

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur
d'état en Sciences de la Mer

Option : Biodiversité et gestion des écosystèmes

Thème :

Surveillance de la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* du Front de mer de la ville de Bou Ismaïl

Réalisé par : M^r. SEHIL Mohamed Anis

Soutenu le 29/ 09/2022 devant le jury composé de :

Mme Ladoul S.	Maître Assistante A	Présidente	ENSSMAL
Mme Amarouche N.	Maître Assistante A	Examinatrice	ENSSMAL
Mme Sengouga A.	Maître Assistante A	Examinatrice	ENSSMAL
Mme Boumaza S.	Maître conférence B	Promotrice	ENSSMAL
Mme Lamouti S.	Attachée de recherches	Co-promotrice	CNRDPA
Professeur Semroud R.	Professeur	Invité	ENSSMAL

Année universitaire : 2021 - 2022

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للعلوم البحر وتهيئة الساحل

École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Hydrobiologie Marine et Continentale

Spécialité : Biodiversité et gestion des écosystèmes

Thème :

Surveillance de la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* du Front de mer de la ville de Bou Ismaïl

Réalisé par : M^r. SEHIL Mohamed Anis

Soutenu le 29/ 09/2022 devant le jury composé de :

Mme Ladoul S.	Maître Assistante A	Présidente	ENSSMAL
Mme Amarouche N.	Maître Assistante A	Examineur	ENSSMAL
Mme Sengouga A.	Maître Assistante A	Examinatrice	ENSSMAL
Mme Boumaza S.	Maître conférence B	Promotrice	ENSSMAL
Mme Lamouti S.	Attachée de recherches	Co-promotrice	CNRDPA
Professeur Semroud R.	Professeur	Invité	ENSSMAL

Année universitaire : 2021 - 2022

REMERCIEMENTS

En terminant mon mémoire de fin d'étude, il m'est agréable d'adresser mes vifs remerciements à tous ceux qui m'ont aidé à élaborer ce mémoire.

Je tiens à remercier en particulier, Mme Boumaza et Mme Lamouti et Mr Semroud pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en nous encadrant, grâce à eux le travail sur le terrain a été efficace et agréable.

Je remercie également, Mme Ladoul d'avoir accepté de présider le jury et d'avoir contribué à la réalisation du travail, ainsi que les membres du jury, Mme Amarouche et Mme Sengouga d'avoir répondu présent pour le juger.

Je tiens à remercier également M. Misraoui son aide précieuse dans le traitement de nos échantillons.

Sans oublier le club de plongée OXYGENE pour toute l'aide qu'ils nous ont apportés.

Enfin, je tiens à remercier tous mes collègues d'étude

DÉDICACES

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	i
DÉDICACE	
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
Introduction :	1
Chapitre 1 : Généralités sur les herbiers à <i>Posidonia oceanica</i>	1
1.1. Présentation et distribution de <i>Posidonia oceanica</i>	3
1.2. Rôles écologiques et services écosystémiques	
1.3. Vulnérabilité et menaces sur les herbiers de <i>Posidonia oceanica</i>	6
1.4. <i>Posidonia oceanica</i> : indicateur biologique	6
Au niveau de la population	7
Chapitre 2 : Matériel et Méthodes	3
2.1. Présentation du site d'étude	9
2.1.1. Présentation du balisage de la limite supérieure	10
2.2. Suivi de la limite supérieure de Bou Ismaïl.....	11
2.2.1. Méthodes d'étude <i>in situ</i>	12
2.2.1.1. Position des balises	12
2.2.1.2. Estimation du recouvrement de l'herbier	13
2.2.1.3. Mesure de la densité de l'herbier.....	14
2.2.1.4. Prélèvements des faisceaux de <i>Posidonia oceanica</i>	15
2.2.1.5. Prélèvement de sédiment	15
2.2.1.6. Prises de vues.....	15
2.2.2. Traitement des échantillons au laboratoire	15
2.2.2.1. Analyse lépidochronologique	15

2.2.2.2. Paramètres phénologiques	17
2.3. Analyses statistiques des données	21
2.4. Méthode de cartographie de la limite de l’herbier	22
Chapitre 3 : Résultats et discussions	23
3.1. Localisation et cartographie de l’herbier	23
3.1.1. Localisation du balisage	23
3.1.2. Etat du balisage	24
3.2. Caractérisation de l’herbier	25
3.2.1. Estimation du recouvrement	25
3.2.2. Densité de l’herbier	26
3.3. Cartographie et description de la limite	27
3.4.1. Nombre de feuilles par faisceaux	28
3.4.2. Longueur des feuilles	29
3.4.3. Largeur des feuilles	29
3.4.4. Surface foliaire	29
3.4.5. Biomasse des feuilles et des épiphytes	29
3.5. Analyse lépidochronologique :	30
3.5.1. Nombre d’écailles par cycle :	31
3.5.2. Croissance des rhizomes :	31
3.5.3. Production des rhizomes :	31
3.6. Analyse granulométrique :	31
3.7. Dénombrement des cellules tannin	34
3.7.1. Variabilité de l’abondance des cellules à tannin en fonction des rangs des feuilles.	34
3.8. Comparaison des prises de vues photographiques	35
3.9. La faune associée	38
Conclusion	40

Références bibliographiques 42
Références bibliographiques 42

LISTE DES FIGURES

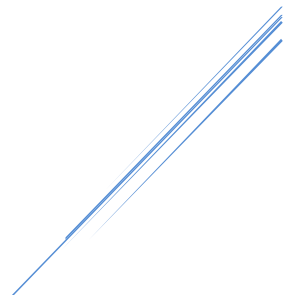
Figure 1. Distribution géographique de <i>Posidonia oceanica</i> (trait rouge). A : Rhône ; B : Pô ; C : Nil (d'après Pergent et al., 2012).....	3
Figure 2. (a) Structure de <i>Posidonia oceanica</i> et illustration d'une croissance orthotrope devenant plagiotrope ; (b) Section verticale dans un herbier à <i>Posidonia oceanica</i> . 1 : Feuilles, 2 : Rhizome orthotrope, 3 : Rhizome plagiotrope, 4 : Racines, 5 : Sédiment,.....	4
Figure 3. Présentation de la baie de Bou Ismaïl et du site d'étude. D'après Bachari-Houma (2009), modifiée par Boumaza (2015).	9
Figure 4. Descriptif de la mise en place d'un balisage en limite inférieure (d'après Charbonnel et al., 2000 modifiée).....	10
Figure 5. Plan de balisage de la limite supérieure de Bou Ismaïl réalisé en 2015.	11
Figure 6. Schéma illustrant le protocole de mesure des relèvements pour le repérage des balises et des piquets-photos (Charbonnel et al., 1995).	13
Figure 7. Méthode d'estimation du recouvrement à l'aide d'une plaquette transparente (Leriche et al., 2005)......	14
Figure 8. Comptage in situ de la densité avec un carré de 20 cm de côté (Sengouga, 2017). 14	
Figure 9. Photo représentant les cycles lépidochronologiques de <i>Posidonia oceanica</i> avec les tronçons de rhizomes correspondants (Boumaza, 2015).....	16
Figure 10. Photo représentant la dissection d'un faisceau de <i>Posidonia oceanica</i> (Boumaza, 2015).....	17
Figure 11. Coupe transversale du limbe d'une feuille de <i>Posidonia oceanica</i> montrant la différence de couleur entre les cellules à tanins (oranges/brunes indiquées par des flèches) et les cellules de parenchyme (incolores). A gauche Gx40- à droite GX100 (d'après D U MAY, 2002).....	19
Figure 12. Etapes de cartographie de la limite supérieure.	22
Figure 13. Localisation du site de balisage de la limite supérieure de l'herbier de Bou Ismaïl.	23
Figure 14. Diversement des eaux usées sans traitement préalable à proximité de la limite supérieure.	24

Figure 15. Cartographie du balisage et représentation des contours de la limite supérieure de l’herbier lors de la mise en place du balisage de 2015 et de son suivi en 2022. Paramètres biométriques	28
Figure 16. Courbe des fréquences cumulées pour les sédiments prélevés en limite supérieure des trois piquet-photos P1, P5 et P10.	33
Figure 17. Abondance des cellules à tannins par rang.	34
Figure 18. Comparaison de l’abondance des cellules a tannins entre une feuille adulte (A), et une feuille intermédiaire (B).	35
Figure 19. Quelques photos de macrofaune présentent dans la limite supérieure : (a) <i>Chromis chromis</i> , (b) <i>Coris julis</i> , (c) <i>Diplodus vulgaris</i> , (d) <i>Diplodus sargus</i> , (e) <i>Mulus surmuletus</i> , (f) <i>Pagrus pagrus</i> , (g) <i>Serranus scriba</i> , (h) <i>Symphodus tinca</i> , (i) <i>Sarpa salpa</i> , (j) <i>Paracentrotus lividus</i>	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Calcul des paramètres granulométriques (Folk et Ward, 1957). Ils sont exprimés en unité (ϕ). L'échelle ϕ est une unité de mesure définie par la relation suivante : $\phi = \log_2(D)$ (D : dimension des grains en mm).....	20
Tableau 2. Les différentes limites de la taille moyenne (TM) (Folk, 1954).	20
Tableau 3. Les limites et la nomenclature de l'indice de symétrie (Ski) (Folk et Ward, 1957).	21
Tableau 4. Les différents stades de l'indice de tri (S0) (Folk, 1954).....	21
Tableau 5. Relèvement « balise à balise » et « piquet-photo à balise ».....	25
Tableau 6. Estimation du recouvrement moyen en amont des trois balise N° 1, 5 et 10 (2015 et 2022).....	26
Tableau 7. Moyenne des densités (nombre de faisceaux/m ²) en arrière des balises N° 1, 5 et 10 mesurée (2015 et 2022).	27
Tableau 8. Paramètres morphologiques de l'herbier au niveau du balisage de Bou Ismaïl, en 2015 et 2022. 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).....	30
Tableau 9. Comparaison des paramètres lépidochronologique entre 2002 et 2022.....	31
Tableau 10. Principaux indices granulométriques calculés pour le sédiment prélevé au niveau des piquet-photos.....	32

INTRODUCTION



Introduction :

Posidonia oceanica, et les herbiers qu'elle constitue sont devenus, au cours des dernières décennies, un objectif majeur de protection et de gestion du milieu marin en Méditerranée en effet ce fragile écosystème joue un rôle fondamental, en termes de maintien de la biodiversité et de la productivité des zones côtières (Boudouresque *et al.*, 2006).

Depuis quelques décennies, surtout aux abords des grands centres urbains, les herbiers sont rentrés en phase de régression de façon alarmante. 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).

Par conséquent, les herbiers à *Posidonia oceanica*, sont devenus l'objet de toutes les attentions et leur suivi apparaît comme une priorité. C'est dans cet optique que de nombreux réseaux de surveillance des herbiers à *Posidonia oceanica* sont mis en place, en particulier ceux basés sur le modèle Réseau de Surveillance Posidonies (RSP), initié par le GIS posidonies (Groupement d'Intérêt Scientifique, basé à l'université de Luminy à Marseille) - depuis le début des années 80 dans la région Provence-Alpes-Côte-D'azur (France) - et régulièrement optimisé (Boudouresque *et al.*, 2007). Il constitue l'un des plus grands programmes d'observation, à long terme, des herbiers à *Posidonia oceanica* en Méditerranée et hautement reconnu pour sa rigueur scientifique (Boudouresque *et al.*, 2006).

Le RSP consiste en l'installation de repères fixes – balisage, transects et carrés permanents - à laquelle est associé l'étude des paramètres de vitalité mesurés sur 2 échelles spatiales, la plante et l'herbier (Habitat), et ce, dans le but de mettre en évidence l'évolution des herbiers à *Posidonia oceanica* – recul, stabilité, régression.

Sur la base des techniques utilisées par le RSP - qui ont servi de base méthodologique et 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), plus de 360 sites, répartis dans 12 pays méditerranéens, sont répertoriés par Pergent et Bertrand (2013). Le long du littoral méditerranéen algérien 7 sites de surveillance basés sur ce modèle ont été mis en place dans le cadre de projets divers : Ile de Rachgoune (Ain Témouchent), Anse de Kouali (Baie de Bou Ismaïl), Bou Ismaïl (Baie de Bou Ismaïl), El Djamila (Baie de Bou

Ismail Alger), Sidi Fredj (Baie de Bou Ismail Alger), Îlot de Bounettah (Baie de Zemmouri) et Taza (Jijel) (Boumaza *et al.*, sous presse).

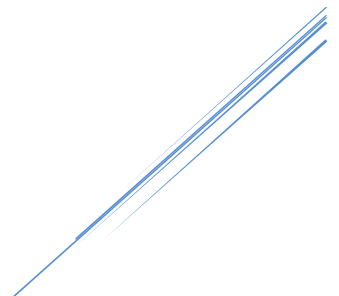
Les principaux objectifs de ces réseaux sont d'une part une surveillance renforcée des herbiers à *Posidonia oceanica* et d'autre part leur utilisation comme indicateurs de la qualité des eaux littorales. Les données acquises de ces réseaux offrent aux collectivités locales ainsi qu'aux administrations concernées par la gestion du littoral - en termes de lutte contre la pollution ou bien la protection des habitats côtiers - des outils précieux permettant d'appréhender de façon précoce et fiable l'état général du milieu et d'en suivre l'évolution grâce à l'acquisition de longues séries temporelles (Boudouresque *et al.*, 2006). La détection précoce de tout changement permettra d'ajuster les pratiques de gestion et/ou de prendre rapidement les mesures correctives à même de protéger cet habitat d'optimiser l'efficacité de la biosurveillance du milieu littoral.

Objectifs de cette étude

Le présent travail s'inscrit dans le cadre des activités de recherches initiées par l'équipe du professeur SEMROUD, depuis 1997. Elles consistent en la mise en place de Réseaux de Surveillance des herbiers à *Posidonia oceanica* le long du littoral algérois, dont les objectifs sont de disposer d'outils permettant d'appréhender rapidement et de manière fiable l'état général du milieu, puis d'en suivre l'évolution sur de longues périodes de temps

Cette étude vise à suivre le balisage mis en place - en 2015 - au niveau d'une portion de la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* situé en face du front de mer de la ville de Bou Ismail. Ce suivi permettra de mettre en évidence *in situ* toute modification, même de faible ampleur, de la position de la limite supérieure de l'herbier. Par ailleurs, tous les paramètres permettant d'apprécier la vitalité de l'herbier, pris en compte lors de l'étude initiale (état zéro) du site, sont considérés lors de ce suivi. Ils seront analysés afin d'évaluer l'impact de la modification des conditions environnementales sur cet herbier

Chapitre 1 :
Généralités sur les herbiers à
Posidonia oceanica



1.1. Présentation et distribution de *Posidonia oceanica*

La magnoliophyte *Posidonia oceanica* est une espèce endémique de Méditerranée qui forment de vastes herbiers, dont la surface occupée 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). Cette distribution le long du pourtour méditerranéen s'interrompt au niveau des estuaires suite aux trop fortes variations de salinité (Figure 1).



Figure 1. Distribution géographique de *Posidonia oceanica* (trait rouge). A : Rhône ; B : Pô ; C : Nil (d'après Pergent *et al.*, 2012).

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 2a). 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 2b).

Les feuilles de *Posidonia oceanica* ont rubanées de 40 à 140 cm de longueur et de 7 à 12 mm de largeur (Semroud, 1993) ; elles sont regroupées en faisceaux de 4 à 8 feuilles environ (Figure 2a). 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 matre, car elles sont peu putrescibles (Boudouresque *et al.*, 2006).

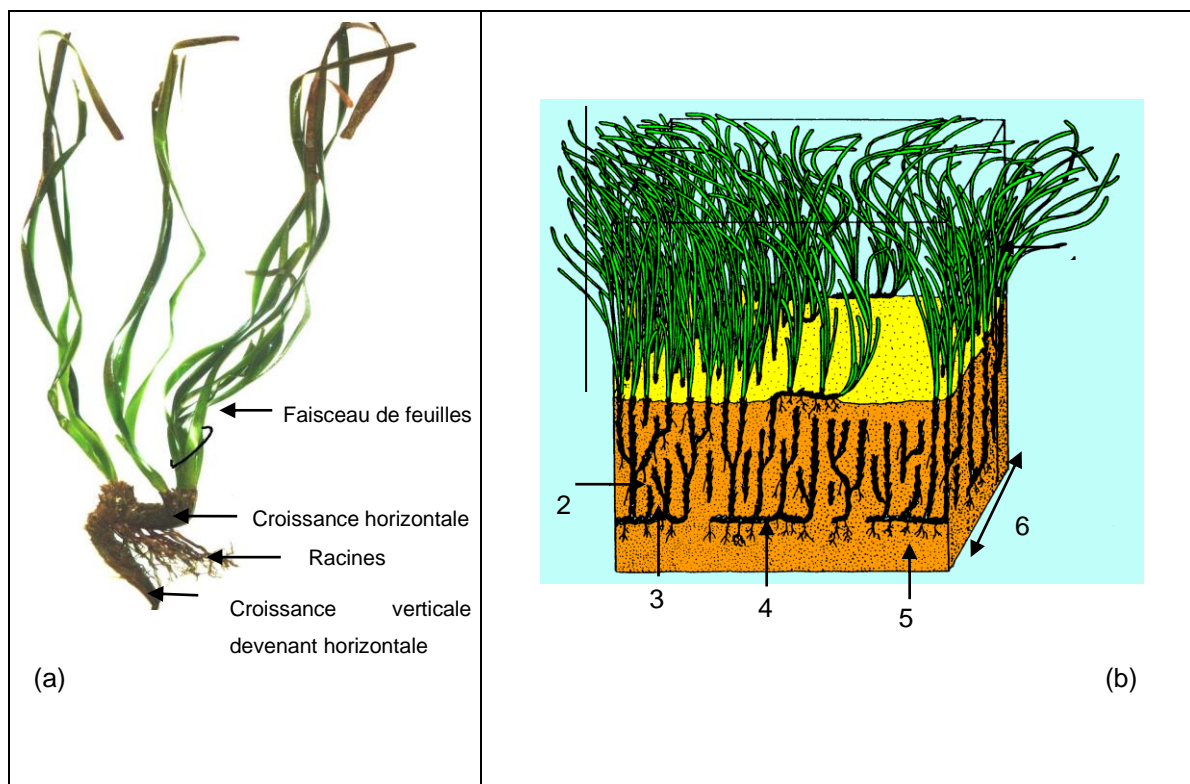


Figure 2. (a) Structure de *Posidonia oceanica* et illustration d'une croissance orthotrope devenant plagiotrope ; (b) Section verticale dans un herbier à *Posidonia oceanica*. 1 : Feuilles, 2 : Rhizome orthotrope, 3 : Rhizome plagiotrope, 4 : Racines, 5 : Sédiment,

1.2. Rôle écologique et services écosystémiques

➤ *Posidonia oceanica* est considérée comme une espèce ingénier, c'est-à-dire que sa présence conditionne l'équilibre écologique de beaucoup de fonds littoraux méditerranéens (Boudouresque et Meinesz, 1982). Elle est aussi une espèce structurante des communautés benthiques. En comparaison des zones de substrats nus, la présence des herbiers à *Posidonia oceanica* favorise la diversité et l'abondance de la faune et de la flore marines. 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).

➤ Les herbiers à *Posidonia oceanica* sont le lieu d'une production primaire importante comparable à celle des forêts tropicales (Pergent, 2006). Cette grande quantité de matière végétale est utilisée au sein de l'herbier, mais une part importante (30 à 35%) est exportée vers

d'autres écosystèmes où elle constitue la base de nombreux réseaux trophiques (Rico-Raimondino 1995).

- Les feuilles et les algues épiphytes associées, assurent une large part de la production d'oxygène de l'étage infralittoral et constituent de ce fait un important facteur d'oxygénation de l'eau et du sédiment (Boudouresque *et al.*, 2006).
- Les herbiers constituent un lieu de frayère, de nurserie, d'abris vis-à-vis des prédateurs et d'habitat permanent pour des milliers d'espèces animales et végétales. Au total, plusieurs centaines d'espèces végétales et plusieurs milliers d'espèces animales peuplent ces herbiers, et font de ces prairies sous-marines un véritable « pôle de biodiversité » (Boudouresque *et al.*, 2006).
- Les herbiers à *Posidonia oceanica* constituent une barrière contre l'hydrodynamique qui atténue l'énergie cinétique des particules en suspensions, qui se déposent plus rapidement, contribuent ainsi à améliorer la clarté de l'eau et protègent les côtes de l'érosion (Terrados et Duarte, 2000). Par ailleurs, la matse souterraine stabilise les fonds meubles en agissant comme un piège à sédiments (Molinier et Picard, 1952). En outre, la taille des feuilles de *Posidonia oceanica*, leur densité et les épiphytes qu'elles supportent réduisent efficacement l'action hydrodynamique des houles et des courants, ce qui a pour conséquence une diminution nette de l'érosion au niveau du fond mais également au niveau de la frange côtière (Jeudy de Grissac et Boudouresque, 1985). Cette dernière profite également de l'effet antiérosif engendré par les banquettes, constituées de feuilles de Posidonies rejetées sur les plages (Boudouresque et Meinesz, 1982).

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⁻² a⁻¹ (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 « matse ». Selon les estimations effectuées par Marbà *et al.* (2014), 20 à 27 Tg de CO₂ 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).

1.3. Vulnérabilité et menaces sur les herbiers de *Posidonia oceanica*

Les herbiers à *Posidonia oceanica*, une des composantes majeures des écosystèmes du domaine littoral méditerranéen, sont sensibles aux agressions anthropiques et constituent de puissants indicateurs de leurs impacts (Boudouresque *et al.*, 2006 ; Marbà *et al.*, 2014). 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 :

- Les aménagements côtiers, notamment la récupération des terres, les ports, les plages artificielles et les épis, qui induisent la destruction et l'altération des herbiers par enfouissement direct, augmentation de la turbidité, hyper-sédimentation en amont et érosion en aval (Montefalcone *et al.*, 2007).
- La pollution industrielle et urbaine, en particulier à proximité des grands centres urbains et des réseaux d'égouts (Duarte, 2002).
- Le chalutage, probablement la cause la plus grave et la plus inquiétante de régression de *P. oceanica* actuellement en activité (Boudouresque *et al.*, 2009).
- Les fermes aquacoles, qui constituent une source de pollution et d'eutrophisation en raison de la nourriture non consommée et de l'excrétion de poissons, en plus d'une réduction significative de l'intensité lumineuse (Pérez *et al.*, 2008).
- L'ancrage : Les herbiers subissent des dommages considérables par arrachage, ces dommages sont souvent irréversibles à cause de leur faible capacité de régénération naturelle (Montefalcone *et al.*, 2008).
- Les déversements de saumure : résulte de l'opération de dessalement qui cause une augmentation de la salinité des eaux de mer et une perturbation des habitats et des écosystèmes dans la zone de rejet. (Sandoval-Gil *et al.*, 2010).
- Les espèces introduites. *Caulerpa taxifolia* (Vahl) C. Agardh et *Caulerpa cylindracea* sont capables d'envahir les herbiers clairsemés de *Posidonia oceanica* (Klein et Verlaque, 2008).

1.4. *Posidonia oceanica* : indicateur biologique

La sensibilité des herbiers à *Posidonia oceanica* aux impacts humains fait de cet écosystème l'indicateur biologique par excellence en milieu côtier (Pergent-Martini *et al.*, 2005). L'herbier rend compte, par sa présence et sa vitalité de la qualité des eaux qui dérivent

au-dessus La sensibilité des herbiers à *Posidonia oceanica* aux impacts humains fait de cet écosystème l'indicateur biologique par excellence en milieu côtier (Pergent-Martini *et al.*, 2005). L'herbier rend compte, par sa présence et sa vitalité de la qualité des eaux qui dérivent au-dessus de lui. Outre leur capacité à enregistrer certains paramètres physico-chimiques, les herbiers à *Posidonia oceanica* intègrent également d'autres paramètres susceptibles de les dégrader : aménagement du littoral, pression de mouillage, chalutage, turbidité, modification de l'hydrodynamisme. Cet indicateur global de la qualité des eaux fonctionne à différents niveaux (Pergent *et al.*, 1995) :

Au niveau de la population

- La profondeur de la limite inférieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* est un bon indicateur de la turbidité moyenne des eaux qui dérivent au-dessus de lui ; en effet, lorsque la turbidité augmente on assiste à une remontée de la limite inférieure. La limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica*, du fait de sa position à proximité des lignes de rivage est à même d'enregistrer très rapidement les conséquences des aménagements littoraux et des rejets d'origines urbaine et industrielle.
- La présence de structures érosives (intermattes, chenaux, ...) au sein de l'herbier témoigne de la présence de courants.

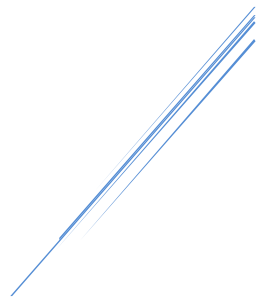
Au niveau de l'individu

- La biométrie foliaire de *Posidonia oceanica*, peut également apporter des renseignements quant à la qualité globale de l'eau. En effet, en milieu pollué, la longueur moyenne des feuilles peut subir une réduction importante. En outre, une biomasse importante d'épiphytes sur les feuilles matérialise la présence de fortes concentrations en matière organique et en nutriments dans le milieu.
- Au niveau anatomique, les cellules à tannin, qui sont des cellules riches en acide phénolique, et les enzymes de détoxification semblent augmenter en réponse à un état de stress de la plante.
- Grâce à la lépidochronologie, il est également possible de connaître l'évolution de différents paramètres caractéristiques du milieu sur de longues périodes de temps : turbidité, taux de sédimentation, température. La lépidochronologie apparaît donc comme un outil précieux pour les études portant sur le suivi temporel de pollutions dans

la mesure où elle pourrait permettre de comparer des teneurs anciennes aux teneurs actuelles de certains polluants (e.g. métaux lourds).

Chapitre 2 :

Matériels et Méthodes



2.1. Présentation du site d'étude

L'étude est menée dans un site localisé dans la baie de Bou Ismail, il s'agit du suivi du balisage de la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* mis en place en juillet 2015, à 300 m au large du front de mer de la baie de Bou-Ismaïl (Harzallah et Zeriat, 2015). Les coordonnées géographiques du balisage sont les suivantes : 36°38'51.6" N et 2°40'51.1" E, correspondant à la balise N°5 (Figure 3).

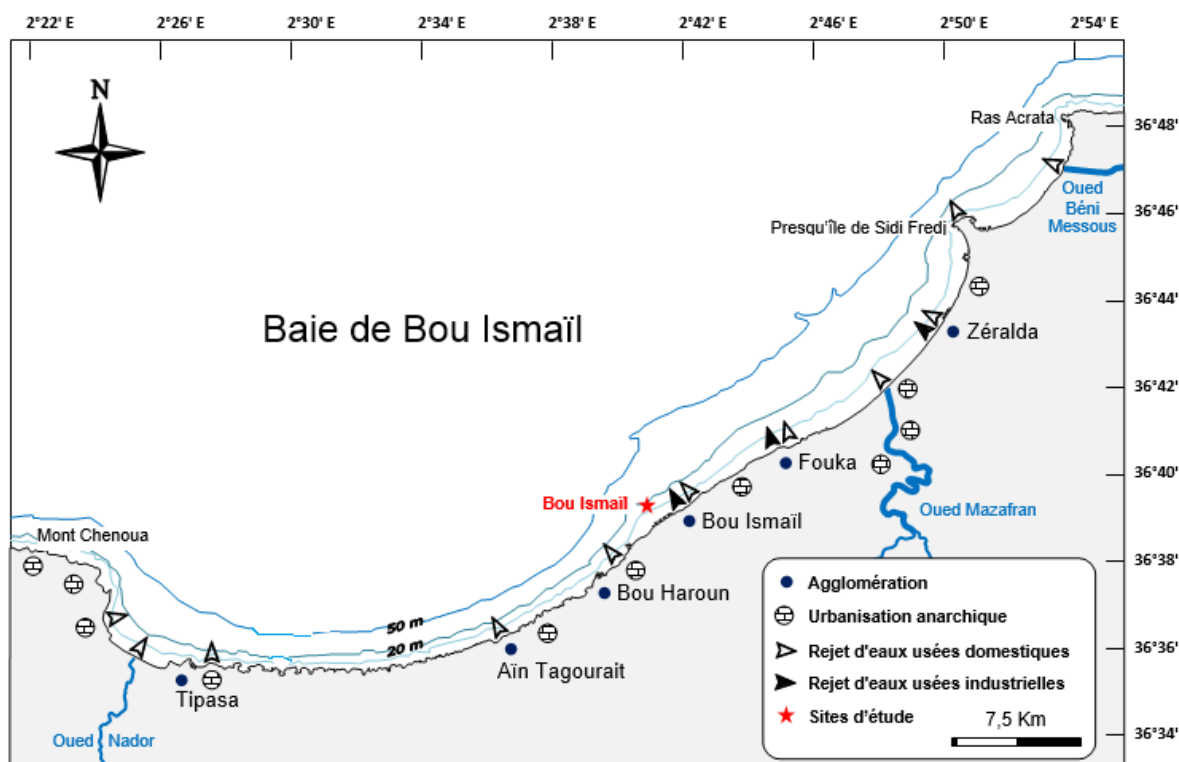


Figure 3. Présentation de la baie de Bou Ismaïl et du site d'étude. D'après Bachari-Houma (2009), modifiée par Boumaza (2015).

Le balisage a été mis en place dans un site sensible, soumis à plusieurs sources de nuisances. Les aménagements du littoral : les perrés et murs de soutènement au-dessus de la plage, la route de bord de mer, les nombreuses habitations et les épis de protection perpendiculaires à la côte. Les rejets domestiques de la ville, qui se déversent directement dans le milieu marin sans traitement préalable et les ruissèlements des domaines agricoles qui se trouvent directement en contact avec le littoral. Par ailleurs, la ville de Bou Ismail est la plus industrialisée de la wilaya de Tipasa, elle accueille en effet une zone industrielle située au sud-est de la ville, qui compte de nombreuses usines, dont l'unité de transformation de papier « TONIC », qui diverse leurs rejets directement en mer, sans traitement préalable.

2.1.1. Présentation du balisage de la limite supérieure

Le balisage de la limite supérieure de Bou Ismaïl, mis en place en 2015, est constitué d'une dizaine de balises, espacées de 5 m les unes des autres. Les balises utilisées sont des blocs en béton de forme tronconique dont le diamètre moyen est de 30 cm, pour une hauteur de 17 cm et un poids d'environ 23 kg. Ces dernières sont ancrées sur le substrat à l'aide de trois tiges métalliques, d'une longueur de 50 cm. Chacune des balises est numérotée et pourvue d'un flotteur numéroté relié à un anneau métallique fixé au centre de la balise, pour faciliter son repérage ultérieur. La profondeur de chaque balise et l'orientation des balises les unes par rapport aux autres, ont été également relevées. En outre, des piquets photographiques (tige métallique de 1.5 m de long) sont installés à 1.5 m en aval de chaque balise. Des photographies de l'herbier en arrière des balises, sont réalisées à partir de ces piquets dont la distance et la position sont connues (Figure 4).

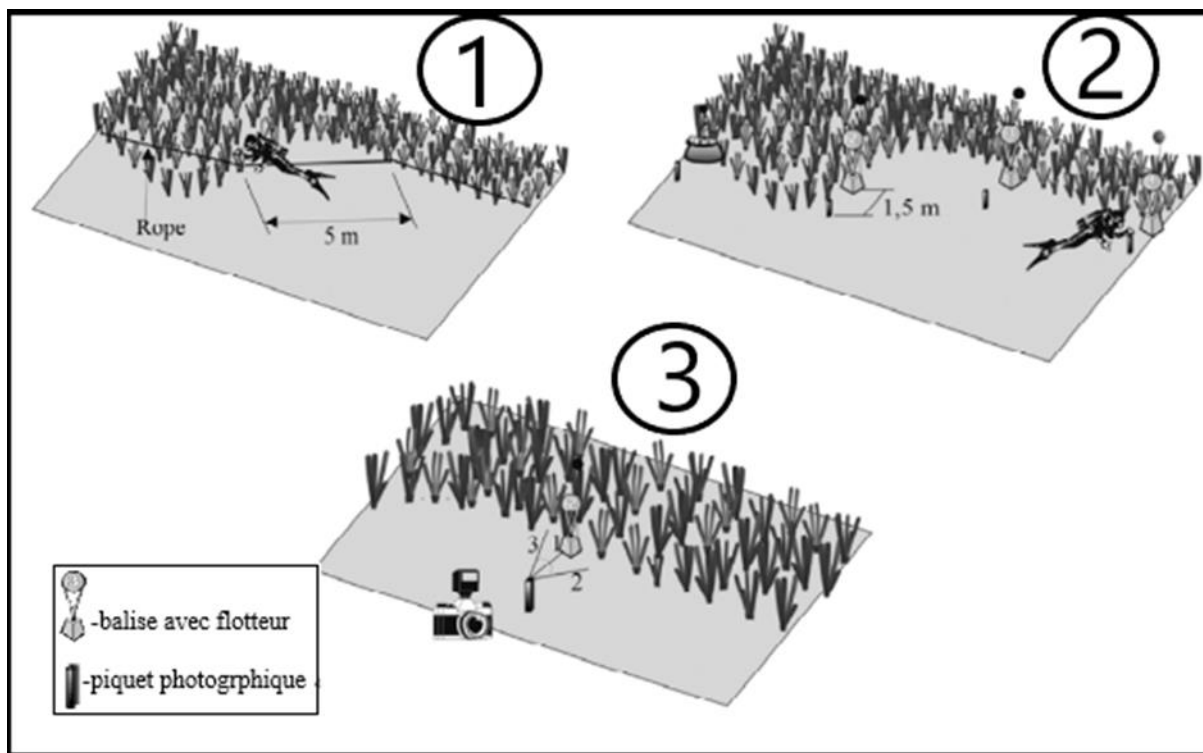


Figure 4. Descriptif de la mise en place d'un balisage en limite inférieure (d'après Charbonnel et al., 2000 modifiée).

Une fois le balisage installé, certains relevés, précisés ci-après, sont effectués afin de caractériser au mieux la structure de la limite supérieure. 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 ont permis de réaliser un plan du balisage (Figure 5). La profondeur de chaque balise est également mesurée à l'aide

d'un profondimètre électronique (précision ± 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.

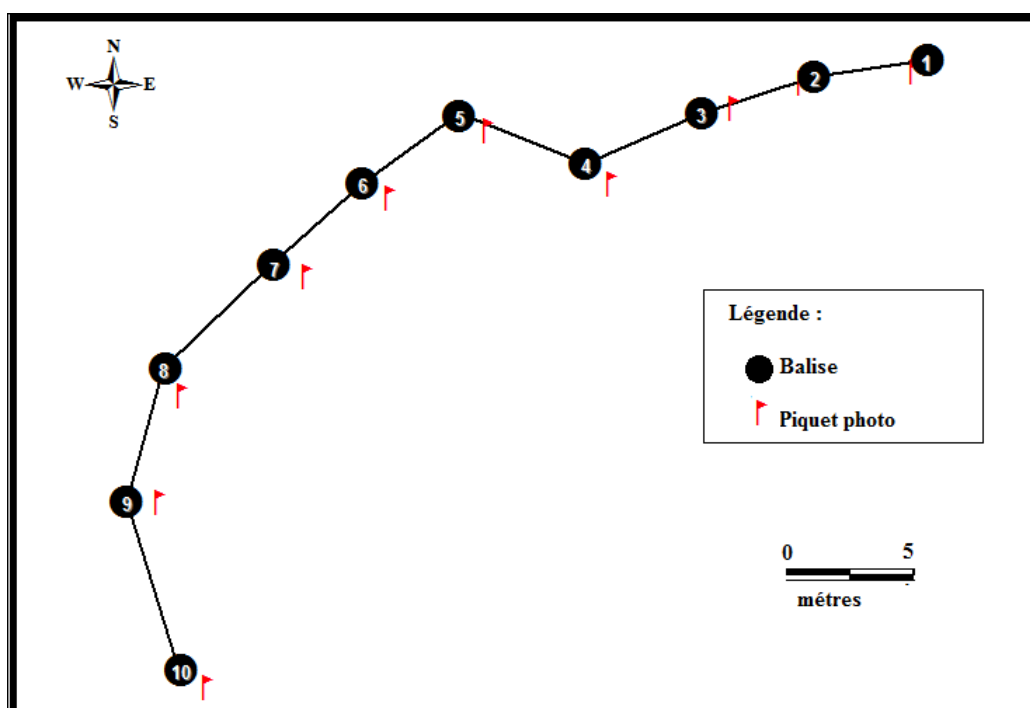


Figure 5. Plan de balisage de la limite supérieure de Bou Ismaïl réalisé en 2015.

2.2. Suivi de la limite supérieure de Bou Ismaïl

Plusieurs paramètres permettant d'évaluer la vitalité de l'herbier qui ont été étudiés lors de la mise en place du balisage (Harzallah et Zeriat, 2015) sont pris en compte en totalité lors de ce suivi.

2.2.1. Méthodes d'étude *in situ*

Les opérations de suivi du balisage de l'herbier à *Posidonia oceanica* se sont déroulées du 7 au 22 juillet 2022. Au total, 4 plongées sont effectuées à des profondeurs comprises entre (4,8 et 5,1 m). La durée moyenne des plongées est de (125 min), soit une durée totale de 04 h 40 min.

Première plongée (07/07/2022) :

Prospection et repérage du balisage en s'appuyant sur les données des coordonnées GPS de la balise 5. Contrôle de la position des balises et identification des balises déplacées et des balises perdues. Prélèvement des faisceaux de Posidonies.

Deuxième plongée (22/07/2022)

Réajustement du réseau avec précision en plaçant les balises déplacées et remplacement des balises perdues par d'autres balises en respectant leur positionnement initial.

Troisième plongée (22/07/2022)

Placement des plaques en PVC numérotées à chaque balise (de 1 à 10), puis estimation du recouvrement et de la densité, prises de vues des balises et film vidéo et renforcement de l'ancrage de certaines balises. Prélèvement des faisceaux de Posidonies.

Quatrième plongée (26/07/2022)

Prélèvement de sédiment.

2.2.1.1. Position des balises

Les relèvements des axes « balise à balise » et « balise à piquet-photo » sont vérifiés à l'aide d'un compas immergeable (Figure 6). Les relèvements de 2015 (état zéro) et les distances balise à balise servent d'indication pour repositionner avec précision les balises déplacées.

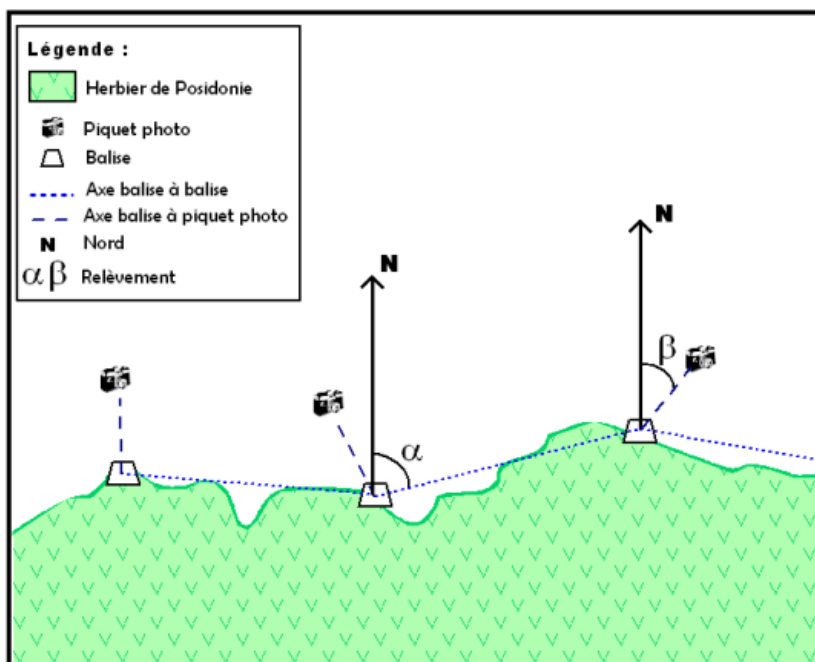


Figure 6. Schéma illustrant le protocole de mesure des relèvements pour le repérage des balises et des piquets-photos (Charbonnel et al., 1995).

2.2.1.2. Estimation du recouvrement de l'herbier

Le recouvrement correspond au pourcentage de couverture du substrat par l'herbier à *Posidonia oceanica* par rapport aux zones non couvertes (sable, matie morte, roche). Le recouvrement varie naturellement en fonction de la vitalité de l'herbier, de la profondeur, de l'hydrodynamisme et du taux de sédimentation. Il apporte des informations sur la transparence de l'eau (aménagements littoraux, rejets d'eaux polluées, etc....) et les dommages qui résultent des actions mécaniques qui le font diminuer (Ganteaume *et al.*, 2005). L'estimation en plongée du recouvrement est réalisée à l'aide d'une plaque de PVC transparente de 30 cm de côté, divisée en 9 carreaux de 10 cm de côté, selon la méthode décrite par Gravez *et al.* (1995). Dans cette méthode, l'observateur évolue à 3 m au-dessus de l'herbier avec la plaquette transparente tenue à bout de bras et le recouvrement est évalué par transparence en comptabilisant le nombre de carreaux occupés par de l'herbier (Figure 7). Trois mesures sont effectuées en amont des balises N°1, 2 et 3. Les valeurs moyennes obtenues sont ensuite comparées à celles mesurées en 2015.

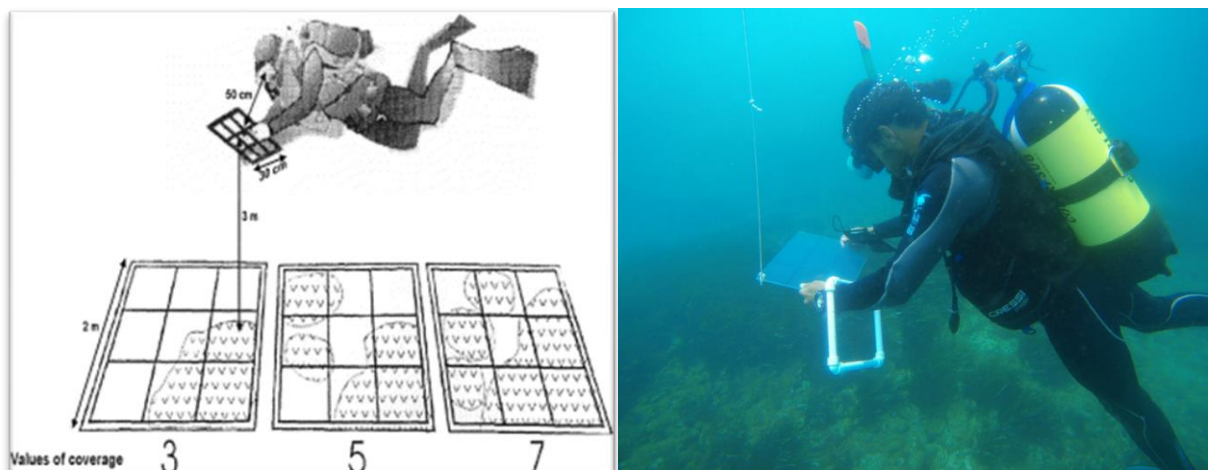


Figure 7. Méthode d'estimation du recouvrement à l'aide d'une plaquette transparente (Leriche et al., 2005).

2.2.1.3. Mesure de la densité de l'herbier

La densité correspond au nombre de faisceaux de feuilles de *Posidonia oceanica* présents par m². Elle est estimée par des comptages *in situ* à l'intérieur d'un cadre de 20 cm de côté déposée au contact de la balise, selon la méthode de Pergent *et al.* (2005) (Figure 8). Pour chaque balise, 3 comptages sont réalisés. Ce paramètre varie en fonction de la profondeur et les conditions du milieu (Descamp *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 (Pergent-Martini *et al.*, 2005). Les valeurs moyennes obtenues sont ensuite comparées à celles mesurées en 2015.



Figure 8. Comptage *in situ* de la densité avec un carré de 20 cm de côté (Sengouga, 2017).

2.2.1.4. Prélèvements des faisceaux de *Posidonia oceanica*

Vingt (20) rhizomes orthotropes sont récoltés, le long de la limite supérieure balisée et de manière aléatoire afin de récolter des individus appartenant à des rhizomes plagiotropes différents (Pergent, 1987). Les rhizomes récoltés sont conservés dans l'eau formolée à 10%. Ils serviront à l'étude des paramètres lépidochronologiques, phénologiques et de biomasse des feuilles et des épiphytes mais également à l'estimation de la densité des cellules à tannins.

2.2.1.5. Prélèvement de sédiment

Pour l'étude granulométrique du sédiment est prélevé en aval de l'herbier au niveau des piquets-photos P1, P5, P10, à l'aide d'une boîte métallique cylindrique sans fond avec un sachet en plastique à l'une des extrémités, retenu par un élastique. La boîte est enfoncée horizontalement dans le sédiment sur une épaisseur d'environ 10 cm.

2.2.1.6. Prises de vues

Afin de caractériser au mieux la structure de la limite supérieure de l'herbier, des prises de vues horizontales sont réalisées à partir des piquets-photos, soit deux photos par balise : une excentré à droite et l'autre excentrée à gauche. Elles seront assemblées pour constituer une vue panoramique qui servira pour visualiser les modifications éventuelles de la limite par rapport à l'état initial. Des photographies verticales sont aussi réalisées, de sorte à faire apparaître deux balises sur le même cliché. Elles serviront pour reconstituer avec précision la totalité de la limite, en tenant compte des informations supplémentaires : matte morte, sable, touffe d'herbier..., qui serait passées inaperçues avec les photographies horizontales. Ces prises de vues sont complétées par une vidéo effectuée suivant la limite supérieure balisée, ce qui nous donne la possibilité de décrire précisément le biotope en avant et en arrière de l'herbier et nous évite des interprétations *in situ*, pouvant être longues du fait la difficulté à avoir une vue d'ensemble du balisage en plongée (Pergent *et al.*, 2008).

2.2.2. Traitement des échantillons au laboratoire

2.2.2.1. Analyse lépidochronologique

Définition

Quand les feuilles de *Posidonia oceanica* meurent, le limbe se détache et tombe, alors que sa base foliaire appelée pétiole reste rattachée au rhizome, il est alors désigné sous le nom d'écaïlle. L'épaisseur des écaïlles ainsi que plusieurs paramètres anatomiques varient de façon cyclique en fonction de leur rang d'insertion sur le rhizome (Pergent, 1993).

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

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

Mode opératoire

Les écaïlles sont détachées soigneusement du rhizome en respectant l'ordre distique de leur insertion, la dissection se fait des plus anciennes aux plus récentes. Les écaïlles sont numérotées, en fonction de leur position sur le rhizome : l'écaïlle se trouvant juste en dessous de la feuille vivante porte le N°1. Leur rang augmente donc des plus récentes au plus anciennes. La position des minima et des maxima d'épaisseur est notée pour chaque rhizome. Le rhizome est coupé au niveau de l'insertion de l'écaïlle fine. Nous obtenons ainsi une série de tronçons de rhizome, délimités par deux minima d'épaisseur et correspondent chacun à une année (Pergent, 1993) (Figure 9). Ils sont ensuite mesurés et placés dans une étuve (70°C, 72h), puis pesés sur une balance de précision.

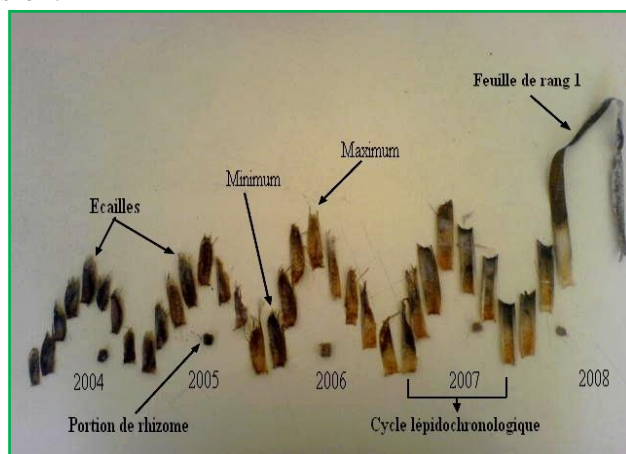


Figure 9. Photo représentant les cycles lépidochronologiques de *Posidonia oceanica* avec les tronçons de rhizomes correspondants (Boumaza, 2015).

2.2.2.2. Paramètres phénologiques

Biométrie foliaire :

Les paramètres biométriques des feuilles sont soumis à des phénomènes cycliques dont l'étude permet de caractériser synthétiquement l'état de vigueur de l'herbier (Pergent *et al.*, 1995). Certains paramètres peuvent être facilement déterminés en laboratoire par des mesures directes avec une règle graduée en cm (longueur et largeur de la feuille et longueur de la base), d'autres sont extrapolées à partir de valeurs mesurées en laboratoire (coefficient A, nombre moyen de feuilles par faisceau, etc.).

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 niveau du centre de l'apex du rhizome et sont d'autant plus âgées qu'elles sont situées vers l'extérieur ; de plus, l'acquisition d'un pétiole par les feuilles ne se fait qu'avec leur vieillissement des feuilles. Les feuilles sont donc séparées selon le protocole de Giraud (1979), puis dénombrées (Figure 10) :

- Feuilles adultes, pourvues d'un pétiole (supérieure ou égale à 2 mm), ayant une longueur supérieure à 50 mm
- Feuilles intermédiaires, dépourvues de pétiole ou dont le pétiole est inférieur ou égal à 2 mm.
- Feuilles juvéniles, dépourvues de pétiole et d'une longueur n'excédant pas 50 mm. Ces dernières ne sont pas prises en compte dans ce travail.

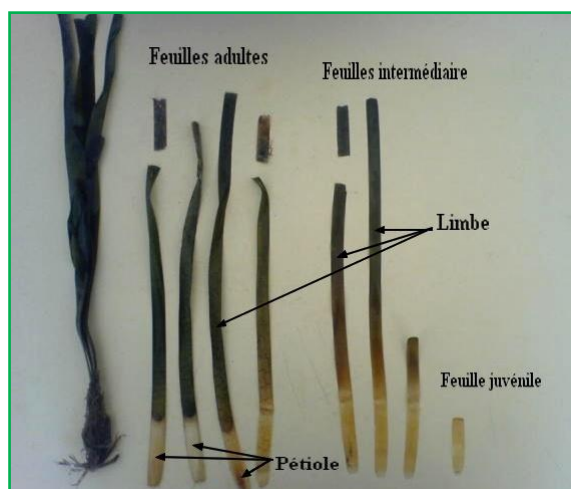


Figure 10. Photo représentant la dissection d'un faisceau de *Posidonia oceanica* (Boumaza, 2015).

Les paramètres biométriques mesurés sont la longueur et la largeur de chaque feuille ainsi

que la longueur de la base, les paramètres suivants sont ensuite déterminés :

- Nombre moyen de feuilles adultes et intermédiaires par faisceau.
- Longueur et largeur moyennes des feuilles adultes et intermédiaires par faisceau.
- Surface foliaire par faisceau pour chaque catégorie de feuille, exprimée en cm².
- Indice foliaire (IF), correspondant à la surface des feuilles par mètre carré, obtenu en multipliant la surface foliaire par la densité.
- Coefficient A qui traduit le pourcentage de feuilles qui ne possèdent plus d'apex. 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. L'altération de l'apex des feuilles par des épiphytes animaux ou végétaux est un autre facteur exprimé par ce coefficient. Par ailleurs, l'état des apex peut également refléter l'action de l'hydrodynamisme du site (Boumaza., 2015).

Biomasse des feuilles et des épiphytes des feuilles :

Les faisceaux récoltés pour l'étude phénologique sont également utilisés pour déterminer la biomasse des feuilles et des épiphytes des feuilles.

Biomasse des feuilles :

Pour chaque faisceau, les lots de feuilles adultes et intermédiaires débarrassées de leurs épiphytes, sont rincées à l'eau, puis séchées séparément à l'étuve pendant 72h à 70°C. Chaque lot est ensuite pesé balance de précision. La biomasse des feuilles est exprimée en mg Ps (poids sec) par faisceau.

Biomasse des épiphytes des feuilles

A l'aide d'une lame de rasoir, sur une plaque de verre, les deux faces de chaque feuille sont grattées soigneusement afin de séparer les épiphytes des feuilles (animaux, végétaux et algues encroûtantes ou dressées) (Dauby et Poulicek, 1995). Le produit du raclage des feuilles adultes et intermédiaires est séché séparément à l'étuve pendant 72 h à 70°C. Chaque lot est ensuite pesé. La biomasse des épiphytes est alors exprimée en mg Ps par faisceau.

2.2.2.3. Dénombrement des cellules à tanins

Posidonia oceanica renferme des cellules à tannin spécialisées dans la séquestration des composés phénoliques (Cariello et Zanetti, 1979 ; Castellano *et al.*, 2012) ; ces composés sont considérés comme des biomarqueurs de la qualité de l'environnement (Astudillo-Pascual *et al.*, 2021). En effet, des stress abiotiques et biotiques semblent entraîner une augmentation du nombre de cellules à tannins (Dumay *et al.*, 2004 ; Boumaza *et al.*, 2012 ; Gasmi, 2020).

Un total de 5 faisceaux est considéré pour le dénombrement des cellules à tannin. Une fois disséqué, les feuilles sont classées en fonction de leur rang d'insertion au sein du faisceau et sont numérotées du rang 1 (la feuille la plus âgée, la plus externe) au dernier rang (la plus jeune, la plus interne). Pour chaque feuille (Figure 11), une section transversale est effectuée, manuellement à l'aide d'une lame de rasoir au niveau de sa région apicale, à environ à 2 à 3cm du bord supérieur où le nombre de cellules à tannins est maximale (Boumaza *et al.*, Soumis). Le dénombrement des cellules à tannin est effectué sous microscope, préalablement étalonné, au grossissement X20 sur l'ensemble de la surface de la section transversale. La surface de la section transversale est estimée en multipliant la largeur de la feuille par son épaisseur, mesurée au centre de la coupe, en considérant que les sections transversales sont rectangulaires. La densité des cellules à tannin dans les feuilles de *Posidonia oceanica* est alors exprimée par mm².

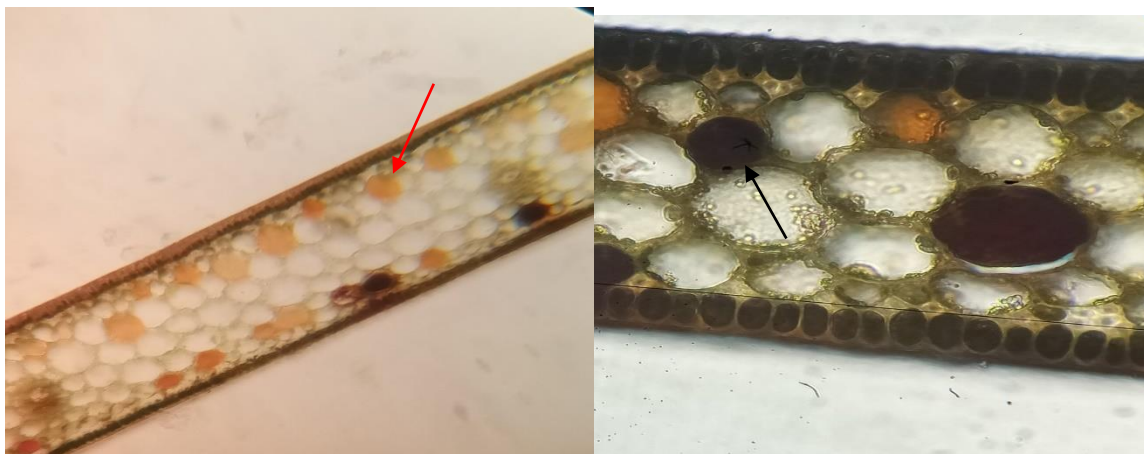


Figure 11. Coupe transversale du limbe d'une feuille de *Posidonia oceanica* montrant la différence de couleur entre les cellules à tanins (oranges/brunes indiquées par des flèches) et les cellules de parenchyme (incolores). A gauche GX10- à droite GX40.

2.2.3. Analyse granulométrique

Le sédiment est d'abord séché à l'étuve à 70° C pendant 48 h. Il est ensuite débarrassé des éventuels restes macroscopiques de Posidonie (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 20 min sur des tamis de norme AFNOR et de diamètre 0,063 ; 0,140 ; 0,25 ; 0,315 ; 0,5 ; 0,8 ; 1 et 2 mm. Chaque refus de tamis est pesé et exprimé en pourcentage du poids total. Les courbes des fréquences et fréquences cumulées sont construites avec en abscisse la dimension des diamètres des tamis avec une échelle logarithmique (Diamètre en Φ -Log2 (diamètre en mm)) et en ordonnée, les fréquences. La courbe cumulative permet de mesurer graphiquement la dimension des particules correspondant à un pourcentage donné et ainsi de calculer divers paramètres granulométriques (Tableau 1).

Tableau 1. Calcul des paramètres granulométriques (Folk et Ward, 1957). Ils sont exprimés en unité (ϕ). L'échelle ϕ est une unité de mesure définie par la relation suivante : $\phi = \log_2(D)$ (D : 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	$SKi = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)}$

La taille moyenne des sédiments (TM), permet de positionner globalement l'échantillon sur l'échelle des dimensions des sédiments. Les différentes limites utilisées par Folk et Ward (1957) sont données dans le tableau 2 :

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

L'indice de symétrie de la distribution (Ski), 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 dans le tableau 3.

Tableau 3. Les limites et la nomenclature de l'indice de symétrie (Ski) (Folk et Ward, 1957).

-1 < SKi < -0.3 : asymétrie très négative

-0.3 < SKi < -0.1 : asymétrie négative

-0.1 < SKi < 0.1 : symétrie

0.1 < SKi < 0.3 : asymétrie positive

0.3 < SKi < 1 : asymétrie très positive

L'indice de tri de Folk (S_0), 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 dans le tableau 4.

Tableau 4. 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

2.3. Analyses statistiques des données

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées dans l'environnement R (R Développent 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 nos résultats avec ceux obtenus par Harzallah et Zeriat (2015) et Boumaza (2015) dans le même site, du point de vue des paramètres biométriques, de la densité et du recouvrement de l'herbier.

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 et des paramètres lépidochronologiques. (Boumaza et al. 2015).

2.4. Méthode de cartographie de la limite de l'herbier

Afin d'obtenir une carte précise de la limite supérieure de l'herbier une série de captures a été réalisée sur les vidéos effectuées lors de différentes plongées et qui ont balayées l'ensemble de la limite balisées. Elle nous a permis d'avoir un assemblé de clichés superposés l'une sur l'autre en prenant comme repère le plan de balisage, et ce à l'aide du logiciel Adobe Illustrator (Figure 12). Les clichés superposés sous forme de calque sont ensuite orientés vers le logiciel ArcGIS, pour le géoréférencement et la digitalisation du contour de la limite en s'appuyant également sur la vidéo qui apporte des informations complémentaires.

Une fois la cartographie de la limite supérieure est établie, est ensuite légendée en illustrant les différents biotopes rencontrés (substrat dur, substrat meuble, matte morte ...).

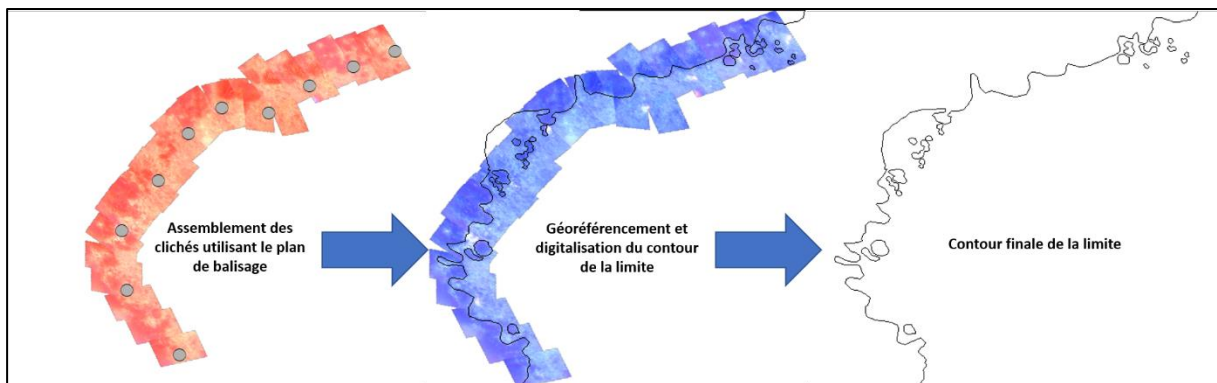
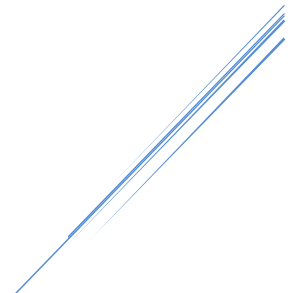


Figure 12. Etapes de cartographie de la limite supérieure.

Chapitre 3 :

Résultats et discussions



3.1. Localisation et cartographie de l'herbier

3.1.1. Localisation du balisage

Dans le but de localiser le point de balisage avec précision, une image satellitaire de la zone d'étude est téléchargée à partir de Google Earth pro. Le trait de côte a été redessiné et la carte géoréférencée à l'aide du logiciel ArcGIS. Le balisage de l'herbier, mis en place en juillet 2015, est installé à environ 350 m des points de rejets des effluents de l'agglomération de la ville Bou Ismail. Les coordonnées géographiques du balisage en système WGS 84 sont : $36^{\circ}38'51.6''$ N et $2^{\circ}40'51.1''$ E, et correspondent plus précisément à celles de la balise N°5 (Figure 12). Deux points de repères sont également figurés sur la carte : les épis du front de mer de la ville de Bou-Ismaïl et le port de Khemisti.

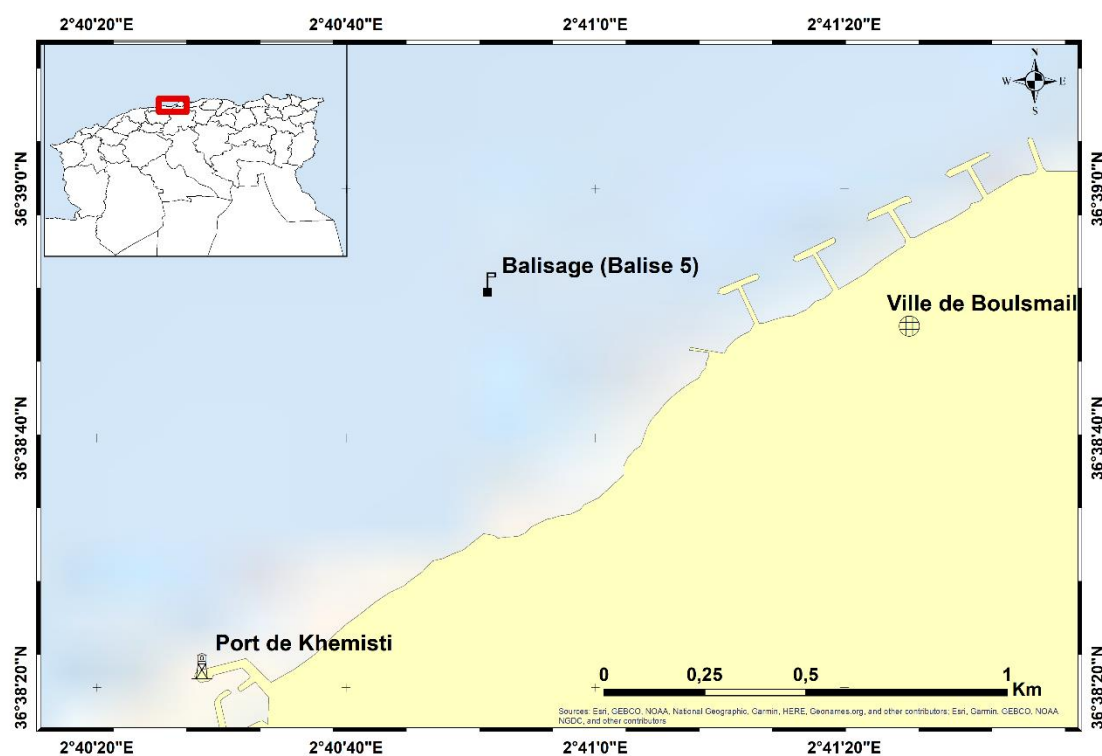


Figure 13. Localisation du site de balisage de la limite supérieure de l'herbier de Bou Ismaïl.

Par ailleurs signalons que la mise en fonction de la station d'épuration de la ville de Bou Ismaïl située à l'Est de l'agglomération a débuté en mai 2019. Cette dernière traite 20 déversoirs d'eaux usées vers la mer, dont notamment des eaux industrielles relevant du groupe TONIC-emballage. En revanche les rejets (domestiques et industriels) qui se trouvent à l'ouest de la

ville, ils sont directement déversés en mer sans traitement préalable ; l'un de ces rejets, se trouve à proximité de notre balisage à environ 350 m. (Figure 14).



Figure 14. Déversement des eaux usées sans traitement préalable à proximité de la limite supérieure.

3.1.2. Etat du balisage

Seules les balises N° 1, 6, 7, 8 et 10 ont été retrouvées et ont pu être identifiées grâce aux relèvements « balise à balise » et « piquet-photo à balise » mesurés lors de la mise en place du balisage en juillet 2015. Ces relèvements ont également servi de repère afin de repositionner avec précision les balises déplacées, en l'occurrence les balises N° 2 et 3. (Tableau 5). Des nouvelles balises portant les N° 4, 5 et 9 sont remplacées en prenant comme repère les relèvements mesurés lors de leur mise en place, en 2015. Une fois les balises ancrées, des plaques numérotées sont accrochées au niveau des anneaux prévus à cet effet.

Tableau 5. Relèvement « balise à balise » et « piquet-photo à balise ».

Balise à balise	Relèvement	Distance	Piquet-photo à balise	Relèvement
B2 à B1	280°	5,7	P1 à B1	210°
B3 à B2	290°	4,6	P2 à B2	225°
B4 à B3	300°	5,5	P3 à B3	85°
B5 à B4	250°	4,7	P4 à B4	155°
B6 à B5	230°	5,2	P5 à B5	145°
B7 à B6	225°	5,5	P6 à B6	140°
B8 à B7	210°	5,8	P7 à B7	120°
B9 à B8	190°	5,2	P8 à B8	165°
B10 à B9	155°	3,7	P9 à B9	80°
			P10 à B10	140°

3.2. Caractérisation de l'herbier

3.2.1. Estimation du recouvrement

Les résultats de recouvrement moyen en amont des trois balises N° 1, 5 et 10 sont consignés dans le tableau 6. Le recouvrement « moyen » de l'herbier au niveau de la limite supérieure est de 46,91%, il correspond à un recouvrement dit « moyen » pour une limite supérieure, selon Charbonnel et al (2000). Il en est de même du recouvrement estimé en 2015 au niveau des mêmes balises 61.66 %.

Néanmoins, une diminution importante du recouvrement est observée au niveau de la balise N°10 (Tableau 6), ce qui correspond à une régression de l'herbier. La diminution de recouvrement correspond à la tendance généralement rapportée dans la littérature au niveau des herbiers à *Posidonia oceanica* localisés au voisinage des rejets d'effluent urbains (Fernandez-Torquemada *et al.*, 2008).

Tableau 6. Estimation du recouvrement moyen en amont des trois balise N° 1, 5 et 10 (2015 et 2022).

Balise	B1	B5	B10
Recouvrement (2015)	60	52	73
Recouvrement (2022)	52	51	37

3.2.2. Densité de l'herbier

La densité moyenne de l'herbier à l'arrière des différentes balises est consignée dans le (Tableau.7). La densité moyenne de l'herbier est de $652,8 \pm 181$ faisceaux/m². Elle fluctue selon les balises entre 725 et 616 faisceaux/m².

Selon la typologie établie par Giraud (1977) l'herbier correspond à un herbier de type II « herbier dense ». Par ailleurs, en tenant compte de la classification proposée par Pergent *et al.* (1995), qui intègre la profondeur, l'herbier présente des valeurs moyennes de densités dites « normales » pour une profondeur moyenne de 5 m. Lors de la mise en place du balisage en 2015, la densité est estimée à 146 ± 19.1 faisceaux/m². Soit une densité dite « anormale » selon l'échelle de Pergent *et al.* (1995).

Selon Boumaza (2015), 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 être à l'origine de l'augmentation de la densité mesurée en 2022 et donc 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 (Vasapollo *et Gambi* ; 2012). Néanmoins, ces valeurs doivent être considérées avec prudence dans la mesure où l'estimation de la densité dépend étroitement de l'expérience de l'observateur.

Tableau 7. Moyenne des densités (nombre de faisceaux/m²) en arrière des balises N° 1, 5 et 10 mesurée en (2015 et 2022).

Balise	B1	B5	B10
Densité (2015)	148	163	147
Densité (2022)	683,25	616,7	616,7

3.3. Cartographie et description de la limite

Les photos, les vidéos et les observations réalisées *in situ*, ont permis d'établir une carte précise de la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* et de la comparer à celle établie en 2015 (Figure 15). Il est à noter que l'herbier est discontinu en allant de la balise N°1 à N°6 et est plus ou moins continu en allant de la balise N°7 à la balise N° 10, avec un recouvrement moins important. Elle a déjà été identifiée en tant que telle en 2015, lors de la mise en place du balisage. Ce type de limite est la conséquence de la pressions anthropiques qui règne dans ce secteur. 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).

Les nouveaux contours de la nouvelle limite sont matérialisés par un trait continu rouge et l'ancienne limite par un trait discontinu bleu (Figure15). Il apparait un recul net de l'herbier entre les balises N° 6 et 7, le reste de la limite ne montre pas un changement important.

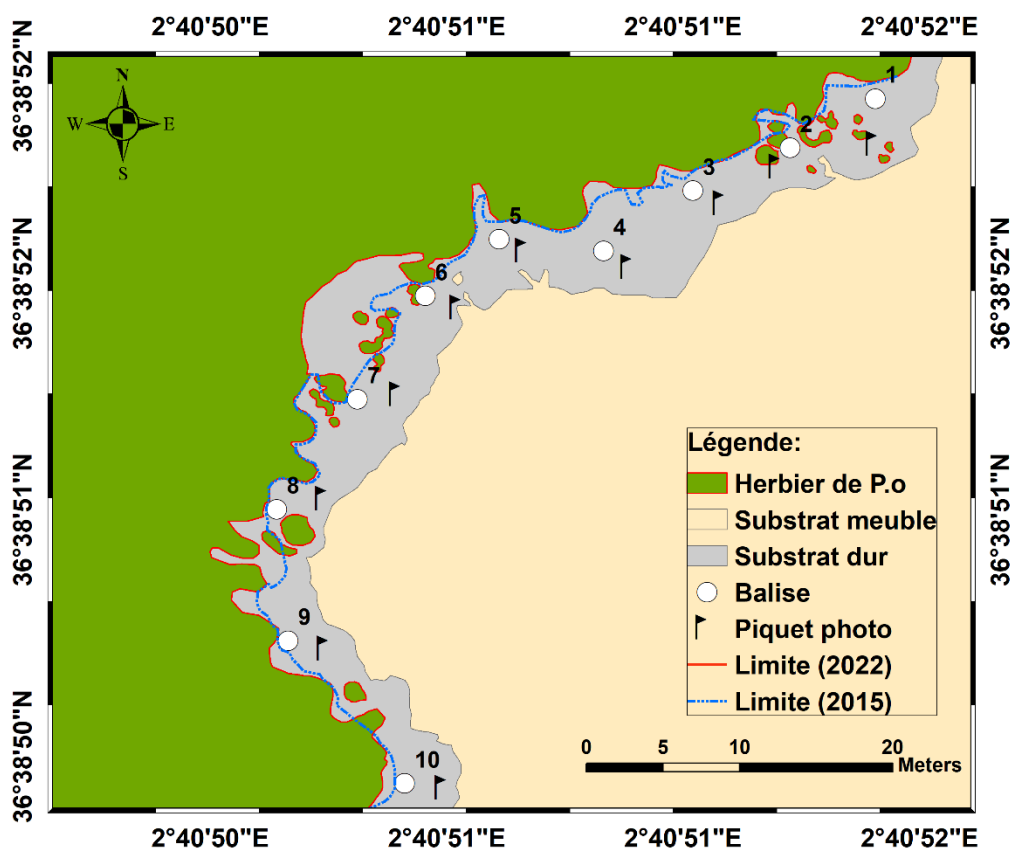


Figure 15. Cartographie du balisage et représentation des contours de la limite supérieure de l'herbier lors de la mise en place du balisage de 2015 et de son suivi en 2022. Paramètres biométriques

Les résultats obtenus ainsi que ceux obtenus en 2015 sont consignés dans le tableau 8, afin de déterminer les variations des différents paramètres biométriques.

3.4. Paramètres biométriques

3.4.1. Nombre de feuilles par faisceaux

Le nombre moyen de feuilles adultes par faisceau enregistré en juillet 2022 (4.1 ± 0.8) est significativement supérieure ($p < 0.05$) à celui enregistré en 2015 (3.1 ± 0.6). Inversement le nombre des feuilles intermédiaires montre une tendance inverse. Les valeurs enregistrées en 2022 (2.5 ± 0.5) sont significativement inférieures ($p < 0.05$) à celles enregistrées en 2015 (3.1 ± 0.6).

Néanmoins, le nombre total de feuilles ne montre pas de différence significative ($p > 0.05$). En effet, la proportion de feuilles adultes et intermédiaires au sein des faisceaux est déterminée, d'une part, par le cycle phénologique de *Posidonia oceanica* - lui-même dépendant de la saison - et de l'hydrodynamisme d'autre part, dans la mesure où il favorise ou non la chute des feuilles sénescents, selon son intensité.

3.4.2. Longueur des feuilles

La longueur moyenne des feuilles adultes est de 258.7 ± 56.6 mm, cette valeur est significativement supérieure ($p < 0.05$) à celle obtenue en 2015 (198.2 ± 56.9 mm). Tandis que la longueur des feuilles intermédiaires présente la tendance inverse avec une moyenne de 180.6 ± 37.1 mm pour l'année 2022 et de 222.8 ± 55.9 mm pour l'année 2015. Quant à la longueur moyenne des feuilles totales (adultes et intermédiaires), celle-ci ne montre pas de différence significative entre 2022 et 2015 ($p > 0.05$).

3.4.3. Largeur des feuilles

La largeur moyenne des feuilles adultes est de (9.2 ± 0.7 mm) pour 2022 et de (9.5 ± 0.8 mm) pour 2015, ces valeurs ne présentent aucune différence significative ($p > 0.05$). Il en est de même pour la largeur moyenne annuelle des feuilles intermédiaires. Les valeurs enregistrées sont de (8.8 ± 0.7 mm) pour 2022 et de (8.8 ± 0.9 mm) pour 2015. La surface foliaire qui intègre à la fois le nombre, la longueur et la largeur des feuilles contribue à l'augmentation de la surface foliaire enregistrée en 2022. La mise en place de la station d'épuration depuis 2019 au niveau de l'agglomération de Bou Ismail pourrait avoir engendré une augmentation de la transparence de l'eau et une diminution de la concentration en nutriment ce qui a eu pour conséquence une augmentation de la production primaire de *Posidonia oceanica*.

3.4.4. Surface foliaire

La surface foliaire moyenne des feuilles adultes est de (240.1 ± 61.8 cm²/faisceau) en 2022 et de (61.1 ± 21.2 cm²/faisceau) en 2015, ce qui représente une différence significative ($p < 0.05$). La même tendance est enregistrée pour les feuilles intermédiaires, 160.8 ± 36.3 cm²/faisceau pour 2022 et de 64 ± 27 cm²/faisceau pour 2015.

3.4.5. Biomasse des feuilles et des épiphytes

Les données de biomasse sont présentées dans le tableau 8 et sont comparées à celles obtenues en 2015. La biomasse moyenne des feuilles adultes mesurée en 2022 est significativement supérieure à celle mesurée en 2015. Les valeurs obtenues sont de 0.34 ± 0.1 g en 2015 et de 0.46 ± 0.1 g en 2022. Concernant les feuilles intermédiaires, des valeurs sont également significativement différentes, elles sont de 0.3 ± 0.1 g en 2015 et de 0.14 ± 0.05 g en

2022. Ces résultats sont à mettre en relation avec les surfaces foliaires obtenues en 2015 et 2022.

La biomasse des épiphytes des feuilles adultes enregistrée en 2022 est de 90.3 ± 65.8 mg contre 84 ± 106.4 mg en 2015. Ces deux valeurs ne présentent pas de différence significative ($p > 0.05$). Tandis que la biomasse des épiphytes des feuilles intermédiaires enregistré en 2022 (7.1 ± 11.2 mg) est significativement inférieur ($p < 0.05$) à celle enregistrée en 2015 (26.7 ± 23.4 mg). La diminution de l'enrichissement du milieu en raison de la mise en service de la station d'épuration est à même de diminuer la biomasse des épiphytes.

Tableau 8. Paramètres morphologiques de l'herbier au niveau du balisage de Bou Ismaïl, en 2015 et 2022. 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).

	2015	2022	
Nombre de feuilles adultes	3.1 ± 0.6	4.1 ± 0.8	***
Nombre de feuilles intermédiaires	3.1 ± 0.6	2.5 ± 0.5	**
Longueur des feuilles adultes (mm)	198.2 ± 56.9	258.7 ± 56.6	**
Longueur des feuilles intermédiaires (mm)	222.8 ± 55.9	180.6 ± 37.1	**
Largeur des feuilles adultes (mm)	9.5 ± 0.8	9.2 ± 0.7	ns
Largeur des feuilles intermédiaires (mm)	8.8 ± 0.9	8.8 ± 0.7	ns
Surface des feuilles adultes (mm²)	61.1 ± 21.2	240.1 ± 61.8	***
Surface des feuilles intermédiaires (mm²)	64 ± 27	160.8 ± 36.3	***
Biomasse des feuilles adultes (g)	0.34 ± 0.1	0.46 ± 0.1	ns
Biomasse des feuilles intermédiaires (g)	0.3 ± 0.1	0.14 ± 0.05	***
Biomasse des épiphytes des feuilles adultes (mg)	90.3 ± 65.8	84 ± 106.4	ns
Biomasse des épiphytes des feuilles intermédiaires (mg)	7.1 ± 11.2	26.7 ± 23.4	**

3.5. Analyse lépidochronologique :

Les paramètres lépidochronologiques mesurés sont comparés à ceux obtenus en 2002 par Boumaza (2015) au niveau du même site (Tableau 10).

3.5.1. Nombre d'écailles par cycle :

Le nombre d'écailles moyen produit annuellement, ne présente pas de différence significative ($p > 0.05$) entre celui mesuré en 2002 (8.7 ± 0.54 écailles par cycle) et celui de 2022 (9.2 ± 1.28 écailles par cycle).

3.5.2. Croissance des rhizomes :

L'allongement annuel moyen des rhizomes estimé en 2002 et 2022 sont respectivement de 7.25 ± 1.85 mm/an et 10.12 ± 4.52 mm/an et aucune différence significative ($p > 0.05$ Kruskal-Wallis). Cela correspond à un allongement considéré bon, selon Pergent *et al* (2008).

3.5.3. Production des rhizomes :

La production annuelle moyenne des rhizomes ne présente pas de différences significatives entre l'année 2002 avec une valeur de 0.13 ± 0.04 mg/an et 2022 (0.13 ± 0.05 mg/an).

Tableau 9. Comparaison des paramètres lépidochronologique entre 2002 et 2022.

	2002	2022	
Nombre d'écailles par cycle	10.12 ± 4.52	9.2 ± 1.28	ns
Croissance des rhizomes	7.25 ± 1.85	10.12 ± 4.52	ns
Production des rhizomes	0.13 ± 0.04	0.13 ± 0.05	ns

3.6. Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique du sédiment prélevé en aval du balisage - au niveau des piquets-photo N°1, 5 et 10 a permis d'obtenir des courbes de fréquences cumulatives et de calculer les indices granulométriques (Figure 16).

La taille moyenne (TM) révèle qu'il s'agit d'un sable moyen selon Folk (1954). Concernant la symétrie du sédiment (Ski) pour les piquets-photos N° 1 et 5, il est considéré comme quasi symétrique, en revanche pour le piquet photo N° 10 celui-ci tend vers les particules fines.

Pour les sédiments analysés en 2015, le sédiment prélevé au niveau du piquet N°1 est moins grossier que celui du piquet N° 5, il en est de même pour le piquet N°10 où la taille moyenne des grains est plus importante que celle du piquet N°1.

La symétrie enregistrée en 2015 indique que les particules grossières dominant au niveau des piquets N° 1 et N° 5, tandis que pour le piquet N° 10, une symétrie est constatée- les particules fines et grossières se présentent dans les mêmes proportions.

En ce qui concerne le Tri (So), les résultats obtenus en 2015 ont montré un tri qui s'améliore très légèrement à mesure que l'on s'éloigne du piquet N°1. En effet, les grains des sédiments du piquet N°10 sont relativement mieux triés que ceux des piquets N°1 et N°5. Cependant, et d'une manière générale, l'utilisation de l'échelle de Folk (1954) fait état d'un environnement ayant un tri granulométrique modéré à mauvais, Les résultats de l'indice de tri (So) obtenus en 2022 indiquent que le sédiment prélevé au niveau des trois piquets N° 1, 5 et 10, est très bien trié.

Tableau 10. Principaux indices granulométriques calculés pour le sédiment prélevé au niveau des piquet-photos.

	Piquet 1		Piquet 5		Piquet 10	
	2015	2022	2015	2022	2015	2022
Année	2015	2022	2015	2022	2015	2022
TM (mm)	2,26	0,33	1,5	0,36	2,06	0,36
Ski	0,28	0,04	0,16	0,06	-0,05	0,14
So	1,11	0,1	1	0,12	0,9	0,14

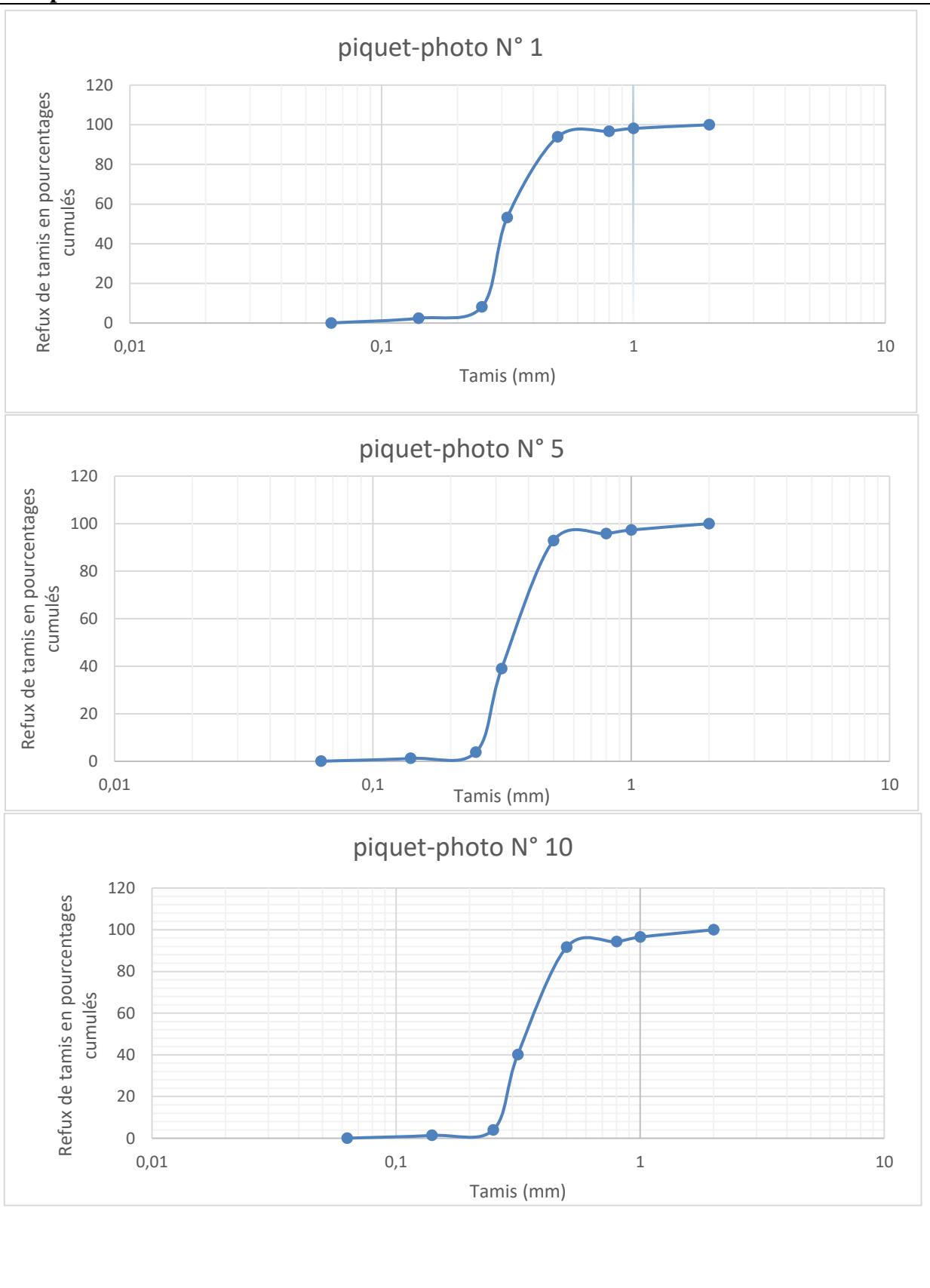


Figure 16. Courbe des fréquences cumulées pour les sédiments prélevés en limite supérieure des trois piquet-photos P1, P5 et P10.

3.7. Dénombrement des cellules a tannin

3.7.1. Variabilité de l'abondance des cellules à tannin en fonction des rangs des feuilles

La densité des cellules à tannin au niveau des feuilles de *Posidonia oceanica* présente des différences significatives en fonction du rang de la feuille ($p < 0,05$). Le maximum est enregistré au niveau de la feuille la plus jeune (rang 7) avec une valeur de $188,24 \pm 4,16$ cellules /mm² et le minimum est enregistré au niveau de la feuille la plus âgée (rang 1) avec la valeur $85,95 \pm 32,89$ cellules /mm² (Figure 17).

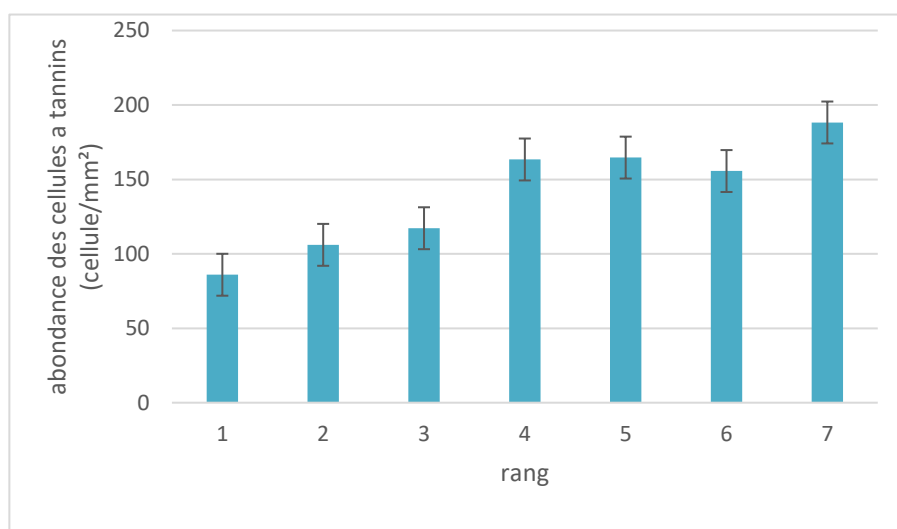


Figure 17. Variabilité de l'abondance des cellules à tannins par rang.

La densité des cellules à tannin des feuilles intermédiaires est significativement supérieure à celle des feuilles adultes (Figure 18). Cette différence entre les feuilles adultes et intermédiaires a déjà été rapportée par Agostini *et al* (1998), Dumay *et al.* (2004) et Boumaza *et al.* (2012). En effet, 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 (Macheix *et al.*, 2005).

Quant à la moyenne de la densité des cellules à tannin qui est de l'ordre de $140,2 \pm 29$, cette dernière est supérieure à celles rapportées par Gasmi (2020) dans différents sites de la baie de Bou Ismaïl et où les densités de cellules à tannin oscillent entre $32,80 \pm 23,61$ cellules /mm² et $9,23 \pm 12,69$ cellules /mm².

Dans la mesure où les cellules à tannin sont considérées comme étant des indicateurs de stress de la plante les valeurs élevées enregistrées au niveau de la limite supérieure de l'herbier de Bou Ismaïl sont à mettre en relation avec les différents types de stress qui agissent au niveau de ce site :

proximité d'un rejet d'effluent non traité et la présence de l'algue verte *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* - remarquée lors de nos différentes plongées - est susceptible d'engendrer un stress supplémentaire - liée à la compétition interspécifique avec *Posidonia oceanica* - et induire une augmentation de la production des cellules à tannin (Dumay *et al.*, 2004).

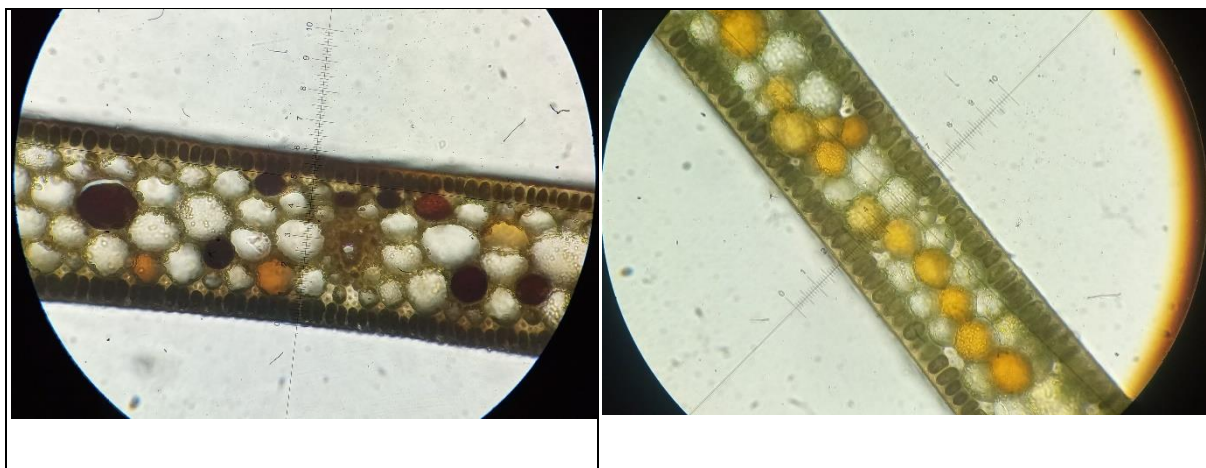


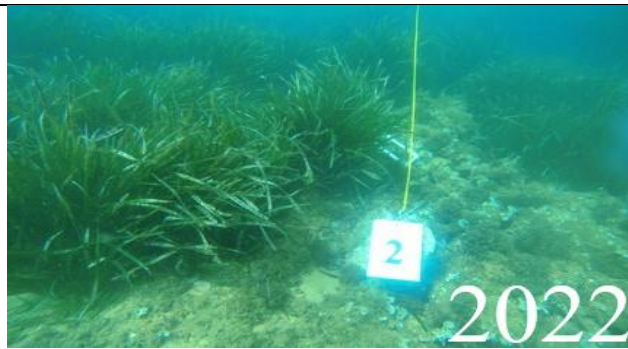
Figure 18. Comparaison de l'abondance des cellules a tannins entre une feuille adulte (A), et une feuille intermédiaire (B).

3.8. Comparaison des prises de vues photographiques

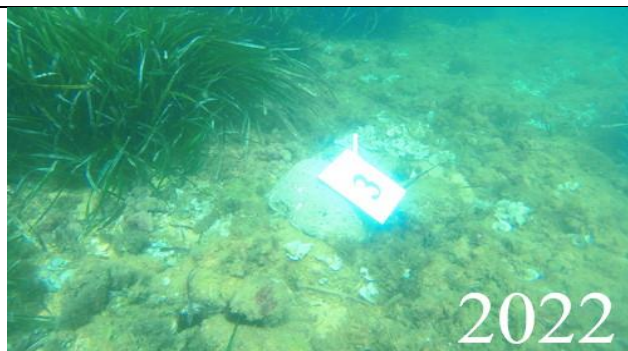
Les photographies prises durant le suivi de 2022 sont assemblées pour chaque balise pour former une vue panoramique, et sont comparées à celles prises en 2015 afin d'observer les modifications de la limite supérieure de l'herbier balisé. Bien que les images aient été prises à la même distance qu'en 2015, celles-ci sont plus larges du fait de la différence de l'objectif de l'appareil photo.



La balise N°1 n'a pas bougé depuis 2015, la limite a reculée d'une quarantaine de centimètres.



La balise N°2 a été placée au contact d'un îlot de Posidonie en 2015, un ensemble de touffes de Posidonies sont présentes on amont de cette balise.



La balise N°3 a été initialement placée à droite d'un îlot de Posidonies (2015). Un recul de la limite à d'une vingtaine de centimètres environ est observé en 2022.



La balise N°4 a été positionnée au contact d'un îlot de Posidonies en 2015. Un recule remarquable de plus de 1 m, est constaté. L'herbier est remplacé par de la matte morte colonisée par des algues.



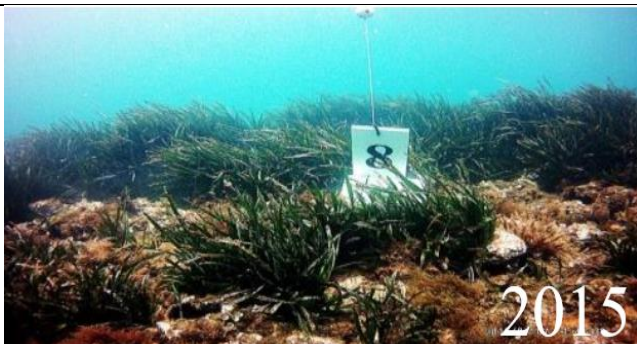
La balise N°5 a été remplacée à gauche de la balise précédente au niveau du même îlot, le reculement est moins que celui en arrière de la balise N°4.



La balise N°6 a été placée au contact d'un îlot, des touffes de Posidonie poussent entourant la balise sont observées.



La balise N°7 a été positionnée à 10 cm de la limite supérieure de l'herbier en 2015, en 2022 une discontinuité est observée avec la présence d'une touffe à droite de la balise.



La balise N°8 est toujours en contact avec la limite telle que placée en 2015. Pas de signe de régression ou de progression lors de ce suivi.



La balise N°9 a été placée en contact avec la limite en 2015. Lors de ce suivi un recule est observé où la matte morte est bien remarquable.



La balise N°10 placée en contact de la limite en 2015 montre lors de ce suivi un net recul et il ne persiste que quelques touffes d'herbier autour de la balise, l'espace vacant est colonisé par des macro-algues.

3.9. La faune associée

Le macrofaune pélagique rencontrée lors de ce suivi est constitué de nombreux juvéniles de *Serranus scriba*, *Pagrus pagrus*, *Mulus surmuletus*, *Diplodus vulgaris* et *Diplodus sargus*. De même des poissons communs à l'herbier a *Posidonia oceanica* ont été observés, comme *Sarpa salpa*, *Symphodus tinca* et *Coris julis*.

S'agissant de la macrofaune benthique les espèces les plus fréquentes sont l'oursin régulier *Paracentrotus lividus*, *Holothuria tubulosa*.

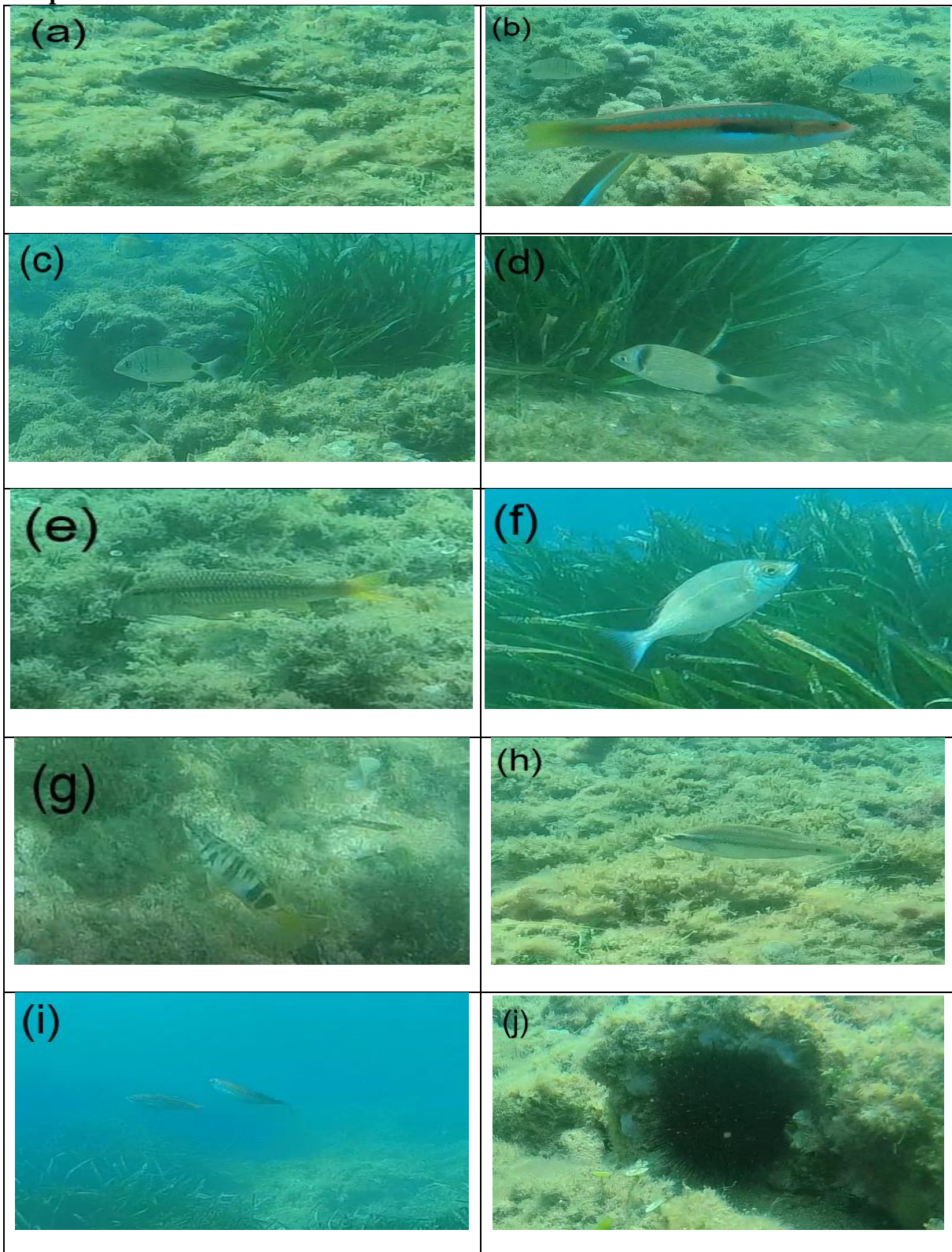
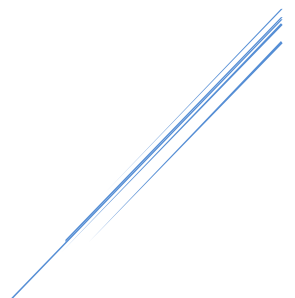


Figure 19. Quelques photos de macrofaune présentes au niveau de la limite supérieure de l'herbier de Bou Ismaïl : (a) *Chromis chromis*, (b) *Coris julis*, (c) *Diplodus vulgaris*, (d) *Diplodus sargus*, (e) *Mulus surmuletus*, (f) *Pagrus pagrus*, (g) *Serranus scriba*, (h) *Symphodus tinca*, (i) *Sarpa salpa*, (j) *Paracentrotus lividus*.

Conclusion



Conclusion

Cette étude rentre dans le cadre du suivi du réseau de surveillance de l'herbier de *Posidonia oceanica* mis en place en juillet 2015 au niveau d'une portion de la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* situé en face du front de mer de la ville de Bou Ismaïl.

Le suivi de cette limite montre son caractère vulnérable qui résulte d'une part de l'action anthropique caractérisé principalement par le diversement les rejets (domestiques et industriels), et d'autre part de l'important hydrodynamisme qui règne dans ce secteur (Braïk, 1989). L'herbier se développe principalement sur un substrat rocheux, ce qui d'ailleurs n'a pas permis d'enfoncer profondément les piquets d'ancrage des balises, les rhizomes sont en majorité de type orthotrope (croissance verticale), et sont enfouis dans le sédiment (pas de déchaussement), le sédiment de l'intermatte est caractérisé par des cailloux dits sablo-rocheux.

Les paramètres caractérisant la vitalité des herbiers à *Posidonia oceanica* - à l'échelle de la population - montrent quelques fluctuations entre 2015 et 2022, dont l'augmentation de la densité et une diminution sensible du recouvrement, avec une structure en patchiness, associée à la dégradation du milieu en raison des rejets d'effluents. Selon Boumaza (2015) cette corrélation négative entre la densité et le recouvrement semble 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.

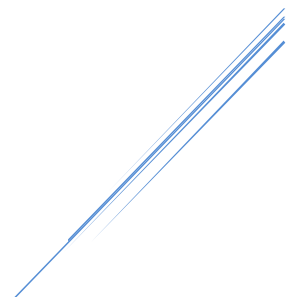
Concernant les paramètres biométriques, c'est-à-dire à l'échelle individuelle, ils montrent également une variabilité entre 2015 et 2022. L'augmentation de la surface foliaire - paramètre intégrateur de l'ensemble des paramètres biométriques, semble traduire une amélioration des conditions du milieu. En outre, la diminution de la biomasse des épiphytes des feuilles vient conforter notre hypothèse.

Les zones de régression observées se situent principalement au milieu du balisage entre les balises N°6 et 7. La tendance générale de l'évolution de l'herbier de Posidonie est plutôt régressive de faible ampleur. La cartographie de limite permet également de visualiser l'évolution de l'herbier sur un plus long terme. Cette affirmation doit rester prudente et les futures suivis permettront de confirmer ou non celle-ci. Un retour sur le site tous les cinq ans serait plus indiqué. Néanmoins, il serait judicieux d'installer des nouvelles balises de référence en arrière des balises N° 6 et 7, afin de suivre l'évolution régressive à long terme dans cette zone. Un entretien annuel des structures mises en place, du fait de l'importance de l'hydrodynamisme.

Conclusion

La mise en service de la station d'épuration (STEP) depuis 2019, semble avoir engendré une amélioration de la qualité du milieu du fait d'avoir éradiqué une vingtaine de déversoirs d'eaux usées notamment les rejets industriels de l'usine TONIC. Cette amélioration est plus perceptible à l'échelle individuelle qu'à l'échelle de la population dans la mesure où l'herbier a continué à régresser à certains endroits. En effet, de nombreux auteurs préconisent dans le cadre de la surveillance de l'état de santé des herbiers à *Posidonia oceanica*, la prise en compte des caractéristiques morphologiques, cytologiques, physiologiques, biochimiques et génétiques, qui constituent des outils de diagnostic précoce et d'aide à la prise de décision pertinents (Pergent-Martini *et al.*, 2005 ; Martinez-Crego *et al.*, 2008). C'est la raison pour laquelle nous avons mesuré un caractère cytologique, en l'occurrence la densité des cellules à tannin au niveau des limbes de *Posidonia oceanica*, ce descripteur servira de point de repère pour les suivis ultérieurs. La prise en compte de ce nouveau descripteur est à même de traduire une réponse de *Posidonia oceanica* à la qualité de la masse d'eau dans laquelle il se développe. L'intérêt d'utiliser ce descripteur, dans le cadre des monitorings des herbiers à *Posidonia oceanica*, est renforcé par le fait qu'il est facile et rapide à mesurer et reproductible. En outre, au regard de la variabilité inter-individuelle mais également de la variabilité mesurée au sein des individus (par rapport au rang de la feuille,) un protocole standardisé devra être proposé lors des suivis ultérieurs.

Références bibliographiques



Références bibliographiques

- Agostini S, Desjobert J.M., Pergent G., (1998).** Distribution of phenolic compounds in the seagrass *Posidonia oceanica*. *Phytochemistry*, 48 (4): p.p 611-617.
- Astudillo-Pascual, M., Domínguez, I., Aguilera, P. A., & Garrido Frenich, A. (2021).** New phenolic compounds in *Posidonia oceanica* seagrass: A comprehensive array using high resolution mass spectrometry. *Plants*, 10(5), 864.
- Bachari-Houma F., 2009.** Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l'imagerie satellitaire. Thèse de Doctorat : Sciences de l'univers et Environnement. Univ. Val de Marne, Paris XII: 1- 272.
- Bengrine, L. Guelmani, A. (2007).** Mise en place d'un système de surveillance de l'herbier à *Posidonia oceanica* (L) Delile de Bou Ismail. Mémoire Ingénieur : Environnement marin. ENSSMAL. 66p.
- Boudouresque C.F., Meinesz A., (1982).** Découverte de l'herbier de Posidonies. Cah. Parc nation. Port-Cros, Fr., 4: 1-79.
- Boudouresque C.F., Pergent G., Francour P., Harmelin-Vivien M., Jangoux M., Mazzella L., Panayotidis P., Pergent-Martini C., Ramos-Espla R. Romero J., Scipione M.B., (1990).** Le Cost 647 : Posidonia Project. *Posidonia Newsletter*, 3(2) : 27-34
- Boudouresque C.F., Charbonel 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. *Biologia Marina Mediterranea*, 7(2) : 328-331.
- Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., et Tunesi L., (2006).** Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. RAMOGE pub., 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., G. Bernard, G. Pergent, A. Shili & M. Verlaque, (2009).** Regression of Mediterranean seagrasses caused by natural processes and anthropogenic disturbances and stress: a critical review. *Botanica Marina* 52 : 395–418.

- Boumaza S., Semroud R., (2000).** Evaluation of past and present primary production in *Posidonia oceanica* beds from the cove of Kouâli (Tipaza, Algeria) using the lepidochronological method. *Biol. Mar. Medit.* 7(2): 26-30.
- 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., (2015).** Caractérisation d'un herbier à *Posidonia oceanica* soumis à des rejets d'effluents. Thèse de doctorat : Ecologie Marine. U.S.T.H.B, Alger : 1-108.
- Boumaza S., Semroud R., Boukortt R., Lamouti S., Sehil M. A. (Sous press).**
- 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.
- Cariello, L., Zanetti, L., & De Stefano, S. (1979).** *Posidonia* ecosystem—V. Phenolic compounds from marine phanerogames, *Cymodocea nodosa* and *Posidonia oceanica*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry*, 62(2), 159-161.
- Castellano, G., Tena, J., & Torrens, F. (2012).** Classification of phenolic compounds by chemical structural indicators and its relation to antioxidant properties of *Posidonia Oceanica* (L.) Delile. *environment*, 2, 6.
- Charbonnel 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, Fr.,: 1-193.
- Charbonnel E., Boudouresque C.F., Meinesz A., Pergent-Martini C., San-Martin G., Bertrand M.C., Foret P., Ragazzi M., Leccia G., (2000).** Le Réseau de Surveillance Posidonies de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Première partie : Présentation et Guide Méthodologique 1999. Seconde partie : résultats du suivi 1999. Région PACA/GIS Posidonie/CQEL 13/CQEL 83/Conseil Général 06/CQEL 06. *GIS Posidonie publ.*, Marseille : 1-60 + 1-116.

- Caye, G. (1989).** Sur la morphogénèse, le cycle végétatif et le reproduction de deux phanérogames marines de Méditerranée: *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile et *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson. *Doct. Etat, Univ. Nice*, 299.
- Dauby, P., & Poulicek, M. (1995).** Methods for removing epiphytes from seagrasses: SEM observations on treated leaves. *Aquatic Botany*, 52(3), 217-228.
- Duarte, C. M., (2000).** The future of seagrass meadows. *Environmental Conservation* 29 : 192–206.
- 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(24), 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.
- 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.
- Ganteaume, A., Bonhomme, P., Emery, E., Hervé, G., & Boudouresque, C. F. (2005).** Impact sur la prairie à *Posidonia oceanica* de l'amarrage des bateaux de croisière, au large du port de Porquerolles (Provence, France, Méditerranée). *Scientific Reports of Port-Cros National Park*, 21, 163-173.
- Gasmi, D. (2020).** Variabilité de l'abondance des cellules a tannin chez *posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile 1813. Mémoire ingénieur : Environnement. ENSSMAL. 31p.
- Giraud, G. (1977).** Essai de classement des herbiers de *Posidonia oceanica* (Linné) Delile.
- Giraud, G. (1979).** Polygone de fréquence de longueur des feuilles de *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile.
- Gravez, V., Gélín, A., Charbonnel, E., Francour, P., Abellard, O., & Remonnay, L. (1995).** Surveillance de l'herbier de Posidonie de la baie du Prado (Marseille)-Suivi 1995. *Ville de Marseille and GIS Posidonie publishers, Marseilles, France*.

- Jeudy de Grissac, A., & Boudouresque, C. F. (1985).** Rôles des herbiers de phanérogames marines dans les mouvements des sédiments côtiers: les herbiers à *Posidonia oceanica*. *Les aménagements côtiers et la gestion du littoral, Coll. pluridisciplinaire franco-japonais océanographie*, 143-151.
- Harzallah, A. Zeriati, C. (2015).** La mise en place d'un réseau de surveillance de l'herbier à *Posidonia oceanica* de Bou Ismail. Mémoire ingénieur : Environnement. ENSSMAL. 62p.
- Klein, J. & M. Verlaque, (2008).** The *Caulerpa racemosa* invasion: a critical review. *Marine Pollution Bulletin* 56: 205–225.
- 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.
- 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.
- Marbà, N., Arthur, R., & Alcoverro, T. (2014).** Getting turfed: The population and habitat impacts of *Lophocladia lallemandii* invasions on endemic *Posidonia oceanica* meadows. *Aquatic botany*, 116, 76-82.
- Martínez-Crego, B., Vergés, A., Alcoverro, T., & Romero, J. (2008).** Selection of multiple seagrass indicators for environmental biomonitoring. *Marine Ecology Progress Series*, 361, 93-109.
- Molinier R., Picard J., (1952).** Recherches sur les herbiers de Phanérogames marines du littoral méditerranéen français. *Annales de l'Institut Océanographique*, 27(3): 157-234.
- Montefalcone, M., Morri, C., Peirano, A., Albertelli, G., & Bianchi, C. N. (2007).** Substitution and phase shift within the *Posidonia oceanica* seagrass meadows of NW Mediterranean Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 75(1-2), 63-71.
- Montefalcone, M., M. Chiantore, A. Lanzone, C. Morri, G. Albertelli & C. N. Bianchi, (2008).** BACI design reveals the decline of the seagrass *Posidonia oceanica* induced by anchoring. *Marine Pollution Bulletin* 56: 1637–1645.

- 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. Sci.*, 47: 359-367.
- Pergent, G. (1987).** *Recherches lépidochronologiques chez posidonia océanica (potamogetonaceae) : fluctuation des paramètres anatomiques et morphologiques des écailles des rhizomes* (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 2).
- Pergent, G. (1993).** L'herbier à *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Approche structurale, fonctionnelle et appliquée. Diplôme d'Habilitation à diriger des recherches, Univ. Corse, Fr. 141pp.* Pergent, G. (1993). L'herbier à *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Approche structurale, fonctionnelle et appliquée. Diplôme d'Habilitation à diriger des recherches, Univ. Corse, Fr. 141pp.*
- 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 (Marseille)*, 54, 3-27.
- 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., Corte : 1-133.
- Pergent G., (2006).** Le rôle des herbiers à *Posidonia oceanica*. In: Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., Tunesi L., edit., RAMOGE pub., 25-31.
- Pergent G., Djellouli A., Hamza A.A., Ettayeb K.S., Alkekli A., Talha M., Alkunti E., 2007.** Structure of *Posidonia oceanica* meadows in the vicinity of ain al-ghazala lagoon (libya): the « macroatoll » ecomorphosis. Proceedings of the third Mediterranean symposium on marine vegetation (Marseilles, 27-29 March 2007). C. Pergent-Martini, S. El Asmi, C. Le Ravallec edits., RAC/SPA publ., Tunis: 135-140.
- 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 ecology*, 8(1), 1-13.

- 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 Malaga, Espagne : IUCN. 80 pages.
- 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., Bazairi, H., Bianchi, C. N., Boudouresque, C. F., Buia, M. C., Calvo, S., ... Verlaque, M. (2014).** Climate change and Mediterranean seagrass meadows: a synopsis for environmental managers. *Mediterranean Marine Science*, 15(2), 462-473.
- Pergent-Martini, C., Leoni, V., Pasqualini, V., Ardizzone, G. D., Balestri, E., Bedini, R., ... Velimirov, B. (2005).** Descriptors of *Posidonia oceanica* meadows: use and application. *Ecological Indicators*, 5(3), 213-230.
- Pergent-Martini, C., Coppo, S., Pulcini, M., Cinquepalmi, F., (2006).** Les textes réglementaires qui s'appliquent aux herbiers à *Posidonia oceanica*. *In* : Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. Boudouresque, C.F., Bernard, G., Bonhomme, P., Charbonnel, E., Diviacco, G., Meinesz, A., Pergent, G., Pergent-Martini, C., Ruitton, S., Tunesi, L., edit, Ramoge pub., France, 48-60.
- Pérez, M., T. Garcia, O. Invers & J. M. Ruiz, (2008).** Physiological responses of the seagrass *Posidonia oceanica* as indicators of fish farm impact. *Marine Pollution Bulletin* 56: 869–879.
- Ramos Esplá A., Benabdi M., Forcada Almarcha A., Sghier Y., Valle Pérez C. (2016).** Cartographie des habitats marins clés de Méditerranée et initiation d'un réseau de surveillance autour de l'île de Rachgoun – Ouest Algérien. Projet MedKeyHabitats. Centre d'activités Régionales pour les Aires Spécialement Protégées (PNUE/PAM-CAR-ASP). 107 p. + Annexes.
- Rico-Raimondino V., (1995).** Contribution à l'étude des stocks et flux d'éléments dans les herbiers à *Posidonia oceanica*. Th. Univ Aix- Marseille II. Fr. 1-248.

- Sandoval-Gil, J. M., L. Mari 'n-Guirao, J. Bernardeau-Esteller, J. M. Ruiz & J. L. Sa 'nchez-Lizaso, (2010).** Effect of hypersaline stress on photosynthesis, growth and survival of the Mediterranean seagrasses *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa*. In El Asmi, S., H. Langar & W. Belkacem (eds), Proceedings of the 4th Mediterranean Symposium on Marine Vegetation (Yasmine-Hammamet, Tunisia), 2–4 December 2010. RAC/SPA, Tunis: 217–218.
- Semroud R., (1993).** Contribution à la connaissance de l'écystème à *Posidonia oceanica* (L.) Delile dans la region d'Alger (Algérie): étude de quelques compartiments. Thèse de Doct. d'Etat, U.S.T.H.B., Alger: 1-219.
- Semroud R., Boumaza S., Boukortt R., Badjou R., Boumoula N., Hadj Aïssa R., Sidi Boumedienne T., (1998).** Surveillance de l'herbier à *Posidonia oceanica* au large de la Grande plage d'El-Djamila (Baie de Bou Ismaïl, Algérie). Convention DGE/ ISMAL, Alger : 1-43.
- Sengouga-Misraoui, A. (2017).** Evaluation de l'état des eaux cotieres algeroises par l'utilisation d'un indice. Thèse Magister, ENSSMAL. 75p.
- Short, F.T. and Coles, R.G. (eds) (2001).** Global Seagrass Research Methods. Elsevier Science B.V., Amsterdam. 473pp.
- Terrados, J. & C. M. Duarte, (2000).** Experimental evidence of reduced particle resuspension within a seagrass (*Posidonia oceanica* L.) meadow. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 243: 45–53.
- Vasapollo, C., & Gambi, M. C. (2012).** Spatio-temporal variability in *Posidonia oceanica* seagrass meadows of the Western Mediterranean: shoot density and plant features. *Aquatic Biology*, 16(2), 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. *Marine pollution bulletin*, 75(1-2), 157-167.

Résumé :

Les rejets d'effluents mixtes – urbains et industriels – constituent une des pressions majeures qui s'exercent sur l'herbier de Bou Ismaïl. Les résultats du premier suivi de la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* du front de mer de la ville de Bou Ismaïl, sept ans après la mise en place du balisage en 2015 et la mise en service de la STEP en 2019, confirment le caractère régressif de cette limite, matérialisé *in situ* à l'échelle de population par une structure en patchiness avec une augmentation de la densité et une diminution du recouvrement suite aux rejets d'effluents – et/ou à la nature hétérogène du substrat. La variabilité des paramètres de vitalité à l'échelle individuelle semble traduire une amélioration des conditions du milieu.

Mots Clés : *Posidonia oceanica*, Limite supérieure, Pression anthropique, Rejets, Surveillance.

Summary:

Mixed effluent discharges - urban and industrial - are one of the major pressures on the Bou Ismaïl seagrass bed. The results of the first monitoring of the upper limit of the *Posidonia oceanica* meadow of the sea front of the city of Bou Ismaïl, seven years after the installation of the marking in 2015 and the commissioning of the WWTP in 2019, confirms the regressive character of this limit, materialized *in situ* at the population scale by a patchiness structure with an increase in density and a decrease in coverage following the effluent discharges and / or the heterogeneous nature of the substrate. Variability in vitality parameters at the individual scale seems to reflect improved environmental conditions.

Keywords: *Posidonia oceanica*, Upper limit, Anthropogenic pressure, Discharge, Monitoring.

ملخص

أحد الضغوط الرئيسية التي تمارس على مرجبو إسماعيل - الحضري و الصناعي - تشكل تصريف المخلفات السائلة المختلفة ، علنا واجهة البحرية لمدينة بوجو إسماعيل *Posidonia Oceanica* تؤكد نتائج الرصد الأول للحد الأعلى لمرج الطبيعة التراجعية لهذا ، 2019 في عام STEP بـ والتكليف 2015 بعد سبع سنوات من تنصيب المنارة في عام / و - يتجسد في الموقع لمنطقة السكان من خلال البنية الترقيع مع زيادة الكثافة وانخفاض التغطية بعد تصريف النفايات السائلة يبدو أن تنبأ معايير الحيوية علنا المستوى بالفردي يعكس تحسناً في الظروف والبيئية . أو الطبيعة غير المتجانسة للرقيقة الرصد ، الإطلاقات ، الضغط البشري المنشأ ، الحد الأعلى : الكلمات المفتاحية *Posidonia oceanica*