sur une longueur de 16 Km sur un total de 35.10 Km (AA. VV., 2004) et que les zones en érosion sont les communes de Montalto, de Castro et de Tarquinia.

L'impact anthropique résulte plutôt bas sur ce secteur côtier et pour cette raison la zone semble conserver encore un certain degré de naturalité.

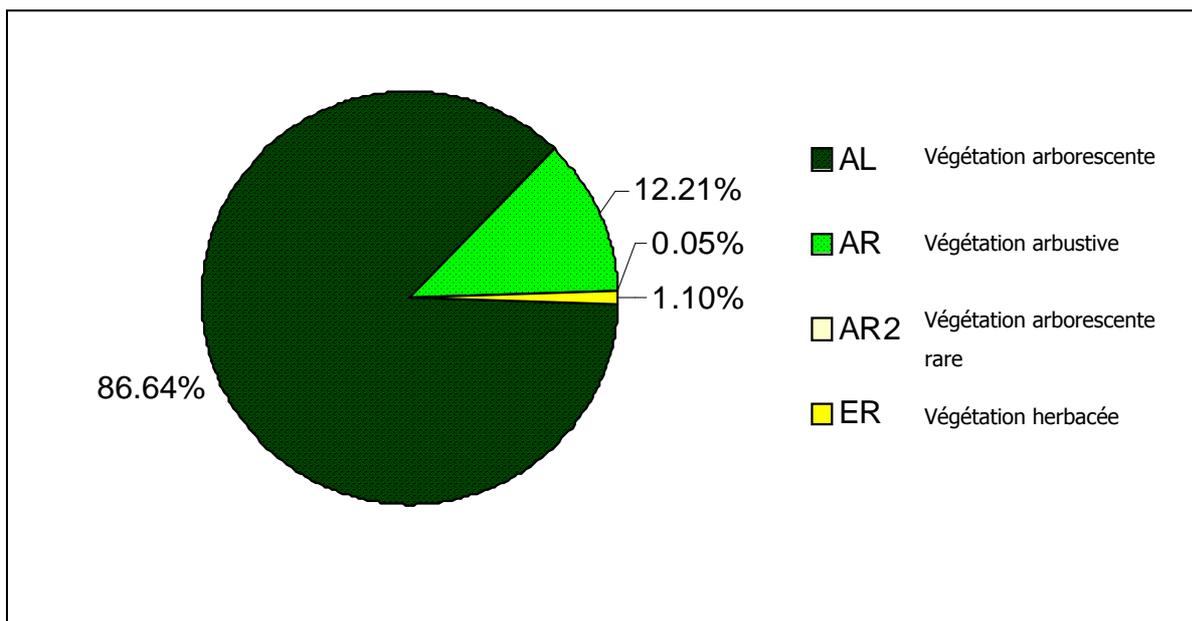
L'importance naturaliste de cette zone, comme déjà dit, est également due à la présence de l'embouchure du torrent Arrone. Dans sa partie terminale, l'Arrone présente les traces des

nombreuses interventions réalisées par l'homme, du rétrécissement des sections fluviales et de la construction de levées artificielles qui ont éliminé une grande partie des milieux riverains originaires et qui empêchent au fleuve d'avoir une majeure liberté de mouvement.

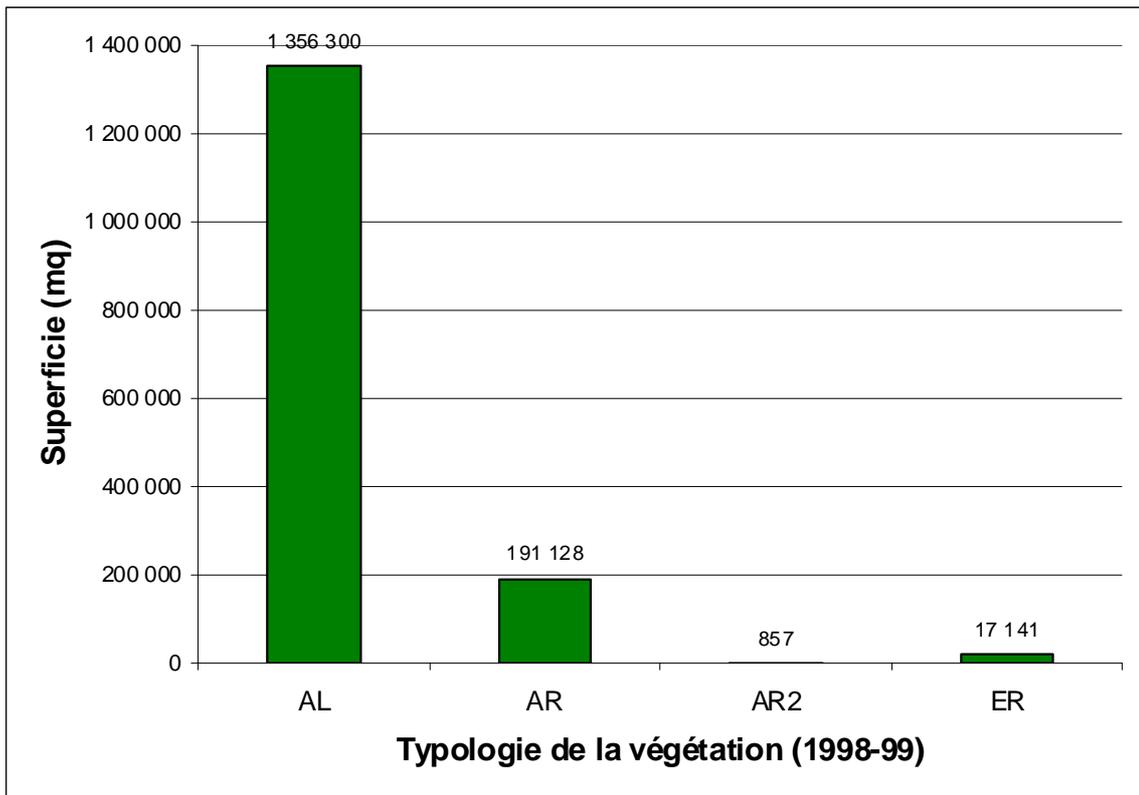
A la hauteur de la Tour de Maccarese le fleuve Arrone subit une soudaine déviation vers le Nord- Ouest. Le fleuve reprend alors une partie de sa « liberté » et l'action commune du dépôt de ses sédiments et du courant marin crée un cordon sableux au niveau de l'embouchure, qui divise le milieu marin de celui fluvial. Un aspect à ne pas oublier est qu'une partie du sable qui forme le cordon provient des sédiments transportés en mer par le fleuve Tevere.

Il est connu que les variations de la portée du fleuve et l'intensité des tempêtes de mer sont responsables des changements de la physionomie de toute la zone occupée par l'embouchure, à laquelle correspondent des variations soudaines de la composition floristique de la végétation.

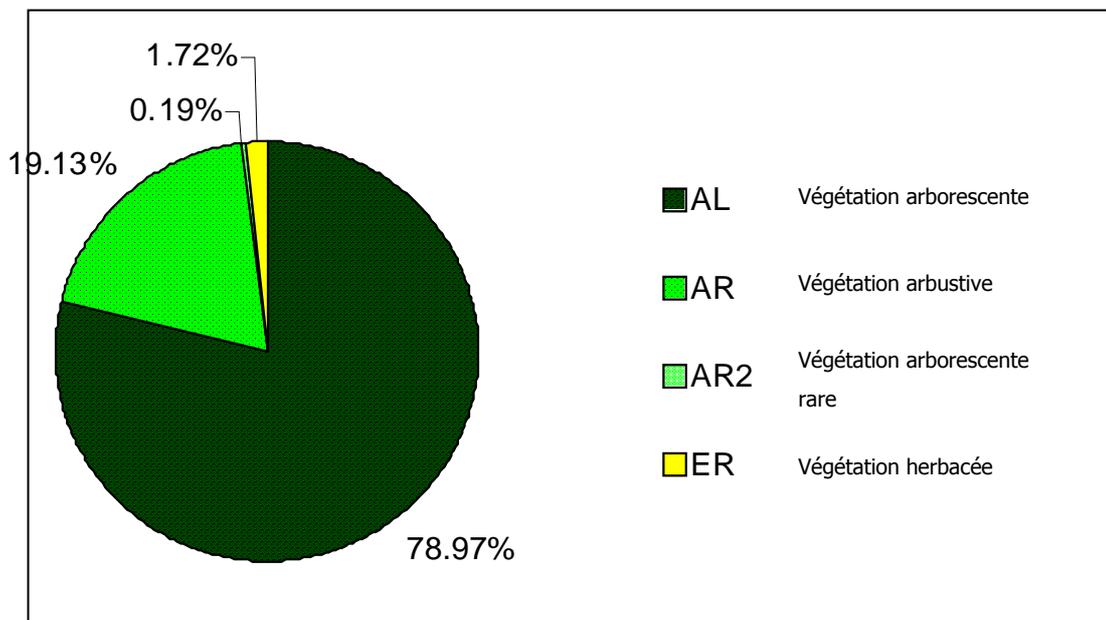
Les oscillations du niveau de l'Arrone intéressent même la zone située en arrière de la plage, correspondant à la dépression rétro-dunaire et au contact du maquis de Cedoline.



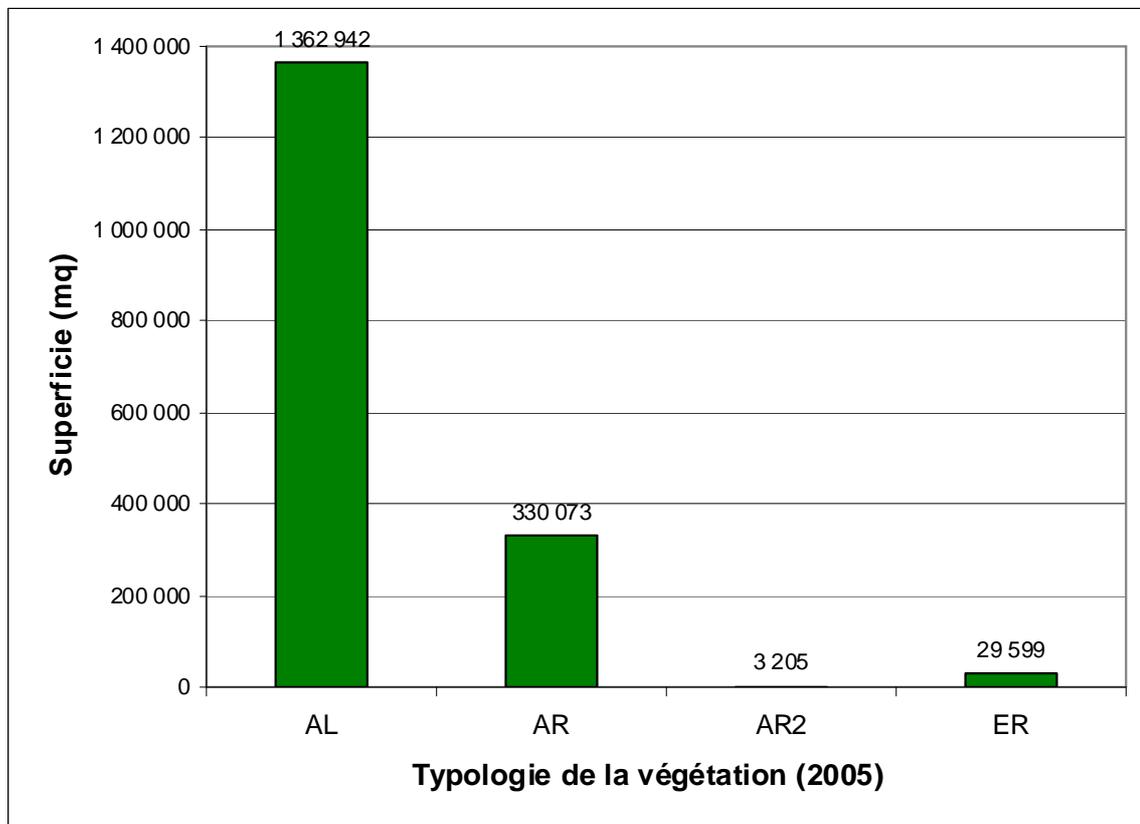
Graphique 1 - Littoral situé entre Montalto Marina et Riva dei Tarquini: dunes et végétation en 1998/99.



Graphique 2 - Littoral situé entre Montalto Marina et Riva dei Tarquini: typologie de la végétation en 1998/99.



Graphique 3 - Littoral situé entre Montalto Marina et Riva dei Tarquini: dunes et végétation en 2005.



Graphique 4 - Littoral situé entre Montalto Marina et Riva dei Tarquini: typologie de la végétation en 2005.

Littoral compris entre le Lac de Fogliano et celui de Caprolace (Latium Meridional, Annexe 2).

De même la situation analysée dans la zone côtière méridionale, comprise entre le Lac de Fogliano et celui de Caprolace, ne montre pas de différences considérables entre 1998-99 et 2005.

La donnée plus significative concerne encore la superficie globale des systèmes dunaires, observée en 2005, d'environ 65 ha, qui confrontée à celle précédente de 1998-99, résulte 10 % supérieure.

Les dunes de ce littoral présentent un développement linéaire subparallèle au trait de côte. Elles sont larges de 60 mètres à plus de 150 m, mais sont en moyenne de 100 mètres.

Les cotes, observées sur la CTR, sont en moyenne de 5 à -6 mètres et, atteignent 8-10 mètres vers le sud, hauteurs qui augmentent toujours plus, en procédant en direction du Promontoire du Circeo, pour dépasser 20-25 mètres.

La plupart de ces dunes, actuellement encore toutes actives, bordent des plages présentant une tendance au recul, toutefois encore assez larges, avec des valeurs généralement comprises entre 20 et 60 mètres.

Il s'agit de cordons très discontinus, fragmentés, interrompus d'un nombre élevé de passages, en large partie consolidés par une végétation spécialisée, principalement arbustive du maquis méditerranéen, bloqués dans sa dynamique et dans son mécanisme d'autoprotection par la route littorale réalisée sur les dunes au cours des années trente, en correspondance de leur axe longitudinal (fig. 4 ; graph. 5 et 6).



Figure 4 - Route littorale réalisée sur les dunes du Latium méridional, en correspondance de leur axe longitudinal (Photo: Valentina Campo).

Cette œuvre, actuellement partiellement abandonnée, en raison de l'érosion côtière, et non reconstruite pour conserver cet environnement, empêche l'évolution morphologique naturelle, et accentue aussi l'érosion de ruissellement car elle favorise la concentration des eaux météoriques. A cela s'ajoute l'érosion d'origine éolienne qui approfondit, et en particulier agrandit, les canalisations de ruissellement, met à jour les appareils radicaux avec un appauvrissement conséquent de la couverture végétale, emporte le sable (et donc le soustrait définitivement au mécanisme de conservation de la dune et en conséquence de la plage) en le

transférant dans la zone plane d'arrière-dune ou dans les bassins lacustres situés derrière la dune.

A l'action « naturelle » s'ajoute celle anthropique. En effet les sillons naturels, qui sont malheureusement très fréquents, sont fréquemment utilisés pour accéder de manière incontrôlée à la plage et constituent une voie à partir de laquelle naissent d'autres zones de piétinement empruntées par des baigneurs et touristes. A l'occasion des saisons d'été, cette fréquentation atteint des pics très élevés, voire insoutenables pour un environnement extrêmement vulnérable.

Il est évident que la traversée désordonnée des dunes de ce littoral a amorcé d'importants phénomènes érosifs, l'appauvrissement de la végétation autochtone corrélé au phénomène de recul des bandes de végétation. Par conséquent, il est possible aujourd'hui de retrouver presque toutes les espèces caractéristiques des diverses associations mélangées entre elles dans une mosaïque de végétation dans laquelle il est difficile reconnaître les différents regroupements.

L'analyse a mis en évidence un état de conservation assez précaire en raison de l'anthropisation qui, dans quelques cas, est tellement intense qu'elle a même compromis les dunes, en donnant naissance au processus de leur démolition (fig. 5). Les traits côtiers où l'anthropisation et/ou l'urbanisation ne sont pas encore intervenues de manière destructive sont très rares.

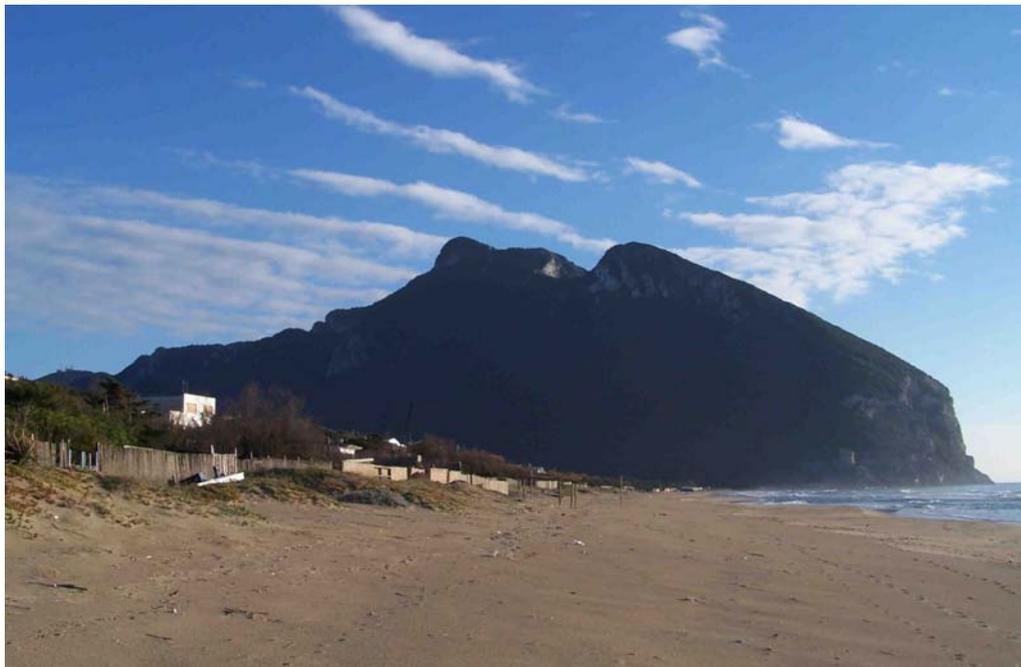


Figure 5 – Exemple de anthropisation sur les dunes en proximité du Promontoire du Circeo

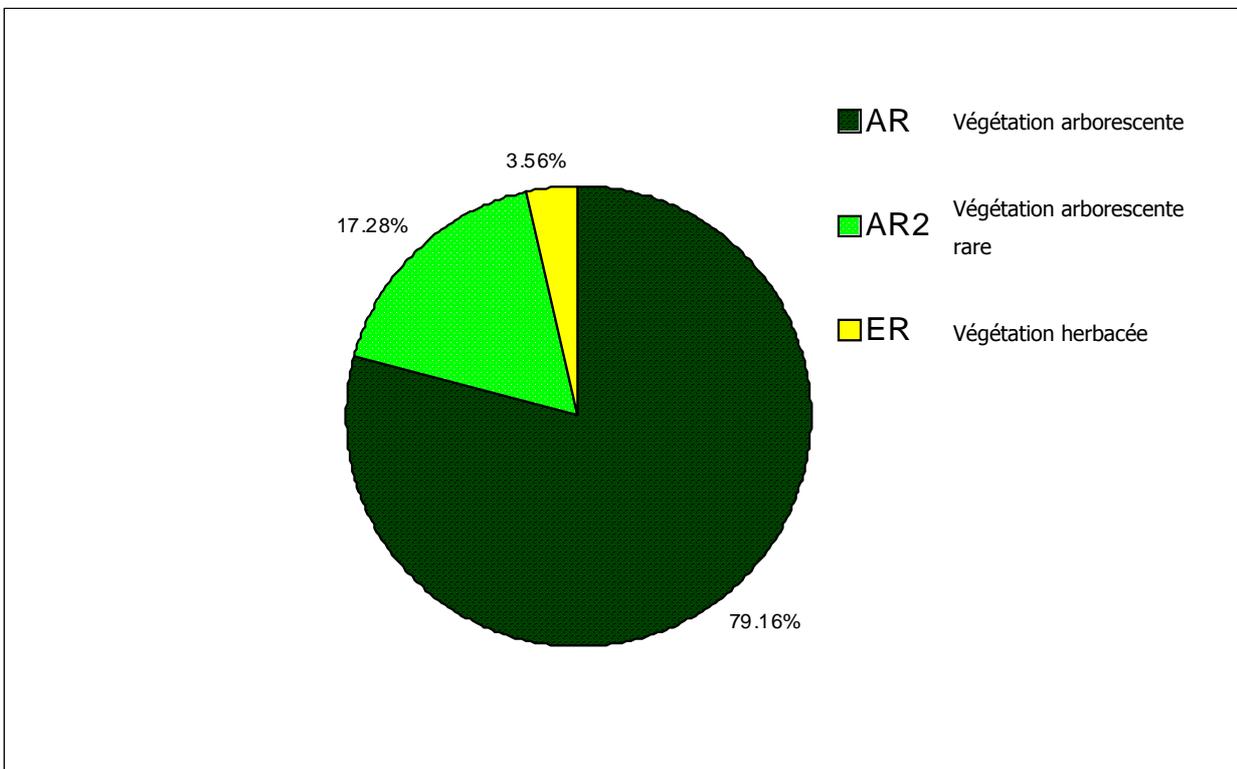
(Photo: Valentina Campo).

L'urbanisation, caractérisée principalement d'habitations secondaires de villégiature, s'est répandue dans le temps à tel point qu'aujourd'hui le cordon dunaire n'est plus régulier et continu, mais apparaît souvent considérablement aplani; de sporadiques restes d'anciens systèmes dunaires (un ou plusieurs) sont observés et se poursuivent, vers l'intérieur, par des dépôts inter-dunaires, très souvent recouverts par une végétation buissonneuse et arbustive, parfois même très épaisse. Dans quelques cas, au lieu du cordon dunaire on observe des accumulations de sable où quelques touffes d'ammophile sont observées sur leur sommet.

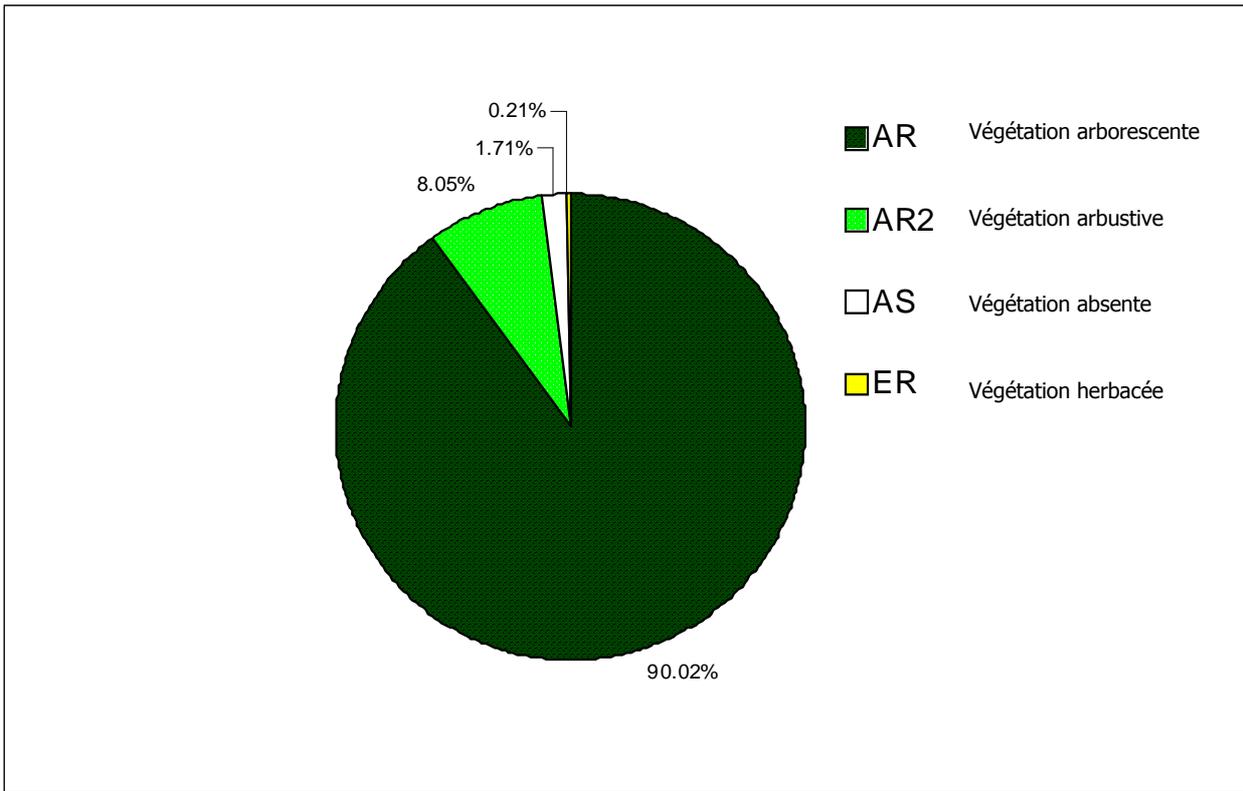
Tout cela a donc engendré une profonde altération des dunes: les milieux naturels et les équilibres dynamiques géologiques et végétationnels originaires de ce trait côtier sont par conséquent modifiés et tout le système présente un état de crise évident.

La situation de forte dégradation est plus importante si on considère que cette zone est protégée, car elle se trouve à l'intérieur d'un Parc National.

Il faut en outre souligner qu'à l'état de conservation de ces dunes et de la plage est étroitement lié celui des écosystèmes contigus tels que les milieux humides rétro-dunaires, comme les lacs côtiers, les lagunes, les embouchures fluviales et même les prairies submergées de *Posidonia oceanica* qui peuvent subir des changements dus à la différente composition sédimentaire.



Graphique 5 - Littoral situé entre Lago de Fogliano et celui de Caprolace: dunes et végétation en 1998/99.



Graphique 6 - Littoral situé entre Lago de Fogliano et celui de Caprolace: dunes et végétation en 2005.

En ce qui concerne l'évaluation du degré de couverture végétale des dunes côtières (graph. 7), deux tests ont été réalisés par différents experts en appliquant différentes méthodologies pour l'interprétation des images disponibles. Dans un premier test chaque zone végétale a été contournée manuellement (relevé manuel); dans le second la superficie « végétale » a été exprimée en pourcentage par rapport aux zones « nues » (Relevé Uniroma 1).

Une première comparaison des résultats obtenus des différents tests menés dans le site pilote du projet POSIDUNE situé en face des Lacs de Fogliano et Monaci est reportée dans le tableau 1. Les tests réalisés suggèrent qu'il existe un bon accord entre les résultats obtenus par les méthodes, alors que les résultats obtenus par le traitement des images satellitaires fournissent des valeurs très différentes. L'écart observé est probablement dû à la valeur limite choisie pour discriminer les zones végétalisés de celles non végétalisés et à la résolution des images satellitaires.

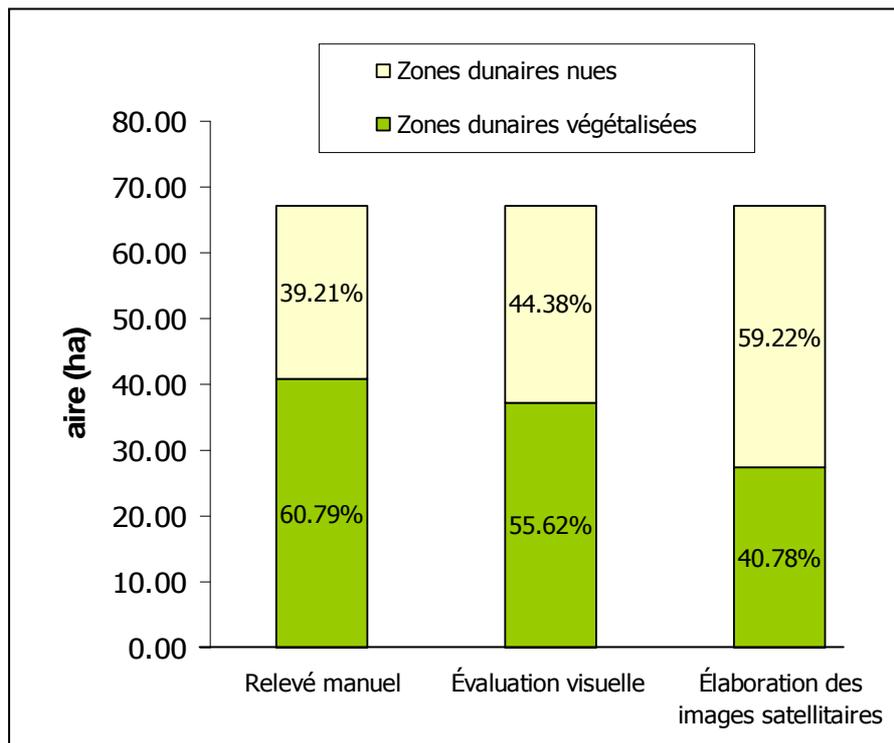


Tableau 1 - Comparaison des résultats obtenus en appliquant trois méthodes différentes (relevé manuel, évaluation visuelle et élaboration des images satellitaires panchromatiques) pour discriminer les zones dunaires végétalisées des zones dunaires nues.

1.5. Considérations finales

La méthodologie utilisée pour la caractérisation des dunes côtières a permis de décrire dans le détail et avec une bonne précision les formes typiques de cet environnement, en montrant l'efficacité du protocole méthodologique proposé dans le Manuel technique de Phase B du Projet POSIDUNE. Il est toutefois nécessaire de faire des considérations qui ne diminuent pas la qualité de la donnée obtenue.

La première concerne la période de temps considérée pour la comparaison entre deux situations environnementales: il est évident que pour suivre avec une certaine précision quelques phénomènes géomorphologiques, il est toujours préférable d'analyser des données plus distantes entre elles dans le temps et de considérer les variations observées sur une période d'au moins 20-30 ans plus significatives et crédibles.

Il est donc évident qu'une période de 7-8 ans n'est généralement pas suffisante pour déterminer les changements d'une portion de territoire permettant de formuler des hypothèses et théories sur des possibles scénarios évolutifs.

La seconde considération concerne le type d'analyse photo-interprétative.

Comme déjà dit, on a utilisé la stéréoscopie et la photo-interprétation à vidéo. La première méthode, souvent utilisée pour ce type d'étude, est extrêmement utile dans un contexte territorial dans lequel domine une morphologie presque plate, alors que la seconde ne permet pas la perception 3D des objets photographiés et l'exagération verticale consécutive du relief. Dans ce cas l'expérience des opérateurs et les caractéristiques des images, qui doivent avoir une définition élevée et un détail thématique considérable, ont permis de résoudre des incertitudes liées au manque de vision stéréoscopique. Des contrôles précis de campagne ont contribué à améliorer la qualité des données obtenues en phase de photo-interprétation. Cela a permis de confirmer que, en plus de l'utilisation de personnel hautement qualifié pour exécuter correctement une caractérisation des dunes côtières, il est indispensable de réaliser des relevés sur le terrain. Ceci-dit, les résultats des tests menés dans le cadre du présent projet suggèrent d'investir dans les implémentations de nouvelles méthodes de caractérisation des dunes côtières surtout pour perfectionner et valider les méthodes plus précises pour l'évaluation du degré de la couverture végétale des dunes côtières.

En général, les mécanismes qui contribuent à déterminer le fort degré de dégradation et d'érosion que présentent les dunes relevées dans le Latium sont principalement liés au degré d'anthropisation et/ou d'urbanisation du littoral, à l'érosion côtière, aux utilisations touristiques incontrôlées.

Il est aussi vrai que les écosystèmes côtiers sableux, en raison de leur nature et de leur position topographique, doivent toujours se confronter à des situations difficiles et changeantes à court et long terme. Les modifications engendrées par l'homme créent toutefois un impact fort et dévastant, auquel ces milieux résistent difficilement.

Actuellement l'équilibre des plages étudiées apparaît presque toujours « attaqué » par les interventions sur le territoire (pas seulement côtier) et, par conséquent, le flux sédimentaire plage-dune est altéré. Ainsi les meilleurs exemples de dunes s'observent là où ces interventions sont encore limitées. C'est le cas de la zone septentrionale où l'anthropisation limitée ne semble pas avoir compromis les composantes environnementales et, par conséquent, altéré la naturalité du milieu.

1.6. Bibliographie

- AA.VV. (1996) - Il Mare Del Lazio. 331 pp.
- AA.VV. (2001) - *Relazione sullo Stato dell'Ambiente*. Pubbl. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.
http://www2.minambiente.it/sito/pubblicazioni/Collana_RSA/RSA_2001/RSA2001_indice.asp
- AA.VV. (2005) – *I depositi eolici delle coste italiane e il flusso di sedimenti spiaggia-duna*. Atti Congr. Cagliari – Arbus – Loc. Piscinas.
- Ardizzone G.D., La Monica G.B., Raffi R. (1994a) – *Carta della distribuzione dei sedimenti e delle praterie di Posidonia oceanica – Lazio Settentrionale*. Stampa Borgia, Roma.
- Ardizzone G.D., La Monica G.B., Raffi R. (1994b) – *Carta della distribuzione dei sedimenti e delle praterie di Posidonia oceanica – Lazio Centrale*. Stampa Borgia, Roma.
- Ardizzone G.D., La Monica G.B., Raffi R. (1994c) – *Carta della distribuzione dei sedimenti e delle praterie di Posidonia oceanica – Lazio Meridionale*. Stampa Borgia, Roma.
- Bovina G., Cappucci S., Pallottini E. (2007a) - *Présence et état des dépôts de biomasse végétale de plage associées aux prairies de phanérogames marines*. POSIDUNE - Interactions de Posidonia Oceanica et Sable avec l'Environnement des Dunes Naturelles. Cahier Technique étendu de Phase A. pp. 132-151.
- Bovina G., Cappucci S., Pallottini E. (2007b) - *La gestion des biomasses végétales de plage*. POSIDUNE - Interactions de Posidonia Oceanica et Sable avec l'Environnement des Dunes Naturelles. Cahier Technique étendu de Phase B. pp. 37-54.
- Diviacco G., Spada E., Virno Lamberti C. (2001a) – *Le fanerogame marine del Lazio*. ICRAM, Roma. pp. 113.
- Diviacco G., Spada E., Virno Lamberti C. (2001b) – *Le fanerogame marine del Lazio*. ICRAM, 14 carte, Roma.
- Campo V., La Monica G.B. (2006) – *Le dune costiere oloceniche prossimali lungo il litorale del Lazio*. Studi costieri, 11. pp. 31-42.
- GNRAC (2006) – *Lo stato dei litorali italiani*. Studi costieri 10, 174 pp.
- Grignetti A., Casacchia R., Salvatori R. (2004) – *Studio dei cambiamenti di un sistema dunale mediante integrazione di foto aeree e immagini MIVIS e Quickbird*. Studi costieri, 8. pp. 111-120.

2. CARACTERISATION DES BIOMASSES VEGETALES DE PLAGES

MAREVIVO – G. Bovina – giancarlo.bovina@geosphera.191.it

ICRAM – S. Cappucci, E. Pallottini – s.cappucci@icram.org

2.1. Introduction

Après les tempêtes les feuilles de plantes marines dont la *Posidonia oceanica* peuvent s'accumuler sur les littoraux. De plus les dépôts de *Posidonia oceanica* sont les plus caractéristiques et de plus grandes dimensions (*banquettes*).

Les restes de posidonie se mélangent fréquemment avec les autres restes de phanérogames marins, d'algues et d'autres espèces végétales d'origine terrestre et s'ajoutent ainsi au problème plus général de la gestion des restes végétaux déposés sur la plage.

Les activités d'entretien et de nettoyage mécanique des plages, liées au développement croissant des activités touristiques-balnéaires, induisent une perte de sédiment et le déplacement des biomasses de plage accumulées sur la plage. Ces accumulations assument un rôle stratégique non seulement en termes de défense des littoraux (Blanc, 1971), mais aussi en termes d'écologie et de biodiversité (Picard, 1953; Molinier et Picard, 1953; Chessa et al, 2000; De Falco et al, 2002; Bovina et al, 2007a, b). Les *banquettes* et les dépôts de plage de *Posidonia oceanica* sont en effet considérés « **habitat déterminant** » dans le cadre du protocole SPAMI de la Convention de Barcelone et, comme les dunes côtières, habitat prioritaire selon la Directive 92/43 de l'UE.

La classification et la liste de ces habitats sont reportées ci-dessous:

I. SUPRALITTORAL

I. 2. SABLES

I. 2.1 Biocénoses des sables supralittoraux

I. 2.1.5. Faciès des phanérogames déposés sur la plage (partie supérieure)

II. MESOLITTORAL

II. 3. GRAVIERS ET GALETS

II. 3.1 Biocénoses du détritique mésolittoral

II. 3.1.1. Faciès des accumulations sur la plage (*banquettes*) de feuilles mortes de *Posidonia oceanica* et autres phanérogames

Du point de vue environnemental, la *Posidonia oceanica* est un excellent indicateur biologique car elle est très sensible au niveau de contamination environnementale. Les prairies sont absentes ou en forte régression au niveau des littoraux des embouchures fluviales et sont en mesure de concentrer les métaux, même en trace, présents dans les eaux et/ou dans les sédiments (Baroli et al, 2001). Ce mécanisme est différent dans les différentes parties des plantes (feuilles, tiges et rhizomes). Ainsi, même les matériaux morts dérivants des prairies peuvent contenir des métaux (Castaldi et al, 2000) dont leur concentration sera fonction de la concentration du milieu marin-côtier de la prairie d'origine (prairie mère). A ce propos, les recherches réalisées jusqu'à présent concernant la caractérisation chimique des dépôts accumulés sur la plage ne permettent pas d'établir un cadre de compatibilité environnementale, bien que les hypothèses de réutilisation doivent tenir compte de la présence éventuelle de substances ou d'éléments contaminants concentrés dans le milieu environnant en relation avec les caractéristiques environnementales du milieu.

Dans le cadre de la présente étude il a été nécessaire d'approfondir ultérieurement les aspects liés à la distribution et à la nature des accumulations de biomasses végétales le long du littoral de la Toscane et du Latium, et en particulier de déterminer les caractéristiques chimiques des *banquettes* et des dépôts de *Posidonia oceanica* et autres phanérogames marins qui s'observent le long de ces côtes.

2.2. Description du site d'étude

Le présent travail décrit les activités réalisées dans le cadre d'un programme d'étude qui prévoyait la caractérisation des dépôts de plage de phanérogames marines (notamment la *Posidonia oceanica*) le long des côtes du Latium en vue de leur possible utilisation pour des interventions de restauration et de consolidation des dépôts éoliens côtiers (Boccalaro et Cantasano, 2003).

Les informations relatives à la présence et à la caractérisation des prairies de phanérogames marins le long de la côte étudiée dérivent de la consultation de différents ouvrages tels que des livres (Boudouresque et al, 2006; Diviacco et al, 2001a; SNAMPROGETTI S.P.A.,1991), des articles (Boudouresque et Meinesz, 1982; Cancemi et al, 1997; Casola et al, 2004; Gabellini et al, 2002; Guccione et al, 2005; Vitale et Chessa, 1998) et des documents cartographiques (Ardizzone et al, 1994a, b, c; Diviacco et al, 2001b). La cartographie réalisée à l'échelle 1:100.000 sur la base des campagnes effectuées au cours du printemps de l'année 2000 le long du littoral compris entre Civitavecchia (Latium septentrional) et l'embouchure du Fleuve Magra (limite Ligurie - Toscane) dans le cadre de la Convention concernant l'étude des

banquettes stipulée en 2002 entre le Ministère de l'Environnement et de la Protection du Territoire et l'Association Environnementale "MAREVIVO" (MAREVIVO, 2001; MAREVIVO, 2003) a été particulièrement utile.

Selon la distribution des zones potentielles de dépôts de plage, et compte-tenu que les dépôts de plage structurés (*banquettes*) sont fortement discontinus et souvent de dimensions réduites, il a été retenu utile d'effectuer un contrôle continu et presque ininterrompu de vastes zones littorales du Latium.

De cette manière, il a été possible de relever, en plus des dépôts plus importants, représentés par les *banquettes*, la présence de dépôts de posidonie de différentes natures et pas nécessairement structurés.

Compte-tenu de la distribution des prairies de posidonie le long du littoral régional (en se référant au concept de "prairie mère" comme zone spécifique de production éventuelle de la biomasse végétale), le relevé direct a concerné environ 130 km des 216 km de côte basse de la région du Latium; en particulier les zones côtières suivantes ont été relevées entre le 30 janvier et le 22 février 2007:

- Latium septentrional: Littoral compris entre l'embouchure de F. Chiarone (limite de la région) et Santa Severa (Chateau de Pyrgi). Les prairies Burano, Montalto di Castro, de l'embouchure du Torrent Arrone, Tarquinia, Frasca, Mattonara, Santa Marinella sont attribuables à ce littoral.
- Latium méridional: Littoral compris entre Torre Astura (au nord de l'embouchure de F. Astura) et Sperlonga (Torre Truglia). Les prairies de Torre Astura, Fogliano, S.F. Circeo, Terracina, Lago Lungo sont présentes le long de ce littoral.
- A ceux-ci s'ajoute (15 mars 2007) la reconnaissance de la côte de l'île de Ventotene à laquelle se réfère la prairie homonyme.

Lors de la reconnaissance 8 dépôts suffisamment représentatifs de la zone d'influence des différentes prairies distribuées le long de la côte du Latium, citées précédemment, ont été identifiés. Les dépôts échantillonnés proviennent des localités suivantes:

- | | |
|---|---------------|
| 1. Murelle (Montalto di Castro). | ECHANTILLON 1 |
| 2. Porto Clementino (Saline di Tarquinia) | ECHANTILLON 2 |
| 3. La Frasca (S. Agostino - Civitavecchia) | ECHANTILLON 3 |
| 4. Fosso di Pontenuovo (Santa Marinella) | ECHANTILLON 4 |
| 5. Foce Verde (Lido di Latina) | ECHANTILLON 5 |

- | | |
|---|---------------|
| 6. Idrovora Canale Lavorazione (Lungomare di Sabaudia) | ECHANTILLON 6 |
| 7. Torre Truglia (Sperlonga) | ECHANTILLON 7 |
| 8. Parata Grande (Isola di Ventotene) | ECHANTILLON 8 |

La position des sites échantillonnés est reportée dans la figure 1.

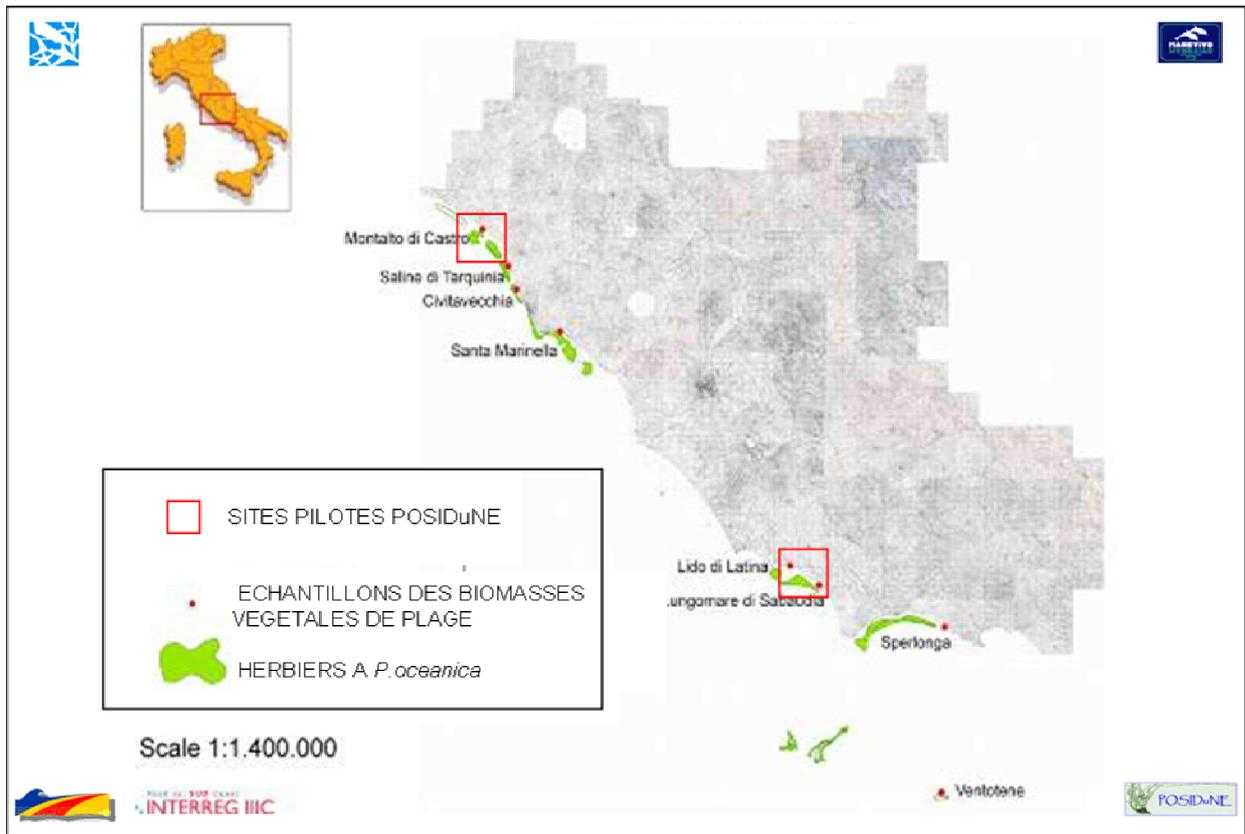


Figure 1 - Localisation des échantillons de phanérogames marins déposés le long des côtes du Latium et des dunes côtières des sites pilotes POSIDuNE.

2.3. Matériels et Méthodes

1.3.1. Caractérisation des dépôts de plage

Les *banquettes* échantillonnées ont été décrites sur le terrain et en laboratoire du point de vue de la dimension, de la structure et de la composition. La méthodologie utilisée se réfère également à la procédure analytique originale définie dans le cadre du "Programme d'étude sur les *banquettes* de *Posidonia oceanica* comme indicateur de l'état de conservation des Prairies" ("Programma di indagine sulle *banquettes* di *Posidonia oceanica* come indicatore dello stato di conservazione delle praterie") (MAREVIVO, 2001).

Les observations *in situ* permettent d'acquérir d'importantes informations sur les caractéristiques des dépôts ainsi que sur les facteurs dynamiques qui ont déterminé le

dépôt de plage; en particulier on a tenu compte de la typologie du dépôt, de l'état de dégradation du matériel déposé sur la plage, de la présence éventuelle et du pourcentage de déchet à l'intérieur du dépôt, de la présence éventuelle de masse flottante dans les eaux voisines au dépôt, de la composition totale, de la géométrie et du niveau de compaction et de concentration des matériaux.

Méthodologie d'étude des caractéristiques compositionnelle et texturales des dépôts.

La méthode pour la caractérisation de la composition et de la texture est décrite en détail dans le Rapport Technique de Phase B du sous-projet POSIDUNE (Bovina et al, 2007b). Les analyses en laboratoire ont permis d'acquérir des informations sur la composition, la classification de la dimension des matériaux et d'obtenir un indice sur l'état de fragmentation/remaniement de ces matériaux.

La caractérisation a été réalisée sur les échantillons représentatifs du dépôt échantillonné, prélevés manuellement.

Suite à une première analyse descriptive de la composition et des caractéristiques de l'échantillon, effectuée sur le matériel humide, l'analyse de la dimension et de la composition a été réalisée sur le matériel sec.

Des tamis métalliques spécialement construits ont été utilisés pour déterminer les caractéristiques de la dimension du matériel séché. Le matériel recueilli dans chaque tamis et le matériel passant la maille plus petite ont été pesés afin d'obtenir l'abondance dimensionnelle en % de la fraction fine, moyenne et grossière de chaque échantillon.

La composition a été décrite pour chaque fraction "granulométrique" pesée en estimant la présence en pourcentage de feuilles, rhizomes, éragropiles, matériel fibreux grossier. La somme de chaque fraction retenue par chaque tamis a permis d'obtenir la description de la composition recherchée.

Une classification basée sur des diagrammes ternaires (fig. 2a et 2b) et sur un indice numérique a été proposée afin de faciliter la comparaison des résultats.

En plus de décrire de manière synthétique chaque échantillon du point de vue de la composition et de la dimension, les diagrammes de classification permettent de comparer rapidement les caractéristiques des différents échantillons et de visualiser les analogies et les différences entre les dépôts.

Un indice numérique, supplémentaire par rapport aux indications fournies par la classification de la dimension et représentatif de l'état de fragmentation, a été obtenu en

calculant le rapport entre les valeurs de pourcentage des trois fractions dimensionnelles G, M, F selon la relation suivante:

$$\text{Indice de fragmentation I.F.} = \% G / 0.5 \% M + \% F$$

ou:

I.F. < 1	matériel très fragmenté
1 < I.F. < 5	matériel moyennement fragmenté
5 < I.F. < 10	matériel peu fragmenté
I.F. > 10	matériel entier

2.3.1. Cartographie des dépôts de plage

L'observation directe et le plus possible continue du littoral a permis de relever les *banquettes* mais aussi les autres formes de dépôt, depuis les dépôts de plage de différentes natures jusqu'à la présence de trace de *Posidonia oceanica* (comme des rares égagropiles et des petits rhizomes). Le relevé direct de secteurs significatifs du littoral du Latium a permis de réaliser une cartographie des dépôts de plage à partir de la Carte Technique Régionale du Latium à l'échelle 1:10.000. Afin d'obtenir une vision complète du phénomène, l'information du relevé à l'échelle 1:10.000 a été synthétisée sur une carte thématique à l'échelle 1:50.000 sur laquelle les informations bibliographiques relatives aux prairies de *Posidonia oceanica* ont été reportées.

Les critères descriptifs et de classification des dépôts et de leurs restes végétaux, bien que subjectifs, font référence au schéma suivant utilisé également dans la légende de la Cartographie des dépôts de plages (Planche 1 et 2).

A.	Absence de trace de <i>Posidonia oceanica</i>
B.	Présence de trace
B.1	Modeste
B.2	Abondante
C.	Dépôt de plage
C.1	Modeste
C.2	Abondante
D.	Banquette
D.1	Dépôt éphémère
D.2	Dépôt transitoire (partiellement stable)
D.3	Dépôt stable ou pseudo-stable

La cartographie des dépôts de plage de posidonie a également considéré les caractéristiques de la composition relative à la présence des éléments suivants: feuilles (Fg), rhizomes (Rz), fibres (Fb), égagropiles (Eg), faisceaux verts (Fsv), faisceaux secs (Fss), motte (Zl).

La présence de *Cymodocea nodosa* a également été représentée en distinguant les dépôts de plage abondants (Cy+) et ceux très abondants (Cy++).

Compte tenu de la nature et des mécanismes de formation/évolution des dépôts de plage, l'évaluation de la stabilité des dépôts (en particulier des *banquettes*) assume un intérêt particulier. La limite de la présente étude est liée à la carte de la distribution des dépôts de plage qui possède une signification temporelle limitée. En effet, compte tenu de la possible modification des dépôts, même de ceux plus structurés, elle représente la situation au moment où les observations ont été réalisées.

De même, la manière dont la carte a été réalisée permet d'obtenir des indications importantes: bien que limitée à une condition temporelle spécifique, elle représente néanmoins une observation de référence homogène, systématique et essentiellement isochrone du phénomène relatif à un trait de côte plus vaste.

Réalisée entre Janvier et Avril (une saison particulièrement significative), elle consent de réaliser une étude de comparaison et de corrélation entre la présence des prairies et du matériel végétal déposé sur la plage et de leur caractéristiques quali/quantitatives.

2.3.2. Analyses chimiques¹

La récolte d'échantillons a permis de caractériser le matériel déposé sur la plage et notamment de déterminer l'éventuel teneur en métaux lourds et autres substances polluantes (IPA et PCB_{TOT}) afin de gérer le matériel déposé sur la plage. Les paramètres analysés ont été sélectionnés parmi ceux proposés par le Groupe de travail sur les biomasses de plage, institué le 02/05/2006.

Tous les échantillons recueillis sur le terrain ont subi préliminairement un processus de lyophilisation et ont été ensuite analysés auprès des laboratoires de l'ICRAM et de l'ISS selon la méthodologie analytique indiquée dans le Rapport technique de Phase B du sous-projet POSIDUNE (OCR Beachmed-e).

¹ Analyses réalisées dans les laboratoires de l'ICRAM (Chiara Maggi, Jessica Bianchi, Manuela Dattolo, Silvia Mariotti, Antonella Cozzolino; Giulio Sesta, Andeka De La Fuente;) et de l'ISS (Eleonora Beccaloni).

2.4. Résultats et discussion

Pour une meilleure compréhension des observations réalisées au cours du présent travail, dans les figures 2a et 2b, sont reportées les analyses de la composition et de la texture des *banquettes* avec les résultats des analyses des *banquettes* des littoraux de Talamone (Toscane méridionale) conduit par l'association environnemental MAREVIVO (2001).

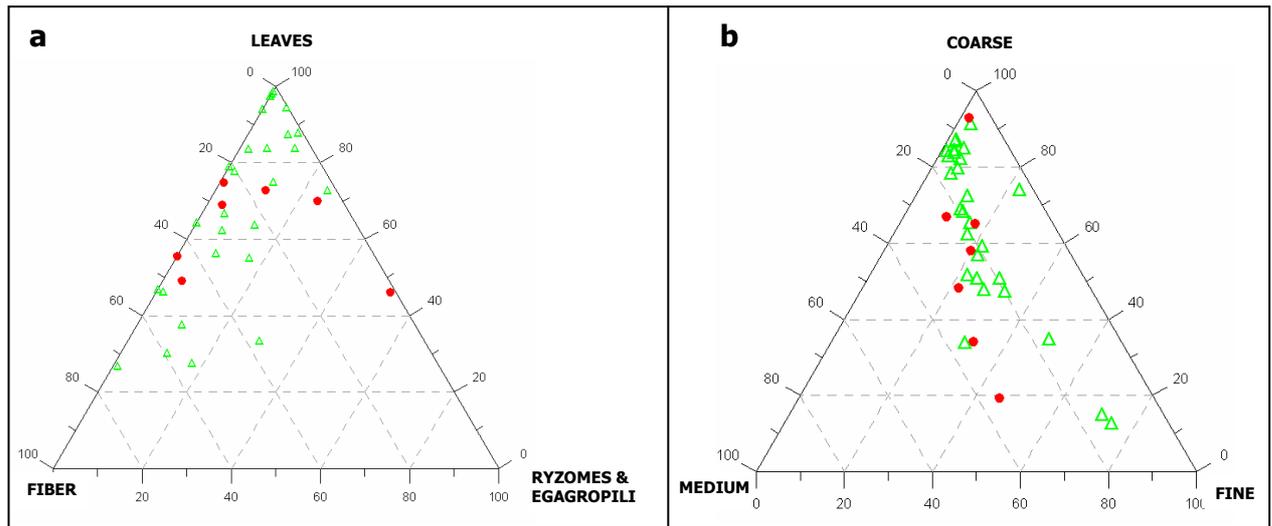


Figure 2 – Analyses de la composition (a) et de la texture (b) des restes de *P. oceanica* déposés long les côtes du Latium (l'échantillon 5 n'est pas représenté car il est composé de restes de *Cymodocea nodosa*) et de Talamone (MAREVIVO, 2003).

2.4.1. Description des formes de dépôts de plage relevées le long de la zone d'étude

Les formes de dépôt de plage et les caractéristiques des dépôts observés lors des campagnes de reconnaissance directe sont décrites ci-dessous.

Littoral du Latium septentrional (Trait côtier compris entre l'embouchure de F. Chiarone et Santa Severa - Château de Pirgy; Planche 1).

La zone comprise entre l'embouchure du Fleuve Chiarone et l'embouchure du Fleuve Marta, caractérisée par la prairie de Montalto, présente du Nord vers le Sud de modestes dépôts de plage principalement constitués de rhizomes et d'égagropiles. Au contraire, au sud de l'embouchure de la Fiora les dépôts de plage sont plus consistants avec une présence appréciable de feuilles. A proximité de la Pointe des Murelle, le premier dépôt, qui résulte éphémère mais partiellement structuré (classifié comme D1), a été observé en position centrale par rapport à la prairie de Montalto située en face. L'**échantillon 1** provient de ce dépôt. Il s'agit d'une accumulation modeste, distribuée sur une superficie de quelques

mètres carrés, de faible épaisseur et de composition hétérogène avec une prédominance de feuilles et de matériel fibreux dérivant de la fragmentation des rhizomes; l'analyse dimensionnelle a mis en évidence une sensible fragmentation indicative d'un remaniement et maturité importants comme indiqué par la faible valeur de l'indice de fragmentation (I.F. = 1)

Vers le sud, dans la zone située en face de la prairie de *Posidonia oceanica* entre l'embouchure de l'Arrone et celle de Marta, les dépôts de plages sont limités, classifiés en traces évidentes, et constitués de rhizomes et d'égagropiles. Des bandes entières, constituées de rhizomes regroupés, avec des feuilles sèches brunes ont été observées à proximité de l'embouchure de la Marta. Le matériel végétal de plage se caractérisait également par la présence de *Cymodocea nodosa* qui augmentait sensiblement dans la zone située au sud de l'embouchure de Marta.

Entre l'embouchure de Marta et celle de Mignone, située en face la prairie de Tarquinia, les dépôts de plage de *Posidonia oceanica* sont plus abondants avec deux zones d'accumulations structurées: la première, à proximité du Port Clementino, Marina de Tarquinia, classifiée comme D2, plus modeste, correspondant à l'**échantillon 2**, la deuxième, située immédiatement au sud des Salines de Tarquinia, à l'intérieur des œuvres défensives côtières de type parallèles détachées, classifiée comme stable (*banquettes* de type D3) (fig. 3). Ici le dépôt atteint des épaisseurs supérieures au mètre distribué de manière discontinue sur une zone de quelques dizaines de mètres. Tout le littoral situé en face de Saline, présentant une forte érosion côtière, était fortement caractérisé par l'abondance de rhizomes même regroupés et de dimensions relevables, de faisceaux isolés ou regroupés avec des feuilles sèches et des feuilles vertes. La présence de la *Posidonia oceanica* en mottes de dimensions relevables est indicative. L'échantillon n. 2 a bien représenté cette situation car il est exclusivement composé de faisceaux verts (frais) et rhizomes (environ 53 %) et de feuilles longues principalement vertes (46 %). L'indice de fragmentation est plus élevé par rapport à ceux mesurés, soit d'environ 22, indiquant un matériel principalement complet, peu remanié et très récent.



Figure 3 - Dépôts de plage de *Posidonia oceanica* immédiatement au sud des Salines de Tarquinia, classifiée comme stable (Photo: Giancarlo Bovina).

Immédiatement au sud de l'embouchure de Mignone la présence abondante de *Cymodocea nodosa* en amas est certainement significative surtout si elle est mise en relation avec les caractéristiques morphologiques et de croissance de la plante.

La côte basse rocheuse suivante présente des dépôts de *Posidonia oceanica* localement importants et bien structurés. En particulier des « mottes » de hauteur supérieure à 2 mètres (fig. 4), semblables à ceux observées au cours de l'étude réalisée par Marevivo au début du printemps 2001, ont été observées. La présence de restes foliaires de *Posidonia oceanica* fortement transformés, situés à la base du dépôt témoigne de la propension à l'accumulation de ce secteur et de la stabilité substantielle des *banquettes* de ce littoral. Ces restes de *Posidonia oceanica* proviennent probablement de la prairie de la Frasca et de celle de Mattonara, situées entre l'embouchure de Mignone et l'extrémité septentrionale du Port de Civitavecchia.

L'**échantillon 3** a été prélevé à quelques centaines de mètres au sud de Torre Santagostino, au niveau de la banquette plus importante observée lors de la recherche. La composition du dépôt est caractérisée par la nette prédominance de restes de feuilles brunes de *Posidonia oceanica* et secondairement de matériel fibreux et rhizomes. L'analyse dimensionnelle met en évidence la rupture des feuilles et permet de calculer un indice de fragmentation 3.1 (moyennement fragmenté) relatif à un matériel remanié peu récemment.

La reconnaissance directe du littoral situé entre la Centrale Enel et la zone d'expansion du Port de Civitavecchia n'a pas pu être réalisée en raison des difficultés d'accès de la zone.



Figure 4 - Dépôts de *Posidonia oceanica* bien structurés, au sud de l'embouchure de Mignone (Photo: Giancarlo Bovina).

Au Sud de Civitavecchia jusqu'à Capo Linaro (en face la prairie de Civitavecchia, ainsi comme dénommée par l'étude SNAMPROGETTI 1991) les dépôts de plage sont insuffisants à l'exception d'un modeste dépôt, classifié comme D2, observé au niveau d'une structure artificielle adhérente. À Est de Capo Linaro, en coïncidence avec la prairie de Santa Marinella, de nombreux dépôts de plage structurés de type transitoire (banquettes de type D2) de nature différente, mais jamais importants (épaisseur maximale d'environ de 0.5 ÷ 0.6 mètre juste au Sud du petit port de Santa Marinella), ont été observés dans les calanques et adossés aux œuvres de protection côtière. Le secteur plus oriental, à l'Ouest de l'embouchure du Fleuve Rio, a été utilisé pour caractériser les dépôts de plage de ce littoral (**échantillon 4**). La présence de sédiment (sable grossier avec des petits galets) à l'intérieur de ce dépôt est plutôt élevée. La *Posidonia oceanica* est substantiellement représentée par des feuilles brunes et des éléments fibreux. D'un point de vue dimensionnel le matériel végétal est plutôt fin, fortement fragmenté (avec un indice de fragmentation 0.6, le plus faible observé), représentatif de condition de remaniement considérable et prolongé. Jusqu'au Château de Santa Severa (Pyrgi) les dépôts de plage de *Posidonia oceanica* sont variables depuis de légères traces à "abondants" avec la présence de fragments foliaires et la prédominance de rhizomes et des égagropiles. La présence de

faisceaux et de petites mottes est parfois significative. La présence de zones militaires a empêché la reconnaissance du littoral situé en face de l'extrémité orientale de la prairie de Santa Marinella.

Littoral du Latium Méridional (Trait côtier compris entre Torre Astura (Nettuno) et Grotta di Tiberio, loc. Sperlonga; Planche 2)

Le littoral compris entre Tour Astura et l'embouchure du canal Acque Alte (Foce Verde) présente seulement quelques traces éparses de restes de *Posidonia oceanica* (fragments de rhizomes et petites égagropiles); l'unique exception est une modeste accumulation de débris foliaires mélangés à des algues, représentative d'un matériel longuement remanié. Le dépôt observé à Foce Verde (Lido de Latine), est représentatif d'un récent dépôt de plage, éparses, mais important, de *Cymodocea nodosa* (fig. 5). Compte-tenu des caractéristiques morphologiques et de la densité des prairies de *Cymodocea nodosa*, les accumulations petites mais très abondantes sont certainement représentatives d'une action énergique de la houle qui a dû intéresser de vastes superficies de la couverture végétale.



Figure 5 - Dépôt de *Cymodocea nodosa*, Foce Verde (Photo: Giancarlo Bovina).

Afin d'obtenir des informations utiles sur les caractéristiques chimiques (la composition et la texture de la *Cymodocea nodosa* n'est pas analysable selon la méthodologie mise à point pour la *Posidonia oceanica*), un échantillon de dépôt de plage a été prélevé (**échantillon**

5). Les dépôts de plage du secteur suivant, jusqu'à hauteur de Capo Portiere (Latina), se sont montrés relativement abondants, discontinus et sont essentiellement constitués de restes de feuilles et de rhizomes; la présence de parties de mottes et de faisceaux entiers, verts et secs, est moins fréquente, mais représentative. La *Cymodocea nodosa* est toujours présente même si principalement en traces. Au Sud, jusqu'à hauteur de l'embouchure du Canal de Lavorazione (Bufalara), les mêmes éléments ont seulement été observés en traces. A proximité de la jetée de levante de l'embouchure du canal, un modeste dépôt semi structuré classifié comme D1, duquel provient l'**échantillon 6**, a été observé (fig. 6); cet échantillon peut être considéré représentatif de la prairie de Fogliano observé au large du littoral décrit. Le dépôt est essentiellement constitué de feuilles brunes et secondairement de matériel fibreux (restes de rhizomes).



Figure 6 - Dépôt semi structuré observé le long du littoral de Sabaudia et représentatif de la prairie de Fogliano (Photo: Giancarlo Bovina).

L'analyse dimensionnelle a mis en évidence la fragmentation sensible des feuilles et des rhizomes (I.F. = 1.32) qui, ensemble aux autres caractéristiques du dépôt, confirment le remaniement sensible du matériel. Entre l'embouchure de la Lavorazione et Torre Paola, à proximité du Promontoire du Circeo, des dépôts de plage ont été observés en traces d'abondance variable, constitués essentiellement de rhizomes de différentes dimensions et d'égagropiles. Des restes foliaires, des faisceaux secs et des petites mottes ont été observés seulement localement.

Dans les petites et rares calanques présentes le long du Promontoire du Circeo de modestes traces de restes de *Posidonia oceanica* non cartographiables ont été observées. Après le promontoire rocheux, à l'Est du Port de San Felice Circeo, sur les plages en forte régression situées en face de la prairie articulée entre Torre Vittoria et Porto Badino, les dépôts de plage sont continus mais seulement en traces plus ou moins évidentes. La composition se caractérise par une absence de matériel foliaire, même fragmenté, à faveur de la composante fibreuse et des restes de rhizomes et d'égagropiles. La présence de faisceaux entiers, secs et verts, et de quelques mottes est importante sur quelques traits, et en particulier à l'est du Port Badino. Aucun dépôt important n'a été observé sur toute la zone.

Le long du littoral compris entre Terracina et Sperlonga, caractérisée par la prairie de Terracina - Lac Lungo, les dépôts de plage ont toujours été observés en traces de diverse nature, principalement de rhizomes et d'égagropiles. Le littoral situé en face de Lago Lungo présente des dépôts de consistance majeure avec des détritiques foliaires plus évidents et des bandes entières souvent vertes. A proximité de la saillie rocheuse de Torre Truglia (Sperlonga), les uniques banquettes du secteur méridional du Latium (Îles Pontines exclues) ont été observées. Le dépôt structuré, également érodé et fragmenté (en phase de destruction évidente), s'étend sur quelques dizaines de mètres et présente des épaisseurs légèrement supérieures au mètre. **L'échantillon 7** a été prélevé sur ce site. L'analyse de la composition, outre à la présence de rhizomes, a mis en évidence une prédominance de la matrice foliaire sur celle fibreuse, également bien représentée. Du point de vue dimensionnel la *banquette* de Sperlonga est plutôt fragmentée avec un index I.F. d'environ 1.9 qui confirme le sensible remaniement et l'âge du matériel qui a donné naissance au dépôt.

L'étude des dépôts de plage phanérogames marins le long des côtes du Latium a partiellement concerné l'archipel Ponziano qui a été intéressé au moyen de la reconnaissance de la côte de l'île de Ventotene. Le but de cette reconnaissance était d'identifier un dépôt de plage structuré représentatif du contexte environnemental de l'île afin de l'utiliser comme terme de comparaison qualitative: la distance de la terre-ferme et l'absence de sources importantes de contamination ont permis de considérer les prairies de *Posidonia oceanica* de Ventotene comme "blanc" de référence pour l'étude chimique. L'échantillon à analyser (**échantillon 8**) provient d'une banquette formée dans l'anse de Parata Grande, sur une plage de galets délimitée par des « fronts » de roche volcanique et des gros blocs dérivant de mécanismes d'écroulement. Le dépôt de plage, distribué sur

environ 25 mètres, présentait des épaisseurs maximums de l'ordre de $1.0 \div 1.2$ m. L'échantillon prélevé à l'intérieur du dépôt de plage est caractérisé par la présence de sédiment (sable grossier/caillouteux fin) pour 30% du poids. Le reste est exclusivement composé par la *Posidonia oceanica*. La composition de la fraction de *Posidonia oceanica* est de 70 % de feuilles (brunes et vertes), 24 % de rhizomes et 4 % de matériel fibreux. L'indice de fragmentation, obtenu par les analyses dimensionnelles, est de 5.3, significatif d'une fragmentation moyenne-faible, indiquant une réélaboration insuffisante du matériel et une origine plutôt récente du dépôt.

2.4.2. Aspects chimiques

Les échantillons de *Posidonia oceanica* de plage, formant des accumulations structurées et liés aux différentes prairies présentes le long des côtes du Latium, ont permis d'effectuer une évaluation générale et de première approximation concernant les aspects chimiques des biomasses végétales considérées. Comme déjà indiqué, la *Posidonia oceanica* est un excellent indicateur environnemental car elle est sensible à l'état de pollution des eaux (elle est fortement limitée par les phénomènes « d'entourbement » et de dilution des eaux marines) et elle est en outre capable d'assimiler les métaux lourds présents dans le milieu de développement (Ancora et al, 2004; Augier et Maudinas, 1979; Augier et al, 1984; Baldissera Nordio et al, 1967; Baroli et al, 2001; Bougerol et al, 1995; Calmet et al, 1988; Calmet et al, 1991; Capiomont et al, 2000; Caredda et al, 1998; Castaldi et al, 2000; Catsiki et Panayotidis, 1993; Maserti et al, 1986; Pergent-Martini, 1998; Pergent-Martini et Pergent, 2000; Pergent-Martini et al, 2005; Tranchina et al, 2005). Dans l'hypothèse d'une réutilisation de ces matériels pour des interventions de restauration naturaliste et de protection des milieux dunaires, la compatibilité environnementale de ces processus a été évaluée. Comme mis en évidence dans les rapports techniques précédents (Bovina et al, 2007a, b), l'enterrement des végétaux d'origine marine dans les dépôts dunaires fait partie du cycle naturel et constitue un mécanisme capable d'amorcer et de favoriser la formation et la stabilisation des dépôts éoliens (au moins pour la fraction de la biomasse végétale qui reste piégée à terre). L'hypothèse de utilisation éventuelle des dépôts végétaux de plage pour la consolidation dunaire est donc cohérente du point de vue écologique, mais dans le cadre du projet POSIDUNE le groupe de travail sur les biomasses, institué intentionnellement, a considéré au moins de manière temporaire, le D.M. 367/03 (qui

définit les standards de qualité environnementale des eaux et des sédiments marins côtiers) comme référence utile. A celles-ci s'ajoute les analyses du Ba, Cu, Fe, Mn et Zn.

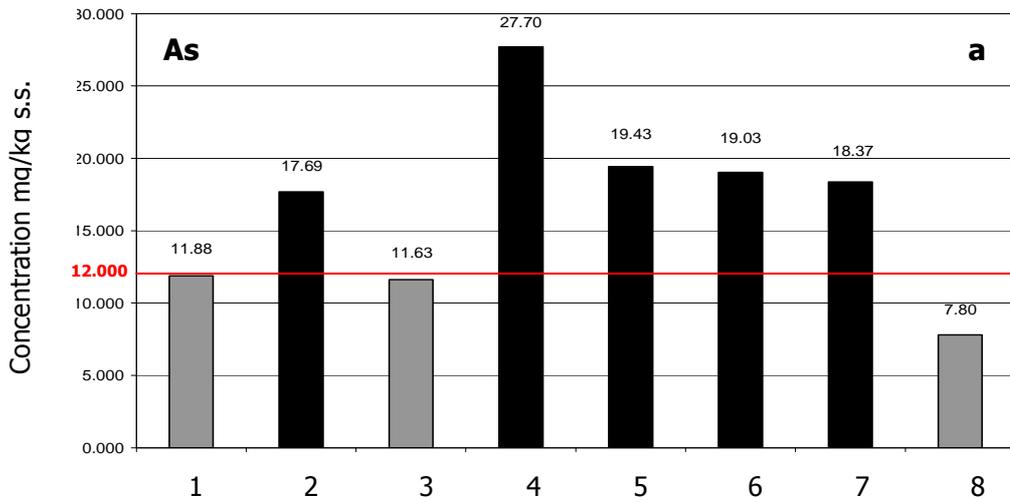
Il est convient de préciser que puisqu'il s'agit d'une matrice biotique, la référence au D.M. 367/03 et s.m.i doit être considérée exclusivement de manière fonctionnelle à la réalisation des interventions de reclassement et de rétablissement morphologique des milieux côtiers où un déplacement de matériel est prévu (dans le cas présent sédiment et biomasses végétales comme prévu par la solution 2 de la circulaire 8123 du 17 Mars 2006).

En plus des échantillons de *Posidonia oceanica*, l'échantillon 5 (relatif à la *Cymodocea nodosa* prélevée à Foce Verde) a été considéré afin de mettre en évidence des possibles mécanismes d'accumulation.

Le tableau 1 reporte les analyses relatives aux échantillons précédents (Bovina et al, 2007). Les concentrations en Arsénique, Cadmium et PCB_{TOT} en relation aux limites indiquées par le D.M. 367/03 sont reportées dans les graphiques 1a, 1b et 1c.

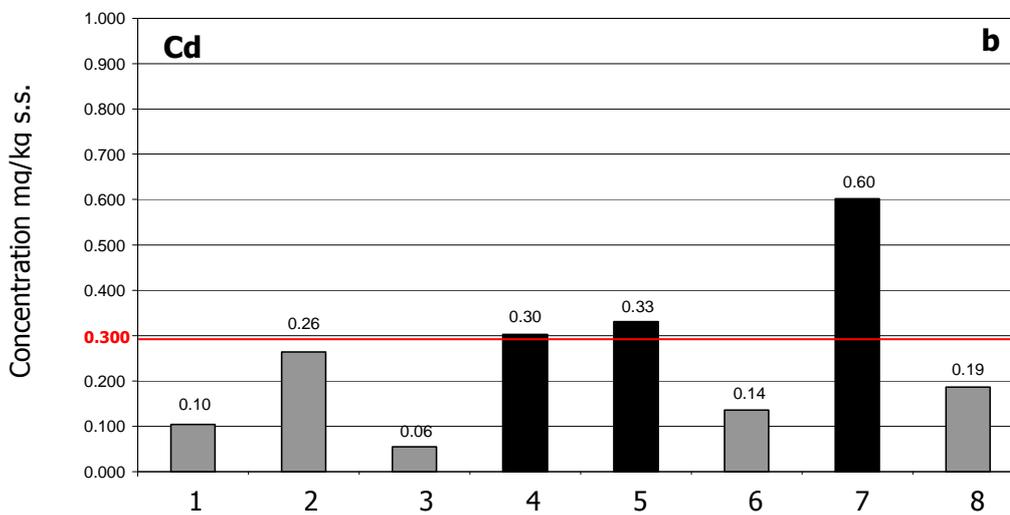
Analyses	Unité de mesure	D.M. 367/03	Ech. 1	Ech. 2	Ech. 3	Ech. 4	Ech. 5	Ech. 6	Ech. 7	Ech. 8
As	mg/kg ss	12	11.881	17.694	11.629	27.704	19.427	19.032	18.372	7.798
Cd	mg/kg ss	0.3	0.104	0.264	0.055	0.303	0.331	0.136	0.602	0.186
Cr tot	mg/kg ss	50	26.242	1.945	1.542	3.004	0.114	4.661	4.679	19.816
Hg	mg/kg ss	0.3	0.102	0.129	0.095	0.098	0.024	0.093	0.029	0.045
Ni	mg/kg ss	30	12.321	21.246	25.812	11.749	< 1.0	24.140	14.611	24.221
Pb	mg/kg ss	30	8.832	3.316	6.948	4.898	1.809	10.441	7.461	10.180
Cu	mg/kg ss		10.067	9.962	11.235	12.109	3.259	15.291	9.636	17.100
Zn	mg/kg ss		19.590	36.617	53.987	21.456	16.111	19.831	29.798	36.794
Ba	mg/kg ss		55.864	2.987	2.375	2.306	< 2.0	6.608	4.366	29.080
Fe	%		0.717	0.139	0.161	0.599	0.203	0.419	0.327	0.759
Mn	mg/kg ss		204.155	85.901	70.992	71.770	21.742	219.716	123.443	167.309
V	mg/kg ss		27.813	9.183	12.460	15.852	1.805	23.666	15.651	21.868
Tl	mg/kg ss		2.100	0.379	0.521	2.188	0.033	0.529	0.035	0.026
IPA tot	mg/kg ss	0.2	0.05	0.08	0.76	0.54	0.05	0.61	1.61	0.094
PCB tot	mg/kg ss	0.004	0.0036	0.0039	0.0055	0.0065	0.0045	0.0193	0.0124	0.0022

Tableau 1 - Résultats chimiques des analyses relatives aux échantillons de *Posidonia oceanica* et *Cymodocea nodosa* de plage présentes le long des côtes du Latium.



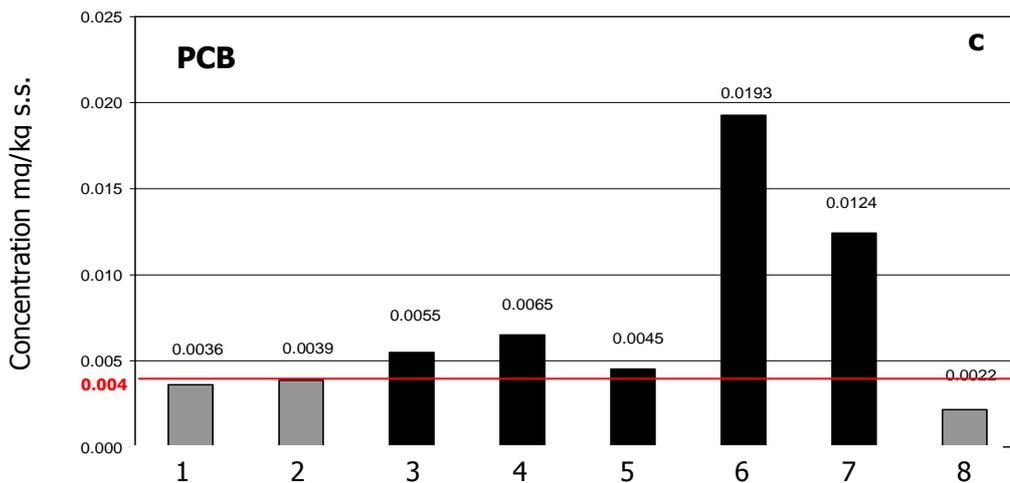
Échantillons

- 1 - Murelle
- 2 - Porto Clementino
- 3 - La Frasca
- 4 - Pontenuovo
- 5 - Foce Verde
- 6 - Bufalara
- 7 - Torre Truglia
- 8 - Parata Grande



Échantillons

- 1 - Murelle
- 2 - Porto Clementino
- 3 - La Frasca
- 4 - Pontenuovo
- 5 - Foce Verde
- 6 - Bufalara
- 7 - Torre Truglia
- 8 - Parata Grande



Échantillons

- 1 - Murelle
- 2 - Porto Clementino
- 3 - La Frasca
- 4 - Pontenuovo
- 5 - Foce Verde
- 6 - Bufalara
- 7 - Torre Truglia
- 8 - Parata Grande

Graphique 1 - Concentrations de Arsénique (a), Cadmium (b) et PCB_{TOT} (c) relatives aux échantillons de *P. oceanica* et *C. nodosa* de plage. Avec le couleur noir sont reportées le dépassement des limites du D.M. 367/03 (tableau 1).

Dans l'ensemble du point de vue chimique on observe:

1. La forte variabilité des concentrations des différents éléments et des substances analysées.
2. L'absence d'une tendance systématique et univoque entre les différents échantillons.
3. L'absence substantielle de corrélation entre des sites représentatifs de différentes conditions environnementales.

Ci-dessous est reportée l'évaluation de la comparaison.

L'**échantillon 1**, de Murelle à Montalto di Castro, présente les fortes concentrations mesurées en Ba (55.86 mg/Kg), en Cr (26.24 mg/Kg), en Fe (0.72 mg/Kg) et en Mn (204.16 mg/Kg) et une concentration relativement élevée en As (11.9 mg/Kg) et en Hg (0.102 mg/Kg). Le même échantillon montre les plus basses valeurs de concentration en Zn, en Cd et en PA. La comparaison avec les valeurs limites prévues par le D.M. 367/2003 pour les sédiments ne présente pas de dépassements même si quelques paramètres en sont proches: As et PCB_{TOT} (3.6 µg/Kg contre 4.0 µg/Kg. L'**échantillon 2** entre Porto Clementino et Tarquinia, présente la plus forte concentration en Hg (0.129 mg/Kg) et la plus faible en Fe. Selon le DM367/2003 on observe le dépassement des limites de l'As (17.7 mg/Kg par rapport à 12 mg/Kg du DM), et le rapprochement des limites du Cd (0,26 mg/Kg par rapport à 0.30 mg/Kg) et des PCB_{TOT} (3.9 µg/Kg).

L'**échantillon 3**, prélevé sur le littoral de la Frasca, situé au nord de la centrale électrique et de la zone portuaire de Civitavecchia, présente les plus fortes valeurs en Ni (25.81 mg/Kg) et en Zn (53.99 mg/Kg) et les plus basses en Ba et en Cr. La comparaison avec les limites du DM 367/2003 met en évidence le dépassement des limites pour les PCB_{TOT} (5.5 µg/Kg) et l'obtention de la limite pour l'As (11.63 mg/Kg).

Le matériel déposé sur la plage, recueilli le long du littoral à l'est de Santa Marinella (**échantillon 4**), présente la plus forte concentration en As soit 27.70 mg/Kg (qui dépasse fortement la limite de 12 mg/Kg du DM 367/2003) et la plus basse pour le NI et le Cd. Toujours selon le DM les limites des PCB_{TOT} sont même dépassées (6.5 µg/Kg) alors que la concentration en Cd coïncide substantiellement avec la limite (0,30 µg/Kg).

Le dépôt de plage de posodonie prélevé à proximité de l'embouchure du canal de Lavorazione (Saubaudia), correspondant à l'**échantillon 6**, présente les plus fortes concentrations mesurées en Pb (10.44 mg/Kg), en Mn (219.76 mg/Kg) et en PCB_{TOT} (19.3

$\mu\text{g/Kg}$). Ce dernier paramètre excède largement la valeur limite du DM ($4 \mu\text{g/Kg}$); de même l'As résulte supérieur aux 12 mg/Kg prévus également par le même DM.

L'**échantillon 7**, prélevé à l'extrémité de la côte entre Terracina et Sperlonga, à proximité du saillies rocheuse de Torre Truglia (Sperlonga), présente la plus forte concentration en Cd (0.62 mg/Kg) et la plus basse en Cu. Par rapport aux limites prévues pour les sédiments par le DM 367/2003 en plus du dépassement du Cd on note celui des PCB_{TOT} ($12.4 \mu\text{g/Kg}$) et de l'As ($18.37 \mu\text{g/Kg}$).

L'échantillon prélevé à Ventotene, sur la plage sableuse-caillouteuse de Parata Grande, (**échantillon 8**), présente les majeures concentrations en Cu (17.10 mg/Kg), en Fe (0.76 mg/Kg), en Ni (24.22 mg/Kg) et en Pb (10.18 mg/Kg) et la seconde valeur en Cr (19.82 mg/Kg); les plus basses pour les PCB_{TOT} ($2.2 \mu\text{g/Kg}$) et l'As (7.8 mg/Kg). On ne note pas de dépassement par rapport au DM 367/2003. Il convient toutefois de souligner que cet échantillon, prélevé dans le but de disposer d'un "blanc", présente de manière très homogène des concentrations en métaux relativement élevées.

La comparaison des données qualitatives relatives à l'**échantillon 5** des restes de dépôt de plage de *Cymodocea nodosa*, prélevé près de Foce Verde (embouchure du canal de l'Acque Medie à Marina di Latina) est particulièrement intéressante. Cet échantillon présente les concentrations plus basses par rapport aux échantillons de *Posidonia oceanica*; toutefois l'As (19.43 mg/Kg), le Cd ($0,33 \text{ mg/Kg}$) et les PCB_{TOT} ($4.5 \mu\text{g/Kg}$) sont plutôt élevés et dépassent les limites prévues par le DM 367/2003 pour les sédiments. Ce résultat indique que même la *Cymodocea nodosa*, qui présente une structure, une couverture et des caractéristiques de développement très différentes de la *Posidonia oceanica*, semble être capable d'accumuler les substances présentes dans le milieu de développement, même si de manière moins efficace par rapport à l'autre phanérogame. Il s'agit évidemment d'une hypothèse qui nécessite d'être plus approfondie.

2.5. Considérations finales

Les caractéristiques de distribution des dépôts de plage de *Posidonia oceanica*, observées lors des relevés de terrain entre le 30 janvier et le 22 février 2007, soulignent la carence des dépôts structurés (*banquettes*) le long de la côte du Latium qui, outre à la proximité des "prairies mères", sont favorisés par des conditions géomorphologiques particulières comme la présence de cales, de côtes basses rocheuses, des œuvres de défense côtière, etc (MAREVIVO, 2001; MAREVIVO, 2003).

La comparaison entre la présente campagne et celle réalisée à Talamone en 2003 (MAREVIVO, 2003), même si relative à des zones côtières différentes (pour la localisation, l'extension et les caractéristiques géomorphologiques, etc.), met en évidence, dans les mêmes *banquettes*, le fort remaniement des matériaux et la présence abondante des rhizomes et/ou de leur matériel dérivant fibreux. Du point de vue de la dimension, la comparaison des diagrammes correspondants met en évidence une analogie évidente de la distribution des échantillons, qui traduit une variabilité dimensionnelle comparable (fig. 2b). Même du point de vue de la composition, on observe une comparabilité substantielle entre les deux campagnes (les échantillons du littoral du Latium se situent tous dans la portion supérieure du diagramme) même si pour la présente étude les dépôts foliaires (présence de feuille supérieure à 80 %) relevés le long de la côte de Talamone et les dépôts structurés de la baie de Talamone constitués essentiellement de matériel fibreux n'ont pas été pris en considération (fig. 2a).

Tout laisse penser à l'existence de phénomènes érosifs importants qui intéressent les prairies du littoral du Latium (comme de la Toscane), mis en évidence par les caractéristiques des dépôts de plage non structurés (faisceaux simples ou multiples, agrégations de rhizomes jusqu'aux mottes).

Les seules *banquettes* définissables comme stables sont celles relevées à Santagostino juste au Nord de Civitavecchia, dépôts déjà observés lors des relevés précédents (MAREVIVO, 2003). Dans la présente étude, la stabilité d'une banquette a été interprétée en fonction de la propension au mécanisme de formation dans un environnement déterminé. D'un point de vue structurel, la présence de couches de base constituées d'amas foliaires fortement transformés, confirment le prolongement dans le temps de l'accumulation végétale et donc la nécessité de préserver ces accumulations comme indiqué par le protocole SPAMI de la convention de Barcelone (Bovina et al, 2007).

Les accumulations de feuilles de *Posidonia oceanica* (qui représentent le matériel perdu naturellement par la plante au cours de son cycle végétatif) même celles partiellement stables, étaient peu fréquentes et de dimensions très limitées.

La constitution des *banquettes*, en plus du matériel foliaire (qui représente la « matrice liante » des *banquettes*), présente généralement des éléments fibreux et des rhizomes qui correspondent moyennement au 50 % du dépôt végétal. Les données de la composition, synthétisées pour faciliter la comparaison directe dans le diagramme triangulaire de classification reportée en figure 2a, et celles dimensionnelles (fig. 2b), et les indices de fragmentation correspondants, généralement plutôt bas, indiquent la présence abondante du

matériel fibreux (dérivant de la désagrégation des rhizomes) et un remaniement sensible des végétaux.

La présence de *Posidonia oceanica* sur la plage, même en traces exiguës, a été observée le long du littoral étudié. Le matériel déposé sur la plage est constitué de rhizomes, de fibres libres et d'égagropiles dérivants tout deux du remaniement et de la fragmentation des rhizomes. De vastes traits côtiers présentent des dépôts de plage constitués de faisceaux entiers (rhizomes individuels ou en groupes avec des feuilles intactes) d'âge différent. A ces derniers ont souvent été associées des mottes entières de dimension variable. En particulier, le phénomène a été observé au niveau de Saline de Tarquinia. De même le littoral de Sperlonga, même si de manière inférieure, est fortement caractérisé par d'importants dépôts de plage constitués des parties basales de la plante.

La prévalence de la fraction « rhizome », provenant des parties basales des plantes, et surtout de faisceaux, et mottes indique des conditions hydrodynamiques élevées, conditions suffisantes pour produire le déchaussement des plantes et la démolition d'une partie des prairies auxquels des mécanismes d'érosion côtière pourraient également s'associer (Blanc, 1971; Boudouresque et al, 2006; De Falco et al, 2002; Jedy De Grissac, 1984; Picard, 1953).

De même la *Cymodocea nodosa* est largement distribuée, même si généralement en traces le long du littoral étudié. Certaines zones, bien que caractérisées par une biomasse végétale potentielle nettement plus basse par rapport à la *Posidonia oceanica*, présentent des accumulations de *Cymodocea nodosa* plutôt consistantes comme par exemple au niveau de l'embouchure du Fleuve Mignone et de Foce Verde (Latina). Les fortes conditions hydrodynamiques seraient même responsables de l'érosion des prairies de *Cymodocea nodosa* dont leurs conséquences sont enregistrées au niveau des accumulations de Foce Verde.

Le présent travail confirme les résultats obtenus dans le cadre du programme Marevivo en 2001 sur le littoral de Talamone et montre également que l'utilisation des *banquettes*, et de manière plus générale des dépôts de *Posidonia oceanica*, comme indicateur de l'état de santé des prairies, permet d'obtenir des informations sur ces écosystèmes à l'aide de quelques caractéristiques des biomasses végétales déposées le long de la côte. L'analyse croisée des « descripteurs » de la prairie mère et des caractéristiques des dépôts de plage (réalisée au cours de l'étude le long du littoral toscan) a permis de réaliser les observations suivantes:

1. Les dépôts de plage traduisent l'état d'équilibre de la prairie dans le milieu environnant (structures érosives, déchaussement des rhizomes, présence de matériel fibreux, présence de rhizomes, mottes et parties de matte). Cela suggère la possibilité d'insérer également l'observation et le relevé des dépôts de plage de phanérogame marin dans les plans

généraux de monitoring du milieu marin-côtier. De plus, cela permet d'obtenir assez rapidement des indications sur l'état de santé des prairies surtout en relation avec les mécanismes érosifs.

2. Le matériel végétal déposé sur la plage se prête à la réutilisation si les dépôts ne sont pas stables.
3. Si les dépôts sont stables, alors selon le Protocole SPAIMI de la Convention de Barcelone ils doivent être protégés. Le long de la côte du Latium, probablement grâce aux conditions géomorphologiques particulières, l'unique exemple de dépôts stables est représenté par les *banquettes* de S. Agostino (Planche 1). Par conséquent elles devraient être protégées en les maintenant en place et en les nettoyant périodiquement des refus.

En relation avec le dernier point, la situation mise en évidence par l'échantillon de Ventotene est particulièrement intéressante. En effet la prairie de cette zone présente des concentrations en métaux lourds parmi les plus fortes alors qu'elle devrait se développer dans un contexte environnemental peu conditionné par les activités anthropiques. Il faut néanmoins considérer que certains éléments (dont l'arsénique) peuvent être présents dans le milieu pour des causes naturelles liées aux caractéristiques géochimiques des fonds sur lesquels se développe la prairie ou de ceux adjacents.

Pour interpréter les résultats analytiques il est également nécessaire de considérer que le matériel échantillonné est essentiellement constitué de végétaux mais la présence de petits fragments d'autres matériels ou substances ne peut pas être exclue. Ces fragments peuvent donner lieu à des concentrations anormales. En termes absolus un dépôt de plage représente un produit d'accumulation engendré par la houle et les mécanismes de ressac de tout ce qui se concentre sur la superficie marine (on pense même à de possibles effets de concentration des substances moins denses dans le film superficiel de la "microcouche") et qui se dépose sur le rivage.

4. Dans futur il sera nécessaire que les régions qui souhaitent gérer les biomasses végétales de plage aux sens de la circulaire n. 8123 du 17 Mars 2006, définissent les « valeurs de fond » de ces matrices biotiques car étant capable d'absorber et de relâcher des substances polluantes de et vers l'environnement voisin (marin et subaérien), aucune réglementation en vigueur en détermine ou en définit les standards de qualité.

2.6. Bibliographie

- Ancora S., Bianchi N., Butini A., Buia M.C., Gambi M.C., Leonzio C. (2004) – *Posidonia oceanica as a biomonitor of trace elements in the gulf of Naples: temporal trends by lepidocronology*. Environmental toxicology and Chemistry, 23(5): 1093-1099.
- Ardizzone G.D., La Monica G.B., Raffi R. (1994a) – *Carta della distribuzione dei sedimenti e delle praterie di Posidonia oceanica – Lazio Settentrionale*. Stampa Borgia, Roma, 1994.
- Ardizzone G.D., La Monica G.B., Raffi R. (1994b) – *Carta della distribuzione dei sedimenti e delle praterie di Posidonia oceanica – Lazio Centrale*. Stampa Borgia, Roma, 1994.
- Ardizzone G.D., La Monica G.B., Raffi R. (1994c) – *Carta della distribuzione dei sedimenti e delle praterie di Posidonia oceanica – Lazio Meridionale*. Stampa Borgia, Roma, 1994.
- Augier H., Maudinas B. (1979) – *Influence of the pollution on the photosynthetic pigments of the marine phanerogam Posidonia oceanica collected from different polluted areas of the region of Marseille (Mediterranean Sea, France)*. Ecol. Plant., 14 (2): 169-176.
- Augier H., Gilles G., Ramonda G. (1984) - *L'herbier de Posidonia oceanica et la pollution par le mercure sur le littoral des Bouches-Du-Rhone et du Var (France)*. International Workshop Posidonia oceanica Beds. GIS Posidonie publ. Fr., 1984, 1: 399-406.
- Baldissera Nordio C., Gallarati Scotti G., Rigoni M. (1967) – *Valore nutritivo e possibilità di utilizzazione zootecnica di Posidonia oceanica*. Atti Conv. Naz. Attività subacquee ital. 1: 21-28.
- Baroli M., Cristini A., Cossu A., De Falco G., Gazale V., Pergent-Martini C., Pergent G. (2001) – *Concentration of Trace Metals (Cd, Cu, Fe, Pb) in Posidonia oceanica Seagrass of Liscia Bay, Sardinia (Italy)*. Mediterranean Ecosystems: Structures and Processes, Ed. Springer-Verlag. pp. 95-99.
- Blanc J.J. (1971) – *Mouvements de la mère et notes de sédimentologie littorale*.
- Boccalaro F., Cantasano N. (2003) – *Posidonia oceanica per il consolidamento delle coste sabbiose (ovvero come difendere il litorale con l'aiuto delle piante)*. Aree Costiere – Accademia Nazionale del Lincei – XXI Giornata dell'Ambiente, Roma. pp. 207-214.
- Boudouresque C.F., Meinesz A. (1982) – *Découverte de l'herbier de Posidonie*. Cah. Parc. Nation. Port-Cros, Fr., 4: 1-79.
- Boudouresque C. F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., Tunesi L. (2006) – *Préservation et conservation des herbiers à Posidonia oceanica*. RAMOGE pub. 197 pp.
- Bougerol X., Pergent G., Gibert J. (1995) – *Compared bioaccumulation of mercury between the marine phanerogam Posidonia oceanica and the herbivorous fish Sarpa salpa: preliminary results*. Rapp. Comm. Int. Mer Médit, 34: 135.
- Bovina G., Cappucci S., Pallottini E. (2007a) - *Présence et état des dépôts de biomasse végétale de plage associées aux prairies de phanérogames marines*. POSIDUNE - Interactions de Posidonia Oceanica et Sable avec l'Environnement des Dunes Naturelles. Cahier Technique étendu de Phase A. pp. 132-151.
- Bovina G., Cappucci S., Pallottini E. (2007b) - *La gestion des biomasses végétales de plage*. POSIDUNE - Interactions de Posidonia Oceanica et Sable avec l'Environnement des Dunes Naturelles. Cahier Technique étendu de Phase B. pp. 37-54.
- Calmet D., Boudouresque C.F., Meinesz A. (1988) – *Memorization of nuclear atmospheric tests by rhizomes and scales of the Mediterranean seagrass Posidonia oceanica (Linnaeus) Delile*. Aquatic Botany, 30: 279-294.

- Calmet D., Charmasson S., Gontier G., Meinesz A., Boudouresque C.F. (1991) – *Chernobyl Radionuclides in the Mediterranean Seagrass Posidonia oceanica, 1986-1987*. J. Environmental Radioactivity 13, pp. 157-173.
- Cancemi G., Pasqualini V., Piergallini G., Baroli M., De Falco, Pergent-Martini C. (1997) – *Indagine cartografica sulla prateria a Posidonia oceanica (L.) Delile di Capo S. Marco (Golfo di Oristano), mediante elaborazione di immagini fotoaeree*. Bio. Mar. Medit. 4 (1): 472-474.
- Capiomont A., Piazzì L., Pergent G. (2000) - *Seasonal variations of total mercury in foliar tissues of Posidonia oceanica*. Journal of Marine Biological Association of the UK, 80 (6): 1119-1123.
- Caredda A.M., Cristini A., Ferrara C., Lobina M.F., Baroli M. (1998) – *Distribution of heavy metals in the Piscinas beach sediments (SW Sardinia, Italy)*. Environmental Geology 38 (2): 91-100.
- Casola E., Lanera P., Magnifico G., Plastina N., Scardi M., Valiante L. M., Vinci D. (2004) - *Analisi descrittiva della prateria di Posidonia oceanica nel tratto di mare compreso tra Santa Severa e Marina di Tarquinia (Lazio, Italia)*. Casagrandi, R. & Melià, P. (Eds.) Ecologia. Atti del XIII Congresso Nazionale della Società Italiana di Ecologia (Como, 8-10 settembre 2003). Aracne, Roma. [online] [URL:http://www.xiiicongresso.societaitalianaecologia.org/articles/Magnifico-131.pdf](http://www.xiiicongresso.societaitalianaecologia.org/articles/Magnifico-131.pdf)
- Castaldi P., Mulé P., Melis P. (2000) – *Heavy metals contents in organic matter amendments based on beached Posidonia oceanica*, Annali di Chimica 90: 741-746.
- Catsiki V.A., Panayotidis P. (1993) – *Copper, Chromium and Nickel in tissues of the Mediterranean Seagrasses Posidonia oceanica & Cymodocea nodosa (Potamogetonaceae) from Greek coastal areas*. Chemosphere, 26 (5): 963-978.
- Chessa L.A., Fustier V., Fernandez C., Mura F., Pais A., Pergent G., Serra S., Vitale L. (2000) – *Contribution to the knowledge of banquettes of 'Posidonia oceanica' (L.) Delile in Sardinia Island*. Biol. Mar. Medit. 7 (2): 35-38.
- De Falco G., Baroli M., Simeone S., Piergallini G. (2002) – *La rimozione della Posidonia dalle spiagge: conseguenze sulla stabilità dei litorali*. Risultati del Progetto ARENA.
- Diviacco G., Spada E., Virno Lamberti C. (2001a) – *Le fanerogame marine del Lazio*. ICRAM, Roma. pp. 113.
- Diviacco G., Spada E., Virno Lamberti C. (2001b) – *Le fanerogame marine del Lazio*. ICRAM, 14 carte, Roma.
- Diviacco G, Tunesi L., Boudouresque C.F. (2006) – *Feuilles mortes de Posidonia oceanica, palges et réensablement*. Préservation et conservation des herbiers à Posidonia oceanica. RAMOGE pub. pp. 61-69.
- Gabellini M., Nicoletti L., La Valle P., Celia Magno M., Fanelli E., Nonnis O., Paganelli D., Pulcini M. (2002) – *Studio per l'impatto ambientale connesso allo sfruttamento di depositi sabbiosi sommersi lungo la piattaforma continentale laziale ai fini di ripascimento*. ICRAM, Regione Lazio.
- Guccione M., Bovina G. & Gori M. (2005) – *Tutela della connettività ecologica degli habitat marini e costieri: una proposta per l'organizzazione e la gestione dei dati*. APAT, Rapporti 54/2005, pp. 100, Roma.
- Jeudy De Grissac A. (1984) – *Effets des herbiers à Posidonia oceanica sur la dynamique marine et la sédimentologie littorale*. Boudouresque CF, Jeudy de Grissac A, Olivier J (eds) International Workshop Posidonia oceanica Beds. GIS Posidonie Publication 1: 437-443 .
- MAREVIVO (2001) – *Programma Nazionale di individuazione e valorizzazione della Posidonia oceanica*. Convenzione Marevivo/Ministero dell'Ambiente 1998. Relazione Illustrativa V semestre (Rapporto inedito).
- MAREVIVO (2003) – *Programma di indagine sulle Banquettes di Posidonia oceanica come indicatore dello stato di conservazione delle praterie*. Realazione illustrativa finale e tavole allegate (Rapporto inedito). Convenzione Marevivo – Ministero dell'Ambiente.

- Maserti B. E., Ferrara R., Paterno P. (1986) – *Biodisponibilità del mercurio dal sedimento: ruolo svolto dalle praterie di Posidonia oceanica*. Nova Thalassa, 8, Suppl. 3, pp. 171-175.
- Molinier R., Picard J. (1953) – *Notes biologiques à propos d'un voyage d'études sur les côtes de Sicile*. Ann. Inst. Océanogr., 28(4): 163-187.
- Pergent-Martini C. (1998) – *Posidonia oceanica: a biological indicator of past and present Mercury contamination in the Mediterranean Sea*'. Marine Environmental Research, 45 (2): 101-111. Elsevier Science Ltd. Great Britain.
- Pergent-Martini C., Pergent G. (2000) – *Marine phanerogams as a tool in the evaluation of marine trace-metal contamination: an example from the Mediterranean*. Int. J. Environment and Pollution, 13 (1-6): 126-147.
- Pergent-Martini C., Leoni V. , Pasqualini V., Ardizzone G.D., Balestri E., R. Bedini, Belluscio A., Belsher T., Borg J., Boudouresque C.F., Boumaza S., Bouquegneau J.M., Buia M.C., Calvo S., Cebrian J., Charbonnel E., Cinelli F., Cossu A., Di Maida G., Dural B., Francour P., Gobert S., Lepoint G., Meinesz A., Molenaar H., Mansour H.M., Panayotidis P., Peirano A., Pergent G., Piazza L., Pirrotta M., RELINI G., Romero J., Sanchez-Lizaso J.L., Semroud R., Shembri P., Shili A., Tomasello A., Velimirov B. (2005) - *Descriptors of Posidonia oceanica meadows: use and application*. Ecological Indicators, vol. 5, pp.213-230.
- Picard J. (1953) – *Importance, répartition et rôle du matériel organique végétal issu les prairies de Posidonies*. Rapp. P.V. Réunion. Commiss. Internation. Explor. Sci. Médit., 18 (2): 189-202.
- SNAMPROGETTI S.P.A.(1991) - *Mappatura delle praterie di Posidonia oceanica lungo le coste delle regioni Liguria, Toscana, Lazio Basilicata e Puglia*. Vol. 3 Relazione Generale. Ministero della Marina Mercantile ICDM.
- Tranchina L., Miccichè S., Bartolotta A., Brai M., Mantegna R.N. (2005) – *Posidonia oceanica as a historical monitor device of lead (Pb) concentration in marine environment*. pp. 32
- Vitale L., Chessa L.A. (1998) – *Indagini sulle banquettes di Posidonia oceanica (L.) Delile sul litorale di Stintino (Sardegna NW)*. Bio. Mar. Medit., 5 (1): 657-660.

3. RECUPERATION ET RECONSTRUCTION DES SYSTEMES DE DUNES DANS LA LOCALITE GOMBO

PROVINCE DE PISA - G. Bracci, A. Carli, A. Conti - g.bracci@provincia.pisa.it
 UNIVERSITÀ DE PISA - G. Sarti - sarti@dst.unipi.it

3.1. Introduction

Le littoral de Pise s'étend depuis l'embouchure du canal "Scolmatore d'Arno" au Sud jusqu'au "fosso della Bufalina" au Nord pour une longueur de 26 km, totalement comprise dans la portion de côte qui va du port de Libourne à celui de Viareggio. Ce littoral constitue la partie méridionale d'une unité physiographique, de 65 km de longueur, délimitée au Nord par la Punta Bianca (dernier contrefort de Monte Marcello) et au Sud par le port de Libourne.

Au Nord du Gombo, entre les deux points fixes qui correspondent, pour l'un, aux brise-lames et pour l'autre à l'embouchure protégée du "Fiume Morto", le trait de côte a évolué vers une figure à spirale avec un centre déplacé au sud de la dite portion de côte, où se trouve aujourd'hui une profonde anse (fig. 2), semblable à celle qui se forme sous l'action de la houle pour les ouvrages qui interceptent de façon sensible le drift littoral.

Au cours des dernières années le phénomène érosif sur la portion de littoral immédiatement au Nord du «Gombo» paraît s'accroître, surtout en occasion de certains événements météo marins particulièrement intenses (septembre octobre 2005 et 2006). La comparaison entre plusieurs relevés du trait de côte, répétés à peu de mois d'intervalle avant et après les dits événements, a en effet montré un recul moyen d'environ 10 mètres par an, condition qui a provoqué l'accentuation de la crise du système dunaire du littoral (fig. 1).



Figure 1 - Détails de la portion de dune récemment objet d'érosion (décembre 2005).

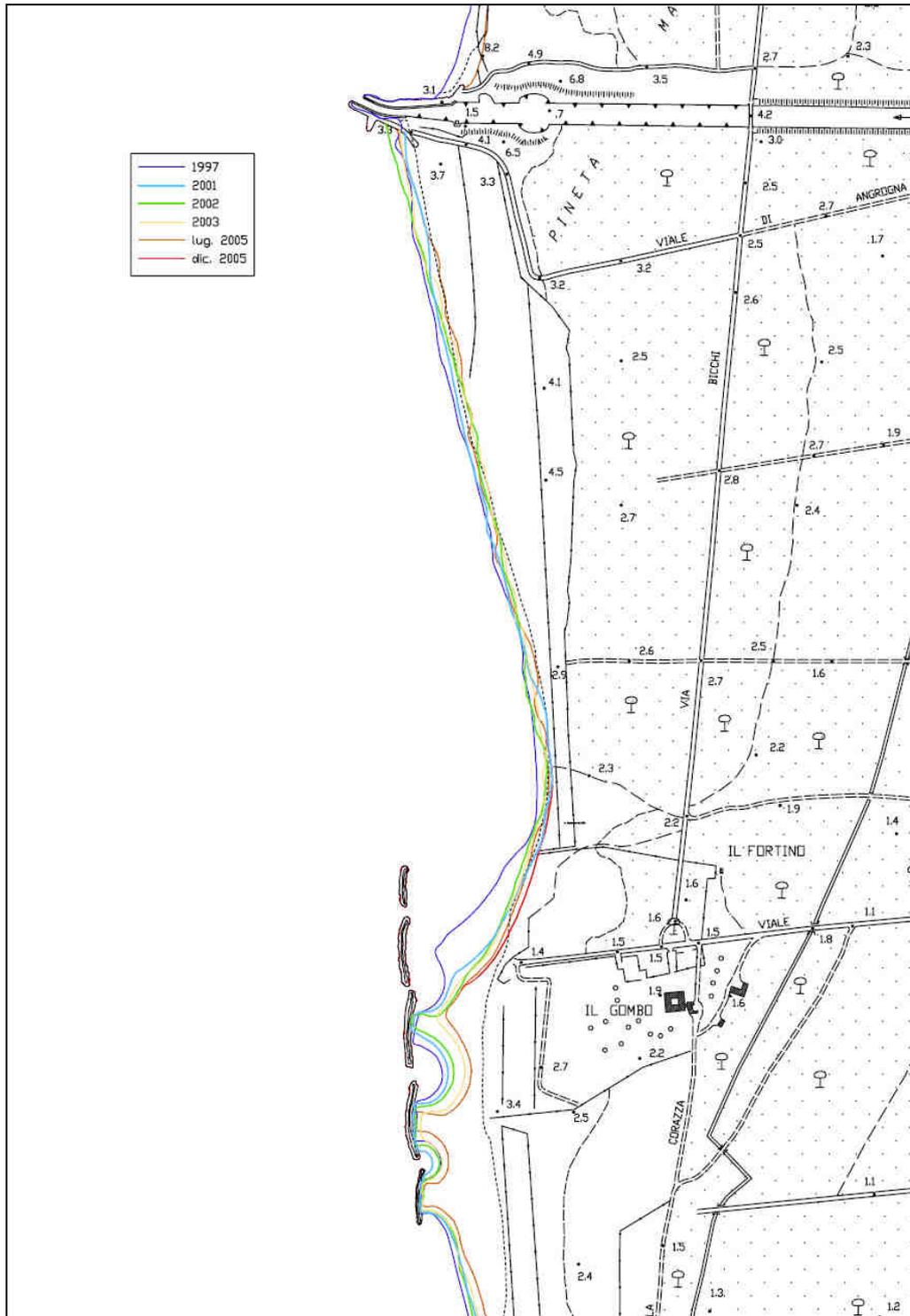


Figure 2 - Evolution de la ligne de côte de 1997 a 2005 entre le « Fiume Morto » et le « Gombo ».

L'analyse de son évolution des dernières années met donc en évidence le grand dynamisme de ce littoral, au sens de sa capacité d'inverser ou d'amplifier des tendances évolutives

apparemment consolidées, condition qui rend indispensable une évaluation soignée des effets induits par une quelconque intervention qui modifie l'assise du trait de côte en examen.

3.2. Description du site d'étude – San Rossore, loc. Gombo (Pise)

La portion de côte intéressée par les ouvrages ici traités s'étend de l'embouchure de l'Arno à l'embouchure du Serchio, pour une longueur d'environ 11 kilomètres, comprend l'apparat deltaïque de l'Arno et est fortement influencé par son évolution.

Reconstruction de l'évolution stratigraphique dépositionnelle des systèmes dunaires côtiers de la province de Pise.

L'étude dont on parle a été réalisée en collaboration avec le Dipartimento di Scienze della Terra de l'Université de Pise. Le but a été de produire une carte morphosédimentologique de synthèse (fig. 3), à l'échelle 1:50.000, dérivée soit de la révision critique des données bibliographique soit des données nouvellement acquises dérivant de relevés récents comme :

- le relevé de détail à l'échelle 1/5000 d'une aire échantillon
- l'exécution d'analyses et relatif prélèvement d'échantillons le long de transepts terre mer orientés perpendiculairement à l'alignement des systèmes dunaires.

Ceci a permis de définir une nouvelle interprétation des processus génétiques dépositionnels des dépôts présents dans l'aire, fondée sur les données de surface et sur les analyses granulométriques et pétrographiques déjà disponibles des échantillons recueillis sur le terrain, et un modèle évolutif de la plaine côtière, fondé sur la reconstruction du processus d'avancée du littoral par rapport au tracé des anciens traits de côte et aux différents taux d'avancement du littoral.

Sous un point de vue structurel l'aire objet d'étude correspond à la portion méridionale du bassin de Viareggio, et est représentée par la portion de côte (voir la carte) délimitée au nord par le « fosso della Bufalina » et par le lac de Massaciuccoli, à est par l'autoroute Libourne - Pise - Gènes, et au sud par le canal Scolmatore. L'aire est caractérisée par la présence de dépôts essentiellement sableux qui remontent au pléistocène supérieur, correspondant à la formation des sables éoliens de l'île de Coltano, et par de nombreux cordons dunaires côtiers d'époque holocénienne séparés par des dépôts alluvionnaires et palustres récents.

Données principales de surface: notes illustratives de la carte morphologique de synthèse.

Depositi sabbiosi di spiaggia attuale.

Sables de moyen à gros, bien classés, contenant des restes de mollusques marins et de rares galets.

- Dépôts sableux de cordon dunaire côtier.

Dépôts constitués par des sables ayant une granulométrie de moyenne à fine de couleur marron voire gris clair, de massifs à faiblement stratifié. Ils constituent un système de cordons parallèles entre eux, qui actuellement se développe le long du littoral entre Libourne et Viareggio pour environ 6 km vers l'intérieur de la plaine côtière. Les cordons atteignent des niveaux de 3,5+4.0 m. au dessus du niveau de la mer et une longueur maximum de 500 m. A l'intérieur de ceux-ci se trouvent des alignements dunaires distincts, ayant parfois une continuité morphologique latérale de plusieurs centaines de mètres, séparés par des aires interdunaires basses de forme allongée.

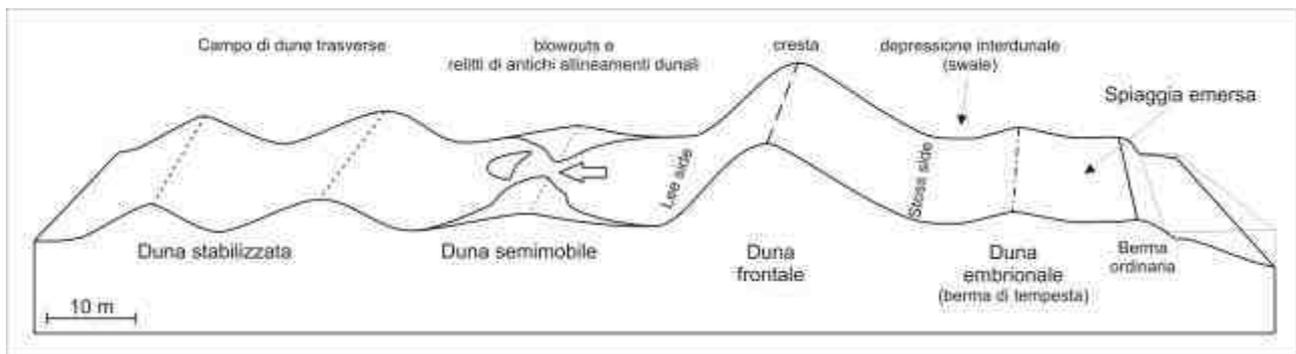


Figure 4 - Profil morphologique schématique de la côte du Parc Naturel de San Rossore.

Le cordon sableux actuellement plus près de la ligne du rivage marin (dune frontale) atteint des dimensions (hauteur et longueur) supérieures par rapport aux alignements plus reculés ayant des caractéristiques géométriques semblables (fig. 4). Il n'est pas exclu que la cause du développement supérieur puisse être due à l'arrêt temporaire d'avancement du littoral, avec dépositions d'un nouvel alignement de dunes qui s'installe sur un alignement déjà existant.

- Dépôts sableux d'aires inter dunaires

Dépôts constitués de sable, ayant une granulométrie essentiellement fine, et de sable de limon de couleur marron clair avec une légère nuance de rouge. La granulométrie et la composition du dépôt présentent une grande affinité avec celles des dépôts de cordon dunaire côtier. Les dépôts se développent à l'intérieur d'aires plates d'ampleur et extension variables, comprises entre un cordon dunaire et l'autre.

3.3. Matériels et Méthodes

Afin de soutenir les options de projet il a été prévu une enquête sur la bande côtière intéressée par l'ouvrage, suffisamment étendue aux alentours, consistant en:

Relevés bathymétriques de la plage émergée et des systèmes dunaires

Chaque campagne a prévu le relevé des éléments suivant:

Ligne non soumise à érosion:	Ne pouvant compter sur des ouvrages existants il est nécessaire de reconstruire une série de bornes dans l'hinterland immédiat, ayant une position qui soit en sécurité par rapport aux évènements météo marins majeurs
Plage émergée et cordons dunaires:	Le modèle plano altimétrique de la plage émergée est reconstruit à travers une série de profils de levés orthogonaux à la ligne de côte (à la distance d'environ 50 m), allant de la ligne non soumise à l'érosion jusqu'à la profondeur maximum (généralement 1,00 - 1,20 m) qu'on peut atteindre durant le levé topographique avec l'assistance d'un opérateur en mer. Les cordons dunaires ont été relevés au moyen d'un plan coté détaillé afin de permettre une interprétation détaillée de leur géométrie.
Ligne de rivage:	Le relevé a prévu l'acquisition d'une série de points à cheval de la ligne de rivage apparente sur le terrain. La ligne bathymétrique de 0,00 (ligne de rivage) a été reconstruite par interpolation des données.

Les résultats des campagnes de relevé ont déjà été illustrés de façon synthétique dans la présentation de l'aire d'intervention. Il est toutefois significatif de reporter les relevés échantillon des cordons dunaires utilisés pour la définition de la «section type» de dune à reconstruire (fig. 5):

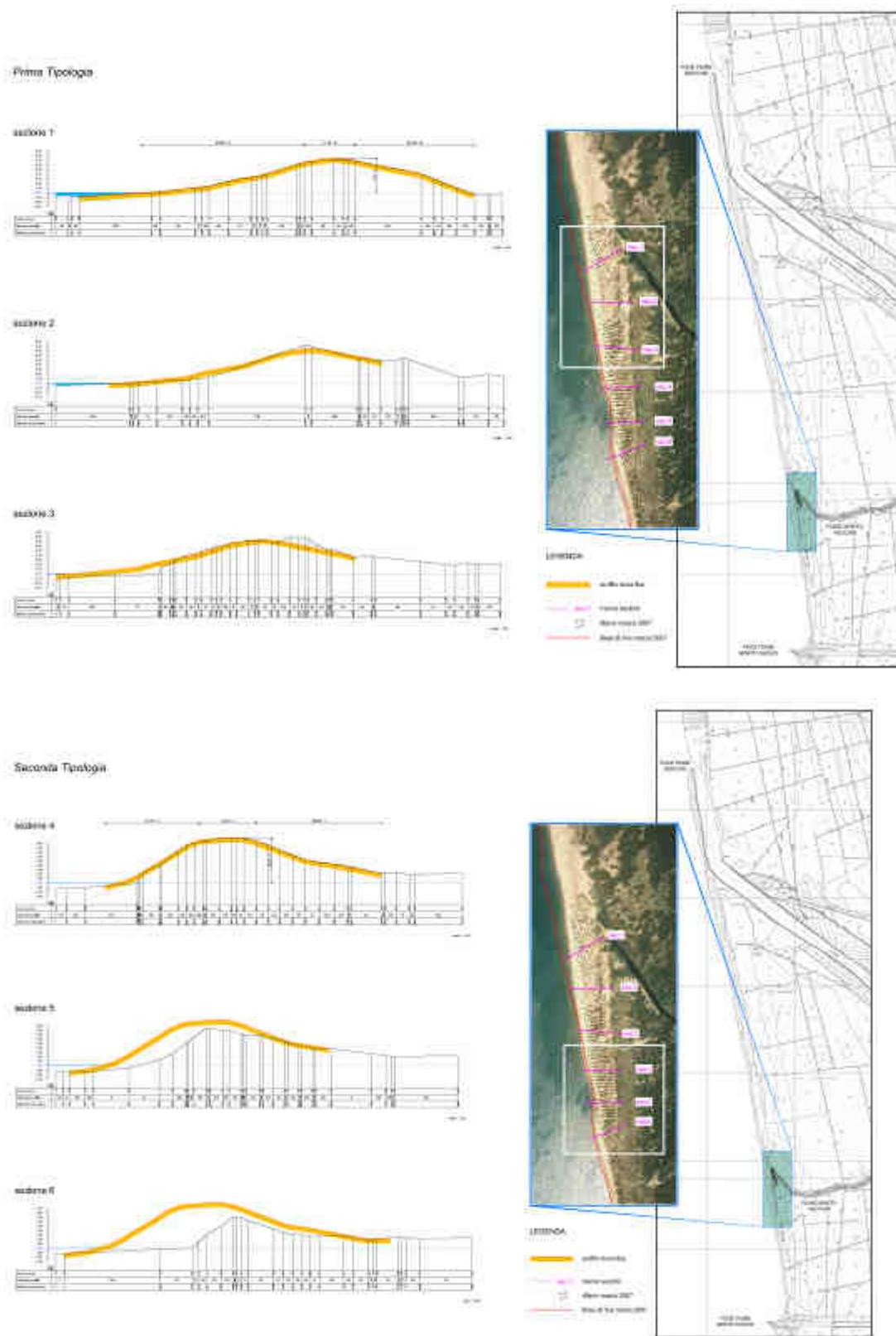


Figure 5 - «section type» de dune à reconstruire.

Analyse compositionnelle quantitative des sables de dune et définition de leur provenance.

La pétrographie des sables holocènes et pré-holocènes a été souvent utilisée pour mettre en évidence les relations entre les aires d'alimentation et la composition des sables même (Ingersll, 1978; Basu 1985; Potter, 1986). La caractérisation pétrographique des dépôts sableux fournit en outre des indications sur la sédimentation et la dispersion sur le littoral de l'aire côtière prise en examen.

On a alors procédé à l'échantillonnage des dunes le long de transepts choisis là où l'apparat dunaire est le mieux préservé et où on peut distinguer les cordons dunaires (dits «cotoni») et les relatives aires inter dunaires (dites «lame»). Le long des transepts qui se développent de la ligne d'eau vers l'intérieur jusqu'au dernier cordon observable, de nombreux échantillons ont été recueillis (fig. 6).

Pour la plupart des échantillons seule la partie superficielle du sédiment a été prélevé (5 - 10 cm) pour éviter l'« effet hétérogénéité » (Kasper-Zubillaga et Dickinson, 2001) du au laminage présent dans les sables qui provoquerait une augmentation des valeurs de classation (Pettijohn et al, 1972; Kasper-Zubillaga et Dickinson, 2001). Certains échantillons, au contraire, ont été recueillis plus en profondeur au moyen d'une perforatrice à main, là où on pouvait observer un changement de granulométrie dans les premiers 50 cm de profondeur.

On a analysé des échantillons de sables recueillis sur la crête de dune frontale, en dune semi mobile et en crête de dune fixe.

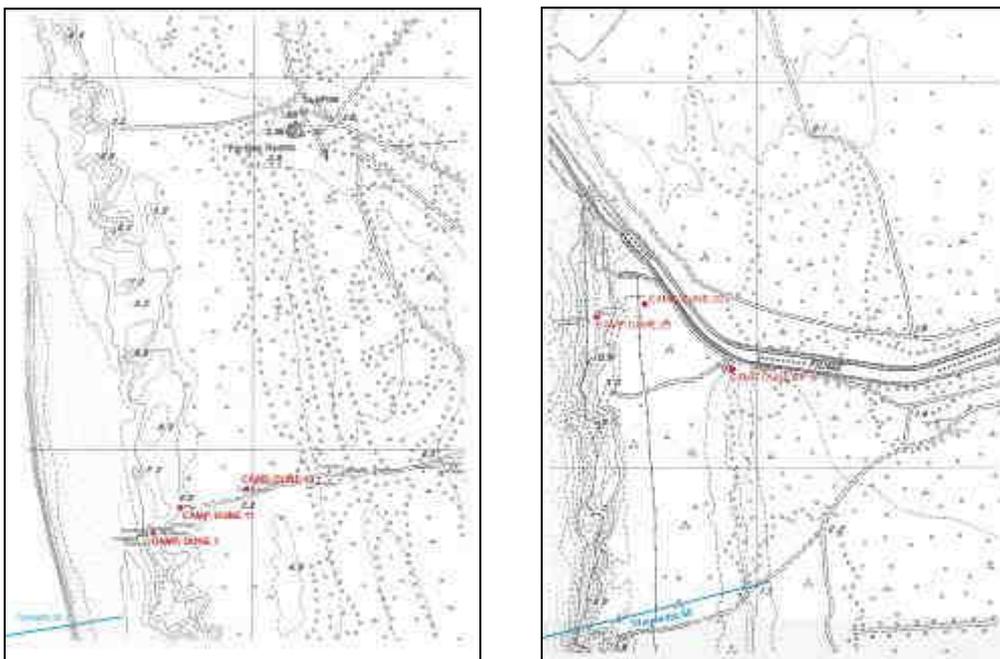


Figure 6 - Emplacement des échantillons de dune prélevés.

Sur la base des premiers résultats acquis on peut mettre en évidence les suivants arguments de discussion:

- Les points représentatifs de la composition des échantillons recueillis dans les dunes actuelles consentent d'identifier un unique groupement compositionnel au sein des sables lithos. Dans ce groupement on a toutefois observé, pour le transects plus au nord, de faibles variations compositionnelle quand au contenu en granules lithiques sédimentaires carbonatiques et en minéraux lourds. Ce malgré, ces différences compositionnelles ne consentent pas, ici, de faire des distinctions dans les apports sédimentaires.
- La composition des dépôts de dune a été comparée avec la composition d'échantillons de plage émergée et submergée placés en proximité des transects effectués le long des cordons dunaires. Les premiers résultats obtenus montrent l'absence de différences compositionnelles significatives et donc à même de laisser supposer une variation dans l'alimentation dans le temps et dans l'espace dans la portion de côte examinée.

Analyse granulométrique

On a procédé à une campagne de récolte d'échantillons sur des sections qui traversent le bord de mer, l'arrière plage, la dune embryonnaire et les systèmes dunaires. L'échantillonnage des dunes a été réalisé pour chacune d'elles sur le pied, sur le *stoss side*, sur la crête, sur le *lee side* et dans la zone inter dunaire de façon à évaluer la présence d'éventuelles significatives variations granulométriques en fonction de la position morphologique. Les données obtenues ont été élaborées pour obtenir les valeurs des paramètres principaux de Folk et Ward (1957) comme la moyenne (Mz) et la classification (σ).

Les graphiques relatifs à la moyenne (fig. 7) rendent évident comme les valeurs se trouvent à l'intérieur d'un intervalle compris entre les sables moyens et les sables fins, témoignant l'absence de différences remarquables entre les sables actuellement présents sur le fore shore (rivage) et ceux désormais stabilisés sur les dunes plus anciennes.

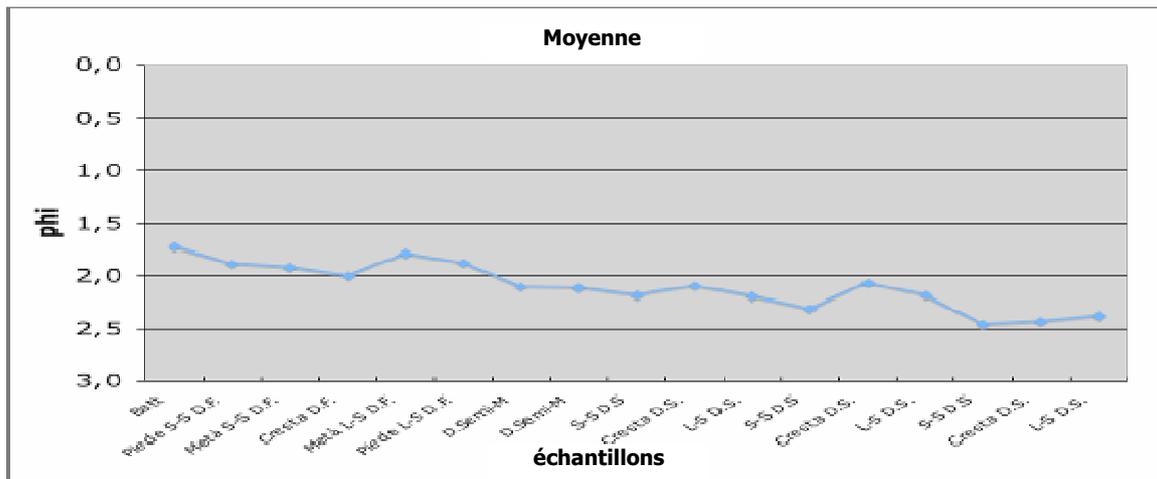


Figure 7 - Graphique des moyennes (phi).

L'analyse des graphiques relatifs à la classification (fig. 8) montre au contraire comme tous les échantillons recueillis présentent des variations d'environ un dixième (entre 0,4 et 0,5), variations très limitées et toutes à l'intérieur d'un intervalle de «bonne classification».

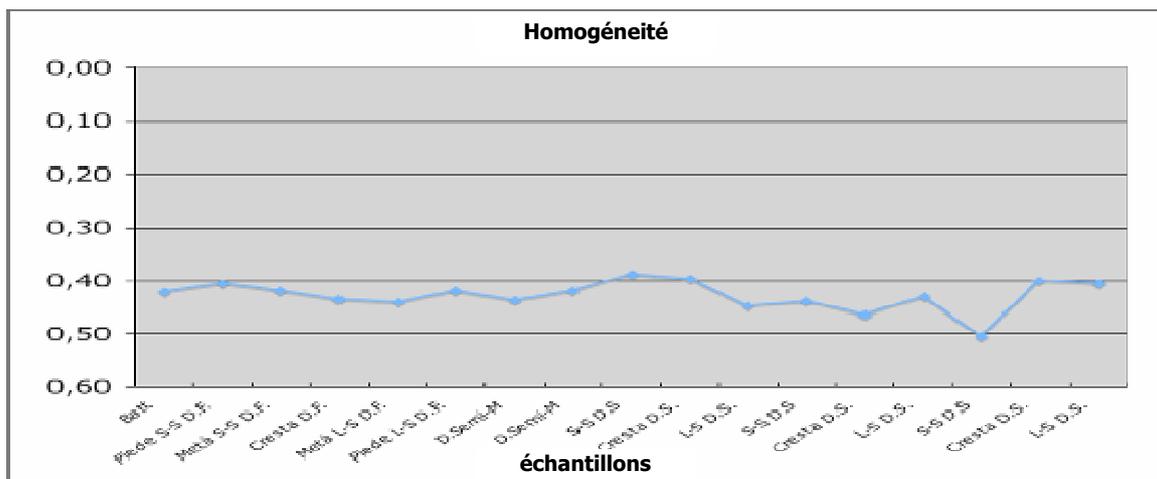


Figure 8 - Graphique homogénéité (•).

A' partir des dites analyses on remarque une relative homogénéité au point de vue granulométrique.

L'unique différence, quoique non essentielle, regarde la plus grande granulométrie du bord et de la *backshore* par rapport à celle du système dunaire, à l'intérieur duquel on observe du reste des différences mais qui se concentrent à l'intérieur d'un éventail très restreint.

On peut donc affirmer raisonnablement que des sables prélevés dans des aires internes au système dunaire même, peuvent être en règle générale aptes (à la suite de la comparaison des

caractéristiques texturales) à effectuer la restauration d'une portion du système dunaire et la reconstruction complète d'une dune dans la zone pilote choisie.

On a en outre conduit l'analyse stratigraphique- texturale en section, en fonction de l'hypothèse de projet de la création d'un nouveau tronçon de cordon dunaire, de façon à estimer si à l'intérieur des dunes naturelles du parc on trouve des variations des caractères tissulaires et quel est le degré de complexité de l'architecture dépositionnelle interne.

L'analyse d'une section de dune frontale (fig. 9) a été conduite sur un cordon, localisé au nord de l'embouchure du *Fiume Morto Nuovo*, sujet à des processus érosifs encore actuels qui en ont emporté une grande partie du *stoss-side*.

Pour ce motif l'architecture sédimentaire qui constitue la dune est bien exposée en section, mettant en évidence le degré élevé de complexité. Pour cela on a choisit un parcours d'échantillonnage très étroit pour mettre en évidence d'éventuelles variations verticales significatives de la granulométrie et des caractéristiques tissulaires.

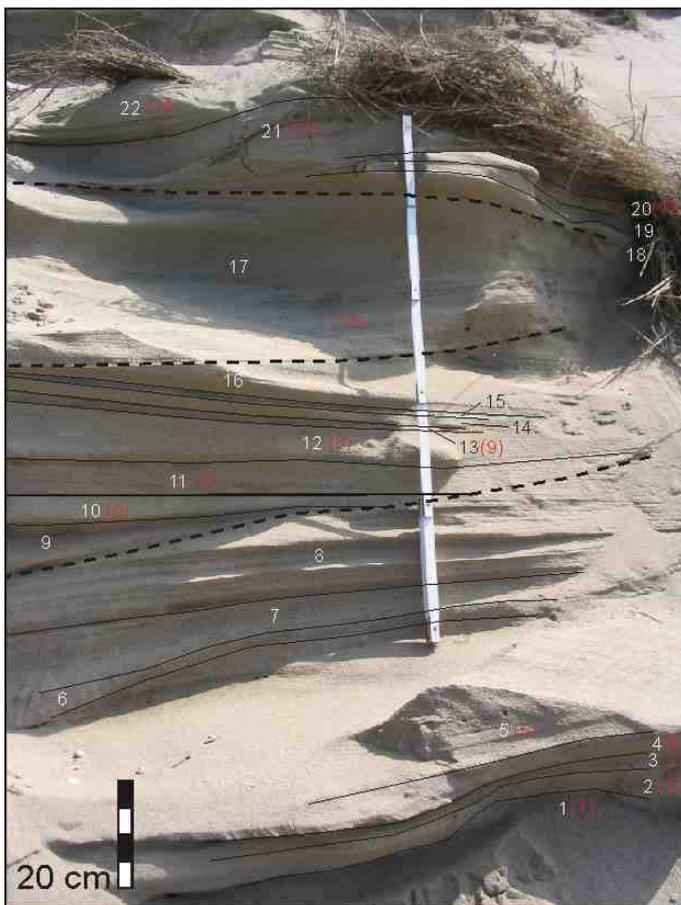


Figure 9 - Section d'une dune frontale en érosion dans la zone du fleuve *Morto Nuovo*.

-  Superficie di stratificazione
-  Superficie di riattivazione
- 6** Unità litostratigrafica
- (2)** Campione

D'après les analyses il a été possible d'observer une modeste variation de la valeur de la « moyenne » entre les échantillons analysés: les valeurs moyennes exprimées en millimètres se trouvent donc toutes dans l'intervalle entre 0,3 et 0,2 mm.

Même le facteur « classification » ne présente pas de variations particulières: les sédiments sont tous bien classés (valeur minimum 0,34 et valeur maximum 0,52). A partir des données de la classification on ne remarque pas de tendances bien définies, ni encore moins à partir de la comparaison entre le graphique de la moyenne et celui de la classification.

En conclusion l'analyse en section d'un dépôt de dune, quoique articulé en une structure sédimentaire intérieure complexe, ne présente pas du bas en haut de significatives variations des paramètres de texture.

3.4. Résultats et discussion

Choix d'intervention et discussion

Solution du projet de la défense locale, restauration et reconstruction des cordons dunaires

La nécessité de contenir le recul du trait de côte, pour la sauvegarde des cordons dunaires et du systèmes environnemental rétro dunaire, offre l'occasion de conduire une expérimentation contextuelle relative à l'application de nouvelles technologies et matériau pour les ouvrages de défense et récupération.

Sur la base des résultats du cadre des connaissances susdit les suivantes prévisions d'interventions ont été formulée (fig. 10):

- réalisation d'un cumul¹ artificiel en correspondance de la quatrième digue du Gombo (l'avant dernière vers le nord), afin d'endiguer le mouvement de matériel sableux actuellement présent. Le fort courant en vortex qui se crée lors des tempêtes plus intenses entre la digue plus au nord et la rivage est, en effet, la cause d'un recul progressif de la plage qui se trouve derrière les digues, avec perte de matériel vers le nord, phénomène qui a gravement compromis les cordons dunaires du littoral portant à leur progressive disparition pour une bonne partie de la portion objet d'intervention.

¹ " tombolo " dans le texte (n.d.t.)

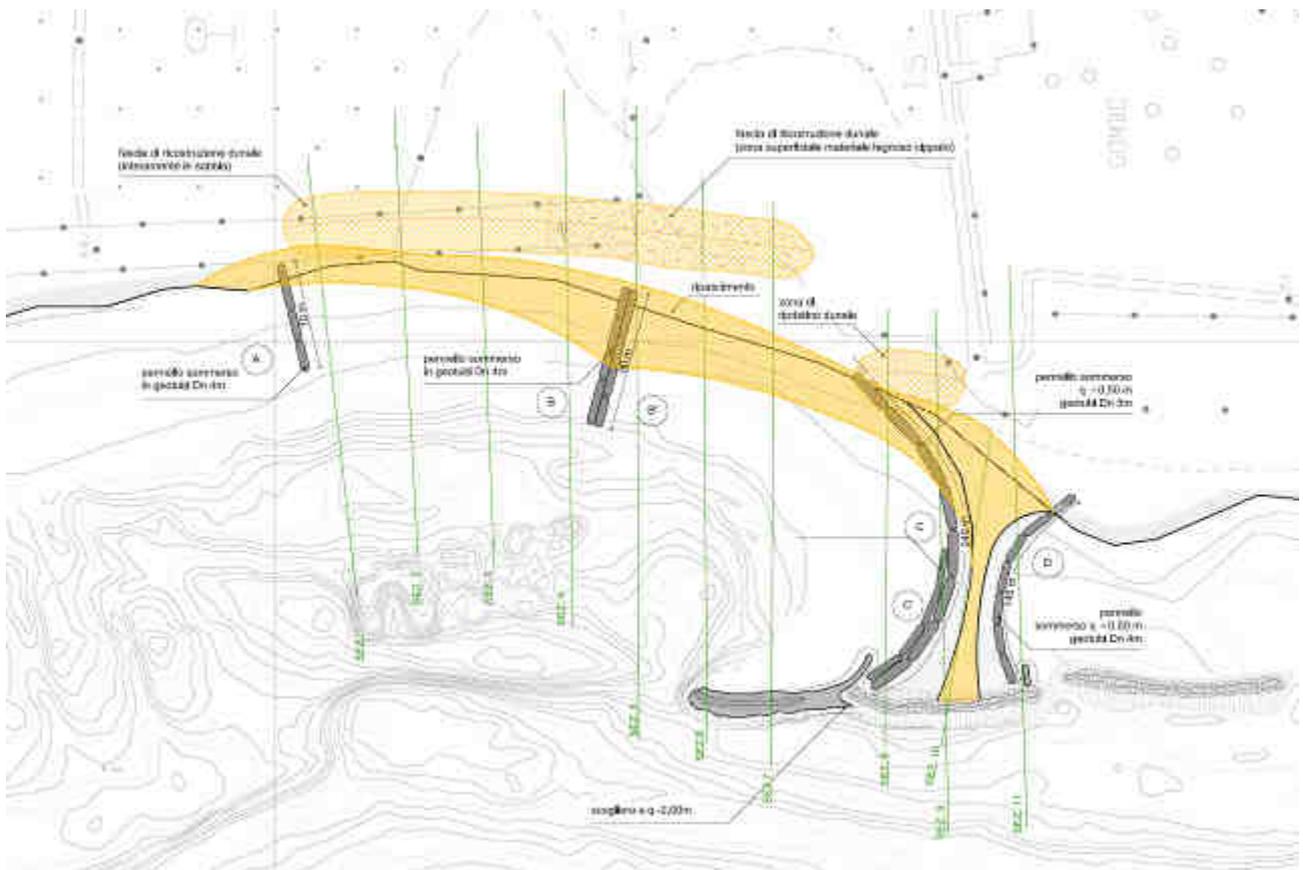


Figure 10 - Prévisions d'interventions.

Cette oeuvre se développera sur environ 200m et sera confinée au moyen de deux éléments de protection du pied, submergés et curvilignes, réalisés avec des géo tubes en polypropylène remplis de sable.

- réalisation de deux épis vers le nord pour la stabilisation du rivage (A e B). La côte actuelle, sa portion entre la localité *Gombo* et le *Fiume Morto*, a une involution évidente avec une démarche à spirale, c'est à dire avec une érosion concentrée dans la portion plus au sud. Ce phénomène peut être contrasté par des interventions finalisées à la stabilisation de la ligne de rivage en correspondance de la portion de côte plus sollicitée (centre de la spirale). Dans le cas spécifique ceci est mis en oeuvre au moyen d'épis submergés réalisés grâce à des géo tubes.
- Les solutions « structurelles » adoptées, outre à être économiquement plus avantageuses par rapport à des structures équivalentes réalisées en rochers naturels, permettront l'exécution des ouvrages en temps brefs et avec des techniques telles qu'un impact négatif quelconque sur l'écosystème de l'arrière pays sera évité.

- reconstruction du système dunaire dégradé entre les deux épis précédents (fig. 11), sur environ 300 m. Cette opération sera conduite avec l'utilisation de techniques d'ingénierie naturaliste récemment expérimentées, consistant à réutiliser des matériaux naturels échoués. Le noyau dunaire sera reconstruit en utilisant des troncs récupérés (ou neufs, au cas où ceux ci ne seraient pas suffisants), plantés dans le terrain en quinconce et placés horizontalement de façon à former une palissade qui contienne d'autres branchages récupérés placées derrière, le tout pour former un renfort au pied de la structure dunaire à même de contraster une éventuelle action érosive de la houle et qui conserve un aspect naturel même si il était exposé à cause de l'érosion du manteau superficiel. Les parties superficielle du profil dunaire seront reconstruite avec un mélange de sable et résidus échoués de posidonies ou matériel ligneux de récupération broyé, de façon à créer une matrice plus solide que le sable sous l'action des vents.

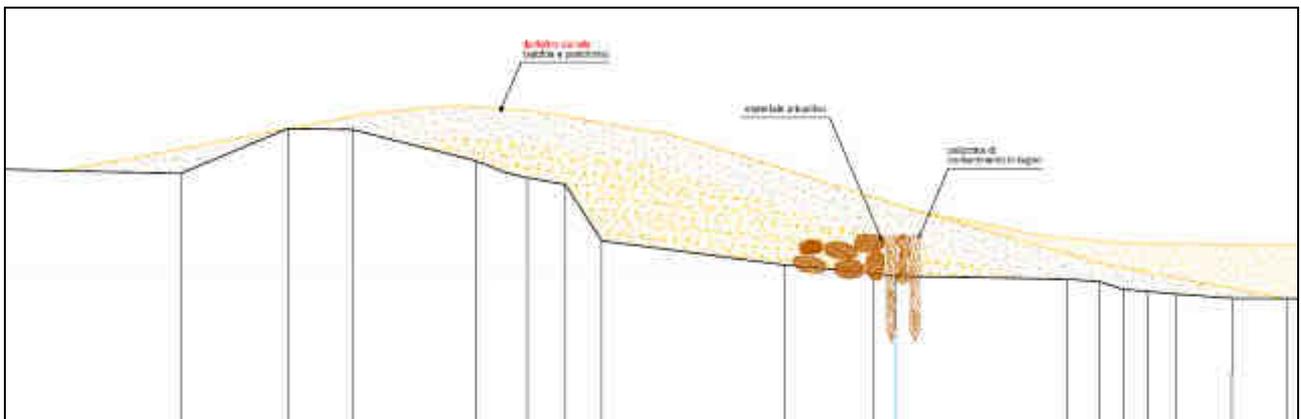


Figure 11 - reconstruction du système dunaire dégradé entre les deux épis précédents.

- engraissement en matériel sableux, en tout 30.000 mc de la portion de plage comprise entre les épis (fig. 12) pour atteindre une condition stable de la ligne de rivage et de la dune qui, durant la période de transition, serait alimentée par le nouveau matériel et conséquemment à même d'atteindre un équilibre morphologique qui lui permettrait d'être végétée à nouveau voire par de successives interventions de protection.

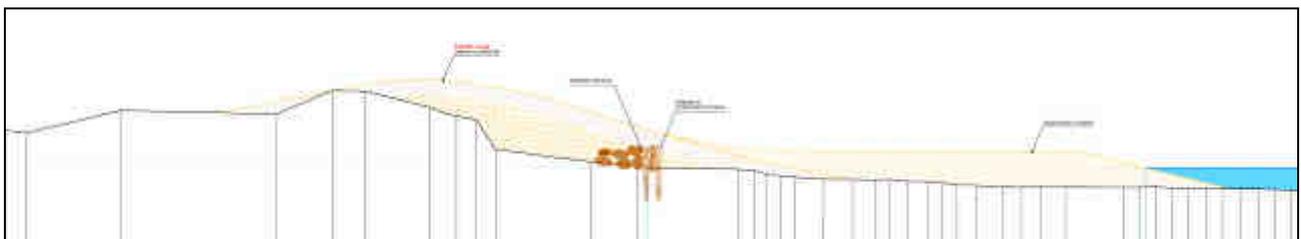


Figure 12 - Engraissement en matériel sableux de la portion de plage comprise entre les épis.

Les méthodologies à peine décrites, par rapport aux interventions de restauration et de protection des dunes, ont été élaborées conformément aux indications élaborées dans le rapport de la Phase B du même projet et en particulier au contenu du chapitre 3 «Techniques innovatrices pour la restauration et la consolidation des dunes côtières» en prenant comme références et en adaptant au cas spécifique les suivants paragraphes:

3.8 «Noyaux dunaires renforcés»

3.9 «Bio revêtement superficiel»

3.12 «Reconstruction de dunes côtières»

3.13 «Restauration de dunes côtières»

Choix du matériel sableux d'engraisement et de restauration dunaire

Pour la recherche du matériel nécessaire à la constitution de l'engraisement on prévoit d'utiliser le matériel sableux dérivant de l'actuation d'une opération contextuelle de requalification environnementale des aires qui sont à l'arrière des dunes, prévue dans la localité limitrophe de Torre del Lago. Dans cette localité l'administration du Parc réalisera en effet, sous peu, des travaux de restauration des zones humides désormais comblées de sédiments sableux, à travers un programme d'excavation d'environ 50.000 mètres cubes de sable. Ce matériel, d'une granulométrie analogue à celle in situ, est cependant intéressé superficiellement par des intrusions végétales, il devra donc être objet de contrôle préalable à son épandage, opération pour laquelle on prévoit une perte d'environ 10 % du volume disponible. Le sable pourra ainsi être utilisé pour la reconstitution de la plage protégée par les nouvelles œuvres rigides. L'engraisement en sable constitue un élément fondamental non seulement pour la défense côtière mais aussi, dans le cas présent, pour la reconstitution du système dunaire dans la portion intéressée.

Pour la reconstitution du cordon dunaire on prévoit l'utilisation du même matériel sableux disponible, dont on a vérifié l'aptitude en fonction d'enquêtes effectuées sur les cordons dunaires existants. Le corps de la dune sera toutefois « armé » avec du matériel échoué sur le littoral limitrophe à l'intervention (branches, troncs), utilisé entier pour la formation d'un noyau stabilisant ou convenablement broyé et réduits en fibres de matrice ligneuse. Ces dernières, ajoutées au sable, ont une fonction de matrice stabilisante de la surface dunaire par rapport à l'action des vents. La même fonction peut être obtenue en utilisant les résidus de posidonies échouées, qui ne sont pas directement disponibles dans l'aire d'intervention mais en un autre site à environ 20 km au sud, sur la cote adjacente à l'embouchure du Canale Scolmatore d'Arno. A ce propos un processus spécifique a été mis au point pour l'approvisionnement de ce

matériel, décrit plus bas (s'agissant de matériel échoué, son transport et réutilisation en une autre zone du littoral doivent être justifiés).

L'intervention expérimentale prévoit donc de réaliser deux distinctes portions de cordon dunaire protégées superficiellement par les deux typologies de matériel, de façon à pouvoir faire une comparaison des résultats obtenus en termes de protection initiale et de successive contribution à la reprise de la végétation naturelle.

Processus pour le transport et l'utilisation de matériaux végétaux échoués pour la stabilisation ou la constitution de dunes côtières.

Aspects généraux des processus

Au niveau préliminaire il a fallu identifier des aires où le prélèvement de matériel échoué est possible et des aires pour sa destination (zone de réalisation des interventions).

Dans le cas spécifique les procédures opératives prévoient le transport du matériel de la zone de déposition naturelle à celle d'utilisation, la procédure de gestion du matériel échoué sera donc qualifiante pour la non application des normes sur les déchets.

On a alors affronté le problème des stockages puisque, pour pouvoir le charger et le transporter sur camions il est indispensable que le matériel soit temporairement entreposé pour lui permettre de s'égoutter.

On a donc prédisposé le « plan de ramassage et réutilisation » des matériaux végétaux échoués servant à la réalisation des interventions de défense, approuvé par la « Conferenza dei Servizi » (Conférence des Services).

Plan de ramassage et réutilisation

Il s'agit du détail exécutif des modalités de gestion du matériel et de la discipline des campagnes d'enquête pour la connaissance des matériaux, des sites de stockage et des destinations.

La procédure de gestion du matériau, définie dans la Phase B du présent projet (Bracci et Pioli, 2007), prévoit les points suivants:

Définition de la typologie des matériaux et caractérisation relative

Les matériaux végétaux nécessaires à l'intervention projetée seront de type ligneux (troncs échoués à utiliser après broyage ou tel quel comme noyau structurel de la dune) ou posidonies échouées (éventuellement associées à d'autres types d'algue).

La définition du matériau est importante aux fins de la détermination des analyses chimiques à faire pour définir ses caractéristiques en fonction de sa réutilisation en terrains littoraux.

Le matériel ligneux grossier, d'origine terrestre, est par sa nature moins prédisposé à l'absorption et au relâchement de substances chimiques polluantes et conséquemment le propos est de les exclure d'échantillonnage et analyses quelconques.

La posidonie échouée devra avoir les mêmes qualités requises pour les autres matériaux utilisables en ce milieu afin d'être réutilisée pour les terrains limitrophes aux plages (on propose donc de contrôler les mêmes paramètres requis pour la caractérisation des matériaux sableux provenant de carrières du littoral et destinés au rechargement des plages).

PARAMETRE	SPECIFICATIONS
Description macroscopique	Couleur, odeur, résidus d'origine anthropique
Métaux	Al, As, Cd, Cr total, Pb, Hg, Ni, Cu, V, Zn
Hydrocarbures Polycycliques Aromatiques (IPA)	IPA totaux [Fluoranthène, Naftalène, Anthracène, Benzo(a)pirène, Benzo(b)fluorantène, Benzo(k)fluorantène, Benzo(g,h,i)perilène, Indopirène, Acenaftène, Fluorène, Fenantrène, Pirène, Benza(a)anthracène, Crisène, Dibenzo(a,h)anthracène, Indeno(1,2,3,cd)pirène]
Hydrocarbures Totaux	Dans la mesure du possible distingués en C<12 et C>12
Pesticides Organochlorurés	Aldrin, Dieldrin, •-esaclorocicloesano, •-esaclorocicloesano, •-esaclorocicloesano (Lindano), DDD, DDT, DDE (pour chaque substances: somme des isomères 2,4 e 4,4)
Polychlorobiféniles	Congenères: PCB 28, PCB 52, PCB 77, PCB 81, PCB 101, PCB 118, PCB 126, PCB 128, PCB 138, PCB 153, PCB 156, PCB 169 e PCB 180 et leur som matoire
Chlorobenzènes	Esachlorobenzène
Coliformes	<i>Escherichia coli</i>
Entérocoques	Fécaux
Salmonelles	
Clostrides	Spores de clostrides solfite-réducteurs
Stafiloocoques	
Micetes	

Tableau 1 - Paramètres physiques, chimiques et microbiologiques.

On considère qu'il est important de soumettre le matériau à un « test de cession », par contre, étant donné qu'il s'agit de matériel végétal déjà échoué et dont la réutilisation est prévue en terrains littoraux limitrophes aux plages mais non fréquentés (les cordons dunaires étant facilement altérables la fréquentation doit en être interdite), on ne prévoit pas d'analyse éco toxicologiques (tests biologiques de toxicité).

Définition des quantités de matériel végétal nécessaires à la réalisation du projet

Evaluation nécessaire afin de localiser et décider les dimensions des aires de stockage et faire le programme des opérations relatives.

Pour l'intervention expérimentale de restauration et reconstruction des dunes dans la localité Il Gombo on prévoit l'utilisation d'environ 5000 mètres cubes de matériel sableux, additionné (principalement dans les couches superficielles) de 1500 mètres cubes de matériel d'origine végétale (posidonies ou bois trituré).

Dans l'hypothèse que chaque transport soit d'environ 15 mètres cubes, la circulation induite sera en tout de 100 camions qui, dans l'hypothèse d'une limite de circulation à 10 véhicules par jour, comporteront une activité d'approvisionnement du matériel de la durée maximum de 10 jours ouvrables, probablement non continus.

Localisation et dimensionnement des aires de stockage temporaire

Etant donné que les quantités de matériel végétal qu'on peut approvisionner directement depuis les plages ne sont pas suffisantes à couvrir les besoins (non disponibilité immédiate des quantités estimées) il sera nécessaire de faire un programme d'approvisionnements répétés. Ce programme sera fondé sur l'observation de la dynamique de déposition du matériel conduite directement au moyen de visites répétées à faire surtout en périodes successives aux phénomènes météorologiques d'intensité significatives.

Les aires de stockage, localisée selon le projet en zone littorale limitrophe à celle d'échouage (localité Calambrone), ont été dimensionnées de façon à pouvoir accueillir les quantités prévues. Considérant un stockage en amas de moyennement un mètre de hauteur, on aura besoin d'une superficie d'environ 2000 mètres carrés (correspondant à 50x50 m).

Le stockage temporaire aura aussi la fonction de permettre le séchage naturel du matériel, avant le transport, et de le soustraire définitivement à l'action de la houle qui pourrait l'éloigner ou le disperser.

Vu que les terrains localisés pour le ramassage des matériaux échoués sont aussi fréquentés en été pour la baignade, on prévoit de transporter rapidement le matériau vers le terrain objet de l'intervention, et de le stocker définitivement à l'intérieur de celui-ci.

Procédure de prélèvement du matériel végétal échoué

- Localisation et délimitation de l'aire sur laquelle effectuer le prélèvement de matériel à la suite de visites pour vérifier la quantité de matériel échoué. Pour des quantités non significatives on pourra décider de ne pas procéder à son enlèvement immédiat;
- Séparation manuelle des déchets solides qui peuvent être présents sur la plage;
- Enlèvement et transport à décharge dans le respect des normes prévues pour les déchets;
- Amasement du matériel végétal en tas, même avec des engins mécaniques, en ayant toutefois soin de limiter au minimum le prélèvement de la matrice sableuse (ce problème est particulièrement sensible pour le prélèvement des posidonies);
- Transfert à l'aire de stockage limitrophe pour le séchage;
- (seulement pour la posidonie) l'échantillonnage du matériel végétal sera effectué au terme de la campagne de prélèvement du matériel estimé nécessaire. Par analogie avec les procédures de caractérisation des matériels terreux pour lesquels on prévoit un échantillonnage chaque 2000 mètres cubes de matériel. Des limites volumétrique plus restrictives pourront être concordées avec l'ARPAT compétente;
- Les échantillons extraits seront soumis à des tests de cession et aux analyses physique, chimiques et microbiologiques précédemment citées, à concorder avec l'ARPAT compétente;
- Le matériel analysé pourra être destiné à l'utilisation au cas où les résultats du test soient dans les limites des normes;
- Au cas où, à partir du test de cession, la réutilisation du matériel stocké dans le cadre du projet ne soit pas permise, le dit matériel devra être éloigné, selon les normes, après accord avec les Administrations communales;
- Les quantités de matériel stocké devront être reportées dans un registre prédisposé par l'administration réalisatrice du projet. Les transports de matériel à l'aire d'utilisation, immédiat ou différé, devront advenir accompagnés d'un bulletin de transport émis par l'administration même et contextuellement déchargés du registre du matériel stocké dans l'aire destinée à cet effet. Le registre et l'ensemble des bulletins devront être conservés par l'administration réalisatrice, jusqu'à réception des œuvres, et mis à disposition des ARPAT, ASL et Administrations communales pour les éventuelles vérifications.

Le processus décrit constitue une garantie par rapport à la destination et à l'utilisation correcte du matériel une fois qu'il s'est éloigné du lieu d'origine (objectifs que se donnent les normes sur les déchets

Nécessité de contrôle suivi des interventions

Afin de vérifier l'interaction existante des œuvres en projet sur l'évolution du littoral, il sera nécessaire de contrôler régulièrement la portion de côte intéressée. Il s'agit d'un contrôle à échelle locale, indispensable dans le cas spécifique, étant donnée la nature « expérimentale » des œuvres. Il pourra se dérouler à travers les phases suivantes:

Relevés topographiques et bathymétriques

L'objectif sera d'évaluer à travers des relevés bathymétriques les éventuelles pertes de matériel qui pourraient se vérifier dans le temps et de régler en fonction les stratégies de manutention, de constater les effets positifs ou négatifs sur la portion de littoral limitrophe et de vérifier en outre l'efficacité des géotubes submergés.

Les relevés topographiques de la plage émergée seront finalisés au contrôle morphologique des dunes.

Contrôle superficiels des cordons dunaires

Un autre paramètre qu'on devra suivre, outre le relevé géométrique, est l'action « protectrice » générée par le matériel ligneux additionné de sable en superficie. A cet égard on choisira des secteurs spécifiques de versant au vent, crête, et versant sous le vent à contrôler après chaque événement météo intense et de toute façon au moins une fois par trimestre. La première année l'analyse se limitera à l'évaluation « physique » de l'action protectrice induite par la couche superficielle de matériel mélangé, en comparant les effets de l'action érosive sur des secteurs comparables de dune non protégée et protégée de façon différente (posidonie ou matériel trituré). Au cours des années successives on évaluera aussi, périodiquement, le « degré de végétation » rejoint dans les portions différemment reconstruite.

3.5. Considérations finales

La révision bibliographique des travaux regardant l'étude géomorphologique et stratigraphique de la plaine côtière de Pisa et le relevé géologique, accompagné des analyses pétrographiques

et granulométriques effectuées sur les échantillons prélevés et déjà analysés, fournissent de nouvelles informations sur les modalités évolutives des systèmes des cordons dunaires de la zone de Pise.

La genèse de formation qui prévoyait des « cotons » et « lames¹ » proposée à plusieurs reprises (cf. Dell'Antonia e Mazzanti 2001) paraît totalement dénuée de fondements, selon laquelle le cordon destiné à devenir dune frontale n'était qu'une barre de delta submergée, en croissance et émergence progressive (coton) qui de cette façon venait à isoler une portion de rétro lagune à l'arrière (lame) qui restait comprise entre la ligne de rivage précédente et la barre émergée. Cette genèse n'est pas confortée par les données morphologiques, de texture et biologiques recueillies.

Le processus commence au contraire de façon plus simple et conventionnelle par la formation d'une dune embryonnaire. Quand durant les tempêtes le système rivage - banc de sable-arrière plage se déplace vers la terre il se forme un relief de tempête qui, quand cesse le phénomène, reste isolé et constitue un obstacle où le sable peut commencer à s'accumuler et à former un amas de sédiments quand le taux d'apport sédimentaire dépasse la capacité de redistribution. En conditions particulièrement favorables d'alimentation de la plage qui se trouve à l'avant (trait de cote avec tendance à l'avancement) la dune embryonnaire tendra progressivement à se stabiliser et à se végétar augmentant petit à petit de dimensions se transformant en une dune frontale. Le résultat de ce processus plusieurs fois répété est la formation d'un système de cordons soudés entre eux comme celui qui affleure actuellement dans la portion de cote de la région de Pise.

Les enquêtes conduites sur la composition granulométrique des systèmes dunaires mettent en évidence une relative homogénéité des sédiments entre les dunes et les surfaces interdunaires, se trouvant toujours dans l'intervalle compris entre les sables moyens et les sables fins. Ceci étaye l'hypothèse de prélèvement et utilisation des sables présents en excès dans les aires internes aux systèmes dunaires nord (où la plage croît de façon continue) pour la restauration d'une portion du système dunaire et la reconstruction complète d'une dune dans la zone pilote choisie.

Quand à l'expérimentation de nouvelles techniques de protection et restauration dunaire, à partir des résultats des enquêtes morphologiques et sédimentologistes conduites sur les systèmes dunaires existants, on a projeté une intervention de reconstruction complète d'une

¹ "cotoni" et "lame" dans le texte (n.d.t.).

dune frontale désormais disparue et de restauration d'une portion résiduelle d'un appareil dunaire fortement endommagé par l'action érosive directe de la mer.

Pour faire une évaluation comparative de la réponse, en termes de protection, de deux matériaux naturels différents à utiliser pour le revêtement superficiel du nouveau cordon dunaire, on a distingué dans le projet trois distinctes sections de dune, identiques comme exposition, géométrie et technique constructive d' « armature » du noyau, mais avec une protection externe différente.

Un premier segment restera en effet superficiellement non protégé, un second sera complété avec une couche superficielle (de 0,50 - 1,00 m d'épaisseur) réalisée avec un mélange de sable et matériel ligneux sous forme de fibres minces, un dernier segment sera recouvert d'une couche semblable de sable mélangé à des feuilles de posidonies échouées.

La campagne de monitoring successive à la réalisation de l'intervention pourra ainsi mettre en évidence les meilleurs résultats obtenus en terme de réduction de l'action érosive superficielle et de capacité de favoriser l'installation d'espèces végétales autochtones et par là la rénaturalisation du système.

A l'égard de la possibilité d'utilisation des posidonies échouées, un programme de ramassage de la matière végétale échouée et de son transport au lieu de réutilisation a été concordé avec les autorités compétentes, déterminant aussi des aires de stockage temporaire expresses en proximité des lieux où on a plus fréquemment observé des échouages significatifs.

Toutefois durant la dernière année la déposition sur le rivage du matériel végétal ne s'est pas reproduite en termes significatifs, faisant douter de la possibilité de disposer de quantités de posidonies suffisantes pour la réalisation de l'intervention expérimentale. Ainsi, une fois examinée l'hypothèse qu'il ne soit pas possible, à travaux en cours, de disposer du volume nécessaire de posidonie trouvé selon les modalités prévues par le projet, on prend en considération la possibilité d'un approvisionnement à partir de lieux d'échouage saisonniers surs de ce matériel végétal, localisés au sud du littoral pisan (commune de Rosignano Marittimo - province de Livorno). Ceci comporte la nécessité d'acquiescer les autorisations nécessaires de la part des autorités territorialement compétentes. Cette activité de révision du processus est actuellement encore en cours d'évaluation.

3.6. Bibliographie

- Baldini A., Regattieri M. (1983) - *Correnti prossimali e apporto solido fra la foce dell'Arno e la foce del Fiume Morto Nuovo*. Atti della Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem. Serie A, 90, 21-34.
- Basu A. (1985) – Influence of climate and relief on compositions of sands released at source areas . In: Provenance of Arenites (Ed. by G.G. Zuffa), N.A.T.O. Advanced Study Institute Series, 148, 1-18. D. Reidel, Dordrecht. (*)
- Bowman D., Pranzini E. (2001) - *Erosion within a segmented detached breakwater (Gombo Presidential Villa beach, Tuscany, Italy)*. Proceedings of the Fifth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, Medcoast 01, E. Ozhan (Editor).
- Bracci G., Pioli L. (2007) - *Procédure pour le transfert et l'utilisation de posidonies pour la constitution de dunes côtières*. POSIDUNE - Interactions de Posidonia Oceanica et Sable avec l'Environnement des Dunes Naturelles. Cahier Technique étendu de Phase B. pp. 114 – 118.
- Cipriani L. E., Ferri S., Iannotta P., Mannari S., Pranzini E. (2004). *Evoluzione recente delle spiagge toscane*. Il piano regionale di gestione integrata della costa ai fini del riassetto idrogeologico – Erosione Costiera. Regione Toscana, EDIFIR 2004.
- Dall'Antonia B., Mazzanti R. (2001) - *Tombolo: territorio della Basilica di San Piero a Grado. Parte Prima - Geomorfologia e idrografia*. In: La Basilica di San Piero a Grado, volume 1, 7-66. (*)
- Della Rocca B., Mazzanti R., Pranzini E. (1987) - *Studio geomorfologico della pianura di Pisa*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 10, 56-84.
- Dickinson W.R., Suczek C.A. (1979) – *Plate tectonics and sandstone compositions*. Bulletin of American Association of Petroleum Geologist, 63, 2164-2182.
- Dickinson W.R. (1970) – *Interpreting detrital modes of graywacke and arkose*. Journal of Sedimentary Petrology, 40, 695-707.
- Federici P.R., Mazzanti R. (1995) - *Note sulle pianure costiere della Toscana*. Soc. Geogr. It. Roma 1995, 165-270.
- Gandolfi G., Paganelli L. (1975) – *Il litorale Pisano-Versiliese (area campione Alto Tirreno): composizione, provenienza e dispersione delle sabbie*. Bollettino della Società Geologica Italiana, 94, 1273-1295.
- Gandolfi G., Paganelli L. (1977) – *Le province petrografiche del litorale toscano*. Bollettino della Società Geologica Italiana, 96, 653-663.
- Ingersoll R.V. (1978) – *Petrofacies and petrology evolution of the Late Cretaceous fore-arc basin northern and central California*. Journal of Geology, 86, 335-352. (*)
- Ingersoll R.V., Bullard T.F., Ford R.L., Grimm J.P., Pickle J.D., Sares S.W. (1984) – *The effects of grain size on detrital modes: a test of the Gazzi-Dickinson point counting method*. Journal of Sedimentary Petrology, 54, 103-116.
- Kasper-Zubillaga J.J., Dickinson W.W. (2001) – *Discriminative depositional environments of sands from modern source terranes using modal analysis*. Sedimentary Geology, 143, 149-167. (*)
- Mazzanti R., Nencini C. (1994) - *La Pianura di Pisa e i rilievi contermini – La natura e la storia*. "La morfologia". Mem. Soc. Geogr. Ital., 50, 89-102.
- Mazzanti R., Pasquinucci M. (1983). *L'evoluzione del litorale lunense-pisano fino alla metà del XIX secolo*. Boll. Soc. Geogr. Ital., 12, 605-628.
- Palla B. (1983) - *Variazione della linea di riva tra i Fiumi Arno e Serchio (Tenuta di S. Rossore – Pisa) dal 1978 al 1981*. Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Serie A, 90, 125-149.

- Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R. (1972) – *Sand and Sandstones*. Springer-Verlag, New York, p. 618. (*)
- Potter P.E. (1986) – *South America and a few grains of sand: part I-beach sands*. Journal of Geology, 94, 301-319. (*)
- Pranzini E. (1983) - *Studi di geomorfologia costiera. IX – L'erosione del delta dell'Arno*. Quaderni Mus. St. Nat. Livorno, 4, 7-18.
- Rapetti F., Vittorini S. (1974) - *Osservazioni sulle variazioni dell'ala destra del delta dell'Arno*. Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem. Serie A, 81, 25-88.
- Rapetti F., Vittorini S. (1983) - *Brevi considerazioni sull'influenza dei venti riguardo alle fluttuazioni della linea di costa del litorale di S. Rossore (Pisa)*. Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Serie A, 90, 13-20.
- Tongiorgi M., Vittorini S. (1983) - *Nuovi dati di osservazione sulla spiaggia campione di S. Rossore (Pisa)*. Atti della Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem., Serie A, pp. 149, Supplemento al Vol. XC.
- Zuffa G.G. (1980) – *Hybrid arenites: their composition and classification*. Journal of Sedimentary Petrology, 50, 21-19.

4. TRANSPORT EOLIEN

UNIVERSITÉ DE FERRARA - U. Simeoni, C. Corbau, Valerio Brunelli, Simona Gragnaniello, Umberto Tessari - g23@unife.it

4.1. Introduction

Le système dunaire, en plus de sa valeur écologique-environnementale, constitue un élément essentiel pour l'équilibre dynamique des littoraux, pour lesquels il représente une réserve importante de sable et une défense naturelle contre l'ingression de la mer.

En Italie, les systèmes dunaires côtiers ont été largement détruits. Au cours du siècle dernier, le long des côtes de l'Adriatique les systèmes dunaires ont été progressivement détruits (Simeoni et Bondesan, 1997), principalement en raison d'une mauvaise gestion anthropique des littoraux. Cela a également impliqué, l'urbanisation et le démantèlement des cordons pour créer des espaces récréatifs, corrélés aux politiques de développement d'un tourisme de masse. A l'action anthropique il convient d'associer la tendance érosive actuelle des plages, due notamment à la forte réduction du transport sédimentaire fluvial et à la subsidence qui provoque un abaissement altimétrique du territoire dû à la subsidence. Les dunes actuelles représentent des résidus d'anciens cordons qui bordaient presque toutes les côtes de la plaine du Pô. Leur présence exiguë a été reportée dans l'Atlas des plages italiennes à la fin des années 90 (AA. VV., 1997). Cet atlas montre que les dunes s'étendaient seulement sur 123 Km pour la côte adriatique (9,8 %), dont plus de la moitié dans les Pouilles.

La côte de l'Emilia-Romagna s'étend sur environ 130 Km et est caractérisée par des côtes basses sableuses interrompues par des lagunes bien développées, des jetées portuaires particulièrement étendues vers la mer et de nombreuses structures de défense de différente nature et entité (Simeoni et al, 2006a).

Cette situation a fragmenté l'unitarisme du littoral en raison du développement de dynamiques hydro-sédimentaires qui sont parfois très différentes d'un secteur à un autre (même adjacent). De plus, les activités humaines réalisées au XXème siècle dans les bassins ont considérablement réduit les apports solides fluviaux engendrant des effets négatifs sur l'évolution de la côte (Simeoni et al, 2006b).

A ceci il faut également ajouter les pertes de sédiment liées à la subsidence anthropique provoquée par l'extraction des eaux méthanifères des nappes superficielles. Si on analyse ce

phénomène en concomitance avec l'incapacité naturelle de compenser les abaissements territoriaux par la sédimentation, alors il représente le principal facteur de l'altimétrie actuelle du territoire littoral de la plaine du Pô, caractérisée par plus de 2000 de km² en dessous du niveau marin (Simeoni et al, 2006b).

Les côtes régionales étaient caractérisées par une évolution positive jusqu'à la fin des années 40, même si appauvries en sédiment utile pour leur maintien. C'est seulement au cours de ces dernières 70 années que le littoral a été caractérisé par une tendance générale érosive, particulièrement intense au cours des années 60 et 70. La nécessité de lutter contre l'érosion a impliqué la construction de nombreuses structures de défense presque tout le long du littoral régional, notamment au cours des années 1970 et 1980.

Le climat moyen marin de la côte de l'Emilia-Romagna est caractérisé par une prédominance des houles de secteur Ouest Nord-Ouest et secondairement Est Sud-Est (Idroser, 1981). Toutefois les plus fortes valeurs de hauteur de houle sont liées aux secteurs ENE et Est. Les tempêtes de mer plus fréquentes sont de secteurs N60° à N 120°, alors que celles plus violentes sont de Bora.

La zone plus septentrionale, à proximité du Scanno de Goro (fig. 1) se distingue du climat météo-marin général en raison de son orientation. Les données ondamétriques provenant de la bouée gérée par l'ISMAR-CNR située au large du système deltaïque ont été transférées à la côte pour obtenir le climat météo marin local. Des roses des vagues ont été ainsi élaborées à partir des résultats obtenus par l'application d'un modèle numérique (module NSW Mike 21), c'est-à-dire dérivant de la propagation des vagues appartenant au secteur de travers (0-150°N).

En se approchant de la côte la fréquence des houles du I Quadrant diminue; dans ce secteur, les pourcentages d'occurrence à la côte sont nuls. De plus, lors de la propagation vers la côte, la hauteur des vagues diminue fortement; en particulier les vagues de secteur N90° à N105° s'atténuent fortement en intensité mais pas en fréquence. De plus une modeste atténuation des vagues, en fréquence et hauteur, est observée seulement pour le secteur compris entre N120° et N150°.

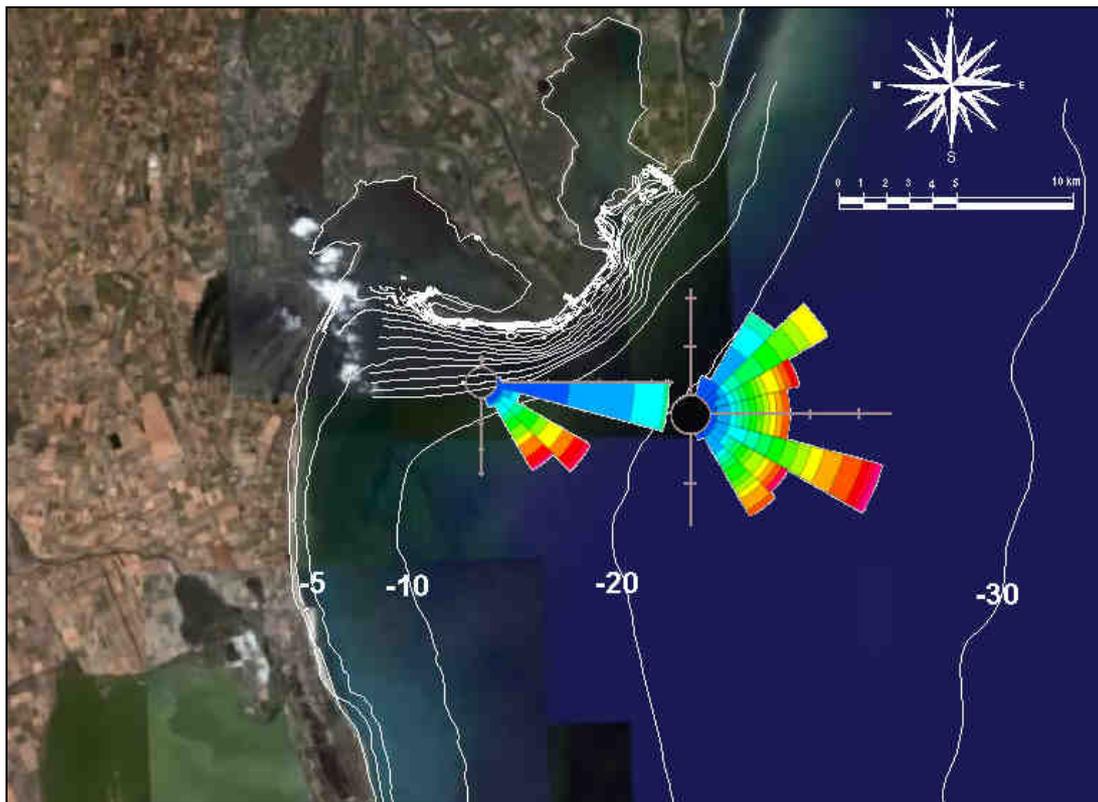


Figure 1 - Rose des Houles extrapolée à l'aide d'un modèle mathématique pour la zone septentrionale de la côte Emilia-Romagna.

4.2. Description du site d'étude

Evolution historique et état de conservation des dunes côtières

Au cours des années 1800, presque tout le littoral de l'Emilia-Romagna était bordé par une série de cordons dunaires, avec une orientation principalement rectiligne ou faiblement arquée à proximité des embouchures fluviales. Ces cordons, longs parfois de quelques kilomètres, s'étendaient sur une largeur de 100 mètres dans la zone de Rimini à plus de 700-800 mètres dans la zone de Ravenna (Simeoni et al, 2006a).

A la fin du XIX siècle les premières interventions furent réalisées modifiant fortement l'évolution naturelle côtière: de vastes zones adjacentes aux littoraux furent boisées pour protéger la culture de l'arrière-pays contre l'action du sel; une grande partie des cordons dunaires furent démantelées pour créer les espaces nécessaires à l'expansion des activités touristiques-récréatives. Au cours des années 1930, par exemple, le développement urbain a détruit les cordons de Forlì et, au cours des années 1950, le développement a provoqué la disparition des dunes (à l'époque déjà sporadiques) entre Cattolica et Cesenatico. Par contre le

développement plus discontinu des nouvelles installations touristiques dans les provinces de Ravenne et de Ferrare a permis une meilleure conservation des dépôts éoliens (Simeoni et al, 2006a). La demande touristique croissante, observée au cours de la période suivante même le long des littoraux plus septentrionaux de la région, a engendré une forte réduction des systèmes dunaires également dans cette zone: entre 1950 et 1980 les dunes ont été réduites de moitié dans la zone de Ravenne et de Ferrare.

Actuellement, seulement 37 km de littoral sur les 130 présentent encore des dunes, dont 12 km dans la province de Ferrare, 23 km dans celle de Ravenne et les 2 km restants sont distribués dans le secteur méridional (Simeoni et al, 2006a). Des cordons dunaires réduits, ou des restes, souvent mal conservés et isolés entre les édifices, sont observés au Lido degli Sacchi, au nord du Lamone, entre Marina di Ravenna et Punta Marina, entre les Lidi de Dante et de Classe, au nord de l'embouchure du Reno. Des dunes individuelles sont aussi présentes au Lido de Volano, au sud du Lido de Spina, entre Lido Adriano et de l'embouchure du Fiume Uniti.

Dans l'ensemble la superficie dunaire est seulement de 19 km², dont 3 % correspond à de véritables avant-dunes. Leur état de conservation est très préoccupant en raison de la présence évidente de falaise d'érosion à leur pied et de passages d'inondation (overwash), fréquemment associés à une largeur réduite de la plage (inférieure à 20 m pour 25 % des cas). La hauteur des dunes est généralement de l'ordre de 2,9 m en moyenne (Simeoni et al, 2006a).

De plus il convient de souligner que l'état de conservation des dunes est étroitement corrélé au degré d'anthropisation de la zone (fig. 2). Les restes de dune présentent généralement un faible degré d'anthropisation: en effet environ 91 % des dunes présente un développement naturel, alors que seulement 4 % est conditionné par la pression anthropique. Le 5 % restant est inséré dans un tissu urbain de densité variable.

Les passages anthropiques, réalisés pour faciliter l'accès aux plages, sont nombreux. Ces passages produisent d'ultérieurs effets négatifs: ils représentent un élément de fragilité important car ils constituent des voies préférentielles pour la déflation éolienne et le transport vers l'arrière-pays de grande quantité de sable ou interrompent le profil morphologique typique des dunes, défense utile en cas d'ingression marine des zones situées en arrière.



Figure 2 - Quelques exemples de la destruction des systèmes dunaires perpétrés pour favoriser la construction d'installations touristiques et pour faciliter l'accès à la mer des touristiques.

Régime anémologique

L'élaboration des données relatives à la distribution des vents en fréquence, direction et intensité, est basée sur les valeurs enregistrées aux trois stations météorologiques du réseau ARPA régionale (fig. 3): Volano (Long. 12°25 et Lat. 44°81, +3 m au dessus du s.l.m., direction et vitesse du vent moyennées sur une heure d'enregistrement), de Marina di Ravenna (Long. 12°3 et de Lat. 44°45, +2 m au dessus du s.l.m., direction et vitesse du vent moyennées sur trois heures d'enregistrement) et Cesenatico (Long. 12°40 et Lat. 44°20, +1 m au dessus du le s.l.m., direction et vitesse du vent moyennées sur une heure d'enregistrement). Pour la définition du taux de transport éolien seuls les enregistrements de la période 2001-2005 ont été considérés car ces enregistrements sont suffisamment homogènes. Les 22658 mesures de la station de Volano ont été analysées et leur analyse statique a permis d'obtenir les données générales suivantes (fig. 1): vitesse moyenne de 2.31 m/s (Dev.std 1,69), avec des vents qui tendent à se distribuer entre trois directions principales (Grecale,

Mistral et Sirocco). Les vitesses de vent plus fréquentes sont comprises entre 0.3 et 3.3 m/s (76,2%), puis celles comprise entre 3.4 et 7.9 m/s (18,8%) alors que seulement 1,2% des évènements présente des vitesses supérieures à 8 m/s.



Figure 3 - Localisation des trois stations météorologiques du réseau ARPA régional.

Au printemps et en été les vents proviennent principalement du II quadrant, alors qu'en automne et en hiver les évènements plus intenses proviennent de NE (Bora), E (Levant) et SE (Sirocco).

Les 9632 mesures enregistrées à la station de Marina di Ravenna présentent (fig. 4) une vitesse moyenne de 3.88 m/s (dev. Std 2,460), avec des vents qui se distribuent entre les quadrants de Levante et de Ponente. Les vitesses des vents sont comprises entre 0.3 et 3.3 m/s pour 49,5%, entre 3.4 et 7.9 m/s pour 44,0% alors que les 6% restantes sont supérieures à 8 m/s.

En Automne la fréquence des vents de Ponente tendent à augmenter alors que les vents plus intenses (vitesses supérieures à 20 m/s) proviennent toujours de Levante; en hiver les évènements de Ponente sont plus fréquents, alors que ceux plus intenses sont de Levante (Bora).

En automne les fréquences majeures sont liées aux vents du VII octante (40%) mais les vents plus intenses proviennent de Bora, de Levante et de Sirocco; la distribution en hiver est semblable à la précédente, avec des directions préférentielles de Sirocco et de Mistral.

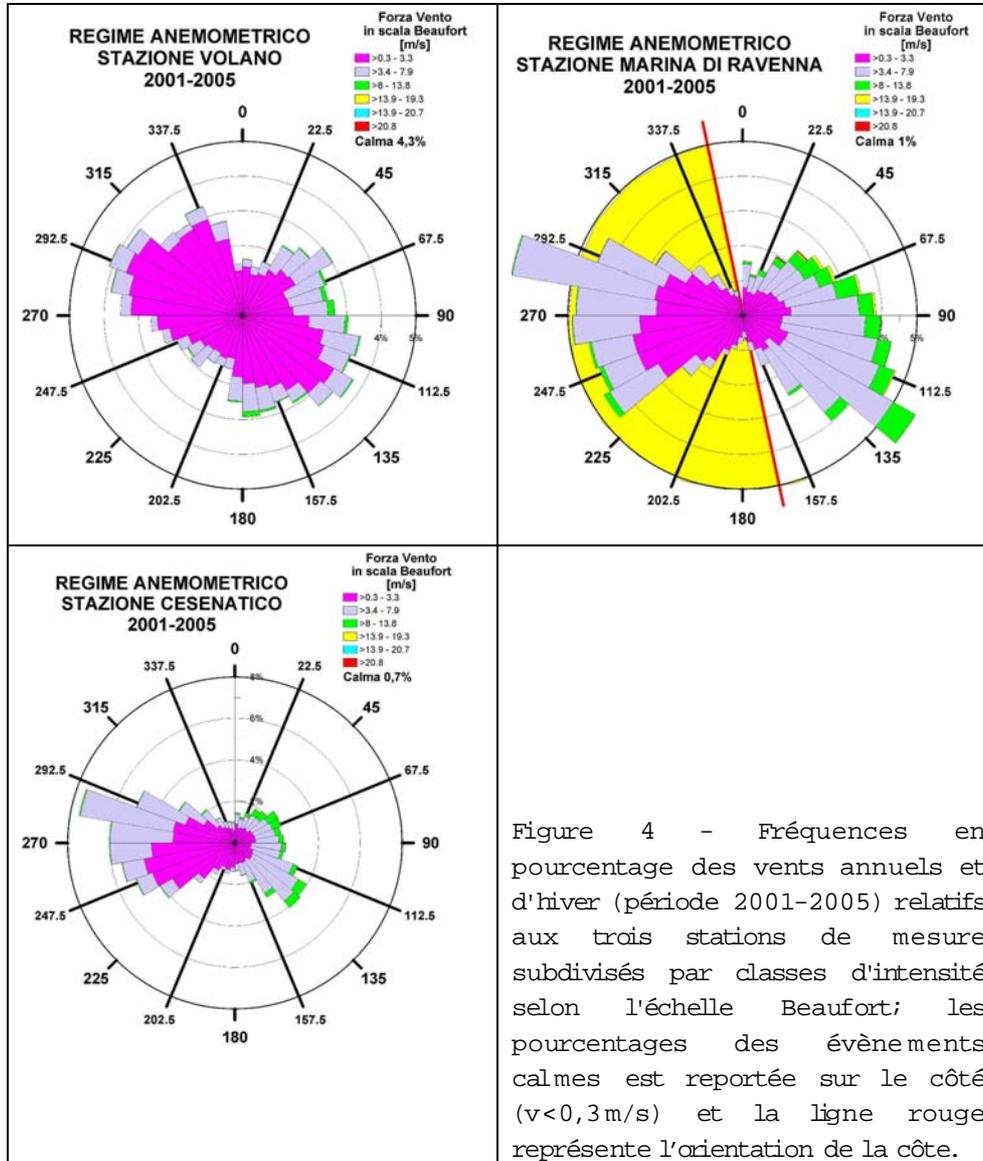


Figure 4 - Fréquences en pourcentage des vents annuels et d'hiver (période 2001-2005) relatifs aux trois stations de mesure subdivisés par classes d'intensité selon l'échelle Beaufort; les pourcentages des évènements calmes est reportée sur le côté ($v < 0,3 \text{ m/s}$) et la ligne rouge représente l'orientation de la côte.

Evolution des systèmes dunaires entre 2000 et 2005

Dans cette phase de l'étude, une analyse photo-interprétative visant à ajourner la banque de donnée des dunes de 2000 à 2005 a été réalisée pour toute la côte de l'Emilia-Romagna. Cela a permis d'évaluer l'évolution du complexe système plage-dune. En particulier des techniques d'analyse spatiale de type automatique et semi-automatique ont été appliquées qui ont permis d'identifier et de tracer l'étendue de chaque système dunaire et, d'associer à chacun d'eux une série d'information sur leur état de conservation. Au cours de cette phase, en plus d'introduire

de nouveaux éléments relatifs à 2005, les éléments identifiés en 2000 ont été vérifiés et partiellement modifiés.

Pour faciliter l'exposition des résultats et en fonction des directions prédominantes du trait de côte, le territoire côtier régional a été subdivisé en 3 macro-zones. Ces dernières ont été également subdivisées en zones (fig. 5) sur lesquelles les analyses inhérentes à l'évolution des systèmes dunaires ont été réalisées.

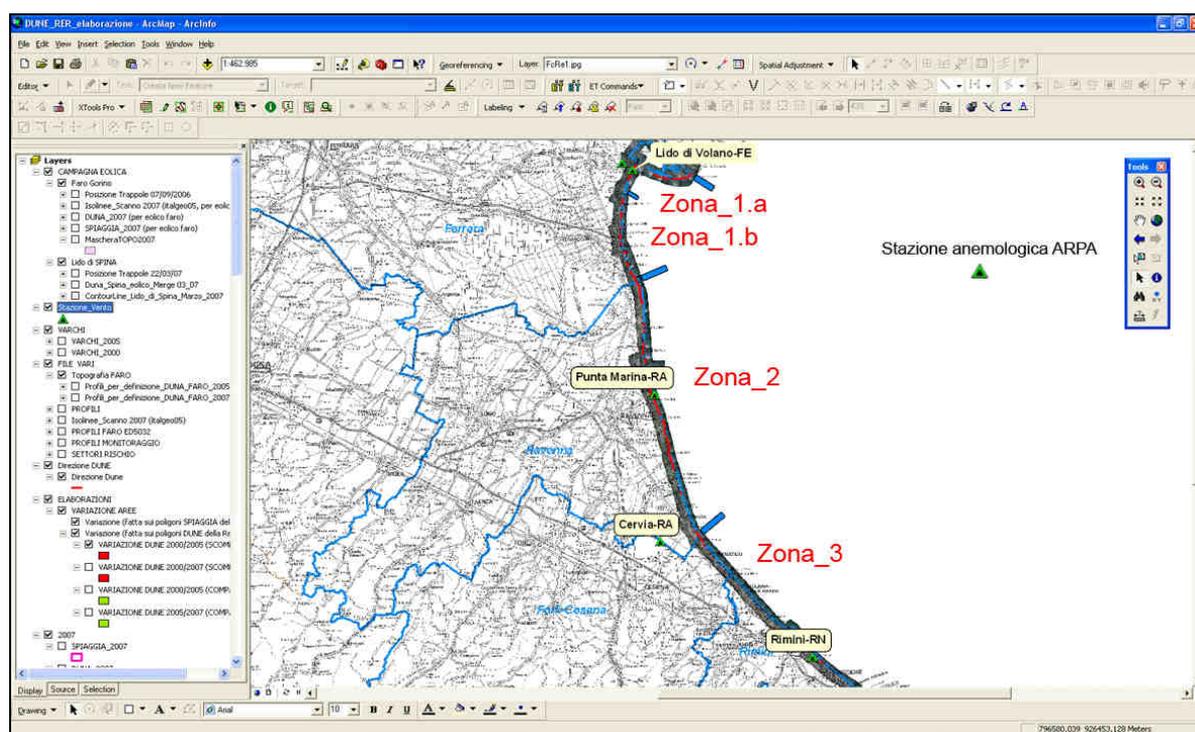


Figure 5 – Subdivision en Macro-zones et Zones de la côte régionale.

Les systèmes dunaires, subdivisés en actifs et inactifs comme pour les analyses de 2000 (Valpreda, 2005), ont été distingués sur la base de la direction et largeur des morphologies et sur les interruptions liées à la présence de passages naturels et anthropiques de largeur supérieure à 15 m. Dans la banque données, en plus des éléments sur les dunes, des informations inhérentes à la plage (largeur, tendance évolutive, utilisation, dimension moyenne des grains, etc) ont été introduites (fig. 6).

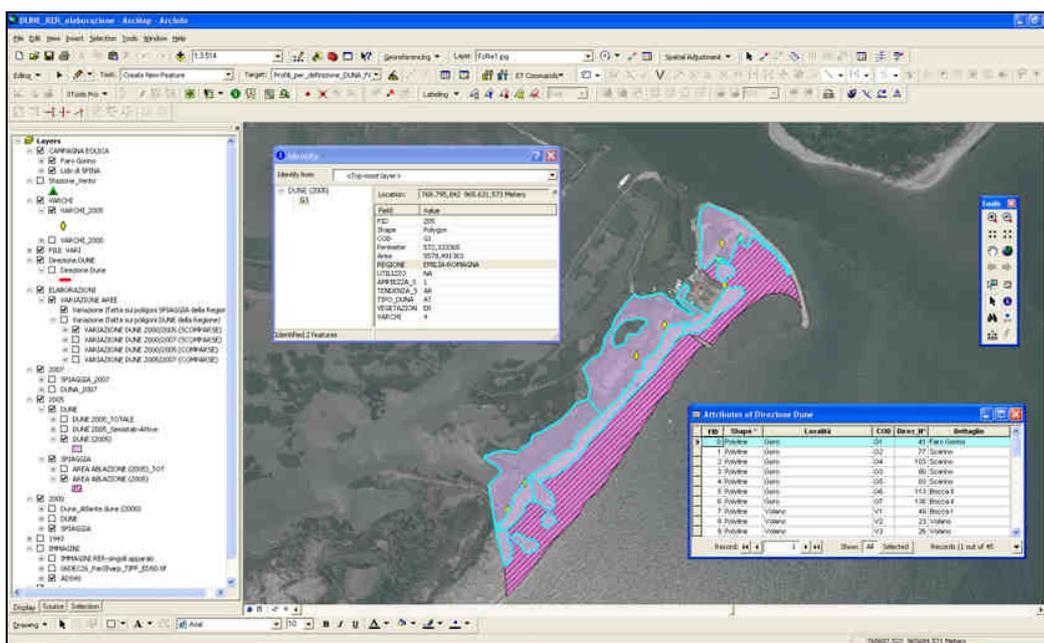


Figure 6 – Exemple d’interrogation du tableau des attributs associés à chaque système dunaire.

Le long de la côte régionale 41 systèmes dunaires ont été déterminés et décrits, et s’étendent de l’embouchure du Po de Goro (à nord) jusqu’au littoral de Rimini (à sud).

Dans l’ensemble, entre 2000 et 2005 on observe à l’échelle régionale une perte de la superficie dunaire de -0.32 km^2 pour un littoral de 33.5 km bordé par des dunes, dont la majeure partie (environ -0.30 km^2 soit 20 % de la superficie dunaire présente en 2000) est située au nord de la Province de Ferrare (Macro-zone 1; 16.4 km de littoral avec des cordons dunaires). Cette zone présente d’intenses phénomènes d’érosion. Seulement la Province de Ravenne (Macro-zone 2) présente un gain modéré (environ $+0.03 \text{ km}^2$ sur un trait côtier de 5.7 km); le secteur situé plus à sud (Macro-zone 3), caractérisé par un fort développement urbain, présente une perte d’environ -0.04 km^2 pour un trait côtier de 1.3 km. Dans la Province de Ferrare (Macro-zone 1, fig. 7), les pertes majeures (-0.16 km^2 pour un trait côtier de 6.7 km) sont observées au niveau du trait côtier plus septentrional entre le Lido de Volano et l’embouchure du Po de Goro: la figure 8 reporte les variations enregistrées à proximité de l’embouchure du Po de Goro (phare de Gorino).

Une situation assez préoccupante s’observe au niveau du Lido de Spina (Macro-zone 1), entre le canal Logonovo et l’embouchure du fleuve Reno, où le trait reporté dans la figure 9 présente des falaises évidentes d’érosion au niveau des systèmes dunaires. De plus, ce trait côtier, long de 1 km environ, a perdu entre 2000-2005 une superficie dunaire d’environ -0.02 km^2 . Une autre situation particulièrement critique est représentée par les systèmes dunaires situés au

nord du Lido delle Nazioni où l'érosion a détruit environ 0.09 km² de dunes qui se développaient sur environ de 0.8 km (fig. 10).

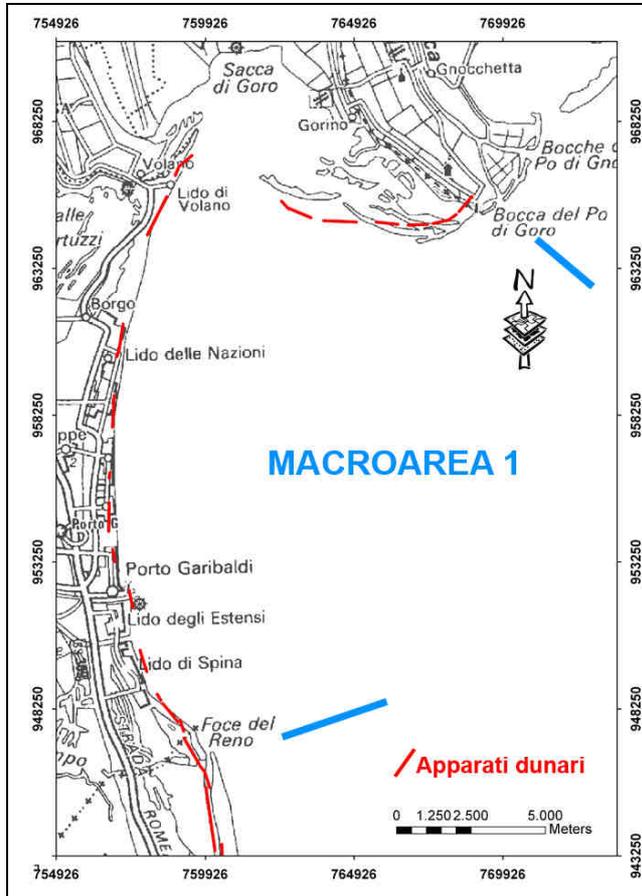


Figure 7 – Extension de la Macro-zone 1: en rouge sont reportés les 22 systèmes dunaires identifiés.

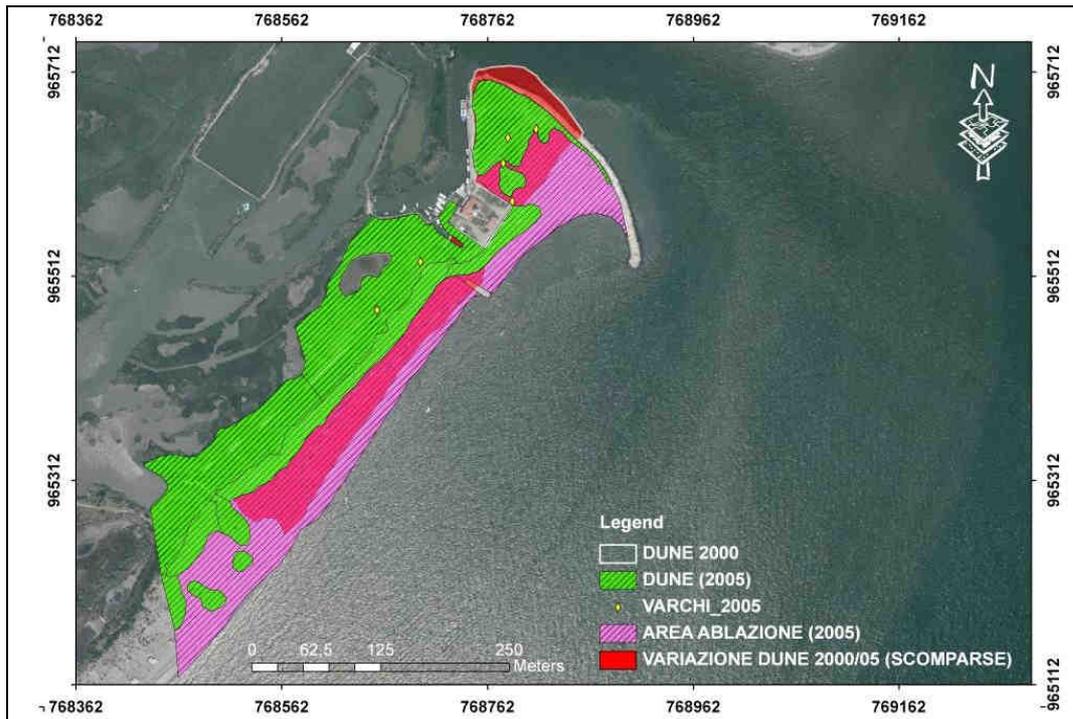


Figure 8 - Variation entre 2000-2005 de l'extension des systèmes dunaires (zone rouge) à proximité de l'embouchure du Po di Goro.

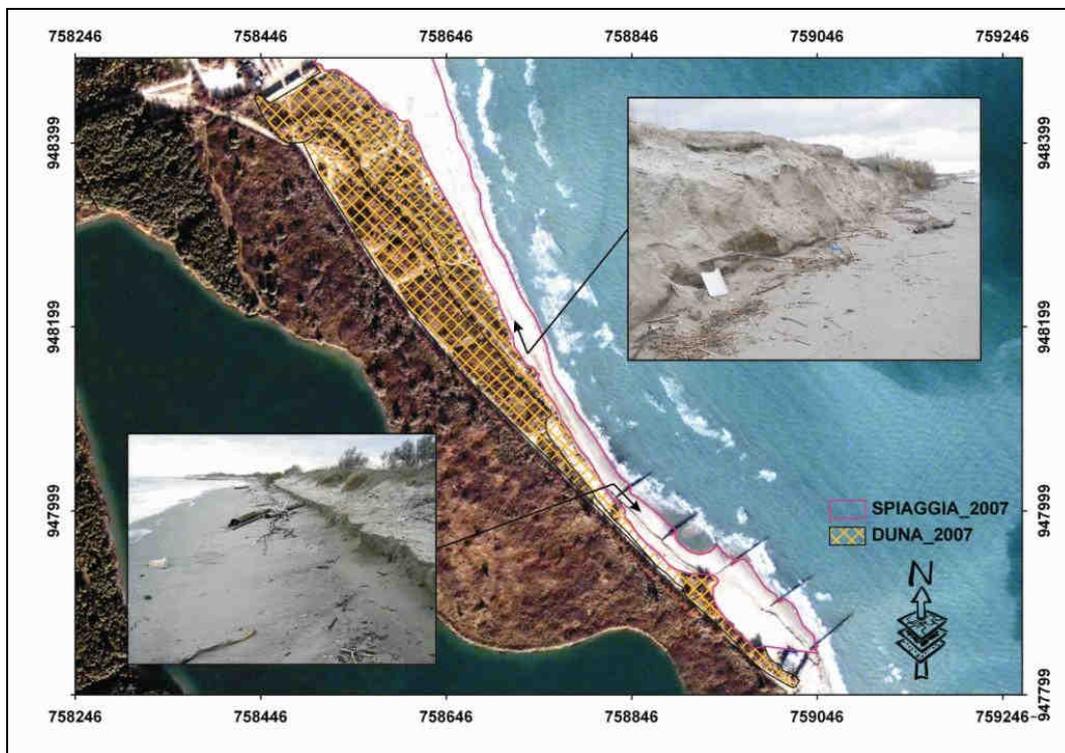


Figure 9 - Lido di Spina: la falaise à la base des systèmes dunaires (falaise de plus de 2 m) souligne la forte crise érosive qui caractérise la zone (photo réalisée le 6.12.2007).

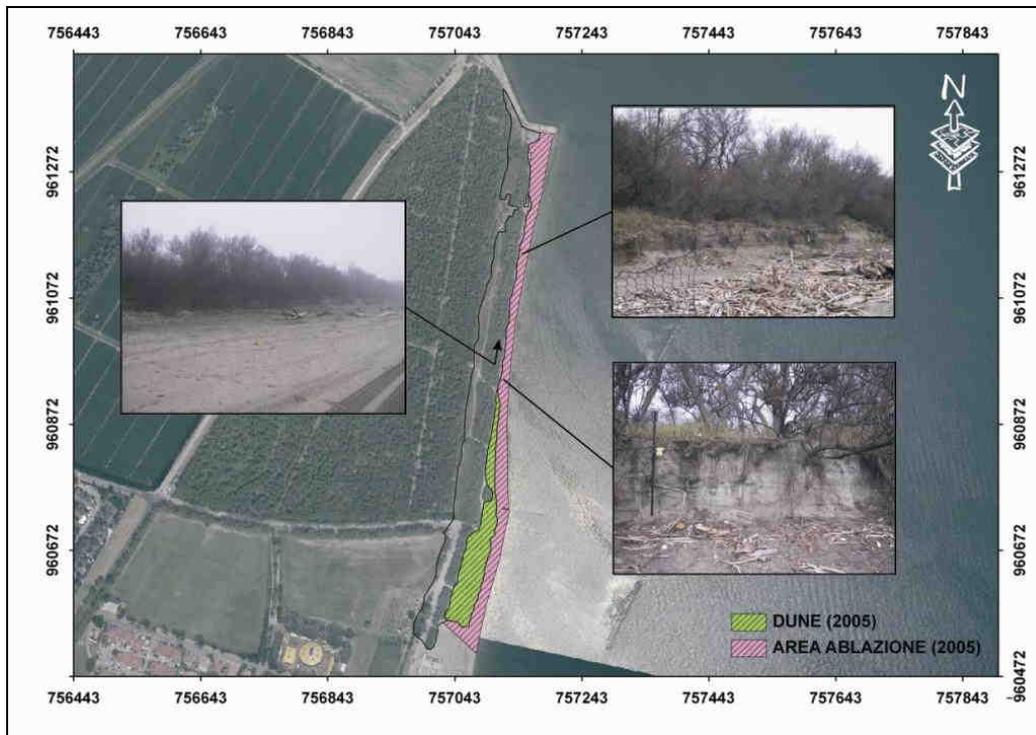


Figure 10 – Lido delle Nazioni: les photos mettent en évidence la falaise d'érosion (environ 1,5 m) sur le flanc marin des dunes présentes en Janvier 2007.

Dans la zone de Ravenna (Macro-zone 2; fig. 11), la situation change nettement, avec des systèmes qui montrent une tendance nette au développement: plus de la moitié des appareils dunaires déterminés (8 sur 12) présentent des accroissements de superficie qui atteignent à $+0.20 \text{ km}^2$ pour un littoral de 8 km.

En particulier, au niveau de l'embouchure du Bevano on enregistre sur une étendue de 4.2 km un accroissement de la superficie dunaire de 0.04 km^2 . La figure 12 reporte l'évolution d'un trait significatif de la zone de l'embouchure du Bevano, long de 1.3 km, où les systèmes dunaires situés à gauche de l'embouchure entre 2000-2005 ont été partiellement démantelés alors que ceux situés à droite ont augmenté. Cette dynamique évolutive est liée à la croissance du *spit* qui s'est déplacé d'environ 500 m vers le nord de l'embouchure du fleuve.

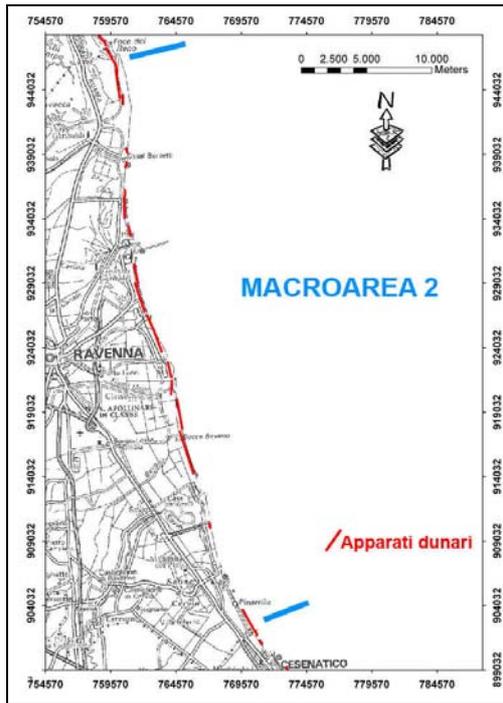


Figure 11 – Extension de la Macro-zone 2: en rouge sont reportés les 15 systèmes dunaires identifiés.

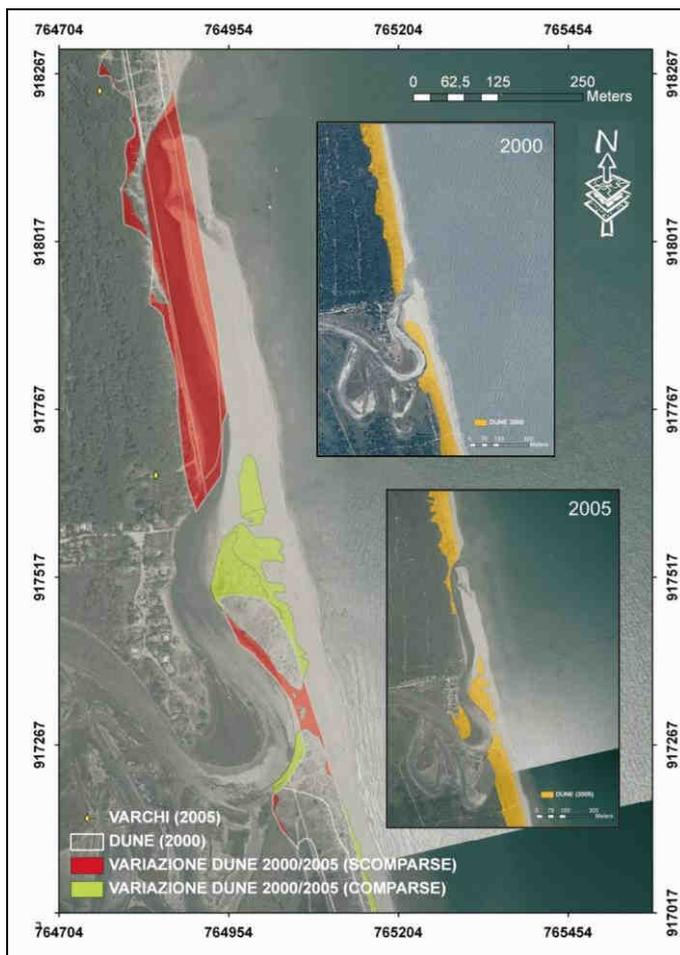


Figure 12 – Zone de l’embouchure du Bevano: les zones identifiées mettent en relief les systèmes dunaires en “accroissement” (en vert) et en érosion (en rouge) entre 2000 et 2005, alors que les images reportées dans les petits cadres représentent le développement des dunes (en orange) entre 2000 et 2005.

La comparaison du budget sédimentaire des dunes et de la plage met en évidence qu'au niveau régional ces deux composantes présentent toutes les combinaisons possibles des stades de développement (fig. 13). En effet les deux systèmes, bien que corrélés entre eux, ne pas présentent nécessairement le même budget en termes quantitatifs ou de signe (Pusty, 1986). L'interprétation des données doit tenir compte des nombreux rechargements réalisés pour contraster l'érosion. Ces interventions peuvent avoir influencé la position des différents systèmes dunaires dans le diagramme.

Entre 2000 et 2005 environ le 40 % (III quadrant) des 41 systèmes dunaires analysés présentent une topographie à *washover* et sont parfois interrompus par des *blowouts*, alors que 21 % (IV quadrant) présente des faibles reculs des dunes vers l'arrière-pays même si leur taux de croissance demeure encore apparemment positif. Environ 68 % des dunes la macro-zone I (province de Ferrare) appartienne dans ces quadrant et 35 % pour la macro-zone II (Province de Ravenne). Dans le quadrant I sont regroupés les corps dunaires (soit 26 % du total) présentant un accroissement des dimensions avec une plage légèrement en avancement ou apparemment stable. De ceux-ci environ 21 % appartient à la macro-zone I et le restant à la macro-zone II.

Peu de cordons dunaires de la Macro-zone III (Provinces de Cesena et de Forlì) retombent principalement dans le quadrant III soulignant ainsi une situation particulièrement critique: peu de systèmes dunaires sont encore présents et dans un état de conservation précaire.

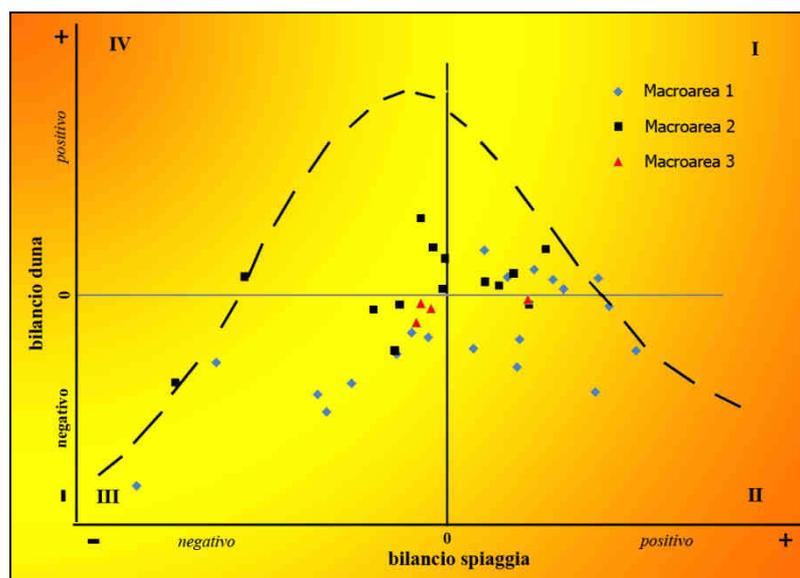


Figure 13 - Développement des dunes, subdivisés par Macro-zone, en fonction des variations de budgets sédimentaires (positifs et négatifs) de la dune et de la plage.

4.3. Matériels et Méthodes

TAUX DE TRANSPORT EOLIEN POTENTIEL

Parmi les différents modèles théoriques qui quantifient le taux transport éolien potentiel, ceux proposés par Bagnold (1941) et Hsu (1986) sont les plus accrédités et ont été utilisés dans le cadre du présent projet. L'équation de Bagnold utilisée pour le calcul de la vitesse limite de cisaillement est:

$$u_{*t} = A_t \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a)gD}{\rho_a}}$$

- ou:
- At = facteur adimensionnel
 - μ^*t = vitesse limite de frottement [cm/s]
 - g = accélération de gravité [cm/s²]
 - D = diamètre moyen [mm]
 - a = densité de l'air
 - s = densité du sédiment

L'équation de Hsu, utilisée pour le calcul du taux de transport potentiel, est:

$$q = K \left[\frac{u_*}{\sqrt{gD}} \right]^3$$

- ou:
- q = taux de transport éolien [g/cm·s]
 - μ^* = vitesse limite de cisaillement [cm/s]
 - g = accélération de la gravité [cm/s²]
 - D = diamètre moyen [mm]
 - K = e^{-9.63+4.91D} = facteur adimensionnel

L'application des modèles de Bagnold et de Hsu partent de l'hypothèse que le transport se réalise sur des surfaces idéales; quand ces hypothèses ne peuvent pas être considérées acceptables et c'est-à-dire dans la plupart des cas, le modèle doit être calibré. A ce propos, il a été calculé le Facteur de capture Tf (Krumbein et James, 1965) pour déterminer le taux

d'accroissement potentiel Ra des dunes (Coastal Engineering Manual U.S. Army, 2002), puisque une partie du matériel transporté par le vent pourrait ne pas se déposer sur la dune mais sortir du système ou ne pas être dimensionnellement apte au transport

$$T_f = \left(\frac{\sigma_{\phi D}}{\sigma_{\phi B}} \right) \exp \left[\frac{(\mu_{\phi D} - \mu_{\phi B})^2}{2(\sigma_{\phi D}^2 - \sigma_{\phi B}^2)} \right]$$

ou

$$\sigma_{\phi} = \frac{\phi_{16} - \phi_{84}}{2} \quad \mu_{\phi} = \frac{\phi_{16} + \phi_{84}}{2}$$

avec

- 16 = diamètre [phi] correspondant à 16 % de la courbe cumulative de la dune (D) et de la plage (B);
- 84 = diamètre [phi] correspondant à 84 % de la courbe cumulative de la dune (D) et de la plage (B).

$$R_a = T_f R_t$$

ou

Tf = facteur de capture

Rt = taux de transport éolien potentiel

Pour chaque système dunaire, les vents constructifs et destructifs ont été séparés en fonction de l'orientation de l'axe de développement des cordons pour lesquels le taux de transport éolien potentiel en m³/m/an a été calculé.

Pour chacun des 41 appareils dunaires subdivisés dans les trois Macro-zones, le taux d'accroissement potentiel Ra a donc été calculé.

Dans la Macro-zone 1, le taux d'accroissement potentiel varie entre 0.29 et 2.23 m³/m/an avec une valeur moyenne de 1.21 m³/m/an (fig. 7). Les plus fortes valeurs sont observées au niveau de la jetée méridionale du Port Garibaldi où l'évolution entre 2000 et 2005, illustrée précédemment, indique que les systèmes dunaires présentent des pertes de superficie plus contenues de toute la macro-zone (fig. 14).

Dans le trait plus septentrional, on note des valeurs de Ra plus basses probablement liées à une orientation différente de la côte (E-W, fig. 15).

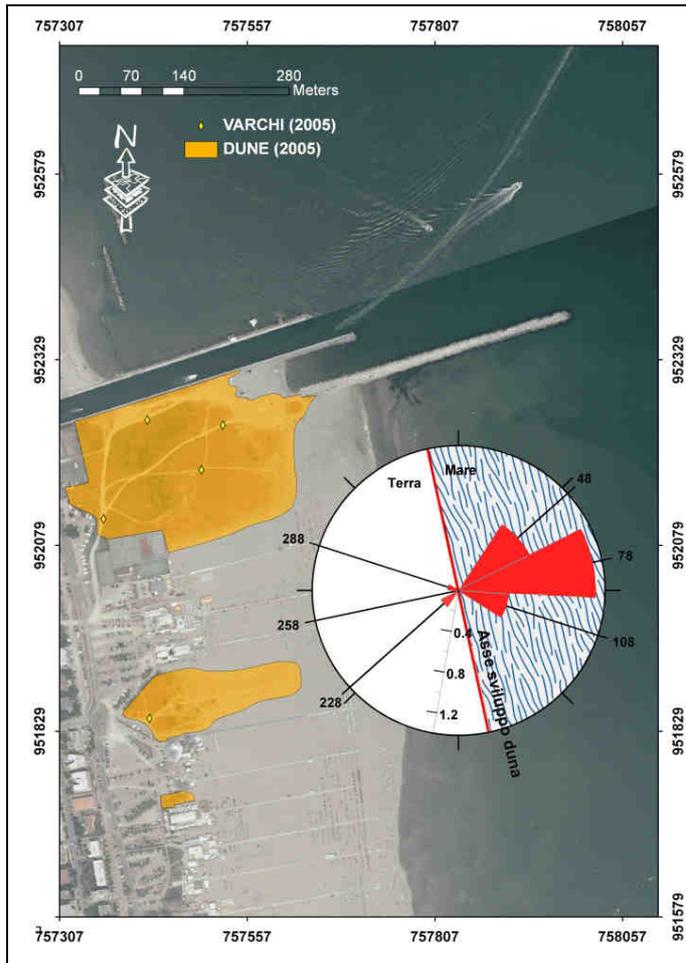


Figure 14 - Cordons dunaires présents dans le littoral au niveau de la jetée méridionale du Porto Garibaldi (Macro-zone 1): dans le diagramme circulaire les taux de transport potentiel sont reportés en fonction de la provenance des vents constructifs et destructifs. L'orientation moyenne de l'axe des cordons dunaires, la présence de brèches et de passages anthropiques sont également indiquées.

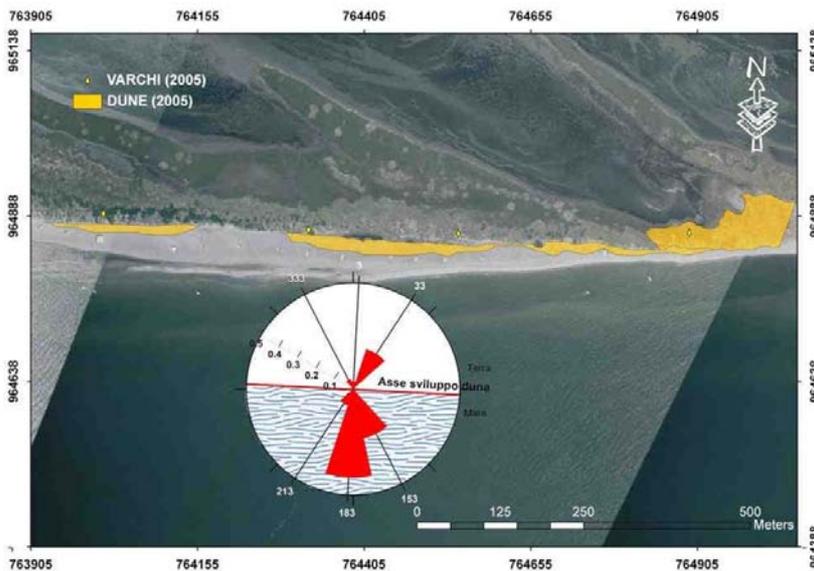


Figure 15 - Cordons dunaires présents dans le littoral du Scanno di Goro (Macro-zone 1): dans le diagramme circulaire les taux de transport potentiels sont reportés en fonction de la provenance des vents constructifs et destructifs. L'orientation moyenne de l'axe des cordons dunaires, la présence de brèches et de passages anthropiques sont également indiquées.

Pour la Province de Ravenne (Macro-zone 2; fig. 11) Ra est compris entre 0.66 et 1.08 m³/m/an avec une valeur moyenne de 0.85 m³/m/an. Les valeurs plus élevées sont observées au niveau de la jetée méridionale de l'embouchure armée du fleuve Lamone où l'évolution entre 2000 et 2005 montre que les systèmes dunaires sont substantiellement en équilibre.

Le long du littoral de Forli et de Cesena (Macro-zone 3; fig. 16) seulement quatre cordons dunaires ont été recensés. Les valeurs de Ra varient entre 0.92 et 1.01 m³/m/an. Il est intéressant de noter que la situation particulièrement critique du système dunaire situé au nord de Cesenatico (fig. 17) présente une faible valeur du taux potentiel de croissance et une perte consistante de la zone dunaire (-0.03 km² sur un front de littoral de 0.3 km).

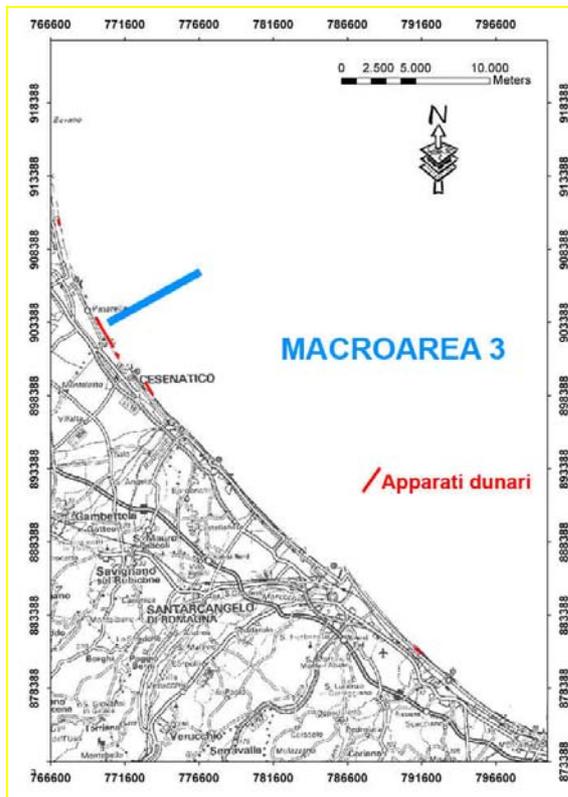


Figure 16 - Extension de la Macro-zone 2: en rouge sont reportés les 4 appareils dunaires identifiés.

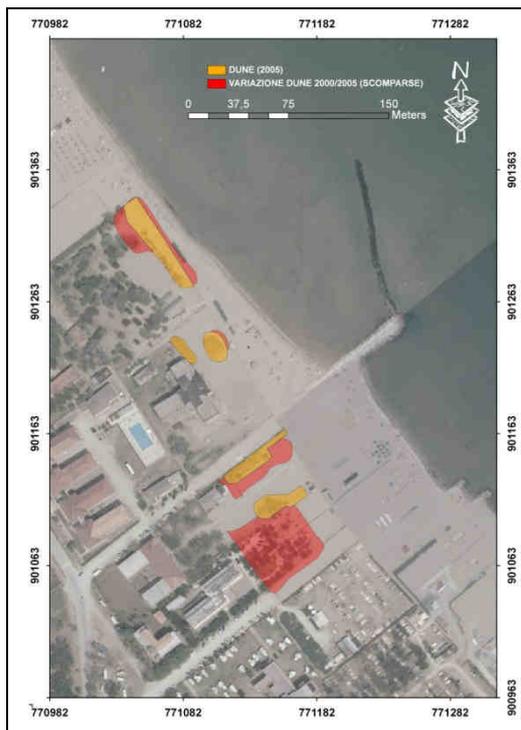


Figure 17 - Cordons dunaires présents sur le littoral situé au nord de Cesenatico (Macro-zone 3): les portions de dunes disparues entre 2000 et 2005 sont représentées en rouge alors que l'état de développement de chaque système est représenté en orange.

La figure 18 représente la comparaison entre l'orientation des dunes et leur taux de développement potentiel. Les plus faibles valeurs de R_a sont observées le long du Scanno di Goro (Macro-zone 1; fig. 18, regroupement a) dont l'orientation E-W est différente de la direction régionale NS. Le taux de développement potentiel augmente vers le sud pour atteindre une valeur maximale au niveau du Lido degli Estensi (fig. 18, regroupement d) pour ensuite rediminuer au niveau du Lido di Spina et dans la Macro-zone 2 et 3. Cette analyse montre que l'orientation de la côte qui favorise le développement des dunes est comprise entre $N340^\circ$ et $N020^\circ$. Les vents plus efficaces pour le développement des dunes devraient être de secteur $N060^\circ$ à $N110^\circ$ en supposant que les vents constructifs sont perpendiculaires à l'axe des cordons dunaires. Dans le cas de la macro-zone I ces vents sont les vents plus intenses (voir station de Volano, fig. 4).

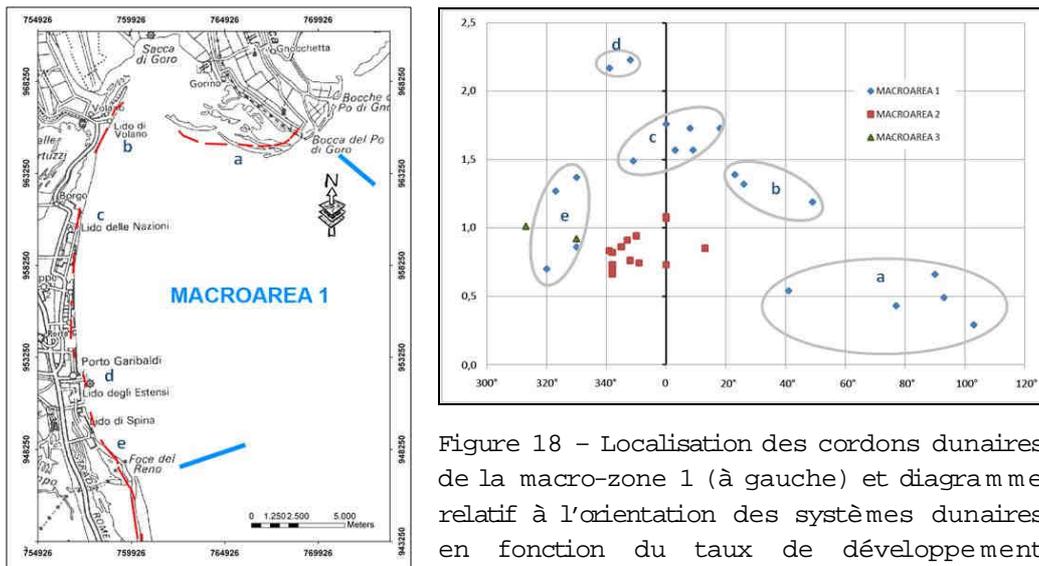


Figure 18 - Localisation des cordons dunaires de la macro-zone 1 (à gauche) et diagramme relatif à l'orientation des systèmes dunaires en fonction du taux de développement potentiel (à droite). Mise en évidence de certains regroupements.

4.4. Résultats et discussion

MONITORAGE DES SITES D'ETUDE

Les zones relevées ont été choisies en raison des interventions de reconstruction et/ou de restauration du cordon dunaire. En particulier, une intervention expérimentale a été réalisée dans la zone du phare de Gorino (Sacca de Goro), consistant en un rechargement de plage et la construction de dunes avec un noyau interne artificiel de nouvelle conception. D'autre part, les sables provenant du nettoyage des plages et déposés dans une décharge publique ont été utilisées pour restaurer la zone située au sud du Lido delle Nazioni.

SCANNO DI GORO

Le trait de côte situé sur le rivage gauche du Po de Goro, caractérisé par une flèche littorale, représente l'unique protection pour la lagune située en arrière (fig. 19). A partir des années 70 la forte érosion a progressivement touché toute le spit jusqu'à compromettre la survie de la lagune de Goro. Pour remédier à ce problème, après une attentive évaluation, une intervention qui répondait aux exigences suivantes, a été réalisée: mettre en sûreté le trait côtier et la lagune située en arrière, effectuer des interventions à bas impact environnemental pour ne pas compromettre la forte valeur environnementale de la zone (zone SiC et ZPS), favoriser la navigabilité du Po de Goro et, protéger la zone du phare de Gorino contre les tempêtes de mer.



Figure 19 – Localisation de la zone de monitoring située sur le lobe méridional du Delta du Po et sur le rivage gauche de la branche du Po de Goro.

Afin de respecter l'évolution morpho-dynamique particulière et rapide de la zone de l'embouchure, la Région Emilie Romagna, en collaboration avec le Département de Sciences de la Terre de l'Université de Ferrare, a adopté une solution de défense douce, ayant un bas impact sur la dynamique naturelle et respectueuse des particularités environnementales de la zone. La présence d'une barre bien développée et attachée à la rive gauche, qui éloignait de l'embouchure du Po de Goro les sédiments provenant des branches septentrionales et obstruait la navigabilité de la branche fluviale, suggéra la possibilité de prélever ces sables pour recharger un trait de plage de 1 km en forte érosion.

La quantité limitée de matériel disponible, environ 80.000 m³, permettait la reconstruction d'une plage avec des dimensions qui n'offraient pas une protection suffisante contre les évènements de tempête et d'acqua alta, et, ne mettait donc en sûreté la zone du phare et les territoires situés en arrière. De plus ce rechargement ne garantissait pas la continuité du Scanno de Goro.

Pour atténuer le risque de ces évènements, une fois la plage reconstruite, des cordons dunaires furent reconstitués pour défendre les zones situées en arrière de la plage. Au cours du projet de reconstruction, une attention particulière fut donnée à leur correcte insertion environnementale en reproposant les dimensions et les géométries des dunes naturelles. Pour effectuer cette modélisation il fut réalisé un recensement attentif et une cartographie des dunes actives encore existantes dans les traits côtiers limitrophes, en notant les caractéristiques morphologiques et de la végétation.

Ces dunes, qui remplissent déjà la double fonction de barrière contre les ingressions marines et de réserve sédimentaire pour l'alimentation des plages en érosion, jouent un rôle de défense

encore plus importante car elles ont été munies d'une armure interne basculante (fig. 20): des gabions, haut 20-30 cm et remplis de cailloux, posés sur les poteaux.

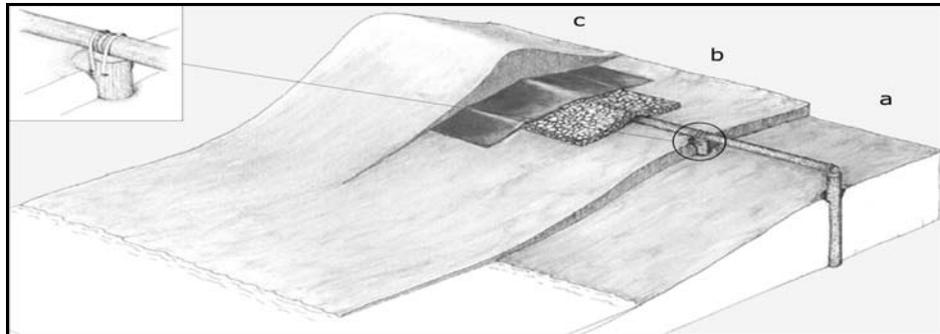


Figure 20 – Schéma de construction de la dune armée: mise en place de la structure de soutien en poteaux (a); versement du sable et réalisation du matelas avec des masses recouvert d'un géotextile (b); versement du sable avec re-profilage de la dune (c).

Ce matelas, recouvert d'un géotextile semi-perméable, a été successivement enterré sous les dunes. L'armure en cas d'une rapide régression de la plage sera mise à jour et, pourra facilement s'adapter à la nouvelle organisation morpho-topographique de la plage puisqu'elle n'est pas rigide mais basculante sur l'échafaudage. L'intervention, terminée au cours de l'été 2002, a été soumise à un attentif monitoring topo-bathymétrique et sédimentologique (fig. 21): entre 2002 et 2007 cinq relevés ont été réalisés.

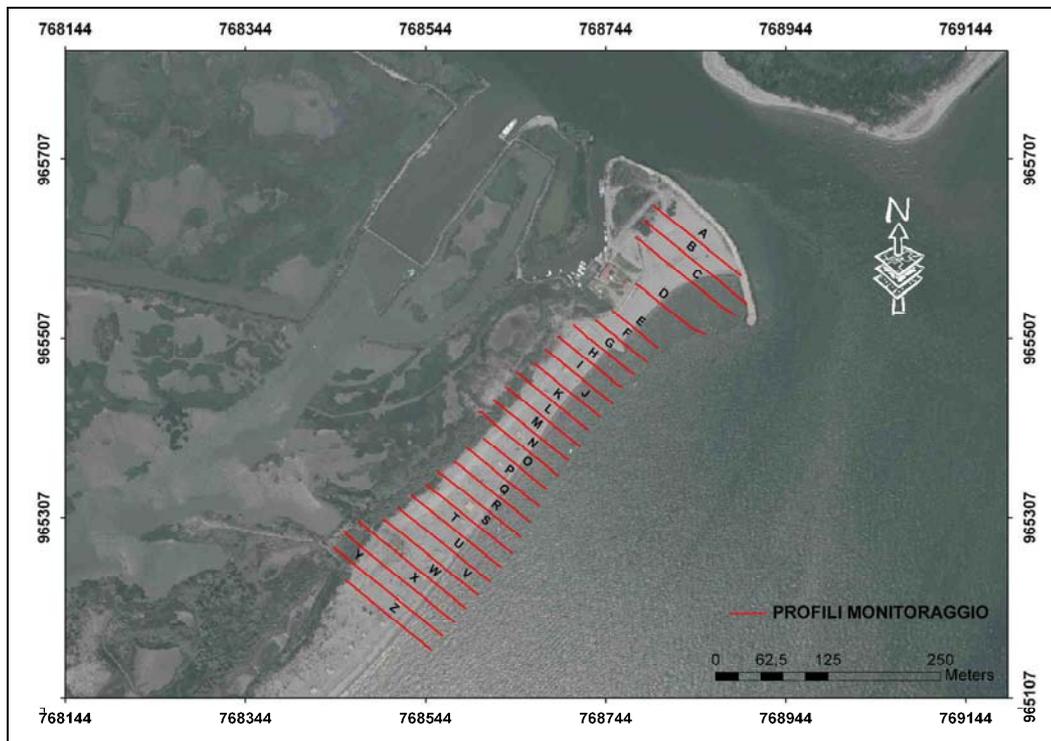


Figure 21 – Réseau du monitoring topo-bathymétrique de la zone du phare de Gorino.

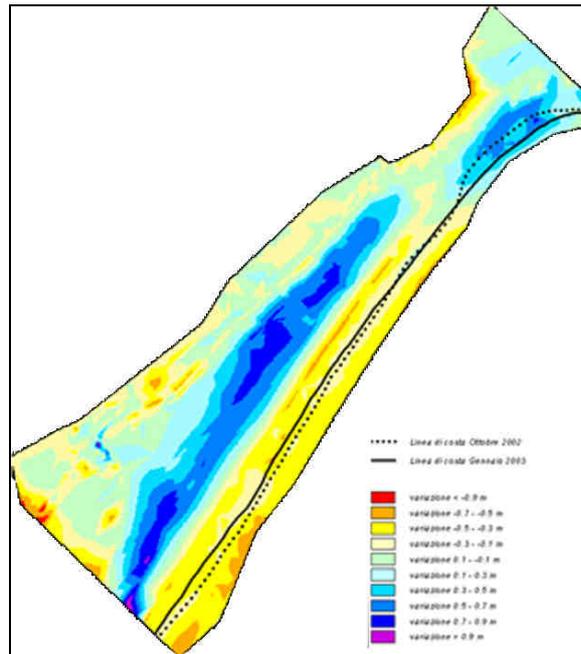


Figure 22 - Comparaison Octobre 2002 - Janvier 2003: dans l'ensemble le budget est positif avec un gain d'environ + 5.000 m³; les tonalités bleues déterminent les zones de majeur dépôt qui se situent au niveau des systèmes dunaires reconstitués.

Après un an environ la plage, suite à un premier recul, a récupéré les dimensions du projet et présentait une progradation évidente du trait de côte et un accroissement volumétrique. Le bon résultat de l'intervention a été, en outre, documenté par la croissance des systèmes dunaires, reconstitués en accord avec le système plage (fig. 22).

Les résultats des relevés successifs (fig. 23) ont mis en évidence la permanence de la forte tendance érosive et, la mise à jour de l'armure de la dune reconstituée au cours de la dernière période.

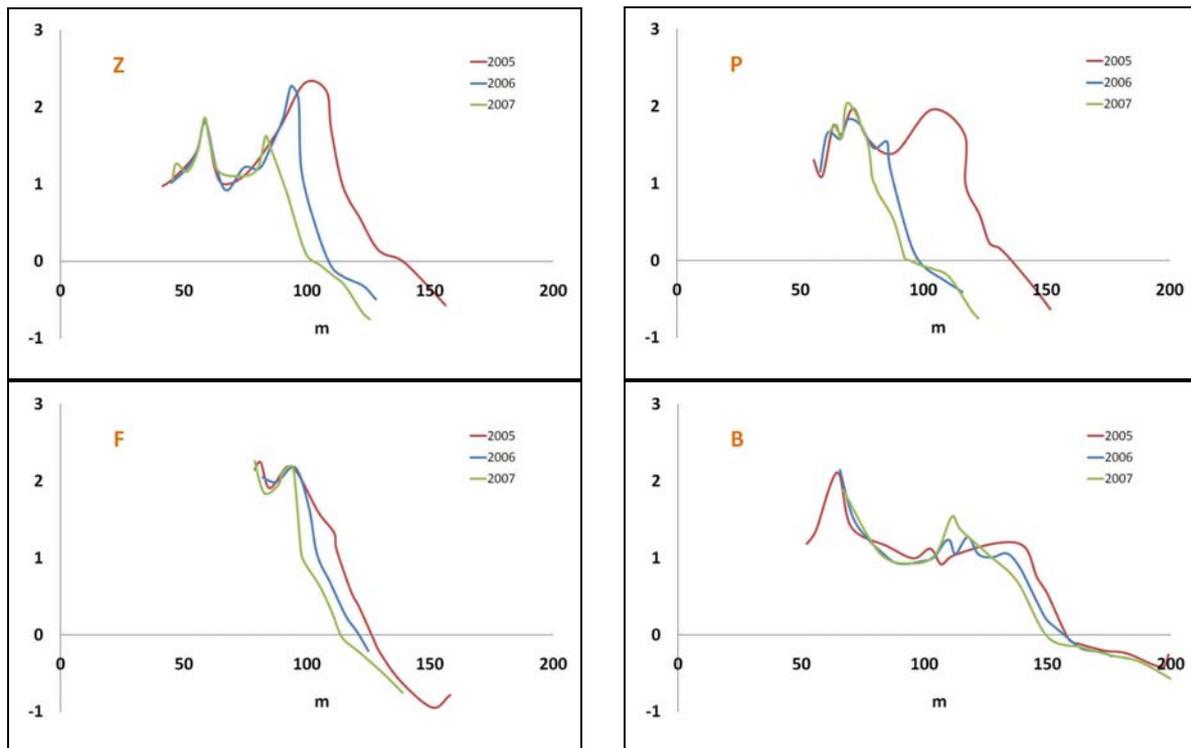


Figure 23 – Comparaison des profils topographiques (pour la localisation voir fig. 21) réalisés en Janvier 2005, Mars 2006 et Août 2007.

Les fortes tempêtes de mer de l'hiver 2007 ont fortement réduit la largeur de la plage et ont mis à jour les structures internes de la dune artificielle (fig. 24).



Figure 24 – Situation ajournée à 2007 du littoral du phare de Gorino. La forte crise érosive a provoqué la mise à jour de l'armure interne des dunes artificielles.

De même la comparaison 2006-2007 des caractéristiques sédimentologiques des sédiments superficiels de la dune met en évidence des changements texturaux importants. Ces derniers sont liés aux fréquents « surpassements » des vagues du sommet de la dune, surtout lors des tempêtes de mer, et, par conséquent, au remaniement de la couche sédimentaire superficielle. D'autre part la crise régressive enregistrée lors de la dernière période de monitoring a permis d'évaluer l'efficacité de la structure défensive interne. Ce monitoring met en évidence que:

comparaison évolutive avec les zones limitrophes indique que l'intervention a eu un résultat positif puisque les taux de recul du trait de côte sont plus modérés; la structure interne s'adapte au nouveau profil topographique de la plage quand elle est mise à jour; la « structure » nécessite quelques améliorations notamment en ce qui concerne la construction du matelas (subdivision interne avec des cloisons; application de poignées pour faciliter le soulèvement).

Aujourd'hui la situation de la zone d'étude (fig. 25) nécessite un nouveau rechargement de matériels sableux et un reprofilage morphologique qui, grâce à la protection de défense interne, peuvent être réalisés sans urgence.

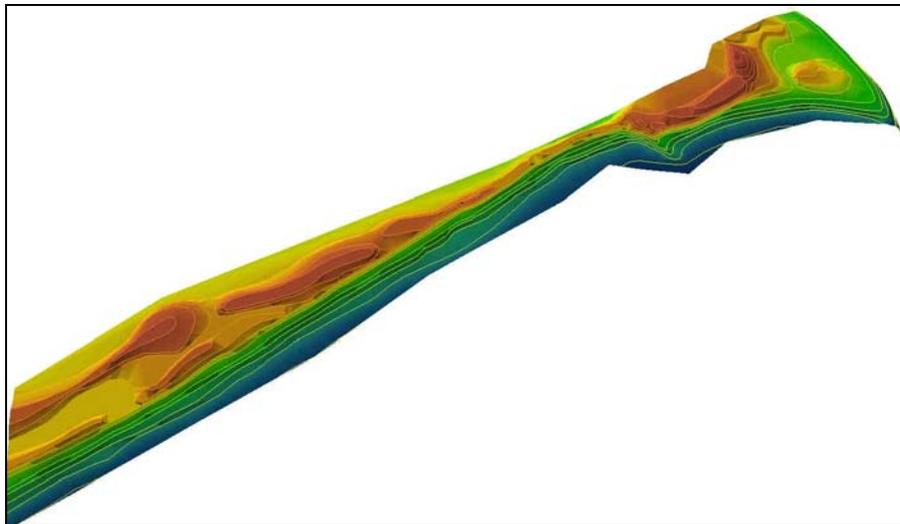


Figure 25 - Modèle 3D de la zone d'intervention réalisé sur la base des relevés d'Août 2007.

LIDO DELLE NAZIONI

La profonde crise érosive des littoraux de l'Emilie-Romagna a nécessité une recherche attentive et une utilisation précise des dépôts sableux présents sur et à proximité de la côte. A ce propos l'intervention effectuée par la Région, en collaboration avec l'Université de Ferrare, de restauration des dunes et du rechargement d'un trait de plage de 800 m environ du Lido delle Nazioni est particulièrement intéressante (fig. 26).

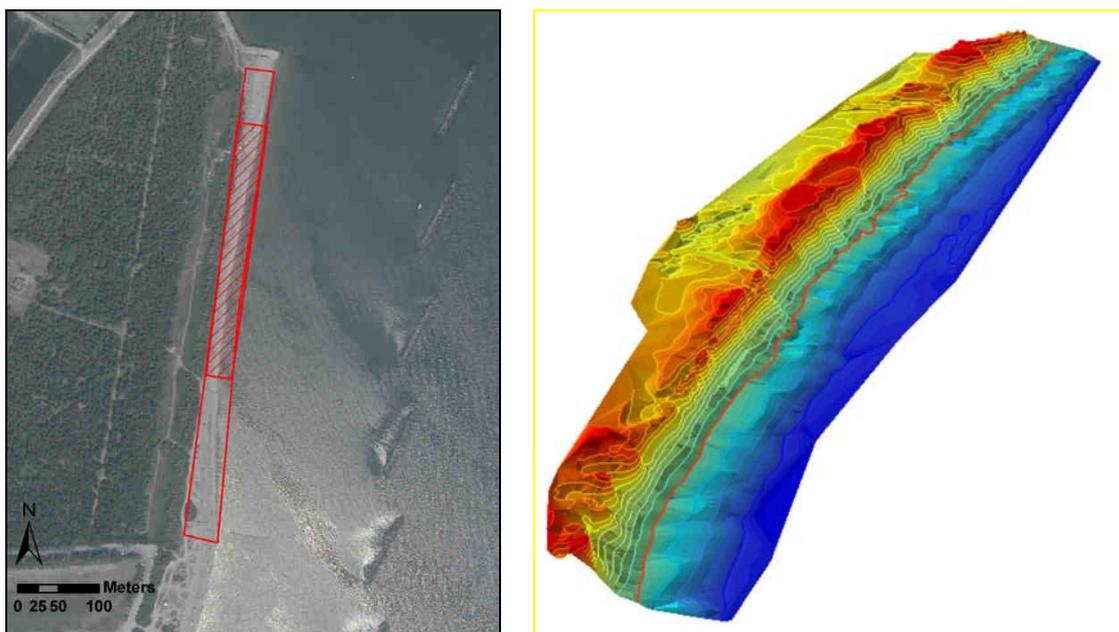


Figure 26 - la figure de gauche indique la position de la zone de l'intervention située dans la Macro-zone 1: le polygone englobe toute la zone d'intervention, alors que le polygone hachuré identifie le trait analysé en détail. La figure de droite correspond à un modèle 3D de la zone d'intervention réalisée à partir des relevés dGPS effectués avant l'intervention (en rouge est reportée l'isobathe 0 m).

Ce littoral, protégé par des brise-lames, sur la base des données antérieures et des mesures effectuées dans le cadre du présent projet est caractérisé par une intense crise érosive: La vitesse de recul a atteint 5 m/an entre 2005 et 2007. La crise est plus évidente si on considère que la largeur moyenne de la plage était seulement de 8 m en 2006 et que le cordon dunaire était profondément attaqué par la houle (fig. 27)



Figure 27 - Figures évidentes d'érosion du cordon dunaire.

Les modalités d'intervention ont été profondément conditionnées par le financement disponible (environ 200.000 €), de l'urgence liée à la mise en sécurité de la zone et de la nécessité de reconstruire les dunes et aussi la plage située en face.

Les sables nécessaires pour le versement proviennent d'une décharge, où sont accumulés les sédiments mélangés aux débris recueillis lors du nettoyage des plages. Après un tamisage adéquat (fig. 28a), des camions et des moyens mécaniques ont permis de transférer et de verser environ 22.000 m³ de sable sur la plage objet d'intervention (fig. 28b).



Figure 28 - Tamisage du sable (a) et phase de versement du matériel sur la plage (b).

La faible disponibilité de sable ne permettait pas d'appliquer les formulations disponibles en littérature pour calculer les volumes de matériel nécessaires par mètre linéaire de littoral. Ceci a rendu nécessaire une approche plus empirique pour calculer le profil de rétablissement.

Au cours du projet il a été établi que la morphologie d'un trait de côte voisin présentant une plage relativement stable (+ 1 m/an entre 2005 et 2007), large (environ 22 m) et encore bordée par des dunes montrant un bon état de conservation, était l'unique condition possible à « obtenir ». A ce propos quelques profils moyens de cette zone ont été calculés et, leur comparaison avec des profils de la zone d'intervention a permis de calculer le volume de matériel à verser pour obtenir une largeur de plage de 22 m environ. Cette valeur est comprise entre 22 et 27 m³ par mètre linéaire de plage.

Successivement ces volumes ont été multipliés par un facteur compris entre 1 et 3, en fonction des vitesses de recul observées au niveau de chaque profil. De plus, la quantité de matériel nécessaire pour rétablir le profil de la dune (de 1.5 à 4 m³/m) a été ajoutée à ces volumes. Dans l'ensemble des quantités de sable comprises entre 24 et 50 m³/m ont été versées.

En outre, puisque la plage étudiée ne présente pas une activité de baignade importante, les troncs et les rameaux dispersés sur la plage et ramassés lors de la phase préparatoire de

l'intervention ont été déposés à proximité du pied de la dune (fig. 29). Cela fournit au cordon dunaire une ultérieure protection contre l'action de démantèlement de la houle et favorise le dépôt des sédiments transportés par le vent.



Figure 29 - Quelques phases de positionnement des restes végétaux sur le flanc marin du cordon dunaire.

Dans le détail, cinq relevés topographiques ont été réalisés dont un avant l'intervention et quatre après, respectivement au cours des mois de Mars, Avril, Juin et Novembre 2007. Un mois après le versement du matériel sur la partie supérieure de la plage (fig. 30), un déplacement du trait de côte vers la mer de l'ordre de 10 à 20 m a été observé, indiquant donc d'une augmentation effective de la largeur de la plage émergée.

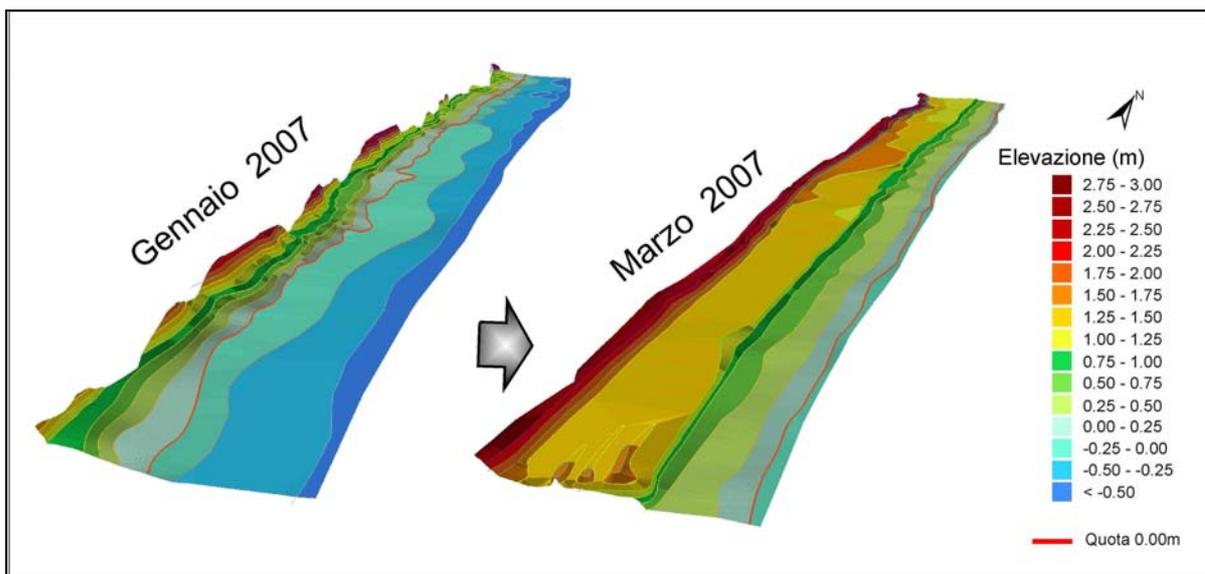


Figure 30 - Modèles 3D obtenus des relevés effectués avant (Janvier 2007) et après (Mars 2007) l'intervention de rechargement (l'isobathe 0 m est reportée en rouge).

En effet le pied de la dune côté mer est située dans une position plus avancée par rapport au relevé précédent de 2-5 m. Toutefois la présence d'une berme (fig. 31) d'environ 0.5 m met en évidence que le phénomène érosif est toujours en cours. En ce qui concerne la partie plus interne, les formes dunaires « ondulées » et discontinues, qui présentaient une altitude d'environ 1.8 m, sont substituées par un cordon continue de hauteur moyenne de 2.5 m.



Figure 31 - "Falaise" d'érosion du matériel versé. Mars 2007.

Pour réussir à déterminer la quantité des volumes une extension sous environnement SIG, dénommée cut/fill, a été utilisée. Le calcul indique que la plage émergée de toute la zone d'étude a présenté une augmentation volumétrique de 12.000 m³. Les 10.000 m³ de sable manquant ont été en partie érodés et transportés par la dérive littorale vers le nord et au large, et se sont en partie accumulés sur les fonds marins compris entre le trait de côte et les brise-lames.

La comparaison du relevé de Mars avec celui d'Avril et Juin ne met pas en évidence des changements importants (fig. 32) et la morphologie de la plage émergée présente en général les mêmes caractéristiques.

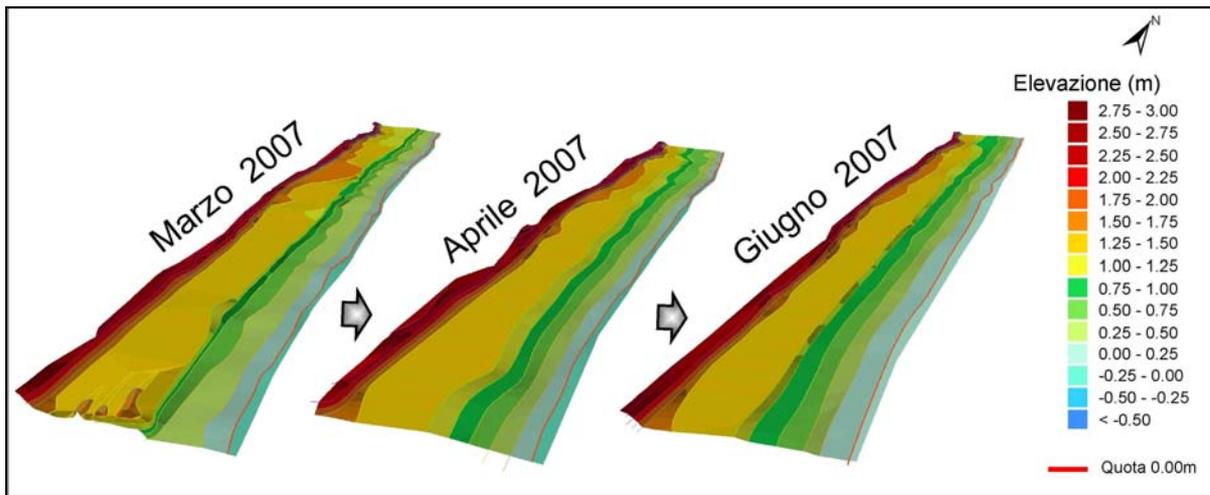


Figure 32 - Modèles 3D élaborés à partir des relevés topographiques effectués en Mars, Avril et Juin 2007 (l'isobathe 0 m est reportée en rouge).

La dernière comparaison (Juin-Novembre 2007) montre un recul moyen du trait de côte de 3-4 m environ. La morphologie de la plage relative au dernier relevé apparaît plus articulée alors que les cotes des crêtes des dunes sont toujours de 2.5-2.8 m (fig. 33).

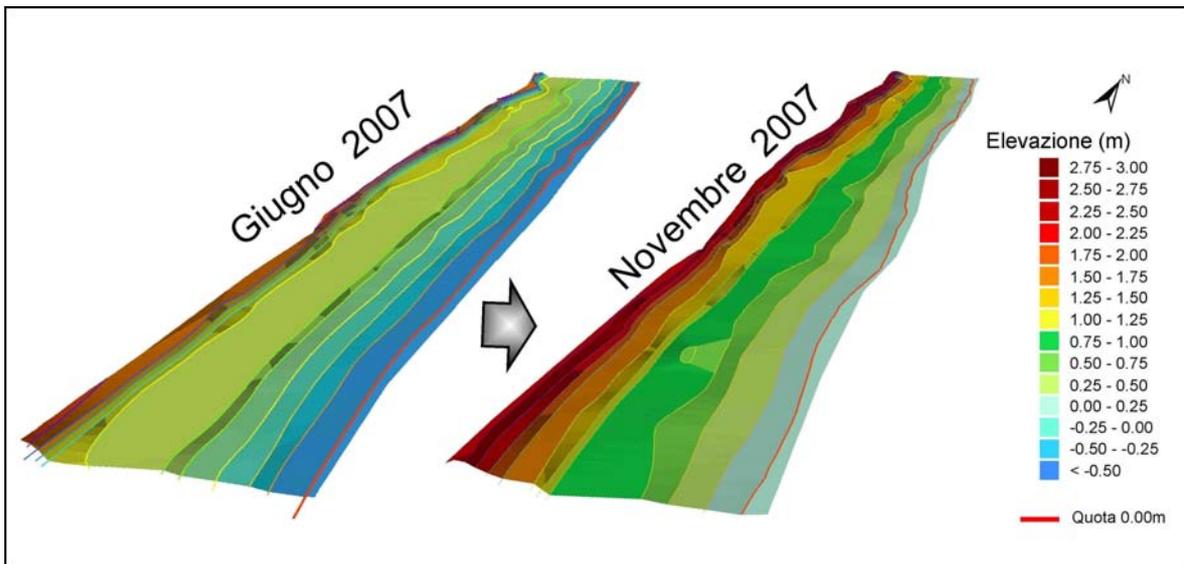


Figure 33 - Modèles 3D élaborés à partir des relevés topographiques effectués en Juin et Novembre 2007 (l'isobathe 0 m est reportée en rouge).

La comparaison du premier et dernier relevé (fig. 34) permet d'émettre un jugement positif de l'intervention en considérant les matériels utilisés, les limites de temps du projet et la réalisation de l'intervention: la plage élargie d'environ 20 m avec le versement du sable a substantiellement maintenu les dimensions du projet (recul moyen de 1 m environ); les dunes ont maintenu les dimensions et la forme données par le reprofilage; les troncs et le rameaux de plage, positionnés pour défendre le pied de la dune, ont fonctionné soit comme pièges pour

la capture des sables éoliens soit comme de défense partielle contre l'érosion des vagues de tempête. Le monitoring se poursuivra en 2008 car ces résultats nécessitent d'être confirmés sur une plus grande période de temps.

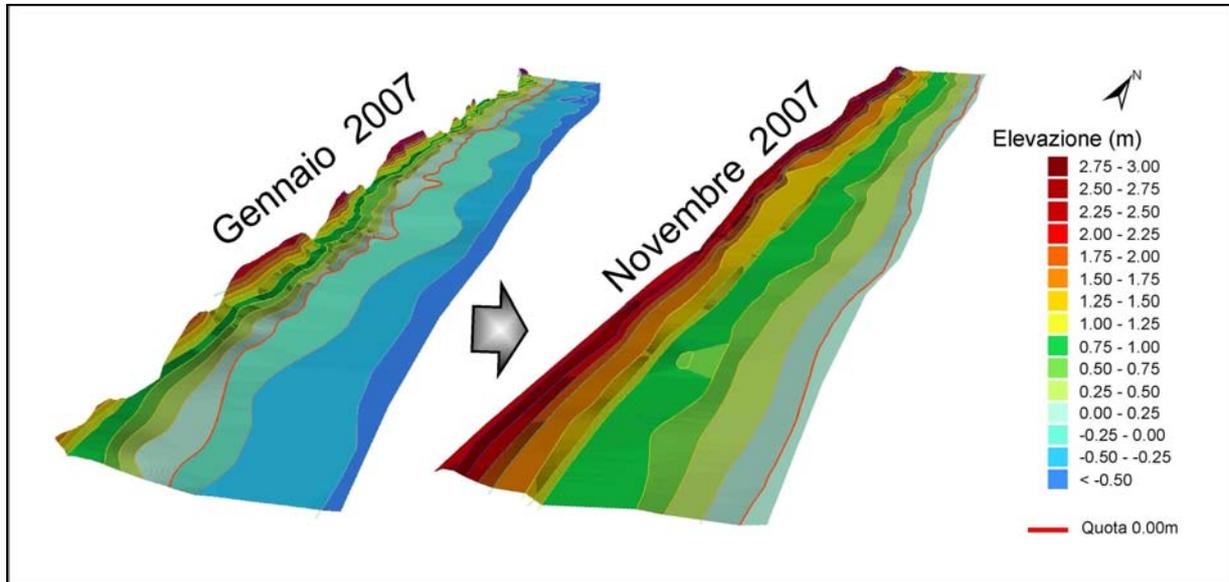


Figure.34 - Comparaison finale du 3D élaborés à partir des relevés topographiques effectués en Janvier (pré-intervention) et en Novembre 2007 (l'isobathe 0 m est reportée en rouge).

DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DU TAUX DE TRANSPORT EOLIEN SUR LES SITES D'ETUDE

La capture expérimentale des sables transportés par le vent a été réalisée sur deux sites d'étude situés dans la Macro-zone 1 (Lido di Spina et Phare de Gorino) et a été répétée à différentes reprises. Au cours de l'expérimentation les données du vent (direction et intensité) et physiques de l'air (température et humidité) à trois hauteurs différentes (0.5, 1 et 3 m) ont été recueillies. En même temps le matériel transporté par le vent, depuis la crête dune jusqu'à la limite de la haute plage, a été capturé en utilisant des pièges (type Rosen modifié) installés sur le plan de campagne et opportunément orientés (fig. 35). Durant la capture du transport éolien, l'humidité superficielle (W_u) n'a pas été mesurée et la rugosité z_0 (roughness) n'a pas été considérée pour le calcul de la vitesse limite de cisaillement u^* .

Deux campagnes expérimentales réalisées sur les deux sites et retenues particulièrement significatives sont reportées ci-dessous.



Figure 35 - Disposition des pièges le long des sections d'échantillonnage; en arrière plan on note la station anémométrique avec les différents capteurs de vitesse et de direction du vent.

La capture éolienne effectuée à Lido di Spina (fig. 36) le 22 Mars 2007 a duré environ 3 heures (de 11:49 a.m à 14:52 p.m.).

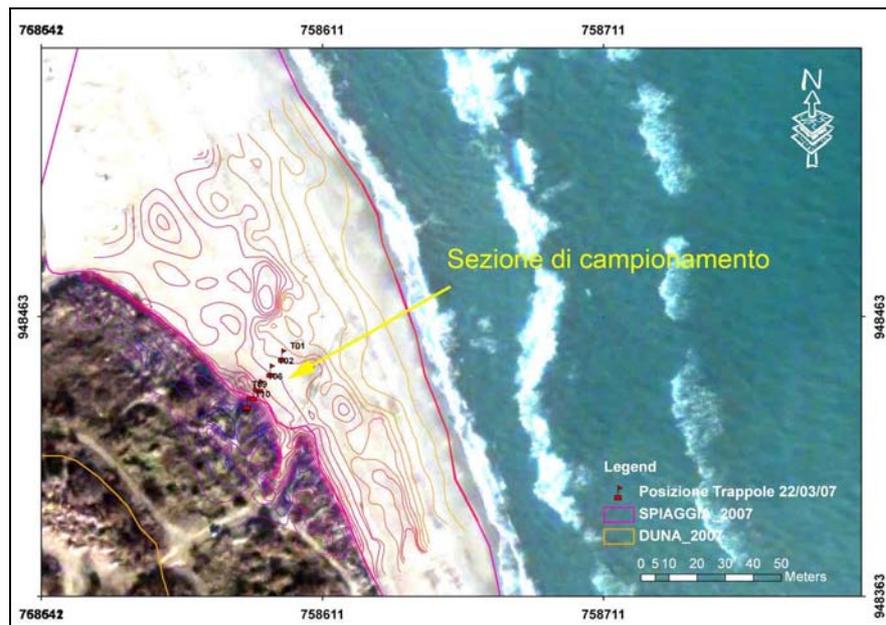


Figure 36 - Position des pièges éoliens le long du profil de la plage du Lido de Spina.

L'enregistrement des données de vent a été effectué à des intervalles de 5s, successivement moyennées à 10s pour déterminer la vitesse limite. Les données ont été filtrées sur la vitesse critique pour le transport sédimentaire éolien (6,35 m/s). Le diagramme de la figure 37 indique que les vents étaient principalement de secteur du II Octante (NW-Bora).

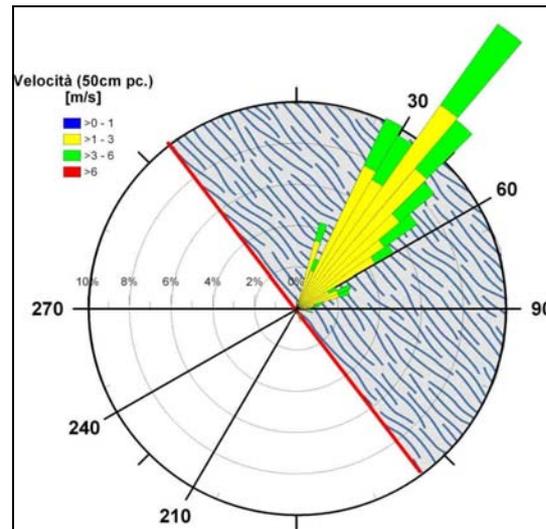


Figure 37 - Diagramme circulaire de la distribution des fréquences des vitesses des vents « constructifs » mesurés à 50 cm du plan de campagne au cours de la capture éolienne réalisée au Lido de Spina (en rouge est indiquée la direction prédominante de l'axe du cordon dunaire).

Au cours de l'échantillonnage 7.35 kg de sédiment ont été capturés par les pièges; théoriquement la valeur de R_a , selon les formules illustrées auparavant devrait être de $1,66 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}/\text{h}$ (environ 10 fois le taux obtenu de manière expérimentale).

La comparaison des caractéristiques texturales des sédiments prélevés sur la partie superficielle de la dune à ceux capturés par les pièges (fig. 38) met en évidence un accord substantiel, même si ceux capturés présentent une dimension moyenne légèrement plus fine et une majeure sélection. Ces différences sont facilement explicables en considérant que le sédiment de la dune a pu être déposé par des vents moins homogènes de vitesses supérieures à celles enregistrées au cours de la présente expérimentation ($V_{\text{moyenne}} = 6,58 \text{ m/s}$).

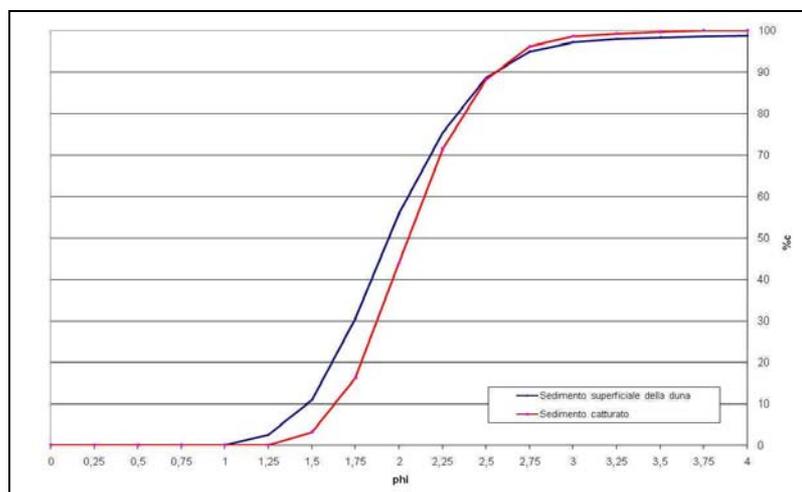


Figure 38 - Comparaison entre les courbes cumulatives des sédiments superficiels de la dune (en bleu) et de ceux capturés au cours de l'expérimentation (en rouge).

La seconde expérimentation a été réalisée de la même manière à proximité du phare de Gorino (fig. 39) le 7 Septembre 2006 et a duré environ 3 heures (entre 08:37 a.m et 11:37 a.m.).



Figure 39 - Position des pièges éoliens le long du profil de plage à proximité du phare de Gorino.

De même les vitesses égales ou inférieures à la vitesse critique (5.02 m/s) ont été éliminées. Le diagramme de la figure 40 met en évidence que les données du vent enregistrées proviennent principalement de N120° à N160°, de N160° à N200° et de N200° à N240° (E-SE principalement vents de Libeccio) avec des vitesses rarement supérieures à 9 m/s.

Au cours de l'échantillonnage une quantité totale de sédiment de 10.19 Kg a été capturée par les pièges; selon les formules illustrées auparavant, le taux de transport théorique est de $1,27 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m/h}$ (9 fois supérieure à celle obtenue de manière expérimentale).

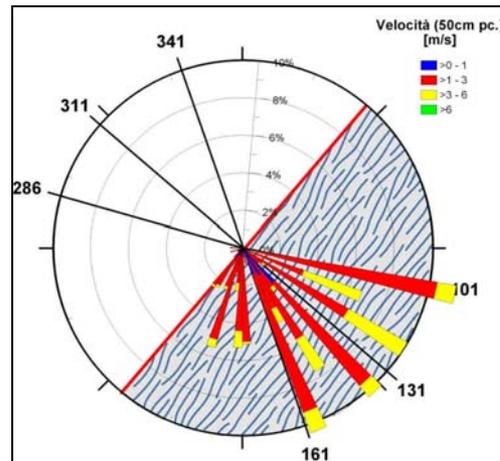


Figure 40 - Diagramme circulaire de la distribution des fréquences des vitesses des vents « constructifs » mesurés à 50 cm du plan de campagne au cours de la capture éolienne réalisée au phare de Gorino (en rouge est indiquée la direction prédominante de l'axe du cordon dunaire).

4.5. Considérations finales

Dans notre Pays le manque de perception de la valeur écologique, du paysage et de protection des dunes côtières a favorisé leur destruction surtout, comme pour l'Emilie-Romagna, pour des fins touristiques balnéaires. Au niveau national, les recherches, au moins à échelle régionale, concernant l'état des dunes côtières sont peu nombreuses alors qu'il existe de nombreuses études à caractère local (Simeoni et al, 1999; Kukavivic et Pranzini, 2003; Bellotti et al, 2006) ou de divulgation (Macchia et al, 2005). Il existe une carence d'étude et de recherche, au moins à l'échelle régionale, concernant l'état des dunes côtières. Cette carence d'information a souvent contribué à la mauvaise gestion et à la dégradation persistante de nombreuses zones côtières.

Les recherches effectuées au cours de la première phase, outre à la cartographie des dunes côtières (description de 41 systèmes dunaires), sous environnement SIG et sur toute la côte régionale, ont permis d'ajouter la banque de données des dunes réalisée en 2000. Dans l'ensemble, entre 2000 et 2005, on a observé une perte, à échelle régionale, de la superficie dunaire de -0.32 km^2 sur un front littoral bordé par des dunes de 33.5 km, la majeure partie (environ -0.30 km^2 soit 20 % de la superficie dunaire présente en 2000) est située dans la Province de Ferrare, où les cordons dunaires bordant 16.4 km de littoral sont principalement en érosion.

De nombreux cordons dunaires présentent un état de conservation assez préoccupant, de nombreux "déchaussements" à la base et des passages d'inondation. La Réserve Naturelle de l'embouchure du Bevano et la zone naturelle des Vene et Ancone di Bellochio présentent

encore aujourd'hui sur quelques kilomètres quelques "restes" de l'ancien paysage, avec des dunes côtières bien développées et végétalisées

Les analyses ont permis de mettre en évidence que la conservation de ces morphologies est fortement à risque et que, compte tenu de l'altimétrie du territoire côtier de l'Emilia-Romagna, il y a été nécessaire de protéger et de conserver les cordons dunaires restants. L'ajournement de la bande donnée, en plus de fournir des éléments qualitatifs et quantitatifs sur l'étendue et l'état de conservation, pourra faciliter la détermination de la criticité, même au stade initial, et la réalisation des meilleures solutions gestionnaires (Rapport phase B Beachmed).

Les données recueillies et les analyses spatiales réalisées dans la banque de données doivent toutefois considérer que le matériel, mobilisé par le vent, alimente les dunes. A ce propos les vents constructifs et destructifs ont été déterminés en fonction de l'orientation de l'axe des cordons dunaires afin de calculer le taux d'accroissement potentiel (R_a) de chaque système. Ainsi le long du littoral régional les taux d'accroissement varient entre 0.3 et 2.2 m³/m/an: les plus basses valeurs sont observées au niveau du Scanno de Goro, probablement en raison de la différente orientation de la côte (E-W), et les plus fortes au niveau de la jetée méridionale du Port Garibaldi.

Pour vérifier la crédibilité des données des expériences de capture éolienne ont été effectuées, en utilisant des pièges de type Rosen, en deux sites (Lido di Spina et Phare de Gorino). La comparaison des données expérimentales avec celles théoriques montre que les formules surestiment la quantité de sable d'un facteur multiplicatif compris entre 5 et 10.

Ceci souligne de nouveau la complexité du système d'étude et qu'il est difficile de considérer simultanément tous les facteurs. A la lumière de ces expériences l'expérimentation en campagne, réalisée pour différents sites et répétée pour différentes conditions environnementales, est fondamentale. Les approches expérimentales adoptées apparaissent utilisables seulement pour des traits côtiers où l'action anthropique est modeste.

De plus, dans le cadre du projet l'évolution de traits côtiers intéressés par des interventions de reconstruction et/ou de restauration de l'appareil dunaire a été attentivement suivie. Les études ont notamment concerné deux traits de côte: le premier (phare de Gorino) où des dunes avec un noyau interne artificiel de nouvelle conception ont été construites et la seconde (Lido delle Nazioni) où les sédiments provenant du nettoyage des plages et accumulés dans une décharge publique ont été utilisés pour restaurer la plage et la dune située en arrière.

Les résultats du suivi apparaissent positifs pour les deux interventions. Dans le premier cas le noyau interne basculant, mis à jour par la forte érosion, a contrasté efficacement l'agression des vagues en adaptant progressivement la morphologie de la plage; dans le second cas les

dunes ont maintenu des dimensions et la forme de l'intervention et, les troncs, placés pour défendre le pied de la dune, ont fonctionné comme pièges pour la capture des sables éoliens ou comme défense partielle contre l'érosion des vagues de tempête.

Il est souhaitable que les résultats de l'étude puissent contribuer à définir un programme de sauvegarde et de récupération des dunes côtières visant à favoriser la récupération de ses fonctions naturelles (réserve de sable, niche écologique, défense contre les ingressions de la mer, etc). La gestion future de la côte devrait prendre en considération que la conservation des zones dunaires n'est pas conflictuelle avec l'utilisation et l'exploitation économique du territoire côtier, mais représente au contraire une valeur supplémentaire pour ces activités et pour la mitigation du risque côtier.

4.6. Bibliographie

- AA.VV., 1997 – Atlante delle spiagge Italiane. MURST e CNR, Selca, Firenze.
- Bellotti P., Di Filippo M., Evangelista S., La Monica G.B. e Minorenti V., 2006. Apporto sedimentario dalla spiaggia alla duna nel Tenuta Presidenziale di Castelporziano e ai Cancelli (Lazio centro-meridionale). Studi Costieri, 11, 43-60.
- Idroser, 1981 – Piano progettuale per la difesa della costa emiliano-romagnola. Relazione Generale. Regione Emilia-Romagna, Bologna: 388p.
- Kukavacic M. e Pranzini E. (2003) - Beach ridges and dunes of the Arno River delta. In: Ozhan E. (ed), Proceedings of the Sixth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, 7-11 October 2003, Ravenna, Italy, 1-3: 1413-1424.
- Macchia U., Pranzini E. e Tomei P.E. (2005) - La duna costiera in Italia: la natura e il paesaggio. Felici (ed), san Giuliano Terme (Pisa), Pp. 206.
- Simeoni U. e Bondesan M., 1997. The role and responsibility of man in the evolution of the Adriatic alluvial coasts of Italy. In Briand F. and Maldonado A. (eds), Transformations and evolution of the Mediterranean coastline. Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Mediterranee (CIESM), Science Series, 18: 111-132.
- Simeoni U., Tessari U., Corbau C., 2006a – The weight of human activities on the basin-coast system: the case of Emilia-Romagna region (Northern Adriatic). Briand F. (ed), Fluxes of small and medium-size Mediterranean rivers: impact on coastal areas. Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Mediterranee (CIESM), Workshop Monographs, 30: 89-91.
- Simeoni U., Calderoni G., Tessari U. e Mazzini E. (1999) - A new application of system theory to foredunes intervention strategies. Journal of Coastal Research, 15, 2, 457-470.
- Simeoni U., Valpreda E., Schiavi C., Corbau C., 2006b – Le dune costiere dell'Emilia-Romagna. Studi Costieri, 11: 121-132.
- Simeoni U., Fontolan G., Tessari U., Corbau C., 2007 – Domains of spit evolution in the Goro area, Po Delta, Italy. Geomorphology, 86, 3-4: 332-348.
- Veggiani A. 1982 – La piccola Età glaciale e gli impaludamenti tra Conselice ed Alfonsine. Studi Romagnoli, XXXIII, Bologna: 1-19.
- Wright L.D., Chappell J., Thom B.G., Bradshaw M.P., Cowell P., 1979 – Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore system: Southern Australia. Marine Geology, 32: 105-140.

5. NAPPE PHREATIQUE

CIRSA - G. Gabbianelli, M. Antonellini, Balugani E., M. Laghi, V. Marconi, A. Minchio, P. Mollema, F. Stecchi - giovanni.gabbianelli@unibo.it; m.antonellini@unibo.it

5.1. Introduction

Les Dunes côtières, grâce à ses caractéristiques d'haute porosité et perméabilité, elles représentent un très bon, réservoir d'eau douce, très facilement rechargeable par les pluies (EEA, 1996; McLoad et al, 1999; Stuyfzand, 1989).

Vue la topographie relevée et la bonne capacité d'infiltration, l'accumulation de l'eau de pluie porte la surface phréatique au dessus du niveau de la mère avec la formation d'une lentille d'eau douce qui a une épaisseur dépendent, selon la loi de Ghyben-Herzberg (Bear et Dagan, 1964; Bear, 1972.) de l'hautesse piézométrique et du contraste de densité entre l'eau douce et l'eau salée. Cette bulle d'eau douce s'oppose à l'intrusion de l'eau de la mer dans l'aquifère côtier. (Figure 1; Bear, 1999; Scheidleger et al, 2004).

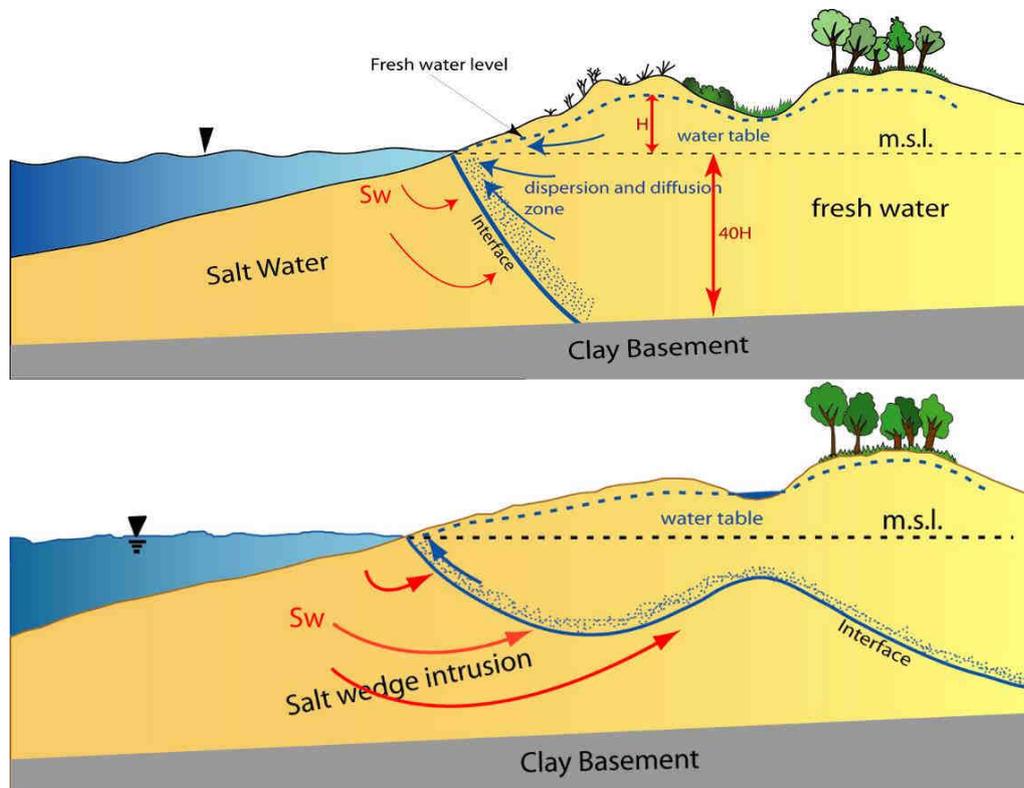


Figure 1 - Effet barrière da la bulle d'eau douce lié à la présence d'un système intact de dunes naturelles (en haut) et détérioré (en bas).

L'intrusion de l'eau salée dans les zones côtières est un processus naturel qui existe partout sur les côtes basses et sableuse ; l'eau salée, plus dense, pénètre au dessus de l'eau douce. Dans une situation naturelle elle existe une interface stable entre l'eau douce et l'eau salée décrite par la loi physique de Ghyben - Herzberg (Figure 1) qui n'est qu'une zone de mélange plus o moins étendue selon les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère et de la recharge.

En général, en termes hydrostatiques, l'interface eau douce eau salée se développe à une profondeur évaluée presque 30 fois l'hautesse du niveau piézométrique sur le niveau de la mer; Ca signifie que une diminution d'un centimètre du charge d'eau va provoquer un remontage de 30 centimètres de l'interface.

Du point de vue dynamique la position de l'interface est contrôlée par le flux d'eau douce de la terre vers la mer (approximation de Ghijben-Herzberg-Dupuit, Fetter, 2001). Le plus la recharge de l'aquifère est élevée, plus l'interface est poussée à la mer.

Une augmentation du niveau de la mer sur une côte basse, provoque un déplacement de l'interface vers la terre causé par la diminution de la surface qui contribue à la recharge et, secondairement, par la nécessité d'un drainage pour les territoires côtiers.

En plus, les recherches menées pendant le projet « Posidune - BeachMed » ont montré que le principe Ghyben-Herzberg_Dupuit (Fetter, 2001) est une excellente première approximation utile pour évaluer et modéliser les effets de l'intrusion saline dans l'aquifère, tandis que le principe de Schijf e Schonfeld (1953) représente un aide très utile pour étudier la remonte de l'eau salée dans les fleuves et les canaux.

Le long de la cote de l'Emilia Romagna, le développement progressif et constant de l'activité anthropique au cours des dernières décennies, a presque complètement déstabilisé l'équilibre hydrostatique et aujopurd'hui l'interface eau douce/salée va remonter presque partout (Mollema et al, 2005; Gabbianelli et Antonellini, 2007; Ulazzi et al, 2007; Antonellini et al, 2007, 2008).

Le problème de l'intrusion de l'eau salée dans le système hydrique côtier a occupé la scène de la chronique et il a attiré l'attention de l'opinion publique pendant les dernières étés, quand, en raison des faibles précipitations et débits fluviales, la montée de l'eau de la mer dans les branches du Pô a été mesurée dizaines de Km a l'intérieur, fait qui a causé un affaiblissement de l'activité agricole (incapacité à irriguer les cultures et les vergers) et il a porté, parfois, au blocage des centrales pour la manque d'eau douce à utiliser pour le refroidissement.

La montée de l'eau de mer le long des fleuves est seulement un aspect du problème qui est en train de changer profondément le système hydrologiques-écologiques des cotes de l'Emilia-

Romagna (et pas seulement) qui comprend les zones humides, les marais, les bois, les cordons de dunes, les fleuves et les canaux, le réseau de drainage et les aquifères phréatiques (Figure 2).

Aussi pour ce motif les petits systèmes des dunes existantes, commencent avoir des importantes fonctions pour l'adaptation et la résilience, non seulement en face des phénomènes d'érosion côtière mais aussi contre l'intrusion du sel. La hausse prévue du niveau de la mer due aux changements climatiques, combinée avec la subsidence d'origine anthropique (qui pour la cote entre Ravenna et Ferrara est mesurée en moyenne entre 5 - 8 mm/année, avec des maximums, dans quelque cas de 1.2 - 2 cm/année) contribuera à accroître encore plus ces phénomènes

Actuellement, malgré dans la plupart de l'Europe du Nord les dunes côtières sont considérée des réservoirs stratégiques pour le stockage et l'exploitation de l'eau douce (e.g. Olsthoorn et Mosch, 2002; Deltawerken Foundation, 2008), dans l'aire méditerranéenne l'importance des dunes comme siège d'aquifères utiles et comme barrières contre l'intrusion saline est très souvent négligé.

Pendant les années passées ça était justifié vue les dimensions modestes des systèmes des dunes méditerranéennes (et adriatiques en particulier) par rapport a ceux du nord Europe et, plus en général, vue la valeur de l'aquifère phréatique côtier. Cette justification a perdu, aujourd'hui, une grande partie de sa validité si on va considérer la valeur que la « ressource eau douce » a rejoint. En plus cette ressource va aujourd'hui devenir faible dans toute l'aire méditerranéenne (IPCC 2007; Marcos et Tsimplis, 2007; OcCC, 2003).

L'eau douce contenue dans les aquifères superficiels illimités a déjà une très grande importance (et en aura encore plus en futur) pour l'entretien des habitats côtiers, pour la biodiversité des zones humides, pour les caractéristiques géo-pédologiques et agronomiques des terres cultivées, etc. (Gabbianelli et al, 2007).

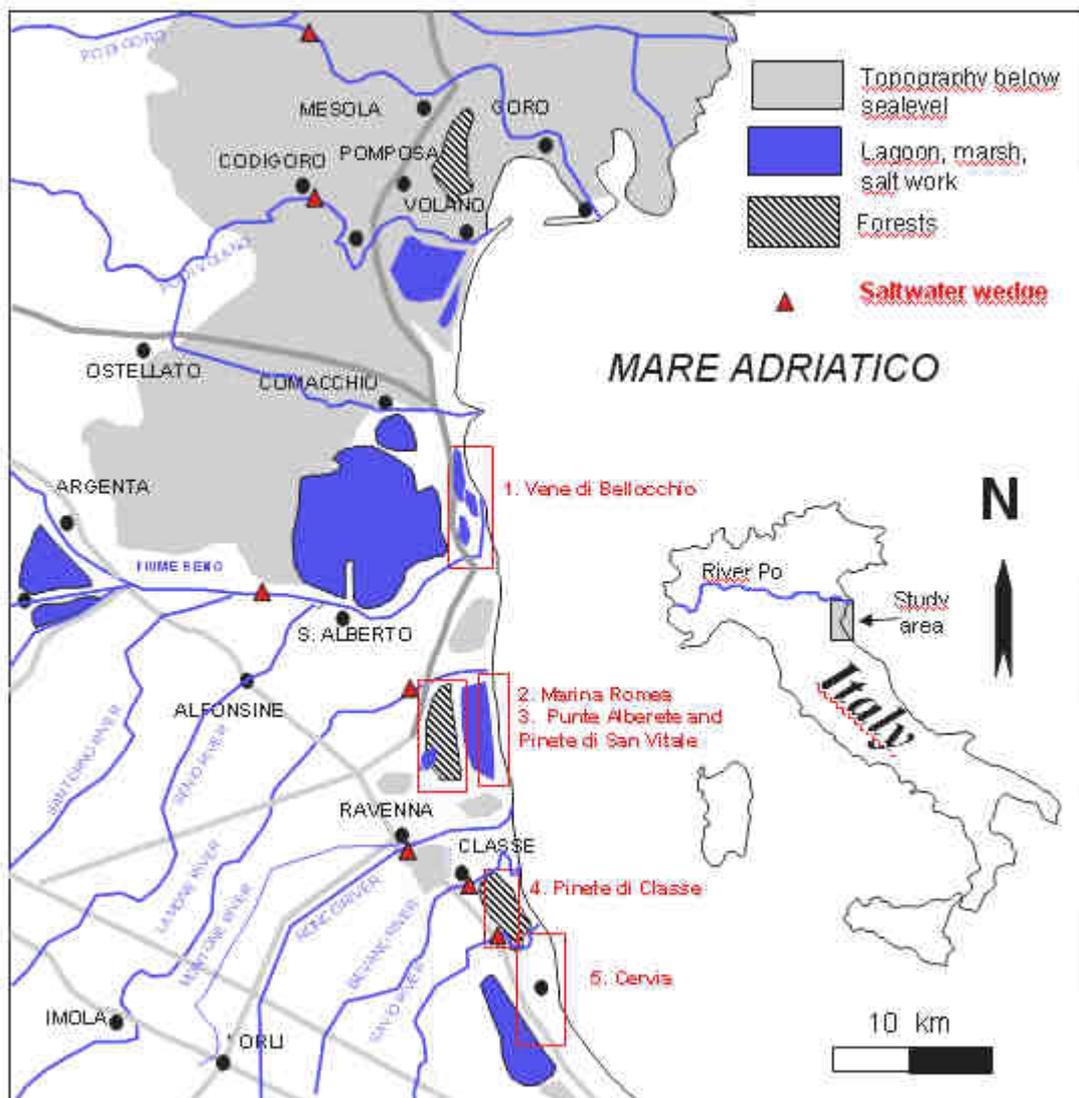


Figure 2 - Schématisation des éléments topographiques - hydrologiques superficiels de la zone côtière de Ravenna et Ferrara : a) la grande extension des terrains au dessus du niveau de la mer (en gris) ; b) extension des bassins d'eau saumâtre (presque tous les bassins sur la côte) ; c) pénétration de l'intrusion saline le long le fleuves principaux (triangles) (Antonellini et al., 2008).

L'hydrographie de la côte de l'Emilia-Romagna est aujourd'hui complètement dirigée par l'homme. Presque tous les cours d'eau ont été rectifiés pour donner des terres à l'agriculture et contrôler les inondations. Les plaines basses (au-dessous ou proche du niveau de la mer) ont été asséchées par des drainages mécaniques. Une subsidence naturelle et artificielle entraîne ces territoires en causant des problèmes à la circulation des cours d'eau: les drainages doivent être toujours augmentés pour maintenir les terres au-dessus du niveau phréatique et assurer l'exploitation agricole des terrains.

Le réservoir phréatique de la côte est cunéiforme et réside dans les dépôts sableux des dunes et plages anciennes et récentes. Ce réservoir est caractérisé par une porosité et une perméabilité très élevées (0,15-0,35 de porosité et 1-70 m/g de conductivité hydraulique) d'après Giambastiani et al (2007). Malheureusement, la proximité de la mer, la haute salinité de certaines eaux intérieures (ex. Valli di Comacchio, Vene di Ancona-Bellocchio, Piailasse) et les faibles débits des fleuves et des rivières (Figure 2) constituent les facteurs de vulnérabilité de ce réservoir à la pollution par immixtion d'eaux salines.

Ces remarques ont été bien considérées aussi dans les indications de l'Agence Européenne de l'Environnement ; cette institution a mis en évidence comme l'intrusion d'eaux salées, causée par l'exploitation excessive des nappes phréatiques est un des principaux risques pour les réservoirs côtiers (EEA, 1996; Scheidleger et al, 2004). L'Italie a été indiquée entre les pays où ce problème est le plus courant et sévère.

Dans le programme de recherche BeachMed "POSIDuNE - Mesure 3.4: Systèmes de défense naturels" l'attention a été concentrée sur la caractérisation hydrologique et hydrogéologique des dunes résiduelles de la côte de l'Emilia-Romagna, qui constituent des réservoirs potentiels d'eau douce et des barrières pour l'intrusion de l'eau marine (Région EMR, 2008). Dans ce projet on a aussi essayé d'évaluer comment les diverses utilisations du sol et la typologie de végétation influent sur la qualité de l'eau de l'aquifère superficiel.

5.2. Description du site d'étude

En prélude à ce projet des dunes sableuses résiduelles de la côte ont été localisées, surveillées et étudiées. Les recherches programmées ont été complétées dans trois de ces sites avec des différentes fonctions et valeurs territoriales (Figure 3). Dans les autres sites, on n'a pas conduit les analyses à cause de problèmes logistiques, de l'action des vandales sur les piézomètres qui ont empêchés la continuité des séries des données, et à cause de l'absence de variations anthropiques.

Deux entre les sites étudiés (Milano Marittima et Marina Romea) sont caractérisés par une élevée anthropisation touristique-balnéaire tandis que le troisième système des dunes, proche à l'embouchure du fleuve Bevano, se développe dans une zone peu urbanisée et avec une remarquable valeur naturaliste (Zone SIC/ZPS, Parco del Delta RER).

Dans ce site, pendant les premiers mois de l'an 2006, dans le cadre d'un projet de mise en sécurité hydraulique du fleuve Bevano, l'embouchure a été déviée et un long segment de dune artificielle (700 m) a été construit. Cette nouvelle situation, on a permis de vérifier la formation et évaluer la qualité d'une nappe phréatique douce au dessous de la dune artificielle, et ensuite

on a permis de faire des comparaisons sur l'état de l'eau douce par rapport à l'adjacent système des dunes naturelles.



Figure 3 - Localisation des trois sites d'étude le long la côte de Ravenna.

Dans ces zones la morphologie de la côte est caractérisée par la présence de plages basses et sableux avec une épaisseur limitée (5-10 m), qui résident sur des anciens dépôts argileux-limoneux de plaine alluviale, de marais ou marins (Amorosi et al, 1999, 2002, 2004). Les dépôts de sable sont typiquement cunéiformes et ils vont à disparaître vers le fond marin à une profondeur de 5-7 m (Figure 4). En face les fonds marins s'approfondissent graduellement et doucement et ils rejoignent 20 m de profondeur à 20 Km de la côte.

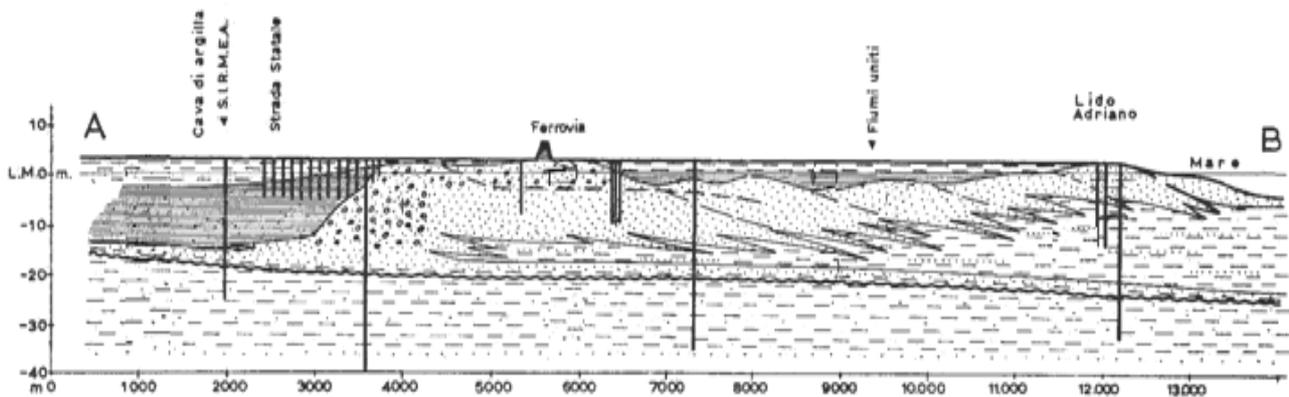


Figure 4 - Représentation schématique de la distribution des cordons dunaux actuels - récents qui caractérisent la zone côtière de Ravenna (Angeli, 1967; modif).

Les zones derrière la ligne de rivage ("*backshore*") montrent une grande variabilité géomorphologique: a partir du système des dunes qui le borde vers la mer, qui a les deux fonctions de protéger les terres le plus internes par les tempêtes et de constituer un réservoir naturel de sable contre l'érosion causée par les vagues pendant l'hiver.

Dans la région est en fait possible d'identifier une série d'anciennes cordons des dunes, composé par sable de plage et sable de dune, qui représentent la "trace" sédimentaire et paléomorphologique des nombreuses lignes de côte qui se sont formées pendant le processus de modification de la ligne de rivage qui a concerné ces zones pendant l'holocène (Figure 5; Ciabatti, 1968; Bondesan, 1988; Regione EMR, 2005).

Du point de vue de l'altimétrie, la plus grande partie de la zone à l'arrière de la plage, présente des hauteurs en général très proche ou au dessous du niveau moyen de la mer (Figure 6). Très diffusée, donc, la présence d'aires au dessous de la mer, en général occupée par des zones humides saumâtres. Presque disparus les bassins naturels d'eau douce, très diffusés après l'achèvement de la restauration mécanique des terres. Seulement la zone de transition et les cordons dunaux résiduels (anciens et récents) sont caractérisés par des hauteurs supérieures à 1 mètre (de 1 à 5 mètres maximum) et ils représentent la seule défense naturelle contre l'intrusion des eaux salées.

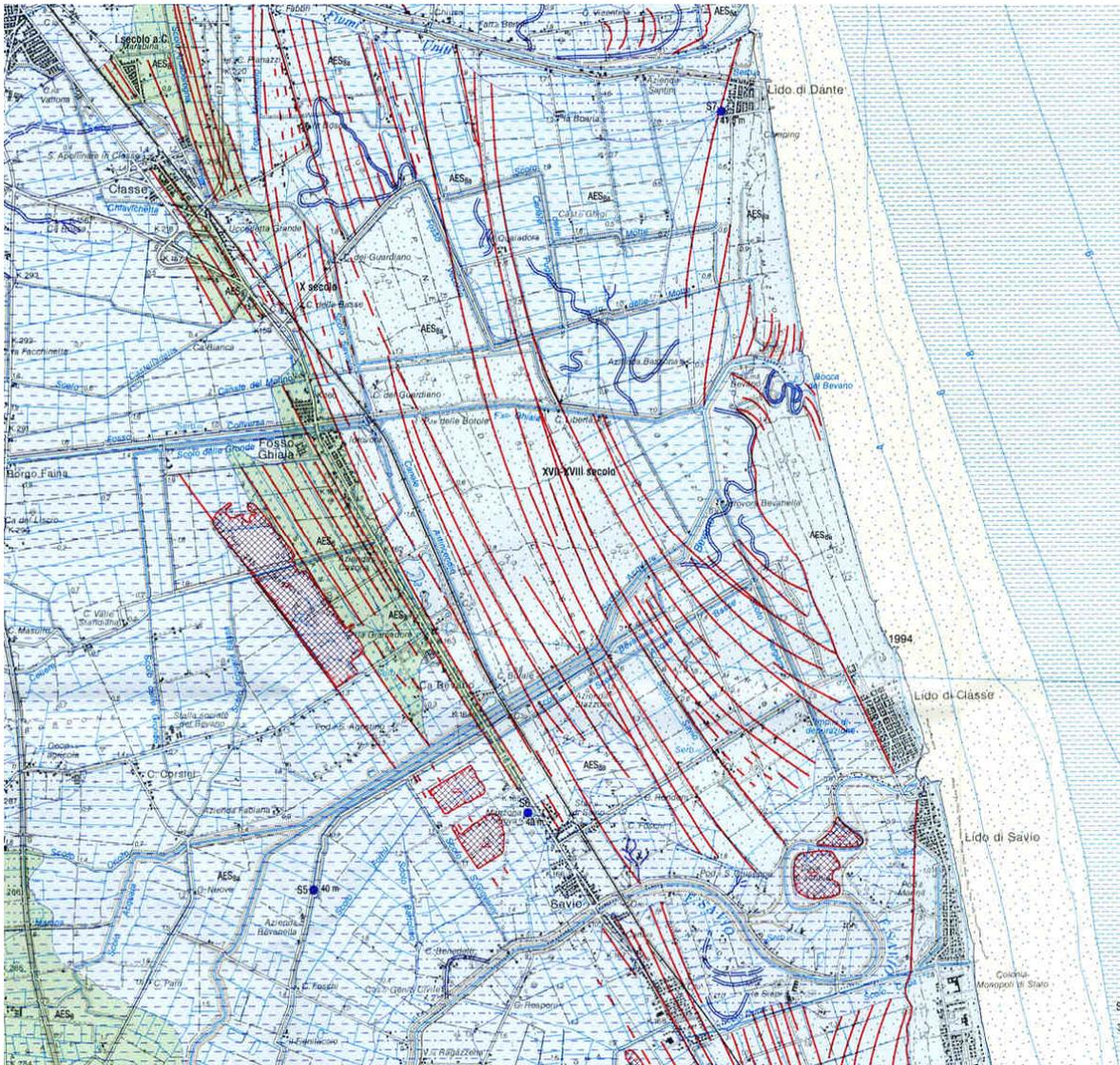


Figure 5 - Distribution des cordons des dunes (en rouge) développés dans l'aire de l'embouchure du torrent Bevano pendant les dernières 4 - 5 siècles (Regione EMR, 2005).

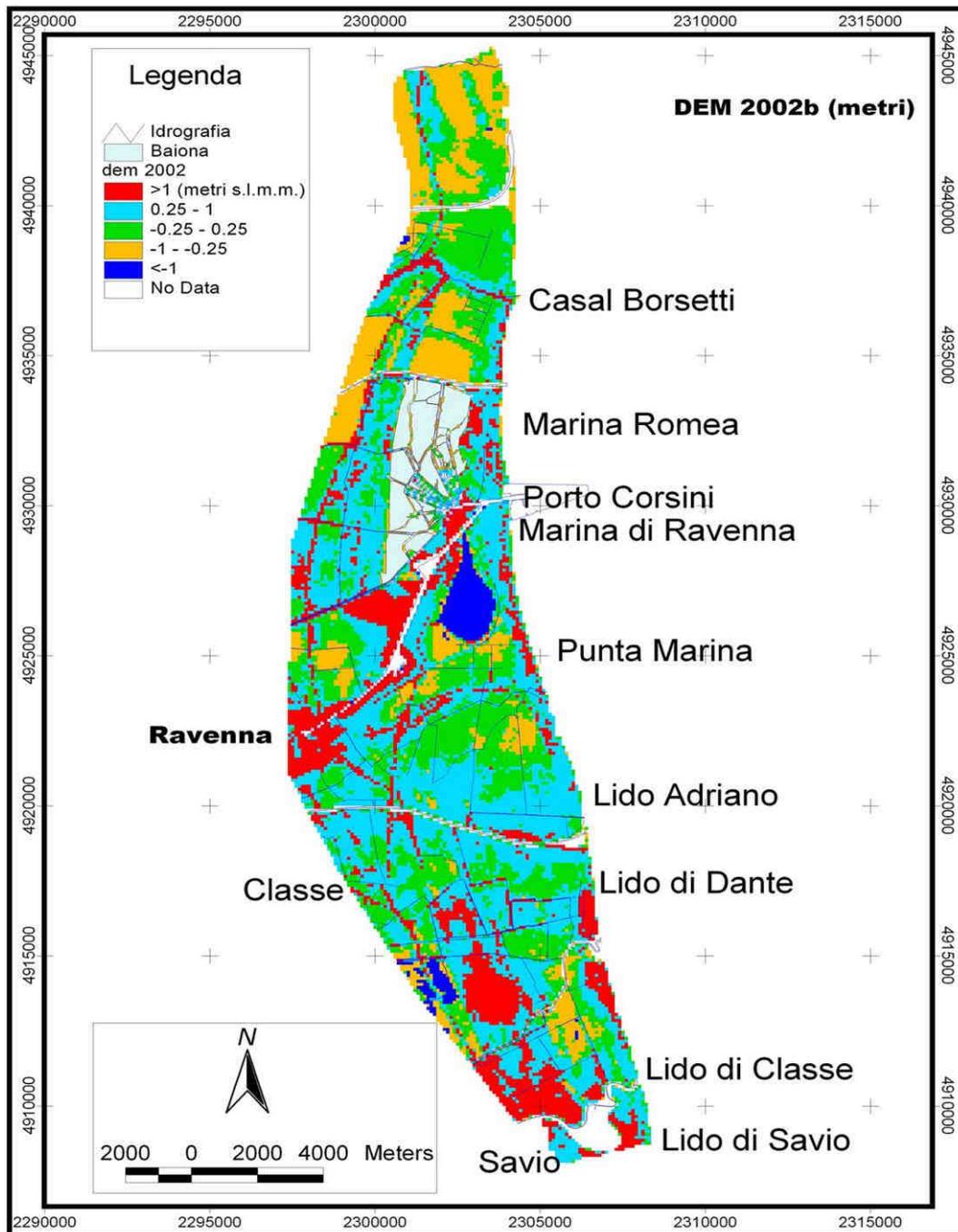


Figure 6 - Schème de l'assiette altimétrique de la zone côtière de Ravenna en 2002.

5.3. Matériels et Méthodes

Les caractéristiques physiques et hydrogéologiques des sites d'étude ont été définis sur la base des actions techniques suivantes :

- A. Définition morphologique de chaque cordonne des dunes actuelles et des aires limitrophes par mis de avec tachéo mètre classique et relevés semestriels DGPS-RTK (Figure 7);

B. Mise en place (en utilisant un système de perforation manuelle "Eijkelkamp" <http://www.eijkelkamp.com/Portals/2/Eijkelkamp/Files/P1-01e.pdf>) et monitoring mensuel d'un réseau piézométrique par chaque site d'étude (profondeur de 4 à 7 m pour un total de 23 stations). Le niveaux piézométriques et les caractéristiques physiques-chimiques de l'eau (température, conductivité) ont été mesurés en continu avec sondes "Mettler Toledo" et/ou "AquaTroll200@" (http://it.mt.com/mt/filters/prodotti-applicazioni_analitica-processo/Process_0x000010083f6f05f140006005.jsp; <http://www.in-situ.com/In-Situ/Products/AquaTROLL/AquaTROLL200.html>);

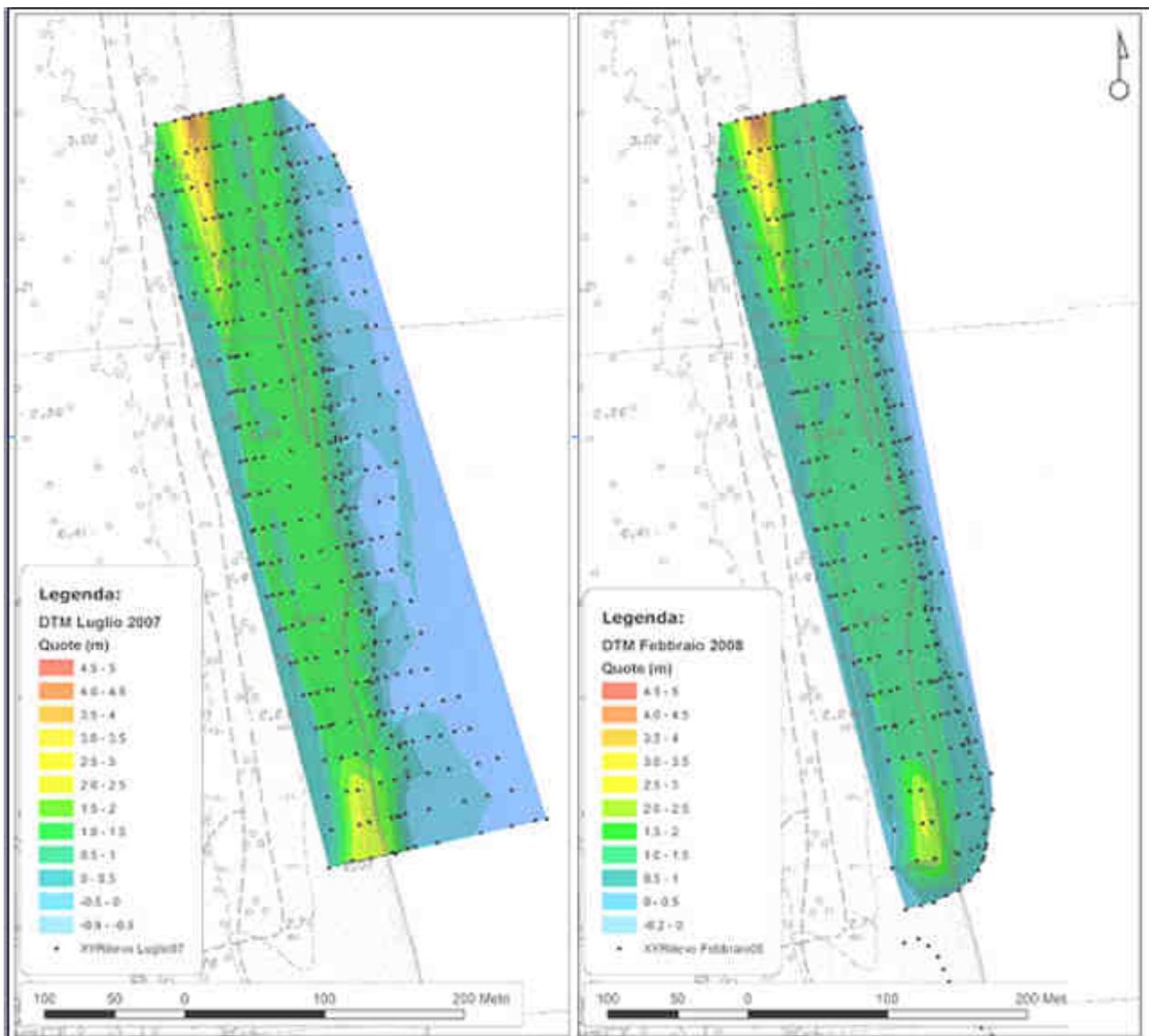


Figure 7 - Exemples de restitution des données topographiques intégrées DGPS et levés avec tachéomètre classique.

- C. Relevés géophysiques verticaux avec système géoelectrique quadripolaire Wenner. Les données obtenues ont été élaborées avec un software pur l'inversion Vertical Electric Sounding (VES; http://larisa_pozd.tripod.com/ves/ves.htm);
- D. Modélisation analytique fondée sur le modèle de Ghijben - Herzberg - Dupuit et sur les équations de dispersion hydrodynamique en condition de filtration verticale d'eau salée pour une évaluation préliminaire des causes et de l'état de l'intrusion saline dans l'aquifère (Mollema et al, 2008).

En particulier ces modélisations ont été calculé par:

- SUTRA (<http://water.usgs.gov/nrp/qwsoftware/sutra/sutra.html>);
- MODDENSE3D (<http://water.usgs.gov/software/MODDENSE/>);
- MODBUD (Marconi et al, 2008)
- SEAWAT (<http://water.usgs.gov/ogw/seawat/>)

Pour vérifier et approfondir la connaissance du phénomène de l'intrusion saline en 3 dimensions, avec une attention spéciale à la présence de canaux de drainage, aux embouchures fluviales, à la topographie des dunes, à leur destruction et reconstruction.

Toutes les données ont été archivées dans un système S.I.G. (Système Informatif Géographique) avec référence géographique et restitution cartographique selon le système UTM. En particulier on a adopté le software commercial ArcGIS® d'ESRI®, composé par plusieurs modules. La variante choisie (9.0), entre les plus diffuses au niveau des institutions locales et des administrations publiques italiennes, comprend les instruments nécessaires pour la création du donnée géographique et son suivante manipulation, gestion, intégration, analyse et restitution cartographique - thématique. En pratique il y a deux classes de produits, une destinée a la création et à la manipulation du données (ArcInfo®, ArcEditor® e ArcView®) et une destinée à leur visualisation et consultation (ArcPad®, ArcExplorer®, ecc.). Toutes les données sont référés au système international UTM avec Datum ED50 (WGS84 comme deuxième référence et Roma40/ Gauss- Boaga comme troisième) et coordonnées géographiques et kilométriques référée au fuseau 32 Zone T. Pour respecter la cohérence et l'utilisation immédiate aussi en rapport au système utilisé par le SIT (Système Informatif

Territorial) de la Regione Emilia Romagna, Province et Commune de Ravenna, a la coordonnée kilométrique Nord est possible soustraire la valeur constant de « 4000000 de m ».

5.4. Résultats et discussion

L'ensemble des données acquises jusqu' à maintenant dans le cadre du projet, confirment la présence d'une nappe d'eau douce a l'intérieur des dunes étudiées. Pendant tout l'année, la surface de la nappe phréatique se retrouve de quelque centimètre à quelque décimètre au dessus du niveau de la mer (+0.05 e +0.35 m). La présence de la nappe est liée aux caractéristiques morphologiques de chaque cordon des dunes, à la pluie, aux temps de recharge et à la proximité de la mer. Ces conditions sont aussi contrôlées par le différent système hydrologique (présence de canaux, drainage superficiel, étranges a l'arrière des dunes) et par les différentes conditions de marée. De suite ils sont reportés les principaux résultats des observations et des reliefs que, dans les trois dernières années, ont concerné les trois d'étude.

5.4.1. Marina Romea

La situation de Marina Romea est complexe (fig. 7), parce que le cordon dunau a été largement fragmenté et détaché pour laisser la place aux établissements touristiques, tandis que, au Nord, l'embouchure du fleuve Lamone et le petit port touristique annexé, favorisent l'intrusion de l'eau salée dans l'aquifère superficiel. La forêt de pins derrière le cordons dunaux et son système de drainage sont la cause de l'abaissement du niveau de la nappe phréatique.

Dans le site de Marina Romea, le monitoring et l'analyse numérique (SEAWAT) montrent une surface phréatique avec une topographie plus basse par rapport à celle observée dans les autres sites (Figure 8 et Figure 9). Ces données doivent, en tout cas, être vérifiés dans la pinède ou les reliefs GPS seront ultérieurement précisés. Avec bonne probabilité l'abaissement est causé par la fragmentation de la dune, par la présence du canal de drainage de la pinède e des arbres même.

Dans le cas de Marina Romea il faut aussi souligner que l'assiette topographique-morphologique et l'usage du sol son très articulés. Les dunes récentes, par exemple, sont aujourd'hui très fragmentées, altérées et coupées à cause de la présence des établissements touristiques. Au contraire, les dunes qu'on trouve à l'arrière, dans la forêt de pins, représentent un haut topographique très utile à la formation d'une nappe d'eau douce. On n'a pas encore évalué ce phénomène du point de vue quantitatif, mais ce sera

l'objectif d'un projet biennal, activé et financé par le commune de Ravenna pendant les dernières mois, qui va constituer la suite (soit technique - instrumental soit scientifique soit de modélisation) de ce que on a réalise pendant le projet BeachMed.

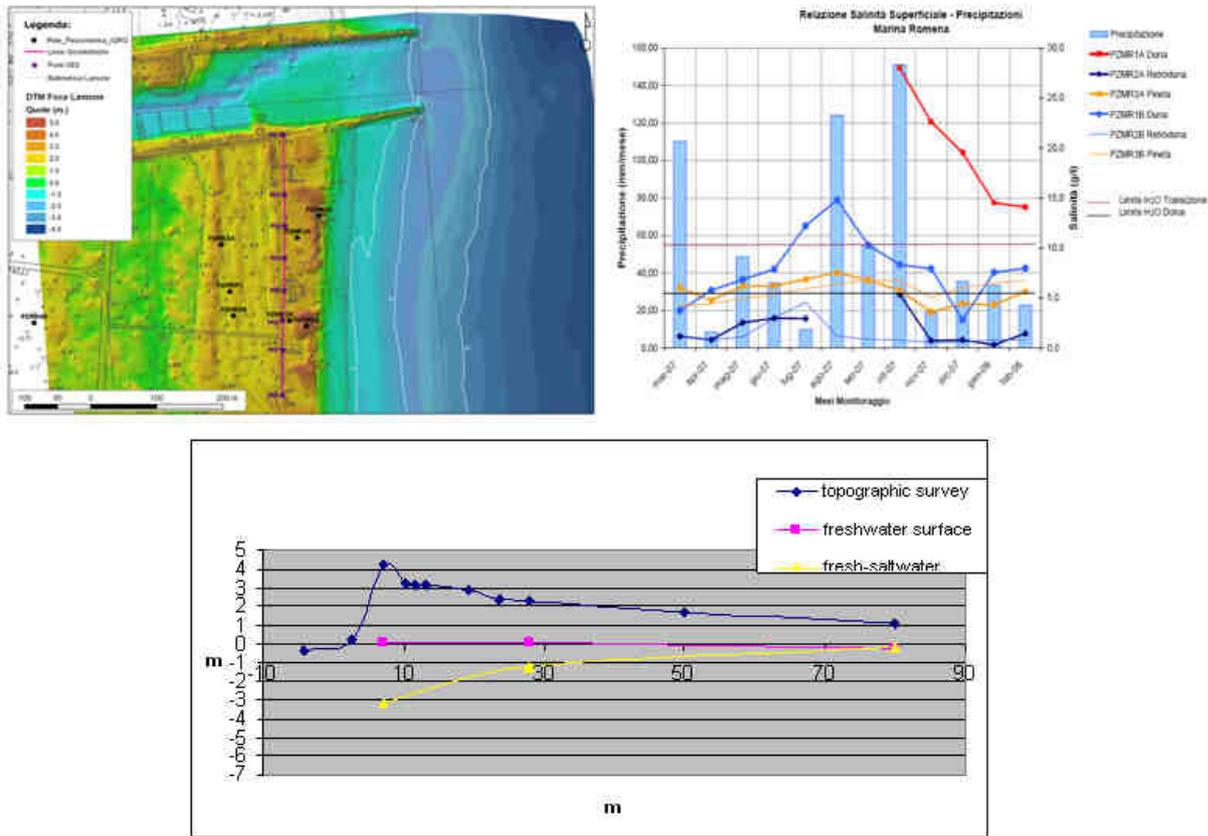


Figure 8 - Site de Marina Romea. Topographie dérivé par le relief LIDAR (en haut à gauche). Salinité superficielle mesurée mensuellement dans les piézomètres, rapporté avec la pluie (en haut à droite). Profil topographique est - ouest transversal à la dune comparé avec le profil de la nappe phréatique et ce de l'interface eau douce-salée calculé en utilisant le principe de Ghijben-Herzberg (en bas).

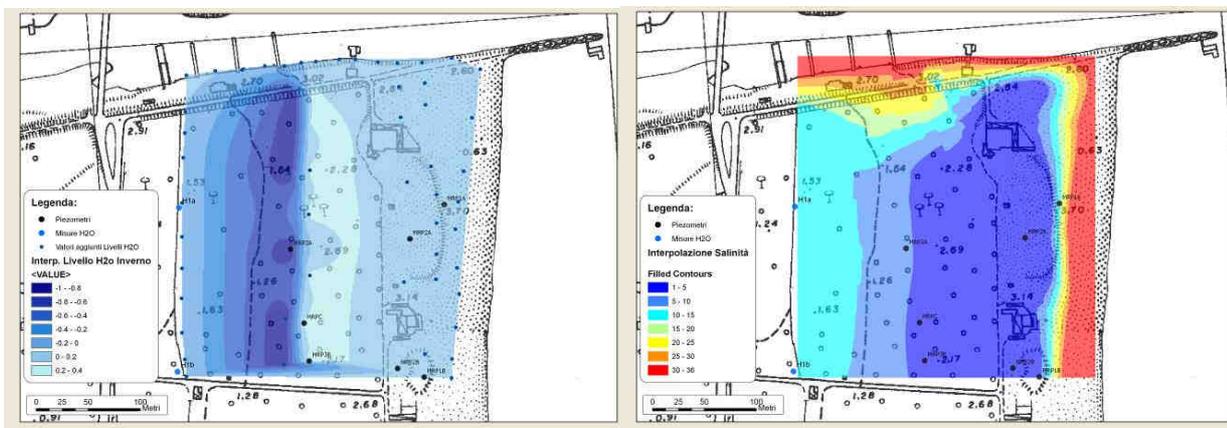


Figure 9 - Site de Marina Romea. Elévation moyenne de la nappe phréatique pendant le monitoring (à gauche). Salinité superficielle moyenne de la nappe (a droite).

La modélisation numérique menée jusqu'ici a montré que la position actuelle de l'interface eau douce-salée n'est pas encore en équilibre, en raison des changements relativement récent du cadre territorial et en raison du fait que le réseau des fleuves et canaux détermine la grand partie du flux (Giambastiani et al, 2007). Les modèles numériques 3D (SEAWAT, Guo et Langevin, 2002) mettent en évidence la possibilité de contraster l'intrusion saline avec des opportunes interventions de recharge artificielle, de reconstruction des dunes côtières et de changement de la végétation sur la côte. Les modèles indiquent que l'effet de la topographie, associé à une vite recharge de la dune, porte à la formation d'une couche d'eau douce presque 3 mètres épais (Figure 10; Mollema et al, 2008). Il manque à être définie l'influence de la bouche du fleuve Lamone sur l'intrusion saline dans l'aquifère.

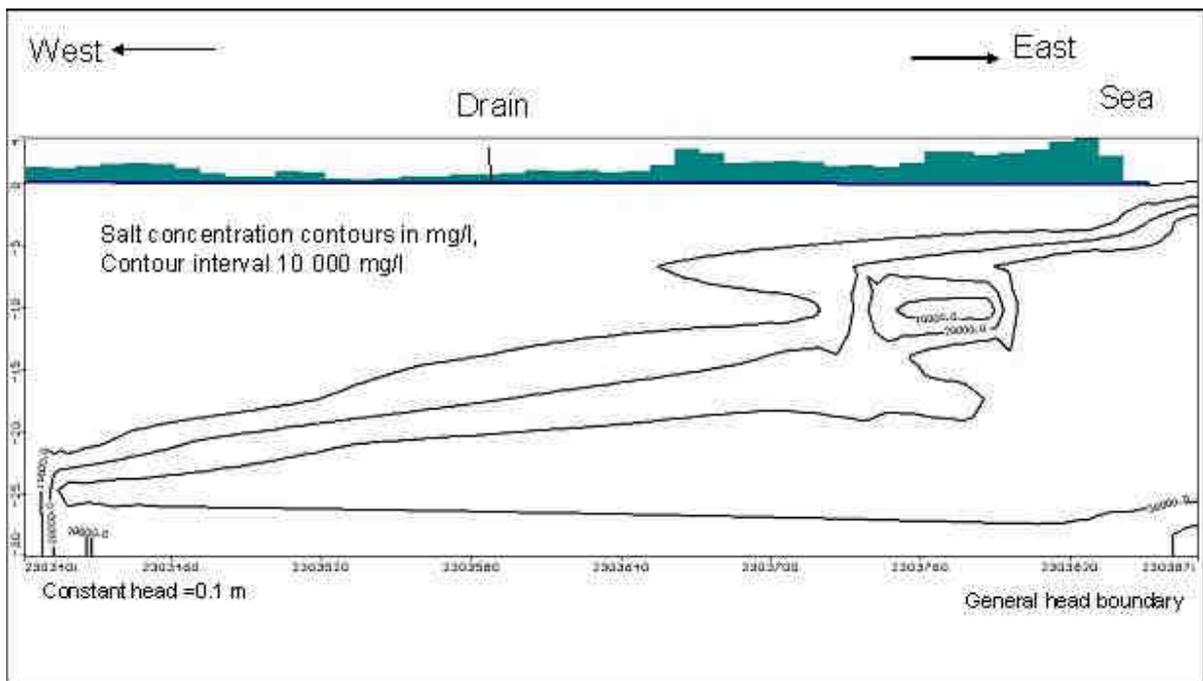


Figure 10 - Site de Marina Romea. Contours de la concentration saline en présence d'un système de drainage 22000 jour après le début de la simulation.

5.4.2. Foce Bevano e Lido di Classe

Le site de l'embouchure du Fleuve Bevano (Foce Bevano) (Figure 11) et Lido di Classe a été choisi pour les raisons suivantes :

- 1) Évaluer la reconstitution d'une nappe d'eau douce dans la dune artificielle construite pendant les travaux pour la modification de l'embouchure du fleuve Bevano.
- 2) Caractériser la nappe phréatique sur la cote où les dunes sont encore à un état naturel.
- 3) Evaluer l'effet de la pinède sur la qualité des eaux de la nappe.

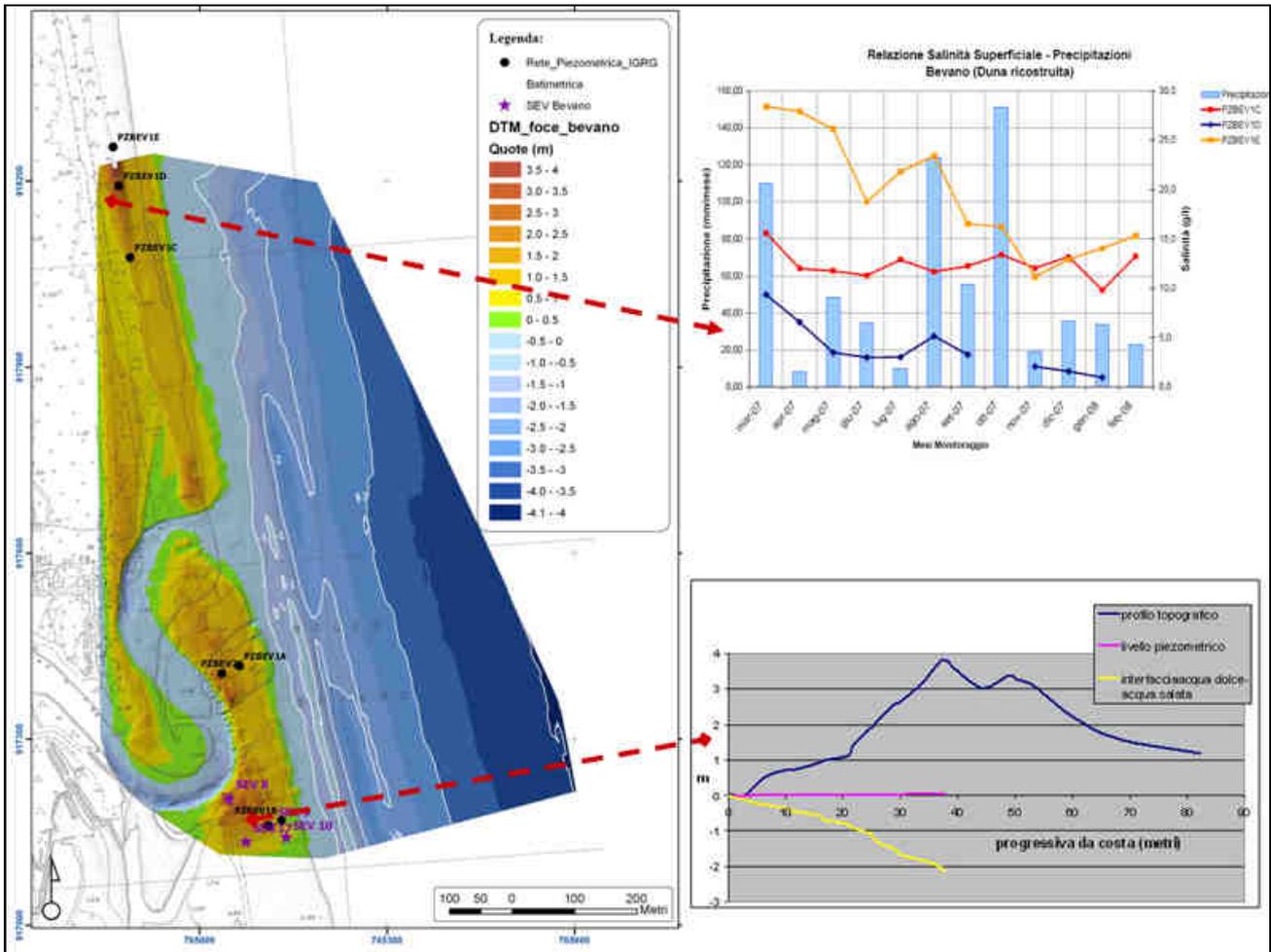


Figure 11 - Site de Foce Bevano. Topographie dérivé par le relief LIDAR (en haut à gauche). Salinité superficielle mesurée mensuellement dans les piézomètres, rapporté avec la pluie (en haut à droite). Profil topographique est - ouest transversal à la dune comparé avec le profil de la nappe phréatique et ce de l'interface eau douce-salée calculé en utilisant le principe de Ghijben-Herzberg (en bas).

Pour mieux comprendre les changements du niveau des eaux souterraines dans les dunes et dans les adjacentes forêts de pins on a utilisé le modèle MODBUD (Marconi et al, 2008) qui calcule l'infiltration potentielle et la variation suivante du niveau de la nappe en relation à des paramètres hydro-climatologiques (température, précipitations, ET), pétrophisiques

(porosité, lithologie, présence d'eau dans le sol) et de végétation (type de vegetation, profondeur des racines). Le modèle a été renversé pour obtenir les niveaux de la nappe mesurés pendant le monitoring des piézomètres. Cette opération nous a permis d'obtenir des informations sur la porosité de l'aquifère, sur le développement des racines des arbres dans la pinède et sur la corrélation avec les paramètres hydro-climatiques (Figure 12).

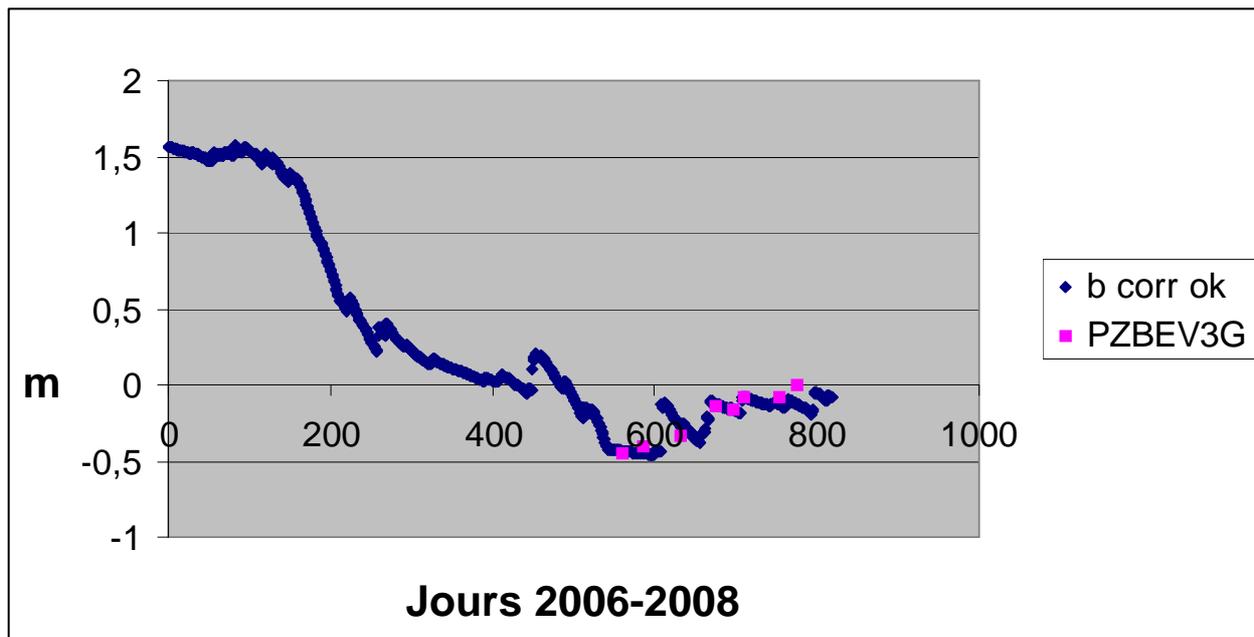


Figure 12 - Site de Foce Bevano. Niveau modélisé de la nappe (en bleu) et mesuré (période 2006 - 2008) dans le piézomètre PZBEV3G (pois rouges) dans la pinède de Lido di Classe.

Le modèle montre que la porosité de l'aquifère varie entre 0,28 et 0,35. Le niveau de la nappe est directement lié à la pluie, tandis que la différence entre la calculé et la mensuration va augmenter avec la proximité a la côte (Figure 13). Ça peut être sans doute causé par l'effet de la marée et des vagues sur le niveau de la nappe qui son mesurables aussi dans quelque dizaine de mètres de la ligne des hautes marées maximales.

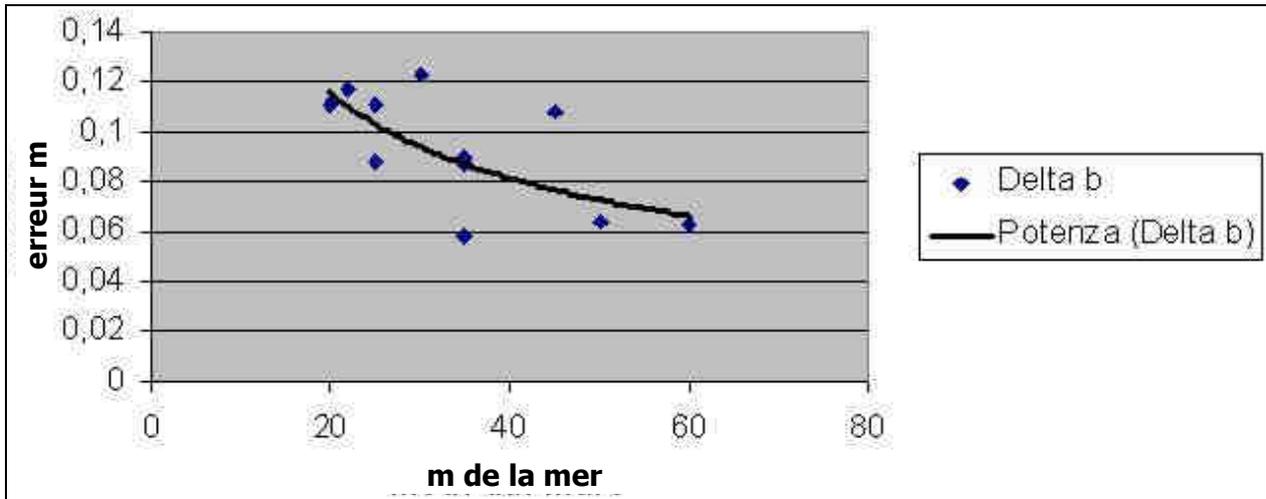


Figure 13 - Site de Foce Bevano. Différence entre la valeur mesuré et la valeur calculé par rapport à la distance de la mer.

Un segment de dune artificielle a été construit au Nord de l'actuelle embouchure du Bevano.

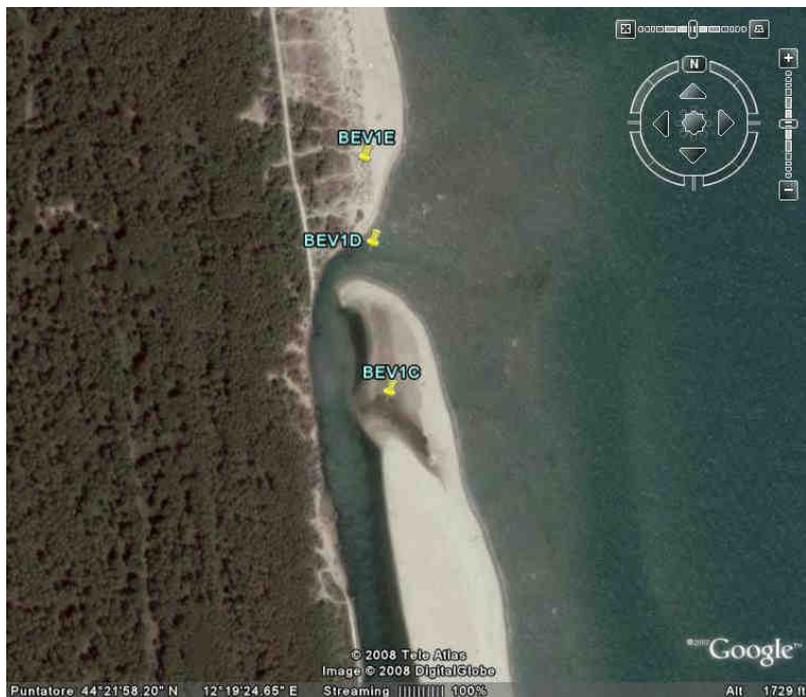


Figure 14 - Site de Foce Bevano. Position des piézomètres.

Ici 3 piézomètres (Figure 14) ont été positionnés. En Figure 15 et en Figure 16 les variations du niveau de la nappe et du TDS sont montrées.

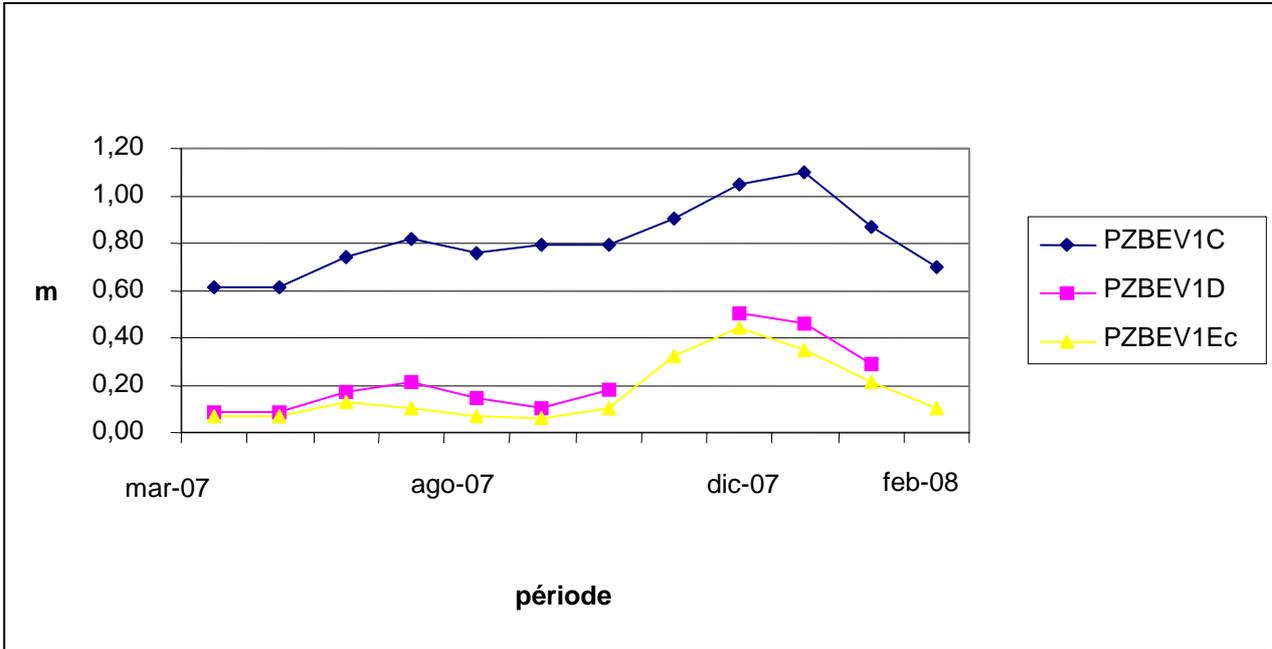


Figure 15 - Site de Foce Bevano. Variation de la nappe dans les piézomètres sur la dune artificielle à partir de sa construction. Le piézomètre PZBEV1C est déplacé de + 0.5 m en élévation.

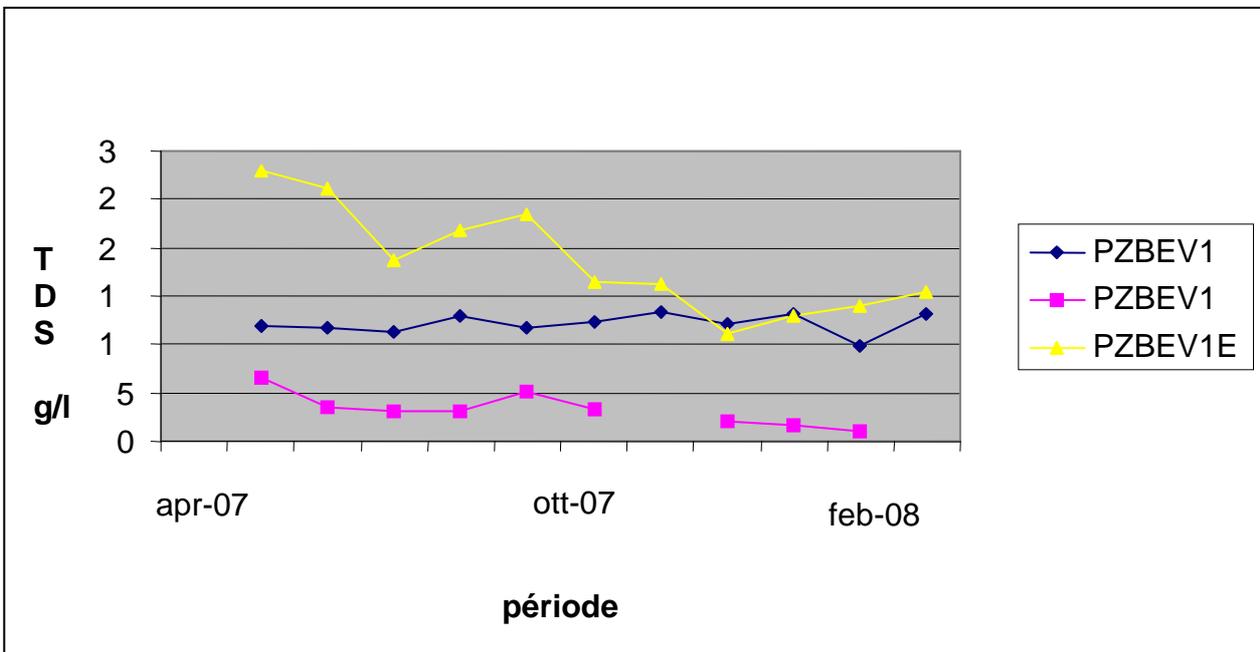


Figure 16 - Site de Foce Bevano. Variation du TDS dans les piézomètres sur la dune artificielle à partir de sa construction.

Les valeurs des TDS, utilisé comme un indicateur de la salinité, montrent une nette tendance d'une reprise progressive d'une nappe d'eau douce, flottant au dessus de l'eau salée.

Dans la dune au Sud de l'embochure du fleuve Bevano, les données montrent que à l'arrière des dunes on a un approfondissement très marqué de l'interface eau douce/salée.

Dans le site de Foce Bevano on a eu une première mesure et évaluation des possibles effets de la marée sur la nappe phréatique. Il est connu, en effet, que les variations du niveau de la mer ont un impact significatif dans ce domaine, vue que les fluctuations de la marée sont une des principales forces à coté de la ligne de rivage : pour chaque variation du niveau de la mer, on observe un changement semblable du niveau phréatique de l'aquifère (Mao et al, 2006; Nielsen, 1990). Selon les propriétés des sédiments la vague de marée va être modifié en taille et phase selon la route que va parcourir à l'intérieur de l'aquifère. Dans ce cas, caractérisé par un système micro-tidale, les sédiments poreux par laquelle la vague se transmette, sont des sédiments sableux bien classés caractérisés par une haute conductivité hydraulique (10-50 m/jour). Les mesures effectuées à ce jour montrent des fluctuations élevées jusqu'à 10-15 cm du niveau phréatique observé un piézomètre positionné 25/30 m de la mer, tandis que dans un deuxième piézomètre, positionné environ 50/60 m de la ligne du rivage les fluctuations ont une taille au dessous de 1 cm (Balugani, 2008).

5.4.3. Milano Marittima

Dans le site de Milano Marittima 3 piézomètres ont été placés sur la dune de Colonia Varese (Figure 17).

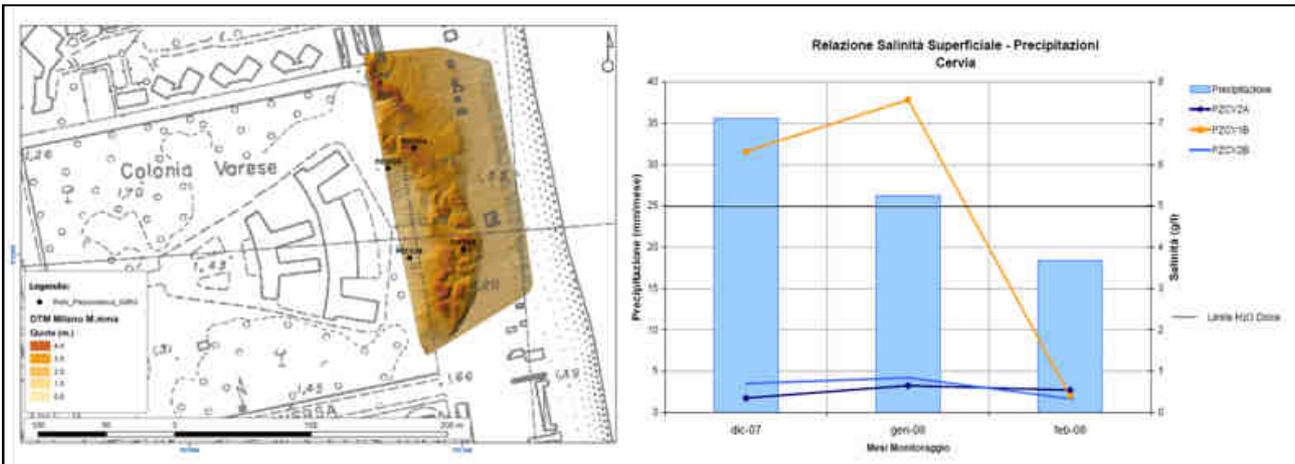


Figure 17 - Site de Milano Marittima. Topographie dérivée par le relief LIDAR (à gauche). Salinité superficielle mesurée dans les piézomètres, rapportée avec la pluie (à droite).

La situation de la nappe phréatique dans les dunes de Colonia Varese est semblable à celle des sites de Marina Romea et Foce Bevano. Le piézomètre le plus avancé vers la mer (PZCBV1B) sur la crête de la dune montre la salinité la plus haute, car il est intéressé, probablement, par les fluctuations de la marée et des vagues. Les piézomètres à l'arrière de la dune montrent une nappe phréatique complètement douce comme observée dans les autres sites. Les niveaux de l'eau oscillent de quelques centimètres à certains décimètres au dessus du niveau de la mer. Les données de salinité, sur les dernières années, ont concerné les trois d'étude.

5.5. Considérations finales

La connaissance des processus de l'intrusion d'eau salée dans les aquifères côtiers et la présence d'eau douce résiduelle dans les dunes côtières a été développée à partir de nombreux reliefs sur le terrain, et de l'utilisation de modèles analytiques et numériques. Dans cette première phase les sites d'étude ont été choisis pour bien définir les problèmes, pour avoir la possibilité de surveillance, et pour étudier les mesures d'atténuation possibles.

Dans tous les cordons examinés on a constaté la présence d'une nappe d'eau douce en particulier dans la région à l'arrière des dunes qui est particulièrement intègre et où les cordons sont constants et la végétation n'inclut pas les grands arbres (les pins par exemple).

Les résultats obtenus montrent clairement l'importance des ressources d'eau douce disponible dans les eaux souterraines côtières superficielles et leur rôle en contraste avec les phénomènes de salinisation. Ces aspects sont toujours plus importants au niveau de la gestion intégrée des zones côtières et dans le domaine de l'adaptation par rapport aux changements climatiques

(IPCC 2007). Tout ca non seulement pour ce qui concerne la conservation des habitats mais aussi pour l'entretien de l'efficacité agricole et des ressources du sol.

En particulier, les tests effectués ont permis de définir le potentiel, la qualité et les principales causes de la salinisation des eaux côtières. Ce phénomène, dans la zone d'investigation, est détectable jusqu'à quelque kilomètre à l'intérieur et il intéresse presque toutes les embouchures fluviales.

Cette étude offre un point de départ pour une caractérisation plus précise de la zone fournit des indications utiles pour les partenaires du projet BeachMed.

5.6. Bibliographie

- Amorosi A., Colalongo M.L., Pasini G., Preti D. (1999) - Sedimentary response to Late Quaternary sea-level changes in the Romagna coastal plain (northern Italy). *Sedimentology*, 46: 99-121.
- Amorosi A., Asioli A., Bondesan M., Cibi U., Colalongo M.L., Correggiari A., Pasini G., Preti D., Roveri M., Sarti G., Severi P., Stefani M., Trincardi F., Vaiani S.C., Vincenzi S. (2002) - Dalle conoidi pedemontane al mare aperto: architettura stratigrafica tardo-quadernaria dell'Adriatico settentrionale e della pianura costiera emiliano-romagnola. Sito internet: <http://www.regione.emilia-romagna.it/geologia/georer4.htm>
- Amorosi A., Colalongo M.L., Fiorini F., Fusco F., Pasini G., Sarti G., Vaiani S.C. (2004) - Paleogeographic and paleoclimatic evolution of the Po plain from 150-ky core records, *Global and Planetary Change*, 40: 55-78
- Angeli A. (1967) - Notizie sulla granulometria dei sedimenti litorali fra Pesaro e la Foce del Savio con riferimento al problema dell'erosione marina. Camera di commercio, industria, artigianato e agricoltura, 3-8, Forlì.
- Antonellini M., Minchio A., Gabbianelli G. (2007) - L'Intrusione salina negli acquiferi costieri emiliano-romagnoli. Atti Terzo Forum Nazionale sulla Pianificazione e Tutela del Territorio Costiero. Relazioni ad Invito. Volume 127 Collana "Ambiente e Territorio", pp. 8 - 14, Maggioli Ed.
- Antonellini M., Mollema P., Giambastiani B., Banzola E., Bishop K., Caruso L., Minchio A., Pellegrini L., Sabia M., Ulazzi E., Gabbianelli G. (2008) - Salt water intrusion in the coastal aquifer of the southern Po-plain, Italy. *Hydrogeology Journal*, <http://www.springerlink.com/content/j51m135217082117/>
- Balugani E. (2008) - Caratterizzazione idrogeologica del sistema di dune tra foce Bevano e Lido di Classe. Tesi di Laurea, Corso di Laurea in Sc. Ambientali, Università di Bologna- Campus di Ravenna.
- Bear J., Dagan G. (2004) - Moving interface in coastal aquifers. *J. Hydraul., ASCE* 90: 193-216.
- Bear J. (1972) - *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Elsevier, New York.
- Bear J., Cheng A.H.D., Sorek S., Ouazar D., Herrera I. (1999) - *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers - Concepts, Methods and Practices, in Theory and Application of Transport in Porous Media*, edited by J. Bear, pp. 625, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Bondesan M. (1988) - Aspetti e problemi geomorfologici del territorio deltizio padano: 2a Escursione - Delta del Po. In: Bondesan M., Elmi C., Nesci O., Dal Cin R. et Veggiani A. (a cura di), Guida alle escursioni. Gruppo Nazionale di Geografia Fisica e Geomorfologia, riunione annuale: Riccione - Delta del Po, 21-24 giugno 1988, 31-58.

- Ciabatti M. (1968) - Ricerche sull'evoluzione del Delta Padano. *Giornale di Geologia*, XXXIV: 318- 410.
- Deltawerken Foundation (2008). The Holland Deltacommission & works <http://www.deltawerken.com/English/10.html?setlanguage=en>
- EEA (1996) - Water resources problems in Southern Europe Document Actions en Topic report No 15/199, Bruxelles.
- Fetter CW (2001) - Applied hydrogeology, 4th edn. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Gabbianelli G., Antonellini M. (2007) - Scenari di adattamento ai Cambiamenti Climatici negli usi della risorsa idrica in ambito costiero. Atti Conferenza "Cambiamenti climatici e ambiente marino – costiero: scenari futuri per un programma nazionale di adattamento", Palermo. http://www.conferenzacambiamentoclimatici2007.it/site/itIT/Sezioni/workshop_e_convegna/Live/presentazioni/workshoppalermo.html
- Giambastiani B.M.S., Antonellini M., Oude Essink G.H.P., Stuurman R.J. (2007) - Salt water intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): a numerical model. *Journal of Hydrology* 340: 94-104.
- Guo W., Langevin C.D. (2002) - User's Guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three dimensional variable- density ground water flow: Techniques of Water-resources investigations Book6, Chapter A7, 77p.
- IPCC (2007) - Climate Change 2007, the Fourth IPCC Assessment Report. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/index.htm>
- Mao X., Enot P., Barry D.A., Li L., Binley A., Jeng D.S. (2006) - Tidal influence of a coastal aquifer adjacent to a low relief estuary. *Journal of Hydrogeology* 327: 110-127.
- Marconi V., Antonellini M., Laghi M., Minchio A., Savelli D. (2008) - A water table fluctuations model in sandy soil below a coastal pine forest. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, 05761.
- Marcos M., Tsimplis N.M. (2007) - Scenarios for Future sea level change in the Mediterranean Sea. European Geosciences Union 2007, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 9, 02218.
- McLeod M., Rijkse W.C., Jessen M.R. (1999) - Available water capacities of key soil layers in the Gisborne-East Coast region, New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, Vol. 42: 195-203.
- Mollema P., Giambastiani B., Ulazzi E., Gabbianelli G. (2005) - The influence of climate changes on the water budget in the Regional Park of the Po River Delta. In: Gabbianelli G. et Sangiorgi F. (eds) "Climatic change and foreseeable impacts on deltas: a new challenge for the conservation of protected areas", Vol 4, Proceedings of the Sixth International Conference on theMediterranean coastal environment, MEDCOAST 03: 69–79.
- Mollema P.N., Antonellini M., Minchio A., Gabbianelli G. (2008) - The influence of three-dimensional dune topography on salt water intrusion in Marina Romea: a numerical study using LIDAR data. Proceedings "Salt Water Intrusion Meeting", Florida, pp. 151-154.
- Nielsen P. (1990) - Tidal Dynamics of the Water Table in Beaches. *Water Resources Research*, 26, no. 9: 2127-34.
- OcCC (2003) - Extreme events and climate change – status of knowledge and recommendations. http://www.proclim.ch/Products/Extremereignisse03/Extrem03_Report.html
- Olsthoorn T.N., M.M.Mosch (2002) - Fifty years of artificial recharge in de Amsterdam Dune Area. In: Dillon, P.J. (Ed) Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Proceedings of the 4th intl. symp. on artificial recharge of groundwater, ISAR-4, Adelaide, South Australia, 22-26 Sep. 2002, A.A.Balkema publishers, ISBN 90-5809 527 4, pp. 29-34.
- Regione Emilia Romagna (2005) - Carta Geologica d'Italia scala 1: 25.000 – Foglio 240-241, Forlì-Cervia.

- Regione Emilia Romagna (2008) - BeachMed in Emilia. Romagna: i risultati. Stampa Tipografia Moderna, Bologna. http://www.ermesambiente.it/wcm/difesa-suolo/news/2008/News02/BEACHMED-e_in_ER_def_LQ.pdf
- Scheidleger A., Grath J., Lindinger H. (2004) - Saltwater intrusion due to groundwater over-exploitation — EEA inventory throughout Europe. In: 18th Salt Water Intrusion Meeting, Cartagena, Spain, p 125.
- Schijf J.B., Schonfeld J.C. (1953) - Theoretical considerations on the motion of salt water and fresh water. In Proc. of the Minn. Intl Hydraulics Conv. Joint meeting IAHR and Hyd. Div., ASCE, pp.321-333.
- Stuyfzand P.J. (1989) - Quality changes of River Rhine and Meuse water upon basin recharge in the Netherlands' coastal dunes: 30 years of experience. In: Johnson, A.I. and Finlayson, D.J. Editors, 1989. Artificial Recharge of Groundwater American Society of Civil Engineering, pp. 235–247.
- Ulazzi E., Antonellini M., Gabbianelli G. (2007) - Saltwater intrusion in a unconfined aquifer: the case study of Cervia (North Adriatic sea, Italy). In: P. Meire et. al. (eds), Integrated Watermanagement: Practical Experiences and case Studies, Springer. p. 295-308.

6. VEGETALISATION DE LA DUNE ARTIFICIELLE DE FOCE BEVANO (RAVENNA, ITALIE)

DiSTA – M. Speranza, G. Venturi, A. Monti, G. Pritoni, N. Merloni, M. Pellizzari, L. Ferroni –
maria.speranza@unibo.it

6.1. Introduction

La zone côtière est une bande territoriale de sensibilité socio-économique, environnementale et paysagère très élevée, qui se développe en Italie sur plus de 8000 km et en Europe sur environ 100 000 km. Elle héberge une part considérable de la population, des activités économiques, des ressources terrestres et marines, du patrimoine naturel, culturel et paysager, mais c'est aujourd'hui une des zones les plus à risques de la zone méditerranéenne pour des raisons anthropiques et naturelles. Dans un futur proche il sera donc nécessaire de disposer de propositions d'interventions adaptées afin de réduire le niveau global de risques, dans une optique de développement durable. Il faudra consacrer toujours plus d'attention, sur tout le trait de côte, au maintien des cordons dunaires restant et à leur restauration, même à travers des interventions artificielles, du fait du rôle d'importance environnementale primordiale qu'elles jouent sous divers aspects. La présence de cordons dunaires assure en effet une meilleure résilience de la ligne de côte par rapport à l'érosion marine, la subsidence, l'ingression du biseau salé, en assurant en même temps une protection naturelle des alluvions de la mer.

Les indications en vigueur sur comment effectuer la restauration des systèmes de dunes dégradés et les opérations de végétalisation sont reportées dans les manuels d'ingénierie côtière (Woodhouse, 1978; Coastal Engineering Research Center, 1984), qui, pour des raisons culturelles compréhensibles, traitent les aspects biologiques du problème de manière peu approfondie, simplifiant en général les problématiques connectées à ces interventions.

La restauration des systèmes de dunes dégradés, inspirée par les indications de ces manuels, et effectuée au moyen de techniques douces (rechargement de la plage et plantation d'*Ammophila* sp.), a déjà été expérimentée depuis longtemps en Europe du Nord (Healy et Doody, 1995) et, plus récemment, également en milieu méditerranéen (Gomez-Pina, 1999; van der Salm et Unal, 2001), sur quelques zones côtières de l'Espagne (Sanjaume et Pardo, 1992; Gomez-Pina et al, 2002), en Italie sur le littoral vénitien du Cavallino (Cecconi et Ardone, 1998; Cecconi et Nascimbeni, 1998; Nascimbeni, 1998) et sur le littoral du Latium dans la propriété présidentielle de Castel Porziano (De Lillis et al, 2004).

Les procédures employées sont communes à la plupart des cas considérés. En pratique, à la suite de l'apport de sable par rechargement, on procède à la modélisation du cordon de dunes et à la plantation successive d'espèces végétales, en général *Ammophila* sp., récoltée dans des zones de dunes plus ou moins proches de celle de la plantation et transplantées directement sur les dunes reconstruites.

Les données provenant du monitoring des plantations du Cavallino, cinq ans après leur réalisation, ne sont pas du tout satisfaisantes (Caniglia et Bonello, 2002; Caniglia, 2006). De Lillis et al (2004) rapportent des informations intéressantes sur l'expérience de végétalisation effectuée sur la propriété de Castel Porziano, également cinq ans après la plantation. La survie des touffes d'*Ammophila* varierait de 60 à 70 %, mais l'augmentation de la couverture serait faible, de l'ordre de 10-15 %. La hauteur des dunes artificiellement reconstruites chute de 50 % à 60 % par rapport à la hauteur initiale, tandis qu'il y a une augmentation de leur superficie de l'ordre de 10-15 %.

Les protocoles de végétalisation des dunes ne donnent donc pas toujours des résultats satisfaisants dans la durée. Une meilleure intégration des diverses compétences pourrait certainement porter à une amélioration des protocoles de végétalisation des dunes utilisées jusqu'à maintenant. Les traditionnelles compétences agronomiques, en particulier, pourraient être transférées utilement à un secteur qui n'est pas typiquement productif, mais qui est intéressant du point de vue environnemental.

L'expérimentation effectuée sur le site pilote de Foce Bevano (Ravenna, Italie) apporte une contribution intéressante dans ce sens. Dans le cadre du thème de la conservation et de la restauration des systèmes de dunes, abordé par le sous-projet POSIDUNE, l'expérimentation réalisée par le Département des Sciences et Technologies Agroenvironnementale (DiSTA) de l'Université de Bologne (Italie) concerne le thème de la réalisation d'une couverture végétale sur une dune artificielle. A travers la mise au point d'un protocole qui s'intéresse en détails aux aspects agro-biologiques du problème, on s'est proposé d'obtenir en un temps bref une couverture végétale qui puisse interagir efficacement et activement avec le vent et le sable transporté, de façon à déclencher les processus naturels de construction et de croissance d'une dune.

6.2. Description de la zone d'intervention

La zone d'intervention est située à proximité immédiate de la nouvelle embouchure du torrent Bevano (Ravenna, Italie). Il s'agit d'une zone d'intérêt particulier du point de vue naturel et de conservation sur laquelle pèsent diverses contraintes de protection environnementale. C'est en

effet une Zone Ramsar (D.M. 13 juillet 1981), une Zone de Protection Spéciale (ZPS) et un Site d'Importance Communautaire (SIC) IT4070009 "Ortazzo, Ortazzino, Embouchure du Torrent Bevano" du Réseau Natura 2000 (D.M. n.65 de 2000), c'est une Réserve Naturelle Nationale "Dune côtière de Ravenna et Embouchure du Torrent Bevano" (D.M. 5 juin 1979), c'est une Station du Parc Régional du Delta du Pô "Pinède de Classe et Saline de Cervia" et c'est enfin une zone de contrainte hydrogéologique.

La zone est un des sites dont la diversité environnementale est la plus importante en littoral de la Région Emilie-Romagne (Tinarelli, 2005). En effet, on y trouve 5 km de dunes côtières actives bordées par la pinède littorale de *Pinus pinaster*, le système de zone humide périfluviale saumâtre de l'Ortazzo et de l'Ortazzino, au delà de la bande côtière marine sur environ 300 m de large. Dans cet ensemble de zones humides et de dunes arides sont présents presque tous les types de végétation halophile nord-adriatique, des communautés à *Salicornes* annuelles et pérennes, aux communautés à *Spartine* et jonchaies maritimes, aux communautés à *Puccinellia*. Derrière la dune se trouvent les pinèdes domaniales, sections Ramazzotti et Savio, créées à la fin du XIX^{ème} siècle sur le cordon littoral alors déposé récemment, dans le but de protéger des vents marins les cultures situées derrière.

Dans la zone sont présents 12 habitats d'intérêt communautaire aux sens de la Directive Habitat 92/43/CEE, dont 4 sont prioritaires. De récentes recherches ont signalé la présence de deux autres habitats d'intérêt communautaire: dunes mobiles du cordon littoral avec présence de *Ammophila littoralis* (dunes blanches), et *dunes côtières fixes à végétation herbacée (dunes grises), ce dernier habitat étant prioritaire. La présence de *Salicornia veneta* est également signalée, protégée aux sens de la directive Habitat 92/43/CEE en tant qu'espèce prioritaire.



Figure 1 - L'estuaire méandrique du Torrent Bevano avant les travaux d'aménagement de l'embouchure.

Jusqu'à la fin 2005 s'ajoutait également aux arguments naturalistiques ci-dessus la présence de l'estuaire méandrique du Torrent Bevano (fig. 1), dernier cours d'eau du Haut Adriatique libre d'évoluer naturellement (Tinarelli, 2005). La zone présentait une dynamique d'embouchure particulière, du fait qu'elle n'était pas contenue par des digues artificielles et était libre de suivre une évolution complètement naturelle. Une étude réalisée par Gardelli et al (2007) a mis en évidence comment l'embouchure du Torrent Bevano a migré vers le nord de 500-600 m sur la période 1996-2005. En moyenne, un tel déplacement, relativement uniforme, a été estimé d'environ 70 m/an. La migration vers le nord a presque toujours intéressé tout le système de l'embouchure. Cette rapide migration, et en particulier l'évolution des années 2004 et 2005, avec la destruction de plus de 150 m de dunes et d'une partie de la pinède, ont affaibli le système de protection naturelle du territoire contre les tempêtes. De plus, dans les périodes d'étiage, l'embouchure se ressentait du transport de sable le long de la côte, s'ensablant et rendant ainsi très difficile le débouché en mer en cas de crue. La difficulté pour l'eau de déboucher en mer se répercutait à l'amont, faisant augmenter le niveau de l'eau dans le fleuve et rendant d'autant plus difficile l'écoulement dans les canaux. En cas de grosse tempête, la mer pouvait en effet pénétrer jusque dans les canaux de la pinède et mettre en crise le système d'assainissement, qui arrive à s'écouler jusqu'aux portes de Ravenne (Région Emilie-Romagne, 2003).



Figure 2. Le site de Foce Bevano début 2006 au cours des travaux d'ouverture de la nouvelle embouchure et de fermeture de l'ancienne. La zone en pointillés rouges correspond à celle où a été effectuée l'intervention de végétalisation.

Début 2006, sous la pression des problèmes mentionnés ci-dessus, la Région Emilie-Romagne a réalisé des travaux de fermeture de l'ancienne embouchure et d'ouverture d'une nouvelle, située 500 m plus au sud (fig. 2). L'ancienne embouchure a été fermée en utilisant le sable dragué pour ouvrir la nouvelle ainsi que la zone du canal d'évacuation, un canal en correspondance du dernier méandre dont la cote du fond est à l'altitude du niveau de la mer et ayant pour fonction de faciliter l'écoulement des eaux en cas de crue (Gardelli et al, 2007).

Sur le trait de côte compris entre l'ancienne et la nouvelle embouchure, une barrière brise-vent a été installée, faite d'osier, dans le but de lancer le processus de formation d'un cordon de dunes, pour substituer celui érodé du Torrent Bevano au cours des années précédentes. Le nouveau cordon de dunes devrait se raccorder avec le système de dunes naturelles existantes immédiatement au nord de l'ancienne embouchure.

Les activités d'expérimentation sur site pilote, prévues par le sous-projet POSIDUNE, ont été insérées dans le contexte environnemental décrit ici et ont concerné en particulier la réalisation d'une intervention de végétalisation en correspondance de la zone de formation du nouveau cordon de dunes.

6.3. Matériels et Méthodes

Les espèces utilisées

Pour réaliser l'intervention de végétalisation, deux espèces répandues et abondantes de les communautés végétales des dunes sableuses côtières ont été choisies. Il s'agit précisément d'*Agropyron junceum* (L.) Beauv. et d'*Ammophila littoralis* (Beauv.) Rothm., les deux appartenant à la famille botanique des Gramineae. *Agropyron junceum* (chiendent des plages) est une espèce géophyte rhizomateuse propre aux dunes embryonnaires (figure 3a) avec des caractéristiques pionnières typiques et, en même temps, une bonne capacité édifiatrice. Elle a une bonne résistance à la salinité, est capable de tolérer les effets de l'aérosol marin et des submersions momentanées par l'eau de mer. Ses touffes, relativement lâches et basses, représentent un bon obstacle pour le ralentissement des vents et le conséquent dépôt de sédiments sableux. L'espèce, cependant, pousse bien également dans des conditions d'apports sableux limités (AGENC, 1994).

Ammophila littoralis (L.) Link (oyat) est une espèce géophyte rhizomateuse propre aux dunes mobiles avec d'excellentes capacités édifiatrices (fig. 3b). Par rapport à *Agropyron junceum*, elle a une capacité de résistance plus faible aux effets des aérosols marins et aux événements de submersion, même sporadiques et occasionnels, par l'eau de mer, mais elle forme des

touffes beaucoup plus denses et hautes, qui représentent un obstacle vraiment important par rapport au vent. *Ammophila littoralis* a des effets positifs non seulement sur l'accumulation de sédiments sableux, mais aussi sur leur stabilisation, à laquelle elle contribue grâce à son appareil racinaire développé jusqu'à une profondeur importante et dans de multiples directions, avec un système de racines fines et longues très riche (fig. 3c).



Figure 3 - De gauche à droite *Agropyron junceum* (a) et *Ammophila littoralis* (b, c).

Récolte des espèces et propagation en pépinière

Agropyron junceum et *Ammophila littoralis* forment de vastes peuplements dans diverses localités côtières de l'Emilie-Romagne, où sont encore présents des systèmes de dunes plus ou moins bien conservés. Dans quelques unes de ces localité (Casal Borsetti, Porto Corsini, Bellocchio), les récoltes du matériau végétal, utilisé ensuite pour la propagation et la culture en pépinière, ont été effectuées avec la collaboration et le support du Corps Forestier d'Etat de la Station de Punta Marina (Ravenna, Italie).



Figure 4 - A gauche, rhizome d'*Agropyron junceum*, à droite rhizome d'*Ammophila littoralis*. A partir d'un segment de rhizome, taillé sur la plante mère et contenant un nœud avec bourgeon (flèche rouge), il est possible d'obtenir un nouvel individu.

Les récoltes ont été effectuées au début du printemps (mars 2006), en prélevant préférentiellement les portions périphériques des touffes et les portions de rhizomes souterrains qui leur sont attachés. Les parties périphériques des touffes, en général de formation récente, bourgeonnent facilement grâce à la production de bourgeons adventifs. Les rhizomes souterrains, avec lesquels sont reliées les parties périphériques des touffes, portent déjà sur leurs nœuds des bourgeons qui peuvent développer de nouvelles feuilles et de nouvelles racines.

La propagation du matériau récolté dans la nature a été effectuée auprès du siège de Cadriano (Bologna) de l'Agence d'Agronomie de l'Université de Bologna (AUB). Les jeunes touffes ont été séparées en les éléments unitaires dont elles étaient constituées; chacune de ceux-ci ont été mis dans un vase contenant du sable et de la terre de champ en un rapport de 3:1. Les morceaux de rhizome ont au contraire été taillés en segments, chacun doté d'un bourgeon (figure 4), et mis dans un vase contenant du sable et de la terre sur environ deux cm d'épaisseur. Environ un mois après cela (avril 2006) on a constaté les premiers bourgeonnements de jeunes feuilles, mais entre temps, l'appareil racinaire s'était déjà considérablement développé. La production de nouvelles feuilles a continué au cours de toute la période printanière suivante, s'est arrêtée pendant l'été, pour ensuite reprendre dans la seconde moitié de septembre 2006.

Les plantes obtenues par propagation végétative ont été maintenues en pépinière (fig. 5) sur toute la période printanière tardive, l'été et le début de l'automne, irriguées selon les besoins et engraisées avec Nitrofoska Gold à mi-juin et fin septembre 2006. A partir de mi-juin et jusqu'à la fin août, les plantes ont été protégées de l'ensoleillement excessif par une toile pare-soleil.



Figure 5 - Culture d'*Agropyron junceum* et d'*Ammophila littoralis* en pépinière, auprès de l'Agence d'Agronomie de l'Université de Bologna.

Réalisation de la plantation

La plantation *in situ* d'*Agropyron junceum* et d'*Ammophila littoralis* a été effectuée le 27 octobre 2006. La saison était adaptée du fait des températures encore douces, des effets favorables de la condensation nocturne de l'humidité atmosphérique en plus des éventuelles précipitations.



Figure 6 - Quelques étapes de la réalisation de la plantation pour la végétalisation à Foce Bevano (Ravenna, Italie).

La plantation a été effectuée conjointement par le personnel technique de l'Agence d'Agronomie de l'Université de Bologne et par celui du Corps forestier d'Etat. Le Corps Forestier d'Etat a de plus fourni le support logistique et les moyens mécaniques nécessaires. Environ 600 pots d'*Agropyron junceum* et 300 d'*Ammophila littoralis* ont été utilisés, chacun contenant 3 à 5 touffes de l'espèce correspondante. Avec ce matériel, il a été possible de végétaliser une bande de 300 m de long sur 2.5 m de large, en correspondance de la barrière brise-vent déjà existante. La plantation s'est faite en particulier sur 46 des 69 cellules qui constituent la barrière brise-vent, à partir de l'extrémité sud, à proximité de la nouvelle embouchure du torrent Bevano. Deux rangées de pots d'*Agropyron junceum* ont été plantées, alternées et distantes d'environ 1 m, en position la plus externe et la plus proche de la ligne de rive, et une rangée de pots d'*Ammophila littoralis*, plus en retrait, distante elle aussi de 1 m de la rangée plus interne d'*Agropyron junceum*.

On a utilisé une densité de plantation de 1,2 pots/m² et d'environ 5 touffes/m². Pour la mise en terre, il a été effectué des trous profonds d'environ 35-40 cm, dans chacun desquels a été positionné le contenu d'un pot, en prenant soin de maintenir le plus intact possible le bloc de terre et de racines, de positionner le tout en profondeur et de recouvrir abondamment de sable la base de la touffe de la plante. Ceci pour éviter un éventuel déchaussement et une mise à nue des racines par l'effet du vent. A la fin de la mise en terre, on a abondamment irrigué, ainsi que le jour suivant. Sur la figure 6 sont illustrées quelques étapes de la réalisation de la plantation.

Monitoring de la plantation et résultats

L'état et le développement des plantes ont été surveillés soit à l'aide de contrôles généraux répétés environ tous les 2 mois au cours de la première année et accompagnés d'une documentation photographique, soit à l'aide de comptages du nombre de nouvelles tiges produites, effectués sur un échantillon représentatif d'*Agropyron* et d'*Ammophila*, au cours du printemps-été 2006.

Au contrôle effectué fin novembre 2006, un mois après la plantation, et ainsi également pour les contrôles de fin février 2007, avril 2007 et juin 2007, quatre, six et huit mois après la mise en terre, la survie était de 100 % aussi bien pour *Agropyron junceum* que pour *Ammophila littoralis*. Ces résultats se modifient légèrement uniquement pour *Ammophila littoralis*, qui à la fin de l'été 2007 présentait une survie de 98 %, tandis qu'elle restait inchangée pour *Agropyron junceum*, qui a passé l'été 2007 sans aucune perte.

	Mars 2007	Avril 2007	Juin 2007	Juillet 2007
<i>Agropyron junceum</i>	36.7 ± 7.6	34.0 ± 8.8	56.7 ± 10.6	67.4 ± 10.7
<i>Ammophila littoralis</i>	22.0 ± 2.3	34.0 ± 8.0	82.2 ± 12.9	138.8 ± 34.6

Tableau 1 - Nombre moyen de tiges par touffe chez *Agropyron junceum* et chez *Ammophila littoralis* au cours du printemps-été 2007. Chaque valeur est la moyenne de huit observations.

Les contrôles quantitatifs, réalisés au cours des mois de mars, avril, juin et juillet 2007, ont permis d'évaluer non seulement la survie, mais aussi l'état de développement des deux espèces. Sur le tableau 1 est reportée la valeur moyenne du nombre de tiges par touffe d'*Ammophila littoralis* et d'*Agropyron junceum* au cours de la saison printemps-été 2007. On observe une augmentation du nombre de tiges par touffe au cours du temps, mais cette augmentation est beaucoup plus nette chez *Ammophila littoralis* que chez *Agropyron junceum*. Chez *Ammophila littoralis*, au cours des quatre mois le nombre de tiges par touffe augmente en moyenne d'à peine plus de 6 fois, tandis que chez *Agropyron junceum*, au cours de la même période, il augmente de 1.8 fois (tab. 1). L'intervalle de variation autour de la moyenne tend à augmenter dans le temps (de mars 2007 à juillet 2007), ce qui indique une variabilité majeure du comportement individuel dans la formation de nouvelles tiges au cours de la saison végétative, vraisemblablement due à une vigueur variable de chaque plante et/ou aux conditions spécifiques locales, plus ou moins favorables au développement de celles-ci.

Sur la figure 7 est reportée une séquence d'images de la plantation, qui mette en évidence le développement plus que satisfaisant de la couverture végétale au cours de la période allant de février 2007 à fin septembre 2007. Les changements qui se vérifient au cours de ces sept mois, en termes de dimensions des tiges d'*Agropyron junceum* et, surtout, d'*Ammophila littoralis* sont d'importance considérable et sont tels qu'ils déterminent un rôle actif de la couverture végétale dans les phénomènes d'interception du sable transporté par le vent, en plus de l'accumulation et de la stabilisation de celui-ci. *Ammophila littoralis* présente une augmentation notable aussi bien de la densité de ses tiges que de leur hauteur. Comme on le voit sur la figure 7, les tiges d'*Ammophila* atteignent déjà en mai la hauteur des poteaux verticaux de la barrière brise-vent, qui sont ensuite largement dépassés fin septembre 2007. Les éléments transversaux de la barrière même sont au contraire déjà ensablés sur l'image de mai 2007. A cette époque, la barrière brise-vent n'a

donc plus aucune fonction d'interception et d'accumulation de sable, mais elle est substituée dans ce rôle par la couverture végétale présente.

L'interception et l'accumulation de sable de la part des plantes est du reste bien documentée sur les images de la figure 8, toutes deux datant de l'automne 2007.



Figure 7 - Evolution de la couverture végétale de la plantation pilote de Foce Bevano. Date des prises de vue, de gauche à droite et du haut vers le bas: 24 février 2007, 15 mai 2007, 17 juillet 2007, 29 septembre 2007.



Figure 8 - Evidentes accumulations de sable à la base et autour des tiges d'*Agropyron junceum* et d'*Ammophila littoralis*. Photo de gauche: 7 novembre 2007; photo de droite: 17 décembre 2007, à l'occasion d'un événement venteux.

Comparaison entre les zones végétalisées et celles non végétalisées du site pilote

A l'occasion de l'intervention de végétalisation effectuée fin octobre 2006, tous les éléments de la barrière brise-vent ne furent pas l'objet d'une plantation. En particulier, dans les 20 cellules plus au nord, aucune intervention n'a été faite.

Plus de deux ans après les travaux de fermeture de l'ancienne embouchure du torrent Bevano, cette zone du site pilote, bien qu'elle soit la plus proche du système de dunes naturelles présentes immédiatement au nord de l'ancienne embouchure, n'a encore reçu ni graines, ni autres propagules provenant de la végétation alentour et est pratiquement privée de couverture végétale significative (fig. 9). La barrière brise-vent a accumulé du sable fin sur la limite supérieure des poteaux transversaux et a donc épuisé sa fonction; en l'absence d'autres obstacles, on n'observe aucune autre accumulation de sable. On peut supposer que la situation restera ainsi jusqu'à ce que commencent à se développer les premiers noyaux de couverture végétale, qui cependant se forment avec une inertie initiale considérable.



Figure 9 – Aspect du tronçon non végétalisé du site de Foce Bevano, à la date du 19 avril 2008.

6.4. Résultats et discussion

L'intervention réalisée au site pilote de Foce Bevano se proposait d'obtenir en des temps relativement courts une couverture végétale significative, capable d'amorcer les effets positifs exercés par la végétation sur l'accroissement de la dune et sur le déroulement des fonctions propres d'un système de dune avec une couverture végétale. Avec le protocole adopté, il a été possible d'obtenir ceci sur un laps de temps d'environ un an à partir de la réalisation de la plantation. Après cette période, la superficie occupée par la plantation a en effet été capable

de jouer son rôle de piège pour le sable à l'occasion des événements venteux, comme la micromorphologie de l'accumulation le démontre, de façon évidente surtout autour et entre les touffes d'*Ammophila littoralis*, mais également autour des touffes d'*Agropyron junceum* de dimensions supérieures (fig. 8).

La plantation effectuée, bien que se référant à d'autres expériences italiennes concernant le littoral de Cavallino et le littoral situé entre Jesolo Pineta et Cortellazzo, tous deux dans la province de Venise (Cecconi et Nascimbeni, 1998; Caniglia et al, 1998; Cecconi et Ardone, 1998, Nascimbeni, 1998; Caniglia, 2006), ainsi que le littoral de la propriété présidentielle de Castelporziano (De Lillis et al, 2004) et d'autre pays méditerranéen, dont la France (Boucheron, 1987; AGENC, 1994), a introduit quelques éléments innovants en plus des techniques recommandées comme des standards de l'intervention (Woodhouse, 1978; Coastal Engineering Research Center, 1984). Le premier a été le choix d'introduire *in situ* des plantes déjà grandes et dans de bonnes conditions végétatives, atteintes après une période de croissance en pépinière; le second a été l'attention portée à la réduction au minimum du stress de la transplantation; le troisième a été le choix de l'époque de la plantation (automne). Les trois éléments ont été déterminants pour la bonne réussite de la plantation du point de vue de l'enracinement du matériau végétal utilisé. Le moment le plus critique, consistant dans la phase de production d'un nouvel appareil racinaire par la partie de la plante utilisée pour la propagation et la production de nouveaux individus, s'est en effet déroulé en pépinière, dans un environnement contrôlé, où il a été possible de réduire les effets négatifs d'une température trop élevée, ainsi que de carences hydriques ou nutritionnelles. Les pertes d'individus par enracinement raté et mort des boutures, qui se sont vérifiées en pépinières, n'ont pas compromis les caractéristiques et la réussite de la plantation, sans compter qu'avant de réaliser la plantation même, il a été possible d'éliminer, sur la totalité du matériau propagé, les individus pas assez vigoureux et bien développés.

En phase de réalisation de la plantation, en utilisant le matériau végétal déjà poussé et doté de son propre appareil racinaire bien développé, les éventuels petits traumatismes ont été facilement surmontés. Ceci est bien différent si les boutures doivent au contraire développer leurs racines directement sur le site de plantation: les pertes sont nettement supérieures.

Au moment de la réalisation de la plantation, le début de l'automne est certainement à préférer au printemps dans toutes les zones de climat méditerranéen ou subméditerranéen, où l'été est caractérisé par une période aride plus ou moins longue et plus ou moins marquée. En effectuant la plantation au début de l'automne les plantes ont pu profiter encore pour un certain temps de températures pas trop basses et d'une bonne disponibilité de l'eau, provenant

des précipitations ou de la condensation nocturne. Ces conditions leur ont permis de s'enraciner avec une activité végétative pas trop intense, qui est ensuite ralentie pendant la période hivernale. La plante est alors arrivée à la période printanière d'intense reprise de l'activité végétative en ayant derrière elle une longue période d'acclimatation aux conditions du site de plantation, traversée sans être soumise à un stress particulièrement intense. Les conditions que la plante aurait dû affronter auraient été très différentes si la plantation avait eu lieu à la fin de l'hiver - début du printemps. Dans ce cas, bien que les conditions initiales soient encore bonnes en ce qui concerne la température et la disponibilité de l'eau, une période d'augmentation de la température et de diminution des précipitations aurait suivi, en plus d'une stimulation intense de l'activité végétative, que la plante aurait affronté avec un stress plus important, ayant terminé depuis peu la période d'acclimatation aux conditions du site d'implantation. Il est donc bien mieux, comme il a été fait dans le cas de l'expérimentation décrite ici, d'utiliser la période printanière-estivale pour la propagation en pépinière, ce qui permet dans ce cas d'intervenir pour réduire les conditions environnementales défavorables, et réserver au contraire la période automnale pour l'introduction des plantes *in situ*.

La combinaison des effets positifs conséquents aux choix effectués a permis de disposer dans l'environnement de la dune en formation des plantes qui, quatre-cinq mois après la plantation, au moment de la reprise de l'activité végétative printanière, étaient déjà acclimatées et parfaitement capables de croître, prêtes à produire de nouveaux bourgeons, se répandant de façon stable sur le site, selon leur propres rythmes saisonniers. La biomasse aérienne et les appareils racinaires qui ont pu se développer au cours de la saison végétative 2007 ont commencé à fonctionner très tôt, que ce soit pour l'interception et l'accumulation que pour la stabilisation du sable.

Le choix d'utiliser un matériau végétal récolté dans la nature, mais propagé et cultivé en pépinière avant la plantation sur le site à végétaliser a présenté des avantages non négligeables également du point de vue de l'impact sur les populations naturelles où ont été effectués les prélèvements. En effet, on a prélevé dans la nature un nombre d'individus inférieur à celui effectivement nécessaire pour l'intervention de végétalisation; ceux-ci ont été obtenus par propagation végétative en pépinière, à partir des individus récoltés dans les populations naturelles.

En ce qui concerne les espèces utilisées, *Ammophila littoralis* a été largement utilisée dans des expérimentations analogues (Woodhouse, 1978; Coastal Engineering Research Center, 1984; Cecconi et Nascimbeni, 1998; Caniglia et al, 1998; Cecconi et Ardone, 1998, Nascimbeni, 1998; De Lillis et al, 2004; Caniglia, 2006), mais en revanche l'utilisation d'*Agropyron junceum* a été

beaucoup moins fréquente jusqu'à maintenant, étant recommandée comme alternative à *Ammophila littoralis* pour la végétalisation de sites avec un faible apport de sable (AGENC, 1994). *Ammophila littoralis* et *Agropyron junceum* sont deux espèces de dimensions et de structure différentes, qui ont des effets différents sur l'interception et l'accumulation du sable du fait de ces caractéristiques intrinsèques. *Ammophila littoralis* atteint des dimensions supérieures à celles d'*Agropyron junceum*, et a aussi des touffes plus denses et plus riches de tiges que celles d'*Agropyron*.

Au cours de l'expérimentation de Foce Bevano, *Ammophila littoralis* a démontré des capacités de croissance en hauteur et en diamètre nettement supérieures à celles d'*Agropyron junceum*. S'agissant dans les deux cas d'espèces pérennes, cela a permis de pouvoir compter sur les effets positifs de la présence d'une couverture végétale tout au long de l'année. *Ammophila littoralis*, cependant, a conservé inaltérée sur toute l'année la même densité de tiges, tandis qu'*Agropyron junceum* a été sujette à des variations saisonnières de ce paramètre, avec des maximums en période printanière et automnale et avec une diminution de la densité en été, quand une grande partie de la plante se dessèche, pour ensuite bourgeonner de nouveau à l'automne. Il s'ensuit donc que tandis qu'*Ammophila* a intercepté le sable avec une efficacité constante sur toute la période considérée, *Agropyron* a fonctionné de manière moins efficace au cours de l'été.

Le protocole de végétalisation que nous avons mis au point et adopté pour l'intervention sur le site de Foce Bevano, est signalé avec d'autres dans le manuel techniques de phase B du sous-projet POSIDUNE, rédigé en collaboration avec les collègues français de l'EID Méditerranée (Speranza et al, 2007). Si on le compare avec les autres protocoles reportés dans ce manuel, il apparaît assez coûteux, mais il produit des résultats rapides et efficaces. Celui-ci a été choisi justement en fonction de ces caractéristiques d'efficacité et rapidité, qui répondent bien aux exigences particulières du site et du type de plantation que l'on voulait obtenir. D'autres protocoles, également reportés dans le même manuel, qui prévoient un investissement de ressources plus faible dans la phase d'exécution de la plantation, donnent cependant des résultats très inférieurs en termes d'enracinement et de croissance de la couverture végétale et donc aussi de la contribution à l'édification *ex-novo* d'une dune.

D'autre part, les interventions de végétalisation "intensives", surtout dans le cas de dunes construites *ex-novo*, absolument privées d'une quelconque couverture végétale et encore en cours de formation comme celle du site pilote ici considéré, semblent sans aucun doute appropriées. Il a été utile d'introduire des espèces pérennes, aux aptitudes édifcatrices bien marquées, qui ont rapidement pu déclencher des phénomènes d'accumulation et de

stabilisation des sédiments sableux. De ce qui a pu être observé sur le site de Foce Bevano, en l'absence d'interventions de végétalisation, le processus de construction active de la dune de la part de la végétation spontanée est absolument inexistant, au moins au cours des deux premières années (à partir de la fin des travaux de création de la nouvelle embouchure, début du printemps 2006, jusqu'à aujourd'hui, printemps 2008). Au cours de la période printemps-été de 2006 et de 2007 on a en effet noté une colonisation modérée de la part d'espèces annuelles, *Cakile maritima* surtout, mais celle-ci, que ce soit pour son port que pour sa présence éphémère, limitée à quelques mois dans l'année, ne contribue pas à l'édification de la dune.

L'expérience conduite à Foce Bevano a donné des résultats positifs par rapport aux aspects essentiels de la végétalisation, démontrant qu'il est possible d'obtenir dans des temps relativement brefs (environ un an) une surface végétalisée avec des espèces pérennes édifiatrices capables de capturer, d'accumuler et de stabiliser les sédiments sableux. Les systèmes végétaux qui en dérivent souffrent cependant d'une certaine simplification par rapport aux systèmes naturels en ce qui concerne le nombre d'espèces qui les composent. Une fois introduites avec succès les espèces qui contribuent à l'édification de la dune, il serait donc bon d'augmenter la biodiversité des systèmes obtenus par végétalisation artificielle, en favorisant d'une certaine façon l'entrée d'espèces quantitativement moins importantes, mais également d'intérêt. Sur cet aspect, des approfondissements expérimentaux sont encore nécessaires, mais les techniques de végétalisation moins coûteuses (utilisation de graines à disperser directement *in situ*, éventuellement combiné avec des techniques qui favorisent la formation d'une couverture végétale spontanée) peuvent trouver les conditions plus adaptées à leur application précisément dans ces interventions collatérales, pour l'amélioration de la biodiversité des systèmes végétaux d'origine artificielle.

6.5. Considérations finales

Le protocole de végétalisation mis au point à l'occasion de l'expérimentation effectuée sur le site pilote de Foce Bevano a donné des résultats positifs par rapport à ce que l'on se proposait de réaliser: obtenir en un temps bref une couverture végétale qui puisse lancer les processus naturels de construction et d'accroissement d'une dune.

Il s'agissait d'une intervention de végétalisation "intensive" qu'il est recommandable d'appliquer surtout dans des situations d'absence absolue ou de forte dégradation de la couverture végétale naturelle, capable de contribuer activement à la construction de la dune. Des situations de ce type sont indubitablement largement présentes le long de la côte émilienne et

dans les zones limitrophes, auxquelles le protocole en question peut donc être facilement transféré, étant donné la similitude des conditions bioclimatiques.

Les aspects qui, d'une manière particulièrement significative, ont contribué à l'obtention des résultats obtenus ont été le choix des espèces et la procédure de préparation du matériel végétal utilisé pour la plantation. Les espèces qui contribuent le mieux à la construction dynamique de la dune ont en effet été utilisées, en les insérant *in situ* dans les meilleures conditions pour leur enracinement.

A ce premier objectif d'introduction d'espèces constructrices de la dune et de déclenchement des processus de construction dynamique de la dune même, qui, à la fin de l'expérimentation, est considéré comme ayant été atteint, pourraient et devraient suivre successivement des interventions réalisables avec des actions de moindre coût, destinées à obtenir un système plus naturel et à la diversité spécifique meilleure.

6.6. Bibliographie

- AGENC Agence pour la Gestion des Espaces Naturels de Corse (1994) – *Restauration des dunes à faible dynamique édificatrice en Corse*. Bastia.
- Boucheron (1987) – *Aménagement et gestion des dunes littorales*. Ministère de l'Environnement, France.
- Caniglia G. (2006) - *Stato attuale dei litorali del Veneto*. Informatore Botanico Italiano, Atti del Convegno "Conservazione e recupero degli habitat costieri", Ancona, 19-20 maggio 2005.
- Caniglia G. et Bonello L. (2002) - *Potere aggregante di *Ammophila littoralis* nella ricomposizione dei litorali veneziani*. Atti del 97° Congresso della Società Botanica Italiana, Lecce.
- Caniglia G. Casetta D., Nascimbeni P. et Pizzinato C. (1998) – *Aspetti del dinamismo della vegetazione nell'edificazione di un sistema dunoso artificiale (Venezia-Cavallino)*. Atti del 10° Seminario IAED – La progettazione ambientale nei sistemi costieri. 12: 42-53.
- Cecconi G. et Ardone V. (1998) – *La progettazione dei litorali con ripascimento delle spiagge: l'esperienza dei litorali di Cavallino e Pellestrina*. Atti del 10° Seminario IAED – La progettazione ambientale nei sistemi costieri, 12: 11-31.
- Cecconi G. et Nascimbeni P. (1998) – *Ricostruzione e naturalizzazione delle dune artificiali sul litorale di Cavallino*. Quaderni Trimestrali Consorzio Venezia Nuova, 2: 45-61.
- COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER (1984) – *Shore protection manual*, vol. II. Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers. Washington D.C..
- De Lillis M., Costanzo M., Bianco P.M. et Tinelli A. (2004) – *Sustainability of sand dunes restoration along the coast of the Tyrrhenian sea*. Journal of Coastal Conservation, 10: 93- 100.
- Gardelli M., Caleffi S. et Ciavola P. (2007) – *Evoluzione morfodinamica della foce del Torrente Bevano*. Studi Costieri, 13: 53-74.

- Gomez-Pina G. (1999) – *Beach nourishment fundamentals. The Spanish experience*. Short Course Notes, COPEDEC, Cape Town, ZA.
- Gomez-Pina G., Munoz-Perez J.J., Ramirez J.L. et Carlos L. (2002) - *Sand dune management: problems and techniques, Spain*. Journal of Coastal Research, 36: 325-332.
- Healy M.G. et Doody J.P. (1995) – *Directions in European coastal management*. EUCC Samara Publishing Limited. Cardigan, UK.
- Nascimbeni P. (1998) – *Ricostruzione e naturalizzazione delle dune artificiali sul litorale di Cavallino*. Atti del 10° Seminario IAED – La progettazione ambientale nei sistemi costieri, 12: 32-41.
- Regione Emilia-Romagna (2003) – *Studio di impatto ambientale. Riqualificazione funzionale del tratto costiero in corrispondenza di Foce Bevano*. Servizio Tecnico Bacino Fiumi Romagnoli, Ravenna, 239 pp.
- Sanjaume E. et Pardo J. (1992) – *The dunes of the Valencian coast (Spain): past and present*. Proceedings of the third European Dunes Congress, Galway.
- Speranza M., Pritoni G., Venturi G., Grosset S., Heurtefeux H. et Mathieu S. (2007) - *Consolidation/restauration des dunes par la végétation*. POSIDUNE-BEACHMED-e, Cahier Technique Etendu de Phase B, pp. 75-83.
- Tinarelli R. ed. (2005) – *Rete Natura 2000 in Emilia-Romagna – Manuale per conoscere e conservare la biodiversità*. Compositori, Bologna, 287 pp.
- van der Salm J. et Unal O. (2001) – *Towards a common Mediterranean framework for potential beach nourishment projects*. MEDCOAST 01: Proceedings of the fifth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, Hammamet, Tunisia, October 23-27 2001, 2: 1333-1346.
- Woodhouse W.W. (1978) – *Dune building and stabilisation with vegetation*. SR-3, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

7. EXPERIMENTATION DE DIFFERENTES TECHNIQUES DE VEGETALISATION EN MILIEU DUNAIRE (GRANDE MAÏRE)

EID Méditerranée – S. Grosset, H. Heurtefeux – hheurtefeux@eid-med.org

7.1. Introduction

Les interventions de restauration dunaire font appel aux techniques issues du génie écologique, utilisant les processus naturels pour aider l'écosystème littoral à se régénérer, à se renforcer pour mieux lutter contre les agressions. Ces opérations consistent en une combinaison de techniques et méthodologies qui visent à rendre au système dunaire l'ensemble de ses fonctionnalités.

La végétation dunaire, élément primordial de la stabilité et de la pérennité dunaire peut être favorisée de différentes manières comme cela a été abordé dans les phases précédentes du programme POSIDUNE. Afin de réduire les coûts mis en œuvre pour cette aide à la végétalisation, des expérimentations de plantations, de semis et d'aide à la végétalisation sont réalisées *in situ* pour cette phase du programme. Ces expériences permettront, si les résultats se révèlent satisfaisants, de réduire les coûts de production des espèces végétales dunaires liées à la phase de culture en pépinière.

Peu d'expériences ont été menées jusqu'à présent en Languedoc-Roussillon sur la végétalisation à partir de semis; sur le site pilote plusieurs techniques "directes" d'aide à la végétalisation ont été testées: des semis réalisés à partir de graines prélevées dans une zone source proche, des bouturages de graminées édificatrices, ainsi que trois techniques de protection du substrat et de facilitation de reprise de végétation.

Le but de ces expérimentations est de connaître les potentialités de techniques peu connues comme le semis, et d'appréhender l'influence de matériaux naturels (couverture végétale morte, géotextile biodégradable...) sur la survie et le développement de la végétation dunaire.

Le site pilote est localisé sur la commune de Portiragnes dans l'ouest du département de l'Hérault, où une dune auparavant fortement fragilisée a été reconstituée grâce à un apport de sable et la pose d'ouvrages de protection dunaire. En vue d'accélérer la consolidation de la dune, les expérimentations d'aide à la végétalisation sont menées sur ce secteur.

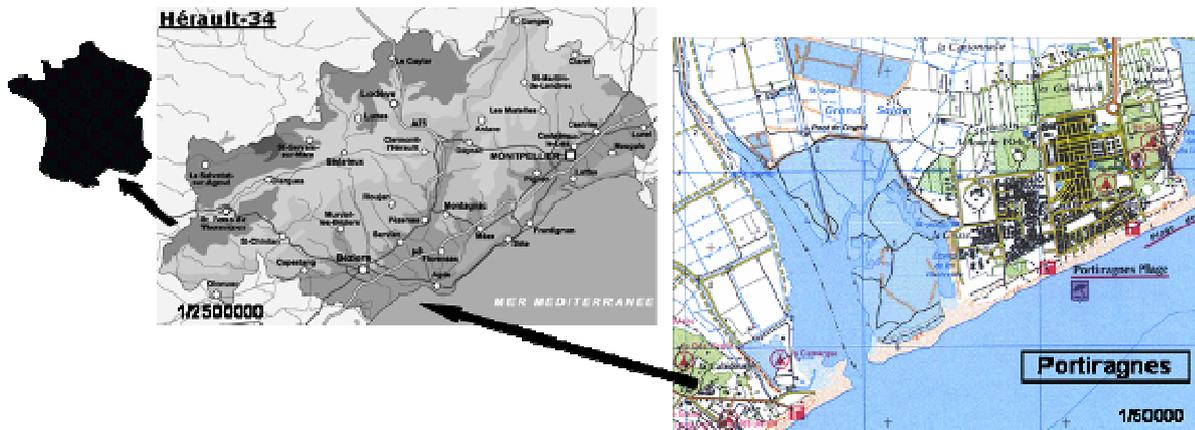


Figure 1 - Localisation du site d'étude.

7.2. Description du site d'étude



Figure 2 - Localisation de la zone restaurée et de la zone source de propagules (boutures et graines).

Le site pilote est situé précisément au lieu-dit "les Bosquets", séparé de quelques centaines de mètres de la zone source de propagules: la dune de la Grande Maire (fig. 1).

Le secteur littoral des bosquets présente un bilan sédimentaire négatif, notamment en raison des nombreux enrochements situés en amont-dérive. Suite à un fort coup de mer survenu en décembre 2003, la dune y a été fortement érodée. Seule la dune fixée était encore bien présente, la dune vive ayant été en grande partie détruite, sur un linéaire d'environ 150 mètres (fig. 2).

A la fin de l'année 2005, la dune du secteur d'étude a fait l'objet de travaux de restauration. Un apport de 1000 m³ de sable (en provenance du secteur de la Grande Maïre) a été réalisé grâce à des engins de génie civil. Cet apport a permis de redonner une forme et un volume satisfaisant au versant maritime du cordon dunaire, en respectant les caractéristiques des dunes proches (alignement par rapport au trait de côte, pentes, altimétrie).

Le versant dunaire ainsi recréé a ensuite été protégé de l'action éolienne, mais également du piétinement, par la mise en place d'un ouvrage à effet brise-vent (maillage de 800 m de ganivelles), épousant la forme du cordon. Cet ouvrage a été implanté dès que le versant dunaire a été réglé suivant sa forme définitive, pour éviter toute perte sableuse. Une passerelle en bois de franchissement du cordon dunaire, emportée par la tempête en 2003, a également été remplacée.

Chronologie des travaux et évolution de la dune

- 2003-2005 (fig. 3)



Figure 3 – Secteur des bosquets de 2003 à 2005.

- a) décembre 2003: la dune du secteur des bosquets est érodée, présentant un profil en falaise
- b) début novembre 2005: prélèvement de sable sur le secteur de la grande maire
- c) novembre 2005: dépôt de sable au niveau de zone érodée
- d) novembre 2005: reprofilage de la plage et de la dune
- e) novembre 2005: mise en place des ouvrages
- f) décembre 2005: vue d'ensemble de l'ouvrage terminé

- 2006 (fig. 4)



La végétation se développe peu mais les ouvrages ont joué leur rôle et ont capté des apports sableux d'origine éolienne jusque sur la partie haute du versant maritime de la dune.

Figure 4 - Secteur des bosquets en 2006.

- 2007 (fig. 5)

Le recouvrement végétal est toujours très faible à l'intérieur des ouvrages; quelques pieds de *Salsola kali*, *Cakile maritima*, *Anthemis maritima*, *Rumex roseus*, *Echinophora spinosa*, *Elytrigia juncea* et *Medicago marina* sont apparus.

Une laisse de mer s'est déposée naturellement dans les premiers casiers de l'ouvrage. Au dessus de l'ouvrage la végétation colonise petit à petit le sable.



Figure 5 - Secteur des bosquets en 2007.

Zone source de graines et boutures

La dune de la Grande Maire, située à quelques centaines de mètres du site d'expérimentation, présente une dynamique naturelle typique des systèmes littoraux du Languedoc-Roussillon; elle est en bon état de conservation et présente une densité végétale importante. Depuis la mer vers l'intérieur des terres, plusieurs communautés végétales très différentes se distinguent (fig. 6):

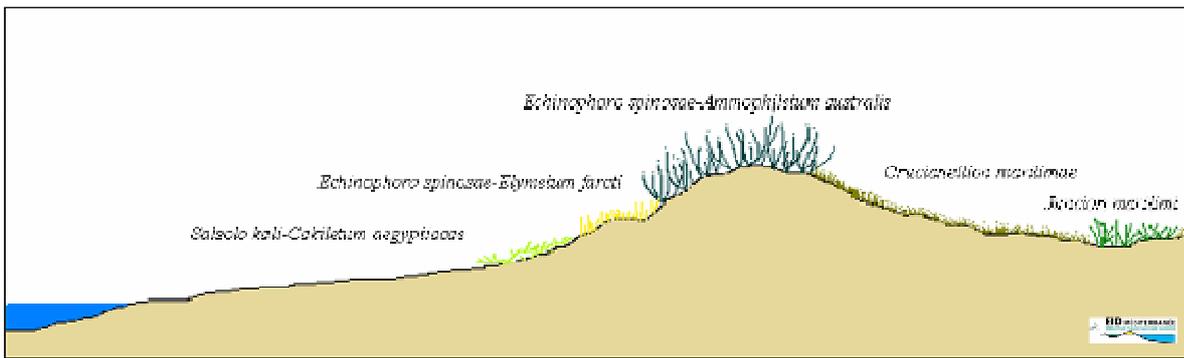


Figure 6 - Succession végétale typique d'une dune du Languedoc-Roussillon.

	Végétation de haut de plage	Dune embryonnaire	Dune vive	Dune fixée	Dépressions humides
Typologie CORINE biotope	Groupements annuels des plages de sable	Dunes embryonnaires méditerranéennes	Dunes blanches de méditerranée	Dunes grises	Prés salés méditerranéens à <i>Juncus</i>
Code Corine	16.12	16.2112	16.2122	16.22	15.51
Typologie NATURA 2000	Laisse de mer des côtes méditerranéennes	Dunes mobiles embryonnaires méditerranéennes	Dunes mobiles à <i>Ammophila arenaria subsp. australis</i> des côtes méditerranéennes	Dunes fixées du <i>Crucianellion maritimae</i>	Prés salés méditerranéens
Code N 2000	1210. 3	2110. 2	2120. 2	2210. 1	1410. 2
Classe	<i>Cakiletea maritimae</i>	<i>Euphorbio paraliae-Ammophiletea australis</i>	<i>Euphorbio paraliae-Ammophiletea australis</i>	<i>Euphorbio paraliae-Ammophiletea australis</i>	<i>Juncetea maritimi</i>
Ordre	<i>Euphorbietalia peplis</i>	<i>Ammophiletelia australis</i>	<i>Ammophiletelia australis</i>	<i>Ammophiletelia australis</i>	<i>Juncetalia maritimi</i>
Alliance	<i>Euphorbion peplis</i>	<i>Ammophilion australis</i>	<i>Ammophilion australis</i>	<i>Crucianellion maritimae</i>	<i>Juncion maritimi</i> et <i>Plantaginion crassifoliae</i>
Association	<i>Salsolo kali-Cakiletum aegyptiacae</i>	<i>Echinophoro spinosae-Elymetum farcti</i>	<i>Echinophoro spinosae-Ammophiletum australis</i>	<i>Malcomio littoreae-Crucianellietum maritimae</i>	

Figure 7 - Associations végétales présentes sur la dune de la grande Maire.

Cette dune est constituée d'une mosaïque d'habitats (fig. 7 et fig. 8) et présente une dune vive et une dune embryonnaire bien développées.

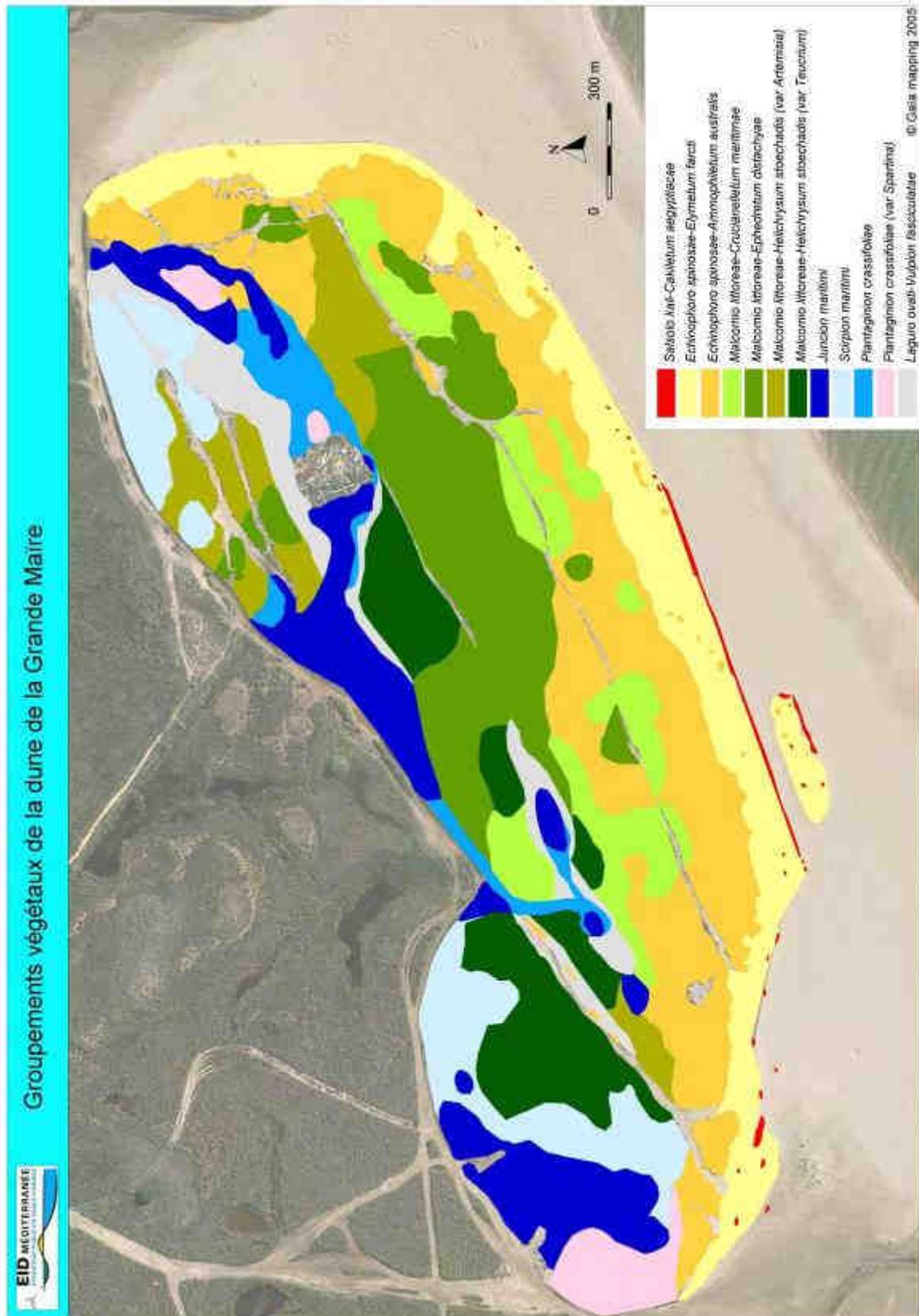


Figure 8 - Groupements végétaux de la dune de la grande Maire.

7.3. Matériels et Méthodes

Les expérimentations ont été réalisées sur une partie de la dune reconstituée du secteur des Bosquets, à l'intérieur des ouvrages de protection dunaire, qui offrent l'avantage de "casiers" délimités (fig. 9). Sur cette zone reconstituée, des semis et des bouturages directs ont été testés, ainsi que trois techniques d'aide à la végétalisation: géotextile biodégradable en jute, couverture végétale morte de *Phragmites australis* et dépôts de laisse de mer (débris végétaux et animaux déposés par la mer).

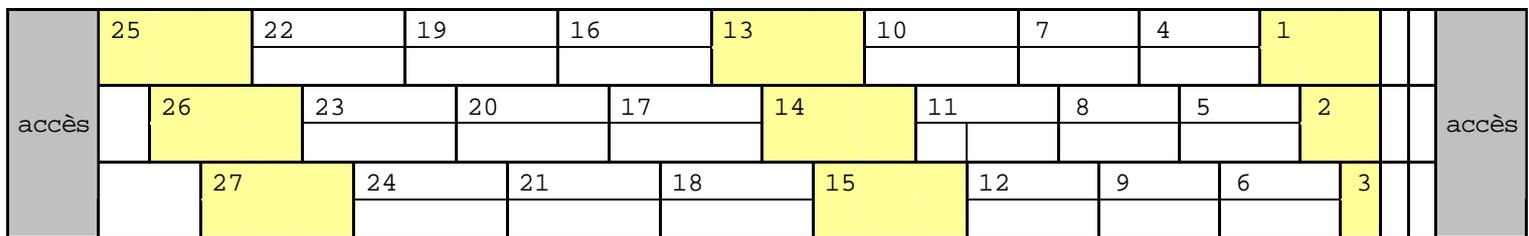


Figure 9 - Secteur des bosquets reconstitué lieu d'expérimentation (en haut photographie de la zone, en bas schéma des ouvrages).

Le tableau ci-dessus schématise le système de casiers délimités par les lignes de ganivelles (visibles sur la photo). Sur les 27 casiers choisis, 18 ont été divisés en 2 par un cordeau, afin de pouvoir réaliser deux traitements différents par casier (soit au total 36 placettes expérimentales), et 9 casiers n'ont fait l'objet d'aucun traitement particulier, afin de constituer des zones témoins (en jaune sur le schéma).

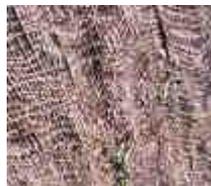
Dans chaque demi-casiers de 10 m², différentes techniques d'aide à la végétalisation sont testées (fig. 19):



- 8 placettes de semis, *Anthemis maritima*, *Medicago marina*, *Cyperus capitatus*, *Catapodium rigidum*, *Malcolmia littorea*, *Ammophila arenaria ssp. australis* et *Elymus farctus*, avec une espèce semée par placette.



- 4 placettes de boutures: 2 de *Ammophila arenaria ssp. australis* et 2 de *Elymus farctus*.



- 1 placette recouverte de géotextile.



- 3 placettes recouvertes de tiges de *Phragmites australis*.



- 4 placettes recouvertes de laisse de mer.



- 7 placettes de semis avec du géotextile.



- 5 placettes de semis avec une couverture végétale morte: tiges de *Phragmites australis*.

- 2 placettes de boutures avec du géotextile.





- 2 placettes de boutures avec de la couverture végétale morte (tiges de *Phragmites australis*)

Faciliter la reprise spontanée de végétation

Dans les casiers les plus bas, au niveau du haut de plage, des débris issus de la laisse de mer sont entreposés, en alternance avec la couverture végétale morte (tiges de *Phragmites australis*). La laisse de mer est ici utilisée en pied de dune pour favoriser la reprise de végétation. Les tiges de phragmites sont également déposées en pied de dune mais aussi en complément des plantations et des boutures sur le milieu et le haut de l'ouvrage. Le géotextile est quant à lui utilisé seulement en complément des plantations et boutures sur le milieu et le haut de l'ouvrage. Deux traitements simples (géotextile et phragmites) ont été réalisés comme témoins sur la partie médiane de l'ouvrage.

Le géotextile, les dépôts de laisse de mer et la couverture végétale morte permettent de stabiliser le sable, de maintenir une humidité supérieure en surface et d'augmenter les apports en matière organique.



Figure 10 - Laisse de mer.

La laisse de mer présente aussi l'avantage de contenir des graines de nombreuses espèces appartenant à la végétation annuelle de haut de plage. La laisse de mer est déposée dans 4 demi-casiers (fig. 10).



Figure 11 - Bottes de *P. australis*.

La couverture végétale morte est déposée dans 10 placettes. Les tiges de phragmites sont étalées uniformément sur les secteurs concernés.

Dans les placettes comprenant seulement des phragmites, une botte 1/2 a été utilisée.

Dans les placettes de semis x phragmites ou de boutures x phragmites, une botte de *Phragmites australis* a été déposée dans chaque placette (fig. 11).



Le géotextile biodégradable a été installé sur 10 placettes de 10 m²: 9 placettes avec des semis ou boutures des différentes espèces et une placette recouverte seulement de géotextile (fig. 12).

Figure 12 - Géotextile biodégradable en fibres de jute.

Semis et boutures

La répartition des semis et des boutures sur la dune reconstituée a été établie en fonction de la zonation naturelle des espèces sur la dune de la grande Maire.

De haut en bas: *Catapodium rigidum*, *Cyperus capitatus*, *Medicago marina*, *Elymus farctus*, *Anthemis maritima*, *Ammophila arenaria ssp. australis* et *Malcolmia littorea*.

Bouturage direct d'oyat et de chiendent

Le chiendent des sables (*Elymus farctus*) et l'oyat (*Ammophila arenaria ssp. australis*) sont deux espèces édificatrices majeures respectivement pour la dune embryonnaire et la dune vive.

Le bouturage direct d'oyat a déjà été réalisé dans l'Hérault et a montré son efficacité, au contraire le bouturage direct de chiendent été peu expérimenté pour le moment.



Les touffes d'oyat et de chiendent des sables prélevées sont fractionnées en brins, qui sont ensuite préparés pour être bouturés. Ces brins doivent comporter deux nœuds au minimum au niveau du système racinaire et le tiers supérieur des feuilles doit être raccourci pour favoriser la reprise (fig. 13).

Figure 13 - Préparation des boutures (coupe des feuilles).

Un plantoir permettant de faire des trous de 30 cm de profondeur est utilisé afin que la tige des boutures soit bien enterrée dans le sol. Le sable doit ensuite être tassé autour de chaque plant. Les boutures des deux espèces sont plantées en quinconce avec une densité de 5 plants/m².

Pour l'oyat comme pour le chiendent sur 4 placettes de 10 m², 50 boutures d'oyat sont mises en place (fig. 14).



Figure 14 - Mise en place des boutures d'oyat à l'aide du plantoir.

Semis

Les graines des différentes espèces ont été récoltées à plusieurs périodes (juillet, août, septembre), et à différents endroits de la dune au sein des associations végétales suivantes: *Echinophoro spinosae-Elymetum farcti*, *Echinophoro spinosae-Ammophiletum australis*, *Malcomio littoreae-Cruciannelletum maritimae*. Les récoltes se sont faites sur différents individus pour chaque espèce, ceci afin d'optimiser la variabilité des semences et les chances de germination.



Figure 15 - Séchage des graines au laboratoire.

Les fruits ou les graines récoltés ont ensuite été triés et séchés puis conservés au frais à l'abri de la lumière. Peu de temps avant l'implantation sur la dune, les semis des différentes espèces ont été préparés. Le poids des graines de chaque espèce a été déterminé afin de connaître la quantité

nécessaire pour atteindre une densité de 50 graines par m² pour chaque placette de semis (fig. 15 et fig. 16).



Figure 16 - Pesée des graines.

Les graines ont ensuite été mélangées avec une terre sans engrais chimique utilisée en agriculture biologique, constituée de tourbe blonde, terre végétale, tourbe brune, écorces compostées, compost de fumiers et algues (fig. 17).



Figure 17 - Photo de gauche mélange des graines et de la terre, de haut en bas: graines d'oyat / terre / mélange de terre et de graines. Photo de droite: Unité de semis contenant 10g de terre et environ 10 graines.

Ce mélange a été réalisé afin de faciliter le semis notamment pour les espèces possédant des graines de très petite taille comme *Malcolmia littorea*. Il permettra également de favoriser le développement des plantules.

Sur chaque placette, les semis sont réalisés en quinconce, avec une densité de 5 trous par m². Dans chaque trou d'une profondeur de 10 cm, 10 g de terre et environ 10 graines sont déposées (fig. 18).



Figure 18 - Semis *in situ* à une dizaine de cm de profondeur.

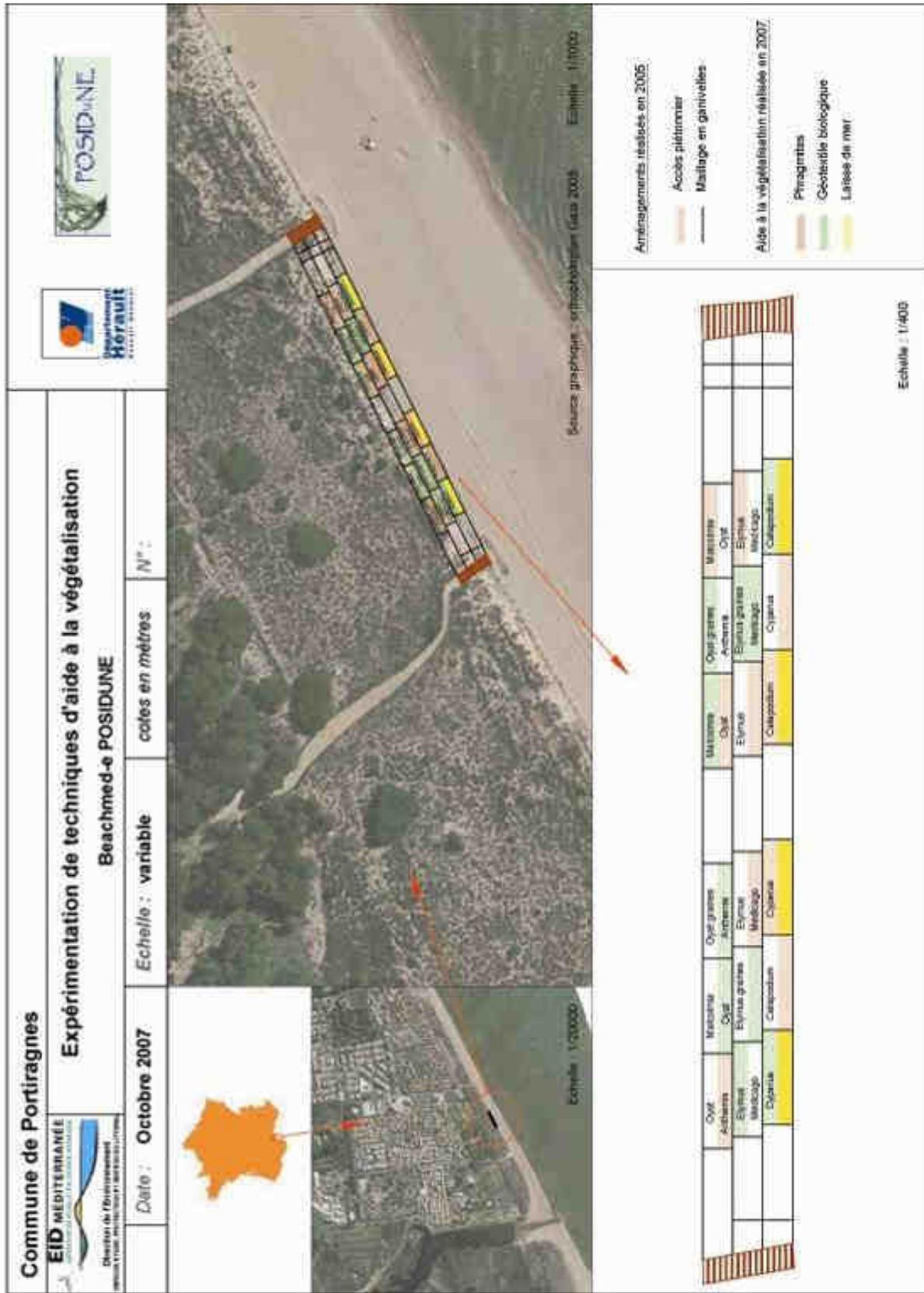


Figure 19 - Expérimentations à l'automne 2007 sur le site pilote.

7.4. Résultats et discussion

L'ensemble des techniques d'aide à la végétalisation et les différentes combinaisons ont été mises en place sur le site à l'automne 2007 (fig. 20). La reconstitution dunaire et l'apport sableux ayant été réalisés il y a deux ans, la salinité du substrat est assez réduite pour permettre le développement de la végétation.

Les résultats et l'évolution de la zone pourront être appréhendés dès le printemps 2008, mais un suivi de la dynamique de végétation sera intéressant à mettre en place sur plusieurs années. Avant la réalisation de l'expérimentation la zone d'étude a été finement cartographiée et les individus d'espèces dunaires présents ont été répertoriés. Connaissant les densités de semis initiales ainsi que le nombre de boutures, un comptage précis pourra être réalisé par placette. Ce suivi permettra d'évaluer:

- le taux de survie des boutures
- le taux de germination des semis et la survie des plantules
- l'influence du géotextile et de la couverture végétale morte sur le développement des boutures et des semis

En complément de ce suivi en terme de survie, un suivi plus global du recouvrement végétal et de l'évolution du site sera mené notamment grâce à un suivi photographique régulier.

Enfin l'ensablement des ouvrages sera contrôlé grâce à des profils topographiques, l'objectif étant d'avoir une idée de l'influence des plantations sur l'ensablement des casiers et réciproquement. Pour cela un état de lieux de la topographie du site a été établi durant l'automne 2007 avant les plantations (fig.21).



Figure 20 - Réalisation de l'expérimentation à l'automne 2007.

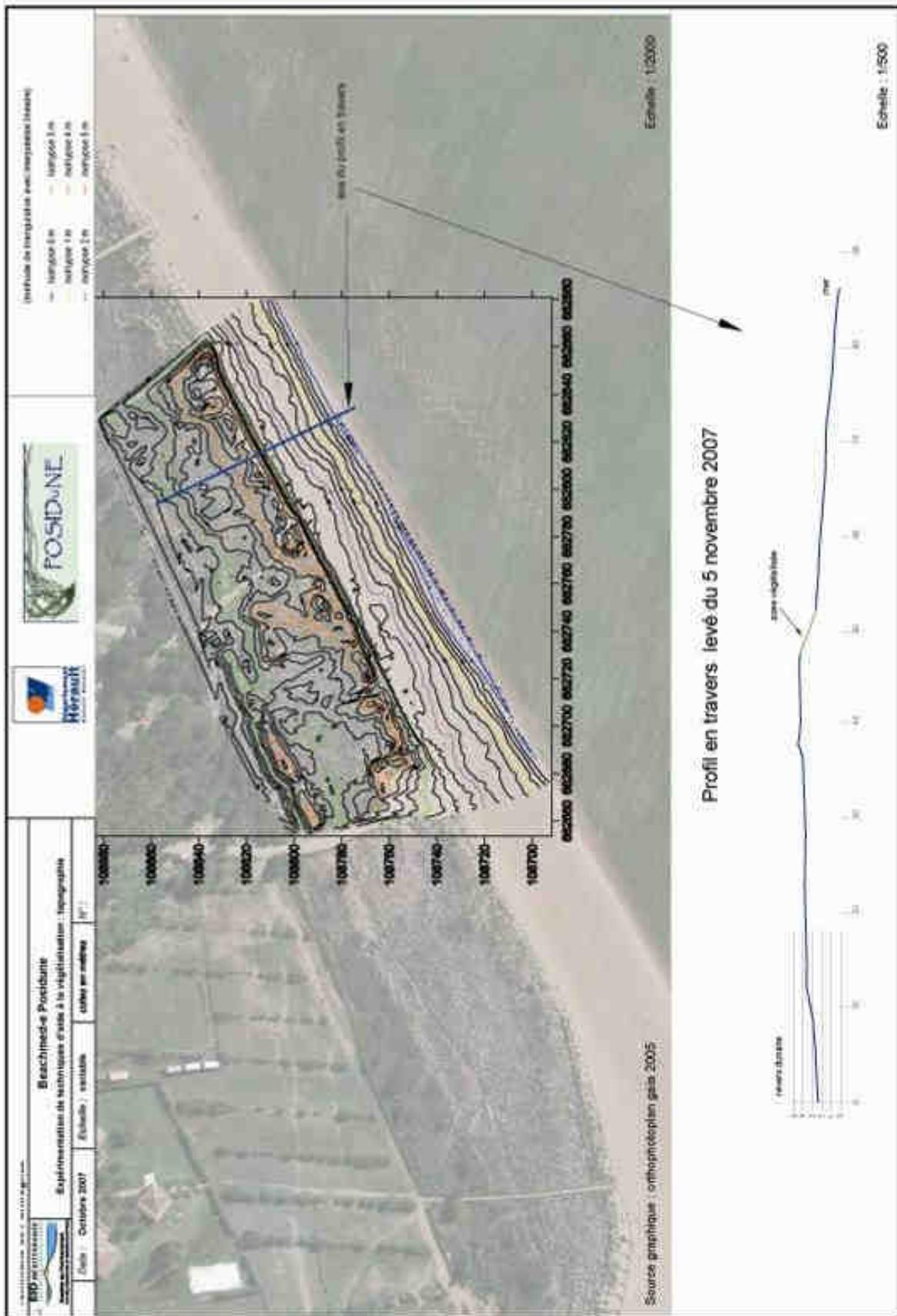


Figure 21 - Topographie à l'automne 2007 du site pilote.

7.5. Considérations finales

La récolte des semences et les semis des différentes espèces se sont révélés plus rapides que les bouturages. Si les espèces semées présentent un bon taux de reprise, cette technique de semis pourra être davantage développée et utilisée. Les espèces semées présentant les meilleurs taux de reprise seront sélectionnées.

Concernant les boutures, il sera possible de comparer le taux de reprise du chiendent à celui de l'oyat, sachant que ce dernier est généralement bon. Il sera également intéressant de comparer le développement du chiendent suite à son implantation par semis et par boutures. Cette espèce qui présente un taux de germination élevé en laboratoire, serait intéressante à utiliser davantage pour la végétalisation dunaire car contrairement à l'oyat elle exige des apports sableux moins importants.

Des informations pourront être tirées concernant les méthodologies optimales de bouturage et de semis à savoir l'utilisation ou non de géotextile ou d'une couverture végétale morte. Enfin, il sera possible d'évaluer l'effet du géotextile par rapport à celui de la couverture végétale morte et d'établir des préconisations qui auront des conséquences en terme de coût puisque le coût du géotextile est le double de celui de la couverture végétale morte.

L'ensemble de ces résultats sera bien sûr conditionné par les conditions climatiques et l'état de conservation global du site.

7.6. Bibliographie

- Allag-Dhuisme F., Le Dain A.Y. (1986) - Les dunes du golfe du lion: aménagement et gestion. IARE.
- Barbel P. (1998) - Fonctionnement et réhabilitation des dunes en milieu nord-méditerranéen. Rapport EID-Méditerranée.
- AGENC (1994) - Restauration des dunes à faible dynamique édificatrice en Corse. « Territoires dégradés: quelles solutions ? ».
- EID-Méditerranée (PANTEL S) (2002) - Végétalisation expérimentale des cordons dunaires du littoral héraultais. Programme de l'année 2000 et premiers résultats sur l'année 2001-2002, pour le Conseil général de l'Hérault et le Conservatoire de l'Espace Littoral et des Rivages Lacustres.
- EID et IARE (CEPREL) et PAM (1992) - Flèche de la Gracieuse, végétalisation du cordon dunaire expérimental, compte rendu de la première année de suivi.
- EID (Moulis D., Barbel P.) (1999) - Réhabilitation et gestion des dunes littorales Méditerranéennes Françaises. Collection: Manuels et méthodes. Brgm Ed: 75-91.
- EID et IARE (1987) - Plage et dunes du Golfe du Lion, analyse des milieux et de leur fonctionnement, protection et restauration par des ouvrages légers, éléments méthodologiques.

- EID et IARE (1988) - Transfert et innovation technologiques, ministère de l'environnement et CR LR - Gestion des espaces dunaires et aménagement du littoral languedocien, état d'avancement des travaux. Contrat plan Etat Région.
- EID et IARE (CEPREL) (1994) - Techniques de rehabilitation des plages et des dunes du littoral nord méditerranéen à l'aide d'ouvrages à effet brise vent. Génie civil / génie côtier - Actes des 3èmes journées nationales, Sète, 2-4 mars 1994. Presses universitaires de Perpignan, Collection Etudes.
- EID et IARE (CEPREL) (1997) - Inventaire de techniques innovantes en matière de protection contre l'érosion: réflexions sur les applications possibles en Languedoc-Roussillon.
- Favennec J., Barrere P. (1997) - Biodiversité et protection dunaire. Lavoisier Ed. 311p.
- Heurtefeux H., Richard P. (2005) - Vingt ans de protection des dunes littorales par des techniques douces: bilan et perspectives à travers quelques exemples en Méditerranée française. Editions l'Harmattan, p.143 à 166.
- IARE, EID, CG 34, CELRL (1999) - Etude de faisabilité d'opération de végétalisation sur le littoral héraultais, base de données floristiques.
- Le Drenn A. N. (1998) - Réhabilitation écologique et paysagère des espaces naturels dégradés en Corse. AGENC, CELRL.
- Lemauiel S., Gallet S., Roze F. (2003) - Sustainable management of fixed dunes: example of a pilot site in Brittany (France). C.R.Biologies, 326:183-191.
- Manfe S., Rooryck V. (2001) - Suivi d'une revégétalisation expérimentale de dunes du littoral Héraultais. Rapp. Stage. EID Méditerranée.
- Miossec A. (1998) - Les littoraux entre nature et aménagement. Ed Sedes.
- Moulis D., Favennec J., Paskoff R. (2001) - Programme national de recherche "Recréer la Nature". Synthèse des recherches en restauration. Réhabilitation des systèmes dunaires. Pour le Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris.
- Nadler C. (1999) - Reconquête biologique et paysagère du littoral héraultais. Etude de faisabilité d'opérations de végétalisation. IARE.
- OTDA (1995) - Restauration et production de la végétation des dunes littorales mobiles de le « Devesa de l'Abuferà ». Valencia.
- Paskoff R. (1985) - Les littoraux: impact des aménagements sur leur évolution. Ed Masson, Coll.géographie.
- Pecheur E. (2002) - Suivi scientifique des opérations expérimentales de végétalisation de cordons dunaires sur le littoral héraultais. Université Montpellier II, EID Méditerranée.
- Richard P. (1994) - La gestion des dunes littorales en France – essai d'approche méthodologique. Mémoire de DEA de géographie sous la direction d'Alain Miossec, Université de Nantes.
- Roze F., Lemauiel S. (2004) - Sand Dune Restoration in North Brittany, France; A 10-Year Monitoring Study. Restoration Ecology, 12 (1): 29-35.

8. CHARACTERISATION DES DUNES COTIERES – REGION CRETE

IMBC – C. Dounas, P. Koulouri – kdounas@her.hcmr.gr

FORTH/IACM – E. Koutantos, N. Kampanis – ekoutant@iacm.forth.gr

8.1. Introduction

As it was presented, in detail, in the final report of FORTH/IACM for POSIDUNE project phase A, the part of the coastal area in the north-western part of Crete between Georgioupolis and Episkopi villages consists of a flat sandy beach, approximately 9–10 km long and 100–300 m wide, which includes the remnants of various dispersed patches of sand dunes intercepted by large coastal tourist developments and pieces of cultivated land. This coastal area belongs in part to a EU Natura 2000 site (GR4340010) covering in total a surface of protected area of 4430 ha. According to the Directive 92/43/EEC and the Greek legislation it has also been designated together with the estuary of Almyros river to the west as an Important Bird Area (IBA).

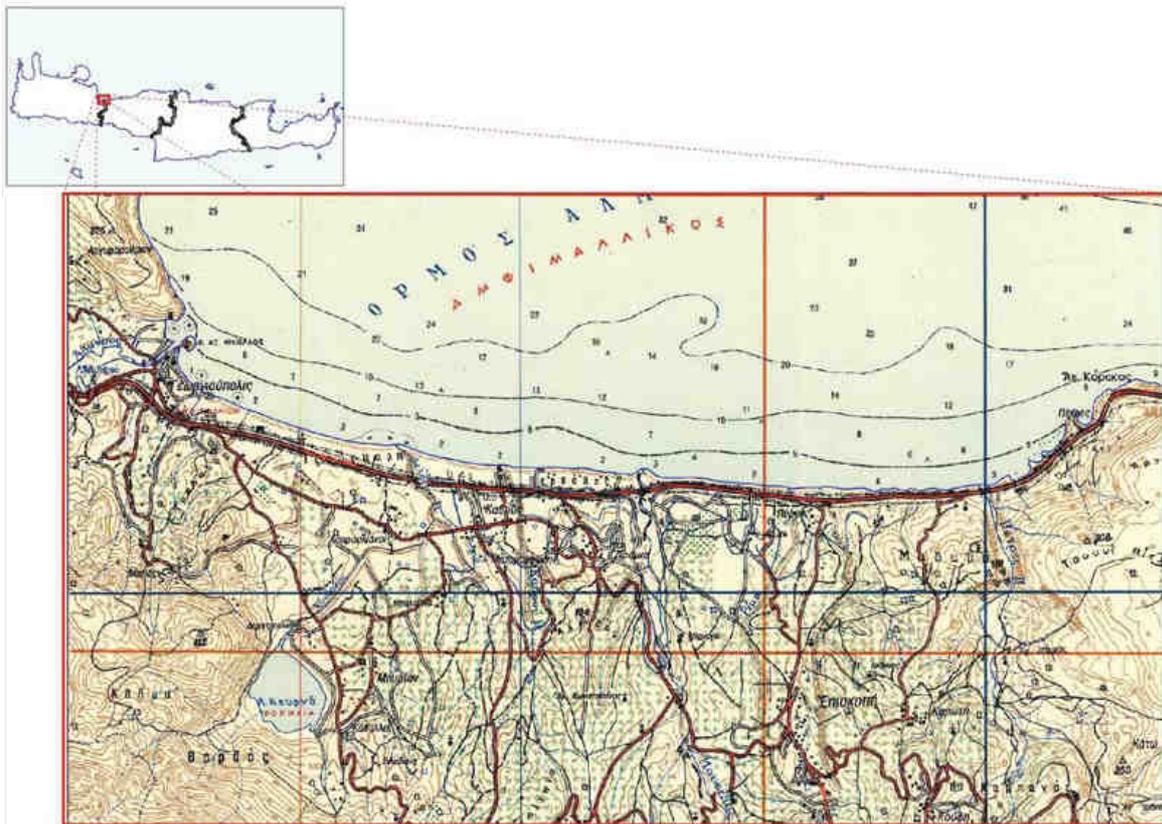


Figure 1 – General view of the coastal area between Episkopi and Georgioupolis in the North – West coasts of Crete.

The surrounding area is largely composed of limestone giving rise to typical Mediterranean soils and landscape features and a well-developed freshwater system of Crete, which is the most important in the south-eastern Mediterranean basin. This system includes, except for the lake Kournas and the Almyros river, which is the only one of Crete that flows throughout the year, an extended network of cold water springs which supplies with fresh water the coastal habitats especially during the winter period.

The coastal area between Georgioupolis and Episkopi is subject to insensitive development, mainly tourism infrastructures, which in less than 15 years have degraded the extended local coastal dune systems. Coastal dune remnants are restricted in a narrow belt close to the coastline and have also been subject to various anthropogenic pressures. As an example, the inland proximate part of the foredunes is polluted by sewage contaminated runoff coming from several streams that incise the sandy substrate of the dune. All initial field observations made during POSIDUNE phase A have identified an almost continuous lack of coherence between the beach and the remaining dune systems as a result of various structures on the beach that act as physical barriers and impede sediment transfer from the beach zone to the dunes. Today, only a small part of the local dunes remains in a rather good condition as it is not fragmented (yet) by human interventions and is still characterized by the typical Mediterranean vegetation of the dunes. This coastal area is located at a distance of less than two kilometers to the east of Georgioupolis village and it is chosen as the most suitable site for the seasonal monitoring of the area according to POSIDUNE Phase C specifications.

8.2. Description du site d'étude

The site area selected for monitoring is a small part of the coastal zone between Georgioupolis and Episkopi villages, with a length of about one kilometre (966 m). This area is the only one that remains today under a rather natural condition and presents a well developed dune system (fig. 2a). The width of the coastal zone here varies between 180 meters to the west up to 290 metres to the east. The lower unvegetated supra-littoral part of the beach has a width varying from 30 to 50 metres. The sediment consists of medium to coarse grained sand with a few mid-littoral patches of small pebbles which appear especially during winter indicating the high exposure of this beach to the wave action. This first zone is followed by a rare vegetated zone 20-30 meters wide, covered mostly by numerous sea hollies (*Eryngium maritimum*) and further inwards by a third zone, characterized by numerous clumps of marram grass (*Ammophila littoralis*), 30-40 m wide and a maximum altitude of three to four metres above

sea level. This zone is structured by a white shifting dune system that hosts from mid-spring up to late autumn a high diversity of typical dune vegetation. A fourth much lower than the previous zone stands between the national high-way from Rethymnon to Chania and is covered by dune-slack reed vegetation. This zone is almost permanently flooded in winter and spring while it remains completely dry during the summer season. The beds of two small streams cross the dune system and reach the upper part of the beach area (fig. 2). Though the area is part of the Natura 2000 site GR4340010, today it is threatened mostly by tourist infrastructure development and recreational activities in summer. For example, during the Posidune Pilot Study (May 2007) the local beach area was occupied by seven organized areas with numerous sun beds and umbrellas and a semi-permanent kiosk that was constructed in the middle of the system of the dunes. Additionally, the upper part of the coastal zone was transformed to illegal parking while nine small roads and paths that intersect vertically the dunes up to the beach have also been illegally constructed.

8.3. Matériels et Méthodes

Sampling

Coordinate of the sampling point locations were defined by using a GPS system (Garmin GPSMAP 60CSxsystem with an accuracy of ± 2 m). Water samples were collected by using 2lt water samplers (dark plastic bottles) and superficial sediment samples were collected by using plastic corers. Samples were analysed in order to study the chemical characteristics of sea water (fig. 2). Sediment samples were collected from mid-littoral zone and more specifically from the mean tide level (st. 1) and upper tide level (st. 2). The third sample (st. 3) was collected inshore at a distance of about 30 m from the coastline which coincides approximately with the half of the local foredune zone. The fourth sample was collected at the seaward base of the dunes (st. 4) while the fifth one (st. 5) at the highest part of the dunes and the last one (st. 6) at the most landward base of the dunes. The water samples were collected along a small stream that crosses the study area (fig. 1). The first sample (st. A) was taken at the level of the highway of Rethymnon-Chania area (fig. 1), the second one (st. B) in the middle of the dune system while the third at the marine part of the stream exit (st. C). Both water and sediment samples were preserved at 4 °C until analysis upon return to the laboratory.

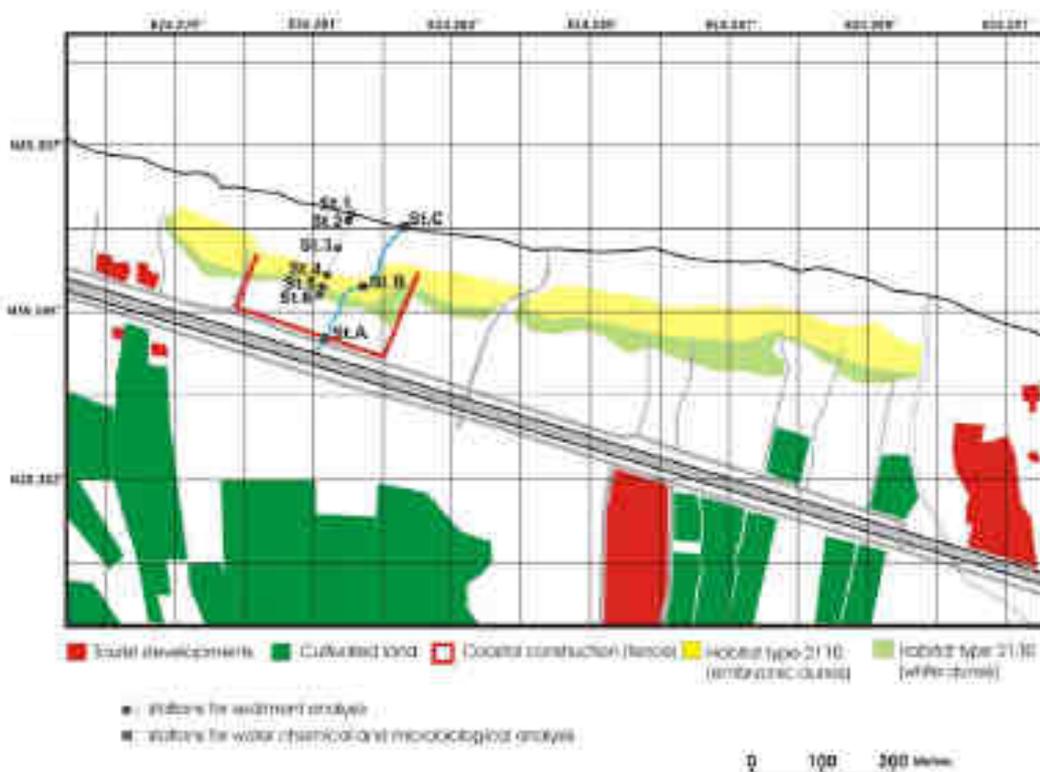
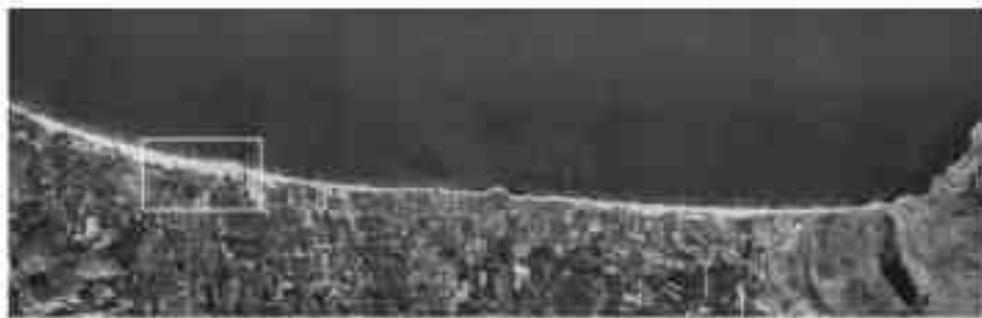


Figure 2 – Coastal zone between Georgioupolis and Episkopi. Map of the study area indicating the land use and the position of the sampling stations.

Inorganic nutrients and particulate organic carbon analyses

All water samples were filtered through Whatman GF/F glass fiber filters in order to estimate particulate organic carbon (POC). Water sub-samples (200 ml) were collected from the filtrate for nutrient analysis (PO₄, NH₄, NO₂, NO₃), frozen immediately, and stored at -20 °C until further analysis at the laboratory. Nitrate (NO₃), nitrite (NO₂), ammonium (NH₄) and phosphate (PO₄) concentrations were determined according to the procedures of Strickland and Parsons (1972), Grasshoff et al (1983) and Parsons et al (1984) using a Beckmann DU65 spectrophotometer. POC concentrations were analysed using a Perking Elmer CHN 2400 analyzer according to Hedges and Stern (1984).

Sediment analysis

Grain size analysis of the sediment was carried out using the technique as described by Buchanan (1984). Samples were sieved wet with distilled water with sieves of mesh-size $63 \cdot m$ to separate sand from mud and silt. After this procedure the sand fraction was dried and sieved with a grade of sieves from $-2 \cdot (4 \text{ mm})$ to $4 \cdot (63 \cdot m)$ every $0.5 \cdot$ (where \cdot is the $-\log$ to the base 2 of the grain diameter). The sediment fractions retained in each sieve and then weighed. The fine fraction (less than $63 \cdot m$) was subjected to pipette analysis based on Stoke's law.

Water quality measurements (Microbiological analysis)

Enumerations of total coliforms, faecal coliforms and *E. coli* were identified by using the multiple tube method (MPN) and confirmation of the positive tubes was performed according to Bathing Water Quality Directive protocol (76/160/EEC). Incubation took place at $37 \text{ }^\circ\text{C}$ for total coliforms, and $44 \text{ }^\circ\text{C}$ for faecal coliforms.

Meteorological monitoring

The meteorological station used for monitoring basic weather parameters in the study area is located close to the village Vrisses and belongs to official network of the National Observatory of Athens. The type of the station used is a fully equipped DAVIS Vantage Pro2 wireless fan-aspirated system. This is the newest station of the network as it has been operating from the beginning of September 2007 covering meteorologically the wider area of the Gulf of Georgioupolis. Parameters measured included mean temperature (in $^\circ\text{C}$, with maximum et minimum recordings), precipitation (mm) and mean wind speed (with maximum recording) as well as direction. Station raw weather data were recorded and stored every 10 min. Processed results are given in Appendix II as mean monthly climatological summaries.

8.4. Résultats et discussion

In Fig. 3 the average monthly temperature, precipitation and wind speed values recorded in the site area by the newly established (September 2007) meteorological Station in Vrisses village are given. Maximum temperature values remain, as expected for a coastal part of Crete, in considerably high levels throughout the monitoring period varying between 38°C (September 2007) and 19°C (January 2008). Nevertheless, monthly average values range from 24 to $10 \text{ }^\circ\text{C}$ while minimum values recorded in February 2008 reached the level of frost for an

extended period of time (>24 hours). This very unusual, for Crete, weather event was the main cause for the severe and massive destruction of the vegetation of the dune observed this winter throughout the site area (Appendix III). Precipitation rates recorded were normal reaching the highest level in December and February (fig. 3). Finally, low average wind speeds recorded were indicative of long periods of mild conditions interrupted by extreme events with winds exceeding a maximum speed of 70 m/second in many occasions. It should be noted that in most of these events that were prominent mainly in winter time, wind direction was N to NW which is the spectrum of wind that "feeds" with sedimentary material to local dune system. Sediment grain size analysis of samples taken from sampling stations located in a transect crossing the study area is given in Figure 4. These sediment samples were taken 24 hours after an extreme gale with strong winds coming from northern directions. Large amounts of thin well sorted sand deposited by the wave action to the upper parts of mid-littoral zone (station 2) were carried to the internal parts of the beach and at a second stage provide with thin sand material the foredune area. Most probably this is the major mechanism for the development of the extended and healthy dune systems that used to cover in the past in an almost uninterrupted belt the coastal area between Georgioupolis and Episkopi villages. Finally, according to the values of sorting and skewness sediment coefficients (fig. 4) it is also evident that the Aeolian energy applied on the beach by the prevailing locally north direction winds comprises the sediment transporting agent that carries and deposits progressively thinner sandy material in the foredune area.

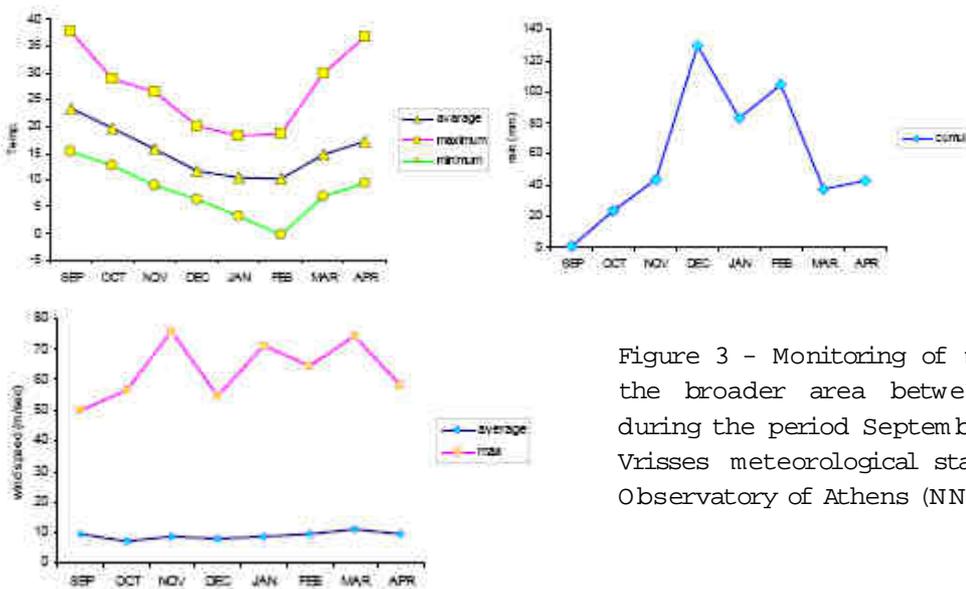


Figure 3 - Monitoring of meteorological parameters within the broader area between Georgioupolis and Episkopi during the period September 2007 - April 2008. Data from Vrisses meteorological station - Network of the National Observatory of Athens (NNOA).

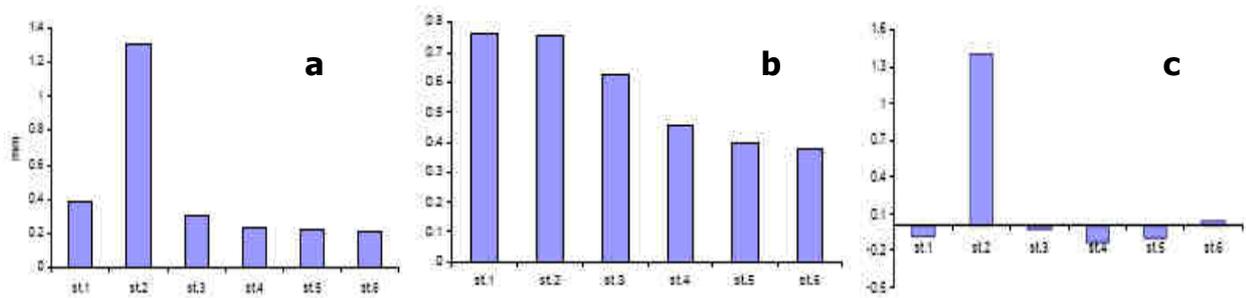


Figure 4 - Sediment analysis parameters from samples collected in February 2008 along a transect crossing the study area. (a) Median Diameter, (b) Sorting, (c) Skewness (for stations position, see fig. 2).

Examination of both chemical and microbiological water quality parameters from samples collected during the spring period (April 2008, fig. 2) from the small stream crossing the local dune system revealed that the winter flood waters that lie stagnant in the upper base of the dunes were found polluted by sewage effluents coming from unknown inland anthropogenic resources. The most striking finding was that this water was reaching finally the beach area reducing locally the bathing water quality (tab. 1). Water chemistry analysis of the same samples support the above-mentioned water quality conditions (tab. 2). Nevertheless, it should be noted that the considerably high concentrations of particulate organic matter measured from the sub-littoral station 3 rather reflect sediment resuspension due to breaking on the beach waves and the resulting contamination of the sample with sediment than an extreme coastal organic load of anthropogenic origin.

Station	Total colifoms	Faecal colifoms	Faecal streptococci	<i>Escherichia coli</i>	Pseudomonas
Georgioupolis 1	30	9	110	9	4
Georgioupolis 2	580	160	150	160	30
Georgioupolis 3	10	6	115	6	30

Table 1 - Microbiological parameters in inland (station 1, 2) and marine water resources (station 3) in the study area (winter 2008). All measured concentrations higher than the guide values included in EU Directive on bathing water quality are indicated in red.

Station	PO ₄ (μM)	NO ₃ (μM)	NO ₂ (μM)	NH ₄ (μM)	POC (mg/l)
Georgioupolis 1	1.3	3.7	0.02	14.8	2.4
Georgioupolis 2	2.1	4.2	0.01	17.9	5.4
Georgioupolis 3	3.4	1.8	0.02	1.4	19.5

Table 2 - Chemical parameters in inland (station 1, 2) and coastal marine water resources in the study area (winter 2008).

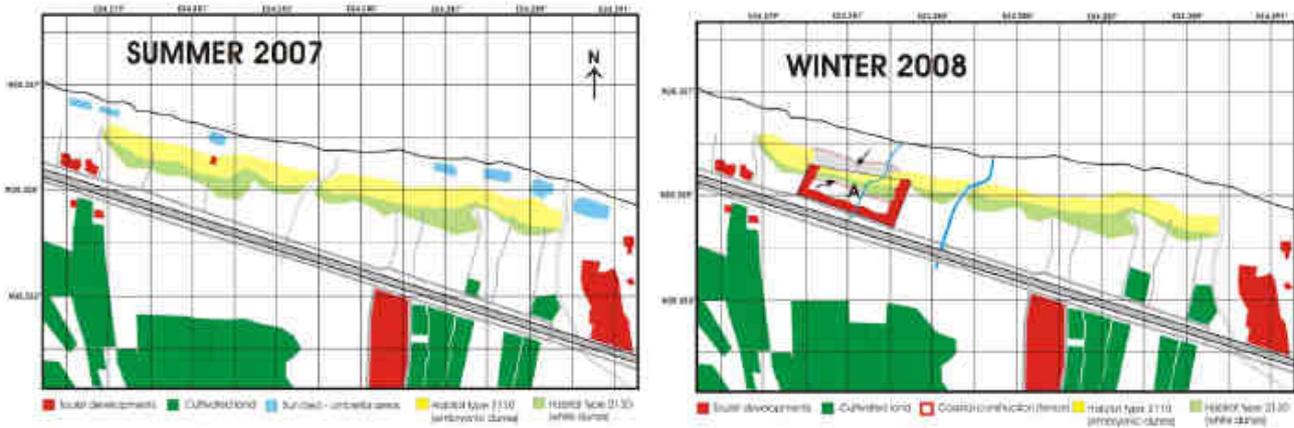


Figure 5 – Comparison between land use changes and direct sand dune destruction incidents that took place during monitoring period of the site (Summer 2007 – Spring 2008). The position of a recently constructed (January 2008) cement based fence for the delimitation of a new tourist resort in the site area indicated with A.



Figure 6 – Several aspects of the 230 m long part of the site area destroyed due to the construction of a cement based fence last January of 2008.

In figure 5 the part of the local dune system destroyed almost completely by the construction of a 230 m long cement based fence in the centre of the site area is shown.

According to information from the local authorities the owner of this piece of land has attempted to develop another coastal tourist resort in an area of about 20000 m². This unexpected event was denounced to the local authorities as an illegal activity because the coastal dunes of Georgioupolis coastal zone belong to Natura 2000 network (code GR4340010) and are today under environmental protection. Nevertheless, it is expected that illegal activities will continue and this ultimate intact part of the dune system between Georgioupolis and Episkopi will be eliminated in a few years as the local authorities seem not to be capable in order to prevent them. In fig. 6 several aspects of the foredune destruction that took place during the building of the cement based fence within the site area are shown.

8.5. Considérations finales

The sand dunes that fringe the coastal landscape between Georgioupolis and Episkopi villages serve an invaluable purpose. They act as a barrier to the local forces of waves and winds absorbing the impact of high-energy storms and also preventing from the intrusion of waters the inland areas. Throughout the monitoring programme undertaken in the area in the framework of Posidune project - Phase C and especially during the winter period it was evident that the highenergy storm waves flattened the beach and eroded the sand substrate flattening also the seaward part of the local dune system. On the other hand, during the more calm periods, waves carried progressively sand from the surf zone to the beach. This material was finally transported inland by the aeolian energy and fed with sand the local dunes. Undoubtedly, the only remaining intact part from the extended in the past dunal system between Georgioupolis and Episkopi is the 1000m long coastal zone that was chosen as the site area for monitoring. This area has been designated by the Greek authorities as a Natura 2000 site under the code GR-4340010. Today, this part of the coastal zone is the only efficient urbanisation, illegal road constructions, human recreation, cropping and grazing of animals accelerating or worsening the observed damage of the dunes by destroying the vegetative cover and promoting development of extended breaches. The 30000 m² cement based fence that was constructed last winter for the future development of a tourist resort on the sand dunes of the site area has already created a large breach of the dunes and this may be the cause for their final extinction from this particular part of Crete.

In Greece today 296 NATURA 2000 sites have been proposed as Sites of European Community Interest (SCI). Twenty-nine of these sites are located on the island of Crete as it was expected that they should protect a wide variety of habitat types from sea level to the oro-Mediterranean zone. The percentage area covered by the Cretan sites (31% of the island area)

is the highest in comparison with the other regions of Greece and this relatively large area proposed for designation in NATURA 2000 is due to the heterogeneity of the Cretan environment.

As far as the protection of the remaining patches of the sand dune habitats of the northwest coasts of Crete is concerned, despite the fact that most of them have been proposed for protection in Natura 2000 program, more effort for conservation is needed. It is recommended that the local authorities should focus on what is left and actively protect every remaining patch of sand dunes that is today under a high risk of extinction. The existing EU legislation, e.g. Habitats Directive, offers an opportunity for the prohibition of any land-use change and most of all illegal building within the sand dune areas. Nevertheless, the Habitats Directive is not at all a panacea as up-to-day the designation of many sand dune systems as specially protected areas in many coastal parts of Greece and many other Mediterranean countries has not prevented them from severe human impacts and large negative effects. A much stricter protection is needed and this can only be achieved after raising effectively the local conservation awareness.

8.6. Bibliographie

- Buchanan J.B. (1984) - Sediment analysis. In: Methods for the study of the marine benthos, N.A. Holme and A.D. McIntyre (eds). Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 41-65.
- Grasshoff K., Ehrhardt M., Kremling K. (1983) - Methods of seawater analysis. Verlag Chemie, 419 pp.
- Hedges J.I., Stern J.H. (1984) - Carbon and nitrogen determinations of carbonate-containing solids. *Limnology and Oceanography*, 29, 657-663.
- National Observatory of Athens (2008) - Meteorological data from the Vrisses station Crete for the period September 2007- April 2008.
- Parsons T.R., Maita Y., Lalli C.M. (1984) - A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press.
- Strickland J.D.H., Parsons T.R. (1972) - A practical handbook of seawater analysis. *J. Fish. Res. Board Can. Bulletin* 167.