

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل
Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'ETUDES
UNIVERSITAIRES APPLIQUEES (D.E.U.A) EN SCIENCES DE LA MER

Sujet :

**Surveillance de la limite inférieure de l'herbier à
Posidonia oceanica de Bou Ismail**

Préparé par :

KHAZIMI Oussama

Encadré par :

M^{me} BOUMAZA S.....Promotrice

M^r SEMROUD R.....Co-Promoteur

M^r BOUKORTT R.....Co-Promoteur

Examiné par :

M^{me} BOUMAZA S.....Promotrice

M^{lle} AIT-AMEUR N.....Examinatrice

Session : Septembre / 2010

SOMMAIRE

Sommaire

1. Introduction	1
1.1. Objectifs de l'étude.....	2
2. Généralités	3
2.1. Présentation et distribution de <i>Posidonia oceanica</i>	3
2.2. Morphologie et biologie de <i>Posidonia oceanica</i>	3
2.3. Rôles des herbiers à <i>Posidonia oceanica</i>	4
2.3.1. Rôles dans les équilibres physiques	5
2.3.2. Rôles dans les équilibres écologiques	6
2.3.3. Rôle économique.....	7
2.3.4. Rôle de bioindicateur	7
2.4. Menaces sur les herbiers.....	8
2.4.1. Menaces indirectes	8
2.4.2. Menaces directes	9
3. Matériel et Méthodes.....	10
3.1. Localisation et caractéristiques du site d'étude	10
3.2. Suivi de la limite inférieure de l'herbier de Bou Ismaïl	11
3.3. Méthodes d'étude <i>in situ</i>	12
3.3.1. Position des balises.....	12
3.3.2. Profondeur des balises.....	13
3.3.3. Prises de vues	13
3.3.4. Identification du type de limite	14
3.3.5. Estimation du recouvrement de l'herbier	15
3.3.6. Mesure de la densité de l'herbier	16
3.3.7. Déchaussement des rhizomes	17
3.3.8. Prélèvements	17
3.4. Etudes associées	18

3.4.1.	Analyse lépidochronologique.....	18
3.4.2.	Analyse phénologique	19
3.4.3.	Biomasse des feuilles et des épiphytes.....	20
3.4.4.	Granulométrie du sédiment	21
3.4.5.	Traitement d'images.....	22
3.4.6.	Traitements statistiques	24
4.	Résultats et discussion.....	26
4.1.	Localisation et cartographie de la limite inférieure	26
4.1.1.	Localisation du balisage	26
4.1.2.	Position et profondeur des balises.....	26
4.1.3.	Cartographie et description de la limite inférieure de l'herbier	28
4.2.	Caractérisation de l'herbier.....	29
4.2.1.	Estimation du recouvrement.....	29
4.2.2.	Densité de l'herbier	30
4.3.	Lépidochronologie.....	30
4.3.1.	Production foliaire.....	30
4.3.2.	Vitesse de croissance des rhizomes.....	31
4.4.	Paramètres biométriques.....	32
4.5.	Biomasse des feuilles et des épiphytes	33
4.6.	Granulométrie du sédiment.....	33
4.7.	Examen et comparaison des prises de vues photographiques	35
4.8.	Observation sur la faune associée.....	39
	CONCLUSION.....	41
	Références Bibliographiques	43
	Annexes	42

INTRODUCTION

1. Introduction

Les potentialités de *Posidonia oceanica* en tant qu'indicateur de la qualité des eaux littorales ont conduit à créer, en 1984, suite à l'initiative du Conseil Régional Provence-Alpes-Côte-d'Azur (PACA), le Réseau de Surveillance Posidonies (RSP). Pour ce faire, des systèmes de surveillance très performants ont été mis au point (Charbonnel *et al.*, 1995). En 1990, ce RSP s'est développé à l'échelle euro-méditerranéenne et a regroupé trois autres pays : l'Espagne, l'Italie et la Grèce à travers le COST 647 (Boudouresque *et al.*, 1990). Suite à l'adoption, en 1999, du Plan d'Action pour la Conservation de la Végétation marine en Mer méditerranée, plusieurs pays se sont dotés de ce type de système de surveillance.

Le RSP consiste en l'installation de repères au niveau des limites inférieure et supérieure des herbiers, de transects permanents et de carrés permanents afin de mettre en évidence le recul, la stabilité ou la progression des herbiers à *Posidonia oceanica*. Ce réseau poursuit un double objectif : **(i)** la surveillance à long terme de l'évolution de l'état de santé des herbiers de Posidonies et **(ii)** l'utilisation de l'herbier comme indicateur biologique de la qualité des eaux littorales (Charbonnel *et al.*, 1995). Par ailleurs, l'efficacité de ces réseaux, basés sur la surveillance de l'évolution spatio-temporelle des limites de l'herbier à *Posidonia oceanica*, est conditionnée par la visite régulière des structures mises en place (Pergent-Martini, 1994).

Dans le cadre des activités de recherche de l'ISMAL, trois (3) sites de surveillance des herbiers à *Posidonia oceanica* ont été mis en place dans la baie de Bou Ismaïl. Le premier dans la petite baie d'El Djamila, qui comporte la mise en place, d'une part, d'un balisage d'une portion de la limite inférieure, et, d'autre part, d'un carré permanent au sein de l'herbier à *Posidonia oceanica* (Semroud *et al.*, 1998). L'analyse de l'évolution de ce site par rapport à la période de la mise en place de ces systèmes de surveillance a été réalisée lors d'un suivi en 2000 (Boumaza et Semroud, 2000). Ce suivi a permis de mettre en évidence une régression qui résulte d'une part de l'important hydrodynamisme qui règne dans ce secteur, et d'autre part de l'action anthropique. Ces modifications au niveau de la limite inférieure, de l'ordre de quelques centimètres, seraient passées inaperçues avec d'autres moyens d'investigation. Le second a été mis en place dans une zone où l'activité anthropique est de plus en plus importante, en l'occurrence le front de mer de la ville de Bou Ismaïl (Bengrine et Guelmami, 2007). Enfin, le troisième a été disposé à Kouali (Guerrah et Nour, 2008), considéré comme une zone de référence dans la baie de Bou Ismaïl (Boumaza, 2002).

1.1.Objectifs de l'étude

Cette étude vise à suivre le système de surveillance de l'herbier à *Posidonia oceanica*, mis en place au large du front de mer de la ville de Bou Ismaïl, en 2007. Ce suivi permettra de mettre en évidence *in situ* toute modification, même de faible ampleur, de la position de la limite inférieure de l'herbier. Par ailleurs, tous les paramètres permettant d'apprécier la vitalité de l'herbier, pris en compte lors de l'étude initiale (état zéro) du site, sont considérés lors de ce suivi. Ils seront analysés afin d'évaluer l'impact de la modification des conditions environnementales sur cet herbier.

GÉNÉRALITÉS

2. Généralités

2.1. Présentation et distribution de *Posidonia oceanica*

Posidonia oceanica (Linnaeus) Delile est une Magnoliophyte marine endémique de la Méditerranée (Molinier et Picard 1952 ; Kuo et Den Hartog, 2001) (Tableau 1). Elle constitue un ensemble végétal appelé « herbier », qui colonise les fonds situés entre la surface et 40 m de profondeur (Molinier et Picard, 1952 ; Duarte, 1991). Elle se développe sur les côtes européennes (France, Corse, Sardaigne, Italie, Yougoslavie, Grèce, Turquie) et les côtes africaines (Égypte, Libye, Tunisie, Algérie), sans s'étendre en mer Noire (Den Hartog, 1970). Cette distribution s'interrompt au niveau des estuaires (Rhône, Pô, Nil) suite aux fortes variations de salinité - espèce sténohaline - (Short *et al.*, 2001). Les herbiers occupent une surface restreinte, 1 à 2% des fonds de la Méditerranée, soit 25 000 à 50 000 km² (Pasqualini *et al.*, 1998).

Tableau 1. Classification phylogénétique de *Posidonia oceanica* (Kuo et Den Hartog, 2001).

Phylum : Chlorophyta
Embranchement : Magnoliophyta
Classe : Liliopsida
Sous-classe : Alismatidae
Ordre : Potamogetonales
Famille : Posidoniaceae
Genre : <i>Posidonia</i>
Espèce : <i>oceanica</i>

2.2. Morphologie et biologie de *Posidonia oceanica*

Les feuilles de *Posidonia oceanica* sont rubanées de 40 à 140 cm de longueur et de 7 à 11 mm de largeur ; elles sont regroupées en faisceaux de 4 à 8 feuilles environ (Pergent-Martini et Le Ravallec, 2007). Elles sont produites toute l'année et vivent entre 5 et 8 mois, exceptionnellement jusqu'à 13 mois, et tombent surtout à l'automne (Thelin et Boudouresque 1983). La zone de croissance foliaire s'effectue au niveau de zones de méristème localisées à la base des feuilles. Chaque faisceau de feuilles est situé à l'apex d'une tige appelée rhizome, totalement ou partiellement enfouie dans le sédiment. Les rhizomes peuvent croître soit horizontalement (rhizomes plagiotropes), soit verticalement (rhizomes orthotropes) (Figure 1). Le type de croissance est fonction de l'espace disponible, de la lumière et de l'importance des apports sédimentaires (Caye, 1980). Les rhizomes plagiotropes sont pourvus de racines qui fixent la plante au substrat et permettent à la plante de puiser les gaz et les nutriments nécessaires à la croissance et au développement de la plante (Pergent-Martini, 1994).

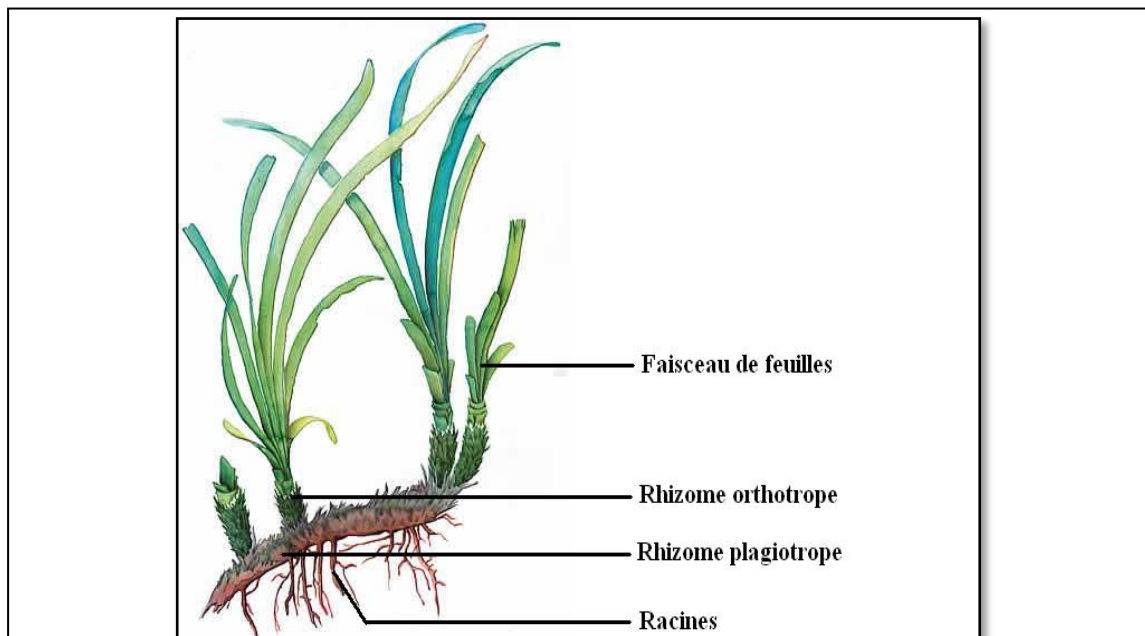


Figure 1. Schéma d'un rhizome plagiotrope de *Posidonia oceanica*, dont partent vers le haut des rhizomes orthotropes et, vers le bas, des racines (D'après Boudouresque et Meinesz, 1982).

Posidonia oceanica se multiplie surtout de manière asexuée, par allongement des rhizomes, par division des faisceaux et par bouturage (Molinier et Picard, 1952). La floraison ne se produit pas tous les ans, elle a lieu à l'automne et elle semble induite par des températures printanières et/ou estivales élevées (Thelin et Boudouresque, 1985 ; Pergent *et al.*, 1989). Quant à la dissémination des fruits (olives de mer) mûrs, elle a lieu à la fin du printemps.

2.3. Rôles des herbiers à *Posidonia oceanica*

Les herbiers à *Posidonia oceanica* comme la majeure partie des peuplements édifiés par les Magnoliophytes marines, assument un rôle écologique majeur en Méditerranée à la fois sur les plans structural, fonctionnel, économique et bioindicateur (Figure 2).

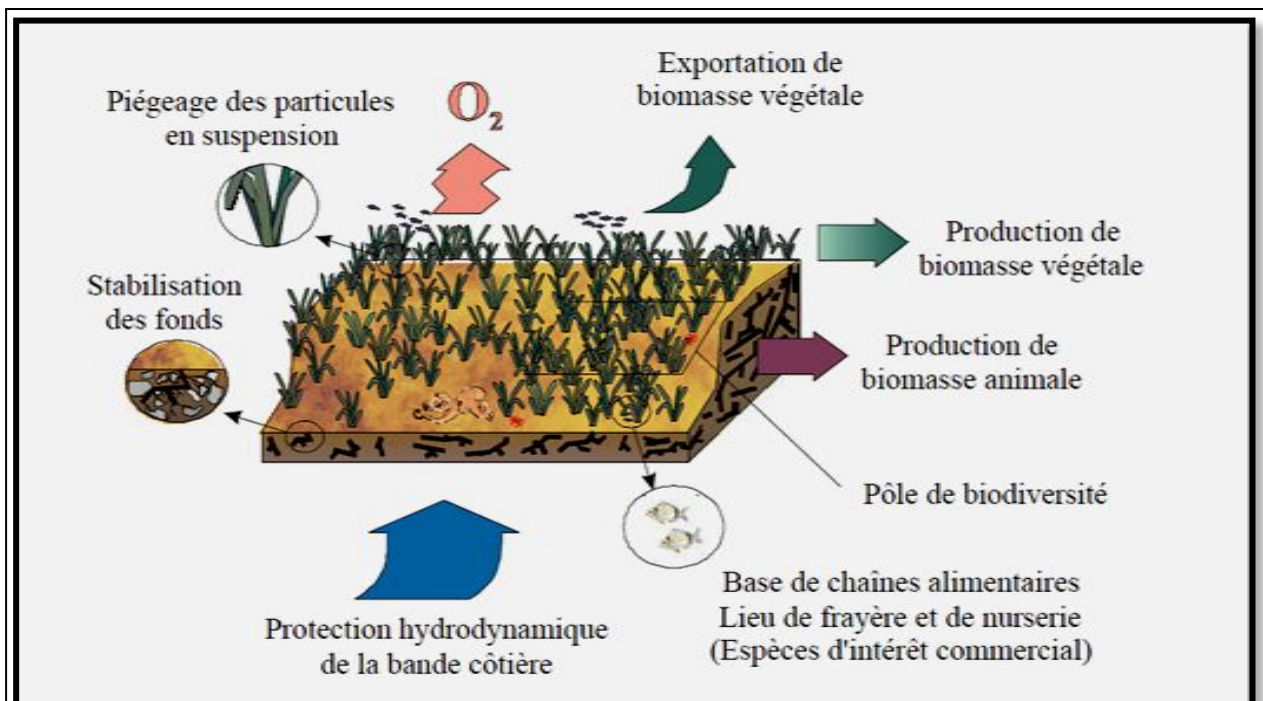


Figure 2. Schématisation des principaux rôles de l'herbier de *Posidonie* dans l'équilibre des fonds littoraux méditerranéens (D'après Charbonnel *et al.*, 2000).

2.3.1. Rôles dans les équilibres physiques

Les herbiers à *Posidonia oceanica* sont des bâtisseurs de fonds, cette aptitude est directement liée à sa morphologie et à son mode de croissance. D'une part, les feuilles constituent de véritables pièges à sédiment qui favorisent la décantation des particules en suspension dans la colonne d'eau, et, d'autre part, la croissance verticale des rhizomes aboutit à la formation d'un substratum compact appelé «matte» (Molinier et Picard, 1952) (Figure 3).

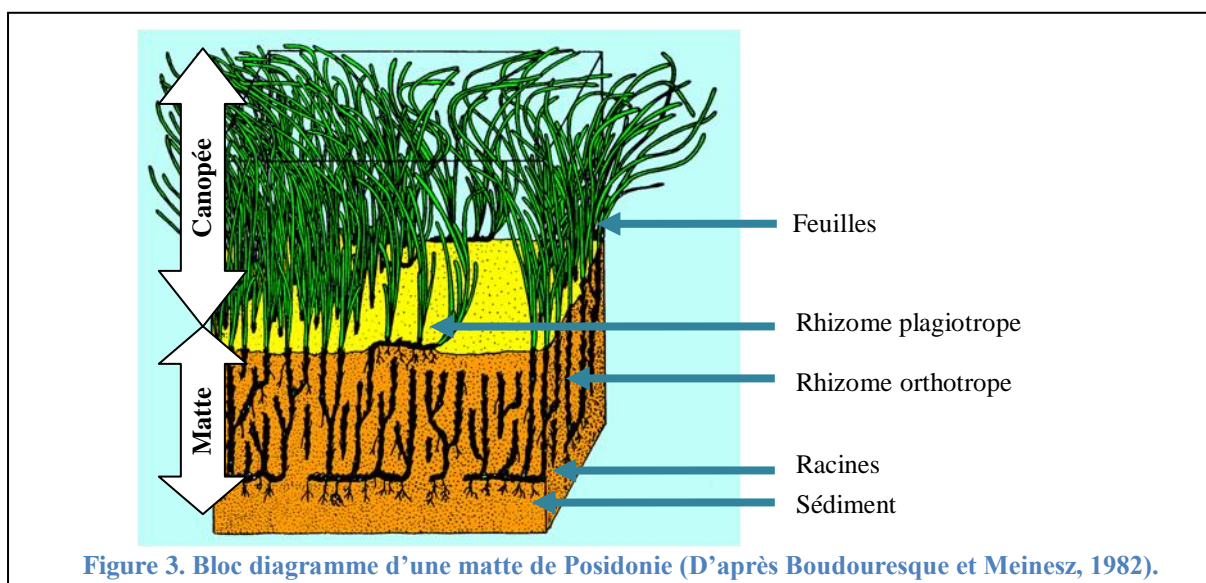


Figure 3. Bloc diagramme d'une matte de *Posidonie* (D'après Boudouresque et Meinesz, 1982).

Cette dernière est constituée par un lacs de rhizomes, morts et/ou vivants, de racines et de sédiment hétérogène (d'origine autochtone et/ou allochtone) qui colmate les interstices. L'élévation de la matte est estimée à 1 m par siècle (Molinier et Picard, 1952 ; Boudouresque et Meinesz, 1982). Par ailleurs, la matte souterraine stabilise les fonds meubles en agissant comme un piège à sédiments (Molinier et Picard, 1952). Elle peut aboutir, après un certain temps, dans les zones abritées, à l'affleurement de l'herbier à la surface de l'eau formant ainsi un «récif-barrière» (Augier et Boudouresque, 1970).

Les herbiers à *Posidonia oceanica* jouent un rôle important dans la modération des effets des mouvements sédimentaires et le freinage des courants et des houles (Jeudy De Grissac et Boudouresque, 1985). En effet, la biomasse végétale constitue une sorte d'écran qui freine et amortit efficacement l'hydrodynamisme (houles, courants) au niveau des fonds et participe ainsi dans la protection hydrodynamique de la frange côtière, par atténuation de près de 50 % de la puissance des vagues, de la houle et des courants (Gambi *et al.*, 1989 ; Pergent *et al.*, 2008). Les feuilles qui s'accumulent sur le rivage au gré des courants constituent de véritables banquettes à même de protéger les plages de l'érosion, notamment lors des tempêtes hivernales (Boudouresque *et al.*, 2006).

2.3.2. Rôles dans les équilibres écologiques

L'herbier à *Posidonia oceanica* représente un pôle de biodiversité important, 20 à 25% des espèces animales et végétales connues en Méditerranée y sont observées, soit plusieurs milliers d'espèces (Boudouresque *et al.*, 2004). Ces espèces utilisent l'herbier comme zone de nutrition, de reproduction, de développement pour les juvéniles et d'abri contre les prédateurs pour un grand nombre d'organismes (Bonhomme *et al.*, 2002 ; Francour, 1997). Les feuilles de *Posidonia oceanica*, de par leur surface importante, constituent également un support pour le développement d'une importante faune et flore benthiques.

Posidonia oceanica est un producteur de matière organique, à la base de nombreux réseaux trophiques littoraux. Elle correspond à la juxtaposition de la production primaire nette issue de la plante et celle de ses épiphytes, elle est de l'ordre de plus de 2 à 10 tonnes/ha/an (Pergent *et al.*, 1994 ; 1997). Toutefois, la part consommée par les herbivores *Paracentrotus lividus* et *Sarpa salpa* est faible, elle est de l'ordre de 10 %. La majorité de cette production, reste soit sur place sous forme de litière est dégradée par de nombreux détritivores (amphipodes, isopodes, holothuries) (Boudouresque, 2005), soit stockée dans la litière, soit exportée

vers d'autres milieux côtiers et profonds où ces feuilles constituent un apport majeur de nourriture (Rico-Raimondino, 1995).

Une autre conséquence de la photosynthèse, réalisée par les herbiers est la production d'oxygène. La production d'oxygène peut-être considérable, au niveau des faisceaux foliaires et des végétaux épiphytes associés, notamment à faible profondeur (Alcoverro *et al.*, 1998). Les quantités produites sont largement excédentaires et les herbiers à *Posidonia oceanica* constituent donc un facteur important de l'oxygénation de l'eau. Par exemple 1m² d'herbier dégage jusqu'à 14 litres d'oxygène par jour (Bay, 1978).

2.3.3. Rôle économique

Le rôle économique de l'herbier à *Posidonia oceanica* découle, d'une façon générale, de son importance dans les équilibres écologiques et physiques du système littoral (Boudouresque *et al.*, 2006). Il concerne en premier lieu la gestion des ressources vivantes à travers sa forte production biologique, mais également il édifie une zone de fraie recherchée par de nombreuses espèces présentant un intérêt commercial (Crustacés, Céphalopodes, Poissons) (Pergent *et al.*, 2008). Il concerne également le développement du tourisme et des activités balnéaires, à travers le maintien de la qualité des eaux (transparence), la stabilisation de la ligne de rivage (plages) en la protégeant contre l'érosion (réduction de l'hydrodynamisme, banquettes de feuilles mortes). De plus, même si les herbiers ne constituent pas toujours des "spots" recherchés par les plongeurs, ils sont néanmoins à l'origine d'une exportation significative de richesses biologiques (en termes d'espèces et de nourriture) vers d'autres biotopes plus recherchés (fonds rocheux) (Boudouresque *et al.*, 2006).

L'importance économique qui dérive des services écologiques des herbiers à *Posidonia oceanica*, à l'instar des autres Magnoliophytes marines, est estimée à 19 000 dollars par hectare et par an, soit trois fois plus que les récifs coralliens et dix fois plus que les forêts tropicales (Costanza *et al.*, 1997).

2.3.4. Rôle de bioindicateur

En Méditerranée, l'herbier à *Posidonia oceanica* constitue un puissant intégrateur de la qualité globale des eaux littorales (Augier, 1985 ; Pergent *et al.*, 1995). Solidaire du fond, l'herbier rend compte, par sa présence et sa vitalité ou inversement par sa régression, de la qualité des eaux. Très largement distribué sur tout le littoral, il est particulièrement sensible à la pollution (Augier *et al.*, 1984 ; Bourcier, 1989) et aux autres agressions liées aux activités humaines (Meinesz et Laurent, 1978 ; Boudouresque et Meinesz, 1982). En effet, son aptitude à enre-

gistrer les conditions ambiantes du milieu peut se mesurer à la fois au niveau de la structure et de la physiologie de la population, de la biométrie foliaire et de la communauté épiphyte des feuilles (Pergent, 1991 ; Pergent *et al.*, 1995). A ce titre, l'extension bathymétrique maximale de l'herbier renseigne sur la transparence des eaux. En effet, dans les secteurs où la turbidité de l'eau est importante, suite aux rejets urbains excessifs ou aux modifications des apports fluviaux, la profondeur maximale de la limite inférieure diminue (Pergent *et al.*, 1995). De même, l'analyse de la densité des faisceaux en fonction de la profondeur peut témoigner de la vitalité de l'herbier et par conséquent du stress subi (Pergent-Martini et Le Ravallec, 2007). La présence de structures érosives qui affectent la « matte » peut témoigner de la courantologie d'une zone (Boudouresque *et al.*, 2006). Par ailleurs, *Posidonia oceanica* a la faculté de concentrer les métaux traces au sein de ses tissus, proportionnellement aux teneurs présentes dans le milieu, sans que ces derniers ne lui nuisent. Cela offre donc la possibilité de suivre l'évolution des concentrations de ces métaux au cours du temps (Pergent *et al.*, 1995).

2.4. Menaces sur les herbiers

De par leur localisation en bordure littorale, les herbiers à *Posidonia oceanica* ont considérablement régressé, en particulier aux alentours des grands centres urbains et portuaires de la Méditerranée. Les activités humaines constituent le principal facteur de régression des herbiers à *Posidonia oceanica*, selon Boudouresque *et al.* (2006). En outre, toutes les pressions que subit l'herbier se répercutent directement sur tout l'écosystème qu'il édifie (Boudouresque *et al.*, 1994). Ces menaces de différents ordres, peuvent être directes ou indirectes.

2.4.1. Menaces indirectes

Les rejets urbains et les autres activités anthropiques peuvent accroître la charge des eaux côtières en particules en suspension, en nutriments et en matière organique dissoute ou particulaire. A leur tour, ils provoquent la prolifération des organismes planctoniques, ce qui a pour conséquence la réduction de la transparence de l'eau (Boudouresque *et al.*, 2006). Ainsi l'augmentation de la turbidité de l'eau constitue la principale cause de régression de l'herbier, cela étant également provoqué par le lessivage des sols agricoles à proximité des côtes, des rejets industriels et urbains, des aménagements littoraux (port, plage artificielle, etc.) (Pergent-Martini et Le Ravallec 2007).

Les aménagements côtiers peuvent intervenir également dans la modification de la courantologie, ce qui altère le bilan sédimentaire, provoquant alors l'érosion ou l'ensevelissement de l'herbier (Jeudy De Grissac et Boudouresque, 1985).

Les rejets anthropiques, outre le fait de modifier de façon importante l'équilibre sédimentaire des eaux côtières, véhiculent une large gamme de contaminants : les détergents, les hydrocarbures, les pesticides, les herbicides, les métaux lourds et les composants des peintures antifouling, qui réduisent la vitalité des herbiers à *Posidonia oceanica* (Augier *et al.*, 1987).

L'introduction d'espèces invasives susceptibles d'entrer directement en compétition avec les phanérogames marines est un phénomène relativement récent, il s'agit essentiellement de deux espèces du genre *Caulerpa* (Ceccherelli *et al.*, 2000). *Caulerpa taxifolia* est en mesure de coloniser presque tous les types de substrats, en particulier la « matte morte » et les herbiers à *Posidonia oceanica* (Boudouresque *et al.*, 1995). Quand à *Caulerpa racemosa* qui colonise des fonds limitrophes de l'herbier à *Posidonia oceanica*, sa croissance en hauteur est fonction de la densité des faisceaux de *Posidonia oceanica* et de l'orientation de l'herbier (Ceccherelli *et al.*, 2000).

2.4.2. Menaces directes

Les causes directes consistent en l'arrachage des plantes par des engins de pêche ou des mouillages de bateaux ou la destruction des faisceaux par utilisation d'explosifs.

Les chaluts de fond constituent la principale menace directe sur les herbiers de Méditerranée. En effet, bien que la législation interdise l'utilisation de ces engins sur les fonds de moins de 50 m ou à proximité des côtes, ils n'en restent pas moins utilisés (Boudouresque, 1996). Ils affectent alors essentiellement la limite inférieure de l'herbier (Francour, 1997).

Le mouillage des bateaux ancres (corps morts isolés et chaînes mères, corps morts et pontons flottants) peut aussi engendrer des nuisances directes sur les herbiers (Boudouresque *et al.*, 2006).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

3. Matériel et Méthodes

3.1. Localisation et caractéristiques du site d'étude

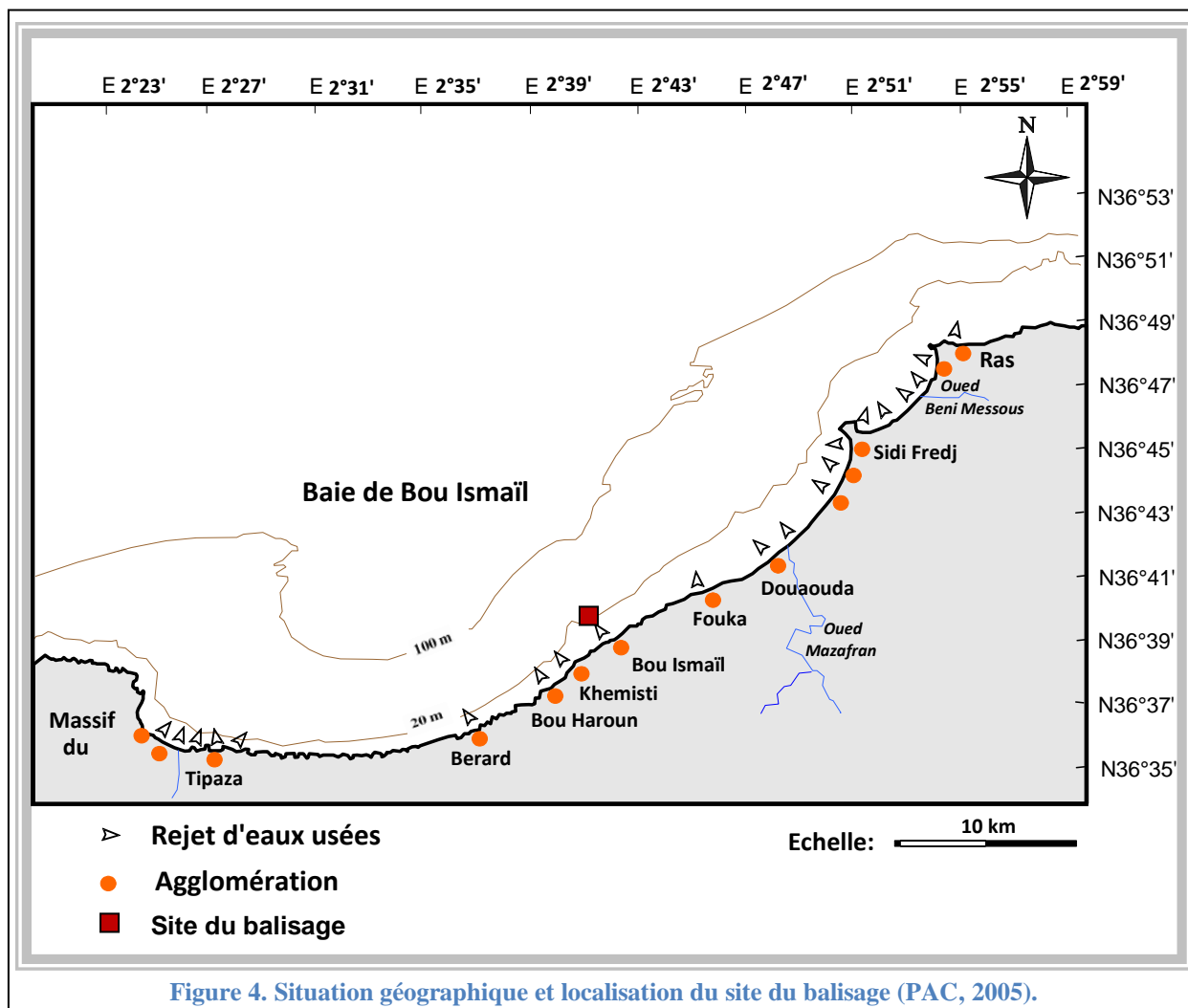


Figure 4. Situation géographique et localisation du site du balisage (PAC, 2005).

L'étude est menée dans un site situé au milieu de la baie de Bou Ismaïl, le balisage de la limite inférieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* a été mis en place en juillet 2007, à 1 km au large du Front de mer de la ville de Bou-Ismaïl (Bengrine et Guelmami, 2007). Les coordonnées géographiques du balisage sont les suivantes : Latitude Nord 36°39.431' / Longitude Est 2°41.120' (Figure 4). Le balisage a été mis en place dans un site sensible, soumis à plusieurs sources de nuisances. Les aménagements et restructurations du littoral : les perrés et murs de soutènement au-dessus de la plage, la route de bord de mer, les nombreuses habitations et les épis de protection perpendiculaires à la côte. Les rejets domestiques de la ville, qui se déversent directement dans le milieu naturel sans traitement préalable et les ruissellements des domaines agricoles qui se trouvent directement en contact avec le littoral. Par ailleurs, la ville de Bou-Ismaïl est la plus industrialisée de la Wilaya de Tipasa. Elle accueille en effet une zone industrielle située au sud-est de la ville, qui compte de nombreuses usines, dont l'unité

de transformation du papier « Tonic » ; qui déversent leurs rejets directement en mer, sans traitement préalable. Ces rejets ont pour conséquence une augmentation de la turbidité moyenne de l'eau qui se traduira à terme par une régression de l'herbier à *Posidonia oceanica*, régression déjà signalée par (Braïk, 1989). A noter également, la proximité à l'ouest de la ville de deux ports : le port de Khemisti et le port de Bouharoun. Récemment, une usine de dessalement de l'eau de mer a été implantée à l'est de la ville.

L'herbier à *Posidonia oceanica* s'étend entre 5 et 25m de profondeur en moyenne, son extension vers le large est freinée par les remaniements sous-marins auxquels est soumise cette zone à forte pente Braïk (1989). L'herbier se développe sur un substrat rocheux recouvert d'une couche de sable d'origine biogène traduisant un faible apport sédimentaire, surtout en sable fin. La présence de structures érosives (chenaux, intermattes, etc) au sein de l'herbier résulte de l'exposition de ce site aux vents dominants : qui sont de secteur nord-est et est en été et de nord-ouest à nord-nord-ouest en hiver (Braïk, 1989). L'herbier à *Posidonia oceanica* est un herbier de site exposé selon la classification de Blanc et Jeudy De Grissac (1978).

3.2. Suivi de la limite inférieure de l'herbier de Bou Ismaïl

La position de la limite inférieure est contrôlée par la mise en place, au contact de l'herbier, de balises en béton.

Le balisage de la limite inférieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* de Bou Ismaïl est constitué par une douzaine de balises, espacées de 5 m les unes des autres. Les balises utilisées sont des blocs en béton de forme tronconique dont le diamètre moyen est de 30 cm, pour une hauteur de 17 cm et un poids d'environ 23 kg. Ces dernières sont ancrées sur le substrat à l'aide de trois tiges métalliques, d'une longueur de 50 cm. Chacune des balises est numérotée et est pourvue d'un flotteur numéroté relié à un anneau métallique fixé au centre de la balise, pour faciliter son repérage ultérieur. La profondeur de chaque balise a été relevée et les orientations des balises les unes par rapport aux autres, sont également relevées. Des photographies de l'herbier en arrière des balises, sont réalisées à partir d'un point dont la distance et la position par rapport à la balise sont connues. La caractérisation de cette limite est faite en fonction de la typologie de Meinesz et Laurent (1978). Plusieurs paramètres permettant d'évaluer la vitalité de l'herbier ont été étudiés lors de la mise en place du balisage, en 2007 (Bengrine et Guelmami, 2007) et seront pris en compte en totalité lors de ce suivi.

3.3. Méthodes d'étude *in situ*

Les opérations de suivi du balisage de l'herbier à *Posidonia oceanica* se sont déroulées du 12 au 15 Juillet 2010. Au total, 7 plongées sont effectuées à des profondeurs comprises entre 19 et 21 m. La durée moyenne des plongées est de 35 min, soit une durée totale de 4h 40 min.

12/07/2010

Repérage du balisage, en s'appuyant sur les données des coordonnées GPS des balises 1, 6 et 12. Contrôle de la position des balises et repositionnement avec précision de celles qui ont été déplacées.

13/07/2010

Remplacement des plaquettes de PVC et des flotteurs numérotés et renforcement de leur ancrage. Prélèvement de faisceaux de Posidonies et de sédiment.

14/07/2010

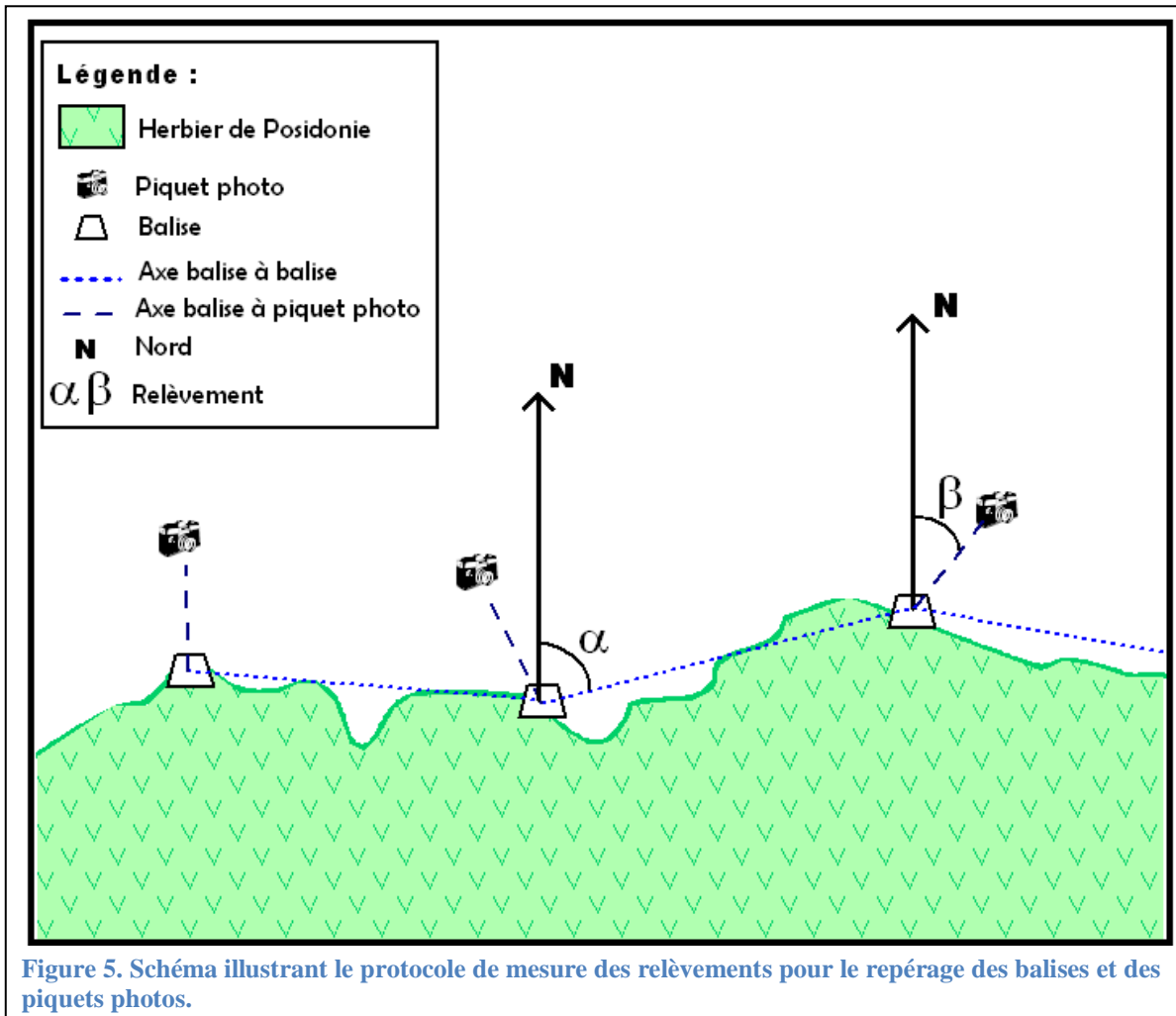
Mesure de densité et de recouvrement, prise de vues des balises et film vidéo.

15/07/2010

Renforcement de l'ancrage de certaines balises et mesure de leur profondeur.

3.3.1. Position des balises

Les relèvements des axes « balise à balise » et « balise à piquet-photo » sont vérifiés à l'aide d'un compas immergeable (précision $\pm 5^\circ$) (Figure 5). Les relèvements de 2007 (état zéro) et les distances de balise à balise (5m) servent d'indication pour repositionner avec précision les balises déplacées.



3.3.2. Profondeur des balises

La profondeur de chaque balise est mesurée à l'aide d'un profondimètre électronique (précision $\pm 10\text{cm}$). Ces mesures permettront de noter une éventuelle érosion ou inversement un apport de sédiment au niveau de la limite de l'herbier.

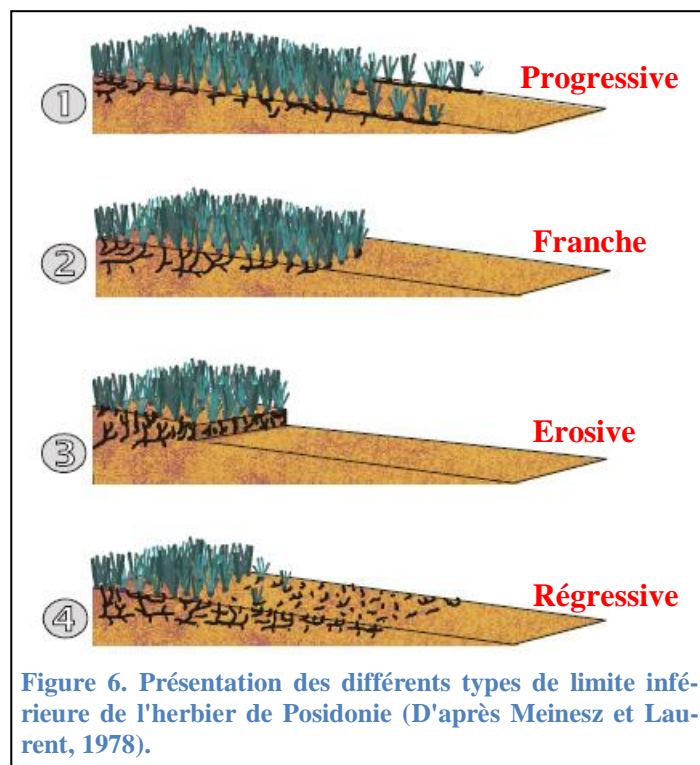
3.3.3. Prises de vues

Afin de caractériser au mieux la structure de la limite inférieure, des prises de vue horizontales sont réalisées à partir des piquets photos, soit deux photos par balise : une excentrée à droite et l'autre excentrée à gauche. Elles seront assemblées pour constituer une vue panoramique qui servira pour visualiser les modifications éventuelles de la limite par rapport à l'état initial. Des photographies verticales sont également prises, de sorte à faire apparaître deux balises sur le même cliché, pour reconstituer avec précision la totalité de la limite, en tenant compte d'informations supplémentaires : matte morte, sable, tache d'herbier..., qui seraient passées inaperçues avec les photographies horizontales. Ces prises de vues sont complétées par une vidéo effectuée en suivant la limite inférieure, ce qui offre la possibilité de décrire

précisément le biotope en avant et en arrière de l'herbier et évite alors des interprétations *in situ*, pouvant être longues du fait de la difficulté à avoir une vue d'ensemble du balisage en plongée (Pergent *et al.*, 2008).

3.3.4. Identification du type de limite

La limite inférieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* peut se présenter sous différents aspects en fonction des conditions du milieu (lumière, hydrodynamisme, ...) (Pergent *et al.*, 2008). Il existe 4 types de limites : limite progressive, brusque, érosive ou régressive (Figure 6).



La limite progressive (Figure 6-1), caractérisée par la présence de rhizomes plagiotropes, disposés de façon parallèle à la pente, sans édification de matte. Ce type de limite traduit une amélioration de la transparence des eaux.

La limite franche (Figure 6-2), caractérisée par la présence de rhizomes généralement orthotropes, sans édification d'une véritable matte, avec absence de matte morte en aval de la limite. Ce type de limite traduit des conditions de milieu stabilisées.

La limite érosive (Figure 6-3), caractérisée par un tombant de matte qui marque la limite de l'herbier et du sédiment. Les courants de fond érodent l'herbier et interdit toute progression vers de plus grandes profondeurs.

La limite régressive (Figure 6-4), caractérisée par la présence d'une étendue de matte morte, recouverte ou non par le sédiment, en aval de la limite de l'herbier. Quelques faisceaux de feuilles, témoins de l'ancienne position de l'herbier, subsistent en aval de la limite actuelle. Ce type de limite traduit une régression d'herbier.

Dans un second temps la nature du fond en aval du balisage sera également décrite, en prenant en compte certains paramètres, comme la présence de matte morte, de ripple-marks, et la nature du substrat, afin de permettre d'évaluer, par la suite, l'évolution de l'herbier de *Posidonia*.

3.3.5. Estimation du recouvrement de l'herbier

Le recouvrement correspond au pourcentage de couverture du substrat par l'herbier à *Posidonia oceanica* vivant, par rapport aux zones non couvertes (sable, matte morte, roche). Le recouvrement varie en fonction de la vitalité de l'herbier, de la profondeur, de la saison, et de l'hydrodynamisme (Bonhomme *et al.*, 2002). De nombreux facteurs peuvent biaiser l'estimation du recouvrement, liée d'une part à l'observateur (son expérience) et d'autre part à des paramètres extérieurs tels que la visibilité, la saison (surévaluation en période estivale où les feuilles sont plus longues) et la structure de l'herbier (Charbonnel *et al.*, 1995).

Le pourcentage de recouvrement est estimé en disposant en amont de chaque balise un cadre de 1m de côté divisé en 4 carrés. Trois mesures sont effectuées en amont de chaque balise, à environ 3 m au-dessus du fond. Les valeurs moyennes obtenues sont ensuite confrontées à l'échelle d'évaluation du recouvrement établie par Charbonnel *et al.* (2000) (Tableau 2).

Tableau 2. Echelle de classification du recouvrement de l'herbier de Posidonie (D'après Charbonnel *et al.*, 2000).

Pourcentage de recouvrement		
Limite supérieure	Limite inférieure	Interprétation
Inferieur a 40%	Inferieur a 20 %	Faible recouvrement
De 40 % à 80 %	De 20 % à 50 %	Recouvrement moyen
Supérieur à 80 %	Supérieur à 50 %	Fort recouvrement

3.3.6. Mesure de la densité de l'herbier

La densité correspond au nombre de faisceaux par mètre carré et varie en fonction de la profondeur et des conditions du milieu (Descamp *et al.*, 2007). Elle est estimée par des comptages *in situ* à l'intérieur d'un cadre de 60 cm de côté subdivisé en carrés de 20 cm déposé au contact de la balise (Pergent *et al.*, 2005). Pour chaque balise, 3 comptages sont réalisés au niveau de 3 carrés choisis au hasard à l'intérieur du carré. Ces mesures permettent de classer l'herbier selon deux grilles de lecture établies par Giraud (1977) (Tableau 3) et par Pergent *et al.* (1995) (Tableau 4). La première est descriptive et la seconde intègre la profondeur.



Figure 7. Mesure de la densité, en utilisant un cadre de 60 cm de côté subdivisé en carrés de 20 cm, en limite inférieure de l'herbier de Bou Ismail.

Tableau 3. Classification de l'herbier de Posidonie selon la densité de faisceaux de feuilles au m² (D'après Giraud 1977).

Densité par m ²	Type d'herbier
plus de 700 faisceaux / m ²	Type I, herbier très dense
de 400 à 700 faisceaux / m ²	Type II, herbier dense
de 300 à 400 faisceaux / m ²	Type III, herbier clairseme
de 150 à 300 faisceaux / m ²	Type IV, herbier très clairseme
de 50 à 150 faisceaux / m ²	Type V, semi herbier
moins de 50 faisceaux / m ²	Faisceaux isolés

Tableau 4. Classification de l'herbier en fonction de la profondeur (intervalle entre 19 et 20m). DA = densité anormale, DSI = densité sub-normale inférieure, DN = densité normale, DSS = densité sub-normale supérieure (D'après Pergent *et al.*, 1995).

Prof. (m)	DA	DSI	DN	DSS
19	←74	↔	186↔410	→
20	←61	↔	173↔397	→
21	←48	↔	160↔384	→
22	←37	↔	149↔373	→

3.3.7. Déchaussement des rhizomes

Le déchaussement des rhizomes traduit généralement l'existence d'un déficit sédimentaire au niveau de l'herbier. La mesure de ce paramètre permet donc d'apprécier rapidement et assez précisément l'hydrodynamisme d'une zone (Denis *et al.*, 2003).

Pour les rhizomes plagiotropes, le déchaussement est la distance qui sépare le sédiment de la partie inférieure des rhizomes. Pour les rhizomes orthotropes, le déchaussement est la distance qui sépare le sédiment de la base des feuilles, distance à laquelle on soustrait 2 cm. Le déchaussement est mesuré à la base des faisceaux, avec 3 mesures réparties de façon aléatoire derrière chaque balise (Boudouresque *et al.*, 1980). L'échelle d'évaluation du déchaussement utilisée est celle de Charbonnel *et al.* (2000) (Tableau 5).

Tableau 5. Echelle d'évaluation du déchaussement en fonction des valeurs moyennes mesurées le long du balisage (D'après Charbonnel *et al.*, 2000).

Déchaussement (valeurs seuils)	Interprétation
Inférieur à 5 cm	Déchaussement faible
5-15 cm	Déchaussement moyen
Supérieur à 15 cm	Déchaussement important

3.3.8. Prélèvements

Trente rhizomes (30) orthotropes sont récoltés, distants de 50 cm à 1m les uns des autres, afin de récolter des individus appartenant à des rhizomes plagiotropes différents (Pergent, 1987). Les rhizomes récoltés sont conservés dans de l'eau formolée à 10%. Ils serviront à l'étude des paramètres lépidochronologiques, phénologiques et de la biomasse.

Pour l'étude granulométrique, du sédiment est prélevé en aval de l'herbier au niveau des piquets photos P1, P6 et P12 ; à l'aide d'une boîte cylindrique sans fond, avec à l'une de ses extrémités un sachet en plastique retenu par un élastique. La boîte est enfoncée horizontalement dans le sédiment sur une épaisseur d'environ 10cm.

3.4. Etudes associées

3.4.1. Analyse lépidochronologique

3.4.1.1. Définition

Quand les feuilles de *Posidonia oceanica* meurent, le limbe se détache et tombe, alors que sa base foliaire appelée pétiole reste rattachée au rhizome ; il est alors désigné sous le nom d'écaille (Grenier, 1860). Les écailles peuvent persister plusieurs millénaires au sein de la matre, car peu putrescibles (Boudouresque *et al.*, 1980).

L'épaisseur des écailles ainsi que plusieurs paramètres anatomiques varient de façon cyclique en fonction de leur rang d'insertion sur le rhizome (Crouzet, 1981 ; Pergent, 1990). La lépidochronologie, technique relativement assimilable dans son principe à la dendrochronologie, est l'étude de ces variations cycliques (Pergent, 1993).

L'évolution au cours du temps de l'épaisseur de la dernière écaille apparue à l'apex du rhizome est un phénomène cyclique. Les écailles « fines » apparaissant à la fin de l'hiver ou au début du printemps, tandis que les écailles épaisses apparaissent en automne. Le terme « année lépidochronologique » définit la période de temps comprise entre deux minima d'épaisseur (Pergent, 1993).

La possibilité, en particulier, de délimiter le long des rhizomes des tronçons correspondant exactement à une année et la possibilité d'identifier cette année, permet d'évaluer : la vitesse de croissance, la production des rhizomes et le nombre de feuilles produites chaque année.

3.4.1.2. Mode opératoire

Les écailles sont détachées soigneusement du rhizome en respectant l'ordre distique de leur insertion, la dissection se fait des plus anciennes aux plus récentes. Les écailles sont numérotées, en fonction de leur position sur le rhizome : l'écaille se trouvant juste en dessous de la feuille vivante porte le N°1. Leur rang augmente donc des plus récentes aux plus anciennes. La position des minima et des maxima d'épaisseur est notée pour chaque rhizome. Le rhizome est coupé au niveau de l'insertion de l'écaille fine. Nous obtenons ainsi une série de tronçons de rhizome, délimités par deux minima d'épaisseur et correspondent chacun à une année (Pergent, 1993) (Figure 8). Ils sont ensuite mesurés et placés dans une étuve (70°C, 72h), puis pesés sur une balance de précision (DENVER instrument M-220D).

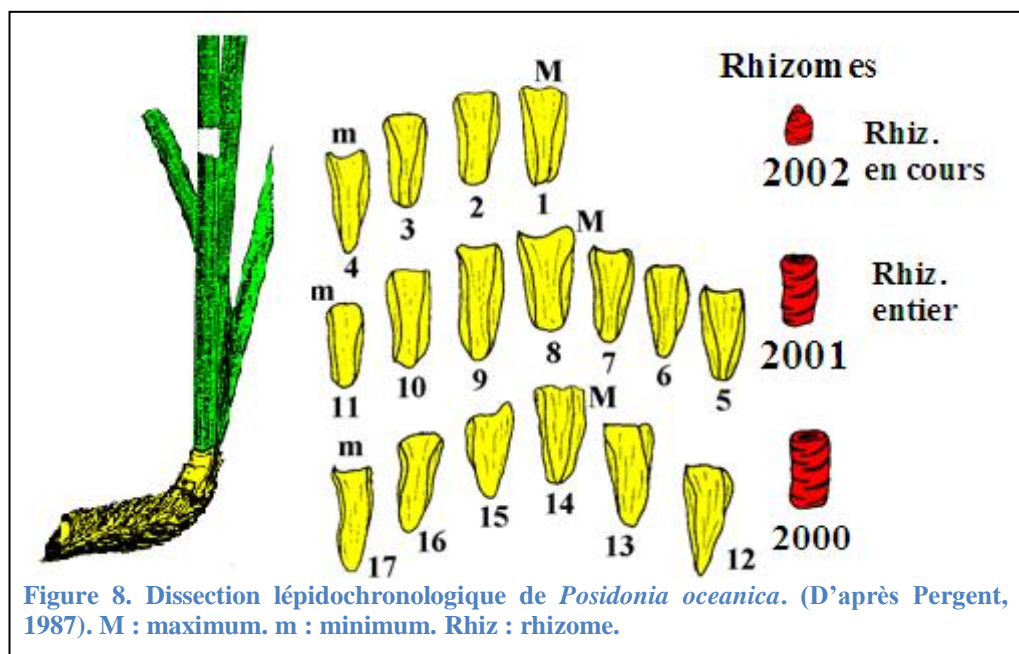


Figure 8. Dissection lépidochronologique de *Posidonia oceanica*. (D'après Pergent, 1987). M : maximum. m : minimum. Rhiz : rhizome.

Une grille de lecture proposée par Pergent *et al.* (2008), intégrant cinq niveaux de qualité et se basant sur les données de la littérature, sera utilisée pour évaluer les données concernant la croissance des rhizomes et la production foliaire (Tableau 6).

Tableau 6. Interprétation de la production foliaire et de l'allongement des rhizomes d'après Pergent, 2008.

	Très bon	Bon	Normal	Médiocre	Mauvais
Nombre de feuilles	> 9,0	8,9-8,0	7,9-7,0	6,9-6,0	< 5,9
Croissance des rhizomes (mm)	> 11,0	10,9-8,0	7,9-5,0	5,0-2,0	< 1,9

3.4.2. Analyse phénologique

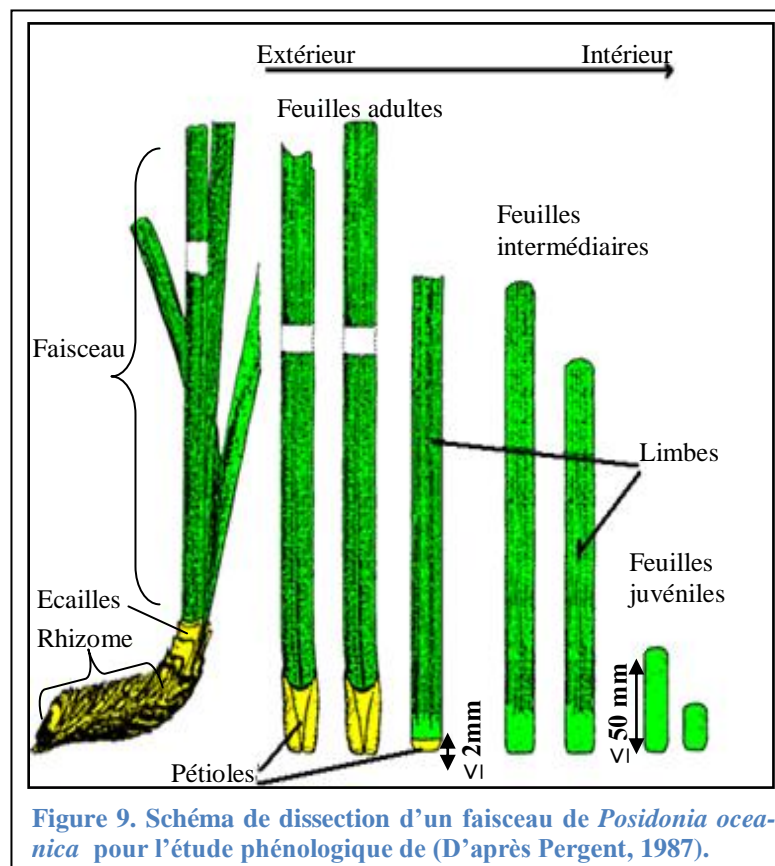
Les caractères morphologiques et l'âge des feuilles diffèrent selon la position de la feuille dans le faisceau. Les feuilles situées à la périphérie sont plus âgées que celles formées au centre du faisceau (Figure 9). Le faisceau foliaire est séparé du rhizome et décortiqué en respectant l'ordre distique d'insertion des feuilles. Les feuilles sont ensuite séparées en fonction de leur âge, selon le protocole de Giraud (1979) :

- Les feuilles adultes, sont pourvues d'une base ou pétiole.
- Les feuilles intermédiaires, dépourvues de pétiole ou dont le pétiole est inférieur à 2 mm.
- Les feuilles juvéniles, dépourvues de pétiole et dont la longueur n'excède pas 50 mm.

Pour chaque feuille, des paramètres biométriques sont mesurés : la longueur totale, la largeur du limbe et la longueur du pétiole. Ces différentes mesures permettent de calculer :

- Le nombre moyen de feuilles adultes et intermédiaires par faisceau.
- La longueur moyenne des feuilles adultes et intermédiaires par faisceau.

- La largeur moyenne des feuilles adultes et intermédiaires par faisceau.
- La longueur moyenne des pétioles des feuilles adultes.
- Le Coefficient A de Giraud (1977), correspondant au pourcentage de feuilles ayant perdu leur apex (feuilles broutées ou brisées à cause de l'hydrodynamisme).
- La surface foliaire (SF), correspondant à la surface des feuilles par faisceau, elle est exprimée en $\text{cm}^2/\text{faisceau}$ (Drew et Jupp, 1976).
- L'indice foliaire (IF), correspondant à la surface des feuilles par mètre carré, obtenu en multipliant la surface foliaire par la densité (Drew, 1971).



3.4.3. Biomasse des feuilles et des épiphytes

Les feuilles de *Posidonia oceanica* constituent un substrat pour de nombreux épiphytes : Fucophycées, Rhodobiontes, Bryozoaires, Hydraires, etc (Boudouresque *et al.*, 2006). Leur biomasse présente un cycle saisonnier, avec un maximum de mars à septembre (Thélin et Bedhomme, 1983). Les faisceaux prélevés sont rincés à l'eau douce et les feuilles sont raclées, sur leurs deux faces, au moyen d'une lame de rasoir, pour en séparer les épiphytes. Le produit du raclage et les feuilles sont ensuite séchés à l'étuve pendant 72 heures à une température de 70°C (Bedhomme, 1981), puis pesés sur une balance de précision (DENVER instrument M-220D).

3.4.4. Granulométrie du sédiment

Tous les échantillons prélevés sont soumis au même protocole. Le sédiment est d'abord séché à l'étuve à 70°C pendant 48h. Il est ensuite débarrassé des éventuelles restes macroscopiques de Posidonie (rhizomes, feuilles mortes, écailles...) et une fraction de l'échantillon (200g environ) est passée sous l'eau dans un tamis de 63µm, afin d'éliminer la fraction pélitique. La fraction restante est séchée à l'étuve, puis pesée et sa granulométrie est réalisée mécaniquement pendant 20 min sur des tamis de diamètre **0,063 ; 0,125 ; 0,25 ; 0,5 ; 1 ; 2 et 4 mm**. Chaque refus de tamis est pesé et exprimé en pourcentage du poids total.

Les courbes des fréquences et fréquences cumulées sont construites avec en abscisse la dimension des diamètres des tamis avec une échelle logarithmique (Diamètre en $\phi = -\text{Log}_2$ (diamètre en mm)) et en ordonnée, les fréquences. La courbe cumulative permet de mesurer graphiquement la dimension des particules correspondant à un pourcentage donné et ainsi de calculer divers indices granulométriques (Tableau 7).

Tableau 7. Formules de calcul des indices granulométriques à partir des diamètres en ϕ .

Indice	Formule
Taille moyenne	$TM = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$
Triage	$DFI = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6}$
Asymétrie	$SKI = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$
Acuité des distributions	$KG = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2,44(\phi_{75} - \phi_{25})}$
Facteur hydrodynamique	$FH = KG - \frac{\phi_{75} - \phi_{25}}{2}$

La taille moyenne du sédiment (TM) exprimée en mm permet de donner une idée de l'éventail granulométrique propre à l'échantillon. Sept classes, en fonction de la taille du sédiment sont retenues (Weydert, 1973) :

- Inférieur à 0,063 mm : Pelites
- De 0,063 à 0,125 mm : Sables très fins
- De 0,125 à 0,250 mm : Sables fins
- De 0,250 à 0,500 mm : Sables moyens
- De 0,500 à 1,000 mm : Sables grossiers
- De 1,000 à 2,000 mm : Sables très grossiers
- De 2,000 à 20,000 mm : Graviers

La symétrie (SKI) traduit la tendance de répartition vers les grandes tailles ou les petites tailles (Krumbein, 1957) :

1 > SKI > 0,3	: Très forte asymétrie vers les particules fines
0,3 > SKI > -0,1	: Asymétrie vers les particules fines
0,1 > SKI > -0,1	: Quasi symétrie
-0,1 > SKI > -0,3	: Asymétrie vers les particules grossières
-0,3 > SKI > -1	: Forte asymétrie vers les particules grossières

L'angulosité de Folk ou coefficient d'acuité (**KG**), permet d'apprécier l'homogénéité de l'échantillon en relation avec l'intensité des actions hydrodynamique (Folk et Ward, 1957).

L'indice hydrodynamique (FH) donne une idée du transport sédimentaire. Si l'indice est négatif alors le sédiment est difficilement mobilisable, s'il est positif cela indique que le sédiment peut être mis en mouvement (Weydert, 1973).

Le triage de Folk (DFI), traduit les réponses du milieu sédimentaire vis-à-vis des apports ou des conditions hydrodynamiques (Folk et Ward, 1957) :

DFI < 0,35	: Très bien trié
0,35 < DFI < 0,50	: Bien trié
0,50 < DFI < 1	: Moyennement trié
1 < DFI < 2	: Peu trié
2 < DFI < 4	: Très peu trié
4 < DFI	: Pas trié

3.4.5. Traitement d'images

Lorsque le rendu des images est de qualité médiocre, du fait du manque de pénétration de la lumière et de l'absorption sélective des couleurs, à partir de 15 m de profondeur. Les images obtenues sont alors bien souvent sombres et tendent vers des teintes bleutées, il est donc nécessaire de traiter ces images en vue d'obtenir une meilleure vue de la limite. Les photos sont alors modifiées avec le logiciel Photoshop en corrigeant les teintes et les contrastes jusqu'à ce que la limite et les différents constituants de l'herbier soient bien visibles (Figure 10).

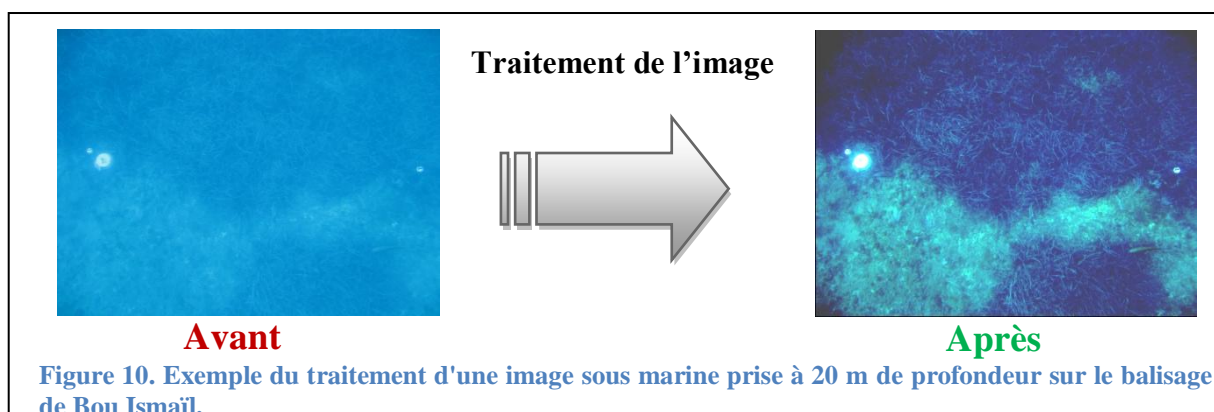
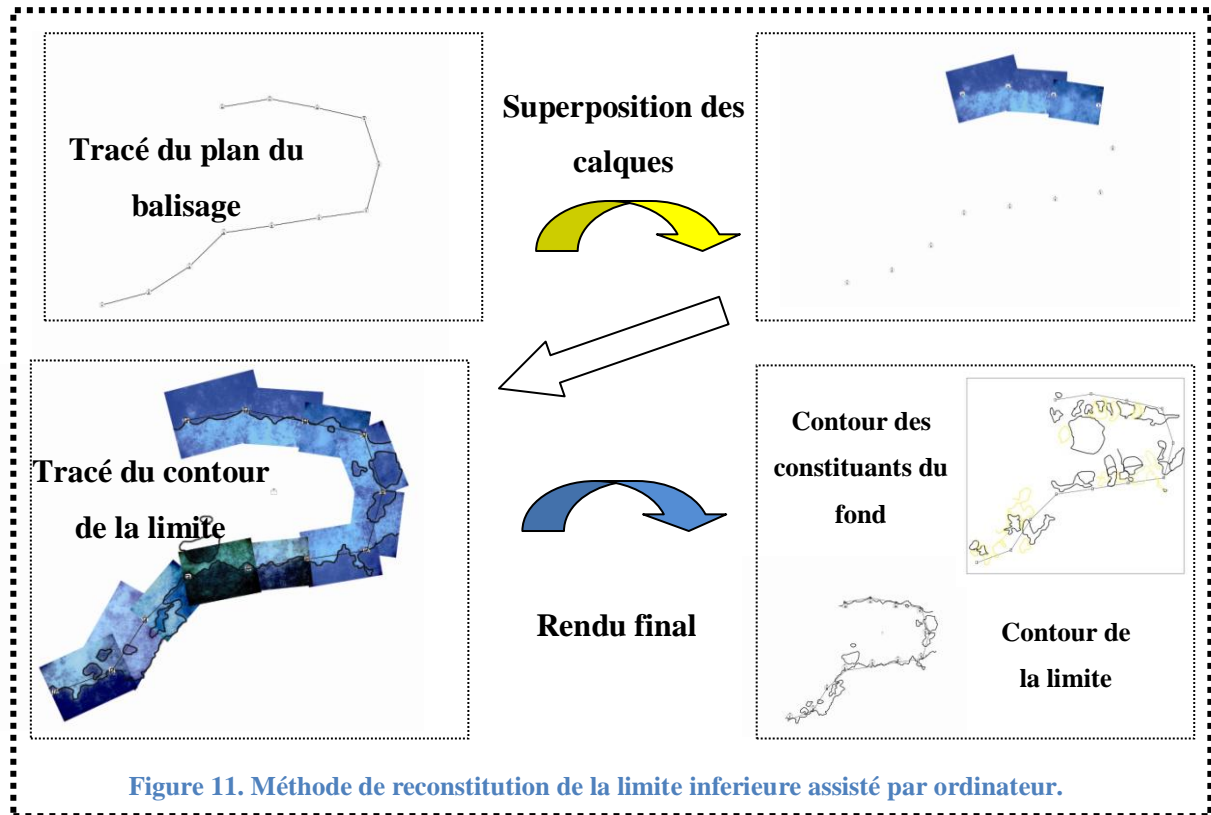


Figure 10. Exemple du traitement d'une image sous marine prise à 20 m de profondeur sur le balisage de Bou Ismaïl.

Pour représenter la limite inférieure il est nécessaire d'assembler les clichés des prises de vues verticales. Une fois les clichés et le plan de balisage sont exportés vers Photoshop, ils sont superposés sous forme de calques, en prenant comme repères les balises. Puis, le contour de la limite et les différents constituants du fond sont tracés en s'appuyant également sur les vidéos qui apportent des informations complémentaires (îlots isolés, nature du fond, ...) (Figure 11).



Enfin, la cartographie de la limite inférieure est établie, en exportant le rendu final des contours sur le logiciel Mapinfo, en ayant préalablement géoréférencé la carte. La carte est ensuite légendée en illustrant les différents biotopes rencontrés.

3.4.6. Traitements statistiques

Les tests statistiques utilisés, sont réalisés, à l'aide du logiciel **R. 2.10.1.**

3.4.6.1. Paramètres descriptifs

Les mesures effectuées sur le terrain ou au laboratoire sont réduites sous forme de quelques paramètres (moyenne, écart-type, intervalle de confiance) qui permettent de caractériser de façon simple les séries statistiques.

La moyenne arithmétique ($m = \sum \frac{x_i}{n}$) est un paramètre de position qui sert à caractériser l'ordre de grandeur des observations.

L'écart-type ($\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - m)^2}{n-1}}$) est un paramètre de dispersion qui permet de chiffrer les variations observées autour de la moyenne.

L'estimation de la moyenne est précisée par la détermination d'un intervalle de confiance ($IC = m \pm \frac{1,96\sigma}{\sqrt{n}}$) qui recouvre la véritable moyenne (Dagnelie, 1975).

3.4.6.2. Analyse de la variance

L'analyse de la variance à un seul facteur (one-way-analysis 'ANOVA') a pour but de comparer les moyennes de plusieurs populations (Dagnelie, 1975). Les données analysées par une ANOVA ont permis de mesurer l'interaction du facteur année sur la biométrie foliaire, la lépidochronologie et la biomasse des feuilles et des épiphytes.

Cette méthode est basée sur la comparaison de deux variances en calculant leur rapport, il est ensuite comparé à la valeur F donnée par la table de distribution F de FISCHER-SNEDECOR à 5%. Si la valeur de la table, correspondant au nombre de degrés de liberté, est inférieure à la valeur calculée, le facteur contrôlé est considéré comme introduisant des différences significatives (Schwartz, 1992). Les conditions d'application de l'ANOVA sont la normalité des distributions et l'homogénéité des variances.

3.4.6.2.1. Normalité des distributions

Les conditions théoriquement indispensables pour l'application de l'analyse de variance sont toutefois peu restrictives dans le cas d'effectifs importants, et ce, en raison de la rapide con-

vergence des distributions d'échantillonnage de la moyenne vers les distributions normales (Dagnelie, 1975). conditions théoriquement indispensables pour l'application de l'analyse de variance sont toutefois peu restrictives dans le cas d'effectifs importants, et ce, en raison de la rapide convergence des distributions d'échantillonnage de la moyenne vers les distributions normales (Dagnelie, 1975).

3.4.6.2.2. *Egalité des variances*

Pour contrôler l'égalité des variances, le test utilisé est celui de BARTLETT ; celui-ci s'applique indifféremment à des échantillons d'effectifs égaux ou inégaux. L'hypothèse nulle d'égalité des variances est rejetée si le χ^2 calculé est supérieur au χ^2 théorique donné par la table à 5%.

3.4.6.3. *Test du Khi-deux (χ^2)*

Pour mesurer l'interaction du facteur année sur le Coefficient A de Giraud, nous avons utilisé le test du χ^2 . Le test d'indépendance du χ^2 vise à déterminer si deux variables observées sur un échantillon sont indépendantes ou non. Ce test permet d'ajuster une distribution empirique à une distribution théorique. La valeur du χ^2 calculée est comparée à la valeur donnée par la table du χ^2 . L'hypothèse d'égalité des distributions est rejetée si le χ^2 calculé est supérieur au χ^2 donné par la table du Khi-deux à 5% correspondant au nombre de degrés de liberté.

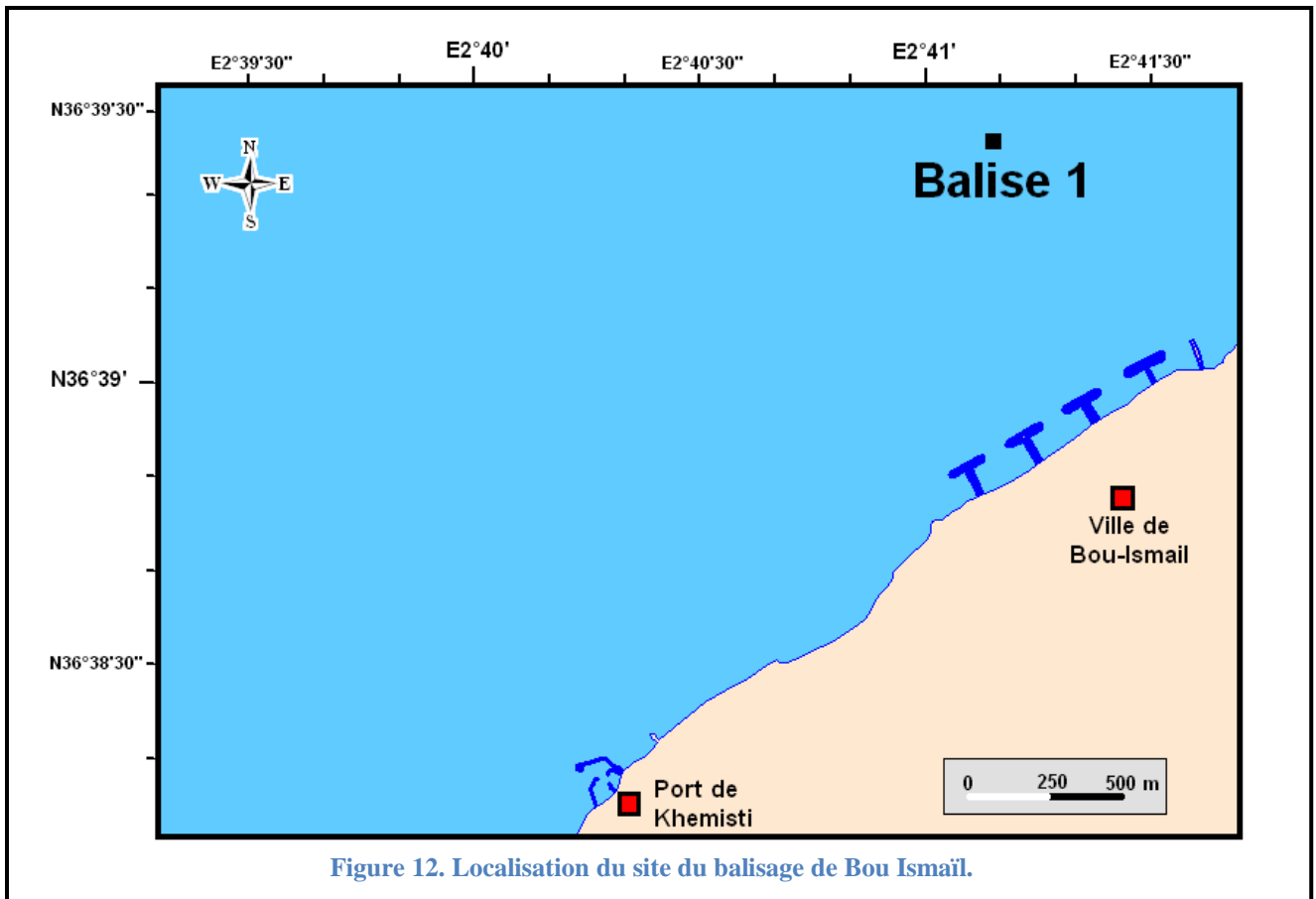
RÉSULTATS ET DISCUSSION

4. Résultats et discussion

4.1. Localisation et cartographie de la limite inférieure

4.1.1. Localisation du balisage

Dans le but de localiser le balisage avec précision, une image satellitaire de la zone d'étude est téléchargée à partir de Google Earth. Le trait de côte a été redessiné et la carte géo-référencée à l'aide du logiciel MAPINFO. Grâce aux coordonnées géographiques de la balise 1, le lieu précis du balisage a été positionné sur la carte. Deux points de repères sont également figurés sur la carte : les épis du Front de mer de la ville de Bou-Ismaïl et le port de Khemisti (Figure 12). Par ailleurs, signalons la présence de deux épis supplémentaires au niveau du Front de mer de la ville de Bou Ismaïl, par rapport à ceux déjà signalés par (Bengrine et Guelmami, 2007).



4.1.2. Position et profondeur des balises

Les relèvements « balise à balise » et « piquet photo à balise » mesurés lors de la mise en place du balisage en juillet 2007, ont servi de repère afin de repositionner de façon précise les balises déplacées (Tableau 8). Seules les balises 1, 2, 4 et 6 ont été retrouvées dans leur position

initiale. La balise 3, a par contre été déplacée et à du être replacée en tenant compte de son initial. Concernant le reste des balises, seuls les piquets d'encrage ont été retrouvés. De nouvelles balises portant les N° 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12 sont remplacées en prenant comme repère les relèvements mesurés lors de leur mise en place, en 2007. Les flotteurs ainsi que les ardoises numérotés sont également remplacés dans leur totalité, car les anciens étaient recouverts de salissures.

Tableau 8. Relèvement « balise à balise » et « piquet photo à balise » du balisage de Bou Ismaïl.

balise à balise	Relèvement	piquet-photo à balise	Relèvement
B2 à B1	75°	P1 à B1	330°
B3 à B2	30°	P2 à B2	350°
B4 à B3	45°	P3 à B3	310°
B5 à B4	80°	P4 à B4	360°
B6 à B5	80°	P5 à B5	30°
B7 à B6	80°	P6 à B6	10°
B8 à B7	15°	P7 à B7	5°
B9 à B8	342°	P8 à B8	235°
B10 à B9	280°	P9 à B9	210°
B11 à B10	280°	P10 à B10	190°
B12 à B11	260°	P11 à B11	220°
-	-	P12 à B12	180°

Les relèvements des balises ainsi que les distances entre les balises ont permis de réaliser le tracé du plan de balisage (Figure 13).

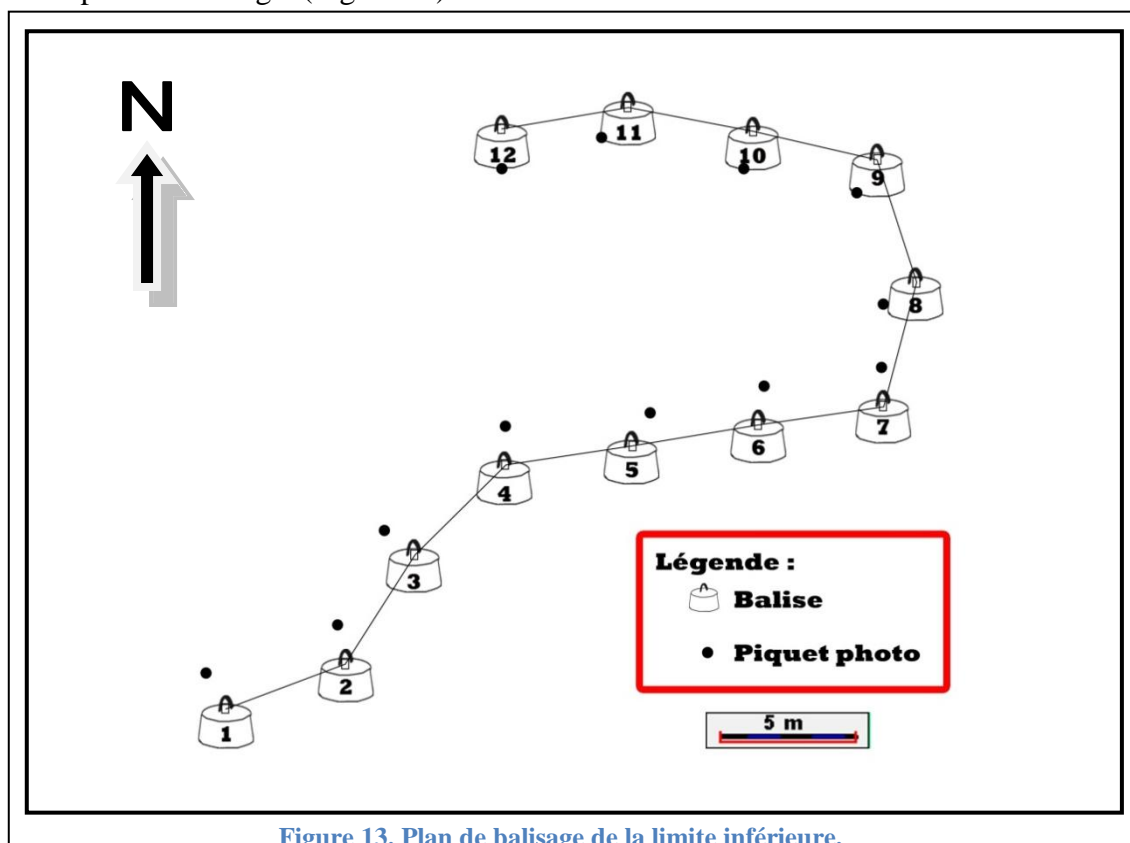


Figure 13. Plan de balisage de la limite inférieure.

La profondeur des balises retrouvées, n'a pas varié depuis leur mise en place en 2007 (Tableau 9). Quant à celles replacées dans leur position initiale, elles se situent toujours aux mêmes profondeurs, ce qui témoigne, à priori, de l'absence de mouvements sédimentaires. En effet, tout changement de profondeur, soit par l'envasement des balises ou au contraire leur déchaussement, témoignerait respectivement d'un apport ou départ de sédiment. Par ailleurs, la profondeur moyenne de la limite inférieure au niveau du balisage est de 20,9 m.

Tableau 9. Profondeurs relevées au niveau de chaque balise (Bou Ismaïl état zéro et suivi de 2010)

Balise	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
Profondeur (m)	21,2	21,2	21,1	20,8	20,9	20,9	20,9	20,7	20,6	20,9	20,8	20,7

4.1.3. Cartographie et description de la limite inférieure de l'herbier

Les photos, la vidéo et les observations réalisées *in situ*, ont permis d'établir une carte précise de la limite inférieure balisée, afin de la comparer à celle établie en 2007 (Figure 14).

La limite inférieure correspond à une limite érosive, selon la terminologie de Meinesz et Laurent (1978). Elle a déjà été identifiée en tant que telle en 2007, lors de la mise en place du balisage. Ce type de limite est la conséquence de l'hydrodynamisme qui règne dans ce secteur. Elle se caractérise par des rhizomes en majorité orthotropes, mais sans édification de matte. Les nouveaux contours de la nouvelle limite sont matérialisés par un trait continu vert et les anciens par un trait discontinu bleu. Il apparaît un recul net de l'herbier en arrière de la balise 8, estimé à 8 m environ vers l'est. Seuls trois îlots, vestiges de l'ancienne limite, subsistent au niveau de cette balise. Le reste de la limite ne montre pas de changements importants, les variations observées sur la carte sont dues à la précision plus importante de la nouvelle technique. L'herbier se développe sur un substrat dur et forme des plaquages sur roche, les rhizomes sont déchaussés et donc fragilisés par le manque de sédiment. Le fond en aval de l'herbier est essentiellement constitué de substrat rocheux recouvert de sable coquiller, sur lequel ce développent des gorgones ainsi que des macros-algues.

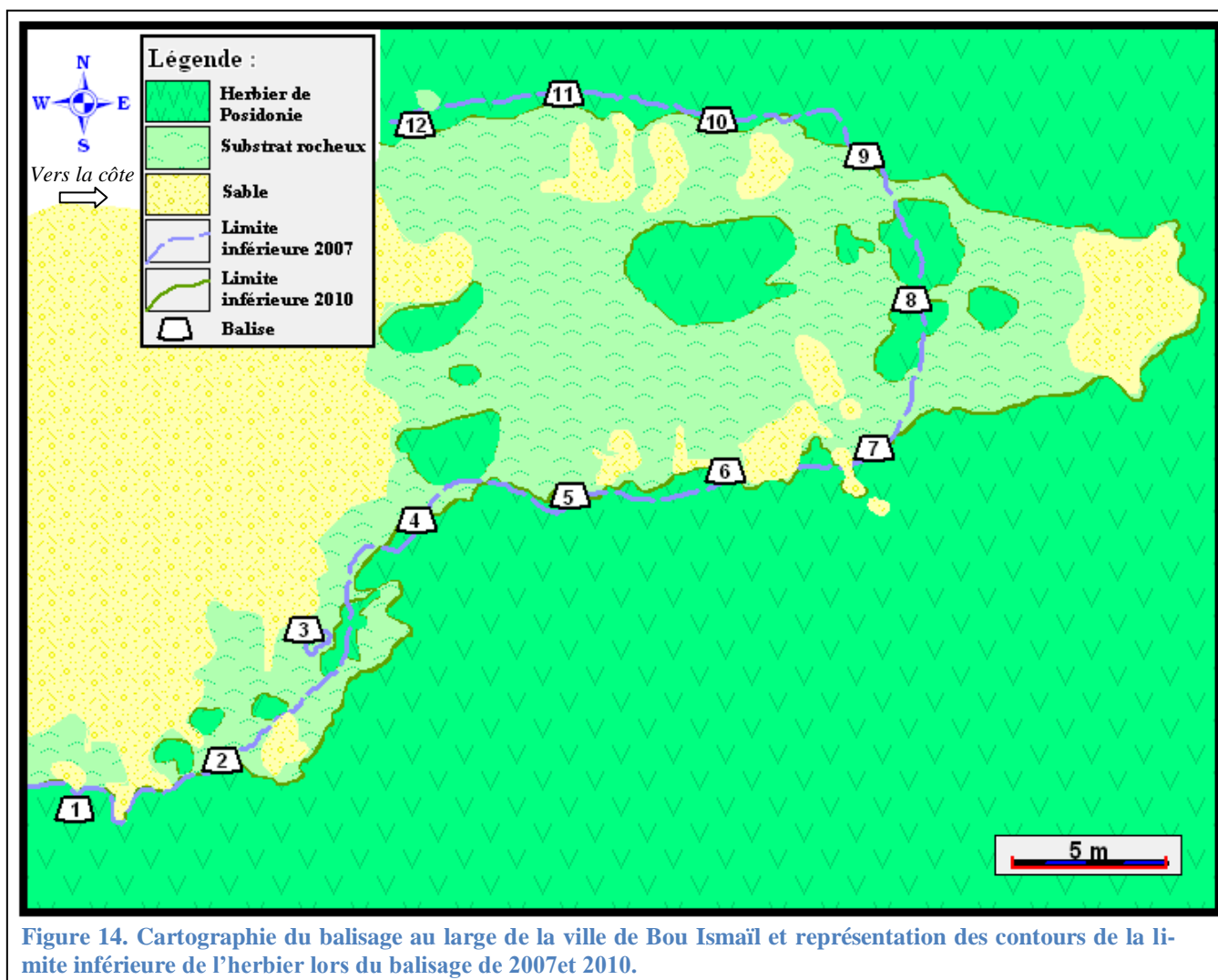


Figure 14. Cartographie du balisage au large de la ville de Bou Ismaïl et représentation des contours de la limite inférieure de l'herbier lors du balisage de 2007 et 2010.

Cette limite inférieure, en forme d'anse semble subir une importante érosion du fait de l'hydrodynamisme. En effet, ce secteur est exposé à un courant provoqué par les vents dominant de secteur ouest-nord-ouest (Braïk, 1989).

4.2. Caractérisation de l'herbier

4.2.1. Estimation du recouvrement

Les résultats de recouvrement moyens en amont de chaque balise sont consignés dans le tableau 10. Le recouvrement moyen de l'herbier au niveau de la limite inférieure est de 57,7 %, il correspond à un fort recouvrement pour une limite inférieure, selon Charbonnel *et al.* (2000). Le recouvrement est très variable d'une balise à l'autre, les valeurs oscillent entre 23 et 80%. Les plus faibles valeurs sont notées au niveau des balises B3 et B8, correspondant à un recouvrement moyen, selon la même échelle.

Par ailleurs, Il est important de noter que l'estimation du recouvrement est une évaluation subjective, susceptible de varier d'un observateur à l'autre.

Tableau 10. Estimation du recouvrement moyen en amont de chaque balise à Bou Ismaïl.

Balise	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
Recouvrement moyen (%)	75,8	76,7	24,2	80,0	78,3	76,7	82,5	23,3	49,2	46,7	41,7	37,5

4.2.2. Densité de l'herbier

La densité moyenne de l'herbier à l'arrière des différentes balises est consignée dans le tableau 11. La densité moyenne de l'herbier est de $161,1 \pm 24,2$ faisceaux / m². Elle fluctue selon les balises, entre 117 et 200 faisceaux / m². En fonction de cette moyenne, l'herbier est classé en herbier de type IV « herbier très clairsemé », selon Giraud (1977). Par ailleurs, en tenant compte de la classification proposée par Pergent *et al.* (1995), qui intègre la profondeur, l'herbier présente des valeurs moyennes de densités dites normales pour une profondeur moyenne de 21 m. Lors de la mise en place du balisage en 2007, la densité moyenne est estimée à 223 ± 47 faisceaux/m², soit une densité normale selon l'échelle de Pergent *et al.* (1995). Par ailleurs, si ces densités diffèrent de façon significative (ANOVA, $p < 0.05$), elles appartiennent toujours à l'intervalle des densités dites normales (160↔384) pour une telle profondeur (Pergent *et al.*, 1995)

Tableau 11. Moyenne des densités (nombre de faisceaux / m²) derrière chaque balise à Bou Ismaïl, 2007 et 2010.

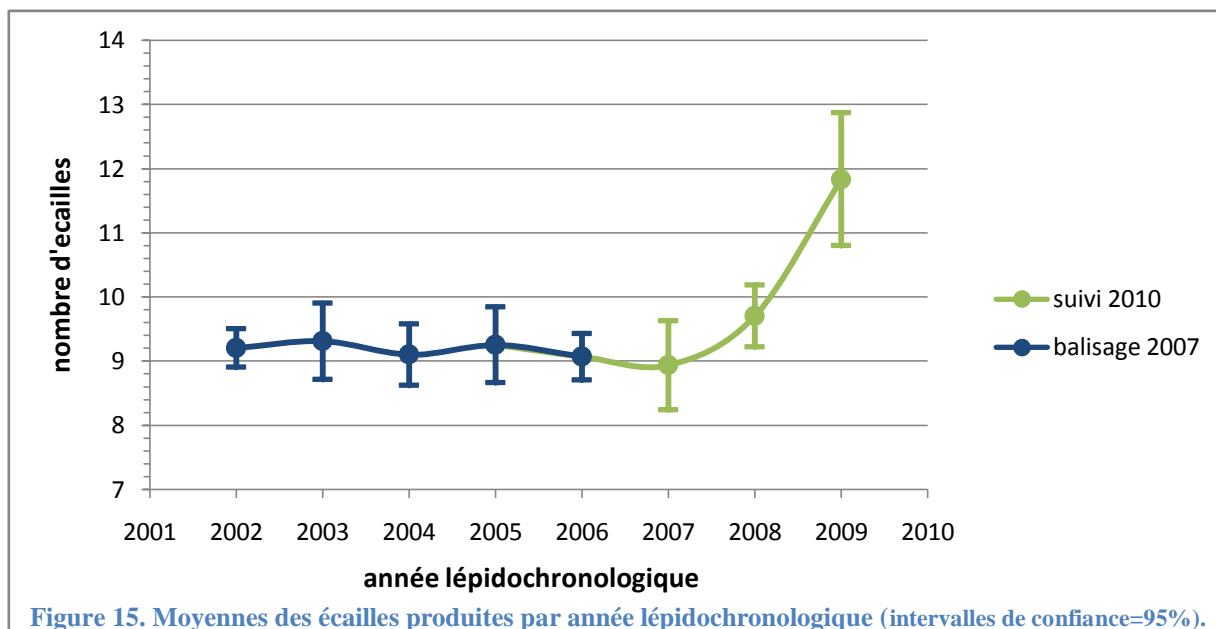
Balise	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
Densité 2010	200	158	183	175	133	167	117	192	150	158	158	142
Densité 2007	233	233	233	217	267	233	275	258	158	192	175	200

4.3. Lépidochronologie

4.3.1. Production foliaire

Le calcul du nombre d'écailles par année lépidochronologique permet de déterminer la production foliaire pour chaque année.

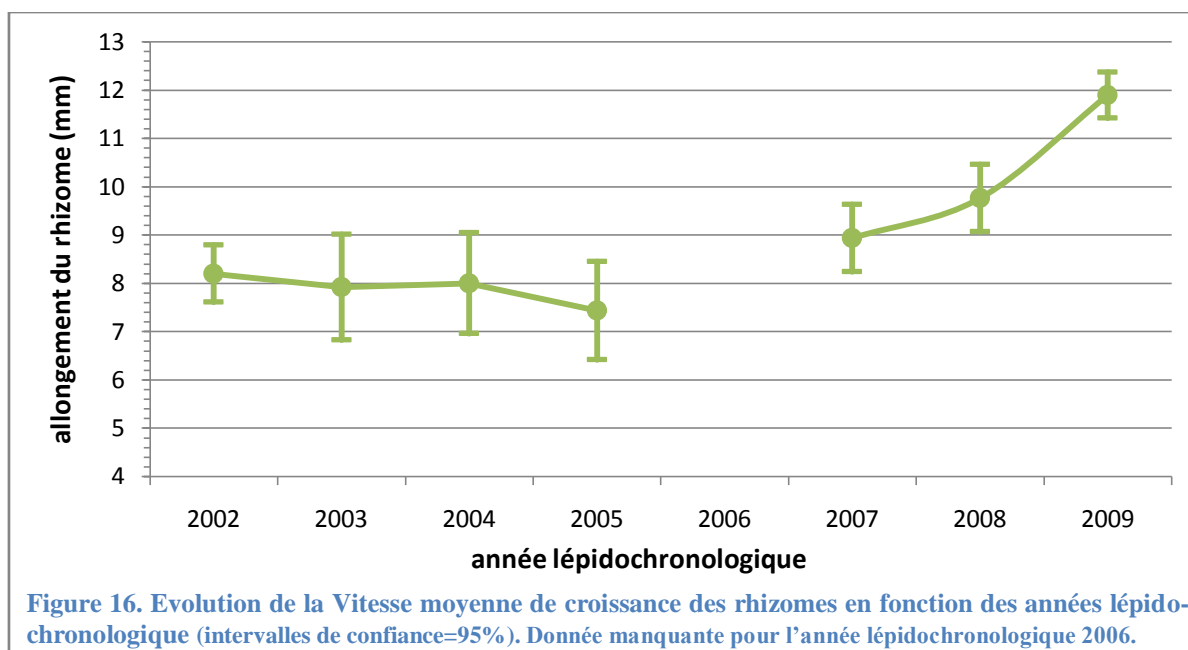
Le calcul du nombre d'écailles par année lépidochronologique permet de déterminer la production foliaire pour chaque année. Le nombre moyen de feuilles par faisceau, produites par an est de $10,2 \pm 2,5$, tandis qu'en 2007 il était de $9,2 \pm 1,3$. Ces valeurs sont significativement différentes (ANOVA, $P < 0.05$). Le nombre de feuilles produites par an est en augmentation depuis la mise en place du balisage en 2007. En effet, le nombre de feuilles produites par an est passé de 9 feuilles en moyenne par faisceaux en 2007 à 11.8 en 2010 (Figure 15).



D'après la grille de lecture proposée par Pergent *et al.* (2008), la production foliaire est considérée comme très bonne de 2002 à 2009.

4.3.2. Vitesse de croissance des rhizomes

L'allongement moyen des rhizomes par faisceau est de $8,2 \pm 2,9$ mm/an, cela correspond à un allongement considéré comme un bon, selon Pergent *et al.* (2008). Il est supérieur à celui calculé lors de la mise en place du balisage, en 2007, où la valeur moyenne était de $6,9 \pm 2,5$ mm/an (ANOVA, $p < 0.05$) (Figure 16).



D'après Boudouresque et Jeudy de Grissac (1984) un allongement supérieur à 7 cm reflète un apport sédimentaire important, pourtant cela ne semble pas le cas pour cette station.

En revanche selon Pergent-Martini (1994) une accélération de la vitesse de croissance des rhizomes peut également être en relation avec une augmentation de la production de feuilles. Or, justement pour les années 2008 et 2009 une augmentation de la production foliaire est enregistrée.

4.4. Paramètres biométriques

Les résultats obtenus ainsi que ceux obtenus en 2007 sont consignés dans le tableau 12, afin de déterminer les variations des différents paramètres biométriques.

Nombre de feuilles par faisceau : Le nombre moyen des feuilles globales (adultes + intermédiaires) par faisceaux est de $7,1 \pm 1$ et celui de 2007 est de $5,9 \pm 1,4$, avec une différence significative (ANOVA, $p < 0.05$).

Longueur des feuilles : La longueur moyenne des feuilles globales est de $523,6 \pm 73,7$, cette valeur est plus élevée que celle obtenue pour 2007 qui était de $460 \pm 76,5$; ces valeurs diffèrent de façon significative (ANOVA, $p < 0.05$). Les feuilles adultes sont significativement plus longues que celles mesurées en 2007 (ANOVA, $p < 0.05$). Inversement la longueur des feuilles intermédiaires ne présentent pas de différence entre les années 2007 et 2010 (ANOVA, $p > 0.05$)

Largeur des feuilles : La largeur moyenne des feuilles globales est de 10,5 mm pour 2010 et de 10,4 pour 2007, cette différence n'est pas significative (ANOVA, $p > 0.05$).

Coefficient A de Giraud : Le coefficient A est de 76,5 % pour les feuilles adultes et 12,2 % pour les feuilles intermédiaires. Ces valeurs ne diffèrent pas de façon significative avec celles obtenues en 2010 qui de 83,7% et 15,4%, respectivement pour les feuilles adultes et intermédiaires (χ^2 , $p > 0.05$).

Surface foliaire : La comparaison de la surface foliaire des feuilles globales entre 2007 et 2010, montre une différence significative (ANOVA, $p < 0.05$). Cette différence est bien marquée pour les surfaces foliaires des feuilles adultes. En revanche pour les feuilles intermédiaires, la différence n'est pas significative (ANOVA, $p > 0.05$).

Indice foliaire :

L'indice foliaire des feuilles globales est de $6.8 \pm 1,3$ m/m² en 2010 alors qu'il de 6.4 ± 1.6 en 2007. Ces valeurs ne diffèrent pas de façon significative (ANOVA, $p > 0.05$). En effet, cet indice est considéré comme un paramètre synthétique puisqu'il intègre à la fois le nombre de feuilles, leur longueur et leur largeur ainsi que la densité de l'herbier.

Tableau 12: Paramètres phénologiques de *Posidonia oceanica* au niveau de la limite inférieure, à Bou Ismail, Juillet 2007 (Bengrine et Guelmami, 2007) et Juillet 2010.

	Feuille adultes		Feuille intermédiaire		Feuille globales	
	2007	2010	2007	2010	2007	2010
Nombre de feuilles/ faisceau	3,3 ± 0,7	4,4 ± 0,8	2,6 ± 0,7	2,7 ± 0,4	5,9 ± 1,4	7,1 ± 1
Longueur des feuilles (mm)	575,7 ± 119,4	724 ± 104,5	339,1 ± 237,4	322,5 ± 94,1	460 ± 76,5	523,6 ± 73,7
Largeur des feuilles (mm)	10,4 ± 0,6	10,5 ± 0,5	10,0 ± 0,6	10,0 ± 0,7	10,2 ± 0,6	10,2 ± 0,5
Coefficient A (%)	83,7	76,5	15,4	12,2	52,3	48,13
Surface foliaire (cm²/faisceau)	199,2 ± 63,2	335,2 ± 80,7	88,6 ± 63,5	88,3 ± 29,6	287,3 ± 71,9	423,5 ± 83
Indice foliaire (m²/m²)	4,4 ± 1,4	5,4 ± 1,3	2,0 ± 0,8	1,4 ± 0,5	6,4 ± 1,6	6,8 ± 1,4

4.5. Biomasse des feuilles et des épiphytes

Les données de biomasse sont représentées dans le Tableau 13 et sont comparées à celles obtenues en 2007. La biomasse moyenne des feuilles adultes est significativement plus importante que celle obtenue 2007 (ANOVA, $p < 0.05$). Concernant les feuilles intermédiaires on retrouve des valeurs du même ordre de grandeur (ANOVA, $p > 0.05$). Quant à la biomasse des épiphytes, celle-ci est plus importante quel que soit le type de feuilles (ANOVA, $p < 0.05$).

Tableau 13. Biomasse moyenne des feuilles et des épiphytes des feuilles pour les mois de Juillet 2007 et 2010.

	Année	Biomasse des épiphytes		Biomasse des feuilles	
		mg Ps/fsc	g PS/m ²	mg Ps/fsc	g PS/m ²
Feuille adultes	2010	401,2 ± 177,7	64,69 ± 28,6	2240 ± 800,1	360,65 ± 128,81
	2007	159,8 ± 165,5	35,5 ± 36,9	862,8 ± 286,1	192,4 ± 63,8
Feuilles intermédiaires	2010	35,9 ± 61,8	5,77 ± 9,95	307,2 ± 120,5	49,46 ± 19,4
	2007	13,5 ± 16,6	3,0 ± 3,71	234,8 ± 115,0	57,8 ± 34,1
Feuilles globales	2010	437,1 ± 182,2	70,4 ± 29,3	2547 ± 802,6	410,4 ± 129,3
	2007	145,4 ± 88,7	32,4 ± 19,8	1167,5 ± 315,7	260,3 ± 70,4

4.6. Granulométrie du sédiment

L'analyse granulométrique du sédiment prélevé en aval du balisage a permis d'obtenir des courbes de fréquences cumulatives (annexes), elles ont des allures sigmoïdes et unimodales. Elles diffèrent d'un échantillon à l'autre. Le sédiment est de nature coquiller, il semble s'agir d'un sédiment majoritairement biogène autochtone.

La taille moyenne (TM) révèle qu'il s'agit d'un sable grossier, la symétrie du sédiment (SKI) pour les piquets photos 6 et 12 est considérée comme quasi symétrique, en revanche pour le piquet photo 1 celui-ci tend vers les particules grossières. Pour les sédiments analysés en 2007, la symétrie du sédiment du piquet 6 tendait vers les particules grossières et pour le pi-

quet 12 vers les particules fines. Concernant le tri du sédiment (DFI) il est évalué comme peu trié pour les piquets 6 et 12 et moyennement trié pour le piquet 1 cela reflète un hydrodynamisme turbulent. Les valeurs de l'indice hydrodynamique (FH), sont similaires pour les années 2010 et 2007, sont toutes positives. Elles indiquent que le sédiment présente une aptitude au transport et qu'il est facilement mobilisable.

La fraction pélitique (<63 μ m) est très faible, inférieure à 5%, pour les 3 prélèvements que ce soit pour 2010 que pour 2007.

La fraction fine (63-500 μ m) est inférieure à 6 % pour les échantillons des piquets photos 1 et 6, pour celui du piquet 12 cette fraction est un peu plus importante avec une valeur de l'ordre de 18%. En 2007, cette fraction était du même ordre de grandeur pour les piquets photos 1 et 12 en revanche pour le piquet 6 le pourcentage de particule fine était plus important. Cette mesure est cohérente étant donnée l'importance de l'action hydrodynamique, qui ne permet pas aux particules fines de se déposer.

La fraction moyenne (500-2000 μ m) est la plus représentée sur l'ensemble des échantillons, et cette proportion est particulièrement importante au niveau du piquet photo 1 où elle représente 80% du sédiment.

Concernant la fraction grossière (> 2000 μ m) elle est différente d'un échantillon à l'autre. Pour l'échantillon prélevé au niveau du piquet photo 1 cette fraction est faible, avec seulement 16,13%. En revanche au niveau du piquet photo 6, la proportion est beaucoup plus importante avec 44,28 %). En 2007, les pourcentages de cette fraction étaient plus importants au niveau des piquets photos 1 et 6.

Tableau 14. Principaux indices granulométrique calculés pour le sédiment prélevé au niveau des piquets photos.

Indice	Piquet photo 1		Piquet Photo 6		Piquet Photo 12	
	2007	2010	2007	2010	2007	2010
TM	1,75	1,06	1,34	1,80	3,05	1,07
DFI	1,26	0,85	1,32	1,00	1,89	1,38
SKI	-0,37	-0,31	-0,14	-0,03	0,22	0,05
KG	0,98	1,00	1,42	0,92	1,01	1,19
FH	0,13	0,42	0,68	0,19	-0,28	0,34
fraction grossière (%)	27,58	16,13	20,68	44,28	50,13	24,60
fraction moyenne (%)	65,37	80,04	66,73	52,19	33,58	57,71
fraction fine (%)	5,91	3,83	10,72	3,53	14,76	17,69
fraction pélitique (%)	2,08	1,79	4,81	1,31	4,73	3,32

4.7. Examen et comparaison des prises de vues photographiques

Les photographies prises durant le suivi de 2010 sont assemblées pour chaque balise pour former une vue panoramique, et elles sont comparées à celles prises en 2007 afin d'observer les modifications de la limite. Bien que les images ont étaient prises à la même distance qu'en 2007, celles-ci sont plus larges du fait de la différence d'angle de l'objectif de l'appareil photo. Pour les prochains suivis, il faudra utiliser le même type d'objectif, ici il s'agit d'un 25 mm « grand angle ».

Balise 1

Cette balise n'a pas bougé depuis 2007, la limite semble avoir légèrement reculée d'une vingtaine de centimètres. Le chenal de sable présent à droite de la balise est toujours présent.

Balise 2

Cette balise est placée à droite du petit chenal en contact de la limite. Trois touffes de Posidonie sont présentes en avant de cette balise.

Balise 3

La balise était initialement placée en contact d'une touffe de Posidonies qui a disparue. En arrière de la balise, à 1m30, une tâche de Posidonie est présente. Entre les balises 2 et 3, le creusement semble plus important qu'en 2007.

Balise 4

Cette balise est restée en place, elle est toujours en contact de la limite, qui est restée stable. On note la présence d'un îlot de Posidonie à 1m à gauche de la balise.

Balise 5

Un léger recul, de 40 cm est enregistré à gauche de cette balise.

Balise 6

La balise a été découverte légèrement penchée, on relève un léger avancement de l'herbier du côté droit de la balise.

Balise 7

La limite est continue au contact de la balise il n'y a pas d'avancée de l'herbier en revanche la tache de sable à droite de la balise s'est creusé d'avantage formant un petit chenal.

Balise 8

La limite a reculé d'environ 8 m entre les balise 7 et 9, il ne persiste que quelques touffes d'herbier en contact de la balise 8. Tout autour on retrouve des gorgones et des macro-algues qui colonisent l'espace vacant. La balise 8 n'est donc plus en contact de la limite réelle.

Balise 9

La limite au niveau de la balise 9 n'a pas variée.

Balise 10

La balise 10 est toujours en contact de la limite sans évolution de cette dernière.

Balise 11

Il n'y a pas de signe d'avancement de l'herbier près de cette balise, elle se trouve toujours en limite de l'herbier.

Balise 12

De même que pour la balise 11, l'herbier paraît ne pas avoir avancée.

4.8. Observation sur la faune associée

La macrofaune pélagique rencontrée était constituée de nombreux juveniles de *Serranus cabrilla*, *Pagrus pagrus*, *Mullus surmuletus* et *Diplodus vulgaris*. De même, des poissons communs à l'herbier à *Posidonia oceanica* ont été observés, comme *Sarpa salpa*, *Symphodus sp.* et *Coris julis*.

S'agissant de la macrofaune benthique deux espèces d'oursins réguliers : *Paracentrotus lividus*, *Sphaerechinus granularis* et une espèce d'oursin irrégulier sont rencontrés. Une espèce d'holothurie, *Holothuria tubulosa* était présente en grand nombre. De même en aval du balisage la population de gorgone *Eunicella singularis*, espèce caractéristique des fonds rocheux à forte courantologie, était présente. Des œufs de Céphalopodes, ont été retrouvés accrochés à un flotteur.

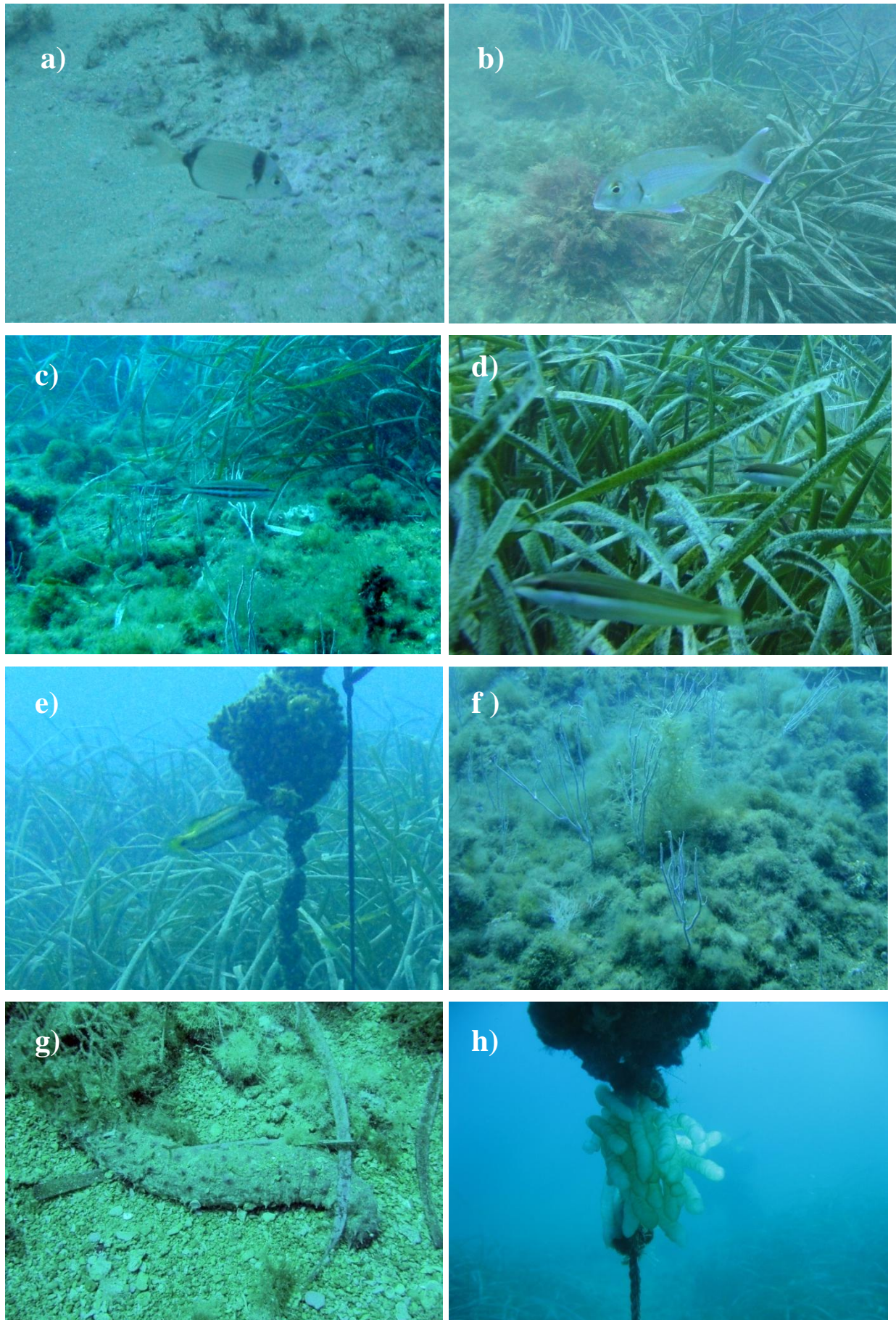


Figure 17. Quelques photos de la macrofaune présente en limite inférieure près de l'herbier à Posidonie (Bou Ismaïl 2010). a) *Diplodus vulgaris*. b) *Pagrus pagrus* c) *Serranus cabrilla.* d) *Symphodus sp.* e) *Coris julis* f) *Eunicella singularis*. g) *Holothuria tubulosa*. h) œufs de Céphalopodes

CONCLUSION

CONCLUSION

Ce travail, effectué en Juillet 2010, a permis le suivi du balisage de la limite inférieure de l'herbier à *Posidonia oceanica*, trois ans après sa mise en place. Il est situé au large du front de mer de la ville de Bou Ismaïl, ce site correspond à une zone dite « sensible », car soumise à une influence anthropique de plus en plus important ainsi qu'une courantologie particulière. Le suivi *in situ* de la limite inférieure de cet herbier associé à l'étude d'un certain nombre de descripteurs de la vitalité des herbiers a permis d'appréhender l'état du milieu marin.

La zone balisée forme une anse dont le centre est occupé par un substrat dur recouvert de sable, avec une dominance de la fraction grossière. La limite de l'herbier est érosive et sa position bathymétrique ne montre pas de variations au niveau des balises. La position de la limite est restée stable sur une partie de l'herbier, au niveau de l'emplacement des balises B1, B4, B6, B9, B10, B11 et B12. En revanche, elle a subi une érosion et par voie de conséquence une régression au niveau du creux de l'anse correspondant à l'emplacement des balises B7 et B8, ainsi qu'à proximité des balises B2, B3 et B5. L'origine de cette régression, semble être les conditions hydrodynamiques qui règnent dans ce secteur. En effet, des courants de fond, orientés d'ouest vers l'est, sont déjà signalés par Braik (1989). L'herbier est disséqué et montre une répartition dispersée, en îlots au centre de l'anse. Par ailleurs, l'analyse granulométrique, et plus particulièrement le triage de Folk (DFI) confirme la présence de courants forts et turbulents, qui rendent difficile le maintien de l'herbier et à fortiori sa progression.

L'étude des descripteurs de la vitalité de l'herbier, au niveau de la limite balisée, montre que ce dernier présente une bonne vitalité, dans la mesure où il a été noté une augmentation de la longueur des feuilles par rapport à celles mesurées lors de la mise en place du balisage. De même la production foliaire déterminée par l'analyse lépidochronologique, a permis de mettre en évidence une augmentation du nombre de feuilles produites depuis 2007. L'amélioration enregistrée, quant à la vitalité de l'herbier, peut s'expliquer par l'abaissement de la teneur en matières en suspension, particulièrement des nutriments responsables en partie du développement des épiphytes. Cette diminution de la turbidité, permet une pénétration plus profonde de la lumière qui constitue un facteur limitant au développement de *Posidonia oceanica*

La synthèse de l'ensemble des données obtenues, indique que la dynamique évolutive de limite inférieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* est principalement due à des causes naturelles, à savoir les conditions hydrodynamiques qui règnent dans ce secteur. Les forts courants présents ont provoqué une régression de l'herbier au niveau d'une partie de la limite infé-

rieure. Aussi, il est judicieux d'installer de nouvelles balises de référence en arrière des balises B8 et B7, afin de mesurer l'impact, à long terme, de l'hydrodynamisme sur cette limite inférieure. En outre, il serait préférable, lors de suivis ultérieurs, d'utiliser la même méthode pour la cartographie de la limite inférieure, à fin de suivre plus finement l'évolution de cette dernière. Également, en dépit de la pollution engendrée par la proximité de la ville, l'herbier n'apparaît pas affecté. Il serait cependant nécessaire de le confirmer par des mesures des concentrations en polluant dans différentes matrices de l'herbier et de sa proximité.

BIBLIOGRAPHIE

Références Bibliographiques

- Alcoverro T., Manzanera M., Romero J., 1998. Seasonal and age-dependent variability of *Posidonia oceanica* (L.) Delile photosynthetic parameters. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, 230(1): 1-13.
- Augier H., 1985. L'herbier à *Posidonia oceanica*, son importance pour le littoral méditerranéen, sa valeur comme indicateur biologique de l'état de santé de la mer, son utilisation dans la surveillance du milieu, les bilans écologiques et les études d'impact. *Vie marine*, 7: 85-113.
- Augier H, Boudouresque C.F., 1970. Végétation marine de l'île de Port-Cros (Parc national). VI. Le récif-barrière de Posidonies. *Bull. 176 Mus. Hist. nat. Marseille*, 30: 221-228.
- Augier H., Gilles G., Ramonda G., 1984a. L'herbier de *Posidonia oceanica* et la pollution par le mercure sur le littoral des Bouches du Rhône et du Var (France). In: Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. edits. *International Workshop on Posidonia oceanica beds, GIS Posidonie publ.*, 1: p399-406.
- Augier H., Giglio Y., Ramonda G., 1987. Peintures anti-fouling et herbier à *Posidonia oceanica*. *GIS Posidonie & Fac. Sci. Luminy Publ.*: 1-94.
- Bay D., 1978. Etude « *In situ* » de la production primaire d'un herbier de Posidonie (*Posidonia oceanica* (L) Delile) de la baie de Calvi-Corse. Progr. Rép. Stn. Oceanogr. Stareso, Univ. Liège, Belg., 18 : 1-251.
- Bedhomme A.L., 1981. *Phénologie et production des feuilles de Posidonia oceanica (L) Delile dans la baie de Port-Cros : Problèmes méthodologiques*. D.E.A. Océan. Bio., Univ. Aix-Marseille II.
- Bengrine L. et Guelmami A., 2007. *Mise en place d'un Système de surveillance de l'herbier à Posidonia oceanica (L) Delile de Bou Ismaïl*. Mémoire d'ingénieur en science de la Mer ; option environnement marin, ISMAL, Alger.
- Blanc J.J., Jeudy De Grissac A., 1978. Recherches de géologie sédimentaire sur les herbiers à Posidonies du littoral de la Provence. Contrat CNEXO 76/4043, 77/4074. Centre nation. Exploit. Océans publ. : 1-185.

- Bonhomme P., Charbonnel E., Bernard G., Cadiou G., 2002. Système de surveillance de l'herbier de Posidonie sur le littoral des Maures dans le cadre de l'observatoire marin du SIVOM du littoral des Maures : résultats du premier suivi 2002 - Rapport final. *Contrat SIVOM du littoral des Maures & GIS Posidonie. GIS Posidonie publ.* : 1-67.
- Boudouresque C.F., Thommeret J., Thommeret Y., 1980. Sur la découverte d'un bioconcrétionnement fossile intercale dans l'herbier à *Posidonia oceanica* de la baie de Calvi (Corse). *Journées Etud. Systém. Biogéogr. médit., Cagliari, CIESM, Monaco* : 139-142.
- Boudouresque C.F., Meinesz A., 1982. Découverte de l'herbier de Posidonie. *Cah. Parc nation. Port-Cros*, 4: 1-79.
- Boudouresque C.F., Jeudy De Grissac A., Meinesz A., 1984. Relations entre la sédimentation et l'allongement des rhizomes orthotropes de *Posidonia oceanica* dans la baie d'Elbu (Corse). *In: Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Olivier J. edits. International Workshop on Posidonia oceanica beds, GIS Posidonie publ.*, 1: 185-191.
- Boudouresque C.F., Pergent G., Francour P., Harmelin-Vivien M., Jangoux M., Mazzella L., Panayotidis P., Pergent-Martini C., Ramos-Espla R., Romero J., Scipione M.B., 1990. Le Cost 647 : Posidonia Project. *Posidonia Newsletter*, 3(2) : 27-34.
- Boudouresque C.F., Gravez V., Meinesz A., Molenaar H., Pergent G., Vitiello P., 1994. L'herbier à *Posidonia oceanica* en Méditerranée : protection légale et gestion. *In: Pour qui la méditerranée au 21ème Siècle - Villes des rivages et environnement littoral en Méditerranée. Actes du colloque scientifique Okeanos, Maison de l'Environnement de Montpellier publ.* : p209-220.
- Boudouresque C.F., Meinesz A., Ribera M.A., Ballesteros E., 1995. Spread of the green alga *Caulerpa taxifolia* (Caulerpales, Chlorophyta) in the Mediterranean: possible consequences of a major ecological event. *Scientia marina*, 59(suppl. 1): 21-29.
- Boudouresque C.F., 1996. Impact de l'homme et conservation du milieu marin en Méditerranée. 2^e édition. *GIS Posidonie publ.* : 1-243.
- Boudouresque C.F., Cadiou G., Guerin B., Le Direach L., Robert P., 2004. Is there a negative interaction between biodiversity conservation and artisanal fishing in a Marine Protected Area, the Port-Cros National Park (France, Mediterranean Sea). *Sci. Rep. Port-Cros natl. Park* 20: 147-160.

- Boudouresque C.F., 2005. Excursion au Cap-Croisette (Marseille) : le milieu marin. 12^e édition. *GIS Posidonie publishers*, Marseilles. : 1-48.
- Boudouresque C.F., Bernard G, Bonhomme P., Charbonnel E., Giovanni D., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., Tinzi L., 2006. Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. *RAMOGE pub.* : p1-202.
- Boumaza S., 1995. *Phénologie, biomasse, lépidochronologie et production primaire de l'herbier à Posidonia oceanica (L) Delile de l'anse de Kouali, Tpaza (Algérie)*. Thèse de Magister en océanologie, ISMAL, Alger.
- Boumaza S., Semroud R., 2000. Surveillance de l'herbier à *Posidonia oceanica* d'El Diamila (Algérie). *Proceeding of the first Mediterranean symposium on marine vegetation*. RAC/SPA publ., Tunis : p1-114.
- Boumaza 2002. Plan d'action pour la mise en place d'un réseau de surveillance des herbiers à *Posidonia oceanica*. *PNUE/CAR/ASP* : 1-20 +annexes 1-2.
- Bourcier M., 1989. Régression des herbiers à *Posidonia oceanica* (L.) Delile, à l'Est de Marseille, sous l'action conjuguée des activités humaines et des modifications climatiques. In: Boudouresque, C.F., Meinesz A., Fresi E., Graez V.édits. *International workshop on Posidonia beds*. GIS Posidonie publ., 2 : 287-293.
- Braïk D., 1989. *Etude de la dynamique sédimentaire devant Bou Ismail : Sédimentologie – Morphologie – Problème d'érosion littoral – Aménagement*. Thèse de magister, option géologie marine, USTHB, Alger.
- Caye G., 1980. Sur la morphogénèse et le cycle végétatif de *Posidonia oceanica* (L.) Delile. Thèse Doct., Univ. Aix-Marseille 2 : 1-121
- Ceccherelli G., Piazzì L., Cinelli F., 2000. Response of the non-indigenous *Caulerpa racemosa* (Forsskal) J. Agardh to the native seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile: effect of density of shoot and orientation of edges of meadows. *J. exp. mar. Biol. Ecol.* 243: 227-240.
- Charbonnel E., Graez V., Abellard O., Boudouresque C. F., Remonnay L., 1995. Surveillance de l'herbier à *Posidonia oceanica* du golfe de Giens (Var-France). Second suivi. Contrat Syndicat Intercommunal Hyères-Carqueiranne pour l'assainissement de la baie de Giens & GIS Posidonie, *GIS Posidonie publ.*: 1-106 + 8 p Ann.

- Charbonnel E., Boudouresque C.F., Meinesz A., Pergent-Martini C., San-Martin G., Bertrand M.C., Foret P., Ragazzi M., Leccia G., 2000. Le Réseau de Surveillance Posidonies de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Première partie : Présentation et Guide Méthodologique 1999. Seconde partie : résultats du suivi 1999. *Région PACA/GIS Posidonie/CQEL 13/CQEL 83/Conseil Général 06/CQEL 06. GIS Posidonie publ., Marseille* : 1-60 + 1-116.
- Costanza R., Arge R., De Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Suttin P., Van Den Belt M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- 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.
- Dagnelie P., 1973. Théorie et méthodes statistiques : applications agronomiques (2vol). *Les presses agronomiques de Gembloux édit.* : 1-378 + 1-463.
- Den Hartog C., 1970. *The sea-grasses of the world*. North Holland publ. Co, Amsterdam, Pays-Bas : 1-275 + 63 pl. h.t.
- Denis J., Hervé G., Deneux F., Sauzade D., Bonhomme P., Bernard G., Boudouresque C.F., Leriche A., Charbonnel E., Le Direac'h L., 2003. Guide méthodologique pour la cartographie des biocénoses marines. Volet n°1 : l'herbier à *Posidonia oceanica*. Guide méthodologique. *Agence de l'Eau, Région Provence Alpes-Côte d'Azur et DIREN PACA. Ifremer, GIS Posidonie & Centre d'Océanologie de Marseille, GIS Posidonie publ.*: 1-93.
- Descamp P., Ballesta L. Holon F., 2007. Suivi de deux herbiers de Posidonie dans la réserve marine de Cerbere – Banyuls : baie de Tancade et anse du Pin Parasol. *Contrat Conseil Général des Pyrénées Orientales. L'OEil d'Andromède publ.* : 1-45.
- Duarte C.M., 1991. Allometric scaling of seagrass form and productivity. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 77: 289-300.
- Folk R.I., Ward W.C., 1976. Brazos river bar : a study in significance of grain size parameters. *J. Sediment. Petrol.*, 27 : 3-26
- Francour P., 1997. Fish assemblages of *Posidonia oceanica* beds at Port Cros (France, NW Mediterranean): Assessment of composition and long-term fluctuations by visual census. *Mar. Ecol., PSZNI* 18(2): 157-173.

- Gambi M.C., Buia M.C., Casola E., Scardi M., 1989. Estimates of water movement in *Posidonia oceanica* beds: a first approach. In: Boudouresque, C.F., Meinesz A., Fresi E., Gravez V. edits. *International workshop on Posidonia beds*. GIS Posidonie publ., 2: 101-112.
- Giraud G., 1977a. *Contribution à la description et à la phénologie des herbiers de Posidonia oceanica (L.) Delile*. Thèse Doct. Spécialité, Univ. Aix-Marseille II : 1-150.
- Giraud G., 1979. Sur une méthode de mesure et de comptage des structures foliaires de *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile. *Bull. Mus. Hist. nat. Marseille*, 39 : 33-39.
- Grenier C., 1860. Recherches sur *Posidonia caulini* Koenig. *Bull. Soc. bot. Fr.* 7(5-6): 362-367.
- Guerrah R., Nour I., 2008. Mise en place du balisage au niveau de la limite inférieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* (L) Delile de l'anse de Kouâli. Mémoire de D.E.U.A., option environnement, ISMAL, Alger.
- Jeudy De Grissac A., Boudouresque C.F., 1985. Rôle des herbiers de Phanérogames marines dans les mouvements de sédiments côtiers : les herbiers à *Posidonia oceanica*. *Colloque franco-japonais d'Océanographie*, Marseille, 1: 143-151.
- Krumbien W.C., 1957. Size frequency distribution of sediments. *J. Sediment. Petrol.*, 4 : 65-77.
- Kuo J., Den Hartog C., 2001. Seagrass taxonomy and identification key. In: Short, Coles, Short edits. *Global seagrass research methods*. Elsevier publ., Amsterdam: 31-58.
- Meinesz A., Laurent R., 1978. Cartographie et état de la limite inférieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* dans les Alpes-Maritimes. Campagne Poséïdon 1976. *Bot. mar.* 21(8): 513-526.
- Molinier R., Picard J., 1952. Recherches sur les herbiers de Phanérogames marines du littoral méditerranéen français. *Ann. Inst. océanogr.* 27(3): 157-234.
- PAC, 2005. Lutte contre la pollution liée aux déchets solides – Diagnostic – Programme d'aménagement côtier (PAC) « Zone Côtière Algéroise ». PAC-PAC. ALG/DS/04-04.

Pasqualini V., Pergent-Martini C., Claubet P., Pergent G., 1998. Mapping of *Posidonia oceanica* using aerial photographs and side scan sonar : Application of the island of Corsica (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47 : 359-367.

Pergent G., 1987. *Recherche lépidochronologique chez Posidonia oceanica (Potamogetonaceae) : Fluctuation des paramètres anatomiques et morphologiques des écailles des rhizomes*. Thèse doctorat, océanographie. Université Aix-Marseille II, France : 21-45.

Pergent G., Ben Maiz N., Boudouresque C.F., Meinesz A., 1989. The flowering of *Posidonia oceanica* over the past fifty years : a lepidochronological study. In: Boudouresque, C.F., Meinesz A., Fresi E., Gravez V. edits. *International workshop on Posidonia beds*. GIS Posidonie publ., 2 : p69-76.

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

Pergent G., 1991. Les indicateurs écologiques de la qualité du milieu marin en Méditerranée. *Oceanis* 17(4): 341-350.

Pergent G., 1993. *L'herbier à Posidonia oceanica (L) Delile : Approche structurelle fonctionnelle et appliquée*. Diplôme d'Habilitation à diriger des recherches. Université de Corse, spécialité écologie. France.

Pergent G., Romero J., Pergent-Martini C., Mateo, M., & Boudouresque, C. F., 1994. Primary production, stocks and fluxes in the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 106 : 139-146.

Pergent G., Pergent-Martini C., Boudouresque C.F., 1995. Utilisation de l'herbier à *Posidonia oceanica* comme indicateur biologique de la qualité du milieu littoral en Méditerranée: état des connaissances. *Mésogée* 54: 3-29.

Pergent G., Rico-Raimondino V., Pergent-Martini C., 1997. Fate of primary production in *Posidonia oceanica* meadows of the Mediterranean. *Aquat. Bot.* 59 : 307-321.

Pergent G., Claubet P., Mimault B., Pasqualini V., Pergent-Martini C., 2005. *Mise en oeuvre d'un Réseau de surveillance Posidonies le long du littoral de la Corse : Deuxième phase Porto-Vecchio / Ajaccio*. Contrat office de l'environnement de la Corse et GIS Posidonie centre de Corse. GIS Posidonie Publ., Corte.

- Pergent G., Leonardini R., Lopez Y., Royo C., Mimault B., & C., P.-M., 2008. *Mise en oeuvre d'un Réseau de surveillance Posidonies le long du littoral de la Corse*. Contrat office de l'environnement de la Corse et GIS Posidonie centre de Corse. GIS Posidonie Publ., Corte.
- Pergent-Martini C., 1994. Impact d'un rejet d'eaux usées urbaines sur l'herbier à *Posidonia oceanica*, avant et après la mise en service d'une station d'épuration. Thèse Doctorat, Univ. Corté.
- Pergent-Martini C., Le Ravallec C., 2007. *Lignes directrices pour les études d'impacts sur les herbiers marins*. Programme des Nations Unies pour l'Environnement, CAR/ASP.
- Rico Raimondino, V. (1995). *Contribution à l'étude des stocks et flux d'éléments dans les herbier à Posidonia oceanica*. Thèse doctorat en ecologie. Univ. d'Aix Marseille II, France.
- Schwartz D., 1992. Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes. *Flammarion, Paris*.
- Semroud R., Boumaza S., Boukortt R., Badjou R., Boumoula N., Hadj Aïssa R., Sidi Boumedienne T., 1998. Surveillance de l'herbier à *Posidonia oceanica* au large de la Grande plage d'El-Djamila (Baie de Bou Ismaïl, Algérie). *Convention DGE/ ISMAL, Alger* : 1-43.
- Short F.T., Coles R., Pergent-Martini C., 2001. Global Seagrass distribution. In : Short F.T. et R. Coles edit., *Seagrass Methods books*. Elsevier publ., Amsterdam : p5-30.
- Thelin I., Bedhomme A.L., 1983. Biomasse des épiphytes des feuilles de *Posidonia oceanica* dans un herbier superficiel. *Rapp. P.V. Réun. Commiss. internation. Explor. sci. Médit.* 28(3): 125-126.
- Thélin I., Boudouresque C. F., 1983. Longévité des feuilles de *Posidonia oceanica* dans un herbier de la baie de Port-Cros (Var, France). *Rapp. P.V. Réun. Commiss. internation. Explor. sci. Médit*, 28 (3) : 115-116.
- Thélin I., Boudouresque C. F., 1985. *Posidonia oceanica* flowering and fruiting : recent data from an international inquiry. *Posidonia Newsletter*, 1 (1) : 5-14.
- Weydert P., 1973. Morphologie et sédimentologi de la partie méridional du Grand Récif de Tuléar (Madagascar). Les ensembles sédimentaires de la pente interne. *Théthys, suppl.* 5 : 133-156.

ANNEXES

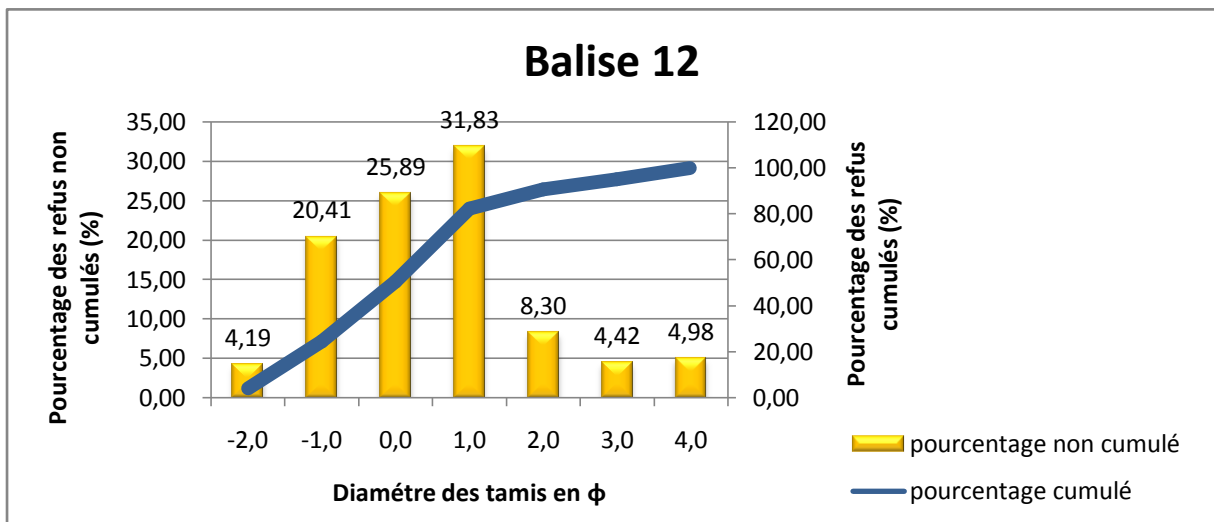
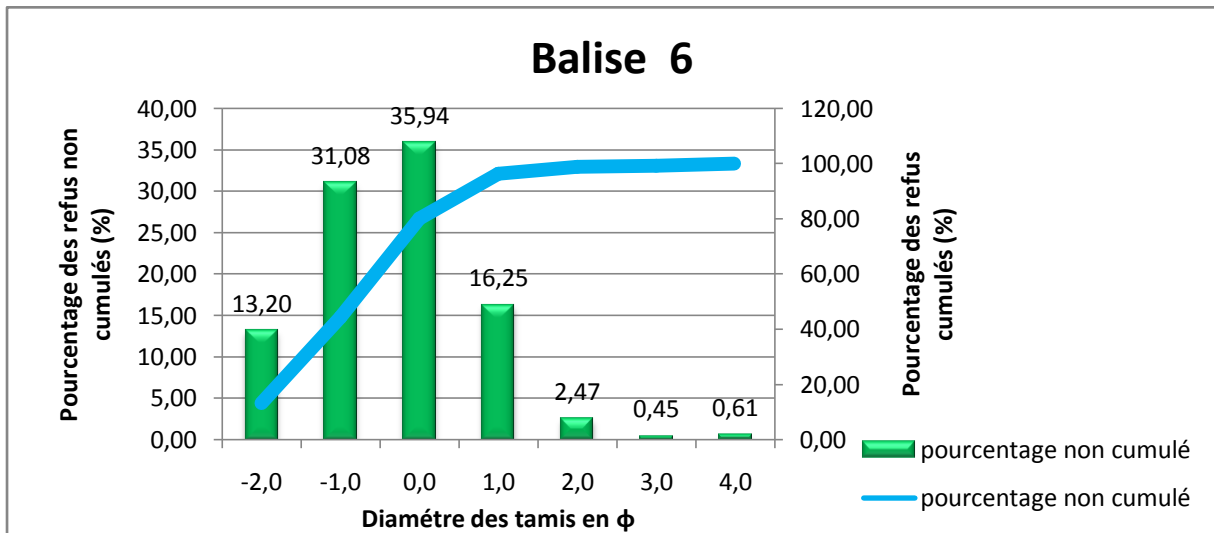
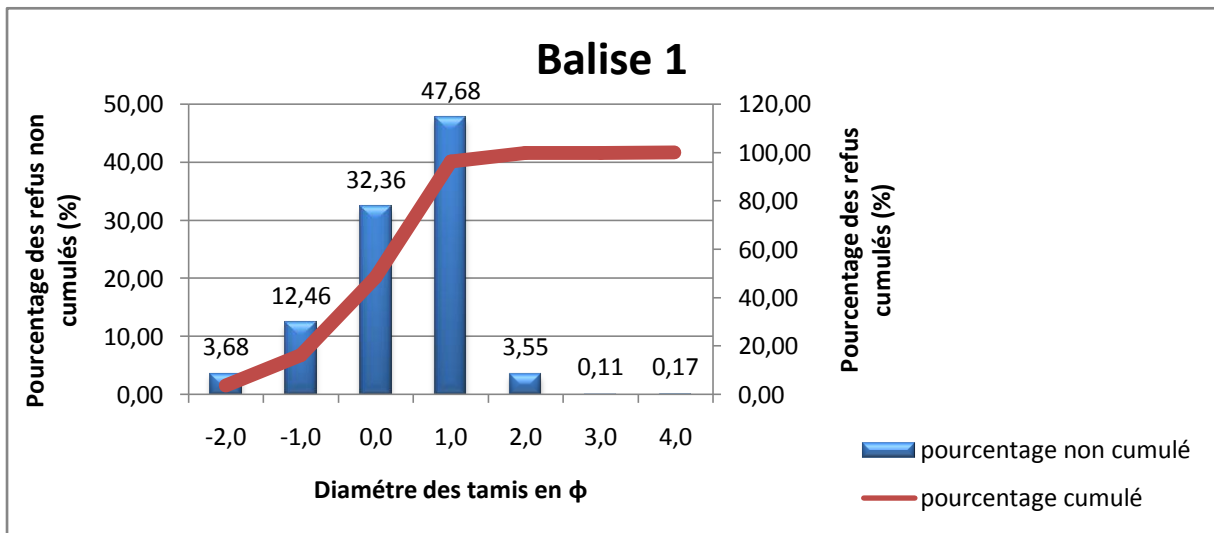
Liste des Figures

Figure 1. Schéma d'un rhizome plagiotrope de <i>Posidonia oceanica</i> , dont partent vers le haut des rhizomes orthotropes et, vers le bas, des racines (D'après Boudouresque et Meinesz, 1982).....	4
Figure 2. Schématisation des principaux rôles de l'herbier de Posidonie dans l'équilibre des fonds littoraux méditerranéens (D'après Charbonnel <i>et al.</i> , 2000).....	5
Figure 3. Bloc diagramme d'une matte de Posidonie (D'après Boudouresque et Meinesz, 1982).....	5
Figure 4. Situation géographique et localisation du site du balisage (PAC, 2005).....	10
Figure 5. Schéma illustrant le protocole de mesure des relèvements pour le repérage des balises et des piquets photos.....	13
Figure 6. Présentation des différents types de limite inférieure de l'herbier de Posidonie (D'après Meinesz et Laurent, 1978).	14
Figure 7. Mesure de la densité, en utilisant un cadre de 60 cm de côté subdivisé en carrés de 20 cm, en limite inférieure de l'herbier de Bou Ismaïl.....	16
Figure 8. Dissection lépidochronologique de <i>Posidonia oceanica</i> . (D'après Pergent, 1987). M : maximum. m : minimum. Rhiz : rhizome.	19
Figure 9. Schéma de dissection d'un faisceau de <i>Posidonia oceanica</i> pour l'étude phénologique de (D'après Pergent, 1987).....	20
Figure 10. Exemple du traitement d'une image sous marine prise à 20 m de profondeur sur le balisage de Bou Ismaïl.	22
Figure 11. Méthode de reconstitution de la limite inférieure assisté par ordinateur.	23
Figure 12. Localisation du site du balisage de Bou Ismaïl.....	26
Figure 13. Plan de balisage de la limite inférieure.....	27
Figure 14. Cartographie du balisage au large de la ville de Bou Ismaïl et représentation des contours de la limite inférieure de l'herbier lors du balisage de 2007et 2010.	29
Figure 15. Moyennes des écailles produites par année lépidochronologique (intervalles de confiance=95%).	31
Figure 16. Evolution de la Vitesse moyenne de croissance des rhizomes en fonction des années lépidochronologique (intervalles de confiance=95%).....	31
Figure 17. Quelques photos de la macrofaune présente en limite inférieure près de l'herbier à Posidonie (Bou Ismaïl 2010). a) <i>Diplodus vulgaris</i> . b) <i>Pagrus pagrus</i> c) <i>Serranus cabrilla</i> .. d) <i>Symphodus sp.</i> e) <i>Coris julis</i> f) <i>Eunicella singularis</i> . g) <i>Holothuria tubulosa</i> . h) œufs de Céphalopodes	40

Liste des Tableaux

Tableau 1. Classification phylogénétique de <i>Posidonia oceanica</i> (Kuo et Den Hartog, 2001).	3
Tableau 2. Echelle de classification du recouvrement de l'herbier de Posidonie (D'après Charbonnel <i>et al.</i> , 2000).....	15
Tableau 3. Classification de l'herbier de Posidonie selon la densité de faisceaux de feuilles au m ² (D'après Giraud 1977).	16
Tableau 4. Classification de l'herbier en fonction de la profondeur (intervalle entre 19 et 20m). DA = densité anormale, DSI = densité sub-normale inférieure, DN = densité normale, DSS = densité sub-normale supérieure (D'après Pergent <i>et al.</i> , 1995).	16
Tableau 5. Echelle d'évaluation du déchaussement en fonction des valeurs moyennes mesurées le long du balisage (D'après Charbonnel <i>et al.</i> , 2000).....	17
Tableau 6. Interprétation de la production foliaire et de l'allongement des rhizomes d'après Pergent, 2008.....	19
Tableau 7. Formules de calcul des indices granulométriques à partir des diamètres en ϕ	21
Tableau 8. Relèvement « balise à balise » et « piquet photo à balise » du balisage de Bou Ismaïl.	27
Tableau 9. Profondeurs relevées au niveau de chaque balise (Bou Ismaïl état zéro et suivi de 2010).....	28
Tableau 10. Estimation du recouvrement moyen en amont de chaque balise à Bou Ismaïl. ...	30
Tableau 11. Moyenne des densités (nombre de faisceaux / m ²) derrière chaque balise à Bou Ismaïl, 2007 et 2010.	30
Tableau 12: Paramètres phénologiques de <i>Posidonia oceanica</i> au niveau de la limite inférieure, à Bou Ismaïl, Juillet 2007 (Bengrine et Guelmami, 2007) et Juillet 2010.	33
Tableau 13. Biomasse moyenne des feuilles et des épiphytes des feuilles pour les mois de Juillet 2007 et 2010.	33
Tableau 14. Principaux indices granulométrique calculés pour le sédiment prélevé au niveau des piquets photos.	34

Annexe : Granulométrie



Courbes des fréquences cumulées et histogrammes des fréquences pour les sédiments prélevés en aval de chaque balise.