

République Algérienne Démocratique et Populaire

Université Abdelhamid Ibn
Badis-Mostaganem
Faculté des Sciences de la
Nature et de la Vie



جامعة عبد الحميد بن باديس
مستغانم
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MER ET DE L'AQUACULTURE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

ZIANI Lamia

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN HYDROBIOLOGIE MARINE ET CONTINENTALE

Spécialité : Bioressources marines

THÈME

**Etude de la dynamique de la limite supérieure de
l'herbier à *Posidonia oceanica* le long de quelques
plages à Mostaganem**

Soutenue le 07 / 07 / 2025

DEVANT LE JURY

Présidente	BORSALI Sofia	MCA	U. Mostaganem
Encadreur	BOUGHERIRA Abdeldjalil	MCB	U. Mostaganem
Examineur	BELBACHIR Noredine	MCA	U. Mostaganem

Année universitaire 2024/2025

Remerciement

Louange et gratitude à Allah Tout-Puissant, qui m'a accordé la santé, la force, la patience et la persévérance pour mener à bien ce travail et surmonter les difficultés rencontrées tout au long de ce parcours.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et ma profonde reconnaissance à mon encadrant, **Monsieur BOUGHERIRA Abdeldjalil**, pour la qualité de son encadrement, ses conseils avisés, sa disponibilité et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce mémoire.

J'adresse également mes vifs remerciements à **Madame BORSALI Sofia**, présidente du jury, et à **Monsieur BELBACHIR Noredine**, examinateur, pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'accepter d'examiner ce mémoire et pour l'attention qu'ils ont bien voulu lui accorder.

Je remercie sincèrement l'ensemble de mes enseignants du Département des sciences de la mer et de l'aquaculture, pour les connaissances et les compétences qu'ils m'ont transmises durant ces années de formation.

Enfin, j'exprime ma gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué par leurs conseils, leurs encouragements ou leur soutien moral à l'aboutissement de ce mémoire.

Dédicace

À mes chers parents,

Pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leur soutien moral et matériel qui ont été le fondement de mon parcours. Que ce travail soit un témoignage de ma reconnaissance et de mon affection profonde.

À mes sœurs mes frères , à mon beau-frère,

Pour leur présence bienveillante, leur soutien constant, leurs encouragements et leurs paroles réconfortantes qui m'ont accompagné dans chaque étape de ce travail.

À ma petite nièce

Ma joie et mon rayon de soleil, merci d'illuminer mes journées par ta présence et ton innocence qui apportent tant de bonheur dans ma vie.

À Malak

Merci d'avoir été à mes côtés dans les moments de doute comme dans ceux de joie.

Lamia

Résumé

La posidonie (*Posidonia oceanica*) est une espèce endémique et emblématique de la mer Méditerranée. Elle forme des herbiers sous-marins qui sont considérés comme des habitats clés pour le maintien des équilibres écologiques des milieux marins et côtiers. Ces herbiers sont toutefois confrontés à des défis écologiques et socio-économiques majeurs qui exigent une connaissance de leur répartition spatiale et de leur état de vitalité.

Dans ce cadre, le présent travail vise à étudier la dynamique de la limite supérieure des herbiers de Posidonie au-devant des plages de Stidia et Petit Port, selon une approche mixte. La démarche méthodologique repose sur l'exploitation d'images satellitaires Google Earth Pro, leur géoréférencement et leur traitement sous SIG (ArcGIS), afin d'extraire et d'analyser les formations de *Posidonia oceanica*. Cette démarche est combinée à des observations *in situ* de l'état de vitalité de l'herbier, par plongée sous-marine, ainsi qu'à des analyses sédimentologiques en laboratoire, afin d'évaluer les conditions édaphiques des sites.

Les résultats obtenus montrent une dynamique complexe de la limite supérieure des herbiers, avec à la fois des signes de stabilité et de dégradation, liés d'une part à la présence d'un herbier continu et récifal, et d'autre part à des herbiers fragmentés, tigrés et à des mattes dégradées. De même, l'analyse des paramètres de vitalité a mis en évidence un état de vitalité globalement modéré pour les deux sites.

Mots-clés : *Posidonia oceanica*, limite supérieure, Mostaganem, SIG, état de vitalité, sédimentologie.

Abstract

Posidonia oceanica is an endemic and emblematic species of the Mediterranean Sea. It forms underwater meadows that are considered key habitats for preserving the ecological balance of marine and coastal environments. However, these seagrass meadows face major ecological and socio-economic challenges that require knowledge of their spatial distribution and vitality.

In this context, the present study aims to analyze the dynamics of the upper limit of *Posidonia oceanica* seagrass meadows off the beaches of Stidia and Petit Port, using a mixed approach. The methodological approach is based on the use of Google Earth Pro satellite images, their georeferencing and processing using GIS (ArcGIS) to extract and analyze *Posidonia oceanica* formations. This approach is combined with in situ observations of the vitality of the seagrass bed, using scuba diving, as well as sedimentological analyses in the laboratory, in order to assess the edaphic conditions of the sites.

The results obtained show a complex dynamic of the upper limit of the seagrass meadows, with signs of both stability and degradation, linked to the presence of continuous and reef-like seagrass meadows on the one hand, and fragmented, tiger-striped seagrass meadows and degraded mats on the other. Also, the analysis of vitality parameters revealed a generally moderate vitality status for both sites.

Keywords: *Posidonia oceanica*, upper limit, Mostaganem, GIS, vitality status, sedimentology.

ملخص

البوسيدونيا (*Posidonia oceanica*) هي نوع نباتي مستوطن يميز البحر الأبيض المتوسط. وهي تشكل أعشابًا بحرية تعتبر موائل أساسية للحفاظ على التوازن البيئي في البيئات البحرية والساحلية. ومع ذلك، تواجه هذه الأعشاب تحديات بيئية واجتماعية واقتصادية كبيرة تتطلب معرفة توزيعها المكاني وحالة حيويتها.

في هذا السياق، يهدف هذا العمل إلى دراسة ديناميكيات الحد الأعلى لأعشاب *Posidonia oceanica* قبالة شواطئ Stidia و Petit Port، وفقًا لنهج مشترك. تعتمد المنهجية على استخدام صور الأقمار الصناعية Google Earth Pro، وتحديد مواقعها الجغرافية ومعالجتها باستخدام نظام المعلومات الجغرافية (ArcGIS)، من أجل استخراج وتحليل تكوينات *Posidonia oceanica*. يتم الجمع بين هذه المقاربة والملاحظات الميدانية لحالة حيوية الأعشاب البحرية، عن طريق الغوص تحت الماء، بالإضافة إلى التحليلات الرسوبية في المخبر، من أجل تقييم الظروف التربة للمواقع.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها ديناميكية معقدة للحد الأعلى للأعشاب البحرية، مع وجود علامات على الاستقرار والتدهور في آن واحد، مرتبطة من ناحية بوجود أعشاب بحرية متصلة وشعاب مرجانية، ومن ناحية أخرى بأعشاب بحرية مجزأة ومخططة ومتدهورة. وبالمقابل، أظهر تحليل معايير الحيوية حالة حيوية معتدلة بشكل عام للموقعين.

الكلمات المفتاحية: *Posidonia oceanica*، الحد الأعلى، مستغانم، نظام المعلومات الجغرافية، حالة الحيوية، علم الرواسب.

Résumé.....	IV
Table des matières.....	VI
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	X
Liste des abréviations et des acronymes.....	XI
Introduction générale.....	2

Chapitre 1 - Synthèse bibliographique

1. Connaissances générales sur les herbiers à <i>Posidonia oceanica</i> et leur environnement.....	5
1.1. Diversité et classification systématique de <i>Posidonia oceanica</i>	5
1.2. Ecologie et description morphologique.....	6
1.2.1. Ecologie.....	6
1.2.2. Description morphologique.....	7
1.3. Fonctions écologiques et services écosystémiques fournis par la Posidonie.....	8
1.4. Menace et pressions sur les herbiers de Posidonie.....	8
1.4.1. Aménagements côtiers.....	8
1.4.2. Activités humaines.....	9
1.4.3. Espèces exotiques envahissantes.....	9
1.4.4. Changements climatiques.....	10
1.5. Statut de conservation de la Posidonie.....	10
2. Apports des systèmes d'information géographique (SIG) dans la cartographie de la posidonie.....	11
2.1. Définition d'un SIG.....	11
2.2. Fonctionnalités et fonctions d'un SIG.....	12
2.3. Rôles des SIG dans la cartographie des herbiers de Posidonie.....	13
2.3.1. Évaluation de l'état général de l'herbier de Posidonie.....	13
2.3.2. Gestion et préservation des écosystèmes marins.....	13
2.3.3. Observation et suivi des changements environnementaux et impact des activités humaines.....	13
3. Méthodes d'étude de la dynamique des herbiers à <i>Posidonia oceanica</i>	14

Chapitre 2 - Matériels et méthodes

1. Présentation de la zone d'étude.....	16
1.1. Contexte géographique, géomorphologique et écologique.....	17
1.2. Conditions climatiques et hydrodynamiques.....	17
1.3. Contexte socio-économique.....	17
2. Méthode de travail.....	18
2.1. Méthode de cartographie de la limite supérieure des herbiers de Posidonie.....	18
2.1.1. Description du logiciel Google Earth Pro et de ses fonctionnalités.....	18
2.1.2. Acquisition des données géographiques.....	18
1.1.1.1. Téléchargement des images satellitaires.....	19
2.1.3. Manipulation et traitement des données dans le SIG.....	20
1.1.1.2. Description du logiciel ArcGis.....	20
1.1.1.3. Intégration des points de contrôle pour le géoréférencement.....	21
2.1.4. Analyse des données dans SIG.....	22
1.1.1.4. Numérisation.....	22
2.1.5. Typologie des herbiers de <i>Posidonia oceanica</i>	23
2.1.6. Evaluation de la marge d'erreur.....	24
2.2. Prélèvement et traitement des échantillons.....	24
1.1.1.5. Etude sédimentologique.....	26
1.1.1.6. Granulométrie.....	26

1.1.1.7.	Matière organique	27
1.1.1.8.	Calcimétrie.....	28
2.3.	Observation et levé <i>in situ</i> de l'état de vitalité de l'herbier de Posidonie.....	29

Chapitre 3 - Résultats et discussion

<u>1.</u>	Résultats.....	34
1.2.	Cartographie de la répartition des herbiers à <i>Posidonia oceanica</i>	34
1.2.1.	Analyse de la répartition des formations à <i>Posidonia oceanica</i> au niveau de la plage de Petit Port	35
1.2.2.	Analyse de la répartition des formations à <i>Posidonia oceanica</i> au niveau de la plage de Stidia	36
1.3.	Analyse de la vitalité de l'herbier à <i>Posidonia oceanica</i>	37
1.3.1.	Plage de Stidia.....	37
1.3.2.	Plage de Petit Port.....	39
1.4.	Analyse Sédimentologique	39
1.4.1.	Granulométrie	39
1.4.2.	Taux de la matière organique et du carbonate de calcium	41
1.4.2.1.	Teneur en matière organique (MO).....	41
1.4.2.2.	Teneur en carbonates de calcium (CaCO ₃)	41
<u>2.</u>	Discussion.....	42
	Conclusion générale.....	45
	References.....	47

Liste des figures

Figure 1 : Répartition géographique de l’herbier de Posidonie en Méditerranée (Esri, 2025).	5
Figure 2 : Dynamiques côtières et profondes des débris de <i>Posidonia oceanica</i> (Lefebvre et al., 2021).	6
Figure 3 : Structure morphologique de <i>Posidonia Oceanica</i> montrant les rhizomes plagiotropes et orthotropes, les faisceaux foliaires, les racines et les feuilles (Boudouresque, 2006).	8
Figure 4 : Services écosystémiques rendus par les herbiers à posidonie (Pergent-Martini, C. 2016)...	9
Figure 5: les étapes de mise en œuvre d’un SIG.....	11
Figure 6: Les différentes fonctionnalités d'un SIG.	12
Figure 7: Localisation géographique des stations étudiées.	16
Figure 8: Processus d’acquisition des images satellitaires.....	19
Figure 9: L’importation des repères de contrôle et le géoréférencement dans ArcMap.	21
Figure 10: Ensemble d’images géoréférencées couvrant la zone d’étude.	22
Figure 11: Numérisation des surfaces d’herbiers marins au-devant de la Plage de Stidia (Mostaganem), à moins de 10 mètres de profondeur.	23
Figure 12: Prise d’échantillons et Observation des paramètre de vitalité de l’herbier de Posidonie.....	25
Figure 13: Les étapes de l’analyse granulométrique (a) Séchage du sédiment, (b) Pesage de 150 g de sédiment, (c) Tamisage.	26
Figure 14 : Introduction de 0,3g de carbonate.	29
Figure 15: Évaluation des paramètres de vitalité de l’herbier à <i>Posidonia oceanica</i>	31
Figure 16 : Répartition surfacique des formations de la Posidonie dans la limite supérieure, au niveau des plages de Petit Port et Stidia.	34
Figure 17: Cartographie des formations de Posidonie au niveau de la plage de Petit Port.....	35
Figure 18: Cartographie des herbiers de Posidonie de la plage de Stidia 2023.	36
Figure 19 : Image sous-marine d’un herbier de Posidonie à Stidia	38
Figure 20 : Courbes granulométriques cumulatives tracées pour les deux sites d’étude.	40

Liste des tableaux

Tableau 1 : Données collectées en vue de cartographier la Posidonie au-devant des plages de Stidia et de Petit Port (Mostaganem).	19
Tableau 2 : Interfaces du logiciel ArcGIS et leurs fonctions.	20
Tableau 3 : Estimation de la marge d'erreur.	24
Tableau 4 : Localisation géographique des stations d'observation et d'échantillonnage	25
Tableau 5 : Valeurs du SO représentant les types de classement (Rivière,1977).	27
Tableau 6 : Limites et nomenclature utilisée dans la cartographie des carbonates.....	28
Tableau 7 : Caractérisation de l'herbier de Posidonie en fonction de la densité des faisceaux foliaires par mètre carré (Giraud, 1977).	30
Tableau 8 : Pourcentage de recouvrement selon Giraud 1977	30
Tableau 9 : Echelle d'évaluation du déchaussement des rhizomes (Charbonnel et al., 2000).....	31
Tableau 10 : Vitalité de l'herbier (tendance à la progression) en fonction des pourcentages moyens de rhizomes plagiotropes mesurés en limite supérieure d'herbier (Denis, 2002).	32
Tableau 11 : Différents types de limite pour évaluer la dynamique de l'herbier	32
Tableau 12 : Observation et levés in situ de l'état de vitalité de l'herbier à Posidonia oceanica.	38
Tableau 13 : Indices granulométriques obtenus dans les deux sites d'étude.....	40
Tableau 14 : Taux de la matière organique obtenus dans les deux sites d'étude.....	41
Tableau 15 : Teneur en carbonates de calcium (CaCO ₃) dans les deux sites d'étude.	42

Liste des abréviations et des acronymes

AFNOR : Agence Française de Normalisation

Ep : Error pixel

ERMs : Error in georeferencing images

Ed : Digitalizing error

Et : Total error

KML : Keyhole Mark-up Language

PH : Potentiel d'Hydrogène

SIG : Système d'Information Géographique

SHFN : Service Hydrographique des Forces Navales

UTM : Universal Transverse Mercator

WGS 1984 : World Geodetic System

Introduction générale

Introduction générale

La protection des écosystèmes marins et côtiers revêt une importance stratégique majeure tant sur le plan environnemental qu'économique et social. Ces milieux, à la fois riches en biodiversité et vulnérables, rendent de nombreux services écosystémiques : régulation du climat, séquestration du carbone, atténuation de l'érosion côtière, soutien aux activités halieutiques et tourisme durable (Buonocore et al., 2020; Beier et al., 2008).

La compréhension fine de leur dynamique et de leur évolution constitue un préalable indispensable à toute démarche de gestion intégrée du littoral (Goiffon, 2003; Cicin-Sain & Knecht, 1998). En effet, des interventions mal adaptées, souvent d'inspiration purement technique ou artificielle (digues, enrochements, envasements), se révèlent non seulement inefficaces à long terme mais peuvent aggraver la dégradation écologique (Botero et al., 2015). À l'inverse, les solutions fondées sur la nature telles que la restauration des herbiers marins, des dunes ou des zones humides offrent des alternatives durables, résilientes et souvent moins coûteuses, en agissant de manière synergique avec les processus naturels de régénération et de protection du littoral.

Posidonia oceanica est une plante marine endémique de la mer Méditerranée, jouant un rôle essentiel dans le maintien des équilibres écologiques des écosystèmes marins et côtiers (Mancini et al., 2023). L'herbier de Posidonie constitue l'un des écosystèmes les plus productifs du bassin méditerranéen. Il assure de nombreuses fonctions : production primaire, stabilisation des sédiments, oxygénation de l'eau, nurserie pour diverses espèces marines, et protection contre l'érosion côtière (Campagne et al., 2015; Vassallo et al., 2013). À ce titre, il est également reconnu comme un excellent bioindicateur de la qualité de l'environnement marin (Montefalcone et al., 2019). Cependant, ces herbiers marins font face à une régression alarmante, en grande partie due à l'intensification des pressions anthropiques le long du littoral méditerranéen, notamment en lien avec l'urbanisation côtière, les aménagements portuaires, les rejets polluants et certaines pratiques de pêche destructrices (Poursanidis et al., 2018). Le littoral algérien, et particulièrement celui de la wilaya de Mostaganem, n'échappe pas à cette dynamique de dégradation, mettant en péril le bon état écologique de ses habitats marins. Dans ce contexte, la gestion durable et la protection des herbiers à *P. oceanica* s'imposent comme des priorités majeures dans les politiques de conservation du milieu marin. L'une des approches les plus efficaces pour suivre l'évolution de ces écosystèmes repose sur la cartographie de leur répartition spatiale, notamment à travers le suivi de la limite supérieure de l'herbier, zone particulièrement sensible aux pressions d'origine terrestre (Mancini et al., 2023). Cette limite constitue un indicateur pertinent pour évaluer l'état de conservation ou de

régression des prairies sous l'effet des contraintes environnementales (pollution physico-chimique et invasion biologique).

Ce mémoire propose une approche méthodologique mixte, combinant la cartographie à partir d'images satellitaires issues de Google Earth Pro, pour délimiter la répartition spatiale des herbiers de Posidonie (Herbier continue, discontinu/fragmenté, Matte morte ou colonisée d'algues photophiles...etc), couplée à une analyse empirique de terrain. Cette dernière repose, d'une part, sur l'observation directe de certains descripteurs de vitalité de l'herbier (densité des faisceaux, taux de recouvrement, proportion de rhizomes plagiotropes), et d'autre part, sur des analyses sédimentologiques (granulométrie) afin d'identifier les conditions édaphiques susceptibles d'influencer son développement ou sa régression.

L'étude est centrée sur deux sites l'un au niveau de la plage de Stidia et l'autre au niveau de la plage de Petit Port. Elle vise à répondre à la question suivante : comment évolue la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* dans ces deux secteurs et dans quelle mesure les pressions anthropiques influencent-elles sa dynamique ?

L'objectif principal est ainsi de suivre l'évolution spatio-temporelle de la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* sur les deux sites d'étude, à travers une double approche cartographique et empirique, dans le but de fournir des éléments d'aide à la gestion et à la préservation de cet habitat marin à haute valeur écologique.

Chapitre 1 - Synthèse Bibliographique

1. Connaissances générales sur les herbiers à *Posidonia oceanica* et leur environnement

La Posidonie (*Posidonia oceanica*), plante marine endémique de la mer Méditerranée (**Figure 1**), occupe une place centrale dans les écosystèmes côtiers (Boudouresque et al., 2012). Elle assure une multitude de fonctions écologiques majeures, parmi lesquelles l'oxygénation de l'eau, la stabilisation des fonds marins, le stockage du carbone et la protection naturelle des littoraux contre l'érosion (Buonocore et al., 2020). Ces services écosystémiques essentiels lui confèrent un rôle clé dans le maintien de l'équilibre et de la résilience des milieux marins méditerranéens.

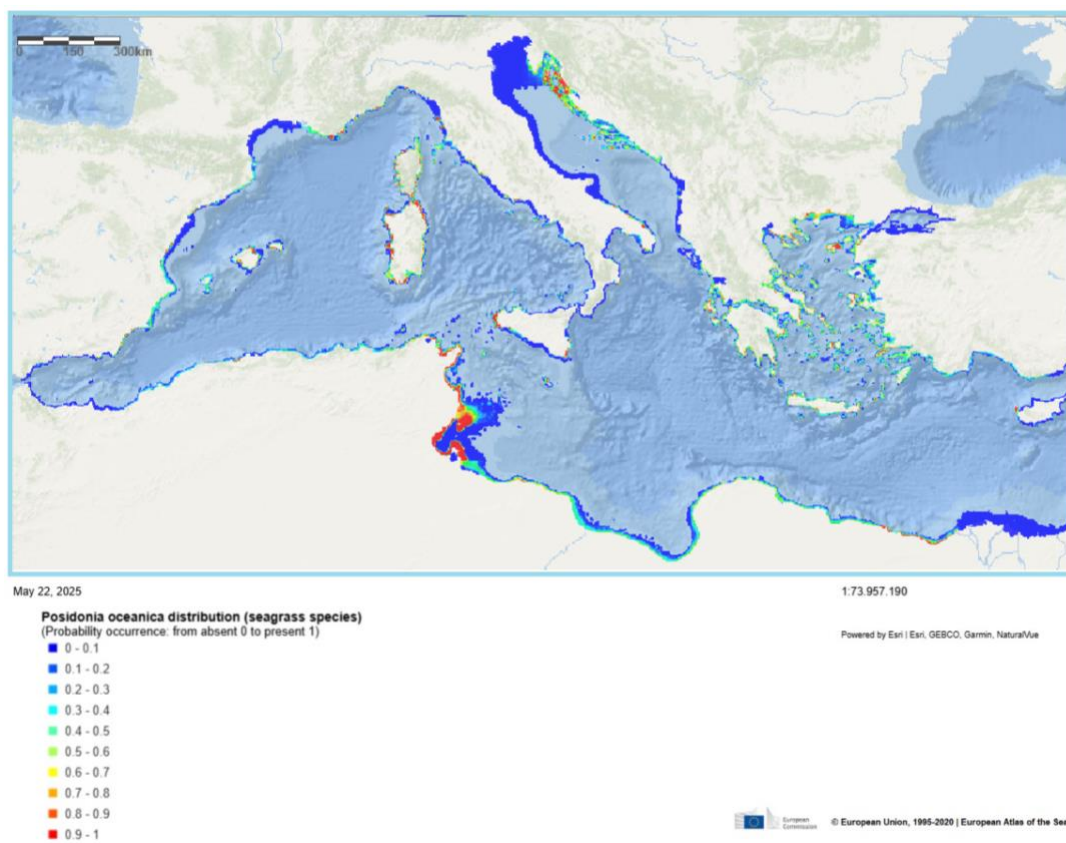


Figure 1: Répartition géographique de l'herbier de Posidonie en Méditerranée (Esri, 2025).

1.1. Diversité et classification systématique de *Posidonia oceanica*

À l'échelle mondiale, environ 13 genres et 60 espèces de phanérogames marines appartenant au groupe des Magnoliophytes ont été identifiés (Boudouresque, 2006). Dans le bassin méditerranéen, la diversité est beaucoup plus restreinte, avec seulement cinq espèces présentes : *Cymodocea nodosa*, *Nanozostera noltii*, *Zostera marina*, *Halophila stipulacea* et *Posidonia oceanica* (Pergent et al., 2012). Parmi celles-ci, *Posidonia oceanica* se distingue par son endémisme strict à la mer Méditerranée. Sur le plan taxonomique, *Posidonia oceanica* est classée comme suit :

- Règne : Plantae
- Sous règne : Tracheobionta
- Super division : Spermatophyta
- Division : Magnoliophyta
- Classe : Liliopsida
- Sous Classe : Alismatidae
- Ordre : Najadales
- Famille : Posidoniaceae
- Genre : Posidonia
- Espèce : *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile, 1813.

1.2. Ecologie et description morphologique

1.2.1. Ecologie

Posidonia oceanica est une plante marine (phanérogame marine) endémique de la Méditerranée, appartenant au groupe des Magnoliophytes. Elle forme des herbiers sous-marins plus ou moins denses, considérés parmi les écosystèmes les plus productifs du bassin méditerranéen, couvrant une superficie estimée entre 25 000 et 50 000 km² (Boudouresque et al. 2006). Selon la transparence de l'eau et la pénétration de la lumière, l'herbier de posidonie colonise les profondeurs allant jusqu'à 40 mètres dans les conditions les plus favorables (Figure 2) (Pasqualini, 1997).

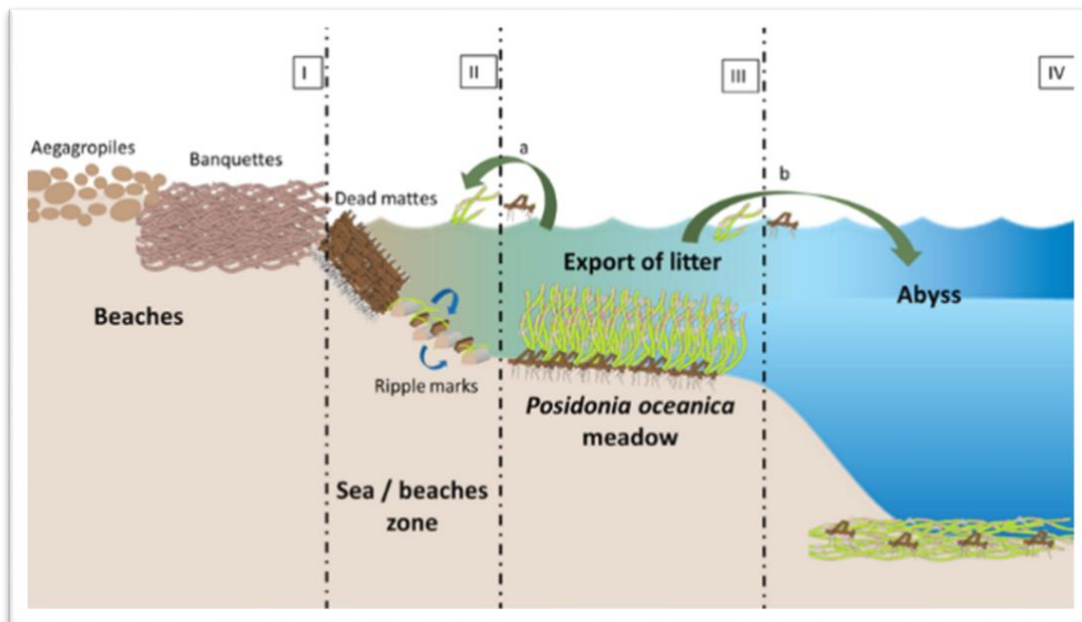


Figure 2 : Dynamiques côtières et profondes des débris de *Posidonia oceanica* (Lefebvre et al., 2021).

I : Les plages, où s'accumulent les aegagropiles et les banquettes de feuilles mortes.

II : La zone intermédiaire mer/plage, caractérisée par la présence de mattes mortes et de débris végétaux mobilisés par l'hydrodynamisme.

III : L'herbier actif de *Posidonia oceanica*, source d'une exportation continue de matière organique, soit vers le rivage (flux **a**), soit vers le large (flux **b**).

IV : Les abysses, où se déposent les amas de matière organique, issus de l'herbier (Lefebvre et al., 2021).

L'espèce montre une tolérance relativement étroite à certains paramètres environnementaux. Elle se développent dans les eaux bien oxygénées, transparentes et peu turbide, avec une tolérance aux valeurs de salinité comprises entre 33 et 40 ‰ (Abadie, 2012). Dans le même sens, *P. oceanica* est particulièrement sensible aux températures élevées ; au-delà de 27 °C la température de l'eau peut altérer ses capacités de photosynthèse et par conséquent compromettre sa croissance (Guerrero-Meseguer et al., 2017). Dans ce sens, le changement climatique constitue une menace majeure pour les herbiers marins, en provoquant non seulement des hausses de températures, mais aussi l'élévation du niveau de la mer et l'introduction d'espèces exotiques compétitrices ou invasives, pouvant perturber les communautés y associées (Pergent et al., 2014 ; Stramska et Aniskiewicz, 2019).

1.2.2. Description morphologique

Posidonia oceanica est une plante marine à fleurs (phanérogame), format des prairies sous-marines appelées herbiers. Du point de vue morphologique, elle présente l'organisation typique d'une plante marine avec des rhizomes, des feuilles, des racines et parfois des fleurs. Les feuilles, de couleur vert clair à verdâtre, sont groupées en faisceaux de 4 à 8 unités, prenant la forme rubanée mesurant entre 30 à 80 cm de long et 7 à 12 mm de large (Sghaier, 2013).

La plante développe deux types de rhizomes (Boudouresque et al., 2006 ; Pergent-Martini & Le Ravallec, 2007) :

- Les rhizomes plagiotropes (horizontaux), qui s'étendent lentement dans le sédiment, assurent l'extension latérale de l'herbier.
- Les rhizomes orthotropes (verticaux), qui croissent vers le haut, permettent à l'herbier de s'élever progressivement, en particulier dans les zones à accumulation de sédiments (Figure 3).

Le croisement complexe des rhizomes, des racines, des écailles (gainés foliaires persistantes) et des sédiments piégés forme une structure dense appelée la matte.

À l'automne, la posidonie perd ses feuilles, qui peuvent être emportées par le courant et s'échouer sur les plages, formant des banquettes de plusieurs mètres d'épaisseur (Laurent,2024).

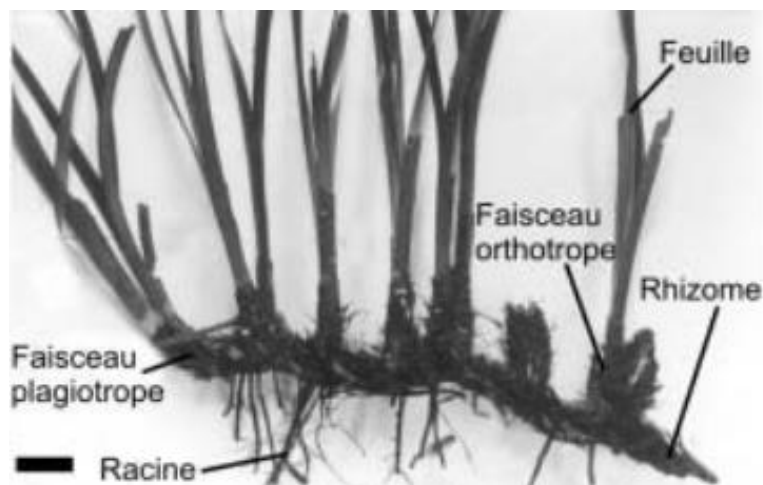


Figure 3 : Structure morphologique de *Posidonia Oceanica* montrant les rhizomes plagiotropes et orthotropes, les faisceaux foliaires, les racines et les feuilles (Boudouresque, 2006).

1.3.Fonctions écologiques et services écosystémiques fournis par la Posidonie

L'herbier de *Posidonia oceanica* constitue l'un des habitats marins les plus importants de la mer Méditerranée, en raison des fonctions écologiques et des services écosystémiques qu'il assure pour les communautés côtières (Montefalcone et al., 2019). Ces herbiers stabilisent les sédiments, filtrent les nutriments et protègent le littoral contre l'érosion des plages (Gacia & Duarte, 2001). Ils forment des structures végétales d'une grande importance, agissant comme zones de nurserie pour de nombreuses espèces marines (Campagne et al., 2014), et comme puits de carbone contribuant à l'atténuation du changement climatique (**Figure 4**) (Monnier et al., 2022).

1.4.Menace et pressions sur les herbiers de Posidonie

Le déclin préoccupant des herbiers à *Posidonia oceanica* en Méditerranée, en particulier dans le bassin nord-occidental, a été largement documenté. De nombreuses prairies ont disparu au cours des dernières décennies, sous l'effet de pressions multiples, parfois irréversibles (Montefalcone, 2009 ; Abadie, 2012).

1.4.1. Aménagements côtiers

Les infrastructures maritimes (ports, marinas, digues, etc.) représentent une des principales pressions anthropiques sur le littoral méditerranéen. Elles engendrent des impacts directs (dragage, remblaiement) ou indirects (modification des courants littoraux, déséquilibre sédimentaire) qui contribuent à la régression, voire à la disparition, des herbiers (Sghaier, 2013).

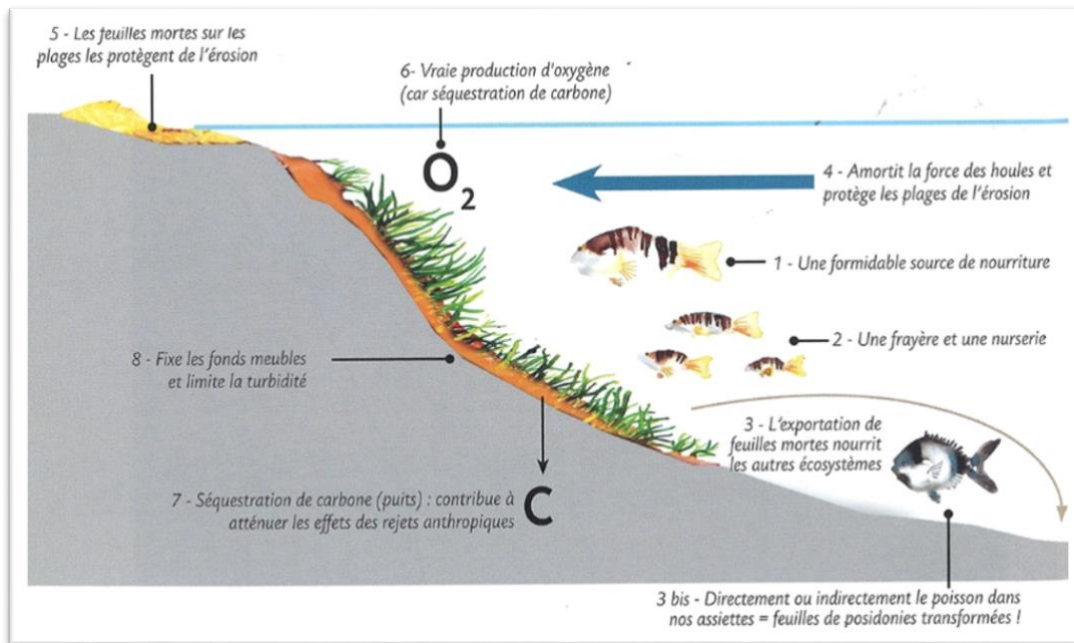


Figure 4 : Services écosystémiques rendus par les herbiers à posidonie (Pergent-Martini, C. 2016).

1.4.2. Activités humaines

- **Pollution marine et côtière :** Les rejets d'eaux usées domestiques et industrielles, riches en matières organiques, chimiques ou thermiques, augmentent la turbidité et favorisent la prolifération d'épiphytes et de phytoplancton. Cette compétition pour la lumière entraîne une baisse de la photosynthèse, provoquant ainsi le dépérissement des herbiers (Sghaier, 2013).
- **Pêche et plaisance :** Certaines pratiques destructrices comme l'utilisation d'explosifs, bien qu'illégales, endommagent localement les herbiers (Pergent-Martini et Le Ravallec, 2007). Le chalutage intensif, surtout entre -15 et -30 m de profondeur, cause des destructions à grande échelle. De même, les mouillages répétés dans les zones touristiques arrachent les rhizomes avec les ancres, causant des dégradations physiques irréversibles (Sghaier, 2013). Par ailleurs, le développement de l'aquaculture en zones littorales constitue une autre source de pression.

1.4.3. Espèces exotiques envahissantes

Les espèces exogènes, en particulier les invasives, concurrencent *P. oceanica* pour les ressources (lumière, espace, nutriments) et peuvent modifier la structure et la biodiversité des herbiers. Certaines, comme *Caulerpa taxifolia*, sont responsables de la destruction d'importantes superficies d'herbiers (Verlaque, 1994 ; Sghaier, 2013 ; Houngnadan, 2020).

1.4.4. Changements climatiques

Le changement climatique constitue une menace croissante pour les herbiers méditerranéens. La hausse des températures, la fréquence accrue des événements extrêmes (tempêtes, vagues de chaleur, pluies intenses), l'élévation du niveau de la mer et l'acidification des océans affectent la croissance, la reproduction et la survie de la *Posidonie* (UICN, 2012 ; Alonso Aller et al., 2019 ; Pergent et al., 2012). La diminution de l'oxygène dissous, la baisse du pH et la montée de la profondeur de compensation lumineuse peuvent provoquer un recul notable de la limite inférieure des herbiers. Par ailleurs, les rejets d'eau réchauffée aggravent localement les effets du réchauffement (Pergent-Martini et Le Ravallec, 2007).

1.5. Statut de conservation de la Posidonie

La dynamique de conservation varie selon les politiques nationales. Une harmonisation des programmes de surveillance est recommandée pour assurer une gestion écologique intégrée en Méditerranée (Montefalcone, 2009).

- **France** : Les herbiers de *Posidonia oceanica* sont protégés au titre de la conservation de la flore et de la faune sauvages. Ils sont reconnus comme éléments du patrimoine naturel à protéger par le décret du 20 septembre 1989. Le suivi est assuré notamment par le Réseau de Surveillance Posidonies (RSP) en région PACA, avec un programme de suivi à long terme de l'état des herbiers (Boudouresque et al., 2006 ; Montefalcone, 2009).
- **Italie** : Les herbiers relèvent des compétences du Ministère de l'Environnement et sont protégés par la loi n° 426 du 9 décembre 1998 (*Nuovi interventi in campo ambientale*). La surveillance repose sur un programme national de cartographie et de suivi, assorti de mesures anti-dégradation (Boudouresque et al., 2006).
- **Espagne** : La protection est assurée au niveau régional (Catalogne, Valence, Baléares, Murcia) par des textes tels que l'Ordre du 31 juillet 1991 et des dispositifs de cartographie initiés dès 1992 en Catalogne. La surveillance repose sur des réseaux régionaux spécifiques (Boudouresque et al., 2006).
- **Algérie** : La protection des herbiers s'inscrit dans le cadre de la législation nationale de préservation du littoral et des écosystèmes marins, notamment la loi du 05 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral. Le Réseau de Surveillance Posidonies d'El Djamila

assure un suivi depuis 1997, bien qu'une actualisation des données soit suggérée par les travaux récents (Boudouresque et al., 2006).

2. Apports des systèmes d'information géographique (SIG) dans la cartographie de la posidonie

2.1. Définition d'un SIG

Un Système d'Information Géographique (SIG) est un système informatique conçu pour collecter, gérer, analyser et cartographier des données géographiques (**Figure 5**). Il associe des informations de localisation à diverses données descriptives, permettant ainsi de visualiser, comprendre et interpréter les relations spatiales, les modèles et les tendances géographiques (Esri, 2024). Selon l'Agence Française de Normalisation (AFNOR, 1992), un SIG se définit comme un système structuré d'opérations informatisées permettant de produire et d'exploiter des données géographiques relatives à un même territoire (Gourmelon & Robin, 2005).

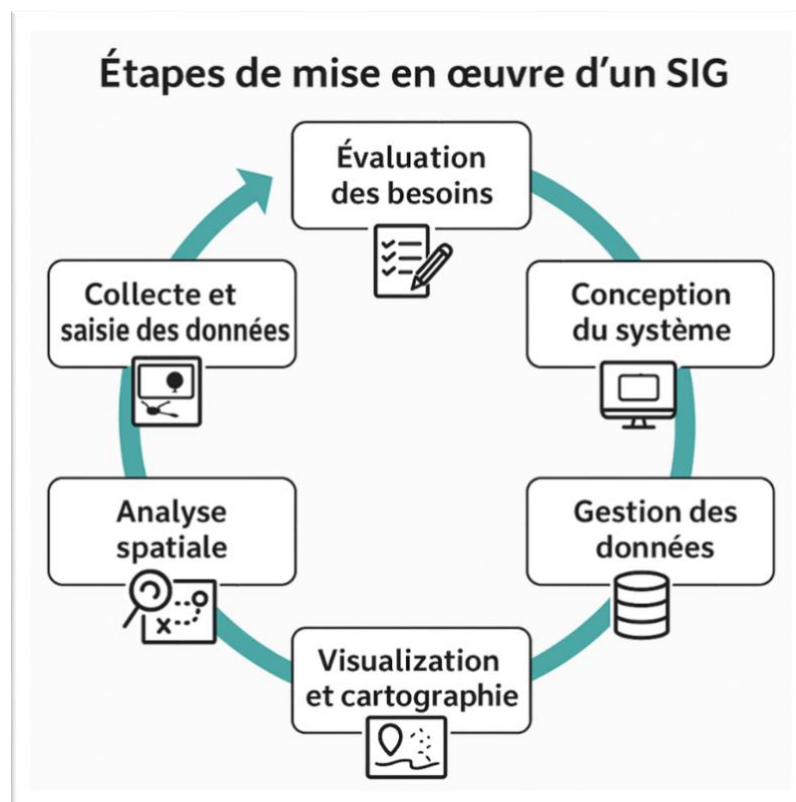


Figure 5: les étapes de mise en œuvre d'un SIG.

2.2.Fonctionnalités et fonctions d'un SIG

Un SIG repose sur plusieurs composantes indispensables : les logiciels, les données, le matériel informatique, les méthodologies de travail et les utilisateurs (Menab, 2018). Ces éléments permettent d'assurer son bon fonctionnement et de répondre à des besoins variés d'analyse spatiale et de prise de décision.

Cinq grandes fonctions des SIG, appelées les "5A" (**Figure 6**) selon Marmonier (2002) :

- Abstraction : Élaboration de modèles de données pour représenter les phénomènes spatiaux.
- Acquisition : Collecte de données à partir de diverses sources
- Archivage : Stockage structuré des données pour assurer leur accessibilité et pérennité
- Affichage : Visualisation sous formes graphiques ou textuelles pour faciliter la compréhension
- Analyse : Traitement des données via des outils d'analyse spatiale pour en extraire des informations utiles à la décision.

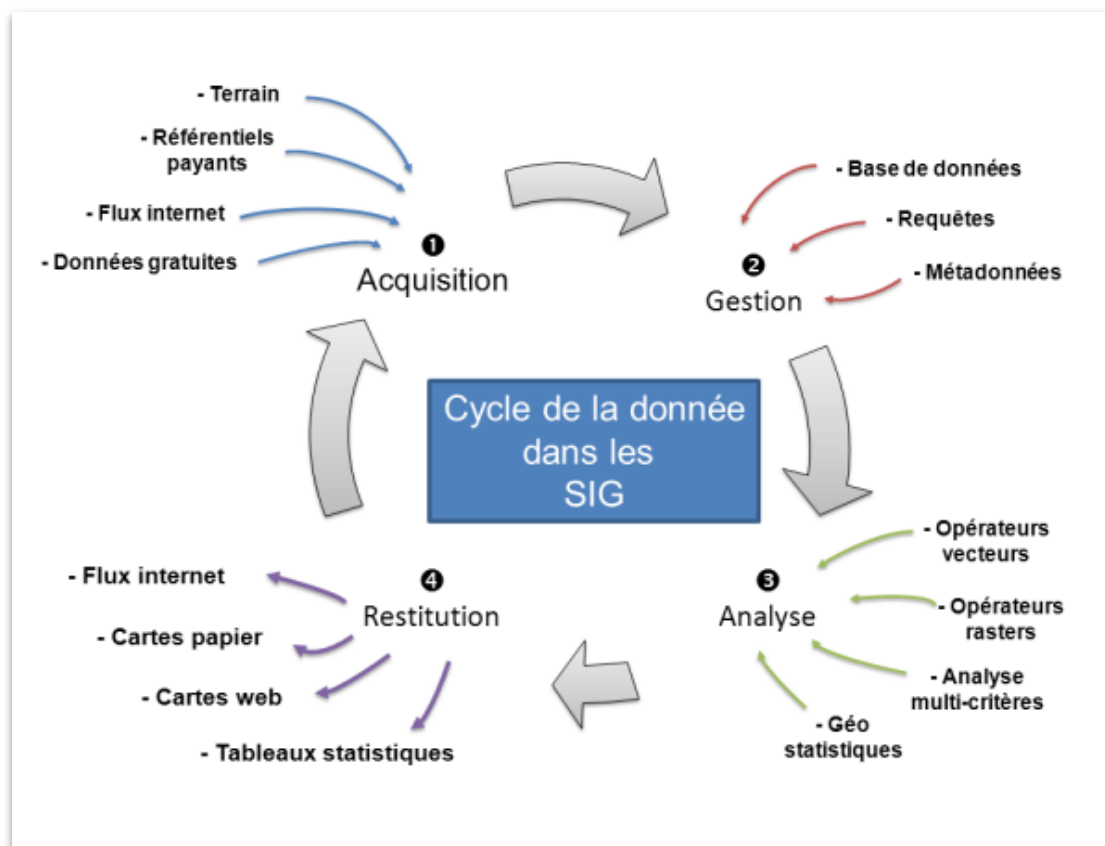


Figure 6: Les différentes fonctionnalités d'un SIG.

2.3. Rôles des SIG dans la cartographie des herbiers de Posidonie

2.3.1. Évaluation de l'état général de l'herbier de Posidonie

L'évaluation des herbiers à *Posidonia oceanica* repose sur la cartographie, outil clé pour leur suivi et gestion durable. Elle permet d'identifier les zones sensibles, d'analyser l'évolution spatiale des herbiers, de détecter les pressions anthropiques affectant leur dynamique écologique et constituer un indicateur fiable de la qualité environnementale des eaux côtières (Laurent, 2024). Les analyses spatiales orientent les stratégies de gestion et préservent les écosystèmes marins. Enfin, les cartes soutiennent la gouvernance en reliant dynamiques écologiques et pressions humaines (Holon et al., 2013).

2.3.2. Gestion et préservation des écosystèmes marins

La gestion et la préservation des herbiers de *Posidonia oceanica* sont essentielles pour la stabilité des écosystèmes marins méditerranéens. Ces herbiers jouent un rôle clé dans la biodiversité, la stabilisation des sédiments et la production d'oxygène, mais sont menacés par l'urbanisation, la pollution et l'ancrage des navires. Pour contrer ces pressions, des mesures telles que la création d'aires marines protégées, la réglementation des activités côtières et le suivi écologique sont mises en place. Une gestion efficace repose sur une approche intégrée impliquant scientifiques, acteurs locaux et décideurs afin d'assurer la résilience de ces habitats (Boudouresque et al., 2012).

2.3.3. Observation et suivi des changements environnementaux et impact des activités humaines

Dans un contexte de transformations environnementales, la surveillance des écosystèmes devient une priorité afin de mieux comprendre leur réaction face aux perturbations. La cartographie des herbiers de *Posidonia oceanica* est essentielle pour le suivi des évolutions du milieu marin, car ces écosystèmes jouent un rôle clé tout en étant exposés à une pression constante liée aux activités humaines et aux changements climatiques. En tant qu'espèces bio-indicatrices, leur déclin constitue un signal précoce des altérations environnementales, permettant ainsi d'anticiper et de mieux gérer les impacts écologiques (Alonso Aller et al., 2019).

L'évaluation des impacts des activités humaines sur les herbiers de *Posidonia oceanica* est cruciale pour comprendre les perturbations anthropiques affectant ces écosystèmes marins. Ces herbiers, particulièrement vulnérables à la pollution, à l'urbanisation côtière, au trafic maritime et à la pêche,

l'ancrage des bateaux cause des dommages considérables, conduisant à la fragmentation des herbiers, à la mise à nu de la couche morte et à la perturbation des sédiments (Arnaud et al., 2025).

Les impacts humains compromettent leur biodiversité et leurs fonctions écologiques essentielles, telles que la stabilisation des sédiments et la production d'oxygène (Boudouresque et al., 2012). Parmi les activités humaines mettant en danger ces herbiers, l'ancrage des bateaux cause des dommages considérables, conduisant à la fragmentation des herbiers, à la mise à nu de la couche morte et à la perturbation des sédiments.

La cartographie des herbiers et la surveillance des paramètres environnementaux sont des outils clés pour évaluer l'étendue des dégradations et suivre l'évolution de leur état. Ces analyses permettent d'identifier les zones les plus affectées et de mesurer l'ampleur des changements sur les écosystèmes marins (Blanco-Murillo et al., 2022).

3. Méthodes d'étude de la dynamique des herbiers à *Posidonia oceanica*

La cartographie des herbiers de *Posidonia oceanica* est essentielle pour la gestion durable et la conservation des zones côtières méditerranéennes. Différentes méthodes peuvent être mobilisées pour l'étude de la dynamique des herbiers de Posidonie selon les contextes environnementaux, les objectifs de l'étude et les moyens disponibles. On distingue deux principales approches méthodologiques : les méthodes classiques et modernes.

Parmi les méthodes classiques couramment employées, il y a les observations directes par plongée, qui permettent une description fine de la structure des herbiers, bien qu'elles soient limitées à de petites surfaces et demandent des moyens humains importants (Boudouresque et al., 2012). De même, la photographie aérienne, très utilisée pour les zones peu profondes, fournit une vue d'ensemble utile à l'échelle locale ou régionale (Meinesz et al., 1991).

En revanche, les méthodes dites modernes tels que la télédétection spatiale, basée sur les images multispectrales et hyper-spectrales, permettent de couvrir de vastes zones et d'assurer un suivi temporel de l'évolution des herbiers (Dekker et al., 2006). Néanmoins, leur inconvénient réside dans la faible résolution spatiale des images satellitaires à accès libre, comme Sentinel et Landsat, ainsi que l'augmentation de la profondeur et la pénétration de la lumière dans la masse d'eau qui affecte la précision des résultats. Pour les zones profondes ou turbides, les méthodes acoustiques telles que le sonar à balayage latéral ou le sondeur multifaisceaux offrent une meilleure cartographie du fond marin et de ses habitats avec plus de précision (Meleder et al., 2010).

Chapitre 2 - Matériels et méthodes

1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude porte sur deux plages situées dans la wilaya de Mostaganem : Petit Port et Stidia (**Figure 7**) Le choix des sites d'étude a été principalement guidé par la présence avérée de l'herbier de posidonie. Par ailleurs, des critères pratiques tels que la facilité d'accès et les conditions de travail et la connaissance préalable du terrain ont également été pris en compte, permettant une efficacité dans la collecte des informations et d'interprétation des résultats.

Ces plages, qui appartiennent au littoral occidental algérien, présentent une grande diversité géomorphologique et écologique, favorable à l'installation d'écosystèmes marins et d'habitats écologiques clés, tels que les herbiers à *Posidonia oceanica*.

La wilaya de Mostaganem est située au nord-ouest de l'Algérie, à 365 km à l'ouest d'Alger et à 80 km à l'est d'Oran, couvrant une superficie de 2 269 km². Elle est bordée par les wilayas de Chlef à l'est, Relizane au sud-est, Mascara au sud-ouest, et Oran à l'ouest. Son littoral s'étend sur plus de 124 km de linéaire côtier, allant de la plage de Sidi Mansour dans l'ouest aux Bahara de la côte est.

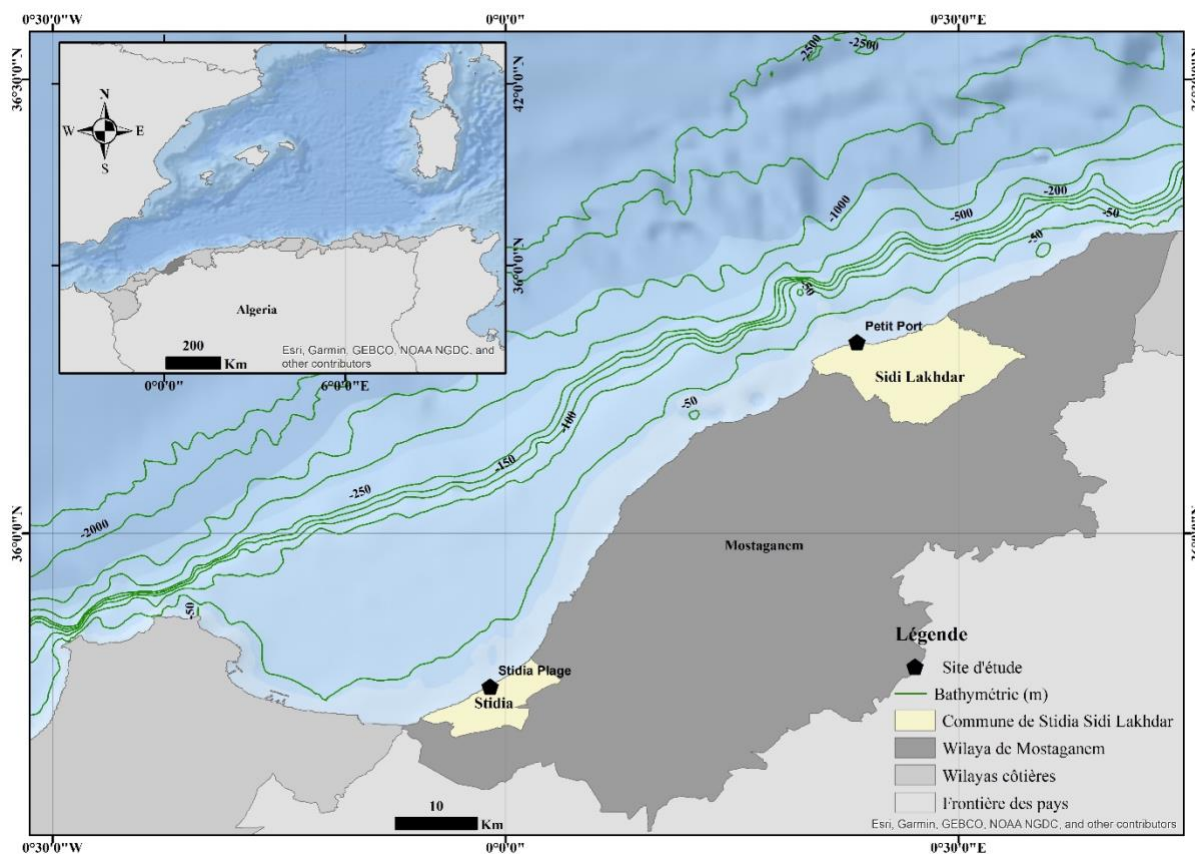


Figure 7: Localisation géographique des stations étudiées.

1.1.Contexte géographique, géomorphologique et écologique

La plage de Petit Port, située dans la commune de Sidi Lakhdar (wilaya de Mostaganem), à environ 35 km à l'est de la ville de Mostaganem. Elle s'étire sur une longueur approximative de 3 600 mètres et est localisée aux coordonnées géographiques 36°12' N / 0°23' E (**Figure 7**). Elle se caractérise par la présence d'un cordon dunaire bien développé en arrière plage, témoin d'une dynamique littorale active favorable à l'accumulation.

En revanche, la plage de Stidia est située à environ 20 km à l'ouest de la ville de Mostaganem (**Figure 7**). Elle s'étend sur environ 1 9500 mètres et s'insère dans un contexte morphologique accidenté de côte rocheuse sédimentaire dans la partie ouest et de côte mixte taillée dans de plages sableuses étroites endossées à des falaises mortes taillées dans des roches sédimentaires. Dans sa partie sous-marine, la plage de Stidia présente un substrat rocheux dur entre 0 et 3 mètres de profondeur, qui évolue vers un substrat meuble constitué de sables fins à grossiers en s'éloignant du rivage (Benzait, 2015).

1.2.Conditions climatiques et hydrodynamiques

La zone côtière de Mostaganem est soumise à un climat méditerranéen, marqué par des étés chauds et des hivers doux. La saison sèche s'étend sur une période de quatre à cinq mois, allant de la mi-mai à la mi-octobre, durant laquelle les précipitations sont rares. En revanche, la saison humide s'étale sur environ sept mois, avec des précipitations pouvant atteindre des valeurs mensuelles maximales de l'ordre de 55,2 mm, contribuant ainsi à l'alimentation hydrique des écosystèmes côtiers (Senouci, 2022). De plus, des baisses de température peuvent atteindre de 12 à 10 °C en hiver (Kaddour Seghir & Touahria, 2023).

La salinité de surface près de la côte varie entre 36 ‰ et 38 ‰. Ces fluctuations sont influencées par les variations des précipitations et des températures locales, avec un maximum observé en été. La salinité tend à diminuer légèrement de l'hiver à l'été, période correspondant aux températures les plus élevées (Benzait, 2015).

Les courants marins dominants, dirigés du nord-ouest vers le sud-est, sont influencés par les vents et la rotation terrestre, et jouent un rôle clé dans la dynamique des eaux côtières.

1.3.Contexte socio-économique

La plage de Petit Port est entourée de nombreuses constructions implantées à seulement quelques mètres du trait de côte, ce qui implique le rejet direct des eaux usées en mer, notamment en période estivale, lorsque la fréquentation touristique atteint son pic. Elle abrite à la fois un port de pêche et de plaisance ainsi qu'une plage d'échouage utilisée pour l'activité de pêche artisanale. Cette situation, renforcée par

une urbanisation dense et un abri de pêche adjacent, accentue les pressions anthropiques : rejets domestiques, activités de pêche, tourisme et exploitation agricole en périphérie. L'ensemble de ces facteurs engendre des perturbations notables sur les écosystèmes marins, notamment sur les herbiers de *Posidonia oceanica*, dont le déclin est particulièrement observable dans les zones les plus urbanisées (Bouchher, 2015). De la même manière, le littoral de Stidia subit une pression anthropique significative due à l'urbanisation côtière, la pêche artisanale, l'agriculture et le tourisme balnéaire. Très fréquentée par les pêcheurs et les plongeurs, cette zone dispose d'un abri de pêche et une urbanisation proche du rivage, à moins de 100 mètres. Ces usages intensifs affectent les écosystèmes marins, en particulier les herbiers de *Posidonia oceanica* (Kaddour Seghir & Touahria, 2023). De plus, sa position entre le port commercial de Mostaganem et le terminal pétrolier d'Arzew l'expose à des pollutions d'origine maritime, accentuées par les rejets directs d'eaux usées de la ville de Stidia dans le milieu marin, aggravant ainsi la dégradation de l'herbier (Belbachir, 2012).

2. Méthode de travail

2.1. Méthode de cartographie de la limite supérieure des herbiers de Posidonie

Dans un premier lieu, nous avons opté pour une démarche cartographique en utilisant un système d'information géographique (SIG), afin d'appréhender la répartition spatiale de la posidonie au niveau de sa limite supérieure. Cette cartographie a été effectuée en exploitant les images satellitaires fournies par le logiciel Google Earth Pro.

2.1.1. Description du logiciel Google Earth Pro et de ses fonctionnalités

Google Earth Pro est un outil de visualisation géospatiale développé par Google, qui nous a permis d'avoir un accès gratuit à une vaste base de données d'images satellites, de modèles 3D et d'informations topographiques. Sa capacité à afficher des images historiques constitue un atout majeur pour l'analyse spatio-temporelle des territoires (Mostefai & Kadi, 2021). Il propose une interface intuitive composée de plusieurs éléments essentiels qui facilitent la navigation et l'exploitation des données géospatiales.

2.1.2. Acquisition des données géographiques

L'étude de la dynamique de la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* a nécessité l'acquisition de données géographiques servant de base à l'élaboration du Système d'Information Géographique (SIG) dédié à la Posidonie. À cet effet, nous avons utilisé des images satellitaires issues de Google Earth Pro ainsi qu'une carte marine couvrant la zone côtière de Mostaganem (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Données collectées en vue de cartographier la Posidonie au-devant des plages de Stidia et de Petit Port (Mostaganem).

Données	Date	Résolution spéciale	Source
Image satellitaire Stidia	2023	0,15m	Google Earth Pro
Image satellitaire Petit Port	2020	0,15m	Google Earth Pro
Carte marine	2005	1 / 120.000	Service hydrographique des Forces Navales (SHFN)

1.1.1.1. Téléchargement des images satellitaires

Les images satellitaires des zones d'études situées au niveau de Petit Port et Stidia ont été acquises à l'aide du logiciel Google Earth Pro (**Figure 8**). La sélection de la date d'acquisition a été effectuée en prenant en compte quelques critères de qualité : la clarté des images, l'absence de bruit atmosphérique (aérosols, nuages ou fumée), des conditions météorologiques et hydrodynamiques favorables (absence de nuages, de vents forts, de vagues importantes et d'éventuels phénomènes de transport sédimentaire).

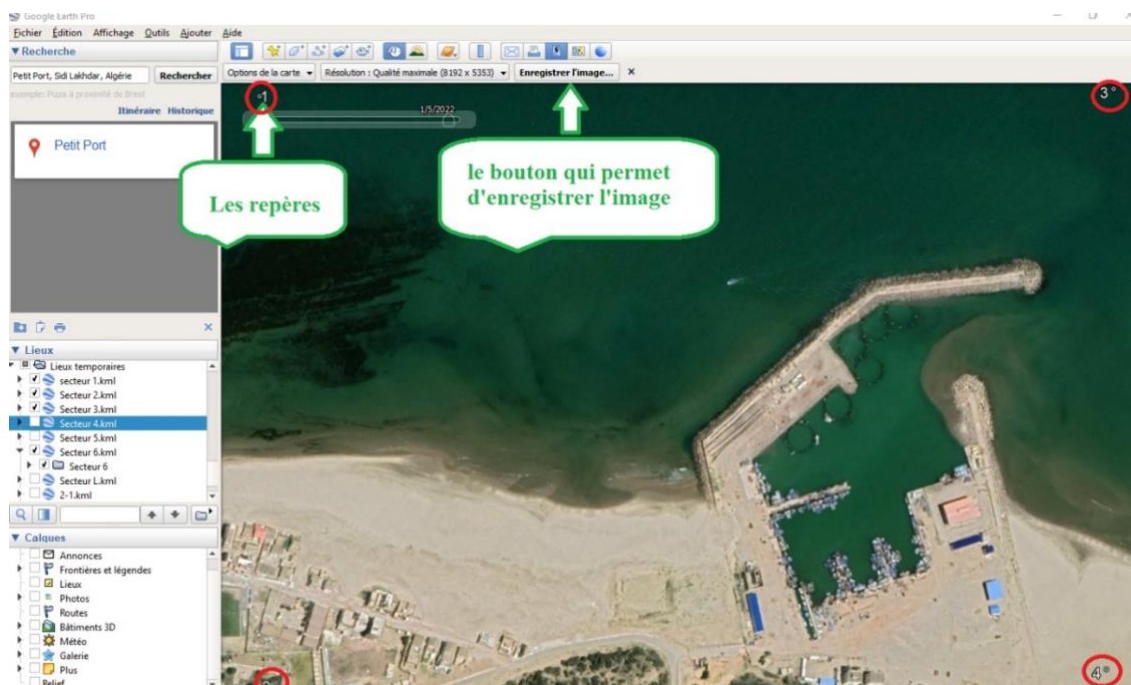


Figure 8: Processus d'acquisition des images satellitaires.

La résolution spatiale et temporelle des images a également constitué un critère déterminant. Les images ont été capturées à une altitude de 800 mètres afin d'optimiser la résolution spatiale et de permettre une délimitation précise de la limite supérieure des herbiers à *Posidonia oceanica*. Pour l'enregistrement des

images, quatre points de repère ont été définis et enregistrés au format KML (Keyhole Markup Language), format natif et interopérable qui facilite le processus ultérieur de géoréférencement (**Figure 8**). Enfin, un chevauchement entre les images acquises a été assuré afin d'éviter toute discontinuité spatiale et de garantir une couverture complète et homogène de la zone d'étude.

2.1.3. Manipulation et traitement des données dans le SIG

1.1.1.2. Description du logiciel ArcGis

ArcGis est un programme de système d'information géographique élaboré par l'entreprise américaine ESRI. Il facilite la collecte, l'organisation, la gestion, l'analyse, l'affichage et la diffusion d'informations géographiques (Bounab & Kanté, 2020).

Le logiciel ArcGIS est principalement composé des applications suivantes : ArcMap, ArcCatalog et ArcToolbox (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Interfaces du logiciel ArcGIS et leurs fonctions.

Interface	Fonctions principales
ArcMap	<ul style="list-style-type: none"> -Créer des cartes à partir des couches de données spatiales - Choisir les couleurs et symboles - Interroger les données -Analyser les relations spatiales - Concevoir la mise en page des cartes
ArcCatalog	<ul style="list-style-type: none"> - Parcourir les données spatiales (disque dur, réseau, Internet) - Rechercher et prévisualiser des données - Créer des entités - Gérer les métadonnées
ArcToolbox	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliser des outils d'analyse spatiale - Convertir des formats de données - Effectuer des projections - Interpoler des données -Réaliser divers types d'analyses géo-spatiales

1.1.1.3. Intégration des points de contrôle pour le géoréférencement

Une fois les images enregistrées, l'étape suivante consiste à les importer dans le logiciel ArcMap en vue de leur géoréférencement (Figure 9). Le géoréférencement est une procédure permettant d'attribuer à une donnée géographique un système de coordonnées géographiques précis, afin de positionner correctement des entités géographiques sur la surface terrestre.

Dans le cadre de cette étude, le système choisi est le WGS 1984 UTM Zone 31N pour le site de Petit Port et WGS 1984 UTM Zone 30N pour le site de Stidia. Le processus de géoréférencement est réalisé en utilisant l'outil Georeferencing d'ArcMap, qui permet d'ajuster l'image en fonction des points de contrôle préalablement définis (Figure 9).

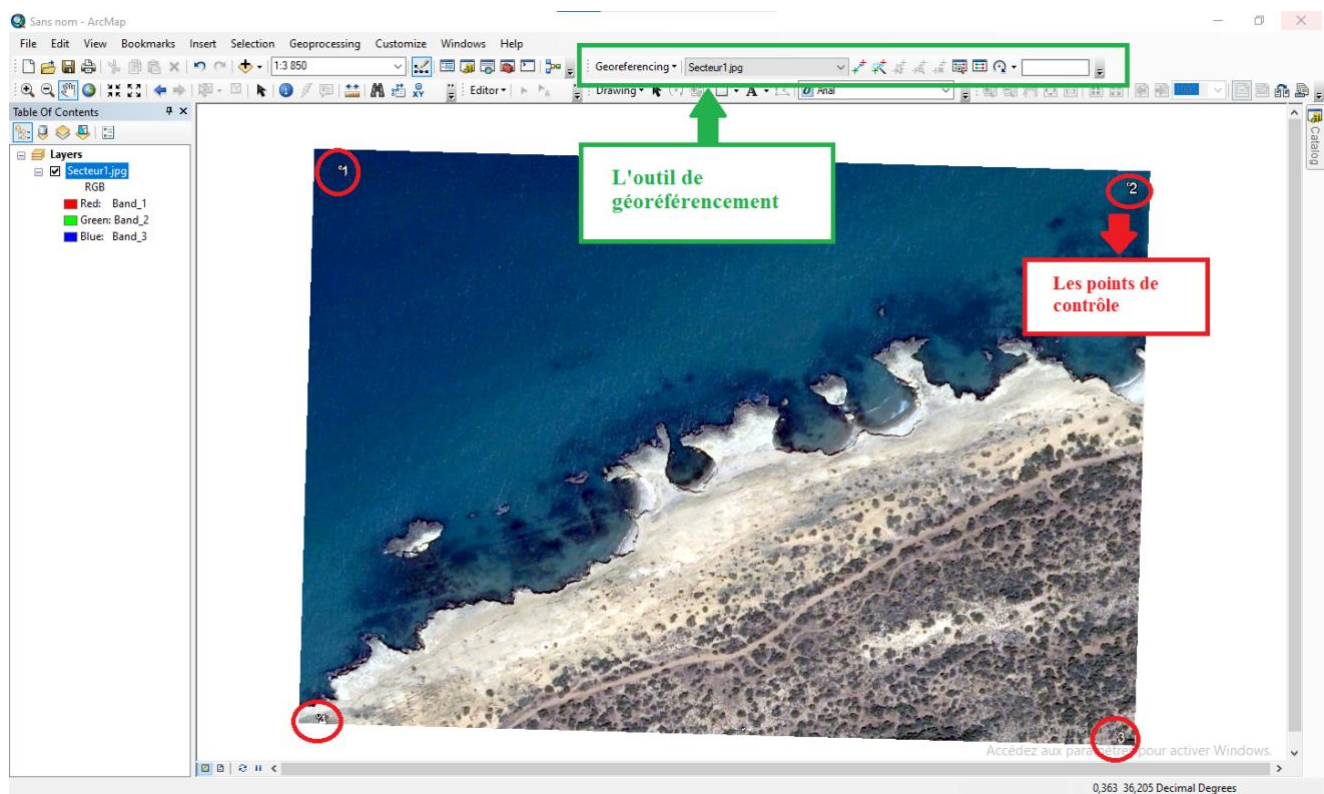


Figure 9: L'importation des repères de contrôle et le géoréférencement dans ArcMap.

À l'issue du géoréférencement des images satellitaires acquises via Google Earth Pro, un assemblage complet et homogène des images est obtenu, couvrant l'intégralité de la zone d'étude (Figure 10).

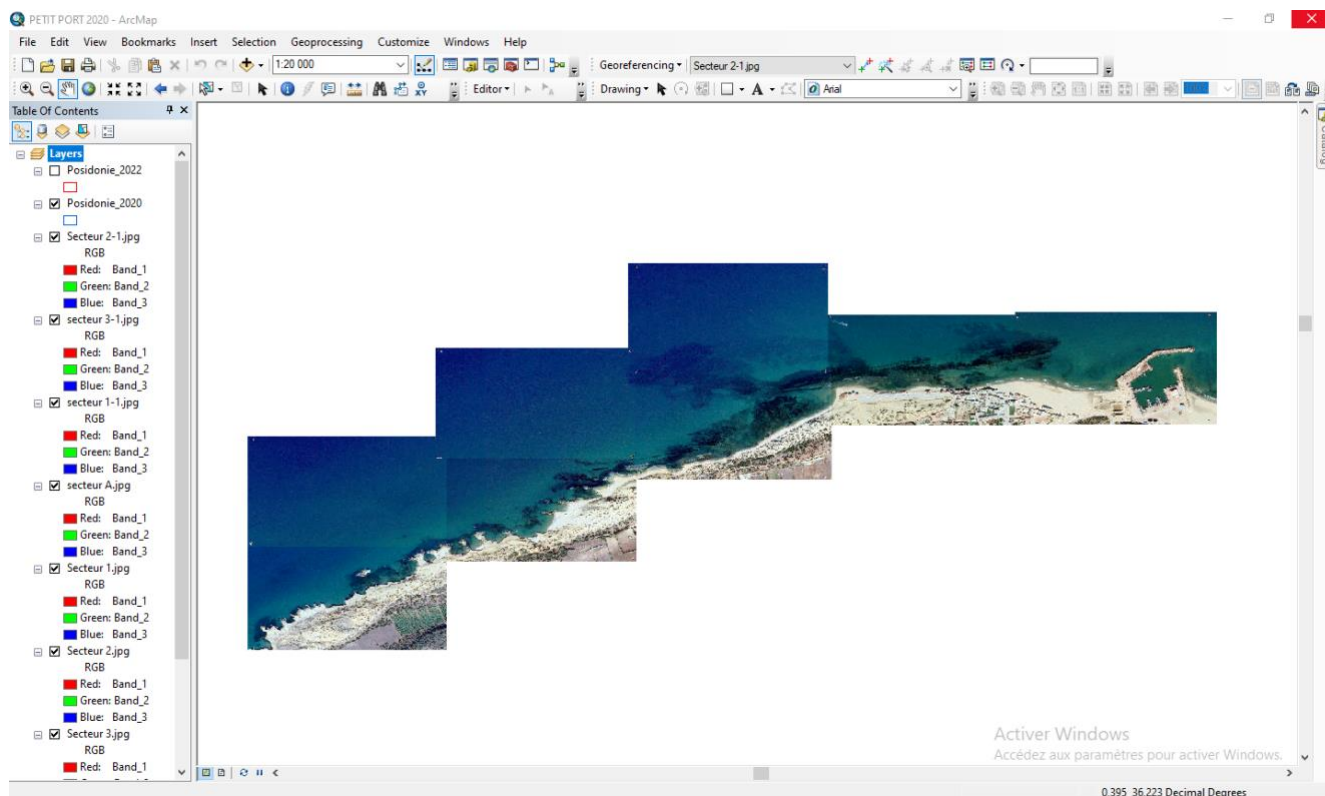


Figure 10: Ensemble d'images géoréférencées couvrant la zone d'étude.

2.1.4. Analyse des données dans SIG

1.1.1.4. Numérisation

La numérisation consiste à convertir les informations visuelles issues des images raster en entités vectorielles exploitables dans un Système d'Information Géographique (SIG). Pour ce faire, nous avons délimité la zone comprise entre le trait de côte et l'isobathe des 10 mètres de profondeur, où est rencontrée la limite supérieure de l'herbier de Posidonie, dans un premier temps. Ensuite, les surfaces potentiellement couvertes par l'herbier de Posidonie ont été numérisées, par photo-interprétation, identifiables sur l'image comme taches sombres (**Figure 11**).

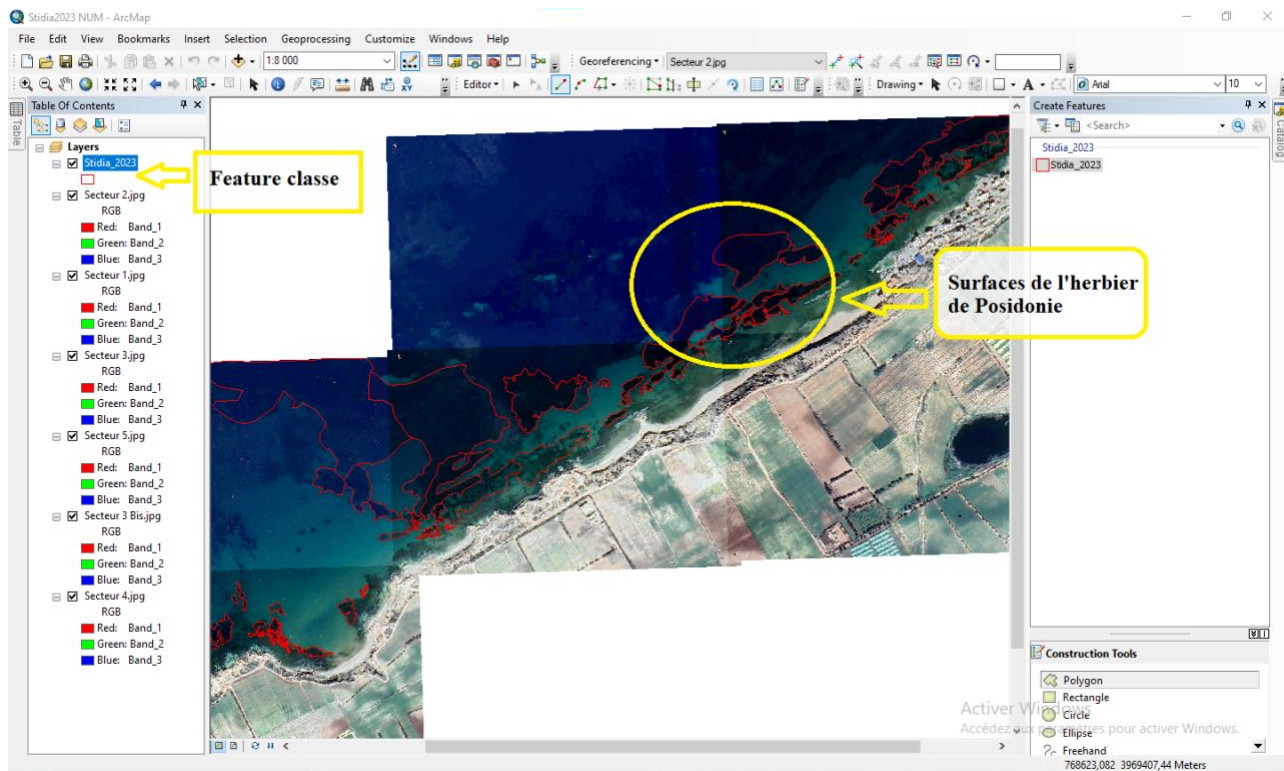


Figure 11: Processus de numérisation des surfaces d’herbiers marins au-devant de la Plage de Stidia (Mostaganem), à moins de 10 mètres de profondeur.

2.1.5. Typologie des herbiers à *Posidonia oceanica*

En Algérie, les herbiers à *Posidonia oceanica* présentent une grande diversité de configurations spatiales, influencées par les conditions environnementales locales et les pressions anthropiques croissantes. Selon (Hattour & Ben Mustapha, 2023) ces types sont les suivants :

- **Herbier continu :** C’est le type le plus fréquent en Méditerranée nord-occidentale. Il se présente sous forme d’une couverture végétale homogène, parfois interrompue par des structures érosives (tombants, inter-mattes) ou des mattes mortes non érosives, témoignant de la dynamique naturelle de l’habitat.
- **Herbier tigré :** Il s’agit de bandes étroites, larges de 1 à 2 mètres et s’étendant sur plusieurs dizaines de mètres, séparées par des zones de mattes mortes. Ces dernières sont fréquemment colonisées par des peuplements de *Cymodocea nodosa* associés à *Caulerpa prolifera*. Les feuilles de *Posidonia oceanica* y présentent une apparence frangeante
- **L’herbier récifal :** Il est constitué de cordons souvent pas très larges (2 à 10 m) et de quelques centaines de mètres de longueur séparés par des plages sableuses occupées le plus souvent par un peuplement à *Cymodocea nodosa* avec des *Caulerpa prolifera*.

- **L'herbier fragmenté** : L'herbier fragmenté de *Posidonia oceanica* se présente sous forme de nappes discontinues séparées par des zones nues ou colonisées par d'autres espèces. Il reflète souvent un état de dégradation ou une dynamique de recolonisation du milieu.
- **Matte morte / dégradé** : Zone où l'herbier de *Posidonia oceanica* a régressé, laissant une structure racinaire (matte) dénudée ou fragmentée. Elle témoigne d'une dégradation ancienne ou en cours.
- **Matte colonisée par des algues photophiles** : Surface de matte morte ou affaiblie colonisée par des algues aimant la lumière. Cela indique une perte de dominance de la Posidonie au profit d'espèces opportunistes.
- **Limite inférieure incertaine** : Zone profonde où la transition entre l'herbier et le substrat nu n'est pas nette. Souvent liée à une faible densité foliaire, une turbidité élevée ou des conditions de lumière limitantes.

2.1.6. Evaluation de la marge d'erreur

Un certain nombre d'erreurs et d'incertitudes méritent d'être prises en considération et analysées, notamment celles liées à la résolution des pixels (E_p), à la qualité du géoréférencement des images (ERMs) et à la précision de la numérisation (E_d). La combinaison de ces composantes, selon la formule ci-dessous, permet d'estimer l'erreur totale (E_t) (**Tableau 3**) (Bougherira et al., 2020; Kermani et al., 2016 ; Thieler et al., 2009).

$$E_t = \sqrt{E_p^2 + E_d^2 + ERMs^2}$$

Tableau 3 : Estimation de la marge d'erreur.

Année	Petit Port 2020	Stidia 2023
Erreur de pixel (EP) (m)	0,15	0,15
Erreur de géoréférencement des images (ERMs) (m)	0,31	0,34
Erreur de numérisation (Ed) (m)	1,96	1,92
Erreur totale (Et) (m)	1,99	1,96

2.2. Prélèvement et traitement des échantillons

❖ Petit Port

- Les sédiments superficiels ont été prélevés durant le 08 mai 2025,
- Trois stations ont été choisies pour le prélèvement dans chaque plage **A, B, C**,

- Le jour de prélèvement a été dans les bonnes conditions météorologiques (**Figure 12**).
- Il y a 3 échantillons avec un poids de 250 g.

❖ **Stidia**

- Les sédiments superficiels ont été prélevés durant l'année précédente par l'encadrant de ce mémoire.
- Trois stations ont été choisies pour le prélèvement dans chaque plage **A, B, C**
- Le jour de prélèvement a été dans les bonnes conditions météorologiques

Tableau 4 : Localisation géographique des stations d'observation et d'échantillonnage

Site	Stidia				Petit Port		
Station	A	B	C	D	A	B	C
Longitude (X°)	0,01718° O	0° 1'24.22"O	0° 1'13.20"O	0° 1'9.72"O	0,38102°E	0,38103°E	0,38484°E
Latitude (Y°)	35,83126° N	35°49'45.03"N	35°49'49.74"N	35°49'51.77"N	30,20953°N	36,20952°N	36,21084°N

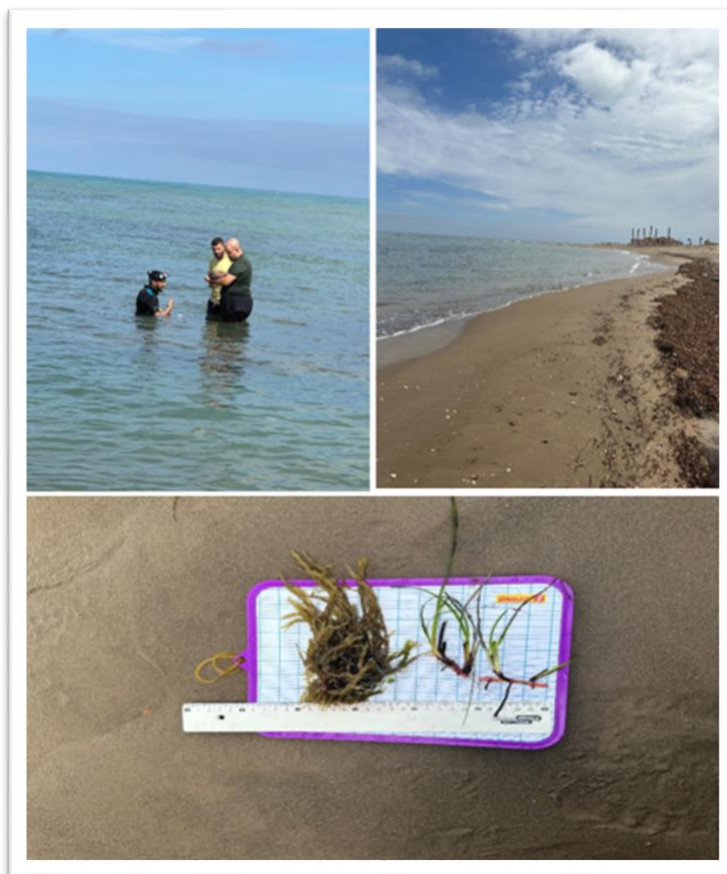


Figure 12: Prise d'échantillons et Observation des paramètres de vitalité de l'herbier de Posidonie.

1.1.1.5. Etude sédimentologique

1.1.1.6. Granulométrie

L'analyse granulométrique consiste à classer les différents grains constituant un échantillon de sédiment en utilisant une série de tamis emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas (0,05mm,0,08mm,0,1mm,0,2mm,1mm,2mm) ainsi que le tamis supérieur est fermé par un couvercle évitant toute perte de sédiment durant l'opération du tamisage. L'échantillon étudié est placé dans la partie supérieure des tamis, ainsi le classement des grains s'obtient par tamisage mécanique.

a. Mode opératoire

Pour chaque échantillon de sédiment, nous avons procédé de la manière suivante (**Figure 13**):

- Sécher une fraction de sédiment dans l'étuve pendant 24 h à 105°C.
- Peser 150 g de sédiment.
- Passer au tamisage sur une série de tamis, pendant 10 mn : constituée de haut en bas, de tamis de dimension décroissante.
- Peser le refus de chaque tamis à l'aide d'une balance de précision.
- Evaluer le pourcentage des refus de chaque tamis.



Figure 13: Les étapes de l'analyse granulométrique (a) Séchage du sédiment, (b) Pesage de 150 g de sédiment, (c) Tamisage.

b. Indices granulométriques

Les indices granulométriques permettent de caractériser la distribution des tailles de grains dans un sédiment. Selon Rivière (1977), il existe plusieurs indices granulométriques, mais dans le cadre de ce mémoire notre analyse va porter sur les indices suivants :

1. **Mode** : Il correspond à la classe granulométrique la plus représentée (le pourcentage le plus élevé), visible au point d'inflexion de la courbe cumulative., les courbes peuvent être :
2. **Médiane(Q50)** : C'est la taille de grain située à 50 % du poids cumulé. Elle représente le grain moyen et donne une indication sur la force du courant ayant transporté le sédiment.
3. **Quartiles** : **Q25** : diamètre correspondant à 25 % du poids, **Q75** : diamètre correspondant à 75 % du poids.
4. **Indice de classement (SO)** : Défini par Trask (1930), il mesure le degré de tri des sédiments. Un SO = 1 indique un tri parfait. Plus l'indice est élevé, plus la dispersion granulométrique est importante. Il reflète les effets du transport et du dépôt, et ne s'applique pas aux sédiments bimodaux (**Tableau 5**).

Tableau 5: Valeurs du SO représentant les types de classement (Rivière,1977).

SO	1-1,5	1,5-2,5	2,5-3	3-4	4
Classement	Très bien classé	Bien classé	Normalement classé	Faiblement classé	Mal classé

1.1.1.7.Matière organique

On a suivi la méthode thermique, elle consiste à déterminer la perte de masse d'un échantillon 02 g préalablement séché et mis dans les creusets à température 70°C pendant 24 heures.

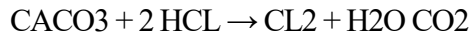
a. Mode d'opérateur

- Sécher les échantillons de sédiment à l'étuve (105°C) pendant 24 h.
- Peser 04 creusets préalablement étiquetés et noter leurs poids respectifs (m0),
- Peser 10 g de sédiments de chaque échantillon (m1), que l'on va mettre dans les creusets,
- Transmettre les creusets avec le sédiment dans le Four à moufle, pour une calcination à 450 °C pendant 2 h.
- Retirer les creusets du four à moufle à l'aide d'une pince,
- Laisser refroidir les sédiments dans le dessiccateur, à l'abri de l'humidité,

- Peser les creusets avec le sédiment (m_2) et en déduire la masse de la matière organique perdue (matière organique = $m_0 + m_1 - m_2$).

1.1.1.8. Calcimétrie

La teneur en carbonates des sédiments brut a été déterminée à l'aide d'un calcimètre de Bernard. Le principe c'est de carbonater à l'aide de l'acide chlorhydrique (HCL) à 30 % une masse déterminée d'un échantillon préalablement broyé. L'essai effectuée sur 0,3 g d'échantillons finement broyé ; Après attaque à l'acide chlorhydrique 30 % qui réagit avec les carbonates selon formule suivante :



a. Mode opératoire

- Préparer une solution saturée de NaCl.
- Tarer la balance puis peser 0.3g de l'échantillon broyé.
- Remplir au même niveau le niveau de la solution saturé en NaCl de la colonne graduée et de l'ampoule du calcimètre, ensuite, on note le volume v_1 indiqué sur la colonne graduée.
- Introduire 0.3 g de carbonate pur ou 0.3 g de l'échantillon à étudier dans l'Erlenmeyer (**Figure 14**).
- Rempli un petit tube (cuvette) avec de l'acide chlorhydrique (HCl), que l'on introduit dans l'erenmeyer avec une pince et avec précaution pour ne pas le verser sur l'échantillon.
- Fermer l'Erlenmeyer à l'aide d'un bouchon relié au tube gradué du calcimètre de Bernard.
- Renverser la cuvette contenant l'acide sur l'échantillon.
- Agiter de temps en temps l'Erlenmeyer pour activer la réaction.
- Noter le volume V_2 sur la colonne graduée, à la fin de l'effervescence (fin de la réaction).
- La différence des volumes $V_2 - V_1$ correspond au volume de CO_2 dégagé (**Tableau 6**).

Tableau 6: Limites et nomenclature utilisée dans la cartographie des carbonates.

Limites (%)	Faciès
<20	Très faiblement carbonaté
20-40	Faiblement carbonaté
40-60	Moyennement carbonaté
60-80	Fortement carbonaté
Sup à 80	Très fortement carbonaté



Figure 14 : Introduction de 0,3g de carbonate.

2.3.Observation et levé *in situ* de l'état de vitalité de l'herbier de Posidonie

La plongée sous-marine est l'une des méthodes les plus fiables pour la cartographie des herbiers de *Posidonia oceanica*. Elle permet une reconnaissance directe des habitats, la prise de photographies géolocalisées, et le relevé précis des limites des herbiers grâce à l'utilisation de GPS RTK placés sur un support flottant suivi par le plongeur (Pergent et al., 1995).

Les observations *in situ* sont essentielles pour valider les données issues de la télédétection et des techniques acoustiques, et pour mieux comprendre la dynamique spatiale et écologique des herbiers. L'exploration sous-marine, pratiquée en apnée ou à l'aide d'un scaphandre autonome, a permis la réalisation de nombreux relevés cartographiques détaillés des herbiers, souvent à une échelle supérieure au 1/5000^e (Meinesz et al., 2020).

D'après Denis et al. (2002), plusieurs paramètres sont nécessaires pour évaluer la vitalité de l'herbier de Posidonie tels que :

A. Densité de l'herbier

La densité des faisceaux de la Posidonie est un paramètre clé de la vitalité de l'herbier. Il existe une relation théorique entre la densité des faisceaux et la profondeur, permettant de classer l'herbier en cinq

catégories (**Tableau 7**) : densité excellente, bonne, moyenne, médiocre ou mauvaise (Pergent Martini et al., 2010).

Tableau 7 : Caractérisation de l’herbier de Posidonie en fonction de la densité des faisceaux foliaires par mètre carré (Giraud, 1977).

Densité par m ²	Type d’herbier
Plus de 700 faisceaux/m ²	Herbier très dense
De 400 à 700 faisceaux/m ²	Herbier dense
De 300 à 400 faisceaux/m ²	Herbier clairsemé
De 150 à 300 faisceaux/m ²	Herbier très clairsemé
De 50 à 150 faisceaux/m ²	Semi herbier
Moins de 50 faisceaux/m ²	Faisceaux isolé

B. Taux de recouvrement (%)

Ce paramètre correspond au pourcentage de surface occupée par l’herbier de Posidonie vivante par rapport aux zones non colonisées (sable, matte morte, roche). Il varie en fonction de l’état de vitalité de l’herbier. Le taux de recouvrement tend à diminuer avec la profondeur et dans les zones soumises à des conditions défavorables au développement, telles que la proximité d’aménagements ou de rejets anthropiques (Denis et al., 2002). Dans ce mémoire, nous avons estimé le taux de recouvrement par observation visuelle directe, à l’aide d’un quadra de 50 × 50 cm (**Figure 15**).Le pourcentage de recouvrement constitue un indicateur de l’état de l’herbier proposée par Giraud (1977) (**Tableau 8**).

Tableau 8 :Pourcentage de recouvrement selon Giraud 1977 .

Pourcentage de recouvrement		
Limite supérieure	Limite inférieure	Diagnostic
Inférieur à 40%	Inférieur à 20 %	Faible recouvrement
40 % à 80 %	20 % à 50 %	Recouvrement moyen
Supérieur à 80 %	Supérieur à 50 %	Fort recouvrement



Figure 15: Évaluation des paramètres de vitalité de l’herbier à *Posidonia oceanica*.

C. Déchaussement des rhizomes

Le déchaussement des rhizomes traduit généralement l'existence d'un déficit sédimentaire de l'herbier. Cette mesure permet de classer l’herbier en trois catégories selon la compacité de la matse sous-jacente (Meinesz et al., 2020): allant de moins de 5 cm (faible déchaussement) à plus de 15 cm (déchaussement important) (Denis et al., 2002) (**Tableau 9**). Un déchaussement important entraîne une fragilisation de l’herbier, ce qui accroît sa vulnérabilité vis à vis des actions de mouillages et de chalutage.

Tableau 9 : Echelle d’évaluation du déchaussement des rhizomes (Charbonnel et al., 2000).

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

D. Pourcentage de rhizomes plagiotropes

Les rhizomes plagiotropes de *Posidonia oceanica* permettent une extension latérale de l’herbier, favorisant la colonisation du substrat et la connexion physiologique entre les rameaux. Cette croissance horizontale assure une meilleure distribution des ressources, renforçant la résilience de la plante face aux conditions environnementales défavorables, comme le manque de lumière. Des recherches récentes

soulignent l'importance de cette stratégie clonale pour la stabilité et la survie de l'écosystème marin méditerranéen (Ruocco et al., 2021) (**Tableau 10**).

Tableau 10 : Vitalité de l'herbier (tendance à la progression) en fonction des pourcentages moyens de rhizomes plagiotropes mesurés en limite supérieure d'herbier (Denis, 2002).

Pourcentage de rhizomes plagiotropes	Interprétation
Inférieur à 30%	Herbier généralement stable, avec peu ou pas de progression
30 % à 70%	Légère tendance à la progression
Supérieur à 70%	Nette tendance à la progression

E. Evaluation de la dynamique de l'herbier de Posidonie

L'évaluation de la dynamique de l'herbier à *Posidonia oceanica* peut être réalisée à partir de paramètres de vitalité mesurés in situ, notamment le long de la limite supérieure de l'herbier. Parmi les indicateurs les plus utilisés figurent la densité des faisceaux foliaires, le taux de recouvrement de la prairie, et la proportion de rhizomes plagiotropes. Ces observations, effectuées en plongée sous-marine, permettent d'interpréter l'état évolutif de l'herbier. Quatre types de limites sont ainsi identifiables : progressive, indiquant une extension de l'herbier ; franche, traduisant une stabilité ; érosive, témoignant d'une perte modérée ; et régressive, marquée par une régression nette (**Tableau 11**). Cette typologie constitue une base essentielle pour comprendre la dynamique spatio-temporelle des herbiers et orienter les mesures de gestion. D'après (Denis et al., 2002) :

Tableau 11 : Différents types de limite pour évaluer la dynamique de l'herbier

Type de limite	Caractéristiques principales	Interprétation écologique
Limite progressive	Présence dominante de rhizomes plagiotropes (croissance horizontale).	Indique une dynamique d'expansion de l'herbier sur le substrat environnant.
Limite franche	Présence majoritaire de rhizomes orthotropes (croissance verticale), avec une lisière nette entre l'herbier et le substrat nu.	Reflète une stabilité de l'herbier dans un milieu aux conditions équilibrées
Limite érosive	Présence d'un tombant de mat, avec une discontinuité brutale entre l'herbier et le sédiment nu, causée par l'érosion liée à l'hydrodynamisme ou aux courants de fond.	Témoigne d'une perte de surface végétalisée par érosion ; limite souvent fixe.
Limite régressive	Présence de mat morte accompagnée de quelques faisceaux isolés, vestiges de l'ancienne position de l'herbier.	Indique un recul actif de l'herbier, signe de dégradation ou de stress intense.

Chapitre 3 - Résultats et discussion

Résultats

1.2. Cartographie de la répartition des herbiers à *Posidonia oceanica*

Dans le cadre de ce mémoire, la cartographie de la répartition de *Posidonia oceanica* a été réalisée sur la base d'images satellitaires issues de Google Earth Pro, selon la technique de photo-interprétation. Ce travail de cartographie s'est concentré sur les deux sites côtiers de la wilaya de Mostaganem, à savoir la plage de Petit Port (Commune de Sidi Lakhdar), analysé à partir d'une image satellitaire daté de 2020, et la plage de Stidia (Commune de Stidia), analysé à partir d'une image satellitaire de 2023. Le choix de ces dates repose d'abord sur des critères techniques liée à la qualité des images, notamment la faible turbidité de l'eau et une très faible (ou absence) de couverture nuageuse, permettant une bonne détection de la limite supérieure de l'herbier, située entre 0 et 10 m de profondeur.

Pour chacun des sites, une typologie éco-dynamique des formations à *Posidonia oceanica* a été appliquée, permettant de distinguer la typologie suivante : herbier continu, herbier fragmenté, herbier récifal, herbier tigré, matte morte/dégradée, matte colonisée par des algues photophiles, limite inférieure incertaine, et substrat meuble. La surface occupée par chaque typologie a été calculée à l'aide d'un système d'information géographique (SIG), et les résultats sont présentés dans le graphique et les cartes ci-dessous (**Figure 16** et **Figure 17**, **Figure 18**).

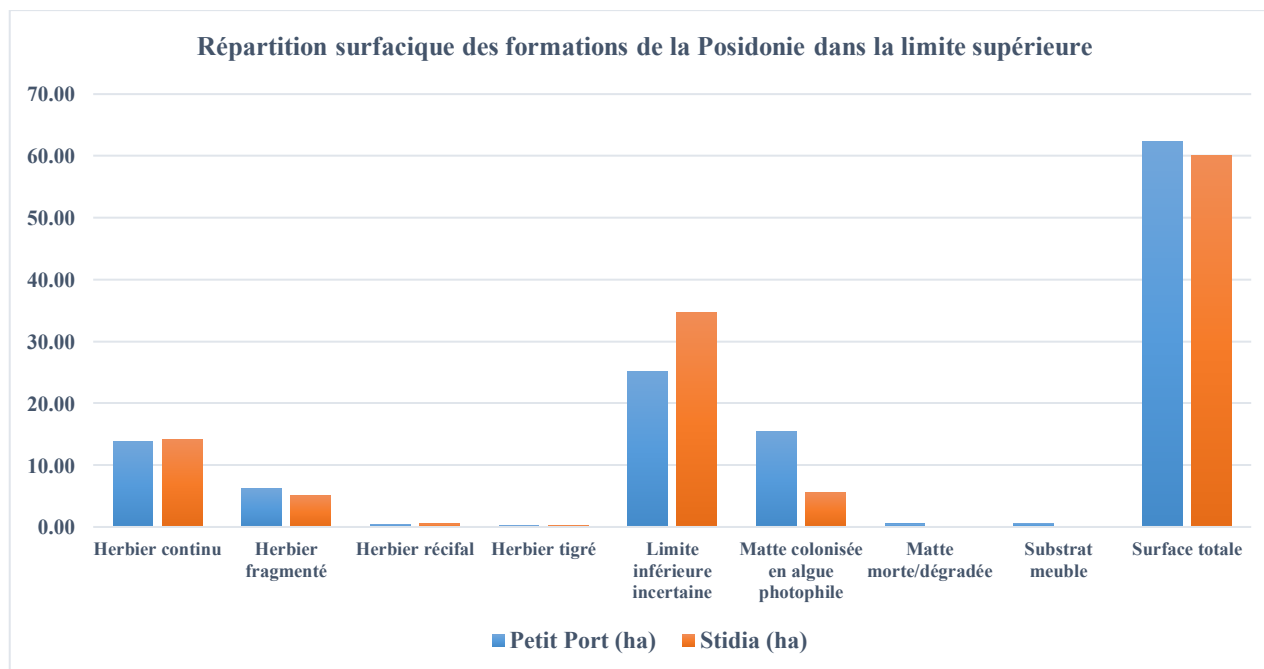


Figure 16 : Répartition surfacique des formations de la Posidonie dans la limite supérieure, au niveau des plages de Petit Port et Stidia.

1.2.1. Analyse de la répartition des formations à *Posidonia oceanica* au niveau de la plage de Petit Port

La superficie totale cartographiée au niveau de la plage de Petit Port est estimée à 63,37 ha. Parmi les types d'herbiers identifiés, l'herbier continu représente une surface de 13,76 ha, soit 22,05 % de la surface analyse, ce qui témoigne d'une certaine stabilité écologique sur plusieurs secteurs. L'herbier fragmenté couvre 6,22 ha, suggérant des dynamiques de perturbation ou de dégradation localisée. (**Figure 17**).

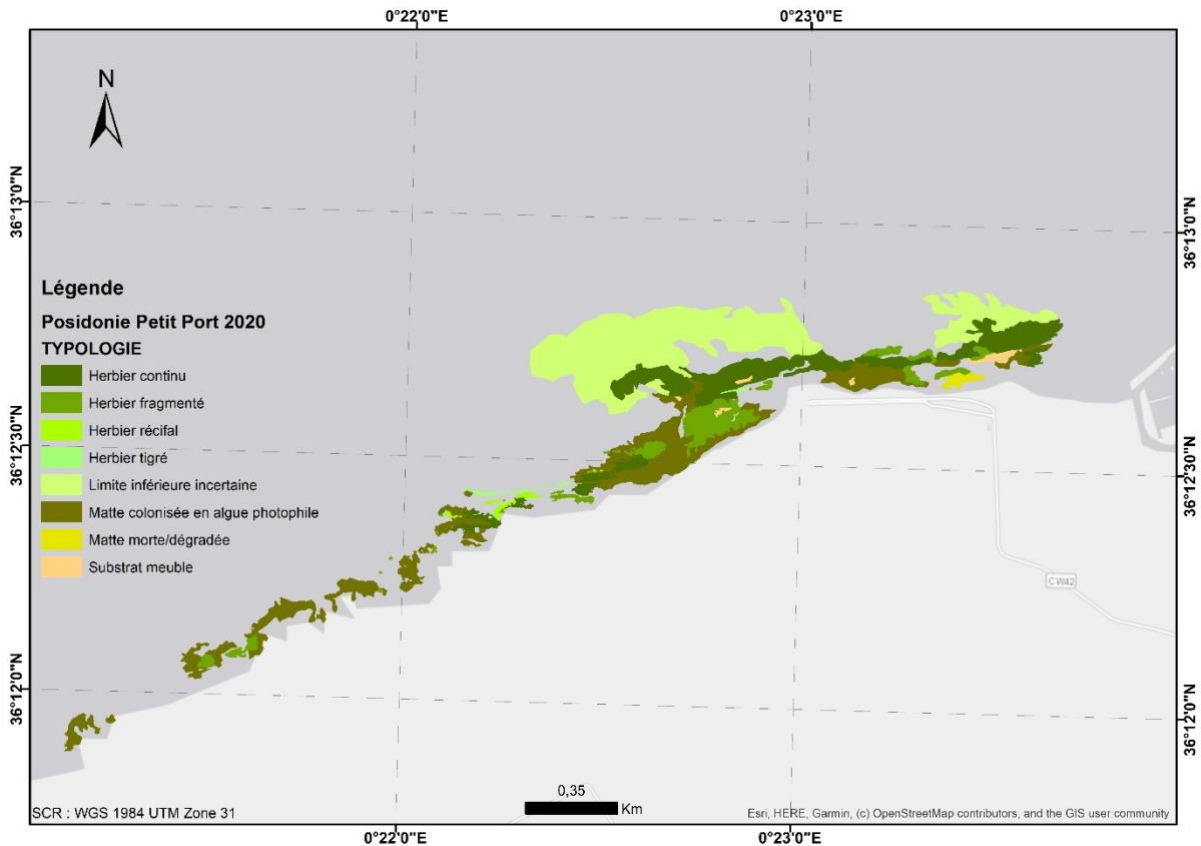


Figure 17: Cartographie des formations de Posidonie au niveau de la plage de Petit Port.

Sur la base de sa morphologie rectiligne et discontinue, deux formations particulières ont été identifiées : l'herbier tigré (0,31 ha) et l'herbier récifal (0,47 ha). Ces formations sont visuellement identifiées sur les images satellitaires, mais elles demanderaient des vérifications *in situ* pour leur validation. En effet, d'après (Boudouresque et al., 2012) l'herbier tigré se manifeste par des bandes d'herbier alternées avec des mattes mortes alors que l'herbier récifal est caractérisé par des crêtes de matte surélevée et des feuilles qui frôlent la surface de la mer. Leur apparition pourrait s'expliquer par la présence de micro-reliefs sous-marins, ou à un hydrodynamisme érosif affectant sur la matte.

La présence d'étendue de mattes colonisées par des algues photophiles est significative, avec 15,40 ha (soit 24,69 %), ainsi que la présence de mattes mortes ou dégradées (0,51 ha). Ces deux catégories sont des indicateurs de dégradation de l'herbier à *Posidonia oceanica*, , probablement dus aux rejets d'eaux usées, activités portuaires, à l'urbanisation à proximité immédiate de la mer, ou encore la surfréquentation touristique estivale.

Enfin, les limites inférieures incertaines couvrent 25,08 ha, soit près de 40 % de la surface totale. Ce pourcentage élevé est lié à la difficulté d'analyse cartographique due à la transition bathymétrique floue, rendant la photo-interprétation difficile.

1.2.2. Analyse de la répartition des formations à *Posidonia oceanica* au niveau de la plage de Stidia

La surface totale cartographiée sur le site de Stidia est légèrement inférieure, estimée à 60,12 ha. L'herbier continu y est légèrement plus étendu qu'à Petit Port, avec 14,16 ha (soit 23,56 %), traduisant un état de conservation relativement favorable dans les zones peu profondes. L'herbier fragmenté représente 5,03 ha, une proportion équivalente à celle observée à Petit Port, témoignant le même niveau de dégradation (**Figure 18**).

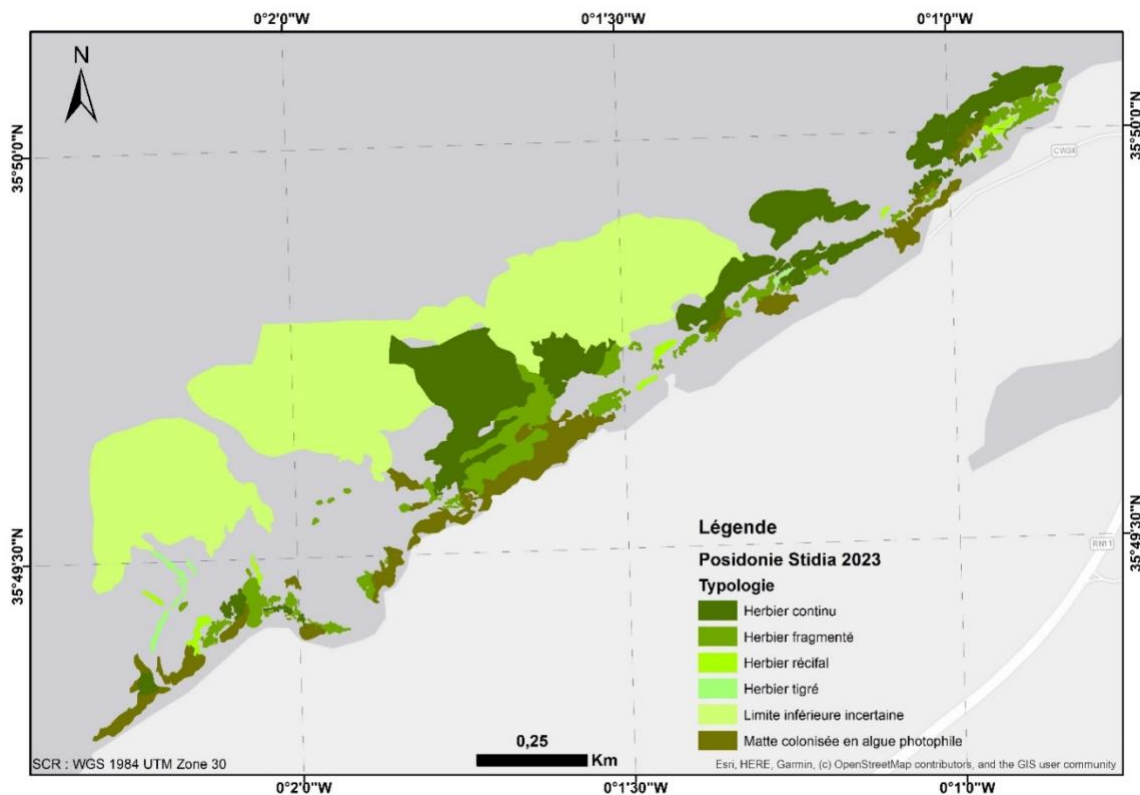


Figure 18: Cartographie des herbiers de Posidonie de la plage de Stidia 2023.

Les formes tigrées (0,27 ha) et récifales (0,55 ha) ont également été identifiées au niveau de la limite supérieure à Stidia. Tout comme l'herbier de Petit Port, ces formations doivent être interprétées avec prudence. Leur présence pourrait indiquer soit des dynamiques complexes, telles que l'alternance de phases d'expansion et de régression de la matte, soit une hétérogénéité bathymétrique favorisant leur développement. Seule une validation sur le terrain pourrait permettre de trancher définitivement sur leur nature (Boudouresque et al., 2006).

Par ailleurs, la surface occupée par les mattes colonisées par des algues photophiles est réduite (5,51 ha), tout comme l'absence de matte morte/dégradée, contrairement à Petit Port. Cela suggère que le site de Stidia présente moins de signes visibles d'une dynamique régressive. De même, la proportion très élevée de limites inférieures incertaines (34,60 ha, soit 57,56 %) suggère la présence de vastes herbiers denses en allant vers le large.

Les deux sites présentent quelques caractéristiques distinctes. Alors que Petit Port montre des valeurs largement supérieures concernant les surfaces de mattes mortes et mattes colonisées d'algues photophiles, à Stidia on note une prédominance d'herbiers continus et moins fragmentés.

1.3. Analyse de la vitalité de l'herbier à *Posidonia oceanica*

L'évaluation de l'état de vitalité de l'herbier à *Posidonia oceanica* repose sur l'analyse de plusieurs paramètres mesurés directement sur le terrain, notamment la densité des faisceaux foliaires, le taux de recouvrement, le déchaussement des rhizomes et la proportion de rhizomes plagiotropes. Ces indicateurs, couramment utilisés dans les travaux de surveillance écologique (Boudouresque et al., 2006 ; Pergent-Martini et al., 1999), permettent d'appréhender l'état de santé de l'herbier et sa dynamique (progression ou régression).

1.3.1. Plage de Stidia

Les quatre stations étudiées à Stidia (A, B, C et D) présentent globalement des valeurs de vitalité qui traduisent un bon état écologique de l'herbier dans ce secteur (**Tableau 12**). Les densités de faisceaux varient de 564 à 768 faisceaux/m², avec un maximum enregistré à la station D. Ces valeurs sont compatibles avec les seuils généralement admis pour des herbiers en bon état (Pergent. Martini et al., 2010 ; Giraud, 1977). Le taux de recouvrement est également élevé, oscillant entre 65 % et 85 %, indiquant une couverture végétale continue, particulièrement dans les stations C et D, caractérisé par un substrat dur (rocheux), où la nature du substrat favorise un ancrage des rhizomes.

Tableau 12 : Observation et levés *in situ* de l'état de vitalité de l'herbier à *Posidonia oceanica*.

Station	Stidia				Petit Port		
	A	B	C	D	A	B	C
Longitude (X°)	0,01718° O	0° 1'24.22"O	0° 1'13.20"O	0° 1'9.72"O	0,38102°E	0,38103°E	0,38484°E
Latitude (Y°)	35,83126° N	35°49'45.03"N	35°49'49.74"N	35°49'51.77"N	30,20953°N	36,20952°N	36,21084°N
Distance (m)	78	110	88	93	17	32	52
Profondeur (m)	3 – 4	1.8 – 2	1.4 - 1.6	2.1 -2.3	1.3	0.6	0.7
Substrat		Meuble	Rocheux	Rocheux	Matte morte	Meuble	Sable fin
Densité faisceaux / m ²	Dense	564	704	768	432	608	Cemodocea
Recouvrement %	80	65	85	80	45	30	80
Déchaussement (cm)	8	6	0	4	7	8	Ensablement
Rhizome plagiotrope	/	20	15	25	/	/	/

De même, le déchaussement des rhizomes, compris entre 4 et 8 cm, indiquent un déchaussement faible à modéré, au sens de Denis et al., (2002), ce qui indique une exposition raisonnable du système racinaire. La présence de rhizomes plagiotropes dans les trois stations (B, C et D), avec des taux variant de 15 à 25%, pourrait témoigner d'une stabilité de l'herbier.

La station A, en raison du nombre très élevé des faisceaux dépassant 700 faisceaux/m², est qualifiée comme herbier très dense, ce qui confirme une vitalité élevée. Ce bon état de vitalité pourrait être attribué à une pression anthropique relativement modérée à Stidia (**Figure 19**).



Figure 19 : Observation directe de l'herbier de Posidonie à Stidia.

Par ailleurs, cette limite supérieure est caractérisée par la présence de matte morte, colonisée par des algues photophiles, tels que : *Caulerpa prolifera*, *Cymodocea nodosa*, accompagnée de quelques faisceaux isolés, vestiges de l'ancienne position de l'herbier, qui traduit un recul actif, signe de dégradation ou de stress environnemental, au sens de Denis et al., (2002).

1.3.2. Plage de Petit Port

Les stations d'observation à Petit Port (A, B et C) indiquent un état de vitalité contrasté. Les densités de faisceaux varient de 432 faisceaux/m² à la station A à 608 faisceaux/m² à la station B, ce qui reste globalement inférieur aux valeurs observées à Stidia. Les taux de recouvrement sont également plus faibles dans les stations A (45 %) et B (30 %), suggérant une fragmentation de l'herbier et une perte de couverture.

Le substrat observé dans ces stations est également révélateur : matte morte à la station A et substrat meuble à la station B, signe d'un herbier peu stable, en particulier en cas d'hydrodynamisme élevé ou d'envasement. Le déchaussement des rhizomes, mesuré entre 7 et 8 cm, indique un déracinement modéré mais plus important que celui observé à Stidia, pouvant résulter de l'érosion des sédiments, de la réduction des apports sédimentaires voire du piétinement en masse lors de la saison estivale.

Au niveau de la station C, nous avons relevé une large répartition de la plante à *Cymodocea nodosa* sur un substrat meuble de sable fin, avec un recouvrement de 80 %, qui remplace un ancien herbier de Posidonie sur une matte morte. Ce phénomène est souvent observé dans des milieux perturbés, où les conditions environnementales deviennent plus favorables à des espèces pionnières à croissance rapide, au détriment de *P. oceanica* (Boudouresque et al., 2006).

Enfin, l'absence de rhizomes plagiotropes dans toutes les stations de Petit Port, pourraient traduire un état stable, voire de régression.

1.4. Analyse Sédimentologique

1.4.1. Granulométrie

L'analyse granulométrique montre que les deux plages étudiées (**Tableau 13**) Stidia et Petit Port, présentent une dominance des fractions sableuses fines à moyennes, avec un mode (Mo) stable de 0,2 mm dans toutes les stations, indiquant une homogénéité sédimentaire à l'échelle des deux sites.

Tableau 13 : Indices granulométriques obtenus dans les deux sites d'étude

Indices granulométriques	Petit Port			Stidia		
	Station 1	Station 2	Station 3	Station 1	Station 2	Station 3
Mode (Mo) mm	0,2	0,2	0,2	0.2	0.2	0.2
Médiane (Me) mm	0,132	0,147	0,144	0.147	0.150	0.153
Quartile supérieur (75%)	0,166	0,174	0,172	0.174	0.175	0.179
Quartile inférieur (25%)	0,097	0,120	0,115	0.121	0.124	0.126
Indice de classement (So)	1,306	1,205	1,222	1.200	1.186	1.192
Classement	Tres bien classé					

Les médianes (Me) varient de 0,132 mm à 0,153 mm pour les deux sites, ce qui situe la majorité des particules dans la gamme des sables fins à moyens, conformément aux plages soumises à une hydrodynamique côtière modérée.

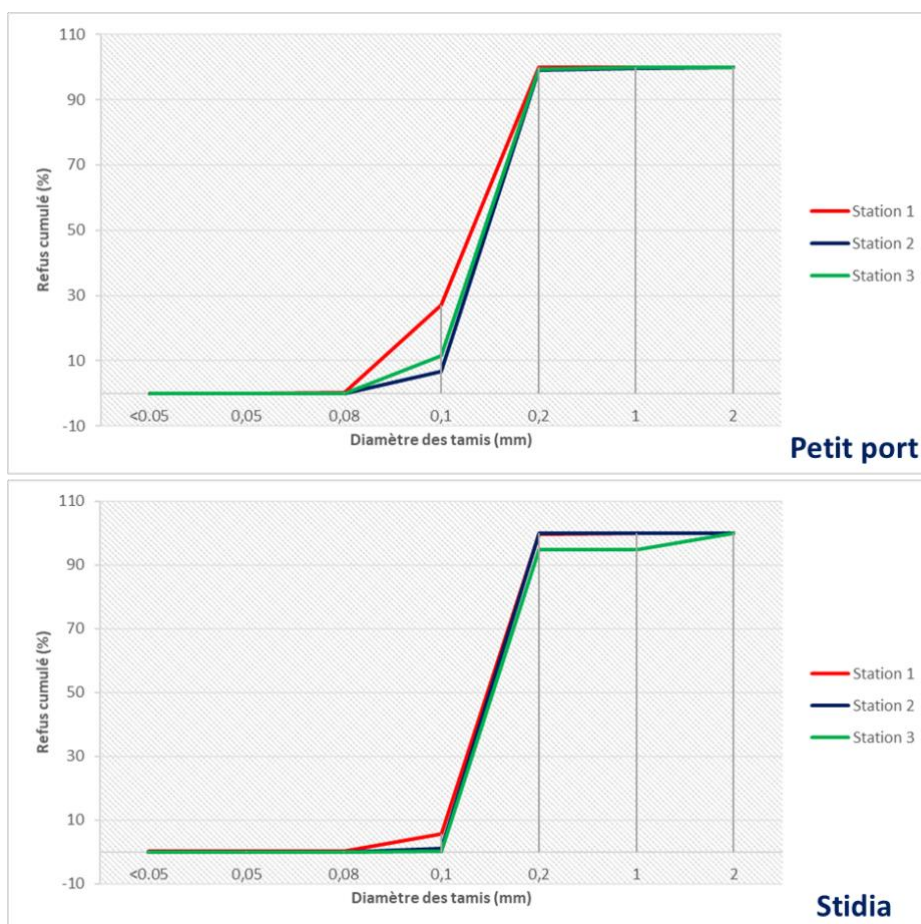


Figure 20 : Courbes granulométriques cumulatives tracées pour les deux sites d'étude.

L'analyse des indices granulométriques révèle un très bon classement des sédiments dans les deux plages.

À Petit Port, les indices de classement (S_o) varient entre 1,205 et 1,306, ce qui indique un classement homogène, caractéristique de milieux soumis à une action hydrodynamique faible à modéré. A Stidia, les indices de classement sont plus homogènes, allant de 1,186 à 1,200, ce qui témoigne d'un apport sédimentaire plus uniforme. Cette meilleure qualité de tri peut refléter une dynamique marine plus constante ou des conditions de dépôt plus stables.

Les courbes granulométriques cumulatives montrent des pentes raides comprises entre 0,1 mm et 0,2 mm (**Figure 20**) typiques des sables fins à moyens bien classés. La superposition quasi parfaite des courbes au sein de chaque site confirme l'homogénéité des dépôts sédimentaires.

1.4.2. Taux de la matière organique et du carbonate de calcium

1.4.2.1. Teneur en matière organique (MO)

Les résultats montrent une teneur en matière organique globalement faible dans les deux sites. Cela est dû à l'origine du sédiment prélevé au niveau du trait de côte, où le sédiment est bien oxygéné et les matières organiques sont rapidement dispersées par l'hydrodynamisme côtier.

À Petit Port, les taux varient de 0,32 % à 1,77 %, avec un maximum en station 2 (**Tableau 14**). À Stidia, les taux sont légèrement plus élevés, allant de 1,7 % à 3,2 %, avec un maximum observé en station 1 (**Error! Reference source not found.**).

Tableau 14 : Taux de la matière organique obtenus dans les deux sites d'étude.

Echantillon	Petit Port		Stidia	
	Matière organique (g)	Taux MO (%)	Matière organique (g)	Taux MO (%)
Station 1	0,032	0,32 %	0,32	3,2 %
Station 2	0,177	1,77 %	0,17	1,7 %
Station 3	0,144	1,44 %	0,21	2,1 %

Ces valeurs suggèrent une légère accumulation de matière organique à Stidia, probablement favorisée par une dynamique plus stable et une activité biologique plus importante, favorisant l'accumulation de débris végétaux liés à la présence d'un herbier plus dense.

1.4.2.2. Teneur en carbonates de calcium ($CaCO_3$)

La calcimétrie révèle une différence significative entre les deux sites, Dont un taux élevé de $CaCO_3$ indique une importante composante biogénique (coquilles, débris calcaires). :

À Petit Port, les sédiments sont décrits comme faiblement carbonatés avec des taux de 32,50 % à 33,13 % (**Tableau 15**). À Stidia, le taux mesuré atteint 47,80 % (station 1), ce qui correspond à un sédiment moyennement carbonaté (**Tableau 15**).

Tableau 15 : Teneur en carbonates de calcium (CaCO₃) dans les deux sites d'étude.

Site	Echantillon	Taux (caco3) %	Description
Petit Port	1	33,13%	Faiblement carbonaté
	2	32,50%	Faiblement carbonaté
	3	33,13%	Faiblement carbonaté
Stidia	1	47.80	Moyennement carbonaté

2. Discussion

Les résultats obtenus dans cette étude a permis de mettre en évidence la diversité des formations à *Posidonia oceanica* sur les plages de Stidia et Petit Port. Globalement, l'herbier de Stidia présente un meilleur état de conservation que celui de Petit Port, comme en témoignent les surfaces plus importantes d'herbier continu sous la forme de prairies étendues entre 3 et 7m de profondeur. Selon nos entretiens avec les pêcheurs locaux, nous appris que les herbiers s'étendent jusqu'à 15m de fond et la moindre proportion de mattes colonisées par des algues photophiles. Cela est conforme aux observations de Belbachir (2012), qui signalait la présence des herbiers dans les mêmes profondeurs, en expliquant une préférence d'extension sur des substrats meubles bien stabilisés, tandis que la fragmentation est souvent associée à des perturbations d'origine anthropique.

La fragmentation importante et la présence accrue de mattes mortes et colonisées par des algues photophiles à Petit Port pourraient être liées à des pressions locales, notamment les activités portuaires et les rejets côtiers, auxquels la Posidonie est particulièrement vulnérable comme l'ont montré Boudouresque et al., (2006) dans des zones côtières similaires en Méditerranée. La structure en taches de cet herbier, avec des fonds meubles intercalés, est également un signe d'instabilité écologique, que Bouchher (2015) l'explique par un hydrodynamisme plus marqué et un déficit en apports sédimentaires stabilisateurs.

Les levés in situ, concernant la vitalité de la Posidonie, confirment l'analyse spatiale des formations à *Posidonia oceanica*. En effet, la densité des faisceaux à Stidia varie de 564 à 768 faisceaux/m², est conforme au seuil des herbiers en bon état de vitalité décrits par Giraud (1977) et Pergent-Martini et al. (2010), tandis que Petit Port présente des valeurs plus faibles et un recouvrement plus faible, notamment à la station B (30 %). La non identification de rhizomes plagiotropes à Petit Port, pourrait traduire

l'absence de dynamique expansive, voire un début de régression, tel que décrit (Denis et al., 2002) sur des herbiers soumis à un stress environnemental.

L'analyse granulométrique révèle une homogénéité de sable fin à moyen sur les deux sites, mais le meilleur tri des sédiments à Stidia reflète des conditions hydrodynamiques et une dynamique côtière favorable à la stabilité de l'herbier. À l'inverse, à Petit Port, le tri plus modéré pourrait favoriser des épisodes d'envasement ou d'érosion, qui pourraient perturber la stabilité de l'herbier à *Posidonia oceanica*.

En fin, nous avons complété notre étude par l'analyse de la teneur en matière organique et en carbonates de calcium. La teneur la plus élevée en matière organique est enregistrée à Stidia, qui pourrait être la conséquence de l'accumulation des débris de la faune et la flore dans un herbier dense, alors que les faibles taux observés à Petit Port pourraient être expliqués par l'ouverture de la plage et son exposition à un hydrodynamisme plus important, favorisant une mise en suspension et la dispersion rapide de la matière organique. Le taux plus élevé de CaCO_3 à Stidia témoigne aussi de l'abondance de sédiments biogènes associés à un herbier en bon état écologique selon Djellouli & Khelil (2017).

Conclusion générale

Conclusion générale

La présente étude a permis d'évaluer, à travers une approche combinant cartographie et observations de terrain, la dynamique de la limite supérieure des herbiers à *Posidonia oceanica* sur deux zones côtières de la wilaya de Mostaganem : Stidia et Petit Port. Les résultats obtenus nous ont permis de caractériser l'état de vitalité et la répartition spatiale des herbiers.

Une typologie des formations à *Posidonia oceanica* a été mise en place, incluant herbier continu, fragmenté, tigré, matrice colonisée par des algues photophiles, qui a permis de cartographier la répartition spatiale des herbiers de posidonie. Cette cartographie a mis en évidence une dynamique complexe, allant de la stabilité à la régression de la limite supérieure des herbiers de Posidonie. L'analyse sédimentologique a mis en évidence des caractéristiques édaphiques (granulométrie, teneur en matière organique et en carbonates de calcium), favorable à une dynamique stable des herbiers de Posidonie, des apports sédimentaires riches en sédiment biogène et de la matière organique, confirmant les résultats concernant l'état de vitalité.

Néanmoins, certains facteurs anthropiques, telles que la surfréquentation touristique, les rejets d'eaux usées, l'urbanisation du littoral et les aménagements portuaires, menacent la durabilité de ces herbiers et peuvent accentuer leur dégradation.

Au terme de ce travail, il convient de noter que l'approche adoptée présente de nombreux avantages :

- L'utilisation d'images satellitaires permet un suivi spatial des herbiers sur de vastes zones maritimes à moindre coût et avec un gain de temps appréciable ;
- La mise en place d'une base de données géographique modifiable et actualisable constitue un outil évolutif pour les suivis à venir ;
- La combinaison des SIG avec les observations de terrain assure une meilleure précision des diagnostics environnementaux.

De même, certaines limites méritent d'être soulevées :

- Les possibilités limitées de disposer d'images de qualité optimale en raison des difficultés liées aux facteurs météorologiques et hydrodynamiques incontrôlables ;
- Les contraintes liées à l'interprétation des images dans des zones à grandes bathymétries ;

Dans ce cadre, il est nécessaire de recourir à des validations *in situ* pour confirmer les détections issues de données satellitaires.

Par ailleurs, ce travail ouvre de réelles perspectives pour des recherches futures. Il serait pertinent de prolonger les suivis dans le temps afin de mieux appréhender les tendances évolutives des herbiers à *Posidonia oceanica* face à la variabilité des facteurs naturels et anthropiques. Le recours à des technologies complémentaires, telles que la cartographie acoustique, la photogrammétrie subaquatique, pourraient enrichir les méthodes de suivi et accroître la précision des observations.

References

- Abadie, A. (2012). Evolution des herbiers à *Posidonia oceanica* (L.) Delile dans la baie de Calvi (Corse, France) et influence de l'ancrage dans la baie de l'Alga.
- AFNOR (1992). *Norme NF Z67-100 : Systèmes d'information géographique Terminologie*. Paris : Agence Française de Normalisation, 34 p.
- Alonso Aller, E., Eklöf, J. S., Gullström, M., Kloiber, U., Linderholm, H. W., & Nordlund, L. M. (2019). Temporal variability of a protected multispecific tropical seagrass meadow in response to environmental change. *Environmental monitoring and assessment*, 191, 1-15.
- Arnaud, B., Chapeyroux, J., Fullgrabe, L., Marengo, M., & Gobert, S. (2025). Évaluation de la dynamique de recolonisation de *Posidonia oceanica* pour des conceptions de restauration efficaces dans les sites d'ancrage dégradés. *Bulletin sur la pollution marine*, 216.
- Beier, C. M., Patterson, T. M., & Chapin, F. S. (2008). Ecosystem Services and Emergent Vulnerability in Managed Ecosystems : A Geospatial Decision-Support Tool. *Ecosystems*, 11(6), 923-938. <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9170-z>
- Benzait, H. (2015). *Contribution à l'évaluation de la Biodiversité des Echinodermes de la région côtière de Mostaganem*.
- Botero, C.-M., Williams, A. T., & Cabrera, J. A. (2015). Advances in Beach Management in Latin America : Overview from Certification Schemes. In C. W. Finkl & C. Makowski (Éds.), *Environmental Management and Governance : Advances in Coastal and Marine Resources* (p. 33-63). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06305-8_2
- Bouchher, A. (2015). *Contribution de la biomasse des épiphytes de Posidonia oceanica (L.) Delile 1813 à l'apport de matière organique au substrat de l'herbier. Côte de Mostaganem*. 158.
- Boudouresque, C.-F. (2006). *Posidonia Oceanica*. 2-905540-30-3, 204.
- Bougherira, A., Ghodbani, T., & Kouti, A. (2020). Contemporary geomorphic evolution of Falcon Cape sandy coastline (Oran, Algeria): Geographical information system (GIS)-based approach. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(18), 937. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05983-7>.
- Boudouresque, C.-F., Bernard, G., Bonhomme, P., Charbonnel, E., Diviacco, G., Meinesz, A., Pergent, G., Pergent-Martini, C., Ruitton, S., & Tunesi, L. (2012). *Protection and conservation of Posidonia oceanica meadows*. RAMOGE and RAC/SPA. <https://hal.science/hal-00808491>
- Bounab, D., & Kanté, W. (2020). *Diagnostic du réseau Ben-Djerrah par le couplage Epanet-Arcgis avec la prise en considération de la problématique des fuites*. 149-150, 284.

- Buonocore, E., Donnarumma, L., Appolloni, L., Miccio, A., Russo, G. F., & Franzese, P. P. (2020). Marine natural capital and ecosystem services : An environmental accounting model. *Ecological Modelling*, 424, 109029. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109029>
- Blanco-Murillo, F., Fernández-Torquemada, Y., Garrote-Moreno, A., Sáez, C. A., & Sánchez-Lizaso, J. L. (2022). Posidonia oceanica L. (Delile) meadows regression: Long-term affection may be induced by multiple impacts. *Marine Environmental Research*, 174, 105557.
- Campagne, C. S., Salles, J.-M., Boissery, P., & Deter, J. (2015). The seagrass Posidonia oceanica : Ecosystem services identification and economic evaluation of goods and benefits. *Marine Pollution Bulletin*, 97(1), 391-400. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.061>
- Cicin-Sain, B., & Knecht, R. (1998). *Integrated Coastal and Ocean Management : Concepts And Practices* (1^{re} éd.). Island Press.
- Denis, J., Hervé, G., Deneux, F., & Sauzade, D. (2002). *Volet n°1 : L'herbier à Posidonia oceanica*. 88.
- Dekker, A. G., Phinn, S. R., Anstee, J., Bissett, W. P., Brando, V. E., Casey, B., ... &
- Pasteris, P. (2006). Intercomparison of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthos mapping techniques in Australian and Caribbean coastal environments. *Limnology and Oceanography: Methods*, 4(12), 448-464.
- Djellouli, A., & Khelil, K. (2017). *Étude du sédiment des Plages de Mostaganem : Granulométrie, Matière organique et Calcimétrie*. 67.
- Goiffon, M. (2003). Les enjeux d'une gestion intégrée du littoral dans les départements français insulaires d'Amérique. *Méditerranée*, 100(1), 35-40. <https://doi.org/10.3406/medit.2003.3280>
- Gourmelon, F., & Robin, M. (2005). *SIG et littoral. Traité IGAT (Information Géographique et Aménagement du Territoire)*. 338.
- Guerrero-Meseguer, L., Marín, A., & Sanz-Lázaro, C. (2017). *Les futures vagues de chaleur dues au changement climatique menacent la survie des semis de Posidonia oceanica*. 230, 40-45.
- Hattour, A., & Ben Mustapha, K. (2023). *Le Couvert Vegetal Marin du Golfe de Gabes: cartographie et reseau de Surveillance de l'herbier de Posidonie*. 154.
- Holon F., Guilbert A., Freschet E. (2013). Cartographie évolutive des herbiers de Posidonie en Région PACA depuis 1922. Document de synthèse, contrat Œil d'Andromede/Agence de l'eau 81 p.

- Kaddour Seghir, H., & Touahria, F. Z. (2023). *Cartographie spatio-temporelle de la répartition de l'herbier à Posidonia oceanica, au-devant de la plage de Stidia (Mostaganem, Algérie)*. 73.
- Laurent, B. (2024). POSIDONIE : LA FORET ENDÉMIQUE DE MÉDITERRANÉE. *Les cahiers de la surveillance MEDTRIX : une collaboration Agence de l'eau RMC, L'Œil d'Andromède et Andromède Océanologie*, 19.
- Lefebvre, L., Compère, P., & Léonard, A. (2021). *Aegagropiles méditerranéens de Posidonia oceanica (L.) Delile (1813) : Une première description complète de la structure macroscopique à la structure microscopique*. 168(3).
- Mancini, G., Mastrantonio, G., Pollice, A., Jona Lasinio, G., Belluscio, A., Casoli, E., Silvia Pace, D., Ardizzone, G., & Ventura, D. (2023). Detecting trends in seagrass cover through aerial imagery interpretation : Historical dynamics of a Posidonia oceanica meadow subjected to anthropogenic disturbance. *Ecological Indicators*, 150, 110209. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110209>
- Meinesz, A., Cuvelier, M., & Laurent, R. (2020). *MÉTHODES RÉCENTES DE CARTOGRAPHIE ET DE SURVEILLANCE DES HERBIERS DE PHANÉROGAMES MARINES Leurs applications sur les côtes françaises de la Méditerranée*.
- Meleder, V., Barillé, L., Launeau, P., & De Smedt, A. (2010). Mapping microphytobenthos biomass by spatially resolved fluorescence of chlorophyll a. *Remote Sensing of Environment*, 114(3), 598–609.
- Menab, W. (2018). *Système d'Information Géographique (cours et travaux pratiques)*. 73.
- Montefalcone, M., Vacchi, M., Archetti, R., Ardizzone, G., Astruch, P., Bianchi, C. N., Calvo, S., Criscoli, A., Fernández-Torquemada, Y., Luzzu, F., Misson, G., Morri, C., Pergent, G., Tomasello, A., & Ferrari, M. (2019). Geospatial modelling and map analysis allowed measuring regression of the upper limit of Posidonia oceanica seagrass meadows under human pressure. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 217, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.11.006>
- Mostefai, F., & Kadi, L. (2021). *Base de données soter et mise à jour de la carte des sols d'algerie par Google Earth application aux sols de la région de Messaad*. 23, 72.
- Poursanidis, D., Topouzelis, K., & Chrysoulakis, N. (2018). Mapping coastal marine habitats and delineating the deep limits of the Neptune's seagrass meadows using very high resolution Earth observation data. *International journal of remote sensing*, 39(23), 8670-8687.

- Ruocco, M., Entrambasaguas, L., Dattolo, E., Milito, A., Marín-Guirao, L., & Procaccini, G. (2021). A king and vassals' tale : Molecular signatures of clonal integration in *Posidonia oceanica* under chronic light shortage. *1221–1235*, *109*(1), 294-312.
- 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), 157-167. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.044>
- Senouci, M. (2002). *État des herbiers à Posidonia oceanica de la baie d'Alger : impact des activités anthropiques*. Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Alger, 132 p.

Annexe

- Granulométrie Petit Port

Station 1			
Diamètre Tamis (mm)	Refus (g)	Refus %	Refus Cumulé %
2	0,06	0,03997868	100
1	0,22	0,14658849	99,96002132
0,2	109,3	72,8278252	99,81343284
0,1	40,33	26,8723348	26,98560768
0,08	0,1	0,06663113	0,113272921
0,05	0,07	0,04664179	0,046641791
<0.05	0	0	0

Station 2			
Diamètre Tamis (mm)	Refus (g)	Refus %	Refus Cumulé %
2	0,41	0,27355218	100
1	1,13	0,75393648	99,72644782
0,2	138,46	92,3805711	98,97251134
0,1	9,82	6,55190819	6,591940219
0,08	0,04	0,02668802	0,040032026
0,05	0,02	0,01334401	0,013344009
<0.05	0	0	0
	149,88		

Station 3			
Diamètre Tamis (mm)	Refus (g)	Refus %	Refus Cumulé %
2	0,14	0,09327737	100
1	1,09	0,72623093	99,90672263
0,2	131,68	87,7340263	99,1804917
0,1	17,11	11,3998268	11,44646545
0,08	0,06	0,03997601	0,046638683
0,05	0,01	0,00666267	0,006662669
<0.05	0	0	0
	150,09		

- **Granulométrie Stidia**

			Station 1	Station 2	Station 3
Diamètre Tamis (mm)	Refus (g)	Refus %	Refus Cumulé %	Refus Cumulé %	Refus Cumulé %
2	0,16	0,16	99,99	99,93	99,99
1	0,18	0,18	99,77	99,93	94,81
0,2	97,75	97,75	99,56	99,9	94,65
0,1	1,84	1,84	5,56	1,05	0,33
0,08	0,05	0,05	0,28	0	0
0,05	0,01	0,01	0,17	0	0
<0.05	0	0	0,06	0	0

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة عبد الحميد بن باديس-مستغانم-
كلية علوم الطبيعة والحياة

تصريح شرفي خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية
لإنجاز البحث

أنا الممضي أدناه،

الطالبة : زياني لمياء رقم التسجيل الجامعي: 38009020.....

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 205931744.....

والصادرة بتاريخ: 14/07/2020.....

عن بلدية تيارت -تيارت

المسجل بكلية علوم الطبيعة و الحياة / قسم علوم البحر وتربية الأسماك
شعبة هيدروبيولوجيا بحرية وقارية / التخصص الموارد البيولوجية البحرية
والمكلف بإنجاز مذكرة ماستر بعنوان:

**Etude de la dynamique de la limite supérieure de l'herbier
à *Posidonia oceanica* le long de quelques plages à
Mostaganem**

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات العلمية
والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في إنجاز البحث ، وأتحمل المسؤولية الشخصية عن كل
المحتوى المتضمن في البحث المذكور أعلاه .

التاريخ: 04/07/2025.....

إمضاء المعني

* ملحق القرار الوزاري رقم 933 المؤرخ في 28 جويلية 2016 الذي يحدد القواعد المتعلقة بالوقاية من السرقة العلمية ومكافحتها.