



DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MER ET DE L'AQUACULTURE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

KADDOUR SEGHIR Hadjira

TOUAHRIA Fatima Zohra

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN HYDROBIOLOGIE MARINE ET CONTINENTALE

Spécialité : Bioressources Marines

THÈME

**Cartographie spatio-temporelle de la répartition de l'herbier
à *Posidonia oceanica*, au-devant de la plage de Stidia
(Mostaganem, Algérie).**

Soutenu le 22 / 06 / 2023

DEVANT LE JURY

Président	Dr. BELBACHIR Nor-Eddine	MCA	U. Mostaganem
Encadreur	Dr. BOUGHERIRA Abdeldjalil	MCB	U. Mostaganem
Examineur	Pr. TAIBI Nasr-Eddine	Professeur	U. Mostaganem

Année universitaire 2022/2023

REMERCIEMENTS

Au terme de ce mémoire, nous remercions ALLAH le tout puissant clément et miséricordieux, qui nous a donné la force, le courage et la patience d'accomplir ce mémoire de fin d'étude.

Nous tenons à remercier et à exprimer notre gratitude envers notre encadrant, Docteur BOUGHERIRA Abdeldjalil, pour son encadrement tout au long de ces six mois de mémoire. Son écoute, sa disponibilité, ses remarques et ses conseils avisés nous ont beaucoup aidé à progresser et à achever ce mémoire.

Nous tenons à remercier le jury d'avoir pris le temps de lire et d'évaluer ce mémoire. Vos retours constructifs vont sans doute être précieux pour améliorer ce mémoire. Pour cela, nos remerciements d'adressent particulièrement à :

Docteur BELBACHIR Nor-Eddine d'avoir accepté de présider ce jury, mais aussi pour tous les enseignements en plongée sous-marine et structure et fonctionnement des écosystèmes pélagiques marins qu'il nous a transmis.

Professeur TAIBI Nasr-Eddine d'avoir accepté d'examiner ce travail et pour toutes les notions d'hydrogéologie qu'il nous a transmis.

Nous n'oublions pas nos enseignants qui ont contribué à notre enseignement ; nous espérons être à la hauteur de leurs attentes.

Nous tenons à remercier également tous ceux qui nous ont soutenu et encouragé de près ou de loin tout au long de notre cursus universitaire.

DEDICACE

Je dédie le fruit de mes efforts au cours de ces années à mon cher père et à ma chère mère qui ont été mon soutien et une épaule sur laquelle m'appuyer et m'ont soutenu avec fierté et amour.

A mes chers sœurs merci pour vos soutiens, vos confiances et vos conseils précieux, qui m'ont aidé dans les moments difficiles.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

KADDOUR SEGHIR HADJIRA

DEDICACE

Tout d'abord je rends grâce à Dieu.

Je remercie infiniment mes parents qui m'ont soutenu dans mon cheminement scolaire et m'ont donnée la force et le courage.

Je remercie ma famille, mes frères et sœurs et tous ceux qui m'ont soutenu et aidé et tous ceux qui m'ont donné des conseils.

TOUAHRIA FATIMA ZOHRA

Résumé

La Posidonie est l'herbier marin le plus emblématique de la Méditerranée. Elle constitue à la fois une espèce clé des écosystèmes marins. La perte généralisée de cette espèce est attribuée à une pression anthropique excessive.

La conservation de l'herbier de Posidonie nécessite une cartographie pour estimer l'étendue de leurs herbiers et pour mesurer les changements au fil du temps. Les outils de géomatique et les données satellitaires, sont largement utilisés pour suivre la distribution spatio-temporelle des herbiers de Posidonie, notamment dans les zones d'eaux peu profondes, qui constituent en même temps l'habitat potentiel des herbiers de Posidonie en Méditerranée.

Pour ce faire, la méthode utilisée nous a permis de mettre en place un système d'information géographique (SIG) et la production de cartes éco-dynamiques à une échelle de 1:8000. Selon une approche diachronique, nous avons pu produire des cartes de l'évolution de la limite supérieure des herbiers de Posidonie selon trois dates : 2014-2018, 2018-2022 et 2014-2022.

Les résultats obtenus montrent une régression notable de la limite supérieure de l'herbier de Posidonie au-devant de la plage de Stidia, notamment durant la période allant de 02/09/2014 à 06/10/2018. La période suivante, entre 06/10/2018 et 31/10/2022, affiche plutôt une dynamique relativement stable de l'herbier de Posidonie, mais avec une légère propension pour la régression. Cette dynamique évolutive pourrait être expliquée par la multiplication des activités anthropiques, à savoir les rejets d'eaux usées, la pêche et la plaisance. Ces derniers exercent une pression sur l'équilibre écologique de la zone côtière de Stidia par la destruction des herbiers de Posidonie.

Mots clés : Plage de Stidia, Herbier de Posidonie, Limite supérieure, Cartographie, SIG.

ملخص

بوسيدونيا هي أكثر الأعشاب البحرية رمزية في البحر الأبيض المتوسط، تعتبر من الأنواع الرئيسية في النظم البيئية البحرية. تعزى الخسارة الواسعة لهذا النوع إلى الضغط البشري المفرط.

يتطلب الحفاظ على أعشاب البوزيدونيا رسم خرائط لتقدير مدى مروجها وقياس التغييرات بمرور الوقت. تُستخدم أدوات الجيوماتكس وبيانات الأقمار الصناعية على نطاق واسع لمراقبة التوزيع المكاني والزمني لأعشاب البوسيدونيا خاصة في المياه الضحلة التي تشكل الموطن المحتمل لأعشاب البوسيدونيا في البحر الأبيض المتوسط.

للقيام بذلك سمحت لنا الطريقة المستخدمة بإعداد نظام معلومات جغرافية وإنتاج خرائط بيئية ديناميكية بمقياس 1:8000 تمكنا من إنتاج خرائط لتطور الحد الأعلى لأعشاب البوسيدونيا وفقاً لثلاث تواريخ: 2018-2014 و 2022-2018 و 2022-2014. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها تراجعاً ملحوظاً للحد الأعلى لأعشاب البوسيدونيا أمام شاطئ ستيديا، ولا سيما خلال الفترة من 2014/09/02 إلى 2018/10/06. تُظهر الفترة التالية: بين 2018/10/06 و 2022/10/31، ديناميكية مستقرة نسبياً لأعشاب البوسيدونيا، ولكن مع ميل طفيف للانحدار. يمكن تفسير هذه الديناميكية التطورية من خلال تكاثر الأنشطة البشرية، مثل تصريف مياه الصرف الصحي وصيد الأسماك واليخوت. هذه الضغوط تؤثر التوازن البيئي للمنطقة الساحلية ستيديا من خلال تدمير أعشاب البوسيدونيا.

الكلمات المفتاحية: شاطئ ستيديا، أعشاب البوسيدونيا، الحد الأعلى، رسم الخرائط، نظم المعلومات الجغرافية.

Abstrat

Posidonia meadow is the dominant marine grass is the most emblematic ecosystem of the Mediterranean Sea, it both key species of ecosystems. The widespread loss of this species is attributed to excessive anthropogenic pressure.

The conservation of Posidonia meadow requires mapping to estimate the extent of existing stocks and to measure changes over time. Satellite images have been used for the localization of Posidonia meadow, they consider a cost-effective method to monitor large areas of shallow water that are a potential habitat for Posidonia meadow.

The method used made it possible to produce accurate maps on a scale of 1:8000 scale maps, we produced three maps representing the evolution of the upper limit of Posidonia meadow according to three dates: 2014-2018, 2018-2022 and 2014-2022.

The results obtained show a notable regression of the upper limit of the Posidonia meadow in front of Stidia beach, particularly during the period from 02/09/2014 to 06/10/2018. The following period, between 06/10/2018 and 31/10/2022, shows rather a relatively stable dynamic of the Posidonia meadow, but with a slight propensity for regression. This evolutionary dynamic could be explained by the multiplication of anthropogenic activities, namely wastewater discharges, fishing and yachting. The latter exert pressure on the ecological balance of the Stidia coastal zone through the destruction of Posidonia meadows.

Keywords: Stidia Beach, Posidonia meadow, Upper limit, Cartography, GIS.

Table des matières

Introduction	1
---------------------------	---

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

1. Connaissances générales sur les herbiers de Posidonie et leur environnement	3
1.1. Répartition géographique	3
1.2. Systématique	3
1.3. Description morphologique	4
1.4. Ecologie	5
1.5. Importances de l'herbier de Posidonie (les multiples fonctions écologiques et services écosystémiques fournis par la Posidonie)	6
1.5.1. Rôle dans les équilibres écologiques du système littoral	6
1.5.2. Rôle dans les équilibres physiques du littoral	7
1.5.3. Rôle de Bio-indicateur	8
1.6. Menaces engendrées par les pressions anthropiques et le changement climatique.....	9
1.6.1. Aménagements du littoral	9
1.6.2. Activités humaines	10
1.6.2.1. Pollution marines et côtières	10
1.6.2.2. Activités maritimes : pêche et plaisance	10
1.6.3. Introduction des espèces exogènes envahissantes	10
1.6.4. Conséquences du changement climatique.....	11
1.7. Statut de conservation de l'herbier de Posidonie en Méditerranée	12
2. Contribution des systèmes d'informations géographiques SIG dans la gestion et le monitoring des zones côtières	14
2.1. Définition d'un SIG	14
2.2. Fonctionnalités et fonctions d'un SIG	15
2.3. Rôles des SIG dans le suivi des écosystèmes côtiers et marins	16
2.4. Intérêts de la cartographie des herbiers de Posidonie.....	16
2.4.1. Détermination de l'état globale de l'herbier de Posidonie.....	16
2.4.2. Gestion et conservation des écosystèmes marins.....	17

2.4.3. Surveillance et suivi des changements environnementaux	17
2.4.4. Évaluation de l'impact des activités humaines	17
3. Différentes méthodes existantes pour la cartographie de la répartition des herbiers de Posidonie	18
3.1. Méthodes traditionnelles	18
3.1.1. Plongée sous-marine	18
3.1.2. Photographie aérienne	21
3.2. Nouvelles technologies de cartographie	21
3.2.1. Télédétection	21
3.2.2. Acoustique	21

Chapitre II : Matériels et Méthodes

1. Présentation de la zone d'étude	23
1.1. Localisation géographique et description géomorphologique et écologique de la plage de Stidia	23
1.2. Description des conditions climatiques et hydrodynamiques	24
1.2.1. Contexte climatique et océanographique	24
1.3. Description des activités socio-économiques et leurs impacts sur le milieu marin et l'herbier de Posidonie	24
2. Méthode de travail	25
2.1. Choix d'une approche diachronique basée sur les systèmes d'information géographique (SIG)	25
2.2. Description du logiciel ArcGIS	25
2.3. Description du logiciel Google Earth Pro	26
2.3.1. Avantages et les inconvénients des imageries satellites fournit par le logiciel Google Earth Pro	26
3. Mise en place du protocole de suivi	27
3.1. Collecte et préparation des données	27
3.1.1. Acquisition des données de base	27
3.1.2. Téléchargement des imageries satellites de Google Earth Pro et et leur préparation pour l'analyse et le traitement sous SIG	27

3.2. Manipulation et traitement des données dans le SIG	28
3.2.1. Importation des points de contrôle.....	28
3.2.2. Importation et géoréférencement des images.....	28
3.2.3. Géoréférencement de la carte marine et superposition des images.....	30
3.3. Analyse des données dans le SIG.....	31
3.3.1. Numérisation.....	31
3.3.2. Evaluation de la marge d'erreur.....	33
3.3.3. Analyse spatio-temporelle de la limite supérieure des herbiers de Posidonie	33

Chapitre III : Résultats et Discussion

1. Analyse cartographique de l'évolution spatio-temporelle des herbiers de Posidonie.....	35
2. Analyse statistique de l'évolution spatio-temporelles des surfaces occupées par les habitats marins	37
3. Évolution linéaire de la limite supérieure des herbiers de Posidonie.....	39
4. Avantages et inconvénients de chaque méthode	40
5. Interprétation et discussion des résultats	41
6. Solutions de protection et de restauration des herbiers de Posidonie	42
Conclusion	44
Références bibliographiques	46
Annexes	45

Liste des figures

Figure 1 : Répartition géographique de l'herbier de Posidonie en Méditerranée (Abadie, 2016)..	3
Figure 2 : Image sous-marine de l'herbier de Posidonie (Pergent <i>et al.</i> , 2012).....	4
Figure 3 : Représentation schématique d'un herbier de Posidonie (Boudouresque et Meinesz, 1982).....	5
Figure 4 : Services écosystémiques rendus par les herbiers de Posidonie (Hounganadan, 2020).	7
Figure 5 : Banquettes des feuilles mortes de l'herbier de Posidonie au niveau de la plage de Stidia	8
Figure 6 : Facteurs anthropiques influençant la structure du paysage formé par les herbiers de Posidonie (Abadie, 2016).	12
Figure 7 : Fonction d'un SIG (Smida, 2008).....	15
Figure 8 : Situation géographique du site d'étude Stidia	23
Figure 9 : Enregistrement d'une image à l'aide du Google Earth Pro	28
Figure 10 : Photographie montrant l'importation des points de contrôle (repères) dans le logiciel ArcGIS.....	28
Figure 11 : Opération de géoréférencement de l'image satellitaire sur ArcMap	29
Figure 12 : Ensemble d'images géoréférencées couvrant la zone d'étude.....	29
Figure 13 : Géoréférencement de la carte marine	30
Figure 14 : Superposition des images sur la carte	30
Figure 15 : Numérisation du trait de côte et l'isobathe	31
Figure 16 : Numérisation de la surface qui existe entre le trait de côte et l'isobathe par un polygone.	31
Figure 17 : Numérisation des surfaces occupée par l'herbier de Posidonie.....	32
Figure 18 : Numérisation de la limite supérieure de l'herbier de Posidonie	32
Figure 19 : Importation des trois limites supérieures et l'intègre dans DSAS	34
Figure 20 : Cartographie des herbiers de Posidonie de la plage de Stidia (02/09/2014).....	35
Figure 21 : Cartographie des herbiers de Posidonie de la plage de Stidia (06/10/2018).....	36

Figure 22 : Cartographie des herbiers de Posidonie de la plage de Stidia (31/10/2022).....	36
Figure 23 : Évolution temporelle de l’herbier de Posidonie.....	38
Figure 24 : Évolution temporelle des herbiers fragmentés, des herbiers érodés et de la matre de Posidonie.	38
Figure 25 : Évolution temporelle des substrats rocheux et sableux et trottoir à vermet de la plage de Stidia.....	39
Figure 26 : Évolution diachronique de la limite supérieure de l’herbier de Posidonie.	40
Figure 27 : Prise de vue sur l’abri de pêche de Stidia.	42

Liste des tableaux

Tableau 1 : Dispositifs règlementaires qui concourt à la sauvegarde des herbiers de Posidonie (Boudouresque <i>et al.</i> , 2006).	13
Tableau 2 : La densité des faisceaux de feuilles par mètre carré et son type d'herbier (Giraud, 1977).....	19
Tableau 3 : Les valeurs de déchaussement des rhizomes et son interprétation (Giraud, 1977)...	19
Tableau 4 : Les pourcentage des rhizomes plagiotropes et son interprétation (Giraud, 1977). ...	19
Tableau 5 : Les pourcentage du recouvrement et son interprétation (Giraud, 1977).....	20
Tableau 6 : Avantages et les inconvénients des images satellitaires fournit par Google Earth Pro.....	26
Tableau 7 : Données collectées en vue de cartographier la Posidonie au-devant de la plage de Stidia (Mostaganem).	27
Tableau 8 : Estimation de la marge d'erreur.....	33
Tableau 9 : Les surfaces de chaque type d'habitas marins.	37
Tableau 10 : Avantages et inconvénients des méthodes de cartographie de l'herbier de Posidonie.....	40

Liste des abréviations et des acronymes

AFNOR : Agence Française de Normalisation

AMP : Aires Marines Protégées

DCE : Directive-Cadre sur l'Eau

DSAS : Digital Shoreline Analysis System

Ep : Error pixel

ERMs : Error in georeferencing images

Ed : Digitalizing error

Et : Total error

FICCDC : Federal Interagency Coordinating Committee on Digital Cartography

KML : Keyhole Mark-up Language

PH : Potentiel d'Hydrogène

PACA : Provence-Alpes-Côte d'Azur

RSP : Réseau de Surveillance Posidonie

SIG : Système d'Information Géographique

SHFN : Service Hydrographique des Forces Navales

UTM : Universal Transverse Mercator

WGS 1984 : World Geodetic System

Introduction

Introduction

Les peuplements de l'herbier de Posidonie jouent un rôle primordial dans les équilibres écologiques des écosystèmes marins et côtiers (Mancini *et al.*, 2023). L'herbier de Posidonie constitue l'un des habitats marins les plus importants de la Mer Méditerranée en termes de fonctions écologiques et des services écosystémiques qu'ils prodiguent aux communautés côtières, ce qui lui confère le statut de bioindicateur (Montefalcone *et al.*, 2019).

Leur présence le long des littoraux est menacée par l'accroissement des activités anthropiques autour du bassin méditerranéen (Topouzelis *et al.*, 2018). Le littoral algérien et particulièrement celui de Mostaganem, n'échappe pas à cette tendance lourde, qui affecte négativement leur état écologique.

La gestion et la protection des herbiers à *Posidonia oceanica* sont parmi les objectifs prioritaires des programmes de gestion de l'environnement côtier. Cela nécessite une cartographie régulière de la distribution spatiale des herbiers à *P. oceanica* (Paul *et al.*, 2011). En effet, ce type de cartographie représente un outil important, qui permet de fournir une base fiable pour déduire les changements au fil du temps dans la surface occupée par les herbiers (Mancini *et al.*, 2023). Par ailleurs, la cartographie de la limite supérieure de l'herbier de Posidonie est utilisée dans ce mémoire comme indicateur de l'état de conservation et/ou de dégradation des prairies, étant directement influencée par les pressions venant de la côte.

La cartographie de la limite supérieure des herbiers de Posidonie permet de déterminer leur répartition et d'identifier les facteurs qui contribuent à leurs variations, dans l'optique d'une meilleure compréhension de son fonctionnement pour une meilleure gestion et une protection efficace de cet habitat marin.

De nos jours, l'accroissement des pressions qui s'exercent sur le littoral de Stidia, engendrées par les différents types d'activités humaines, menace la distribution de l'herbier de Posidonie. Dans ce mémoire nous nous interrogeons comment les herbiers de Posidonie évoluent et dans quelles mesures les pressions anthropiques peuvent affecter leur évolution ?

Cette étude a pour objectif de suivre l'évolution spatio-temporelle de la répartition de l'herbier à *Posidonia oceanica*, au-devant la plage de Stidia (Mostaganem, Algérie), afin de fournir des informations permettant d'apprécier de manière approximative la qualité globale de l'herbier.

Afin d'atteindre l'objectif de ce mémoire, nous avons suivi le plan suivant :

- ✓ Le premier chapitre dresse une synthèse bibliographique sur, entre autres, les aspects morphologique et écologique des herbiers de Posidonie, ainsi que le rôle que joue celle-ci dans le maintien des équilibres écologiques et les principales causes et conséquences de sa dégradation.
- ✓ Le deuxième chapitre expose les caractéristiques de la zone d'étude et les différences d'approches d'études de la dynamique des herbiers de Posidonie, ainsi que le choix de la méthodologie que nous allons suivre dans cette étude.
- ✓ Le troisième chapitre présente et discute les principaux résultats obtenus.
- ✓ Enfin, notre travail sera achevé par une conclusion.

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

1. Connaissances générales sur les herbiers de Posidonie et leur environnement

La Posidonie est une plante marine endémique de la Méditerranée, qui joue un rôle important dans l'écosystème marin en fournissant de nombreux services écosystémiques essentiels, tels que l'oxygénation, la stabilisation des fonds, le piégeage du carbone et la protection des plages contre l'érosion côtière (Buonocore *et al.*, 2020).

1.1. Répartition géographique

Selon Sghaier (2013), la Posidonie est présente sur la quasi-totalité du bassin méditerranéen, à l'ouest elle disparaît un peu avant le détroit de Gibraltar ; à l'est, elle est absente des côtes d'Égypte, de Palestine, du Liban et de la Syrie, elle est rare ou absente dans l'extrême nord de l'Adriatique et le long des côtes languedociennes (Figure 1). Cette distribution est principalement liée à la température de l'eau, la salinité et la disponibilité de lumière, mais aussi les pressions anthropiques (Houngnandan, 2020).



Figure 1 : Répartition géographique de l'herbier de Posidonie en Méditerranée (Abadie, 2016).

1.2. Systématique

La classification de *Posidonia oceanica* se présente comme suit :

- Règne : *Plantae*
- Sous règne : *Tracheobionta*
- Super division : *Spermatophyta*
- Division : *Magnoliophyta*
- Classe : *Liliopsida*

- Sous Classe : *Alismatidae*
- Ordre : *Najadales*
- Famille : *Posidoniaceae*
- Genre : *Posidonia*
- Espèce : *oceanica* (Linnaeus) Delile, 1813.

1.3. Description morphologique

La Posidonie est une plante marine à fleurs, qui constitue de vastes prairies sous-marines, appelées herbiers (Figure 2). Elle présente une structure classique d'une plante marine avec des rhizomes et des feuilles. Ces dernières sont de couleur verdâtres et groupées en faisceaux de 4 à 8 feuilles, se présentant sous forme de lanières rubanées de 30 à 80 cm de longueur et de 7 à 12 mm de largeur (Sghaier, 2013). Chacun de ces faisceaux de feuilles est situé à l'apex d'un axe appelé rhizome (tige souterraine) (Figure 3) (Bonhomme et Rouanet, 2015).



Figure 2 : Image sous-marine de l'herbier de Posidonie (Pergent *et al.*, 2012).

L'herbier à *Posidonia oceanica* est constitué par des tiges rampantes ou dressées (Boudouresque *et al.*, 2006). Les tiges sont de consistance ligneuse totalement ou partiellement enfouies dans le sédiment sont désignées sous le nom de rhizomes, elles peuvent être plagiotropes (horizontales) ou orthotropes (verticales) mesurant jusqu'à 1 cm de diamètre (Pergent-Martini et Le Ravallec, 2007). Les rhizomes plagiotropes qui croît horizontalement permet à l'herbier d'occuper l'espace, d'où une extension linéaire de l'herbier ainsi que les rhizomes orthotropes qui croît verticalement permet à l'herbier de croître en hauteur, contribuant à l'élévation de l'herbier vers la surface (Sghaier, 2013).

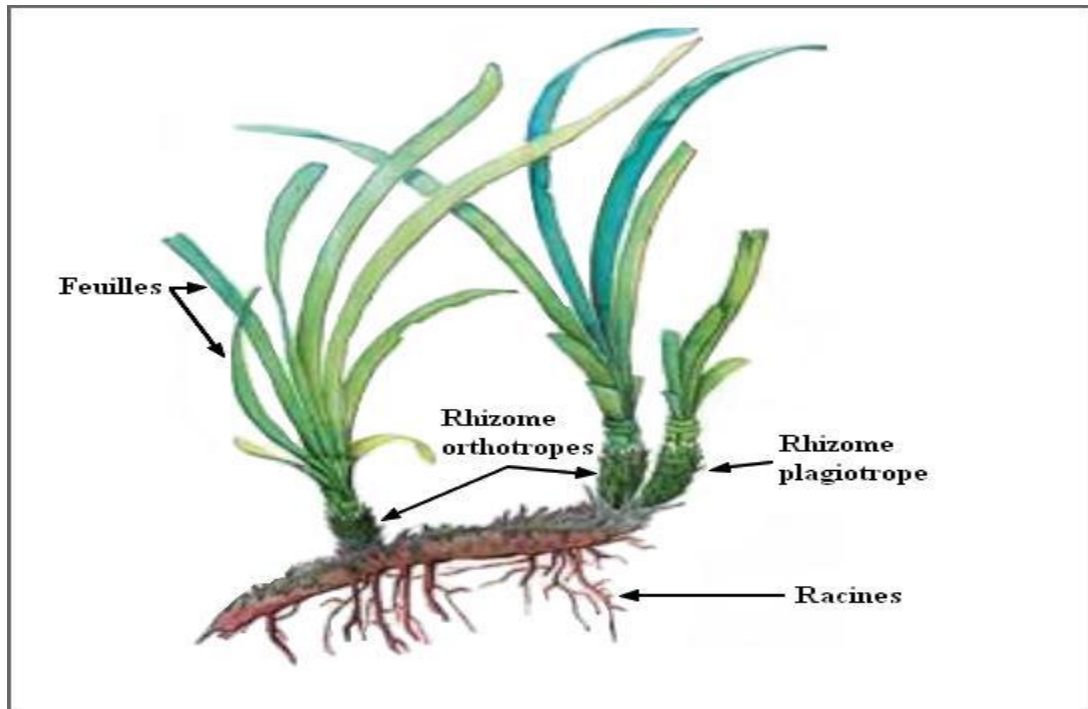


Figure 3 : Représentation schématique d'un herbier de Posidonie (Boudouresque et Meinesz, 1982).

La Posidonie peut se reproduire de façon sexuée en produisant des fleurs puis des fruits, ce phénomène ne se produit pas de façon annuelle. La lumière parmi les facteurs potentiels qui influence la floraison, l'herbier de Posidonie assure se reproduire principalement de façon végétative (Abadie, 2016).

1.4. Ecologie

L'herbier à *P. oceanica* représentée dans l'étage infralittoral, peuvent se développer de la surface jusqu'à une quarantaine de mètres de profondeur en fonction de la transparence de l'eau, l'intensité lumineuse disponible au fond devenant le facteur limitant pour leur développement (Abadie, 2012).

Elle est considérée comme une espèce sténohaline en raison de sa capacité à résister aux taux élevés de salinité, allant jusqu'à 41‰. Néanmoins, elle ne tolère pas la dessalure, car elle dépérit immédiatement en dessous de 33‰. La Posidonie est vulnérable aux conditions d'hydrodynamisme intense, car les tempêtes détachent les feuilles ce qui conduit à une fragilisation de la plante (Boudouresque *et al.*, 2006).

De plus, La Posidonie peut se développer dans des eaux tempérées, avec des températures comprises entre 9°C et 29°C. Elle n'est capable qu'exceptionnellement de supporter les températures supérieures à 30°C (Abadie, 2012).

1.5. Importances de l'herbier de Posidonie (les multiples fonctions écologiques et services écosystémiques fournis par la Posidonie)

L'herbier de Posidonie est considéré comme un écosystème pivot du littoral méditerranéen (Deter *et al.*, 2010). Le rôle des herbiers de Posidonie en milieu marin littoral assimile à celui exercé par la forêt en milieu terrestre, ces herbiers constituent la base de la richesse des eaux littorales en Méditerranée par le rôle essentiel qu'ils jouent dans le maintien des équilibres littoraux dressées (Boudouresque *et al.*, 2006).

Elles possèdent à l'origine de nombreux services écosystémiques compris des services culturels qui jouent un rôle fondamental pour le bien-être humain, quelques services écosystémiques importants des herbiers de Posidonie et son rôle primordiale à savoir (Houngnandan, 2020) :

1.5.1. Rôle dans les équilibres écologiques du système littoral

La Posidonie est l'herbier marin le plus important et le plus abondant de la mer Méditerranée qui joue un rôle majeur dans l'équilibre écologique des milieux marins méditerranéens (Montefalcone, 2009).

Ce sont des habitats côtiers très productifs (Koopmans *et al.*, 2020). Cette production primaire est similaire ou supérieure à celle d'autres environnements hautement productifs qu'ils soit terrestres (forêts tempérées ou tropicales) ou marins (zones d'upwelling, mangroves...) (Belbachir, 2018).

La majeure partie de cette production foliaire n'est pas directement consommée par les herbivores (3 à 10 % seulement) et est soit utilisée pour nourrir la litière de l'herbier, soit exportée vers d'autres écosystèmes. Cette exportation représente une source importante de nourriture pour les organismes de l'étage circalittoral et les étages de profondeurs supérieurs (Pergent-Martini et Le Ravallec, 2007). Elle représentée un maillon important de la chaîne alimentaire (Sghaier, 2013).

Par ailleurs, l'une des conséquences de la photosynthèse des végétaux est également la production d'oxygène, qui peut atteindre des valeurs considérables au niveau des faisceaux foliaires et des végétaux épiphytes associés, dont les quantités produites sont largement excédentaires. Les herbiers de Posidonie constituent donc un habitat important en raison de sa capacité d'oxygéner l'eau de mer (Boudouresque *et al.*, 2006).

De même, ces herbiers marins sont des écosystèmes de carbone bleu qui stockent de grandes quantités de carbone dans leurs sédiments, contribuant ainsi à l'atténuation du changement climatique (Monnier, 2021). Peuvent être comparé à plusieurs écosystèmes terrestres considérés comme performants dans le stockage du carbone (Pergent-Martini *et al.*, 2021).

L'herbier de Posidonie joue également un rôle crucial en tant que zone de frayère et de nurserie, offrant un habitat à une grande diversité d'espèces animales et végétales. En effet, jusqu'à 25 % des espèces de la Méditerranée sont observées dans l'herbier de Posidonie, où elles se nourrissent, se reproduisent et se développent. Sa complexité structurale, avec de longues feuilles et la présence de structures érosives, en fait un habitat particulièrement important pour ces espèces (Bonhomme et Rouanet, 2015).

La figure ci-dessous (Figure 4) représente un résumé des services écosystémiques rendu par l'herbier de Posidonie.

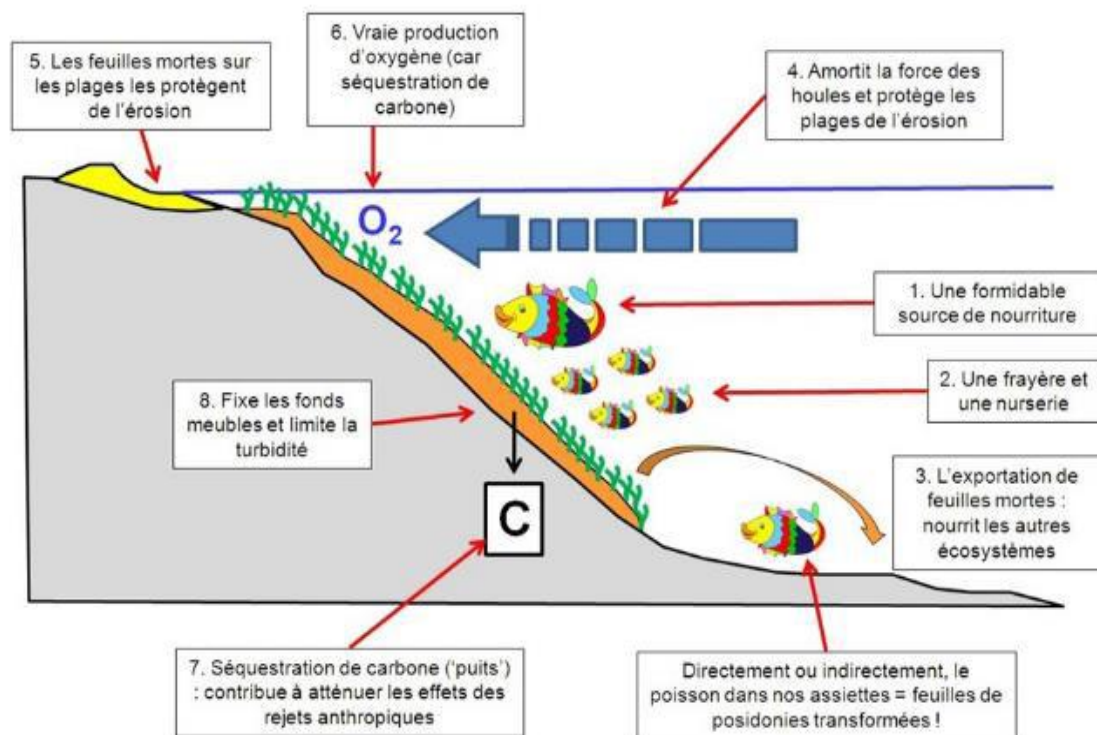


Figure 4 : Services écosystémiques rendus par les herbiers de Posidonie (Hounganadan, 2020).

1.5.2. Rôle dans les équilibres physiques du littoral

L'herbier joue également un rôle fondamental dans la protection hydrodynamique de la frange côtière et des plages par atténuation de 50% de la puissance des vagues, de la houle et des courants, stabilisée les fonds sableux par la fixation des sédiments dans le lacis des rhizomes constituant la matte (Bonhomme et Rouanet, 2015).

La dissipation graduelle de l'énergie des vagues et des courants prodigue une protection naturelle du littoral contre l'érosion marine et contribue à la stabilisation de la position du trait de côte. Au

niveau des fonds littoraux, les herbiers constituent de véritables barrières végétales qui favorisent la décantation et la sédimentation des particules en suspension dans la colonne d'eau (piégeage des sédiments) (Boudouresque *et al.*, 2006).

Les herbiers de Posidonie représentent une efficace protection des plages contre l'érosion (Taibi, 2011). Les feuilles mortes des herbiers est accumulée au niveau des plages forment des banquettes (Figure 5) qui assurent une protection efficace des plages sableuses en atténuant les mécanismes de transport sédimentaire, en limitant le phénomène d'érosion et en protégeant les plages lors des tempêtes hivernales. La présence des banquettes au niveau des rivages particulièrement pendant la saison automnale est un phénomène naturel (Zakhama-Sraieb *et al.*, 2009).



Figure 5 : Banquettes des feuilles mortes de l'herbier de Posidonie au niveau de la plage de Stidia.

1.5.3. Rôle de Bio-indicateur

La Posidonie est une espèce clé dans les eaux côtières méditerranéennes. Elle est largement utilisée comme indicateur biologique pour évaluer la qualité des eaux côtières. Elle permet d'évaluer l'état de santé des écosystèmes côtiers en raison de sa large distribution, de son mode de sédentarité et de sa sensibilité aux conditions environnementales changeantes (Montefalcone, 2009).

Sa capacité à concentrer une vaste gamme de xénobiotiques permet de disposer de véritables archives biologiques, qui renseigne sur l'évolution temporelle d'une pollution (Boudouresque *et al.*, 2006).

La limite inférieure constitue souvent un indice de la qualité des eaux, si cette limite est profonde la turbidité est faible et vice-versa. Par contre, la limite supérieure renseigne sur les changements naturels de l'environnement (l'hydrodynamisme et l'équilibre sédimentaire) et les conséquences des actions humaines (les ménagements littoraux, impact des ancrages, ...), la présence des mattes mortes au sein de l'herbier, révèle un équilibre fragile qui est due à l'activité balnéaire ou de la pêche. Par ailleurs, la Posidonie donne des informations sur le degré de contamination de l'environnement par les polluants, car elle accumule dans ses tissus, des métaux traces voire mémorise les teneurs passées et indique ainsi l'histoire de la contamination du site (Bensabra et Hemissi, 2012).

Tous ces paramètres justifient l'emploi des herbiers de Posidonie en tant que bio-indicateur, lors de la mise en place des réseaux de bio-surveillance de la qualité du milieu marin et littoral (Sghaier, 2013).

1.6. Menaces engendrées par les pressions anthropiques et le changement climatique

Les herbiers de Posidonie se trouvent dans des zones côtières, souvent soumises à des activités humaines intenses qui affectent inévitablement l'herbier, soit directement par des dommages physiques à l'herbier soit indirectement par l'impact sur la qualité des eaux et les sédiments. Un déclin alarmant des herbiers à *Posidonia oceanica* a été signalé en Méditerranée et principalement dans la partie nord-ouest du bassin, où de nombreuses prairies ont déjà été perdues au cours des dernières décennies (Montefalcone, 2009). Certaines de ces pressions peuvent entraîner des dommages irréversibles sur les herbiers (Abadie, 2012).

Ces pressions peuvent être induites par un ou plusieurs facteurs dont les plus importants sont :

1.6.1. Aménagements du littoral

Les aménagements côtiers comptent parmi les principales formes de pression anthropique rencontrée en Méditerranée. La constructions d'ouvrages maritimes (ports, marinas, etc) entraînent souvent une dégradation irréversible des herbiers. L'impacts de ces aménagements côtiers sur les herbiers peuvent être soit directs (destruction suite aux dragages des ports...), soit indirects (modifications des courants littoraux qui entraînent des changements dans les flux sédimentaires à l'origine des déchaussements de l'herbier de Posidonie) (Sghaier, 2013).

1.6.2. Activités humaines

1.6.2.1. Pollution marines et côtières

La pollution d'origine urbaine ou industrielle sous forme (chimique, organique, thermique, etc) est la principale menace qui affecte les herbiers, les rejets des eaux usées domestiques et industrielles augmentent la turbidité et induisent un enrichissement du milieu favorisant le développement excessif de certaines espèces, principalement les épiphytes qui entrent en compétition avec la Posidonie pour la lumière, ainsi qu'une poussée de phytoplancton il en résulte une diminution de la pénétration de la lumière entraînant ainsi la régression et même la mort des herbiers (Sghaier, 2013).

Le refroidissement des rejets d'eaux industriels peut entraîner une modification de la température de l'eau de mer, qui peut constituer une menace pour les organismes, l'augmentation de la température altérer la vitalité de la plante (Pergent-Martini et Le Ravallec, 2007).

1.6.2.2. Activités maritimes : pêche et plaisance

L'utilisation d'engins explosifs dans le cadre des activités de pêche : en effet, ces pratiques sont interdites par toutes les législations nationales en raison de leurs conséquences sur les stocks et l'environnement et lorsqu'elles continuent d'être pratiquées, elles n'affectent que de petites surfaces généralement moins d'un hectare (Pergent-Martini et Le Ravallec, 2007).

Le chalutage intensif est l'une des principales causes de la destruction à grande échelle des herbiers de Posidonie en particulier à des profondeurs de -15 à -30 m, l'installation et l'extension des stations aquacoles le long des côtes méditerranéennes constituent une menace pour les herbiers de Posidonie (Sghaier, 2013).

Dans les zones très fréquentées par le mouillage des bateaux, les herbiers sont labourés ensuite arrachés par les ancres, subissant ainsi de considérables dégradations physiques irréversibles (Sghaier, 2013).

1.6.3. Introduction des espèces exogènes envahissantes

L'introduction d'espèces exogènes peut menacer les herbiers de Posidonie de plusieurs manières. Les espèces invasives, voire envahissantes, peuvent concurrencer les espèces natives pour les ressources telles que la lumière, les nutriments et l'espace, et ainsi perturber l'équilibre écologique de l'herbier. De plus, certaines espèces invasives peuvent se nourrir directement de la Posidonie, réduisant ainsi la surface de l'herbier (Houngnadan, 2020). Enfin, les espèces invasives peuvent modifier la composition et la structure de l'herbier, ce qui peut affecter la biodiversité et la

fonctionnalité de l'herbier (Sghaier, 2013). Par exemple, l'introduction de l'algue *Caulerpa taxifolia* dans la Méditerranée a entraîné la destruction de vastes étendues d'herbiers de Posidonie, ce qui a eu des effets néfastes sur la biodiversité et les fonctions écologiques de l'écosystème (Verlaque, 1994).

1.6.4. Conséquences du changement climatique

Le changement climatique constitue une menace émergente pour les écosystèmes aquatiques du monde, notamment la Méditerranée qui est considérée comme hotspot du changement climatique et de biodiversité. Au-delà des pressions anthropiques évoquées précédemment, les herbiers de Posidonie seront exposés directement aux effets néfastes du changement climatique (UICN, 2012).

Les herbiers de Posidonie sont sensibles face aux événements extrêmes qui induite par le réchauffement climatique tels que les vagues de chaleur, les tempêtes violentes, les pluies extrêmes peuvent fortement impacter les herbiers (Alonso Aller *et al.*, 2019). L'élévation de la température des eaux entraîne à une baisse concentration en oxygène dans l'eau et une diminution du taux de la floraison des herbiers de Posidonie. La montée du niveau de la mer pourrait également expliquer certains reculs enregistrés au niveau de la limite inférieure de l'herbier de Posidonie, en relation avec la remontée de la profondeur de compensation, sur des fonds où la pente est très faible, une remontée du niveau de la mer de quelques centimètres pourrait entraîner un recul linéaire de l'herbier de plusieurs mètres. L'accroissement du dioxyde de carbone "CO₂" atmosphérique absorbée par les mers engendrer une acidification de la colonne d'eau c'est -à -dire une descende du PH "le potentiel hydrogène" moyen de l'eau de mer qui entraine des modifications significatives pour les herbiers de Posidonie et même pour les organismes qui vive en symbiose avec l'herbier (Pergent *et al.*, 2012).

La figure ci-dessous (Figure 6) montre les facteurs anthropiques qui influe l'herbier de Posidonie.

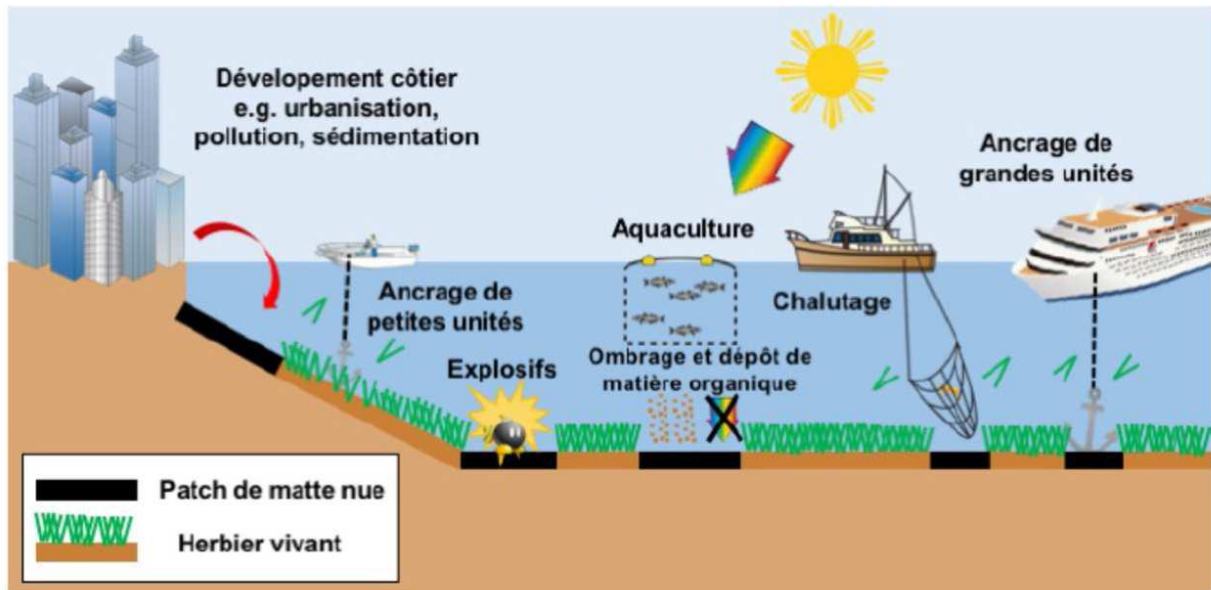


Figure 6 : Facteurs anthropiques influençant la structure du paysage formé par les herbiers de Posidonie (Abadie, 2016).

1.7. Statut de conservation de l'herbier de Posidonie en Méditerranée

Différents efforts ont été menés dans plusieurs pays afin de protéger légalement les herbiers de Posidonie. Cette espèce est inscrite sur la liste rouge des espèces marines menacées de Méditerranée et les herbiers sont définis comme habitats naturels prioritaires, compte tenu de l'importance écologique reconnue des herbiers et de la nécessité d'une bonne gestion, il est crucial de disposer de plans de surveillance standardisés adéquats afin de conserver cette habitat prioritaire (Montefalcone, 2009).

Plusieurs états riverains de la Méditerranée ont adopté des dispositifs réglementaires, résumés dans le tableau ci-après (Tableau 1), qui concourt à la sauvegarde du patrimoine écologique que forment les herbiers de Posidonie.

Tableau 1 : Dispositifs règlementaires qui concourt à la sauvegarde des herbiers de Posidonie (Boudouresque *et al.*, 2006).

Pays	Statut de conservation	Les textes juridiques	Moyens mis en place	Références
France	En France, la protection légale de l'herbier de Posidonie s'intègre dans le cadre de la protection de la nature concernant la protection de la flore et de la faune sauvages du patrimoine naturel français.	Le Décret du 20 septembre 1989 qui stipule la préservation des herbiers de Posidonies qu'ils constituent un site ou un paysage remarquable ou caractéristique du patrimoine naturel et culturel du littoral, sont nécessaires au maintien des équilibres biologiques ou présentent un intérêt écologique qui abritent des concentrations naturelles d'espèces animales ou végétales.	Le Réseau de Surveillance Posidonies (RSP) est le principal système de surveillance des herbiers de Posidonie dans la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA, France). L'objectif de ce réseau était double surveiller à long terme l'évolution de l'état des herbiers de Posidonies et utiliser ces herbiers comme indicateur biologique de la qualité globale des eaux littorales.	(Boudouresque <i>et al.</i> , 2006)
Italie	les compétences nationales en matière de défense de la biodiversité du milieu marin et côtier, des espèces marines protégées et de l'environnement marin dans son ensemble sont du ressort de la Direction pour la Protection de la Nature du Ministère de l'Environnement et de la Défense du Territoire.	l'Italie a mis en place une procédure légale qui vise à assurer la protection des herbiers à Posidonie, il s'agit de la loi "Nuovi interventi in campo ambientale" (n°426 – 9/12/98), ces textes consacrent des paragraphes spécifiques aux herbiers, avec notamment des dispositions financières pour la réalisation d'études et de programmes pour la protection et la cartographie de l'herbier de Posidonie.	la Direction de la Protection de la Nature du Ministère de l'Environnement a mis en place un plan spécifique pour la cartographie des herbiers le long des côtes méditerranéennes, conformément au « Programme national de repérage et de mise en valeur de l'herbier et d'étude des mesures de protection de celle-ci contre tous les phénomènes susceptibles d'en provoquer la dégradation et la destruction ».	(Boudouresque <i>et al.</i> , 2006)
Espagne	les gouvernements autonomes de Catalogne et de la Comunitat Valenciana disposent d'une protection effective de l'herbier de Posidonie	l'Ordre du 31 juillet 1991 permet la protection de l'herbier de Posidonie et d'autres espèces, en 1992 une cartographie détaillée des herbiers des côtes catalanes qui vise à recueillir des données sur le fonctionnement des herbiers de Phanérogames marines de manière à obtenir des informations utiles à leur protection et leur gestion	Des réseaux de surveillance des herbiers de Posidonie en Espagne ont été mis en place en Catalogne (33 sites), dans la Comunitat Valenciana (15 sites), aux Baléares (13 sites) et dans la Région de Murcia.	(Boudouresque <i>et al.</i> , 2006)

<p>Algérie</p>	<p>L'Algérie contribue à la protection et à la valorisation du littoral tous les sites d'intérêt écologique ou de valeur scientifique.</p>	<p>la Loi relative à la protection et à la valorisation du littoral parue au Journal Officiel n° 10 du 12 février 2002 indique que "l'occupation et l'utilisation des sols littoraux doivent préserver les espaces terrestres et marins remarquables ou nécessaires au maintien des équilibres naturels, les îlots et les îles et tous les sites d'intérêt écologique ou de valeur scientifique sur le littoral, tels que les récifs coralliens, les herbiers sous-marins et les formes ou formations côtières sous-marines".</p>	<p>L'Algérie bénéficie d'un certain nombre de réseaux de surveillances parmi ces services : RSP d'El djamila qui a été mis en place en 1997, comporte un carré permanent et un balisage au niveau de la limite inférieure et il a été suivi en 2000. Un système de surveillance très proche du RSP a été mis en place en Algérie dans la Région d'Alger</p>	<p>(Boudouresque <i>et al.</i>, 2006)</p>
-----------------------	--	---	---	---

2. Contribution des systèmes d'informations géographiques SIG dans la gestion et le monitoring des zones côtières

2.1. Définition d'un SIG

L'une des premières définitions d'un Système d'Information Géographique (SIG), celle du FICCDC-1988 (Comité fédéral de coordination inter-agences pour la cartographie numérique) : « un système informatique permettant à partir de diverses sources, de rassembler et organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement contribuant notamment à la gestion de l'espace ». De même, l'Agence Française de Normalisation (AFNOR, 1992), considère qu'un SIG est un ensemble coordonné d'opérations généralement informatisées destinées à produire et utiliser une information géographique sur un même territoire (Gourmelon et Robin, 2005).

De plus, un système d'information géographique peut également se définir comme un ensemble d'équipements informatiques de logiciels et de méthodologies pour la saisie, la validation, le stockage et l'exploitation de données dont la majorité est spatialement référencée. Ce dispositif vise particulièrement à combiner au mieux les différentes ressources accessibles (base de données, savoir-faire, capacité de traitement) qui lui sont demandées. Il apporte ainsi un appui essentiel dans la prise de décision des responsables d'un organisme (Gourmelon et Robin, 2005).

2.2. Fonctionnalités et fonctions d'un SIG

Un système d'information géographique (SIG) est un outil qui permet de stocker, de traiter et d'afficher des données géographiques. Il peut être utilisé dans de nombreux domaines tels que la gestion de l'environnement, la planification urbaine, l'agriculture, la gestion des ressources naturelles, la cartographie, etc. Les SIG sont constitués de plusieurs composantes qui permettent de gérer les données spatiales telles que des cartes, des images satellitales, des données topographiques ou des données issues de capteurs, et de les traiter pour en extraire des informations. Les fonctionnalités des SIG sont regroupées en 5 catégories (Figure 7) : l'abstraction (conception de modèles de données), l'acquisition (collecte de données géographiques), l'archivage (stockage des données), l'affichage (visualisation des données) et l'analyse (traitement des données) (Marmonier, 2002). Les SIG permettent de représenter des phénomènes spatiaux, de les analyser, de simuler des scénarios, de planifier des interventions et de prendre des décisions.

Les systèmes d'information géographique peuvent répondre à différents besoins. Comme le système universel n'existe pas, il faut les adapter selon les objectifs fixés. Toutefois ils ont en commun des fonctionnalités que l'on retrouve dans chaque système regroupé en 5 familles sous le terme des « 5A » : **Abstraction, Acquisition, Archivage, Affichage et Analyse** (Marmonier, 2002). Ces termes résument les principales fonctionnalités pour chaque SIG : différents modèles mise en œuvre, nombreuses application, présentations multiples des données, variété des informations et capacités de stockage.

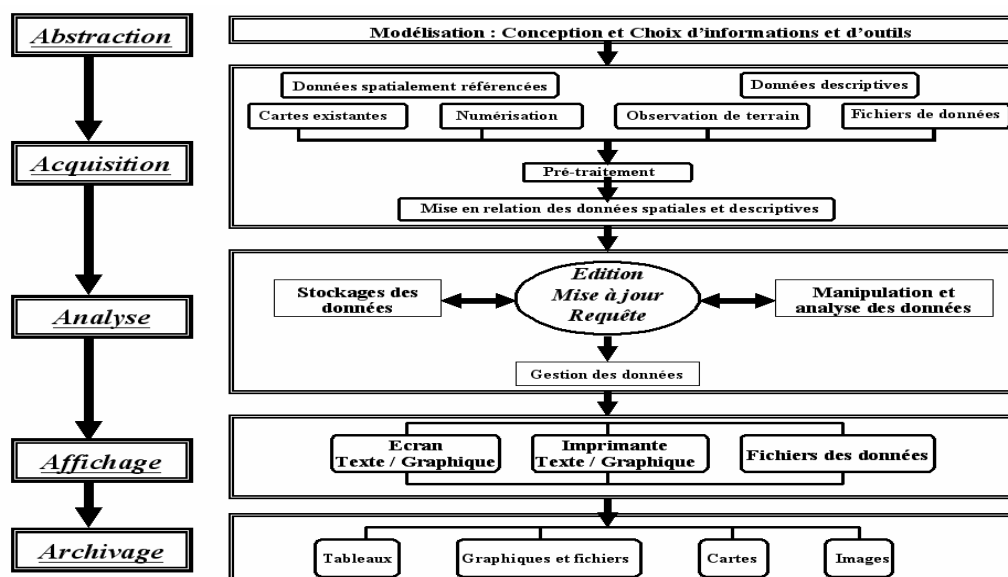


Figure 7 : Fonction d'un SIG (Smida, 2008).

2.3. Rôles des SIG dans le suivi des écosystèmes côtiers et marins

La zone côtière est un espace extrêmement complexe dont le fonctionnement et l'évolution sont conditionnés par de multiples paramètres naturels et anthropiques qui interagissent à différentes échelles spatiotemporelles. Les systèmes écologiques sont variés, généralement très productifs, et d'autant plus fragiles que leurs ressources renouvelables subissent une pression anthropique croissante, pouvant menacer l'équilibre global. (Gourmelon et Robin, 2005).

Le SIG apparaît comme l'outil le plus approprié pour gérer les zones côtières qui permet d'une évolution spatiale et temporelle de tous les facteurs qui contrôlent leur changement afin de mieux analyser et d'évaluer l'impact sur les milieux littoraux et de les gérer correctement. Chaque zone côtière nécessite des stratégies de gestion différentes et donc des utilisations SIG différentes pour traiter chaque problème SIG utilisée dans la gestion des zones côtières dans : la gestion des risques côtiers, le SIG aide à l'analyse statistique, nécessaire pour réaliser un modèle spatio-temporel multivarié qui estime la probabilité d'occurrence des risques. Traitant de traits de rivage correspondant à des années différentes, le SIG permet l'analyse des tendances évolutives pour définir le comportement du système. Les SIG utilisés dans les études d'évolution des champs de dunes sont indispensables pour estimer les taux de migration des dunes et analyser toutes les variables impliquées dans ce processus et offrant des cartes de risque côtier (Rodriguez *et al.*, 2009).

2.4. Intérêts de la cartographie des herbiers de Posidonie

2.4.1. Détermination de l'état globale de l'herbier de Posidonie

La cartographie de la répartition des herbiers permet d'illustrer et d'identifier les étendues occupées par l'herbier de Posidonie et de déceler les macros régressions de l'herbier (évolution linéaire de la limite supérieure). Les cartes réalisées viennent en appui aux constats écologiques opérés sur le terrain et sont un instrument de visualisation et de communication très intéressant dans l'aide à la gestion et à la gouvernance des littoraux concernés. Les objectifs de la cartographie des herbiers de Posidonie sont multiples puisqu'il s'agit premièrement de dresser un état des lieux des herbiers à grande échelle spatiale puis dans un second temps de cartographier l'évolution de la répartition spatiale de l'herbier (stabilité de l'herbier ou progression de l'herbier ou bien régression de l'herbier) entre les périodes anciennes et actuelles pour finalement mettre en lien les cartographies évolutives des herbiers avec les pressions anthropiques (Holon *et al.*, 2013).

2.4.2. Gestion et conservation des écosystèmes marins

L'herbier de Posidonie est utilisé comme élément de qualité biologique dans les programmes de surveillance à long terme de la directive-cadre sur l'eau (DCE) pour l'évaluation de l'état écologique des eaux côtières. L'objectif principal de la cartographie des herbiers de Posidonie est de comparer l'état écologique des eaux côtières et des écosystèmes marins à travers leurs répartitions dans une large étendue spatiale, pour objectif de conserver et de gérer de déterminer l'état écologique de tous ces environnements marins afin un développement durable et une bonne gestion des écosystèmes marins (Güreşen *et al.*, 2020).

2.4.3. Surveillance et suivi des changements environnementaux

Dans un environnement changeant, on s'intéresse de plus en plus à la surveillance des écosystèmes pour comprendre leurs réponses aux changements environnementaux. La cartographie des herbiers de Posidonie est nécessaire pour le monitoring de tout changement du milieu marin car sont des écosystèmes très importants qui sont sous la pression constante des activités humaines et des impacts climatiques, donc sont des espèces bio-indicatrices et leurs déclin peuvent être utilisée comme des signaux précoces pour le changement environnemental (Alonso Aller *et al.*, 2019).

2.4.4. Évaluation de l'impact des activités humaines

Les herbiers de Posidonie sont des communautés qui offrent une grande variété de services écosystémiques à la fois écologiques et socio-économiques. L'impact d'origine humaine sur ces habitats a été largement évalué, bien que les conclusions puissent varier selon la zone. Elles sont soumises à différentes sources d'impacts associés au développement côtier a un impact indéniable sur les écosystèmes marins qui se fait au détriment des communautés les plus sensibles ainsi le développement industriel, social et touristique, tels que le développement portuaire, le trafic maritime, les rejets chimiques, etc. La cartographie des herbiers de Posidonie est devenue nécessaire pour l'évaluation des activités humaines en raison de leur sensibilité aux conditions environnementales changeantes et leur capacité à concentrer les polluants donc sont considérée comme un moniteur biologique de l'impact des activités anthropiques sur les écosystèmes marins (Blanco-Murillo *et al.*, 2022).

3. Différentes méthodes existantes pour la cartographie de la répartition des herbiers de Posidonie

Dans le contexte des changements environnementaux mondiaux actuels, la cartographie et la surveillance des herbiers marins sont devenues des outils importants pour la gestion et la préservation des écosystèmes marins et côtiers (Puhr *et al.*, 2014).

La cartographie de l'herbier de Posidonie fait appel à de nombreuses données d'origine et de nature différentes, dont l'ensemble est destiné à être traité pour être cartographié, le traitement de cet ensemble de données nécessite de suivre une méthode rigoureuse depuis leur collecte jusqu'à leur restitution sous forme de cartes.

Les données requises sont des données à acquérir aux différents moyens : de la photographie aérienne, de la plongée sous-marine, de la télédétection, et du moyen de l'acoustique (Denis *et al.*, 2002). Le maillage de la cartographie d'herbiers est défini en fonction de l'objectif de l'étude qui est lui-même dépendant de la méthode utilisée ou des moyens disponibles (Fontan *et al.*, 2011). On peut donc distinguer plusieurs méthodes d'observation et de suivi des herbiers de Posidonie.

3.1. Méthodes traditionnelles

3.1.1. Plongée sous-marine

Les prélèvements et les observations sur le terrain fournissent des données discrètes. Les observations *in situ* peuvent en outre constituer des techniques de levé à part entière lorsqu'elles sont utilisées le long de lignes (transects) ou sur de petites surfaces (carré permanent) (Pergent-Martini, 2015).

A l'aide de la plongée sous-marine on peut réaliser des observations *in situ*, qui nous permettent à l'aide de paramètres standardisés d'apprécier la présence ou non d'herbier de Posidonie et d'évaluer l'état de vitalité et la dynamique de l'herbier (Denis *et al.*, 2002).

Selon Denis *et al.*, (2002) l'estimation de l'état de vitalité de l'herbier de Posidonie fait appel à plusieurs paramètres :

a. Densité de l'herbier

Ce paramètre correspond au nombre de faisceaux de feuilles présents par unité de surface (en mètre carré). La densité est mesurée au hasard au moyen d'un quadrat de 20 cm de côté avec 3 à 5 mesures pour une station donnée. Selon les travaux de Giraud (1977) la densité de l'herbier varie selon six (06) classes, allant de Faisceaux isolé (Moins de 50 faisceaux/m²) à l'herbier très dense (Plus de 700 faisceaux/m²) (Tableau 2).

Tableau 2 : La densité des faisceaux de feuilles par mètre carré et son type d'herbier (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. Mesure du déchaussement des rhizomes

Ce paramètre traduit entre autres l'existence d'un déficit sédimentaire de l'herbier, permettant ainsi d'apprécier l'hydrodynamisme et le transit sédimentaire qui y ont lieu.

Selon Denis *et al.*, (2002), le déchaussement est mesuré à la base des faisceaux selon 5 mesures réparties de façon aléatoire par station. On distingue trois (03) classes de déchaussement, allant de moins de 5 cm (faible déchaussement) à plus de 15 cm (déchaussement important) (Tableau 3).

Un déchaussement important entraîne une fragilisation de l'herbier et accroît sa vulnérabilité vis-à-vis des actions de mouillage et de chalutage (Denis *et al.*, 2002).

Tableau 3 : Les valeurs de déchaussement des rhizomes et son interprétation (Giraud, 1977).

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

c. Pourcentage de rhizomes plagiotropes

Les rhizomes plagiotropes forment une bordure des taches à proximité des îlots de Posidonie, dont leur présence est un indice de bonne vitalité de l'herbier car elle traduit une tendance à la progression (Denis *et al.*, 2002) (Tableau 4).

Tableau 4 : Les pourcentage des rhizomes plagiotropes et son interprétation (Giraud, 1977).

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

d. Recouvrement de l’herbier

Ce paramètre correspond au pourcentage des surfaces couvertes par l’herbier de Posidonie vivante par rapport aux surfaces non couvertes (sable, matte morte, roche), variant selon l’état de vitalité de l’herbier. Le recouvrement présente des valeurs plus faibles avec la profondeur et lorsque l’herbier est soumis à des conditions de développement moins favorables (proximité de zones perturbées par des aménagements ou des rejets). Les méthodes actuellement utilisées pour estimer le recouvrement soit par une évaluation visuelle direct soit à travers une plaquette transparente de 30 cm x 30 cm (Denis *et al.*, 2002).

L’interprétation des valeurs du recouvrement varie différemment entre la limite inférieure et la limite supérieure selon trois classes comme indiqué dans le (Tableau 5).

Tableau 5 : Les pourcentage du recouvrement et son interprétation (Giraud, 1977).

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

e. Evaluation de la dynamique de l’herbier de Posidonie

Ce paramètre est mesuré le long des marges de l’herbier (limite inférieure et/ou limite supérieure). L’estimation de la dynamique de l’herbier de Posidonie permet d’apprécier son caractère évolutif. Selon Denis *et al.*, (2002), il existe quatre (04) types de limites :

- **Les limites progressives** : sont caractérisées par la présence de rhizomes plagiotropes (croissance horizontale).
- **Les limites franches** : caractérisées par la présence de rhizomes orthotropes (à croissance verticale) traduisent souvent un herbier stable avec des conditions de milieu stabilisées.
- **Les limites érosives** : caractérisées par un tombant de matte qui marque la limite entre les herbiers de Posidonie et le sédiment, résulte de l’hydrodynamisme et l’action des courants de fonds qui érode l’herbier et interdit toute progression vers de plus grandes profondeurs.
- **Les limites régressives** : sont caractérisées par la présence d’une étendue de matte morte et quelques faisceaux de feuilles témoins de l’ancienne position de l’herbier.

3.1.2. Photographie aérienne

La photographie aérienne devenue la source la plus courante pour les études de cartographie des herbiers marins (Mancini *et al.*, 2023).

Plusieurs cartes ont été établies grâce à l'utilisation de photographies aériennes qui permettent une bonne localisation des contours de l'herbier situé entre la côte. Les limites supérieures des herbiers de Posidonie figurées sur les nombreuses cartes ont été localisées essentiellement grâce aux documents photographiques.

La zone exploitable par cette méthode est située entre 0 et - 10 m (- 20 m au maximum), en raison de la pénétration insuffisante de la lumière au-delà de 20 m de profondeur pour photo-identifier l'herbier de Posidonie. Cette méthode présente d'autres limites, dues notamment à la turbidité de l'eau de mer. Les meilleurs résultats seront obtenus avec une mer absolument calme sans aucune ride et avec une turbidité minimale pour le secteur considéré. Ces conditions sont essentielles pour obtenir de bons clichés et sont déterminantes pour la portée maximale en profondeur (Meinesz *et al.*, 1981).

3.2. Nouvelles technologies de cartographie

3.2.1. Télédétection

La télédétection a été largement utilisée pour surveiller et cartographier les écosystèmes d'herbiers marins à travers le monde (Veettil *et al.*, 2020). La télédétection des herbiers de Posidonie est fondée sur le principe qu'un capteur peut différencier le substrat de la végétation au-dessus, la couche de renseignements sur les herbiers est couverte par la colonne d'eau ce qui atténue la progression de la lumière réfléctée. Les plantes aquatiques ne peuvent pas être reconnues par leur rayonnement rouge comme les plantes terrestres car celui-ci est atténué de façon significative par l'eau pure, dans les eaux côtières la dispersion spectrale et l'absorption par le phytoplancton, la matière organique et inorganique en suspension et les substances organiques dissoutes provoquent la diminution de la lumière réfléctée par le benthos donc l'exactitude des données diminue avec l'augmentation de la profondeur (Fontan *et al.*, 2011).

3.2.2. Acoustique

Le sonar acoustique fournit des images du fond à travers l'émission et la réception d'ultrasons. Parmi les principales technologies de cartographies acoustiques distinguent : les systèmes à larges faisceaux acoustiques (sonar à balayage latéral), les sondeurs à faisceau unique et les systèmes

bathymétriques à faisceaux étroits multiples et les sondeurs multifaisceaux (Pergent-Martini, 2015).

La méthode acoustique, avec une très grande résolution, permet d'obtenir des images en 3 dimensions des fonds et donc de visualiser les herbiers mais également d'en apprécier la biomasse et indiquent la répartition et les limites des différentes entités sur une surface de 100 à 200 m. La cartographie final dépend en partie des moyens de positionnement utilisés par le bateau (Pergent-Martini, 2015).

Chapitre II : Matériels et Méthodes

1. Présentation de la zone d'étude

1.1. Localisation géographique et description géomorphologique et écologique de la plage de Stidia

La wilaya de Mostaganem située au Nord-Ouest du territoire national. Mostaganem est une ville côtière caractérisée par la présence d'un cordon littoral et d'une longueur de 124km, qui débute de l'embouchure de El-Mactaa à l'ouest, au Cap Nagraoua à l'est.

Le site de Stidia est situé à environ 20 km vers l'Ouest de la ville de Mostaganem, où passe le méridien de Greenwich (Figure 8).

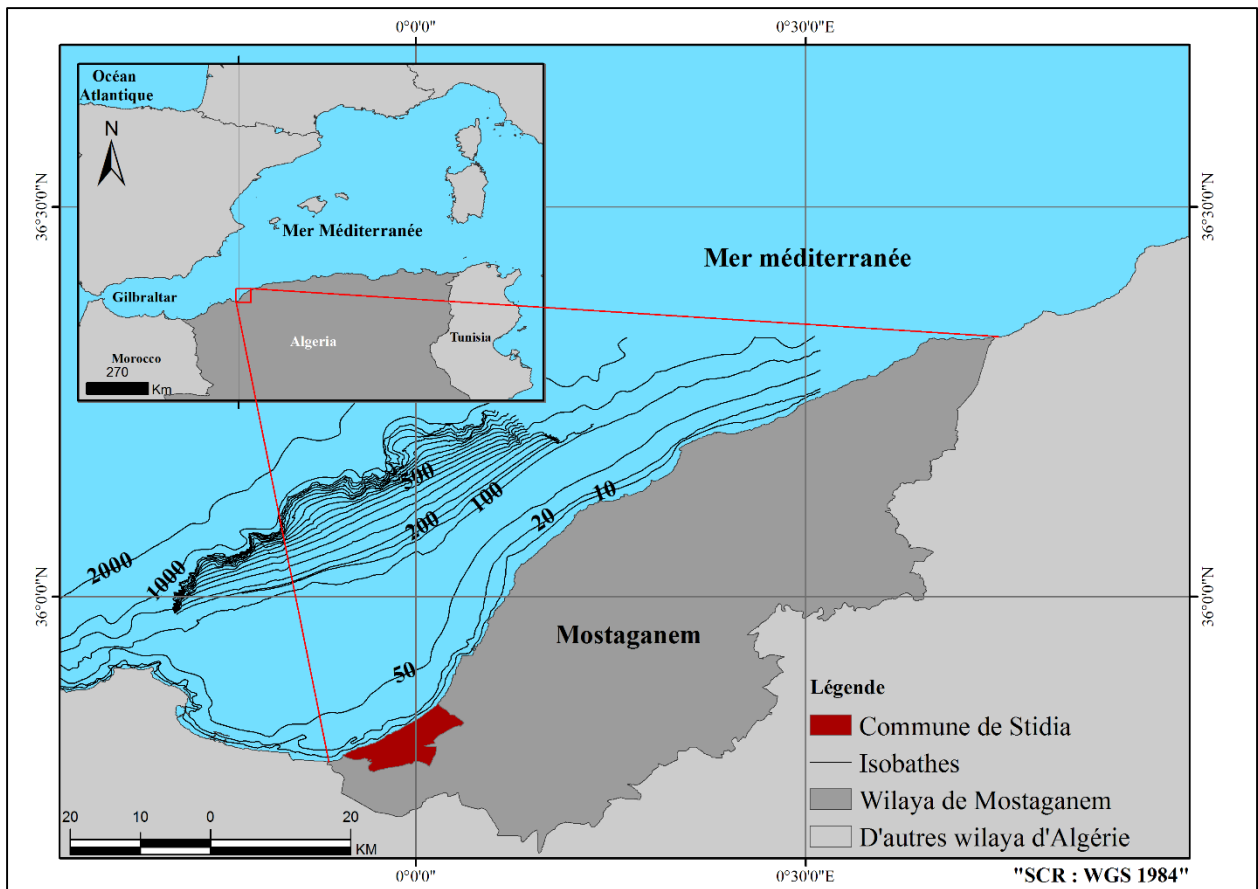


Figure 8 : Situation géographique du site d'étude Stidia.

Le site est caractérisé par la présence d'un substrat dur au niveau des premiers mètres de profondeur (entre 0-3m). En allant vers le large, la nature du substrat change et devient meuble caractérisé par du sables fins et grossier (Benzait, 2014).

Certains traits particuliers font de la plage de Stidia une frange côtière riche en biocénose de l'herbier de Posidonie, notamment les conditions climatiques et la nature de substrat qui favorise l'installation de l'herbier de Posidonie.

L'herbier à *Posidonia oceanica* de ce site se développe sur substrat meuble, les plages sableuses qui y existent ont un linéaire côtier assez réduit et d'une largeur qui ne dépasse pas une quinzaine de mètre. Globalement, l'aspect sous-marin de ce site est principalement constitué par une alternance de substrat rocheux d'éboulis et de substrats sableux (Belbachir, 2012).

1.2. Description des conditions climatiques et hydrodynamiques

1.2.1. Contexte climatique et océanographique

- **Contexte climatique**

La région de Mostaganem est soumise à un climat de type méditerranéen, caractérisé par une longue période sèche, allant du mois d'avril au mois d'octobre. De point de vue bioclimatique, elle se situe dans un étage semi-aride avec de précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 350 mm/an et des températures moyenne annuelle avoisinant les 19 °C.

Les températures les plus élevées sont enregistrées durant la saison estivale, où la température de l'eau de mer en surface peut atteindre 24 °C. Par contre, des fluctuations saisonnières de la température de l'eau de mer sont enregistrées sur tout le long de la côte algérienne, et en particulier à Mostaganem, avec des baisses qui peuvent atteindre 12 à 10 °C en hiver.

La salinité de surface au voisinage de la côte est de l'ordre de 36% à 38%, ces fluctuations sont associées aux changements de pluies et températures locales dont le maximum se situe en été. La salinité décroît légèrement d'hiver en été, période qui correspond au maximum de température (Benzait, 2014).

- **Contexte océanographique et hydrodynamique**

Le littoral de Mostaganem est soumis aux vents dominants du secteur Ouest et Nord-Ouest, avec une prépondérance aux vents de l'ouest pendant l'automne et l'hiver et une prépondérance aux vents du nord et du nord-est pendant le printemps et l'été.

Etant donné la zone d'étude est situé à l'intérieur de la baie d'Arzew, les vents du secteur nord-ouest arrivent avec une incidence relativement perpendiculaire. Ces derniers engendrent un train de vagues important et un hydrodynamisme côtier fort durant la période hivernale.

1.3. Description des activités socio-économiques et leurs impacts sur le milieu marin et l'herbier de Posidonie

Le littoral de Stidia concentre de nombreuses activités humaines notamment l'urbanisation, la pêche artisanale, l'agriculture (vignoble et maraichage), tourisme balnéaire de masse.

C'est une zone côtière très convoité par les pêcheurs et les plongeurs sous-marins. Elle se caractérise par la présence d'un abri de pêche, l'urbanisation à moins de 100 m. Toutes ces activités exercent une pression anthropique importante, et sans cesse croissante, sur les écosystèmes marins et côtiers et présentent particulièrement une menace avérée sur les herbiers de Posidonie.

Par ailleurs, sa localisation entre les deux grands ports, notamment le port de commerce, trafic maritime et de pêche de Mostaganem et le terminal pétrolier et de gaz naturel d'Arzew, l'expose à deux sources potentielles de pollution, par-dessus des rejets des eaux usées de la ville de Stidia. Ces eaux usées, directement rejetées dans l'eau de mer, vont engendrer une pollution marine le long des plages de Stidia, ce qui constituera un facteur supplémentaire de perturbation de l'herbier à *P. oceanica* (Belbachir, 2012).

2. Méthode de travail

2.1. Choix d'une approche diachronique basée sur les systèmes d'information géographique (SIG)

Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser une approche diachronique à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG). En effet, la cartographie des herbiers de Posidonie a été réalisée en superposant les informations extraites des images satellitales provenant de Google Earth Pro. Ces images nous ont permis d'avoir un aperçu complet de la zone d'étude de Stidia à différentes dates, pour identifier et suivre l'évolution de la limite supérieure de l'herbier de Posidonie dans le temps (approche diachronique). Les informations obtenues ont été combinées dans un SIG, qui nous permet de localiser la répartition des herbiers de Posidonie au-devant de la plage de Stidia, ainsi de suivre leur évolution spatio-temporelle ; c'est-à-dire s'il y'a une stabilité, une progression et/ou une régression des surfaces occupées par les herbiers de Posidonie dans le temps.

2.2. Description du logiciel ArcGIS

ArcGIS est une plateforme intégrée qui permet aux développeurs de créer, manipuler, partager et analyser des données géographiques. Il est composé de plusieurs composants qui communiquent entre eux et peuvent fonctionner sur des ordinateurs de bureau, des mobiles, des serveurs et des services en ligne (Flores et Gallardo, 2021).

Le logiciel ArcGIS comprend principalement les applications suivantes :

a/ArcMap : crée des cartes à partir des couches de données spatiales, choisit les couleurs, les symboles, interroge, analyse les relations spatiales et conçoit la mise en page de la carte.

b/ArcCatalog : parcourez les données spatiales contenues sur le disque dur, le réseau ou Internet, recherchez des données spatiales, prévisualisez les données, créez des entités et des métadonnées.

c/ArcToolbox : utilise de nombreux outils pour effectuer différents types d'analyse allant de la conversion de données spatiales d'un format à un autre, des données de projection, l'interpolation, l'analyse et bien d'autres.

2.3. Description du logiciel Google Earth Pro

Google Earth Pro c'est un service de cartographie et leur fonctionne repose sur des technologies informatiques spécifiques, offrent une visualisation de l'ensemble de la surface du globe terrestre au moyen d'assemblages d'images satellitaires et de photographies aériennes, dont les résolutions sont variables dans l'espace (Lonchay, 2007).

En plus des services supplémentaires destinés aux professionnels et aux entreprises, Google Earth Pro offre aux utilisateurs la possibilité d'explorer la surface du globe terrestre en deux et trois dimension (2D et 3D). Il n'est pas seulement un outil de visualisation car il intègre à son service un moteur de recherche géographique capable de localiser un lieu selon le choix de l'utilisateur (Lonchay, 2007).

2.3.1. Avantages et les inconvénients des imageries satellites fournit par le logiciel Google Earth Pro

Le tableau suivant (Tableau 6) résume les avantages et les inconvénients des imageries satellites fournit par le logiciel Google Earth Pro qui est destinée pour le suivi et l'évaluation des écosystèmes côtiers et marins.

Tableau 6 : Avantages et les inconvénients des images satellitaires fournit par Google Earth Pro.

Avantages	Inconvénients	Références
<ul style="list-style-type: none"> - Offrent une résolution spatio-temporelle fine et une couverture mondiale a montré un grand potentiel pour surveiller les changements environnementaux. - Haute résolution spatiale, acquisition digitale est rapide et une large couverture et facile à géo-référencer. - Utilisable partout avec une précision géométrique élevée. 	<ul style="list-style-type: none"> - L'exactitude diminue avec l'augmentation de la complexité du milieu. - Erreur d'interprétation liée aux variations bathymétriques. - Nécessite des bonnes conditions météorologiques (absence de nuages, et de vent). 	<p>(Li <i>et al.</i>, 2023) (Fontan <i>et al.</i>, 2011) (Pergent-Martini, 2015)</p>

3. Mise en place du protocole de suivi

3.1. Collecte et préparation des données

3.1.1. Acquisition des données de base

L'étude de l'évolution spatio-temporelle des herbiers à *Posidonia oceanica* a nécessité l'acquisition de données géographiques, qui vont servir de base à notre Système d'information géographique de Posidonie. Pour cela nous avons utilisé les images satellitales de Google Earth Pro et une carte marine de la frange maritime de Mostaganem (Tableau 7).

Tableau 7 : Données collectées en vue de cartographier la Posidonie au-devant de la plage de Stidia (Mostaganem).

Données	Date	Résolution spatiale / échelle	Source
Image satellitale	2022	0,57 m	Google Earth Pro
Image satellitale	2018	0,57 m	Google Earth Pro
Image satellitale	2014	0,57 m	Google Earth Pro
Carte marine	2005	1 / 120.000	Service Hydrographique des Forces Navales (SHFN)

3.1.2. Téléchargement des imageries satellites de Google Earth Pro et et leur préparation pour l'analyse et le traitement sous SIG

Premièrement on enregistre des images de la zone d'étude de Stidia à l'aide du logiciel Google Earth Pro selon 03 périodes avec un intervalle de quatre ans entre périodes.

Les dates sont choisies selon plusieurs critères, à savoir la clarté de l'image, l'absence de bruit atmosphérique (aérosols, nuage ou fumé), conditions météorologiques et hydrodynamiques optimales (absence des nuages, des vents et des vagues, ainsi qu'un éventuel transport sédimentaire important), la résolution spatiale et temporelle des images. Les images sont enregistrées selon une prise de vue située à 400 m d'altitude, afin d'avoir une meilleure résolution spatiale nous permettant de déterminer la limite supérieure de l'herbier de Posidonie.

Pour l'enregistrement des images il faut mettre quatre points de repères et on les enregistre sous le format de fichier natif interopérable KML (Keyhole Mark-up Language) qui nous aide ensuite dans l'étape du géoréférencement de l'image (Figure 9).

Ensuite, il faut que les images satellitaires enregistrées à l'aide du logiciel Google Earth Pro chevauchent sur leurs extrémités, pour qu'il n'y ait pas de vide entre les images et d'avoir une couverture complète et homogène de la zone d'étude.



Figure 9 : Enregistrement d'une image à l'aide du Google Earth Pro.

3.2. Manipulation et traitement des données dans le SIG

3.2.1. Importation des points de contrôle

Après l'étape de l'enregistrement des images on passe à la deuxième étape qui est l'importation des points de contrôle (les repères) des images enregistrer sur ArcMap afin de les permettre de les géoréférencer (Figure 10).

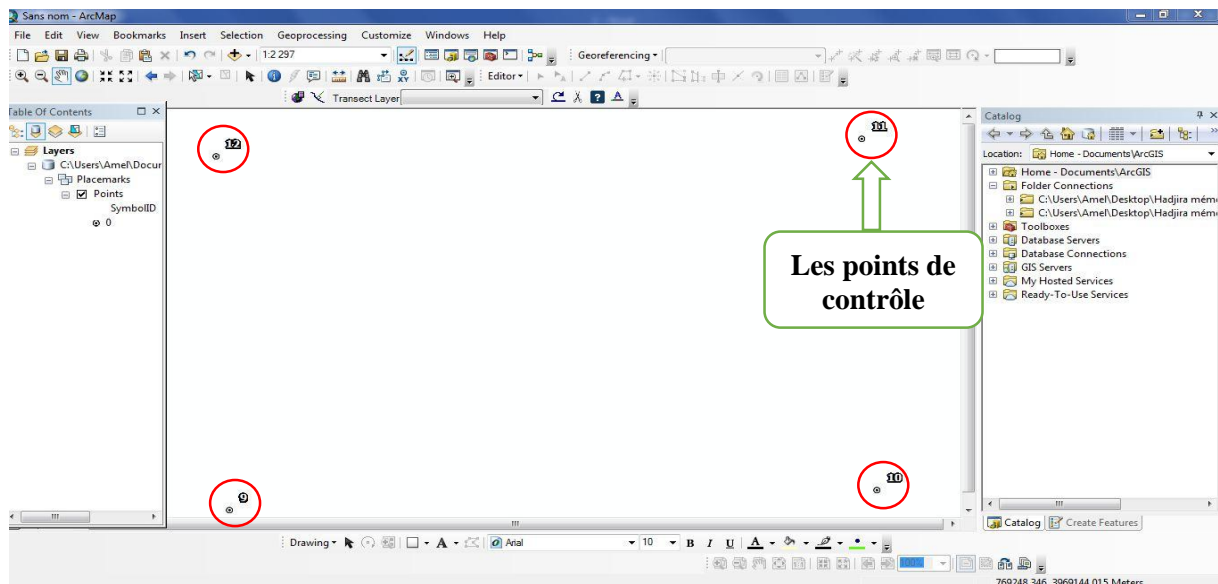


Figure 10 : Photographie montrant l'importation des points de contrôle (repères) dans le logiciel ArcGIS.

3.2.2. Importation et géoréférencement des images

Ensuite on passe à l'étape de l'importation les images dans le logiciel ArcMap pour les géoréférencier.

Le géoréférencement est une procédure qui permettant de positionner une image télécharger à l'aide de ses coordonnées géographiques c'est-à-dire permettre de donner l'emplacement spatial d'une entité géographique. Il faut définir le système de cordonnée géographique compatible avec la zone d'étude avant de toute manipulation sur le logiciel ArcGIS dans ce cas c'est : WGS (World Geodetic System) 1984 UTM (Universal Transverse Mercator) Zone 30N.

On ouvre l'outil de géoréférencement (Géoreferencing) pour géoréférencer l'image (Figure 11).

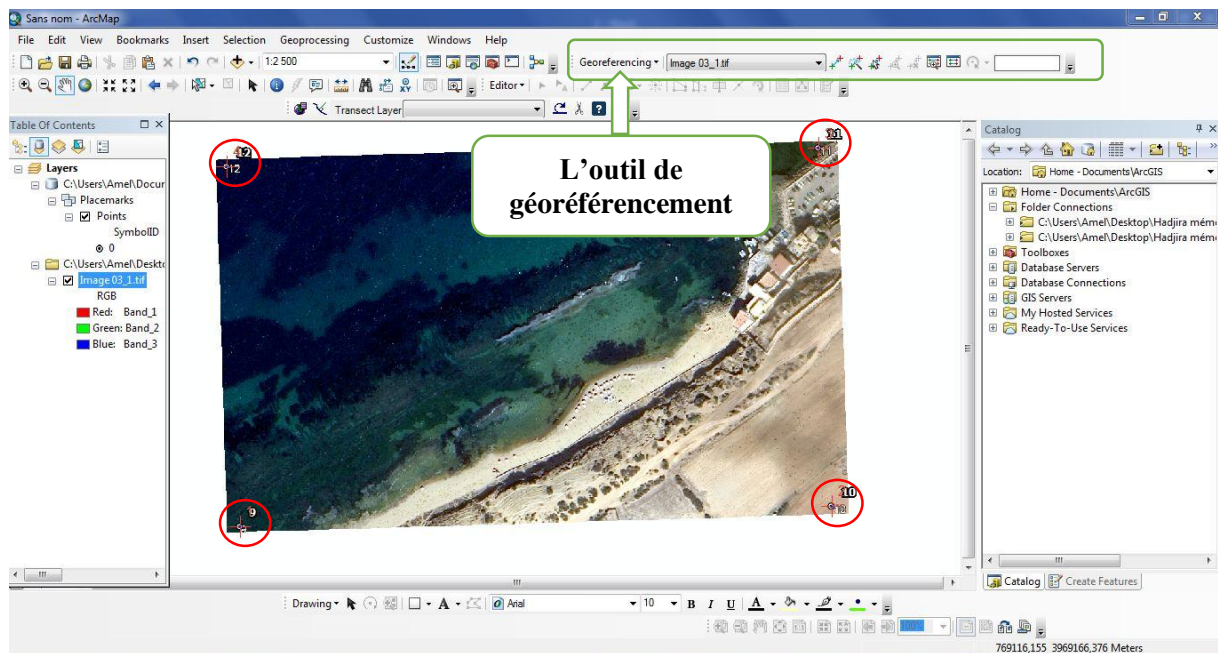


Figure 11 : Opération de géoréférencement de l'image satellitaire sur ArcMap.

A l'issue du géoréférencement des images satellitaires Google Earth Pro, on obtient un assemblage d'images couvrant l'ensemble de la zone d'étude (Figure 12).

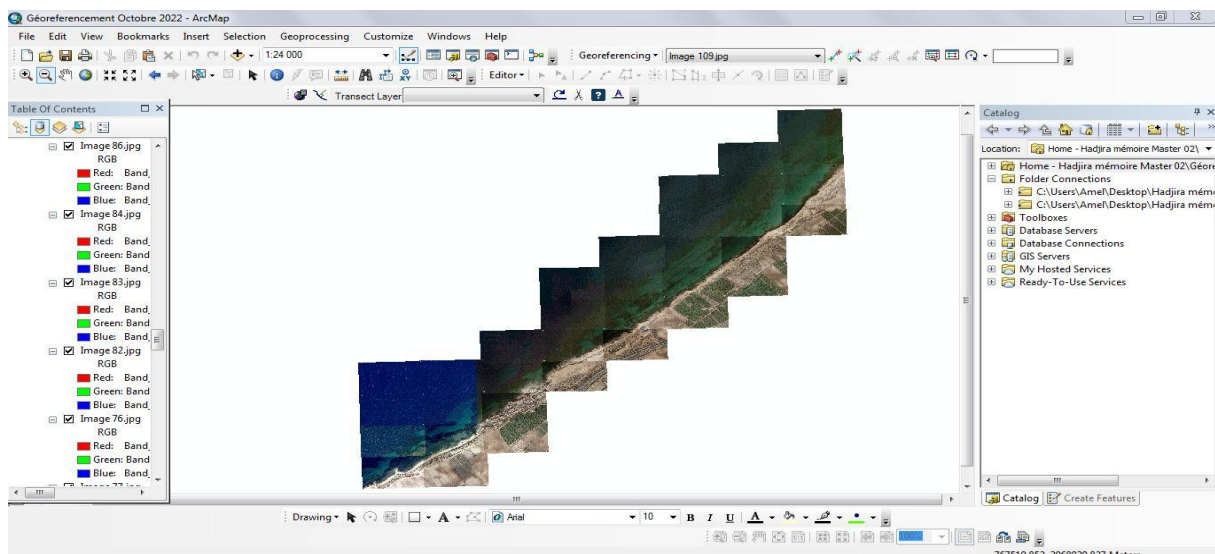


Figure 12 : Ensemble d'images géoréférencées couvrant la zone d'étude.

3.2.3. Géoréférencement de la carte marine et superposition des images

On passe à l'étape du géoréférencement de la carte pour superposer les images géoréférencées. On a choisi le système de coordonnées géographiques : WGS 1984, pour géoréférencer la carte on a besoin au moins de 4 point fixe sur la carte (des repères) avec des coordonnées géographiques connues (Figure 13).

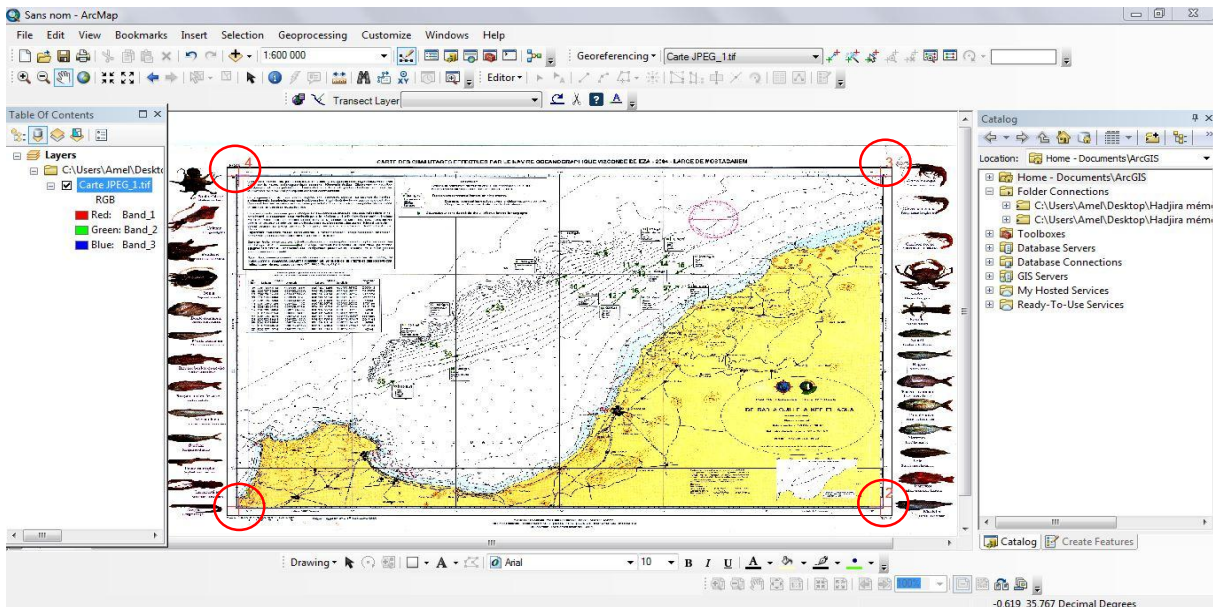


Figure 13 : Géoréférencement de la carte marine.

Après on fait la superposition les images satellitales géoréférencées sur la carte qui est déjà géoréférencée (Figure 14).

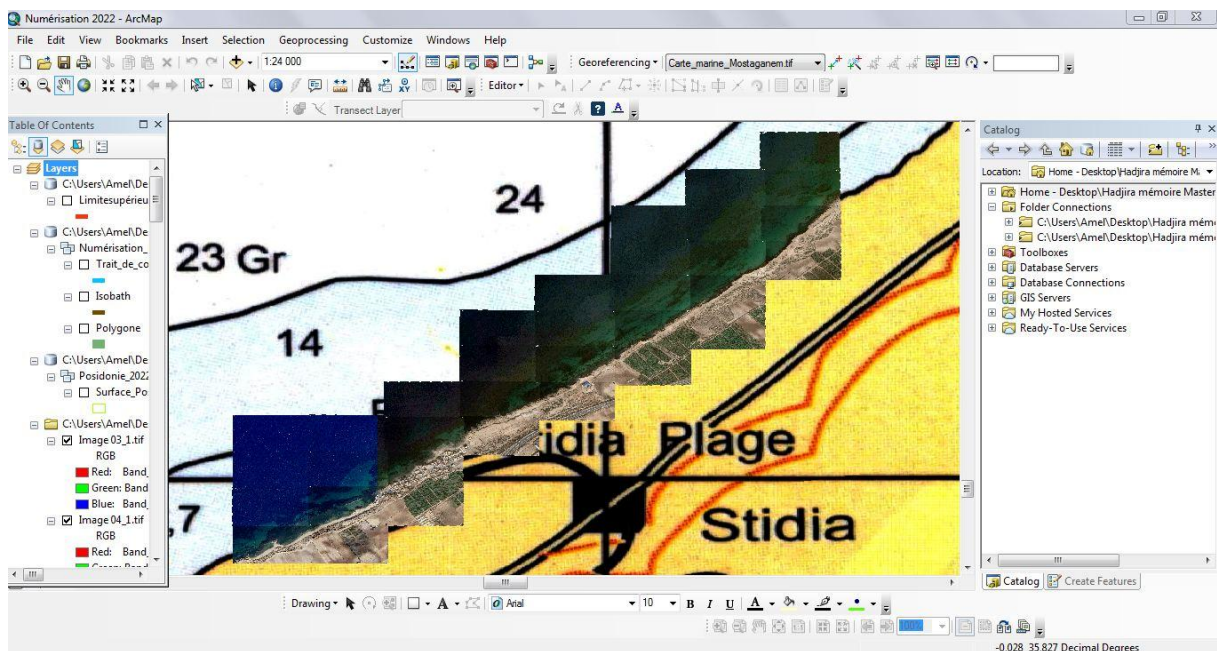


Figure 14 : Superposition des images sur la carte.

3.3. Analyse des données dans le SIG

3.3.1. Numérisation

La numérisation c'est la transformation de l'information visuelle raster en format numérique vecteur. On fait la numérisation du trait de côte et l'isobathe qui est représentée une ligne joignant des points d'égale profondeur dans notre cas c'est 10 m de profondeur (Figure 15).

Après on créer un polygone qui couvre la surface qui existe entre le trait de côte et l'isobathe, ce polygone couvre la surface où on peut délimiter les surfaces qui occuper par l'herbier de Posidonie (Figure 16).

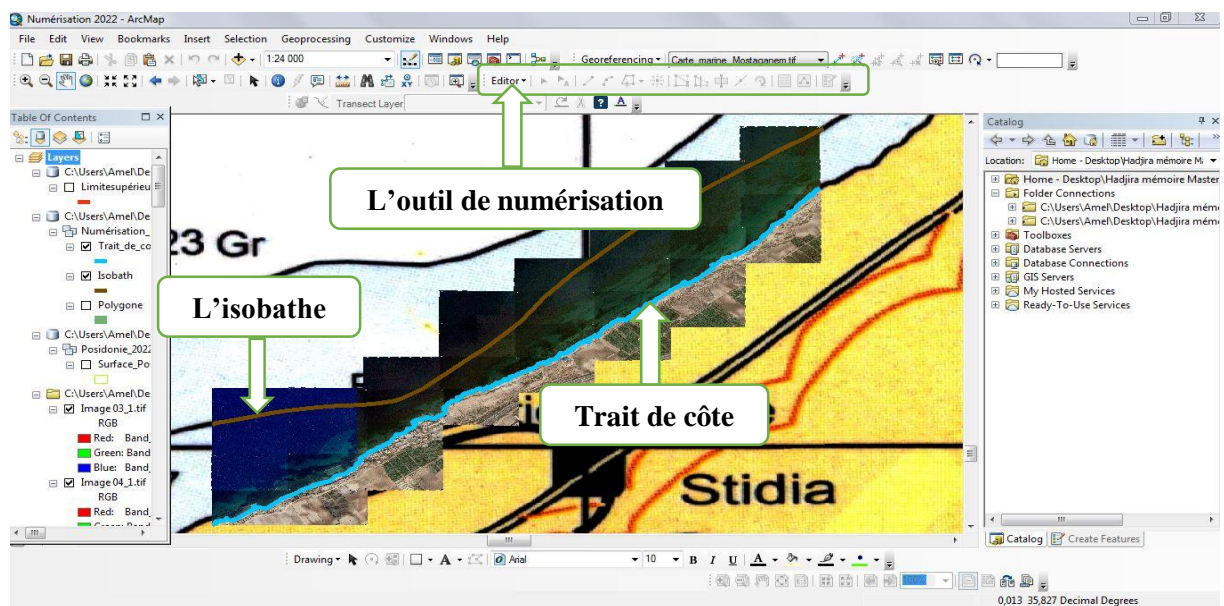


Figure 15 : Numérisation du trait de côte et l'isobathe 10 m.

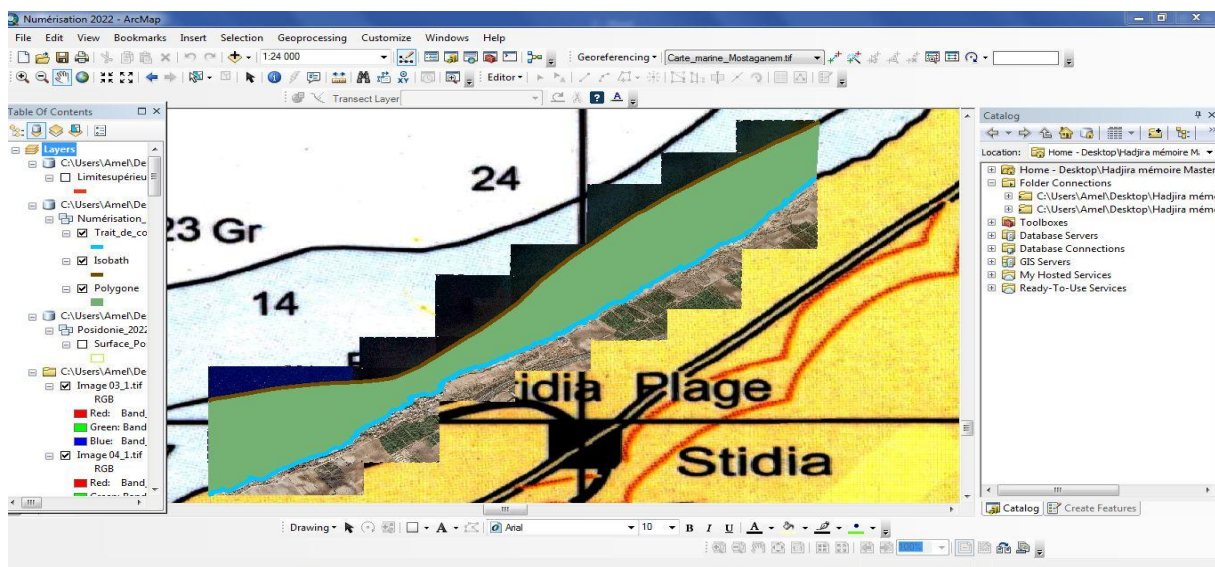


Figure 16 : Numérisation de la surface qui existe entre le trait de côte et l'isobathe par un polygone.

Ensuite on fait la numérisation des surfaces de Posidonie c'est-à-dire on délimite les surfaces qui sont montrée par des taches noire (Figure 17).

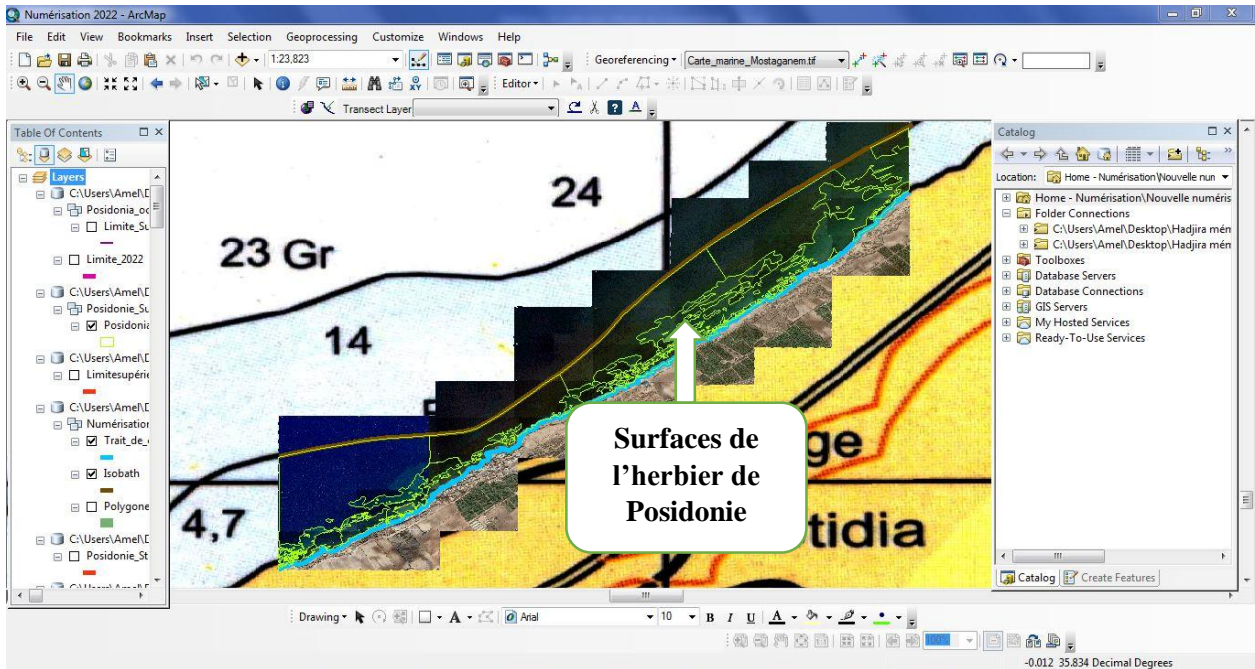


Figure 17 : Numérisation des surfaces occupée par l'herbier de Posidonie.

Ensuite on fait la numérisation de la limite supérieure de l'herbier de Posidonie qui représente (le niveau d'analyse linéaire), au-delà de cette ligne on se trouve les surfaces dégradées qui représentent (le niveau d'analyse surfacique) qui sont montrée par des petits tâches isolé généralement se trouve près du trait de côte (Figure 18).

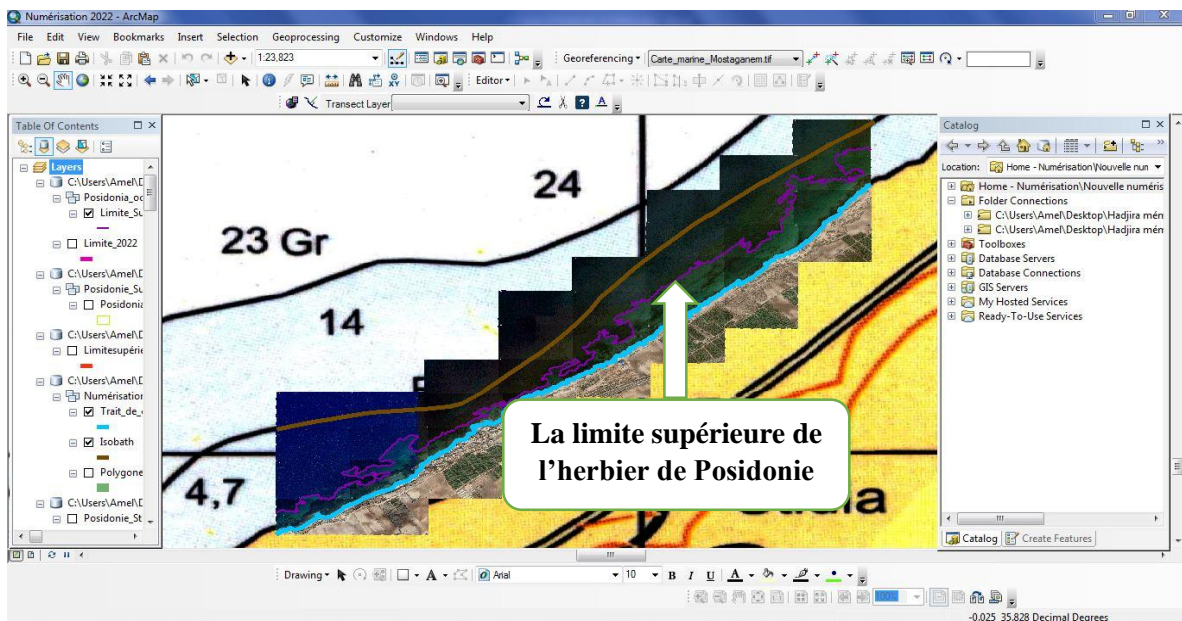


Figure 18 : Numérisation de la limite supérieure de l'herbier de Posidonie.

3.3.2. Evaluation de la marge d'erreur

Il existe un certain nombre d'erreurs et d'incertitudes liées à la résolution des pixels (Ep) (qualité des données utilisées), au géoréférencement des images (ERMs) et à la numérisation (Ed). Leur combinaison dans la formule ci-dessous nous a permis d'apprécier les erreurs totales (Et) (Tableau 8) (Bougherira *et al.*, 2020; Kermani *et al.*, 2016; Thieler *et al.*, 2009).

$$Et = \sqrt{Ep^2 + Ed^2 + ERMs^2}$$

La marge d'erreur obtenue permet d'évaluer la représentativité et la fiabilité de nos résultats. Nous l'avons estimée à une valeur acceptable de 0,82 m/an, vu que la valeur moyenne des résultats relatifs à l'évolution de la limite supérieure des herbiers de Posidonie est plus grande que la marge d'erreur.

Tableau 8 : Estimation de la marge d'erreur.

Années	2014	2018	2022
Erreur de pixel (EP) (m)	0,57	0,57	0,57
Erreur de géoréférencement des images (ERMs) (m)	0,30	0,30	0,28
Erreur de numérisation (Ed) (m)	1,55	1,45	1,5
Erreur totale (Et) (m)	1,68	1,59	1,63
Erreur totale annualisée (Et) (m/an)	0,82		

3.3.3. Analyse spatio-temporelle de la limite supérieure des herbiers de Posidonie

Nous nous inspirons dans cette analyse des travaux réalisés par Bougherira *et al.*, (2020) sur l'évolution et la dynamique du trait de côte. En effet, dans le but de caractériser l'évolution spatiotemporelle de la limite supérieure des herbiers à *Posidonia oceanica*, nous avons utilisé l'outil Digital Shoreline Analysis System (DSAS). Pour ce faire, nous avons importé les trois limites supérieures et on l'intègre dans le (DSAS), qui nous permet de calculer des statistiques de taux de changement pour une série chronologique de données vectorielles du littoral c'est-à-dire permet de calculer les statistiques sur l'avancé, la stabilité et/ou recul de la limite supérieure de Posidonie (Figure 19).

Pour mener à bien cette opération, la DSAS nécessite la création d'une base de données contenant les différentes limites supérieures numérisées et une ligne de base. Ensuite, nous générons des transects perpendiculaires à partir de la ligne de base.

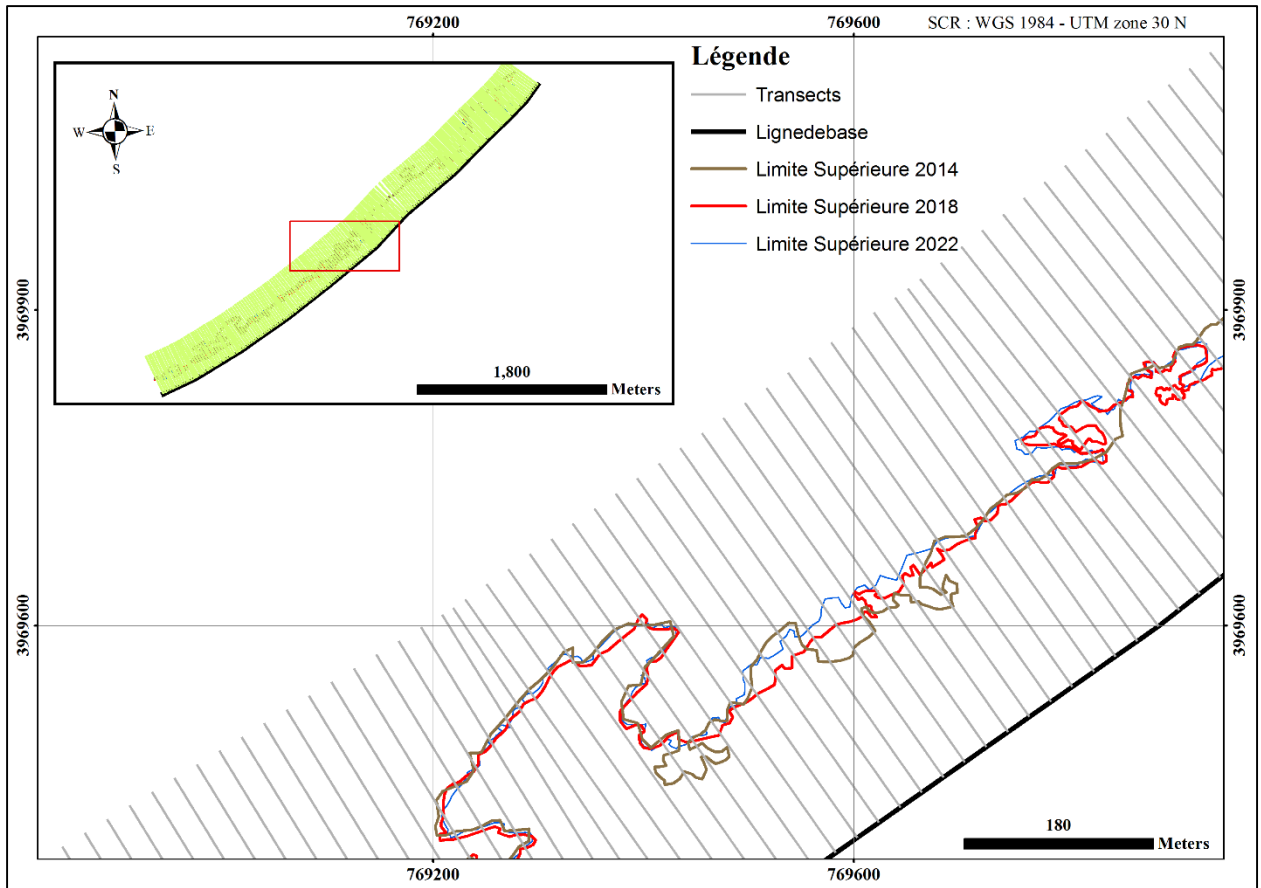


Figure 19 : Importation des trois limites supérieures et l'intègre dans DSAS.

Chapitre III : Résultats et Discussion

1. Analyse cartographique de l'évolution spatio-temporelle des herbiers de Posidonie

La cartographie spatio-temporelle des herbiers à *Posidonia oceanica* au-devant de la plage de Stidia a été réalisée dans le cadre de ce mémoire. Nous nous sommes focalisés sur la limite supérieure de ces herbiers de Posidonie, à savoir leur répartition entre le trait de côte (zéro hydrographique = 0 m) et 10 m de profondeur.

Les images satellitaires utilisées doivent répondre à de bonnes conditions de visibilité permettant de vérifier, entre-autre, la dynamique (progression, régression et/ou stabilité) de l'ensemble des surfaces occupée par les herbiers de Posidonie. L'analyse et la photo-interprétation des imageries satellitaires, fournies par Google Earth Pro, nous ont permis d'observer et de distinguer dans la tranche d'eau couverte les différentes taches parmi lesquelles l'herbier est présent.

Trois cartes à l'échelle 1/8000 ont été réalisées selon 03 périodes : 2014 (Figure 20), 2018 (Figure 21) et 2022 (Figure 22), afin d'apprécier la tendance évolutive de la limite supérieure de l'herbier de Posidonie au-devant de la plage de Stidia. Ces cartes présentent également les différentes typologies des habitats marins (des substrats meubles, des substrats durs, des mosaïques d'herbier (herbier altéré, matte et litière de Posidonie), des herbiers de Posidonie continus).

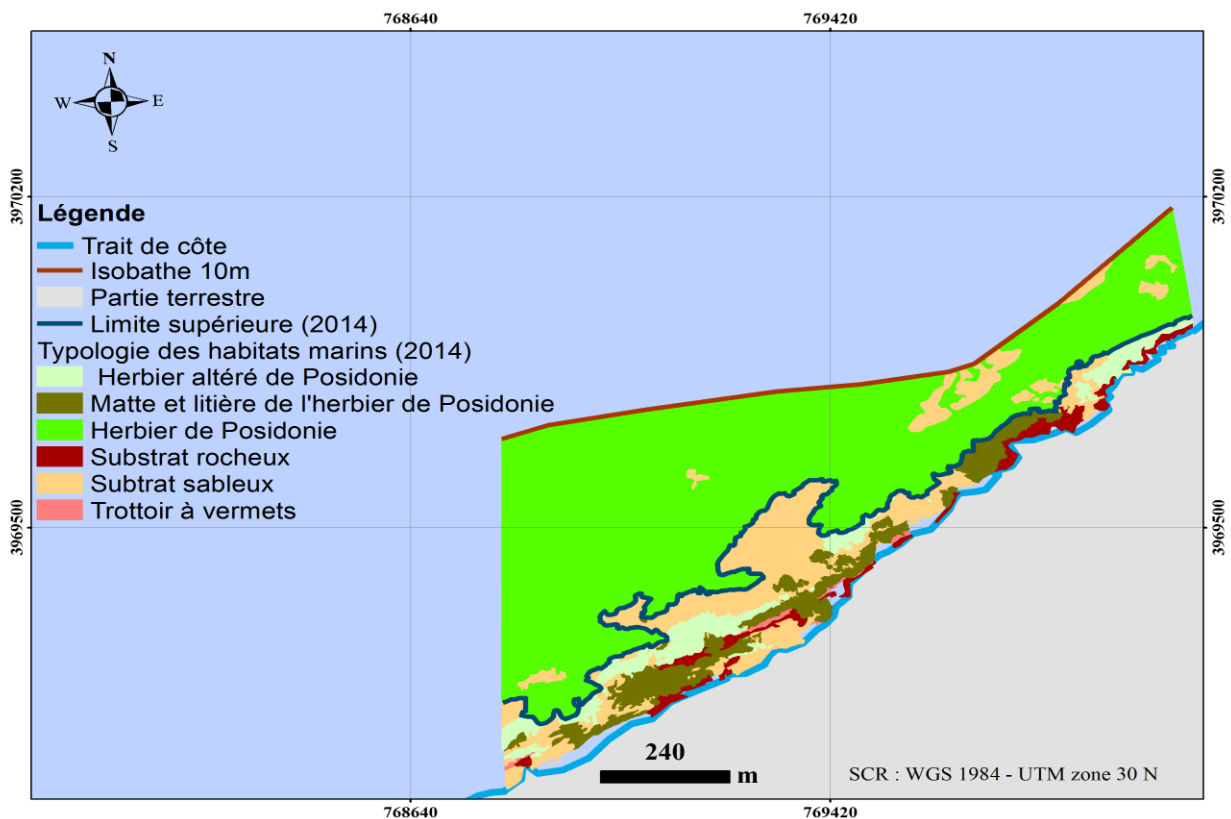


Figure 20 : Cartographie des herbiers de Posidonie de la plage de Stidia (2014).

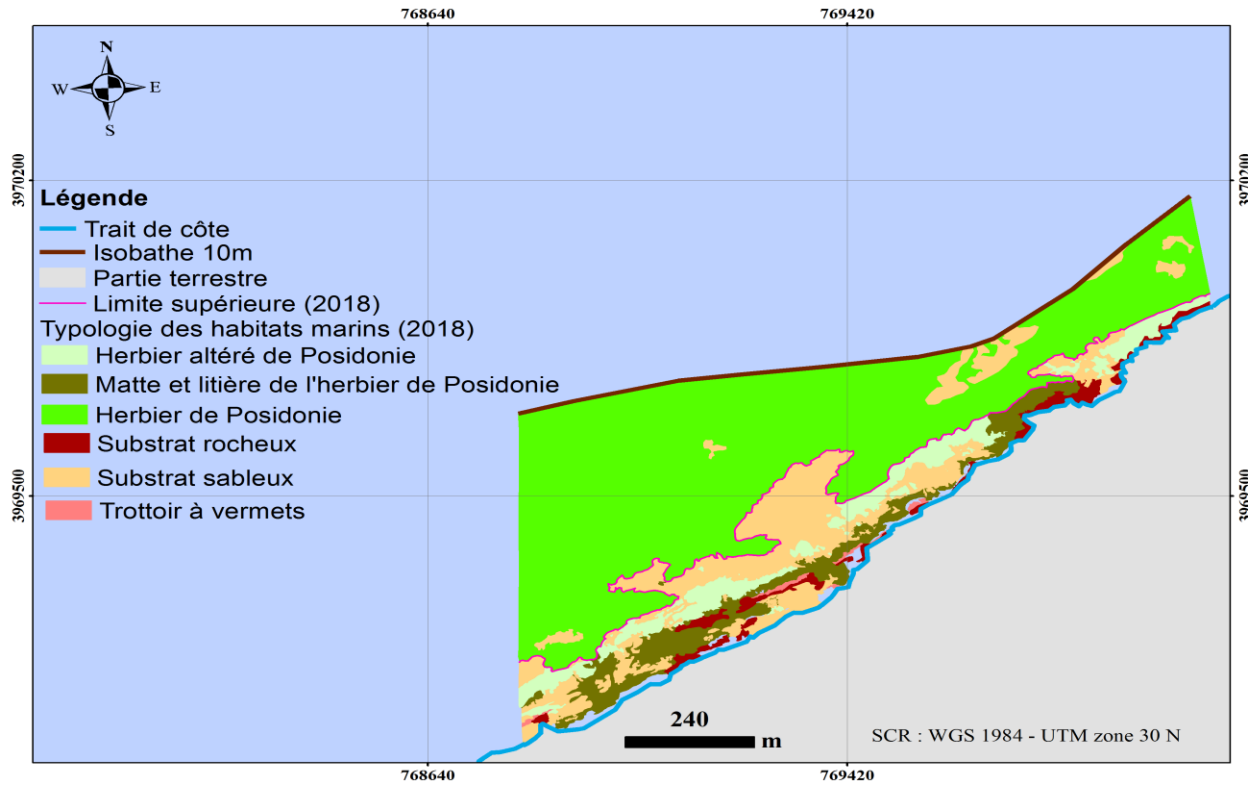


Figure 21 : Cartographie des herbiers de Posidonie de la plage de Stidia (2018).

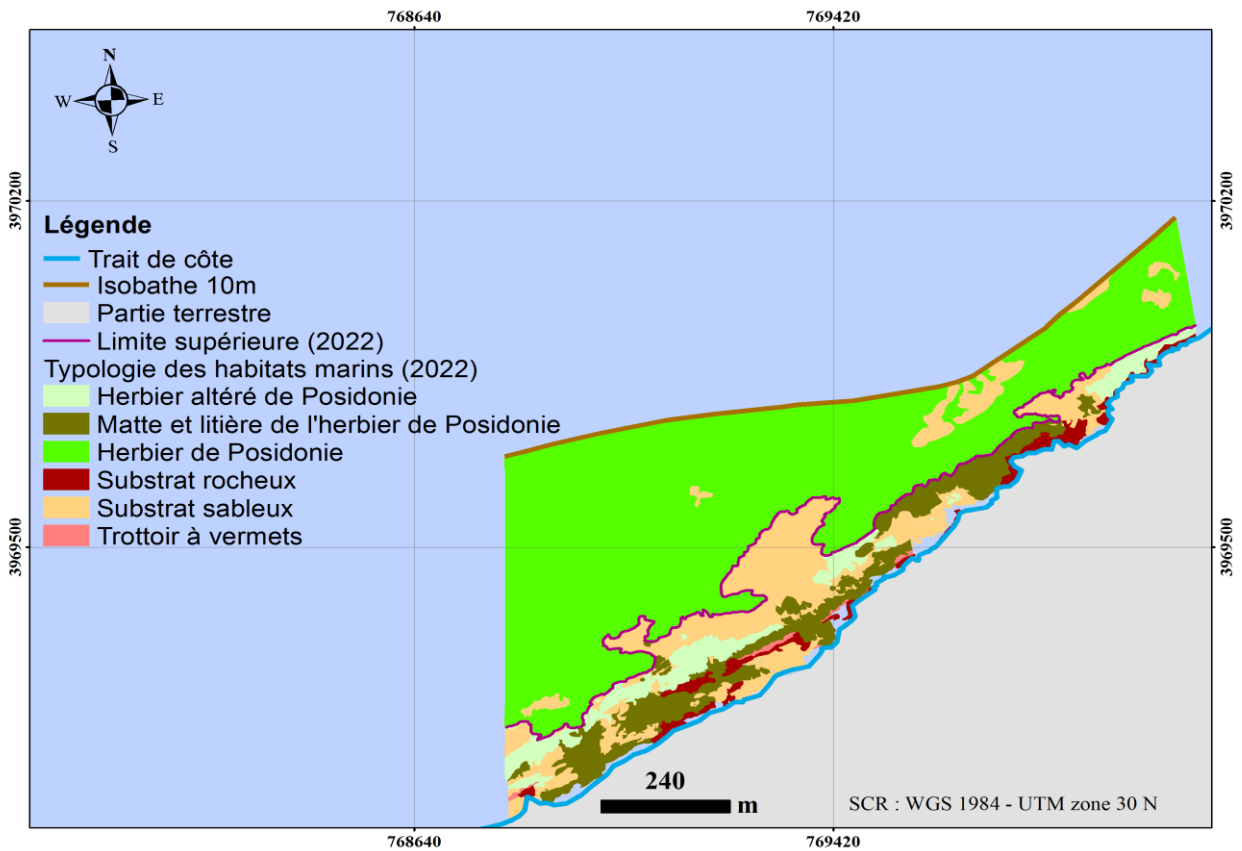


Figure 22 : Cartographie des herbiers de Posidonie de la plage de Stidia (2022).

Selon les résultats qui ont été extraite après l'étape de la numérisation des typologies occupées par les différents habitats marins on observe que la répartition globale des herbiers à *P. oceanica* elle montrent une forte régression entre 2014 et 2018 tandis qu'entre 2018 et 2022 on observe qu'il y a une faible dégradation.

Cependant les d'autre typologies d'habitats marins certains d'entre eux présente une stabilisation lors du trois dates (substrat rocheux et sableux, trottoir à vermetes), tandis que la dynamique de l'herbier altéré, la matte et la litière de Posidonie apparaissent des variations notables entre les trois périodes.

2. Analyse statistique de l'évolution spatio-temporelles des surfaces occupées par les habitats marins

Les résultats statistiques des surfaces occupées par les différents habitats marins au-devant de la plage de Stidia sont présentés dans le (Tableau 9) et (Annexe 1).

Tableau 9 : Les surfaces de chaque type d'habitats marins.

Typologie	2014	2018	2022
Herbier altéré de Posidonie (ha)	3.00128555284672	3.12690294870347	2.17527193868543
Litière de l'herbier de Posidonie (ha)	4.05100512118022	5.57202520430959	6.52365621432764
Prairies de l'herbier de Posidonie (ha)	37.5335041514606	36.0328175760954	35.933109
Substrat rocheux (ha)	1.63509307282602	1.63552475792347	1.63602764759015
Substrat sableux (ha)	10.0362058235142	10.0364006350147	10.0360691715712
Trottoir à vermetes (ha)	0.235152359408908	0.235098228438892	0.235280299084213
Surface totale (ha)	176.169678		

Sur la base du (Tableau 9), nous avons créés les graphiques en histogramme (Figure 23, Figure 24, Figure 25), qui montrent les variations des surfaces de différentes habitats associés aux herbiers à *Posidonia oceanica* au-devant de la plage de Sitidia, représentés dans les cartes précédentes.

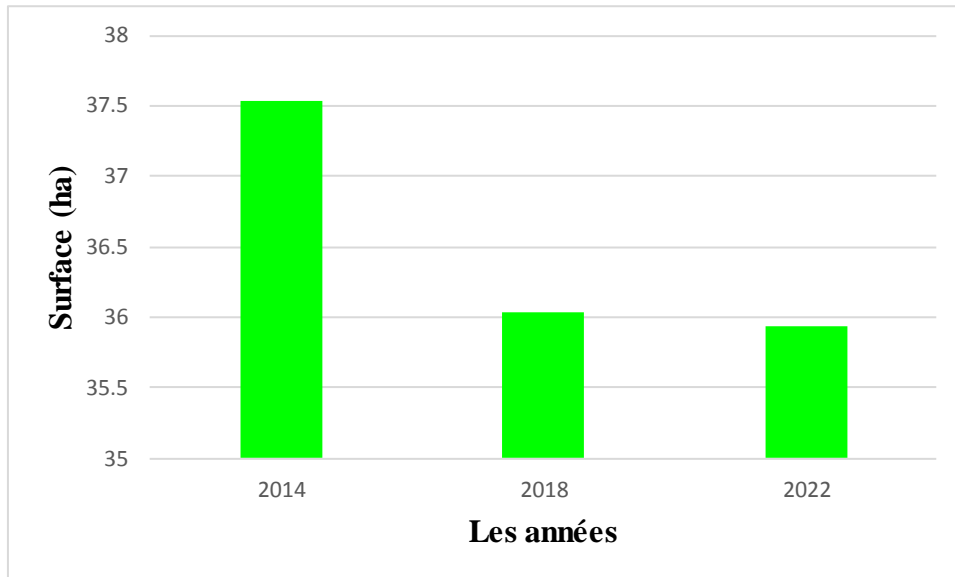


Figure 23 : Évolution temporelle de l'herbier de Posidonie.

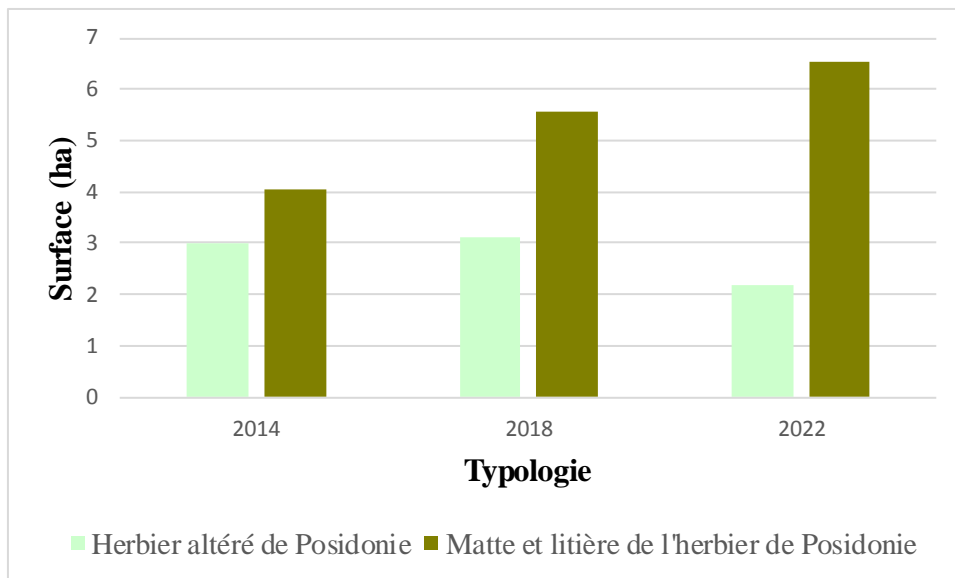


Figure 24 : Évolution temporelle des herbiers altérés et la matte et litière de Posidonie.

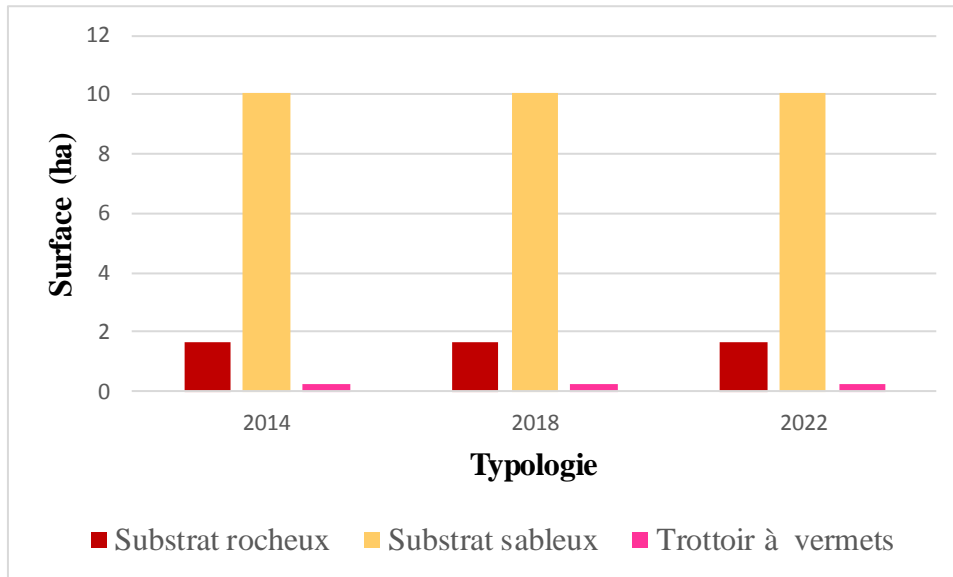


Figure 25 : Évolution temporelle des substrats rocheux et sableux et trottoir à vermetes de la plage de Stidia.

3. Évolution linéaire de la limite supérieure des herbiers de Posidonie

On utilise l'outil DSAS (Digital Shoreline Analysis System) qui permet d'effectuer un ensemble des statistiques afin de déterminer le caractère évolutif de la limite supérieure de l'herbier de Posidonie (Figure 26).

Les calculs sont faits de manière que l'outil DSAS mesure la distance entre la ligne de base et la limite supérieure pour chaque transects (Annexe 2).

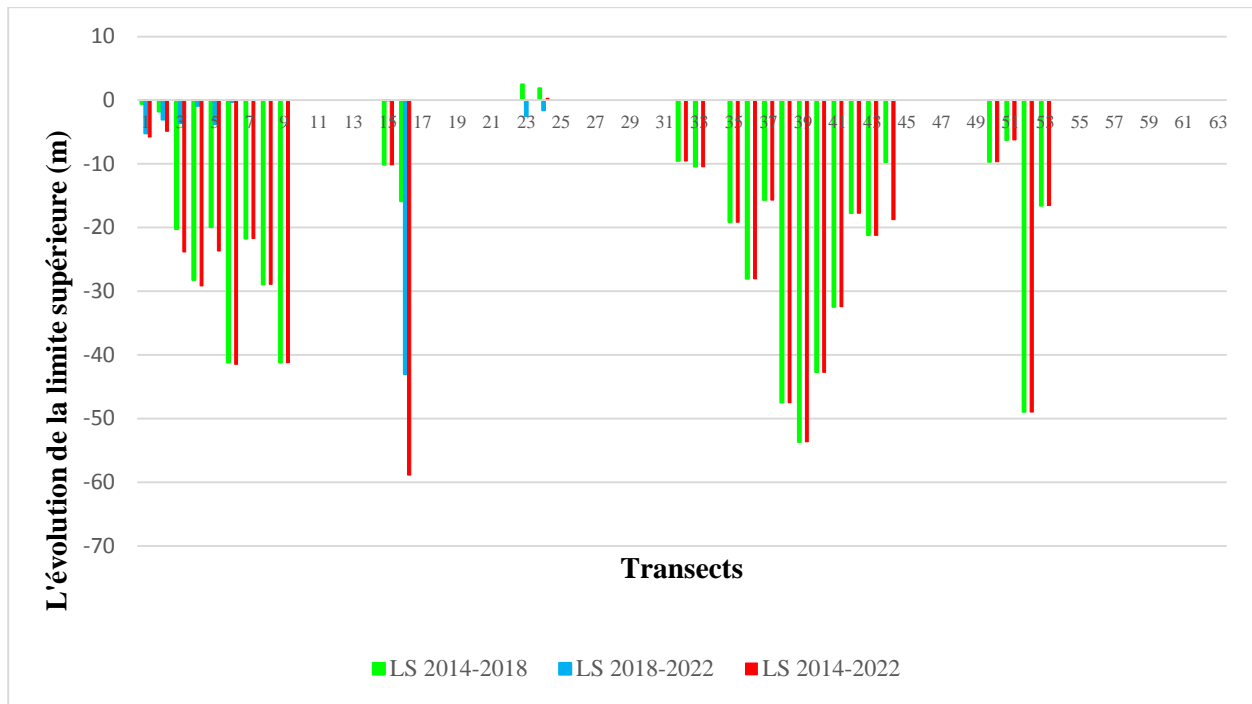


Figure 26 : Évolution diachronique de la limite supérieure de l’herbier de Posidonie.

4. Avantages et inconvénients de chaque méthode

Les méthodes existantes pour la cartographie de la répartition des herbiers de Posidonie présentent des limites en termes de précision de détection ou de couverture spatiale, alors l’intégration appropriée du système est essentielle pour produire des cartes de distribution spatiale des herbiers marins de haute qualité (Pühr *et al.*, 2014).

Le tableau suivant (Tableau 10) résume les avantages et les inconvénients pour chaque méthode.

Tableau 10 : Avantages et inconvénients des méthodes de cartographie de l’herbier de Posidonie.

Méthodes	Avantages	Inconvénients	Références
Plongée sous-marine	<ul style="list-style-type: none"> - La méthode la plus polyvalent car elle convient à la fois à la surveillance des herbiers marins et à la capacité de fournir des informations de terrain. - La plongée sous-marine c’est la méthode la plus précise pour décrire et identifier la répartition et l’état de vitalité des herbiers de Posidonie. 	<ul style="list-style-type: none"> - L’un des principaux problèmes des opérations de plongée est la difficulté d’obtenir une précision de la position sous-marine comparable aux méthodes nouvelles. - Les enquêtes sur le terrain sont plus coûteuses car elles nécessitent des navires équipés pour la cartographie des herbiers de Posidonie. - Demande beaucoup de temps et de main-d’œuvre, en particulier si une vaste zone doit être étudiée régulièrement. 	(Pühr <i>et al.</i> , 2014) (Vassallo <i>et al.</i> , 2018) (Sgorbini <i>et al.</i> , 2002) (Paul <i>et al.</i> , 2011)
Photographie aérienne	<ul style="list-style-type: none"> - L’une des meilleures méthodes pour cartographier les prairies peu profondes. 	<ul style="list-style-type: none"> -Les techniques d’imagerie sont limitées par la couverture nuageuse et la clarté de l’eau de mer. 	(Maccarrone, 2010) (Paul <i>et al.</i> , 2011)

	<ul style="list-style-type: none"> - Les données fournissent par les photographies aériennes sont aujourd'hui utilisées pour cartographier des territoires très étendus. 	<ul style="list-style-type: none"> - Distorsion photographique et problèmes liés à la présence de nuages, vagues... 	<p>(Fontan <i>et al.</i>, 2011)</p>
Télédétection	<ul style="list-style-type: none"> - C'est une méthode de cartographie la plus efficace en termes de surface couverte. - Fournit une méthode rentable pour surveiller de vastes zones d'eaux peu profondes qui sont un habitat potentiel des herbiers de Posidonie - Approvisionner des données pertinentes et à long terme pour analyser les changements des écosystèmes. - Accès à des renseignements impossibles à obtenir par d'autres méthodes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Une restriction c'est que la fréquence de passage d'un satellite particulier sur une région d'étude restreint la fréquence de collecte de données ce qui augmente donc la difficulté d'étudier des phénomènes connaissant une dynamique temporelle courte est difficile comme les herbiers. - L'exactitude des données diminue donc avec l'augmentation de la profondeur. 	<p>(Sgorbini <i>et al.</i>, 2002) (Fornes <i>et al.</i>, 2006) (Veettil <i>et al.</i>, 2020) (Houli <i>et al.</i>, 2017) (Fontan <i>et al.</i>, 2011)</p>
Acoustique	<ul style="list-style-type: none"> - Une meilleure alternative pour la cartographie des herbiers de Posidonie dans les eaux plus profondes ou plus troubles. - La plus rapide, plus précise et plus facile pour vérifier les données sur le terrain. 	<ul style="list-style-type: none"> - Perte de définition en bordure d'image qui conduit à prévoir un léger recouvrement entre profils. - Des importantes variations de l'amplitude du signal qui peut entraîner des erreurs d'interprétation. 	<p>(Fornes <i>et al.</i>, 2006) (Mutlu <i>et al.</i>, 2023) (Pergent-Martini, 2015)</p>

5. Interprétation et discussion des résultats

Les résultats obtenus sur la dynamique des herbiers de Posidonie montrent une tendance régressive sur l'ensemble du secteur étudié. On observe qu'il y a une dégradation significative le long de la limite supérieure de l'herbier de Posidonie entre 2014 et 2018 tandis qu'entre 2018 et 2022 il y a une stabilité relative, ponctuée par une faible régression très localisée.

Il est difficile d'expliquer l'origine et les causes de la dynamique régressive des herbiers de Posidonie au-devant de la plage de Stidia. Elles peuvent être en partie naturelle, car la plage de Stidia est caractérisée par un hydrodynamisme côtier relativement important et des tempêtes intenses qui peuvent survenir durant la période hivernale, qui arrachent les faisceaux des feuilles (Holon *et al.*, 2013).

Par ailleurs, la plage de Stidia est en train de subir une érosion côtière due à l'installation des aménagements côtiers. Ces derniers impactent les transferts sédimentaires naturels, comme la plage de la Capte qui est soumise à des phénomènes d'érosion liés aux aménagements côtiers (Bonhomme *et al.*, 2015).

On peut également expliquer ces résultats par l'action simultanée de plusieurs facteurs anthropiques :

- La plage de Stidia abrite un abri de pêche artisanale (Figure 27), basée principalement sur les petits métiers, mais aussi une activité de plaisance (Hattour et Ben Mustapha, 2013).
- Les rejets domestiques de la ville de Stidia qui sont rejetés dans l'eau de mer, le tourisme balnéaire de masse, la pollution des sols et des cours d'eau influençant la qualité physico-chimique de la masse d'eau (Pergent *et al.*, 1985).



Figure 27 : Prise de vue sur l'abri de pêche de Stidia.

6. Les solutions de protection et de restauration des herbiers de Posidonie

La destruction et le recul des herbiers de Posidonie est un phénomène particulièrement préoccupant, eu égard de l'ensemble des services écosystémiques rendus par ces herbiers. Dans ce contexte particulier, les actions qui visent à la protection et la restauration de la Posidonie, sont devenues plus que prioritaires. C'est pourquoi de nombreux chercheurs se sont penchés sur des techniques de restauration et de protection de cette espèce indispensable. Parmi les solutions proposées on peut citer :

- Des mesures juridiques sont prises afin de la protéger, par exemple des arrêtés identifient des zones d'interdiction au mouillage qui va permettre de décongestionner les zones côtières, ces réglementations imposent, en outre des mesures de gestion efficaces permettant de s'assurer ces habitats, de même les espèces qui les constituent, pour se maintenir dans un état satisfaisant pour assumer leurs services propres.
- Il faudrait stopper l'urbanisation et aussi limiter les pressions anthropiques déjà présents.

- Augmenter le nombre et la surface des Aires Marines Protégées (AMP), d'ailleurs dans ces zones on ne remarque pas de déclin de l'herbier de Posidonie comme on pourrait le constater en dehors, il est évident qu'un plan de gestion à grand échelle et fondamental.
- L'utilisation des fragments des herbiers de Posidonie qui s'échouent sur les plages pour les récupérer avant qu'ils ne se dessèchent et de les replanter.
- Concevoir des structures d'appuis capable de résister aux vagues et l'action des courants de fonds.

Malgré les résultats positifs de ces méthodes variées, toutes ces solutions sont inutiles si l'agent de destruction n'est pas stoppé. Compte tenu des incertitudes et des contraintes liées à la restauration, la régulation des activités humaines qui endommagent les prairies de l'herbier à *Posidonia oceanica* reste la meilleure stratégie pour préserver cet écosystème côtier précieux et fragile.

Conclusion

Conclusion

Cette étude vise à produire une base de données et d'informations sur la distribution spatio-temporelle des herbiers à *P. oceanica*. La cartographie des herbiers de Posidonie est indispensable pour faire des études écologiques et de conservation à grande échelle.

La cartographie est faite à l'aide d'imageries satellitales, selon une approche diachronique. Le suivi de l'évolution temporelle de la limite supérieure de l'herbier de Posidonie a été réalisé selon trois dates : 2014, 2018 et 2022.

La cartographie est réalisée seulement sur la limite supérieure des herbiers de Posidonie (entre 0 et 10m de profondeur). Les cartes produites présentent également les différentes typologies des habitats marins : Substrat rocheux, substrat sableux, trottoir à vermetes et un mosaïque d'herbier altéré, des herbiers continus, la matre et litière des herbiers à *Posidonia oceanica*.

Ces cartes représentent des documents de base qui témoignent de la position actuelle des herbiers ; elles permettront d'évaluer l'évolution ultérieurs de ces derniers.

Néanmoins, nous constatons un manque d'études portant sur la cartographie des herbiers de Posidonie sur les côtes algériennes. En effet, les herbiers de Posidonie de la plage de Stidia ont été cartographiées et un système d'information géographique (SIG) a été mis en place pour la première fois.

La cartographie de l'herbier à *Posidonia oceanica* du site de Stidia nous a permis de relever une dynamique évolutive régressive et de caractériser la nature des menaces auxquelles ils sont soumis. Cette dégradation peut être expliquée par les pressions anthropiques, à savoir les activités de pêche (mouillage et chalutage), le déversement des eaux usées, les aménagements côtiers (urbanisation incontrôlée et tourisme mal planifiée...), provoquant des dégradations importantes, voire irréversibles.

Au terme de ce mémoire, nous pouvons conclure également que l'étude cartographique de l'évolution spatio-temporelle des herbiers de Posidonie, sous l'angle des systèmes d'information géographique (SIG), présente à la fois des avantages et des inconvénients.

Parmi les avantages on peut citer :

- Le libre accès à l'historique d'imageries satellitales couvrant de larges espaces maritimes, avec une résolution spatio-temporelle fine,
- La mise en place d'une base de données géographiques modifiable et actualisable,
- Le gain en matière du temps et de ressources matérielles et financières.

Concernant les limites et les inconvénients que nous avons rencontrés, on peut citer :

- Le choix difficile des images satellitaires appropriés à l'étude du milieu marin, dû aux conditions météorologiques et hydrodynamiques défavorables au moment de la prise de vue satellitaire,
- La diminution de l'exactitude avec la complexité du milieu marin,
- Erreurs d'interprétation liées aux variations bathymétriques.

La cartographie spatio-temporelle des herbiers de Posidonie doit tenir compte de l'ensemble de ces avantages et inconvénients, afin d'évaluer la fiabilité de la méthode et par conséquent des résultats que nous allons produire.

Comme tout travail scientifique, ce mémoire n'est pas exempté d'erreur et d'imperfection, voire d'exhaustivité. Ce travail ouvre des perspectives en matière de cartographie *in situ*, afin de corriger les erreurs résiduelles et de confirmer les résultats obtenus.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- **Abadie, A. (2016).** Etude des intermattes des herbiers à *Posidonia oceanica*.
- **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.
- **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.
- **Bougherira, A. (2021).** Les cordons dunaires de la côte algérienne entre aménagement du littoral et protection de l’environnement : Le cas de Bousfer-Andalouses (Oran) et Sidi Abdelaziz (Jijel) [Doctorat LMD, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem]. <http://e-biblio.univ-mosta.dz/handle/123456789/19774>.
- **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>.
- **Bonhomme, D., Rouanet, E., Astruch, P., Chassaing, L. (2015).** Suivi de l'herbier de Posidonie (*Posidonia oceanica*) au-devant de la plage de La Capte. Contrat Mairie de Hyères les Palmiers & GIS Posidonie. GIS Posidonie publ., Fr., 1-48.
- **Boudouresque, C. F., Bernard, G., Bonhomme, P., Charbonnel, E., Diviacco, G., Meinesz, A., ... & Tunesi, L. (2006).** Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. Ramoge.
- **Boudouresque C. F., Meinesz A., (1982).** Découverte de l’herbier de Posidonie. *Cah. Parc nation. Port-Cros*, Fr., 4 : 1-79.
- **Bensabra, H., Hemissi, F., & Belbacha, S. E. (2012).** Répartition de la Posidonie (limite supérieure) dans l'aire marine protégée de Taza (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- **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>.
- **Belbachir, N. (2012).** Contribution à l’étude écologique de l’herbier à *Posidonia océanica* (L.) Delile (1813) de la frange côtière de Mostaganem : état de santé et relation entre plante et échinoderme. Mémoire de Magister en Biologie. Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem p 58, 59.

- **Belbachir, N. (2018).** Rôle des Holothuries aspidochirotés dans le fonctionnement du réseau trophique de l'écosystème à *Posidonia oceanica* (L.) Delile (1813) de la frange côtière de Mostaganem (Doctoral dissertation, Thèse de Doctorat, Université de Mostaganem, Algérie) p 50, 51.
- **Benzait, Hocine. (2014).** Contribution à l'évaluation de la biodiversité des Echinodermes de la région côtière de Mostaganem (Doctoral dissertation, Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis).
- **Bajjali, W. (2018).** Using ArcGIS: Classification. In: ArcGIS for Environmental and Water Issues. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment.
- **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.
- **Deter J., Holon F., Descamp P. (2010).** Surveillance de l'herbier de Posidonie – Année 2010. Evaluation de l'évolution de l'herbier de Posidonie entre 2000 et 2010 sur le littoral des Maures dans le cadre de l'observatoire marin du SIVOM. Rapport Final. Contrat SIVOM du littoral des Maures et Andromède Océanologie publ. : 69 p.
- **Denis, J., Hervé, G., Deneux, F., Sauzade, D., Bonhomme, P., Bernard, G. (2002).** Guide méthodologique pour la cartographie des biocénoses marines. Volet N°1 : l'herbier à *Posidonia oceanica*. Guide méthodologique. Agence de l'Eau, Région Provence Alpes-Côte d'Azur et DIREN PACA. IFREMER, GIS Posidonie & Centre d'Océanologie de Marseille, GIS Posidonie publ. : 1-93.
- **Fontan, E., Dumas, P., & Ponton, D. (2011).** Méthodes de cartographie, de caractérisation et de suivi des herbiers marins.
- **Fornes, A., Basterretxea, G., Orfila, A., Jordi, A., Álvarez, A., & Tintoré, J. (2006).** Mapping *Posidonia oceanica* from IKONOS. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(5), 315-322.
- **Flores, G., & Gallardo, C. (2021).** Creating Shapefile Files in ArcMap from KML File Generated in My Maps. In *Advances in Emerging Trends and Technologies: Proceedings of ICAETT 2020* (pp. 193-204). Springer International Publishing.
- **Gourmelon, F., & Robin, M. (2005).** *SIG et littoral* (LAVOISIER). Hermès. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00071087>.

- **Güreşen, A., Pergent, G., Güreşen, S. O., & Aktan, Y. (2020).** Evaluating the coastal ecosystem status of two Western and Eastern Mediterranean islands using the seagrass *Posidonia oceanica*. *Ecological Indicators*, 108, 105734.
- **Giraud G., (1977).** Recensement des floraisons de *Posidonia oceanica* (Linné) Delile en Méditerranée. *Rapp. P.V. Réun. Commiss. internation. Explor. sci. Médit.*, Monaco, 24 (4) : 126-130.
- **Houngnandan, F. (2020).** *Rôle des pressions anthropiques et de l'environnement dans l'état des herbiers de Posidonies de Méditerranée française* (Doctoral dissertation, Université Montpellier).
- **Holon F., Guilbert A., Freschet E. (2013).** Cartographie évolutive des herbiers de Posidonie en Région PACA depuis 1922. Document de synthèse, contrat Œil d'Andromède/Agence de l'eau 81 p.
- **Houli, Z., Merrouche, D., & Boudjelal, F. (2017).** *Suivi de la dynamique intrannuelle de la chlorophylle dans les eaux côtières Est de Jijel à partir d'images satellitaires* (Doctoral dissertation, université de Jijel).
- **Hattour, A., & Ben Mustapha, K. (2013).** Le Couvert Vegetal Marin du Golfe de Gabes : Cartographie et Réseau de Surveillance de l'Herbier de Posidonie.
- **Kermani, S., Boutiba, M., Guendouz, M., Guettouche, M. S., & Khelfani, D. (2016).** Detection and analysis of shoreline changes using geospatial tools and automatic computation: Case of jijelian sandy coast (East Algeria). *Ocean & Coastal Management*, 132, 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.08.010>.
- **Lonchay, M. (2007).** Google Earth et Windows Live Search Maps : Analyse fonctionnelle et comparaison. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 49.
- **Li, Y., Robinson, S. V., Nguyen, L. H., & Liu, J. (2023).** Satellite prediction of coastal hypoxia in the northern Gulf of Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 284, 113346.
- **Mancini, G., Mastrantonio, G., Pollice, A., Lasinio, G. J., Belluscio, A., Casoli, E., ... & 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.
- **Maccarrone, V. (2010).** Determination of the upper boundary of a *Posidonia* meadow. *Ecological Informatics*, 5(4), 267-272.

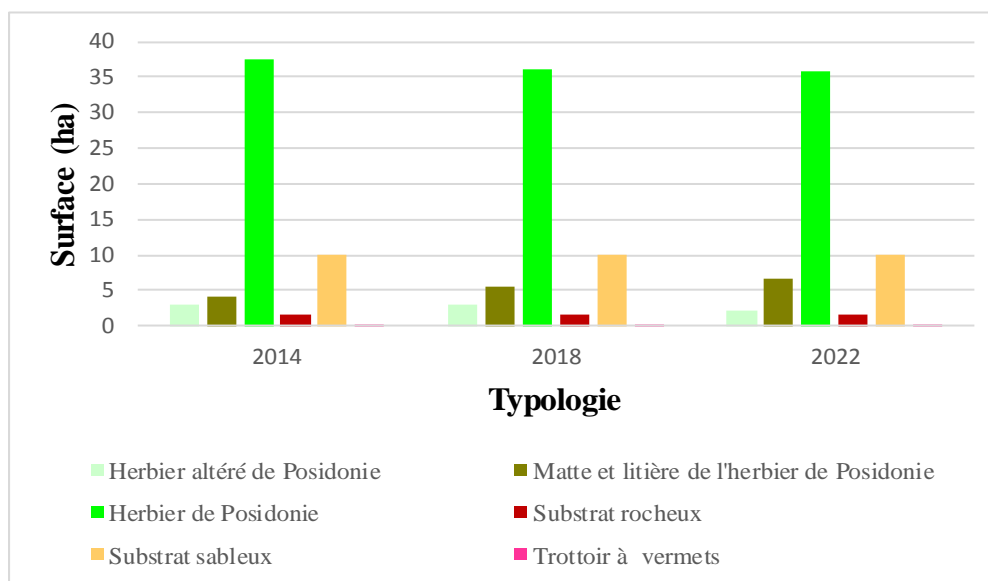
- **Mutlu, E., & Olguner, C. (2023).** Density-dependent acoustical identification of two common seaweeds (*Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa*) in the Mediterranean Sea. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 1-13.
- **Meinesz, A., Cuvelier, M., Laurent, R. (1981).** Méthodes récentes de cartographie et de surveillance des herbiers de phanérogames marines leurs applications sur les côtes françaises de la Méditerranée. *Vie et Milieu/Life & Environnement* 31 27-34.
- **Montefalcone, M. (2009).** Ecosystem health assessment using the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*: a review. *Ecological indicators*, 9(4), 595-604.
- **Montefalcone, M., Vacchi, M., Archetti, R., Ardizzone, G., Astruch, P., Bianchi, C. N., ... & 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.
- **Marmonier, P. (2002).** L'information géographique. *Ecole nationale Des sciences géographiques, France*.
- **Monnier, B., Pergent, G., Mateo, M. Á., Carbonell, R., Clabaut, P., & Pergent-Martini, C. (2021).** Sizing the carbon sink associated with *Posidonia oceanica* seagrass meadows using very high-resolution seismic reflection imaging. *Marine Environmental Research*, 170, 105415.
- **Puhr, K., Schultz, S., Pikelj, K., Petricioli, D., & Bakran-Petricioli, T. (2014).** The performance, application and integration of various seabed classification systems suitable for mapping *Posidonia oceanica* (L.) Delile meadows. *Science of the total environment*, 470, 364-378.
- **Pergent-Martini, C. (2015).** Lignes Directrices pour la Standardisation des Méthodes de Cartographie et de Surveillance des Magnoliophytes Marines en Méditerranée. PNUE/PAM-CAR/ASP, édits., publ., Tunis, 46 p.
- **Paul, M., Lefebvre, A., Manca, E., & Amos, C. L. (2011).** An acoustic method for the remote measurement of seagrass metrics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(1), 68-79.
- **Pergent, G., Bazair, H., Bianchi, C. N., Bouderesque, C. F., Buia, M.C., Clabaut, P., Harmelin-Vivien, M., Mateo, M. A., Montefalcone, M., Morr, C., Orfanidis, S., Pergent-Martini, C., Semroud, R., Serrano, O., Verlaque, M. (2012).** Internationale, U., & de la nature, P. L. C. Les herbiers de Magnoliophytes marines de Méditerranée.

- **Pergent-Martini, C., & Le Ravallec, C. (2007).** Lignes directrices pour les études d'impacts sur les herbiers marins. Programme des Nations Unies pour l'Environnement, Plan d'action pour la Méditerranée. CAR/ASP éd., Tunis, Tunisie.
- **Pergent, G., & Pergent, C. (1985).** Cartographie de l'herbier à *Posidonia oceanica* de la baie d'Urla-Iskele (Turquie). *Rapports et Procès-Verbaux des Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Méditerranée*, 29(6).
- **Rodríguez, I., Montoya, I., Sánchez, M. J., & Carreño, F. (2009).** Geographic information systems applied to integrated coastal zone management. *Geomorphology*, 107(1-2), 100-105.
- **Sghaier, M. (2013).** Les magnoliophytes marines de la Tunisie : distribution, croissance et production primaire (Doctoral dissertation).
- **Smida, H. (2008).** Apports des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) pour une approche intégrée dans l'étude et la gestion des ressources en eau des systèmes aquifères de la région de Sidi Bouzid (Tunisie centrale). *Université de Sfax, Thèse Doctorat*, 341.
- **Sgorbini, S., Peirano, A., Cocito, S., & Morgigni, M. (2002).** An underwater tracking system for mapping marine communities: an application to *Posidonia oceanica*. *Oceanologica acta*, 25(3-4), 135-138.
- **Taibi, N. E. (2011).** Importance des herbiers de *Posidonia oceanica* dans la conservation des plages de la Méditerranée.
- **Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., & Ergul, A. (2009).** The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline change (USGS Numbered Series N° 2008-1278; Open-File Report). U.S. Geological Survey. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20081278>.
- **Topouzelis, K., Makri, D., Stoupas, N., Papakonstantinou, A., & Katsanevakis, S. (2018).** Seagrass mapping in Greek territorial waters using Landsat-8 satellite images. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 67, 98-113.
- **UICN (2012).** *Les Herbiers de Magnoliophytes Marines de Méditerranée : Résilience Et Contribution À L'atténuation Des Changements Climatiques*. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales (UICN).
- **Vassallo, P., Bianchi, C. N., Paoli, C., Holon, F., Navone, A., Bavestrello, G., ... & Morri, C. (2018).** A predictive approach to benthic marine habitat mapping: Efficacy and management implications. *Marine Pollution Bulletin*, 131, 218-232.

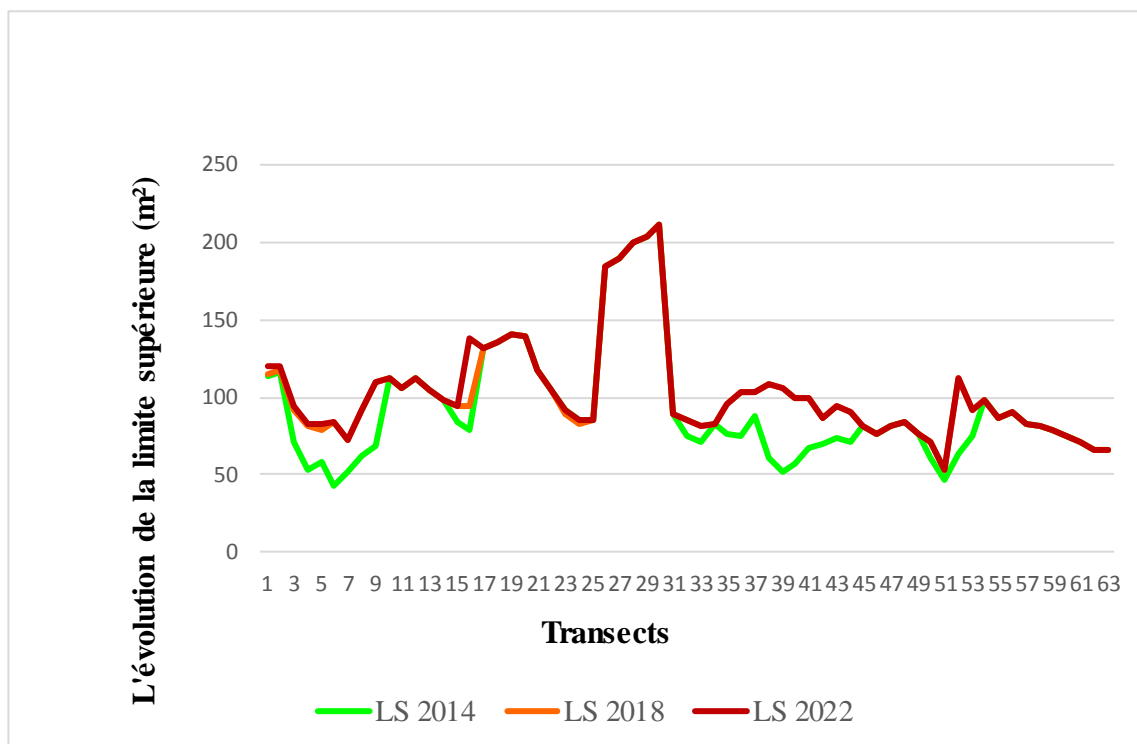
- **Veetil, B. K., Ward, R. D., Lima, M. D. A. C., Stankovic, M., Hoai, P. N., & Quang, N. X. (2020).** Opportunities for seagrass research derived from remote sensing: A review of current methods. *Ecological Indicators*, *117*, 106560.
- **Verlaque, M. (1994).** Inventaire des plantes introduites en Méditerranée : origines et répercussions sur l'environnement et les activités humaines. *Oceanologica acta*, *17*(1), 1-23.
- **Zakhama-Sraieb, R., Sghaier, Y. R., & Charfi-Cheikhrouha, F. (2009, October).** Sensibilisation sur l'importance des banquettes de *Posidonia oceanica* dans la protection des plages sableuses : Approche participative. In *Sandy beaches and coastal zone management– Proceedings of the fifth International Symposium on Sandy Beaches* (pp. 19-23).

Annexes

Annexes



Annexe 1: Variation des surfaces de typologies des habitats marins.



Annexe 2 : Évolution temporelle de la limite supérieure de l'herbier de Posidonie.