

N° d'ordre : 09/2015-D/SB

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE  
FACULTE DES SCIENCES BIOLOGIQUES



## THESE

DE DOCTORAT EN SCIENCES  
POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR EN SCIENCES  
BIOLOGIQUES

Spécialité : ECOLOGIE MARINE

par

Mme BOUMAZA Salima

## THEME

**"Caractérisation d'un herbier à *Posidonia oceanica* soumis  
à des rejets d'effluents"**

Soutenue publiquement le 07 avril 2015  
Devant le Jury composé de :

<b>M. K. HARCHOUCHE</b>	Professeur USTHB / FSB	Président
<b>M. R. SEMROUD</b>	Professeur, ENSSMAL	Directeur de thèse
<b>Mme D. NEDJAROUI</b>	Professeur USTHB / FSB	Examinatrice
<b>Mme S. OUAFI Saida</b>	Professeur USTHB / FSB	Examinatrice
<b>M. G.M.J. PERGENT</b>	Professeur, U. CORSE	Examineur
<b>M. B. HAMDI</b>	Professeur ENSSMAL	Examineur
<b>Mme H. SERIDI</b>	Maitre de conférences, USTHB / FSB	Examinatrice

# Remerciements

Je tiens à remercier M. Kamel Harchouche, M. Boualem Hamdi, Mme Dalila Nedjraoui, Mme Halima Seridi et Mme Saida Wafi pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à M. Gérard Pergent dont la disponibilité sans faille, l'amitié, les encouragements et les suggestions m'ont aidée à aller jusqu'au bout de ce travail. Je le remercie aussi d'avoir accepté de juger ce travail et dont les travaux ont inspiré cette thèse.

Je remercie tous les étudiants stagiaires: Nassima Boudefoua, Mohamed Kada, Oussama Khazimi, Liza Bengrine, Anis Guelmami, Amina Sengouga, Ali Misraoui, Ryma Guerrah, Imen Nour et le personnel de laboratoire : Nabila Eddalia, Youcef Matouk, Azzouz Mekki, qui ont participé au travail fastidieux de terrain et/ou de laboratoire. Sans eux mes conditions de travail auraient sans doute été très différentes et beaucoup moins agréables.

Pour leur lourde contribution au travail de terrain, que Redouane Boukortt et Saïd Belbacha trouvent ici l'expression de toute ma gratitude.

Je remercie mes collègues M. Boualem Hamdi, M. Rachdi Boussahel, M. Yacine Hamdane et M. Khoudir Mezouar pour leur précieuse aide.

Merci à Fateh Tarmoul pour son aide lors de la création des cartes de ce manuscrit.

J'adresse également tous mes remerciements à Naïma Khiari qui a toujours répondu à mes appels au secours. Le terme d'équipe prend ici tout son sens même si les aléas de la vie l'ont éloignée de la Posidonie.

Mes remerciements vont aussi à ma famille, mes amis et collègues qui, avec cette question récurrente « quand est-ce que tu la soutiens cette thèse ? » bien qu'angoissante, particulièrement en périodes de doutes, m'a aidé à ne pas dévier de mon objectif.

A Rachid Semroud, notre fille Inès et Rachid Boumazza

# Résumé

Les rejets d'effluents urbains et industriels constituent une des causes majeures de régression des herbiers à *Posidonia oceanica* en Méditerranée. Par conséquent, la mise en œuvre d'outils et de méthodologies communes qui permettent la surveillance de ces formations s'avère nécessaire. L'objectif de ce travail est de mesurer les réponses d'un herbier à *Posidonia oceanica* soumis à ce type de rejets et situé dans la baie de Bou Ismaïl. La comparaison avec un herbier de référence – Kouali –, localisé dans la même aire géographique, mais indemne de tout rejet, est effectuée selon un gradient de profondeur et durant un cycle annuel. Les paramètres mesurés concernent la structure spatiale (densité, recouvrement), la morphologie (biométrie foliaire, lépidochronologie, coefficient A, indice épiphytique) et la physiologie (teneurs en phénols totaux). En outre, un système de surveillance des limites inférieures, sur le modèle de celui du Réseau de Surveillance Posidonies, est mis en place au niveau de ces deux sites, afin d'en suivre l'évolution au cours du temps. Les résultats obtenus pour l'ensemble de cette étude ont mis en évidence la structure spatiale en patchiness de la limite supérieure, avec particulièrement une diminution du recouvrement. En outre, si les rejets d'effluents semblent influencer la plupart des paramètres morphologiques mesurés, au moins ponctuellement (un mois donné), le paramètre qui semble le plus sensible est la longueur des feuilles. Quant à la surface foliaire, sa diminution est plus marquée au niveau de la limite supérieure comparativement à la limite inférieure. Cette hétérogénéité traduit, d'une part, le gradient environnemental, en raison de la proximité de cette station par rapport aux rejets des effluents, et d'autre part, les facteurs locaux – hydrodynamisme et broutage –. La relation entre l'enrichissement par les rejets et l'augmentation de la biomasse des épiphytes n'est établie que durant la saison estivale et plus particulièrement au niveau de la limite supérieure. L'analyse lépidochronologique a mis en évidence l'impact des rejets sur la croissance des rhizomes, les réponses enregistrées sont là aussi différentes en fonction de la profondeur, une diminution est notée en limite supérieure, tandis qu'une augmentation l'est en limite inférieure. Les stress induits par les rejets des effluents semblent n'avoir pas engendré de variation dans la teneur en phénols totaux des feuilles adultes (bases et limbes) et des feuilles intermédiaires de *Posidonia oceanica*. Seule une augmentation de la teneur en phénols totaux des bases des feuilles adultes et des feuilles intermédiaires est enregistrée au niveau du site de référence, augmentation expliquée par le broutage par les mésoherbivores. La mise en place du balisage a permis, d'une part, de confirmer l'efficacité de ce système de surveillance des herbiers à *Posidonia oceanica*, et, d'autre part, de confirmer le caractère régressif de la limite inférieure de l'herbier de Bou Ismaïl.

Mots clés : *Posidonia oceanica*, Limite supérieure, Limite inférieure, Rejets d'effluents, Baie de Bou Ismaïl, Structure spatiale, Biométrie foliaire, Lépidochronologie, Phénols totaux, Réseau de surveillance.

# Sommaire

<b>Chapitre 1. Introduction générale</b>	<b>3</b>
1.1. Les herbiers à <i>Posidonia oceanica</i> .....	6
1.1.1. Répartition.....	6
1.1.2. Caractéristiques biologiques.....	7
1.1.3. Services écologiques des herbiers à <i>Posidonia oceanica</i> .....	8
1.1.4. Surveillance des herbiers à <i>Posidonia oceanica</i> .....	9
1.2. Cadre de l'étude et objectifs.....	13
1.2.1. Cadre de l'étude.....	13
1.2.2. Objectifs des travaux.....	14
1.2.3. Plan de présentation des travaux.....	15
<b>Chapitre 2. Matériel et méthodes</b>	<b>17</b>
2.1. Présentation des sites.....	17
2.1.1. Site de Bou Ismail.....	19
2.1.2. Site de Kouali.....	21
2.2. Prélèvement des échantillons.....	22
2.3. Etude des paramètres morphologiques.....	23
2.3.1. Densité de l'herbier.....	23
2.3.2. Recouvrement foliaire.....	24
2.3.3. Biométrie foliaire.....	24
2.3.4. Biomasse des épiphytes des feuilles.....	26
2.3.5. Analyse lépidochronologique.....	26
2.4. Etude des teneurs en phénols totaux.....	28
2.4.1. Tri et lyophilisation des échantillons.....	29
2.4.2. Extraction.....	29
2.4.3. Dosage par spectrophotométrie.....	30
2.5. Suivi des limites inférieures.....	32
2.5.1. Mise en place du balisage.....	32
2.5.2. Etudes associées.....	33
2.5.2.1. Type de limite.....	33
2.5.2.2. Analyse granulométrique du sédiment.....	36
2.5.2.3. Paramètres morphologiques.....	37
2.6. Analyses statistiques des données.....	37
<b>Chapitre 3. Résultats</b>	<b>39</b>
3.1. Paramètres morphologiques.....	39
3.1.1. Densité et recouvrement de l'herbier.....	39
3.1.2. Paramètres biométriques.....	40

3.1.2.1. Nombre de feuilles.....	40
3.1.2.2. Longueur des feuilles.....	40
3.1.2.3. Largeur des feuilles.....	42
3.1.2.4. Surface foliaire.....	43
3.1.2.5. Coefficient A.....	44
3.1.2.6. Indice épiphytique.....	45
3.1.3. Paramètres lépidochronologiques.....	47
3.1.3.1. Nombre d'écailles par cycle.....	48
3.1.3.2. Croissance des rhizomes.....	49
3.1.3.3. Production des rhizomes.....	50
3.2. Teneurs en phénols totaux.....	51
3.3. Suivi des limites inférieure de l'herbier.....	53
3.3.1. Balisage de l'herbier de Bou Ismaïl.....	53
3.3.1.1. Evolution de la limite de Bou Ismaïl entre 2007 et 2010.....	54
3.3.2. Balisage de l'herbier de Kouali.....	57
3.2.1. Evolution de la limite de Kouali entre 2008 et 2010.....	58
<b>Chapitre 4. Discussion</b>	<b>61</b>
4.1. Paramètres morphologiques.....	61
4.1.1. Densité et recouvrement.....	61
4.1.2. Paramètres biométriques.....	62
4.1.3. Paramètres lépidochronologiques.....	65
4.2. Teneurs en phénols totaux.....	67
4.3. Suivi des limites inférieures.....	70
4.3.1. Limite inférieure de l'herbier de Bou Ismaïl.....	70
4.3.2. Limite inférieure de l'herbier de Kouali.....	71
<b>Chapitre 5. Conclusions générales</b>	<b>73</b>
5.1. Réponses de <i>Posidonia oceanica</i> et implications pour la surveillance.....	74
5.2. Perspectives de recherche.....	79
<b>Bibliographie</b>	<b>81</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>96</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>98</b>
<b>Annexes</b>	<b>100</b>
Annexe 1.....	101
Annexe 2.....	102
Annexe 3.....	107

# Chapitre 1

## Introduction générale

Les activités humaines impactent lourdement notre environnement, avec en retour des conséquences sur le fonctionnement et les services rendus par les écosystèmes (Costanza *et al.*, 1997 ; Barbier *et al.*, 2011). Les écosystèmes marins littoraux, en tant qu'interfaces avec le continent et l'océan du large, subissent des pressions anthropiques et climatiques qui menacent de détruire leur équilibre et la biodiversité qu'ils renferment (Beaumont *et al.*, 2007 ; Doney *et al.*, 2012). En Méditerranée, l'augmentation de la pression humaine a principalement engendré la modification des habitats, l'appauvrissement de la biodiversité, l'eutrophisation, l'augmentation de la turbidité, l'érosion côtière et l'introduction d'espèces allochtones (Lasagna *et al.*, 2011 ; Mermex Group, 2011 ; Vacchi *et al.*, 2014).

Les herbiers à *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile, une des composantes majeures des écosystèmes du domaine littoral méditerranéen, sont sensibles à ces agressions et constituent de puissants indicateurs de leurs impacts (Boudouresque *et al.*, 2006 ; Pergent *et al.*, 2012 ; Marbà *et al.*, 2014 ; Richir *et al.*, 2015). En effet, au cours de ces dernières décennies, des phénomènes de régression des herbiers à *Posidonia oceanica*, en termes de surfaces occupées et de biodiversité, sont signalés dans plusieurs secteurs du littoral méditerranéen, résultant de différentes activités humaines : la restructuration des rivages (Ruiz et Romero, 2003 ; Boudouresque *et al.*, 2006) ; la gestion des ressources

vivantes (pêche et aquaculture) (Delgado *et al.*, 1999 ; González-Correa *et al.*, 2005 ; Holmer *et al.*, 2008 ; Kiparissis *et al.*, 2011) ; les rejets des déchets solides et liquides (Pergent-Martini et Pergent, 1996 ; Balestri *et al.*, 2004 ; Boudouresque *et al.*, 2006) ; les ancrages (Milazzo *et al.*, 2004 ; Montefalone *et al.*, 2006) ; l'installation de pipelines (Di Carlo, 2004 ; Badalamenti *et al.*, 2006) ; l'introduction d'espèces non indigènes (Kiparissis *et al.*, 2011 ; Marbà *et al.*, 2014) et les changements climatiques (Marbà et Duarte, 2010 ; Pergent *et al.*, 2014).

Les causes de la régression des herbiers à *Posidonia oceanica* en Méditerranée sont attribuées pour 67 % d'entre eux à des impacts physiques, 30 % à l'eutrophisation et 2 % à la compétition avec les algues invasives, selon Marbà *et al.* (2014) (Figure 1).

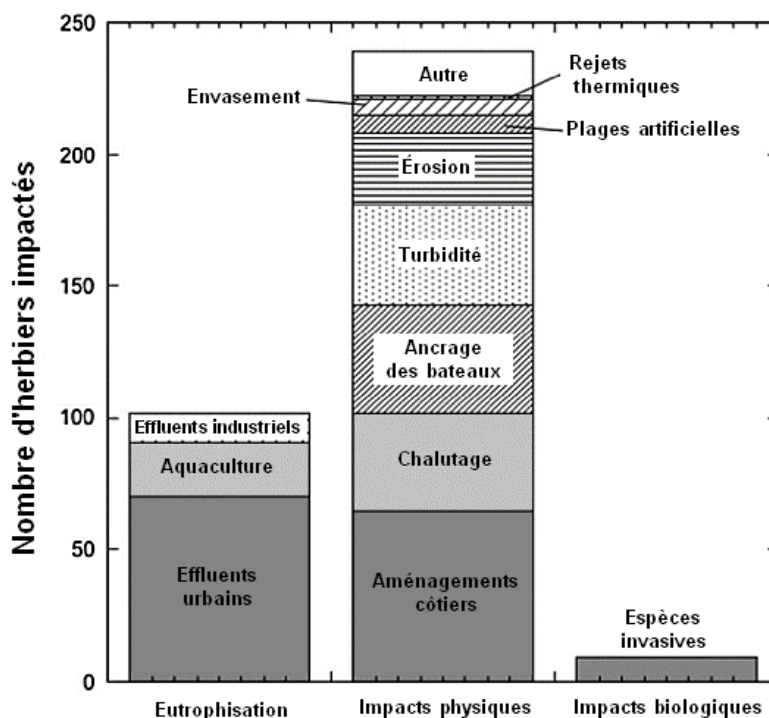


Figure 1. Pressions responsables de la régression des herbiers à *Posidonia oceanica*. Le graphique montre le nombre d'herbiers impactés par chacune des pressions (d'après Marbà *et al.*, 2014).

Toutefois, l'amplitude de ces régressions à l'échelle de la Méditerranée est très controversée (Pergent *et al.*, 2012 ; Bonacorsi *et al.*, 2013). Ainsi, Boudouresque *et al.* (2009) font une estimation comprise entre 0 et 10 %, au cours du XX<sup>e</sup> siècle. Tandis que Marbà *et al.* (2014) estiment qu'au cours de ces 50 dernières années, 6.9 % des herbiers à

*Posidonia oceanica* disparaissent chaque année au niveau du bassin méditerranéen. Enfin, Jordà *et al.* (2012) estiment que la régression touchera près de 50 % des herbiers à *Posidonia oceanica* d'ici 2049 ( $\pm 10$  ans). Toutefois, ces valeurs doivent être considérées avec précaution dans la mesure où l'absence de données de référence fiables, constitue un obstacle pour l'évaluation précise de ces régressions (Bonacorsi *et al.*, 2013).

L'importance des écosystèmes à *Posidonia oceanica* rend leur régression préoccupante ; des mesures ont donc été prises pour protéger *Posidonia oceanica* en tant qu'espèce et habitat. Dans la Convention de Berne de 1979, modifiée en 1996, *Posidonia oceanica* figure dans les annexes comme espèce méritant une protection. La Convention de Barcelone, adoptée en 1976, définissant un plan d'action pour la Méditerranée (PAM), intègre depuis 1996 une liste d'espèces en danger ou menacées, dans laquelle figure *Posidonia oceanica*. En outre, depuis 1999, les parties contractantes à la Convention de Barcelone ont adopté un plan d'action relatif à la conservation de la végétation marine, qui laisse une large part aux magnoliophytes marines et aux formations qu'elles constituent. En dehors des conventions internationales, il convient d'ajouter la Directive Habitats (92/94 CEE/Habitats naturels) du 21 mai 1992, qui constitue la base juridique de la politique de conservation des habitats naturels de la faune et de la flore sauvage et du maintien de la biodiversité sur le territoire de l'Union Européenne. C'est au niveau de son annexe 1 que les herbiers à *Posidonia oceanica* sont recensés en tant qu'habitat prioritaire (Platini, 2000 ; Boudouresque *et al.*, 2006).

En Algérie, la protection légale de *Posidonia oceanica* s'intègre dans le cadre de la Loi du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement, et de son décret d'application du 4 janvier 2012, fixant la liste des espèces végétales non cultivées et protégées (Journal officiel n°03 du 18 janvier 2012). Le décret interdit : «*la destruction, la coupe, la mutilation, l'arrachage, la cueillette de végétaux de ces espèces ou leurs fructifications, ou de toute autre forme prise par ces espèces au cours de leur cycle biologique, leur transport, leur utilisation, leur mise en vente ou leur achat, ainsi que la détention de spécimens prélevés dans leur milieu naturel*» (*sic*). Le décret prévoit également des autorisations de prélèvement de ces espèces, dont les modalités d'obtention restent à fixer.

## 1.1. Les herbiers à *Posidonia oceanica*

### 1.1.1 Répartition

Les herbiers à *Posidonia oceanica* colonisent la majeure partie des côtes européennes et nord-africaines, à l'exception du secteur de Gibraltar, des zones soumises à l'influence des grands fleuves (Pô, Rhône, Nil) et du littoral sud-est du bassin oriental (Boudouresque *et al.*, 2006 ; Gobert *et al.*, 2006 ; Pergent *et al.*, 2012) (Figure 2). Les herbiers s'étendent depuis la surface jusqu'à des fonds pouvant se situer autour de 40 m et se développent aussi bien sur des substrats meubles que sur des substrats durs (Procaccini *et al.*, 2003 ; Boudouresque *et al.*, 2006 ; Gobert *et al.*, 2006). La profondeur de l'extension bathymétrique maximale des herbiers à *Posidonia oceanica* marque la limite entre les étages infralittoral et circalittoral, et est généralement liée à la transparence de l'eau (Boudouresque *et al.*, 2006) ou à l'hydrodynamisme (Vacchi *et al.*, 2012). La surface occupée par les herbiers, en Méditerranée, est estimée entre 2.5 et 4.5 millions d'hectares, soit 23 % des fonds compris entre 0 et 50 m de profondeur (Pasqualini *et al.*, 1998).



Figure 2. Distribution géographique de *Posidonia oceanica* (trait rouge). A : Rhône ; B : Pô ; C : Nil (d'après Pergent *et al.*, 2012).

### 1.1.2. Caractéristiques biologiques

Les herbiers à *Posidonia oceanica* se développent à la fois verticalement (compétition pour l'accès à la lumière : rhizomes orthotropes) et horizontalement (compétition pour l'espace : rhizomes plagiotropes) (Boudouresque et Meinesz, 1982). En outre, les rhizomes plagiotropes peuvent se transformer en rhizomes orthotropes et réciproquement, et ce, en fonction de l'espace disponible et de la lumière (Caye, 1989) (Figure 3a). La pérennité des rhizomes permet l'édification d'une structure relativement solide et cohésive dénommée « matte », qui correspond à l'enchevêtrement des rhizomes et des racines, plus ou moins colmatés par les sédiments (Figure 3b).

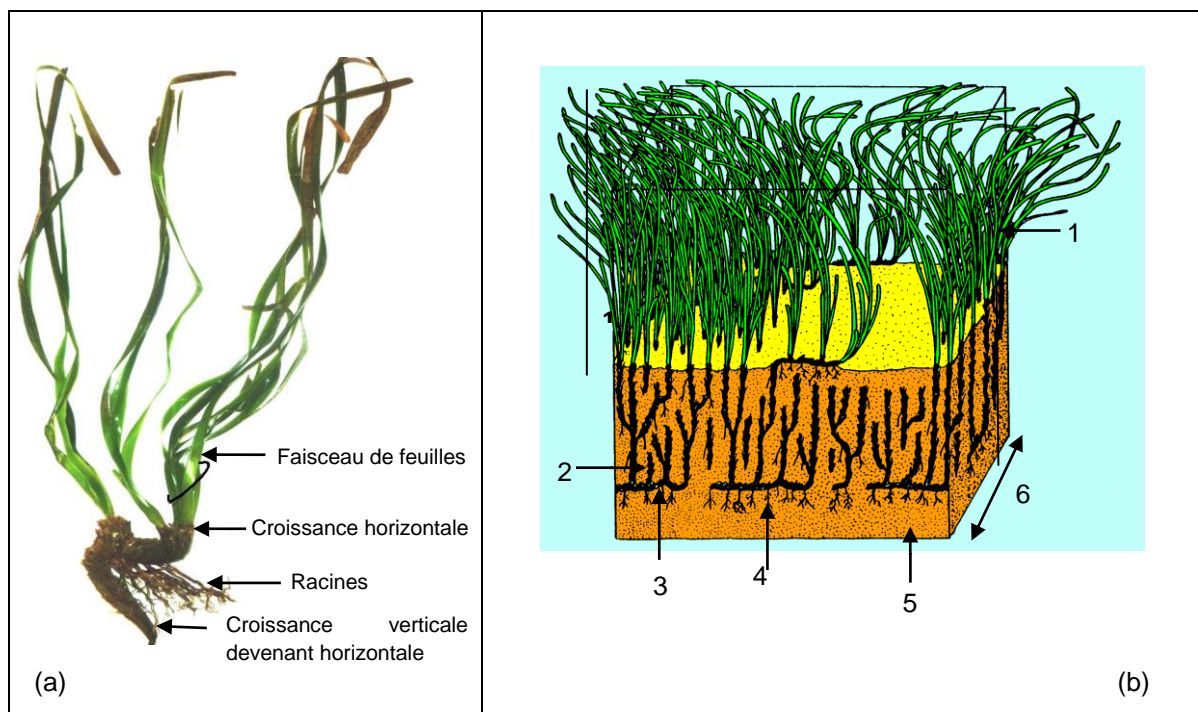


Figure 3. (a) Structure de *Posidonia oceanica* et illustration d'une croissance orthotrope devenant plagiotrope ; (b) Section verticale dans un herbier à *Posidonia oceanica*. 1 : Feuilles, 2 : Rhizome orthotrope, 3 : Rhizome plagiotrope, 4 : Racines, 5 : Sédiment, 6 : Matte (d'après Boudouresque et Meinesz, 1982).

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 (Figure 3a). Quand les feuilles de *Posidonia oceanica* meurent, le limbe se détache et tombe, alors que sa base foliaire appelée pétiole reste rattachée au rhizome ; elle est alors désignée sous le nom d'«écaille». Les « écailles » peuvent persister plusieurs siècles au

sein de la matte, car elles sont peu putrescibles (Boudouresque *et al.*, 2006 ; Gobert *et al.*, 2006).

La floraison qui a lieu en automne est relativement synchrone à l'échelle du bassin méditerranéen, avec des années particulièrement favorables lors de l'augmentation de la température (Diaz-Almela *et al.*, 2006 ; 2007) et de l'activité solaire (Montefalcone *et al.*, 2013). Toutefois, la multiplication asexuée, par stolonisation et dispersion de fragments végétatifs, est la principale voie de propagation de *Posidonia oceanica* (Di Carlo *et al.*, 2005 ; Boudouresque *et al.*, 2006).

### 1.1.3. Services écologiques des herbiers à *Posidonia oceanica*

Les herbiers à *Posidonia oceanica* comme la majeure partie des peuplements édifiés par les magnoliophytes marines offrent de nombreux services :

- ils constituent à la fois une zone de nutrition, de reproduction (frayère et nurserie), de recrutement mais aussi un abri pour de nombreuses espèces, dont certaines à forte valeur commerciale (Boudouresque *et al.*, 2006 ; Gobert *et al.*, 2006) ;
- ils sont considérés comme les écosystèmes les plus productifs de Méditerranée, la production totale de la plante a une valeur comprise entre 60 à 705 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, dont 6 à 50 % de cette production est exportée vers d'autres écosystèmes où elle constitue la base de nombreux réseaux trophiques littoraux (Pergent *et al.*, 2012) ;
- ils produisent une importante quantité d'oxygène et constituent de ce fait un important facteur d'oxygénation de l'eau et du sédiment (Bay, 1978 ; Boudouresque *et al.*, 2006) ;
- ils constituent une barrière qui atténue l'énergie cinétique des particules, qui se déposent plus rapidement, et contribuent ainsi à améliorer la clarté de l'eau, à réduire l'hydrodynamisme et ainsi protéger les côtes de l'érosion (Jeu de Grissac et Boudouresque, 1985 ; Terrados et Duarte, 2000).

L'estimation de l'importance économique qui dérive des services suivants : rétention des sédiments et atténuation de l'hydrodynamisme, production d'oxygène, rôle de nurserie et production primaire, est estimée à 172 € m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> (Vassallo *et al.*, 2013).

Enfin, les herbiers à *Posidonia oceanica* sont considérés comme des formations essentielles dans la séquestration du carbone atmosphérique, en raison de la lente dégradation qui caractérise les rhizomes lignifiés et les racines au sein de la «matte». Selon les estimations effectuées par Marbà *et al.* (2014), 20 à 27 Tg de CO<sub>2</sub> sont séquestrés annuellement par les herbiers à *Posidonia oceanica* dans le bassin méditerranéen. Par conséquent, ces derniers constituent des puits de carbone naturels contribuant à l'atténuation des changements climatiques (Pergent *et al.*, 2014). Toutefois, ce rôle peut être gravement compromis si la régression des herbiers à *Posidonia oceanica*, actuellement observée, n'est pas arrêtée (Marbà *et al.*, 2014).

#### 1.1.4. Surveillance des herbiers à *Posidonia oceanica*

En Méditerranée, *Posidonia oceanica* constitue un puissant bio-intégrateur de la qualité des eaux littorales (Pergent *et al.*, 1995 ; Pergent-Martini *et al.*, 2005). Par conséquent, la mise en œuvre d'outils et de méthodologies communes permettrait une optimisation de la surveillance, de la conservation et de la gestion des herbiers à *Posidonia oceanica*, à l'échelle de la Méditerranée (Pergent-Martini *et al.*, 2005 ; Lopez y Royo, 2008).

C'est ainsi, qu'en 2005, 39 scientifiques de 23 centres et équipes de recherche, dont l'équipe de Phytobenthos de l'ISMAL, ont synthétisé dans une publication commune les paramètres de *Posidonia oceanica* les plus utilisés, afin de mieux définir les avantages de chacun d'eux dans l'évaluation de l'état écologique des eaux littorales méditerranéennes (Pergent-Martini *et al.*, 2005). Ces paramètres concernent tous les niveaux d'organisation des herbiers à *Posidonia oceanica*, depuis la composition biochimique et la physiologie de la plante à la structure de l'ensemble de l'écosystème (Figure 4). Les paramètres les plus couramment utilisés pour la surveillance des herbiers à *Posidonia oceanica* et par conséquent l'évaluation de la qualité du milieu sont :

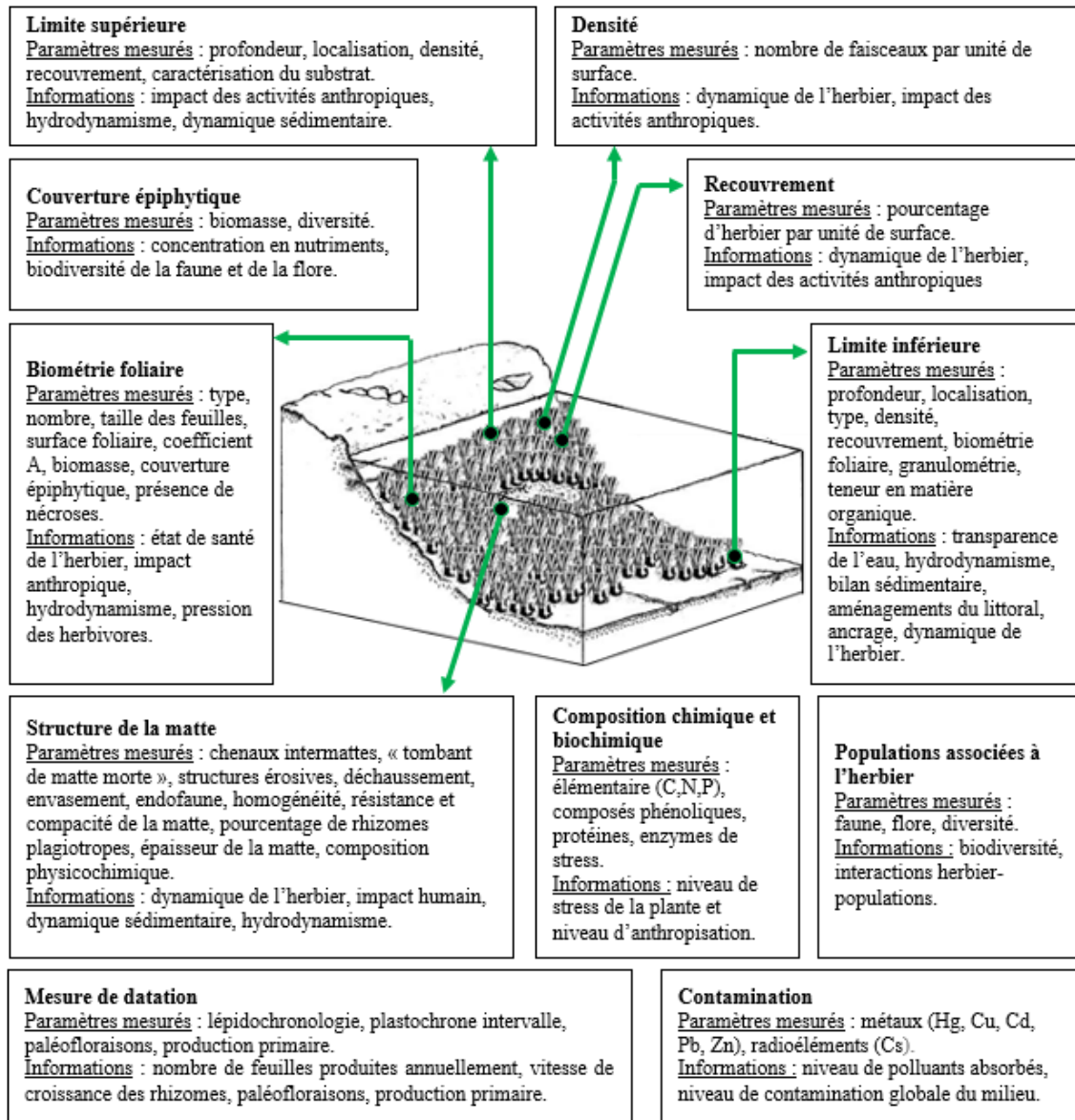


Figure 4. Schéma récapitulatif des principaux descripteurs de *Posidonia oceanica*, avec les paramètres mesurés et leurs méthodes d'investigation (d'après Pergent-Martini *et al.*, 2005).

- les caractéristiques structurelles de l'herbier – limites inférieure et supérieure, densité des faisceaux, recouvrement de l'herbier, structure de la matrice – fournissent des informations pertinentes sur les changements environnementaux, naturels et anthropiques : transparence de l'eau, hydrodynamisme, bilan sédimentaire, aménagements littoraux et leurs impacts sur la macrostructure et la dynamique de l'herbier – progressive, régressive – en relation avec la qualité du milieu ;

- les espèces associées – faune et flore – fournissent des informations pertinentes concernant la biodiversité de l’herbier et les interactions entre l’herbier et ces espèces. Par exemple, la population épiphyte est de nature à fournir des informations sur la qualité de l’eau, en particulier son enrichissement en nutriments ;
- la biométrie foliaire est indicatrice de la vitalité de *Posidonia oceanica* est par là même révélatrice des conditions environnementales : anthropisation, hydrodynamisme, transparence de l’eau, broutage. Elle constitue, en outre, une source d’informations sur la dynamique et le développement végétatif des herbiers ;
- la datation par la lépidochronologie – changements cycliques le long des rhizomes – (Pergent, 1990 ; 1993) et la durée d’un plastochrone – procédé d’interpolation utilisé pour estimer l’âge de la feuille – (Cebrian *et al.*, 1994) fournit des informations sur l’évolution temporelle de la production primaire, les taux de sédimentation, la reproduction sexuée et la dynamique de l’herbier ;
- les compositions chimique et biochimique de *Posidonia oceanica* peuvent fournir des informations sur le niveau de stress de la plante, et semblent en adéquation avec le niveau et l’impact des activités anthropiques ;
- les niveaux de contaminations par les métaux traces renseignent sur le niveau des polluants absorbés par les végétaux et par là même le niveau de contamination global du milieu.

Si les réponses spatiales et morphologiques apportent des informations pertinentes quand à l’impact des paramètres environnementaux, elles ne fournissent que des signaux d’alarme tardifs, et souvent peu spécifiques des perturbations qui les engendrent (Ferrat, 2010). Par conséquent les études s’orientent actuellement vers l’identification et la validation d’indicateurs physiologiques et biochimiques chez *Posidonia oceanica*, susceptibles de détecter de manière plus précoce, voire plus spécifique l’impact de ces paramètres (Ferrat *et al.*, 2003 ; Ferrat, 2010). Les biomarqueurs testés chez cette plante, en réponses à différents types de stress biotiques et abiotiques, sont les enzymes de détoxification et les composés phénoliques (Tableau 1).

Tableau 1. Les principaux biomarqueurs de stress étudiés chez *Posidonia oceanica*.

Biomarqueur	Stress	Références
Phosphatase alcaline (PAL)	Eutrophisation	Pérez et Romero (1993) ; Invers <i>et al.</i> (1995) ; Martínez-Crego <i>et al.</i> (2006)
Cytochromes P450 monooxygénase (CYP <sub>s</sub> ) EROD (Ethoxyresorufin-O-deethylase)	Cu	Hamoutène <i>et al.</i> (1996)
GSTs (Glutathion-S-Transferase)	Cu, Hg, HgCl <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> HgCl	Hamoutène <i>et al.</i> (1996) ; Ranvier <i>et al.</i> (2000) ; Ferrat <i>et al.</i> (2002a, b, 2003) ; Pergent-Martini <i>et al.</i> (2006)
Catalase (CAT), Superoxyde dismutase (SOD), Glutathion peroxydase (GPX), Malondialdéhyde (MDA), protéines carbonylées, Peroxyde d'hydrogène (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	Compétition avec <i>Lophocladia lallemandii</i>	Sureda <i>et al.</i> (2008)
Glutathion (GSH)	Cu, Zn, Cd  Compétition avec <i>Lophocladia lallemandii</i>	Hamoutène <i>et al.</i> (1996), Ferrat <i>et al.</i> (2003) Sureda <i>et al.</i> (2008)
Composés phénoliques	Enrichissement en azote Rejets d'effluents  Compétition intra spécifique (densité de l'herbier) Acidification Broutage  Hg Compétition avec <i>Caulerpa taxifolia</i>  Compétition interspécifique avec <i>Caulerpa racemosa</i> Fermes aquacoles	Leoni <i>et al.</i> (2007) Migliore <i>et al.</i> (2007) Rotini <i>et al.</i> (2011) ; Boumaza <i>et al.</i> (2012) ; Boumaza <i>et al.</i> (2014) Rotini <i>et al.</i> (2013)  Migliore <i>et al.</i> (2012) Vergés <i>et al.</i> (2007a, b, 2008, 2011) Ferrat <i>et al.</i> (2012) Cuny <i>et al.</i> (1995), Agostini <i>et al.</i> (1998) Ferrat (2001) ; Dumay <i>et al.</i> (2004) ; Pergent <i>et al.</i> (2008) Dumay <i>et al.</i> (2004)  Cannac <i>et al.</i> (2006)
Activité photosynthétique	Diminution de l'intensité lumineuse	Ruiz et Romero (2003) ; Ralph <i>et al.</i> (2007)
Cytokinines	Rejets d'effluents	Cozza <i>et al.</i> (2004)

Par ailleurs, des réseaux de surveillance des herbiers à *Posidonia oceanica*, ont été mis en place au niveau du bassin méditerranéen, grâce aux initiatives du Centre d'Activités Régionales pour les Aires Spécialement Protégées (CAR/ASP, PNUE), et plus particulièrement depuis 1999, suite à l'adoption du plan d'action pour la conservation de la végétation marine en Méditerranée (Pergent *et al.*, 2012). L'objectif de ces réseaux est double : une surveillance accrue des herbiers à *Posidonia oceanica* et leur utilisation

comme indicateurs de la qualité des eaux littorales. Ils sont basés sur le modèle adopté par le Réseau de Surveillance Posidonies (RSP), initié depuis le début des années 80 dans la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur (France) (Boudouresque *et al.*, 2000, 2007). Il consiste en l'installation de repères fixes – balisage, transects et carrés permanents – dans le but de mettre en évidence l'évolution des herbiers à *Posidonia oceanica* – recul, stabilité, régression. Ce modèle de réseau, avec plus de 360 sites, intègre douze pays méditerranéens, dont l'Algérie (Pergent et Bertrand, 2013).

## 1.2. Cadre de l'étude et objectifs

### 1.2.1. Cadre de l'étude

L'Algérie, à l'instar des autres pays méditerranéens, a engagé en 2001, avec le concours d'institutions engagées dans le Plan d'Action pour la Méditerranée (PAM), un Programme d'Aménagement Côtier (PAC) de la «zone côtière algéroise». Il constitue le premier projet de ce type en Algérie, faisant la promotion d'une véritable démarche de gestion intégrée, appliquée à une zone côtière. Ce programme vise à contribuer au développement durable, à la protection de l'environnement et à l'utilisation rationnelle des côtes et de leurs ressources (PNUE/PAM/CAR PAP, 2006).

Les travaux développés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre du programme PAC «zone côtière algéroise» et portent plus particulièrement sur la surveillance des herbiers à *Posidonia oceanica*. Cette thèse est en partie financée dans le cadre d'un contrat avec l'Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable (Code du projet : 2409 ; Contrat n° 19/04).

Par ailleurs, ces travaux s'inscrivent dans une problématique générale, destinée à mieux cerner le rôle des herbiers à *Posidonia oceanica* dans la gestion intégrée des zones côtières en Méditerranée. Par conséquent, l'utilisation d'outils et de méthodologies communes et standardisées applicables à toute la Méditerranée apparaît primordiale dans la mesure où ils permettront, d'une part, la comparaison des résultats acquis et, d'autre part, de disposer de banques de données exploitables, tant par les scientifiques que par les décideurs en charge de la gestion du littoral (Pergent-Martini *et al.*, 2005).

### 1.2.2. Objectifs des travaux

Les rejets d'effluents mixtes – urbains et industriels – constituent une des pressions majeures qui s'exercent sur la baie de Bou Ismaïl, région concernée par le Programme d'Aménagement Côtier «zone côtière algéroise». Néanmoins, la pollution industrielle reste limitée en raison du faible tissu industriel (Grimes, 2011). Par conséquent, les travaux développés dans cette thèse consistent à examiner les effets potentiels de ces rejets sur un herbier à *Posidonia oceanica*, situé au large du front de mer de l'agglomération de Bou Ismaïl. Les effets sont mesurés au niveau de ses limites supérieure et inférieure, secteurs particulièrement sensibles aux perturbations du milieu (Boudouresque *et al.*, 2006). Une comparaison avec un herbier de référence – Kouali – localisé dans la même aire géographique – baie de Bou Ismaïl – mais indemne de tout rejet, est effectuée durant un cycle annuel. Trois approches complémentaires constituent ce travail :

- mesure des réponses de *Posidonia oceanica* au niveau morphologique (structure spatiale (densité, recouvrement), biométrie foliaire, indice épiphytique, coefficient A, paramètres lépidochronologiques) ;
- mesure des réponses de *Posidonia oceanica* au niveau physiologique, par la mesure de la concentration en phénols totaux des feuilles. Cette partie est une contribution à l'identification de biomarqueurs susceptibles de diagnostiquer de façon précoce les perturbations du milieu ; et
- dans la mesure où ce travail s'intègre également dans une stratégie globale de gestion des herbiers, un système de surveillance est mis en place au niveau des deux sites étudiés, sur le modèle de celui du Réseau de Surveillance Posidonies, afin d'en suivre l'évolution sur de longues périodes de temps.

### 1.2.3. Plan de présentation des travaux

Le manuscrit s'articule autour de cinq chapitres :

- Le chapitre 1 est consacré à une synthèse bibliographique, rappelant l'importance des herbiers à *Posidonia oceanica* et les menaces qui pèsent sur ces derniers en Méditerranée. Les outils de protection et de surveillance des herbiers sont également présentés afin de contextualiser ce travail.
- Le chapitre 2 regroupe la présentation des deux sites d'étude et les différentes méthodes mises en œuvre tout au long de ce travail, à la fois en plongée automne et au laboratoire.
- Le chapitre 3 présente les résultats de la comparaison intersites des paramètres relatifs à la morphologie de *Posidonia oceanica* et à la teneur en phénols totaux des feuilles de *Posidonia oceanica*. Les résultats concernant la mise en place et le suivi du balisage des limites inférieures des deux herbiers étudiés, sont également présentés.
- Le chapitre 4 présente la discussion des résultats -les plus pertinents- concernant la morphologie, la teneur en phénols totaux et le réseau de surveillance de *Posidonia oceanica*.
- Le chapitre 5 présente les paramètres de *Posidonia oceanica*, inhérents à ce travail, les plus pertinents à mettre en œuvre dans le cadre du suivi des herbiers à *Posidonia oceanica* soumis à des rejets d'effluents. Des perspectives de recherche sont également présentées.



## Chapitre 2

### Matériel et méthodes

#### 2.1. Présentation des sites

Deux sites sont considérés dans le cadre de ce travail, tous deux situés dans la baie de Bou Ismaïl, l'une des plus importantes de la côte algérienne. Elle couvre une superficie de 350 km<sup>2</sup>, avec une ouverture de 40 km orientée SO-NE, soit 2° 54 E et 36° 48 N à 2° 24 E et 36° 38 N (Figure 5). Elle est délimitée à l'est par le massif d'Alger (Ras-Acrata) et par le Mont Chenoua à l'ouest. La baie de Bou Ismaïl est le réceptacle d'oueds à régime irrégulier, avec un apport de particules dissoutes et particulaires très important d'origine terrigène. Il s'agit, par ordre décroissant de leur débit annuel, des oueds Mazafran, Nador et Beni Messous (Bachari-Houma, 2009).

La pression urbaine exercée sur le littoral de Bou Ismaïl résulte principalement de l'extension spatiale de la capitale. La saturation d'Alger et la consommation de son assiette foncière urbaine poussent en priorité sa population vers ce territoire côtier le plus proche et le plus attractif (Grimes, 2011). Ces dernières décennies, avec le développement démographique et l'extension de l'urbanisation, de l'agriculture et de l'industrie, une pression et une artificialisation accrues sur les communes littorales de la baie de Bou Ismaïl sont enregistrées (PNUE/PAM/CAR PAP, 2006).

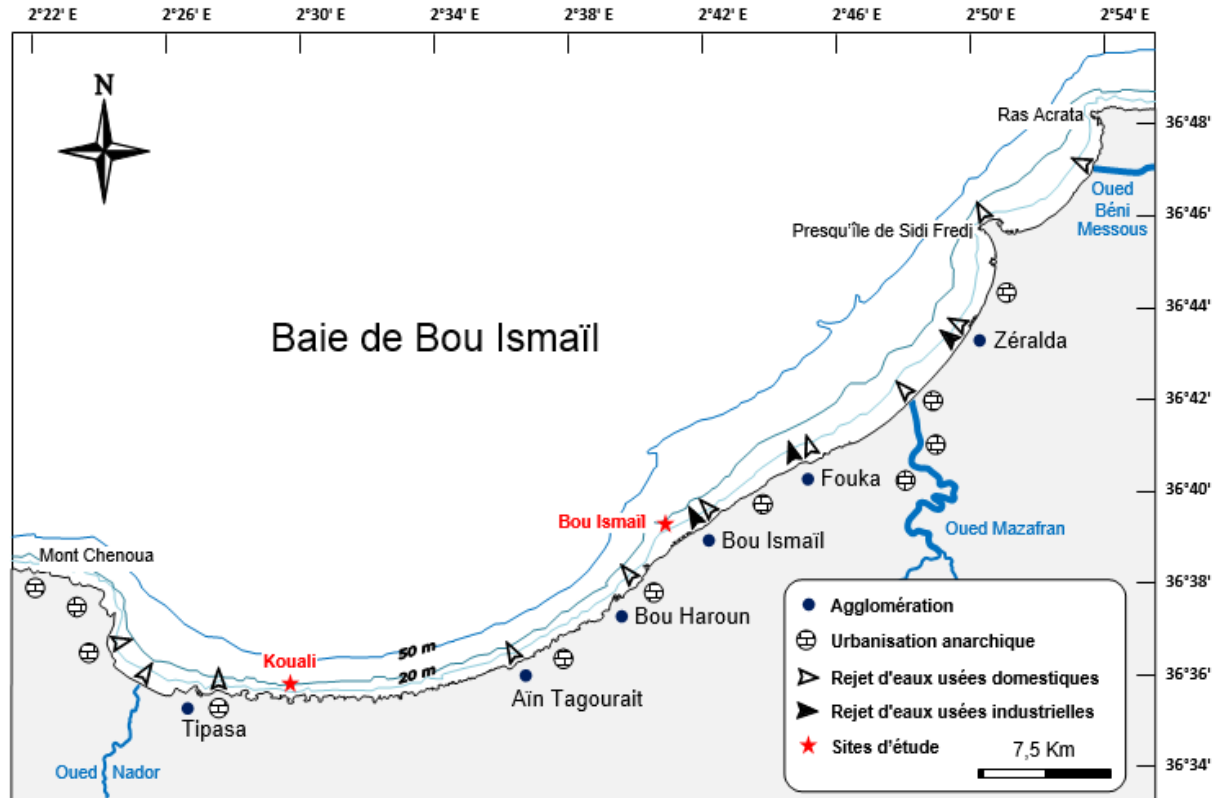


Figure 5. Présentation de la baie de Bou Ismaïl (d'après Bachari-Houma, 2009 modifiée).

La pression urbaine exercée sur le littoral de Bou Ismaïl résulte principalement de l'extension spatiale de la capitale. La saturation d'Alger et la consommation de son assiette foncière urbaine poussent en priorité sa population vers ce territoire côtier le plus proche et le plus attractif (Grimes, 2011). Ces dernières décennies, avec le développement démographique et l'extension de l'urbanisation, de l'agriculture et de l'industrie, une pression et une artificialisation accrues sur les communes littorales de la baie de Bou Ismaïl sont enregistrées (PNUE/PAM/CAR PAP, 2006).

Les deux sites considérés dans cette étude présentent des conditions environnementales différentes, représentatives du niveau de littoralisation de la baie de Bou Ismaïl (Figure 5).

- Le premier site (Bou Ismaïl), situé à proximité de l'agglomération de Bou Ismaïl, est représentatif du secteur est de la baie, correspondant au territoire où se concentrent l'essentiel des pressions anthropiques.

- Le second site (Kouali), situé dans la partie ouest de la baie, caractérisé par une activité humaine peu marquée et est représentée essentiellement par l'occupation saisonnière des lieux pour la baignade. Ce secteur présente une plus forte «naturalité» et est représentatif du territoire côtier, le moins urbanisé et le moins développé de la baie de Bou Ismaïl (Grimes, 2011).

### 2.1.1. Site de Bou Ismaïl

L'agglomération de Bou Ismaïl, avec l'accroissement rapide de sa population, a abouti à une consommation grandissante des espaces et une prolifération des constructions anarchiques à la périphérie de son littoral (PNUE/PAM/CAR PAP, 2006). En outre, le littoral du front de mer de Bou Ismaïl a subi de nombreuses restructurations : perrés au-dessus de la plage et épis de protections perpendiculaires à la côte, qui ont entraîné des remblayages incessants et des apports de matériaux artificiels (Braïk, 1989). Ces aménagements littoraux ont eu, en partie, pour conséquence une érosion du littoral qui a entraîné la disparition de la plage, malgré les différents épis installés (Braïk, 1989 ; PNUE/PAM/CAR PAP, 2006).

Par ailleurs, cette agglomération a vu son tissu industriel croître ces dernières décennies ; en effet, 12 unités industrielles sont installées dans la zone d'activité située au sud-ouest du chef-lieu (sur un total de 24 pour toute la wilaya de Tipasa). Elles concernent principalement les secteurs de la métallurgie, le textile, la tannerie, le papier, le plastique et la céramique (PNUE/PAM/CAR PAP, 2006). Les effluents urbains et industriels sont directement rejetés en mer, sans traitement préalable, à travers de multiples déversoirs sous-marins, soit un volume estimé à 4000 m<sup>3</sup> par jour (PNUE/PAM/MED POL/OMS, 2004). Ils charrient des quantités importantes de matières organiques, détergents et colorants industriels qui atténuent la transparence de l'eau et réduisent ainsi la pénétration de la lumière (Braïk, 1989 ; PNUE/PAM/CAR PAP, 2006). Des prélèvements d'eaux superficielles réalisés durant le printemps 2003 ont montré des concentrations importantes de matières en suspension, soit 134 à 142 mg. l<sup>-1</sup>, dont 60 % se composent de matière organique ; entraînant une turbidité de l'eau évaluée à 80 NTU (Bachari-Houma, 2009). En outre, des prélèvements effectués au printemps 2010, à proximité des rejets d'effluent sont

montré des concentrations importantes en sels nutritifs :  $\text{NH}_4^+$  ( $10.30 \mu\text{mol l}^{-1}$ ),  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NO}_2^-$  ( $0.94 \mu\text{mol l}^{-1}$ ) et  $\text{PO}_4^{3-}$  ( $2.40 \mu\text{mol l}^{-1}$ ) (Tarmoul, 2010).

L'herbier à *Posidonia oceanica* est la principale communauté benthique de l'étage infralittoral de Bou Ismaïl. Il s'étend entre 5 et 22 m de profondeur en moyenne. Dans la partie orientale, l'installation de l'herbier de *Posidonia oceanica* est contrariée par la présence du platier rocheux, sans sédiment, en bordure de littoral et son extension vers le large est stoppée par les remaniements sous-marins auxquels est soumise cette zone de forte pente (Braïk, 1989). Le caractère très accidenté des fonds est lié à la présence d'affleurements rocheux nombreux et à la présence de chenaux et de cuvettes intermattes qui traversent l'herbier à *Posidonia oceanica*. Ces structures érosives témoignent de la présence d'un important hydrodynamisme ; en effet, de par sa position en baie ouverte, le secteur est très exposé aux vents dominants de secteur E-NE en période estivale et de NO-NNO en période hivernale (Braïk, 1989). Par ailleurs, cet auteur signale le caractère régressif de l'herbier au droit d'un ensemble d'émissaires qui reçoivent toutes les eaux usées de l'agglomération de Bou Ismaïl. Il rapporte de nombreux témoignages signalant, pour la période antérieure à 1968-1969, des accumulations saisonnières de banquettes de feuilles de *Posidonia oceanica* de hauteur importante (1.5 à 2 m) sur le littoral de Bou Ismaïl, signe d'un développement normal de l'herbier ; en revanche, les banquettes actuelles ne dépassent guère 50 cm de hauteur.

Deux stations sont sélectionnées au niveau de ce site : la première localisée à environ 300 m du point de rejets d'un émissaire et correspond à la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica*, soit à 5 m de profondeur en moyenne ( $36^\circ 38' 48.7'' \text{N}$  et  $2^\circ 40' 50.1'' \text{E}$ ). La seconde est localisée à environ 1000 m du point de rejets et correspond à la limite inférieure de l'herbier, soit à 20 m de profondeur en moyenne ( $36^\circ 39' 25.8'' \text{N}$  et  $2^\circ 41' 7.2'' \text{E}$ ) (Figure 6).

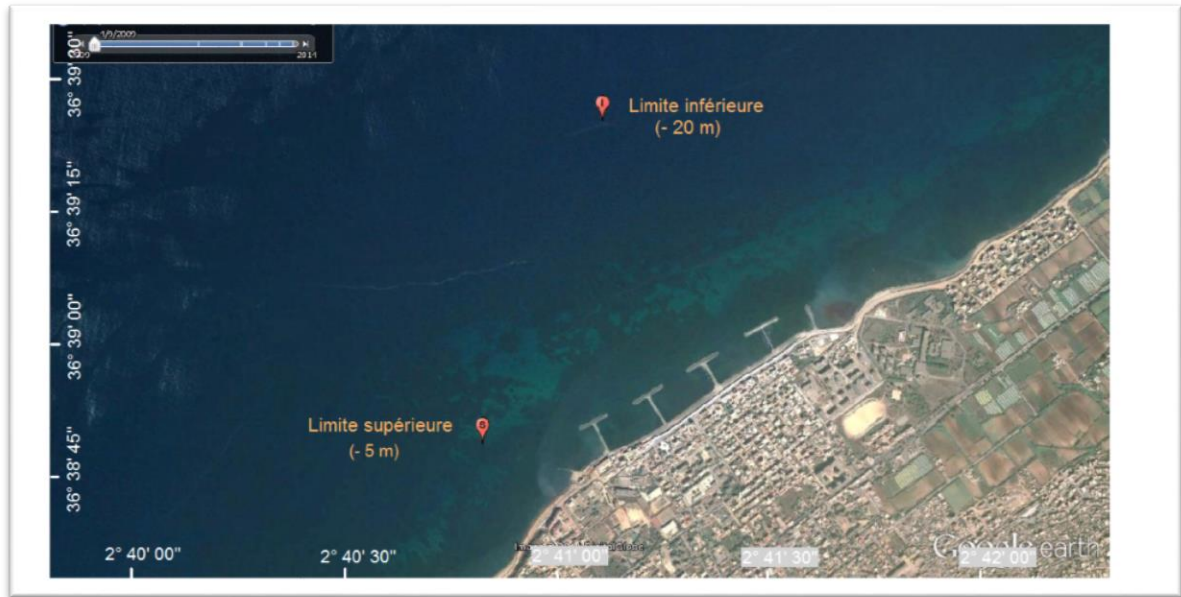


Figure 6. Localisation des stations étudiées à Bou Ismaïl.

### 2.1.2. Site de Kouali

Les anses de Kouali, au nombre de trois, sont situées dans la partie occidentale de la baie de Bou Ismaïl, à environ 70 km à l'ouest d'Alger. Elles font partie de l'ensemble Mont Chenoua-anses de Kouali qui a été retenu par le ministère de l'aménagement du territoire et de la ville pour bénéficier du statut d'Aire Marine et Côtière Protégée (AMCP) (Mangos et Claudot, 2013). En effet, leurs fonds marins présentent une grande diversité sédimentaire et biologique, avec notamment la présence de multiples herbiers à *Posidonia oceanica* et de centaines d'espèces, dont certaines sont menacées d'extinction et figurant à la fois sur la liste rouge de l'UICN et sur l'Annexe II du Protocole relatif aux Aires Spécialement Protégées (Boumaza, 1995 ; PNUE/PAM/CAR PAP, 2006 ; Grimes, 2011 ; Mangos et Claudot, 2013).

L'anse considérée dans cette étude est l'anse centrale, c'est la plus abritée des anses de la baie de Bou Ismaïl, en raison de la présence d'un goulet non loin du rivage qui isole le fond et la protège de la houle (Le Gall, 1969). Cette anse occupe une surface de 5 km<sup>2</sup>, et une grande partie de l'étage infralittoral est occupée par un herbier à *Posidonia oceanica*, s'étendant entre 0.3 et 20 m de profondeur en moyenne (Boumaza, 1995). Ce site est caractérisé par la présence de plusieurs espèces et paysages marins remarquables et menacés en Méditerranée qui lui confèrent une haute valeur écologique et patrimoniale : le

récif-barrière à *Posidonia oceanica*, les trottoirs à vermetes (bio constructions) et les magnoliophytes *Zostera noltei* et *Cymodocea nodosa* (PNUE-UICN-GIS Posidonie, 1990). Par ailleurs, l'herbier à *Posidonia oceanica* est identifié comme un herbier de référence dans la baie de Bou Ismaïl ; sa productivité primaire étant l'une des plus importantes enregistrées en Méditerranée (Boumaza et Semroud, 2000). Des prélèvements d'eau superficielle effectués au printemps 2010, à proximité de la côte, ont des concentrations en sels nutritifs beaucoup moins élevées que celles mesurées à Bou Ismaïl :  $\text{NH}_4^+$  ( $6.39 \mu\text{mol l}^{-1}$ ),  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NO}_2^-$  ( $0.07 \mu\text{mol l}^{-1}$ ) et  $\text{PO}_4^{3-}$  ( $0.09 \mu\text{mol l}^{-1}$ ) (Tarmoul, 2010).

Les stations sélectionnées sont situées aux mêmes profondeurs que celles de Bou Ismaïl, et les coordonnées géographiques sont  $36^\circ 35' 30.1''$  N et  $2^\circ 29' 40.1''$  E en limite supérieure et  $36^\circ 35' 40.6''$  N et  $2^\circ 29' 42.4''$  E en limite inférieure (Figure 7).



Figure 7. Localisation des stations étudiées à Kouali.

## 2.2. Prélèvement des échantillons

Pour chacune des quatre stations et chacune des quatre saisons de mai 2002 à mars 2003 (Tableau 2), 75 rhizomes orthotropes sont prélevés en plongée, avec scaphandre autonome. Les rhizomes récoltés sont distants d'environ un mètre les uns des autres, afin d'éviter les individus rattachés à un même rhizome plagiotrope (Pergent, 1987).

Tableau 2. Plan d'échantillonnage des faisceaux de *Posidonia oceanica* au niveau des deux sites d'étude.\* : Limite supérieure.

Biométrie foliaire, lépidochronologie, biomasse des épiphytes		Phénols totaux	
Kouali	Bou Ismaïl	Kouali	Bou Ismaïl
23/07/2002	22/07/2002	30/05/2002	25/05/2002
02/10/2002	26/10/2002	31/08/2002	27/08/2002
30/12/2002*	17/12/2002	30/12/2002*	17/12/2002
26/03/2003	25/03/2003	26/03/2002	25/03/2003

Trente rhizomes sont destinés aux études phénologique, lépidochronologique et à l'évaluation de la biomasse des épiphytes. Les 45 faisceaux restants sont destinés au dosage des phénols totaux ; ils sont transportés dans une glacière jusqu'au laboratoire, afin de réduire l'activité cellulaire et limiter la dégradation des composés phénoliques (Ribereau-Gayon et Peynaud, 1968). Une fois au laboratoire, ils sont immédiatement traités.

## 2.3. Etude des paramètres morphologiques

### 2.3.1. Densité de l'herbier

La densité de l'herbier est exprimée par le nombre de faisceaux par unité de surface (généralement par m<sup>2</sup>). Ce paramètre constitue un outil clé pour estimer l'abondance des magnoliophytes marines et est utilisé de façon routinière dans le cadre des réseaux de surveillance (Kirkman, 1996 ; Boudouresque *et al.*, 2007). Il apporte des informations sur les conditions environnementales, en particulier la transparence de l'eau, mais également sur l'enrichissement en nutriments du milieu (Ruiz et Romero, 2001 ; Pergent-Martini *et al.*, 2005).

La densité est déterminée par comptage *in situ* à l'intérieur d'un cadre de 0.16 m<sup>2</sup> (Panayotidis *et al.* 1981) au niveau des limites supérieures. Dix mesures sont effectuées au hasard dans l'herbier afin de prendre en compte sa structure globale (Panayotidis *et al.*, 1981). Lorsque l'herbier est discontinu, les comptages sont réalisés à l'intérieur des taches d'herbier (Charbonnel *et al.*, 1995). En fonction de la densité moyenne, l'herbier à *Posidonia oceanica* est classé selon la grille de lecture établie par PNUE-PAM-CAR/ASP (2011) (Annexe 1).

### 2.3.2. Recouvrement foliaire

Le recouvrement foliaire, exprimé en pourcentage de superficie de substrat couvert par les feuilles de *Posidonia oceanica*, apporte principalement des informations sur la transparence de l'eau (Ruiz et Romero, 2001 ; Pergent-Martini *et al.*, 2005), les dommages qui résultent de l'action mécanique, par exemple le mouillage (Francour *et al.*, 1999) et de l'activité hydrodynamique (Bonhomme *et al.*, 2002). Bien que le recouvrement soit l'un des descripteurs de la structure spatiale des herbiers à *Posidonia oceanica* le plus largement utilisé (Pergent-Martini *et al.*, 2005). Sa relation avec différents facteurs (profondeur, type de substrat, densité, et niveau de pression anthropique) n'est pas démontrée (Leriche *et al.*, 2006) ; ce qui rend son interprétation difficile (Lopez y Royo, 2008). L'estimation visuelle de ce paramètre n'a pas été standardisée bien que plusieurs méthodes aient été proposées (Pergent-Martini *et al.*, 2005). En outre, de nombreux facteurs peuvent biaiser l'estimation du recouvrement, car elle est liée d'une part à l'observateur et d'autre part à des paramètres extérieurs telles que la visibilité et la saison (surévaluation en période estivale où les feuilles sont plus longues) (Charbonnel *et al.*, 1995).

Dans le cadre de cette étude, l'estimation du recouvrement est réalisée à l'aide d'un quadrat de 1m<sup>2</sup>, divisé en quatre carrés. Il correspond au pourcentage de couverture du substrat par l'herbier à *Posidonia oceanica* vivant, par rapport aux zones non couvertes dans chaque carré (Pergent-Martini *et al.*, 2005). Dix mesures sont effectuées au niveau de chacune des stations.

### 2.3.3. Biométrie foliaire

Nonobstant leur variabilité saisonnière, les paramètres biométriques constituent de bons indicateurs de la transparence de l'eau (Ruiz et Romero, 2001, 2003), de l'enrichissement du milieu (Cancemi *et al.*, 2003 ; Leoni *et al.*, 2006) et de la pollution par les rejets industriels (Balestri *et al.*, 2004). De ce fait, ils font partie des descripteurs utilisés en routine pour rendre compte de la vitalité de *Posidonia oceanica* (Pergent *et al.*, 1995 ; Pergent-Martini *et al.*, 2005 ; Boudouresque *et al.*, 2006).

Les faisceaux foliaires détachés du rhizome sont décortiqués en respectant l'ordre distique d'insertion des feuilles. En effet, les caractéristiques morphologiques et l'âge des feuilles d'un faisceau diffèrent selon la position de la feuille dans le faisceau. Les feuilles se forment au centre et sont d'autant plus âgées qu'elles sont situées vers l'extérieur et l'acquisition d'un pétiole par les feuilles ne se fait qu'avec leur vieillissement (Giraud, 1979). Les feuilles sont donc séparées selon le protocole de Giraud (1979) puis dénombrées (Figure 8) :

- feuilles adultes, pourvues d'un pétiole (supérieure ou égale à 2 mm) ;
- feuilles intermédiaires, dépourvues de pétiole ou dont le pétiole est inférieur ou égal à 2 mm ;
- feuilles juvéniles, dépourvues de pétiole et de longueur n'excédant pas 50 mm (non prises en compte lors de cette étude).

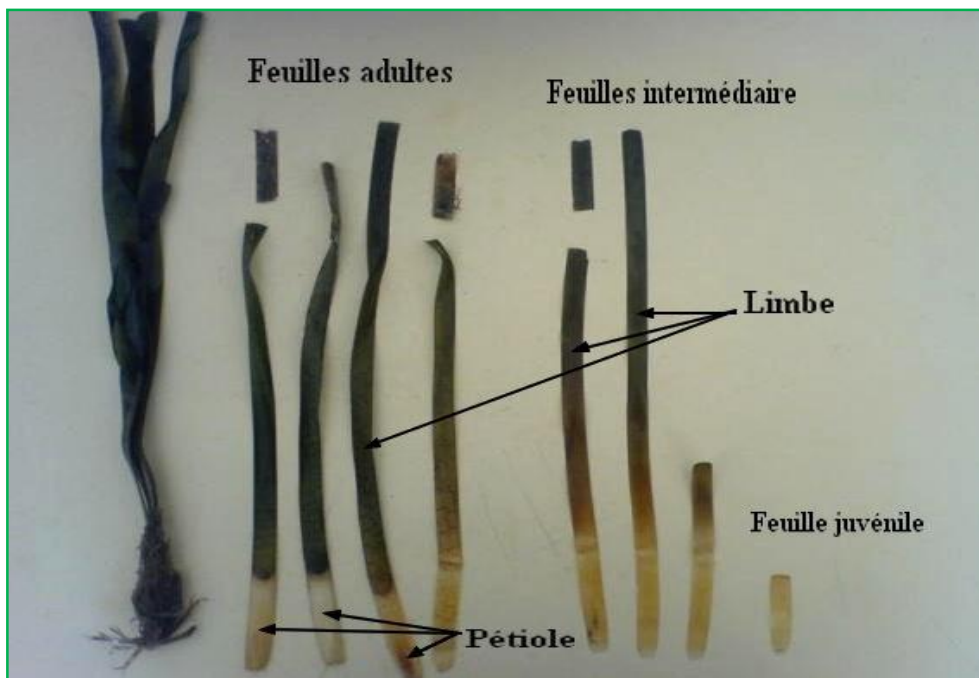


Figure 8. Photo représentant la dissection d'un faisceau de *Posidonia oceanica*.

Les paramètres biométriques mesurés sont la longueur et la largeur de chaque feuille, les paramètres suivants sont déterminés :

- nombre moyen de feuilles adultes et intermédiaires par faisceau ;
- longueur et largeur moyennes des feuilles adultes ou intermédiaires par faisceau ;

- surface foliaire par faisceau pour chaque catégorie de feuille, exprimée en cm<sup>2</sup> ;
- coefficient A qui traduit le pourcentage de feuilles qui ne possèdent plus d'apex (Giraud, 1979). Il est en mesure de nous informer sur la pression exercée par les herbivores sur *Posidonia oceanica*. En effet, les marques de broutage laissées par certains d'entre eux (le téléostéen *Sarpa salpa* ou l'oursin *Paracentrotus lividus*) sont caractéristiques (Boudouresque et Meinesz, 1982). L'altération de l'apex des feuilles par des épiphytes animaux ou végétaux est un autre facteur exprimé par ce coefficient (Mazzella *et al.*, 1981). Par ailleurs, l'état des apex peut également refléter l'action de l'hydrodynamisme du site (Mazzella *et al.*, 1991).

#### 2.3.4. Biomasse des épiphytes des feuilles

Les feuilles de *Posidonia oceanica* constituent un excellent substrat pour les organismes épiphytes et leur développement excessif peut avoir un impact négatif sur le développement de la plante, car ils créent un écran réduisant la pénétration de la lumière (Dalla Via *et al.*, 1998). De nombreux auteurs s'accordent à corréliser la biomasse des épiphytes des feuilles de *Posidonia oceanica* et le degré d'enrichissement du milieu en nutriments (Pergent-Martini *et al.*, 1996 ; Piazzini *et al.*, 2004 ; Leoni *et al.*, 2006). En outre, les épiphytes sont considérés comme des indicateurs des changements environnementaux plus sensibles que la plante hôte (Balata *et al.*, 2008, 2010 ; Kocak et Aydin-Onen, 2014). L'aptitude des épiphytes à répondre de façon précoce aux modifications du milieu, fait de leur biomasse un indicateur incontournable dans les programmes de surveillance et de gestion des zones côtières (Balata *et al.*, 2008 ; Giovannetti *et al.*, 2010).

Les épiphytes des feuilles adultes et intermédiaires sont récoltés séparément, à l'aide d'une lame de rasoir, puis séchés à l'étuve pendant 48 h à 70°C, et pesés à l'aide d'une balance de type Denver instrument M-220 D (précision de 0.1 mg). La biomasse est exprimée en mg Ps (poids sec) par faisceau.

#### 2.3.5. Analyse lépidochronologique

Lorsque les feuilles de *Posidonia oceanica* meurent, seul le pétiole reste attaché au rhizome, il porte le nom d'«écaille». L'épaisseur des écailles varie de façon cyclique en

fonction de leur rang d'insertion sur le rhizome. La lépidochronologie permet d'étudier les variations cycliques de l'épaisseur des écailles le long de rhizomes orthotropes de *Posidonia oceanica* (Crouzet, 1981 ; Pergent, 1990). Les variations de l'épaisseur des écailles peuvent avoir une origine aléatoire ou traduire une réponse de la plante à des facteurs endogènes (variations intrinsèques) ou exogènes (température, luminosité, hydrodynamisme) (Pergent, 1987). Ces variations cycliques sont annuelles, avec un maximum et un minimum d'épaisseur par an, mais ne respectent pas les années calendaires, d'où le nom d'années lépidochronologiques pour les distinguer des précédentes (Pergent *et al.*, 1989 ; Pergent, 1993). L'analyse lépidochronologique permet de mesurer la vitesse de croissance et la production annuelle des rhizomes, le nombre de feuilles formées chaque année, la dynamique d'édification des herbiers, la production primaire passée, le rythme de chute des feuilles et les teneurs anciennes en polluants (Pergent et Pergent-Martini, 1990). Elle permet également la datation des anciennes floraisons (Pergent *et al.*, 1989).

Les rhizomes conservés dans le formol sont réhydratés et nettoyés de façon à retirer le sédiment entre les écailles, ainsi que les épiphytes et épibiontes macroscopiques. Les écailles de chaque rhizome sont très soigneusement détachées en respectant leur ordre distique d'insertion le long du rhizome et leur épaisseur est appréciée au toucher. Les écailles étant emboîtées les unes dans les autres, la dissection se fait à partir des plus anciennes vers les plus récentes (Pergent, 1987). Elles sont classées par rang en fonction de leur position sur le rhizome : l'écaille qui se trouve juste après la première feuille vivante a le rang 1, le rang des écailles augmente donc en s'éloignant du point végétatif (Figure 9).

Lorsque l'écaille d'épaisseur minimale est rencontrée, le rhizome est coupé au niveau de son insertion, puis sa longueur est mesurée. On obtient donc un certain nombre d'écailles correspondant à un fragment de rhizome et à un cycle ou année lépidochronologique. Chaque tronçon de rhizome est alors placé dans une étuve à 70°C, jusqu'à obtention d'un poids constant puis pesé sur une balance de type Denver instrument M-220 D (précision de 0.1 mg).

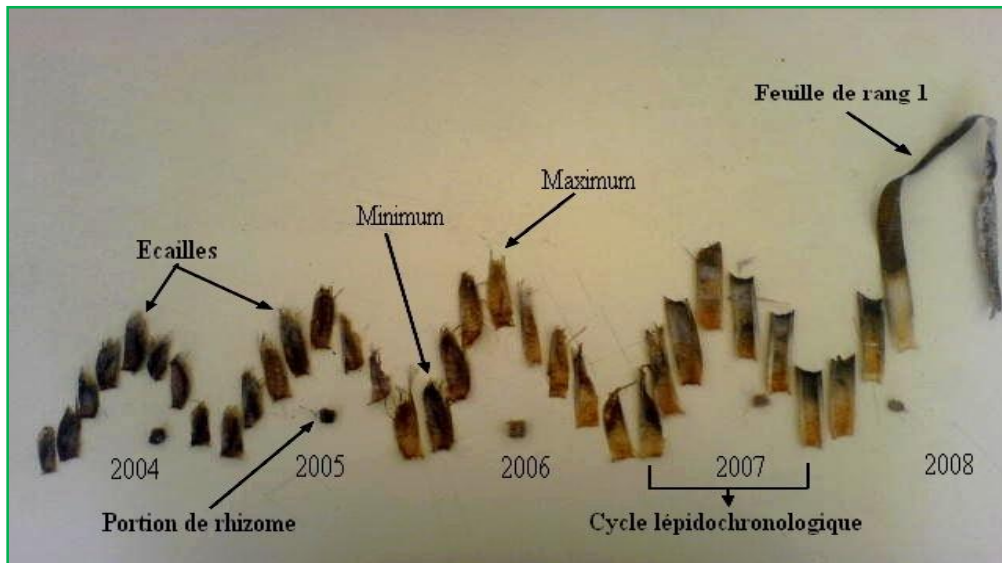


Figure 9. Photo représentant les cycles lépidochronologiques de *Posidonia oceanica* avec les tronçons de rhizomes correspondants.

## 2.4. Eude des teneurs en phénols totaux

La présence de « cellules à tannin » spécialisées dans la production de composés phénoliques a été mise en évidence chez *Posidonia oceanica* (Pellegrini et Pellegrini, 1992, 1993). Leur nombre semble augmenter dans certains cas par des facteurs externes tels que les rejets d'effluents (Pergent, 1988 ; Boumaza *et al.*, 2012) et lors de la compétition interspécifique avec deux Bryopsidophyceae, *Caulerpa taxifolia* var. *distichophylla* et *Caulerpa cylindracea* (Cuny *et al.*, 1994 ; De Villèle et Verlaque, 1995 ; Dumay *et al.*, 2004). Par ailleurs, une corrélation entre le nombre de « cellules à tannin » et la teneur en phénols totaux a été mise en évidence au niveau des feuilles de *Posidonia oceanica* (Cuny *et al.*, 1994 ; De Villèle et Verlaque, 1995). Un total de 23 acides phénoliques et divers flavonoïdes sont identifiés chez cette plante (Cuny *et al.*, 1995 ; Agostini *et al.*, 1998 ; Ferrat, 2001 ; Dumay *et al.*, 2004 ; Cannac *et al.*, 2006).

Néanmoins, peu de choses sont connues sur l'implication des composés phénoliques chez *Posidonia oceanica* face aux stress environnementaux. En outre, les études menées à ce jour sur les teneurs en phénols totaux des feuilles de *Posidonia oceanica*, n'ont pas permis de préciser leur implication face aux espèces invasives *Caulerpa taxifolia* var. *distichophylla* et *Caulerpa cylindracea* (Ferrat *et al.*, 2003). Quant à l'enrichissement du milieu en azote par les activités aquacoles, il semble entraîner une

augmentation de la teneur en phénols totaux (Leoni *et al.*, 2007) et flavonoïdes (Cannac *et al.*, 2006). La contamination par le mercure semble également induire une augmentation de la teneur en phénols totaux (Ferrat *et al.*, 2003 ; 2012). Enfin, la teneur en phénols totaux des rhizomes de *Posidonia oceanica* semble répondre aux perturbations du milieu, liés aux rejets d'effluents (Migliore *et al.*, 2007 ; Rotini *et al.*, 2011).

#### 2.4.1. Tri et lyophilisation des échantillons

Au laboratoire et à l'abri de la lumière, les 45 faisceaux destinés au dosage des composés phénoliques (§ 2.2) sont immédiatement séparés en trois lots de 15 faisceaux, puis disséqués selon le protocole de Giraud (1979). Les feuilles sont débarrassées de leurs épiphytes par grattage doux, à l'aide d'une lame de verre, de manière à altérer le moins possible l'épiderme, puis rincées à l'eau distillée. Les différents types de tissus : limbes et bases des feuilles adultes et feuilles intermédiaires sont ensuite lyophilisés (lyophilisateur, modèle SHAIST®, BETA-1-8), durant 72 h.

#### 2.4.2. Extraction

L'extraction hydro-éthanolique des composés phénoliques est réalisée conformément au protocole mis au point par Cuny *et al.* (1995), dont le synopsis est donné dans la figure 10. Pour chaque lot, 3 g de poids sec de chacun des tissus étudiés (limbes et bases des feuilles adultes, feuilles intermédiaires), sont mis à infuser pendant trois heures dans 200 ml d'éthanol aqueux (50 % v/v ; C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O – 99.8%, Riedel-de Haën). L'infusion se fait à reflux, à l'obscurité et au bain-marie (40°C). Les échantillons sont ensuite placés sous vide, au bain-marie à 45°C (Rotavapor – BÜCHI R-114 et B-480), et l'éthanol ainsi distillé est séparé par condensation le long d'une colonne de refroidissement. Une double extraction (2 X 25 ml) est réalisée à l'aide d'acétate d'éthyle (C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>O<sub>2</sub> – 99.8% Carlo-Erba). Les phases aqueuse et organique sont séparées dans une ampoule à décanter. La phase organique des échantillons est alors asséchée par ajout de sulfate de sodium anhydre (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – SIGMA@) afin d'éliminer toute présence d'eau, puis filtrée (filtre Whatman, Φ 150 µm, Macherey-Nagel). Le séchage se fait ensuite sous jet d'azote jusqu'à l'obtention d'un résidu sec, qui est repris dans 1 ml de méthanol (CH<sub>4</sub>O – 99.5 %, Fluka) dans des ampoules ambrées. Afin de supprimer le bruit de fond lié au mode opératoire, chaque série

de six échantillons est accompagnée d'un blanc ; il est préparé de la même manière que les échantillons, sauf qu'aucun échantillon n'est ajouté. Les échantillons sont ensuite conservés au réfrigérateur jusqu'à leur analyse.

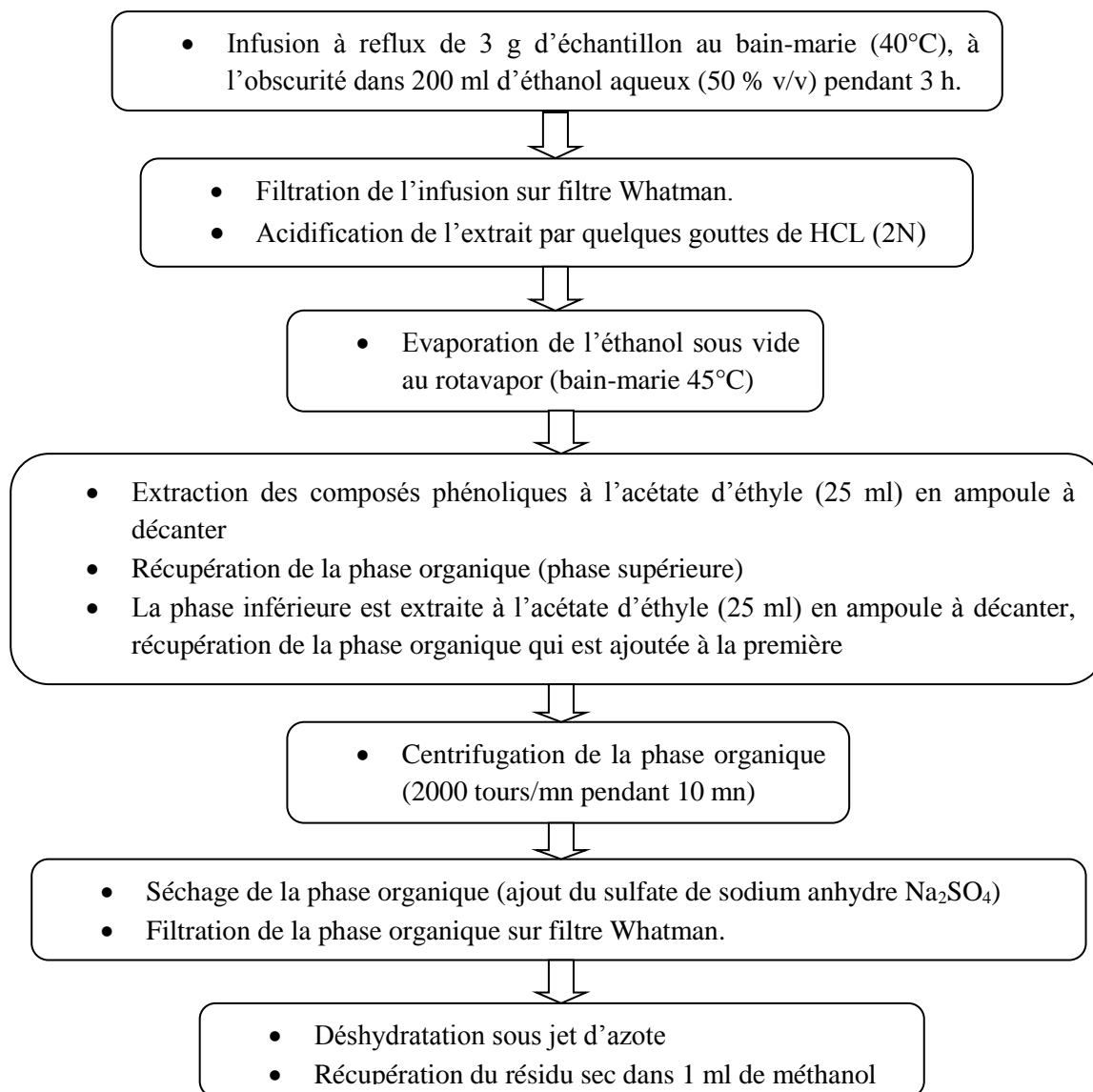


Figure 10. Synopsis du protocole utilisé pour l'extraction des composés phénoliques (d'après Cuny *et al.*, 1995).

### 2.4.3. Dosage par spectrophotométrie

Le protocole utilisé pour le dosage des phénols totaux est celui mis au point par Waterman et Mole (1994) et modifié par Koivikko *et al.* (2005). Le principe de cette méthode est basé sur l'emploi du réactif de Folin-Ciocalteu, qui a l'avantage de présenter moins d'interférences avec les composés non phénoliques que l'emploi du réactif Folin-

Denis (Watermann et Mole, 1994). La méthode est basée sur la réduction, en milieu alcalin, de la mixture acide phosphotungstique et acide phosphomolybdique qui compose ce réactif, par les groupements oxydables des composés phénoliques. Le produit de la réduction, nommé chromophore, est un oxyde métallique de couleur bleue, présentant un maximum d'absorption entre 640 et 800 nm, et dont l'intensité est proportionnelle à la quantité de composés phénoliques présents dans l'échantillon (Waterman et Mole, 1994).

Le synopsis du protocole d'analyse est donné dans la figure 11 et les dosages sont effectués sur trois répliquats de chaque extrait. 1 ml de l'échantillon dilué est mélangé dans un tube à essai avec 1 ml de réactif Folin-Ciocalteu à 1N (SIGMA@, 2N), puis mélangé au vortex. Après 3 mn d'incubation à température ambiante et pour rendre le milieu basique, 2 ml d'une solution de carbonate de sodium  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (SIGMA@, 20%) sont ajoutés, puis agités au vortex. Les échantillons sont incubés à 20°C pendant 1 heure (incubateur de marque Nüve, EN : 400), puis centrifugés (centrifugeuse de type SIGMA@ 1-6P) pendant 8 mn à 1600 tours/mn.

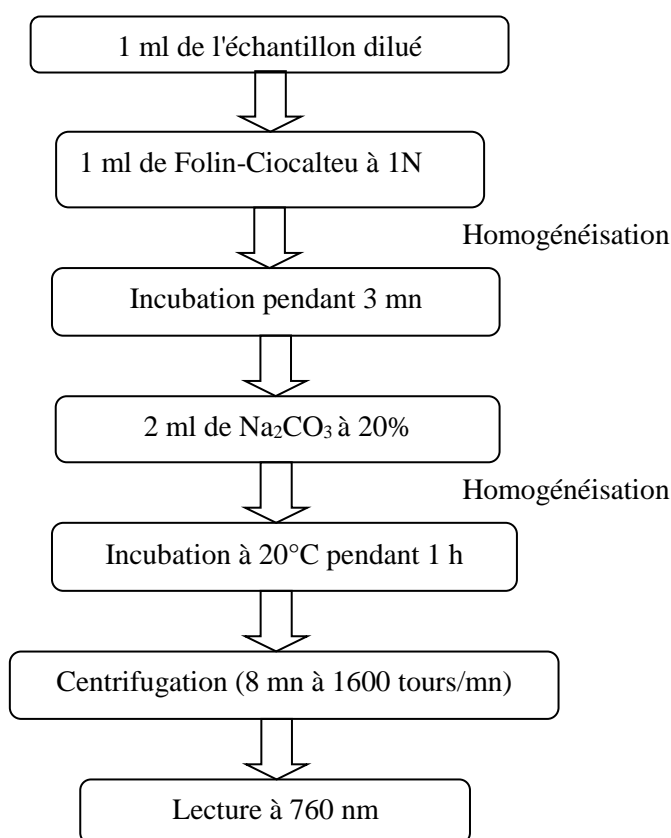


Figure 11. Synopsis du protocole utilisé pour le dosage des composés phénoliques (d'après Waterman et Mole, 1994 modifié par Koivikko *et al.*, 2005).

Les teneurs en phénols totaux sont déterminées par colorimétrie à l'aide d'un spectrophotomètre à UV-visible à double faisceau de marque SHIMADZU UV-1800. Le phloroglucinol (Fluka) est utilisé comme standard pour l'élaboration des courbes étalons (Cuny *et al.*, 1995). Les concentrations en phénols totaux sont calculées à partir de la droite de régression de la courbe d'étalonnage et sont exprimées en  $\mu\text{g}$  équivalent de phloroglucinol par ml d'extrait. La quantité de composés phénoliques dans l'échantillon est calculée en utilisant la formule proposée par Koivikko (2008) (Annexe 2).

Dans le but de produire des résultats fiables et reproductibles, nous avons déterminé les critères de validation suivants : les limites de détection et de quantification, la linéarité et la fidélité (CEAEQ, 2009) (Annexe 2).

## 2.5. Suivi des limites inférieures

L'extension des herbiers à *Posidonia oceanica* en profondeur, est largement conditionnée par la quantité de lumière disponible (Duarte, 1991). En limite inférieure, l'herbier est donc particulièrement sensible à toute altération de la qualité des eaux, comme par exemple l'augmentation de la turbidité, qui peut entraîner une remontée de cette limite (Meinesz et Laurent, 1978 ; Ardizzone *et al.*, 2006). La position de cette limite peut être contrôlée par la mise en place de balises en béton au contact de l'herbier, dont le suivi permettra de mesurer la dynamique de l'herbier – régression, progression, stabilité –, que l'on peut extrapoler à plusieurs kilomètres d'herbier situé de part et d'autre de ce balisage (Meinesz *et al.*, 1981).

### 2.5.1. Mise en place du balisage

Le calendrier de la mise en place des deux balisages au niveau des limites inférieures des herbiers de Bou Ismaïl et de Kouali, ainsi que leur suivi est donné dans le tableau 3.

Tableau 3. Plan de mise en place et suivi des balisages.

Site	Date	Objet
Bou Ismaïl	Juillet 2007	Mise en place du balisage en limite inférieure
Kouali	Juin 2008	Mise en place du balisage en limite inférieure
Bou Ismaïl / Kouali	Juillet 2010	Suivi des balisages

La technique consiste en la mise en place de 12 balises en béton, le long d'une portion représentative de la limite inférieure de l'herbier. Les balises en béton, spécialement manufacturées, sont de forme tronconique dont le diamètre moyen est de 30 cm pour une hauteur de 17 cm. Elles sont percées par trois trous, permettant un ancrage permanent sur le fond par trois tiges métalliques, d'une longueur de 1 m et de 12 mm de diamètre. Les balises sont disposées tous les 5 m, au contact de la portion d'herbier préalablement repérée. Une fois positionnée sur le fond, chaque balise est équipée d'une plaquette en PVC et d'un flotteur numérotés pour faciliter les repérages ultérieurs. En outre, des piquets photographiques (tige métallique de 1.5 m de long) sont installés à 1.5 m en aval de chaque balise (Figure 12). Une fois le balisage installé, certains relevés, précisés ci-après, sont effectués afin de caractériser au mieux la structure de la limite inférieure. Tout d'abord l'orientation des balises, les unes par rapport aux autres, de même que celles du piquet photographique par rapport à la balise, sont relevées à l'aide d'un compas (précision  $\pm 5^\circ$ ). Ces mesures permettent de réaliser un plan du balisage. La profondeur de chaque balise est également mesurée à l'aide d'un profondimètre électronique (précision  $\pm 10$  cm). La mesure s'effectue au pied de chaque balise, elle est répétée systématiquement au cours des suivis successifs, afin de mettre en évidence d'éventuels mouvements sédimentaires, constatés par les changements de valeurs de profondeurs. Des prises de vue horizontales sont réalisées à partir des piquets photographiques, soit deux photos par balise : une excentrée à droite et l'autre excentrée à gauche. Elles sont assemblées pour constituer une vue panoramique qui sert à visualiser les modifications éventuelles de la limite par rapport à l'état initial.

## 2.5.2. Etudes associées

### 2.5.2.1. Type de limite

Le type de limite inférieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* apporte des informations sur la dynamique de l'herbier, d'une part en fonction de l'évolution de la transparence de l'eau et d'autre part en fonction de l'intensité de l'hydrodynamisme (Meinesz et Laurent, 1978). Le type de limite est en mesure d'apporter des informations sur les conditions du milieu, de façon plus précoce que l'extension bathymétrique de la limite inférieure (Pergent *et al.*, 2005 ; Lopez y Royo, 2008).

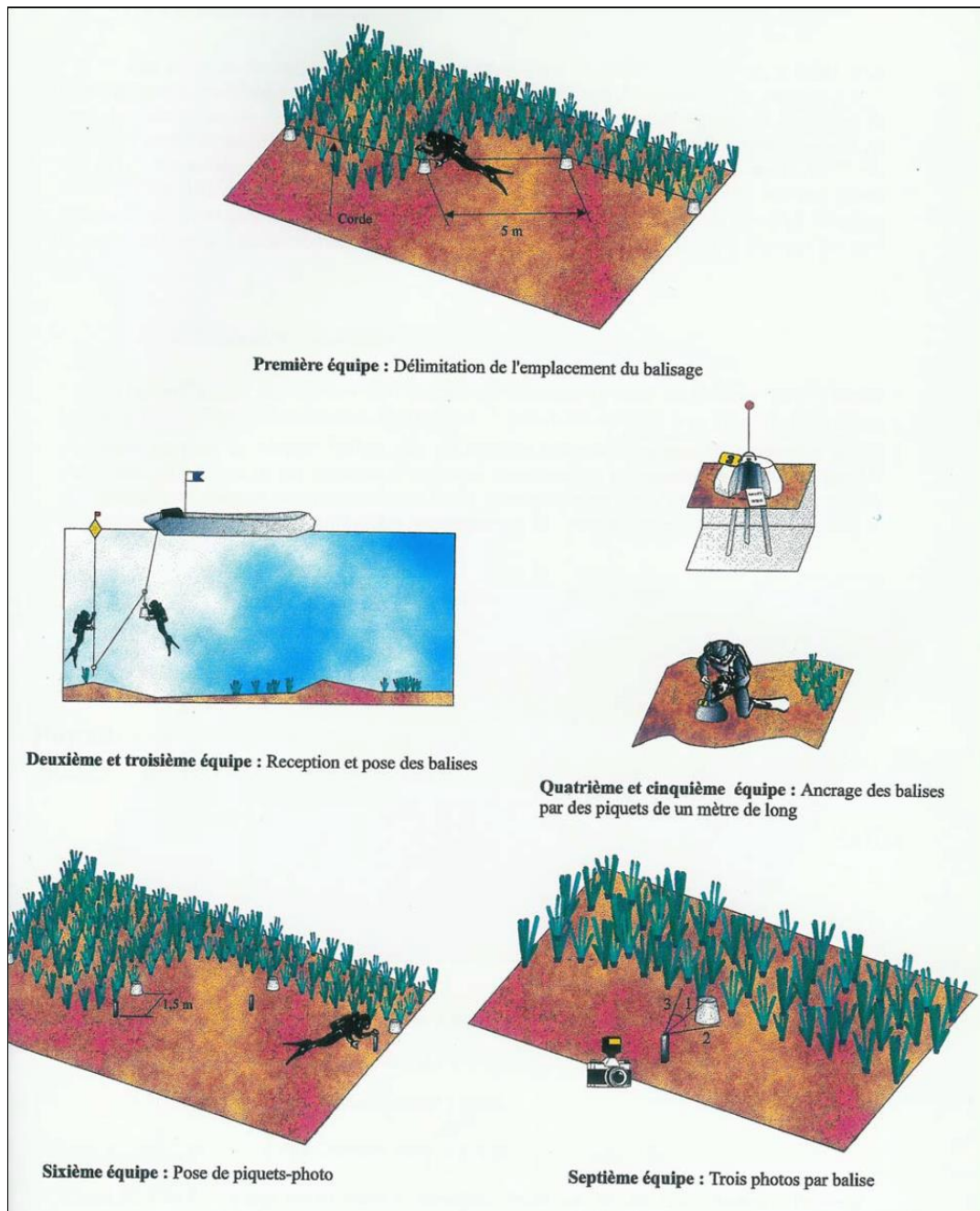


Figure 12. Descriptif de la mise en place d'un balisage en limite inférieure (d'après Charbonnel *et al.*, 2000).

Une observation en plongée permet de caractériser le type de limite en fonction de la typologie de Meinez et Laurent (1978) (Figure 13) :

- Limite progressive, caractérisée par la présence de rhizomes plagiotropes disposés de façon parallèle, dans le sens de la pente. L'herbier n'édifie pas de matse mais la présence de ces rhizomes traduit une amélioration, au moins momentanée, de la qualité des eaux (Pergent *et al.*, 2005).

- Limite brusque, caractérisée par la présence de rhizomes orthotropes, sans édification de matte et sans la présence de matte morte. Elle traduit généralement la stabilisation des conditions du milieu (transparence des eaux).
- Limite érosive, caractérisée par la présence d'un tombant de matte au niveau de la zone de contact entre l'herbier et le sédiment. L'hydrodynamisme semble être à l'origine de cette limite et interdit toute progression vers le large (Pergent *et al.*, 2005).
- Limite régressive, ce type de limite traduit une régression de l'herbier, vraisemblablement liée à une augmentation de la turbidité moyenne des eaux (Pergent *et al.*, 2005). Ce type de limite peut présenter différents stades de régression, allant du stade 1 au stade 3. Le stade 1 est caractérisé par la présence de rhizomes plagiotropes morts. Le stade 2 d'un herbier en régression se termine par des touffes de faisceaux foliaires vivants, mais dont les faisceaux foliaires sont très déchaussés. Le stade 3 est caractérisé par un herbier sur matte, épars, seuls des faisceaux isolés et des touffes persistent (Meinesz et Laurent, 1978).

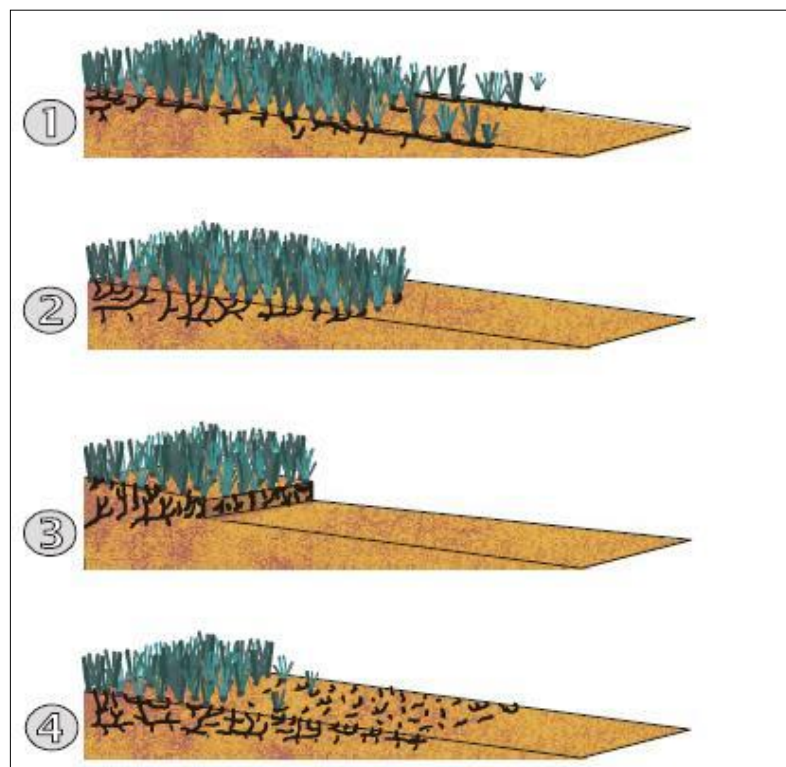


Figure 13. Types de limite inférieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* (d'après Pergent *et al.*, 2005) : (1) progressive, (2) brusque, (3) érosive et (4) régressive.

### 2.5.2.2. Analyse granulométrique du sédiment

L'analyse sédimentologique est réalisée sur la fraction superficielle du sédiment (0 à 2 cm d'épaisseur). Trois prélèvements de sédiments sont effectués le long de la limite balisée, à l'aide d'une boîte métallique cylindrique sans fond, enveloppée à l'une de ses extrémités par un sac en plastique retenu par un élastique. L'ensemble des prélèvements sédimentaires a été analysé au laboratoire selon les techniques classiques de tamisage (Weydert, 1973 ; Rivière, 1977). La granulométrie consiste à évaluer le pourcentage de la masse totale correspondant à chaque dimension de particule (Rivière, 1977).

Le sédiment est d'abord séché à l'étuve à 105°C pendant 24h. Il est ensuite débarrassé des éventuelles restes macroscopiques de *Posidonia oceanica* (rhizomes, feuilles mortes, écailles...) et une fraction de l'échantillon (200 g environ) est passée sous l'eau dans un tamis de 63 µm, afin d'éliminer la fraction pélitique. La fraction restante est séchée à l'étuve, puis pesée et sa granulométrie est réalisée mécaniquement pendant 10 mn sur des tamis de norme AFNOR, de maille 0,063 ; 0,125 ; 0,25 ; 0,5 ; 1 ; 2 et 4 mm. Chaque refus de tamis est pesé et est exprimé en pourcentage du poids total. Le mode de représentation des distributions granulométriques utilisé est le diagramme semi-log. Les tailles sont représentées sur l'axe des abscisses en échelle logarithmique de base 10 (en général en mm) et les ordonnées en échelle arithmétique de 0 à 100 %.

Les paramètres granulométriques utilisés sont :

- La taille moyenne des sédiments (TM), qui permet de positionner globalement l'échantillon sur l'échelle des dimensions des sédiments. Les différentes limites utilisées par Folk et Ward (1957) sont données en annexe 3.
- L'indice de symétrie de la distribution (SKi), qui indique un étalement de la courbe granulométrique plus ou moins important vers les sédiments fins ou les sédiments grossiers. Les limites et la nomenclature utilisées par Folk et Ward (1957) sont données en annexe 3.

- L'indice de tri de Folk ( $S_0$ ), qui donne une idée de l'étalement de la courbe autour de son grain moyen. Les différents stades du triage utilisés par Folk (1954) sont donnés en annexe 3.

#### 2.5.2.3. Paramètres morphologiques

Les modes opératoires utilisés pour la mesure de la densité, de la biométrie foliaire et de la biomasse des feuilles sont ceux décrits précédemment (§ 2.3.1, § 2.3.3 et § 2.3.4).

## 2.6. Analyses statistiques des données

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées dans l'environnement R (R Development Core Team, 2011). Les tests statistiques utilisés et listés ci-après sont réalisés au seuil de signification de 5%.

Lorsque les distributions des données sont normales et que les variances sont égales les comparaisons de moyennes sont réalisées à l'aide du test de Student. Il a été mis en œuvre pour comparer les sites du point de vue des paramètres biométriques, de l'indice épiphytique et enfin du coefficient A après application de la transformation arc sinus de sa racine carrée ( $asin\sqrt{X}$ ).

Lorsque ce test paramétrique ne peut être mis en œuvre, un test non paramétrique est utilisé. Le test de Kruskal-Wallis a été mis en œuvre pour comparer les sites du point de vue des densités, des recouvrements des herbiers, des teneurs en phénols totaux et des paramètres lépidochronologiques.



# Chapitre 3

## Résultats

### 3.1. Paramètres morphologiques

#### 3.1.1. Densité et recouvrement de l'herbier

La densité, exprimée en nombre de faisceaux de *Posidonia oceanica* par m<sup>2</sup>, ne montre pas de différence significative entre le site anthropisé (Bou Ismaïl) et le site de référence (Kouali) (Tableau 4). Seul le recouvrement, estimé en pourcentage, est significativement moins élevé à Bou Ismaïl (-5 m) (22 %) comparativement à Kouali (-5 m) (60 %) (Tableau 4).

Tableau 4. Structure de l'herbier par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (\*\*\* p < 0.001; \*\* p < 0.01; \* p < 0.05) ou non (ns).

		Kouali	Bou Ismaïl	
Densité (m <sup>2</sup> )	Limite supérieure(-5 m)	302 ± 79	318 ± 95	ns
	Limite inférieure(-20 m)	252 ± 77	223 ± 36	ns
Recouvrement (%)	Limite supérieure(-5 m)	60 ± 29	22 ± 15	***
	Limite inférieure(-20 m)	44 ± 23	39 ± 12	ns

### 3.1.2. Paramètres biométriques

#### 3.1.2.1. Nombre de feuilles

Le nombre moyen annuel de feuilles adultes par faisceau est significativement moins élevé à Bou Ismaïl comparativement à Kouali (Tableau 5). En outre, cette différence est hautement significative ( $p < 0.001$ ) en limite supérieure où les nombres moyens de feuilles adultes sont de 3.7 à Bou Ismaïl et 4.1 à Kouali. La même tendance est enregistrée durant l'année ; à l'exception des mois de juillet en limite supérieure et mars en limite inférieure, pour lesquels aucune différence significative n'est enregistrée (Figure 14). En outre, la valeur 4.5 feuilles, relevée en juillet à Bou Ismaïl (-20 m), est significativement plus importante que la valeur 4.1 feuilles enregistrée à Kouali (-20 m).

Le nombre moyen annuel de feuilles intermédiaires par faisceau ne présente pas de différence significative entre les deux sites (Tableau 5). Durant l'année, le nombre de feuilles intermédiaires est significativement plus important à Bou Ismaïl (-5 m) en juillet comparativement à Kouali (-5 m) (respectivement 2.9. et 2.5) et inversement en décembre (respectivement 3.8 et 4.2 feuilles) (Figure 12).

Tableau 5. Nombre moyen de feuilles adultes et intermédiaires par faisceau, par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (\*\*\*)  $p < 0.001$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ ) ou non (ns).

		Kouali	Bou Ismaïl	
Nombre de feuilles adultes par faisceau	Limite supérieure (-5 m)	4.1 ± 0.8	3.7 ± 0.9	***
	Limite inférieure (-20 m)	3.8 ± 0.9	3.5 ± 0.9	*
Nombre de feuilles intermédiaires par faisceau	Limite supérieure (-5 m)	3.5 ± 0.9	3.5 ± 0.7	ns
	Limite inférieure (-20 m)	3.2 ± 0.9	3.3 ± 0.8	ns

#### 3.1.2.2. Longueur des feuilles

La longueur moyenne annuelle des feuilles adultes est significativement moins élevée à Bou Ismaïl comparativement à Kouali (Tableau 6). En outre, cette différence est hautement significative, et ce, au niveau des limites supérieure et inférieure. La même tendance est enregistrée durant l'année, à l'exception du mois de mars où la longueur des feuilles adultes à Bou Ismaïl (-20 m) est significativement plus importante qu'à Kouali (-20 m) : les valeurs enregistrées sont respectivement de 516 et 334 mm (Figure 15).

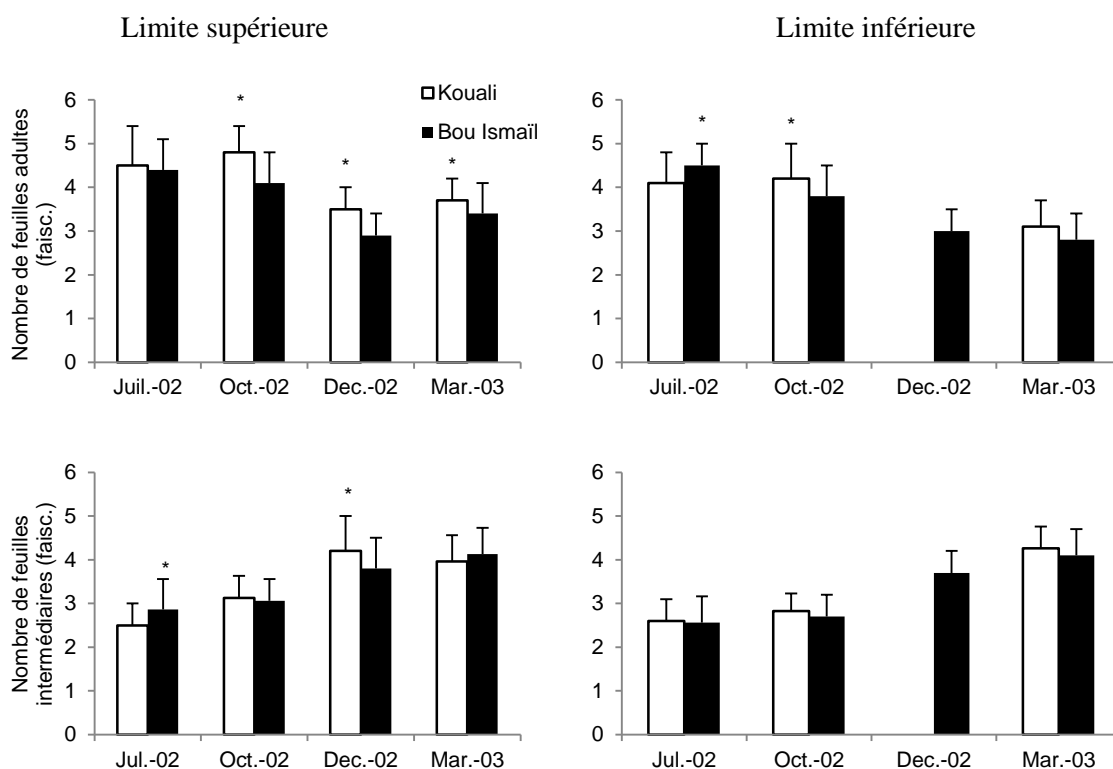


Figure 14. Evolution du nombre moyen de feuilles adultes et intermédiaires au cours du temps. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les deux sites sont indiquées par le symbole \* ( $p < 0.05$ ).

La longueur moyenne annuelle des feuilles intermédiaires est significativement moins élevée à Bou Ismaïl (Tableau 6). En outre, cette différence est hautement significative en limite supérieure et les valeurs enregistrées sont respectivement de 231 mm (Bou Ismaïl) et 298 mm (Kouali). La même tendance est enregistrée durant l'année, à l'exception des mois de juillet, en limite supérieure, et des mois d'octobre et mars en limite inférieure, pour lesquels aucune différence significative n'est enregistrée (Figure 15).

Tableau 6. Longueur moyenne des feuilles adultes et intermédiaires par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (\*\*\*)  $p < 0.001$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ ) ou non (ns).

		Kouali	Bou Ismaïl	
Longueur des feuilles adultes (mm)	Limite supérieure (-5 m)	576 ± 167	388 ± 112	***
	Limite inférieure (-20 m)	554 ± 154	475 ± 147	***
Longueur des feuilles intermédiaires (mm)	Limite supérieure (-5 m)	298 ± 144	231 ± 95	***
	Limite inférieure (-20 m)	280 ± 99	236 ± 104	**

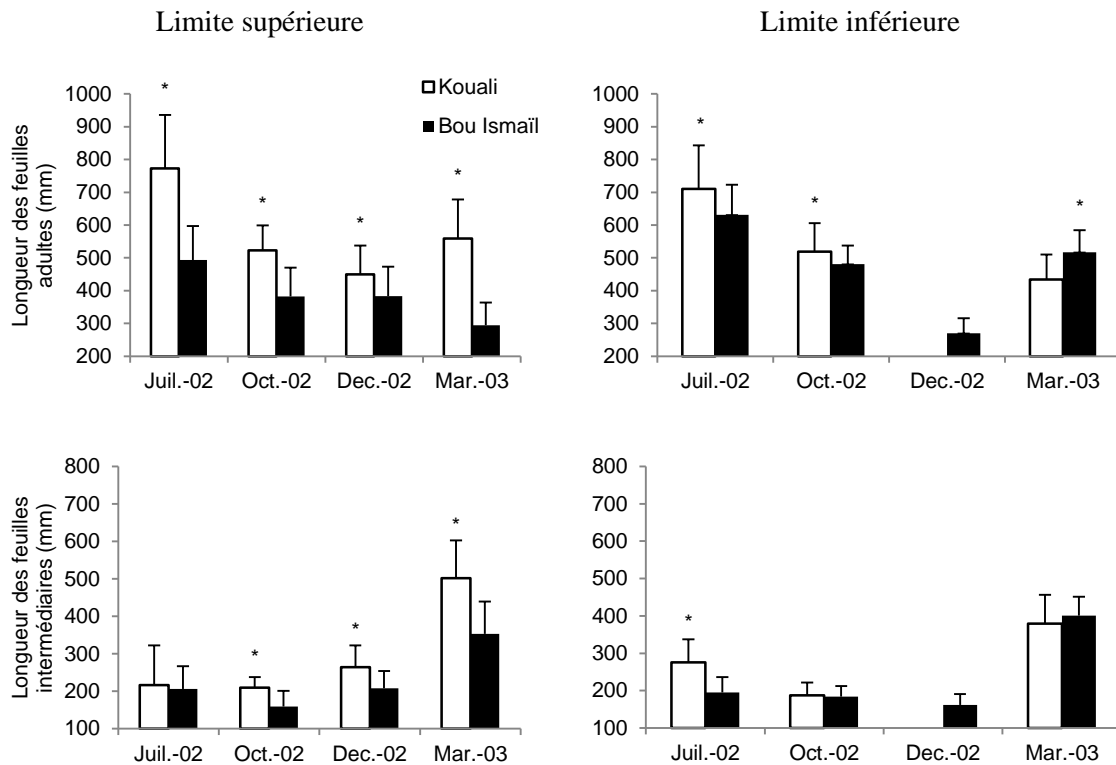


Figure 15. Evolution de la longueur moyenne des feuilles adultes et intermédiaires au cours du temps. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les sites sont indiquées par le symbole \* ( $p < 0.05$ ).

### 3.1.2.3. Largeur des feuilles

La largeur moyenne annuelle des feuilles adultes ne présente de différence significative qu'au niveau de la limite supérieure, et la valeur enregistrée à Bou Ismaïl (10.9 mm) est moins élevée que celle enregistrée à Kouali (11.2 mm) (Tableau 7). Durant l'année, la même tendance est enregistrée, à l'exception du mois de juillet où la tendance s'inverse : 10.9 mm à Bou Ismaïl (-5 m) et 10.5 mm à Kouali (-5 m). Par ailleurs, la valeur (11.1 mm) enregistrée en mars à Bou Ismaïl (-20 m) est significativement moins élevée que celle (11.5 mm) de Kouali (-20 m) (Figure 16).

La largeur moyenne annuelle des feuilles intermédiaires est significativement moins élevée à Bou Ismaïl comparativement à Kouali (Tableau 7). Cette différence est moins marquée en limite inférieure où les valeurs enregistrées sont de 10.3 mm à Bou Ismaïl et 10.4 mm à Kouali. Durant l'année, ce type de différence est enregistré en octobre et décembre au niveau de la limite supérieure et en octobre et mars au niveau de la limite inférieure (Figure 16). Par ailleurs, la largeur moyenne des feuilles intermédiaires

enregistrée en juillet à Bou Ismaïl (-20 m) est plus importante qu'à Kouali (-20 m), respectivement 10.1 et 10.5 mm. Quant aux valeurs relevées en juillet et mars en limite supérieure, elles ne présentent pas de différences significatives entre les deux sites (Figure 16).

Tableau 7. Largeur moyenne des feuilles adultes et intermédiaires par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (\*\*\*  $p < 0.001$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ ) ou non (ns).

		Kouali	Bou Ismaïl	
Largeur des feuilles adultes (mm)	Limite supérieure (-5 m)	11.2 ± 0.7	10.9 ± 0.6	**
	Limite inférieure (-20 m)	11.2 ± 0.7	11.1 ± 0.5	ns
Largeur des feuilles intermédiaires (mm)	Limite supérieure (-5 m)	10.4 ± 0.6	10.1 ± 0.6	**
	Limite inférieure (-20 m)	10.4 ± 0.6	10.3 ± 0.4	*

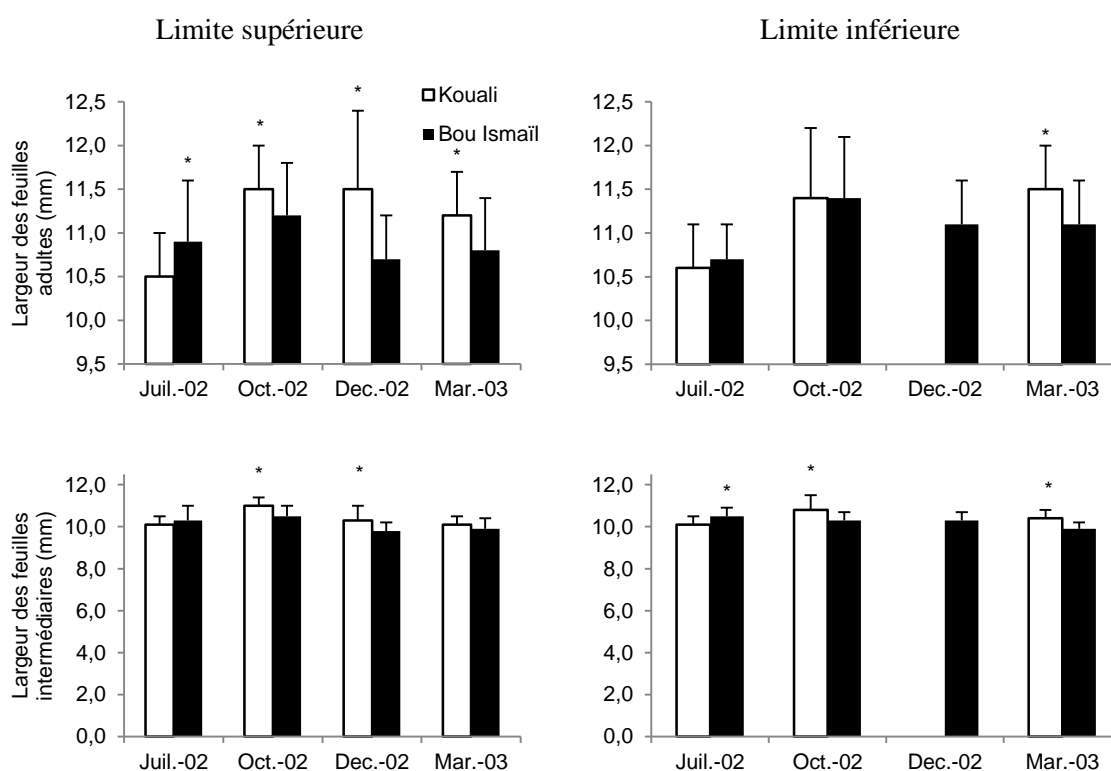


Figure 16. Evolution de la largeur moyenne des feuilles adultes et intermédiaires au cours du temps. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les sites sont indiquées par le symbole \* ( $p < 0.05$ ).

### 3.1.2.4. Surface foliaire

La surface foliaire, par faisceau, moyenne annuelle des feuilles adultes est significativement moins élevée au niveau de Bou Ismaïl comparativement à Kouali

(Tableau 8). En outre, les différences sont hautement significatives et ce, au niveau des limites supérieure et inférieure. Durant l'année, la même tendance est enregistrée en limite supérieure (Figure 17). Tandis qu'en limite inférieure, aucune différence significative n'est enregistrée entre les deux sites ; à l'exception du mois d'octobre où la valeur relevée à Kouali ( $258 \text{ cm}^2.\text{faisceau}^{-1}$ ) est significativement supérieure à celle relevée à Bou Ismaïl ( $206 \text{ cm}^2.\text{faisceau}^{-1}$ ).

La surface foliaire par faisceau, moyenne annuelle des feuilles intermédiaires est significativement moins élevée à Bou Ismaïl (Tableau 8). La même tendance est enregistrée durant l'année en limite supérieure ; à l'exception du mois de juillet où aucune différence significative n'est enregistrée entre les deux sites. En limite inférieure, aucune différence significative n'est enregistrée entre les deux sites, à l'exception du mois de juillet où la surface foliaire est significativement plus élevée à Kouali ( $73 \text{ cm}^2.\text{faisceau}^{-1}$ ) comparativement à Bou Ismaïl ( $57 \text{ cm}^2.\text{faisceau}^{-1}$ ) (Figure 17).

Tableau 8. Surface foliaire par faisceau moyenne des feuilles adultes et intermédiaires par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (\*\*\*)  $p < 0.001$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ ) ou non (ns).

		Kouali	Bou Ismaïl	
Surface foliaire des feuilles adultes ( $\text{cm}^2.\text{faisceau}^{-1}$ )	Limite supérieure (-5 m)	$265 \pm 90$	$160 \pm 72$	***
	Limite inférieure (-20 m)	$242 \pm 100$	$190 \pm 87$	***
Surface foliaire des feuilles intermédiaires ( $\text{cm}^2.\text{faisceau}^{-1}$ )	Limite supérieure (-5 m)	$113 \pm 67$	$88 \pm 53$	**
	Limite inférieure (-20 m)	$101 \pm 57$	$85 \pm 53$	*

### 3.1.2.5. Coefficient A

Le coefficient A moyen annuel de feuilles adultes ne présente pas de différence significative entre les deux sites étudiés (Tableau 9). Durant l'année, le coefficient A est significativement plus élevé à Bou Ismaïl (-5 m) comparativement à Kouali (-5 m) en juillet (93 % contre 77 %) et en octobre (77 % contre 42 %) (Figure 18). Tandis qu'en limite inférieure aucune différence significative n'est enregistrée durant l'année.

Le coefficient A moyen annuel des feuilles intermédiaires ne montre pas de différence significative entre les deux sites étudiés (Tableau 9). Durant l'année, le coefficient A est significativement plus élevé à Bou Ismaïl (-5 m) comparativement à Kouali (-5 m) en octobre (18 % contre 2 %) et mars (48 % contre 23 %). Tandis qu'en

limite inférieure, cette tendance est rencontrée en juillet (12 % contre 2 %) et en octobre (14 % contre 0 %) (Figure 18).

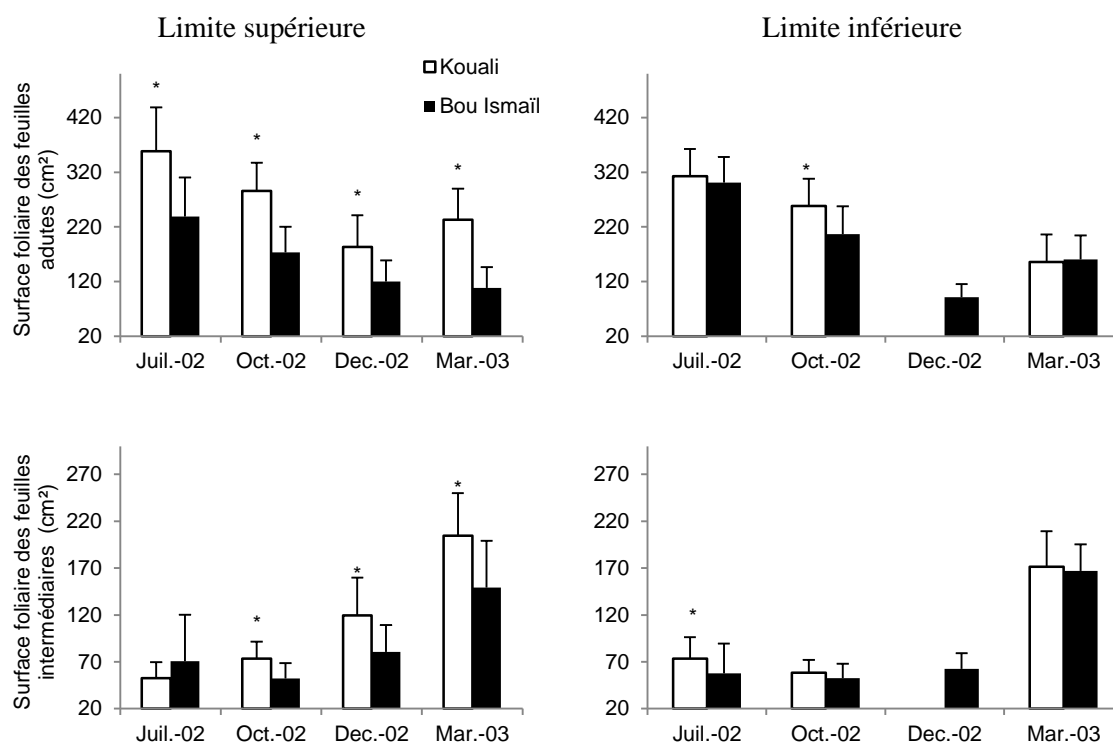


Figure 17. Evolution de la surface foliaire moyenne des feuilles adultes et intermédiaires au cours du temps. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les deux sites sont indiquées par le symbole \* ( $p < 0.05$ ).

Tableau 9. Coefficient A moyen des feuilles adultes et intermédiaires par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (\*\*\*)  $p < 0.001$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ ) ou non (ns).

		Kouali	Bou Ismaïl	
Coefficient A des feuilles adultes (%)	Limite supérieure (-5 m)	72 ± 22	88 ± 10	ns
	Limite inférieure (-20 m)	75 ± 16	58 ± 15	ns
Coefficient A des feuilles Intermédiaires(%)	Limite supérieure (-5 m)	10 ± 10	22 ± 18	ns
	Limite inférieure (-20 m)	5 ± 5	10 ± 7	ns

### 3.1.2.6. Indice épiphytique

L'indice épiphytique moyen annuel de feuilles adultes est significativement moins élevé au niveau du site anthropisé (Bou Ismaïl) par rapport au site de référence (Kouali) (Tableau 10). En outre, cette différence est hautement significative, et ce, au niveau des limites supérieure et inférieure. Durant l'année, en limite supérieure, les valeurs sont significativement plus élevées à Bou Ismaïl comparativement à Kouali en juillet

(2.1 contre 0.6 mg.cm<sup>-2</sup>) et en octobre (0.9 contre 0.7 mg.cm<sup>-2</sup>), et la tendance s'inverse en décembre (2.1 contre 0.2 mg.cm<sup>-2</sup>) et en mars (0.6 contre 0.3 mg.cm<sup>-2</sup>) (Figure 19). Tandis qu'en limite inférieure, les valeurs sont significativement plus élevées à Kouali en juillet (0.7 contre 0.5 mg.cm<sup>-2</sup>) et octobre (0.4 contre 0.3 mg.cm<sup>-2</sup>) et la tendance s'inverse en mars (0.4 contre 0.5 mg.cm<sup>-2</sup>).

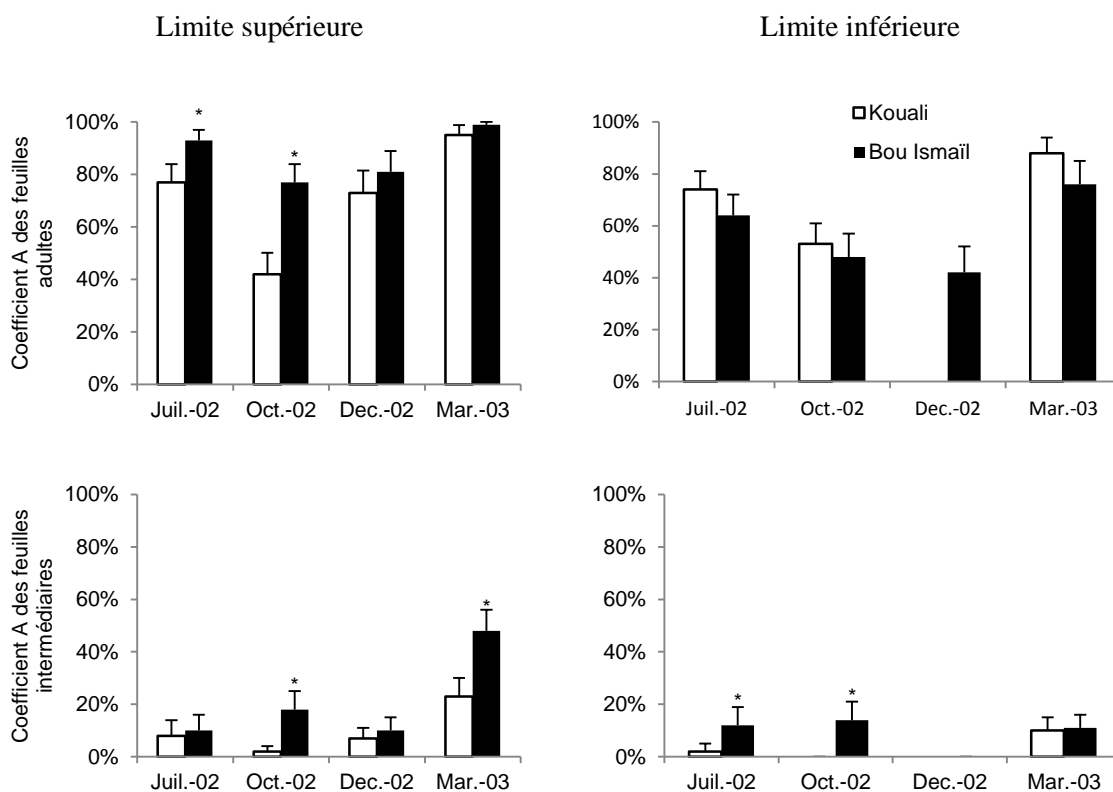


Figure 18. Evolution du coefficient A moyen des feuilles adultes et intermédiaires au cours du temps. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les deux sites sont indiquées par le symbole \* ( $p < 0.05$ ).

L'indice épiphytique moyen annuel de feuilles intermédiaires ne présente de différence significative entre les deux sites, qu'en limite supérieure où la valeur enregistrée est significativement moins élevée à Bou Ismaïl (-5 m) (0.05 mg.cm<sup>-2</sup>) comparativement à Kouali (-5 m) (0.12 mg.cm<sup>-2</sup>) (Tableau 10). En outre, durant l'année, les valeurs enregistrées sont significativement plus élevées à Kouali (-5 m) en décembre (0.24 contre 0.01 mg.cm<sup>-2</sup>) et mars (0.12 contre 0.03 mg.cm<sup>-2</sup>) et la tendance s'inverse en octobre (0.1 contre 0.05 mg.cm<sup>-2</sup>) (Figure 19). Tandis qu'en limite inférieure, cet indice épiphytique est significativement plus important à Bou Ismaïl en juillet (0.2 contre 0.15 mg.cm<sup>-2</sup>) et la tendance inverse est enregistrée le reste de l'année (Figure 19).

Tableau 10. Indice épiphytique moyen des feuilles adultes et intermédiaires par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (\*\*\*)  $p < 0.001$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ ) ou non (ns).

		Kouali	Bou Ismaïl	
Index épiphytique des feuilles adultes (mg.cm <sup>2</sup> )	Limite supérieure (-5 m)	1.02 ± 0.94	0.65 ± 0.57	***
	Limite inférieure (-20 m)	0.49 ± 0.28	0.38 ± 0.28	***
Index épiphytique des feuilles intermédiaires (mg.cm <sup>2</sup> )	Limite supérieure (-5 m)	0.12 ± 0.19	0.05 ± 0.08	***
	Limite inférieure (-20 m)	0.10 ± 0.08	0.11 ± 0.06	ns

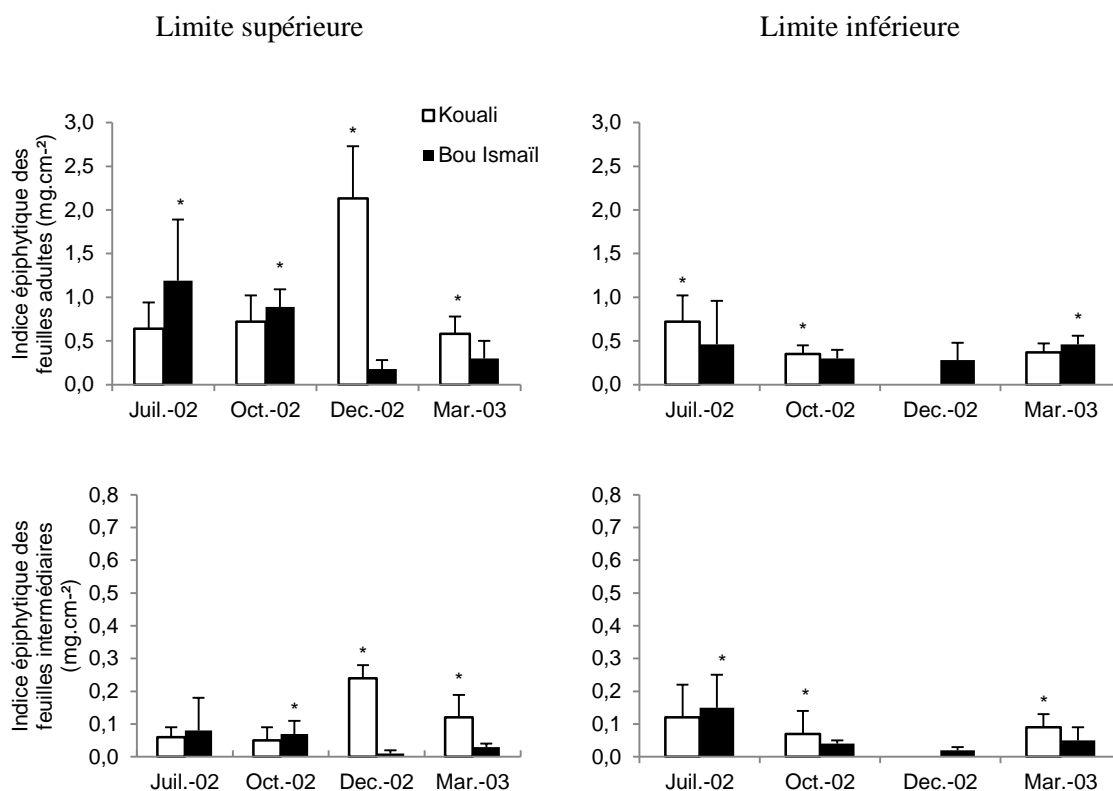


Figure 19. Evolution de l'indice épiphytique des feuilles adultes et intermédiaires au cours du temps. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les deux sites sont indiquées par le symbole \* ( $p < 0.05$ ).

### 3.1.3. Paramètres lépidochronologiques

Un total de 450 faisceaux orthotropes, soit 2054 tronçons de rhizomes ont été analysés selon la méthode lépidochronologique. L'âge des faisceaux varie entre 2 et 16 ans et l'âge moyen est significativement supérieur à Kouali à la fois à -5 m, avec ( $4.1 \pm 1.7$  ans) contre ( $3.1 \pm 1.5$  ans) à Bou Ismaïl ; et à -20 m avec ( $5.4 \pm 2.6$  ans) contre ( $4.6 \pm 2.4$  ans) à Bou Ismaïl. Par ailleurs, au niveau du site de Bou Ismaïl (-20 m) l'âge modal est de 3 ans, tandis qu'il est de 5 ans dans le reste des stations (Figure 20). La distribution de fréquence de la date d'apparition des faisceaux de *Posidonia oceanica* est symétrique au

niveau de l'ensemble des stations, à l'exception de Bou Ismaïl (-20 m), où une dyssimétrie dans la distribution est enregistrée vers les classes d'âge les plus jeunes (Figure 20).

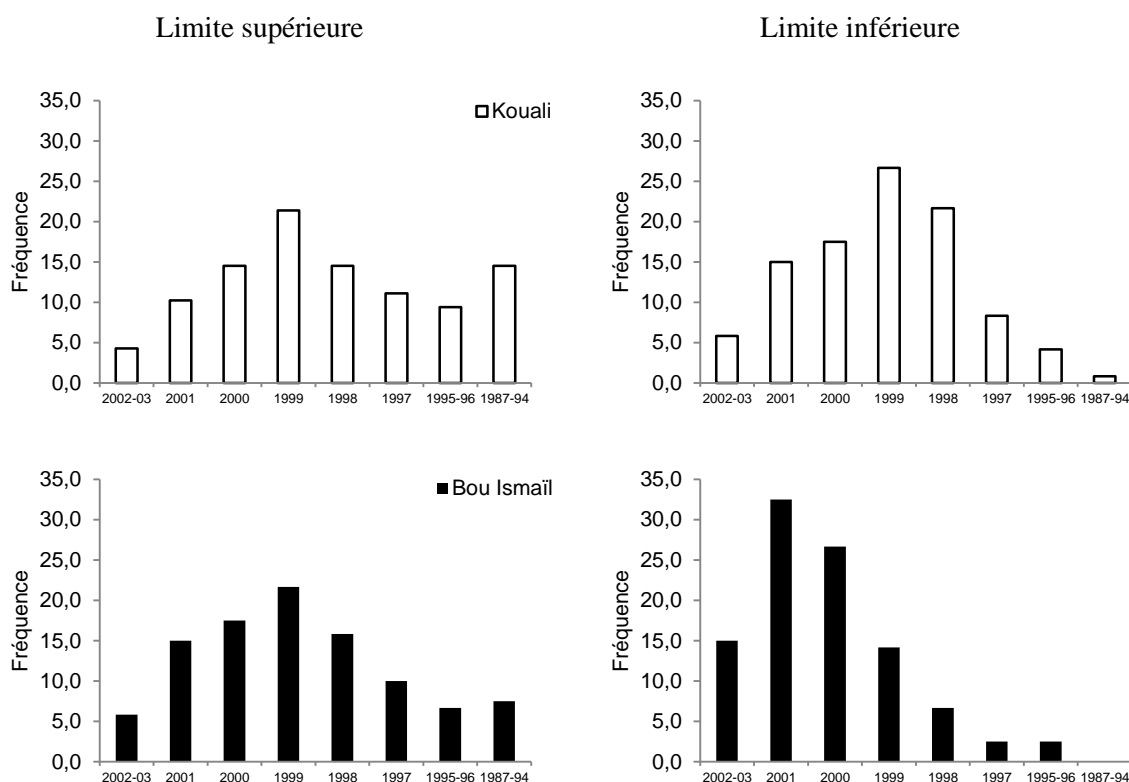


Figure 20. Distribution de fréquence (en %) de la date d'apparition des faisceaux par profondeur et par site.

### 3.1.3.1. Nombre d'écailles par cycle

Le nombre d'écailles moyen produit annuellement, ne présente de différence significative entre le site anthropisé (Bou Ismaïl) et le site de référence (Kouali), qu'au niveau de la limite inférieure (Tableau 11). En outre, cette différence est hautement significative ( $p < 0.001$ ) et la valeur enregistrée est plus importante à Bou Ismaïl (Tableau 11). En limite supérieure, seule une différence significative est enregistrée pour l'année lépidochronologique 1998, avec un nombre moyen d'écailles moins important à Bou Ismaïl (-5 m) ( $8.7 \text{ écailles.cycle}^{-1}$ ) comparativement à Kouali (-5 m) ( $9.4 \text{ écailles.cycle}^{-1}$ ) (Figure 21). Tandis qu'en limite inférieure le nombre d'écailles par cycle est plus important à Bou Ismaïl durant les années lépidochronologiques 1999, 2000 et 2001 ( $10.1$ ,  $10.6$ ,  $9.6 \text{ écailles.cycle}^{-1}$ , respectivement), comparativement à Kouali ( $9.2$ ,  $8.9$ ,  $9.1 \text{ écailles.cycle}^{-1}$ , respectivement) (Figure 21).

Tableau 11. Nombre moyen d'écailles par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (\*\*\*)  $p < 0.001$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ ) ou non (ns).

Nombre d'écailles par cycle			
	Kouali	Bou Ismaïl	
Limite supérieure (-5 m)	$8.8 \pm 1.5$	$8.6 \pm 1.3$	ns
Limite inférieure (-20 m)	$9.1 \pm 1.6$	$10.0 \pm 1.5$	***

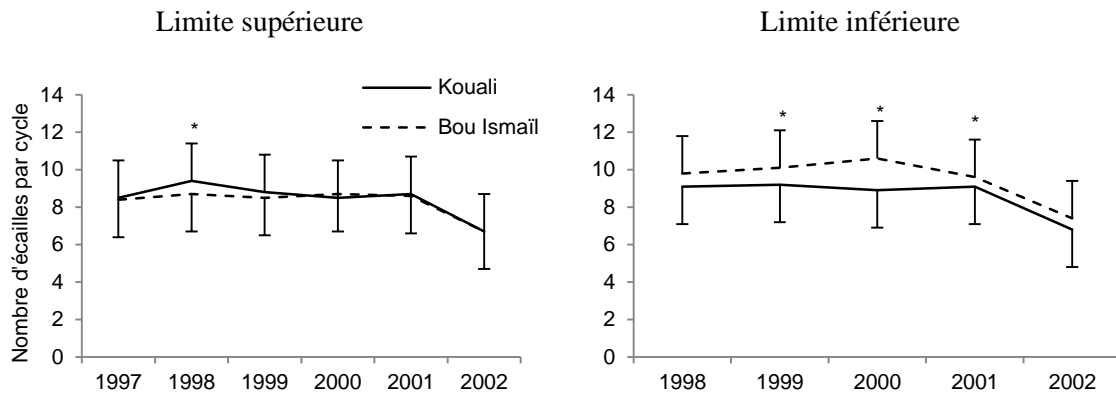


Figure 21. Evolution du nombre moyen d'écailles par année lépidochronologique, par profondeur et par site. Les barres verticales sont de longueurs égales à 1 écart-type. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les deux sites sont indiquées par le symbole \* ( $p < 0.05$ ).

### 3.1.3.2. Croissance des rhizomes

La croissance annuelle moyenne des rhizomes présente des différences hautement significatives entre le site anthropisé (Bou Ismaïl) et le site de référence (Kouali) ( $p < 0.001$ ) (Tableau 12). La croissance annuelle est significativement plus importante à Kouali (-5 m) comparativement à Bou Ismaïl (-5 m) et la tendance opposée est enregistrée en limite inférieure. Par ailleurs, seules les valeurs enregistrées à Kouali (-5 m) durant les années lépidochronologiques 1998, 2000 et 2001 (10.2, 9.3 et 7.8  $\text{mm}\cdot\text{cycle}^{-1}$ , respectivement) sont significativement supérieures à celles enregistrées à Bou Ismaïl (-5 m) (7.9, 7.5 et 6.4  $\text{mm}\cdot\text{cycle}^{-1}$ , respectivement). Tandis qu'à Bou Ismaïl (-20 m), les valeurs sont toujours significativement plus importantes que celles enregistrées à Kouali (-20 m) (Figure 22).

Tableau 12. Croissance moyenne des rhizomes par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (\*\*\*  $p < 0.001$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ ) ou non (ns).

		Kouali	Bou Ismaïl	
Croissance des rhizomes (mm.cycle <sup>-1</sup> )	Limite supérieure (-5 m)	9.0 ± 3.6	7.5 ± 3.1	***
	Limite inférieure (-20 m)	5.5 ± 2.2	9.0 ± 3.2	***

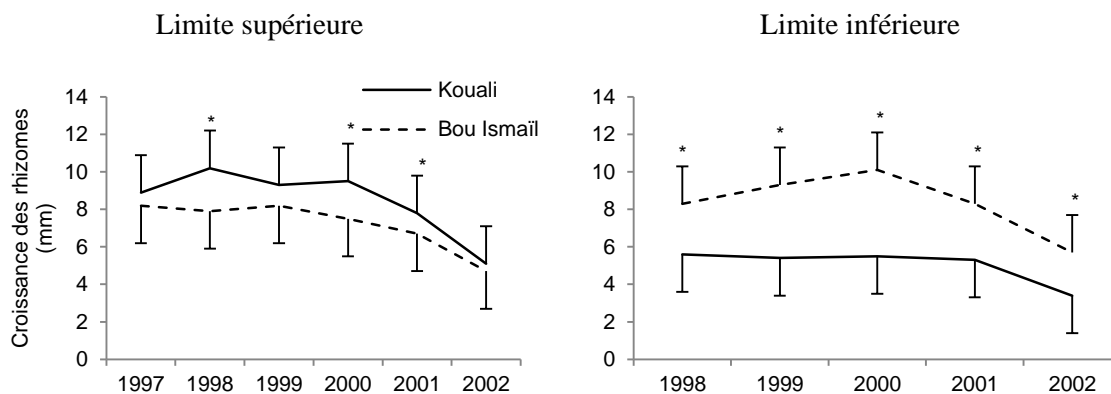


Figure 22. Evolution de la croissance moyenne des rhizomes par année lépidochronologique, par profondeur et par site. Les barres verticales sont de longueurs égales à 1 écart-type. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les deux sites sont indiquées par le symbole \* ( $p < 0.05$ ).

### 3.1.3.3. Production des rhizomes

La production annuelle moyenne des rhizomes présente des différences significatives entre le site anthropisé (Bou Ismaïl) et le site de référence (Kouali) (Tableau 13). Par ailleurs, la figure 23 montre que les valeurs enregistrées à Kouali (-5 m) sont toujours significativement supérieures à celles enregistrées à Bou Ismaïl (-5 m), et la tendance opposée est enregistrée à Bou Ismaïl (-20 m).

Tableau 13. Production moyenne des rhizomes par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (\*\*\*  $p < 0.001$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ ) ou non (ns).

		Kouali	Bou Ismaïl	
Production des rhizomes (mg.cycle <sup>-1</sup> )	Limite supérieure (-5 m)	142.5 ± 66.9	108.1 ± 54.2	***
	Limite inférieure (-20 m)	68.5 ± 36.7	132.7 ± 75.9	***

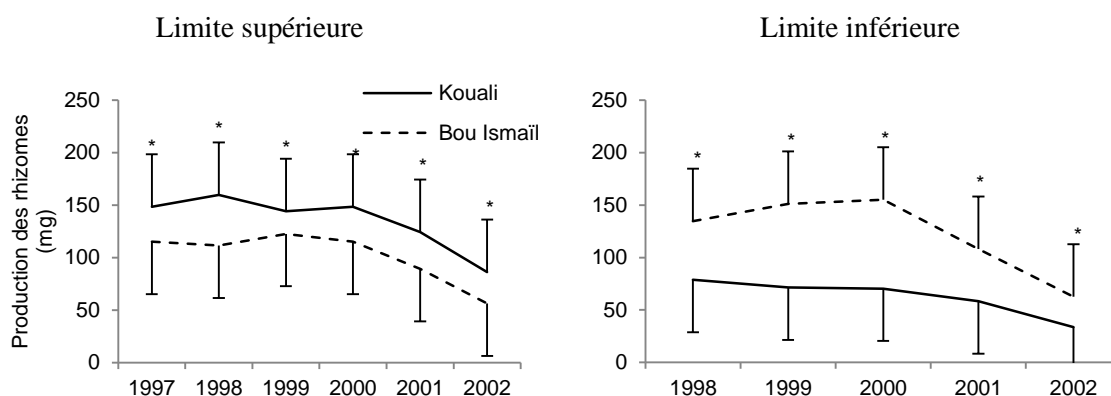


Figure 23. Evolution de la production moyenne des rhizomes, par année lépidochronologique, par profondeur et par site. Les barres verticales sont de longueurs égales à 1 écart-type. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les deux sites sont indiquées par le symbole \* ( $p < 0.05$ ).

### 3.2. Teneurs en phénols totaux

La teneur moyenne annuelle en phénols totaux mesurée au niveau des limbes des feuilles adultes et des feuilles intermédiaires ne montre pas de différence significative entre les deux sites (Tableau 14). Seule, la teneur enregistrée au niveau des bases des feuilles adultes à Kouali ( $1.14 \text{ mg.g}^{-1}$ ) est significativement supérieure à celle enregistrée à Bou Ismaïl ( $0.87 \text{ mg.g}^{-1}$ ) (Tableau 14).

Tableau 14. Teneur moyenne en phénols totaux ( $\text{mg.g}^{-1}$  Ps) des feuilles adultes (bases et limbes) et intermédiaires par site. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (\*\*\*)  $p < 0.001$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ ) ou non (ns).

	Kouali	Bou Ismaïl	
Limbes des feuilles adultes ( $\text{mg.g}^{-1}$ Ps)	$0.65 \pm 0.64$	$0.91 \pm 0.71$	ns
Bases des feuilles adultes ( $\text{mg.g}^{-1}$ Ps)	$1.14 \pm 0.47$	$0.87 \pm 0.27$	*
Feuilles intermédiaires ( $\text{mg.g}^{-1}$ Ps)	$1.15 \pm 1.01$	$1.59 \pm 1.39$	ns

Par ailleurs, durant l'année (Figure 24), les teneurs enregistrées à Kouali en mai 2002, au niveau des bases des feuilles adultes ( $1.34 \text{ mg.g}^{-1}$  Ps) et des feuilles intermédiaires ( $0.91 \text{ mg.g}^{-1}$  Ps) sont significativement plus élevées que celles enregistrées à Bou Ismaïl au niveau de ces mêmes tissus ( $0.97$  et  $0.57 \text{ mg.g}^{-1}$  Ps, respectivement). En outre, les teneurs en phénols totaux enregistrées au niveau des feuilles intermédiaires sont significativement plus élevées au début de l'hiver (décembre) par rapport à celles enregistrées durant le reste

de l'année, et ce au niveau des deux sites : les valeurs enregistrées à Kouali et Bou Ismaïl sont respectivement de 2.44 et 4.48 mg.g<sup>-1</sup> Ps.

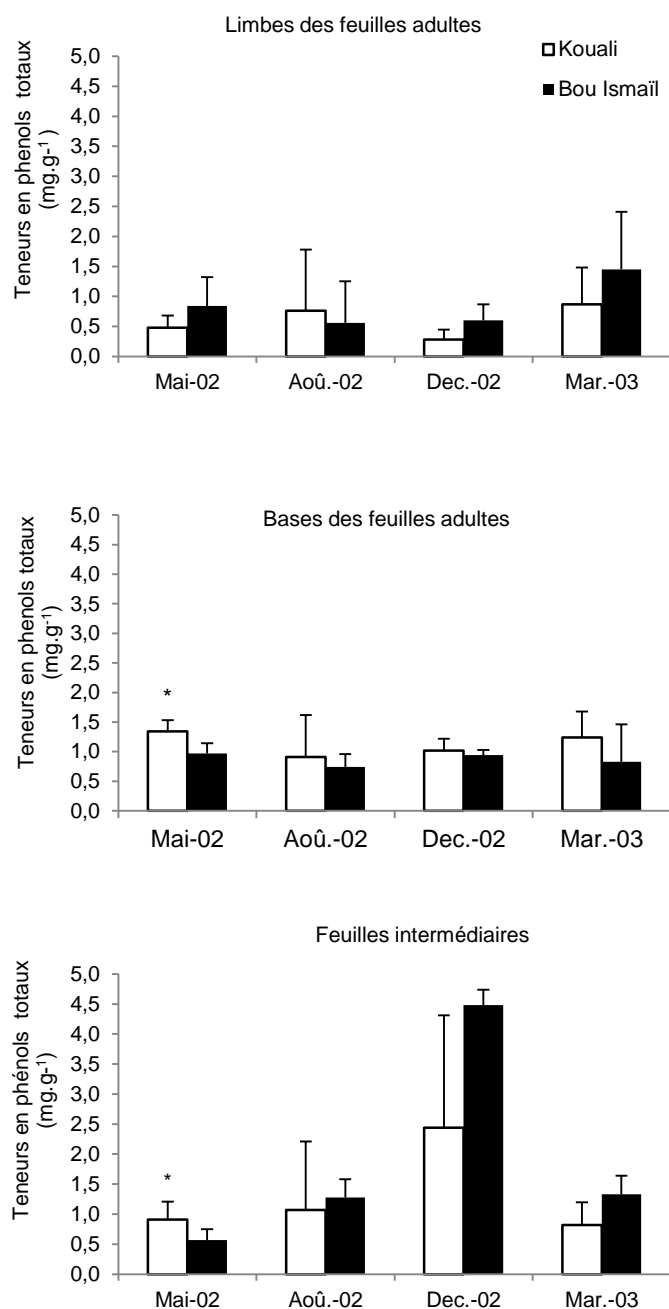


Figure 24. Evolution de la teneur en phénols totaux au cours du temps. Pour chaque tissu et pour chaque profondeur, les différences significatives entre les deux sites sont indiquées par le symbole \* (p < 0.05).

En outre, au niveau du site de référence, les teneurs moyennes enregistrées au niveau des bases des feuilles adultes et des feuilles intermédiaires sont significativement plus importantes que celles des limbes des feuilles adultes ( $p < 0.05$ ) (Tableau 14). Tandis qu'au niveau de Bou Ismaïl, les feuilles intermédiaires présentent des teneurs significativement plus élevées, suivies de celles des limbes des feuilles adultes, puis des bases des feuilles adultes ( $p < 0.05$ ) (Tableau 14).

### 3.3. Suivi des limites inférieures de l'herbier

#### 3.3.1. Balisage de l'herbier de Bou Ismaïl

Le balisage de l'herbier, mis en place en juillet 2007, est installé à un kilomètre environ des rejets d'effluents de l'agglomération de la ville Bou Ismaïl, à une profondeur moyenne de 20.9 m. Les coordonnées géographiques du balisage en système WGS 84 sont : 36°39' 25.8" N et 2° 41' 7.2" E (Tableau 15 ; Figures 25 et 26).

L'herbier de la zone balisée se développe sur un substrat dur et forme des plaquages sur roche, les rhizomes orthotropes sont déchaussés et donc fragilisés par le manque de sédiments. En effet, la composition sédimentologique du substrat (sable grossier d'origine biogène et autochtone) au niveau de cette limite, témoigne d'un faible apport sédimentaire, surtout en sable fin, nécessaire à la constitution et à l'élévation de la matre. On note également la présence de rhizomes plagiotropes superficiels entre les touffes de faisceaux vivants d'où partent des rhizomes verticaux dépourvus de faisceau foliaire. Le fond en aval de l'herbier est essentiellement constitué de substrat rocheux recouvert de sable coquillier, sur lequel se développent des gorgones ainsi que des macroalgues. On note également, la présence d'îlots de *Posidonia oceanica*, en avant de cette limite, témoignant d'une régression de l'herbier dans ce secteur. Les balises décrivent une limite en forme d'anse et l'aspect de la limite est irrégulier et déchiqueté avec des plages de sable non colonisées par l'herbier. Deux petits chenaux de sable sont également observés et situés entre les balises numérotées 1 et 2 d'une part, et les balises 6 et 7, d'autre part.

Tableau 15. Profondeur, orientations et observations le long du balisage de Bou Ismaïl.

N° Balise	Profondeur (m)	Relèvement balise à balise	Relèvement balise à piquet	Observations
1	21.2	75°	330°	Herbier discontinu, présence d'un petit chenal de sable entre les balises 1 et 2
2	21.2	250°	350°	Herbier plus ou moins continu, présence de touffes de <i>Posidonia oceanica</i> à gauche, en aval et à droite de la balise
3	21.1	33°	310°	Balise placée au niveau d'une touffe, en aval de la limite + litière + macroalgues + <i>Eunicella singularis</i>
4	20.8	45°	0°	Limite continue et densité importante + macroalgues en aval de la limite
5	20.9	82°	28°	Limite continue et densité importante+ macroalgues en aval de la limite. Touffes de posidonies en aval de la limite entre les balises 4 et 5
6	20.9	80°	10°	Limite continue + macroalgues à droite de la balise
7	20.9	82°	5°	Limite discontinue entre les balises 6 et 7 par un petit chenal de sable
8	20.7	15°	235°	Balise placée en aval de la limite, en contact d'une tache de <i>Posidonia oceanica</i> . Présence d'une autre tache en aval de la balise et une plus petite en amont de la balise+ Présence de ripple-marks
9	20.6	342°	210°	Balise en contact de la limite continue + substrat couvert de macroalgues + <i>Eunicella singularis</i>
10	20.9	283°	190°	Balise en contact de la limite continue+ substrat couvert de macroalgues + <i>Eunicella singularis</i>
11	20.8	280°	218°	Balise en contact de la limite continue+ substrat couvert de macroalgues + <i>Eunicella singularis</i>
12	20.7	260°	180°	Balise en contact de la limite continue+ substrat couvert de macroalgues + <i>Eunicella singularis</i>
		80°	-	

### 3.3.1.1. Evolution de la limite de Bou Ismaïl entre 2007 et 2010

La comparaison des différents paramètres mesurés lors de la mise en place du balisage en 2007 et de son suivi en 2010, montre des différences significatives pour certains d'entre eux (Tableau 16). La densité de l'herbier enregistrée en 2010 est significativement inférieure à celle enregistrée en 2007. Par ailleurs, en tenant compte de la grille de lecture établit par PNUE-PAM-CAR/ASP (2011), l'herbier est passé d'une densité dite « moyenne » en 2007, à une densité dite « médiocre » en 2010 pour une telle profondeur.

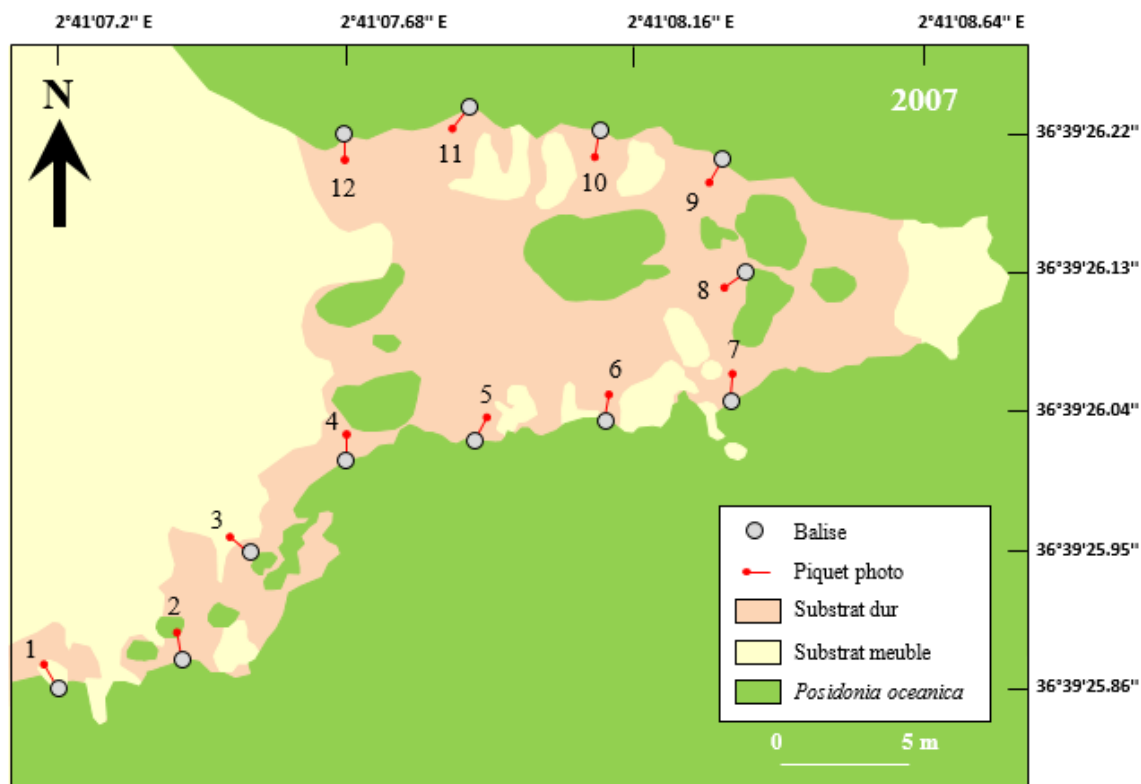


Figure 25. Cartographie du balisage de Bou Ismaïl en juillet 2007.

Tableau 16. Paramètres morphologiques de l'herbier au niveau du balisage de Bou Ismaïl, en 2007 et 2010. Les valeurs correspondent à la moyenne  $\pm$  écart-type. Pour chaque paramètre, la dernière colonne indique si la différence entre les deux années est significative (\*\*\*)  $p < 0.001$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ ) ou non (ns).

	2007	2010	
Densité (Nombre de faisceaux par m <sup>2</sup> )	223 $\pm$ 36	161 $\pm$ 24	***
Nombre de feuilles adultes	3.3 $\pm$ 0.6	4.4 $\pm$ 0.7	***
Nombre de feuilles intermédiaires	2.6 $\pm$ 0.7	2.7 $\pm$ 0.4	ns
Longueur des feuilles adultes (mm)	575.7 $\pm$ 119.4	724 $\pm$ 104.5	***
Longueur des bases (mm)	42.9 $\pm$ 5.4	44.1 $\pm$ 5.0	ns
Longueur des feuilles intermédiaires (mm)	344.3 $\pm$ 124.8	322.5 $\pm$ 94.1	ns
Largeur des feuilles adultes (mm)	10.4 $\pm$ 0.6	10.5 $\pm$ 0.5	ns
Largeur des feuilles intermédiaires (mm)	9.9 $\pm$ 0.5	9.9 $\pm$ 0.6	ns
Coefficient A des feuilles adultes (%)	83.7	76.5	ns
Coefficient A des feuilles intermédiaires (%)	15.4	12.2	ns
Surface foliaire des feuilles adultes (cm <sup>2</sup> )	199.2 $\pm$ 63.2	335.2 $\pm$ 80.7	***
Surface foliaire des feuilles intermédiaires	88.6 $\pm$ 63.5	88.3 $\pm$ 29.6	ns
Indice épiphytique des feuilles adultes (mg.cm <sup>-2</sup> )	0.78 $\pm$ 0.78	1.10 $\pm$ 0.34	*
Indice épiphytique des feuilles intermédiaires (mg.cm <sup>-2</sup> )	0.53 $\pm$ 0.54	0.36 $\pm$ 0.37	ns

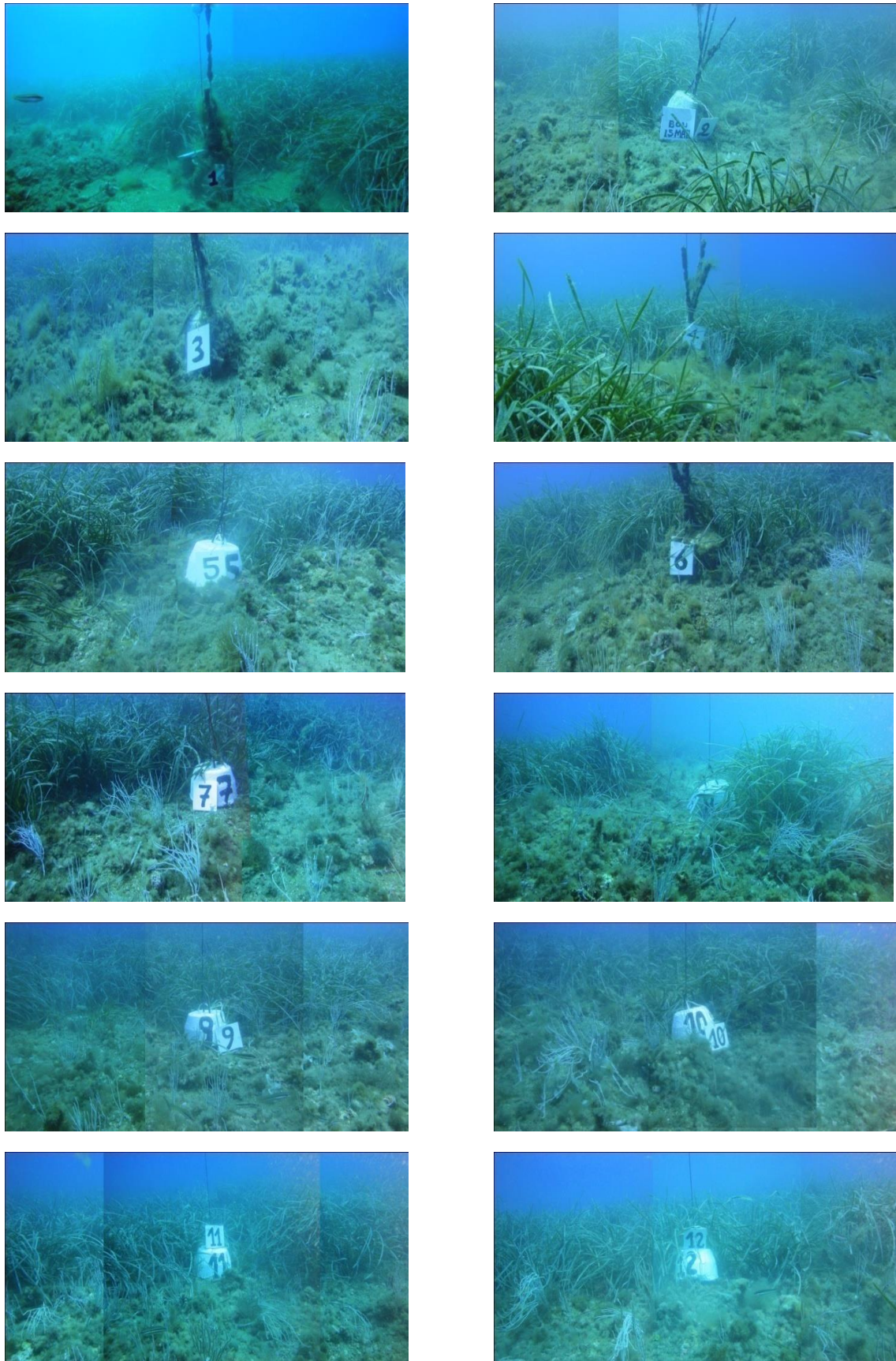


Figure 26. Herbier à *Posidonia oceanica* au niveau des balises 1 à 12 de la limite inférieure de l'herbier de Bou Ismaïl.

Quant à la surface foliaire des feuilles adultes (paramètre synthétique de la plante), une augmentation significative est enregistrée entre 2007 et 2010, en raison de l'augmentation du nombre et de la longueur des feuilles adultes. En revanche, la surface foliaire des feuilles intermédiaires ne montre pas de différence significative entre 2007 et 2010. Pour ce qui est de l'indice épiphytique des feuilles adultes de 2010, il est significativement plus élevé que celui de 2007, contrairement à celui des feuilles intermédiaires qui ne présente pas de différence significative.

L'analyse granulométrique du sédiment prélevé en aval du balisage en juillet 2010 a permis de tracer la courbe granulométrique (Annexe 3). Elle est de forme sigmoïde et légèrement redressée, indiquant un sédiment bien trié. De plus, l'application de l'équation de Folk (1954) corrobore cette observation montrant une valeur de tri ( $S_0 = -1.29$ ) correspondant à un sédiment très bien trié. La valeur de l'indice de symétrie ( $SK_i = -0.08$ ) traduit une asymétrie vers les particules grossières, quant à la valeur du diamètre moyen du sédiment ( $TM = 0.49$ ), elle indique la présence de sables moyens.

### 3.3.2. Balisage de l'herbier de Kouali

Le balisage de l'herbier, mis en place en juillet 2008, est installé à une profondeur moyenne de 18.3 m. Les coordonnées géographiques du balisage en système WGS 84 sont :  $36^{\circ} 35' 40.3''$  N et  $2^{\circ} 29' 42.5''$  E (Tableau 17 ; Figure 27).

Au niveau de la limite inférieure l'herbier se développe sur un substrat principalement rocheux, ce qui d'ailleurs n'a pas permis d'enfoncer profondément les piquets d'ancrage des balises. La limite inférieure de l'herbier est continue, constituée de grandes touffes souvent confluentes et coïncide avec la limite inférieure du platier rocheux. La limite de l'herbier est qualifiée de limite franche selon la terminologie de Meinesz et Laurent (1978). En effet, les rhizomes sont en majorité de type orthotrope (croissance verticale), sans édification de matte. L'herbier ne présente pas de dynamique de recolonisation du substrat (très peu de rhizomes plagiotropes). Les rhizomes sont enfouis dans le sédiment et ne présentent pas de déchaussement, ce qui indique un équilibre des apports sédimentaires.

Tableau 17. Profondeur, orientations et observations le long du balisage de Kouali.

N° Balise	Profondeur (m)	Relèvement balise à balise	Relèvement balise à piquet	Observations
1	18.5	247°	38°	Balise en contact de la limite présentant une densité importante + macroalgues et litière de part et d'autre de la balise.
2	18.6	70°	315°	Limite continue + macroalgues en aval de la limite.
3	18.5	95°	352°	Limite formée de touffes confluentes + macroalgues + litière.
4	18.5	65°	30°	Balise au niveau d'un chenal couvert de sable colonisé par des macroalgues + litière importante.
5	18.2	120°	40°	Balise au niveau d'un chenal couvert de sable colonisé par des macroalgues + litière importante.
6	18.8	110°	312°	Balise en contact de la limite ; herbier plus ou moins continu + macroalgues + litière.
7	18.3	60°	30°	Balise au niveau d'une invagination importante colonisée par des macroalgues + litière.
8	18.3	135°	315°	Balise en contact de la limite ; herbier continu + macroalgues abondantes à droite de la balise.
9	18.3	80°	315°	Balise en contact de la limite ; herbier continu + macroalgues abondantes à droite de la balise.
10	17.9	20°	300°	Limite formée de touffes confluentes + macroalgues en aval de la balise.
11	17.8	20°	325°	Balise en contact de la limite ; substrat colonisé par des macroalgues.
12	17.8	40°	325°	Balise en contact de la limite présentant une densité importante + macroalgues en aval + importante litière autour de la balise.
		210°	-	

### 3.3.2.1. Evolution de la limite de Kouali entre 2008 et 2010

Le suivi *in situ* du balisage, deux ans après sa mise en place en 2008, n'a pas permis de conclure quant à une modification de la position de la limite inférieure de l'herbier. La limite inférieure de l'herbier de ce site se situe à 18.3 m de profondeur en moyenne et est restée stable entre 2008 et 2010.

Les différents paramètres biométriques mesurés lors du suivi de juillet 2010 sont comparés à ceux obtenus en 2008 lors de la mise en place du balisage (Tableau 18). L'augmentation significative de la surface foliaire des feuilles adultes observée entre 2008 et 2010 est liée à l'augmentation du nombre de feuilles adultes. Inversement, la surface des feuilles

intermédiaires montre une diminution en 2010. Quant à l'indice épiphytique des feuilles adultes, il est significativement plus important en 2010, tandis que celui des feuilles intermédiaires montre la tendance inverse. En outre, le coefficient A de Giraud des feuilles adultes est plus important en 2010 ; alors que celui des feuilles intermédiaires ne montre pas de différence significative entre ces deux années.

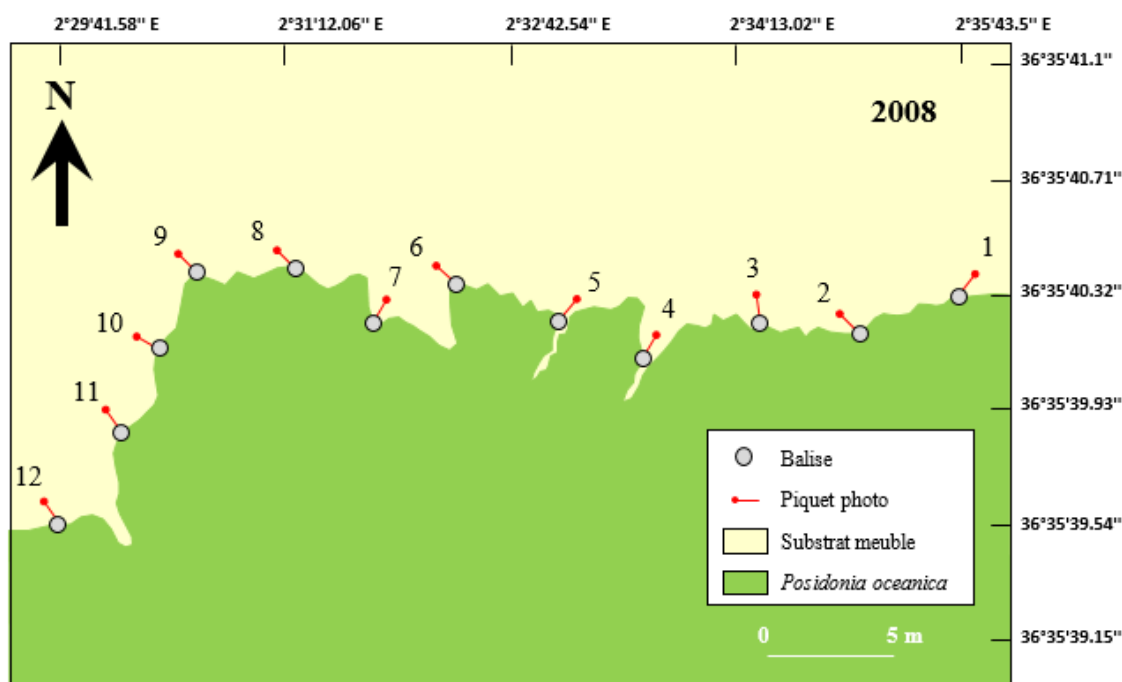


Figure 28. Cartographie du balisage de Kouali en juin 2008.

Tableau 18. Paramètres morphologiques de l'herbier au niveau du balisage de Kouali, en 2008 et 2010. Les valeurs correspondent à la moyenne  $\pm$  écart-type. Pour chaque paramètre, la dernière colonne indique si la différence entre les deux années est significative (\*\*\*)  $p < 0.001$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ ) ou non (ns).

	2008	2010	
Nombre de feuilles adultes	3.3 $\pm$ 0.9	4.5 $\pm$ 0.9	***
Nombre de feuilles intermédiaires	3.3 $\pm$ 0.7	2.7 $\pm$ 0.5	***
Longueur des feuilles adultes (mm)	628.9 $\pm$ 111.6	592.3 $\pm$ 127.0	ns
Longueur des bases (mm)	37.8 $\pm$ 7.8	40.8 $\pm$ 6.5	ns
Longueur des feuilles intermédiaires (mm)	490.9 $\pm$ 95.0	394.9 $\pm$ 128.3	**
Largeur des feuilles adultes (mm)	11.4 $\pm$ 0.6	11.3 $\pm$ 0.5	ns
Largeur des feuilles intermédiaires	10.7 $\pm$ 0.5	10.8 $\pm$ 2.1	ns
Coefficient A des feuilles adultes (%)	71.8	93.5	***
Coefficient A des feuilles intermédiaires (%)	20.8	24.7	ns
Surface foliaire des feuilles adultes (cm <sup>2</sup> )	238.6 $\pm$ 81.5	300.5 $\pm$ 88.8	**
Surface foliaire des feuilles intermédiaires (cm <sup>2</sup> )	174.0 $\pm$ 47.0	114.8 $\pm$ 39.9	***
Indice épiphytique des feuilles adultes (mg.cm <sup>-2</sup> )	0.27 $\pm$ 0.11	1.15 $\pm$ 0.38	***
Indice épiphytique des feuilles intermédiaires (mg.cm <sup>-2</sup> )	0.26 $\pm$ 0.10	0.13 $\pm$ 0.11	***

L'analyse granulométrique du sédiment prélevé en aval du balisage en juillet 2010, a permis de tracer la courbe granulométrique (Annexe 3). Elle est de forme sigmoïde et redressée, par conséquent le sédiment est bien trié. De plus, l'application de l'équation de Folk (1954) corrobore cette observation en montrant une valeur de tri ( $S_0 = -0.84$ ) correspondant à un sédiment très bien trié. La valeur de l'indice de symétrie ( $SK_i = -0.18$ ) traduit une asymétrie vers les particules fines, quant à la valeur du diamètre moyen du sédiment ( $TM = 2.74$ ), elle indique la présence de sables très fins.

# Chapitre 4

## Discussion

### 4.1. Paramètres morphologiques

#### 4.1.1. Densité et recouvrement

La classification de ces herbiers, selon la grille de lecture proposée par PNUE-PAM-CAR/ASP (2011), indique que les herbiers de Kouali et de Bou Ismaïl, en limite supérieure, correspondent à des herbiers dits de densité «mauvaise». Tandis qu'en limite inférieure, l'herbier de Kouali correspond à un herbier dit de densité «bonne», alors que celui de Bou Ismaïl est dit de densité « moyenne ». Par conséquent, et toujours selon cette grille de lecture, les densités mesurées à Bou Ismaïl traduisent une réduction de la vitalité des herbiers à *Posidonia oceanica* au niveau de ce site, ce qui constitue un signal d'alarme quant aux perturbations engendrées par les rejets d'effluents.

Par ailleurs, cette classification qui exprime la variabilité de la densité en fonction de la profondeur, ne tient pas compte des autres facteurs susceptibles d'affecter ce paramètre, comme la morphologie et la topographie du substrat et/ou la teneur en nutriment (Balestri *et al.*, 2003 ; Gobert *et al.*, 2003 ; Zupo *et al.* 2006 ; Giovannetti *et al.*, 2008). En outre, Gobert (2002), Marbà et Duarte (2003) et Vela (2006) ont mis en évidence une corrélation négative entre la biomasse épigée de *Posidonia oceanica* et l'espacement entre des faisceaux contigus, et par voie de conséquence, la densité. Par

conséquent, la diminution de la densité – faisceaux très espacés – observée à Kouali, en limite supérieure, pourrait être liée soit à la nature du substrat – matte – ou bien à l’augmentation de la biomasse épigée (§4.1.2.).

Par ailleurs, l’absence de différence significative, en termes de densité, entre les deux sites pourrait résulter d’un artéfact lié au plan d’échantillonnage. En effet, le paramètre densité montre une grande variabilité à méso-échelle (Panayotidis *et al.*, 1981 ; Gobert *et al.*, 2003 ; Zupo *et al.*, 2006). Par conséquent, un plan d’échantillonnage hiérarchisé avec un nombre de réplicats adéquats est recommandé, afin d’éviter toute interprétation erronée (Balestri *et al.*, 2004 ; Fernandez-Torquemada *et al.*, 2008).

Quant à la diminution du recouvrement de l’herbier à Bou Ismaïl, en limite supérieure, cette tendance a également été rapportée dans la littérature au niveau des herbiers à *Posidonia oceanica* localisés au voisinage des rejets d’effluents urbains (Fernandez-Torquemada *et al.*, 2008 ; Montefalcone, 2009). Néanmoins, les rejets d’effluents ne sont pas les seuls facteurs qui interviennent dans la structuration spatiale de *Posidonia oceanica* au niveau de cette station. En effet, les observations réalisées *in situ* au niveau de Bou Ismaïl (-5 m) ont montré que les rhizomes contigus sont très rapprochés traduisant une confluence de ces derniers vers le même espace. Cette distribution en patchiness pourrait constituer une réponse aux variations locales des ressources disponibles, telle que la concentration en nutriments – suite aux rejets d’effluents – et/ou à la nature hétérogène du substrat – sableux à sablo-rocheux – qui caractérisent cette station. Cette structure en patchiness des herbiers, soumis à des pressions anthropiques, a été largement rapportée dans la littérature (Panayotidis *et al.*, 1981 ; Balestri *et al.*, 2003 ; Vasapollo et Gambi ; 2012). Par ailleurs, la nature hétérogène du substrat et la diminution de la vitalité de l’herbier favorise l’action mécanique liée à l’hydrodynamisme qui règne dans ce secteur ; ce qui entraîne le creusement de dépressions intermattes comme rapporté par Braïk (1989).

#### 4.1.2. Paramètres biométriques

Les paramètres de biométrie foliaire mesurés présentent des variations saisonnières caractéristiques et similaires au sein des deux sites et sont cohérentes avec celles observées

en Méditerranée. En effet, le développement de *Posidonia oceanica*, matérialisé par la surface foliaire, paramètre intégrateur de l'ensemble des paramètres biométriques de *Posidonia oceanica* (Silvestri, 1993), est maximum au printemps-été et minimum en hiver (Buia *et al.*, 1992, 2000 ; Ruiz et Romero, 2001, 2003). Il semblerait donc que le cycle phénologique de *Posidonia oceanica* ne soit pas affecté au niveau de la station de Bou Ismaïl par les rejets d'effluents. La même tendance a été rapportée par Invers *et al.* (2004) et Leoni *et al.* (2006) lors d'enrichissements artificiels réalisés sur des herbiers à *Posidonia oceanica*.

Par ailleurs, l'ensemble de ces paramètres présente des valeurs moyennes annuelles significativement inférieures à Bou Ismaïl ; à l'exception du nombre moyen de feuilles intermédiaires, pour lequel aucune différence significative n'est enregistrée avec le site de référence. L'optimisation de la surface photosynthétique, à travers le maintien du nombre de jeunes feuilles, se retrouve lorsque la plante est confrontée à une diminution de l'intensité lumineuse résultant de l'augmentation de la profondeur ou de la turbidité (Dalla Via *et al.*, 1998 ; Abbate *et al.*, 2000 ; Ralph *et al.*, 2007). En effet, l'augmentation de la turbidité au sein du site de Bou Ismaïl, suite aux divers rejets, est à même d'entraîner ce type de réaction chez *Posidonia oceanica*. Selon Collier *et al.* (2012), la chute des feuilles âgées et le maintien des jeunes feuilles, constituent une stratégie d'adaptation des magnoliophytes marines à la diminution de la lumière, puisque ces dernières ont une capacité photosynthétique plus importante, car moins épiphytées et plus riches en pigments chlorophylliens.

La diminution des paramètres biométriques contribue à la réduction de la surface foliaire moyenne annuelle des feuilles. En effet, cette réduction est rapportée par de nombreux auteurs, au niveau des sites où *Posidonia oceanica* est soumise aux rejets d'émissaires (Maggi *et al.*, 1977 ; Pergent, 1993 ; Balestri *et al.*, 2004 ; Ben Brahim *et al.*, 2010 ; Castejón Silvo, 2011). Ces rejets engendrent une diminution de la transparence de l'eau et une augmentation de la concentration en nutriments qui affectent la production primaire de *Posidonia oceanica* (Maggi *et al.*, 1977 ; Pergent *et al.*, 1995 ; Leoni *et al.*, 2006). En outre, la surface foliaire montre une diminution plus importante au niveau de la limite supérieure comparativement à la limite inférieure. Cette tendance reflète d'une part le gradient environnemental, en raison de la proximité de cette station superficielle par

rapport aux rejets d'effluents. D'autre part, l'augmentation du coefficient A enregistrée en été au niveau de cette station, est à même de réduire de façon drastique la longueur des feuilles de *Posidonia oceanica* et donc la surface foliaire (Ruiz et Romero, 2003).

Par ailleurs, la diminution des paramètres étudiés n'est pas systématiquement enregistrée au cours de l'année, excepté au mois de décembre, où l'ensemble des paramètres (longueur, largeur et nombre de feuilles) mesurés au niveau de la limite supérieure, sont significativement inférieurs à ceux mesurés à Kouali. Selon Invers *et al.* (2004), la réduction de la vitalité de *Posidonia oceanica* durant l'hiver est liée à la diminution des réserves en carbohydrates – nécessaires à la croissance de la plante durant cette saison –, suite à l'enrichissement du milieu. En outre, seule la longueur des feuilles adultes montre une diminution quelque soit le mois, et ce au niveau des limites inférieure et supérieure, à l'exception du mois de mars en limite inférieure. La diminution de la longueur des feuilles suite à l'augmentation de la turbidité ou de l'enrichissement est souvent rapportée dans la littérature (Maggi *et al.*, 1977 ; Delgado *et al.*, 1999 ; Cancemi *et al.*, 2003 ; Ruiz et Romero, 2003 ; Leoni *et al.*, 2006 ; Ben Brahim *et al.*, 2010). Cette diminution permettrait, d'une part, de réduire la demande en carbone pour la croissance, et d'autre part, de maximiser l'exposition des feuilles à la lumière, tout en réduisant la demande respiratoire des parties âgées de la plante, comme rapporté pour *Posidonia sinuosa* (Collier, 2006).

Paradoxalement, la relation entre l'enrichissement en nutriments par les rejets d'effluents à Bou Ismaïl et le développement des épiphytes n'est pas établie. En effet, l'indice épiphytique montre des valeurs annuelles moyennes moins importantes comparativement au site de référence. La même tendance est observée dans différentes localités de la Méditerranée, en réponse aux rejets d'effluents (Cebrian *et al.*, 1999 ; Piazzini *et al.*, 2004 ; Ben Brahim *et al.*, 2010 ; Giovanetti *et al.*, 2010). Néanmoins, l'indice épiphytique mesuré en été à Kouali est plus élevé, particulièrement en limite supérieure. Cette tendance a également été enregistrée dans différents herbiers à *Posidonia oceanica* soumis à des apports en nutriments (Delgado *et al.*, 1999 ; Cancemi *et al.*, 2003) ou à un enrichissement artificiel (Leoni *et al.*, 2006, 2008). Selon Prado *et al.* (2008), la communauté épiphytique de *Posidonia oceanica* répond à l'enrichissement en éléments nutritifs, surtout en été lorsque la lumière et la température sont à leur maximum. Par

ailleurs, cette augmentation de la biomasse des épiphytes pourrait expliquer les valeurs élevées du coefficient A des feuilles adultes enregistrées durant la même période à Bou Ismaïl (-5 m). La même tendance a déjà été signalée par Cancemi *et al.* (2003), Leoni *et al.* (2006) et Rountos *et al.* (2012).

#### 4.1.3. Paramètres lépidochronologiques

L'analyse lépidochronologique a permis de révéler des disparités dans la structure démographique des rhizomes récoltés. En effet, la moyenne d'âge des faisceaux est significativement moins importante à Bou Ismaïl comparativement à Kouali. Il est probable que l'enrichissement par les rejets d'effluents au niveau de Bou Ismaïl ait un impact sur la longévité des rhizomes, comme rapporté par Tomasello *et al.* (2007) pour *Posidonia oceanica* et Cunha et Duarte (2005) pour *Cymodocea nodosa*.

Par ailleurs, Marbà *et al.* (1996) et González-Correa *et al.* (2007) expliquent que plus le temps séparant l'âge modal de l'âge minimum est important, plus le recrutement des faisceaux durant les années précédant les prélèvements diminue. Cette tendance a été relevée au niveau de l'ensemble des stations, à l'exception de la station Bou Ismaïl (-20 m). En outre, cette station semble également s'individualiser, dans la mesure où elle présente l'âge maximal et l'âge modal les plus bas, ce qui suggère une mortalité plus précoce, comparativement au reste des stations, comme rapporté par Marbà *et al.* (1996). Quant à la diminution rapide de la fréquence à partir de l'âge modal, en raison de la mortalité des faisceaux avec l'augmentation de l'âge (Duarte *et al.*, 1994 ; Marbà *et al.*, 1996), elle ne semble pas suivre la même tendance au niveau des stations superficielles comparativement aux stations profondes. Ces observations suggèrent une disparité entre les taux de recrutement et les taux de mortalité entre les stations superficielles et profondes comme rapporté par Marbà *et al.* (1996).

Quant aux paramètres lépidochronologiques, il est relevé des fluctuations annuelles synchrones du nombre moyen d'écaïlles par cycle et ce, au niveau de l'ensemble des stations, avec une tendance générale à la diminution en 2002. Ces variations interannuelles sont généralement liées, d'une part, à des facteurs exogènes, tels que la lumière, l'hydrodynamisme et la température (Pergent 1987, 1990 ; Mayot *et al.*, 2005) et d'autre

part, à des facteurs endogènes, telle que la floraison (Pergent, 1987, Gobert *et al.*, 2001 ; Balestri et Vallereni, 2003 ; Calvo *et al.*, 2006). Par conséquent, la diminution notée en 2002 dans l'ensemble des stations, pourrait s'expliquer par la floraison de *Posidonia oceanica* enregistrée en 2003. En effet, cette année a été marquée par une floraison d'une intensité exceptionnelle tant dans la baie de Bou Ismaïl qu'à l'échelle de la Méditerranée (Montefalconne *et al.*, 2013). Ces derniers ont montré que la production foliaire diminue l'année précédent la floraison, dans la mesure où la reproduction sexuée a un coût énergétique important pour la plante (Calvo *et al.*, 2006). Cette dernière investirait plus dans la reproduction sexuée que dans la production foliaire. Quant au nombre moyen d'écailles par cycle, il ne montre de différence significative entre les deux sites qu'au niveau des limites inférieures. La même tendance a été rapportée par Balestri *et al.* (2004), en comparant un site soumis à des rejets d'effluents avec deux sites de référence. L'augmentation du nombre d'écailles par cycle enregistrée à Bou Ismaïl (-20 m) pourrait correspondre à une réponse physiologique de la plante à l'augmentation de la turbidité (Ralph *et al.*, 2007).

La croissance et la production moyennes des rhizomes présentent des variations annuelles synchrones entre les deux sites, marquées par une tendance générale à la diminution en 2001 et 2002. En effet, Boudouresque *et al.* (1984) montrent que la croissance des rhizomes orthotropes n'est totalement achevée que deux à trois ans après leur formation. Quant aux variations annuelles des taux de croissance des rhizomes, elles peuvent être influencées par plusieurs facteurs locaux : l'exposition à l'hydrodynamisme (Guidetti *et al.*, 2000), la nature du substrat (Marbà et Duarte, 1997; Peirano *et al.*, 2005) et le degré d'anthropisation (Cancemi *et al.*, 2003 ; Balestri *et al.*, 2004). La diminution du taux moyen de croissance des rhizomes à Bou Ismaïl (-5 m), comparativement à Kouali (-5 m), pourrait résulter de l'impact des rejets d'effluents localisés à proximité de cette station. Cette tendance à la réduction a également été rapportée par Balestri *et al.* (2004) et Tomasello *et al.* (2007) lorsque les herbiers à *Posidonia oceanica* sont soumis aux rejets des effluents urbains et industriels.

Par ailleurs, le taux de croissance des rhizomes particulièrement élevé, enregistré à Bou Ismaïl (-20 m) comparativement à Kouali (-20 m), ne semble pas constituer une stratégie permettant d'éviter l'enfouissement des faisceaux de *Posidonia oceanica* par des

apports importants de sédiments, comme rapporté par plusieurs auteurs (Boudouresque *et al.*, 1984 ; Marbà et Duarte, 1994 ; Marbà *et al.*, 1996). En effet, au niveau de cette station, nous avons plutôt noté un déficit sédimentaire, révélé par le déchaussement des rhizomes. Deux hypothèses peuvent être émises pour expliquer cette croissance face à l'augmentation de la turbidité. La première est qu'elle permettrait à la plante un meilleur accès à la lumière et donc améliorer le rendement photosynthétique (Boudouresque et Meinesz, 1982 ; Marbà et Duarte, 1998). La seconde, est liée au fait que les rhizomes constituent une importante réserve en carbohydrates, qui permet à la plante de maintenir une croissance lorsque cette dernière est soumise à une diminution de l'intensité lumineuse (Longstaff *et al.*, 1999 ; Alcoverro *et al.*, 2001 ; Ralph *et al.*, 2007 ; Collier *et al.*, 2008). Cependant, l'augmentation de la croissance des rhizomes (partie endogée de la plante) peut entraîner un déséquilibre entre le taux de fixation du carbone (photosynthèse) et sa consommation (respiration et croissance), ce qui a pour conséquence une augmentation de la sensibilité de *Posidonia oceanica* à une diminution de la lumière ; cette fragilisation toucherait en particulier les classes d'âge les plus anciennes (Alcoverro *et al.*, 2001 ; Tomasello *et al.*, 2007).

## 4.2. Teneurs en phénols totaux

Les teneurs moyennes en phénols totaux mesurée au niveau des différents tissus de *Posidonia oceanica* sont comprises dans l'intervalle habituellement rencontré dans la littérature (Agostini *et al.*, 1998 ; Ferrat, 2001 ; Dumay *et al.*, 2004 ; Leoni *et al.*, 2007 ; Pergent *et al.*, 2008). Les feuilles intermédiaires accumulent les teneurs les plus importantes par rapport aux autres tissus, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par Cariello et Zanetti (1979) ; Agostini *et al.* (1998) ; Ferrat *et al.* (2003) et Dumay *et al.* (2004). Ces auteurs constatent que la teneur en phénols totaux diminue avec l'âge des feuilles chez *Posidonia oceanica* et ce, dans la mesure où le processus de biosynthèse des composés phénoliques est plus intense chez les jeunes feuilles (Cariello et Zanetti, 1979 ; Macheix *et al.*, 2005) et particulièrement au niveau de leur partie apicale (Cariello et Zanetti, 1979 ; Cozza *et al.*, 2004).

Par ailleurs, les rejets d'effluents au niveau de Bou Ismaïl n'ont pas eu d'impact significatif sur la teneur en phénols totaux des feuilles de *Posidonia oceanica*. Seule une

augmentation de cette teneur est enregistrée au niveau des bases des feuilles adultes et des feuilles intermédiaires à Kouali en mai 2002. En outre, durant la même période, ces tissus ont montré des dommages dus à l'action des mésoherbivores (Figure 28). Le même type de dommages est observé sur les tissus vivants de la magnoliophyte *Amphibolis griffithii*, due au broutage par l'isopode *Limnoria agrostica* (Brearley *et al.*, 1993), et sur les tissus de *Posidonia oceanica* par l'isopode *Limnoria tuberculata* (Guidetti *et al.*, 1997). Par conséquent, l'augmentation de la concentration en phénols totaux au niveau de ces tissus pourrait constituer une réponse au broutage par des mésoherbivores. Cette augmentation en réponse au broutage par les mésoherbivores a déjà été signalé par Steel et Valentine (2012) chez les magnoliophytes *Thalassia testudinum* et *Halodule wrightii*. Ces deux auteurs ont émis l'hypothèse que cette augmentation pourrait fonctionner comme un mécanisme de défense contre l'infection, car le broutage offre une ouverture pour les organismes pathogènes.

L'absence de différence significative entre les teneurs des deux sites a été rapportée dans des études similaires portant sur l'impact des stress liés aux pressions anthropiques et à la compétition interspécifique avec *Caulerpa taxifolia* et *Caulerpa racemosa* (Agostini *et al.*, 1998; Dumay *et al.*, 2004; Ferrat *et al.*, 2003; Pergent *et al.*, 2008). Par ailleurs, tous ces auteurs ont noté une augmentation du nombre de cellules à tannins spécialisées dans la production de composés phénoliques. Une tendance similaire a été observée lorsque nous avons comparé un site fortement anthropisé situé dans la baie d'Alger, en l'occurrence Tamentfoust, et un site non anthropisé (Kouali). En effet, le nombre de cellules à tannins enregistré dans les feuilles intermédiaires de *Posidonia oceanica* à Tamentfoust ( $62.0 \pm 23.8$  cellules à tannins par  $\text{cm}^2$ ) est significativement plus élevé que celui enregistré à Kouali ( $30.1 \pm 16.1$  cellules à tannins par  $\text{cm}^2$ ). Inversement, la teneur en phénols totaux n'a pas montré de différence significative entre les deux sites (Boumaza *et al.*, 2012).

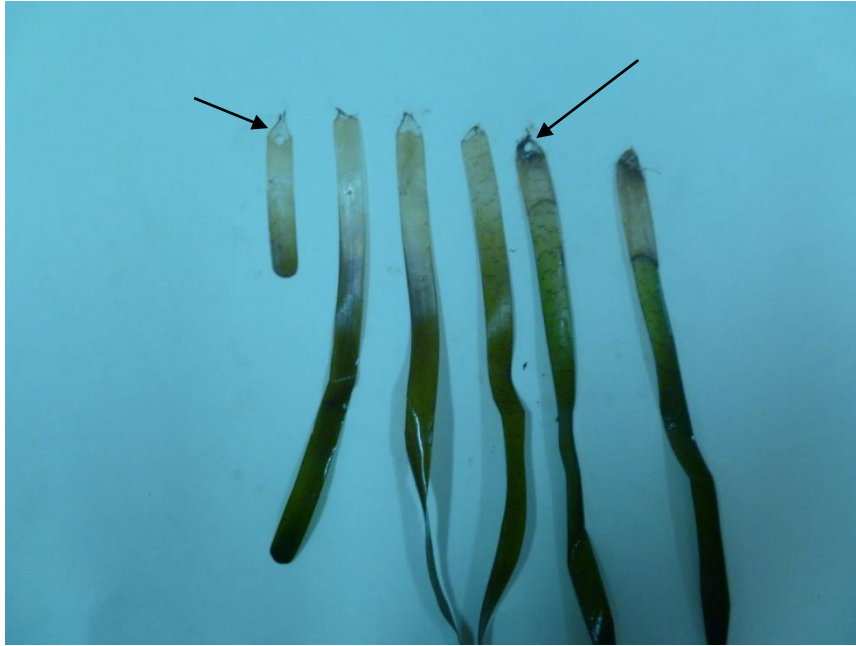


Figure 28. Dommages causés par les mésoherbivores sur les bases des feuilles adultes et des feuilles intermédiaires au niveau du site de référence (Kouali).

En outre, la variation de la typologie des inclusions phénoliques dans les cellules à tannins liées au changement qualitatif des substances phénoliques, a également été signalée en réponse à des rejets d'effluents (Cozza *et al.*, 2004). Ces observations suggèrent donc l'implication d'une classe de substances phénoliques dans le mécanisme de défense de *Posidonia oceanica* à différents types de stress. En effet, les magnoliophytes sont riches en composés phénoliques très divers depuis les simples acides phénoliques jusqu'aux grands polymères complexes que sont les tannins condensés et la lignine (Arnold et Target, 2002 ; Steel *et al.*, 2005 ; Papenbrock, 2012). Les acides phénoliques constituent la part la plus importante dans la mesure où ils représentent environ 50 % des composés phénoliques identifiés au niveau de ces plantes (Vergeer *et al.*, 1995 ; Vergeer et Develi, 1997). Toutefois, cette proportion varie beaucoup en fonction de la population, de l'espèce et du tissu considéré. De plus, la production de ces composés peut être influencée par les conditions environnementales en place (Arnold et Target, 2002 ; Papenbrock, 2012). Par conséquent, la prise en compte d'une classe de ces composés (simples ou complexes, hydrosolubles ou non) permettrait de connaître leur implication dans les mécanismes de réponse à un type de stress précis (Cannac *et al.*, 2006 ; Leoni *et al.*, 2007 ; Ferrat, 2010).

Les variations saisonnières de la teneur en phénols totaux des feuilles intermédiaires enregistrées, sont maximales en hiver (décembre) et minimales au printemps/été. La même tendance a été rapportée par de nombreux auteurs (Ferrat, 2001 ; Dumay *et al.*, 2004; Leoni *et al.*, 2007 ; Pergent *et al.*, 2008 ; Ferrat *et al.*, 2012). Par conséquent, l'accumulation des composés phénoliques intervient lorsque le rythme de croissance est ralenti (automne/hiver). En revanche, durant le printemps et l'été, les plantes allouent plus d'énergie à leur croissance qu'au métabolisme secondaire (Alcoverro *et al.*, 1995, 2001 ; Invers *et al.*, 2002, 2004). Il apparaît donc que le processus de croissance semble dominer le processus de défense chez *Posidonia oceanica* lorsque les facteurs environnementaux sont favorables à la croissance (Yates et Peckol, 1993 ; Macheix *et al.*, 2005). De cette façon, les substances phénoliques sont considérées comme un stockage de l'excès de carbone, qui, à son tour, contribue au fitness de la plante (Vergeer *et al.*, 1995 ; Migliore *et al.*, 2012).

### 4.3. Suivi des limites inférieures

#### 4.3.1. Limite inférieure de l'herbier de Bou Ismaïl

La mise en place du balisage et le suivi de la limite inférieure de Bou Ismaïl a permis de mettre en évidence le caractère régressif de cette limite ; au regard des caractéristiques décrites (§ 3.3.1.), elle est qualifiée de « régressive de type 2 », selon la terminologie de Meinesz et Laurent (1978). Dans ce cas, c'est le bilan radiatif qui est insuffisant, en raison de l'augmentation de la turbidité, ce qui fragilise l'herbier et le rend vulnérable vis-à-vis des courants qui le désagrègent et déchaussent les rhizomes (Meinesz et Laurent, 1978). En effet, le site de Bou Ismaïl situé en mer ouverte est exposé à des courants de fond orientés d'ouest vers l'est rendant difficile le maintien ou la progression de l'herbier (Braïk, 1989). Par ailleurs, l'analyse granulométrique corrobore ces observations, dans la mesure où elle a montré une dominance des fractions moyenne et grossière, signe d'une énergie marine substantielle.

D'autre part, l'étude des descripteurs de la vitalité de l'herbier a montré des différences significatives à plusieurs niveaux. Cette étude a révélé une diminution de la densité qui correspond à une réponse à long terme de *Posidonia oceanica* à la diminution

de la luminosité, permet une réduction des effets d'auto-ombrage et donc une meilleure pénétration de la lumière dans la canopée (Dalla Via *et al.*, 1998 ; Oleson *et al.*, 2002 ; Collier *et al.*, 2007 ; Ralph *et al.*, 2007). Elle a aussi révélé une augmentation de la surface foliaire des feuilles adultes. Ce type d'augmentation concomitamment à une diminution de la densité, a déjà été rapporté par Gobert (2002), lors d'un suivi pluriannuel dans la baie de Calvi. Cette relation pourrait correspondre à une stratégie de croissance de *Posidonia oceanica* par rapport aux ressources disponibles, notamment la lumière (Duarte et Kalff, 1987 ; Marbà et Duarte, 2003). Enfin cette étude a révélé une augmentation de l'indice épiphytique des feuilles adultes. Celle-ci pourrait correspondre à ce qui a été déjà observée au niveau de la limite supérieure du site de Bou Ismaïl en été, comme indiqué précédemment. En effet, selon Prado *et al.* (2008) la communauté épiphytique de *Posidonia oceanica* répond, surtout en été lorsque la lumière et la température sont à leur maximum, à l'enrichissement en éléments nutritifs par une augmentation de la biomasse algale.

#### 4.3.2. Limite inférieure de l'herbier de Kouali

La mise en place et le suivi de la limite inférieure de l'herbier de Kouali a permis de conforter la tendance déjà enregistrée entre 2002 et 2003, quant à la vitalité de cet herbier. Concernant la position bathymétrique de la limite inférieure, elle coïncide avec la bordure inférieure du platier rocheux. La nature du substrat semble être à l'origine de ce type de limite, comme signalé par Clabaut *et al.* (2010) en Corse. En outre, l'analyse granulométrique du sédiment prélevé en aval du balisage montre une dominance de sables fins, qui ne semble pas adéquat à la progression de l'herbier vers le large. Par ailleurs, ce type de limite traduit des conditions de milieu stabilisées, en termes de transparence de l'eau (Meinesz et Laurent, 1978). Concernant, les différences enregistrées au niveau de la biométrie foliaire, du coefficient A et de l'indice épiphytique, elles semblent correspondre aux variations saisonnières du cycle phénologique de *Posidonia oceanica*, dans la mesure où la mise en place du balisage s'est faite en juin 2008, tandis que le suivi a été effectué en juillet 2010.



## Chapitre 5

### Conclusions générales

La surveillance des herbiers *Posidonia oceanica* constitue un des enjeux majeurs du Programme d'Aménagement Côtier «zone côtière algéroise». En effet, la vocation portuaire, urbaine, industrielle, agricole et touristique du littoral concerné par ce programme, induit des nuisances diverses sur le milieu marin et en particulier sur les herbiers à *Posidonia oceanica* (PNUE/PAM/CAR PAP, 2006). D'ailleurs, il est fait état d'une perte d'environ 18 hectares d'herbiers dans la région située à l'est d'Alger, durant ces 40 dernières années, soit une perte économique estimée à 11 millions de DA par hectare et par an (METAP, 2005). En outre, cette nécessité de surveillance doit également tenir compte du statut actuel de *Posidonia oceanica* en Algérie, en tant qu'espèce qu'il faut conserver (Journal officiel n°03 du 18 janvier 2012).

Par ailleurs, la biosurveillance est un processus coûteux et souvent de longue haleine, il est donc nécessaire d'identifier les paramètres susceptibles d'apporter des informations pertinentes sur la vitalité des herbiers à *Posidonia oceanica* et plus globalement sur la qualité du milieu (Pergent-Martini *et al.*, 2005 ; Martinez-Crégo *et al.*, 2008 ; Mc Mahon *et al.*, 2013). L'évaluation des paramètres de *Posidonia oceanica*, à différents niveaux d'organisation, en fonction d'un gradient environnemental constitue donc une étape incontournable, en l'absence de données de référence. Cette étape permet d'identifier les paramètres de *Posidonia oceanica* qui reflètent, sans équivoque, le statut

écologique des eaux littorales. En effet, la coexistence de pressions naturelles et anthropiques, qui interagissent simultanément sur l'herbier à *Posidonia oceanica* peut biaiser notre interprétation quant à l'impact réel des actions anthropiques sur ce dernier. C'est pour cette raison que de nombreux auteurs préconisent une approche globale combinant différents paramètres de *Posidonia oceanica* pour permettre une meilleure compréhension de ces interactions (Pergent-Martini *et al.*, 2005 ; Martinez-Crégo *et al.*, 2008).

Par conséquent, ce travail s'est intéressé dans un premiers temps, à examiner les mécanismes de réponses d'un herbier à *Posidonia oceanica*, soumis à des rejets d'effluents mixtes (urbains et industriels), et ce, au niveau de ses limites supérieure et inférieure et durant un cycle annuel. La comparaison avec un herbier référence, Kouali, est effectuée à la fois au niveau de la morphologie et de la physiologique – teneur en phénols totaux – de *Posidonia oceanica*. Dans un second temps, un système de surveillance des limites inférieures, sur le modèle RSP (Réseau de Surveillance Posidonies) est mis en place au niveau de ces deux sites, afin d'en suivre l'évolution au cours du temps.

## 5.1. Réponses de *Posidonia oceanica* et implications pour la surveillance

La réponse de la structure spatiale l'herbier à *Posidonia oceanica* de Bou Ismaïl au niveau de la limite supérieure se manifeste par une structure spatiale en patchiness, associée à la dégradation du milieu en raison des rejets d'effluents. Toutefois, les paramètres liés à la structuration spatiale de l'herbier – densité et recouvrement –, mesurés au niveau de cette station sont largement influencés par des facteurs locaux, la nature du substrat et l'hydrodynamisme. D'ailleurs, Martínez-Crego *et al.* (2008), considèrent que ces paramètres ne constituent des indicateurs pertinents que lorsqu'ils sont mesurés au niveau des stations profondes. En outre, si la densité de l'herbier à *Posidonia oceanica* n'a pas montré de différence significative lors de la comparaison intersites. En revanche, une diminution significative a été enregistrée entre 2007 et 2010, au niveau de la limite inférieure de Bou Ismaïl, et ce grâce à la mise en place du balisage. Par conséquent ce paramètre apparaît plus intéressant à mettre en œuvre dans le cadre d'une surveillance à long terme des herbiers, plutôt que dans celui d'une comparaison intersites.

Les paramètres biométriques ont montré une grande variabilité saisonnière, indépendamment du gradient environnemental. Par conséquent, dans le cadre des comparaisons intersites et des suivis interannuels des herbiers à *Posidonia oceanica*, il est donc important de respecter le même calendrier d'échantillonnage. Quant à la surface foliaire, sa diminution est plus marquée au niveau de la limite supérieure comparativement à la limite inférieure. Cette hétérogénéité traduit, d'une part, le gradient environnemental, en raison de la proximité de cette station par rapport aux rejets des effluents, et d'autre part, les facteurs locaux comme l'hydrodynamisme ou la pression des herbivores (e.g. oursin *Paracentrotus lividus*). La combinaison de ces facteurs a un impact important sur la morphologie et la physiologie de *Posidonia oceanica*, par conséquent la variabilité de ces paramètres est intimement liée à des facteurs naturels au niveau des stations superficielles (Martinez-Crégo *et al.*, 2008). En outre, si les rejets d'effluents semblent influencer la plupart des paramètres mesurés, au moins ponctuellement (un mois donné), le paramètre qui semble le plus sensible est la longueur des feuilles adultes. Par conséquent, pour s'affranchir de l'impact des facteurs locaux (hydrodynamisme, broutage) sur la longueur des feuilles, il est plus judicieux de suivre ce paramètre au niveau des stations profondes. En outre, des variations interannuelles de la longueur des feuilles ont été mises en évidence lors du suivi de la limite inférieure de Bou Ismaïl entre 2007 et 2010. En effet, une augmentation de la longueur des feuilles est enregistrée, parallèlement à une diminution de la densité. Cette corrélation négative entre la biomasse épigée de *Posidonia oceanica* et la densité semble constituer une stratégie de croissance de *Posidonia oceanica* en réponse à l'augmentation de turbidité. Par conséquent, la prise en compte du paramètre longueur des feuilles dans le cadre du suivi à long terme des herbiers à *Posidonia oceanica*, associée à des mesures de densité, s'avère donc intéressant. En outre, la mesure de la longueur des feuilles peut se faire *in situ*, de façon non destructrice, au même titre que la mesure de la densité, ce qui constitue un atout important lorsque cette espèce bénéficie du statut d'espèce protégée.

La relation entre l'enrichissement du milieu par les rejets et l'augmentation de la biomasse des épiphytes n'est pas établie à Bou Ismaïl, à l'exception de la saison estivale et plus particulièrement au niveau de la limite supérieure. L'utilisation de l'indice épiphytique comme indicateur de l'enrichissement prend, par conséquent, toute son importance lorsqu'il est mesuré en été, comme déjà rapporté par Leoni (2005). Par ailleurs la diminution enregistrée à Bou Ismaïl le reste de l'année pourrait s'expliquer par l'effet

d'autres facteurs comme l'hydrodynamique et le broutage, qui peut conduire à des changements de la biomasse des épiphytes, minimisant ainsi l'effet de l'enrichissement (Castejón Silvo, 2011). D'ailleurs, Prado *et al.* (2008) considèrent que la biomasse des épiphytes ne constitue pas un indicateur pertinent de l'enrichissement du milieu en nutriments par des apports anthropogéniques. Par conséquent, la prise en compte de l'assemblage des épiphytes de *Posidonia oceanica* comme indicateur des effets potentiels des activités humaines, est recommandée lorsque le niveau d'anthropisation n'engendre pas d'augmentation de la biomasse des épiphytes (Balata *et al.*, 2008).

L'étude de la structure démographique des rhizomes récoltés au niveau des deux sites, même si elle ne constitue qu'une première approche a permis d'individualiser la station de Bou Ismaïl (-20 m). En effet, l'herbier au niveau de cette station semble présenter une mortalité des rhizomes plus importante par rapport au reste des stations étudiées. Cette tendance semble se confirmer par la diminution de la densité de l'herbier enregistrée lors du suivi de cette limite entre 2007 et 2010 grâce à la mise en place du balisage. Néanmoins, cette tendance basée sur les rhizomes récoltés, ne constitue que des résultats préliminaires, qui doivent se confirmer par une étude de la structure démographique plus rigoureuse basée sur un échantillonnage plus adéquat. Il consiste, par exemple, à prélever un bloc de matte de 1m<sup>2</sup> et à estimer l'âge de l'ensemble des rhizomes qu'il contient (González-Correa *et al.*, 2007).

Quant à l'impact des rejets sur la croissance et la production des rhizomes, les réponses enregistrées sont là aussi différentes en fonction de la profondeur. Une diminution est notée en limite supérieure et correspond à une réponse classique enregistrée au niveau des herbiers soumis à des rejets d'effluents. Quant à l'augmentation de la croissance et de la production des rhizomes au niveau de la limite inférieure, des investigations sont nécessaires afin de déterminer si cette stratégie permet une meilleure acclimatation à l'augmentation de la turbidité comme rapportée par Collier *et al.* (2007). En effet ceci est envisageable dans la mesure où les rhizomes constituent des organes de réserves qui permettent la croissance de la plante lorsque les conditions du milieu sont défavorables. Par conséquent, la prise en compte de la croissance des rhizomes dans le cadre du suivi de la vitalité de *Posidonia oceanica* s'avère intéressante, néanmoins elle doit être accompagnée par le dosage des réserves en carbohydrates.

Quant à l'augmentation de la production foliaire enregistrée en limite inférieure et l'absence de différence significative en limite supérieure, elle pourrait constituer une adaptation face à l'augmentation de la turbidité, permettant d'intercepter d'avantage de lumière et donc d'augmenter la capacité photosynthétique de la plante, à travers l'augmentation de la concentration en pigments chlorophylliens (Ruiz et Romero, 2001 ; Peirano *et al.*, 2011). Néanmoins, la tendance générale à l'augmentation du nombre moyen d'écailles par cycle, apparaît comme une conséquence probable de phénomènes généraux d'enrichissement en nutriments, décelés dans l'ensemble du bassin Méditerranéen Nord-Occidental (Pergent-Martini, 1994 et les références citées). Par conséquent, la prise en compte de ce paramètre pour le suivi de l'impact de l'enrichissement du milieu sur *Posidonia oceanica* s'avère intéressant.

Les stress induits par les rejets des effluents semblent n'avoir pas engendré de variation dans la teneur en phénols totaux des feuilles adultes (bases et limbes) et des feuilles intermédiaires de *Posidonia oceanica*. Néanmoins, seuls les composés phénoliques solubles dans l'eau ont été mesurés dans le cadre de ce travail. Il est donc tout à fait envisageable que des composés phénoliques non-solubles soient impliqués dans les mécanismes de réponse de *Posidonia oceanica* aux stress engendrés par les rejets d'effluents, sans que cela n'ait pu être mis en évidence par la méthode employée. En outre, l'augmentation du nombre de cellules de tannins dans les feuilles de *Posidonia oceanica* en réponse à ce type de stress justifie la prise en compte des composés phénoliques complexes comme les flavonoïdes et les tannins condensés. Par ailleurs, il a été montré que la synthèse et l'accumulation des composés phénoliques dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* est beaucoup plus stable que dans les feuilles, en raison des variations saisonnières enregistrées au niveau de ces tissus. Par conséquent, la prise en compte des rhizomes dans le cadre de l'utilisation des composés phénoliques comme biomarqueurs de stress chez *Posidonia oceanica* est préconisé par Migliore *et al.* (2007) et Rotini *et al.* (2011, 2013). En effet, ces derniers ont trouvé des corrélations négatives entre la vitalité des herbiers et la teneur en phénols totaux des rhizomes.

La mise en place des balisages pour la surveillance des limites inférieures des deux herbiers étudiés et leur suivi a confirmé l'efficacité de cette technique ayant permis de détecter *in situ* des modifications de faible ampleur. Elle a aussi confirmé le caractère

régressif de l'herbier de Bou Ismaïl au niveau de sa limite inférieure en raison de l'augmentation de la turbidité engendrée par les rejets des effluents. Contrairement à celle de Kouali qui traduit des conditions de milieu stabilisées, en termes de transparence de l'eau. Quant à la profondeur de la limite inférieure, elle ne semble pas uniquement liée à la transparence de l'eau au niveau de la baie de Bou Ismaïl ; elle est également liée à la nature du substrat. Cela a été confirmé des explorations réalisées en 2011 et 2013 dans la baie de Bou Ismaïl, dans le cadre de l'évaluation du statut écologique des eaux littorales par la mise en œuvre d'un indice multiparamétrique (Semroud *et al.*, 2014). En effet, nous avons constaté que la limite inférieure des herbiers à *Posidonia oceanica* coïncide toujours avec la bordure du platier rocheux. Par conséquent, si le suivi du type limite inférieure constitue un critère incontournable pour apprécier la transparence des eaux et leur évolution moyenne au cours du temps, il apparaît clairement que l'extension bathymétrique maximale de l'herbier peut être influencée par d'autres facteurs, en fonction de la région géographique étudiée comme rapporté par Pergent *et al.* (2005). Un retour sur les sites de Bou Ismaïl et Kouali est programmé pour juillet 2015, afin de suivre la dynamique évolutive de ces deux herbiers.

Enfin, ce travail a permis d'approfondir la compréhension des réponses de *Posidonia oceanica* aux changements dans la disponibilité de la lumière et l'augmentation de la concentration en nutriments dans le milieu, suite aux rejets des effluents mixtes (urbains et industriels). Elle a également contribué de manière significative à notre capacité à mettre en place un réseau de surveillance des herbiers à *Posidonia oceanica*. Les résultats obtenus ont permis de déceler des différences significatives entre le site exposé aux rejets d'effluents et le site de référence, et ce à différents niveaux d'organisation de *Posidonia oceanica*. En outre, il est apparu que l'herbier de Bou Ismaïl est plus affecté au niveau de sa limite supérieure (proche de l'émissaire), et ce, au niveau de sa structure spatiale et de sa morphologie. Tandis qu'au niveau de sa limite inférieure, hormis le caractère régressif de la limite, la diminution de sa vitalité est moins importante comparativement à la limite supérieure. En effet, la configuration du site de Bou Ismaïl -situé en baie ouverte- permet une dispersion importante des rejets effluents vers le large, d'où un impact moins important sur l'herbier au niveau de sa limite inférieure. De plus les facteurs locaux – hydrodynamisme et broutage – qui caractérisent la station superficielle viennent s'ajouter aux nuisances liées aux rejets. La combinaison de ces facteurs a un impact

important sur la morphologie et la physiologie de *Posidonia oceanica*, par conséquent la variabilité de ces paramètres est intimement liée à des facteurs naturels au niveau des stations superficielles (Martinez-Crégo *et al.*, 2008).

## 5.2. Perspectives de recherche

L'optimisation des programmes de surveillance des herbiers à *Posidonia oceanica* dans le but de traduire la qualité de l'environnement littoral méditerranéen est un élément essentiel dans le cadre d'une gestion efficace de ce milieu (Lopez y Royo, 2008). C'est dans ce contexte que des indices multiparamétriques associés à *Posidonia oceanica* et susceptibles de répondre à une variété de perturbations du milieu marin ont été mis en œuvre (Romero *et al.*, 2007 ; Fernández-Torquemada *et al.*, 2008 ; Gobert *et al.*, 2009 ; Lopez y Royo *et al.*, 2010 ; Bennett *et al.*, 2011 ; Bacci *et al.*, 2013 ; Personnic *et al.*, 2014). Par conséquent, nos activités de recherche en cours s'orientent vers la mise en œuvre d'un indice biotique basé sur *Posidonia oceanica* pour évaluer la qualité globale des eaux côtières de la « zone côtière algéroise ». La disponibilité de certains indices synthétiques utilisant *Posidonia oceanica* nous a offert l'opportunité d'évaluer la qualité globale des eaux de la « zone côtière algéroise » dans le cadre d'un « Projet National de Recherche, 2014 » (PNR, code 2/u 163/431). L'état écologique des masses d'eau est ainsi quantifié sous la forme d'un ratio entre les conditions réelles et les conditions de référence (Ecological Quality Ratio, (EQR)) selon une échelle comportant cinq classes : Très bonne, Bonne, Moyenne, Médiocre, Mauvaise. Les indices retenus sont le BiPo (Biotic index using *Posidonia oceanica*) (Lopez y Royo *et al.*, 2010) et le PREI (*Posidonia oceanica* Rapid Easy Index) (Gobert *et al.*, 2009) qui prennent en compte les paramètres suivants : profondeur et type de limite inférieure, densité de l'herbier, longueur des feuilles, surface foliaire et biomasse des épiphytes. Les résultats préliminaires obtenus confirment la possibilité de comparer l'état des herbiers à *Posidonia oceanica* de la « zone côtière algéroise » à ceux de la Méditerranée, grâce à l'utilisation de ces indices synthétiques. La mise en œuvre de ces indices semble répondre à la problématique actuelle qui consiste à trouver des outils fiables permettant de comparer l'état actuel des herbiers à l'échelle de la Méditerranée (Lopez y Royo, 2008).

Quant à nos futures recherches, elles ont pour objectif de trouver des outils permettant un diagnostic précoce des perturbations du milieu liés aux rejets des effluents. Tenant compte des résultats obtenus concernant l'utilisation des composés phénoliques comme biomarqueurs de stress chez *Posidonia oceanica*, nous envisageons le dosage des phénols totaux au niveau des rhizomes de *Posidonia oceanica*. En outre, l'analyse lépidochronologique, en permettant de rétro-dater avec précision des segments de rhizomes, ouvre une voie pour la détermination de l'évolution temporelle des impacts anthropiques sur les teneurs en phénols totaux. En outre, l'augmentation de la teneur en phénols totaux enregistrée au niveau des bases des feuilles adultes et des feuilles intermédiaires suite à un broutage par les mésoherbivores, fournit la preuve de l'importance de continuer à étudier l'implication de substances phénoliques dans les mécanismes de défense de *Posidonia oceanica* contre le broutage par les mésoherbivores, complétant ainsi ce qui a été publié concernant les macroherbivores *Sarpa salpa* et *Paracentrotus lividus* (Vergès *et al.* 2007a, b, 2011).

Enfin, la mise en place d'un balisage au niveau de la limite supérieure du site de Bou Ismaïl est également envisagée au cours de la même période, dans la mesure où l'impact des rejets d'effluents a été particulièrement marqué au niveau de cette limite. Par ailleurs, une station de traitement et d'épuration des eaux usées (STEP) est en cours de réalisation à Bou Ismaïl. Sa mise en service est selon l'Office National de l'Assainissement, prévue pour 2016. Ce système de surveillance permettra d'évaluer l'éventuelle restauration naturelle de cet herbier suite à l'amélioration de la qualité du milieu attendue.

# Bibliographie

- Abbate M., Peirano N., Ugolini, U., 2000. Structural changes in *Posidonia oceanica* leaves along the coast of Liguria (Italy) : responses to environmental stress. *Biol. Mar. Medit.*, 7 (2) : 320-323.
- Agostini S., Desjobert J.M., Pergent G., 1998. Distribution of phenolic compounds in the seagrass *Posidonia oceanica*. *Phytochemistry*, 48(4) : 611-617.
- Alcoverro T., Duarte C.M., Romero J., 1995. Annual growth dynamics of *Posidonia oceanica* : contribution of large-scale versus local factors to seasonality. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 130 : 203-210.
- Alcoverro T., Manzanera M., Romero J., 2001. Annual metabolic carbon balance of the seagrass *Posidonia oceanica* : the importance of carbohydrate reserves. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 211 : 105-116.
- Ardizzone G., Belluscio A., Mairano L., 2006. Long-term change in the structure of a *Posidonia oceanica* landscape and its reference for a monitoring plan. *Mar. Ecol.*, 27 : 299-309.
- Arnold T.M., Targett N.M., 2002. Marine tannins : the importance of a mechanistic framework for predicting ecological roles. *J. Chem. Ecol.*, 28 : 1919-1934.
- Bacci T., Rende S.F., Penna M., Trabucco B., Montefalcone M., Cicero A.M., Giovanardi F., 2013. A methodological approach to understand functional relationships between ecological indices and human-induced pressures : The case of the *Posidonia oceanica* meadows. *J. Environ. Manag.*, 129 : 540-547.
- Bachari-Houma F., 2009. *Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l'imagerie satellitaire*. Thèse Doctorat : Sciences de l'univers et Environnement, Université Val de Marne, Paris XII, Fr. : 1- 272.
- Badalamenti F., Di Carlo G., D'Anna G., Toccaceli M.C.M., 2006. Effects of dredging activities on population dynamics of *Posidonia oceanica* (L.) Delile in the Mediterranean sea : the case study of Capo Feto (SW Sicily, Italy). *Hydrobiologia* 555 : 253-261.
- Balata D., Bertocci I., Piazzzi L., Nesti U., 2008. Comparison between epiphyte assemblages of leaves and rhizomes of the seagrass *Posidonia oceanica* subjected to different levels of anthropogenic eutrophication. *Estuar. Coast. Shelf S.*, 79(3) : 533-540.
- Balestri E., Benedetti-Cecchi L., Lardicci C., 2004. Variability in patterns of growth and morphology of *Posidonia oceanica* exposed to urban and industrial wastes: contrasts with two reference locations. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 208 : 1-21.
- Barbier E.B., Hacker S.D., Kennedy C., Koch E.W., Stier A.C., Silliman B.R., 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecol. Monogr.*, 81(2) : 169-193.
- 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*. Thèse Doctorat : Sciences océanologiques, Université Liège, Belg. : 1-251.
- Beaumont N., Austen M., Atkins J., Burdon D., Degraer S., Dentinho T.P., Deros S., Holm P., Horton T., Van Ierland E., Marboe A.H., Starkey D.J., Townsenda M.,

- Zarzycki T., 2007. Identification, definition and quantification of goods and services provided by marine biodiversity : implications for the ecosystem approach. *Mar. Pollut. Bull.*, 54 : 253-265.
- Ben Brahim M., Hamza A., Hannachi I., Rabai A., Jarboui O., Bouain A., Aleya L., 2010. Variability in the structure of epiphytic assemblages of *Posidonia oceanica* in relation to human interferences in the Gulf of Gabes, Tunisia. *Mar. Environ. Res.* 70 : 411-421.
- Bennett S., Roca G., Romero J., Alcoverro T., 2011. Ecological status of seagrass ecosystems : An uncertainty analysis of the meadow classification based on the *Posidonia oceanica* multivariate index (POMI). *Mar. Pollut. Bull.*, 62 : 1616-1621.
- Bonacorsi M., Pergent-Martini C., Bréand N., Pergent G., 2013. Is *Posidonia oceanica* regression a general feature in the Mediterranean Sea? *Medit. Mar. Sci.*, 14(1) : 193-203.
- 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 et GIS Posidonie. GIS Posidonie Publ. : 1-67.
- Boudouresque C. F., Jeudy de Grissac A., Meinesz A., 1984. Relation entre la sédimentation et l'allongement des rhizomes orthotropes de *Posidonia oceanica* dans la baie d'Elbu (Corse). In C.F. Boudouresque., A. Jeudy de Grissac, J. Olivier (Edits.), Proceedings of International workshop on *Posidonia oceanica* Beds, GIS Posidonie Publ., Fr., 1 : 158-191.
- Boudouresque C. F., Meinesz A., 1982. Découverte de l'herbier de Posidonie. *Cah. Parc nation. Port-Cros*, Fr., 4 : 1-79.
- Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., Tunesi L., 2006. Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. RAMOGE Publ., Monaco, Fr. : 1-202.
- Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Le Diréach L., Ruitton S., 2007. Monitoring methods for *Posidonia oceanica* seagrass meadows in Provence and the French Riviera. *Sci. Rep. Port-Cros natl. Park*, 22 : 17-38.
- Boudouresque C.F., Bernard G., Pergent G., Shili A., Verlaque M., 2009. Regression of Mediterranean Seagrasses caused by natural processes and anthropogenic disturbances and stress: a critical review. *Bot. mar.*, 52 : 395-418.
- Boudouresque C.F., Charbonnel E., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Cadiou G., Bertrand M.C., Foret P., Ragazzi P., Rico-Raimondino V., 2000. A monitoring network based on the seagrass *Posidonia oceanica* in the northwestern mediterranean sea. *Biol. Mar. Medit.*, 7(2) : 328-331.
- Boumaza S., 1995. *Phénologie, biomasse, lépidochronologie et production primaire de l'herbier à Posidonia oceanica (L.) Delile de l'anse de Kouâli, Tipaza (Algérie)*. Thèse Magister : Océanologie, ISMAL, Alger, Alg. : 1-125 + Annexes.
- Boumaza S., Boudefoua N., Boumaza R., Semroud R., 2014. Effects of urban effluents on spatial structure, morphology and total phenols of *Posidonia oceanica* : Comparison with a reference site. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 457 : 113-119.

- Boumaza S., Khiari N., Mokeddem Z., Hamoul N., Semroud R. 2012. Effects of disturbances caused by coastal discharges on phenolic compounds in the seagrass *Posidonia oceanica*. In Proceedings of the 3rd Mediterranean Seagrass Workshop, Essaouira, 34.
- Boumaza S., Semroud R., 2000. Evaluation of past and present primary production in *Posidonia oceanica* beds from the cove of Kouâli (Tipasa, Algeria) using the lepidochronological method. *Biol. Mar. Medit.* 7(2) : 26-30.
- Braïk D., 1989. *Etude de la dynamique sédimentaire devant Bou Ismaïl : Sédimentologie - Morphologie - problème d'érosion littorale - Aménagement*. Thèse magistère : Géologie marine, USTHB, Alger, Alg. : 1-174.
- Brearley A., Walker D.I., 1993. Isopod borers in seagrass species from south-western Australia. In F.E. Wells, D.I. Walker, H. Kirkman, R. Lethbridge (Edits.), Proceedings of the Fifth International Marine Biological Workshop : The Marine Flora and Fauna of Rottnest Island, Western Australia, 2. Western Australian Museum, Perth : 415-428.
- Buia M. C., Zupo V., Mazzella L. 1992. Primary production and growth dynamics of *Posidonia oceanica*. P.S.Z.N.I : *Mar. Ecol.* 13(1) : 1-15.
- Buia M.C., Gambi M.C., Zupo V., 2000. Structure and functioning of mediterranean seagrass ecosystemes : an overview. *Biol. Mar. Medit.*, 7(2) : 167-190.
- Calvo S., Lovison G., Pirrotta M., Di Maida G., Tomasello A., Sciandra M., 2006. Modelling the relationship between sexual reproduction and rhizome growth in *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Mar. Ecol.*, 27 : 361-371.
- Cancemi G., De Falco G., Pergent G., 2003. Effects of organic matter input from a fish farming facility on a *Posidonia oceanica* meadow. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.*, 56 : 961-968.
- Cannac M., Ferrat L., Pergent-Martini C., Pergent G., Pasqualini V., 2006. Effects of fish farming on flavonoids in *Posidonia oceanica*. *Sci. Total Environ.*, 370 : 91-98.
- Cariello L., Zanetti L., 1979. Distribution of chicoric acid during leaf development of *Posidonia oceanica*. *Bot. Mar.*, XXII : 359-360.
- Castejón Silvo I., 2011. *Grazing on the epiphytic community of Posidonia oceanica (L.) Delile : An assessment of its relevance as a buffering process of eutrophication effects*. Thèse PhD, Université Baléares, Palma, Esp. 1-165.
- Caye G., 1989. *Sur la morphogenèse, le cycle végétatif et la reproduction de deux phanérogames : Posidonia oceanica (Linnaeus) Delile et Cymodocea nodosa (Ucria) Ascherson*. Thèse Habilitation à Diriger des Recherches, Université Nice, Fr : 1-229.
- Cebrian J., Marbà N., Duarte C.M., 1994. Estimating leaf age of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile using the plastochrone interval index. *Aquat. Bot.*, 49 : 59-65.
- Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec. 2009. Protocole pour la validation d'une méthode d'analyse en chimie, DR-12-VMC, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, Édition courante : 1-30.
- Charbonne E., Boudouresque C. F., Meinesz A., Pergent-Martini C., Rico-Raimondino V., San-Martine G., Bertrand M C., Foret P., Ragazzi M., Leccia G., 1995. Le Réseau de surveillance posidonies de la région Provence-Alpes, Côte d'Azur. Rapport

1995 (4ème phase 2ème année.) Région PACA/GIS Posidonies/CQEL 13/CQEL 83/DQECV/CQEL06. GIS Posidonie Publ., Marseille : 1-193.

- Charbonnel E., Boudouresque C.F., Meinesz A., Bernard G., Bonhomme P., Patrone J., Kruczek R., Cottalorda J.M., Bertrand M.C., Foret P., Ragazzi M., Le Direach L., 2000. Le Réseau de surveillance Posidonies de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Première partie : Présentation et guide méthodologique. Année 2000. Région PACA / Agence de l'Eau RMC /GIS Posidonie / CQEL 13 / CQEL 83 / Conseil Général 06. GIS Posidonie publ., Marseille : 1-76.
- Clabaut P., Pergent-Martini C., Pergent G., Augris C., Pasqualini V., Chamley H., 2010. Les relations entre les herbiers de Posidonies, le substrat et l'hydrodynamisme. *In* : S. El Asmi, H. Langar, R. Belgacem (Eds), Proceedings of the Fourth Mediterranean Symposium on Marine Vegetation. Hammamet-Yasmine. RAC/SPA Publ., Tunis : 49-54.
- Collier C.J., 2006. *Charaterising responses of the seagrass Posidonia sinuosa to changes in light availability*. PhD Dissertation, Université Cowan, Aus. : 1-189.
- Collier C.J., Lavery P.S., Masini R.J., Ralph P.J., 2007. Morphological, growth and meadow characteristics of the seagrass *Posidonia sinuosa* along a depth related gradient of light availability. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 337 : 103-115.
- Collier C.J., Lavery P.S., Ralph P.J., Masini R.J., 2008. Physiological characteristics of the seagrass *Posidonia sinuosa* along a depth-related gradient of light availability. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 353 : 65-79.
- Collier C.J., Waycott M., Giraldo-Ospina A., 2012. Responses of four Indo-West Pacific seagrass species to shading. *Mar. Pollut. Bull.*, 65 : 342-354.
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., Van den Belt M., 1997. The service of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387 : 253-260.
- Cozza R., Chiappetta A., Petrarulo M., Salimonti A., Rende F., Bitonti M.B., Innocenti A.M., 2004. Cytological features of *Posidonia oceanica* as putative markers of environmental conditions. *Chem. Ecol.*, 20 : 215-223.
- Crouzet A., 1981. Mise en évidence de variations cycliques dans les écailles de *Posidonia oceanica* (Potamogetonacea). *Trav. sci. Parc nation. Port-Cros*, Fr., 7 : 129-135.
- Cunha A.H., Duarte C.M., 2005. Population age structure and rhizome growth of *Cymodocea nodosa* in the Ria Formosa (southern Portugal). *Mar. Biol.*, 146 : 841-847.
- Cuny P., Serve L., Jupin H., Boudouresque C.F., 1994. Les composés phénoliques hydrosolubles de *Posidonia oceanica* (phanérogame marine) dans une zone colonisée par la chlorophyte introduite *Caulerpa taxifolia* (Alpes Maritime, France, Méditerranée). *In* C.F. Boudouresque., A. Meinesz, V Gravez (Edits.), First International Workshop on *Caulerpa taxifolia.*, GIS Posidonie publ., Fr. : 355-364.
- Cuny P., Serve L., Jupin H., Boudouresque C.F., 1995. Water soluble phenolic compounds of the marine phanerogam *Posidonia oceanica* in Mediterranean area colonised by the introduced chlorophyte *Caulerpa taxifolia*. *Aquat. Bot.*, 52 : 237-242.

- Dalla Via J., Sturmhuber C., Schönweger G., Sötz E., Mathekowitsch S., Stifter M., Reiger R., 1998. Light gradients and meadow structure in *Posidonia oceanica* : ecomorphological and functional correlates. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 163 : 267-278.
- De Villele X., Verlaque M., 1995. Changes and degradation in a *Posidonia oceanica* bed invaded by the introduced tropical alga *Caulerpa taxifolia* in the north western Mediterranean. *Bot. Mar.*, 38(1) : 79-87.
- Delgado O., Ruiz J., Perez M., Romero J., Ballesteros E., 1999. Effects of fish farming on seagrass (*Posidonia oceanica*) in a Mediterranean bay: seagrass decline after organic loading cessation. *Oceanol. Acta.*, 22(1) : 109-117.
- Di Carlo G., Badalamenti F., Jensen A.C., Koch E.W., Riggio S., 2005. Colonisation process of vegetative fragments of *Posidonia oceanica* (L.) Delile on rubble mounds. *Mar. Biol.*, 147 : 1261-1270.
- Di Carlo, G., 2004. *The natural recolonization process of the seagrass Posidonia oceanica (L.) Delile after the introduction of the Italo-Algerian methane pipeline in the SW Mediterranean sea*. Thèse Ph.D., Université Southampton, Ang. : 1-224.
- Diaz-Almela E., Marbà N., Duarte C.M., 2007. Consequences of Mediterranean warming events in seagrass (*Posidonia oceanica*) flowering records. *Glob. Change Biol.* : 224-235.
- Diaz-Almela E., Marbà N., Ivarez E.A., Balestri E., Ruiz-Fernandez J.M., Duarte C.M., 2006. Patterns of seagrass (*Posidonia oceanica*) flowering in the Western Mediterranean. *Mar. Biol.*, 148 : 723-742.
- Doney S.C., Ruckelshaus M., Duffy J. E., Barry J. P., Chan F., English C.A., Galindo H.M., Grebmeier J.G., Hollowed A.B., Knowlton N., Polovina J., Rabalais N.N., Sydeman W.J. and Talley L.D., 2012. Climate Change Impacts on Marine Ecosystems. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 4 : 1-27.
- Duarte C.M., Kalff J., 1987. Weight-density relationships in submerged macrophytes : the importance of light and plant geometry. *Oecologia*, 72 : 612-617.
- Duarte C.M., Marba N., Agawi N., Cebrian J., Enriquez S., Fortes M.D., Gallegos M.E., Merino M., Olesen B., Sand-Jensen K., Uri J., Vermaat J., 1994. Reconstruction of seagrass dynamics: age determinations and associated tools for the seagrass ecologist. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 107 : 195-209.
- Duarte., 1991. Seagrass depth limits. *Aquat. Bot.*, 40 : 363-377.
- Dumay O., Costa J., Desjobert J.M., Pergent G., 2004. Variations in the concentration of phenolic compounds in the seagrass *Posidonia oceanica* under conditions of competition. *Phytochemistry*, 65 : 3211-3220.
- Fernández-Torquemada Y., Diaz-Valdes M., Colilla F., Luna B., Sanchez-Lizaso J. L., Ramos-Espla A.A., 2008. Descriptors from *Posidonia oceanica* (L.) Delile meadows in coastal waters of Valencia, Spain, in the context of the EU Water Framework Directive. *ICES. J. Mar. Sci.*, 65 : 1-6.
- Ferrat L., 2001. *Réactions de la magnoliophyta marine Posidonia oceanica en réponse a des stress environnementaux*. Thèse Doctorat : Ecologie Marine, Université Corté, Corse, Fr. : 1-187.

- Ferrat L., 2010. *Bioindicateurs des variations environnementales chez les végétaux*. Thèse Habilitation à Diriger des Recherches : Biologie des populations et Ecologie, Université Corté, Corse, Fr. : 1-78.
- Ferrat L., Bingert A., Roméo M., Gnassia-Barelli M., Pergent-Martini C., 2002a. Mercury uptake and enzymatic response of *Posidonia oceanica* after an exposure to organic and inorganic forms. *Environ. Toxicol. Chem.* 21(11) : 2365-2371.
- Ferrat L., Pergent-Martini C., Romeo M., 2003. Assessment of the use of biomarkers in aquatic plants for the evaluation of environmental quality : application to seagrasses. *Aquat. Toxicol.*, 65 : 187-204.
- Ferrat L., Roméo M., Gnassia-Barelli M., Pergent-Martini C., 2002b. Effect of mercury on antioxidant mechanisms in the marine phanerogam *Posidonia oceanica*. *Dis. Aquat. Org.*, 50 : 157-160.
- Ferrat L., Wyllie-Echeverria S., Cates Rex G., Pergent-Martini C., Pergent G., Zou J., Romeo, M., Pasqualini V., Fernandez C., 2012. En ligne <http://www.intechopen.com/books/ecological-water-quality-water-treatment-and-reuse/posidonia-oceanica-and-zostera-marina-as-potential-bioindicators-of-heavy-metal-contamination-in-est>.
- Folk R.L., 1954. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature. *J. Geology*, 62 : 344-359.
- Folk R.L., Ward W.C., 1957. Brazos river bar : a study in significance of grain size parameters. *J. Sediment. Petrol.*, 27 : 3-26.
- Francour P., Ganteaume A., Poulain M., 1999. Effects of boat anchoring in *Posidonia oceanica* beds in Port-Cros National Park (north-western Mediterranean Sea). *Aquatic Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 9 : 391-400.
- Giovannetti E., Lasagna R., Montefalcone M., Bianchi C.N., Albertelli G., Morri C., 2008. Inconsistent responses to substratum nature in *Posidonia oceanica* meadows : An integration through complexity levels? *Chem. Ecol.*, 24 (suppl.1) : 83-91.
- Giovannetti E., Montefalcone M., Morri C., Bianchi C.N., Albertelli G., 2010. Early warning response of *Posidonia oceanica* epiphyte community to environmental alterations (Ligurian Sea, NW Mediterranean). *Mar. Pollut. Bull.*, 60 : 1031-1039.
- Giraud G., 1979. Sur une méthode de mesure et de comptage des structures foliaires de *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile. *Bull. Muséum Hist. Nat. Marseille*, Fr., 39 : 33-39.
- Gobert S., 2002. *Variations spatiale et temporelle de l'herbier à Posidonia oceanica (L.) Delile (Baie de La Revellata-Calvi-Corse)*. Thèse Docorat : Océanologie. Université Liège, Belgique : 1-201.
- Gobert S., Cambridge M.L., Velimirov B., Pergent G., Lepoint G., Bouquegneau J.M., Dauby P., Pergent-Martini C., Walker D.I., 2006. In D. Larkum, R.J. Orth, C.M. Duarte (Edits), "Seagrasses Biology: Ecology and Conservation", Springer Publ., New York : 387-408.
- Gobert S., Defawe O., Lepoint G., Demoulin V., Bouquegneau J.M., 2001. Anthesis effects on *Posidonia oceanica* (L.) Delile phenology in the Bay of Calvi (Corsica, Mediterranean Sea). *Hydrobiologia*, 455 : 121-125.

- Gobert S., Kyramarios M., Lepoint G., Pergent-Martini C., Bouquegneau J.M., 2003. Variations at different spatial scales of *Posidonia oceanica* (L.) Delile beds; effects on the physico-chemical parameters of the sediment. *Oceanol. Acta*, 26 : 199-207.
- Gobert S., Sartoretto S., Rico-Raimondino V., Andral B., Chery A., Lejeune P., Boissery P., 2009. Assessment of the ecological status of Mediterranean French coastal waters as required by the Water Framework Directive using the *Posidonia oceanica* Rapid Easy Index: PREI. *Mar. Pollut. Bull.* 58, 1727-1733.
- González-Correa J.M., Bayle J.T., Sánchez-Lizaso J.L., Valle C., Sánchez-Jerez P., Ruiz J.M., 2005. Recovery of deep *Posidonia oceanica* meadows degraded by trawling. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 320 : 65-76.
- González-Correa J.M., Fernández-Torquemada Y., Sánchez-Lizaso J.L., 2007. Comparing shoot population dynamics methods on *Posidonia oceanica* meadows. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 353 : 115-125.
- Grimes S., 2011. Profil de durabilité dans quelques destinations touristiques méditerranéennes : La destination touristique pilote en Algérie : la zone côtière de Tipasa. Plan Bleu, CAR/ PNUE/PAM, Sophia Antipolis : 1-78.
- Guidetti P., Buia M.C., Mazzella L., 2000. The use of lepidochronology as a tool of analysis of dynamic features in the seagrass *Posidonia oceanica* of the Adriatic Sea. *Bot. Mar.*, 43 : 1-9.
- Guidetti P., Bussotti S., Gambi M.C., Lorenti M., 1997. Invertebrate borers in *Posidonia oceanica* scales : relationship between their distribution and lepidochronological parameters. *Aquat. Bot.*, 58 : 151-164.
- Hamoutene D., Roméo M., Gnassia M., Lafaurie M., 1996. Cadmium effects on oxidative metabolism in a marine seagrass : *Posidonia oceanica*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 56 (2) : 327-334.
- Holmer M, Argyrou M, Dalgaard T, Danovaro R, Diaz-Almela E., Duarte C.M., Frederiksen M., Grau A., Karakassis I., Marbà N., Mirto S., Pérez M., Pusceddu A., Tsapakis M., 2008. Effects of fish farm waste on *Posidonia oceanica* meadows: synthesis and provision of monitoring and management tools. *Mar. Pollut. Bull.*, 56 : 1618-1629.
- Invers O., Kraemer G.P., Perez M., Romero J., 2004. Effects of nitrogen addition on nitrogen metabolism and carbon reserves in the temperate seagrass *Posidonia oceanica*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 303 : 97-114.
- Invers O., Perez M., Romero J., 1995. Alkaline phosphatase activity as a tool for assessing nutritional conditions in the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Sci. Mar.* 59 (Suppl. 1) : 41-47.
- Invers O., Tomàs F., Pérez M., Romero J., 2002. Potential effect of increased global CO<sub>2</sub> Availability on the depth distribution of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile : A tentative assessment using a carbon balance model. *Bull. Mar. Sci.*, 71(3) : 1191-1198.
- Jeuzy 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.
- Jordà G., Marbà N., Duarte C.M., 2012. Mediterranean seagrass vulnerable to regional climate warming. *Nat. Clim. Change.*, 2 : 821-824.

- Kiparissis S., Fakiris E., Papatheodorou G., Geraga M., Kornaros M., Kapareliotis A., Ferentinos G. 2011. Illegal trawling and induced invasive algal spread as collaborative factors in a *Posidonia oceanica* meadow degradation. *Biol. Invasions*, 13 : 669-678.
- Kirkman H., 1996. Baseline and Monitoring Methods for Seagrass Meadows, *J. Env. Manag.*, 47 : 191-201.
- Koivikko R., 2008. *Brown algal phlorotannins improving and applying chemical methods*. Université Turku, Turku, FI : 1- 61.
- Koivikko R., Loponen J., Honkanen T., Jormalainen V. 2005. Contents of soluble, Cell-Wall-Bound and exuded phlorotannins in the brown alga *Fucus vesiculosus*, with implications on their ecological functions. *J. Chem. Ecol.*, 31 : 195-212.
- Kocak F. Aydin-Onen S., 2014. Epiphytic bryozoan community of *Posidonia oceanica* (L.) Delile leaves in two different meadows at disturbed and control locations. *Medit. Mar. Sci.*, 15(2) : 390-397.
- Lasagna R., Montefalcone M., Albertelli G., Corradi N., Ferrari M., Morri C., Bianchi C.N., 2011. Much damage for little advantage : Field studies and morphodynamic modelling highlight the environmental impact of an apparently minor coastal mismanagement. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.*, 94 : 255-262.
- Le Gall J.Y., 1969. Etude de l'endofaune des pelouses de Zostéracées superficielles de la baie de Castiglione (côte d'Algérie). *Téthys*, 1(2) : 395-420.
- Leoni V., 2005. *Utilisation de Posidonia oceanica (L.) Delile dans le cadre de la surveillance du littoral : Bilan des descripteurs - Réponses face à un enrichissement en nutriments (N & P)*. Thèse Doctorat : Ecologie marine, Université Corté, Corse, Fr. : 1-163.
- Leoni V., Pasqualini V., Pergent-Martini C., Vela A., Pergent G., 2006. Morphological responses of *Posidonia oceanica* to experimental nutrient enrichment of the canopy water. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 339 : 1-14.
- Leoni V., Pasqualini V., Pergent-Martini C., Vela A., Pergent G., 2007. Physiological responses of *Posidonia oceanica* to experimental nutrient enrichment of the canopy water. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 349 : 73-83.
- Leoni V., Vela A., Pasqualini V., Pergent-Martini C., Pergent G., 2008. Effects of experimental reduction of light and nutrient enrichments (N and P) on seagrasses: a review. *Aquat. Conserv.*, 18 : 202-220.
- Leriche A., Pasqualini V., Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Clabaut P., Denis J., 2006. Spatial, temporal and structural variations of a *Posidonia oceanica* seagrass meadow facing human activities. *Aquat. Bot.*, 84 : 287-293.
- Longstaff B.J., Loneragan N.R., O'Donohue M.J., Dennison W.C., 1999. Effects of light deprivation on the survival and recovery of the seagrass *Halophila ovalis* (R.Br.) Hook. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 234 : 1-27.
- Lopez y Royo C., Casazza G., Pergent-Martini C., Pergent G., 2010. A biotic index using the seagrass *Posidonia oceanica* (BiPo), to evaluate ecological status of coastal waters. *Ecol. Indic.* 10, 380-389.

- Macheix J.J., Fleuriet A., Jay-Allemand C., 2005. Les composés phénoliques des végétaux, un exemple de métabolites secondaires d'importance économique. Presses polytechniques et universitaires romandes, CH-1015 (Edit.), Lausanne : 1-191.
- Maggi P., Greut Y., Lassus P., 1977. Influence de la pollution urbaine sur la vitalité des herbiers à Posidonies dans le golf de Giens. *Sci. Pêche marit.*, Fr., 269 : 5-13.
- Mangos A., Claudot M.A., 2013. Etude économique des effets des aires protégées marines et côtières en Méditerranée. Les Cahiers du Plan Bleu, Valbonne, 13 : 1-64.
- Marbà N., Duarte C.M., 1994. Growth response of the seagrass *Cymodocea nodosa* to experimental burial and erosion. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 107 : 307-311.
- Marbà N., Díaz-Almela E., Duarte C.M., 2014. Mediterranean seagrass (*Posidonia oceanica*) loss between 1842 and 2009. *Biol. Conserv.*, 176 : 183-190.
- Marbà N., Duarte C.M., 1997. Interannual changes in seagrass (*Posidonia oceanica*) growth and environmental change in the Spanish Mediterranean littoral zone. *Limnol. Oceanogr.*, 42(5) : 800-810
- Marbà N., Duarte C.M., 1998. Rhizome elongation and seagrass clonal growth. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 174 : 269-280.
- Marbà N., Duarte C.M., 2003. Scaling of ramet size and spacing in seagrasses: Implications for stand development. *Aquat. Bot.*, 77 : 87-98.
- Marbà N., Duarte C.M., Cebrian J., Gallegos M.E., Olesen B., Sand-Jensen K., 1996. Growth and population dynamics of *Posidonia oceanica* on the Spanish Mediterranean coast: elucidating seagrass decline. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 137 : 203-213.
- Marbà N., Duarte M., 2010. Mediterranean warming triggers seagrass (*Posidonia oceanica*) shoot mortality. *Glob. Change Biol.* 16 : 2366-2375.
- Martínez-Crego B., Romero J., Alcoverro T., 2006. The use of surface alkaline phosphatase activity in the seagrass *Posidonia oceanica* as a biomarker of eutrophication. *Mar. Ecol.*, 27 : 381-387.
- Martínez-Crego B., Vergés A.; Romero J., Alcoverro T., 2008. Selection of multiple seagrass indicators for environmental biomonitoring. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 361 : 93-109.
- Mazzella L., Buia M. C., Gambi M.C., Lorenti M., Russo G., Scipione M.B., Zupo V., 1991. Primary production of *Posidonia oceanica* and the vagile fauna of leaf stratum : a spatio-temporal analysis in a meadow of the island of Ischia (Gulf of Naples, Italy). In B.F. Keegan (Edit.), Space and time series data analysis in coastal benthic ecology. Coast 647- Project on coast benthic ecology, commission of the european community, Bruxelles : 519-540.
- Mazzella L., Cinelli F., Ott J., Klepal W., 1981. Studi sperimentali "in situ" sull'epifitismo della *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Quad. Lab. Tecnol. Pesca*, 3 (Suppl. 1) : 481-492.
- Mc Mahon K., Collier C., Lavery P.S., 2013. Identifying robust bioindicators of light stress in seagrasses: A meta-analysis. *Ecol. Indic.*, 30 : 7-15.
- Meinesz A., Cuvelier M., Laurent R., 1981. Méthodes récentes de cartographie et de surveillance des herbiers de Phanérogames marines. Leurs applications sur les côtes françaises de la Méditerranée. *Vie Milieu*, Fr., 31 (1) : 27-34.

- Meinesz A., Laurent R., 1978. Cartographie et état de la limite inférieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* dans les Alpes-Maritimes. Campagne Poséidon, 1976. *Bot. Mar.*, 21(8) : 513-526.
- Mermex Group : Durrieu de Madron X., Guieu C., Sempere R., Conan P., Cossa D., D'Ortenzio F., Estournel C., Gazeau F., Rabouille C., Stemmann L., Bonnet S., Diaz F., Koubbi P., Radakovitch O., Babin B.M., Baklouti M., Bancon-Montigny C., Belviso S., Bensoussan N., Bonsang B., Bouloubassi I., Brunet C., Cadiou J.F., Carlotti F., Chami M., Charmasson S., Charriere B., Dachs J., Doxaran D., Dutay J.C., Elbaz-Poulichet F., Eleaume M., Eyrolles F., Fernandez C., Fowler S., Francour P., Gaertner J.C., Galzin R., Gasparini S., Ghiglione J.F., Gonzalez J.L., Goyet C., Guidi L., Guizien K., Heimbürger L.E., Jacquet S.H.M., Jeffrey W.H., Joux F., Le Hir P., Leblanc K., Lefevre D., Lejeusne C., Leme R., Loye-Pilot M.D., Mallet M., Mejanelle L., Melin F., Mellon C., Merigot B., Merle P.L., Migon C., Miller W.L., Mortier L., Mostajir B., Mousseau L., Moutin T., Para J., Perez T., Petrenko A., Poggiale J.C., Prieur L., Pujon-Pay M., Pulido-Villena, Raimbault P., Rees A.P., Ridame C., Rontani J.F., Ruiz Pino D., Sicrem M.A., Taillandier V., Tamburini C., Tanaka T., Taupier-Letage I., Tedetti M., Testor P., Thebault H., Thouvenin B., Touratier F., Tronczynski J., Ulses C., Van Wambeke F., Vantrepotte V., Vaz S., Verney R., 2011. Marine ecosystems responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean. *Prog. Oceanogr.*, 91 : 97-166.
- METAP Mediterranean Environmental Technical Assistance Program, 2005. Renforcement de capacités dans les pays sélectionnés de METAP afin d'évaluer le coût de dégradation de l'environnement dans les zones côtières. Le coût de la dégradation de l'environnement côtier en Algérie : 1-72.
- Migliore L., Piccenna A., Rotini A., Garrard S., Buia, M.C., 2012. Can ocean acidification affect chemical defenses in *Posidonia oceanica*? Proceeding of the 3rd Mediterranean Seagrass Workshop, Essaouira, 14.
- Migliore L., Rotini A., Randazzo D., Albanese N., Giallongo A., 2007. Phenols content and 2-D electro-phoresis protein pattern : A promising tool to monitor *Posidonia* meadows health state. *BMC Ecol.*, 7 : 6.
- Milazzo M., Badalamenti F., Ceccherelli G., Renato C., 2004. Boat anchoring on *Posidonia oceanica* beds in a marine protected area (Italy, western Mediterranean) effect of anchor types in different anchoring stages. *J. Mar. Biol. Ecol.*, 299 : 51-62.
- Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement et Ministère de l'agriculture et du Développement Rural. Décret exécutif n°12-03 du 10 Safar 1433 correspondant au 4 janvier 2012 fixant la liste des espèces végétales non cultivées protégées. Journal Officiel, n°3, 18 janvier 2012 : 12-39.
- Montefalcone M., 2009. Ecosystem health assessment using the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* : A review. *Ecol. Indic.*, 9 : 595-604.
- Montefalcone M., Giovannetti E., Morri C., Peirano A., Bianchi C.N., 2013. Flowering of the seagrass *Posidonia oceanica* in the NW Mediterranean: is there a link with solar activity? *Medit. Mar. Sci.*, 14(2) : 416-423.
- Olesen B., Enríquez S., Duarte C.M., Sand-Jensen K., 2002. Depth-acclimation of photosynthesis, morphology and demography of *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa* in the Spanish Mediterranean Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 236 : 89-97.

- Panayotidis P., Boudouresque C.F., Marcot-Coqueugniot J., 1981. Microstructure de l'herbier de *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile. *Bot. Mar.*, 24(3) : 115-124.
- Papenbrock, J., 2012. "Highlights in Seagrasses Phylogeny, Physiology, and Metabolism: What Makes Them Special ? *ISRN Botany*. doi :10.5402.2012.103892/ID 103892.
- Pasqualini V., Pergent-Martini C., Clabaut P., Pergent G., 1998. Mapping of *Posidonia oceanica* using aerial photographs and side scan sonar : Application of the island of Corsica (France). *Estuar. Coast. Shelf. S.*, 47 : 359-367.
- Peirano A., Damasso V., Montefalcone M., Morri C., Bianchi C.N., 2005. Effects of climate, invasive species and anthropogenic impacts on the growth of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile in Liguria (NW Mediterranean Sea). *Mar. Pollut. Bull.*, 50 : 817-822.
- Peirano, A., Cocito, S., Banfi, V., Cupido, R., Damasso, V., Farina, G., Lombardi, C., Mauro, R., Morri, C., Roncarolo, I., Saldana, S., Savini, D., Sgorbini, S., Silvestri, C., Stoppelli, N., Torricelli, L., Bianchi, C.N., 2011. Phenology of Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile : medium and long-term cycles and climate inferences. *Aquat. Bot.* 94 : 77-92.
- Pellegrini L., Pellegrini L., 1992. Fine structural observations of the leaf blade of the marine phanerogam *Posidonia oceanica* (L.) Delile, in relation to leaf development. *Cytobios*, 72 : 47-61.
- Pellegrini L., Pellegrini L., 1993. Ultrastructural differentiation of the tanniniferous cells in the marine phanerogam *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Bot. Mar.*, 36 : 179-187.
- Pérez M., Romero J., 1993. Preliminary data on alkaline phosphatase activity associated with Mediterranean seagrasses. *Bot. Mar.*, 36(3) : 499-502.
- Pergent G., 1987. *Recherches lépidochronologiques chez Posidonia oceanica (Potamogetonaceae). Fluctuations des paramètres anatomiques et morphologiques des écailles des rhizomes.* Thèse Doctorat : Océanologie, Université Aix-Marseille II, Fr. : 1-853.
- Pergent C., 1988. Variabilité de l'abondance des cellules à tanin dans les écailles de *Posidonia oceanica*. *Rapp. P. V. Réun. Commiss. Internation. Explor. Sci. Médit.*, Monaco, 31(2) B-19 : 7-7.
- Pergent G., 1990. Lepidochronological analysis of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile : a standardized approach. *Aquat. Bot.*, 37 : 39-54.
- Pergent G., 1993. *L'herbier à Posidonia oceanica (L.)Delile Approche structurale, fonctionnelle et appliquée.* Thèse Habilitation à Diriger des Recherches : Ecologie, Université Corté, Corse, Fr. : 1-162.
- Pergent G., Bazairi H., Bianchi C.N., Boudouresque C.F., Buia M.C., Clabaut P., Harmelin-Vivien M., Mateo M.A., Montefalcone M., Morri C., Orfanidis S., Pergent-Martini C., Semroud R., Serrano O., Verlaque M., 2012. Les herbiers de Magnoliophytes marines de Méditerranée : résilience et contribution à l'atténuation des changements climatiques. Gland, Suisse et Málaga, Espagne : IUCN publ. : 1-80.
- Pergent G., Bazairi H., Bianchi C.N., Boudouresque C.F., Buia M.C., Clabaut P., Harmelin-Vivien M., Mateo M.A., Montefalcone M., Morri C., Orfanidis S., Pergent-Martini C., Semroud R., Serrano O., Verlaque M., 2014. Climate change

and Mediterranean seagrass meadows: a synopsis for environmental managers. *Medit. Mar. Sci.* : 15(2) : 462-473.

- 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 C.F. Boudouresque, A. Meinesz, E. Fresi, V. Gravez (Edits.), Proceedings International workshop on *Posidonia* beds. GIS Posidonie publ., Marseille, Fr., 2 : 69-76.
- Pergent G., Bertrand M. C., 2013. Le Réseau de Surveillance Posidonie, toujours copié, jamais égalé. In L. Le Diréach, C.F. Boudouresque (Edits.), GIS Posidonie : plus de 30 ans au service de la protection et de la gestion du milieu marin, GIS Posidonie publ., Marseille, Fr. : 25-29.
- Pergent G., Boudouresque C.F., Dumay O., Pergent-Martini C., Wyllie-Echeverria S., 2008. Competition between the invasive macrophyte *Caulerpa taxifolia* and the seagrass *Posidonia oceanica*: contrasting strategies. *BMC Ecol.*, 8 : 20.
- Pergent G., Clabaut P., Mimault B., Pasqualini V., Pergent-Martini C., 2005. Mise en œuvre 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. : 1-133.
- Pergent G., Pergent-Martini C., 1990. Some applications of lepidochronological analysis in the seagrass *Posidonia oceanica*. *Bot. Mar.*, 33 : 299-310.
- 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 : 3-27.
- Pergent-Martini C., Pasqualini V., Ferrat L., Pergent G., 2006. Ecological data in integrated coastal zone management : Case study of *Posidonia oceanica* meadows along the Corsican coastline (Mediterranean Sea). *Environ. Manage.*, 38 : 889-895.
- Pergent-Martini C., Pergent G., 1996. Spatio-temporal dynamics of *Posidonia oceanica* beds near a sewage outfall (Mediterranean- France). In J. Kuo , R.C Phillips., D.I Walker., H. Kirkman (Edits.), Proceedings of the Second International Workshop on Seagrass Biology,. Univ. Western Australia Publ. : 299-306.
- Pergent-Martini C., Rico-Raimondino V., G. Pergent G., 1996. Impact des nutriments sur les herbiers à *Posidonia oceanica* : Données préliminaires. *J. Rech. Oceanogr.*, 21 : 35-39.
- Pergent-Martini, C., Leoni, V., Pasqualini, V. Ardizzone, G.D., Balestri, E., Bedini, R., Belluscio, A., Belsher, T., Borg, J., Boudouresque, C.F., Boumaza, S., Bouquegneau, J.M., Buia, M.C., Calvo, S., Cebrian, J., Charbonnel, E., Cinelli, F., Cossu, A., Di Maida, G., Dural, B., Francour, F., Gobert, S., Lepoint, G., Meinesz, A., Molenaar, H., Mansour, H.M., Panayotidis, P., Peirano, A., Pergent, G., Piazzzi, L., Pirrotta, M., Relini, G., Romero, J., Sanchez-Lizaso, J.L., Semroud, R., Shembri, P., Shili, A., Tomasello, A., Velimirov, B., 2005. Descriptors of *Posidonia oceanica* meadows: Use and application. *Ecol. Indic.*, 5 : 213-230.
- Personnic S., Boudouresque C.F., Astruch P., Ballesteros E., Blouet S., Bellan-Santini D., Bonhomme P., Thibault-Botha D., Feunteun E., Harmelin-Vivien M., Pergent G., Pergent-Martini C., Pastor J., Poggiale J.C., Renaud F., Thibaut T., Ruitton S., 2014. An Ecosystem-Based Approach to Assess the Status of a Mediterranean

- Ecosystem, the *Posidonia oceanica* Seagrass Meadow. PloS ONE, 9(6) : e98994. doi :10.1371/journal.pone.0098994.
- Piazzini L., Balata D., Cinelli F., Benedetti-Cecchi L., 2004. Patterns of spatial variability in epiphytes of *Posidonia oceanica* - differences between a disturbed and two reference location. *Aquat. Bot.*, 79(4) : 345-356.
- Platini F., 2000. La protection des habitats aux herbiers en Méditerranée. Rapport PNUE, PAM, CAR/ASP publ. : 1-65.
- PNUE-PAM-CAR/ASP, 2011. Projet de lignes directrices pour la standardisation des méthodes de cartographie et de surveillance des magnoliophytes marines en Méditerranée. Document de travail pour la dixième réunion des Points focaux pour les ASP, Marseille - France, 17-20 Mai 2011, C. Pergent-Martini, G. Pergent (Edits.), CAR/ASP publ., UNEP (DEPI)/MED WG.359/9 : 1-62.
- PNUE/PAM/CAR PAP, 2006. Programme d'Aménagement Côtier (PAC) de la «zone côtière algéroise» (PAC). Rapport final intégré. *MAP Tech. Rep. Ser.*, 64, UNEP, Athènes : 1-190 + Atlas cartographique.
- PNUE/PAM/MED POL/OMS, 2004. Stations d'épuration des eaux usées municipales dans les villes côtières de la Méditerranée (II). *MAP Tech. Rep. Ser.*, 157, UNEP, Athènes : 1-90.
- PNUE-UICN-GIS Posidonie, 1990. Livre rouge «Gérard Vuignier» des végétaux, peuplements et paysages marins menacés de Méditerranée. *MAP Tech. Rep. Ser.*, 43, UNEP, Athens : 1- 250.
- Prado P., Alcoverro T., Romero J., 2008. Seasonal response of *Posidonia oceanica* epiphyte assemblages to nutrient increase. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 35 : 89-98.
- Procaccini G., Buia M.C., Gambi M.C., Perez M., Pergent G., Pergent-Martini C., Romero J., 2003. The seagrasses of the Western Mediterranean. In E.P. Green, F.T. Short (Edits), World Atlas of Seagrasses, Université Californie Press Publ. : 48-58.
- R. Development Core Team, 2011. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria 3-900051-07-0 (URL: <http://www.R-project.org/>).
- Ralph P.J., Durako M.J., Enríquez S., Collier C.J., Doblin M.A., 2007. Impact of light limitation on seagrasses. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 350 : 176-193.
- Ranvier S., Gnassia-Barelli M., Pergent G., Capiomont A., Roméo M., 2000. The effect of mercury on glutathione S-transferase in the marine phanerogam *Posidonia oceanica*. *Bot. Mar.*, 43 : 161-168.
- Ribereau-Gayon J., Peynaud E., 1968. Les composés phénoliques des végétaux. DUNOD (Eds), Paris : 1-154.
- Richir J., Salivas-Decaux M., Lafabrie C., Lopez y Royo C., Gobert S., Pergent G., Pergent-Martini C., 2015. Bioassessment of trace element contamination of Mediterranean coastal waters using the seagrass *Posidonia oceanica*. *J. Environ. Manag.*, 150 : 1-14.
- Rivière A., 1977. Méthodes granulométriques - Techniques et interprétations. Masson publ., Paris : 1-170.
- Romero J., Martinez-Crego B., Alcoverro T., Perez M., 2007. A multivariate index based on the seagrass *Posidonia oceanica* (POMI) to assess ecological status of coastal

- waters under the water framework directive (WFD). *Mar. Pollut. Bull.* 55 : 196-204.
- Rotini A., Anello L., Di Bernardo M., Giallongo A., Valiante L., Migliore L., 2013. Comparative analysis of bed density, total phenol content and protein expression pattern in *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *J. Ecol.*, 3(6) : 438-444.
- Rotini A., Micheli C., Valiante L., Migliore L., 2011. Assessment of *Posidonia oceanica* (L.) Delile conservation status by standard and putative approaches : the case study of Santa Marinella meadow (Italy, W Mediterranean). *J. Ecol.*, 1(2) : 48-56.
- Rountos K.J., Peterson B.J., Karakassis I., 2012. Indirect effects of fish cage aquaculture on shallow *Posidonia oceanica* seagrass patches in coastal Greek waters. *Aquacult. Env. Interact.*, 2 : 105-115.
- Ruiz J.M., Romero J., 2001. Effects of *in situ* experimental shading on the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 215 : 107-120.
- Ruiz J.M., Romero J., 2003. Effects of disturbances caused by coastal constructions on spatial structure, growth dynamics and photosynthesis of the seagrass *Posidonia oceanica*. *Mar. Pollut. Bull.*, 46 : 1523-1533.
- Semroud R., Boumaza S., Amarouche N., Boukourt R., 2014. *Mise en œuvre de l'indice Synthetic Index Posidonia oceanica (SiPo) pour l'évaluation de l'état écologique des eaux côtière algéroises*. Rapport Projet National de Recherche (PNR, code 2/u 163/ 431) : 1-61.
- Silvestri C., 1993. *Studio sinecologico sulla prateria di Posidonia oceanica (L.) Delile di Monterosso al mare (SP) : cartografia quali-quantitativa e dinamica stagionale*. Thèse Université Rome, Ital. : 1-97.
- Sokal R.R., Rohlf F.J., 1981. *Biometry*. Freeman and Company, San Francisco, CA : 1-930.
- Steele L., Caldwell M., Boettcher A., Arnold T., 2005. Seagrass-pathogen interactions: 'pseudo-induction' of turtlegrass phenolics near wasting disease lesions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 303 : 123-131.
- Steele L., Valentine J.F., 2012. Idiosyncratic responses of seagrass phenolic production following sea urchin grazing. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 466 : 81-92.
- Sureda A, Box A., Terrados J., Deudero S., Pons A., 2008. Antioxidant response of the seagrass *Posidonia oceanica* when epiphytized by the invasive macroalgae *Lophocladia lallemandii*. *Mar. Environ. Res.*, 66(3) : 359-363.
- Tarmoul F., 2010. *Contribution à l'étude de l'impact de la pollution chimique sur l'herbier à Posidonie dans la baie de Bou Ismaïl*. Mémoire Ingénieur : Sciences de la mer, ENSSMAL : 1- 77 + annexes.
- Terrados J., Duarte C.M., 2000. Experimental evidence of reduced particle resuspension within a seagrass (*Posidonia oceanica* L.) meadow. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 243 : 45-53.
- Tomasello A., Calvo S., Di Maida G., Lovison G., Pirrotta M., Sciandra M., 2007. Shoot age as a confounding factor on detecting the effect of human-induced disturbance on *Posidonia oceanica* growth performance. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 343 : 166-175.

- Vacchi M., Montefalcone M., Bianchi C.N., Morri C., Ferrari M., 2012. Hydrodynamic constraints to the seaward development of *Posidonia oceanica* meadows. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.*, 97 : 58-65.
- Vacchi M., Montefalcone M., Parravicini V., Rovere A., Vassallo P., Ferrari M., Morri C., Bianchi C.N., 2014. Spatial models to support the management of coastal marine ecosystems : a short review of best practices in Liguria, Italy. *Medit. Mar. Sci.*, 15(1) : 189-197.
- Vasapollo C., Gambi M.C., 2012. Spatio-temporal variability in *Posidonia oceanica* seagrass meadows of the Western Mediterranean : shoot density and plant features. *Aquat. Biol.*, 16 : 163-175.
- Vassallo P., Paoli C., Rovere A., Montefalcone M., Morri C., Bianchi C.N., 2013. The value of the seagrass *Posidonia oceanica* : A natural capital assessment. *Mar. Pollut. Bull.*, 75 : 157-167.
- Vergeer L.H.T., Aarts T.L., Groot J.D., 1995. The « wasting disease » and the effect of abiotic factors (light intensity, temperature, salinity) and infection with *Labyrinthula zosterae* on the phenolic content of *Zostera marina* shoots. *Aquat. Bot.*, 52 : 35-44.
- Vergeer L.H.T., Develi A., 1997. Phenolic acids in healthy and infected leaves of *Zostera marina* and their growth-limiting properties towards *Labyrinthula zosterae*. *Aquat. Bot.*, 58(1) : 65-72.
- Vergés A., Alcoverro T., Romero J., 2011. Plant defences and the role of epibiosis in mediating within-plant feeding choices of seagrass consumers. *Oecologia*, 166 : 381-390.
- Vergés A., Becerro M.A., Alcoverro T., Romero J., 2007a. Variation in multiple traits of vegetative and reproductive seagrass tissues influences plant-herbivore interactions. *Oecologia*, 151 : 675-686.
- Vergés A., Becerro M.A., Alcoverro T., Romero J., 2007b. Experimental evidence of chemical deterrence against multiple herbivores in the seagrass *Posidonia oceanica*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 343 : 107-114.
- Vergés A., Pérez M., Alcoverro T., Romero J., 2008. Compensation and resistance to herbivory in seagrasses : induced responses to simulated consumption by fish. *Oecologia*, 155 : 751-760.
- Waterman P.G., Mole S., 1994. Analysis of phenolic plant Metabolites. Blackwell Scientific Publications, Oxford, Great Britain : 1-237.
- Weydert P., 1973. Morphologie et sédimentologie de la partie méridionale du Grand Récif de Tuléar (Madagascar). Les ensembles sédimentaires de la pente interne. *Téthys*, 5 : 133-156.
- Yates, J.C., Peckol, P., 1993. Effects of nutrient availability and herbivory on polyphenolics in the seaweed *Fucus vesiculosus*. *Ecology*, 74 : 1757-1766.
- Zupo V., Mazzella L., Buia M.C., Gambi M.C., Lorenti M., Scipione M.B., Cancemi G., 2006. A small-scale analysis of the spatial structure of a *Posidonia oceanica* meadow off the Island of Ischia (Gulf of Naples, Italy) : Relationship with the seafloor morphology. *Aquat. Bot.*, 84 : 101-109.

# Liste des tableaux

Tableau 1. Les principaux biomarqueurs de stress étudiés chez <i>Posidonia oceanica</i> .	12
Tableau 2. Plan d'échantillonnage des faisceaux de <i>Posidonia oceanica</i> au niveau des deux sites d'étude.* : Limite supérieure	23
Tableau 3. Plan de mise en place et suivi des balisages	32
Tableau 4. Structure de l'herbier par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (***) $p < 0.001$ ; ** $p < 0.01$ ; * $p < 0.05$ ) ou non (ns).	39
Tableau 5. Nombre moyen de feuilles adultes et intermédiaires par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (***) $p < 0.001$ ; ** $p < 0.01$ ; * $p < 0.05$ ) ou non (ns).	40
Tableau 6. Longueur moyenne des feuilles adultes et intermédiaires par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (***) $p < 0.001$ ; ** $p < 0.01$ ; * $p < 0.05$ ) ou non (ns).	41
Tableau 7. Largeur moyenne des feuilles adultes et intermédiaires par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (***) $p < 0.001$ ; ** $p < 0.01$ ; * $p < 0.05$ ) ou non (ns).	43
Tableau 8. Surface foliaire moyenne des feuilles adultes et intermédiaires par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (***) $p < 0.001$ ; ** $p < 0.01$ ; * $p < 0.05$ ) ou non (ns).	44
Tableau 9. Coefficient A moyen des feuilles adultes et intermédiaires par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (***) $p < 0.001$ ; ** $p < 0.01$ ; * $p < 0.05$ ) ou non (ns).	45
Tableau 10. Indice épiphytique moyen des feuilles adultes et intermédiaires par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (***) $p < 0.001$ ; ** $p < 0.01$ ; * $p < 0.05$ ) ou non (ns).	47
Tableau 11. Nombre moyen d'écailles par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (***) $p < 0.001$ ; ** $p < 0.01$ ; * $p < 0.05$ ) ou non (ns).	49
Tableau 12. Croissance moyenne des rhizomes par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (***) $p < 0.001$ ; ** $p < 0.01$ ; * $p < 0.05$ ) ou non (ns).	50
Tableau 13. Production moyenne des rhizomes par site et par profondeur. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (***) $p < 0.001$ ; ** $p < 0.01$ ; * $p < 0.05$ ) ou non (ns).	50
Tableau 14. Teneur moyenne en phénols totaux des feuilles adultes (bases et limbes) et intermédiaires par site. La dernière colonne indique si la différence entre les deux sites est significative (***) $p < 0.001$ ; ** $p < 0.01$ ; * $p < 0.05$ ) ou non (ns).	51
Tableau 15. Profondeur, orientations et observations le long du balisage de Bou Ismaïl.	54
Tableau 16. Paramètres morphologiques de l'herbier au niveau du balisage de Bou Ismaïl, en 2007 et 2010. Les valeurs correspondent à la moyenne $\pm$ écart-type. Pour chaque paramètre, la dernière colonne indique si la différence entre les deux années est significative (***) $p < 0.001$ ; ** $p < 0.01$ ; * $p < 0.05$ ) ou non (ns).	55

Tableau 17. Profondeur, orientations et observations le long du balisage de Kouali. 58

Tableau 18. Paramètres morphologiques de l'herbier au niveau du balisage de Kouali, en 2008 et 2010. Les valeurs correspondent à la moyenne  $\pm$  écart-type. Pour chaque paramètre, la dernière colonne indique si la différence entre les deux années est significative (\*\*\*)  $p < 0.001$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$  ou non (ns). 59

# Liste des figures

Figure 1. Pressions responsables de la régression des herbiers à <i>Posidonia oceanica</i> . Le graphique montre le nombre d'herbiers impactés par chacune des pressions. D'après Marbà <i>et al.</i> (2014).	4
Figure 2. Distribution géographique de <i>Posidonia oceanica</i> (trait rouge). A : Rhône ; B : Pô ; C : Nil. D'après Pergent <i>et al.</i> (2012).	6
Figure 3. (a) Structure de <i>Posidonia oceanica</i> et illustration d'une croissance orthotrope devenant plagiotrope ; (b) Section verticale dans un herbier à <i>Posidonia oceanica</i> . 1 : Feuilles, 2 : Rhizome orthotrope, 3 : Rhizome plagiotrope, 4 : Racines, 5 : Sédiment, 6 : Matte. D'après Boudouresque et Meinesz (1982).	7
Figure 4. Schéma récapitulatif des principaux descripteurs de <i>Posidonia oceanica</i> , avec les paramètres mesurés et leurs méthodes d'investigation. D'après Pergent-Martini <i>et al.</i> (2005).	10
Figure 5. Présentation de la baie de Bou Ismaïl. D'après Bachari-Houma (2009), modifiée.	18
Figure 6. Localisation des stations étudiées à Bou Ismaïl	21
Figure 7. Localisation des stations étudiées à Kouali	22
Figure 8. Photo représentant la dissection d'un faisceau de <i>Posidonia oceanica</i> .	25
Figure 9. Photo représentant les cycles lépidochronologiques de <i>Posidonia oceanica</i> avec les tronçons de rhizomes correspondants.	28
Figure 10. Synopsis du protocole utilisé pour l'extraction des composés phénoliques. D'après Cuny <i>et al.</i> (1995).	30
Figure 11. Synopsis du protocole utilisé pour le dosage des composés phénoliques. D'après Waterman et Mole (1994) modifié par Koivikko <i>et al.</i> (2005).	31
Figure 12. Descriptif de la mise en place d'un balisage en limite inférieure. D'après Charbonnel <i>et al.</i> (2000).	34
Figure 13. Types de limite inférieure de l'herbier à <i>Posidonia oceanica</i> . D'après Pergent <i>et al.</i> (2005) : (1) progressive, (2) brusque, (3) érosive et (4) régressive.	35
Figure 14. Evolution du nombre moyen de feuilles adultes et intermédiaires au cours du temps. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les deux sites sont indiquées par le symbole * ( $p < 0.05$ ).	37 41
Figure 15. Evolution de la longueur moyenne des feuilles adultes et intermédiaires au cours du temps. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les sites sont indiquées par le symbole * ( $p < 0.05$ ).	42
Figure 16. Evolution de la largeur moyenne des feuilles adultes et intermédiaires au cours du temps. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les sites sont indiquées par le symbole * ( $p < 0.05$ ).	43
Figure 17. Evolution de la surface foliaire moyenne des feuilles adultes et intermédiaires au cours du temps. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les deux sites sont indiquées par le symbole * ( $p < 0.05$ ).	45
Figure 18. Evolution du coefficient A moyen des feuilles adultes et intermédiaires au cours du temps. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les deux sites sont indiquées par le	

symbole * ( $p < 0.05$ ).	46
Figure 19. Evolution de l'indice épiphytique des feuilles adultes et intermédiaires au cours du temps. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les deux sites sont indiquées par le symbole * ( $p < 0.05$ ).	47
Figure 20. Distribution de fréquence (en %) en fonction de la date d'apparition des faisceaux par profondeur et par site.	48
Figure 21. Evolution du nombre moyen d'écailles par année lépidochronologique, par profondeur et par site. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les deux sites sont indiquées par le symbole * ( $p < 0.05$ ).	49
Figure 22. Evolution de la vitesse de croissance moyenne des rhizomes par année lépidochronologique, par profondeur et par site. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les deux sites sont indiquées par le symbole * ( $p < 0.05$ ).	50
Figure 23. Evolution de la production moyenne des rhizomes par année lépidochronologique, par profondeur et par site. Pour chaque profondeur, les différences significatives entre les deux sites sont indiquées par le symbole * ( $p < 0.05$ ).	51
Figure 24. Evolution de la concentration en phénols totaux au cours du temps. Pour chaque tissu et pour chaque profondeur, les différences significatives entre les deux sites sont indiquées par le symbole * ( $p < 0.05$ ).	52
Figure 25. Cartographie du balisage de Bou Ismaïl en juillet 2007.	55
Figure 26. Herbier à <i>Posidonia oceanica</i> au niveau des balises 1 à 12, de la limite inférieure de Bou Ismaïl.	56
Figure 27. Cartographie du balisage de Kouali en juin 2008.	59
Figure 28. Dommages causés par les mésoherbivores sur les bases des feuilles adultes et des feuilles intermédiaires au niveau du site de référence (Kouali).	69

# Annexes

## Annexe 1.

Tableau 1. Classification des herbiers en fonction de la densité des faisceaux et de la profondeur. D'après PNUE-PAM-CAR/ASP (2011).

## Annexe 1.

Tableau 1. Classification des herbiers en fonction de la densité des faisceaux et de la profondeur. D'après PNUE-PAM-CAR/ASP (2011).

Profondeur (en m)	Très Bonne	Bonne	Moyenne	Médiocre	Mauvaise
1	> 1133	1133 à 930	930 à 727	727 à 524	< 524
2	> 1067	1067 à 863	863 à 659	659 à 456	< 456
3	> 1005	1005 à 808	808 à 612	612 à 415	< 415
4	> 947	947 à 757	757 à 567	567 à 377	< 377
5	> 892	892 à 709	709 à 526	526 à 343	< 343
6	> 841	841 à 665	665 à 489	489 à 312	< 312
7	> 792	792 à 623	623 à 454	454 à 284	< 284
8	> 746	746 à 584	584 à 421	421 à 259	< 259
9	> 703	703 à 547	547 à 391	391 à 235	< 235
10	> 662	662 à 513	513 à 364	364 à 214	< 214
11	> 624	624 à 481	481 à 338	338 à 195	< 195
12	> 588	588 à 451	451 à 314	314 à 177	< 177
13	> 554	554 à 423	423 à 292	292 à 161	< 161
14	> 522	522 à 397	397 à 272	272 à 147	< 147
15	> 492	492 à 372	372 à 253	253 à 134	< 134
16	> 463	463 à 349	349 à 236	236 à 122	< 122
17	> 436	436 à 328	328 à 219	219 à 111	< 111
18	> 411	411 à 308	308 à 204	204 à 101	< 101
19	> 387	387 à 289	289 à 190	190 à 92	< 92
20	> 365	365 à 271	271 à 177	177 à 83	< 83
21	> 344	344 à 255	255 à 165	165 à 76	< 76
22	> 324	324 à 239	239 à 154	154 à 69	< 69
23	> 305	305 à 224	224 à 144	144 à 63	< 63
24	> 288	288 à 211	211 à 134	134 à 57	< 57
25	> 271	271 à 198	198 à 125	125 à 52	< 52
26	> 255	255 à 186	186 à 117	117 à 47	< 47
27	> 240	240 à 175	175 à 109	109 à 43	< 43
28	> 227	227 à 164	164 à 102	102 à 39	< 39
29	> 213	213 à 154	154 à 95	95 à 36	< 36
30	> 201	201 à 145	145 à 89	89 à 32	< 32
31	> 189	189 à 136	136 à 83	83 à 30	< 30
32	> 179	179 à 128	128 à 77	77 à 27	< 27
33	> 168	168 à 120	120 à 72	72 à 24	< 24
34	> 158	158 à 113	113 à 68	68 à 22	< 22
35	> 149	149 à 106	106 à 63	< 63	
36	> 141	141 à 100	100 à 59	< 59	
37	> 133	133 à 94	94 à 55	< 55	
38	> 125	125 à 88	88 à 52	< 52	
39	> 118	118 à 83	83 à 48	< 48	
40	> 111	111 à 78	78 à 45	< 45	

## Annexe 2

### Calcul de la quantité de composés phénoliques (Koivikko, 2008)

$$P = \frac{V_{\text{solvant}}}{V_{\text{extrait}}} * \left[ \frac{V_{\text{extrait}} + V_{\text{eau}}}{V_{\text{traité}}} \right] * Z \quad (1)$$

Avec :  $V_{\text{solvant}}$  = volume (ml) du solvant dans lequel l'échantillon est dilué ;

$V_{\text{extrait}}$  = volume (ml) pris du  $V_{\text{solvant}}$  pour l'analyse (ml) ;

$V_{\text{eau}}$  = volume d'eau (ml) avec lequel le  $V_{\text{extrait}}$  est dilué ;

$V_{\text{traité}}$  = volume (ml) de la fraction de l'échantillon dilué ( $V_{\text{extrait}} + V_{\text{eau}}$ ) qui est utilisé lors l'analyse ;

Z= quantité (mg) de composés phénoliques dans le  $V_{\text{traité}}$  calculé en utilisant la courbe d'étalonnage ;

P= quantité (mg) de composés phénoliques dans l'échantillon.

Les résultats sont ensuite convertis en quantité de composés phénoliques par poids sec de l'échantillon (P/Ps).

### Critères de validation de la méthode de dosage des phénols (CEAEQ, 2009)

#### 1. Estimation de la limite de détection et de quantification

La limite de détection de la méthode (LDM) correspond à la plus petite teneur ou concentration de l'analyte pouvant être détectée, avec une incertitude acceptable, mais non quantifiée nécessairement. Elle est déterminée par la lecture directe de 10 mesures de blancs d'analyse (échantillons contenant l'ensemble des constituants, à l'exception de la substance à rechercher).

$$LDM = 3 * \sigma \quad (2)$$

où  $\sigma$  : l'écart-type sur les 10 mesures de blancs d'analyse

Le calcul du ratio de conformité ( $R_c$ ) permet de valider la méthode de détermination de la LDM, il doit être compris entre 4 et 10 pour accepter la LDM.

$$R_c = \frac{m}{LDM} \quad (3)$$

où  $m$  : la moyenne sur les 10 mesures de blancs d'analyse

La limite de quantification de la méthode (LQM) correspond à la plus petite teneur ou concentration de l'analyte pouvant être quantifiée.

$$LQM = 10 * \sigma \quad (4)$$

où  $\sigma$  : l'écart-type sur les 10 mesures de blancs d'analyse

## 2. Limite et domaine de linéarité

La limite de linéarité (LL) correspond à la concentration la plus élevée de l'analyte quantifiable. Le domaine de linéarité est l'étendue de concentration compris entre la LQM et la LL ; il correspond à la zone quantifiable dans une méthode d'analyse. Le coefficient de corrélation  $R^2$  doit être supérieur à 0,995 pour respecter le critère de la LL.

## 3. Fidélité

La fidélité de la méthode d'analyse est l'étroitesse de l'accord entre les résultats obtenus en appliquant un procédé expérimental à plusieurs reprises. Elle s'exprime sous forme de répliquabilité, de répétabilité et de reproductibilité pour une méthode.

### 3.1. Répliquabilité

Elle correspond à l'étroitesse de l'accord entre les résultats obtenus sur le même échantillon soumis à l'essai dans le même laboratoire, le même analyste, le même appareil et le même jour.

$$\text{Réplicabilité} = \frac{t_{(0,975, n-1)} * \sigma_1}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

où :  $\sigma_1$  : écart-type de la série de mesures

n : nombre de réplicats

$t_{(0,975, n-1)}$  : valeur tabulée de la loi t de Student à (n-1) degré de liberté et à un niveau de signification  $\alpha$  de 0,05

### 3.2. Répétabilité

Elle correspond à l'étroitesse de l'accord entre les résultats obtenus sur le même échantillon soumis à l'essai dans le même laboratoire et au moins l'un des éléments suivants est différent : l'analyste, l'appareil ou le jour. Dans notre cas nous avons opté pour un jour différent.

$$\text{Répétabilité} = \frac{t_{(0,975, n-1)} * \sigma_2}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

où :  $\sigma_2$  : écart type de la série de mesures

n : nombre de réplicats

$t_{(0,975, n-1)}$  : valeur tabulée de la loi t de Student à (n-1) degré de liberté et à un niveau de signification  $\alpha$  de 0,05

### 3.3. Reproductibilité

Elle correspond à l'étroitesse de l'accord entre les résultats obtenus sur le même échantillon soumis à l'essai dans un autre laboratoire avec un analyste et un appareil différents.

$$\text{Reproductibilité} = \frac{t_{(0,975, n-1)} * \sigma_3}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

où  $\sigma_3$  : écart type de la série de mesures

n : nombre de réplicats

$t_{(0,975, n-1)}$  : valeur tabulée de la loi t de Student à (n-1) degré de liberté et à un niveau de signification  $\alpha$  de 0,05

L'intervalle de confiance (IC) ainsi que le coefficient de variation (CV) sont déterminés comme suit :

$$IC = m \pm \frac{t_{(0,975,n-1)} * \sigma}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

$$CV = 100 * \frac{\sigma}{m} \quad (9)$$

## Résultats de la validation de la méthode de dosage des phénols totaux

Les critères de validation de la méthode utilisée pour la quantification des composés phénoliques chez *Posidonia oceanica* comprennent les seuils de détection (LDM) et de quantification (LQM), la linéarité et la fidélité.

La LDM obtenue est égale à 1,14 µg/ml, la LQM à 3,80 µg/ml avec un ratio de conformité égal à 5,07 et la limite de linéarité est de 60 µg/ml. La réponse est linéaire entre 0 et 60 µg/ml avec un R<sup>2</sup> de 0,996 et une équation :  $y = 0,035x - 0,094$  (Figure 1).

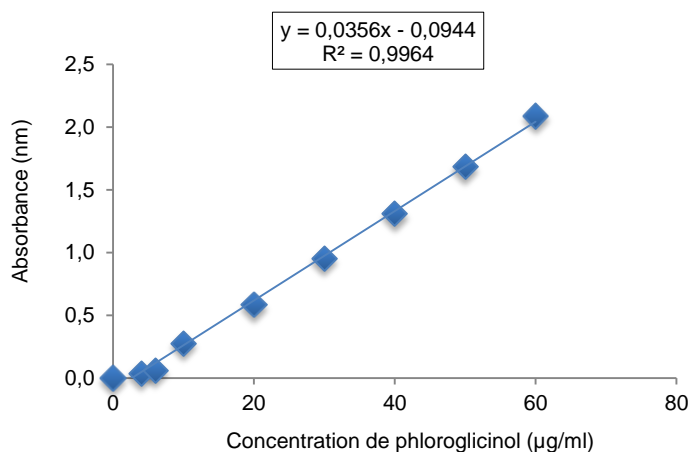


Figure 1. Domaines de linéarité obtenus pour le phloroglucinol.

Les paramètres liés à la fidélité de la méthode sont consignés dans le Tableau 1 avec les coefficients de variation (CV) correspondants. Ils dénotent une bonne précision de la méthode de dosage utilisée.

Tableau 1. Test de fidélité de la méthode avec une probabilité de 95%. IC : intervalle de confiance.

	Valeurs	IC ( $\mu\text{g/ml}$ )	CV(%)
Réplicabilité ( $\mu\text{g/ml}$ )	5.13	1220.28 - 1228.41	0.58
Répétabilité ( $\mu\text{g/ml}$ )	13.46	1664.18 - 1691.11	1.12
Reproductibilité ( $\mu\text{g/ml}$ )	9.81	670.74 - 690.37	2.01

## Annexe 3

Tableau 1 : Calcul des paramètres granulométriques (Folk et Ward, 1957). Ils sont exprimés en unité ( $\phi$ ). L'échelle  $\phi$  est une unité de mesure définie par la relation suivante :

$$\phi = \log_2(D) \quad (D : \text{dimension des grains en mm}).$$

Paramètre	Formule
Taille moyenne	$TM = (\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}) / 3$
Indice de tri	$S_0 = [(\Phi_{84} - \Phi_{16}) / 4] + [(\Phi_{95} - \Phi_5) / 6,6]$
Indice de symétrie de la distribution	$SKi = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)}$

Tableau 2. Les différentes limites de la taille moyenne (TM) (Folk, 1954).

TM < -6	: galet
-6 < TM < -2	: granule
-2 < TM < -1	: sable très grossier
-1 < TM < 0	: sable grossier
0 < TM < 1	: sable moyen
1 < TM < 2	: sable fin
2 < TM < 3	: sable très fin
3 < TM < 3.98	: vase

Tableau 3. Les différents stades de l'indice de tri ( $S_0$ ) (Folk, 1954).

$S_0 < 0.35$	: très bien trié
$0.4 < S_0 < 0.5$	: bien trié
$0.5 < S_0 < 0.7$	: modérément bien trié
$0.7 < S_0 < 1$	: modérément trié
$1 < S_0 < 2$	: mal trié
$2 < S_0 < 4$	: très mal trié
$4 < S_0$	: extrêmement mal trié

Tableau 4. Les limites et la nomenclature de l'indice de symétrie (Ski) (Folk, 1954).

$-1 < SK_i < -0.3$	: asymétrie très négative
$-0.3 < SK_i < -0.1$	: asymétrie négative
$-0.1 < SK_i < 0.1$	: asymétrie
$0.1 < SK_i < 0.3$	: asymétrie positive
$0.3 < SK_i < 1$	: asymétrie très positive

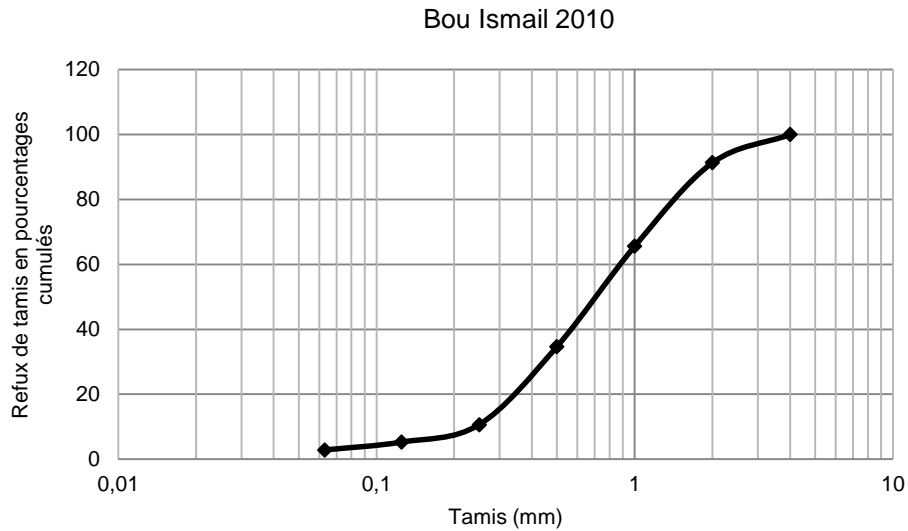


Figure 1. Courbe des fréquences cumulées pour les sédiments prélevés en limite inférieure de l'herbier de Bou Ismaïl.

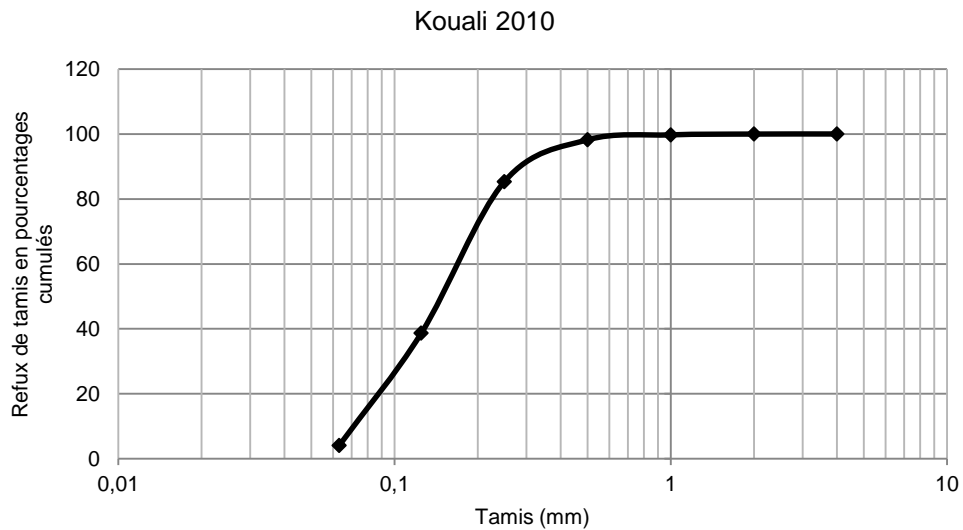


Figure 2. Courbes des fréquences cumulées pour les sédiments prélevés en limite inférieure de l'herbier de Kouali.