



Projet SEDITERRA (N°CUP : I42F17000010006)



COMPOSANTE / COMPONENTE T1 : BIBLIOGRAPHIE, DIAGNOSTIC ET INVENTAIRE DE L'AIRE MARITTIMO / BIBLIOGRAFIA, DIAGNOSI E INVENTARIO DELL'AREA MARITTIMO

LIVRABLE/PRODOTTO T1.4.7 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DES TRAITEMENTS ET FILIÈRES EXISTANTES POUR LES FRACTIONS DE POSIDONIES MÉLANGÉES AUX SÉDIMENTS DRAGUÉS PRÉSENTS DANS LA ZONE MARITTIMO / SINTESI BIBLIOGRAFICA DEI TRATTAMENTI E DEI PERCORSI ESISTENTI PER FRAZIONI DI POSIDONIA MISTA A SEDIMENTI DRAGATI PRESENTI NELLA ZONA MARITTIMO

LIVRABLE/PRODOTTO T1.5.8 : CARACTÉRISATION DES POSIDONIES. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DES CARACTÉRISATIONS DES FRACTIONS DE SÉDIMENTS DRAGUÉS CONTENANT DES POSIDONIES / CARATTERIZZAZIONE DELLA POSIDONIA. SINTESI BIBLIOGRAFICA DELLE CARATTERIZZAZIONI DELLE FRAZIONI DI SEDIMENTI DRAGATI CONTENENTI POSIDONIA

Mars/Marzo 2020

TRAVAUX Á LA CHARGE DE LA COLLECTIVITÉ DE CORSE



<p>Nom du livrable :</p> <p>Nome del deliverable :</p>	<p>LIVRABLES T1.4.7 & T1.5.8 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE RELATIVE AUX POSIDONIES</p> <p>PRODOTTI T1.4.7 & T1.5.8 : RECENSIONE DELLA LETTERATURA SULLA POSIDONIA</p>
<p>Rédigé par / Redatto da :</p>	<p>Alison SCHNEIDER (Rocca e Terra)</p>
<p>Validé par / Approvato da :</p>	<p>Éric GRABOWSKI (Rocca e Terra) / Denis TOMA (CDC)</p>
<p>Mise en forme finale / Formattazione finale :</p>	<p>E. TESSIER (INSA de Lyon)</p>

ANNÉE : 2020

ANNO : 2020

ORGANISATION DU DOCUMENT :

LIVRABLE T1.4.7 & T1.5.8 – P8

LIVRABLE T1.4.7 & T1.5.8 TRADUIT EN ITALIEN – P53

ORGANIZZAZIONE DEL DOCUMENTO

PRODOTTO T1.4.7 & T1.5.8 IN FRANCESE – P8

PRODOTTO T1.4.7 & T1.5.8 TRADOTTO IN ITALIANO – P53

SOMMAIRE

	9
PRÉAMBULE	9
INTRODUCTION	10
I. CARTOGRAPHIE	11
I.1 PRÉSENTATION	11
I.2 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	17
II. POSIDONIE ET SÉDIMENTS	17
II.1 LA POSIDONIE	18
2.1.1 Herbier	19
2.1.2 Feuilles	21
2.1.3 Fleurs et fruits	21
2.1.4 Matte	22
2.1.5 Production primaire foliaire	22
II.2 LES PROCÉSSUS DE DÉGRADATION	23
2.2.1 Exportation et transport	23
2.2.2 Dégradations de l'herbier	24
2.2.3 Nécromasse	24
2.2.4 Dégradation physique	24
2.2.5 Dégradation biologique	25
2.2.6 Taux de décomposition	26
2.2.7 Facteurs déterminant les taux de décomposition	27
2.2.8 Autres processus de dégradation	28
II.3 Limites	29
III. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES-CHIMIQUES-MÉCANIQUES-BIOLOGIQUES	29
III.1 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	29
III.2 CARACTERISTIQUES CHIMIQUES	32
III.3 CARACTERISTIQUES MÉCANIQUES	36

III.4	CARACTÉRISTIQUES BIOLOGIQUES	36
3.4.1	Écologie	37
3.4.2	Fonctionnement de l'écosystème	38
3.4.3	Reproduction	38
IV.	SÉPARATION DES FIBRES	39
IV.1	PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL	39
4.1.1	Remise en suspension par injection d'air	39
4.1.2	Remise en suspension par injection d'eau	39
4.1.3	Tamassage de matériaux secs	40
4.1.4	Analyse	41
4.1.5	Autres procédures	42
4.1.6	Opération de dragage	42
IV.2	RÈGLEMENTATION	43
4.2.1	Règlementation internationale	43
4.2.2	Règlementation européenne	43
4.2.3	Règlementation en France	43
4.2.4	Règlementation en Italie	44
4.3	VALORISATIONS EXISTANTES	45
4.3.1	Bioénergie - méthane	45
4.3.2	Eco matériaux de construction	46
4.3.3	Agriculture	47
4.3.4	Santé	47
4.3.5	Accessoire	47
4.3.6	Limites actuelles	48
V.	SYNTHÈSE ET CONCLUSION	48
VI.	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	49

SOMMARIO

	PREMESSA	54
	INTRODUZIONE	55
I.	CARTOGRAFIA	56
	I.1 PRESENTAZIONE	56
	I.2 SINTESI DEI RISULTATI	62
II.	POSIDONIA E SEDIMENTI	62
	II.1 POSIDONIA	63
	2.1.1 Praterie	64
	2.1.2 Foglie	65
	2.1.3 Fiori e frutti	66
	2.1.4 Matte	67
	2.1.5 Produzione primaria fogliare	67
	II.2 PROCESSI DI DEGRADAZIONE	68
	2.2.1 Esportazione e trasporto	68
	2.2.2 Degradazione dell'erbario	69
	2.2.3 Necromassa	69
	2.2.4 Degrado fisico	69
	2.2.5 Degradazione biologica	70
	2.2.6 Tasso di decomposizione	71
	2.2.7 Fattori che determinano il tasso di decomposizione	72
	2.2.8 Altri processi di degradazione	73
	II.3 Limiti	74
III.	CARATTERISTICHE FISICHE, CHIMICHE, MECCANICHE E BIOLOGICHE	74
	III.1 CARATTERISTICHE FISICHE	74
	III.2 CARATTERISTICHE CHIMICHE	77
	III.3 CARATTERISTICHE MECCANICHE	81
	III.4 CARATTERISTICHE BIOLOGICHE	81

3.4.1	Ecologia	82
3.4.2	Funzionamento dell'ecosistema	82
3.4.3	Riproduzione	83
IV.	SEPARAZIONE DELLE FIBRE	84
IV.1	PROTOCOLLO DI PROVA	84
4.1.1	Risospensione per iniezione d'aria	84
4.1.2	Risospensione tramite iniezione d'acqua	84
4.1.3	Setacciatura di materiali secchi	85
4.1.4	Analisi	86
4.1.5	Altre procedure	86
4.1.6	Operazioni di dragaggio	87
IV.2	NORMATIVA	87
4.2.1	Normativa internazionale	87
4.2.2	Normativa europea	88
4.2.3	Normativa francese	88
4.2.4	Normativa italiana	89
IV.3	FILIERE DI VALORIZZAZIONE ESISTENTI	90
4.3.1	Bioenergia - metano	90
4.3.2	Materiali da costruzione ecologici	90
4.3.3	Agricoltura	92
4.3.4	Salute	92
4.3.5	Accessorio	92
4.3.6	Limiti di corrente	92
V.	SINTESI E CONCLUSIONE	92
VI.	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	93

LIVRABLE T1.4.7 / PRODOTTO T1.4.7 :

**SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DES TRAITEMENTS ET FILIÈRES EXISTANTES
POUR LES FRACTIONS DE POSIDONIES MÉLANGÉES AUX SÉDIMENTS
DRAGUÉS PRÉSENTS DANS LA ZONE MARITTIMO / SINTESI BIBLIOGRAFICA
DEI TRATTAMENTI E DEI PERCORSI ESISTENTI PER FRAZIONI DI POSIDONIA
MISTA A SEDIMENTI DRAGATI PRESENTI NELLA ZONA MARITTIMO**

LIVRABLE T1.5.8 / PRODOTTO T1.5.8 :

**CARACTÉRISATION DES POSIDONIES. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DES
CARACTÉRISATIONS DES FRACTIONS DE SÉDIMENTS DRAGUÉS CONTENANT
DES POSIDONIES / CARATTERIZZAZIONE DELLA POSIDONIA. SINTESI
BIBLIOGRAFICA DELLE CARATTERIZZAZIONI DELLE FRAZIONI DI SEDIMENTI
DRAGATI CONTENENTI POSIDONIA**

MARS 2020



PRÉAMBULE

Ce projet s'inscrit dans le programme de coopération transfrontalière « INTERREG – MARITTIMO 2014 – 2020 ». Ce livrable propose une synthèse relative aux Posidonies dans les sédiments de l'aire Marittimo France-Italie.

Ce livrable mutualise la synthèse bibliographique des traitements et filières existantes pour les fractions de Posidonies mélangées aux sédiments dragués présents dans la zone Marittimo (livrable T1.4.7) et la synthèse bibliographique des caractérisations de fractions de sédiments dragués contenant des posidonies (livrable T1.5.8) comprenant les prestations suivantes :

- Zones portuaires concernées par la problématique posidonies dans les sédiments de dragage sur l'aire Marittimo - production d'une cartographie (qui sera intégrée au livrable SIG T1.3.5)
- Posidonies et sédiments : comment et sous quelles formes les posidonies se retrouvent intégrées dans les sédiments - Description des processus de dégradation
- Recueil bibliographique et synthèse des caractéristiques physiques-chimiques-mécaniques et biologiques des posidonies et de leurs résidus
- Réflexion et proposition d'un protocole de séparation des fibres contenues dans le sédiment pour faciliter sa valorisation (*i.e.* pour récupérer un sédiment exempt de fibres)

INTRODUCTION

L'herbier à *Posidonia oceanica* est l'un des écosystèmes les plus productifs de la planète. Cette magnoliophyte (= phanérogame) marine est endémique à la Méditerranée, elle y est présente quasiment partout à l'exception des embouchures de grands fleuves, du détroit de Gibraltar et des côtes d'Israël et du Liban.

Le Millennium Ecosystem Assessment (MA, 2005) a répertorié les nombreux services écosystémiques rendus par l'herbier tels que : zones de nurserie pour les poissons et les invertébrés, production élevée, oxygénation des eaux côtières et source de nourriture pour de nombreuses espèces d'organismes côtiers et marins, le piégeage des sédiments et la défense du littoral.

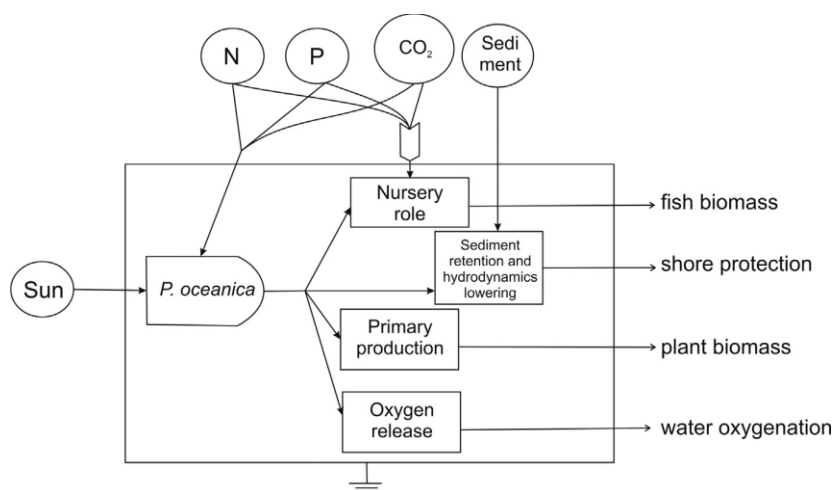


Figure 1 Diagramme des services écosystémiques de *P. oceanica* (Vassallo et al., 2013)

Le premier chapitre se compose des cartes représentant les zones portuaires potentiellement concernées par la problématique de la posidonie dans les sédiments.

Le deuxième chapitre développe les processus de dégradation afin de déterminer comment et sous quelles formes les posidonies se retrouvent intégrées dans les sédiments.

Le troisième chapitre est une synthèse bibliographique des caractéristiques physiques-chimiques-mécaniques et biologiques des posidonies et de leurs résidus.

Le quatrième chapitre propose un protocole de séparation des fibres contenues dans le sédiment pour faciliter sa valorisation.

I) CARTOGRAPHIE

I.1) PRÉSENTATION

Cette cartographie représente les zones portuaires potentiellement concernées par la problématique posidonies dans les sédiments de dragage par la mise en évidence des ports et marinas proches d'herbiers de posidonie sur le littoral de l'air Marittimo.

La zone étudiée s'étend sur 500 km d'Ouest en Est entre Toulon (FR) et Grosseto (IT). Et 600 km du Nord au Sud entre Gênes (IT) et Cagliari. 5 cartes ont été produites :

Cartographie	Secteur
Sediterra 1	Alpes-Maritimes - Var
Sediterra 2	Corse
Sediterra 3	Sardaigne
Sediterra 4	Ligurie
Sediterra 5	Une partie de la Toscane : Grosseto - Luca - Livorno - Massa Carrara - Pisa





I.2) SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

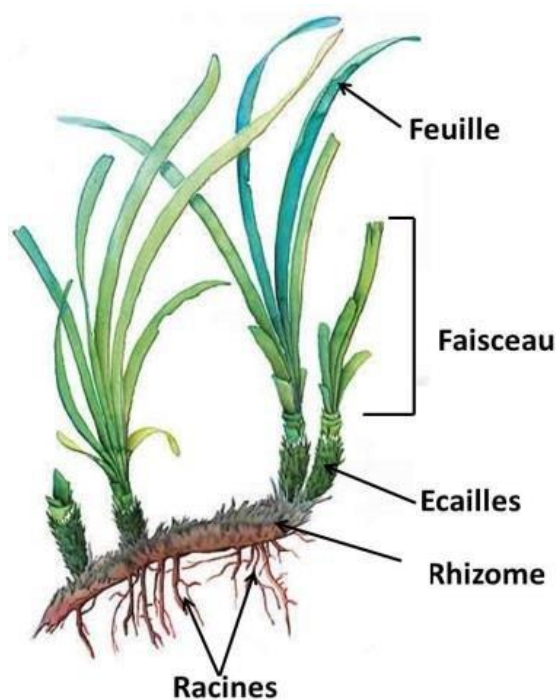
Le littoral méditerranéen est fortement artificialisé par des ports et des aménagements côtiers (digues, épis, brise lames, etc.). Les littoraux les plus concernés sont ceux des Alpes-Maritimes avec 1 port ou abris tous les 3.1 km, la province de Gênes, la Ligurie, et une partie de la Sardaigne (Boudouresque *et al.*, 2006).

Les herbiers de Posidonies occupent 20 à 50 % des fonds entre 0 et 50 m de profondeur (Pasqualini *et al.*, 1998), ce qui représente entre 30 000 et 40 000 km² soit 1 à 2 % des fonds de la Méditerranée. Le Nord-Ouest du bassin méditerranéen est bien représentatif avec des herbiers remarquables par leur surface et leur état de conservation.

Le Nord-Est de la Sardaigne semble être le secteur le plus représentatif avec une très forte densité de ports et marinas à proximité d'herbiers de Posidonies. Les autres régions potentiellement concernées par la problématique de posidonies dans les sédiments sont : le littoral ligurien entre Vintimille et Loano (Ouest Ligurie, IT), la région de Livourne (Toscane, IT), la région de Toulon (Var, FR).

II) POSIDONIE ET SÉDIMENTS

Ce chapitre développe les processus de dégradation afin de déterminer comment et sous quelles formes les posidonies se retrouvent intégrées dans les sédiments.



© Arnaud Abadie



© Antonin Guilbert / Agence des aires marines protégées

Figure 2 Illustration de la posidonie et de l'herbier (source INPN)

II.1) LA POSIDONIE

Cette plante à fleur marine et endémique ne vit qu'en Méditerranée entre 0 et 40 à 50 m de fond. Elle se compose de faisceaux de feuilles allongées fixées sur des rhizomes orthotropes (horizontaux) et plagiotropes (verticaux) (Boudouresque *et al.*, 2006). Les feuilles se forment toute l'année et vivent entre 5 et 8 mois.

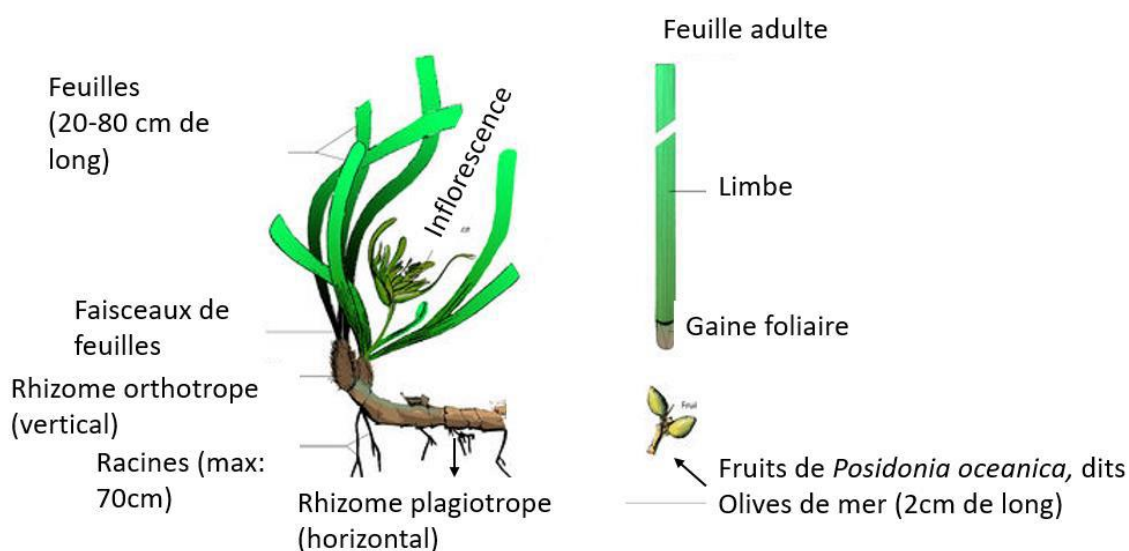


Figure 3 Morphologie générale de *P. oceanica* (Boudouresque *et al.*, 2006)

Chaque faisceau de *Posidonia oceanica* est constitué de cinq à huit feuilles rubanées de 40 à 80 cm de hauteur et de 10 mm de large en moyenne (Figure 3). A la mort des feuilles, seul le limbe tombe.

Le pétiole (aussi appelé la gaine foliaire), peu putrescible, reste fixe sur les rhizomes ou il peut persister plusieurs siècles. Les pétioles présentent des cycles chronologiques caractéristiques de variations d'épaisseur le long du rhizome (lépidochronologie in Pergent, 1990).

Les rhizomes et les racines s'enchevêtre et sont comblés par des sédiments dans une structure appelée « matte ».

La floraison est irrégulière et dépend de paramètres environnementaux, cependant la posidonie semble se disséminer majoritairement de façon végétative par fragmentation et bouturage (Boudouresque *et al.*, 2006).

Le rôle de cette espèce est majeur au niveau écologique (production de matière végétale, pôle de diversité spécifique, oxygénation des eaux), sédimentaire (piège à sédiment, amortissement de l'hydrodynamisme, lutte contre l'érosion des plages) et économique (zone de frayère et de nurseries, activités balnéaires) ; elle constitue également un puissant indicateur de la qualité des eaux (bioindicateur) et joue un rôle majeur dans la fixation et le stockage du carbone en milieu littoral - « puits de carbone » (Pergent *et al.*, 1994 ; Duarte *et al.*, 2005 ; Boudouresque *et al.*, 2006).

2.1.1) Herbier

Posidonia oceanica constitue de vastes herbiers sur tous types de substrats. Les conditions hydrodynamiques du site, les courants et la température des eaux façonnent les types morpho-structuraux des herbiers. Le plus couramment rencontré en Méditerranée est l'herbier de plaine, il s'agit d'une prairie plus ou moins continue, horizontale ou en pente modérée, interrompue par des structures érosives (tombants de « matte », intermattes érosives, intermattes déferlantes, rivières de retour) et des « mattes mortes » non érosives (intermattes structurelles). On peut également rencontrer des herbiers de colline, tigré, ondoyant, en pain de sucre, en escalier, etc.

La dynamique des herbiers à *Posidonia oceanica* est fortement influencée par toute une série de facteurs abiotiques (hydrodynamisme, morphologie sous-marine, lumière, salinité, température, nutriments) et biotiques (compétition vis à vis d'autres macrophytes, broutage par des espèces herbivores, essentiellement le poisson *Sarpa salpa* et l'oursin *Paracentrotus lividus*).

Grâce à la densité des feuilles de *Posidonia oceanica*, l'herbier piège une grande quantité de sédiment. Les rhizomes réagissent par une croissance verticale de quelques millimètres à quelques centimètres par an et édifient ainsi la matte.

Le fonctionnement de l'herbier est modélisé dans la figure suivante avec le modèle conceptuel développé à l'intérieur du rectangle noir :

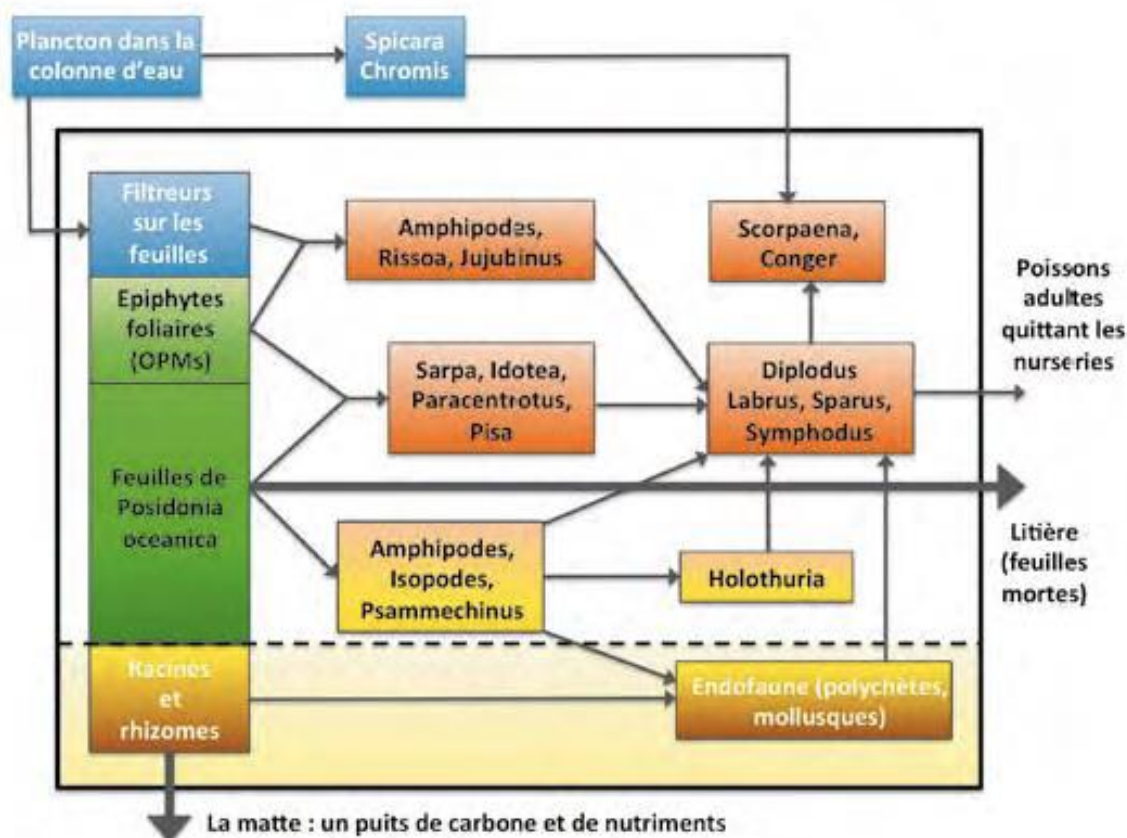


Figure 4 Modèle conceptuel simplifié du fonctionnement trophique de l'écosystème à *Posidonia oceanica* avec les principales entrées et sorties de matière. La largeur des flèches est proportionnelle à leur importance (d'après Boudouresque et al., 2006) source IUCN

Le rôle de puits de carbone est attribué à la matte en raison du stockage important de feuilles mortes et de sédiments. Ce **stockage** représente 1 des 3 destinations identifiées des flux de carbone à travers l'herbier ; avec, à part égale : l'**exportation** hors de l'herbier sous forme de feuille morte ; et pour la majorité : près de la moitié du carbone est **dégradé** par les détritivores au niveau de la litière de l'herbier (Pergent et al., 1994).

2.1.2) Feuilles

Les feuilles se forment toute l'année et vivent entre 5 et 8 mois. On nomme feuilles « juvéniles » les feuilles de moins de 5 cm de longueur, « intermédiaires » les feuilles de plus de 5 cm sans pétiole ; lorsque la croissance est terminée, le pétiole se met en place : la feuille est alors dite « adulte ». Les feuilles s'imbriquent les unes dans les autres et forment ainsi une insertion distique.

Les feuilles sont larges de 8-11 mm et longues de 20-80 cm (Boudouresque *et al.*, 2006). La feuille comporte donc un pétiole par lequel elle est fixée à la tige ou au rhizome, et un limbe, partie où s'effectue la photosynthèse. La chute des feuilles, comme leur formation se produit tout au long de l'année (Pergent et Pergent-Martini, 1991), leur chute est renforcée en été et en automne.

A leur mort, les feuilles ne se détachent pas en totalité, seul le limbe tombe tandis que le pétiole reste fixé au rhizome, on parle alors d'écaille. Les paramètres des écailles (longueur, épaisseur, anatomie) varient de façon cyclique le long d'un cycle annuel. La lépidochronologie est l'analyse de ces cycles (Crouzet, 1981 ; Pergent *et al.*, 1983 ; Pergent, 1990). Les écailles et les rhizomes sont peu putrescibles, et se conservent donc pendant plusieurs siècles ou millénaires.

2.1.3) Fleurs et fruits

Les fleurs de *P. oceanica* sont hermaphrodites (à la fois mâles et femelles) et fleurissent en automne (septembre - novembre). La floraison est irrégulière et certaines années sont particulièrement favorables (année 2003) en relation avec l'augmentation globale de la température de l'eau et/ou l'activité solaire. La floraison ne s'effectue pas par température trop basse surtout dans les eaux relativement froides du Nord de la Méditerranée Occidentale.

4 à 10 fleurs sont groupées en une inflorescence au sommet d'un pédoncule de 10-30 cm de longueur. Les fleurs fécondées par le pollen deviendront des fruits qui ressemblent à des olives.



Figure 5 *Inflorescence (à gauche) et fruits (à droite) de Posidonia oceanica. D'après Boudouresque et Meinesz (1982)*

Les fruits se développent durant 6 à 9 mois, ils se détachent à partir d'avril-mai, remontent en surface et y flottent un certain. Le fruit s'ouvre, l'unique graine tombe sur le fond pour donner naissance à une nouvelle plantule (printemps-été) et la coque poursuit sa flottaison à la surface.

Selon l'orientation des courants, les fruits et coques peuvent s'échouer en grand nombre sur les plages.

2.1.4) Matte

Les rhizomes plagiotropes (horizontaux) ont une vitesse de croissance élevée (de l'ordre de 5 cm/an) et colonisent ainsi rapidement les espaces libres. Les rhizomes orthotropes (verticaux) croissent à une vitesse de l'ordre de 1 cm/an et luttent ainsi contre l'enfouissement (Boudouresque *et al.*, 2006).

On nomme « matte » l'ensemble constitué par les rhizomes, les écailles, les racines et par le sédiment qui remplit les interstices. Les rhizomes, les écailles et les racines sont peu putrescibles et se conservent donc, à l'intérieur de la « matte », pendant plusieurs siècles ou millénaires (Boudouresque et Jeudy de Grissac, 1983).

Les feuilles et les rhizomes de *Posidonia oceanica* sont le support de toute une flore et une faune d'organismes dont certains sont calcifiés. A leur mort, leurs restes tombent sur place, constituant un sédiment autochtone (débris de tests ou de piquants d'oursins, de coquilles de Mollusques, de *Corallinaceae*, etc.). Par ailleurs, les feuilles de *P. oceanica*, par leur densité (jusqu'à 5 000 / m²) et leur disposition, diminuent la vitesse du courant ; les particules sédimentaires transportées par l'eau voient leur énergie cinétique diminuer et tombent alors sur le fond (sédiment allochtone).

Lorsque les conditions de milieu deviennent défavorables *Posidonia oceanica* meurt et seule la matte reste en place. Cette « matte morte » fonctionne en surface comme un habitat semi-dur à dur, sur lequel prospèrent plusieurs espèces d'algues. Le substrat, formé d'un enchevêtrement de rhizomes morts, colmatés par des éléments de granulométrie très hétérogène, du fin gravier à la vase est particulièrement compact et favorise l'établissement d'une faune relativement spécialisée.

2.1.5) Production primaire foliaire

La production primaire totale (limbes, pétiole et rhizomes) varie de 820.6 à 1426.4 grammes de matière sèche par mètre carré et par an (Vela A., 2006) et pourrait atteindre plus de 125 kg de biomasse sèche par mètre côtier à partir d'un herbier de 1 km² (Cocozza *et al.*, 2011).

Les feuilles représentent le pourcentage le plus élevé de la production primaire totale supérieure à 80 % (Cebrian et Duarte, 2001), cette production primaire foliaire a été mesurée entre 203 et 708 grammes de matières sèches par mètre carré et par an (Pergent G, Pergent-Martini C., 1991). En l'espace d'un an, tout le matériel foliaire produit est soit décomposé, soit exporté ; l'exportation annuelle peut être estimée à 50% du matériel foliaire produit pour l'ensemble de l'herbier de Lacco Ameno (Romero *et al.* 1992). Sur la base de ces hypothèses on peut estimer la production primaire foliaire exportée entre 100 et 354 grammes de matière sèche par mètre carré d'herbier et par an.

Leoni *et al.* (2005) ont évalué pour l'herbier de la baie de Calvi (présentant une très forte vitalité) le stock potentiel de litière exportées à même de s'échouer sur les plages est de $2\,410.8 \pm 91.1$ tonnes.

II.2) LES PROCÉSSUS DE DÉGRADATION

Les débris de posidonie susceptibles d'être retrouvés dans les sédiments de dragage sont issus soit directement de l'excrétion des feuilles mortes dans la colonne d'eau, soit de l'exportation de la litière (feuilles mortes, rhizomes cassés), soit de la fragmentation et de la dégradation de cette litière par des détritivores (sur le site de production ou bien sur des sites éloignés).

2.2.1) Exportation et transport

A l'automne, l'augmentation de la masse de feuilles mortes (rythme de chute des feuilles, taille des feuilles) se conjugue aux conditions météorologiques (renforcement de l'hydrodynamisme, tempêtes d'équinoxe) pour transporter de grandes quantités de cette matière végétale morte vers les plages (Boudouresque et Meinesz, 1982 ; Pergent *et al.*, 1997 ; Walker *et al.*, 2001).

Les feuilles mortes, ou macrophytodétritus, se logent dans l'herbier et s'y dégradent en formant ainsi une « litière ». Celle-ci sera tantôt présente à l'intérieur de l'herbier, tantôt massivement exportée au gré des vagues vers des zones d'accumulation sans végétation, souvent des zones sableuses. On parle alors de litière « exportée ».

Les dépôts de litière de Posidonies s'accumulent en grande quantités en automne et en hiver à la chute des feuilles. De forts courants remuent les dépôts de litière et y provoquent un départ des feuilles mortes. Pour l'ensemble de la litière le taux d'exportation varie entre 51 et 68 % en région exposée aux vagues et courants et 37 à 49 % en région abritée (Pergent *et al.*, 1997) et peut affecter jusqu'à 99% de la litière.

Entre 40 % et 80 % des détritiques de feuilles de *P. oceanica* est fréquemment exporté au large des prairies par les vagues et les courants et décomposé dans les systèmes récepteurs (Romero *et al.*, 1992 ; Pergent *et al.*, 1994 ; Pergent *et al.*, 1997).

Les variables environnementales et l'hydrodynamisme influent sur la dispersion à longue distance des fragments d'herbiers marins. L'étude de Lai *et al.* (2019) a révélé que des niveaux d'ombrage élevés ont entraîné un taux plus rapide de désintégration des fragments et de perte de flottabilité au fil du temps. Grâce aux expériences de flux, il a été constaté que les vents peuvent contribuer au transport de fragments d'herbiers marins. De plus, les petites vagues (celles dont la hauteur est plus petite et la fréquence plus faible) ont entraîné des vitesses de transport plus rapides que les grandes vagues. Les résultats de cette étude fournissent d'importants paramètres obtenus expérimentalement qui sont essentiels à l'élaboration de modèles prédictifs précis pour la dispersion des fragments d'herbiers marins.

2.2.2) Dégradations de l'herbier

Harrison (1989) fournit une revue de la littérature sur les détritiques des herbiers marins concernant *Zoostera marina* et *Thalassia testudinum*. Elle permet la compréhension de la nature chimique des détritiques des herbiers marins qui affectent et sont affectés par les processus de décomposition induits par des agents abiotiques (se rapportant au milieu) et biotiques (se rapportant au monde vivant).

La dégradation des posidonies en nécromasse (ensemble des macrophytodétritiques) passe par un traitement physique et un traitement biologique.

2.2.3) Nécromasse

Romero *et al.* (1992) ont étudié la nécromasse, en particulier la litière des feuilles, associée au lit de *Posidonia* composée principalement d'une fraction grossière de feuille (> 0.8 cm) : il s'agit de matériaux du limbe à un stade plus ou moins décomposé ; et en minorité de litière fine (0.1 à 0.8 cm) ne représentant pas plus de 10 % du poids total : il s'agit de matériaux hétérogènes avec quantités de minuscules débris et fibres de feuilles résultant de la décomposition de la base de la feuille.

2.2.4) Dégradation physique

Les détritiques subissent des traitements physiques tels que la fragmentation de grosses particules, la production des particules à partir de molécules dissoutes, la floculation et la sédimentation.

La fragmentation par les détritivores augmente les taux de décomposition dans les détritiques exportés en réduisant la taille des particules, en augmentant les surfaces disponibles pour les attaques microbiennes et (parfois) en ajoutant de l'azote aminé aux détritiques.

Pendant la période de lixiviation les molécules organiques solubles et les minéraux solubles sont perdus.

2.2.5) Dégradation biologique

La dégradation biologique passe par différentes étapes dont le broyage et le déchetage par des animaux, la décomposition par des microbes, la digestion par l'intestin des animaux puis la reminéralisation.

Les oursins et les crustacés déchiquettes les feuilles mortes tandis que les bactéries et les champignons dégradent effectivement la matière.

La consommation par les détritivores favorise la dégradation en fournissant plus de surfaces pour la lixiviation et l'entrée microbienne. La combinaison d'environnements aérobies/anaérobies permet à la cellulose et la lignine d'être dégradées, et les nutriments d'être expulsés avec les détrit.

Harrison (1989) relève, dans l'ensemble de la littérature étudiée, l'importance de la composition chimique de la litière végétale pour déterminer la perte de biomasse due à la lixiviation et à la décomposition microbienne, la reminéralisation des composants végétaux et l'accumulation de matériaux humiques.

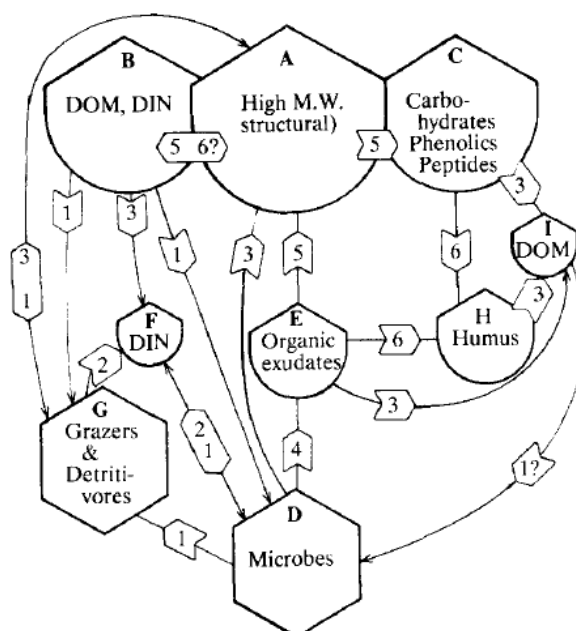


Figure 6 Modèle conceptuel des processus physico-chimiques de dégradation de la litière

La litière végétale est principalement constituée de composés structuraux de poids moléculaire élevé (A à la figure n°6), tels que la cellulose et la lignine. Les bactéries et les champignons (D) sécrètent des enzymes extracellulaires (E) dans les cellules végétales. La dépolymérisation enzymatique forme des composés de poids moléculaire inférieur.

Certains ions inorganiques (B) sont lessivés de la litière végétale dans la réserve de nutriments inorganiques dissous (F) à la disposition des décomposeurs. La reminéralisation nette se produit soit directement par les bactéries (voie 2 de D à F) et soit elle est excrétée par les détritivores (par exemple, protistes, invertébrés et vertébrés ; G à la figure n°6) qui se nourrissent de bactéries.

Les détritivores et les herbivores peuvent accélérer la décomposition microbienne en fragmentant de gros morceaux de plantes, augmentant ainsi la surface disponible pour les attaques par les enzymes microbiennes. L'assimilation directe des composés végétaux dans la litière par des invertébrés ou des vertébrés peut également contribuer à la perte de biomasse (voies 1 de A et B à G). Les exsudats microbiens peuvent contribuer à la valeur alimentaire des détritits ; les restes végétaux peuvent être assimilés directement par les détritivores.

Une partie de la litière végétale ne peut jamais être décomposée ou reminéralisée si la production de composés aromatiques conduit lentement à la formation d'humus à partir des détritits.

Le développement de conditions anaérobies (généralement par enfouissement des détritits dans les sédiments) favorise la décomposition par les bactéries cellulolytiques (qui dégradent la cellulose) anaérobies.

2.2.6) Taux de décomposition

Romero *et al.* (1992) ont estimés les taux de décomposition du matériel végétal en fonction du temps. La dégradation de la litière exportée est relativement lente :

- Après 1 mois à 20 m de profondeur, 11% à 35% seulement de sa masse a disparu
- Après 6 mois, le pourcentage de dégradation atteint, 64% (à 5m) et 44% (à 20m) à Ischia (IT) (Pergent *et al.*, 1994). La voie des détritivores constitue la principale voie de transfert de la production primaire des feuilles de *P. oceanica* dans l'écosystème

Les feuilles, les pousses et les parties du sous-sol présentent les mêmes vitesses de décomposition.

Les champignons ne sont présents qu'en faible nombre dans les détritiques des herbiers marins subtidaux, et seulement des bactéries cellulolytiques anaérobies ont été signalées à partir de sédiments associés aux rhizomes et aux racines de zostères. Les échantillons frais de *H. decipiens* perdaient plus rapidement de la matière organique lorsqu'ils étaient enfouis que lorsqu'ils étaient à la surface des sédiments. Les pousses vertes de *Z. marina* se décomposaient plus rapidement dans des conditions anaérobies en laboratoire, mais on n'a trouvé aucune différence entre les taux de décomposition aérobie et anaérobie dans une étude parallèle des fragments de feuilles détritiques. Les feuilles mortes, séchées et broyées de *Z. marina* ont perdu de la matière organique à des taux similaires en conditions aérobie et anaérobie à 10 °C ; mais à 25 °C, le taux aérobie était plus élevé.

2.2.7) Facteurs déterminant les taux de décomposition

La décomposition est renforcée par la fragmentation. Les amphipodes jouent un rôle important dans la réduction de la taille des particules de fragments de feuilles d'herbiers marins, même si les animaux utilisent principalement la population microbienne sur les feuilles comme nourriture. La fragmentation entraîne une augmentation de la surface totale et donc de l'activité métabolique microbienne.

La décomposition des herbiers marins dans la zone subtidale est en grande partie le résultat d'une activité bactérienne et non fongique. Des champignons sont présents sur *Posidonia oceanica* (L.) Delile mais ils sont en grande partie des "propagules inactifs ou micro colonies faiblement établies". Les bactéries ont diverses capacités métaboliques, mais il faut beaucoup de temps pour que les espèces digérant l'amidon et la cellulose atteignent une abondance élevée.

Kenworthy et Thayer (1984), qui ont également trouvé d'abondantes bactéries filamenteuses sur les rhizomes en décomposition de *Z. marina*, considèrent que les conditions anaérobies sont nécessaires pour la dégradation de la cellulose. L'enfouissement dans des sédiments anoxiques pourrait favoriser la dégradation du principal composant de la structure dans les herbiers marins, la cellulose, mais si la cellulose est protégée par la lignine, les détritiques enfouis peuvent se décomposer très lentement.

Les composants de détritiques facilement dégradés sont présents en faibles quantités ; ces mêmes composants sont présents dans des supports adéquats, mais ne sont pas accessibles aux microbes en raison de dispositifs de protection physique ou chimique ; la décomposition peut se produire dans des habitats qui ne favorisent pas la dégradation rapide des composantes structurales des détritiques des herbiers marins.

Un autre facteur limitant la facilité avec laquelle les microbes peuvent obtenir les composants facilement dégradés dans les détritiques des herbiers marins peut être la nature physique et chimique de l'épiderme et des tissus internes. Une couche épidermique intacte est une barrière efficace à l'attaque bactérienne, mais endommagée ou coupée, les surfaces des feuilles et des rhizomes sont facilement envahies.

Dans les faisceaux de fibres, et également dans la feuille de *P. australis*, la lignine a été signalée dans la lamelle moyenne et ainsi elle enrobe et protège contre les attaques bactériennes, la paroi riche en cellulose. Elle agit comme agent d'imperméabilisation, dans les parois cellulaires de l'épiderme, l'hypoderme (les couches immédiatement internes à l'épiderme) et les faisceaux de fibres corticales du rhizome.

Les taux de décomposition des macrophytes aquatiques en général sont positivement corrélés avec la teneur en azote. L'azote peut être présent dans les détritiques sous diverses formes : protéines végétales (amino-azote), protéines microbiennes et produits de condensation complexes d'origine microbienne et végétale. Pour *T. testudinum*, tout l'azote des feuilles vertes était présent sous forme d'azote aminé.

Par ailleurs, Lai *et al.* (2019) ont étudié (en-dehors de l'aire Marittimo) les effets de l'ombrage sur les taux de décomposition des fragments de deux espèces d'herbiers marins tropicaux (*Halophila ovalis* et *Thalassia hemprichii*). L'étude a révélé que des niveaux d'ombrage plus élevés ont entraîné un taux plus rapide de désintégration des fragments.

En outre, les conditions physico-chimiques sur le site de la décomposition peuvent être aussi importantes que les conditions biologiques.

2.2.8) Autres processus de dégradation

P. oceanica craint l'hydrodynamisme trop intense, car les vagues et courants lors des tempêtes arrachent des faisceaux entiers de feuilles (Boudouresque Ramoge 2006).

Par ailleurs, certaines activités humaines sont responsables de la dégradation de l'herbier. On relève notamment l'utilisation d'arts traînants (dragues, chaluts, lignes) tractés par le bateau des pêcheurs professionnels qui accrochent des paquets de feuilles et arrachent les rhizomes. Les filets des chaluts peuvent ainsi être responsables de l'arrachage de 100 000 à 360 000 feuilles par heure.

On relève également l'impact de l'ancrage des bateaux dans l'herbier qui va arracher jusqu'à 250 feuilles à la fois, qui s'associe à l'impact de la chaîne qui racle le fond dans le périmètre d'évitement (dans un secteur d'emprise de 3 à 4 fois la hauteur d'eau). Ce phénomène participe à la fragmentation de l'herbier notamment lors de l'ancrage des plus grosses unités.

D'autre part, l'aquaculture perturbe la photosynthèse de l'herbier avec l'ombrage créé et le rejet des déchets des poissons qui apporte un surplus d'éléments nutritifs.

Enfin, le bétonnage des littoraux dégrade les herbiers soit par leur emprise directe sur l'herbier, la modification de l'hydrodynamisme, l'apport d'eaux usées (rejets de sels nutritifs et d'eau douce), ou encore l'augmentation de la turbidité et donc la perturbation de la photosynthèse, etc.

II.3) LIMITES

Le sort de la nécromasse est (i) la séquestration dans la matte, (ii) la consommation par les détritus-mangeurs dans l'herbier, (iii) l'exportation vers d'autres écosystèmes marins, où il constitue une source pour les réseaux alimentaires, (iv) l'exportation vers les plages, où il constitue des banquettes, réduit l'impact des vagues et contribue à l'écosystème des plages, et (v) s'exporte vers l'écosystème terrestre des dunes. Ces cinq actions peuvent échanger la nécromasse.

Les processus de dégradations sont particulièrement étudiés à l'intérieur de l'herbier et notamment dans la matte, peu de données existent concernant les sédiments de dragage.

III) CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES – CHIMIQUES – MÉCANIQUES - BIOLOGIQUES

Recueil bibliographique et synthèse des caractéristiques physiques-chimiques-mécaniques et biologiques des posidonies et de leurs résidus.

La littérature disponible a majoritairement étudié les propriétés physiques et chimiques tandis que les caractéristiques mécaniques des posidonies et de leurs résidus sont peu documentées.

III.1) CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

Posidonia oceanica est une plante à fleur à croissance lente (1 cm par an) qui peut vivre plus de mille ans dans des conditions favorables. Elle se compose en partie supérieure de faisceaux de feuilles, et en partie inférieure de rhizomes et de racines qui s'entrelacent en créant la matte.

P. oceanica est sensible à certaines modifications de son milieu notamment à la diminution de la salinité. Un trop fort hydrodynamisme lui est également préjudiciable.

A l'échelle de la Méditerranée, on observe une régression générale des herbiers.

Jeudy De Grissac (1975) présente dans sa thèse de sédimentologie dynamique, qu'une partie des feuilles mortes de *Posidonia oceanica* qui se détachent des rhizomes lors de l'automne sont exportées vers des aires de décantation, telles que des zones de sable et des intermattes.

Par la suite, les tempêtes d'hiver et d'automne les entraînent soit vers d'autres écosystèmes benthiques, de l'étage infralittoral à l'étage bathyal, soit vers les plages.

Sur les plages, les feuilles mortes, ainsi parfois que des rhizomes, peuvent localement s'accumuler en quantités considérables, sur une épaisseur pouvant atteindre 1 - 2 m. Ces accumulations de feuilles mortes sont nommées "banquettes". En fait, les banquettes sont constituées de feuilles et de rhizomes de *P. oceanica* à divers états de fragmentation et de dégradation (jusqu'au stade de fibres), de sédiment et d'eau. Cet ensemble constitue une structure rigide et élastique en même temps.

Le matériel végétal est constitué essentiellement de feuilles, de fragments de feuilles et de fibres ; les rhizomes sont en quantité négligeable. Les débris végétaux qui constituent les banquettes peuvent être classés en 3 catégories :

- Type 1 : Débris peu évolués, encore verts et conservant encore les 2 bords de la feuille. Ils représentent moins de 1% des banquettes.
- Type 2 : Débris présentant les mêmes caractéristiques que ceux de type 1, mais de couleur brune. Ils représentent 1 à 26% des banquettes.
- Type 3 : Débris très dégradés, de couleur brune, présentant au maximum un seul des 2 bords de la feuille. Ils représentent 1 à 99% des banquettes.

Hamdaoui *et al.* (2018) ont étudié les propriétés de conduction thermique des fibres issues de pelotes de Posidonie. Cette étude a permis de déterminer que les fibres de *Posidonia oceanica* ont des caractéristiques adaptées aux matériaux d'isolation car elles sont comparables à celles des matériaux d'isolation industriels.

L'utilisation à l'état brut est également intéressante. Il pourrait s'agir d'un matériau isolant écologique prometteur dans le domaine de la construction en raison de son caractère renouvelable et de sa disponibilité.

Cocozza *et al.* (2011) ont indiqué que les résidus fibreux de *Posidonia oceanica* montrent des puissances de chauffage qui semblent être proches de celles du bois, de la paille et de la tourbe.

Khiari & Belgacem, 2017 ont étudié la morphologie des pelotes et des feuilles de *P. oceanica*. Les vues transversales superficielles et longitudinales de ces matières premières présentées à la figure 7 révèlent que la feuille (C et D) a une structure très poreuse par rapport à la pelote (A et B). Notamment, la pelote est principalement composée de fibres d'un diamètre de ~ 20 µm et d'une épaisseur de paroi d'environ 10 µm, tandis que la feuille se compose de plusieurs éléments cellulaires différents. Les fibres de feuille ont une épaisseur de paroi cellulaire comprise entre 2 et 5 µm selon leur position dans la feuille, c'est-à-dire que les cellules extérieures sont plus épaisses que les cellules intérieures.

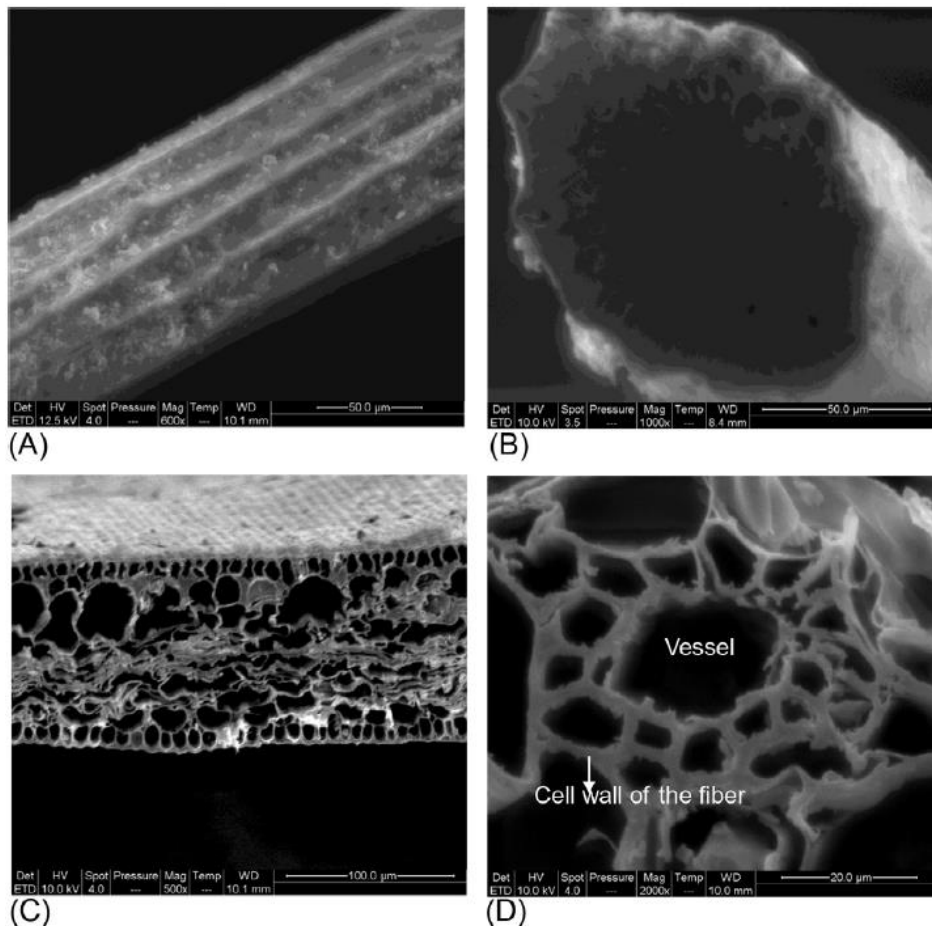


Figure 7 Microscopie électronique à balayage des pelotes de *P. oceanica* (A, B) et des feuilles (C, D). *Bettaieb F, Khiari R, Dufresne A, Mhenni MF, Putaux JL, Boufi S. Cellulose nanofibrillaire de Posidonia oceanica : propriétés et caractéristiques morphologiques. Ind Crops Prod 2015 ; 72:97–106, Elsevier 2016.*

Verhille *et al.* (2017) ont étudié les aegagropiles, ces pelotes de fibres végétales de feuilles de posidonies décomposées. Lors de l'agglomération, des fibres détachées de la plante se regroupent en paquets lâches et désordonnés. Ceux-ci se compactent ensuite sous l'effet des vagues et des courants, qui les font rouler et retomber sur le fond marin. La structure interne à une densité croissante du cœur de la pelote vers la périphérie.

Les déformations appliquées à la boule sont en partie irréversibles. L'effet combiné de l'élasticité et du frottement des fibres permet en effet aux pelotes de garder leur cohésion malgré l'absence de paroi pour les maintenir comprimées. La compréhension de la structure et des propriétés mécaniques de ces amas naturels de fibres ouvre des perspectives pour la conception de matériaux à la fois légers et résistants.

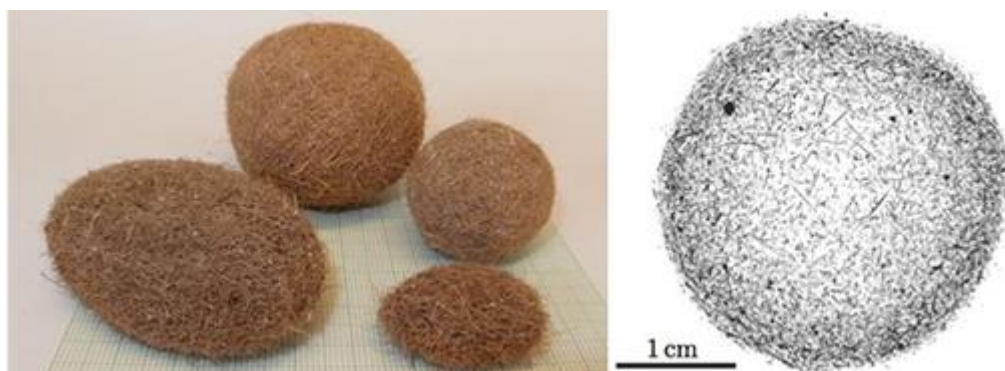


Figure 8 *A gauche : quelques aegagropiles posés sur du papier millimétré. A droite : coupe équatoriale d'un aegagropile montrant sa structure interne : un cœur lâche entouré d'une croûte plus dense (Sébastien Moulinet)*

III.2) CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES

La production primaire issue de *P. oceanica* est très riche en cellulose et en lignine, des composés peu utilisables par les herbivores, et en composés phénoliques, dont l'un des rôles est de dissuader les consommateurs potentiels.

Romero *et al.* (1992) ont mesuré la composition chimique des débris de posidonie tout au long de la désintégration en tenant compte de la litière foliaire et des rhizomes et racines morts, ainsi que des stocks minéraux qu'elle représente (C, N, P). Dans le cas des feuilles, la teneur en carbone (C) diminue nettement avec le temps, la teneur en azote (N) et phosphore (P) diminuait à 20 m et demeurait relativement constante à 5 m.

	C	N	P
young leaves	33.8	1.49	0.127
old leaves	30.6	1.32	0.089
litter (coarse)	29.9	0.42	0.039
litter (fine)	36.6	0.45	0.031
living rhizome	35.7	0.59	0.034
dead rhizome	34.1	0.35	0.022
living roots	38.4	0.45	0.017
dead roots	36.6	0.44	0.018

Figure 9 *Teneurs en carbone, nitrogène et phosphore contenues dans les différentes parties de la plante*

Le tableau ci-dessous recense les résultats de l'expérimentation sur la station à 20 m de profondeur.

		dry weight	C	N	P
living	leaves	384	123.6	5.4	0.41
	rhizomes	1223	393.8	7.2	0.42
	roots	140	53.8	0.6	0.02
	total living	1747	571.2	13.2	0.85
dead	leaves	136	40.7	0.6	0.05
	rhizomes	2947	1004.9	10.3	0.65
	roots	945	345.9	4.2	0.17
	fine	698	255.5	3.1	0.22
	total dead	4726	1646.9	18.2	1.09
	TOTAL	6473	2218.1	31.4	1.94

Figure 10 *Stock de biomasse et de minéraux dans les différentes parties de la plante. Poids sec en g de matière sèche par m². C, N et P exprimés en g de l'élément au m².*

Ainsi les résultats de l'étude montrent que l'écosystème de *Posidonia oceanica* agit comme un puits pour les divers éléments biogéniques. En l'espace d'un an, tout le matériel foliaire produit est soit décomposé, soit exporté ; l'exportation annuelle peut être estimée à 50% du matériel foliaire produit pour l'ensemble de l'herbier de Lacco Ameno.

Harrison (1989) dans sa revue sur la dégradation des herbiers marins précise que les détritiques des herbiers marins subissent une première période de lessivage, laissant un mauvais substrat pour les bactéries parce que ce qui reste de la matière soluble est déficient en nutriments inorganiques, contient des composés phénoliques inhibiteurs, et est protégé par la cellulose et la lignine. Pendant la décomposition l'azote et d'autres éléments sont progressivement libérés.

Puisque les champignons semblent être sans importance dans la décomposition des herbiers marins, le développement de conditions anaérobies (généralement par enfouissement de détritiques dans les sédiments) favorise la décomposition par les bactéries cellulolytiques anaérobies. La fragmentation par détritivores augmente également les taux de décomposition dans les détritiques exportés en réduisant la taille des particules, en augmentant les surfaces disponibles pour les attaques microbiennes et (parfois) en ajoutant de l'azote aminé aux détritiques. Certains animaux peuvent assimiler le contenu cellulaire des feuilles d'herbiers marins tandis que d'autres présentent une cellulolyse dans leurs intestins et sont des assimilateurs efficaces des glucides structurels d'herbiers marins.

Augier et Santimone (1979) ont étudié la composition en cendres, carbone, hydrogène, azote, protéines et acides aminés de la posidonie prélevée en plongée à différentes profondeurs. Les concentrations en azote total, azote protéinique et en protéines sont croissantes successivement dans les racines, les rhizomes, et les feuilles, ces dernières présentant des taux trois fois plus élevés que les deux autres organes.

En ce qui concerne les acides aminés libres, 6 ont été identifiés et dosés dans les rhizomes, 11 dans les racines et 13 dans les feuilles. Les rhizomes se caractérisent par des teneurs relativement élevées en arginine ; les feuilles et les racines par des quantités importantes en acide glutamique et en acide aspartique. Les trois organes ont, par contre, en commun des quantités relativement élevées en alanine.

La teneur en carbone total la plus élevée a été mesurée dans les racines (38.64 %), puis dans les feuilles (33.85 %) et enfin dans les rhizomes (30.10 %). De plus, les concentrations sont plus élevées dans les feuilles récoltées à - 20 m (33.85%) que dans celles à - 10 m (32.67 % et à - 30 m : 31.45%).

D'après Harrison (1989) les herbiers marins présentent des cycles de croissance saisonniers au cours desquels la composition chimique varie. Ainsi, des différences dans les taux de décomposition des feuilles de *Zostera marina* L. d'âges différents (jeunes, vieilles, mortes) obtenues dans des microcosmes de laboratoire pourraient résulter de différences initiales dans la composition des feuilles (teneur en azote, teneur totale en matières organiques ou en matières organiques solubles ou différences dans l'épibiote).

Agostini *et al.* (1998) ont identifié et quantifié les composés phénoliques dans divers tissus foliaires de *P. oceanica*. Au total, 23 composés ont été identifiés et analysés quantitativement. Le niveau des composés trouvés varie selon (i) le tissu examiné, les concentrations les plus élevées étant observées chez les jeunes feuilles en croissance (feuilles intermédiaires) et les conditions environnementales (facteurs abiotiques et conditions de « stress »).

La composition chimique des fibres et des feuilles a été recensée par Allègue *et al.* (2011). Les substances contenues dans ces matériaux sont des graisses et cires, pectines, hémicelluloses et lignines. Les fibres ont un taux élevé de lignine. Les feuilles contiennent un taux d'holocelluloses inférieur à celui des fibres. Par contre, elles contiennent un taux plus élevé de lignine et de pectine.

Taux en %	Fibres brutes	Fibres bouillies	Taux en %	Feuilles brutes	Feuilles bouillies
Cellulose	48,39	48,11	Cellulose	41,3	42,7
Hémicellulose	18,91	20,79	Hémicellulose	19,83	20,78
Holocellulose	67,3	68,9	Holocellulose	61,13	63,48
Lignine	23,12	22,71	Lignine	29,57	28,63
Pectine	4,78	8,69	Pectine	5,6	7,19
Graisses et cires	4,8	0	Graisses et cires	3,7	0,7

Figure 11 *Composition chimique des fibres (à gauche) et des feuilles (à droite) de Posidonie*

D'après Khiari et Belgacem (2017) la principale différence réside dans la teneur en cendres, qui est plus élevée dans la feuille (12 %) que dans la pelote (10 %). La quantité d'holocellulose provenant de la pelote (61 %) est également nettement plus élevée que celle de la feuille (47 %), mais les deux ont des teneurs en lignine similaires. Enfin, il convient également de noter que la pelote contient une plus grande quantité de cellulose que la feuille.

Les composés chimiques ont été comparé à ceux de nombreuses biomasses cellulosiques tirés de la littérature, comme le bois dur, et le bois résineux, les résidus agricoles, d'autres sources non ligneuses diverses et les plantes annuelles. Il ressort de ce qui précède que dans l'eau froide et chaude, la quantité d'extractions associées aux deux formes de *P. oceanica* est plus élevée que dans le bois dur et le bois résineux, mais comparable aux quantités habituellement rencontrées dans les sources non ligneuses.

La composition chimique de la Posidonie a été comparée à celle de fibres de matériaux issus et non issus de bois. Les résultats discutés par Khiari et Belgacem (2017) montrent que la Posidonie est un des matériaux lignocellulosiques les plus intéressants.

Kaal *et al.* (2018) décrivent la composition moléculaire de plusieurs organes de *P. oceanica*. La lignine de *P. oceanica* a une abondance extraordinaire d'acide p-hydroxybenzoïque. L'abondance de la lignine et la composition moléculaire de *P. oceanica* peut influencer sur la capacité de stockage du carbone organique par l'amélioration de la récalcitrance chimique des parois cellulaires.

De Sanctis *et al.*, (2019) ont étudié la composition chimique de feuilles de *P. oceanica*, ils ont obtenu des valeurs moyennes de 33.6 % (\pm 6.6) de lignine et 23.5 % (\pm 6.7) de cellulose. Cette étude a été soutenue par le projet BIOPS (Traitement et réutilisation de *Posidonia oceanica*) financé par la région des Pouilles (IT).

Dans la revue de Harrison (1989) des échantillons de terrain de *Z. marina* révèlent une tendance à la diminution progressive de la teneur en azote à mesure que les feuilles se sénescent et meurent, avec de petites augmentations subséquentes sous forme de fragments détritiques.

Contrairement à d'autres plantes vasculaires, les détritiques des herbiers marins ne présentent pas d'accumulation nette d'azote pendant la décomposition et peuvent donc être une source d'une petite quantité de l'élément nutritif essentiel.

Une estimation de la contribution de la décomposition des herbiers marins à la libération des éléments nutritifs est que la décomposition d'une culture de feuilles a libéré 46 % (pour *P. australis*) des nutriments nécessaires pendant la croissance d'une nouvelle culture de feuilles.

En outre, les conditions physico-chimiques sur le site de la décomposition peuvent être aussi importantes que les conditions biologiques.

Pour ce qui est des banquettes, elles sont essentiellement constituées de fibres et d'hydrates de carbone. Elles sont pauvres en lipides et en protéines et présentent donc une faible qualité nutritionnelle par rapport aux feuilles vivantes de *Posidonia oceanica* (Chessa *et al.*, 2000).

III.3) CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Allègue *et al.* (2012) ont étudié les propriétés mécaniques de matériaux composites renforcés avec des fibres de posidonie issues des pelotes. Ils développent l'étude du module de Young dans le cadre de matériaux composites. Il s'agit du module d'élasticité (ou de traction) soit la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et le début de la déformation d'un matériau élastique isotrope. La résistance mécanique du matériau est caractérisée par sa limite d'élasticité et/ou sa résistance à la traction.

En considérant les propriétés mécaniques, le taux de 5% de fibres est le taux de renfort optimal pour renforcer un composite. Le module en flexion du composite continue à augmenter en augmentant le taux de renfort. La contrainte et le module en flexion s'améliorent avec l'augmentation de la vitesse de sollicitation et le taux de renfort.

Le transfert de la charge entre la matrice et les fibres dans un composite n'est pas seulement déterminé par les propriétés intrinsèques de la fibre et de la matrice, mais aussi affecté par les paramètres géométriques et l'organisation des fibres dans la matrice.

III.4) CARACTÉRISTIQUES BIOLOGIQUES

Les magnoliophytes marines disposent d'un système foliaire dressé, porté par des tiges ou des rhizomes, et un système racinaire. Elles sont aussi capables de vivre totalement immergées, disposent d'un système de fixation au sédiment efficace, se sont adaptées à la vie en milieu salé et disposent toutes d'un système de pollinisation hydrophile (Vela *et al.* 2006).

La posidonie renferme des composés toxiques et répulsifs destinés à freiner sa consommation par les herbivores, ils limitent sa comestibilité à quelques poissons et oursins. Une fois les feuilles tombées, ces composés toxiques s'échappent des cellules mortes et sont dissous dans l'eau (et ne sont donc plus présents dans les feuilles).

Les nutriments sont à leur tour en grande partie dissous dans l'eau s'ils n'ont pas été remobilisés au préalable par la posidonie. Non toxiques donc, mais largement dépourvues de nutriments, les accumulations de feuilles mortes de posidonie n'en restent pas moins convoitées par quantité de micro-organismes détritvires : champignons, bactéries et autres micro-algues s'appliquent immédiatement à les dégrader tandis qu'ils profitent des quelques nutriments encore disponibles. Ces micro-organismes sont alors, à leur tour, consommés par toute une série d'invertébrés. Ceux-ci, sans qu'ils aient eux-mêmes eu à digérer les feuilles mortes de la posidonie, en profitent cependant directement, du fait même de leur consommation de micro-organismes les ayant digérées avant eux. La litière de posidonie constitue donc un « compartiment détritvire » bien plus important qu'il n'y paraît, et pas uniquement un habitat. Il est même permis de postuler que c'est par le biais de cette matière organique et des détritvires qui la consomment que la matière organique foliaire produite par la posidonie se transmet à l'ensemble des chaînes alimentaires côtières de la Méditerranée (François Remy).

3.4.1) Écologie

La Posidonie (*Posidonia oceanica*) est une plante marine (magnoliophyte) endémique de la Méditerranée. Elle se développe entre la surface et 30 à 40 m de profondeur. Elle tolère des variations de température et d'hydrodynamisme importants mais craint la dessalure. Elle constitue de vastes prairies sous-marines communément appelées herbiers.

La lumière constitue l'un des facteurs les plus importants pour la répartition et la densité de *P. oceanica* (Elkalay et al., 2003).

P. oceanica dépérit immédiatement en dessous de 33‰ et semble mieux résister aux salinités élevées, bien que 41 ‰ est sa limite supérieure (Ben Alaya, 1972).

Il est possible que les températures basses (moins de 10 °C) et hautes (plus de 28 °C) ne soient supportées qu'exceptionnellement.

Mayot *et al.* (2005) suggèrent que l'augmentation de la température de l'eau de mer qui est observée actuellement (Salat et Pascual, 2002) pourrait avoir un effet négatif sur *P. oceanica*.

L'hydrodynamisme trop intense est préjudiciable à l'herbier et peut arracher des faisceaux entiers de feuilles lors de tempêtes.

3.4.2) Fonctionnement de l'écosystème

Une caractéristique fondamentale de l'écosystème à *Posidonia oceanica* est constituée par la juxtaposition de 2 types de production primaire. A l'échelle planétaire, seuls les écosystèmes à magnoliophytes marines présentent cette particularité (Boudouresque, 1996).

(i) La production primaire issue de *P. oceanica* est riche en cellulose et en lignine, composés peu utilisables par les herbivores, et en composés phénoliques. La production primaire nette de *P. oceanica* est en moyenne de 420 g de matière sèche par mètre carré et par an. Localement, des valeurs supérieures ont été mentionnées dans la littérature, atteignant 1 300 g de matière sèche par mètre carré et par an ; elle diminue en fonction de la profondeur (Pergent *et al.*, 1997).

(ii) La production primaire issue des épiphytes des feuilles est constituée par des Chromobiontes et Rhodobiontes facilement utilisables par les herbivores ; elle est comprise entre 100 et 500 g de matière sèche par mètre carré et par an (Mazzella et Ott, 1984). Au total, les herbiers à *P. oceanica* constituent l'un des écosystèmes les plus productifs de la planète.

Boudouresque *et al.* (2006) indiquent que la biomasse végétale issue des herbiers de *Posidonia oceanica* est très élevée et comparable à celle des mangroves. De plus, le stockage dans la matre est effectif pour une très longue durée. La biomasse animale bien que plus faible que la biomasse végétale est très élevée également.

3.4.3) Reproduction

La floraison de *P. oceanica* se produit à l'automne (septembre-novembre) lors de la reproduction sexuée si elle a lieu. Les fleurs sont hermaphrodites, c'est-à-dire à la fois mâles et femelles ; 4 à 10 fleurs sont groupées en une inflorescence au sommet d'un pédoncule de 10-30 cm de longueur. La floraison ne se produit pas tous les ans, surtout dans les eaux relativement froides de l'Aire Marittimo (Nord de la Méditerranée Occidentale). Les fruits ne contiennent qu'une seule graine (Hartog, 1970 ; Boudouresque et Meinesz, 1982).

L'essentiel de la reproduction de *P. oceanica* semble se faire surtout de façon végétative, par des boutures (Molinier et Picard, 1952), et par pseudo-viviparité : des plantules végétatives se forment directement sur les inflorescences et remplacent les organes de reproduction sexuée. Cette stratégie contribue à courte distance. On ignore, pour le moment, s'il s'agit d'un mode de reproduction très local, ou s'il concerne d'autres régions de Méditerranée. [on distingue deux sortes de viviparité : (i) La viviparité stricte dans laquelle les graines résultant d'une reproduction sexuée germent sur l'inflorescence avant de se détacher de la plante et (ii) La pseudo-viviparité lorsque des propagules végétatives (bulbilles, plantules) remplacent les organes de la reproduction sexuée sur l'inflorescence. Comme les boutures, ces plantules donnent donc naissance à des clones de la plante-mère.]

La faible variabilité génétique de *P. oceanica* pourrait constituer un facteur fragilisant pour cette espèce (Raniello et Procaccini, 2002). Capiomont et al. (1996) ont en effet mis en évidence que le polymorphisme enzymatique entre populations de Méditerranée Occidentale (Italie, France continentale, Corse et Algérie) est très faible, tout particulièrement à Port-Cros (Var, France) et dans la région de Nice (Alpes-Maritimes, France). La rareté de la floraison et surtout de la production de graines, ainsi que l'autopollinisation, et inversement l'importance de la reproduction végétative (par boutures) pourrait expliquer cette faible variabilité.

IV) SÉPARATION DES FIBRES

Réflexion et proposition d'un protocole de séparation des fibres contenues dans le sédiment pour faciliter sa valorisation (*i.e.* pour récupérer un sédiment exempt de fibres).

IV.1) PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Le principe est de proposer une expérimentation compatible avec plusieurs moyens de dragage, en cherchant à obtenir une solution de séparation des fibres qui nécessite peu de matériel, peu d'énergie, et un nombre réduit d'opérations et d'opérateurs en vue de la valorisation des sédiments.

4.1.1) Remise en suspension par injection d'air

Cette injection d'air vise à mettre en suspension les sédiments dragués dans un réservoir pour détruire la cohésion entre les sédiments. Les feuilles et les détritiques plus légers resteront en suspension plus longtemps que les sédiments.

Elle peut employer des rampes d'aération en fond de bassin telles que dans un bassin d'aération utilisé dans un processus de traitement des eaux usées. L'injection d'air peut également être effectuée par immersion d'une pompe de dragage de faible puissance.

Puis l'extraction des boues de dragage serait réalisée à partir d'une vanne dans le fond du bassin. Les feuilles et fibres de posidonies en suspension pourraient être récupérés en surface ou dans la partie haute de la colonne d'eau par surverse par exemple.

4.1.2) Remise en suspension par injection d'eau

Une injection d'eau au moyen d'une pompe permettrait de détruire la cohésion entre les sédiments. De plus l'utilisation d'une eau saline voire hyper saline (ajout de sel) améliorerait la flottabilité des fibres et des feuilles.

La solution hypersaline est obtenue en dissolvant une grande quantité de sel dans l'eau. La quantité de sel à ajouter est à faire varier pour obtenir des résidus de posidonie et autres fibres végétales qu'ils se maintiennent en surface (De Sanctis et al., 2019), en l'occurrence 175 à 285 g de biomasse humide dans 1 L d'eau du robinet.

Puis l'extraction des sédiments de dragage serait réalisée à partir d'une vanne dans le fond du bassin. Les feuilles et fibres de posidonies en suspension pourraient être récupérés en surface ou dans la partie haute de la colonne d'eau par surverse.

On relève cependant que les sédiments de type limons-argiles se déposent lentement dans la colonne d'eau, les injections d'air et d'eau favorisant la mise en suspension seraient moins adaptées à cette catégorie de sédiments.

4.1.3) Tamisage de matériaux secs

Le passage de la fraction sédimentaire sur un tamis, rincé à l'eau de mer, permettrait de retenir la fraction grossière des détritiques (feuilles, faisceaux de feuilles, rhizomes, etc.). Cette méthode nécessite de faire sécher les sédiments de dragage, et pourrait être adaptée en cas de stockage temporaire à terre. Les matériaux seront versés sur une grille munie d'un système de vibration, et placée par-dessus un réservoir. Les sédiments seront envoyés dans le réservoir et les feuilles et fibres seront récupérés en surface. L'agitation est utilisée à une plus petite échelle par De Sanctis et al. (2019) pour concentrer les sédiments dans le fond d'un sac. Toutefois cette technique est chronophage et risque de ne pas être rentable.

Plus la maille sera réduite et plus le tamisage sera efficace. A partir d'une maille de 2 mm permet de retenir les feuilles et la fraction sous-dimensionnée (< 2 mm) se compose principalement de sédiments sableux et d'une petite partie de fibres de posidonies (Parente et al. 2013).

Le sédiment étudié dans la rade d'Hyère par Jeudy de Grissac (1975) est résultat de deux composantes :

- la production biogène, autochtone ou allochtone plus importante pour le détritique côtier que pour l'herbier de posidonies.
- la production terrigène, liée aux apports fluviaux et aux érosions littorales.

Il est le support de 3 grands ensembles de fonds marins : le prisme littoral, l'herbier de posidonies et le détritique côtier.

La fraction de sédiments correspondant peut-être subdivisée en 4 parties :

- sable grossier : supérieur à 2 mm
- sable moyen : 2 mm à 0.5 mm
- sable fin : 0.5 mm à 0.063 mm
- pélites : inférieur à 0.063 mm

Les tamis utilisés par Gobert (2002) ont des mailles de 2 ; 1 ; 0.5 ; 0.25 ; 0.125 et 0.063 mm. La granulométrie renseignée dans la figure n°12 ci-dessous présente la répartition entre les sédiments et les détritiques de l'herbier en % du poids sec de l'échantillon de départ.

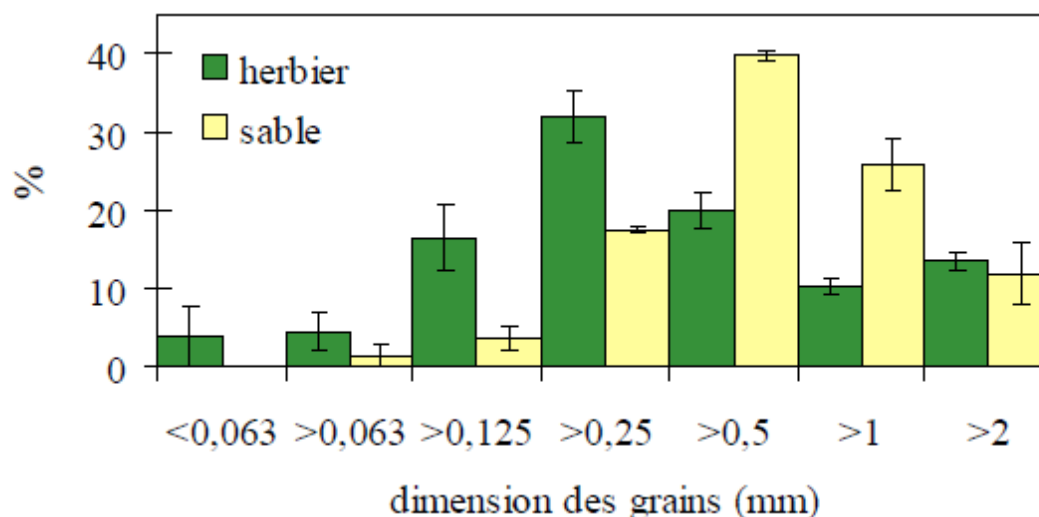


Figure 12 *Distribution des différentes fractions granulométriques (% du poids sec de l'échantillon de départ) du sédiment prélevé dans la zone des 10 m dans l'herbier et à la tâche de sable adjacente de la Baie de La Revellata (n=27) (Gobert, 2002).*

La fraction granulométrique dominante au niveau du sédiment dans l'herbier est celle qui contient les grains compris entre 0.25 et 0.50 mm.

4.1.4) Analyse

Une analyse sur la matière sèche et plus précisément l'analyse des cendres suite à une incinération d'un échantillon représentatif permettrait de connaître la proportion de la part minérale et organique.

Parente *et al.* (2013) séparent complètement la fraction organique du sédiment avec un traitement au H₂O₂ 130 vol. à une température de 40 °C (ANPA, 2001) de la fraction de plus petite taille. A la fin de l'oxydation (indiquée par l'arrêt de l'effervescence), les résidus ont été lavés à plusieurs reprises dans l'eau courante, séchés à nouveau dans le four et finalement pesés.

4.1.5) Autres procédures

Les processus régulièrement utilisés sur un échantillonnage réduit de posidonies pour les séparer des sédiments ont pour objectif inverse de récupérer des feuilles et fibres exempts de sédiments.

Parente *et al.* (2013) utilisent un prototype de « tamis rotatif » pour séparer les fibres de Posidonie du sable. Il est constitué d'un réservoir équipé d'un agitateur et d'un tamis cylindrique mobile à trous de 2 mm. Le principe de fonctionnement du prototype de séparation du sable consiste à laver les résidus à l'eau de mer et à les tamiser ensuite. L'opération se déroule en deux phases : d'abord, les résidus sont placés à l'intérieur du réservoir contenant l'eau, où, au moyen d'un bras mobile, le lavage des résidus a lieu. Par la suite, les résidus sont passés à l'intérieur d'un tamis rotatif cylindrique qui complète la séparation.

Après tamisage, la fraction surdimensionnée et la fraction sous-dimensionnée (respectivement, > 2 mm composée de feuilles et < 2 mm composée principalement de sédiments sableux et d'une petite partie de fibres de posidonie) ont été séchées à 105°C.

Afin de séparer complètement la fraction organique du sédiment, la fraction de plus petite taille a été traitée au H₂O₂ 130 vol. à une température de 40 °C (ANPA, 2001). A la fin de l'oxydation (indiquée par l'arrêt de l'effervescence), les résidus ont été lavés à plusieurs reprises dans l'eau courante, séchés à nouveau dans le four et finalement pesés.

La majeure partie des fibres de posidonies est récupérée manuellement sur la plage puis cardée (brossée) manuellement pour en éliminer le sédiment.

4.1.6) Opération de dragage

Suivant le moyen de dragage utilisé (mécanique ou hydraulique) la mise en place d'un outil directement sur l'engin de dragage tel qu'une grille dans le godet ou un filtre (géotextile à maille large) dans la cuve de récupération des sédiments pourrait permettre une première filtration grossière pour séparer la fraction sédimentaire des macrophytodétritus.

IV.2) RÈGLEMENTATION

Le long des côtes méditerranéennes, la posidonie est protégée selon différents niveaux de réglementation. Dans l'aire Marittimo, elle est protégée par des directives européennes, leur transcription en droit national ainsi que d'autres niveaux de protection locales.

4.2.1) Règlementation internationale

La posidonie est protégée par la convention de Barcelone signée en 1976 sous l'égide du programme environnement des Nations Unies. Le « protocole relatif aux aires spécialement protégées et à la diversité biologique en Méditerranée » de la « Convention pour la protection de la Méditerranée contre la pollution » dresse deux listes de 126 espèces marines « en danger ou menacées ».

La convention de Berne signée en 179 (amendée en 2002 et signée en 2008) porte sur la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe. Trois annexes listent les espèces « protégées » ou « strictement protégées ».

La convention de Washington signée en 1975 est une convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction (CITES). Elle interdit le commerce d'espèces menacées d'extinction, réglemente celui d'espèces potentiellement menacées, et réglemente le commerce d'espèces bénéficiant d'un statut particulier défini par un Etat en coopération internationale.

De plus, l'IUCN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature) dresse depuis 1964 une « liste rouge » d'espèces qu'il convient de préserver en fonction de critères pertinents de rareté et d'évolution temporaire de leur population.

4.2.2) Règlementation européenne

Depuis les années 1990, l'habitat « herbier de posidonie » est protégé par la directive « Habitats, Faune, Flore » (dite Natura 2000) permet à chaque Etat membre de désigner des sites Natura 2000 au sein desquels des objectifs de conservations spécifiques seront définis.

4.2.3) Règlementation en France

En France la protection de *P. oceanica* s'applique aussi bien à la plante vivante que morte, « tout ou partie » par la Loi du 10 juillet 1976, relative à la protection de la nature et de son Décret d'application du 25 novembre 1977 concernant la protection de la flore et de la faune sauvages du patrimoine naturel français.

Le Décret du 7 juillet 1999 du Ministère des Affaires étrangères, portant publication des amendements aux annexes de la Convention relative à la Conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe (Convention de Berne) mentionne également *Posidonia oceanica*.

En dehors de l'espèce *P. oceanica* elle-même, les herbiers peuvent bénéficier d'une protection aux termes de la Loi du 3 janvier 1986, qui énonce les principes relatifs à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral. Cette Loi "littoral" peut permettre la préservation d'un herbier ou d'une partie d'herbier, qui présente un intérêt écologique ou s'avère indispensable au maintien de l'équilibre biologique. Cela s'est traduit par le Décret du 20 septembre 1989 qui stipule que "sont préservés, dès lors qu'ils constituent un site ou un paysage remarquable ou caractéristique du patrimoine naturel et culturel du littoral, sont nécessaires au maintien des équilibres biologiques ou présentent un intérêt écologique : (...) les milieux abritant des concentrations naturelles d'espèces animales ou végétales tels que les herbiers (...)" (Boudouresque *et al.*, 2006).

La Directive Cadre sur l'Eau adoptée en 2000, vise à garantir la qualité de l'eau en préservant les milieux aquatiques y compris les eaux côtières jusqu'à 12 milles nautiques.

4.2.4) Règlementation en Italie

D'après Boudouresque *et al.*, (2006) en Italie, les compétences nationales en matière de défense de la biodiversité du milieu marin et côtier, des espèces marines protégées et de l'environnement marin dans son ensemble sont du ressort de la Direction pour la Protection de la Nature du Ministère de l'Environnement et de la Défense du Territoire.

La défense de la biodiversité marine est un thème prioritaire des stratégies nationales, et de nombreux efforts ont été consacrés à la sélection et à la création d'Aires Marines Protégées.

Les activités actuellement en cours, coordonnées par le Ministère de l'Environnement et de la Défense du Territoire, concernent la mise en œuvre d'Action Plans pour les cétacés, les tortues de mer, les herbiers à *Posidonia oceanica* et les espèces allochtones envahissantes.

La Direction pour la Protection de la Nature organise en outre, sous convention avec 14 régions côtières, une activité de surveillance de l'environnement marin et côtier qui s'étend sur 6 000 km de côtes environ.

Le Ministère de l'Environnement et de la Défense du Territoire a réservé une attention particulière à *Posidonia oceanica*, lui consacrant de nombreux projets au cours de ces dernières années. Ainsi la distribution et l'état de conservation des herbiers à *P. oceanica* ont été étudiés moyennant de multiples campagnes.

De plus, la Direction de la Protection de la Nature du Ministère de l'Environnement a mis en place un plan spécifique pour la cartographie des herbiers le long des côtes méditerranéennes, conformément au « Programme national de repérage et de mise en valeur de *Posidonia oceanica*, et d'étude des mesures de protection de celle-ci contre tous les phénomènes susceptibles d'en provoquer la dégradation et la destruction », prévu par la Loi n° 426/98.

Grâce au projet « Bioitaly », lancé en 1994 par le Ministère de l'Environnement, ayant pour but d'identifier les Sites d'Importance Communautaire (SIC - Directive Habitats), les herbiers de posidonie sont désormais protégés à l'intérieur de zones de protection que ce soit les aires marines protégées ou les zones Natura 2000.

Depuis 1998, l'Italie a mis en place une procédure légale qui vise à assurer la protection des herbiers à Posidonie. Il s'agit de la Loi "Nuovi interventi in campo ambientale" (n°426 – 9/12/98) et plus récemment de la Loi sur les "Disposizioni in campo ambientale" (n°93 – 23/3/2001). Ces textes, bien que très généraux, consacrent des paragraphes spécifiques aux herbiers, avec notamment des dispositions financières pour la réalisation d'études et de programmes pour la protection et la cartographie de *P. oceanica*.

La Ligurie a adopté en 2001 une réglementation pour l'évaluation de l'impact des projets d'aménagement sur les sites d'importance communautaire (Directive Habitats), dans lequel sont inclus les herbiers à *P. oceanica* (Deliberazione di Giunta Regionale n° 646 du 8 juin 2001).

IV.3) VALORISATIONS EXISTANTES

Les feuilles mortes de *P. oceanica* ont été utilisées dans le passé par les populations riveraines du bassin méditerranéen (Boudouresque et Meinesz 1982) :

4.3.1) Bioénergie - méthane

De Sanctis *et al.* (2019) ont étudié la production de bioénergie par digestion anaérobie. La teneur élevée en lignine (environ 34 %) nécessite un prétraitement pour améliorer la récupération d'énergie. Les résultats obtenus ont montré que lorsque le prétraitement thermique était amélioré par l'ajout d'acide chlorhydrique, une amélioration de la production de méthane de 575 % a été obtenue par rapport au prétraitement thermique seulement.

Ce résultat a été attribué à la défibrillation des composants lignocellulosiques opérés par prétraitement thermique acide qui a permis l'élimination de 74%, 70% et 24% de cellulose, hémicellulose et lignine, respectivement, pendant la digestion anaérobie. L'analyse énergétique réalisée pour les stations de traitement d'une capacité de 10 et 50 m³/j a montré que l'addition d'acide dans l'étape d'hydrolyse thermique permet au bilan énergétique de tourner de très négatif (la demande d'énergie est de 8 à 10 fois supérieure à celle produite) à des valeurs positives, avec des efficacités énergétiques des procédés allant de 22 à 35 % par rapport à la taille de la centrale.

4.3.2) Eco matériaux de construction

En Afrique du Nord les feuilles mortes de posidonies ont longtemps été utilisées pour l'isolation de toits. Aujourd'hui des essais sont menés sur l'isolation thermique et phonique.

Le Professeur Roberto Bedini, directeur de l'Institut de biologie et d'écologie Marine de Piombino a mené un projet de traitement des feuilles de posidonie océanique échouées utilisées dans la fabrication de briques allégées où les feuilles hachées étaient utilisées, dans la pâte, à la place de boulettes de polystyrène.

L'institut fut récompensé par la Région Toscane pour ce projet et leur équipe a été interviewée, dans une émission de LINEA BLU de la RAI. C'était un projet dans lequel nous avons utilisé une entreprise qui a construit une machine à transporter sur la côte où elle broyait les feuilles in situ. Les feuilles hachées étaient ensuite amenées à une usine de briques.

Figure 13 Feuilles hachées de posidonie entrant dans la composition des briques



Figure 14 Brique composée avec des feuilles de posidonie

Hamdaoui *et al.* ont étudié la diminution de la conductivité thermique du ciment lorsque des feuilles de posidonies entraînent dans sa composition.

Khiari et Belgacem (2017) ont compilé les utilisations actuelles et potentielles des déchets de *Posidonia oceanica* dans le domaine de la science des matériaux.

4.3.3) Agriculture

Les feuilles mortes de *P. oceanica* ont aussi été utilisées pendant longtemps comme compost par les agriculteurs des côtes méditerranéennes.

Des essais ont été effectués en Italie, en Tunisie et en Grèce, en vue de produire un compost à base de feuilles de *P. oceanica*, avec des résultats intéressants

En Espagne, la municipalité de Denya (Comunitat Valenciana), grâce à un financement européen (projet Life Environnement, 1996) et en collaboration avec l'Université de Valences, a mis en place une installation de compostage capable de traiter 15 000m³/an de déchets végétaux. Le compost obtenu par le mélange de feuilles mortes de *P. oceanica* avec d'autres détritux végétaux (dans un rapport d'environ 1/3) présente de bonnes caractéristiques agronomiques, est riche en oligo-éléments et peut être utilisé pour la reforestation et dans d'autres actions de restauration environnementale.

Les feuilles de *P. oceanica* fraîches possèdent une bonne valeur nutritive, semblable à celle du foin ou de la luzerne. En ajoutant de la poudre de feuilles aux aliments des poules, en Italie, on a amélioré la ponte et le poids des œufs.

4.3.4) Santé

Les égyptiens attribuaient des propriétés curatives à la posidonie, en particulier contre le mal de gorge et les maladies de la peau, et un vieux manuel de botanique (Cazzuola, 1880) la cite parmi les produits de la pharmacopée populaire.

4.3.5) Accessoire

Depuis l'Antiquité les feuilles mortes de *Posidonia oceanica* ont longtemps été utilisées sous forme de garniture à l'intérieur de matelas ou comme litière pour les animaux.

Dans l'Égypte antique, il semble que l'on fabriquait des chaussures avec le feutrage des aegagropiles.

Pendant des siècles les feuilles de *P. oceanica* ont été utilisées par les vénitiens pour emballer et transporter leur délicate et célèbre verrerie.

Parmi les autres usages de *P. oceanica*, on peut également citer la production de papier, vers la fin du 19ème siècle.

4.3.6) Limites actuelles

Les essais modernes ont démontré la faisabilité de l'utilisation des feuilles et des fibres, mais se sont le plus souvent heurtés aux réalités économiques. Elle se heurterait également, dans les pays où l'espèce est protégée à l'interdiction de son utilisation, sous quelque forme que ce soit.

V. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Les détritiques de posidonie susceptibles d'être retrouvés dans les sédiments de dragage sont issus soit directement de l'excrétion des feuilles mortes dans la colonne d'eau, soit de l'exportation de la litière (feuilles mortes, rhizomes cassés), soit de la fragmentation et de la dégradation de cette litière par des détritivores (sur le site de production ou bien sur des sites éloignés).

La posidonie est sensible à certaines modifications de son milieu, à l'échelle du bassin méditerranéen on observe une régression générale des herbiers. Le matériel végétal est constitué essentiellement de feuilles, de fragments de feuilles, de fibres et de rhizomes.

La production primaire issue de *P. oceanica* est très riche en cellulose et en lignine, des composés peu utilisables par les herbivores, et en composés phénoliques, dont l'un des rôles est de dissuader les consommateurs potentiels.

Les fibres de *P. oceanica* sont très résistantes et leurs capacités d'isolation sont semblables à des matériaux industriels.

Les herbiers de *P. oceanica* constituent l'un des écosystèmes les plus productifs à l'échelle de la planète grâce à la production d'une biomasse végétale et d'une biomasse animale issue des herbiers.

Les procédés à étudier pour la séparation des fibres exploitent la flottabilité des résidus végétaux vis-à-vis des sédiments minéraux.

Les feuilles et les fibres de *Posidonia oceanica* sont utilisés depuis l'Antiquité et des recherches récentes sont en cours pour les utiliser en renforcement de matériaux d'éco-construction notamment en raison de ses propriétés thermiques comparables à celles des matériaux d'isolation industriels.

VI. BIBLIOGRAPHIE - WEBOGRAPHIE

AGOSTINI S., DESJOBERT J-M., PERGENT G., 1998. Distribution of phenolic compounds in the seagrass *Posidonia oceanica*. *Phytochemistry*, Vol 48, No 4, pp. 611-617.

ALLEGUE L., ZIDI M., SGHAIER S., 2011. Développement des composites ciments à base de *Posidonia Oceanica*. Conférence : Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques CMSM'2011.

ALLEGUE L., ZIDI M., SGHAIER S., 2012. Propriétés mécaniques des composites polypropylènes renforcées de fibres de posidonie. Deuxième Congrès Tunisien de Mécanique. COTUME'2012.

AUGIER H., SANTIMONE M., 1979. Contribution à l'étude chimique de la phanérogame marine *Posidonia oceanica* Delile : composition en cendres, carbone, hydrogène, azote, protéines et acides aminés en milieu exempt de pollution et en fonction de la profondeur dans le parc national de Port-Cros. 105-123.

BEN ALAYA H., 1972. Répartition et conditions d'installation de *Posidonia oceanica* Delile et *Cymodocea nodosa* Ascherson dans le golfe de Tunis. *Bull. Inst. Océanogr. Pêche Salammbô*, 2(3): 331-416.

BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., 1982. Découverte de l'herbier de Posidonie. *Cah. Parc nation. Port-Cros, Fr.*, 4 : 1-79.

BOUDOURESQUE C.F., JEUDY DE GRISSAC A., 1983. L'herbier à *Posidonia oceanica* en Méditerranée : les interactions entre la plante et le sédiment. *J. Rech. océanogr.*, 8(2-3) : 99-122.

BOUDOURESQUE C.F., BERNARD G., CHARBONNEL E., DIVIACCO G., MEINESZ A., PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., RUITTON S., TUNESI L., 2006. Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. *Ramoge pub.* : 1-202.

CAPIOMONT A., SANDMEIER M., CAYE G., MEINESZ A., 1996. Enzyme polymorphism in *Posidonia oceanica*, a seagrass endemic to the Mediterranean. *Aquat. Bot.* 54 : 265-277.

COCOZZA C., PARENTE A., ZACCONE C., MININNI C., SANTAMARIA P., MIANO T., 2011. Chemical, physical and spectroscopic characterization of *Posidonia oceanica* (L.) Del. residues and their possible recycle. *Biomass and bioenergy* 35. 799-807.

CEBRIAN J., DUARTE C.M., 2001. Detrital stocks and dynamics of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile in the Spanish Mediterranean. *Aquatic Botany*, 70: 295-309.

Chessa, L.A., Deriu, A., Fernandez, C., Fustier, V., Mura, F., Pais, A., Pergent, G., Pergent-Martini, C., Serra, S., Vitale, L., Zanetti, S., 2000b. Valorizzazione delle banquettes di *Posidonia oceanica*. In : *Environnement et identité en Méditerranée*, Interreg II, Univ. Corse, 115-121.

- CROUZET A., 1981. Mise en évidence de variations cycliques dans les écailles de *Posidonia oceanica* (Potamogetonaceae). Trav. sci. Parc nation. Port-Cros, Fr. 7 : 129-135.
- DE SANCTIS M., CHIMIENTI S., PASTORE C., PIERGROSSI V., Di IACONI C., 2019. Energy efficiency improvement of thermal hydrolysis and anaerobic digestion of *Posidonia oceanica* residues. Applied Energy. 252.
- DUARTE C.M., MIDDELBURG J.J., CARACO N., 2005. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. Biogeosciences, 1, 173-180.
- ELKALAY K., FRANGOULIS C., SKLIRIS N., GOFFART A., GOBERT S., LEPOINT G., HECQ J.H., 2003. A model of seasonal dynamics of biomass and production of the seagrass *Posidonia oceanica* in the Bay of Calvi (Northwestern Mediterranean). Ecol. Model. 167 : 1-18.
- GOBERT S., 2002. Variation spatiale et temporelle de l'herbier à *Posidonia oceanica* (L.) Delile. (Baie de La Revellata-Calvi-Corse). Thèse Doct. Univ. Liège, 1-226.
- HAMDAOUI O., IBOS L., MAZIOUD A., SAFI M., LIMAM O., 2018. Thermophysical characterization of *Posidonia oceanica* marine fibers intended to be used as an insulation material in Mediterranean buildings. Construction and Building materials 180. 68-76.
- HARRISON, P. G., 1989 : Detrital processing in seagrass systems : a review of factors affecting decay rates, remineralization and detritivory. Aquat. Bot., 23 : 263-288.
- HARTOG C. den, 1970. The sea-grasses of the world. North Holland publ. Co, Amsterdam, Pays-Bas : 1-275 + 63 pl. h.t.
- JEUDY DE GRISSAC A., 1975. *Sédimentologie Dynamique des Rades d'HYERES et de GIENS (Var). Problèmes d'Aménagements*. Thèse Doct. Univ. Provence, 1-174.
- KAAL J., SERRANO O., DEL RIO J.C., RENCORET J., Radically different lignin composition in *Posidonia* species may link to differences in organic carbon sequestration capacity, *Organic Geochemistry* (2018), doi : <http://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2018.07.017>
- KHIARI R., BELGACEM M.N., 2017. Potential for using multiscale *Posidonia oceanica* waste : current status and prospects in material science. Whoodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. 447-471.
- LAI S., YU C.Z., BOUMA T.J., YAAKUB S.M., TODD, P.A., The relative importance of light and hydrodynamics in the decay and transport of vegetative seagrass fragments, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (2019), doi : <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106430>
- LEONI V., PERGENT G., VELA A., PERGENT-MARTINI C., 2005. Etude finale de faisabilité pour la réutilisation des banquettes de feuilles de *Posidonia oceanica* : du ramassage au recyclage – PORIME. Rapport d'Activité 2004/2005 – Région Corse. Programme INTERREG IIIA Sardaigne / Corse / Toscane, Gis Posidonie édit., Corte : 1-33.

- MAYOT N., BOUDOURESQUE C.F., LERICHE, 2005 Unexpected response of the seagrass *Posidonia oceanica* to a warm Water episode in the Northwestern Mediterranean Sea. C.R. Biologies 328: 291-296.
- MOLINIER R., PICARD J., 1952. Recherches sur les herbiers de Phanérogames marines du littoral méditerranéen français. Ann. Inst. océanogr. 27(3): 157-234.
- PARENTE A, MONTESANO FF, LOMORO A, GUIDO M. Improvement of beached *Posidonia* residues performances to composting. Environ Eng Manage J 2013 ; 12 (S11) : 81–4.
- PASQUALINI V., PERGENT-MARTINI C., PERGENT G., 1998. Use of Remote Sensing for the Characterization of the Mediterranean Coastal Environment : The Case of *Posidonia oceanica*. Journal of Coastal conservation 4 : 59-66.
- PERGENT G., BOUDOURESQUE C.F., CROUZET A., 1983. Variations cycliques dans les écailles des rhizomes orthotropes de *Posidonia oceanica*. Trav. sci. Parc nation. Port-Cros 9 : 107-148.
- PERGENT G., 1990. Lepidochronological analysis of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile : a standardized approach. Aquatic Botany, 37 : 39-54.
- PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., 1991. Leaf renewal cycle and primary production of *Posidonia oceanica* in the bay of Lacco Ameno (Ischia, Italy) using lepidochronological analysis. Aquat. Bot. 42 : 49-66.
- PERGENT G., ROMERO J., PERGENT-MARTINI C., MATEO M.A., BOUDOURESQUE C.F., 1994. Primary production, stocks and fluxes in the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. Mar. Ecol. 106, 139-146.
- PERGENT G., RICO-RAIMONDINO V., PERGENT-MARTINI C., 1997. Faite of primary production in *Posidonia oceanica* meadows of the Mediterranean. Aquatic botany, 59 : 307-321.
- RANIELLO R., PROCACCINI G., 2002. Ancient DNA in the seagrass *Posidonia oceanica*. Mar. Ecol. Progr. Ser. 227 : 169-173.
- ROMERO J., PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., MATEO M.A., REGNIER C., 1992. The detritic compartment in a *Posidonia oceanica* meadow : litter features, decomposition rates and mineral stocks. Mar. Ecol. 13, 73-83.
- SALAT J., PASCUAL J., 2002. The oceanographic and meteorological station at L'Estartit (NW Mediterranean). In : Tracking long-term hydrological change in the Mediterranean Sea. CIESM Workshop Series,16 : 29-32.
- VASSALLO P., et al. The value of the seagrass *Posidonia oceanica* : A natural capital assessment. Mar. Pollut. Bull. (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.044>
- VELA A., 2006. *Fonctionnement et production primaire des herbiers à Posidonia oceanica (L.) Delile en Méditerranée*. Thèse Doct. Univ. Corse, 1-174.

VERHILLE G., MOULINET S., VANDENBERGHE N., ADDA-BEDIA M., LE GAL P., 2017. Structure and mechanics of aegagropilae. Proceedings of the National Academy of Sciences May 2017, 114 (18) 4607-4612 ; DOI : www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1620688114

WALKER D.I., PERGENT G., FAZI S., 2001. Chapter 16 - Seagrass decomposition. Global Seagrass Research Methods, 313-324.

Les couches d'informations utilisées pour la cartographie sont les suivantes :

La couche Herbiers de posidonie est extraite des habitats EUNIS à partir de la plateforme EMODnet Seabed habitats : <https://www.emodnet-seabedhabitats.eu/access-data/launch-map-viewer/>

Les ports et marinas sont issus de la plateforme openstreetmap : <https://www.openstreetmap.fr/>

PRODOTTO T1.4.7 / LIVRABLE T1.4.7 :

**SINTESI BIBLIOGRAFICA DEI TRATTAMENTI E DEI PERCORSI ESISTENTI PER
FRAZIONI DI POSIDONIA MISTA A SEDIMENTI DRAGATI PRESENTI NELLA
ZONA MARITTIMO / SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DES TRAITEMENTS ET
FILIERES EXISTANTES POUR LES FRACTIONS DE POSIDONIES MÉLANGÉES AUX
SÉDIMENTS DRAGUÉS PRÉSENTS DANS LA ZONE MARITTIMO**

PRODOTTO T1.5.8 / LIVRABLE T1.5.8 :

**CARATTERIZZAZIONE DELLA POSIDONIA. SINTESI BIBLIOGRAFICA DELLE
CARATTERIZZAZIONI DELLE FRAZIONI DI SEDIMENTI DRAGATI CONTENENTI
POSIDONIA / CARACTÉRISATION DES POSIDONIES. SYNTHÈSE
BIBLIOGRAPHIQUE DES CARACTÉRISATIONS DES FRACTIONS DE SÉDIMENTS
DRAGUÉS CONTENANT DES POSIDONIES**

MARZO 2020

PREMESSA

Questo progetto s'iscrive nell'ambito del programma di cooperazione transfrontaliera « INTERREG MARITTIMO » 2014 – 2020 e riassume la problematica della presenza di Posidonia nei sedimenti dell'area Marittimo.

Il presente elaborato raccoglie la sintesi bibliografica dei trattamenti e delle filiere esistenti per le frazioni di Posidonia miste ai sedimenti di dragaggio della zona Marittimo (elaborato T1.4.7) e quella riguardante la caratterizzazione delle frazioni di sedimenti di dragaggio contenenti Posidonia (elaborato T1.5.8). Comprende i seguenti contributi :

- Aree portuali interessate dalla problematica della presenza di Posidonia nei sedimenti di dragaggio all'interno dell'area Marittimo - Produzione di una cartografia (che sarà integrata nell'elaborato T1.3.5)
- Posidonia oceanica e sedimenti : come e in che forma i frammenti di Posidonia si ritrovano intrappolati nei sedimenti - Descrizione del processo di degradazione
- Raccolta bibliografica e sintesi delle caratteristiche fisiche, chimiche, meccaniche e biologiche della Posidonia e dei suoi residui
- Riflessione e proposta di un protocollo di separazione delle fibre contenute nel sedimento al fine di facilitarne la valorizzazione (i.e. per recuperare un sedimento privo di fibre)

INTRODUZIONE

Le praterie di *Posidonia oceanica* sono tra gli ecosistemi più produttivi del pianeta. Questa magnoliofita (o fanerogama) marina è endemica del Mar Mediterraneo, dove è presente quasi ovunque, fatta eccezione delle foci dei grandi fiumi, dello Stretto di Gibilterra e delle coste di Israele e del Libano.

Il Millennium Ecosystem Assessment (MA, 2005) ha elencato i numerosi servizi ecosistemici forniti dalle praterie di *Posidonia* : zone di nursery per i pesci e gli invertebrati, produzione abbondante, ossigenazione delle acque costiere e nutrimento per numerose specie di organismi costieri e marini, intrappolamento dei sedimenti e preservazione del litorale.

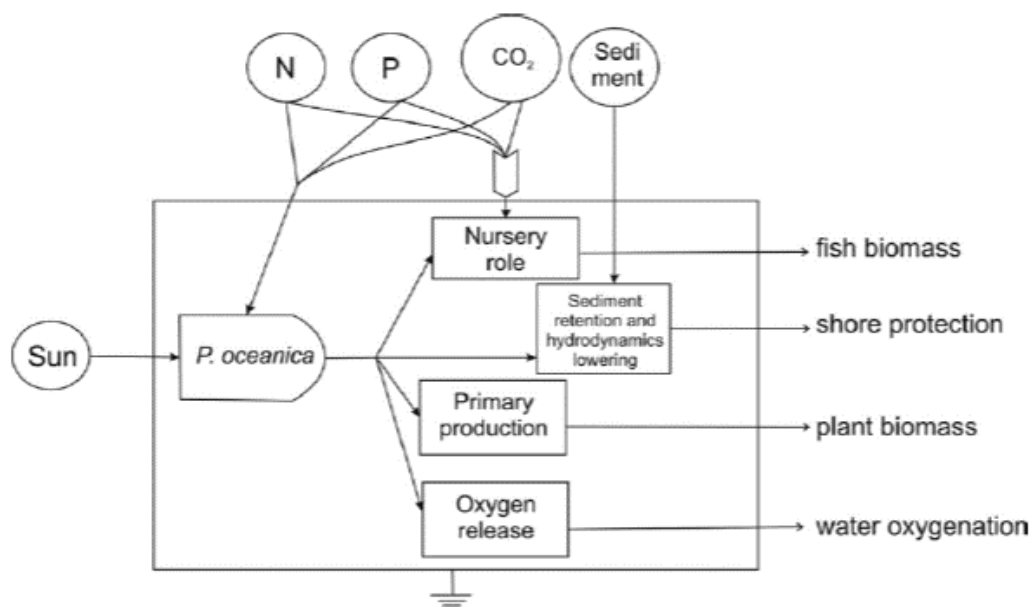


Figura 1 : Diagramma dei servizi ecosistemici della *P. oceanica* (Vassallo et al., 2013)

Il primo capitolo si compone di alcune carte che rappresentano le aree portuali interessate dalla problematica della *Posidonia* nei sedimenti.

Il secondo capitolo sviluppa il processo di degradazione, al fine di stabilire come e in quali forme i frammenti di *Posidonia* si ritrovano integrati nei sedimenti.

Il terzo capitolo è una sintesi bibliografica delle caratteristiche fisiche, chimiche, meccaniche e biologiche dei frammenti di *Posidonia* e dei loro rifiuti.

Il quarto capitolo propone un protocollo per la separazione delle fibre contenute nel sedimento, per facilitarne la valorizzazione.

I) CARTOGRAFIA

I.1) PRESENTAZIONE

La cartografia qui proposta rappresenta le aree portuali potenzialmente interessate dalla problematica dei frammenti di Posidonia nei sedimenti di dragaggio, evidenziando i porti e le marine in prossimità di praterie di P. oceanica lungo il litorale dell'area Marittimo.

La zona presa in esame si estende per 500 km da ovest a est, tra Tolone (Francia) e Grosseto (Italia), e 600 km da nord a sud tra Genova e Cagliari (Italia). Sono state elaborate 5 carte :

Cartographie	Secteur
Sediterra 1	Alpes-Maritimes - Var
Sediterra 2	Corse
Sediterra 3	Sardaigne
Sediterra 4	Ligurie
Sediterra 5	Une partie de la Toscane : Grosseto - Luca - Livorno - Massa Carrara - Pisa





I.2) SINTESI DEI RISULTATI

Il litorale del Mar Mediterraneo è ricco di opere artificiali come porti e altre architetture costiere (dighe, moli, frangiflutti, etc.). I litorali più interessati da questo fenomeno sono: quello delle Alpi-Marittime, con 1 porto o riparo ogni 3,1 km, la provincia di Genova, la Liguria e una parte della Sardegna (Boudouresque et al., 2006).

Le praterie di Posidonia occupano dal 20 al 50 % dei fondali compresi tra 0 e 50 m di profondità (Pasqualini et al., 1998), ovvero tra 30 000 e 40 000 km² e quindi tra l'1 e il 2 % dei fondali del Mar Mediterraneo. La porzione nord-occidentale del bacino del Mediterraneo è molto rappresentativa, con praterie notevoli sia per la loro superficie sia per il loro stato di conservazione.

La parte nord-orientale della Sardegna sembra essere il settore più rappresentativo in assoluto, con una fortissima densità di porti e marine in prossimità di praterie di Posidonia oceanica. Le altre regioni potenzialmente interessate dalla problematica sono: il litorale ligure tra Ventimiglia e Loano (ovest della Liguria, Italia), la regione di Livorno (Toscana, Italia), la regione di Tolone (Var, Francia).

II) POSIDONIA E SEDIMENTI

Il presente capitolo analizza i processi di degradazione, al fine di determinare in che modo e sotto quali forme i frammenti di Posidonia oceanica si ritrovano nei sedimenti.

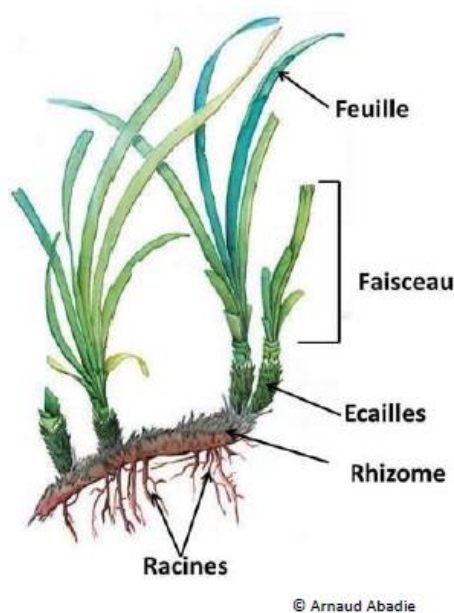




Figura 2 Praterie di *Posidonia oceanica* (fonte: INPN)

II.1) La *Posidonia oceanica*

Questa pianta da fiore marina endemica vive soltanto nel Mediterraneo tra 0 e 40-50 m di profondità. Si compone di fasci di foglie allungate attaccate a rizomi ortotropi (orizzontali) e plagiotropi (verticali), (Boudouresque et al., 2006). Le foglie crescono tutto l'anno e hanno un ciclo vitale che va dai 5 agli 8 mesi.

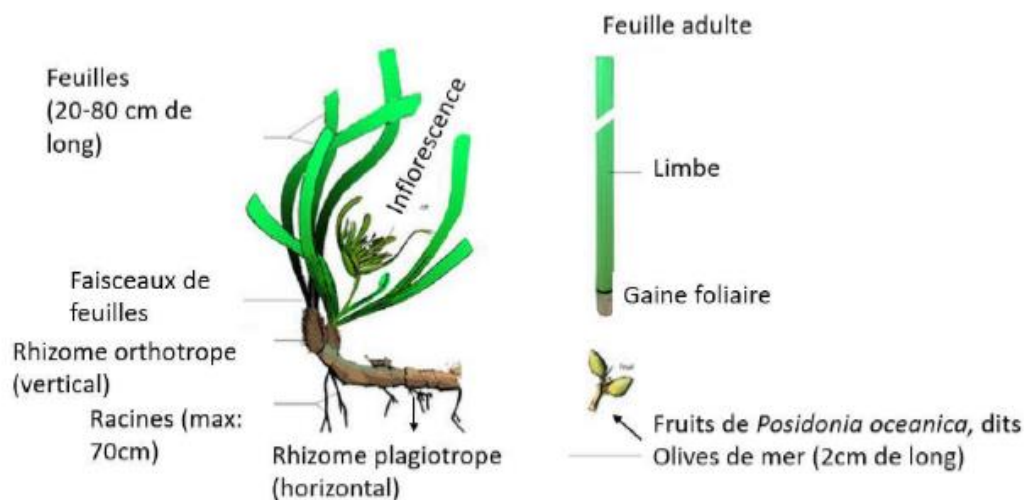


Figura 3 : Morfologia di *P. oceanica* (Boudouresque et al., 2006)

Ogni ciuffo di *Posidonia oceanica* è costituito da un numero compreso tra cinque e otto di foglie nastriformi, lunghe dai 40 agli 80 cm e larghe mediamente 10 mm (Figura 3). Quando le foglie muoiono, soltanto il lembo fogliare cade.

Il picciolo (detto anche guaina fogliare), scarsamente putrescibile, resta attaccato ai rizomi, dove può rimanere per secoli. Lungo tutto il rizoma, i piccioli presentano dei caratteristici cicli cronologici di variazione di spessore (lepidocronologia, in Pergent, 1990).

I rizomi e le radici si intrecciano e intrappolano i sedimenti, formando così una struttura denominata « matte ».

La fioritura è irregolare e dipende da fattori ambientali, ciononostante la *Posidonia oceanica* sembra riprodursi principalmente per via vegetativa, per frammentazione e per talea.

Questa specie riveste un ruolo fondamentale sul piano ecologico (produzione di materia vegetale, polo di diversità di specie, ossigenazione delle acque), sedimentario (trappola per sedimenti, rallentamento del moto ondoso, lotta contro l'erosione costiera) ed economico (zona riproduttiva e di nursery, attività balneari); essa rappresenta inoltre un potente indicatore della qualità delle acque (bioindicatore) e ha una funzione di grande importanza nella fissazione e nell'immagazzinamento del carbonio in ambiente costiero - «pozzo di assorbimento del carbonio» (Pergent et al., 1994 ; Duarte et al., 2005; Boudouresque et al., 2006).

2.1.1) Praterie

La *Posidonia oceanica* forma delle vaste praterie su qualunque tipo di substrato. Le condizioni idrodinamiche del sito, le correnti e la temperatura delle acque determinano la tipologia morfologica e strutturale degli erbari. Le praterie più comunemente incontrate nel Mediterraneo sono quelle di pianura. Si tratta di praterie piuttosto continue, orizzontali o in lieve pendenza, interrotte da strutture risultanti dall'erosione (cascate di « matte », intermattes erosive, intermattes dilaganti, correnti di ritorno) e da « matte morte » non erosive (intermattes strutturali). Si possono incontrare anche praterie «collinari», «tirate», «ondulate», a «forma di pan di zucchero», «a gradini», etc.

La dinamica delle praterie di *Posidonia oceanica* è fortemente influenzata da una serie di fattori abiotici (moto ondoso, morfologia sottomarina, luminosità, salinità, temperatura, sostanze nutritive) e biotici (competizione con altre macrofite, pascolo da parte delle specie erbivore, essenzialmente il pesce *Sarpa salpa* e il riccio di mare *Paracentrotus lividus*).

Grazie alla densità delle foglie di *Posidonia oceanica*, la prateria intrappola una gran quantità di sedimenti. I rizomi reagiscono con una crescita verticale che va da pochi millimetri a pochi centimetri l'anno, creando così la matte.

La figura seguente illustra il funzionamento della prateria, il modello concettuale è sviluppato all'interno del rettangolo nero :

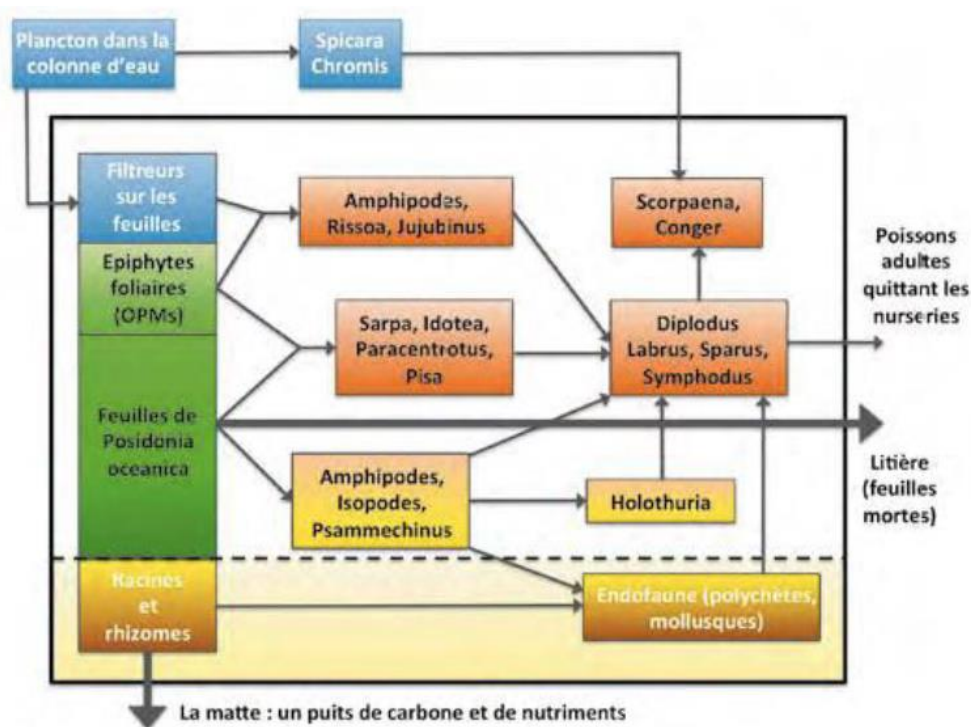


Figura 4 : Modello concettuale semplificato del funzionamento trofico dell'ecosistema di Posidonia oceanica, con le principali materie in ingresso e in uscita. La larghezza delle frecce è proporzionale alla loro importanza (secondo Boudouresque et al., 2006) fonte: IUCN

Alla matte è attribuito il ruolo di pozzo di assorbimento del carbonio, per via del consistente deposito di foglie morte e sedimenti. Questo deposito rappresenta una delle tre destinazioni identificate per il flusso di carbonio attraverso la prateria; le altre sono: l'esportazione della prateria sotto forma di foglia morta; la decomposizione del carbonio (quasi la metà) da parte dei detritivori a livello della lettiera della prateria (Pergent et al., 1994).

2.1.2) Foglie

Le foglie spuntano tutto l'anno e hanno un ciclo vitale che va dai 5 agli 8 mesi. Sono dette : «giovani» le foglie che misurano meno di 5 cm di lunghezza, «intermedie» quelle lunghe più di 5 cm e prive di picciolo; possono dirsi «adulte» quando, al termine del ciclo di crescita, compare il picciolo. Esse si intrecciano le une con le altre.

Le foglie sono larghe 8-11 mm e lunghe 20-80 cm (Boudouresque et al., 2006). Sono provviste di una base mediante la quale si attaccano al fusto, o rizoma, e di un lembo, dove avviene la fotosintesi. La caduta delle foglie, come la loro formazione, ha luogo durante tutto l'anno (Pergent e Pergent-Martini, 1991), ma aumenta in estate e in autunno.

Alla loro morte, le foglie non si staccano completamente dalla pianta, soltanto il lembo cade mentre la base resta attaccata al rizoma, si parla allora di "scaglia". I parametri delle scaglie (lunghezza, spessore, anatomia) variano ciclicamente durante l'anno. La lepidocronologia è l'analisi di questi cicli (Crouzet, 1981; Pergent et al., 1983; Pergent, 1990). Le scaglie e i rizomi sono scarsamente putrescibili e si conservano dunque per diversi secoli o addirittura millenni.

2.1.3) Fiori e frutti

I fiori di *P. oceanica* sono ermafroditi (con organi maschili e femminili allo stesso tempo) e fioriscono in autunno (settembre-novembre). La fioritura è irregolare e certe annate sono particolarmente favorevoli (2003), a seconda dell'aumento globale della temperatura dell'acqua e/o dell'attività solare. La fioritura non avviene a temperature molto basse, soprattutto nelle acque relativamente fredde della parte settentrionale del Mediterraneo occidentale.

Tra i 4 e i 10 fiori si raggruppano in un'infiorescenza in cima a un peduncolo di 10-30 cm di lunghezza. I fiori fecondati dal polline diventeranno dei frutti che somigliano a delle olive.



Figura 5 : Infiorescenza (a sinistra) e frutti (a destra) di Posidonia oceanica. Da Boudouresque e Meinesz (1982)

Lo sviluppo dei frutti ha una durata che va dai 6 ai 9 mesi; essi si staccano dalla pianta a partire da aprile-maggio, risalgono in superficie e galleggiano per qualche tempo. Poi, si aprono, l'unico seme al loro interno cade sul fondale per dare vita a una nuova piantina (primavera-estate) e il loro guscio continua a galleggiare in superficie.

Grandi quantità di frutti e i loro gusci possono spiaggiarsi, seguendo l'orientamento delle correnti.

2.1.4) Matte

I rizomi plagiotropi (orizzontali) hanno una velocità di accrescimento elevata (dell'ordine di 5 cm l'anno) e colonizzano dunque rapidamente gli spazi liberi. Quelli ortotropi (verticali) crescono a una velocità di 1 cm l'anno e lottano contro il seppellimento (Boudouresque et al., 2006).

L'insieme costituito da rizomi, scaglie, radici e sedimenti intrappolati negli interstizi prende il nome di « matte ». I rizomi, le scaglie e le radici sono scarsamente putrescibili e si conservano dunque all'interno della « matte » per diversi secoli o addirittura millenni (Boudouresque et Jeudy de Grissac, 1983).

Le foglie e i rizomi di *Posidonia oceanica* fungono da supporto a tutta una flora e una fauna, con alcuni organismi calcificati. Alla loro morte, i resti di questi organismi cadono, costituendo un sedimento autoctono (frammenti di corazze o di aculei di ricci marini, di conchiglie di molluschi, di Corallinaceae, etc.). Inoltre le foglie di *P. oceanica*, sono in grado di rallentare le correnti, per via della loro densità (fino a 5000 / m²) e della loro disposizione ; le particelle sedimentarie trasportate dall'acqua vedono così diminuire la loro energia cinetica e cadono dunque sul fondale (sedimento alloctono).

Quando le condizioni ambientali diventano sfavorevoli, la *Posidonia oceanica* muore e solo la matte rimane in loco. Questa « matte morta » funziona in superficie come un habitat semi duro o duro, sul quale proliferano diverse specie di alghe. Il substrato, formato da un intreccio di rizomi morti, sigillati da elementi di granulometria molto eterogenea, dalla ghiaia sottile fino alla fanghiglia, è particolarmente compatto e favorisce l'insediamento di una fauna relativamente specializzata.

2.1.5) Produzione primaria fogliare

La produzione primaria complessiva (lambi, base e rizomi) varia da 820,6 a 1426,4 grammi di materia secca per metro quadrato l'anno (Vela A., 2006) e potrebbe raggiungere più di 125 kg di biomassa secca per metro costiero a partire da una prateria di 1 km² (Cocozza et al., 2011).

Le foglie rappresentano la percentuale maggiore della produzione primaria totale, superando l'80% (Cebrian e Duarte, 2001). Tale produzione primaria fogliare è stata misurata tra 203 e 708 grammi di materia secca per metro quadrato l'anno (Pergent G, Pergent-Martini C., 1991). Nel giro di un anno, tutto il materiale fogliare prodotto si decompone o viene esportato ; l'esportazione annuale può essere stimata al 50% del materiale fogliare prodotto per l'insieme della prateria di Lacco Ameno (Romero et al. 1992). Sulla base di queste supposizioni si può ipotizzare un'esportazione di produzione fogliare tra i 100 e i 354 grammi l'anno di materia secca per metro quadrato di prateria.

Leoni et al. (2005) hanno stimato, per la prateria della baia di Calvi (che presenta una forte vitalità), uno stock potenziale di lettiera esportata destinata a spiaggiarsi pari a $2410,8 \pm 91,1$ tonnellate.

II.2) IL PROCESSO DI DEGRADAZIONE

I detriti di Posidonia che possono essere ritrovati nei sedimenti di dragaggio provengono direttamente dall'espulsione delle foglie morte nella colonna d'acqua, o dall'esportazione della lettiera (foglie morte, rizomi spezzati) o ancora dalla frammentazione o dalla decomposizione di questa lettiera da parte dei detritivori (sul sito di produzione o altrove).

2.2.1) Esportazione e trasporto

In autunno, l'aumento della massa di foglie morte (ritmo di caduta delle foglie, dimensioni delle foglie) si coniuga con le condizioni meteorologiche (rinforzo del moto ondoso, tempeste stagionali) per trasportare grandi quantità di questa materia vegetale morta verso le spiagge (Boudouresque et Meinesz, 1982 ; Pergent et al., 1997 ; Walker et al., 2001).

Le foglie morte si adagiano all'interno della prateria, dove si decompongono formando così una « lettiera ». Quest'ultima sarà presente all'interno della prateria, ma allo stesso tempo sarà esportata dalle onde in quantità massicce verso zone di accumulo prive di vegetazione, spesso zone sabbiose. Si parla allora di lettiera « esportata ».

I depositi di lettiera di Posidonia si accumulano in grandi quantità in autunno e in inverno, al momento della caduta delle foglie. Forti correnti smuovono i depositi e provocano lo spostamento delle foglie morte. Per l'insieme della lettiera, il tasso d'esportazione varia tra il 51 e il 68 % in aree esposte alle onde e alle correnti e dal 37 al 49 % in aree riparate (Pergent et al., 1997) e può riguardare fino al 99% della lettiera.

Una percentuale compresa tra il 40 % e l'80 % dei detriti di foglie di P. oceanica è spesso esportata al largo delle praterie dalle onde e dalle correnti e decomposta nei sistemi di ricezione (Romero et al., 1992 ; Pergent et al., 1994 ; Pergent et al., 1997).

Le variabili ambientali e il moto ondoso influiscono sulla dispersione a lunga distanza dei frammenti di praterie marine. Lo studio di Lai et al. (2019) ha rivelato che livelli di ombra elevati comportano tassi di decomposizione dei frammenti più rapidi e una maggior perdita della capacità di galleggiamento nel tempo. Grazie agli esperimenti sulle correnti, è stato possibile constatare che i venti possono contribuire al trasporto di frammenti di praterie marine. Inoltre, le onde di piccole dimensioni (con altezza inferiore e frequenza minore) comportano velocità di trasporto maggiori rispetto a quelle più grandi. I risultati di questo studio forniscono importanti parametri, ottenuti a livello sperimentale, che sono essenziali ai fini dell'elaborazione di modelli predittivi precisi della dispersione dei frammenti di praterie marine.

2.2.2) Degradazione della prateria

Harrison (1989) ha fornito una revisione della letteratura sui detriti delle praterie marine, riguardante in particolare *Zostera marina* e *Thalassia testudinum*. Questa rassegna permette di comprendere la natura chimica dei detriti delle praterie marine che coinvolgono e sono coinvolte in processi di decomposizione indotti da agenti abiotici (relativi all'ambiente) e biotici (relativi al mondo vivente).

La decomposizione della Posidonia in necromassa (insieme di detriti macrofiti) passa attraverso un processo fisico e biologico.

2.2.3) Necromassa

Romero et al. (1992) hanno studiato la necromassa, in particolare la lettiera delle foglie, associata al letto di Posidonia, composta principalmente da una frazione grossolana di foglie (> 0.8 cm): si tratta di frammenti del lembo a uno stadio di decomposizione più o meno avanzato, e, in misura minore, di lettiera fine (da 0.1 a 0.8 cm) che rappresenta solo il 10 % del peso totale: si tratta di materiali eterogenei con numerosi minuscoli detriti e fibre di foglie risultanti dalla decomposizione della base fogliare.

2.2.4) Degradazione fisica

I detriti vanno incontro ad alcuni processi fisici come la frammentazione delle particelle grossolane, la produzione di particelle a partire da molecole disciolte, la flocculazione e la sedimentazione.

La frammentazione da parte dei detritori fa aumentare il tasso di decomposizione nei detriti esportati, riducendo le dimensioni delle particelle, facendo aumentare le superfici disponibili per gli attacchi microbici e, talvolta, aggiungendo azoto amminico ai detriti.

Durante il periodo di lisciviazione le molecole organiche solubili e i minerali solubili vengono persi.

2.2.5) Degradazione biologica

La degradazione biologica passa attraverso diverse tappe tra cui la macinazione e la triturazione da parte di animali, la decomposizione microbica, la digestione nell'intestino degli animali e la successiva rimineralizzazione.

I ricci di mare e i crostacei triturano le foglie morte mentre i batteri e i funghi decompongono effettivamente la materia.

Il consumo da parte dei detritivori favorisce la decomposizione, fornendo superfici per la lisciviazione e l'ingresso dei microbi. La combinazione di ambienti aerobici e anaerobici permette la decomposizione della cellulosa e della lignina e l'espulsione delle sostanze nutritive insieme ai detriti.

Harrison (1989) rileva, nell'insieme della letteratura esaminata, l'importanza della composizione chimica della lettiera vegetale al fine di determinare la perdita di biomassa dovuta alla lisciviazione e alla decomposizione microbica, la rimineralizzazione dei componenti vegetali e l'accumulo di sostanze umiche.

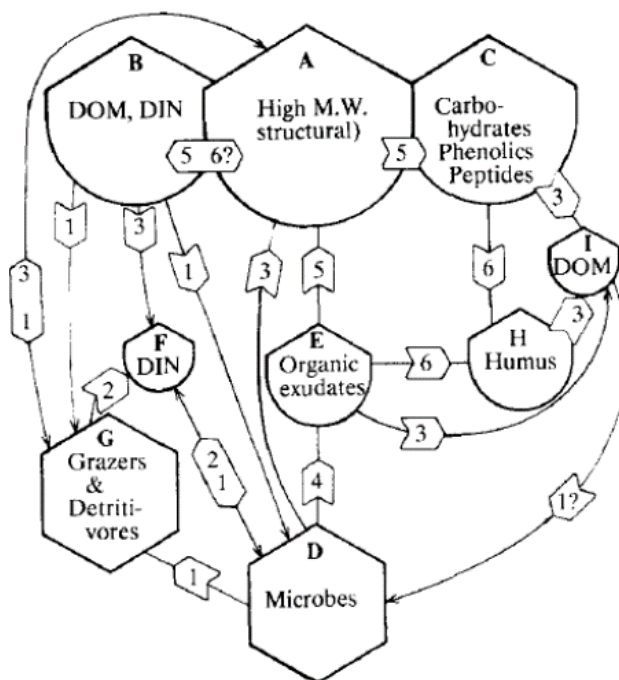


Figura 6 : Modello concettuale del processo fisico-chimico di degradazione della lettiera

La lettiera vegetale è costituita principalmente da composti strutturali di peso molecolare elevato (A nella figura n°6), come la cellulosa e la lignina. I batteri e i funghi (D) secernono alcuni enzimi extra-cellulari (E) nelle cellule vegetali. La depolimerizzazione enzimatica forma dei composti di peso molecolare inferiore.

Alcuni ioni inorganici (B) sono lisciviati dalla lettiera vegetale nella riserva di sostanze nutritive inorganiche disciolte (F) a disposizione degli organismi decompositori. La rimineralizzazione avviene direttamente attraverso i batteri (via 2 da D a F) oppure viene secreta dai detritivi (per esempio, protisti, invertebrati e vertebrati ; G nella figura n° 6) che si nutrono di batteri.

I detritivi e gli erbivori possono accelerare la decomposizione microbica frammentando grossi pezzi di piante e aumentando così la superficie disponibile per gli attacchi da parte degli enzimi microbici. L'assimilazione diretta dei composti vegetali nella lettiera da parte degli invertebrati o dei vertebrati può ugualmente contribuire alla perdita di biomassa (via 1 di A e da B a G). Gli essudati microbici possono contribuire al valore nutrizionale dei detriti ; i resti vegetali possono essere assimilati direttamente dai detritivi.

Se la produzione di composti aromatici conduce lentamente alla formazione di humus a partire dai detriti, una parte della lettiera vegetale non potrà mai essere decomposta o rimineralizzata.

Lo sviluppo di condizioni anaerobiche (generalmente per insabbiamento dei detriti nei sedimenti) favorisce la degradazione da parte dei batteri anaerobi in grado di decomporre la cellulosa.

2.2.6) Tasso di decomposizione

Romero et al. (1992) hanno elaborato una stima del tasso di decomposizione delle sostanze vegetali in base al tempo. La decomposizione della lettiera esportata è relativamente lenta.

- dopo 1 mese a 20 m di profondità è scomparso soltanto dall'11% al 35% della sua massa
- dopo 6 mesi, la percentuale di decomposizione raggiunge il 64% (a 5 m) e il 44% (a 20 m) a Ischia (Italia) (Pergent et al., 1994). Quella dei detritivi rappresenta la principale via di trasferimento della produzione primaria delle foglie di *P. oceanica* nell'ecosistema

Le foglie, i germogli e le parti sotto terra presentano la stessa velocità di decomposizione.

Nei detriti delle praterie marine subtidali, i funghi non sono presenti se non in scarse quantità e sono stati segnalati soltanto batteri anaerobi in grado di digerire la cellulosa, in sedimenti associati ai rizomi e alle radici di *Zostera marina*. I campioni di *H. decipiens* perdevano più rapidamente sostanze organiche quando erano sotterrati che quando si trovavano sulla superficie dei sedimenti. I germogli verdi di *Z. marina* si degradavano più rapidamente in condizioni anaerobiche in laboratorio, ma non è stata riscontrata alcuna differenza tra il tasso di decomposizione aerobica e anaerobica in uno studio parallelo dei frammenti di foglie detritiche. Le foglie morte, essiccate e macinate di *Z. marina* hanno perso delle sostanze organiche in percentuali simili in condizioni aerobiche e anaerobiche a 10 °C ; ma a 25 °C si è rilevato un tasso aerobico più elevato.

2.2.7 Fattori che determinano il tasso di decomposizione

La decomposizione è accelerata dalla frammentazione. Gli anfipodi giocano un ruolo importante nella riduzione delle dimensioni delle particelle dei frammenti di foglie di praterie marine, anche se gli animali utilizzano come nutrimento principale la popolazione microbica presente sulle foglie. La frammentazione comporta un aumento della superficie totale e dunque dell'attività metabolica da parte dei microbi.

La decomposizione delle praterie marine nella zona subtidale è in gran parte il risultato dell'attività dei batteri e non dei funghi. Alcuni funghi sono presenti sulla.

Posidonia oceanica (L.) Delile ma sono in gran parte dei "propaguli inattivi o micro colonie con un insediamento debole". I batteri hanno diverse capacità metaboliche, ma occorre molto tempo perché le specie in grado di digerire l'amido e la cellulosa raggiungano una quantità elevata. Kenworthy e Thayer (1984), che hanno trovato anche batteri filamentosi in abbondanza sui rizomi di *Z. marina* in decomposizione, considerano che le condizioni anaerobiche sono necessarie per la decomposizione della cellulosa. Il seppellimento in sedimenti anossici potrebbe favorire la decomposizione del principale componente della struttura nelle praterie marine, la cellulosa, ma se quest'ultima è protetta dalla lignina, i detriti seppelliti possono decomporsi molto lentamente.

I componenti dei detriti facilmente degradabili sono presenti in scarse quantità ; questi stessi componenti sono disponibili su supporti adeguati, ma non sono accessibili ai microbi per protezione fisica o chimica. La decomposizione può avvenire in habitat sfavorevoli a una rapida degradazione delle componenti strutturali dei detriti delle praterie marine.

Un altro fattore che limita la facilità di decomposizione da parte dei microbi nei detriti delle praterie marine può essere la natura fisica e chimica dell'epidermide e dei tessuti interni. Uno strato epidermico intatto è una barriera efficace contro l'attacco dei batteri ; se l'epidermide presenta danni o tagli, la superficie delle foglie e dei rizomi sarà facilmente invasa.

Nei fasci di fibre, e anche nella foglia di *P. australis*, la lignina è stata segnalata nella lamella mediana e quindi riveste e protegge la parete, ricca di cellulosa, contro gli attacchi dei batteri. Questa agisce come impermeabilizzante nelle pareti cellulari dell'epidermide, dell'ipoderma (gli strati immediatamente interni all'epidermide) e dei fasci di fibre corticali del rizoma.

Il tasso di decomposizione delle macrofite acquatiche, in generale, è positivamente correlato al contenuto di azoto. L'azoto può essere presente nei detriti sotto diverse forme : proteine vegetali (azoto amminico), proteine microbiche e prodotti di condensazione complessi di origine microbica e vegetale. Per *T. testudinum*, tutto l'azoto era presente nelle foglie verdi sotto forma di azoto amminico.

Inoltre, Lai et al. (2019) hanno studiato (al di fuori dell'area Marittimo) gli effetti dell'ombra sul tasso di decomposizione dei frammenti di due specie di praterie marine tropicali (*Halophila ovalis* e *Thalassia hemprichii*). Lo studio ha rivelato che livelli di ombra più elevati comportano un tasso più rapido di decomposizione dei frammenti.

Inoltre, le condizioni fisico-chimiche del sito di decomposizione possono essere importanti tanto quanto le condizioni biologiche.

2.2.8) Altri processi di degradazione

La *P. oceanica* non ama l'idrodinamismo troppo intenso, poiché durante le tempeste il moto ondoso e le correnti strappano interi fasci di foglie (Boudouresque Ramoge 2006).

Anche alcune attività umane sono responsabili della degradazione della prateria. In particolare l'uso di attrezzi da traino (draghe, reti, cavi) trascinati dalle barche di pescatori, che impigliandosi ai ciuffi di foglie staccano i rizomi. Le griglie delle reti possono strappare da 100 000 a 360 000 foglie l'ora.

Da notare anche l'impatto dell'ancoraggio delle barche, capace di strappare fino a 250 foglie alla volta, combinato con l'effetto della catena che raschia il fondale nel perimetro di evasione (con un settore d'influenza da 3 a 4 volte l'altezza dell'acqua). Questo fenomeno partecipa alla frammentazione della prateria, in particolare quando a essere ancorate sono le unità più grandi.

D'altra parte, anche l'acquacoltura perturba la fotosintesi della prateria per via dell'ombra creata e dei rifiuti di pesce gettati nell'acqua, che apportano un surplus di sostanze nutritive.

Infine, la cementificazione dei litorali contribuisce al degrado delle praterie per via della sua diretta influenza sull'erbario, dei cambiamenti indotti sull'idrodinamismo, dell'apporto di acque reflue (rigetto di sali nutrienti e d'acqua dolce), oppure a causa dell'aumento della torbidità e della conseguente perturbazione della fotosintesi, etc.

II.3) LIMITI

La necromassa è destinata a essere (i) intrappolata all'interno della matte, (ii) consumata da parte dei detritivi presenti nella prateria, (iii) esportata verso altri ecosistemi marini, dove costituisce una fonte per le catene alimentari, (iv) o verso le spiagge, dove forma delle banquettes, smorzando l'impatto delle onde e contribuendo all'ecosistema, e (v) infine a essere trasportata verso l'ecosistema terrestre delle dune. Queste cinque azioni possono trasformare la necromassa.

I processi di degradazione sono studiati in particolare all'interno della prateria e specialmente all'interno della matte ; esistono pochi dati riguardanti i sedimenti di dragaggio.

III) CARATTERISTICHE FISICHE, CHIMICHE, MECCANICHE E BIOLOGICHE

Raccolta bibliografica e sintesi delle caratteristiche fisiche, chimiche, meccaniche e biologiche della Posidonia e dei suoi residui.

La letteratura disponibile ha indagato principalmente le proprietà fisiche e chimiche della Posidonia e dei suoi residui, mentre quelle meccaniche sono poco documentate.

III.1) CARATTERISTICHE FISICHE

La Posidonia oceanica è una pianta da fiore ad accrescimento lento (1 cm l'anno) in grado di vivere, in condizioni favorevoli, per più di mille anni. Si compone, nella sua parte superiore, di fasci di foglie e, nella sua parte inferiore, di rizomi e di radici che si intrecciano tra di loro creando le matte.

La Posidonia oceanica è sensibile a determinati cambiamenti del suo ambiente, in particolare alla riduzione della salinità. Un idrodinamismo troppo forte è ugualmente dannoso.

Nel Mediterraneo, si osserva una generale regressione delle praterie.

Jeu de Grissac (1975), nella sua tesi di sedimentologia dinamica, afferma che parte delle foglie morte di Posidonia oceanica che si staccano dai rizomi durante l'autunno, vengono esportate verso delle aree di decantazione, come le zone sabbiose e delle intermatte. In seguito, le tempeste autunnali e invernali le trascinano verso altri ecosistemi bentici, dal piano infralitorale a quello batiale, oppure verso le spiagge.

Sulle spiagge le foglie morte, così come talvolta i rizomi, possono accumularsi localmente in quantità considerevoli, su uno spessore che può raggiungere 1 o 2 m. Questi accumuli di foglie morte sono chiamati "banquettes". Le banquettes sono costituite dunque da foglie e da rizomi di P. oceanica in diverso stato di frammentazione e di degradazione (fino allo stato di fibre), da sedimenti e da acqua. Questo insieme forma una struttura rigida ed elastica allo stesso tempo.

Il materiale vegetale è costituito essenzialmente da foglie, frammenti di foglie e fibre ; i rizomi sono presenti in quantità trascurabili. I resti vegetali che costituiscono le banquettes possono essere classificati in 3 categorie :

- Tipo 1 : resti poco evoluti, ancora verdi e che conservano ancora i due bordi della foglia. Rappresentano meno dell'1% delle banquettes.
- Tipo 2 : resti che presentano le stesse caratteristiche di quelli del tipo 1 ma sono di colore bruno. Rappresentano fino al 26% delle banquettes.
- Tipo 3 : resti in stato di degradazione avanzato, di colore bruno, che presentano al massimo un solo bordo della foglia. Rappresentano fino al 99% delle banquettes.

Hamdaoui et al. (2018) hanno studiato le proprietà di conduzione termica delle fibre provenienti dagli agglomerati di Posidonia. Questa indagine ha permesso di stabilire che le fibre di Posidonia oceanica hanno caratteristiche paragonabili a quelle dei materiali isolanti industriali e sono dunque idonee per l'isolamento termico.

L'utilizzo allo stato grezzo è ugualmente interessante. Potrebbe trattarsi di un materiale isolante ecologico promettente nel settore dell'edilizia, in virtù del suo carattere rinnovabile e della sua disponibilità.

Cocozza et al. (2011) hanno affermato che i residui di fibre di Posidonia oceanica presentano potenze calorifiche che sembrano avvicinarsi a quelle del legno, della paglia e della torba.

Khiari & Belgacem, 2017 hanno studiato la morfologia degli agglomerati e delle foglie di P. oceanica. I profili trasversali superficiali e longitudinali di queste materie prime, presentati nella figura 7, rivelano che la foglia (C e D) ha una struttura molto porosa rispetto a quella dell'agglomerato (A e B). In particolare, l'agglomerato è composto principalmente da fibre del diametro di $\sim 20 \mu\text{m}$ e di uno spessore parietale di circa $10 \mu\text{m}$, mentre la foglia si compone di molti elementi cellulari diversi. Le fibre di foglia hanno una parete cellulare di uno spessore compreso tra 2 e $5 \mu\text{m}$, a seconda della loro posizione all'interno della foglia, infatti le cellule esterne sono più spesse di quelle interne.

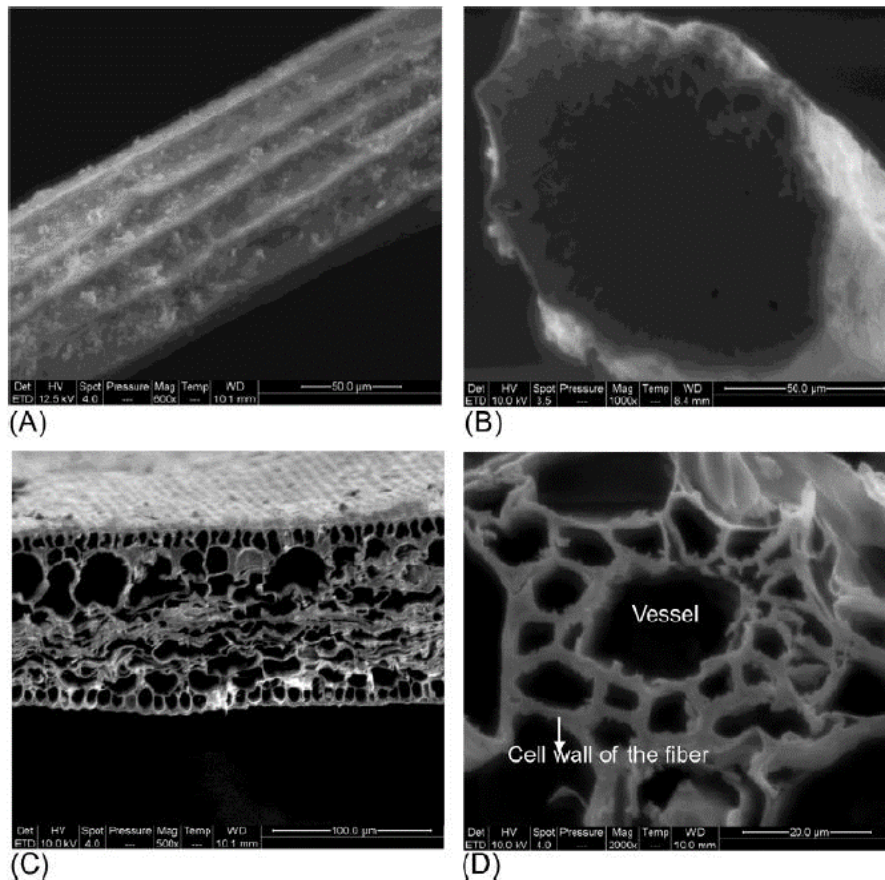


Figura 7 : Immagini al microscopio elettronico a scansione degli agglomerati (A, B) e delle foglie (C, D) di *P. oceanica*. Bettaieb F, Khiari R, Dufresne A, Mhenni MF, Putaux JL, Boufi S. Cellulosa nanofibrillare di *Posidonia oceanica* : proprietà e caratteristiche morfologiche. Ind Crops Prod 2015 ; 72:97–106, Elsevier 2016

Verhille et al. (2017) hanno preso in esame le egagropile, agglomerati di fibre vegetali di foglie di *Posidonia oceanica* decomposte. Al momento della creazione di questi agglomerati, le fibre staccate dalla pianta si raggruppano in mazzi sciolti e disordinati. Questi si compattano successivamente per effetto delle onde e delle correnti, che li fanno girare su se stessi e ricadere sul fondale marino. La struttura interna ha una densità crescente dal cuore verso la sua periferia.

Le deformazioni apportate all'agglomerato sono in parte irreversibili. L'effetto combinato dell'elasticità e dell'attrito delle fibre permette in effetti alle sfere di mantenere la loro coesione nonostante l'assenza di pareti che le mantengano compresse. La compressione della struttura e delle proprietà meccaniche di questi agglomerati naturali di fibre apre la strada ad alcune prospettive per la concezione di materiali al contempo leggeri e resistenti.

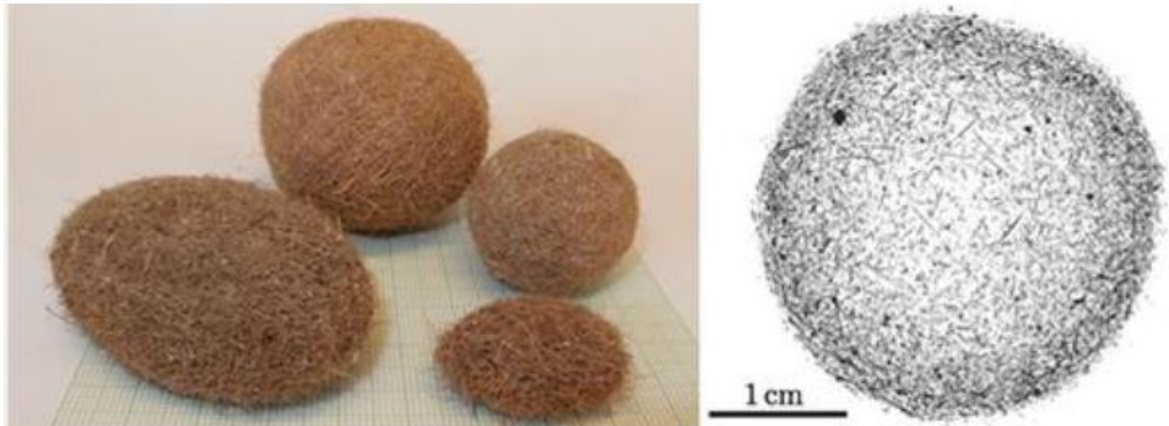


Figura 8 : A sinistra : egagropile su carta millimetrata. A destra : sezione equatoriale di un'egagropila che ne mostra la struttura interna: il cuore, poco compatto, è circondato da una crosta più fitta (Sébastien Moulinet)

III.2) CARATTERISTICHE CHIMICHE

La produzione primaria di *P. oceanica* è molto ricca di cellulosa e di lignina, poco fruibili per gli erbivori, e di composti fenolici, che hanno il compito, tra i tanti, di dissuadere i potenziali consumatori.

Romero et al. (1992) hanno rilevato la composizione chimica dei detriti di *Posidonia* nel corso del processo di disintegrazione tenendo conto della lettiera fogliare, dei rizomi e delle radici morte, così come dei depositi minerali (C, N, P).

Nel caso delle foglie, il contenuto di carbonio (C) diminuisce nettamente con il tempo, quello di azoto (N) e fosforo (P) diminuisce a 20 m di profondità e resta relativamente costante a 5 m.

	C	N	P
young leaves	33.8	1.49	0.127
old leaves	30.6	1.32	0.089
litter (coarse)	29.9	0.42	0.039
litter (fine)	36.6	0.45	0.031
living rhizome	35.7	0.59	0.034
dead rhizome	34.1	0.35	0.022
living roots	38.4	0.45	0.017
dead roots	36.6	0.44	0.018

Figura 9 : Livelli di carbonio, azoto e fosforo contenuti nelle diverse parti della pianta

La tabella qui sotto riepiloga i risultati dell'esperimento effettuato nella stazione a 20 m di profondità.

		dry weight	C	N	P
living	leaves	384	123.6	5.4	0.41
	rhizomes	1223	393.8	7.2	0.42
	roots	140	53.8	0.6	0.02
total living		1747	571.2	13.2	0.85
dead	leaves	136	40.7	0.6	0.05
	rhizomes	2947	1004.9	10.3	0.65
	roots	945	345.9	4.2	0.17
	fine	698	255.5	3.1	0.22
total dead		4726	1646.9	18.2	1.09
TOTAL		6473	2218.1	31.4	1.94

Figura 10 : Deposito di biomassa e di minerali nelle diverse parti della pianta. Peso a secco in g di materia secca per m². C, N e P espressi in g di elemento per m².

I risultati dello studio mostrano che l'ecosistema di Posidonia oceanica agisce come un pozzo per i diversi elementi biogeni.

Nel giro di un anno, tutto il materiale fogliare prodotto è decomposto o esportato. Per l'insieme della prateria di Lacco Ameno, l'esportazione annuale può essere stimata al 50% del materiale fogliare.

Harrison (1989) nella sua revisione della letteratura sulla degradazione delle praterie marine precisa che i detriti di queste ultime attraversano un primo periodo di lisciviazione, lasciando un substrato non adatto per i batteri, poiché quel che resta della materia solubile è povero di sostanze nutritive inorganiche, contiene composti fenolici inibitori ed è protetto dalla cellulosa e dalla lignina. Durante la decomposizione l'azoto e altri elementi sono liberati progressivamente.

Poiché i funghi sembrano non rivestire alcun ruolo nella decomposizione delle praterie marine, lo sviluppo di condizioni anaerobiche (generalmente per seppellimento dei detriti nei sedimenti) favorisce la degradazione da parte dei batteri anaerobici in grado di digerire la cellulosa. La frammentazione da parte dei detritivi aumenta anche il tasso di decomposizione nei detriti esportati, riducendo le dimensioni delle particelle, facendo aumentare le superfici disponibili per gli attacchi microbici e, talvolta, aggiungendo dell'azoto amminico ai detriti. Certi animali possono assimilare il contenuto cellulare delle foglie di praterie marine, mentre altri effettuano la cellulolisi nel loro intestino e sono degli assimilatori efficaci dei glucidi strutturali delle praterie marine.

Augier e Santimone (1979) hanno studiato il contenuto di ceneri, carbonio, idrogeno, azoto, proteine e aminoacidi della Posidonia prelevata a diverse profondità. Le concentrazioni di azoto totale, azoto proteico e proteine crescono progressivamente dalle radici, ai rizomi, fino alle foglie, che presentano contenuti tre volte superiori rispetto a quelli degli altri organi.

Per quanto riguarda gli aminoacidi liberi, 6 sono stati identificati e dosati nei rizomi, 11 nelle radici e 13 nelle foglie. I rizomi si distinguono per i contenuti relativamente elevati di arginina ; le foglie e le radici per le quantità importanti di acido glutammico e di acido aspartico. I tre organi hanno in comune, invece, quantità relativamente elevate di alanina.

Il contenuto di carbonio totale più elevato è stato riscontrato nelle radici (38.64 %), poi nelle foglie (33.85 %) e infine nei rizomi (30.10 %). Inoltre, le concentrazioni sono maggiori nelle foglie raccolte a 20 m (33.85%) che in quelle prelevate a 10 m e a 30 m (rispettivamente 32.67 % e 31.45%).

Secondo Harrison (1989) le praterie marine presentano dei cicli di crescita stagionali nel corso dei quali la composizione chimica varia. Dalle differenze iniziali nella composizione delle foglie di Zostera marina L. (contenuto di azoto, contenuto totale di sostanze organiche o di sostanze organiche solubili o ancora differenze nell'epibionte), potrebbero risultare, dunque, variazioni nel tasso di decomposizione di foglie di età diverse (giovani, adulte, morte).

Agostini et al. (1998) hanno identificato e quantificato i composti fenolici in diversi tessuti fogliari di P. oceanica. Nel complesso, sono stati identificati e analizzati dal punto di vista quantitativo 23 composti. Il livello dei composti trovati varia a seconda (i) del tessuto esaminato, concentrazioni più elevate sono state osservate nelle foglie giovani in crescita (foglie intermedie), e delle condizioni ambientali (fattori abiotici e condizioni di «stress»).

La composizione chimica delle fibre e delle foglie è stata compilata da Allègue et al. (2011). Le sostanze contenute in questi materiali sono grassi e cera, pectina, emicellulose e lignina. Le fibre hanno un contenuto di lignina elevato. Le foglie contengono una percentuale di olocellulosa inferiore a quello delle fibre, ma una percentuale maggiore di lignina e di pectina.

Contenuto %	Fibre grezze	Fibre bollite	Contenuto %	Foglie grezze	Foglie bollite
Cellulosa	48,39	48,11	Cellulosa	41,3	42,7
Emicellulosa	18,91	20,79	Emicellulosa	19,83	20,78
Olocellulosa	67,3	68,9	Olocellulosa	61,13	63,48
Lignina	23,12	22,71	Lignina	29,57	28,63
Pectina	4,78	8,69	Pectina	5,6	7,19
Grassi e cera	4,8	0	Grassi e cera	3,7	0,7

Figura 11 : Composizione chimica delle fibre (a sinistra) e delle foglie (a destra) di Posidonia oceanica

Secondo Khiari e Belgacem (2017), la principale differenza risiede nel contenuto di ceneri, che è superiore nella foglia (12 %), che nell'egagropila (10 %). Anche la quantità di olocellulosa proveniente dall'egagropila (61%) è nettamente superiore a quella della foglia (47 %), ma entrambe hanno contenuti di lignina simili. Infine, è necessario sottolineare anche che l'egagropila contiene una quantità superiore di cellulosa rispetto alla foglia.

I composti chimici sono stati confrontati con quelli di numerose biomasse contenenti cellulosa, tratti dalla letteratura, come il legno duro, il legno resinoso, i residui agricoli, varie altre fonti non legnose e le piante annuali. Da questo è emerso che nell'acqua fredda e calda, la quantità di estrazioni associate alle due forme di *P. oceanica* è superiore rispetto a quella riscontrata nel legno duro e nel legno resinoso, ma paragonabile alle quantità solitamente riscontrate nelle fonti non legnose.

La composizione chimica della Posidonia è stata paragonata a quella delle fibre di materiali derivati e non derivati del legno. I risultati discussi da Khiari e Belgacem (2017) mostrano che la Posidonia oceanica è uno dei materiali contenenti lignina e cellulosa più interessanti.

Kaal et al. (2018) descrivono la composizione molecolare di diversi organi di *P. oceanica*. La lignina di *P. oceanica* ha una straordinaria abbondanza di acido p-idrossibenzoico. L'abbondanza della lignina e la composizione molecolare di *P. oceanica* può influire sulla capacità di immagazzinare il carbonio organico, grazie al miglioramento della resistenza chimica delle pareti cellulari.

De Sanctis et al., (2019) hanno studiato la composizione chimica delle foglie di *P. oceanica*, ottenendo dei valori medi pari al 33.6 % (± 6.6) di lignina e al 23.5 % (± 6.7) di cellulosa. Questo studio è stato sostenuto dal progetto BIOPS (Trattamento e riutilizzo di Posidonia oceanica), finanziato dalla regione Puglia (Italia).

Nella rassegna di Harrison (1989) alcuni campioni terrestri di *Z. marina* rivelano una tendenza alla riduzione progressiva del contenuto di azoto man mano che le foglie invecchiano e muoiono, con alcuni piccoli aumenti successivi sotto forma di frammenti detritici.

Contrariamente ad altre piante vascolari, i detriti delle praterie marine non presentano accumuli netti di azoto durante la loro decomposizione e possono dunque fornire soltanto una piccola quantità di questa sostanza nutritiva essenziale. Riguardo al contributo della decomposizione delle praterie marine alla liberazione delle sostanze nutritive, si ipotizza che la decomposizione di una coltivazione di foglie liberi il 46 % (per *P. australis*) delle sostanze nutritive necessarie per la crescita di nuove foglie. Anche le condizioni fisico-chimiche presenti sul sito di decomposizione possono essere importanti tanto quanto quelle biologiche.

Per quanto riguarda le banquettes, queste sono essenzialmente costituite da fibre e carboidrati. Sono povere di lipidi e di proteine e presentano dunque una scarsa qualità nutrizionale rispetto alle foglie viventi di Posidonia oceanica (Chessa et al., 2000).

III.3) CARATTERISTICHE MECCANICHE

Allègue et al. (2012) hanno studiato le proprietà meccaniche dei materiali compositi rinforzati con fibre di Posidonia provenienti dalle egagropile, sviluppando lo studio del modulo di Young nell'ambito dei materiali compositi. Si tratta del modulo di elasticità (o di trazione), ovvero la costante che collega la tensione della trazione (o di compressione) e l'inizio della deformazione di un materiale elastico isotropo. La resistenza meccanica del materiale è caratterizzata dal suo limite di elasticità e/o dalla sua resistenza alla trazione.

Considerando le proprietà meccaniche, la percentuale di fibre ottimale per rinforzare un composito è pari al 5%. Il modulo in flessione del composito continua ad aumentare, facendo salire, a sua volta, la percentuale di rinforzo. La tensione e il modulo in flessione migliorano con l'aumento della velocità di sollecitazione e la percentuale di rinforzo.

Il trasferimento del carico tra la matrice e le fibre in un composito non è determinata soltanto dalle proprietà intrinseche della fibra e della matrice, ma è influenzata anche dai parametri geometrici e dalla disposizione delle fibre all'interno della matrice.

III.4) CARATTERISTICHE BIOLOGICHE

Le magnoliofite marine dispongono di un sistema fogliare sviluppato in verticale, supportato da steli o rizomi, e di un sistema di radici. Sono capaci di vivere anche completamente sommerse, sono munite di un sistema efficace che permette di fissare i sedimenti, si sono adattate alla vita in ambiente salino e dispongono tutte di un sistema di impollinazione idrofila (Vela et al. 2006). La Posidonia contiene composti tossici e repulsivi, destinati a frenare la sua consumazione da parte degli erbivori, limitando la sua commestibilità ad alcuni pesci e ricci di mare. Una volta cadute le foglie, i composti tossici fuoriescono dalle cellule morte e si dissolvono nell'acqua (e non sono dunque più presenti nelle foglie).

Le sostanze nutritive sono a loro volta in gran parte dissolte nell'acqua, se non sono state rimobilizzate in precedenza dalla Posidonia. Gli accumuli di foglie morte di Posidonia, non più tossici, ma ampiamente sprovvisti di sostanze nutritive, restano comunque ambiti da molti microrganismi detritivi : funghi, batteri e altre microalghe si applicano immediatamente a degradarli mentre approfittano dei pochi nutrienti ancora disponibili. Questi microrganismi sono quindi, a loro volta, consumati da tutta una serie di invertebrati. Questi ultimi traggono comunque benefici diretti delle foglie morte di Posidonia, senza aver bisogno di digerirle, poiché già consumate dai microrganismi. La lettiera di Posidonia costituisce dunque un « compartimento detritico » ben più importante di quanto non sembri, e non soltanto un habitat. Ci è anche concesso di ipotizzare che sia proprio grazie alla materia organica e ai detritivi che la consumano, che il materiale organico fogliare prodotto dalla Posidonia si trasmette all'insieme delle catene alimentari costiere del Mediterraneo (François Remy).

3.4.1) Ecologia

La Posidonia oceanica è una pianta marina (magnoliofita) endemica del Mediterraneo. Si sviluppa tra la superficie e 30-40 m di profondità. Tollera variazioni di temperatura e di idrodinamismo importanti, ma non ama la perdita di salinità dell'acqua. Forma vaste distese sottomarine, comunemente chiamate praterie.

La luce rappresenta uno dei fattori più importanti per la ripartizione della densità di P. oceanica (Elkalay et al., 2003).

P. oceanica deperisce immediatamente al di sotto del 33‰ di salinità e sembra resistere meglio alle salinità elevate, anche se il suo limite massimo è di 41 ‰ (Ben Alaya, 1972).

È possibile che le temperature basse (inferiori a 10 °C) e alte (superiori a 28 °C) siano sopportate solo in casi eccezionali.

Mayot et al. (2005) suggeriscono che l'aumento della temperatura dell'acqua del mare attualmente osservata (Salat et Pascual, 2002) potrebbe avere un effetto negativo sulla P. oceanica.

L'idrodinamismo troppo intenso è dannoso per la prateria e può strapparne interi fasci durante le tempeste.

3.4.2) Funzionamento dell'ecosistema

Una caratteristica fondamentale dell'ecosistema di Posidonia oceanica è costituito dalla sovrapposizione di 2 tipi di produzione primaria. A livello mondiale, soltanto gli ecosistemi delle magnoliofite marine presentano questa particolarità (Boudouresque, 1996).

(i) La produzione primaria derivata dalla P. oceanica è ricca di cellulosa e lignina, poco fruibili da parte degli erbivori, e di composti fenolici. In media, la produzione primaria netta di P. oceanica è pari a 420 g di materia secca per metro quadrato l'anno. Localmente, nella letteratura sono stati citati valori superiori, che raggiungono 1300 g di materia secca per metro quadrato l'anno ; la produzione primaria diminuisce in base alla profondità (Pergent et al., 1997).

(ii) La produzione primaria derivata dagli epifiti delle foglie è costituita da Cromobionti e Rodobionti, facilmente utilizzabili dagli erbivori ; essa è compresa tra 100 e 500 g di materia secca per metro quadrato l'anno (Mazzella et Ott, 1984). Nel complesso le praterie di P. oceanica rappresentano uno degli ecosistemi più produttivi del pianeta.

Boudouresque et al. (2006) affermano che la biomassa vegetale originata dalle praterie di Posidonia oceanica è molto elevata e paragonabile a quella delle mangrovie. Inoltre, lo stoccaggio nella matre è effettivo per un periodo di tempo molto lungo. Anche la biomassa animale è molto elevata, sebbene in misura minore rispetto a quella vegetale.

3.4.3) Riproduzione

La fioritura di *P. oceanica* avviene in autunno (settembre-novembre), al momento della riproduzione sessuata quando questa ha luogo. I fiori sono ermafroditi, ovvero possiedono allo stesso tempo organi maschili e femminili ; tra i 4 e i 10 fiori si raggruppano in un'infiorescenza sulla sommità di un peduncolo di 10-30 cm di lunghezza. La fioritura non ha luogo tutti gli anni, soprattutto nelle acque relativamente fredde della zona Marittimo (Mediterraneo Occidentale del Nord). I frutti contengono un solo seme (Hartog, 1970 ; Boudouresque e Meinesz, 1982).

La riproduzione di *P. oceanica* sembra avvenire essenzialmente in maniera asessuata, per talea (Molinier et Picard, 1952), e mediante pseudo viviparità : delle plantule si formano direttamente sulle infiorescenze e sostituiscono gli organi della riproduzione sessuata. Questa strategia contribuisce a breve distanza. Per il momento, non è dato sapere se si tratta di una modalità di riproduzione locale, o se interessa anche altre regioni del Mediterraneo. [Si distinguono due tipi di viviparità : (i) la viviparità in senso stretto nella quale i semi risultanti da una riproduzione sessuata germinano sull'infiorescenza prima di staccarsi dalla pianta e (ii) la pseudo-viviparità, quando i propaguli (bulbilli, plantule) sostituiscono gli organi della riproduzione sessuata sull'infiorescenza. Come le talee, queste plantule danno dunque vita a dei cloni della pianta madre.]

La scarsa variabilità genetica di *P. oceanica* potrebbe costituire un fattore penalizzante per questa specie (Raniello et Procaccini, 2002). Capiomont et al. (1996) hanno infatti messo in evidenza che il polimorfismo enzimatico tra le popolazioni del Mediterraneo Occidentale (Italia, Francia continentale, Corsica e Algeria) è molto ridotto, in particolar modo a Port-Cros (Var, Francia) e nella regione di Nizza (Alpi Marittime, Francia). La rarità della fioritura e soprattutto della produzione di semi, così come l'autoimpollinazione, e contrariamente l'importanza della riproduzione asessuata (per talea) potrebbe spiegare questa scarsa diversità.

IV) SEPARAZIONE DELLE FIBRE

Riflessione e proposta di un protocollo per la separazione delle fibre contenute nel sedimento al fine di facilitarne la valorizzazione (recuperare un sedimento privo di fibre).

IV.1) PROTOCOLLO SPERIMENTALE

Il principio è quello di proporre una sperimentazione compatibile con diverse modalità di dragaggio, cercando di ottenere una soluzione per la separazione delle fibre che richieda poco materiale, poca energia e un numero ridotto di operazioni in vista del recupero dei sedimenti.

4.1.1) Rimessa in sospensione con iniezione d'aria

L'iniezione d'aria mira a rimettere in sospensione i sedimenti dragati all'interno di una vasca per distruggere la coesione tra di essi. Le foglie e i detriti più leggeri resteranno in sospensione più a lungo dei sedimenti.

Questa tecnica può servirsi dei sistemi di aerazione sul fondo della vasca, come quelli dei bacini d'aerazione utilizzati nel processo di trattamento delle acque reflue. L'immissione d'aria può anche essere effettuata tramite l'immersione di una pompa di dragaggio di bassa potenza.

L'estrazione dei fanghi di dragaggio verrà effettuata tramite una valvola sul fondo della vasca. Le foglie e le fibre di Posidonia in sospensione potrebbero essere recuperate in superficie o nella parte alta della colonna d'acqua per esempio, per sfioramento.

4.1.2) Rimessa in sospensione con iniezione d'acqua

L'immissione d'acqua attraverso una pompa permetterebbe di distruggere la coesione tra i sedimenti. Inoltre, l'impiego di acqua salata o ipersalinica (aggiunta di sale) migliorerebbe il galleggiamento di fibre e foglie.

La soluzione ipersalina si ottiene sciogliendo una grande quantità di sale nell'acqua. La quantità di sale da aggiungere deve essere variata, affinché i residui di Posidonia e altre fibre vegetali restino in superficie (De Sanctis et al., 2019), in questo caso da 175 a 285 g di biomassa umida in 1 L d'acqua di rubinetto.

L'estrazione dei sedimenti di dragaggio verrà effettuata tramite una valvola sul fondo della vasca. Le foglie e le fibre di Posidonia in sospensione potrebbero essere recuperate in superficie o nella parte alta della colonna d'acqua per sfioramento.

Si rileva tuttavia che i sedimenti come limo e argilla si depositano lentamente nella colonna d'acqua ; la messa in sospensione attraverso l'immissione d'aria o acqua sarebbe dunque meno adatta a questa categoria di sedimenti.

4.1.3) Setacciatura dei materiali secchi

Il passaggio della frazione sedimentaria al setaccio, e il risciacquo con l'acqua di mare permetterebbe di trattenere la frazione grossolana dei detriti (foglie, fasci di foglie, rizomi, etc.). Questo metodo richiede la disidratazione dei sedimenti di dragaggio e potrebbe essere adeguata in caso di stoccaggio temporaneo a terra. I materiali saranno versati su una griglia munita di un sistema di vibrazione e collocata sopra una vasca. I sedimenti andranno nella vasca e foglie e fibre saranno recuperate in superficie. L'agitazione è utilizzata su una scala più ridotta da De Sanctis et al. (2019) per concentrare i sedimenti sul fondo di un sacco. Tuttavia questa tecnica richiede tempo e rischia di non essere conveniente.

Più la maglia è stretta più la setacciatura sarà efficace. A partire da una maglia di 2 mm si possono trattenere le foglie e la frazione fine (< 2 mm) si compone principalmente di sedimenti sabbiosi e di una piccola parte di fibre di Posidonia (Parente et al. 2013).

- Il sedimento esaminato nella rada di Hyère da Jeudy de Grissac (1975) è il risultato di due componenti la produzione biogena, autoctona o alloctona, più importante per il detritico costiero che per le praterie di Posidonia
- la produzione terrigena, legata agli apporti fluviali e all'erosione del litorale.

È il supporto di 3 grandi insiemi dei fondali marini : il prisma litorale, la prateria di Posidonia e il detritico costiero.

La frazione di sedimenti corrispondente può essere suddivisa in 4 parti :

- sabbia grossolana: superiore a 2 mm
- sabbia media: da 2 mm a 0.5 mm
- sabbia fine: da 0.5 mm a 0.063 mm
- peliti: inferiori a 0.063 mm

I setacci utilizzati da Gobert (2002) hanno maglie da 2 ; 1 ; 0.5 ; 0.25 ; 0.125 e 0.063 mm. La granulometria presentata nella figura 12 qui sotto illustra la ripartizione del peso secco del campione di partenza tra i sedimenti e i detriti della prateria in percentuale.

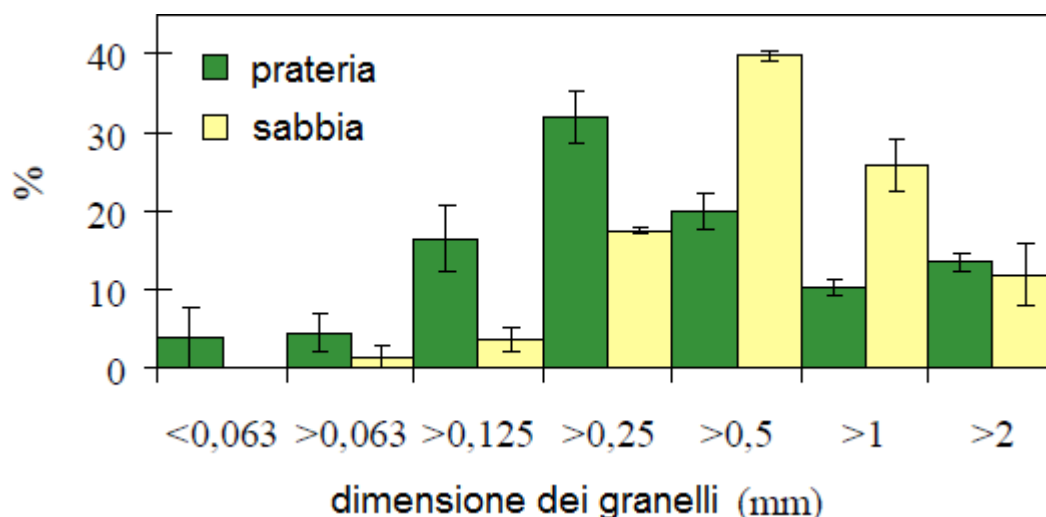


Figura 12 : Distribuzione delle diverse frazioni granulometriche (% del peso a secco del campione di partenza) del sedimento prelevato nella zona dei 10 m nella prateria e nella macchia di sabbia adiacente alla Baia di La Revellata (n=27) (Gobert, 2002)

La frazione granulometrica dominante a livello del sedimento nella prateria è quella che contiene i granelli compresi tra 0.25 e 0.50 mm.

4.1.4) Analisi

L'analisi della materia secca, più precisamente l'analisi delle ceneri in seguito all'incenerimento di un campione rappresentativo, permetterebbe di conoscere la proporzione della parte minerale e di quella organica.

Parente et al. (2013) separano completamente la frazione organica del sedimento con un trattamento della frazione di dimensioni minori a base di H₂O₂ 130 vol. a una temperatura di 40 °C (ANPA, 2001). Al termine del processo di ossidazione (indicato dalla fine dell'effervescenza), i residui sono stati lavati più volte in acqua corrente, essiccati nuovamente nel forno e infine pesati.

4.1.5) Altre procedure

I processi regolarmente utilizzati su campioni di Posidonia oceanica per separarli dai sedimenti, hanno come obiettivo opposto quello di recuperare le foglie e le fibre prive di sedimenti.

Parente et al. (2013) utilizzano un prototipo di « setaccio rotante » per separare le fibre di Posidonia dalla sabbia. Questo è costituito da una vasca munita di un dispositivo di agitazione e di un setaccio cilindrico mobile con fori da 2 mm. Il principio di funzionamento del prototipo di separazione della sabbia consiste nel lavare i residui con l'acqua di mare e nel setacciarli successivamente. L'operazione si svolge in due fasi : prima i residui sono collocati all'interno della vasca contenete dell'acqua dove ha luogo il lavaggio, per mezzo di un braccio mobile. Poi i residui vengono passati al setaccio, all'interno del cilindro rotante che completa la separazione.

Dopo la setacciatura, la frazione grossolana e quella fine (rispettivamente > 2 mm, composta da foglie, e < 2 mm, composta principalmente da sedimenti sabbiosi e di una piccola parte di fibre di Posidonia) sono state essiccate a 105°C.

Per separare completamente la frazione organica del sedimento, la frazione più fine è stata trattata con H₂O₂ 130 vol. a una temperatura di 40 °C (ANPA, 2001). Al termine dell'operazione di ossidazione (indicato dalla fine dell'effervescenza), i residui sono stati lavati diverse volte con l'acqua corrente, essiccati di nuovo nel forno e infine pesati.

La maggior parte delle fibre di Posidonia vengono recuperate manualmente sulla spiaggia e poi cardate a mano per eliminare i sedimenti.

4.1.6) Operazione di dragaggio

A seconda del tipo di dragaggio utilizzato (meccanico o idraulico) l'applicazione di un utensile direttamente sullo strumento di dragaggio, come una griglia nella benna o un filtro (geotessile a maglia larga) nel bacino di raccolta dei sedimenti, potrebbe consentire una prima filtrazione grossolana per separare la frazione sedimentaria dai macrodetriti.

IV.2) NORMATIVA

Lungo le coste del Mediterraneo la Posidonia oceanica è protetta da normative articolate su diversi livelli. Nell'area Marittimo, la specie è tutelata dalle direttive europee e dalle relative trascrizioni nel diritto nazionale dei vari Paesi, ma anche da altre misure di protezione locale.

4.2.1) Normativa internazionale

La Posidonia oceanica è protetta dalla convenzione di Barcellona, firmata nel 1976 sotto l'egida del programma ambientale delle Nazioni Unite. Il « protocollo relativo alle zone specialmente protette e alla biodiversità del Mediterraneo » della « Convenzione per la protezione del Mar Mediterraneo dall'inquinamento » contiene due elenchi di 126 specie marine « minacciate o in pericolo ».

La convenzione di Berna, firmata nel 1979 (modificata nel 2002 e firmata nuovamente nel 2008) riguarda la tutela della vita selvatica e dell'ambiente naturale in Europa. Tre allegati elencano le specie « protette » o « specialmente protette ».

La convenzione di Washington, firmata nel 1975, riguarda invece il commercio internazionale delle specie di flora e fauna selvatiche in via d'estinzione (CITES). Essa vieta il commercio delle specie in via d'estinzione, regola quello delle specie potenzialmente in pericolo e di quelle aventi uno statuto speciale attribuito da uno Stato in cooperazione internazionale.

Inoltre, l'IUCN (Unione Mondiale per la Conservazione della Natura) tiene dal 1964 una « Lista Rossa » delle specie da preservare in funzione di criteri pertinenti di rarità e di evoluzione nel tempo della loro popolazione.

4.2.2) Normativa europea

A partire dagli anni Novanta, l'habitat « prateria di Posidonia oceanica » è protetto dalla direttiva « Habitat, flora e fauna » (chiamata Rete Natura 2000) la quale consente a ciascuno Stato membro di designare i propri siti della Rete Natura 2000, per i quali definire obiettivi di salvaguardia specifici.

4.2.3) Normativa francese

In Francia la tutela della *P. oceanica* si applica sia alla pianta in vita sia ai suoi resti, « tutto o parte » secondo la legge del 10 luglio 1976, relativa alla salvaguardia della natura e il relativo decreto applicativo del 25 novembre 1977, riguardante la protezione della flora e della fauna selvatica del patrimonio naturale francese.

Il decreto del Ministro degli Affari Esteri, del 7 luglio 1999, che pubblica gli emendamenti agli allegati della Convenzione relativa alla salvaguardia della vita selvatica e degli ambienti naturali in Europa (Convenzione di Berna) cita anche la *Posidonia oceanica*.

Oltre alla specie *P. oceanica* di per sé, le praterie marine possono beneficiare della protezione ai sensi della legge francese del 3 gennaio 1986, che enuncia i principi relativi all'assetto, alla protezione e alla valorizzazione del litorale. La legge, comunemente chiamata "Loi littoral", consente la preservazione di una prateria o di una sua parte, che presenti un interesse ecologico o si riveli indispensabile al mantenimento dell'equilibrio biologico. Questo si traduce nel decreto del 20 settembre 1989, il quale stabilisce che "sono preservati, dal momento che costituiscono un sito o un paesaggio notevole o caratteristico del patrimonio naturale e culturale del litorale, sono necessari al mantenimento degli equilibri biologici o presentano un interesse ecologico : (...) gli ambienti che ospitano concentrazioni naturali di specie animali o vegetali come le praterie (...)" (Boudouresque et al., 2006).

La Direttiva Quadro sulle Acque, recepita in Francia nel 2000, mira a garantire la qualità delle acque preservando gli ambienti acquatici, comprese le acque costiere fino a 12 miglia nautiche.

4.2.4) Normativa italiana

Secondo Boudouresque et al., (2006) in Italia, la competenza nazionale in materia di salvaguardia della biodiversità in ambiente marino-costiero, delle specie marine protette e dell'ambiente marino nel suo insieme, spetta alla Direzione per la Protezione della Natura del Ministero dell'Ambiente e della Difesa del Territorio.

La difesa della biodiversità marina è un tema prioritario nelle strategie nazionali e numerosi sforzi sono stati consacrati alla selezione e alla creazione di Aree Marine Protette

Le attività attualmente in corso, coordinate dal Ministero dell'Ambiente e della Difesa del Territorio, riguardano l'applicazione di Action Plans per i cetacei e le tartarughe marine, le praterie di *Posidonia oceanica* e le specie alloctone e invasive.

Inoltre, la Direzione per la Protezione della Natura organizza, in collaborazione con 14 regioni costiere, un'attività di monitoraggio dell'ambiente marino-costiero che si estende per circa 6000 km.

Il Ministero dell'Ambiente e della Difesa del Territorio ha riservato particolare attenzione alla Posidonia oceanica, a cui ha dedicato numerosi progetti nel corso degli ultimi anni. Così la distribuzione e lo stato di conservazione delle praterie di Posidonia oceanica sono stati oggetto di molteplici campagne di studio.

Inoltre, la Direzione della Protezione della Natura del Ministero dell'Ambiente e della Difesa del Territorio ha messo in atto un piano specifico per la realizzazione di una cartografia delle praterie lungo le coste del Mediterraneo, in conformità con il « programma nazionale di individuazione e valorizzazione della Posidonia oceanica, nonché di studio delle misure di salvaguardia della stessa da tutti i fenomeni che ne comportano il degrado e la distruzione », previsto dalla Legge n° 426/98.

Grazie al progetto « Bioitaly », lanciato nel 1994 dal Ministero dell'Ambiente, con lo scopo di identificare i Siti d'Interesse Comunitario (SIC - Direttiva Habitat) le praterie di Posidonia oceanica sono ormai protette all'interno delle zone tutelate, che si tratti di aree marine protette o delle aree della rete Natura 2000.

Dal 1998 l'Italia ha messo in atto una procedura legale che mira ad assicurare la protezione delle praterie di Posidonia oceanica. Si tratta della legge n° 426 – 9/12/98, “Nuovi interventi in campo ambientale”, e della più recente legge n° 93 – 23/3/2001, “Disposizioni in campo ambientale” . Questi testi, anche se molto generici, consacrano alcuni paragrafi specifici alle praterie, contenenti in particolare disposizioni finanziarie per la realizzazione di studi e di programmi per la protezione e la realizzazione di una cartografia relativa alla P. oceanica.

La Liguria ha adottato nel 2011 una normativa per la valutazione dell'impatto dei progetti di architettura del paesaggio sui siti d'interesse comunitario (Direttiva Habitat), nel quale sono incluse le praterie di P. oceanica (Delibera della Giunta Regionale n° 646 del 8 giugno 2001).

IV.3) Filiere di valorizzazione esistenti

In passato, le foglie morte di P. oceanica sono state utilizzate in diversi modi dalle popolazioni costiere del bacino del Mediterraneo (Boudouresque et Meinesz 1982).

4.3.1) Bioenergia- metano

De Sanctis et al. (2019) hanno studiato la produzione di bioenergia per digestione anaerobica. L'elevato contenuto di lignina (circa il 34 %) richiede un pretrattamento per poter migliorare il recupero dell'energia. I risultati ottenuti hanno dimostrato che quando il pretrattamento termico è stato affinato con l'aggiunta di acido cloridrico, si è ottenuto un miglioramento della produzione di metano del 575 %, rispetto al solo pretrattamento termico.

Questo risultato è stato attribuito alla rimozione delle fibre di lignina e cellulosa, operata dal pretrattamento termico acido, il quale ha permesso di eliminare rispettivamente il 74% di cellulosa, il 70% di emicellulosa e il 24% di lignina, durante la digestione anaerobica. L'analisi energetica realizzata per le stazioni di trattamento della capacità di 10 e 50 m³/j ha dimostrato che l'aggiunta di acido durante la fase di idrolisi termica permette al bilancio energetico di passare da valori molto negativi (la domanda di energia è da 8 a 10 volte superiore di quella prodotta) a dati positivi, con un'efficienza energetica dei processi che va dal 22 al 35%, secondo le dimensioni della centrale.

4.3.2) Materiali ecologici di costruzione

In Africa del Nord le foglie morte di Posidonia sono state a lungo utilizzate per l'isolamento dei tetti. Attualmente sono stati effettuati alcuni test sull'isolamento termico e sonoro.

Il professor Roberto Bedini, direttore dell'Istituto di Biologia ed Ecologia Marina di Piombino ha condotto un progetto sul trattamento delle foglie di Posidonia oceanica spiaggiate, utilizzate nella fabbricazione di mattoni leggeri, nel quale le foglie tritate erano utilizzate nella pasta in sostituzione del polistirene.

L'istituto è stato premiato dalla Regione Toscana per questo progetto e la squadra di ricerca è stata intervistata in una puntata della trasmissione LINEA BLU della RAI. In questo progetto ci si è serviti di un'impresa che ha costruito un macchinario da trasportare sulla costa, per macinare le foglie in situ. Le foglie tritate venivano in seguito trasferite verso una fabbrica di mattoni.



Figura 13 : Foglie di Posidonia oceanica tritate che andranno a comporre i mattoni



Figura 14 : Mattone composto con foglie di Posidonia oceanica

Hamdaoui et al. hanno studiato la riduzione della conduttività termica del cemento quando le foglie di Posidonia entrano a far parte della sua composizione.

Khiari et Belgacem (2017) hanno parlato degli utilizzi attuali e potenziali dei rifiuti di Posidonia oceanica nel campo della scienza dei materiali.

4.3.3) Agricoltura

Le foglie morte di Posidonia oceanica sono state utilizzate a lungo anche come concime dagli agricoltori delle coste del Mediterraneo.

In Italia, Tunisia e Grecia sono stati effettuati alcuni esperimenti, in vista della produzione di un concime a base di P. oceanica, che hanno dato risultati interessanti.

In Spagna, la municipalità di Denya (Comunità Valenciana), grazie a un finanziamento europeo (progetto Life Environnement, 1996) e in collaborazione con l'Università di Valencia, ha avviato un impianto di produzione di compost, capace di trattare 15 000 m³/anno di rifiuti vegetali. Il concime ottenuto dal miscuglio di foglie morte di P. oceanica e altri detriti vegetali (in un rapporto di circa 1:3) presenta buone caratteristiche agronomiche, è ricco di oligoelementi e può essere utilizzato per il rimboschimento e in altre azioni di restauro ambientale.

Le foglie fresche di P. oceanica possiedono un buon valore nutrizionale, simile a quello del fieno o dell'erba medica. Aggiungendo della polvere di foglie di Posidonia oceanica al mangime delle galline, in Italia, è stato riscontrato un incremento della produzione di uova.

4.3.4) Salute

Gli egiziani attribuivano alla Posidonia oceanica proprietà curative, in particolare contro il mal di gola e le malattie della pelle, e un vecchio manuale di botanica (Cazzuola, 1880) la cita tra i prodotti della farmacopea popolare.

4.3.5) Altro

Sin dall'Antichità le foglie morte di Posidonia oceanica sono state a lungo utilizzate sotto forma di imbottitura di materassi o come lettiera per gli animali.

Nell'antico Egitto, pare si fabbricassero delle scarpe con la feltratura delle egagropile.

Per secoli le foglie di P. oceanica sono state utilizzate dai veneziani per imballare e trasportare la loro delicata e celebre vetreria.

Tra gli altri usi di P. oceanica, si può annoverare anche la produzione di carta, verso la fine del secolo XIX.

4.3.6) Limiti attuali

Le sperimentazioni moderne hanno dimostrato la fattibilità dell'impiego delle foglie e delle fibre di P. oceanica, ma questa possibilità si è scontrata spesso con le realtà economiche. Essa si scontra inoltre con il divieto di utilizzo sotto qualsiasi forma, nei Paesi dove la specie è protetta.

V) SINTESI E CONCLUSIONE

I detriti di Posidonia che possono essere ritrovati nei sedimenti di dragaggio derivano direttamente dall'espulsione delle foglie morte nella colonna d'acqua, dall'esportazione della lettiera (foglie morte, rizomi strappati), oppure dalla frammentazione e dalla decomposizione della lettiera da parte dei detritivori (sul sito di produzione o altrove).

La Posidonia oceanica è sensibile a determinati cambiamenti nel suo ambiente ; nel bacino del Mediterraneo si osserva una generale regressione delle praterie. Il materiale vegetale è costituito essenzialmente da foglie, frammenti di foglie, fibre e rizomi.

La produzione primaria originata dalla P. oceanica è molto ricca di cellulosa e di lignina, poco utilizzabili dagli erbivori, e di composti fenolici che hanno il ruolo di dissuadere i potenziali consumatori.

Le fibre di *P. oceanica* sono molto resistenti e le loro capacità isolanti sono simili a quelle dei materiali industriali.

Le praterie di *P. oceanica* rappresentano uno degli ecosistemi più produttivi del pianeta, grazie alla produzione di biomassa vegetale e animale.

I processi da studiare per la separazione delle fibre sfruttano la maggior capacità dei residui vegetali di stare a galla, rispetto ai sedimenti minerali.

Le foglie e le fibre di *Posidonia oceanica* vengono utilizzate fin dall'Antichità e sono in corso alcune ricerche per il loro impiego nei materiali ecologici di costruzione, specialmente per le loro proprietà termiche paragonabili a quelle dei materiali isolanti industriali.

VI. BIBLIOGRAPHIE - WEBOGRAPHIE

AGOSTINI S., DESJOBERT J-M., PERGENT G., 1998. Distribution of phenolic compounds in the seagrass *Posidonia oceanica*. *Phytochemistry*, Vol 48, No 4, pp. 611-617.

ALLEGUE L., ZIDI M., SGHAIER S., 2011. Développement des composites ciments à base de *Posidonia Oceanica*. Conférence : Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques CMSM'2011.

ALLEGUE L., ZIDI M., SGHAIER S., 2012. Propriétés mécaniques des composites polypropylènes renforcées de fibres de posidonie. Deuxième Congrès Tunisien de Mécanique. COTUME'2012.

AUGIER H., SANTIMONE M., 1979. Contribution à l'étude chimique de la phanérogame marine *Posidonia oceanica* Delile : composition en cendres, carbone, hydrogène, azote, protéines et acides aminés en milieu exempt de pollution et en fonction de la profondeur dans le parc national de Port-Cros. 105-123.

BEN ALAYA H., 1972. Répartition et conditions d'installation de *Posidonia oceanica* Delile et *Cymodocea nodosa* Ascherson dans le golfe de Tunis. *Bull. Inst. Océanogr. Pêche Salammbô*, 2(3): 331-416.

BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., 1982. Découverte de l'herbier de Posidonie. *Cah. Parc nation. Port-Cros, Fr.*, 4 : 1-79.

BOUDOURESQUE C.F., JEUDY DE GRISSAC A., 1983. L'herbier à *Posidonia oceanica* en Méditerranée : les interactions entre la plante et le sédiment. *J. Rech. océanogr.*, 8(2-3) : 99-122.

BOUDOURESQUE C.F., BERNARD G., CHARBONNEL E., DIVIACCO G., MEINESZ A., PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., RUITTON S., TUNESI L., 2006. Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. Ramoge pub. : 1-202.

CAPIOMONT A., SANDMEIER M., CAYE G., MEINESZ A., 1996. Enzyme polymorphism in *Posidonia oceanica*, a seagrass endemic to the Mediterranean. *Aquat. Bot.* 54 : 265-277.

COCOZZA C., PARENTE A., ZACCONE C., MININNI C., SANTAMARIA P., MIANO T., 2011. Chemical, physical and spectroscopic characterization of *Posidonia oceanica* (L.) Del. residues and their possible recycle. *Biomass and bioenergy* 35. 799-807.

CEBRIAN J., DUARTE C.M., 2001. Detrital stocks and dynamics of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile in the Spanish Mediterranean. *Aquatic Botany*, 70 : 295-309.

Chessa, L.A., Deriu, A., Fernandez, C., Fustier, V., Mura, F., Pais, A., Pergent, G., Pergent-Martini, C., Serra, S., Vitale, L., Zanetti, S., 2000b. Valorizzazione delle banquettes di *Posidonia oceanica*. In : Environnement et identité en Méditerranée, Interreg II, Univ. Corse, 115-121.

CROUZET A., 1981. Mise en évidence de variations cycliques dans les écailles de *Posidonia oceanica* (Potamogetonaceae). *Trav. sci. Parc nation. Port-Cros, Fr.* 7 : 129-135.

DE SANCTIS M., CHIMIENTI S., PASTORE C., PIERGROSSI V., Di IACONI C., 2019. Energy efficiency improvement of thermal hydrolysis and anaerobic digestion of *Posidonia oceanica* residues. *Applied Energy*. 252.

DUARTE C.M., MIDDELBURG J.J., CARACO N., 2005. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, 1, 173-180.

ELKALAY K., FRANGOULIS C., SKLIRIS N., GOFFART A., GOBERT S., LEPOINT G., HECQ J.H., 2003. A model of seasonal dynamics of biomass and production of the seagrass *Posidonia oceanica* in the Bay of Calvi (Northwestern Mediterranean). *Ecol. Model.* 167 : 1-18.

GOBERT S., 2002. Variation spatiale et temporelle de l'herbier à *Posidonia oceanica* (L.) Delile. (Baie de La Revellata-Calvi-Corse). Thèse Doct. Univ. Liège, 1-226.

HAMD AOUI O., IBOS L., MAZIOUD A., SAFI M., LIMAM O., 2018. Thermophysical characterization of *Posidonia oceanica* marine fibers intended to be used as an insulation material in Mediterranean buildings. *Construction and Building materials* 180. 68-76.

HARRISON, P. G., 1989 : Detrital processing in seagrass systems : a review of factors affecting decay rates, remineralization and detritivory. *Aquat. Bot.*, 23 : 263-288.

HARTOG C. den, 1970. The sea-grasses of the world. North Holland publ. Co, Amsterdam, Pays-Bas : 1-275 + 63 pl. h.t.

JEUDY DE GRISSAC A., 1975. *Sédimentologie Dynamique des Rades d'HYERES et de GIENS (Var). Problèmes d'Aménagements*. Thèse Doct. Univ. Provence, 1-174.

KAAL J., SERRANO O., DEL RIO J.C., RENCORET J., Radically different lignin composition in *Posidonia* species may link to differences in organic carbon sequestration capacity, *Organic Geochemistry* (2018), doi : <http://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2018.07.017>

KHIARI R., BELGACEM M.N., 2017. Potential for using multiscale *Posidonia oceanica* waste : current status and prospects in material science. Whoodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. 447-471.

LAI S., YU C.Z., BOUMA T.J., YAAKUB S.M., TODD, P.A., The relative importance of light and hydrodynamics in the decay and transport of vegetative seagrass fragments, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (2019), doi : <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106430>

LEONI V., PERGENT G., VELA A., PERGENT-MARTINI C., 2005. Etude finale de faisabilité pour la réutilisation des banquettes de feuilles de *Posidonia oceanica* : du ramassage au recyclage – PORIME. Rapport d'Activité 2004/2005 – Région Corse. Programme INTERREG IIIA Sardaigne / Corse / Toscane, Gis Posidonie édit., Corte : 1-33.

MAYOT N., BOUDOURESQUE C.F., LERICHE, 2005 Unexpected response of the seagrass *Posidonia oceanica* to a warm Water episode in the Northwestern Mediterranean Sea. C.R. Biologies 328: 291-296.

MOLINIER R., PICARD J., 1952. Recherches sur les herbiers de Phanérogames marines du littoral méditerranéen français. Ann. Inst. océanogr. 27(3): 157-234.

PARENTE A, MONTESANO FF, LOMORO A, GUIDO M. Improvement of beached *Posidonia* residues performances to composting. Environ Eng Manage J 2013 ; 12 (S11) : 81–4.

PASQUALINI V., PERGENT-MARTINI C., PERGENT G., 1998. Use of Remote Sensing for the Characterization of the Mediterranean Coastal Environment : The Case of *Posidonia oceanica*. Journal of Coastal conservation 4 : 59-66.

PERGENT G., BOUDOURESQUE C.F., CROUZET A., 1983. Variations cycliques dans les écailles des rhizomes orthotropes de *Posidonia oceanica*. Trav. sci. Parc nation. Port-Cros 9 : 107-148.

PERGENT G., 1990. Lepidochronological analysis of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile : a standardized approach. Aquatic Botany, 37 : 39-54.

PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., 1991. Leaf renewal cycle and primary production of *Posidonia oceanica* in the bay of Lacco Ameno (Ischia, Italy) using lepidochronological analysis. Aquat. Bot. 42 : 49-66.

PERGENT G., ROMERO J., PERGENT-MARTINI C., MATEO M.A., BOUDOURESQUE C.F., 1994. Primary production, stocks and fluxes in the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. Mar. Ecol. 106, 139-146.

PERGENT G., RICO-RAIMONDINO V., PERGENT-MARTINI C., 1997. Faite of primary production in *Posidonia oceanica* meadows of the Mediterranean. Aquatic botany, 59 : 307-321.

RANIELLO R., PROCACCINI G., 2002. Ancient DNA in the seagrass *Posidonia oceanica*. Mar. Ecol. Progr. Ser. 227 : 169-173.

ROMERO J., PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., MATEO M.A., REGNIER C., 1992. The detritic compartment in a *Posidonia oceanica* meadow : litter features, decomposition rates and mineral stocks. Mar. Ecol. 13, 73-83.

SALAT J., PASCUAL J., 2002. The oceanographic and meteorological station at L'Estartit (NW Mediterranean). In : Tracking long-term hydrological change in the Mediterranean Sea. CIESM Workshop Series, 16 : 29-32.

VASSALLO P., et al. The value of the seagrass *Posidonia oceanica* : A natural capital assessment. Mar. Pollut. Bull. (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.044>

VELA A., 2006. *Fonctionnement et production primaire des herbiers à Posidonia oceanica (L.) Delile en Méditerranée*. Thèse Doct. Univ. Corse, 1-174.

VERHILLE G., MOULINET S., VANDENBERGHE N., ADDA-BEDIA M., LE GAL P., 2017. Structure and mechanics of aegagropilae. Proceedings of the National Academy of Sciences May 2017, 114 (18) 4607-4612 ; DOI : www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1620688114

WALKER D.I., PERGENT G., FAZI S., 2001. Chapter 16 - Seagrass decomposition. Global Seagrass Research Methods, 313-324.

Les couches d'informations utilisées pour la cartographie sont les suivantes :

La couche Herbiers de posidonie est extraite des habitats EUNIS à partir de la plateforme EMODnet Seabed habitats : <https://www.emodnet-seabedhabitats.eu/access-data/launch-map-viewer/>

Les ports et marinas sont issus de la plateforme openstreetmap : <https://www.openstreetmap.fr/>