

Programme INTERREG Italie-France Maritime 2014 – 2020 Axe II

Projet “GIREPAM – Gestion Intégrée des Réseaux Ecologiques à travers les Parcs et les Aires
Marines”.

Accord entre le Consortium de Gestion entre l'Aire Marine Protégée de Tavolara-Punta Coda Cavallo et l'Université de Cagliari - Département des Sciences Chimiques et Géologiques.



RAPPORT TECHNIQUE FINAL



Le Responsable de la Recherche

Prof. Paolo E. Orrù

Les Collaborateurs

Dott. Giacomo Deiana

Dott. Valentino Demurtas

Dott. Ing. Andrea Sulis

La cooperazione al cuore del Mediterraneo

La coopération au coeur de la Méditerranée



Interreg



UNIONE EUROPEA



GIREPAM



AREA MARINA PROTETTA
TAVOLARA
PUNTA CODA CAVALLO



MINISTERO DELL'AMBIENTE
PULIZIA E GESTIONE DEL TERRITORIO

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Sommaire

Préface.....	3
Introduction.....	4
La Posidonia oceanica et les banquettes.....	5
La Posidonia oceanica.....	5
Modes de dégradation du matériel foliaire de Posidonie sur les plages submergées.....	6
La Banquette.....	10
Analyse du cadre juridique de référence	14
Les zones de stockage temporaire de Posidonia oceanica retirée de la plage.....	14
Hydrodynamique côtière et dépôts foliaires à Posidonia oceanica.....	17
Aspects de l'hydrodynamique côtière en présence de Posidonia oceanica.....	18
Morphotypes de banquettes et effet sur le mouvement des vagues	19
Effet sur le mouvement des vagues et les courants dans la ceinture de houle	22
Effet de la densité près du rivage	23
Difficultés	26
Relations entre perméabilité et érosion	26
Moyens mécaniques.....	27
Analyse de la pression au sol de différents tracteurs	31
La zone d'étude	33
Classification géographique de la zone étudiée	33
Classification géologique et géomorphologique	34
Porto Taverna	35
Cala Brandinchi	36
La Cinta	37
Protocole méthodologique dans la Zone échantillon de l'AMP Tavolara P.C.C.	38
Relèvements sur le terrain, levé altimétrique et planimétrique de détail.....	38
Relevés photogrammétriques aériens avec drone	43
Échantillonnage des sédiments de surface	55
Analyse en laboratoire.....	59
Analyse granulométrique	59
Poids spécifique des grains.	62
Tests de perméabilité.	64
Exécution du test.....	67



Interreg



UNIONE EUROPEA



GIREPAM



AREA MARINA PROTETTA
TAVOLARA
PUNTA CODA CAVALLO



MINISTERO DELL'AMBIENTE
ITALIA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Résultats	69
Analyse de la taille des grains	69
Poids spécifique des grains.	70
Analyse des échantillons de Banquette di Posidonia	70
Tableau 3 - Poids du sable dans la banquette.	71
Tests de perméabilité	71
Relations entre la perméabilité et la porosité par étape de charge	72
Discussions et conclusions	74
Tests in situ	75
Essais de charge sur plaque	76
Essais de perméabilité	81
Localisation des enquêtes	82
Résultats des tests	83
Conclusions	85
Protocole de fonctionnement : élaboration d'hypothèses de gestion	
Bibliographie	89

Préface

Dans le cadre du projet GIREPAM, le Département des Sciences Chimiques et Géologiques de l'Université de Cagliari, a développé, en accord avec l'AMP "Tavolara - Punta Coda Cavallo", les activités visant à concevoir les lignes directrices de la recherche, les modalités de caractérisation et de gestion des gisements de *Posidonia oceanica* échouée, à partir d'une analyse critique du cadre juridique de référence et de la gouvernance concernant les modalités d'enlèvement des banquettes de *Posidonia oceanica* échouée dans les zones côtières à forte vocation touristique, une enquête visant principalement les territoires inclus dans le PO maritime Italie-France.

Des études détaillées seront menées sur la distribution, les caractéristiques morphologiques, stratigraphiques et de composition des dépôts de *Posidonia oceanica* échouée, suivies d'études terrestres sur les zones péri littorales situées derrière la plage (soit retro-dunaires soit péri lagunaires) afin d'identifier les zones de faible vulnérabilité où les dépôts saisonniers peuvent être placés en vue d'atténuer les impacts, en tenant compte des zones hautement critiques en termes de conservation du stock sédimentaire de la plage.

Des analyses complémentaires seront effectuées soit en laboratoire (analyses granulométriques et minéralogiques, détermination des rapports fraction minérale/fraction organique, analyse de l'humidité relative, densité des dépôts saturés en milieu péri littoral; poids spécifique des bermes de plantes) soit sur le terrain: micro-carottage des zones arrière-côtières, densité in situ, chargement des plaques de haute et d'avant-plage, mesures de la porosité effective et de la pression neutre afin d'établir, par des données objectives, le dimensionnement (type et poids maximal) des moyens mécaniques, le calendrier et les actions les meilleures pour le déplacement des banquettes dans les zones côtières sensibles.

En outre, une phase expérimentale est prévue en appliquant le protocole méthodologique développé dans les Lignes Directrices sur une zone d'échantillonnage particulièrement représentative dans l'AMP afin d'optimiser les opérations d'intervention, de minimiser les impacts et de tester les techniques et les procédures de surveillance.



Interreg



UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



GIREPAM



AREA MARINA PROTETTA
TAVOLARA
PUNTA CODA CAVALLO



MINISTERO DELL'AMBIENTE
E POLITICHE SULL'ENERGIA

Introduction

L'échouage des restes de *Posidonia Oceanica* (feuilles mortes, rhizomes, restes fibreux) est un phénomène naturel que l'on observe chaque année sur les côtes, surtout après les tempêtes d'automne et d'hiver. L'accumulation de la biomasse des plages, combinée au sable, forme des structures appelées "banquettes" qui peuvent se développer sur des centaines de mètres, selon la structure géomorphologique de la côte.

En général, les banquettes sont principalement composées de feuilles de posidonie dont la forme en ruban et la méthode d'accumulation, donne à la masse une structure lamellaire très compacte et élastique. La nature élastique à laquelle les banquettes sont soumises, cependant, en fait des formes de dépôt transitoires et facilement déformables sous l'action du mouvement ondulatoire incident auquel elles sont soumises.

Les banquettes, avec leur fraction flottante, jouent un rôle important dans la protection mécanique des plages contre l'érosion en entravant l'action et l'énergie du mouvement des vagues, contribuant ainsi à la stabilité des plages. En outre, elles contribuent directement et indirectement à la vie des biocénoses animales et végétales de la plage, car les produits de la dégradation des feuilles accumulées libèrent de grandes quantités de nutriments essentiels pour la flore et la faune de toute la bande côtière. Cependant, les restes de *Posidonia oceanica* échouée constituent un problème croissant. En effet, si d'une part il est utile de les maintenir en place afin de freiner l'érosion des plages et de promouvoir la productivité des eaux côtières, d'autre part leur présence dans les zones de baignade touristique peut décourager l'afflux des baigneurs tant pour les résidus fluctuants que pour les odeurs qui se développent lors des processus de dégradation bactérienne. Ces aspects entraînent une diminution de la valeur touristique de la plage elle-même et, par conséquent, on demande, aux administrations locales, d'éliminer ces dépôts afin de rendre les plages plus agréables.

L'évolution des banquettes fait partie du problème plus général de la gestion de la biomasse des plages et en particulier de la manière dont elle doit être envisagée. À ce jour, la plupart des organismes publics concernés ont adopté des solutions temporaires et d'urgence, notamment la collecte et l'élimination coûteuse dans des décharges. En général, l'enlèvement est effectué avant l'été avec des moyens mécaniques qui permettent d'enlever, en plus des feuilles, de grandes quantités de sable sans tenir compte de la nature du littoral sur lequel l'intervention est effectuée.

Cela déclenche/accélère l'érosion et compromet l'intégrité de l'habitat côtier, ce qui oblige les administrations locales à prendre des mesures coûteuses de protection du littoral et de rechargement des plages.

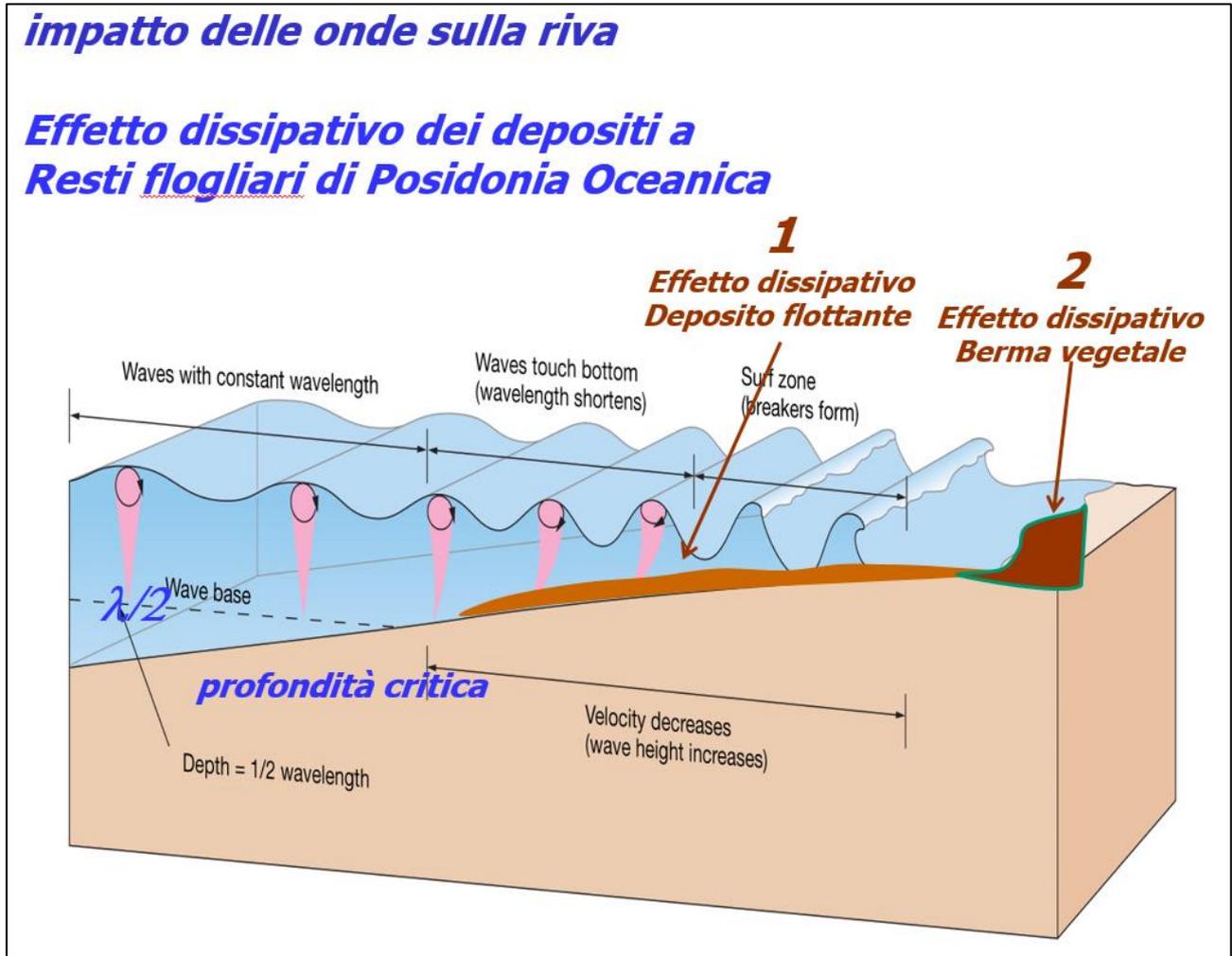


Figure 1 - Interaction entre le mouvement des vagues et la posidonie échouée.

La Posidonia oceanica et les banquettes

La Posidonia oceanica

Posidonia oceanica est une phanérogame marine endémique de la mer Méditerranée, organisée en racines, rhizome et feuilles. Elle présente une reproduction sexuée avec formation de fleurs et de fruits ou asexuée par bouturage. Lorsqu'elle rencontre des conditions environnementales favorables, la posidonie est capable de coloniser de vastes zones des fonds marins, formant de grandes étendues vertes appelées prairies qui s'étendent de la surface jusqu'à une profondeur de 40 mètres dans des eaux particulièrement claires. La posidonie se fixe généralement sur des substrats mobiles tels que du sable plus ou moins grossier, parfois mélangé à de la boue, mais aussi sur des débris et des fonds rocheux. La prairie de posidonies piège les sédiments en formant une structure fibreuse appelée "matte", constituée d'un

entrelacement de racines, de rhizomes et de sédiments, qui augmente en hauteur et produit une élévation du fond marin, influençant la géomorphologie des dépôts de sable côtiers. En particulier, les dépôts foliaires atténuent les vagues, réduisant l'énergie vers les plages, et la "matte" réduit la pente de la plage submergée. La régression de la prairie peut provoquer une augmentation de l'énergie des vagues et une accentuation de l'inclinaison de la plage submergée, modifiant ainsi le profil du rivage. (ISPRA 55/2010)



Figure 2 - Prairie de *Posidonia oceanica* (Photo: M.Magri, www.rete.toscana.it).

Conception de lignes directrices pour la détection et la caractérisation des dépôts de *Posidonia oceanica* échouée.

Modes de dégradation du matériel foliaire de Posidonie sur les plages submergées.

Une fois détachées des écailles, les feuilles de Posidonie sont transportées en partie flottantes et en mai elles sont suspendues dans la colonne d'eau, la substance organique du tissu foliaire, soumise à une dégradation rapide, a tendance à absorber l'eau et à s'alourdir en allant se déposer sur la plage submergée distale, formant des accumulations près de la limite supérieure de la prairie. (Fig. 3).

Le mode de dégradation et la vitesse de décomposition du matériel foliaire des Posidonies dans les plages submergées sont liés à l'action des communautés bactériennes aérobies qui se développent à la fois au-dessus de la surface des dépôts organiques, et dans les parties où les bactéries anaérobies et les bactéries

soufrées dominant. La décomposition de la substance organique est relativement rapide tandis que les fibres de cellulose présentent une résistance remarquable tant à l'action des bactéries qu'à la désintégration mécanique opérée par les courants de fond et les mouvements induits par le passage du pied d'onde. Les fibres résiduelles sont d'abord sélectionnées et accumulées dans de grandes dunes longitudinales festonnées.



Figure 3 - Prairie à *Posidonia oceanica*, limite supérieure érosive (Baia di Carbonara - Villasimius): zone de décantation privilégiée du matériel foliaire.

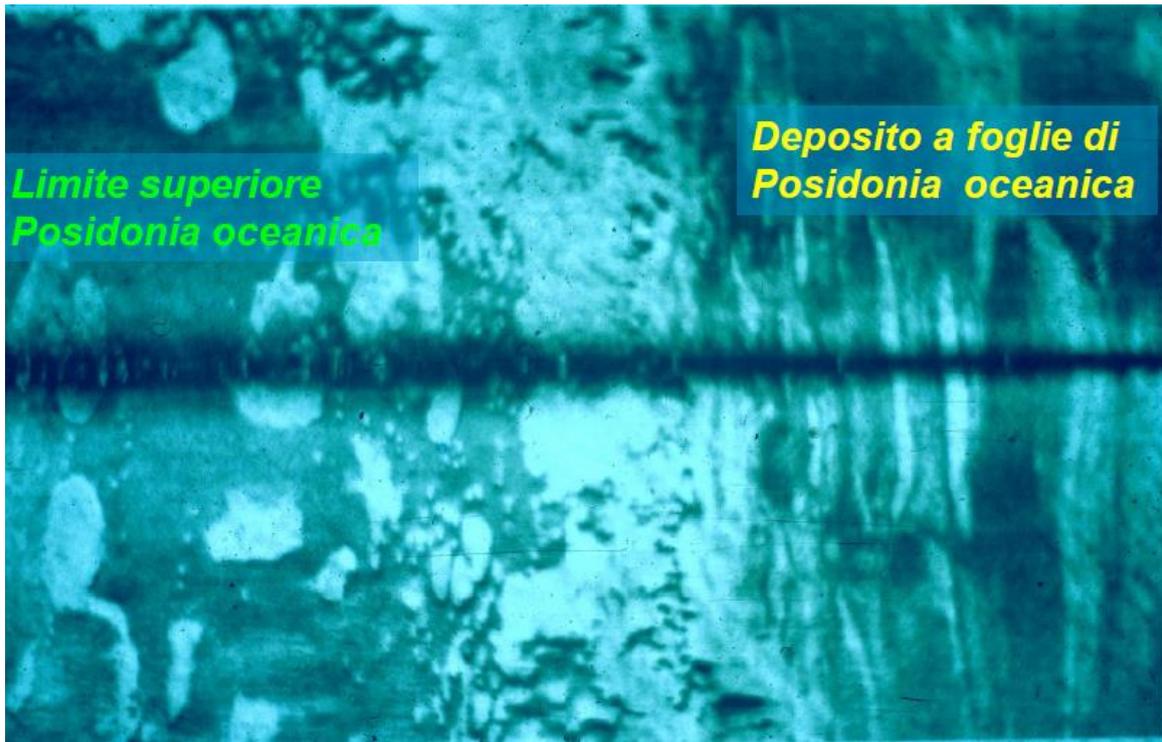


Figure 4 Image sonar à balayage latéral 150 khz: Prairie à *Posidonia oceanica*, limite supérieure érosive avec zone de décantation du matériel foliaire organisée en grandes dunes longitudinales.



Figure 5– Image sous-marine du dépôt de restes de feuilles à *Posidonia oceanica*, sur la plage sous-marine distale, mettant en évidence l'action de dégradation des bactéries aérobies (feutre bactérien blanchâtre)



Figure 6– Image sous-marine du dépôt avec des fibres de cellulose prédominantes provenant des restes foliaires à *Posidonia oceanica*, organisés en dunes longitudinales et dans la zone creuse des structures des courants marins (ripple marks)

Les courants de traction de fond unidirectionnels et les mouvements alternatifs du pied d'onde sélectionnent les fibres de cellulose en formant, dans la zone creuse, des *ripplemarks* et des *mégaripples*, des dépôts cylindriques discontinus.

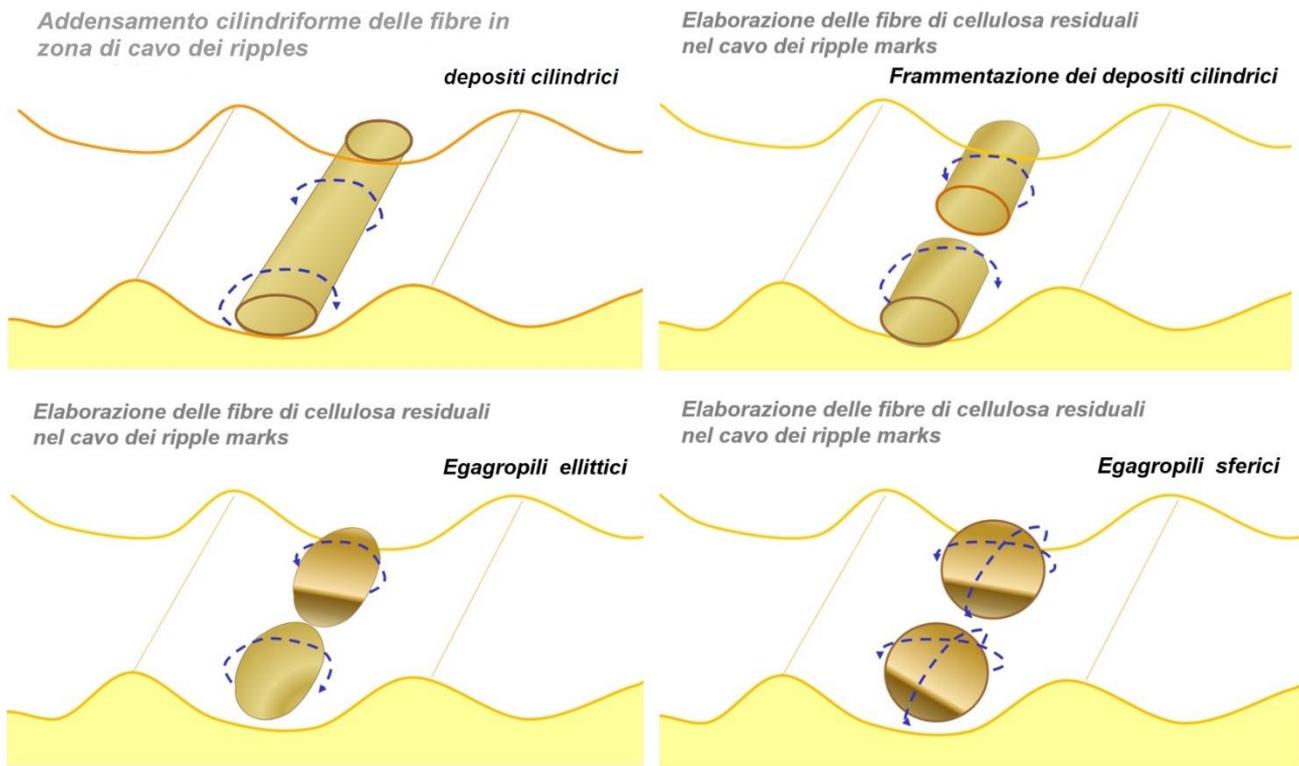


Figure 7 – Schéma d'évolution des pelotes de fibres posidonies (ægagropiles), par les mouvements alternatifs des pieds de vagues dans la zone creuse de la structure du courant marin (ripple marks).



Figure 8 – ægagropiles déposées sur l'estran par le mouvement des vagues, formant principalement des accumulations dans la zone située entre la berme ordinaire et la berme de tempête.

La Banquette

Le dépôt de débris de plantes marines, principalement représentés par des feuilles, des rhizomes et des restes fibreux de *Posidonia oceanica*, est un phénomène très répandu le long des côtes méditerranéennes.

À proximité des grandes prairies de posidonies, à la suite des tempêtes maritimes d'automne et d'hiver, et dans des conditions particulières (liées aux caractéristiques hydrodynamiques et à la conformation de la côte), les restes de posidonies donnent lieu à la formation de structures connues sous le terme français de "*banquettes*" (Molinier et Picard, 1953; Picard, 1953; Blanc, 1971). Elles ont des épaisseurs variables pouvant atteindre plusieurs mètres ; elles sont plus ou moins profondes et se développent sur des centaines de mètres, selon la structure géomorphologique de la côte (Boudouresque et Meinesz, 1982; Jeudy de Grissac et Audoly, 1985; De Falco et al, 2008).

L'évolution et la stabilité des banquettes sont extrêmement variables ; quand elles ont des dimensions considérables, elles constituent de véritables formations "bio-géomorphologiques", certes transitoires, mais qui caractérisent le paysage côtier, augmentant son patrimoine de diversité tant géomorphologique qu'écologique. (Marevivo, 2001).

En général, les banquettes sont principalement composées de feuilles de posidonie, dont la forme de ruban et la méthode d'accumulation, donnent à l'amas une structure lamellaire très compacte et élastique (Marevivo, 2003;). Cette structure est capable d'absorber l'énergie du mouvement des vagues, ce qui réduit la capacité d'érosion et contribue ainsi à la stabilité des plages pendant toute la phase de démolition qui se produit au début de certaines tempêtes. La structure des plages et des banquettes de posidonies a été soigneusement étudiée dans la région de Marseille (France), où la teneur en eau est comprise entre 30 et 90%, allant de la partie supérieure (exposée au soleil) à la partie inférieure de la banquette (Jeudy de Grissac et Audoly, 1985). Le taux de sable, en revanche, varie de 0,5 à 85%, en fonction de l'exposition du lieu, de l'hydrodynamique, de la taille des grains et de la morphologie de la plage. La banquette, en effet, joue un rôle actif dans la rétention des sédiments qui restent coincés entre les couches de feuilles superposées : on estime qu'un mètre cube de banquette est capable de retenir environ 40 kg de sédiments meubles (Legambiente, 2005).

Selon Jeudy de Grissac et Audoly (1985), les accumulations végétales qui composent les banquettes peuvent être classées en 3 catégories :

- Type 1 : vestiges peu évolués, encore verts où l'on peut encore voir les deux bords de la feuille. Ils représentent moins de 1 % des banquettes ;
- Type 2 : restes avec les mêmes caractéristiques que celles du type 1, mais en brun. Ils représentent de 1% à 26% des banquettes ;
- Type 3 : vestiges très détériorés, de couleur marron, avec au maximum un des deux bords de la feuille. Ils représentent 1 à 99% des banquettes.

Sur la base des nombreuses observations réalisées dans des sites italiens différents (Marevivo, 2001; Bovina et al., 2007a, INTERREG II Toscana/Corse, 2000; De Falco et al., 2008), les mécanismes de formation et d'évolution du gisement ont été principalement dépendants de l'interaction des facteurs suivants:

1. phase contingente saisonnière ;
2. les conditions météorologiques et l'état de la mer ;
3. la position, les caractéristiques et l'état de conservation des "prairies mères" ;
4. les caractéristiques géomorphologiques de la côte et des fonds marins situés devant elle ;
5. la dynamique côtière.

Dans la formation d'une banquette, outre les caractéristiques des prairies (en particulier la densité des bouquets de feuilles et leur longueur) et la distance de celles-ci par rapport aux points d'échouage, qui peuvent affecter l'état physique et la transformation biochimique des matériaux, une influence particulière semble avoir la nature géomorphologique de la côte. En principe, en effet, les accumulations sur la plage, même si elles sont généralement assez importantes au moment du dépôt, sont plus facilement démolies par le mouvement des vagues et se caractérisent donc par une moindre stabilité, par rapport aux dépôts sur ou entre les affleurements rocheux qui favorisent le "piégeage" de la biomasse.

La nature élastique qui les caractérise, toutefois, en fait des formes de dépôt transitoires et facilement déformables sous l'action du mouvement ondulatoire incident auquel elles sont soumises. Cependant, la présence de stratifications au sein des masses foliaires (avec des niveaux basaux nettement plus anciens), la stabilité relative de nombreuses structures et la formation récurrente dans des sites spécifiques, nous amène à considérer de nombreuses étendues côtières comme des "zones de formation probable de banquettes" (Marevivo, 200 ; Bovina et al., 2008).

De tels sites sont normalement caractérisés par la présence de côtes rocheuses basses, de baies et de plages devant des falaises et aussi par la présence d'ouvrages de protection côtière rigides (récifs artificiels et brise-lames).

Des recherches récentes ont tenté d'étudier les mécanismes complexes de destruction, de transport et de reconstruction des banquettes au sein d'une même plage ou unité physiographique exposée à des tempêtes de durée, d'intensité et de direction différentes (Mateo et al., 2003).

L'angle d'incidence du mouvement de la vague, mieux décrit comme la direction de la crête de la vague dans la zone du brisant (où le processus de réfraction est considéré comme épuisé), semble jouer un rôle fondamental dans le déplacement de grandes quantités de biomasses végétales des points les plus exposés vers les secteurs de la côte les moins énergétiques (Mateo et al., 2003)".



Figure 9 - Banquette dans le secteur sud à la plage de La Cinta. Les conditions d'enfouissement total de la plage, dans ces cas le rôle des dépôts de restes de feuilles de posidonies empêchant la reconstruction naturelle du profil estival et la dynamique naturelle du littoral.



Figure 10 - Les restes foliaires de la berme ordinaire végétale (Banquette) ont subi le transport du vent et ont alimenté la construction de la dune de haute plage, sur laquelle les espèces psammophiles ont ensuite poursuivi le développement de la dune (La plage de La Cinta).

Analyse du cadre juridique de référence

Les zones de stockage temporaire de *Posidonia oceanica* enlevée de la plage

Selon les "ADRESSES OPÉRATIONNELLES POUR LA GESTION DES DÉPÔTS DE POSIDONIE PLONGÉE SUR LES CÔTES" - Annexe 1 à la délibération G.R. n° 40/13 du 6.7.2016 : [omis]

Les méthodes de gestion des lits de posidonies sur la plage, conformément aux dispositions de la circulaire du Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Terre et de la Mer n° 8123/2006 :

0) Maintien des lits de posidonies sur place ;

1) Déplacement des accumulations et repositionnement pendant la période hivernale ;

2) Déplacement et l'élimination permanents.

D'autres options introduites ultérieurement par la norme peuvent être :

3) L'enterrement ;

4) Repositionnement sur les dunes.

Les procédures d'exploitation seront spécifiquement décrites dans le paragraphe suivant : Instructions d'exploitation pour les options de gestion de la posidonie.

Les études réalisées jusqu'à présent suggèrent que la stratégie à privilégier est le maintien des lits des posidonies sur place. En fait, la présence de la posidonie échouée, en tant que partie intégrante de l'écosystème côtier, évite l'instauration ou la perpétration de processus d'érosion des lignes de plage et représente un indicateur de la bonne santé de l'habitat des prairies de posidonies.

Compte tenu du fait que la présence des banquettes fait partie intégrante de l'écosystème côtier et protège les plages de l'érosion, les municipalités et les institutions sont invitées à agir contre la perception négative répandue à propos de la posidonie échouée en activant des actions appropriées pour sensibiliser les utilisateurs, par le biais de panneaux d'information ou d'autres mesures, éventuellement aussi en coordonnant des réseaux à ces fins.

Si l'on considère comme extrêmement problématique, pour des raisons techniques qui entravent objectivement l'utilisation de la plage pendant la saison estivale, maintenir les lits de posidonies sur place et opter pour l'option de déplacement et de repositionnement ultérieur de l'accumulation ou, dans des cas extrêmes, pour l'élimination/la valorisation des déchets, les responsables du nettoyage de la plage doivent suivre les instructions procédurales et opérationnelles suivantes.

[omis]

Option 1) - Déplacement des accumulations in situ et repositionnement

Les opérations de manipulation de la posidonie doivent être effectuées de manière à ne pas affaiblir la structure défensive de la plage et, par conséquent, doivent être évitées pendant la période hivernale, car elles priveraient les plages d'un système naturel de protection constitué par les banquettes, les exposant ainsi aux changements dus à l'action des tempêtes.

Les opérations doivent être effectuées avec une prudence particulière afin d'éviter l'enlèvement du sable : le sable récupéré doit être redistribué le long de la plage.

Le déplacement de la posidonie in situ nécessite l'identification de zones appropriées au sein d'une même plage, dans lesquelles s'accumulent les matériaux collectés sur le littoral. La phase de sélection du matériel végétal doit être effectuée de préférence par des moyens manuels, mais l'utilisation de mécaniques de taille appropriée est également autorisée, mais ne doit, en aucun cas, causer de dommages à la plage. L'utilisation de véhicules à chenilles est, en tout cas, interdite.

Les moyens mécaniques ne doivent pas passer sur les dunes ou la végétation et ne doivent pas causer de modification de la structure géomorphologique, texturale et chromatique de la plage, sans préjudice de la redéfinition du profil de la plage causée par le mouvement de la banquette.

La méthode de collecte de la biomasse doit être indiquée dans le modèle de communication visé au paragraphe précédent.

Il est préférable que l'enlèvement des banquettes soit effectué par étapes successives, de manière à permettre le séchage des couches découvertes : il est donc nécessaire que, surtout lorsque l'expérience prévoit désormais des phénomènes d'accumulation importants, la collecte soit planifiée et effectuée périodiquement.

En cas de tempêtes exceptionnelles impliquant des accumulations de biomasse d'un volume considérable, une intervention extraordinaire peut être autorisée en ce qui concerne l'activité prévue.

Le matériel ainsi collecté et sélectionné doit être accumulé dans une zone isolée de la même plage, aménagée de manière à ne pas interférer négativement avec la morpho dynamique et la biocénose de la plage ni représenter un inconfort et/ou un dommage, dans des structures de confinement spéciales amovibles qui assurent la ventilation et évitent la dispersion par le vent et les odeurs désagréables, par exemple, ces structures peuvent également être formées de simples étauçons fixés dans le sable et reliés par des haies métalliques étroitement tissée. Les quantités d'accumulation doivent être telles qu'elles permettent une ventilation entre les feuilles et évitent la putréfaction.

Cette opération doit être saisonnière, avec élimination de la posidonie au printemps et/ou en été et repositionnement éventuel en automne (à la fin de la saison balnéaire si le matériau ne s'est pas entre-temps biodégradé/intégré au substrat) dans la partie de la plage d'origine.

Les interventions doivent être précédées par la récupération des déchets anthropiques (plastique, métal, bois, verre) sur le rivage sablonneux. Cette opération doit être effectuée de préférence avec des outils manuels, mais il est également permis d'utiliser des moyens mécaniques de taille appropriée équipés d'un système de cribleuses (grilles permettant l'enlèvement des déchets et le rejet simultané de résidus de sable et de posidonie) qui ne doivent en aucun cas causer de dommages à la plage: il est toujours interdit d'utiliser des véhicules à chenilles.

Conformément à l'article 183, paragraphe 1, lettre n) du décret législatif n° 152/2006 (loi consolidée sur l'environnement), les opérations de collecte, de regroupement, de tri et de stockage préalables à la collecte de matériaux ou de substances naturelles provenant d'événements atmosphériques ou météorologiques, y compris les tempêtes et les inondations, même lorsqu'elles sont mélangées à d'autres matériaux d'origine anthropique, effectuées, dans le temps technique strictement nécessaire, sur le même site où ces événements les ont déposées, ne constituent pas des activités de gestion des déchets.

Le nettoyage des dunes et des zones couvertes par la végétation doit être effectué exclusivement par des moyens manuels. Les déchets anthropiques collectés doivent être débarrassés de tout reste de sable et éliminés conformément à la réglementation sectorielle.

S'il n'est pas possible d'identifier des zones appropriées pour le stockage du matériel collecté sur la plage, le déplacement ex situ est également autorisé. Dans ce cas, si l'on a l'intention de ramener la posidonie sur la plage d'origine à la fin de la saison, la biomasse n'est pas considérée comme un déchet; si, au contraire, on choisit de conserver la posidonie dans le nouveau lieu, elle sera soumise aux règles de valorisation des déchets (opérations selon l'annexe C du décret législatif n° 152/2006 et ses modifications et ajouts ultérieurs) et, à ce titre, elle doit être autorisée par les organismes compétents avant le déménagement. Le transport de déchets doit être effectué par des personnes inscrites au registre national des gestionnaires de l'environnement conformément à l'article 212 du décret législatif n° 152/2006.

[omis]

Dans le cadre de cette étude, pour chaque plage, les zones à utiliser pour le stockage temporaire des accumulations retirées de l'estran ont été identifiées ; ces sites ont été choisis en fonction des critères suivants:

- Les zones à utiliser pour le stockage temporaire sont de préférence identifiées dans des zones d'arrière-plage peu exposées au vent et à la dynamique côtière ;

- Les zones ne doivent pas être à proximité de zones humides ni près des entrées de lagunes;
- Les zones ne doivent pas être caractérisées par des sédiments éoliens stabilisés par des arbustes et/ou une végétation psammophile ;
- Les zones doivent être facilement accessibles et l'itinéraire suivi par les moyens utilisés ne doit pas affecter les zones dunaires ;

Hydrodynamique côtière et dépôts foliaires à *Posidonia oceanica*

L'activité de recherche a été développée dans le domaine de l'hydrodynamique côtière en présence de *Posidonia oceanica* et s'est concentrée spécifiquement sur l'interaction entre le mouvement des vagues et la prairie de *Posidonia* dans le surf *area* et sur les effets, sur le mouvement des vagues, de la variation de la densité de l'eau en présence de *Posidonia* près du rivage.

La recherche a utilisé les résultats des enquêtes menées sur une zone d'échantillonnage de l'AMP particulièrement représentative.

Posidonia oceanica est une phanérogame marine endémique de la mer Méditerranée, organisée en racines, rhizome et feuilles, capable de coloniser de vastes zones des fonds marins en formant de grandes étendues vertes appelées prairies qui s'étendent de la surface jusqu'à une profondeur de 40 mètres dans des eaux particulièrement claires.

Près des grandes prairies de posidonies, à la suite des tempêtes d'automne et d'hiver, de grandes quantités de débris de plantes marines sont générées, principalement représentées par des feuilles, des rhizomes et des restes fibreux de *Posidonia oceanica*. Sur la base de nombreuses observations réalisées dans différents sites italiens (Marevivo, 2001; Bovina et al., 2007a, INTERREG II Toscane/Corse, 2000; De Falco et al., 2008), l'hydrodynamique côtière conditionne le transport et le stockage des débris de Posidonie.

Plus précisément :

- L'élévation des fonds marins due à la formation de mattes et de touffes foliaires influence directement la propagation du mouvement des vagues ;
- La variation de la densité de la colonne d'eau en présence de débris conditionne les mécanismes de dissipation de l'énergie du mouvement des vagues près du rivage (). L'état physique et biochimique des débris, outre les caractéristiques des prairies, est conditionné par la distance par rapport au point d'origine.

Aspects de l'hydrodynamique côtière en présence de *Posidonia oceanica*

La *Posidonia oceanica* est capable de créer des prairies sur les fonds marins devant une grande partie des côtes de la Sardaigne, constituant un écosystème d'une valeur écologique extraordinaire qui offre nourriture et abri à un grand nombre d'organismes marins. Les prairies de *Posidonia oceanica* augmentent la rugosité du fond, modifiant ainsi le transport des sédiments dans la couche la plus proche (Kock et al., 2006) et augmentant l'atténuation du mouvement des vagues (Kobayashi et al., 1993).

La littérature sur l'atténuation du mouvement des vagues induite par la prairie de *Posidonia oceanica* dans la ceinture de houle est abondante, souvent exprimée en fonction d'une rugosité équivalente et donc d'un facteur de friction (Infantes et al., 2012). Cela signifie que le profil d'équilibre d'une plage en présence d'une prairie de *Posidonia oceanica* est plus représentatif que celui de Dean.

En particulier, certaines études ont montré qu'il existe un contrôle hydrodynamique sur la limite supérieure de la prairie de *Posidonia oceanica* définie par la vitesse orbitale des particules près du fond. D'autres recherches ont approfondi les mécanismes complexes de destruction, de transport et de reconstruction des banquettes au sein d'une même plage ou unité physiographique (UF) exposée à des tempêtes de durée, d'intensité et de direction différentes, avec une attention particulière aux différents contenus énergétiques des portions de plage ou d'UF (Mateo et al., 2003).

Parmi les modèles déjà développés et disponibles dans la littérature scientifique sur les effets protecteurs des banquettes de *Posidonia oceanica* sur le littoral (par exemple, Jeudy de Grissac 1984), il est intéressant de noter le modèle consécutif de dépôt et de retrait naturels des banquettes accumulées dans la zone de balancement sur les plages des îles Baléares (Servera et al., 2002) qui indique deux profils d'évolution des plages dépendant du retrait ou non des banquettes avec un avancement du littoral dans le second cas. Cela pourrait indiquer que le non-retrait des banquettes est une pratique de gestion sur les plages les plus critiques.

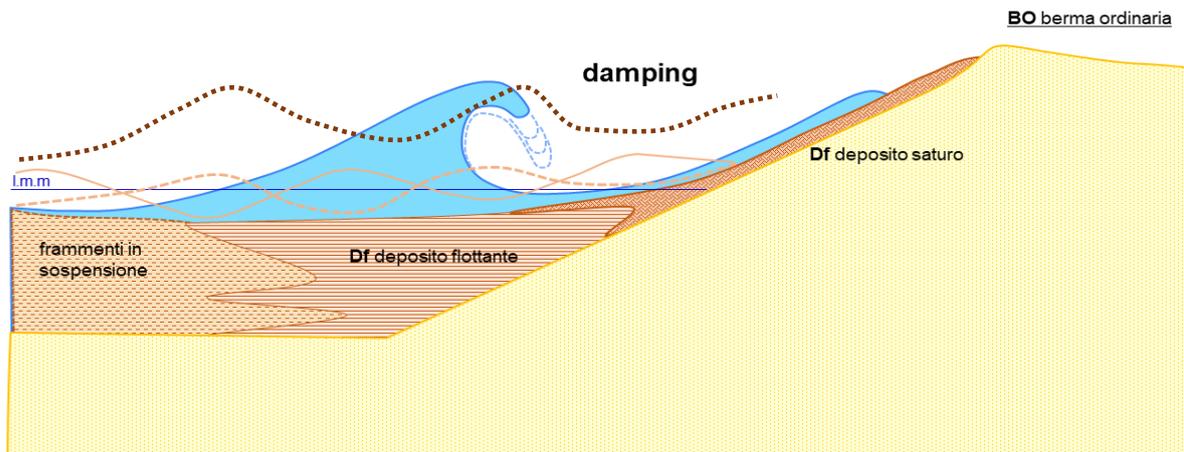
Il existe plusieurs phénomènes intéressants pour le contrôle et la prévision de la morphologie des plages.

Parmi ces phénomènes, les suivants ont été examinés :

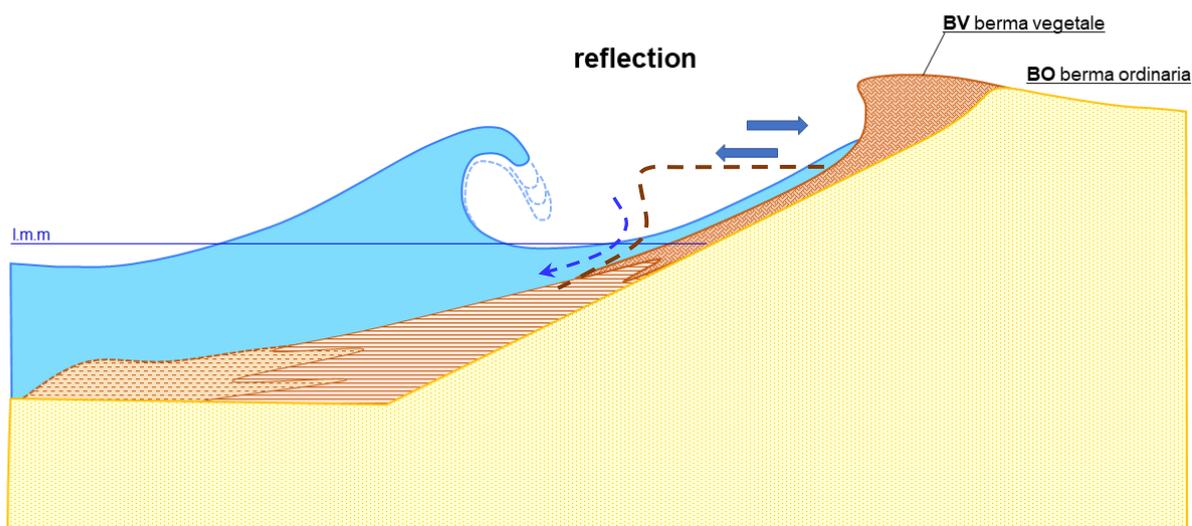
- La fonction de stabilisation et de consolidation du fond marin assurée par le système racinaire ;
- Atténuation du mouvement des vagues et des courants due à l'appareil foliaire ;
- L'effet combiné de la présence de prairies et de feuilles dans la colonne d'eau sur les champs de courant côtier ;
- Les amas de feuilles déposés le long des plages (banquettes) constituent une protection naturelle du sédiment sableux contre l'action des vagues et des courants ;
- Atténuation de l'énergie des vagues par le dépôt de feuilles flottantes ;
- Réflexion de l'énergie des vagues par l'abri de dépôt sous vertical ;
- Amortissement de l'énergie du flot montant par la berme végétale ;

- Elévation de la limite d'élan du run-up des vagues.

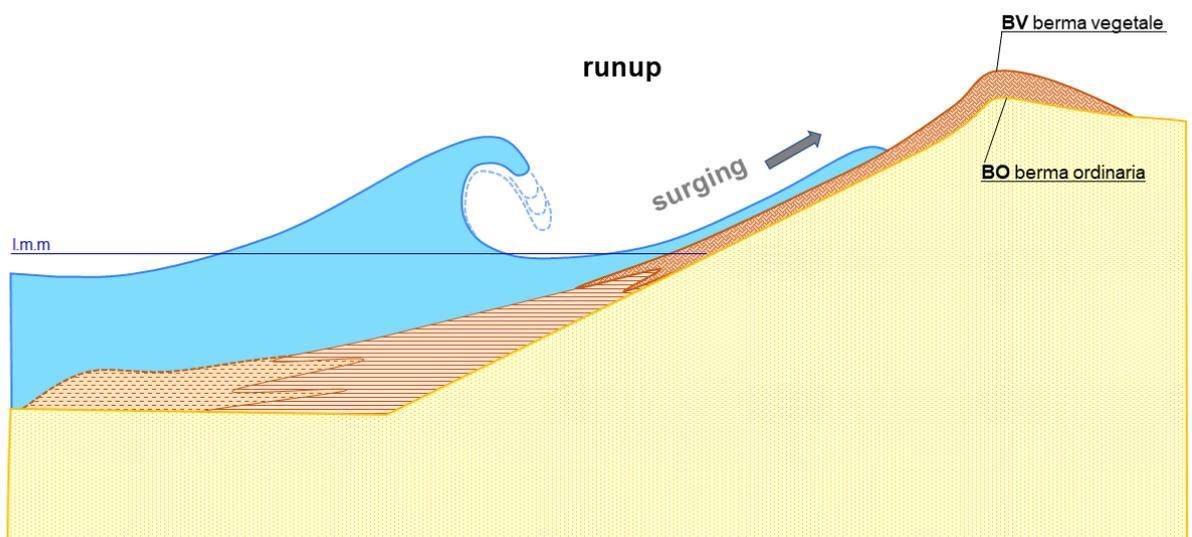
Morphotypes de banquettes et effet sur le mouvement des vagues



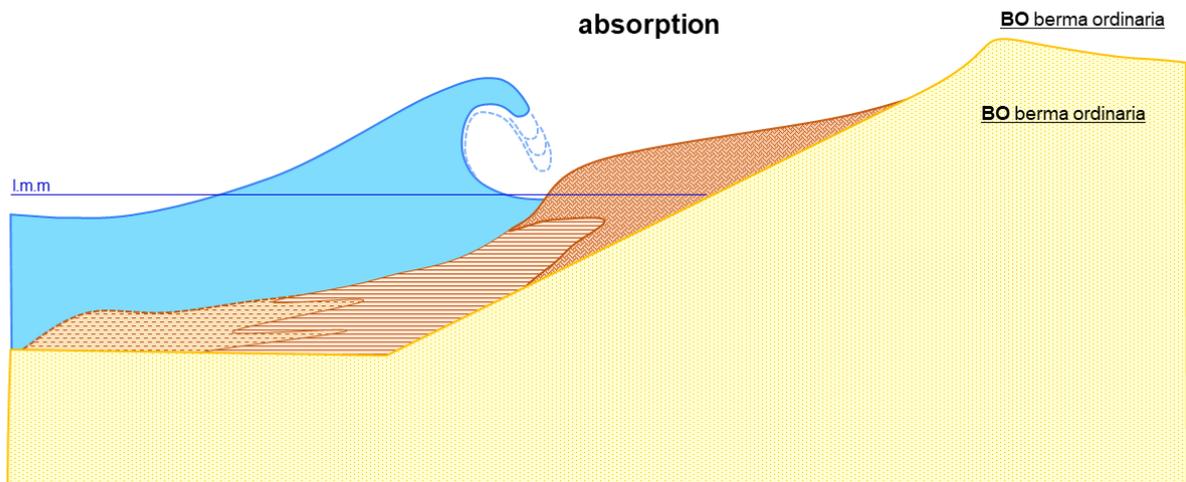
Les restes de feuilles de *Posidonia oceanica* peuvent s'épaissir dans la plage submergée proximale sous forme de boue à différents niveaux de dilution, vers le rivage le gel organique et les microfragments en suspension, près du rivage une boue organique dense contenant des fragments flottants de quelques centimètres. Ces dépôts organiques mélangés à l'eau de mer modifient à la fois la densité et la viscosité du fluide et donc à la fois la vitesse de migration et la forme du brise-lames.



Les dépôts foliaires à *Posidonia oceanica*, une fois échoués, peuvent construire une bioconstruction interstratifiée à la fois avec les sédiments littoraux (sables, graviers et restes de coquillages) structurés avec un abri à profil sousvertical concave qui s'élève directement du rivage avec une hauteur maximale de +1/+2 m au-dessus du niveau de la mer.



Les dépôts foliaires de *Posidonia oceanica* peuvent être déposés par la houle jusqu'à surplomber la berme sédimentaire (BO berma ordinaria) et structurer une berme végétale (BV) qui peut rehausser le profil de la plage de +0,5 à + 1m. Ceci constitue un obstacle à la migration de run-up des vagues et dissipe l'énergie de la houle (surging).



De plus, une fois déshydraté, le talus végétal stratifié présente une perméabilité effective considérablement plus élevée que la perméabilité du sable de plage, ce qui favorise l'absorption des eaux de flot montant ; mais dans ce cas, les sédiments abandonnés auront tendance à être "absorbés" et piégés dans la bioconstruction, ce qui justifie les pourcentages trouvés dans la présente étude 40/70 %.



Effet sur le mouvement des vagues et les courants dans la ceinture de houle

La ceinture de houle (surf area) est le principal site de dissipation et de transformation de l'énergie des vagues. Dans sa partie affectée par la prairie de *Posidonia oceanica*, la contribution au taux de dissipation d'énergie par frottement sur le fond (Sulis et al., 2012) modélisée selon le rapport de Johnson et Kofoed-Hansen (2000) est particulièrement intéressante:

$$S_{bf}(f, \theta) = -C_f \frac{k}{\sinh 2kh} F(f, \theta) \quad (1)$$

où $C_f = f_w U_{bm}$ est un coefficient de résistance, U_{bm} est la vitesse orbitale maximale des particules au fond et f_w un facteur de friction pour le plancher mobile (Swart, 1974):

$$f_w = \begin{cases} \exp\{-5.977 + 5.213(k_N/a_{bm})^{0.194}\} & a_{bm}/k_N > 2 \\ 0.24 & a_{bm}/k_N < 2 \end{cases} \quad (2)$$

où $a_{bm} = U_{bm}/\sigma$ est l'amplitude orbitale et k_N est l'équivalent de la rugosité de Nikuradse, une rugosité artificielle et facilement mesurable obtenue à partir de ses tests en laboratoire.

Sulis et al (2012) supposent les valeurs ou formules de calcul suivantes de k_N pour les différentes typologies des fonds:

- roche: $k_{Nr} = 300$ mm;
- *Posidonia oceanica*: $k_{Np} = 100$ mm;
- sable (k_{Ns}): les contributions dues à une rugosité superficielle ont été prises en compte (k_{Nc}) et les formes de fond (k_{Nf}), tandis que la contribution due au transport solide a été négligée (Johnson & Kofoed-Hansen, 2000). En particulier :

$$k_{Nc} = 2d_{50} \quad (3)$$

où d_{50} est le diamètre médian du sédiment.

Dans le cas du trafic côtier, la résistance au mouvement est exprimée par le coefficient de Chezy en termes de rugosité de Strickler k_S :

$$\chi = k_S h^{1/6} \quad (3)$$

où la correspondance entre k_N et k_S est obtenu à partir de Sulis et al (2012) en utilisant l'expression de Colebrook pour le régime de la paroi rugueuse. La rugosité de Strickler ainsi déterminée était comprise entre 30 et 75 $m^{1/3}/s$.

Les études, nombreuses sur modèle et peu nombreuses in situ, montrent comment la conformation du fond avec alternance de zones de posidonies et de zones sableuses ou rocheuses, donc avec une érodabilité hétérogène et des contributions différentes de résistance aux mouvements, détermine l'atténuation des vagues et la présence de tourbillons bien développés. Infantes et al (2012) présentent

l'atténuation des vagues ($M_{rms} = 1 \text{ m}$; $T_p = 5.5 \text{ s}$) sur un fond marin à une profondeur constante de 10 m sur une prairie de *Posidonia oceanica* d'une longueur de 1000 m (Figure 11).

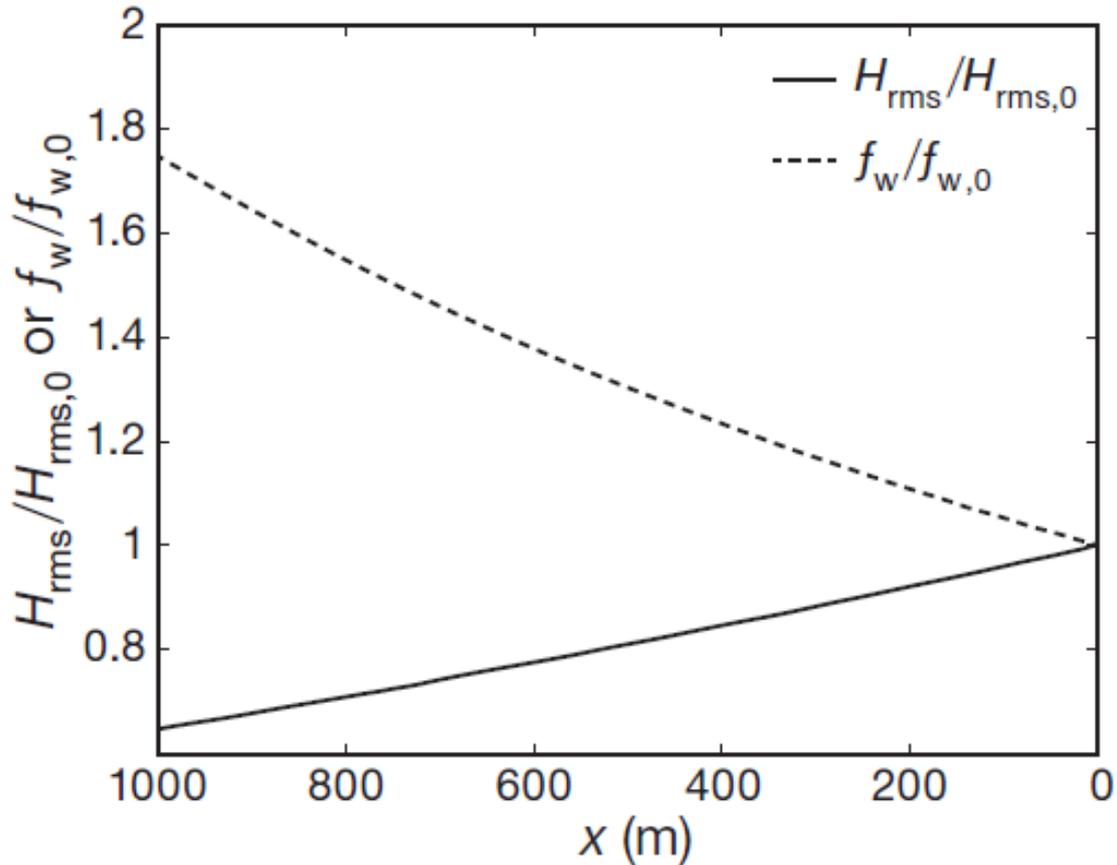


Figure 11. Propagation du mouvement des vagues sur un transect de prairie de *Posidonia oceanica* (Infantes et al, 2012)

Avec plus de détails, les valeurs de k_N et k_S devraient être liées aux valeurs absolues de densité des touffes de feuilles. Les méthodes les plus largement utilisées pour la classification des prairies sur la base de valeurs absolues de densité foliaire sont au nombre de deux; la première (Giraud, 1977) classe les prairies sur la base du nombre de faisceaux de feuilles par mètre carré, en les subdivisant en 5 classes de densité; la seconde, proposée seulement récemment (Pergent et al, 1995), classe les prairies en tenant compte non seulement des valeurs absolues de densité des touffes, mais aussi de la profondeur d'échantillonnage; les auteurs ont en effet mis en évidence la façon dont les valeurs de densité des touffes de feuilles diminuent avec la profondeur, ce qui explique 54% de la variabilité de ce facteur. La définition de ces valeurs est faite en immersion par référence à des carrés standards.

Effet de la densité près du rivage

Des études ont montré qu'il y a un contrôle hydrodynamique sur la limite supérieure de la prairie de *Posidonia oceanica* définie par la vitesse orbitale des particules près du fond. D'autres recherches ont approfondi les mécanismes complexes de destruction, de transport et de reconstruction des banquettes au

sein d'une même plage ou unité physiographique (UF) exposée à des tempêtes de durée, d'intensité et de direction d'origine différentes, avec une attention particulière aux différents contenus énergétiques des portions de plage ou d'UF (Mateo et al., 2003). La fiabilité des modèles dans la littérature sur les effets protecteurs des banquettes de *Posidonia oceanica* sur le littoral (par exemple, Jeudy de Grissac 1984) est liée à une phase de calibration avec une quantité importante de données de terrain.

Dans les modèles hydrodynamiques, la présence de débris en suspension nécessite l'utilisation d'équations supplémentaires, notamment en ce qui concerne l'effet de densité. L'équation d'état qui lie la densité de l'eau et la variation de la salinité à la température est, dans certains modèles (par exemple, DELFT3D-FLOW), étendue pour inclure l'effet de la densité des débris en suspension :

$$\rho = \rho_w + \sum_{l=1}^{LSED} c_{vol}^{(l)} (\rho_s^{(l)} - \rho_w) \quad (4)$$

où ρ_w est la densité de l'eau de mer qui inclut les effets de la salinité et de la température (différenciés selon les périodes de l'année, par exemple l'hiver égal à 1028.9 Kg/m³); $c_{vol}^{(l)}$ est la concentration volumétrique de la fraction sédimentaire l ; $\rho_s^{(l)}$ est la densité des particules solides de la fraction sédimentaire l ; LSED est le nombre total de fractions sédimentaires.

La même dissipation d'énergie par brisement est affectée par les variations de la densité de l'eau (Goda, 2001). Au brise lame, la dissipation d'énergie par turbulence (liée aux formes de la houle : surging, plunging e spilling) est conditionnée par la présence de débris qui affectent la viscosité du fluide.

Un intérêt particulier pour la morphologie côtière est la valeur de la poussée et du flux d'impulsion du mouvement de la vague, considérée ici comme agissant sur une section transversale de longueur d'onde unitaire d'une vague progressive de faible amplitude. La pression en un point de la section est :

$$p = -\rho g z + \rho g \eta \frac{\cosh[k(z + d)]}{\cosh(kd)} \quad (5)$$

Par conséquent, la poussée agissant sur l'élément dz du plan vertical sera :

$$dS_p = p dz \quad (6)$$

Et le flux correspondant de l'élan élémentaire :

$$dM = \rho u^2 dz \quad (7)$$

En particulier, l'intégration de (6) conduit à :

$$S_p = \frac{\rho g d^2}{2} \quad (8)$$

Où l'on met en évidence la relation entre la poussée sur la section S_p et la densité ρ tel que défini en (4).

Difficultés

Relations entre perméabilité et érosion

L'influence de la perméabilité sur l'évolution morphologique de la plage est un sujet abordé dans la littérature depuis 1940 (Bagnold R.A., 1940).

En fait, plusieurs auteurs ont rapporté que la perte d'énergie potentielle due à la lixiviation à l'intérieur de la plage émergée diminue l'énergie du back-wash (Grant U.S., 1948). Plus la perméabilité de la plage est grande, plus la possibilité que les sédiments transportés par le run-up se déposent, face à la diminution de la capacité érosive du back-wash, est grande. Aucune étude n'a été trouvée dans la littérature qui relie la perméabilité des sables de plage à la charge imprimée par le transit des véhicules lourds.

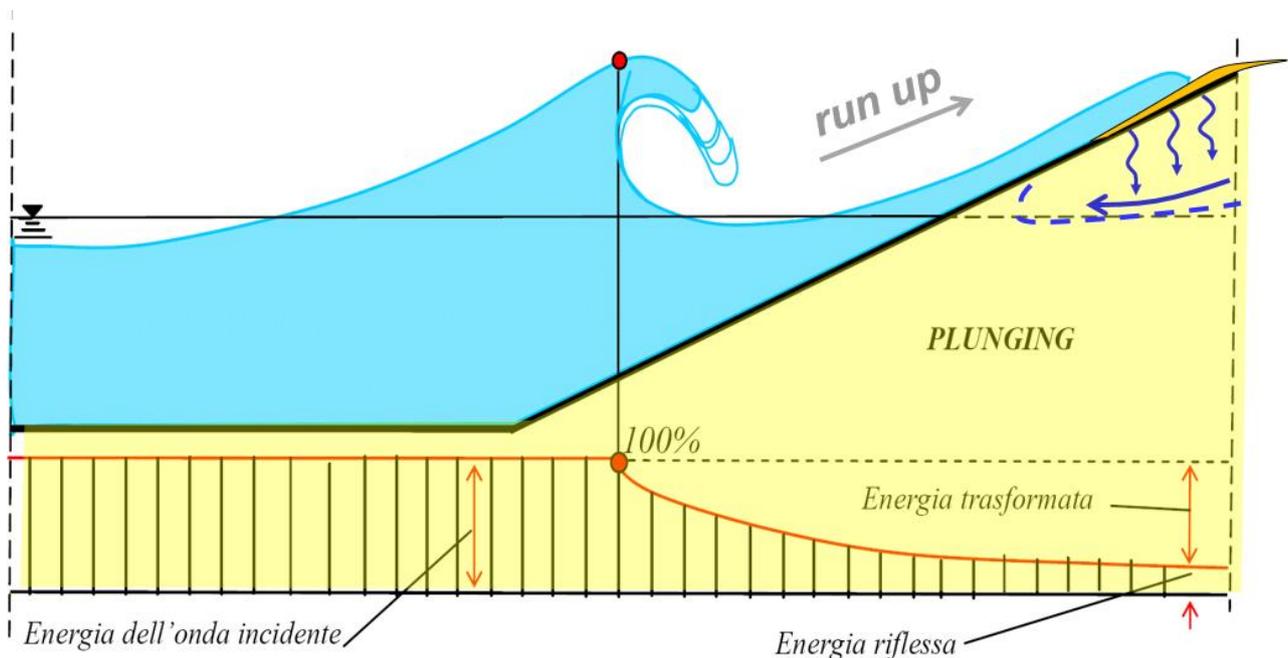


Figure 12 - Bilan énergétique de la vague de déferlement

Entre une phase de run-up et la suivante, une partie de l'eau est absorbée par la plage vers le niveau de la nappe phréatique, laissant une surface non saturée, de manière à minimiser le flux de lavage de retour et à éviter que les sédiments transportés sur la plage ne soient à nouveau entraînés vers la mer.

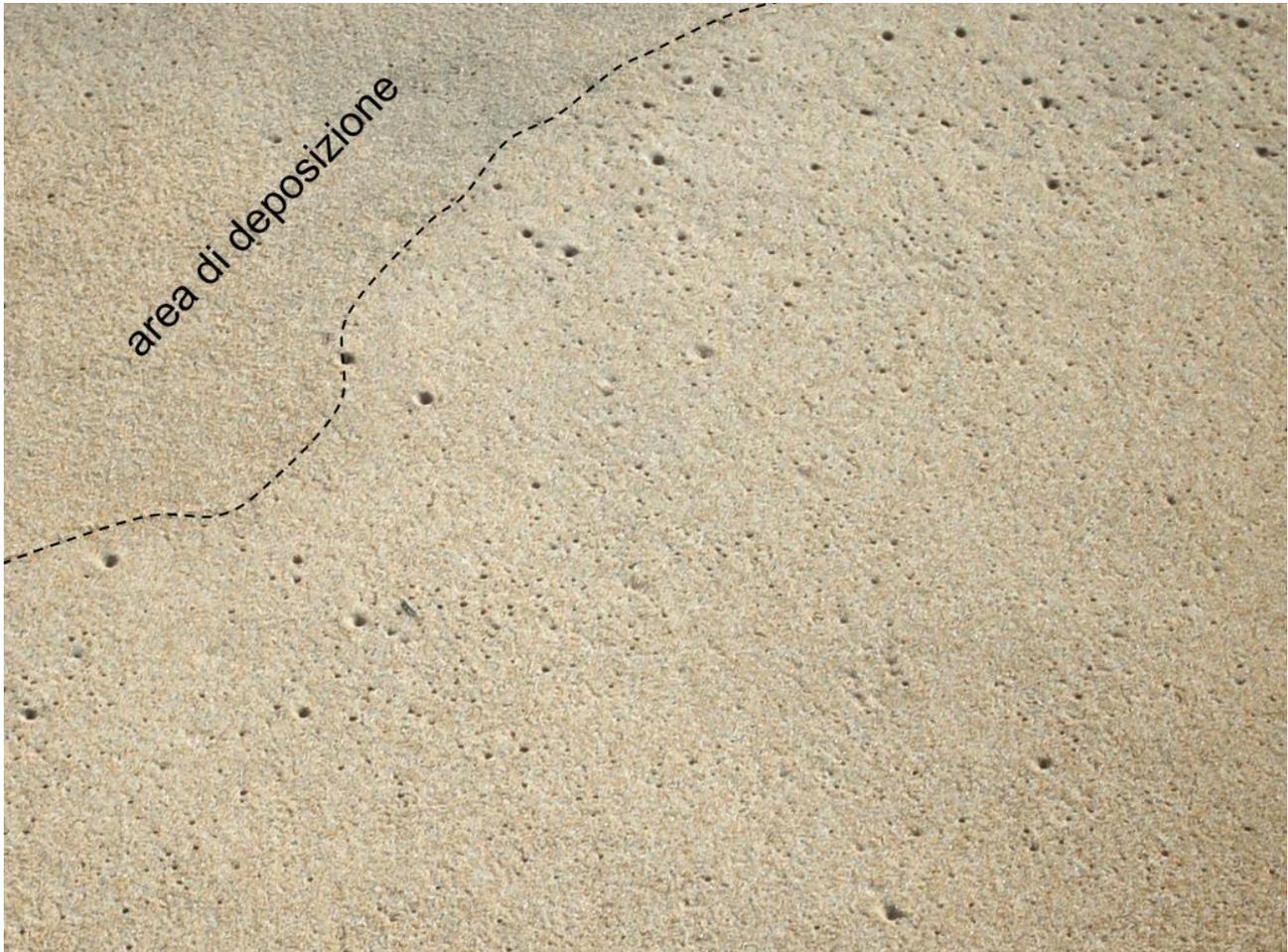


Figure 13 – Preuve de l'absorption des flots montants sur le rivage, notez les pock marks dues à l'air sortant du sédiment.

Moyens mécaniques

L'utilisation de moyens mécaniques dans les opérations de nettoyage des plages implique une série de problèmes liés au compactage des sédiments et à la diminution de la perméabilité qui en résulte.

Ces véhicules lourds induisent des contraintes verticales et horizontales dans les sédiments de la plage en fonction du poids des machines et de la traction des pneus (Fig. 16).

La charge appliquée sur le sol dépend principalement du poids du véhicule, de la taille des pneus et de leur pression de gonflage.

De nombreuses études ont été réalisées sur l'interaction entre les véhicules agricoles et les sols dans le domaine agronomique. L'analyse de ces études montre qu'une diminution de la charge au sol est liée à l'utilisation de pneus plus gros et à une faible pression de gonflage (Fig. 17).

Il a été observé que le nombre de passages de véhicules sur la surface a également des effets sur les propriétés physiques du sédiment (Ogunjirin,O.A.).

La réponse du sédiment en fonction de l'effort appliqué dépend de ses caractéristiques. Cela peut être compris comme la capacité portante du matériau et dépend de la texture, de la structure et du degré d'humidité.

La connaissance des caractéristiques granulométriques de la plage est fondamentale, en effet les sables assortis sont sujets à un plus grand épaissement par rapport aux sables bien classés. La capacité de charge est inversement proportionnelle à l'humidité de ses sédiments, en effet, plus un sol est humide, moins il est capable de résister à la pression.

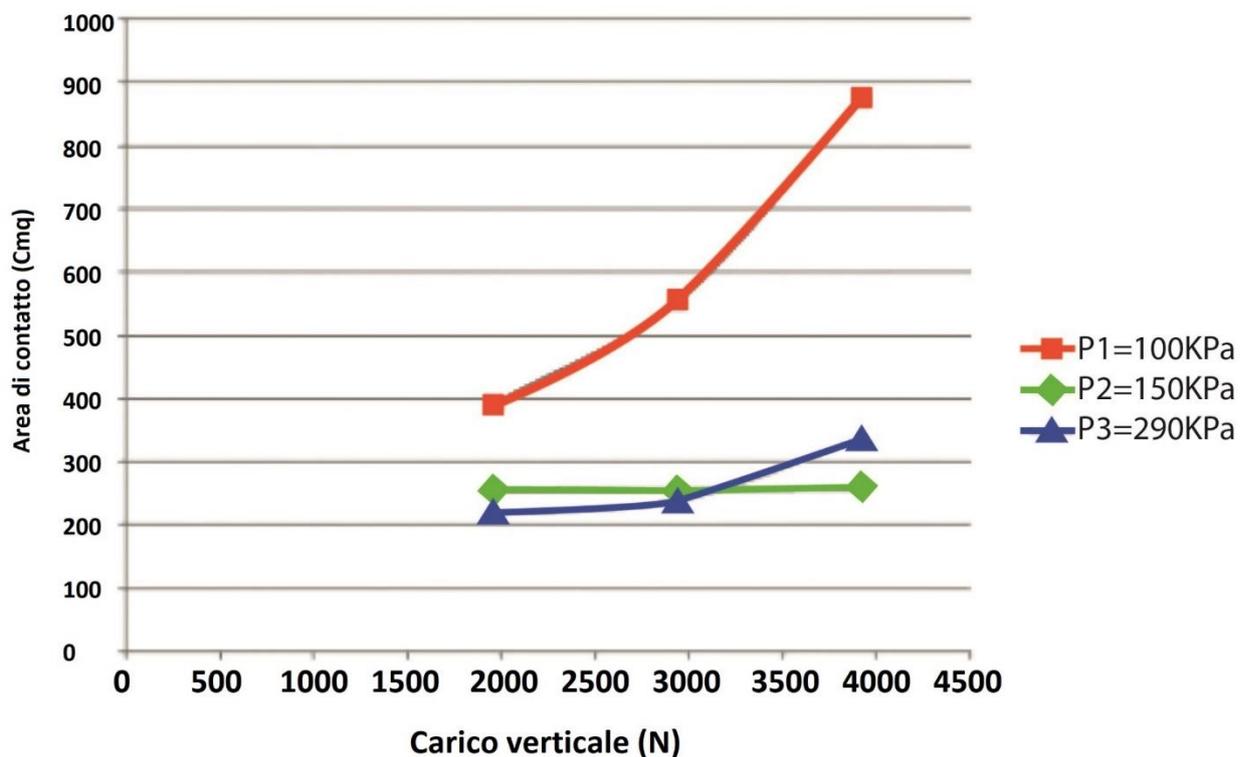


Figure 14- Relation entre la charge verticale et la surface de contact en fonction de la pression de gonflage des pneus (Taghavifar H. & Mardani A ; 2012)

La zone en rouge, c'est-à-dire celle où la pression est maximale, doit être réduite au minimum.

- Si la charge par roue reste la même, un pneu plus grand avec une pression interne plus faible réduit la pression sur le sable (situation b).
- Si la charge des roues est élevée, les risques sont plus grands. Si la charge est très élevée, même l'utilisation de pneus larges ne réduit pas suffisamment la pression au sol (situation c).

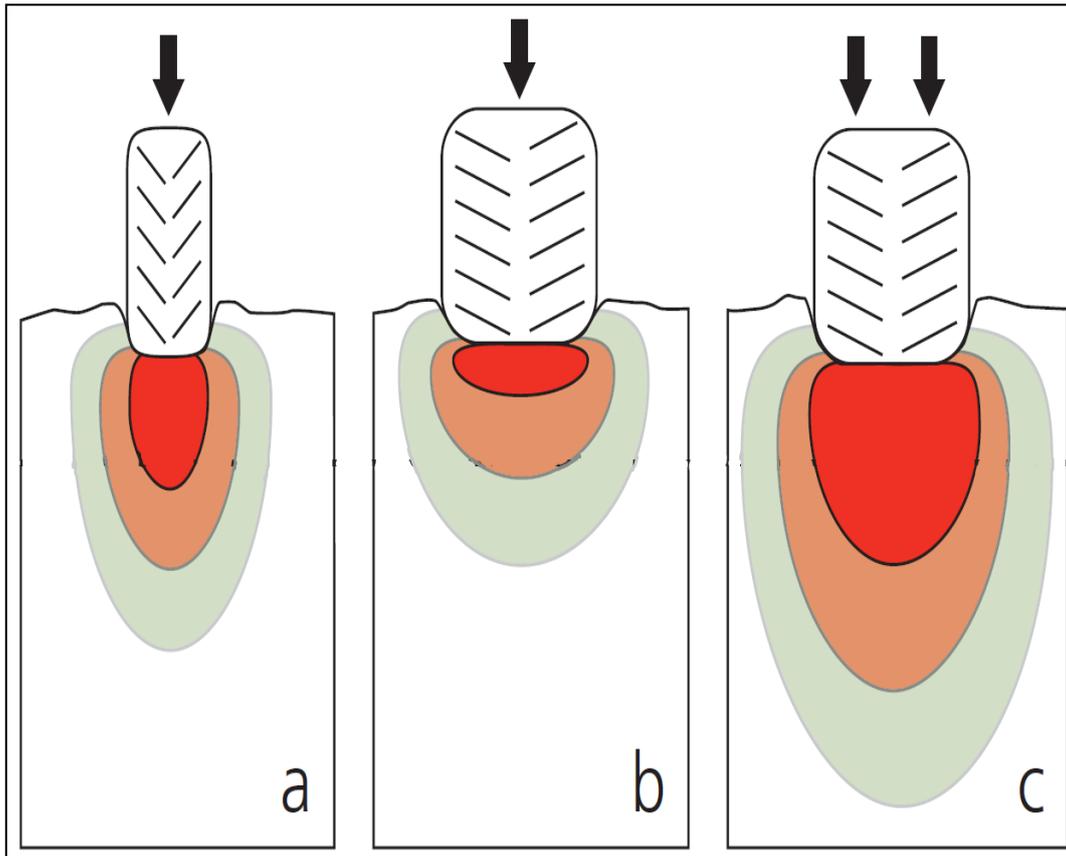


Figure 15- Effets de deux charges de roues différentes (une flèche : charge simple; deux flèches: charge double) et de deux largeurs de pneus différentes.



Figure 15 a – les types de pneus à sable ayant une grande surface d'appui et une faible pression de fonctionnement.



**Trattore Holland TLA
100**

Peso totale 6500 kg

**Carico per ruota
2330 kg**

**su superficie
di applicazione
2000 cm²**

Figure 15b - Tracteur lourd New Holland TLA100



Trattore SAME SOLARIS 55

**Peso totale 1700 kg
(circa 1/4)**

**Carico per ruota 425
kg**

**su superficie
di applicazione
1000 cm²**

Figure 7 - Tracteur léger Same Solaris 55

Analyse de la pression au sol de différents tracteurs

New Holland T5070

- Pneumatiques ant. : 480/65 r 24
- Pneumatiques post : 600/65 r 34
- Lest antérieur : 400 kg
- 165 litres de diesel
- Poids total 4.700 kg

Surface d'appui des pneus postérieurs : $2472 \text{ cm}^2 \times 2 = 4.944 \text{ cm}^2$

Surface d'appui des pneus antérieurs : $1407 \text{ cm}^2 \times 2 = 2.814 \text{ cm}^2$

Surface totale de soutien : 7.756 cm^2

Pression au sol moyenne du tracteur lesté : $4.700 \text{ kg} / 7.756 \text{ cm}^2 = \underline{0.60 \text{ kg/cm}^2}$

Pression au sol moyenne du tracteur délesté : $4.300 \text{ kg} / 7.756 \text{ cm}^2 = \underline{0.55 \text{ kg/cm}^2}$

New Holland T5040

- Pneumatiques antérieurs : 320/85 r 28 Michelin Agribib
- Pneumatique postérieurs : 420/85 r 38 Michelin Agribib

- 140 litres de diesel

- Poids total 4100 kg sans lest

Surface d'appui des pneus postérieurs : $2058 \text{ cm}^2 \times 2 = 4116 \text{ cm}^2$

Surface d'appui des pneus antérieurs : $1089 \text{ cm}^2 \times 2 = 2178 \text{ cm}^2$

Surface totale de soutien : 6294 cm^2

Pression au sol moyenne du tracteur délesté : $4100 \text{ kg}/6294 \text{ cm}^2 = \underline{0.65 \text{ kg/cm}^2}$

New Holland T7060

- Pneumatiques antérieurs : 600/65 r 28

- Pneumatiques postérieurs : 710/70 r 38

- Lest antérieur : 1000 kg

- 400 litres de diesel

- Poids total 9500 kg

Surface d'appui des pneus post. : $3.379 \text{ cm}^2 \times 2 = 6.758 \text{ cm}^2$

Surface d'appui des pneus ant. : $2.270 \text{ cm}^2 \times 2 = 4.540 \text{ cm}^2$

Surface totale de soutien : 11.298 cm^2

Pression au sol moyenne du tracteur délesté : $9.500 \text{ kg}/11.298 \text{ cm}^2 = \underline{0.84 \text{ kg/cm}^2}$

Afin d'éviter les impacts du chargement sur la plage, il est toujours préférable, lorsque les volumes le permettent, d'utiliser le chargement manuel des restes de feuilles à l'aide d'outils agricoles.



Dans le cas de volumes importants qui nécessitent l'utilisation de moyens mécaniques de ramassage et de transport, il est nécessaire de limiter le poids des véhicules et la charge totale des chariots ; en outre, afin de réduire le ramassage du sable emprisonné dans les "Banquettes", il est utile d'utiliser des véhicules équipés d'une benne à fourche.



La zone d'étude

Classification géographique de la zone étudiée

Les systèmes côtiers à l'étude sont situés sur la côte nord-est de la Sardaigne, dans l'Aire Marine Protégée de Tavolara-Capo Coda Cavallo.

Les plages concernées sont celle de Porto Taverna, au nord du promontoire de Capo coda Cavallo, et les plages de Cala Brandinchi et de La Cinta dans le secteur sud.

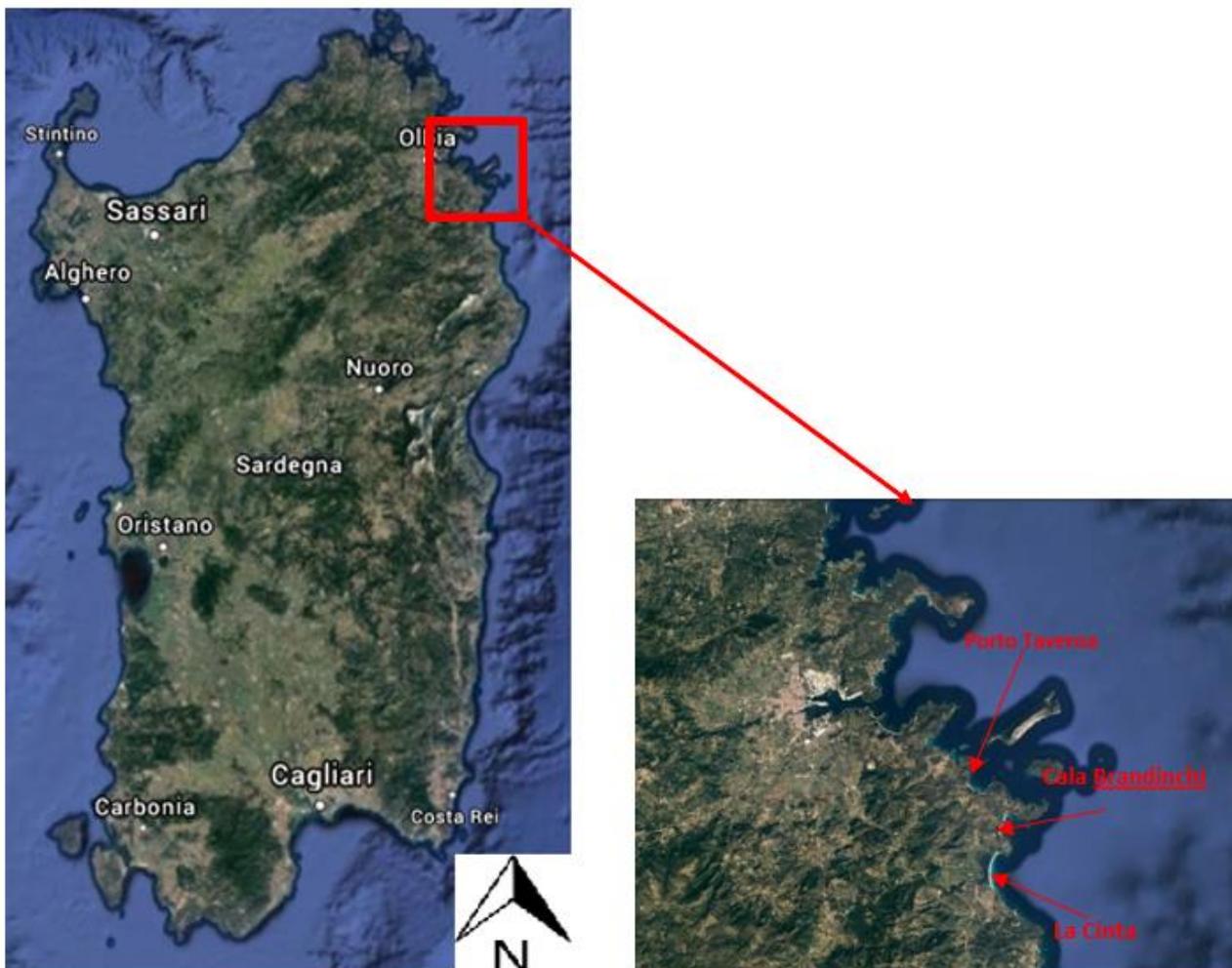


Figure 16 - Localisation des plages à l'étude.

Classification géologique et géomorphologique

L'évolution géomorphologique de la zone étudiée est fortement influencée par les caractéristiques lithologiques du substrat, constitué de roches appartenant au socle paléozoïque sarde, généralement massif et fortement fracturé.

Le patrimoine structurel a joué un rôle important dans la configuration de la région, car la plupart des vallées s'approfondissent le long des failles et des fractures de la tectonique alpine orientée principalement autour du N-S et du NE-SO. La zone examinée est caractérisée par une morphologie grossière dans laquelle les processus côtiers d'altération sur les roches granitiques et ensuite le remaniement par l'eau de pluie sur l'autre jouent un rôle prédominant.

Le long des zones les plus fracturées et fissurées, les cours d'eau ont été approfondis pour générer un réseau de drainage typiquement angulaire. Les principaux cours d'eau sont situés en correspondance d'importants éléments structurels qui se suivent dans de plus grandes zones du nord-est de la Sardaigne.

La dynamique côtière est caractérisée par une alternance de promontoires taillés dans les rochers de la base intrusive et de petites plages entre un promontoire et un autre (*pocket beach*). Cependant, il y a aussi de fréquentes baies creusées dans la roche sans dépôts côtiers sableux. Dans ces cas, il est probable que l'érosion marine a agi plus rapidement le long des lignes de fractures préexistantes. La grille angulaire des vallées et les nombreuses sections côtières confirmeraient cette hypothèse. Cependant, il ne fait aucun doute que les bras de mer les plus profonds sont des exemples typiques de Rias comme ceux qui caractérisent d'autres nombreuses localités du nord-est de la Sardaigne.

Il s'agit de vallées fluviales qui ont été touchées par des phénomènes de remplissage limités lors de la dernière glaciation et/ou qui ont en tout cas été affectées par d'importants phénomènes d'exhumation lors de la transgression Versilienne. De telles morphologies suggéreraient toutefois la présence de mouvements de descente lente dans ce secteur de l'île.

Dans cette zone, il y a également des plates-formes d'érosion sur la roche qui peuvent être interprétées comme d'anciennes terrasses d'abrasion marine.

Porto Taverna

Le contexte géomorphologique de Porto Taverna est caractérisé par un cordon littoral qui délimite une lagune en arrière, dont l'embouchure est située à l'extrémité sud de la plage. Dans plusieurs secteurs de la plage, on trouve des restes d'artefacts qui limitent l'expansion de la végétation, ou plutôt favorisent l'établissement de phénomènes de déflation.

L'ensemble du système dunaire, en particulier dans les zones qui précèdent la dune, est affecté par un niveau élevé de dégradation en relation avec les processus d'érosion intense qui affectent principalement le pied et le flanc des dunes.



Figure 17 - Plage de Porto Taverna – secteur central : restes de feuilles de *Posidonia oceanica*.

Cala Brandinchi

La plage de Brandinchi se trouve sur le cordon de sable qui sépare la mer et la lagune. Elle s'étend dans une direction nord-sud et à son extrémité sud se trouve l'embouchure de la lagune. Le profil de la plage est considérablement affecté par la pression anthropique, il y a en effet des signes évidents de perturbation, tels que le pied des dunes et les dunes embryonnaires. De plus, le passage de véhicules lourds directement sur la crête des dunes a réduit la présence de végétation qui aurait favorisé la stabilisation des dunes.



Figure 18 - Photographie par le drone de la plage de Cala Brandinchi.

La partie submergée de la plage de Brandinchi présente un système de barres près du rivage, tandis que plus au large, le substrat rocheux émerge directement.

La Cinta

Le système de La Cinta, situé près du village de San Teodoro, a une extension parabolique, dans une direction presque méridienne, d'environ 3,5 km et délimite, dans l'espace situé derrière elle, une zone humide particulièrement étendue. Il s'agit d'un cordon côtier, dont la largeur maximale est atteinte dans la partie centrale (environ 130 m), sur lequel un champ de dunes côtières bien développé a été mis en place. La plage est orientée N-S avec une exposition à l'est. La zone géomorphologique côtière est constituée de dunes fixées par la végétation, qui ont une hauteur et une extension limitées et sont alimentées par des plages constituées principalement de sédiments silicoclastiques et de sédiments carbonatés.



Figure 19 - Photo par le drone de la plage La Cinta.

Protocole méthodologique dans la Zone échantillon de l'AMP Tavolara P.C.C.

Relèvements sur le terrain

Les études géomorphologiques des plages et des banquettes ont été réalisées en mai 2018. Les activités se sont concentrées sur la plage de Cala Brandinchi, car elle présentait une plus grande quantité de dépôts de végétaux de plage. Les accumulations ont été trouvées aux extrémités de la plage avec une plus grande concentration dans le secteur nord, où elles se développent sur une longueur d'environ 200 m au sud et une largeur allant jusqu'à 7 m dans la partie nord. Une partie des restes végétaux de *Posidonia oceanica* est présente en suspension dans l'eau.

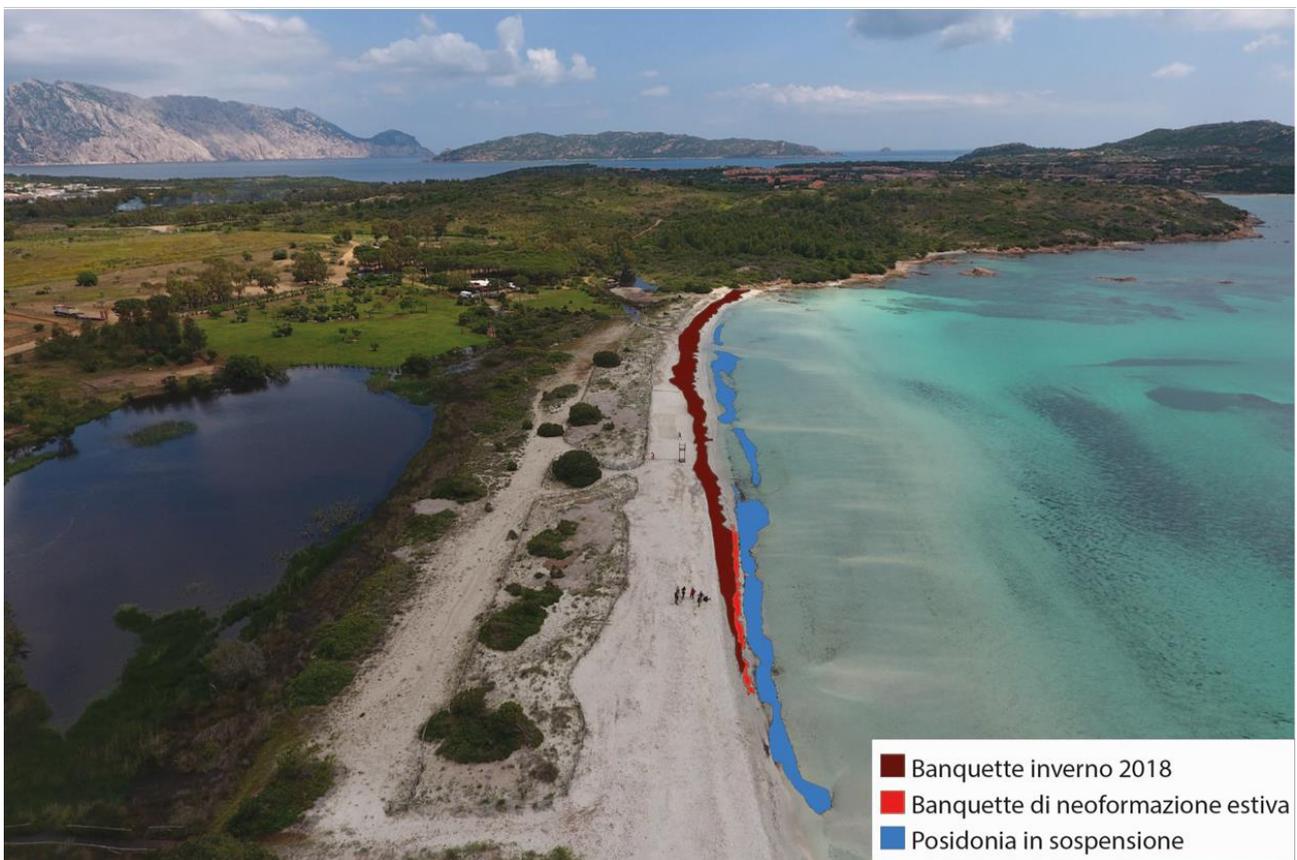


Figure 20 – Distinction entre la Banquette en hiver et la Banquette en été néoformation

Les débris sont en étroite relation avec la fraction d'eau ("masse flottante") dont la présence dépend des conditions météorologiques et est liée à la fois aux phases de construction et de démolition de la banquette.

La biomasse en suspension (composée principalement de feuilles mais aussi de restes fibreux) constitue une suspension dense qui, par sa "viscosité" et sa tension superficielle, dissipe, pour quelques mètres

devant le banc végétal, l'énergie mécanique des vagues (Boudouresque et Meinesz, 1982 ; Maervivo, 2001 ; Manca et al., 2009 ; INTERREG IIIC Beachmed- e, sous-projet NAUSICAA).

La banquette est structurée par une alternance d'amas compacts de restes de feuilles à teneur variable en sable, entrecoupées de **lentilles** et de niveaux de sable.



Figure 21 - Banquette en hiver.



Figure 22- Formations d'amas de sable dans la banquette d'hiver.

Des accumulations de posidonies ont été localisées dans les zones péri lagunaires de la plage et sur le système dunaire. Ces dépôts sont caractérisés par l'absence de la structure cohérente typique de la banquette ; ce sont les dépôts anthropiques mis en place lors du nettoyage de la plage.



Figure 23 - Accumulations anthropiques de posidonies, stockées sur l'arrière plage de Cala Brandinchi.



Figure 24 - Des posidonies s'entassent dans l'étang derrière la plage de Cala Brandinchi.



Figure 25- Des traces de véhicules lourds utilisés pour l'enlèvement et le stockage de la posidonie.



Figure 26- Impact causé par des véhicules sur la plage ; Forces de cisaillement verticales et horizontales appliquées sur la surface par les pneus.

Accumuli antropici di posidonia Maggio 2018

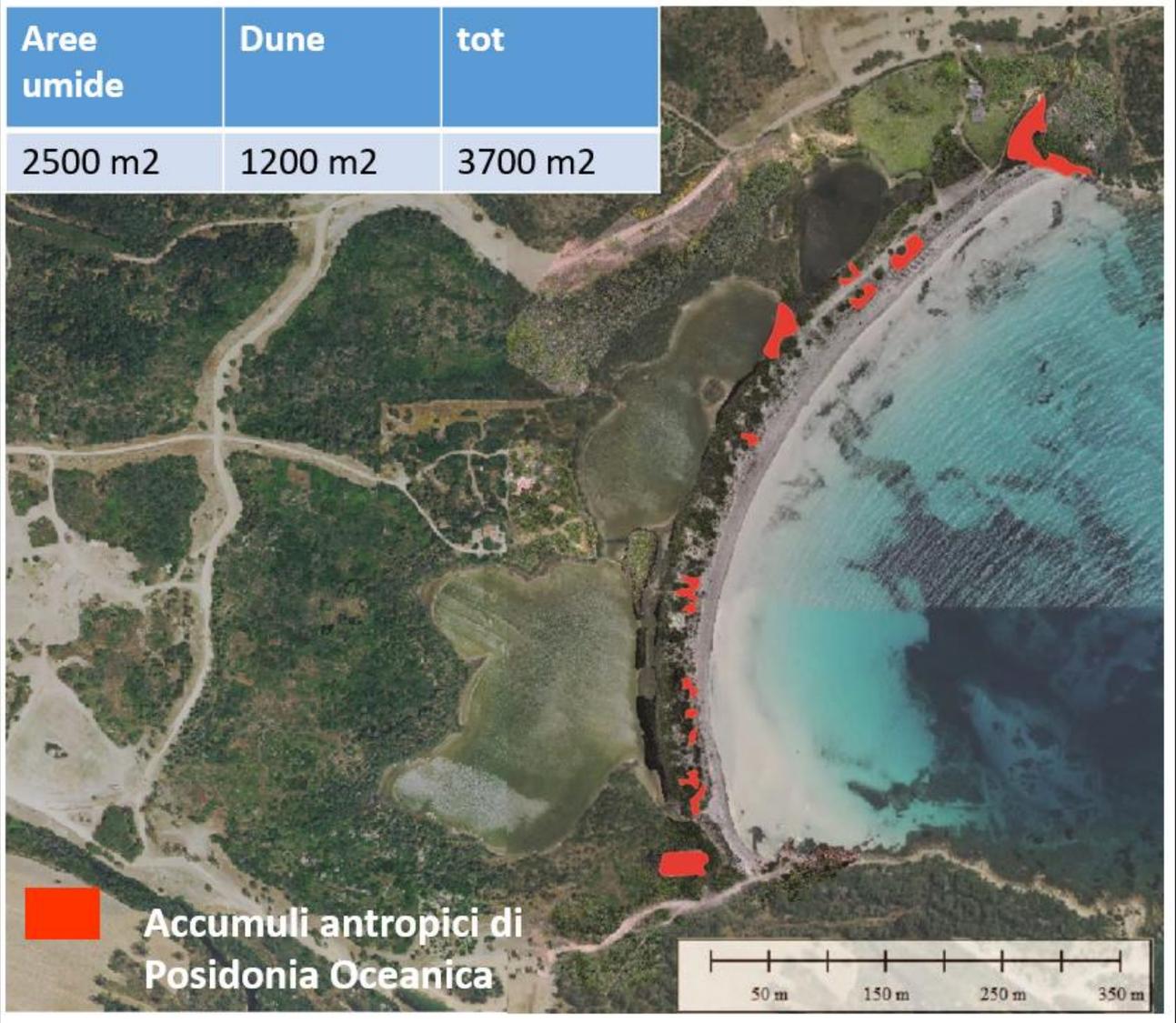


Figure 27 - Distribution des accumulations anthropiques de posidonie sur la plage de Cala Brandinchi.

Relevés photogrammétriques aériens avec drone

Afin d'acquérir les données nécessaires à l'analyse de la répartition des caractéristiques, de la représentation cartographique et à la formulation d'hypothèses évolutives relatives aux Banquettes, on a décidé de réaliser un relevé photogrammétrique aérien détaillé à l'aide d'un système aérien téléguidé (S.A.P.R).

L'objectif principal était d'acquérir les données pour le traitement et la restitution du modèle numérique de terrain (MNT) et des ortho photos zénithales de l'ensemble du système de plage.

Instruments

Le drone utilisé est un DJI Phantom 4, un multiplicateur à quatre hélices qui pèse un kilo et quatre cents grammes et porte un appareil photo de 12 Mpixels et un objectif grand angle. Le drone est alimenté par une batterie au lithium d'une durée d'environ 25 minutes. Le SAPR dispose d'un GPS intégré qui permet de

gérer des plans de vol prédéfinis. Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques techniques du drone utilisé pour les enquêtes.

Drone DJI Phantom 4	
Poids (y compris la batterie et les hélices)	1380 g
Vitesse maximale d'ascension	6 m/s (22 km/h) / Mode Sport
Vitesse de descente maximale	4 m/s (14 km/h) / Mode Sport
Précision des vols	Vertical: +/- 10 cm (avec des capteurs de position actifs) ou +/-0.5 m Horizontal: +/- 30 cm (avec des capteurs de position actifs) ou +/-1.5 m
Vitesse maximale	16 m/s (57,6 km/h)(Mode ATTI, pas de vent)
Altitude maximale de vol	6000 m
Température de fonctionnement	de 0 à 40°C
Mode GPS	GPS/GLONASS
Camera 4k avec slowmotion 1080p	
Capteur	1/2.3" de 12 Mpixels effectifs
Objectif	FOV 94° 20 mm (format 35 mm) f/2.8, mis à feu à infini
Range ISO	100-3200 (video) 100-1600 (photo)
Vitesse d'obturation	8s - 1/8000s
Taille maximale de l'image	4000 x 3000
Mode Photo	- Un seul coup - Sprint (3/5/7 coups) - Auto Exposure Bracketing (AEB) : 3/5 - Cadres entre crochets à 0,7EV - Intervalle de temps (timelaps) - HDR
Format file	- FAT32 (≤ 32 GB); exFAT (> 32 GB) - Foto JPEG, DNG (RAW)
Température de fonctionnement	de 0 à 40°C
Gimbal	
Contrôle Gimbal	de -90° à +30°
Stabilisation	3-axes (tangage, roulis, lacet)
Contrôle radio	
Fréquence de fonctionnement	2.400 Ghz - 2.483 Ghz
Débit maximal	3,5 km en mode CE, 5 km en mode FCC
Température de fonctionnement	de 0° à 40°C
Batterie	6000 mAh LiPo 2S
Soutien aux appareils mobiles	Par tablette et smartphone
Puissance de transmission (EIRP)	- FCC : 23 dBm - CE : 17 dBm
Alimentation électrique	1,2 A - 7,4 V
Batterie de drones intelligents	

Capacité de la batterie	5350 mAh
Tension	15.2 V
Type	LiPo 4S
Puissance	81,3 Wh
Poids	462 g
Durée maximale du vol	environ 28 minutes
Température de fonctionnement	de -10° à 40°C
Puissance de chargement maximale	100 W

Un GPS géodésique Leica 1200 a été utilisé pour relever les points d'appui au sol (GCP), fonctionnant avec une correction différentielle RTK à distance en mode *rover* ; les données pour la correction ont été transmises depuis l'antenne Italpos à Olbia. L'instrument ainsi configuré est capable d'effectuer des acquisitions plano-altimétriques avec une précision instrumentale de l'ordre du centimètre. Cela a permis de calibrer et de géoréférencer avec une grande précision les images et le retour des ortho photos zénithales et du DTM.



Figure 28 - Localisation des données capturées par le drone.

Les étapes principales pour obtenir les données de l'enquête sont les suivantes :

- Planification de vol, en utilisant l'application UgCS 3.3.438. L'application permet de détecter une zone sélectionnée de manière entièrement automatique. Pour chaque zone, un relevé avec une inclinaison de caméra de 90° et un autre avec une inclinaison de caméra de 45° ont été effectués.
- Acquisition de points de contrôle (GCP).
- Traitement des données et restitution des résultats grâce au logiciel Agisoft Photoscan.

Les étapes principales de l'élaboration sont les suivantes :

- Alignement des images

Les images sont ensuite automatiquement placées au bon endroit dans un environnement géoréférencé.

Le résultat de l'alignement est un nuage de points tridimensionnels de faible densité : le nuage épars.

ACQUISITION

Le relevé du système de plage de Cala Brandinchi a porté sur une superficie d'environ 7 ha. Lors de la phase de planification des vols, les zones ont été légèrement étendues afin d'inclure les zones accessoires immédiates pour une extension globale du relevé et de la restitution de plus de 10.4 ha. La figure ci-dessous montre la position et l'étendue de la zone étudiée.

En particulier, ce protocole méthodologique a été suivi :

- détection et échantillonnage des dépôts de *Posidonia oceanica* dans le Berma végétal (**BV**) et des sables de plage dans le Berma ordinaire (**BO**)
- étude de la répartition, des caractéristiques morphologiques, stratigraphiques et de l'épaisseur des gisements de *Posidonia oceanica* échoués.
- Identification et relevé des zones d'arrière-plage où des dépôts temporaires peuvent être mis en place ; relevé topographique détaillé à l'aide du GPS géodésique ;
- Traitement des données plano altimétriques et restitution de la carte topographique détaillée et de la carte isotherme ; calcul des volumes des dépôts de *Posidonia oceanica* ; échantillonnage des dépôts de surface dans les zones de plage et d'avant-plage.



Figure 29 – Ortho photo RAS 2016 – Voici en évidence la zone touchée par l'enquête avec APR.

Deux missions de vol ont été effectuées, chacune d'entre elles étant réalisée au moyen d'un plan de route approximativement parallèle au littoral. Chaque vol a été effectué à une altitude nominale d'environ 50 m agl (above ground level = altitude par rapport au sol) à laquelle correspond une GSD (Ground Sample Distance - taille nominale du pixel au sol) égale à environ 2 cm et une empreinte nominale de la photo unique d'environ 80 x 60 m.

L'objectif de l'appareil est un FOV 94° 20 mm (format 35 mm) f/2.8, mis au point à l'infini. Afin d'assurer la redondance et d'améliorer la qualité de la restitution, le chevauchement longitudinal et transversal entre les photos a été fixé à une valeur de 80 % (photos le long d'un même balayage) et 65 % (photos entre des balayages adjacents) respectivement, ce qui correspond à une distance entre les photos d'environ 12 m pour un total d'environ 459 images globalement acquises pendant les deux vols.

La planification des missions de vol a été effectuée à l'aide du logiciel UgCS 3.3.438 (figure ci-dessous) ; le même logiciel a été utilisé pour le contrôle et l'exécution automatique des missions d'acquisition de données pendant l'enquête.



Figure 30 – Planification des vols grâce à l'utilisation du logiciel UgCS 3.3.438.

SYSTÈME DE COORDONNÉES DE RÉFÉRENCE

Le système de référence des coordonnées adopté lors de l'enquête et de la restitution était ETRF2000, en projection UTM Fuso 32. Les élévations ont été converties par les ellipsoïdes ETRF2000 ortho métriques au moyen du modèle du géoïde Italgeo 2005 (reconnu comme niveau moyen de la mer) fourni par l'IGM.

GÉORÉFÉRENCEMENT

Le géoréférencement du bloc photogrammétrique a été effectué en localisant, à des endroits choisis, un nombre approprié de GCP (Ground Control Point) sous forme de cibles détectables par la caméra du drone, dont les coordonnées ont été détectées par des mesures au sol avec le récepteur GPS différentiel (Leica 1200) en bi fréquence et correction par VRS (Virtual Reference Station), avec une erreur de positionnement d'environ 1÷2 cm. La figure suivante montre un exemple de pose et de mesure de la cible de contrôle sur le terrain.

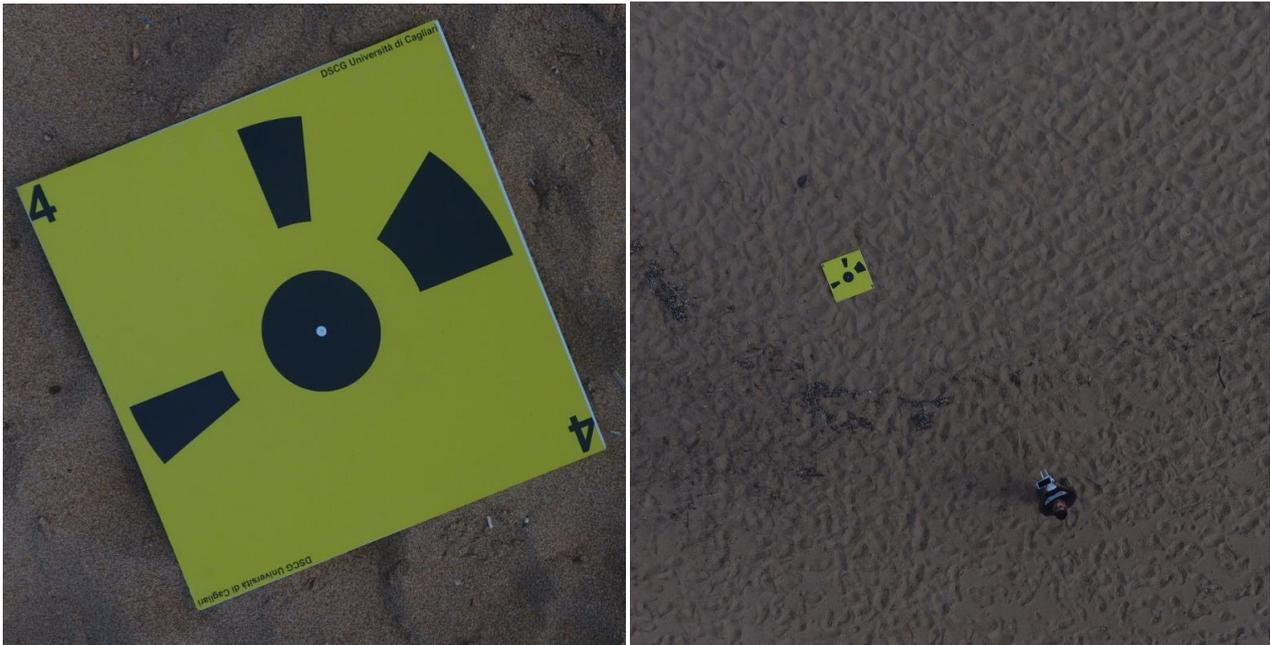


Figure 31 – Target agissant comme GCP.



Figure 32 - Position des cibles ayant fonction de GCP.

POST-ÉLABORATION ET RESTITUTION

Le relevé aérien a été rendu en trois dimensions au moyen d'un logiciel de traitement photogrammétrique spécial, qui a reconstruit l'orientation des prises de vue au moment de l'acquisition, corrigé les distorsions introduites par le système objectif/capteur et généré les coordonnées 3D des points homologues visibles en même temps sur plusieurs photographies (principe stéréoscopique), pour un total d'environ 12 millions de points rendus sur toute la surface.

L'image suivante montre une phase de la reconstruction du bloc photogrammétrique composé de toutes les photographies orientées, prise à partir d'une capture d'écran du logiciel de post-production :

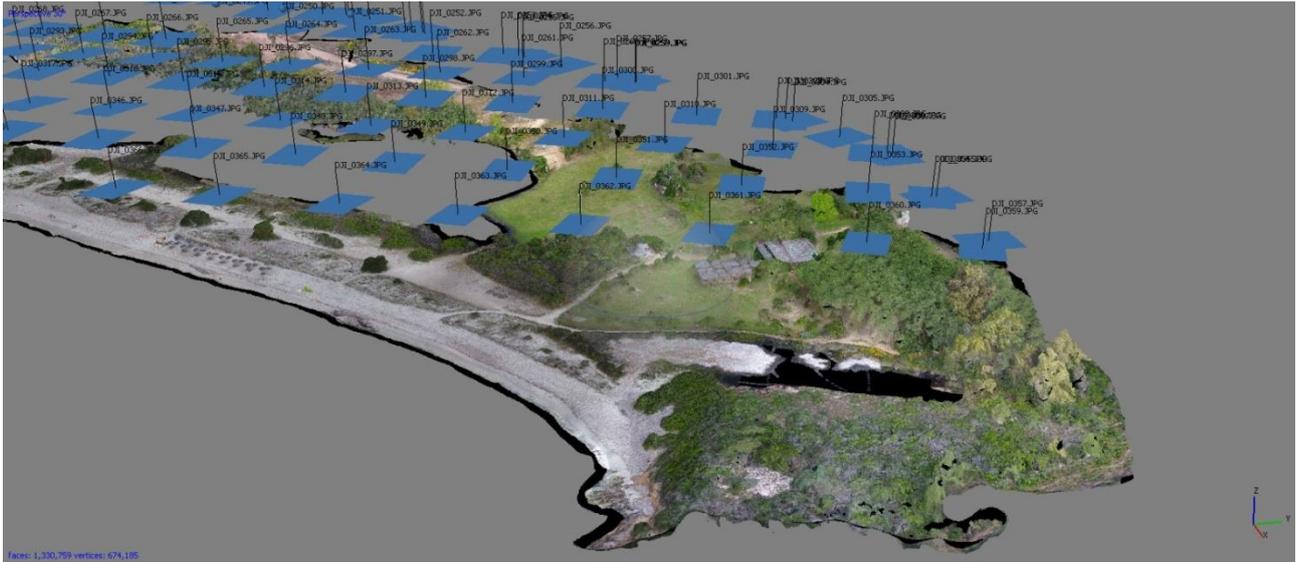


Figure 33 - Orientation des images dans le software de post-processing.

Le nuage de points dense produit par le logiciel de traitement des données correspond à un modèle numérique de surface (MNS) capable de représenter les zones détectées avec une grande précision. Le nuage a ensuite été soumis à l'application séquentielle d'une série de filtres morphologiques, ce qui a permis de retirer la végétation et les objets au-dessus du sol afin d'obtenir le modèle numérique de terrain (MNT).

Le modèle ainsi obtenu a finalement été soumis à des opérations de maillage avec des éléments triangulaires irréguliers (TIN) et de texturisation pour la création du modèle 3D photoréaliste sur toute la surface et l'extraction des :

- Modèle numérique de surface tel que créé nativement par le modèle photogrammétrique, caractérisé par une GSD (Ground Sample Distance = taille nominale du pixel au sol) égale à 5 cm, en format matriciel .tif géoréférencé ;
- Modèle numérique de terrain, comportant une GSD (Ground Sample Distance = taille nominale du pixel au sol) égale à 1 cm, en format matriciel .tif géoréférencé ;
- Orthophoto de la plage de Cala Brandinchi au format .ecw géoréférencé, caractérisée par une GSD (Ground Sample Distance = taille nominale du pixel au sol) égale à 3 cm ;
- Carte de courbes de niveau avec une équidistance égale à 0,2 m en format vectoriel gérable dans un environnement CAD et GIS.

L'image suivante montre un exemple de retour typique avec des courbes de niveau et des orthophotos superposées :

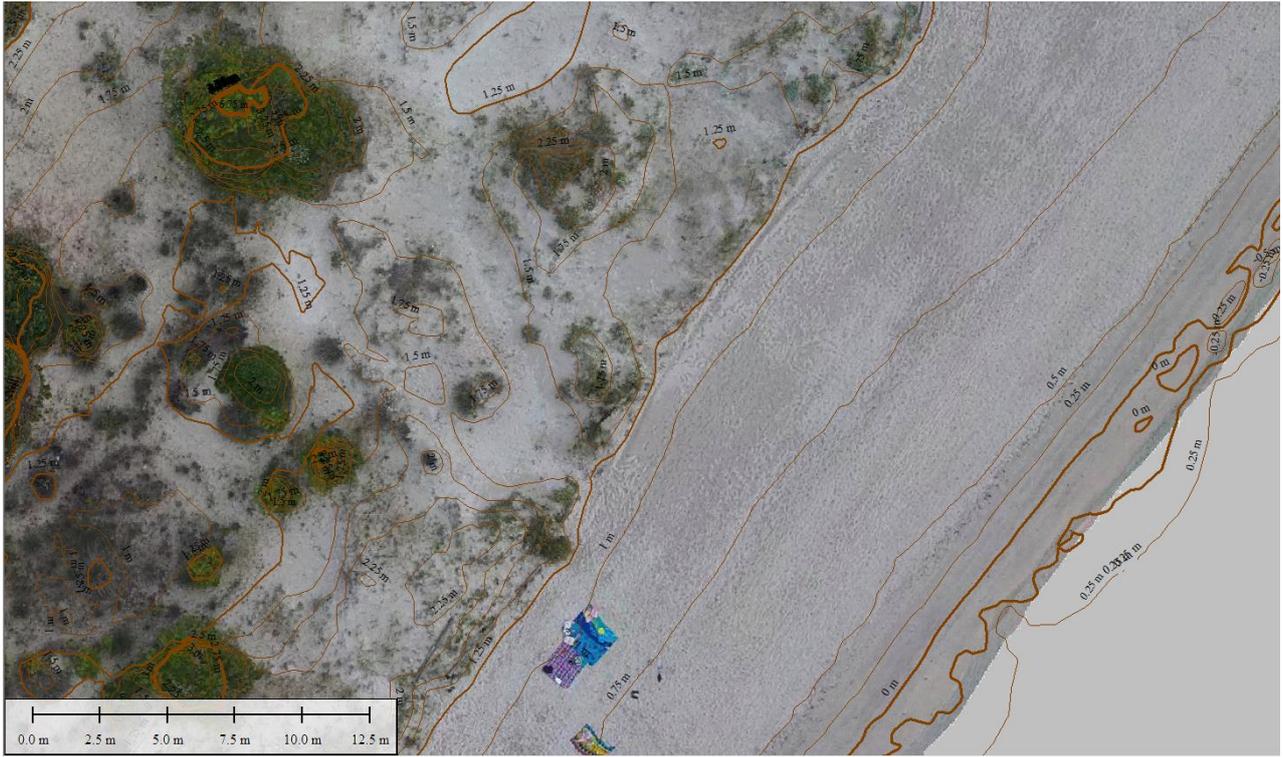


Figure 34 – Orthophotos avec superposition des courbes de niveau.

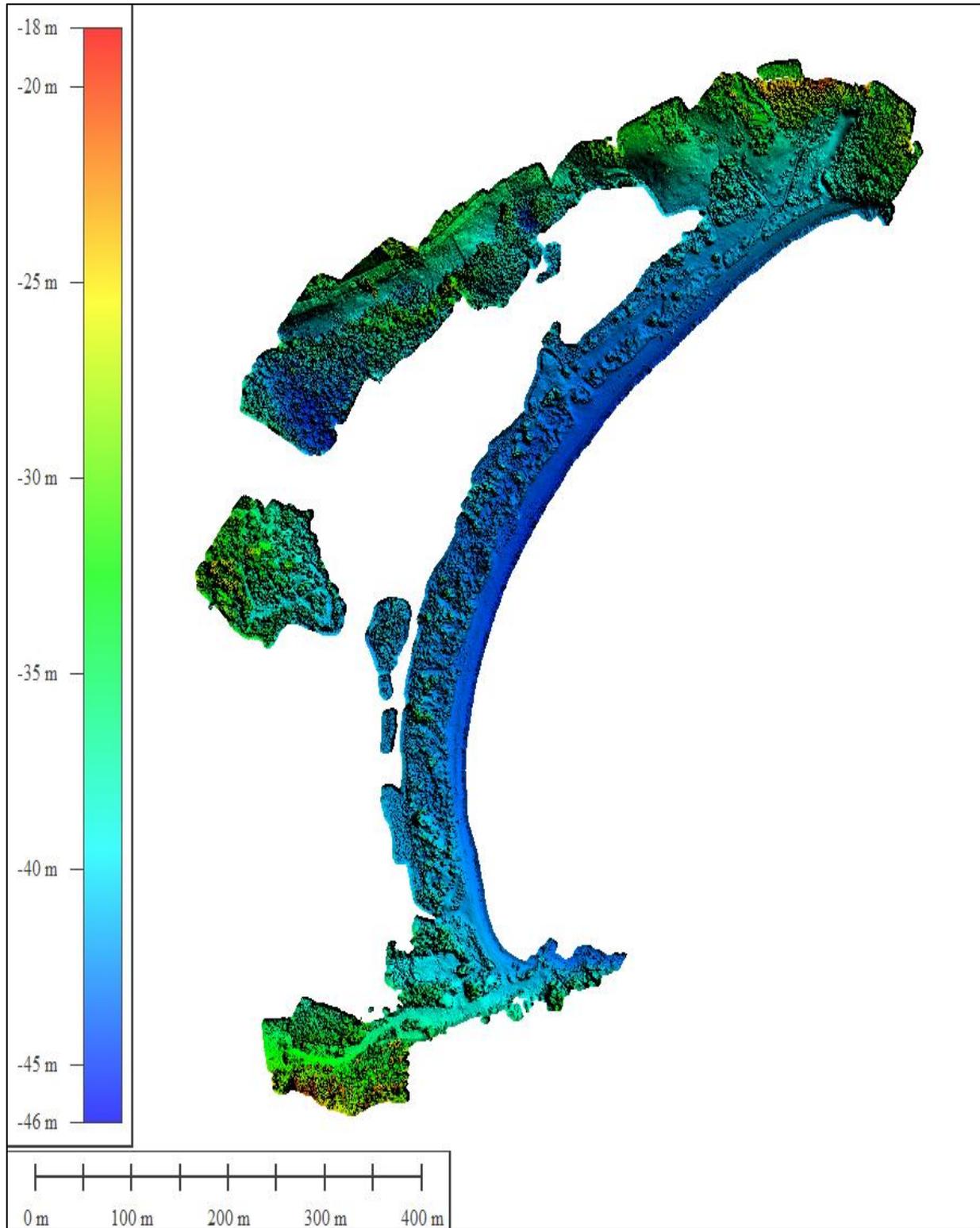


Figure 35 - Digital Elevation Model (DEM) Cala Brandinchi

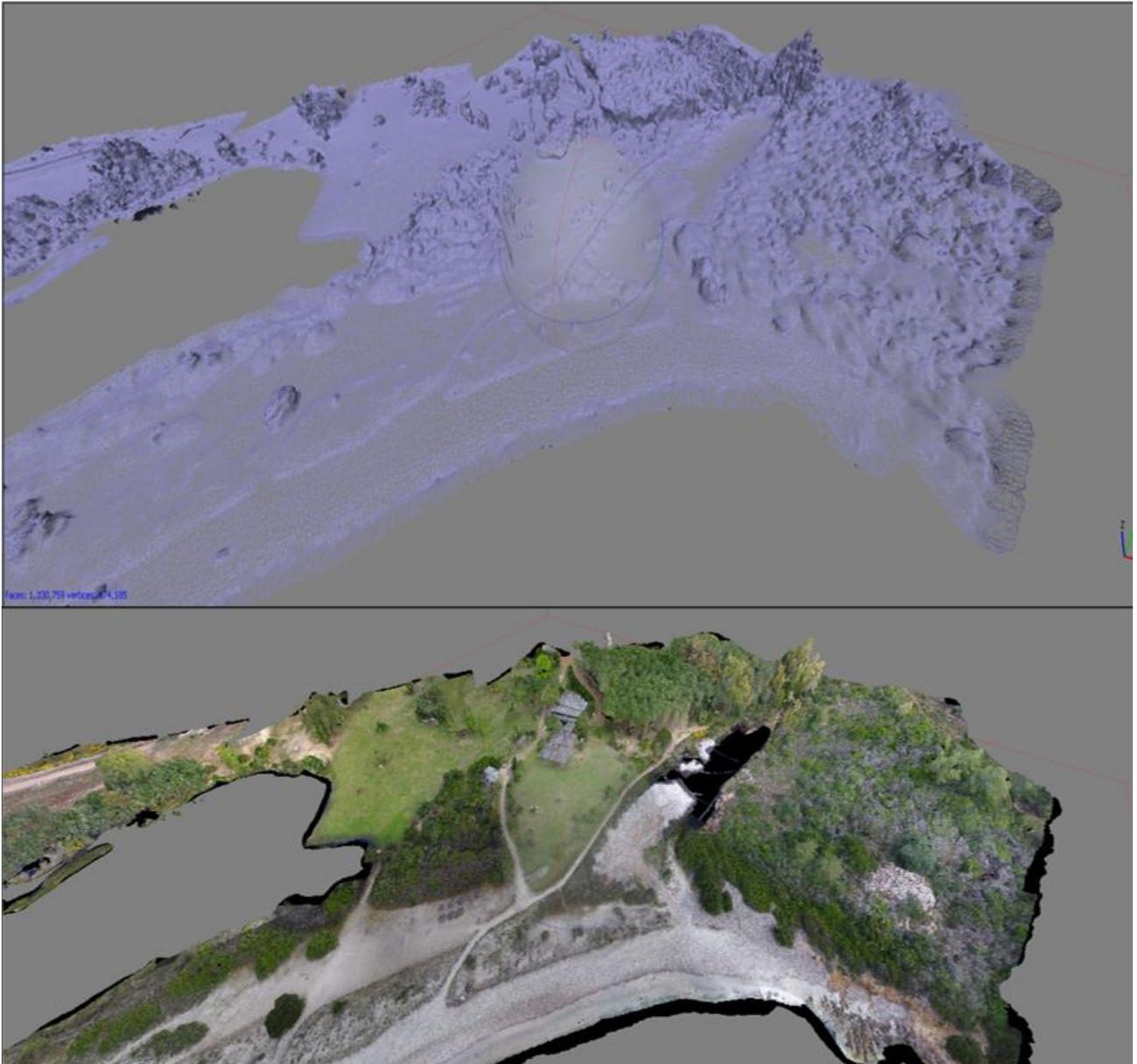


Figure 36 - Détail du traitement des données photogrammétriques.

Échantillonnage des sédiments de surface

Simultanément à l'exécution des études géomorphologiques, un échantillonnage des sédiments de surface de la plage a été effectué afin de réaliser la caractérisation granulométrique.

Des échantillons de sable ont été prélevés sur place, pour chaque échantillon une quantité de sable a été prélevée pour remplir des sacs d'un volume d'environ 10 l. Les échantillons prélevés ont été nommés :

C₂= Échantillon prélevé sur la plage "Cala Brandinchi" (San Teodoro)

C₃= Échantillon prélevé sur la plage "Porto Taverna" (Porto San Paolo)

C_{la cinta}= Échantillon prélevé sur la plage "La Cinta" (San Teodoro).

Les tests suivants ont été effectués sur ces échantillons de portions de banquette de *Posidonia oceanica* à partir desquelles le pourcentage de sable présent dans l'échantillon a été déterminé. Les deux échantillons ont été prélevés respectivement dans la partie inférieure et supérieure de la côte, et ont été nommés : "C. La Cinta_{bas}" e "C. La Cinta_{haut}".

Au total, 6 échantillons significatifs ont été prélevés sur la plage émergée, 3 échantillons de sable de surface et 3 échantillons de Posidonie de la Banquette.

Sigla échantillon	Coordonnées (UTM – WGS 84)		Plage	Typologie
	X	Y		
C4	555108.128	4523283.745	Porto Taverna	Échantillon de sable
C1	558041.510	4520896.423	Cala Brandinchi	Échantillon de Posidonie
C2	557775.156	4520408.079	Cala Brandinchi	Échantillon de sable
C-La Cinta	556832.782	4514777.875	La Cinta	Échantillon de sable
La Cinta haut	556871.398	4514741.944	La Cinta	Posidonie de la partie haute de la banquette
La Cinta bas	556877.042	4514741.266	La Cinta	Posidonie de la partie basse de la banquette



Figure 37 - Point de prélèvement sur la plage de Porto Taverna. Rouge - Échantillon de sable ; Jaune - Échantillon de posidonie.



Figure 38 - Point de prélèvement de la plage de Cala Brandinchi. Rouge - Échantillon de sable ; Jaune - Échantillon de posidonie.

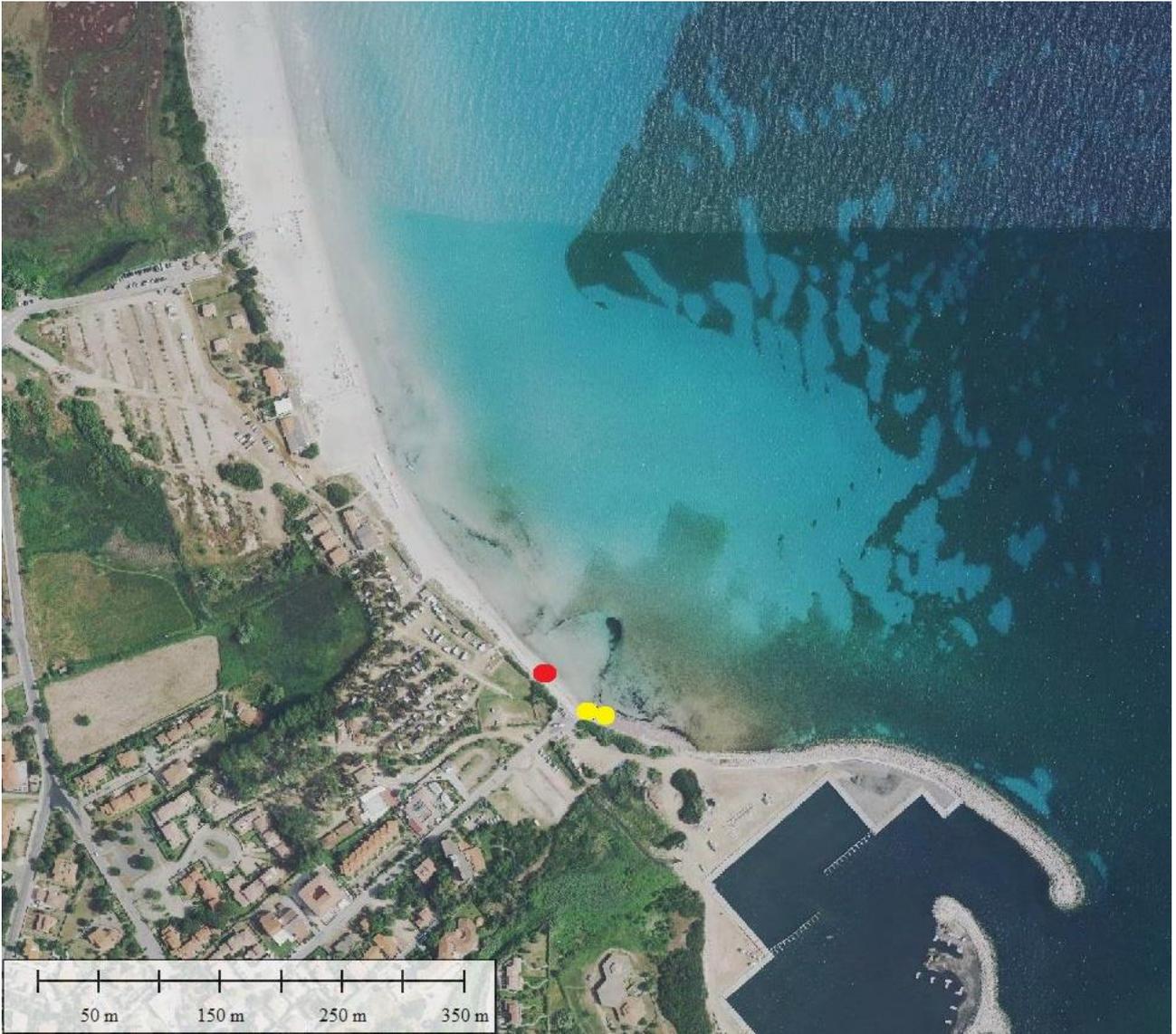


Figure 39 - Point de prélèvement de la plage de La Cinta. Rouge - échantillon de sable; Jaune - Échantillon de posidonie.

Analyse en laboratoire

Analyse de la taille des particules

L'activité analytique pour la détermination des caractéristiques des tissus a consisté en trois phases différentes :

Étape 1 : préparation et prétraitement.

Chaque échantillon (pesant environ 200 gr.) a été traité avec une solution de peroxyde d'hydrogène (30%) et d'eau distillée dans un rapport de 1:4, pendant 48 heures à température ambiante. Les échantillons ont ensuite été lavés deux fois à l'eau distillée, afin d'éliminer les sels présents, et séchés dans un four pendant 24 heures à une température de 100° C.

Étape 2 : séparation de la fraction sableuse et de la fraction argileuse.

Après un prétraitement approprié et la détermination du poids total, chaque échantillon a été séparé à l'état humide en deux fractions granulométriques au moyen d'un tamis de 63 mailles μm avec un vide. La fraction grossière ($>63 \mu\text{m}$) et la fraction fine ($<63 \mu\text{m}$) ont été placées dans des conteneurs spéciaux, séchées dans un four pendant 24 heures à une température de 100 °C et ensuite pesées.

Étape 3 : Analyse des fractions obtenues.

La fraction supérieure à 63 μm a été criblée pendant 12 minutes avec une pile de tamis de la série ASTM (American Society for Testing and Materials) dont les mailles vont de 5600 à 63 μm , espacées à intervalles de $1/2 \Phi$ ($\Phi = -\log_2 d$; où d est le diamètre de chaque particule individuelle exprimé en mm); enfin, le poids retenu dans chaque tamis a été déterminé.

Tableau 1 - Formules statistiques utilisées par l'application "Gradistat" pour la détermination des caractéristiques granulométriques des échantillons de sédiments analysés.

(d) Logarithmic (original) Folk and Ward (1957) graphical measures					
Mean	Standard deviation		Skewness	Kurtosis	
$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$	$\sigma_I = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$		$Sk_I = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$	$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$	
Sorting (σ_1)	Skewness (Sk_1)		Kurtosis (K_G)		
Very well sorted	<0.35	Very fine skewed	+0.3 to +1.0	Very platykurtic	<0.67
Well sorted	0.35–0.50	Fine skewed	+0.1 to +0.3	Platykurtic	0.67–0.90
Moderately well sorted	0.50–0.70	Symmetrical	+0.1 to -0.1	Mesokurtic	0.90–1.11
Moderately sorted	0.70–1.00	Coarse skewed	-0.1 to -0.3	Leptokurtic	1.11–1.50
Poorly sorted	1.00–2.00	Very coarse skewed	-0.3 to -1.0	Very leptokurtic	1.50–3.00
Very poorly sorted	2.00–4.00			Extremely leptokurtic	>3.00
Extremely poorly sorted	>4.00				

Les paramètres statistiques prévus dans la méthodologie Folk and Ward (1957) ont été obtenus en utilisant l'application Gradistat pour Microsoft Excel (Tableau 2).

Une brève description des paramètres statistiques considérés est donnée ci-dessous :

Diamètre moyen : il s'agit d'une moyenne de la taille des granules composant l'échantillon examiné ;

Médiane ou d50 : est la taille des particules au centre de la distribution, c'est-à-dire le diamètre correspondant à 50 % de la courbe cumulée ;

Tableau 2 - Comparaison entre l'échelle de taille des grains utilisée par le programme Gradistat et les classifications de Udden (1914) et Wentworth (1922) et Friedman (1978) et Sanders (1978) (d'après Blott & Pye, 2001).

Grain size		Descriptive terminology		
phi	mm/ μ m	Udden (1914) and Wentworth (1922)	Friedman and Sanders (1978)	GRADISTAT program
-11	2048 mm		Very large boulders	
-10	1024		Large boulders	Very large
-9	512	Cobbles	Medium boulders	Large
-8	256		Small boulders	Medium
-7	128		Large cobbles	Small
-6	64		Small cobbles	Very small
-5	32			Very coarse pebbles
-4	16	Pebbles	Coarse pebbles	Coarse
-3	8		Medium pebbles	Medium
-2	4		Fine pebbles	Fine
-1	2		Granules	Very fine pebbles
0	1	Very coarse sand	Very coarse sand	Very coarse
1	500 μ m	Coarse sand	Coarse sand	Coarse
2		Medium sand	Medium sand	Medium
3		Fine sand	Fine sand	Fine
4		Very fine sand	Very fine sand	Very fine
5	31		Very coarse silt	Very coarse
6	16	Silt	Coarse silt	Coarse
7	8		Medium silt	Medium
8	4		Fine silt	Fine
9	2		Very fine silt	Very fine
		Clay	Clay	Clay

Mode : c'est le diamètre de particule le plus fréquent, indiqué par le point le plus raide de la courbe cumulative ou le point le plus élevé de la courbe de fréquence ;

Écart-type ou calibrage ou triage (σ_1) : c'est la diffusion de la distribution autour de la moyenne, c'est-à-dire qu'il indique dans quelle mesure la distribution de la taille des grains diffère de la valeur moyenne du diamètre ; il est indépendant du grain moyen et indique, en général, le degré de transformation auquel un sédiment a été soumis. La classification exprime la capacité sélective du moyen de transport, c'est-à-dire sa capacité à collecter et/ou à déposer les granulés : abandon des plus grossiers et prise en charge des plus fins. Les sédiments des vents et des plages, par exemple, sont parmi les plus classés dans la nature (Bosellini et al. , 1989 ; Ricci Lucchi, 1980);

Skewness ou Asymétrie: elle met en évidence l'homogénéité de la population granulométrique, c'est-à-dire si les valeurs sont également réparties d'un côté à l'autre de la position centrale, ou barycentre de la courbe. Elle a un signe positif (+) si la courbe a une queue vers les diamètres fins et un signe négatif (-) si la courbe a une queue vers les diamètres grossiers ; une courbe parfaitement symétrique est définie avec une asymétrie nulle. L'asymétrie est due à des additions ou des soustractions de matière dans les queues de la courbe granulométrique d'origine. Par exemple, dans les sables de rivière et de dunes, l'asymétrie est généralement positive (queue de la matière fine); en fait, les deux moyens de transport (la rivière et le vent) sont capables de transporter des sédiments très fins mais pas des sédiments grossiers; tandis que dans les sables de plage, l'asymétrie est généralement négative (queue de la matière grossière) en raison de l'élimination des fractions fines par le mouvement des vagues (Bosellini et al., 1989 ; Ricci Lucchi, 1980).

Kurtosis : c'est la mesure de l'affinement de la distribution de fréquence et considère le rapport entre la dispersion dans la partie centrale et la dispersion dans les queues ; on distingue une distribution leptokurtique ("affinement" de la courbe de fréquence) d'une distribution platikurtique (dispersion sur toute la courbe de fréquence).

Les échantillons ont été subdivisés en classes de taille des particules selon l'échelle de Wentworth (1922), dont les limites de classe sont exprimées en Φ ($\Phi = -\log_2$ du rapport : diamètre des granules exprimé en mm/unité de diamètre de 1 mm), selon l'échelle proposée par Krumbein (1934). La distinction des principales classes de taille (gravier, sable, limon et argile) a été utilisée pour la classification des sédiments selon le diagramme triangulaire de Shepard.

Les analyses granulométriques ont été effectuées sur un total de 9 échantillons de sédiments.



Figure 40: Exécution du tamisage des échantillons.

Poids spécifique des grains.

Le poids spécifique des grains d'une terre signifie le rapport entre le poids des grains et leur volume, y compris les pores éventuels existant à l'intérieur des grains ou non saturés en eau.

Pour déterminer le poids spécifique des grains, une quantité connue (50 g) de matière sèche, à moitié remplie d'eau distillée et préalablement déshydratée, est placée dans un pycnomètre d'un volume de 100 ml, placé sous vide pendant le temps nécessaire pour expulser tous les gaz. Le pycnomètre est ensuite rempli jusqu'à la marque sur le cou et pesé avec une précision de 0,01 g. La pesée du pycnomètre rempli uniquement d'eau distillée jusqu'à ce que la marque sur le col soit répétée et que, par différence, on obtienne le volume déplacé par les particules solides. À partir de ces données, il est possible d'obtenir le poids spécifique des particules solides grâce à la formule :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w * (P_2 - P_1)}{[P_4 + (P_2 - P_1)] - P_3}$$

γ_w = Poids spécifique de l'eau

P1 = Poids du pycnomètre vide avec bouchon

P2 = Pycnomètre de poids avec capuchon + échantillon

P3 = Pycnomètre poids avec bouchon + échantillon + eau

P4 = Pycnomètre poids avec bouchon + eau



Figure 41: Pesée du pycnomètre.

Tests de perméabilité.

La perméabilité est une mesure de la vitesse à laquelle un fluide passe à travers un milieu poreux. Le type de test effectué en laboratoire est défini à charge constante.



Figure 42: Préparation de la matrice pour le test de perméabilité.

Le volume de la matrice a été calculé en prenant les mesures manuellement et en appliquant la formule suivante :

$$V = (\pi r^2 h)$$

Où "r" représente le rayon du dé et "h" la hauteur.

Les tests ont été effectués à des stades différents d'épaissement de l'échantillon : add-Base: remplissage de la matrice avec la plus petite quantité de sable. Afin d'obtenir le même épaisseur pour chaque test portant sur le même échantillon, une quantité d'échantillon a été insérée dans la matrice de manière à avoir le même poids dans chaque test effectué.

Epaississement pour la charge statique

Une presse reliée à un anneau dynamométrique a été utilisée, grâce à laquelle il a été possible d'homogénéiser la charge appliquée.



Figure 43: Application d'une charge statique sur l'échantillon.

Comme on peut le voir sur l'image, un disque a été placé au-dessus de l'échantillon afin d'obtenir une répartition uniforme de la charge.

L'épaississement est effectué par couches, chaque couche représente un tiers du poids de l'échantillon utilisé pour l'essai avec un épaississement de base, puis chaque couche est compactée par la machine à l'intérieur de la matrice jusqu'à un compactage.

Les tests ont donc été effectués sur deux étapes de chargement, de 45 Kg et 90 Kg.

L'épaississement avec la charge de 90 kg a été effectué à la fois à l'état sec des différents échantillons et à l'état humide. Le processus d'humidification a été réalisé en amenant l'échantillon à saturation à l'intérieur d'une matrice et en éliminant l'excès d'eau par gravité.

Ensuite, le pourcentage en poids de l'eau présente dans l'échantillon a été calculé.

Epaississement par vibration

L'épaississement par vibration a été effectué à l'aide des mêmes machines que celles utilisées pour faire vibrer les tamis lors de l'analyse granulométrique.

Un filtre placé à la base de la matrice a été utilisé pour que la dispersion de l'échantillon pendant la vibration soit nulle.

En outre, un "collier" a été installé sur la matrice de manière à pouvoir insérer une plus grande quantité d'échantillon, 1500 grammes d'échantillon ont été insérés pour chaque test, au-dessus desquels un bouchon a été placé pour empêcher l'échantillon de s'échapper et un poids qui permet de fixer la matrice au tamis comme le montre la figure 20.



Figure 44: les différentes étapes de l'épaississement par vibration, la préparation de la matrice (première image) et l'exécution de la vibration (deuxième image)

Exécution du test

Une fois l'échantillon préparé et pesé, il doit être inséré dans la matrice en disposant correctement les plaques de base et de tête et le disque filtrant.

Ensuite, on remplit le réservoir de l'autoclave avec de l'eau de désaération et l'on connecte la matrice contenant l'échantillon au système de tubes du perméamètre. Une fois ces procédures et précautions prises, le test peut être effectué par saturation de l'échantillon puis, à l'aide d'un chronomètre, on doit prendre note du temps nécessaire pour remplir un volume donné constitué des cylindres gradués utilisés, obtenant ainsi la vitesse de remplissage.



Figure 45: Instruments utilisés pour effectuer des tests de perméabilité.

Pendant l'exécution du test, il peut se produire des événements susceptibles de provoquer une erreur :

- Charge hydraulique trop élevée

Ce paramètre, dans le cas d'un écoulement ascendant, peut provoquer des phénomènes de siphonage à l'intérieur de l'échantillon, une variation du degré d'épaissement et une perturbation du matériau ;

- Formation d'un film-filtre de matériaux fins

Ce film peut se former à proximité immédiate des surfaces libres de l'échantillon à la suite de la séparation des constituants limoneux du sable, pendant le dépôt du matériau à l'intérieur du perméamètre, ou pendant l'essai à la suite de la migration des particules plus fines vers la base ou la tête de l'échantillon ;

- Flux latéral entre l'échantillon et la paroi du perméamètre
- Variation de température pendant l'essai

Une augmentation de la température entraîne une diminution de la viscosité dynamique de l'eau, ce qui se traduit par une augmentation de la perméabilité mesurée ;

- Gonflement dans le cas d'échantillons cohésifs.

Résultats

Analyse de la taille des particules

Dans les tableaux et les graphiques sont reportées toutes les données relatives aux analyses granulométriques effectuées, puis des tableaux avec les pourcentages en poids de la rétention au tamis relatif, les déterminations du coefficient d'uniformité et de la courbure, la courbe cumulative décrivant le sédiment et les histogrammes décrivant la distribution de la granulométrie.

En outre, le tableau ci-dessous fournit un résumé général des résultats de l'analyse des trois échantillons.

Les caractéristiques de la taille des grains affectent le soulèvement du sédiment.

Les sables bien classés ont une plus grande portance que les sables assortis.

Granulométrie			
Porto Taverna	Sable grossier	49%	Mal classé
	Sable moyen	19,6%	
	Sable fin	6%	
	Sable très fin	0,2%	
Cala Brandinchi	Sable grossier	0,1%	Très bien classé
	Sable moyen	8,4%	
	Sable fin	90%	
	Sable très fin	1,6%	
La Cinta	Sable grossier	0,3%	Très bien classé
	Sable moyen	16,7%	
	Sable fin	82,7%	
	Sable très fin	0,2%	

Poids spécifique des grains.

Échantillon	γ_d (g/cm ³)
La Cinta	2,67
Porto Taverna	2,63
Cala Brandinchi	2,67

Analyse des échantillons de Banquette de Posidonie

Les échantillons de posidonie prélevés sur la banquette ont été analysés en laboratoire dans le but d'identifier le pourcentage de sable qu'ils contiennent.



Figure 46 - Posidonie échantillonnée de la Banquette.

Les analyses ont été effectuées sur un total de 3 échantillons significatifs des dépôts de restes de feuilles échoués (Banquette) dans la bande entre le rivage et la Berma ordinaire des deux plages de La Cinta et Cala Brandinchi. Des banquettes bien structurées n'ont pas été trouvées sur la plage de Porto Taverna.

Cala Brandinchi (Banquette hiver 2018)

44 % Sable

La Cinta (Banquette de néoformation estivale)	6,6 % Sable
La Cinta (Banquette hiver 2018)	75,5 % Sable

Tableau 3 - Poids du sable dans les banquettes.

Les résultats des tests montrent que la perméabilité du sable diminue sensiblement lorsque la charge statique augmente, mais qu'elle diminue très nettement, se réduisant à environ la moitié si la charge est appliquée avec des vibrations simultanées (rendant ainsi la plage plus érodable), une condition qui est typique de la pression appliquée sur le sable par un moyen mécanique.

Tests de perméabilité

Les tableaux ci-dessous indiquent, pour chaque échantillon, le coefficient de perméabilité (k), le poids de l'échantillon utilisé pour l'essai, le poids spécifique des grains, calculé précédemment, la densité apparente obtenue en divisant le poids de l'échantillon par le volume de la matrice, le pourcentage de porosité et enfin le pourcentage de teneur en eau en ce qui concerne l'épaississement des échantillons effectué à l'état humide. Pour les tests de perméabilité en laboratoire, des matrices de 105 mm de diamètre et d'une surface de 164,85 cm² ont été utilisées sur lesquelles ont été appliquées des charges de 45 kg et 90 kg, correspondant respectivement à une charge unitaire de 0,28 kg/cm² et 0,56 kg/cm² ; ces charges peuvent simuler la pression exercée sur le sable par **un petit tracteur d'environ 2000 kg qui décharge 0,25 kg/cm²** par roue et un **tracteur moyen de 4300 kg qui décharge 0,55 kg/cm²** par roue.

Charge appliquée	Sédiment de Porto Taverna	Sédiment de Cala Brandinchi	Sédiment de La Cinta
0 kg/cm ²	8,93 mm/s	9,23 mm/s	8,48 mm/s
0,28 kg/cm ²	8,87 mm/s	7,60 mm/s	7,26 mm/s
0,56 kg/cm ²	8,40 mm/s	7,09 mm/s	6,65 mm/s
0,56 kg/cm ² Sature	8,87 mm/s	7,09 mm/s	6,65 mm/s
0,28 kg/cm ² Vibrant	7,98 mm/s	5,70 mm/s	5,80 mm/s

0, 56 kg/cm ²	6,50 mm/s	4, 85 mm/s	4,89 mm/s
Vibrant			

Figure 47 - Valeurs de perméabilité mesurées en laboratoire pour divers degrés de compactage de l'humidité.

Les résultats des tests montrent que la perméabilité du sable diminue sensiblement lorsque la charge statique augmente, mais qu'elle diminue très nettement, se réduisant à environ la moitié si la charge est appliquée avec des vibrations simultanées (rendant ainsi la plage plus érodable), une condition qui est typique de la pression appliquée sur le sable par un moyen mécanique.

Relations entre la perméabilité et la porosité par étape de charge

Dans les graphiques ci-dessous, les paramètres de perméabilité et de porosité pour chaque test effectué sur chaque échantillon ont été corrélés.

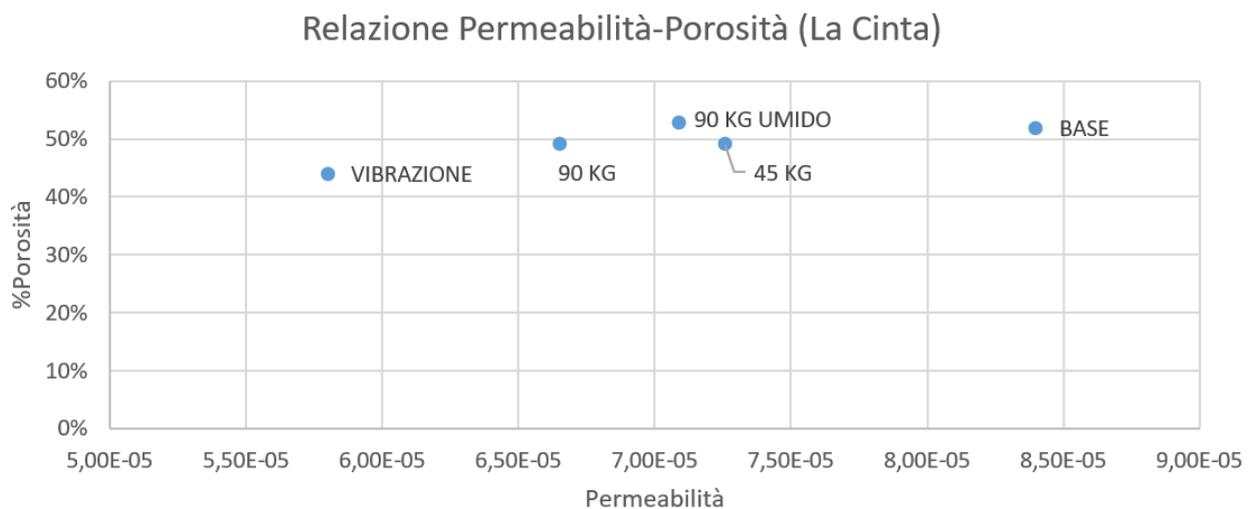


Figure 48 - Relation Perméabilité - Porosité de la plage La Cinta.

Relazione Permeabilità-Porosità (Cala brandinchi)

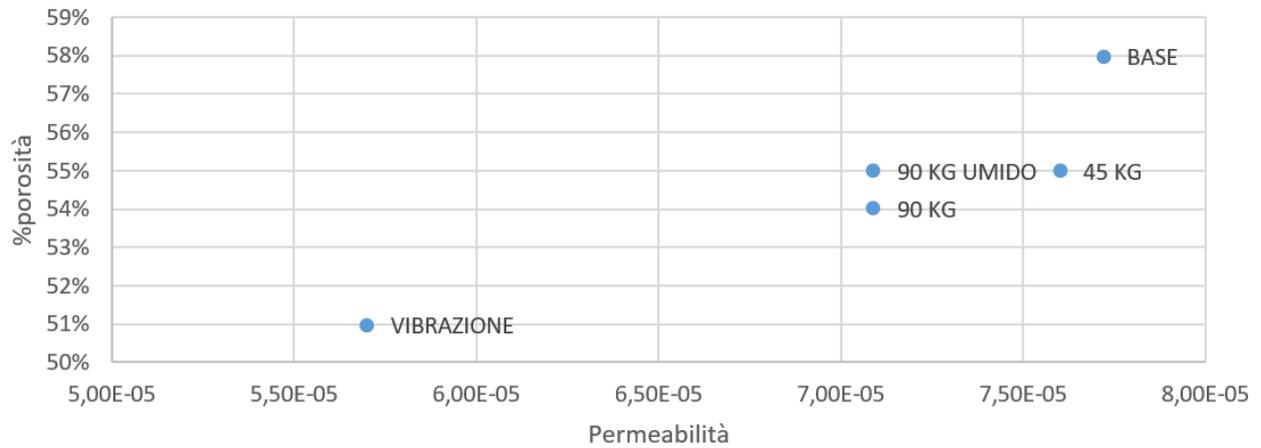


Figure 49 - Relation Perméabilité - Porosité de la plage Cala Brandinchi.

Relazione Permeabilità-Porosità (Porto Taverna)

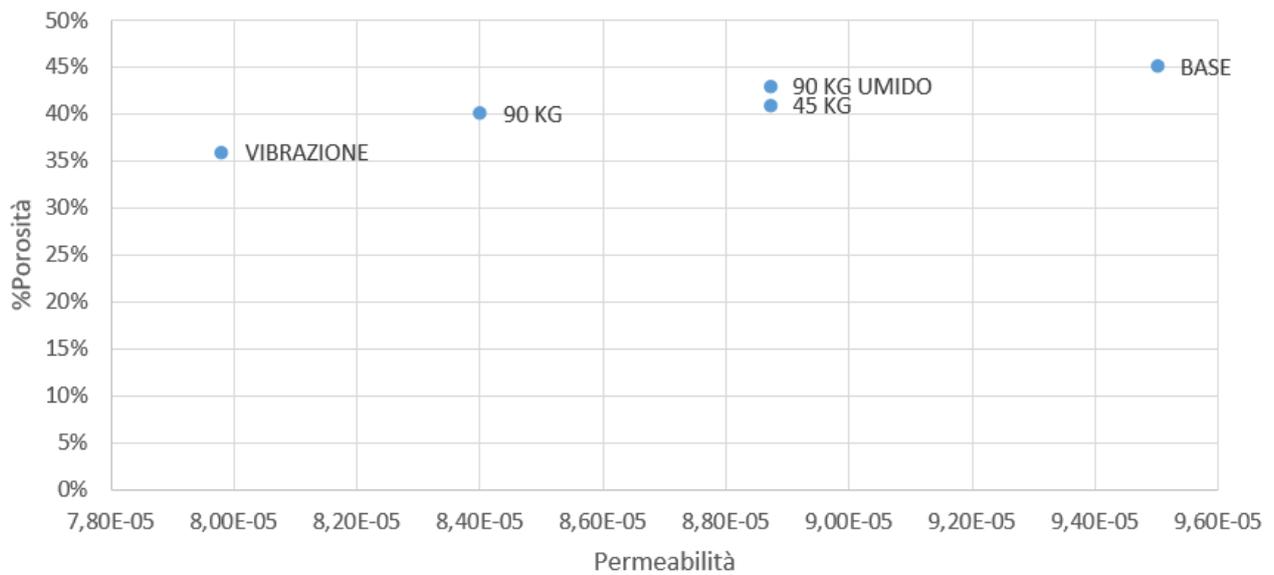


Figure 50 - Relation Perméabilité - Porosité de la plage Porto Taverna.

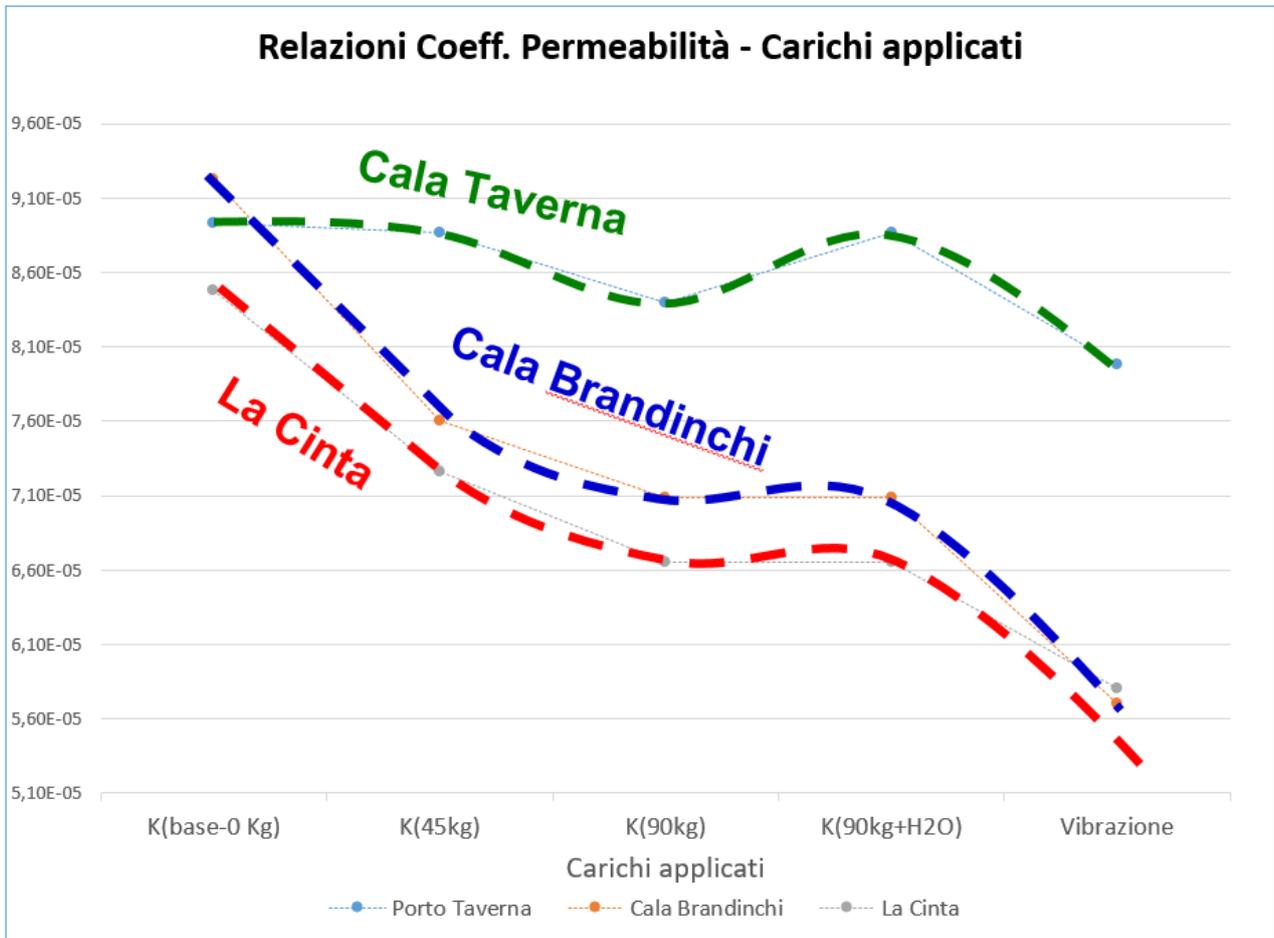


Figure 51 - Relation entre le coefficient de perméabilité et les charges appliquées.

Discussions et conclusions

Afin d'obtenir des valeurs de perméabilité représentatives pour les sols granulaires dans des conditions naturelles, la meilleure méthode serait d'effectuer des tests directement in situ, car il est difficile de maintenir l'épaissement naturel du dépôt en laboratoire. L'importance des tests en laboratoire dans ce cas réside dans le fait que le comportement des sols sous différentes charges et contraintes a été comparé.

Par conséquent, la prochaine phase d'investigation sera la réalisation de charges de plaques dans l'estran des 3 côtes examinées, et la perméabilité in situ par des tests d'absorption volumétrique.

Les tests de laboratoire effectués ont démontré :

- 1) que les charges affectent la perméabilité sur les plages de sables fins bien classés (Brandinchi, Cinta), de sables moyens et grossiers moins sensibles, hétérométriques et polygéniques (Porto Taverna).
- 2) que la réduction de la perméabilité en fonction de la charge statique subit un changement particulièrement important lorsqu'une vibration est également appliquée.

À la lumière des tests effectués et des résultats obtenus, on peut souligner que le coefficient de perméabilité de chaque échantillon est fortement influencé par plusieurs paramètres, tels que la taille des grains, le coefficient d'uniformité, l'état d'épaississement et la porosité.

Tests in situ

En raison de l'impossibilité d'obtenir les autorisations nécessaires pour entrer sur les plages de La Cinta et de Cala Brandinchi avec un moyen mécanique sur pneus de 8.600 kg qui pourrait servir de contraste, les essais de charge sur plaque ont été effectués uniquement sur le site de Porto Taverna, une plage qui, en raison de la taille de ses particules, a montré une moindre sensibilité à la contrainte de charge aux analyses de laboratoire (sables moyens et grossiers); par conséquent, si la charge sur plaque permet de documenter un impact significatif sur la réduction de la perméabilité, l'impact que les moyens mécaniques auront sur les deux autres plages de sable fin (La Cinta et Brandinchi) sera encore plus important.

Les enquêtes in situ ont été réparties entre les activités suivantes :

1. identification des zones de la plage les plus appropriées et représentatives où effectuer les tests de perméabilité ;
2. réalisation de 28 tests de perméabilité à charge variable sur site au moyen d'un infiltromètre à anneau unique ;

3. Exécution de 2 essais de charge sur plaque.

Essais de charge sur plaque

Des essais sur plaque sont effectués pour vérifier la capacité portante du substrat des couches de fondation non liées, des routes et des bâtiments industriels.

Détermination des modules de déformation M_d et M_d' au moyen d'un essai de charge à double cycle sur plaque circulaire (CNR BU 146/92)

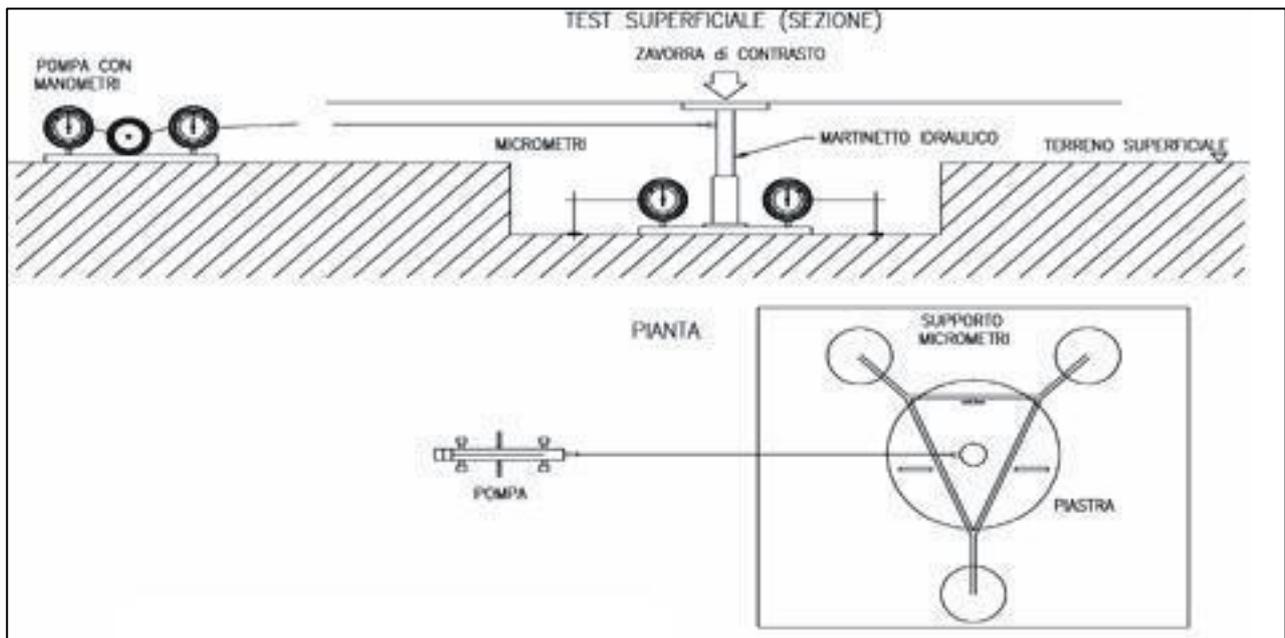


Figure 54 – Test de charge sur la plaque. Schéma de montage du système de comparateurs pour le calcul d'affaissement du terrain.

L'essai sur plaque est utilisé pour vérifier le sol de fondation, la couche de fondation et la couche de base des chaussées. Son utilisation devrait également être étendue à l'étude de la capacité portante des sols de surface.

Le test est effectué sur une partie du sol en le chargeant par étapes successives, de manière à pouvoir calculer le module de déformation ou la compressibilité du sol.

Le test est effectué conformément à la réglementation italienne, selon les indications fournies par la **CNR BU N. 146 du 14 décembre 1992**. Comme mentionné ci-dessus, l'essai consiste à charger par étapes une plaque d'acier d'un diamètre de 300 mm et d'une épaisseur de 25 mm avec un cylindre hydraulique capable de communiquer une force maximale de 10 tonnes. Une fois que la zone de terrain où l'essai doit être effectué a été choisie, convenablement nivelée et que les pierres (clastes) de plus de 100 mm ont été enlevées, elle doit être nivelée avec du sable. Une fois la plaque d'acier positionnée, le cylindre hydraulique doit être placé au centre de la plaque, convenablement contrasté à l'aide d'un compresseur ou d'un camion. A 120° du périmètre de la plaque, il faut positionner trois capteurs de déplacement électroniques d'une résolution de 0,001 mm, convenablement fixés à un cadre de référence totalement indépendant du

système de chargement ; le test consiste à effectuer un cycle de chargement et de déchargement, ou un double cycle de chargement et de déchargement.

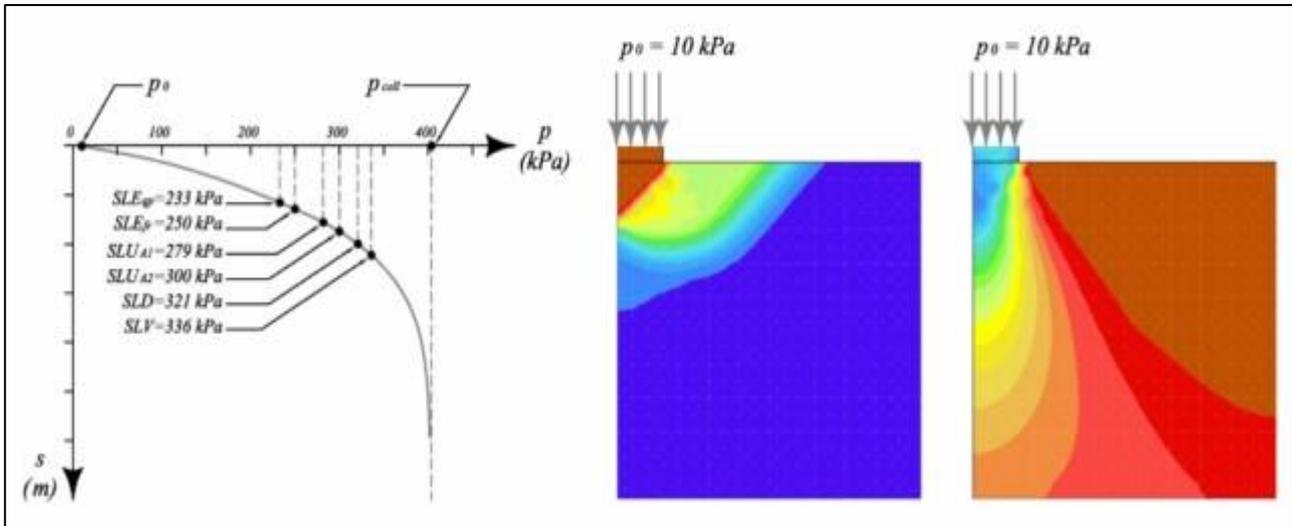


Figure 55 - Diagramme de la répartition des contraintes dues à la charge pendant l'essai de charge sur plaque

Le *module de déformation* **Md** (ou module de compressibilité) en N/mm^2 , représente la mesure conventionnelle de la capacité de charge d'une terre et est donné par la formule : **$Md = (\Delta p / \Delta s) \times D$**

Où :

- Δp est l'augmentation de la charge transmise de la plaque au sol (N/mm^2)
- Δs est l'incrément d'affaissement correspondant (mm)
- D est le diamètre de la plaque (300 mm avec une surface de 700 mm^2)

A partir du rapport entre la charge et l'affaissement, nous avons le module de réaction du sol, ou constante élastique **K**.

En exécutant un seul cycle de charge, nous définissons le module de déformation **Md** pour le substrat examiné.

En exécutant deux cycles de charge, tels que représentés dans les schémas ci-joints, nous définirons le module **Md'**, c'est-à-dire le degré de compactage de la couche de sol examinée.

$$Md' = \Delta p / s'$$

Les essais de charge sur plaque sont généralement effectués dans le but de définir les paramètres géotechniques de la surface de pose des remblais routiers (détermination du module de déformation M_d) et des substrats de revêtement (détermination du module de réaction "k").

Dans le cadre de cette recherche, les essais de charge sur la plaque ont été réalisés en association avec des essais de perméabilité dans le but de :

- Analyser la réponse des sédiments de plage aux stress induits par la charge des véhicules lourds à utiliser pour l'enlèvement des accumulations de *Posidonia oceanica* ; puis mesurer la variation du degré d'épaississement (analyse de l'affaissement);
- Analyse et variation des valeurs de perméabilité à la suite de l'application de charges par l'essai sur plaque.

Pour effectuer l'essai, il est nécessaire de disposer d'un contraste fixe sur lequel pèse au moins une charge égale au double de la charge maximale à exercer sur la plaque (Conseil national de la recherche - BOLLETTINO UFFICIALE - partie IV Normes techniques - année XXVI n. 146 du 14 décembre 1992 : "*Détermination des modules de déformation M_d et M'_d au moyen d'un essai de charge à double cycle avec plaque circulaire*"). Dans ce cas précis, un moyen mécanique à roues JCB mod. 4CX d'un poids à pleine charge de 8600 kg (4200 kg sur l'essieu arrière) a été utilisée.

Les étapes de charge ont été choisies en fonction des charges utilisées lors des tests en laboratoire et normalisées en fonction des dimensions de la plaque de manière à appliquer le même état de tension sur les sables de la plage.

Instruments utilisés

- une plaque d'acier circulaire d'une épaisseur de 20 mm et d'un diamètre de 300 ± 1 mm ; surface de la plaque = $706,5 \text{ cm}^2$;
- une charnière sphérique pour le centrage de la charge (verrouillable lors de l'installation de l'équipement), à placer immédiatement au-dessus du plateau de charge ;
- un vérin hydraulique d'une capacité de 200 kN ;
- un manomètre numérique avec un débit de 200 kN et une sensibilité d'au moins 0,50 kN ;
- trois cadrans mécaniques d'une précision de l'ordre du centième de millimètre ;
- un support pour les bras de comparaison constitué d'une poutre rigide en aluminium, d'environ 2,50 mètres de long, avec deux supports à l'extrémité pour soutenir le sol ;
- un niveau à bulle ;

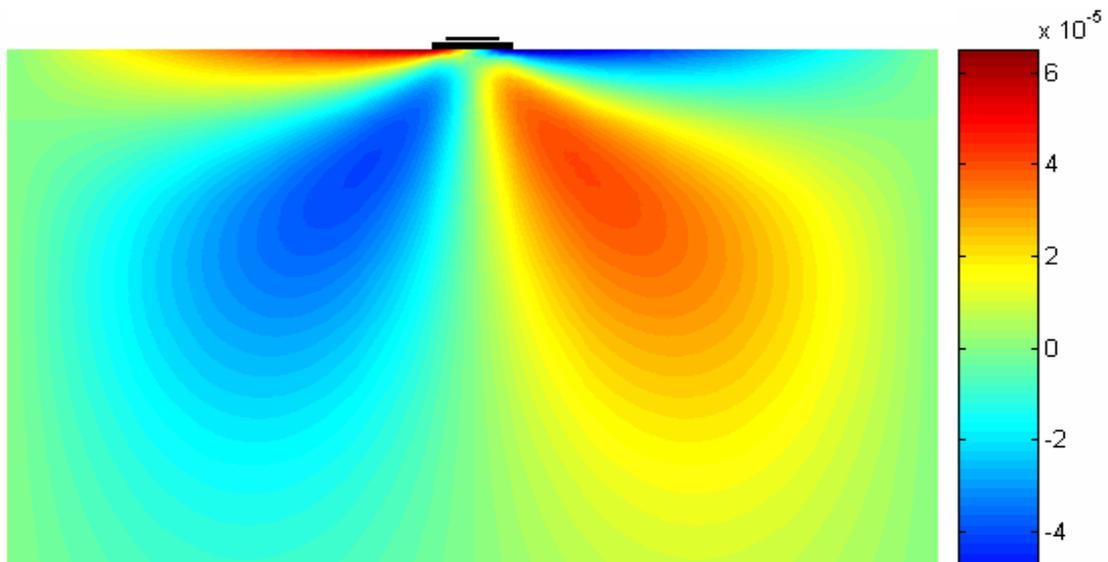


Figure 56 : Test de charge sur plaque - affichage du déplacement horizontal

Mode d'exécution des preuves

Pour l'exécution du test, il est nécessaire d'avoir un contraste fixe ; dans le cas spécifique, une chargeuse-pelleteuse à roues de 8 600 kg a été utilisée.

La plaque a été placée sur la surface des sédiments de la plage, en veillant à ce que la zone de contact soit complète. À cette fin, les irrégularités de surface ont été nivelées manuellement.

Après avoir positionné tous les équipements de test, la charnière sphérique a été libérée et a appliqué, en agissant sur le vérin, une charge d'équilibrage de 0,02 N/mm² globalement, c'est-à-dire en incluant la charge de l'équipement sur la surface à tester et non mesurée par le manomètre. Une fois que les défaillances, qui peuvent être lues en stabilisant les lectures prises sur les comparateurs à cadran, sont épuisées, la lecture est remise à zéro par une augmentation égale mais contraire à la valeur mesurée par les comparateurs à cadran. La charge est ensuite amenée à la valeur choisie et une lecture des trois comparateurs est effectuée jusqu'à la stabilisation complète.

Les étapes de charge utilisées lors de l'exécution des essais de charge sur la plaque sont les suivantes :

Pression exercée Kg/cm ²	0,5	1,2	1,5	2,00	3,00	4,00
Kg appliqués sur plaque de 300mm	353,25	847,8	1059,8	1413	2119,5	2826

Les pressions utilisées en laboratoire de 0,5 et 1,2 kg/cm² correspondent aux deux premières étapes de chargement effectuées in situ.



Figure 57 - Une chargeuse pelleuse à roues, d'un poids de 8.600 kg, utilisée comme contraste pour effectuer les tests de plaque.



Figure 58 - Équipement utilisé pour effectuer des essais sur des plaques de 300 mm, des treillis et des supports de comparateurs millimétriques, cric et pompe hydraulique avec manomètre de précision.

Essais de perméabilité



Figure 52 - Les instruments utilisés pour mener les enquêtes.

Pour l'étude des caractéristiques de perméabilité in situ des sables de plage, 24 tests ont été réalisés à l'aide d'un infiltromètre à anneau unique. Les tests étaient basés sur la mesure du taux d'infiltration de l'eau sur les sédiments à différents stades de compactage et dans différentes zones de la plage.

Les tests d'infiltration et de perméabilité ont été effectués à des charges variables.

Les tests ont été effectués sur des dépôts de berme et de haute plage.

Équipement

- Infiltromètre à anneau unique (h=51 cm, $\varnothing=10,1$ cm)
- Niveau
- Mètre
- Chronomètre
- Eau de mer

Sur les points d'investigation, le cylindre a été inséré jusqu'à une profondeur de 7 cm, en prenant soin de ne pas altérer les conditions naturelles du sol lui-même.

À l'intérieur du cylindre, de l'eau de mer était injectée jusqu'à ce qu'elle atteigne une hauteur hydraulique de 44 cm. À l'aide d'un chronomètre, le temps nécessaire pour que le volume d'eau soit absorbé par le sol a été mesuré. Les temps correspondants ont été mesurés pour chaque baisse de 1 cm du niveau de l'eau dans le cylindre.

Les données obtenues à partir des tests ont été traitées à l'aide d'une feuille de calcul Microsoft Excel et le taux d'infiltration a été obtenu à l'aide de la formule suivante.

$$V_{\text{Inf}} = \frac{Q}{t * A}$$

Où :

Q = la quantité d'eau injectée dans le cylindre (cm^3)

t = période d'essai (s)

A = zone d'infiltration du cylindre (cm^2)

Localisation des enquêtes

Les tests de perméabilité ont été effectués à différents stades de compactage à la suite de l'application de la charge sur une surface circulaire de 30 cm de diamètre.

On a réalisé :

8 tests sur les dépôts de berme. 6 sans application de charge, donc avec un épaissement de sable de base et 2 avec une charge de plaque de 2826 kg.

20 tests ont été effectués sur des dépôts de haute plage près de la berme. 8 sans application de charge et 12 avec application croissante de charge sur la plaque, une pour chaque étape de charge utilisée pour l'essai de sur plaque.

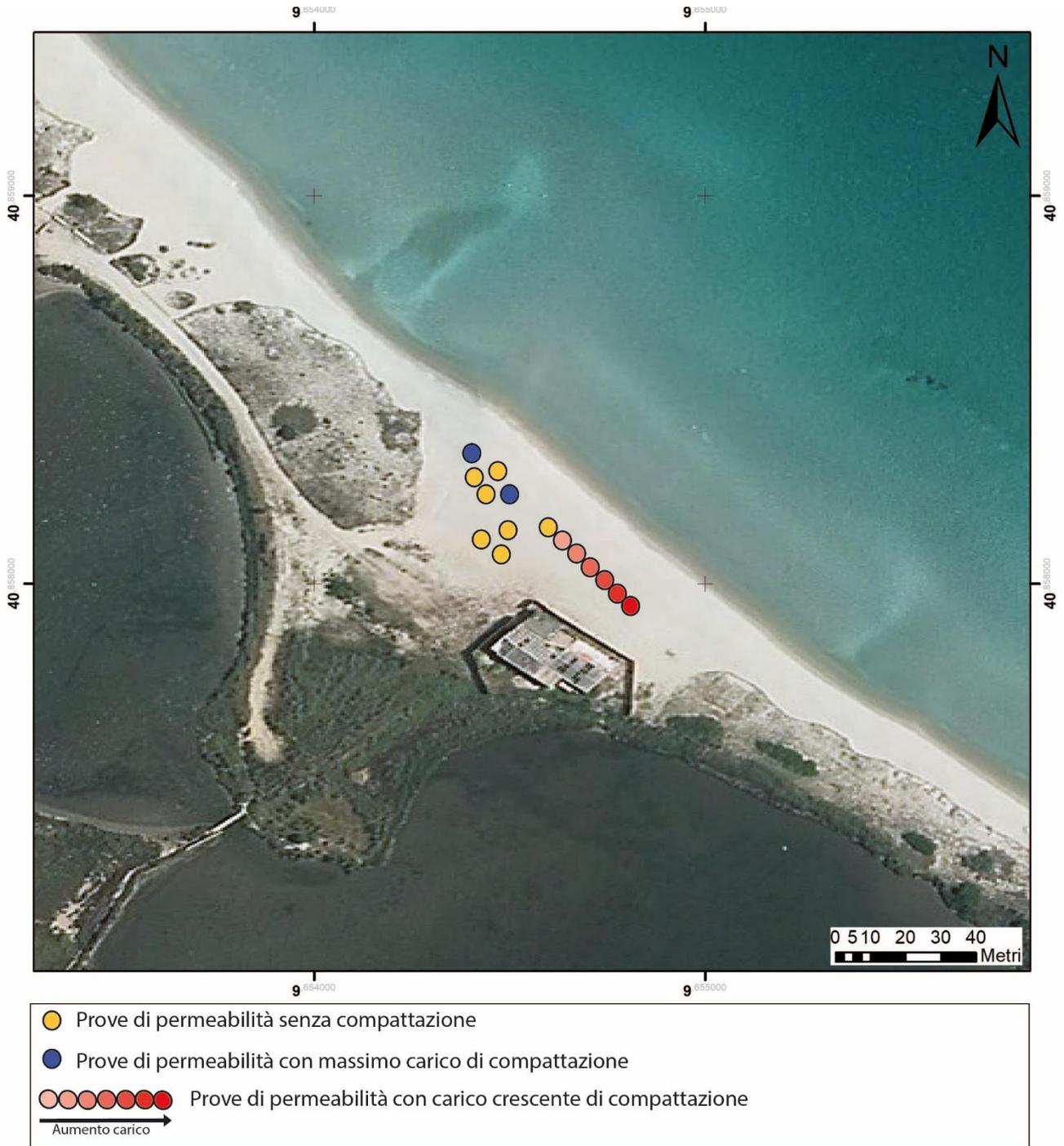


Figure 53 - Localisation des tests de perméabilité.

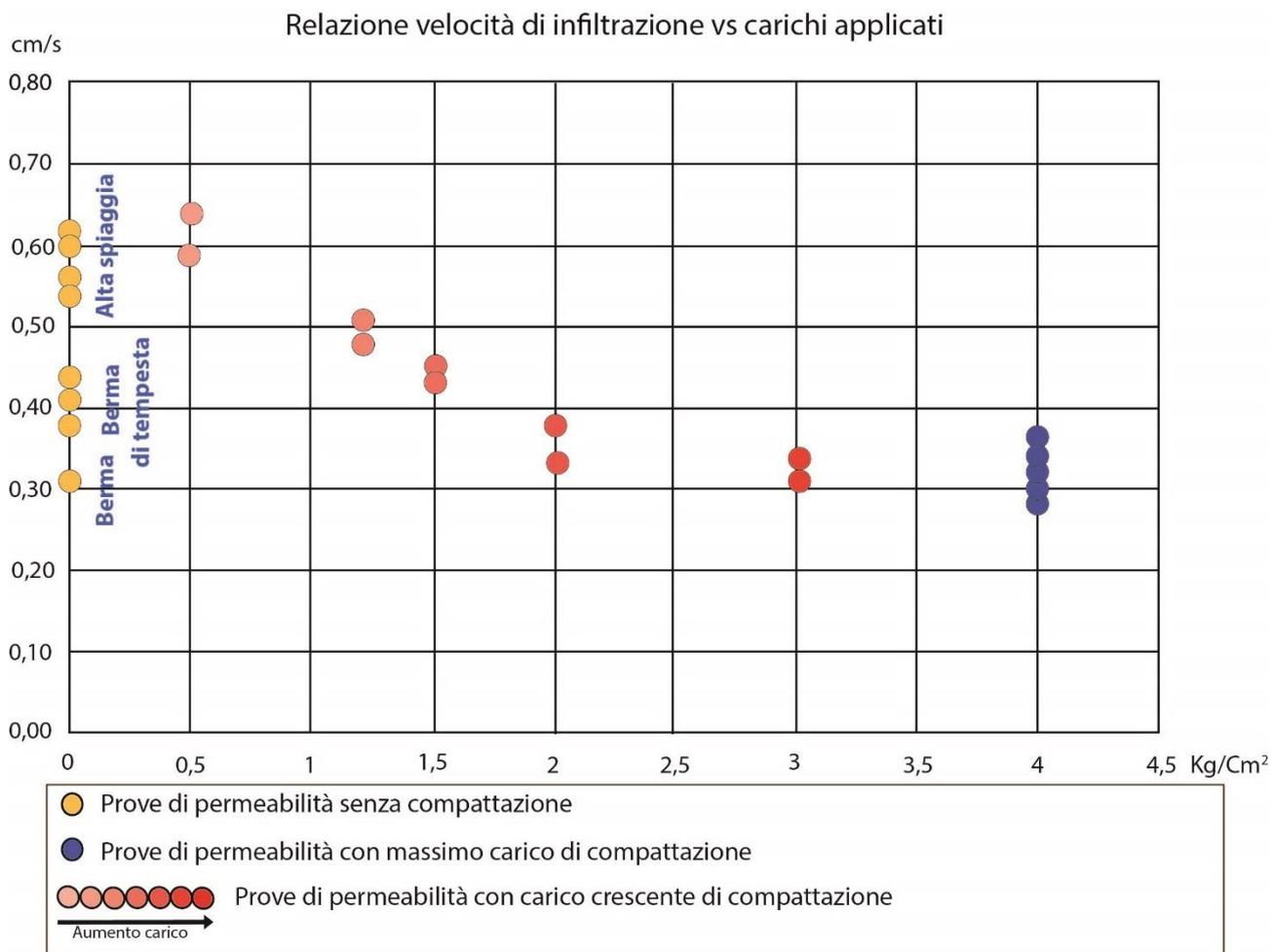
Résultats des tests

Pour chaque test de perméabilité, le taux d'infiltration est indiqué.

Des tests de perméabilité sur du sable sans compactage ont donné des valeurs de V_{inf} comprises entre 0,26 et 0,43 cm/s pour les dépôts sur berme et des valeurs comprises entre 0,54 et 0,72 cm/s pour les tests sur les dépôts de haute plage.

Aux deux points où les essais de charge sur plaque ont été effectués jusqu'à ce que l'étape de charge maximale soit atteinte, des valeurs V_{inf} de 0,36 à 0,30 cm/s ont été calculées.

Pour les tests à charge croissante, une diminution de la vitesse d'infiltration a été enregistrée à mesure que la charge appliquée augmentait, obtenant des valeurs V_{inf} allant de 0,64 à 0,31 cm/s.



Conclusions

À la lumière des expériences faites dans le cadre de ce projet, les conclusions suivantes peuvent être résumées :

L'Analyse du cadre juridique

L'analyse du cadre juridique de référence pour les territoires inclus dans le PO Maritime Italie-France , en ce qui concerne les problèmes liés au calendrier, à l'enlèvement et à la gestion ultérieure des dépôts de *Posidonia oceanica* échouée, n'identifie pas une stratégie unique et partagée, se limitant souvent à la liste des bonnes pratiques qui n'incluent pas une gouvernance exhaustive qui combine les multiples aspects éco-morphologiques, hydrodynamiques et les problèmes liés à la fructification touristique des côtes sableuses.

Protocole méthodologique de détection

Un protocole méthodologique a été testé pour la détection des banquettes en place et des dépôts de feuilles repositionnées après le déplacement grâce à l'utilisation de l'APR (drone) et à l'analyse morpho topographique très détaillée de trois zones d'échantillonnage dans l' AMP Tavolara P.C.C., La Cinta, Cala Brandinchi et Porto Taverna, sur les plages et les bandes d'arrière-plage. Des situations d'évolution positive ont été trouvées pour l'"assimilation" du matériel foliaire dans la zone de la haute plage qui, en favorisant la formation de dunes embryonnaires et de dunes, élève et renforce le profil de la haute plage.

Malgré les contrôles permanents effectués par le CCPP et l'AMP, il existe cependant des situations de dégradation limitées à la zone de Cala Brandinchi en raison du repositionnement illégal des dépôts de la plage de *Posidonia* sur des zones morpho-écologiquement sensibles, en particulier sur des dunes végétalisées, à la fois psammophiles et de genévrier, sur une végétation péri lagunaire halophile, avec enfouissement partiel de petits bassins lagunaires; toutes les zones SIC et ZPS, pour un total de 1200 m² de zones dunaires et 2500 m² de zones humides et péri lagunaires.

Aucune zone de faible sensibilité n'a été identifiée, tant sur la haute plage que sur l'arrière- plage des côtes examinées, de sorte que les zones déjà artificielles et utilisées comme aires de stationnement sont indiquées comme zones de stockage temporaire. Les dépôts de restes de feuilles de *Posidonia oceanica*, contenant de grandes quantités de sable de plage, doivent en tout cas être isolés, protégés de la pollution par tout déversement non autorisé de déchets qui rendrait impossible le retour à la plage.

Hydrodynamique côtière et dépôts foliaires à *Posidonia oceanica*

La dynamique de l'interaction entre les restes de feuilles de *Posidonia oceanica* et le mouvement des vagues a été analysée, en particulier: la réflexion des bioconstructions sous-verticales à morphologie creuse au niveau moyen de la mer directement sur le rivage; l'**obstacle à la migration du run-up** des vagues et la

dissipation de l'énergie des vagues par la berme végétale BV; l'absorption de la force des vagues par la berme végétale et le piégeage des sédiments (40/70 % en teneur en sable).

Dissipation de l'énergie des vagues par des dépôts organiques mélangés à de l'eau de mer, dans des faciès de boue et de gel organique avec des fragments flottants qui modifient à la fois la densité et la viscosité du fluide et donc à la fois la vitesse de migration et la forme du brise-lames.

Un **modèle hydrodynamique** a été proposé et validé pour évaluer la présence de débris en suspension, notamment en ce qui concerne l'effet de la densité et de la viscosité sur la dissipation d'énergie due à la turbulence (liée à la forme des briseurs : surging, plunging e spilling).

Impact des moyens mécaniques sur la vulnérabilité à l'érosion des plages

L'utilisation de moyens mécaniques pour le nettoyage des plages et l'élimination des dépôts de feuilles de *Posidonia oceanica* peut entraîner un ralentissement de la reconstruction du profil de la plage en été et une augmentation de l'érodabilité de la plage par rapport au compactage des sédiments et la diminution de la perméabilité qui en résulte. Les impacts dus au poids des différents véhicules, l'impact des vibrations et la possibilité d'atténuer et de réduire la charge unitaire en diminuant la pression de gonflage des pneus ont été évalués.

L'ANALYSE EN LABORATOIRE

Analyse de la taille des particules

Les résultats de l'analyse granulométrique ont permis de distinguer les caractéristiques sédimentologiques et tissulaires des 3 plages examinées, en particulier les plages de La Cinta et de Cala Brandinchi ont des caractéristiques tissulaires et minéralogiques très similaires, des **sables moyens-fins** très classés avec une composition majoritairement cristalline, subordonnée au carbonate; tandis que la plage de Porto Taverna a des **sables moyens-grands** avec une composition peu ou moyennement polygénique, ce qui démontre l'influence plus importante des apports fluviaux récents.

Le poids spécifique aussi reflète des caractéristiques similaires, les sédiments des plages de La Cinta et de Cala Brandinchi ayant un poids volumique γ_d de 2,67 g/cm³ tandis que les sédiments hétérométriques de Porto Taverna ont un poids volumique γ_d de 2,63 g/cm³.

Deux importants dépôts de restes de feuilles à *Posidonia oceanica* ont été prélevés, liés à la plage de l'hiver 2017/18 à Cala Brandinchi et la Cinta, qui ont montré une teneur en sable de 44 % (Brandinchi) et 75,5 % (Cinta) à l'analyse pondérale ; tandis qu'un autre dépôt avec une faible épaisseur de néo-beaching à la plage de La Cinta a montré une teneur encore modeste de 6,6 %.

Analyse comparative de perméabilité/charges

Le laboratoire géotechnique a effectué des tests de perméabilité sur des échantillons significatifs des 3 plages, prélevés dans la zone de berme ordinaire, les tests ont simulé la pression exercée sur le sable par un petit tracteur d'environ 2000 kg déchargeant 0,25 kg/cm² et un tracteur moyen de 4300 kg déchargeant 0,55 kg/cm² par roue, les différentes conditions de sédiments secs ou saturés et l'application de la charge en mode statique et vibratoire ont été simulées. Les sables fins de La Cinta et de Brandinchi présentent la plus grande diminution de perméabilité sous charge, tandis que les sables moyennement gros de Porto Taverna se sont avérés moins sensibles à la charge. Une diminution particulière de la perméabilité a été enregistrée sous charge vibrante (tracteur moyen) qui peut réduire la perméabilité (avec l'augmentation conséquente de l'érodabilité des plages) entre **30%** et **50%** (broyage de 9,23 à 4,85 mm/s et La Cinta de 8,48 à 4,89 mm/s).

ESSAIS EN SITU

Charges sur plaque

Des tests ont été effectués sur des sites de chargement de plaques afin de calibrer et de valider les données acquises lors des essais en laboratoire géotechnique.

Malheureusement, il a été possible d'effectuer les chargements de plaques seulement sur la plage de Porto Taverna, dans la commune de Loiri Porto San Paolo, car, en raison de la présence de touristes et de baigneurs même hors saison sur les plages de La Cinta et de Cala Brandinchi, il n'a pas été possible d'utiliser la chargeuse-pelleteuse à roues de 8 600 kg, ce qui est indispensable comme moyen de contraste.

Bien que les sables hétérométriques de moyenne et grande taille de Porto Taverna se soient avérés moins sensibles au compactage que les sables fins de La Cinta et de Cala Brandinchi, les résultats du chargement des plaques ont confirmé la tendance à la réduction de la perméabilité documentée en laboratoire.

On pense donc que le même résultat positif de validation peut être étendu aux plages de San Teodoro, La Cinta et Cala Brandinchi.

Protocole opératoire : rédaction d'hypothèses de gestion

Sur la base des résultats obtenus, un certain nombre d'hypothèses de gestion sont résumées ci-dessous :

- Le rôle des dépôts foliaires échoués de *Posidonia oceanica* dans la dissipation de l'énergie du déferlement des vagues est complexe et répond à différents modèles morpho dynamiques : avec mode **réflexif** dans le cas d'un rivage subvertical ou creux ; **élévation du seuil de run-up** par la Berme végétal avec dissipation du *surging*; atténuation de l'énergie par **absorption** dans le cas d'une couverture totale du rivage.
- Les dépôts foliaires de Posidonie montrent une grande efficacité dans la dissipation du mouvement des vagues lorsqu'ils sont dans un état saturé de suspension ou de flottement, conditionnent la forme de la crête de la vague pour **inhiber complètement la formation du déferlement**, réduisent considérablement l'énergie qui est déchargée sur le rivage, par rapport à la densité globale et aux niveaux de viscosité du dépôt ; l'énergie peut être ainsi réduite jusqu'à 60%.
- Les événements météorologiques avec des vents provenant des quadrants Sud et Est (quadrants d'exposition des principales plages de l'AMP Tavolara P.C.C.) caractérisés par des hauteurs maximales significatives élevées des vagues sont relativement fréquents pendant la saison printanière dans le nord-est de la Sardaigne (plus fréquents en mars et avril, également présents au mois de mai). Il n'est donc pas conseillé de retirer les banquettes en Posidonie avant le début du mois de juin.
- Le pourcentage de sables littoraux piégés dans les dépôts foliaires est tel, (40/75%) en moyenne > 50%, qu'il est recommandé comme hypothèse optimale la réémergence dans l'eau dans des conditions météorologiques et marines appropriées (vents de terre forts et constants pendant quelques jours - NO, ONO) afin de ne pas épuiser le stock sédimentaire et la métabolisation complète de la substance organique foliaire dans le milieu marin.
- Le pourcentage de sables littoraux piégés dans les dépôts de restes de feuilles (40/75 %) déconseille leur élimination définitive (compostage, utilisation agricole, traitement et mise en décharge), car cela affecterait la consistance du stock sédimentaire et mettrait en danger l'équilibre du littoral. Pour l'enlèvement éventuel, il vaut mieux utiliser les méthodes et les outils manuels pour les petits volumes tandis que pour les gros volumes nécessitant une manutention mécanique doivent être préférés et l'utilisation de chargeuses pelleteuses telles que indiquées dans cette étude.
- La possibilité d'élimination et/ou de compostage doit être limitée à des cas très particuliers de restes de feuilles de posidonies extrêmement importants sur le plan volumétrique, qui ont enfoui ou masqué toute la plage, empêchant ainsi la reconstitution et l'aménagement de la plage et la

reconstruction du profil de la plage d'été. Dans ce cas, si au cours de l'hiver suivant, une tempête enlève les dépôts végétaux, la plage sous-jacente s'appauvrit et devient très vulnérable, ce qui accélère l'érosion (les "banquettes" peuvent interférer négativement avec l'équilibre du littoral).

- Les opérations de ramassage et de déplacement des dépôts de feuilles de *Posidonia oceanica* en bord de plage à l'aide de moyens mécaniques et/ou de chariots de chargement pesant plus de 2000 kg peuvent causer des dommages importants à la plage en termes de réduction de la porosité effective de 30/50% avec une augmentation correspondante de l'érodabilité de la plage. Il est donc conseillé de favoriser les véhicules légers équipés de pneus à sable à grande section, d'une surface au sol élevée, d'une faible pression de service et de chariots à 4 essieux à faible limite de charge et de pneus similaires.
- Le ré-enfouissement sur la plage de quantités modestes de restes de feuilles de posidonie n'est possible que dans l'estran (limite interne du talus de tempête) pour des niveaux de puissance ne dépassant pas 20 cm. De telles opérations sont fortement déconseillées tant sur l'estran que sur la dune.
- Les véhicules chenillés sont fortement déconseillés car les vibrations transmises au sol/sable provoquent une augmentation considérable de la constipation à charge égale.
- Il n'existe pas de zones de faible sensibilité environnementale en amont de la berme d'orage (zones habituellement utilisées pour la baignade et les installations connexes) où les dépôts foliaires de posidonie peuvent être périodiquement stockés; ces opérations peuvent interférer avec la morpho dynamique naturelle de la plage et provoquer l'enfouissement de la végétation psammophile des anti dunes et des dunes embryonnaires, de la végétation pionnière de la dune, de la végétation de genévrier sur la crête de la dune, de la végétation halophile des bords de la lagune, le remplissage de petits étangs derrière le rivage (toutes les zones vulnérables, dont certaines sont protégées par des mesures d'intérêt communautaire (directive Natura 2000, SIC et ZPS))
- Les zones de stockage temporaire devraient de préférence être des zones déjà anthropisées (aires de stationnement, zones municipales internes) et les tas de stockage foliaires repositionnés, à forte teneur en sables littoraux, devraient être protégés par des installations appropriées contre la pollution par les PM10 et les déversements illégaux de déchets qui rendraient impossible leur retour au littoral.

Bibliographie

- Bagnold R.A. (1940). Beach formation by waves: some experiments in a wave tank. Jour. Institution of C.E. Nov. pp.507-528.
- Boudouresque, C.F., Meisnesz, A., (1982). Découverte de l'herbier de Posidonie. Cahiers, vol. 4. Parc National de Port-Cros, p. 79.
- Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-martini C., Ruitton S., Tunesi, L. (2012). Protection and conservation of *Posidonia oceanica* meadows. Ra Mo Geand AC/SPA,Tunis :204.
- Burcharth H. F., Hawkins S. H., Zanuttigh B., Lamberti A., 2007, "Environmental design guidelines for low crested coastal structures", Elsevier, 448 pp.
- Burgos E., Montefalcone M., Ferrari M., Paoli C., Vassallo P., Morri C., Bianchi C. (2017) Ecosystem functions and economic wealth: Trajectories of change in seagrass meadows. Journal of Cleaner Production 168 1108-1119.
- Cambi M., Fabiano F., Foderi C., Marchi E. (2014) Impatto sul suolo forestale per il transito di un trattore Forestale. Un caso di studio nell'italia centrale. Proceedings of the second international congress of silviculture florence, november 26th - 29th 2014
- Cambi M, Certini G., Neri F., Marchi E. (2015) The impact of heavy traffic on forest soils: A review. Forest Ecology and Management 338; 124–138
- Deiana, G., Holon, F., Meleddu, A., Navone A., Orrù, P.E., Paliaga, E.M. (2019) - Geomorphology of the continental shelf of Tavolara Island (Marine Protected Area 'Tavolara-Punta Coda Cavallo'–Sardinia NE) - 1744-5647 (Online) - Journal of Maps
- De Falco G., Molinaroli E., Baroli M., Bellacicco S. (2003) Grain size and compositional trends of sediments from *Posidonia oceanica* meadows to beach shore, Sardinia, western Mediterranean. Estuarine, Coastal and Shelf Science 58 299–309
- Grant U.S. (1948). Influence of the water table on beach aggradation and degradation. Jour. Marine Research, 7(3) pp.655-660.
- Jeudy de grissac, A. and audoly, G., (1985). Etude préliminaire des banquettes de feuilles mortes de *Posidonia oceanica* de la region de Marseille (France). Rapp. Comm. Int. Mer. Médit. 29(5) [in French]
- INTERREG II Toscana/Corsica Azione 3.1 - D.1 (2000) - Etude de la réutilisation des feuilles accumulées sur la plage de *Posidonia oceanica*.
- ISPRA. (2010) Formazione e gestione delle banquettes di *Posidonia oceanica* sugli arenili. Manuali e linee guida 55/2010
- Manca E., Amos C.L., Cucco A., Simeone S., De Falco G. - Field investigation on the effects of a shallow *Posidonia oceanica* seagrass meadow on waves and flows in the Glf of Oristano (Sardinia, Italy).

- Marevivo/Bovina G. (2001) – Programma Nazionale di individuazione e valorizzazione della Posidonia oceanica. Convenzione Marevivo/Ministero dell’ambiente 1998. Relazione Illustrativa V semestre (Rapporto inedito).
- Marevivo/Bovina G. (2003) - Programma di indagine sulle banquettes di Posidonia oceanica come indicatore dello stato di conservazione delle praterie. Convenzione Associazione Ambientalista Marevivo/Ministero dell’Ambiente 2002. Relazione illustrativa finale e tavole allegate (Rapporto inedito).
- Mateo M.A., Sanchezlizaso J.L., Romero J. (2003) - Posidonia oceanica “banquettes”: a preliminary assessment of the relevance for meadow carbon and nutrients budget. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 56(1): 85–90.
- Molinier R. et Picard J. (1953) Recherches analytiques sur les pulements littoraux se developpant sur substrat solide. *Rec. Trav. Sta. Mar. Endoume* 9 (4)
- Ogunjirin, O. A., James David and M. Y. Kasali. Effect of Tyre Inflation Pressure and Tractor Passes on Sandy Loam Soil.
- Ou-Yang L., Wang H., Tang Y. (2014) Relationship between tire pressure and tractive characteristic of beach cleanner. *Journal of applied sciences* 14 (20); 2542-2546
- Puliga G., Orru’ P.E., Paliaga E., Deiana G., Masia P., Navone A. (2008) – Valutazione dei livelli di rischio geomorfologico-ambientale e formulazione di ipotesi gestionali (AMP Tavolara Punta Coda Cavallo) – Primi Risultati. *Rendiconti del seminario della Facoltà di Scienze di Cagliari*. (volume 79 - 2009)
- Renčín L., Polcar A., Bauer F. (2017). The effect of the tractor tires load on the ground loading pressure. *Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendeliana brunensis*.
- Servera, J., J. A. Martín-Prieto y A. Rodríguez-Perea (2002), “Forma y dinàmica de les acumulacions de fulles de Posidonia oceanica. El seu paper com a protector de la platja subaèria”, III Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears, libro de ponencias y resúmenes 91-93, Palma de Mallorca.
- Simeone S., De Falco G. (2012) Morphology and composition of beach-cast Posidonia oceanica litter on beaches with different exposures. *Geomorphology* 151-152 224–233
- Taghavifar H., Mardani A. (2012) contact area determination of Agricultural tractor wheel with soil. *Cercetări agronomice în moldova* vol. Xlv , no. 2 (150) / 2012.
- Telesca L., Belluscio A., Criscoli A., Ardizzone G., Apostolaki E.T., Frascchetti S., Gristina M., Knittweis L., Martin C. S., Pergent G., Alagna A., Badalamenti F., Garofalo G., Gerakaris V., Pace M. L. , Pergent-Martini C. & Salomidi M. (2015) Seagrass meadows (*Posidonia oceanica*) distribution and trajectories of change.. *Sci. Rep.* 5, 12505.
- TNEC- MATTM-REGIONI (2016) Linee Guida Nazionali per la difesa della costa dai fenomeni di erosione e dagli effetti dei cambiamenti climatici.
- Vacchi M., De Falco G., Simeone S., Montefalcone M., Morri C., Ferrari M. and Bianchi C. N. (2016) Biogeomorphology of the Mediterranean Posidonia oceanica seagrass meadows. *Earth Surf. Process. Landforms*
- Way T. R, Kishimoto T., Torbert H. A., Burt E. C., Bailey A. C. (2009) Tractor tire aspect ratio effects on soil bulk density and cone index. *Journal of Terramechanics* 46 27–34