

République Algérienne Démocratique et Populaire

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



جامعة عبد الحميد بن باديس
مستغانم
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MER ET DE L'AQUACULTURE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

CHAOUCH Fatima Batoul

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN HYDROBIOLOGIE MARINE ET CONTINENTALE

Spécialité : Bioressources Marines

THÈME

Cartographie de l'évolution spatio-temporelle de la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* et du trait de côte le long de quelques plages à Mostaganem (Algérie).

Soutenue le 17/09/2024

DEVANT LE JURY

| | | | |
|--------------|---------------------------|-----|---------------|
| Présidente | Mme BENZIDANE Dehiba | MCA | U. Mostaganem |
| Encadreur | M. BOUGHERIRA Abdeldjalil | MCB | U. Mostaganem |
| Examinatrice | Mme BILLAMI Malika | MAB | U. Mostaganem |

Année universitaire 2023/2024

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné la santé, la force, le courage, la patience et la persévérance pour accomplir ce travail.

Je tiens à remercier mon encadrant monsieur Bougherira, pour tous ses conseils avisés, pour son écoute active, sa rigueur et sa disponibilité permanente tout au long de la période de réalisation de mon projet de fin d'étude. Sans lui ce mémoire n'aurait pas pu être terminé dans les délais. Je le remercie surtout pour sa patience lors des multiples séances de travail intenses.

Je tenais 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, ma remerciement d'adressent particulièrement à :

Madame Benzidane d'avoir accepté de présider le jury de la soutenance de mon mémoire de fin d'étude.

Madame Billami d'avoir accepté d'examiner mon mémoire de fin d'étude

Je n'oublie pas mes enseignants qui ont contribué à notre enseignement, j'espère être à la hauteur de leurs attends.

Je tends également à remercier tous ceux qui m'ont encouragé et soutenu de près ou de loin tout au long de mon cursus universitaire.

DEDICACE

Je dédie ce mémoire,

A mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

À ma fille, que le bon Dieu miséricordieux lui accorde la santé, l'intelligence et la sagesse dont elle a besoin.

A mes sœurs et frères : **Hadjer, Imene, Mohamed, Mustapha.**

A mes nouveaux que dieu le protège.

Résumé

L'herbier à *Posidonia oceanica* est l'un des écosystèmes clés de la Méditerranée, remplissant de nombreuses fonctions écologiques et fournissant divers services écosystémiques, notamment la protection des plages contre l'érosion côtière. La régression des herbiers de Posidonie entraîne une perte de ces services, rendant l'érosion des plages inévitable.

Dans le but d'explorer le lien entre la répartition des herbiers de Posidonie et la stabilité des plages, nous avons adopté une démarche méthodologique basée sur la cartographie de la Posidonie et du trait de côte dans un système d'information géographique (SIG). Cette approche vise à délimiter et suivre l'évolution de l'étendue des herbiers en relation avec les variations du trait de côte.

La méthode utilisée repose sur les SIG et la production de cartes éco-dynamiques. À travers une approche diachronique, nous avons produit des cartes de l'évolution de la limite supérieure des herbiers à *Posidonia oceanica* et du trait de côte sur une période de 19 ans, divisée en quatre intervalles : 2004-2010, 2010-2016, 2016-2023, et 2004-2023.

Parallèlement, nous avons complété l'analyse cartographique par une étude des sédiments de la plage de La Crique à Salamandre, en trois stations de prélèvement par site (plage sous-marine, plage aérienne et trait de côte), à travers des analyses granulométriques, de la matière organique et de la calcimétrie.

Les résultats obtenus sur la dynamique des herbiers de Posidonie montrent une tendance régressive sur l'ensemble du secteur étudié. Une dégradation significative de la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* et des changements du trait de côte ont été observés entre 2016 et 2023. En revanche, une stabilité relative a été notée entre 2004 et 2010, avec une légère variation entre 2010 et 2016, marquée par une faible régression.

Mots-clés : Plage de Mostaganem, Herbier à *Posidonia oceanica*, Trait de côte, Système d'Information Géographique, Granulométrie, Calcimétrie, Matière organique.

Abstract

The *Posidonia oceanica* seagrass meadow is one of the key ecosystems of the Mediterranean Sea, providing numerous ecological functions and ecosystem services, including beach protection against coastal erosion. The regression of *Posidonia* meadows leads to the loss of these services, making beach erosion inevitable.

In order to explore the relationship between the distribution of *Posidonia* meadows and beach stability, we adopted a methodological approach based on the mapping of *Posidonia* and the coastline using a geographic information system (GIS). This approach aims to delineate and monitor the evolution of the extent of the meadows in relation to changes in the coastline.

The method used relies on GIS and the production of eco-dynamic maps. Through a diachronic approach, we produced maps of the evolution of the upper limit of the *Posidonia oceanica* meadows and the coastline over a 19-year period, divided into four intervals: 2004-2010, 2010-2016, 2016-2023, and 2004-2023.

Additionally, we complemented the cartographic analysis with a study of the sediments from the beach of La Crique to Salamandre, across three stations by site (submarine beach, aerial beach, and coastline) through granulometric analyses, organic matter, and calcimetry.

The results regarding the dynamics of *Posidonia* meadows show a regressive trend across the entire studied area. Significant degradation of the upper limit of the *Posidonia oceanica* meadow and changes in the coastline were observed between 2016 and 2023. In contrast, relative stability was noted between 2004 and 2010, with slight variation between 2010 and 2016, marked by a minor regression.

Keywords: Mostaganem Beach, *Posidonia oceanica* Seagrass, Coastline, Geographic Information System, Granulometry, Calcimetry, Organic Matter.

تُعد مروج بوسيدونيا أوشيانكا أحد النظم الإيكولوجية الرئيسية في البحر الأبيض المتوسط، حيث تؤدي العديد من الوظائف الإيكولوجية وتوفر خدمات مختلفة للنظام الإيكولوجي، بما في ذلك حماية الشواطئ من التآكل الساحلي. ويؤدي انحسار مروج بوسيدونيا إلى فقدان هذه الخدمات، مما يجعل تآكل الشواطئ أمراً حتمياً.

من أجل استكشاف الصلة بين توزيع مروج بوسيدونيا واستقرار الشواطئ، اعتمدنا مقاربة منهجية تقوم على رسم خرائط بوسيدونيا والخط الساحلي في نظام المعلومات الجغرافية (GIS) والهدف من هذا النهج هو تحديد ورصد التغيرات في مدى انتشار مروج الأعشاب البحرية فيما يتعلق بالتغيرات في الخط الساحلي.

تعتمد الطريقة المستخدمة على نظام المعلومات الجغرافية وإنتاج خرائط ديناميكية بيئية. وباستخدام نهج تاريخي، أنتجنا خرائط للتغيرات في الحد الأعلى لمروج بوسيدونيا أوشيانكا والخط الساحلي على مدى 19 عامًا، مقسمة إلى أربع فترات: 2010-2004، 2016-2010، و2016-2010، و2023-2016، و2023-2004.

في الوقت نفسه، استكملنا التحليل الخرائطي بدراسة للرواسب على الشاطئ في لا كريك آسالاماندر، في ثلاث محطات لأخذ العينات لكل موقع (الشاطئ تحت الماء، والشاطئ الجوي والخط الساحلي)، باستخدام تحليلات الحبيبات والمواد العضوية والتحليلات الحسابية.

تُظهر النتائج التي تم الحصول عليها حول ديناميكيات مروج بوسيدونيا اتجاهًا تنازلياً في جميع أنحاء القطاع المدروس. وقد لوحظ تدهور كبير في الحد الأعلى لمروج بوسيدونيا أوقيانوسيا والتغيرات في الخط الساحلي بين عامي 2016 و 2023. من ناحية أخرى، لوحظ ثبات نسبي بين عامي 2004 و2010، مع وجود تباين طفيف بين عامي 2010 و2016، تميز بانحدار طفيف.

الكلمات المفتاحية: شواطئ مستغانم، عشبة *Posidonia oceanica*، مرج الأعشاب البحرية، الخط الساحلي، نظام المعلومات الجغرافية، تحليل حجم الجسيمات، قياس كربونات الكالسيوم، المادة العضوية.

Table des matières

Table des matières

| | |
|---|----|
| Introduction | 1 |
| Chapitre I : Synthèse Bibliographique | 3 |
| 1. Présentation générale sur l’herbiers à <i>Posidonia oceanica</i> | 3 |
| 1.1. Répartition géographique | 3 |
| 1.2. Caractéristique | 4 |
| 1.3. Classification | 5 |
| 1.4. Bref aperçu sur l’écologie de la <i>Posidonie</i> | 5 |
| 1.5. Rôle des herbiers à <i>Posidonia oceanica</i> | 6 |
| 1.5.1. Rôle dans les équilibres écologiques du système littoral..... | 6 |
| 1.5.2. Rôle dans les équilibres physiques du système Littoral | 8 |
| 1.5.3. Rôle économique | 9 |
| 1.5.4. Rôle de bio-indicateur | 9 |
| 1.6. Menaces sur les herbiers à <i>Posidonia oceanica</i> | 11 |
| 1.6.1. Aménagements côtiers et modification de la dynamique sédimentaire..... | 11 |
| 1.6.2. Pollution | 11 |
| 1.6.3. Modification des apports par les cours d’eaux | 12 |
| 1.6.4. Impacts de l’Ancrage et du Mouillage sur les Herbiers de Posidonie..... | 12 |
| 1.6.5. Compétition avec des espèces introduites | 14 |
| 1.6.6. Effet du changement climatique | 14 |
| 2. Méthodes d’étude de la dynamique des herbiers à <i>Posidonia oceanica</i> | 15 |
| 2.1. Plongée sous-marine..... | 15 |
| 2.1.1. Densité de l’herbier | 15 |
| 2.1.2. Mesure du déchaussement des rhizomes | 16 |
| 2.1.3. Pourcentage de rhizomes plagiotropes | 16 |
| 2.1.4. Recouvrement de l’herbier | 17 |
| 2.1.5. Evaluation de la dynamique de l’herbier de Posidonie | 17 |
| 2.2. Apport de la géomatique dans le suivi des zones côtières et habitats marins..... | 18 |
| 2.2.1. Photographie aérienne | 18 |
| 2.2.2. Télédétection | 18 |
| 2.2.3. Acoustique..... | 19 |
| Chapitre II : Matériel et Méthodes | 20 |

| | |
|--|-----------|
| 1. Présentation de la zone d'étude | 20 |
| 1.1 Localisation géographique et description géomorphologique et écologique de la plage de Salamandre | 20 |
| 1.2. Description des conditions climatiques et hydrodynamiques | 20 |
| 1.2.1. Contexte climatique | 20 |
| 1.2.2. Conditions aérodynamiques et hydrodynamiques | 20 |
| 1.3. Description des activités socio-économiques et leur impact sur le milieu marin et l'herbier à <i>Posidonia oceanica</i> | 21 |
| 1.3.1. Port de Salamandre | 21 |
| 1.3.2. Crique de Salamandre | 21 |
| 1.3.3. Sablette Est | 21 |
| 2. Méthodes de travail | 22 |
| 2.1. Choix d'une approche diachronique basée sur les systèmes d'information géographiques (SIG) | 22 |
| 2.2. Représentation du logiciel Google Earth Pro | 22 |
| 2.2.1. Avantages et inconvénients des images satellites fournies par Google Earth Pro | 23 |
| 2.3. Présentation de logiciel ArcGIS | 23 |
| 3. Partie expérimentale | 24 |
| 3.1. Prélèvement et traitement des échantillons | 24 |
| 3.2. Identifications de quelques espèces marines rencontrées sur la plage de Salamandre | 25 |
| 4. Traitement des échantillons | 26 |
| 4.1. Analyse granulométrique | 26 |
| 4.1.1. Méthode d'analyse granulométrique | 26 |
| 4.2. Matière organique | 28 |
| 4.2.1. Méthode de détermination le taux de matière organique | 28 |
| 4.3. La Calcimétrie | 29 |
| 4.3.1. Méthode de déterminer le taux de la CaCO ₃ | 30 |
| 5. Protocole de suivi cartographique | 33 |
| 5.1. Collecte et préparation de données | 33 |
| 5.2. Prétraitement des images satellitaires | 34 |
| 5.2.1. Géoréférencement des images | 34 |
| 5.3. Analyse des données dans le SIG | 35 |
| 5.3.1. Numérisation | 35 |
| 5.3.2. Analyse spatio-temporelle du trait de côte et de la limite supérieure des herbiers à <i>Posidonia oceanica</i> | 37 |
| Chapitre III: Résultat et Discussion | 21 |

| | |
|---|-----------|
| 1. Analyse granulométrique..... | 39 |
| 1.1. La plage de La Crique : Salamandre | 39 |
| 1.1.1. Station 1..... | 39 |
| 1.1.2. Station 2..... | 41 |
| 1.1.3. Station 3..... | 42 |
| 2. Matière organique..... | 44 |
| 2.1. La plage de La Crique : Salamandre | 44 |
| 3. Calcimétrie | 45 |
| 3.1. La plage de la Crique : Salamandre..... | 45 |
| 3.1.1. Station 1..... | 45 |
| 3.1.2. Station 2..... | 46 |
| 3.1.3. Station 3..... | 47 |
| 4. Analyse cartographique de l'évolution spatio-temporelle des herbiers de <i>Posidonie</i> | 48 |
| 5. Analyse statistique de l'évolution spatio-temporelle des surfaces occupées par les habitats marins | 53 |
| 6. Evolution linéaire du trait de côte..... | 54 |
| 7. Interprétation et discussion des résultats | 54 |
| 8. Les solutions de protection et de restauration des herbiers à <i>Posidonia oceanica</i> | 55 |
| Conclusion | 57 |
| Références bibliographiques | 59 |
| Annexes : | 64 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Herbière à <i>Posidonia oceanica</i> (Chartier, 2019)..... | 3 |
| Figure 2 : Répartition de <i>Posidonia oceanica</i> en Méditerranée (La Posidonie, le poumon de la Méditerranée MedWet, 2017)..... | 4 |
| Figure 3 : Schéma descriptif de la morphologie de la <i>P. oceanica</i> (Abadie, 2012)..... | 4 |
| Figure 4 : Image de rhizomes de <i>Posidonia oceanica</i> rampants sous-marine (Ruitton et al., 2017)..... | 5 |
| Figure 5: Services écosystémiques et économiques fournis par la Posidonie (Abadie, 2019)..... | 8 |
| Figure 6: Banquettes des feuilles mortes de l’herbière à <i>Posidonia oceanica</i> (Fullgrabe, 2020)..... | 9 |
| Figure 7: Typologie de la limite inférieure des herbiers à <i>Posidonia oceanica</i> en fonction de leur morphologie d’après (Meinesz & Laurent, 1978b)..... | 10 |
| Figure 8: Impact des ancrages des navires de plaisance sur l’herbière à <i>Posidonia oceanica</i> (Drupal.,2021).... | 13 |
| Figure 9: <i>Codium fragile</i> (Photographie : Bougherira., 2024)..... | 25 |
| Figure 10: <i>Gelidium pulchellum</i> (Photographie : Bougherira., 2024)..... | 25 |
| Figure 11: <i>Padina pavonica</i> (Photographie : Bougherira., 2024)..... | 25 |
| Figure 12: <i>Ulva rigida</i> (Photographie : Bougherira., 2024)..... | 25 |
| Figure 13: Zostère (Photographie : Bougherira., 2024)..... | 25 |
| Figure 14: Préparation des échantillons de sédiments pour le séchage dans l’étuve à 105°C pendant 24 h.. | 27 |
| Figure 15: Pesage de 100 g du sédiment à l’aide d’une balance électronique précision de 0.01g..... | 27 |
| Figure 16: Montage de la série de tamis (allant de 2 mm jusqu’à <0.05 mm) sur une tamiseuse mécanique | 28 |
| Figure 17: Calcination des échantillons de sédiments dans le four à moufle, (a) : Four à moufle, (b) Calcination du sédiment, (c) Sédiment calciné..... | 29 |
| Figure 18: Broyage du sédiment..... | 31 |
| Figure 19: Préparation de solution de NaCl..... | 32 |
| Figure 20: Calcimètre de Bernard..... | 32 |
| Figure 21: Pesage de 0.3 g du sédiment..... | 32 |
| Figure 22: Insertion de l’échantillon dans l’Erlenmeyer..... | 33 |
| Figure 23: Géoréférencement de l’image satellitaire sur ArcMap..... | 35 |
| Figure 24: Photo de géoréférencement de la zone d’étude en 2004..... | 35 |
| Figure 25: Numérisation de trait de côte de la zone de salamandre..... | 36 |
| Figure 26: Numérisation des surfaces occupées par l’herbière de Posidonie..... | 37 |
| Figure 27: Importation des trois limites supérieures en vue de leur suivi par l’extension DSAS..... | 38 |
| Figure 28: Courbe granulométrique du sédiment prélevé au niveau de la plage la Crique : Salamandre : station 1..... | 40 |
| Figure 29: Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 2..... | 42 |
| Figure 30: Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 3..... | 44 |
| Figure 31: Taux de matière organique de la plage la Crique : Salamandre (station 1,2,3)..... | 45 |
| Figure 32: Taux de carbonates dans le sédiment (plage la Crique : Salamandre) : station 1..... | 46 |
| Figure 33: Taux de carbonates dans le sédiment (plage la Crique : Salamandre) : station 2..... | 47 |
| Figure 34: Taux de carbonates dans le sédiment (plage la Crique : Salamandre) : station 3..... | 48 |
| Figure 35: Cartographie des surfaces potentiellement occupées par les herbiers de Posidonie au-devant de plusieurs plages : Port de Salamandre, La Crique, Sablette Est (2004)..... | 49 |
| Figure 36: Cartographie des surfaces potentiellement occupées par les herbiers de Posidonie au-devant de plusieurs plages : Port de Salamandre, La Crique, Sablette Est (2010)..... | 50 |
| Figure 37: Cartographie des surfaces potentiellement occupées par les herbiers de Posidonie au-devant de plusieurs plages : Port de Salamandre, La Crique, Sablette Est (2016)...... | 51 |

| | |
|---|----|
| Figure 38: Cartographie des surfaces potentiellement occupées par les herbiers de Posidonie au-devant de plusieurs plages : Port de Salamandre, La Crique, Sablette Est (2023) | 52 |
| Figure 39: Evolution spatio-temporelle de l'herbier à Posidonia oceanica | 53 |
| Figure 40: Evolution spatio-temporelle d'Herbier dégradé de Posidonie et le substrat meuble. | 54 |
| Figure 43: Evolution diachronique des transects (NSM) entre (2004-2010)..... | 54 |
| Figure 42: prise de vue sur le Port de Salamandre | 55 |
| Figure 43: une photo qui montrent l'importation des points de contrôle dans le logiciel ArcGIS | 64 |
| Figure 44: évolution diachronique des transects (EPR) entre (2010-2016) | 64 |
| Figure 45: évolution diachronique des transects (NSM) entre (2010-2016) | 65 |
| Figure 46: évolution diachronique des transects (NSM) entre (2016-2023) | 65 |
| Figure 47: évolution diachronique des transects (EPR) entre (2016-2023) | 65 |
| Figure 48: évolution diachronique des transects (NSM) entre (2004-2023) | 66 |
| Figure 49: évolution diachronique des transects (LRR) entre (2004-2023)..... | 66 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Densité des faisceaux de feuilles par mètre carré et son type d'herbier (Denis et al, 2002). | 16 |
| Tableau 2 : Daleurs de déchaussement des rhizomes et son interprétation (Denis et al, 2002). | 16 |
| Tableau 3 : Pourcentage des rhizomes plagiotropes et son interprétation (Denis et al, 2002). | 17 |
| Tableau 4 : Pourcentage du recouvrement et son interprétation (Denis et al, 2002). | 17 |
| Tableau 5 : Coordonnées géographiques de plusieurs sites à Mostaganem (Salamandre, le Port de Salamandre, La Crique, Sablette). | 22 |
| Tableau6 : stations de prélèvements de la plage de la Crique (SALAMANDRE) (Levé de terrain et échantillonnage réalisé par BOUGHERIRA., 2024) | 24 |
| Tableau 7 : Données collectées en vue de cartographier la Posidonie au-devant de la plage de Salamandre (Mostaganem). | 33 |
| Tableau 8 : Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 1- prélèvement : PM-1 | 39 |
| Tableau 9 : Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : station 1- prélèvement : TC-1 | 39 |
| Tableau 10 : Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 1- prélèvement : PA-1 | 40 |
| Tableau 11 : Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 2- prélèvement : PM-2 | 41 |
| Tableau 12 : Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 2- prélèvement : TC-2 | 41 |
| Tableau 13 : Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 3- prélèvement : PM-3 | 42 |
| Tableau 14 : Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 3- prélèvement : TC-3 | 43 |
| Tableau 15 : Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 3- prélèvement : PA-3 | 43 |
| Tableau 16 : Taux de matière organique de la plage la Crique : Salamandre (station 1,2,3)..... | 44 |
| Tableau 17 : Taux de carbonates dans le sédiment (plage la Crique : Salamandre) : station 1 | 45 |
| Tableau 18 : Taux de carbonates dans le sédiment (plage la Crique : Salamandre) : station 2 | 46 |
| Tableau 19 : Taux de carbonates dans le sédiment (plage la Crique : Salamandre) : station 3 | 47 |
| Tableau 20 : les surfaces de chaque type d'habitats marins. | 53 |

Liste des abréviations et des acronymes

SIG : Système d'information géographique

UTM : universal transverse marcator

WGS 1984 : world geodetic system

Kml : keyhole mark-up langage

PH : potential d'Hydrogène

CO2 : dioxyde de carbone

DSAS : digital shoreline analysis system

ZPM : Zone de protection marine

CaCO3 : Carbonate de Calcium

EP: Error pixel

ERMs: Error in georeferencing

INTRODUCTION

Introduction

Les zones côtières constituent des écosystèmes de transition entre la terre et la mer, représentant l'un des environnements naturels les plus dynamiques, où l'activité humaine, l'économie, l'écologie et la géomorphologie interagissent (Blanco-Murillo et *al.*, 2022). De plus, les zones côtières sont des centres d'activité humaine en raison de leur productivité biologique élevée et de leur accessibilité, ce qui en fait les zones les plus peuplées au monde (Primavera, 2006). En conséquence, elles sont confrontées à des problèmes environnementaux majeurs, tels que l'étalement urbain, la pollution des eaux côtières et l'exploitation des ressources marines (Mancini et *al.*, 2023).

Les herbiers marins sont un groupe de plantes à fleurs vivant dans les eaux peu profondes, prospérant à la fois sur les fonds meubles et rocheux et capables de former de vastes prairies (Green, 2003). *Posidonia oceanica* est l'une des espèces clés de ces herbiers en Méditerranée. Elle est l'une des espèces les plus importantes et les plus étudiées de l'étage infralittoral méditerranéen. Endémique à cette mer, la *Posidonie* joue un rôle écologique et économique essentiel (Boudouresque et *al.*, 2006). En tant qu'écosystème côtier précieux, elle fournit divers biens et services écosystémiques, notamment la protection contre l'érosion côtière, la production d'oxygène, la séquestration du carbone et la bio-indication de la qualité des eaux (Boudouresque et *al.*, 2012).

L'herbier à *Posidonia oceanica* est également un puissant indicateur de la qualité globale des eaux marines. Il est largement réparti sur tout le littoral méditerranéen, et particulièrement sensible à la pollution. Sa vitalité ou sa régression reflète directement l'état des eaux environnantes (Belbachir, 2012). Le littoral algérien, et particulièrement celui de Mostaganem, n'échappe pas à cette tendance globale de dégradation, affectant négativement son état écologique.

Au cours des dernières décennies, la concentration des activités anthropiques sur le littoral, telles que les aménagements et la pollution, a rendu la posidonie vulnérable. Ces pressions ont entraîné une dégradation alarmante des herbiers dans certaines régions de la Méditerranée. Cela a mené à la création d'Aires Marines Protégées, à la cartographie des herbiers et à l'établissement de réseaux de surveillance pour minimiser les impacts (Ben Maiz, 2000).

La protection du trait de côte nécessite une gestion rigoureuse et une protection des herbiers à *Posidonia oceanica*, un des objectifs majeurs pour la préservation de l'environnement côtier (De Falco et *al.*, 2000). Pour cela, une cartographie régulière de la distribution spatiale des herbiers est indispensable (Paul et *al.*, 2011). Les études antérieures sur la cartographie des herbiers marins en Méditerranée souffraient soit d'une étendue spatiale limitée (Boudouresque et *al.*, 2009), soit d'une faible résolution spatiale (Giakoumi et *al.*, 2013). La gestion des données dans les SIG (Système d'Information Géographique) est devenue cruciale pour cartographier ces herbiers. Cela permet

d'identifier les zones où ils sont présents et de les protéger contre des activités humaines potentiellement nuisibles, telles que la navigation ou la pêche destructrice. La surveillance régulière par cartographie permet également de détecter tout changement dans leur distribution, un aspect clé pour une conservation efficace.

La cartographie de la limite supérieure des herbiers à *Posidonia oceanica* et du trait de côte permet de suivre leur évolution et d'identifier les facteurs responsables de leurs variations. Cette approche vise à améliorer la gestion et la protection de ces habitats.

Dans ce mémoire, nous utilisons une cartographie spatio-temporelle pour suivre l'évolution de la limite supérieure des herbiers à *Posidonia oceanica* et du trait de côte sur quelques plages de Mostaganem, afin de déterminer s'il y a progression ou régression de l'espèce.

Notre étude couvre site de Salamandre (Mostaganem, Algérie) sur une période de dix-neuf ans (2004-2023), avec des analyses à des périodes spécifiques (septembre 2004, juillet 2010, septembre 2016 et juin 2023). Nous cherchons également à évaluer leur rôle dans la protection des côtes algériennes et à identifier les mesures nécessaires pour protéger les herbiers.

Ce travail est divisé en trois chapitres, complétés par une introduction et une conclusion générale, avec le plan suivant :

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique sur les aspects écologiques et morphologiques des herbiers à *Posidonia oceanica*, leur rôle dans les écosystèmes marins, ainsi que les causes et conséquences de leur dégradation.

Chapitre 2 : Présentation des caractéristiques de la zone d'étude, des différentes approches méthodologiques pour étudier la dynamique des herbiers, du trait de côte et des analyses sédimentaires réalisées.

Chapitre 3 : Discussion des résultats obtenus.

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

1. Présentation générale sur l'herbiers à *Posidonia oceanica*

Posidonia oceanica est une plante endémique de la Méditerranée. Elle constitue des forêts sous-marines appelées "herbiers" (Figure 1). Elle constituant un habitat fournissant de nombreux biens et services à l'humanité. La *Posidonie* est un écosystème utile rend des services écosystémiques, tel que la séquestration du carbone organique, la protection des plages contre l'érosion, le rôle de frayère (Charles-Francois, 2006).



Figure 1 : Herbier à *Posidonia oceanica* (Chartier, 2019)

1.1. Répartition géographique

L'herbier de *Posidonie* occupe 1 à 2 % des fonds de la Méditerranée (Figure 2), il constitue le principal peuplement à l'exception du secteur de Gibraltar (influence atlantique). A l'est, elle est absente des côtes d'Égypte (à l'Est du delta du Nil), de Palestine et du Liban (Boudouresque, et al., 2006). La *Posidonie* est rare voire absente dans l'extrême Nord de l'Adriatique (Boudouresque, et al., 2006), et le long des côtes languedociennes (France). La *Posidonie* est généralement sténohaline, préférant beaucoup plus la salinité et la lumière. En Algérie, l'herbier à *Posidonia oceanica* est présente dans plusieurs côtes.

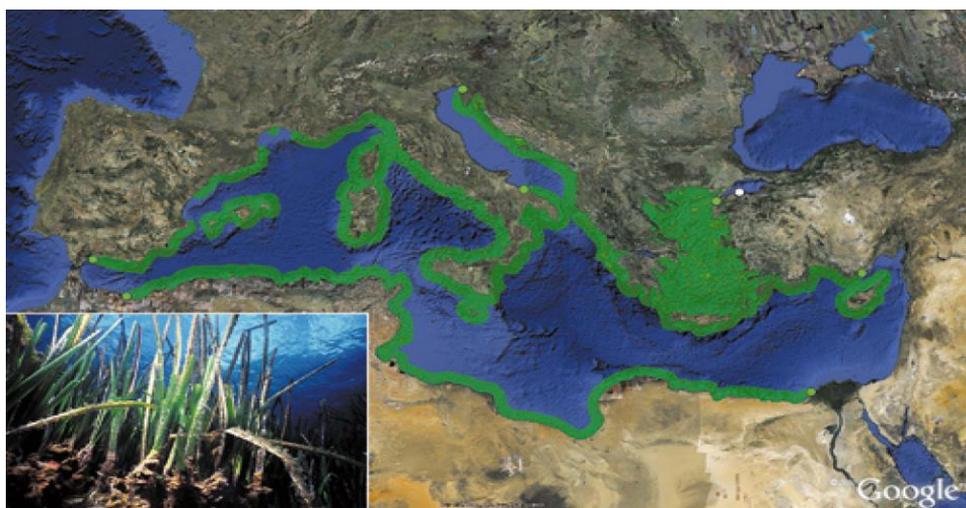


Figure 2 : Répartition de *Posidonia oceanica* en Méditerranée (La Posidonie, le poumon de la Méditerranée | MedWet, 2017)

1.2. Caractéristique

L'herbier à *Posidonia oceanica* est une plante verte à fleurs marine, constitué par des tiges rampantes ou dressées (Boudouresque et *al.*, 2006), occupant les petits fonds allant jusqu'à 30 et 40 mètres de profondeur.

Cet herbier est composé principalement des rhizomes et des feuilles. Les rhizomes sont des tiges à l'épaisseur de 1-2 cm, et prolifèrent généralement enterrés dans les sédiments. Ces derniers sont de deux types, dont les rampants ou plagiotropes poussent horizontalement et les seconds dressés verticalement appelés orthotropes. Les rhizomes se terminent par des groupes de 4-8 feuilles « faisceaux » (Boudouresque et *al.*, 2006) (Figure 3).

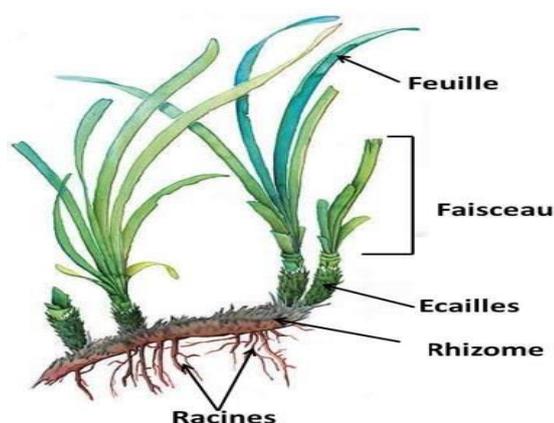


Figure 3 : Schéma descriptif de la morphologie de la *P. oceanica* (Abadie, 2012)

Les feuilles sont coloré en vert, elles mesurent entre 40 et 80 cm et se regroupent en faisceaux qui tombent surtout à l'automne (Bonhomme et Rouanet, 2015). Les feuilles de la *Posidonie* se divisent

en trois : feuilles adultes, feuilles intermédiaires et feuilles jeunes (Figure 4). Elle fleurit en automne et produit au printemps des fruits flottants appelées « olive de mer »(Boudouresque, et *al.*, 2006).



Figure 4 : Image de rhizomes de *Posidonia oceanica* rampants sous-marine (Ruitton et *al.*, 2017)

1.3. Classification

La classification de la *Posidonia oceanica* est :

- ❖ Règne : Plantae
- ❖ Sous-règne : Tracheobionta
- ❖ Division : Magnoliophyta
- ❖ Classe : Liliopsida
- ❖ Sous-classe : Alismatidae
- ❖ Ordre : Najadales
- ❖ Famille : Posidoniaceae
- ❖ Genre : *Posidonia*
- ❖ Espèce : *Posidonia oceanica*

1.4. Bref aperçu sur l'écologie de la *Posidonie*

La *Posidonie* occupent les petits fonds, allant de jusqu'à 40m de profondeur, selon la transparence de l'eau, l'intensité lumineuse disponible au fond devenant le facteur limitant pour leur développement (Elkalay et *al.*, 2003).

P. oceanica est sensible aux variations de température et de salinité de l'eau (Abadie., 2012). Cette plante peut se développer dans des eaux dont la température est comprise entre 9°C et 29°C (Augier et al., 1980). Elle est capable de résister à des températures supérieures.

L'herbier à *Posidonia oceanica* est une espèce sténohaline, elle ne subit pas de grandes variations de salinité, sa gamme de tolérance est entre 33 et 40. Elle se développe dans un milieu de salinité moyenne.

La formation des herbiers, leur dynamique et leur densité dépendent étroitement du milieu environnant : nature du substrat sur lequel les *Posidonies* se fixent, hydrodynamisme, courant, profondeur, qualité des eaux (Boudouresque et al., 2006).

De plus, les herbiers à *Posidonia oceanica* tolèrent des variations de températures et d'hydrodynamisme d'amplitude relativement grande (Bonhomme et Rouanet, 2015). Qui doit créer un hydrodynamisme intense. *Posidonia oceanica* est vulnérable aux variations des conditions environnementales qui influencent leur croissance et leur répartition spatiale.

1.5. Rôle des herbiers à *Posidonia oceanica*

Les prairies de *Posidonia oceanica* fournissent de nombreux services écosystémiques importants (Campagne et al., 2015), et ces services écosystémiques correspondent aux biens qu'un écosystème fournit et aux services qu'il rend à l'Homme (bien involontairement bien sûr), biens et services qui peuvent être chiffrés en termes de valeur monétaire (Pergent-Martini, 2016). L'herbier de *Posidonie* intègre, par sa présence, son état de santé, ou son absence, la qualité moyenne des eaux dans lesquelles il baigne tout au long de l'année. Il constitue donc un outil efficace de surveillance de la qualité globale des eaux et des milieux littoraux (Boudouresque et al., 2006).

En effet, les herbiers sont essentiels dans la production de matières premières et de nourriture, la protection du littoral contre l'érosion et la purification de l'eau (Team, 2023).

Les herbiers constituent également une protection hydrodynamique, sans équivalent, de la frange côtière (Ledireach, 2013). Elle joue un rôle majeur dans la fixation et la séquestration du Carbone Bleu (puits de Carbone) ; la matrice constitue un réservoir unique estimé à plus de 1 500 tonnes de Carbone par hectare soit 4 à 10 fois plus important que la forêt (Pergent, 2016). C'est une richesse pour les eaux littorales en méditerranée.

1.5.1. Rôle dans les équilibres écologiques du système littoral

La *Posidonie* sont essentiels pour la stabilité des rivages sablonneux et des fonds marins. En fait les vagues et courants sont déchargés de ce sédiment par la matrice puis s'accumule par l'action du filtrage

des feuilles et des rhizomes. L'efficacité de la protection des rivages par les prairies à *Posidonia oceanica* est mise en évidence par les changements apparents affectant les régions côtières après la régression de la *Posidonie*. Parmi ceux-ci, l'instabilité de l'érosion des fonds marins, l'ensablement ou l'érosion des rivages sablonneux, le taux élevé d'accumulation du sable autour des ports, dock (Hattour et Ben Mustapha, 2013).

Les herbiers à *Posidonia oceanica* est une frayère et une nurserie ou un habitat permanent pour une certains nombres d'espèce, plus de 400 espèce différents de végétaux et plusieurs milliers d'espèce animales peuplent les herbiers à *P. oceanica*, et font de ces prairies sous-marines un pôle de biodiversité unique (Boudouresque, 2004).

L'herbier se trouve à la base de nombreuses chaînes alimentaires, par la production de biomasse végétale et animale (Belbachir, 2012), la biomasse végétale de la posidonie est forte par rapport leur biomasse animale selon (Figure 5). Cette production a un effet d'appâter une faune variée, souvent d'intérêt économique pour la zone littorale concernée (Francour, 1990).

Elle produit la matière végétale d'une quantité entre 2 à 10 tonnes/ha/an, issue de deux modes de production primaire. La production primaire des herbiers de *Posidonia oceanica* est similaire ou supérieure à celle d'autres écosystèmes productifs, qu'ils soit terrestres (forêts tempérées ou tropicales) ou marins (zones d'upwelling, mangroves, récifs coralliens) (Belbachir, 2018).

La production primaire des feuilles de Posidonies (4 à 10%) est consommée par les herbivores comme un produit nécessaire de nourriture la litière qui est portée avec plusieurs écosystème.

Permis les conséquences de la photosynthèse de l'herbier à *Posidonia oceanica* est la production d'oxygène, une partie de cet oxygène est consommée pour leur dégradation (Mateo & Romero, 1996). Au niveau des faisceaux foliaires et des végétaux épiphytes associés la production d'oxygène peut être considérable (Boudouresque et al., 2006). Donc, les herbiers à *Posidonia oceanica* sont un facteur important de l'oxygénation de l'eau.

Les habitats de *Posidonia oceanica* jouent également un rôle important en tant que réservoir de carbone. L'importance mondiale des prairies de *P.oceanica* en tant que puits de carbone à long terme a été largement reconnue en raison de la grande quantité de carbone stockée et de leur large répartition dans la mer Méditerranée (Monnier et al., 2021). Ils absorbent le dioxyde de carbone, et stockent le carbone à un taux moyen de 83C/m2 par an, contribuent à atténuer les effets du changement climatique (Monnier et al., 2021).

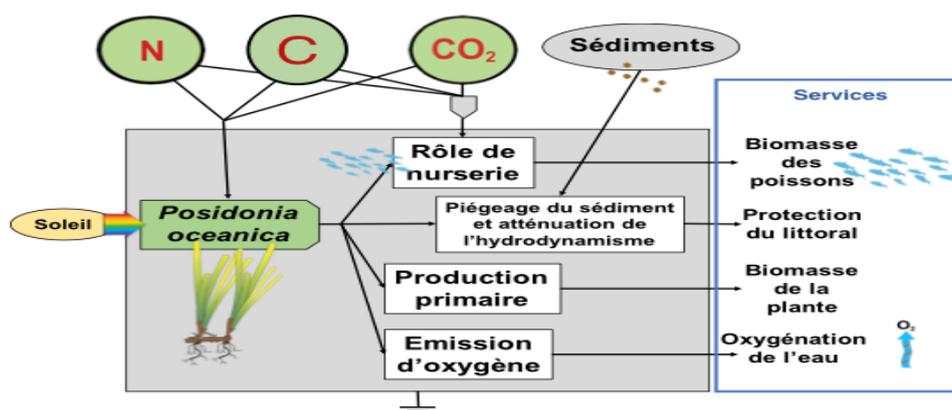


Figure 5: Services écosystémiques et économiques fournis par la *Posidonie* (Abadie, 2019)

1.5.2. Rôle dans les équilibres physiques du système Littoral

La *Posidonie* joue un rôle essentiel dans la protection hydrodynamique de la frange côtière et des plages par affaiblissement de 50% de la puissance des vagues de la houle et des courants. L'herbier de *Posidonie* préserve aussi le littoral contre l'érosion, par l'accumulation des feuilles mortes. Les petits fonds sableux sont également stabilisés par la fixation des sédiments et la formation de la matte (C. Boudouresque et Grissac, 1983).

La longueur des feuilles de l'herbier de *Posidonia oceanica* ralentit le courant, ce qui réduit la remise en suspension des sédiments piégés par la canopée. Par conséquent, cela contribue à diminuer la turbidité de la colonne d'eau (Gacia et Duarte, 2001). Les feuilles s'accumulent sur le rivage au gré des courants et constituent de véritables banquettes à même de protéger les plages de l'érosion, notamment lors des tempêtes hivernales (Figure 6). Leur maintien sur les plages apparaît donc comme un élément indispensable dans une optique de protection du littoral (Zakhama-Sraieb et *al.*, 2011).

Il faut également noter que la décantation des sédiments et leur immobilisation au sein de la "matte", principalement des particules fines, concourent à l'augmentation de la transparence des eaux littorales (Boudouresque et *al.*, 2006).



Figure 6: Banquettes des feuilles mortes de l’herbier à *Posidonia oceanica* (Fullgrabe, 2020)

1.5.3. Rôle économique

Le rôle économique de l'herbier de *Posidonie* concerne notamment la gestion des ressources vivantes grâce à sa production biologique élevée et la protection qu'il offre aux alevins et aux jeunes organismes contre les prédateurs. De plus, il constitue une frayère très prisée par de nombreuses espèces à haute valeur marchande (jimenez, 1996).

Elle contribue également au développement du tourisme et des activités balnéaires, principalement en améliorant la qualité des eaux grâce à sa contribution à la transparence. De plus, l'herbier de *Posidonie* joue un rôle crucial dans la stabilisation de la ligne de rivage en la protégeant contre l'érosion (Boudouresque, et *al.*, 2006).

En général, bien que l'importance des écosystèmes naturels soit largement reconnue, notamment en termes de maintien des équilibres naturels (rôle écologique), leur valeur économique globale est plus difficile à évaluer (Costanza et *al.*, 1997). Cette évaluation économique doit prendre en compte à la fois les bénéfices directs et indirects, ainsi que les valeurs d'option.

1.5.4. Rôle de bio-indicateur

La *Posidonie* est largement utilisée comme indicateur biologique permettant d'évaluer la qualité du milieu marin. Elle est un bon indicateur de l'état de santé des écosystèmes marins ainsi que des impacts anthropiques sur l'environnement côtier, notamment la perte alarmante d'habitats (De Paola et *al.*, 2024). De plus, elle constitue un outil fiable pour l'évaluation de la contamination métallique des écosystèmes littoraux. En effet, elle influence l'âge et la croissance des tissus foliaires dans l'accumulation métallique et sert de traceur de la contamination métallique, ce qui en fait un outil

intéressant dans la mise en œuvre de réseaux de surveillance à l'échelle de la Méditerranée (Lafabrie, 2007).

La limite inférieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* constitue souvent un indice de la qualité des eaux, notamment en ce qui concerne la turbidité. En effet, si cette limite est profonde, la turbidité est faible, et vice versa (Meinesz & Laurent, 1978a). De plus, la profondeur de la limite inférieure pourrait également être influencée par la température, et le type de cette limite fournit des informations sur l'état de santé de l'herbier (Pergent et al., 1995). Elle dépend également de la transparence de l'eau, étant plus profonde lorsque le taux de transparence augmente. On distingue plusieurs types de limites en fonction de l'évolution des conditions du milieu, notamment les limites progressives, les limites brusques, les limites érosives et les limites régressives (Figure 7).

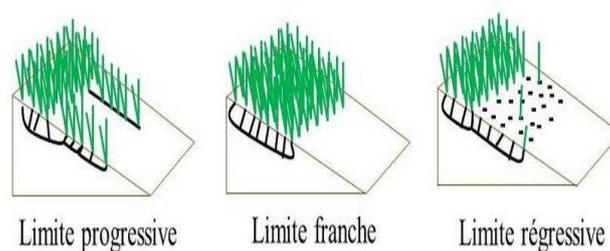


Figure 7: Typologie de la limite inférieure des herbiers à *Posidonia oceanica* en fonction de leur morphologie d'après (Meinesz & Laurent, 1978b)

La limite supérieure renseigne quant à elle sur les changements naturels de l'environnement, tels que l'hydrodynamisme et l'équilibre sédimentaire, ainsi que sur les conséquences des actions humaines, comme les aménagements littoraux et l'impact des ancrages (Pergent-Martini et al., 2005). La présence d'intermattes ou de mattes mortes au sein de l'herbier révèle un équilibre fragile, souvent dû à l'activité balnéaire ou de la pêche. De plus, le type de limites observé peut fournir des informations sur l'évolution temporelle de la transparence des eaux (Boudouresque et al., 2006).

L'empreinte de la qualité des eaux sur les herbiers à *Posidonia oceanica* est permanente, et de nombreux paramètres peuvent être enregistrés par l'herbier (Bensabra et Hemissi., 2012). La *Posidonia oceanica*, en tant qu'espèce aquatique endémique de la mer Méditerranée, est reconnue comme un puissant bio-indicateur, car l'empreinte de la qualité des eaux sur les herbiers est indépendante du sens du courant au moment de l'observation. La position de sa limite inférieure et la densité des faisceaux témoignent de la turbidité de l'eau, tandis que les épiphytes des feuilles et la composition chimique de la plante reflètent la quantité de matière organique et de nutriments disponibles.

1.6. Menaces sur les herbiers à *Posidonia oceanica*

Les herbiers de *Posidonie* font face à de nombreuses pressions anthropiques susceptibles de compromettre leur développement voire de les faire régresser (Peirano et al., 2005). Certaines de ces pressions peuvent entraîner des dommages irréversibles à l'échelle humaine sur les herbiers (Abadie, 2012). Souvent, les herbiers sont plus fragmentés dans les zones où il y a des activités humaines (Montefalcone et al., 2010).

1.6.1. Aménagements côtiers et modification de la dynamique sédimentaire

La régression des herbiers à *Posidonia oceanica* le long du littoral Méditerranéen est largement attribuée aux aménagements côtiers, tels que les ports, les marinas, les digues et les épis rocheux. Selon Sghaier (2013), ces infrastructures ont des impacts directs, comme le comblement des zones à herbiers et la destruction lors des dragages portuaires, ainsi que des impacts indirects, notamment les modifications des courants littoraux qui altèrent les flux sédimentaires et créent des zones à mattes mortes. Ces changements de dynamique sédimentaire affectent la croissance et le développement des herbiers en limitant la quantité de lumière disponible pour la photosynthèse. Ruiz Fernandez et Romero (2004) ont montré que la modification des courants peut provoquer la remise en suspension de particules dans la colonne d'eau, réduisant ainsi la transparence de l'eau et limitant la photosynthèse. Belbachir (2012) souligne que les matériaux terrigènes déversés en mer peuvent entraîner une hyper sédimentation dans les herbiers, ce qui diminue la transparence de l'eau et compromet la santé des herbiers à long terme.

1.6.2. Pollution

La pollution d'origine terrestre, notamment les rejets urbains et industriels ainsi que ceux des bateaux de plaisance, représente une menace majeure pour les herbiers de *Posidonie*. Ces contaminants altèrent le flux sédimentaire et s'accumulent dans les tissus de la *posidonie*, affectant ses pigments photosynthétiques et réduisant sa vitalité (Balestri et al., 2004). Les rejets d'eaux usées domestiques et industrielles entraînent une augmentation de la turbidité de l'eau, favorisant le développement excessif d'espèces compétitrices telles que les épiphytes et le phytoplancton. Cette compétition pour la lumière réduit la pénétration de la lumière dans l'eau, ce qui conduit à la régression voire à la mort des herbiers (Balestri et al., 2004). De plus, le refroidissement des rejets d'eaux industrielles peut modifier la température de l'eau de mer, ce qui peut également affecter la vitalité de la *Posidonie* (Ravallec et Pergent-Martini, 2007).

1.6.3. Modification des apports par les cours d'eaux

Les cours d'eaux côtiers exercent une influence significative sur les herbiers de *Posidonia oceanica* en modifiant la salinité, les apports en nutriments et en sédiments. Les fluctuations saisonnières et interannuelles du débit des fleuves côtiers Méditerranéens, bien que naturelles, peuvent affecter localement la distribution des herbiers. Les aménagements humains, tels que la canalisation des cours d'eau et la construction de barrages et de lacs, ont des effets contradictoires sur les herbiers. D'une part, ces interventions réduisent la charge sédimentaire à l'embouchure des fleuves, ce qui peut conduire à un réchauffement des rhizomes de la *Posidonie* et fragiliser les herbiers (Grissac & Boudouresque, 1985). D'autre part, l'exploitation des ressources minérales dans les lits des cours d'eau contribue également à réduire les apports sédimentaires. La diminution de la charge sédimentaire peut entraîner une augmentation de la turbidité de l'eau, limitant ainsi l'activité photosynthétique de la *Posidonie* et affectant les peuplements marins plus profonds (Tunesi et al., 2001).

De plus, l'augmentation des apports en nutriments due aux activités humaines peut favoriser la prolifération d'épiphytes, ce qui peut également avoir un impact négatif sur les herbiers de *Posidonie* (Ruiz Fernández, 2000).

1.6.4. Impacts de l'Ancrage et du Mouillage sur les Herbiers de Posidonie

Les activités d'ancrage et de mouillage des bateaux représentent des menaces significatives pour les herbiers de *Posidonie* selon (Figure 8). Sous l'influence de la houle et du vent, les mouvements des bateaux peuvent entraîner la fragmentation des prairies de *Posidonies*, favorisant ainsi l'invasion d'espèces non indigènes (Boudouresque, et al., 2006). Le mouillage forain, en particulier, exerce un impact destructeur sur les herbiers en raison de l'action mécanique de l'ancre et de la chaîne, entraînant une destruction irréversible de la *Posidonie* (Boudouresque, et al., 2006).

L'ancrage des navires implique la pose de l'ancre sur le fond marin, ce qui peut entraîner des dommages considérables aux herbiers de *Posidonie*. La taille des ancres, proportionnelle à celle des navires, est directement liée à l'ampleur des dégâts causés aux herbiers. Des études ont montré que ce sont principalement les grands navires qui ont un impact significatif sur la *Posidonie* (Boudouresque, et al., 2006).

Les zones d'ancrage et de mouillage, qu'elles soient organisées ou foraines, sont également associées à une pollution importante, comprenant notamment des peintures, des hydrocarbures, des détergents et des macro-déchets (Ganteaume et al., 2005 ; Boudouresque et al., 2006). Les ancres peuvent agir directement sur les rhizomes et le fond marin, entraînant l'arrachage des faisceaux de *Posidonie* et la formation de marmites érosives. Ces actions contribuent à la diminution du recouvrement de l'herbier,

favorisent la fragmentation et la dégradation de l'écosystème (Porcher, 1984 ; Francour et *al.*, 1997 ; Pasqualini et *al.*, 2000).



Figure 8: Impact des ancres des navires de plaisance sur l'herbier à *Posidonia oceanica* (Drupal.,2021)

La mise en place de ferme aquacole dans les eaux côtières s'est accélérée au cours des dernières années. Les études réalisées montrent clairement que les fermes piscicoles, quand elles sont situées à proximité d'un herbier à *Posidonia oceanica*, ont un impact fort sur celui-ci : la teneur en matière organique et en azote du sédiment, la teneur en phosphore de l'eau interstitielle et en phosphore total du sédiment augmentent au fur et à mesure que l'on s'approche du site de la ferme piscicole, avec pour conséquence la diminution de la densité des faisceaux et baisse de la production primaire de la plante (Cancemi, 2000).

Il semble que la cause principale de l'impact des fermes piscicoles soit la libération de matière organique, dont l'oxydation induit des conditions anoxiques dans le sédiment situé sous et au voisinage des fermes (Delgado et *al.*, 1999). Et la synthèse de composés réduits qui peuvent être toxiques pour *Posidonia oceanica* (Hemminga, 1998).

En outre, l'enrichissement des eaux en nutriments peut déterminer un accroissement des épiphytes des feuilles, avec pour conséquence la réduction de la photosynthèse de *Posidonia oceanica* (par

limitation de l'accès à la lumière), et l'augmentation du broutage des feuilles par les herbivores (Boudouresque et *al.*, 2006).

1.6.5. Compétition avec des espèces introduites

Le problème de la compétition entre l'herbier à *Posidonia oceanica* et les espèces introduites est devenu d'actualité avec l'introduction en Méditerranée de 2 chlorobiontes (Plantae), *Caulerpa taxifolia* et *C. racemosa var. cylindracea*, et de 2 Rhodobiontes, *Womersleyella setacea* et *Acrothamnion preissii* (Boudouresque et *al.*, 2006).

Caulerpa taxifolia est originaire d'Australie et a été introduite en Méditerranée en 1984. C'est une espèce capable de coloniser presque tous les types de substrats, en particulier la « matte morte » et les prairies à *Posidonia oceanica*. Les herbiers stressés et dégradés constituent un milieu très favorable pour cette espèce, la présence de *C. taxifolia* dans un herbier à *Posidonia oceanica* modifie profondément le fonctionnement de l'écosystème (Harmelin et *al.*, 1999).

Caulerpa racemosa var. cylindracea, introduite en Méditerranée vers 1990. Son expansion a été extraordinairement rapide, Aujourd'hui présente dans la plus grande partie de la Méditerranée. Quand *C. racemosa* colonise des fonds limitrophes de l'herbier à *Posidonia oceanica*, sa croissance en hauteur est fonction de la densité des faisceaux de *P. oceanica* et de l'orientation de l'herbier.

1.6.6. Effet du changement climatique

Le changement climatique a un impact sur l'herbier à *Posidonia oceanica*, qui menace les écosystèmes aquatiques du monde, surtout en Méditerranée qui est considérée comme hotspot du changement climatique et de biodiversité. Au-delà des pressions anthropiques évoquées précédemment, les herbiers à *Posidonia oceanica* seront exposés directement aux effets négatifs du changement climatique.

L'augmentation des températures semble avoir un effet négatif direct sur la *Posidonie* : une baisse de la concentration en oxygène dans l'eau, diminution du taux de la floraison des herbiers, la modification du pH de l'eau. L'accroissement du dioxyde de carbone « CO₂ » atmosphérique absorbé par les mers engendrer une acidification de la colonne d'eau c'est-à-dire une baisse du pH « le potentiel hydrogène » moyen de l'eau de mer qui entraîne des modifications significatives pour les herbiers à *Posidonia oceanica* et même pour les organismes qui vivent en symbiose avec l'herbier (Pergent, 2012).

Les herbiers à *Posidonia oceanica* 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).

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

L'étude de la dynamique des herbiers à *Posidonia oceanica* 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 : plongée sous-marine, photographie aérienne, télédétection et 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*.

2.1. 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 :

2.1.1. 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 Denis *et al*, (2002) 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 1).

Tableau 1 : Densité des faisceaux de feuilles par mètre carré et son type d'herbier (Denis *et al*, 2002).

| 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 |

2.1.2. 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 2).

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 2 : Valeurs de déchaussement des rhizomes et son interprétation (Denis *et al*, 2002).

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

2.1.3. 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 3).

Tableau 3 : Pourcentage des rhizomes plagiotropes et son interprétation (Denis *et al*, 2002).

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

2.1.4. 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 4).

Tableau 4 : Pourcentage du recouvrement et son interprétation (Denis *et al*, 2002).

| 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 |

2.1.5. 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.

2.2. Apport de la géomatique dans le suivi des zones côtières et habitats marins

La géomatique offre des outils puissants pour le suivi, la gestion et la conservation des herbiers de *Posidonie*, permettant de mieux comprendre et protéger les habitats marins clés. Basée sur l'usage combiné des outils du Système d'Information Géographique (SIG) et de la télédétection, la géomatique peut pour le suivi des habitats marins, notamment les herbiers de *Posidonie* (*Posidonia oceanica*). La cartographie de ces derniers constitue, par conséquent, un support d'aide à la conservation et la gestion de ces écosystèmes marins.

2.2.1. 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).

2.2.2. Télédétection

La télédétection a été largement utilisé pour surveiller et cartographier les écosystèmes d'herbiers marins à travers le monde (Veetil *et al*, 2020). La télédétection des herbiers à *Posidonia oceanica* 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 terrestre 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).

2.2.3. 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 finale dépend en partie des moyens de positionnement utilisés par le bateau (Pergent-Martini, 2015).

Chapitre II : Matériel et Méthodes

1. Présentation de la zone d'étude

1.1 Localisation géographique et description géomorphologique et écologique de la plage de Salamandre

La wilaya de Mostaganem est une ville portuaire de la Méditerranée située au nord-ouest de l'Algérie. C'est une ville côtière qui dispose d'une façade maritime d'environ 124 km, allant de l'embouchure de la Macta à l'ouest jusqu'à l'oued Kramis et un peu au-delà à l'est.

Le site de la Salamandre est situé à (35°55'13.78"N ; 0°03'21.63"E) et à environ 3 km de la ville de Mostaganem. Il est exposé aux vents dominants du secteur nord-ouest et présente un substrat rocheux et une profondeur moyenne de 10m. L'aspect sous-marin du site de Salamandre présente quelques signes de dégradation, à savoir une biodiversité réduite et un herbier de posidonie en très mauvais état (Belbachir, 2018). Il se caractérise par un hydrodynamisme actionné par les vagues et les houles. La bande littorale de la Salamandre est affectée par une urbanisation croissante et les différentes activités anthropiques, notamment touristiques, qui ont réduit la capacité de charge du littoral.

Cette zone côtière est réputée pour ses habitats sous-marins, dont l'accumulation des feuilles mortes de *Posidonie* témoigne de la présence d'un herbier de *Posidonie*.

1.2. Description des conditions climatiques et hydrodynamiques

1.2.1. Contexte climatique

La zone côtière de Mostaganem est soumise à un climat tempéré de type méditerranéen. Elle se situe dans un étage bioclimatique semi-aride, avec une période sèche allant de la mi-mai à la fin de septembre. Les précipitations annuelles sont faibles d'environ 300 mm et la température annuelle moyenne varie entre 21°C et 27°C (Boudahmani, 2023). Le maximum moyen de température est situé en été (AOUT), par contre, la température minimale se situe en (Janvier-Février).

La salinité est un facteur physique très important, elle joue un rôle primordial dans la densité et la qualité de l'eau et elle détermine aussi la vitesse du courant géostrophique. La salinité de surface, au voisinage de la côte est de l'ordre de 36‰ à 38‰ (Benzait, 2015).

1.2.2. Conditions aérodynamiques et hydrodynamiques

A Mostaganem, les vents dominants proviennent du sud, avec une direction, vitesse et fréquence variables. Les vents du nord-ouest et de l'ouest, perpendiculaires à la côte, sont particulièrement forts en hiver, générant un hydrodynamisme côtier significatif. La houle, influencée par la direction du

vent, est cruciale pour l'hydrodynamisme sédimentaire en zones peu profondes. En été et début automne, le vent de N.E. crée une houle faible, tandis que le vent de N.O. en hiver et printemps génère une houle plus intense. Les houles de secteur Est et N.O. sont les plus fréquentes, les houles de secteur Est et N.E. étant les moins fréquentes (Benzait, 2015).

1.3. Description des activités socio-économiques et leur impact sur le milieu marin et l'herbier à *Posidonia oceanica*

Le site de Salamandre est situé au voisinage de la zone industrielle de Mazagran dont les rejets des eaux industrielles débouchent à environ 1km à l'ouest. L'impact sur l'environnement de ces effluents liquides rejetés dans la mer est très élevée. Ce site est localisé à l'intérieur d'un port. L'aspect sous-marin de la zone d'étude est également caractérisé par un herbier à *Posidonia oceanica*.

1.3.1. Port de Salamandre

Le port de pêche de Salamandre Mostaganem se trouve sur l'ouest de l'Algérie, exactement dans la région de Mostaganem. Il est estimé une superficie de 1000 mètres carrés et se compose de 25 carrés. Ce site est exposé aux vents dominants, et il contient plusieurs formes de Pollution (urbaine, industrielle, physique, chimique). Le port de Salamandre exposé de nombreuses activités anthropiques, occupation humaine, agriculture, tourisme en période estivale et pêche.

1.3.2. Crique de Salamandre

Ce site est situé au Nord-Ouest de Mostaganem en face de complexe Sonique où se déversent les rejets d'eaux usées (industrielles, urbaines), est considérée comme l'une des plages les plus pittoresques de la région. La plage sous une forme de petite anse, se caractérise par des substrats rocheux. Ce site en termes de biodiversité est moins riche que les autres (Lakel et Zaoui, 2019). Elle est environ de 500 mètres et est bordée par des falaises rocheuses et des formations sédimentaires. La Crique de Salamandre est un habitat pour plusieurs espèces animales et végétales par exemple (poissons, crustacés, oiseaux et des plantes halophytes).

1.3.3. Sablette Est

Le site de Sablette est situé à environ 5 km à l'Ouest de la ville Mostaganem ; il abrite l'une des plages les plus fréquentées de la wilaya. Cette dernière est constituée de sables fins et occupe un environnement plus ou moins naturel, ce qui lui confère des atouts et un attrait touristiques indéniables. Plusieurs aménagements et équipements touristiques ont été installés au bord de la plage Est de Sablette, notamment des hôtels, des restaurants et les cafétérias. Ces derniers participent à la dynamique socio-économique locale, mais ils risquent d'engendrer des conséquences négatives sur

l'environnement côtiers et les écosystèmes marins, si les mesures compensatoires et préventives ne soient pas prises selon (Tableau 5).

Tableau 5: Coordonnées géographiques de plusieurs sites à Mostaganem (Salamandre, le Port de Salamandre, La Crique, Sablette).

| Les sites | Salamandre | Port de Salamandre | La crique de Salamandre | Sablette |
|-------------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| Les coordonnées géographiques | 35°55'N 0°03'E | 35.9462°N 0.1044°E | 35.5480°N 0.320°E | 35.9515°N 0.1093°E |

2. Méthodes de travail

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

Dans cette étude, nous avons choisis d'utiliser une approche diachronique à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). La cartographie de la *Posidonie* est faite sur la base des images satellitaires fournies par Google Earth Pro. Ces images donnent une aperçue globale de la zone d'étude de Salamandre sur une période de 17 ans sur quatre années différentes (2004, 2010, 2016 et 2023), afin de suivre l'évolution spatio-temporelle de la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* et du trait de côte de cette zone.

L'objectif final est de chercher à établir une relation entre l'éventuelle présence d'herbiers sous-marins et l'évolution du trait de côte, et par conséquent de mettre en évidence les services écosystémiques que peuvent fournir les herbiers sous-marins pour la protection des plages contre l'érosion côtière.

2.2. Représentation du logiciel Google Earth Pro

Google Earth Pro est un service de cartographie interactive récemment développés, qui repose sur des technologies informatiques spécifiques. Offrent une visualisation de l'ensemble de la surface du globe terrestre au moyen d'assemblage d'images satellitaires.

Les images satellitaires de Google Earth Pro ont été rendues en libre accès sur internet et sont devenues parmi les sources les plus exploitées dans le domaine de l'observation de la terre.

Google Earth Pro constitue une alternative moins coûteuse, qui propose des images de haute résolution. Il enrichit les études axées sur la surveillance et la cartographie globales pour divers sujets de recherche environnementales en particulier (Z. Li & Demir, 2024).

2.2.1. Avantages et inconvénients des images satellites fournies par Google Earth Pro

Selon Pergent-Martini(2015), Fontan (2011), (Y. Li et *al.*, 2023), les images satellites qui sont obtenues par le logiciel Google Earth Pro offrent plusieurs avantages pour surveiller les changements environnementaux dans les écosystèmes marins et côtiers en raison de leur résolution spatiale élevée, large couverture sur la surface de la terre ce qu'il permet d'obtenir des informations sur les zones difficilement accessibles, voire inaccessible.

Par contre, les images satellitaires de Google Earth Pro présentent certains inconvénients, dont on peut citer : erreur d'interprétation liée aux variations bathymétriques, nécessite des bonnes conditions météorologiques et hydrodynamique (absence de nuages, et de vent), limité par la profondeur (5 à 10 m).

2.3. Présentation de logiciel ArcGIS

ArcGIS est un ensemble de logiciels de Système d'Informations Géographiques (SIG), il offre aux utilisateurs la possibilité d'organiser, d'analyser et d'afficher des données géographique grâce à sa vaste collection d'outils et de fonctionnalités. Les utilisateurs peuvent enregistrer, sauvegarder, modifier, analyser et présenter des données géographiques à l'aide d'une grande variété de fonctions fournis par ArcGIS. Les données provenant de nombreuses sources, telles que l'imagerie satellite, la photographie aérienne, les données du système de positionnement global (GPS) et d'autres bases de données (Oyinna et *al.*, 2023).

Le logiciel ArcGIS généralement contient des applications permis eux :

- **ArcMap** : représente l'environnement de travail du logiciel ArcGIS, où l'on peut créer, gérer, analyser et afficher des données géographiques. ArcMap permet de travailler avec des cartes, des couches de données et d'effectuer diverses tâches d'analyse spatiale.
- **ArcCatalog** : est un autre composant de la suite ArcGis, qui fonctionne avec ArcMap. C'est un outil pour gérer, organiser et parcourir les données géographiques. Cette application permet aux utilisateurs d'explorer les données stockées dans différents formats, tels que les fichiers de formes, les géodatabases et les jeux de données raster. Les utilisateurs peuvent afficher les métadonnées, prévisualiser les données et organiser les fichiers dans des dossiers. Il s'agit d'un outil nécessaire dans SIG pour gérer leurs ressources de données spatiales.
- **ArcToolbox** : c'est une boîte à outils de géo-traitement et d'analyse spatial permettant d'analyser, de modifier, convertir des données et de production des cartes. Il s'agit d'une collection complète d'outils organisés en différents ensembles d'outils en fonction de leurs

fonctionnalités, permettant aux utilisateurs d'effectuer diverses tâches telles que l'analyse de tampon, l'interpolation spatiale et le traitement raster. Leur disponibilité est en trois niveaux : ArcView, ArcEditor, ArcInfo.

3. Partie expérimentale

3.1. Prélèvement et traitement des échantillons

Dans notre étude, nous avons adopté sur la côte de la plage la Crique (Salamandre). Ensuite, nous avons choisi trois sites différents, chaque un contient des propres coordonnées géographiques, et nous prenons 8 échantillons de sédiment de divers sites soit : dans la Plage Sous-marine (PM), ou dans le trait de côte (TC) ou bien dans la plage Aérienne (PA).

Les échantillons ont été prélevés le 05/06/2024 dans les bonnes conditions Climatiques et Météorologiques où la plage est calme par le Dr. A. Bougherira.

La plage de La Crique (Salamandre) :

Tableau6: Stations de prélèvements de la plage de la Crique (SALAMANDRE) (Levé de terrain et échantillonnage réalisé par BOUGHERIRA., 2024)

| Stations | X | Y | La date | Etat de la mer | Prélèvements | Matière organique | %CaCo3 |
|----------|--------|--------|------------|----------------|--------------|-------------------|--------|
| 1 | 0.0544 | 35.909 | 05/06/2024 | Calme | PM-1 | 1.6% | 55.22% |
| | | | | | TC-1 | 1.3% | 32.83% |
| | | | | | PA-1 | 1.3% | 38.80% |
| 2 | 0.0547 | 35.910 | 05/06/2024 | Calme | PM-2 | 1.6% | 38.80% |
| | | | | | TC-2 | 1.9% | 67.16% |
| 3 | 0.0543 | 35.912 | 05/06/2024 | Calme | PM-3 | 2% | 97.01% |
| | | | | | TC-3 | 1.7% | 70.15% |
| | | | | | PA-3 | 1.8% | 79.10% |

3.2. Identifications de quelques espèces marines rencontrées sur la plage de Salamandre



Figure 9: *Codium fragile* (Photographie : Bougherira., 2024)



Figure 10: *Gelidium pulchellum* (Photographie : Bougherira., 2024)



Figure 11: *Padina pavonica* (Photographie : Bougherira., 2024)



Figure 12: *Ulva rigida* (Photographie : Bougherira., 2024)



Figure 13: Zostère (Photographie : Bougherira., 2024)

4. Traitement des échantillons

4.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est une méthode traditionnelle importante pour évaluer la distribution de la taille des particules d'un matériau granulaire et d'étudier la répartition des différents grains d'un échantillon de sédiment, selon leur caractéristiques (poids, taille), par la méthode Tamisage.

4.1.1. Méthode d'analyse granulométrique

4.1.1.1. Matériels

En vue de mesurer le taux de refus cumulé de sédiments nous avons eu besoin du matériel et équipement suivants :

- Sédiments
- Récipients pour les mesures
- Etuve
- Des plateaux pour le séchage
- Balance électronique dont la précision de 0.01g
- Une brosse
- Tamiseuse
- Série de tamis est allant de 2 mm jusqu'à <math><0.05\text{ mm}</math>

4.1.1.2. Mode opératoire

- Mettre les 8 échantillons du sédiment dans des plateaux avec étiqueté selon les prélèvements (Figure 13).
- Séchage du sédiment à l'étuve (105°C) pendant 24h (Figure 14).
- Pesé 100 g de sédiment (pour chaque échantillon) à l'aide d'une balance électronique (Figure 15).
- Passer en tamisage (10 min) de tamis de dimension décroissante (constitué de haut en bas) (Figure 17).
- Après tamisage : on utilise une brosse en plastique passe sur les mailles du tamis pour récupérer quelques grains après on mesure le sédiment de chaque tamis à l'aide d'une balance électronique précise (0.01g).
- Evaluer le pourcentage des refus de chaque tamis.
- Tracer la courbe granulométrique sur un diagramme semi-logarithmique

- Calculer les indices granulométriques

-les calculs de la refus % : 100g de sédiment → 100%

$X \text{ (g)} \rightarrow X\%$



Figure 14: Préparation des échantillons de sédiments pour le séchage dans l'étuve à 105°C pendant 24 h.



Figure 15: Pesage de 100 g du sédiment à l'aide d'une balance électronique précision de 0.01g



Figure 16: Montage de la série de tamis (allant de 2 mm jusqu'à $<0.05\text{ mm}>$) sur une tamiseuse mécanique

4.2. Matière organique

Le but de ce travail est de déterminer le taux de la matière organique (MO) dans le sédiment marin, et pour le faire nous avons utilisé la méthode de perte au feu (Calcination). Dont le principe de la transformation de la matière organique en gaz carbonique (CO_2), et vapeurs à l'effet de hautes températures.

4.2.1. Méthode de détermination le taux de matière organique

4.2.1.1. Matériel

En vue de mesurer le taux de matière organique nous avons eu besoin du matériel et équipement suivants :

- Sédiment
- Etuve
- Creusets
- Four à moufle
- Balance électronique (0.01g)

4.2.1.2. Mode opératoire

- Mettre les 8 échantillons du sédiment à l'étuve (105°C) pendant 24h pour le séchage.
- On mesure le poids de chaque creuset et l'étiqueté selon l'échantillon.

- On pèse 10 g de sédiment du chaque échantillon à l'aide d'une balance électronique.
- Mettre les sédiments dans des creusets.
- On transmettre les creusets qui contient le sédiment dans le four à moufle (550°C) pendant 2h (Figure 19).
- Laisser refroidir le sédiment (Figure 20), (Figure 21).
- On pèse à nouveau les creusets pour noter et calculer le poids de la matière organique (MO).

-les calculs de Poids de la M.M (g) :

Poids de la M.M (g) = [Poids de creuset +sédiment (après calcination)] – [Poids de creusets (g)]

-les calculs de Taux de la M.O % :

PM-1 : 10g de sédiment → 100%

X(g) → T%



Figure 17: Calcination des échantillons de sédiments dans le four à moufle, (a) : Four à moufle, (b) Calcination du sédiment, (c) Sédiment calciné.

4.3. La Calcimétrie

La Calcimétrie permet de préciser la teneur en calcaire dans les sédiments. Par l'appareil de mesure la calcimètre de Bernard qui est permet de mesure le volume de CO₂ dégagé par action de l'acide chlorhydrique (HCL) sur le Carbonate de Calcium (CaCO₃) d'un échantillon. L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone (CO₂) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique en excès (dans des conditions de température et de pression atmosphérique connues) par un échantillon préparé pour l'essai. On mesure le volume de CO₂ dans un tube manométrique après attaque du sédiment après attaque de l'échantillon à (HCL) suivant la réaction suivante :



On utilise l'eau saturé en sel pour éviter la perte de CO₂ à partir leur réaction avec H₂O.

Le but de la calcimétrie est de Calculer le pourcentage de CaCO_3 dans les échantillons étudiés en comparaison avec un échantillon témoin de carbonate pur (100 % CaCO_3).

4.3.1. Méthode de déterminer le taux de la CaCO_3

4.3.1.1. Matériel

En vue de mesurer le taux des carbonates de calcium nous avons eu besoin du matériel et équipement suivants :

- Calcimètre de Bernard (Erlenmeyer + tube gradué + Ampoule de décompte)
- Etuve
- Mortier
- Sédiment sec est broyé
- Balance électronique
- Pince
- Pipette
- Solution saturé NaCl
- CaCO_3 pur
- Solution de HCL (30%)
- Verre de montre
- Fiole
- Cuvette

4.3.1.2. Mode opératoire

- Mettre les 8 échantillons du sédiment à l'étuve (105°C) pendant 24h pour le séchage.
- Préparer une solution saturée de NaCl (Figure 23).
- Remplir au même niveau le niveau de la solution saturé en NaCl de la colonne graduée et de l'ampoule du calcimètre
- Tarer la balance électronique, puis on pèse 0.3g de CaCO_3 pur (Figure 25)
- Place le CaCO_3 dans l'Erlenmeyer.
- A l'aide d'une pipette remplir (3/4) dans une cuvette par l'acide chlorhydrique (HCL), puis mettre en place dans l'Erlenmeyer avec une pince et avec précaution pour ne pas le verser sur l'échantillon.
- Fermer l'Erlenmeyer à l'aide d'un bouchon relié au tube gradué du calcimètre de Bernard et on note le volume V_1 avant la réaction.

- Modifier la hauteur de l'ampoule de manière à ce que le liquide soit au même niveau dans l'ampoule et le tube gradué
- Renverser la cuvette contenant l'acide sur l'échantillon.
- Agiter de temps en temps l'Erlenmeyer pour activer la réaction
- Noter le volume V_2 sur la colonne graduée, à la fin de l'effervescence (fin de réaction).
- La différence des volumes $V_2 - V_1$ correspond au volume de CO_2 dégagé.
- Et nous répétons ce processus pour les 17 échantillons pour déterminer le taux de calcaire dans chaque sédiment.

-les calculs de $V(\text{CaCO}_3)$ pure ml :

$$V_1 = 3 \text{ ml}$$

$$V_2 = 70 \text{ ml}$$

$$V_t = 70 - 3 = \mathbf{67 \text{ ml}}$$

-les calculs de $V_{\text{CO}_2}(\text{CaCO}_3)$ ml :

- $V_{\text{CO}_2}(\text{CaCO}_3) \text{ ml} = V_2 - V_1.$



Figure 18: Broyage du sédiment



Figure 19: Préparation de solution de NaCl

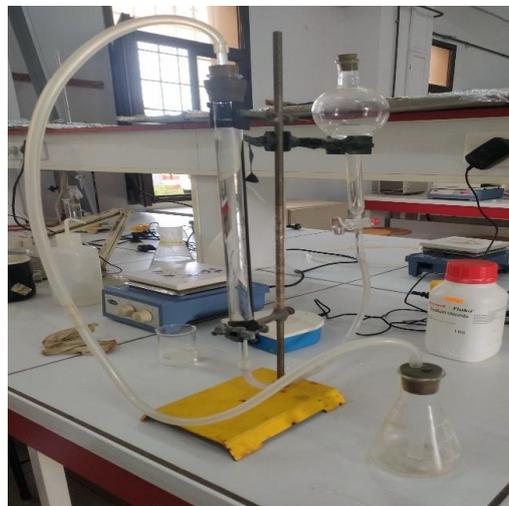


Figure 20: Calcimètre de Bernard



Figure 21: Pesage de 0.3 g du sédiment



Figure 22: Insertion de l'échantillon dans l'Erlenmeyer

5. Protocole de suivi cartographique

5.1. Collecte et préparation de données

Cette étude est basée sur l'évolution spatio-temporelle de la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* et la relation que pourrait y avoir avec le trait de côte, en utilisant une approche basée sur le système d'information géographique (SIG). Dans le cadre de ce mémoire, nous avons utilisé les images satellitaires obtenues de Google Earth Pro, ensuite nous les avons transférés sur ArcMap afin de les géoréférencer et les préparer pour le traitement. Nous avons donc acquis quatre images satellitaires, couvrant la zone du Port de Salamandre à l'est jusqu'à la plage est de la Sablette, correspondent à quatre années, avec des intervalles de temps plus moins égaux (≈ 6 ans : 2004, 2010, 2016, 2023) (Tableau 7).

Le choix des dates répond à plusieurs critères afin d'obtenir des images satellitaires de bonne qualité, notamment : l'absence de nuage, conditions climatiques et hydrodynamiques favorables, la netteté de l'image, la résolution spatiale et temporelle des images.

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

| Données | Date | Résolution spatiale (m) | Source |
|--------------------|------------|-------------------------|------------------|
| Image satellitaire | 02/09/2004 | 0.75 | Google Earth Pro |
| Image satellitaire | 30/07/2010 | 0.7 | Google Earth Pro |
| Image satellitaire | 04/09/2016 | 0.7 | Google Earth Pro |
| Image satellitaire | 16/06/2023 | 0.7 | Google Earth Pro |

L'acquisition des images satellitaire à partir de Google earth pro passe par plusieurs étapes, que l'on peut décliner comme suit :

Ajustez la prise de vue à une altitude de 1 km de la zone d'étude.

Une fois la zone d'étude localisée, créez quatre points de repère aux coins de la zone. Ces points serviront des points de géoréférencement lors de l'importation des images dans ArcMap.

Après avoir défini les points de repère, téléchargez l'image satellite de la zone avec la meilleure résolution disponible sur Google Earth Pro. Assurez-vous que la résolution est de 8192×5340 pixels pour une qualité maximale.

Enregistrez les points de repère créés au format KML (Keyhole Markup Language). Ensuite, importez ces fichiers KML dans ArcMap et convertissez-les en fichiers de forme (Shapefile) pour utiliser comme point de géoréférencement.

Répéter l'opération sur l'ensemble de la zone d'étude jusqu'à obtention d'une couverture complète.

5.2. Prétraitement des images satellitaires

5.2.1. Géoréférencement des images

L'étape suivante est l'importation des images satellites dans le logiciel ArcMap pour le géoréférencement.

Le géoréférencement est une procédure qui permettant de positionner une image capter à l'aide de ses coordonnées géographiques. C'est-à-dire déterminer les emplacements sur la terre. Le système de coordonnées géographiques qui utilisée pour cette étude est : WGS (world geodetic system) 1984 UTM (Universal Transverse Mercator), zone 31N.

On cliquer sur le bouton de Géoréférencing pour géoréférencer l'image satellite (Figure 23).

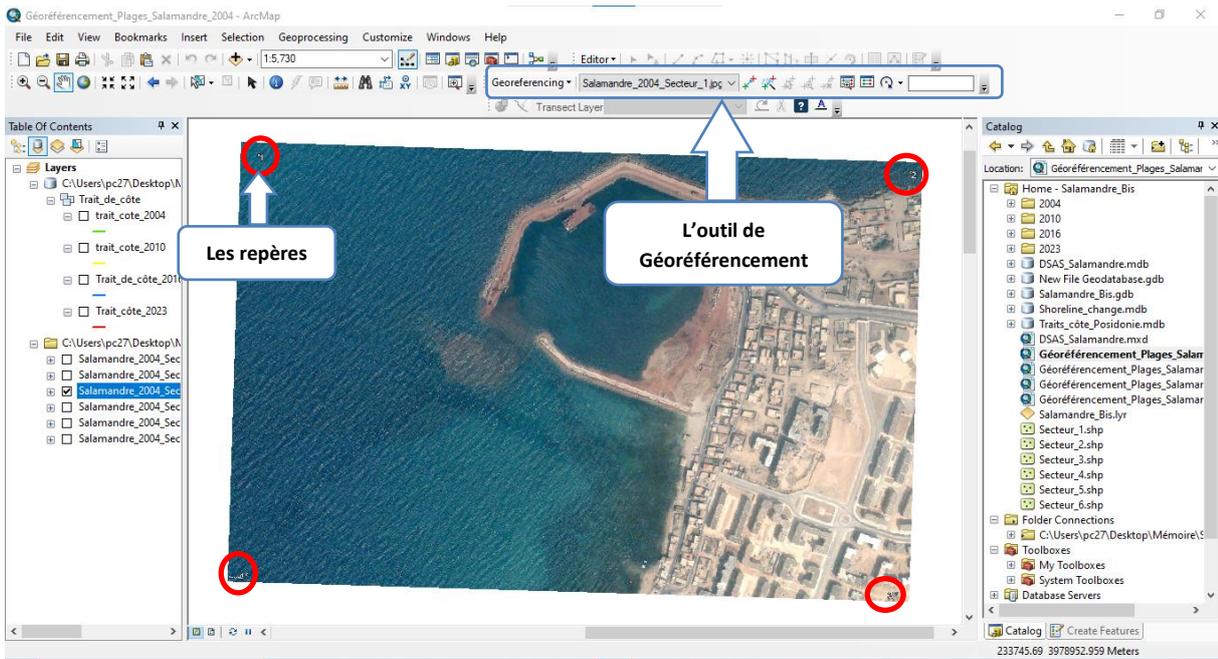


Figure 23: Géoréférencement de l'image satellitaire sur ArcMap.

Après le géoréférencement de tous les 6 secteurs dans les différentes dates, on obtient un assemblage d'images qui couvrent la zone d'étude (Figure 24).

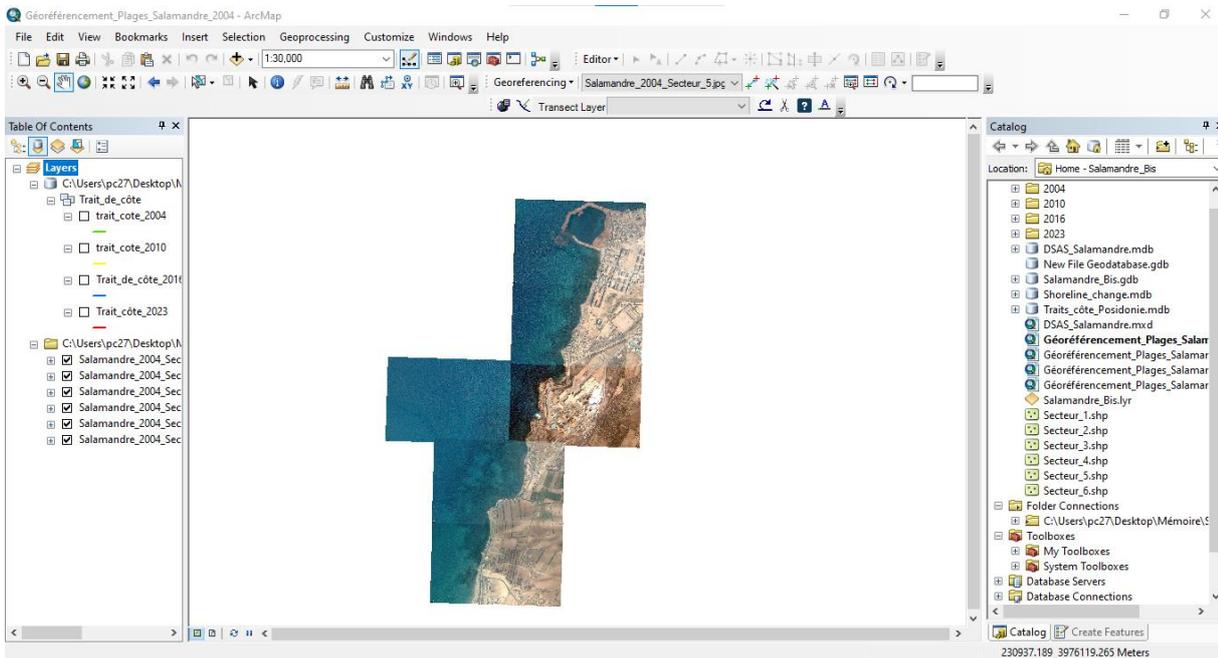


Figure 24: Photo de géoréférencement de la zone d'étude en 2004.

5.3. Analyse des données dans le SIG

5.3.1. Numérisation

La numérisation est la transformation de l'information visuelle raster en format numérique vecteur.

Au début, nous avons commencé la numérisation de trait de côte le long de la zone d'étude « Salamandre » sur la base des images satellites géoréférencées, selon le système de coordonnées géographiques WGS 1984, la zone 31N par une ligne « Line features » qui expose des points à une profondeur de 10 mètre (Figure 25).

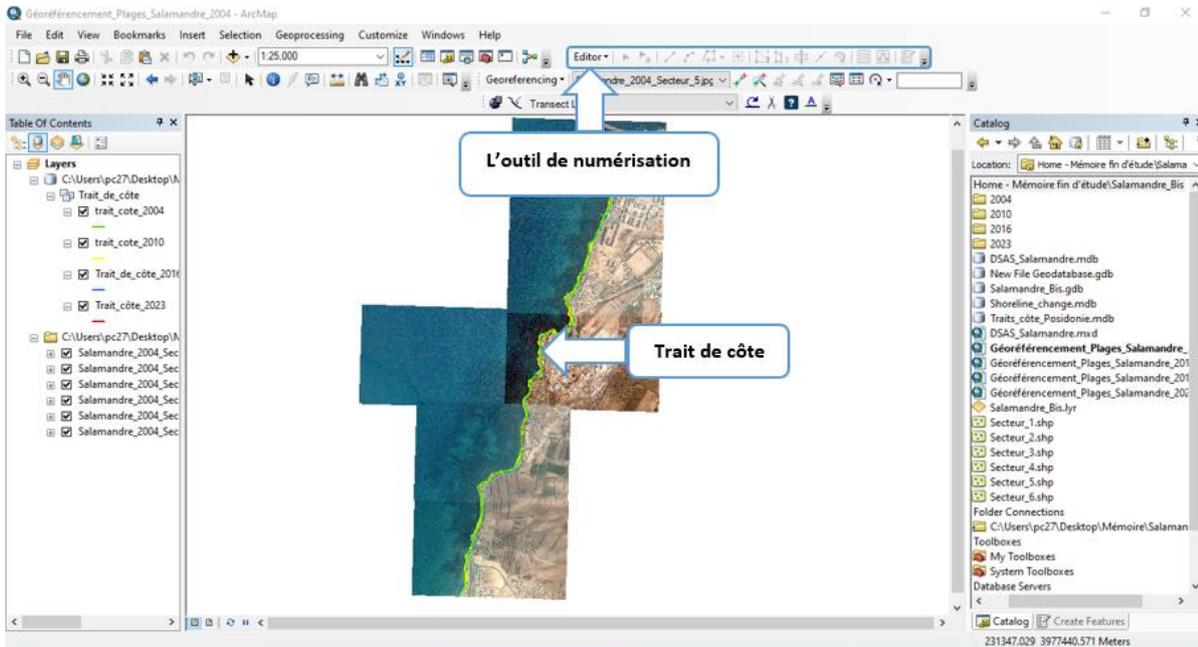


Figure 25: Numérisation de trait de côte de la zone de salamandre

Ensuite, nous avons passé à la numérisation de la surface potentiellement occupées par l'herbier à *Posidonia oceanica* par des entités géométriques appelées polygone, par la technique de photo-interprétation (taches foncées noir) selon (Figure 26).

Ensuite, on fait la numérisation de la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* par la numérisation de l'espace dégradé de l'herbier à *Posidonia oceanica* (selon la couleur vert) sans oublier la numérisation de l'espace blanc qui concerne le substrat meuble (l'espace qui est vide de l'herbier).

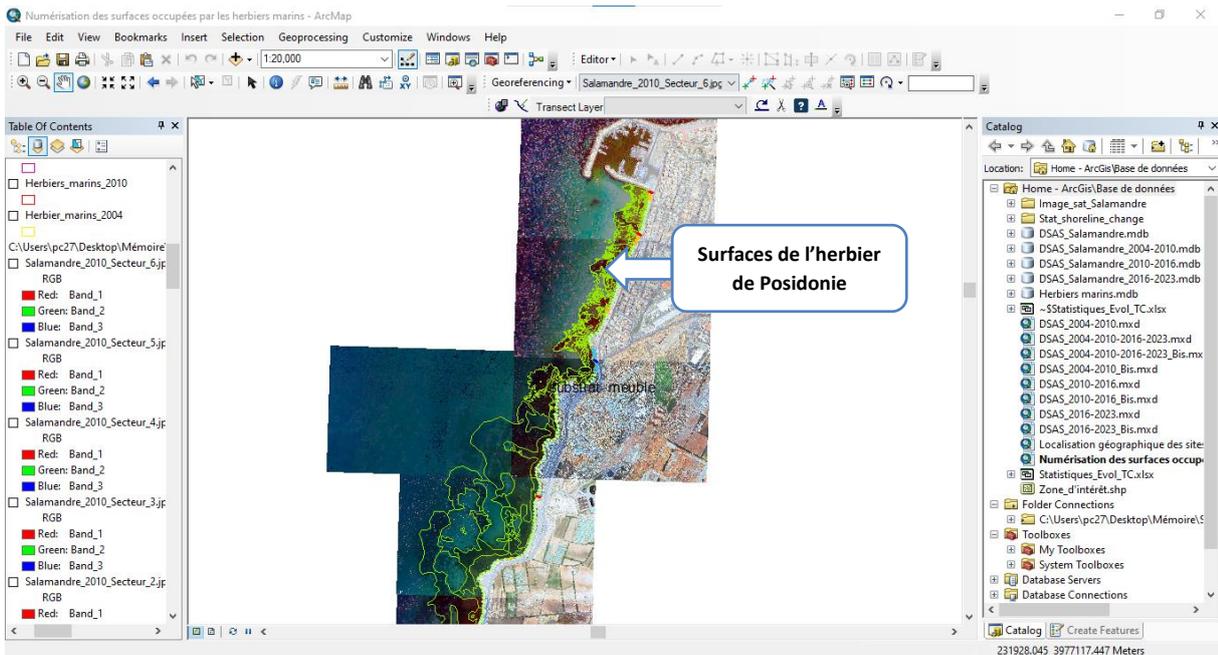


Figure 26: Numérisation des surfaces occupées par l'herbier de Posidonie

5.3.2. Analyse spatio-temporelle du trait de côte et de la limite supérieure des herbiers à *Posidonia oceanica*

L'analyse spatio-temporelle de la limite supérieure de l'herbier de *Posidonie* implique l'étude de l'évolution de cette limite dans l'espace et dans le temps. Dans cette analyse nous inspirons des travaux réalisés par Bougherira *et al.*, (2020) sur l'évolution et la dynamique du trait de côte. Pour cela, nous avons installons l'outil Digital Shoreline Analysis System (DSAS) qui est couplé avec le logiciel de SIG (ArcGIS). Au début, on créer une géodatabase personnelle et on enregistrer le dossier de Base de données, et nous avons importés les quatre limites supérieures qui doivent être combinées à un trait de côte et on le déposé dans le (DSAS). Donc, nous avons calculer des statistiques de taux de changement pour une série chronologique de données vectorielles du littoral veut dire calculer les statistiques sur l'avancé, la stabilité et le recul de la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* (Figure27).

Pour gérer ces opérations, il nécessite de créer une ligne de base cette ligne est créer parallèlement au trait de côte de la zone de Salamandre par l'outil DSAS pour un but de créer des transects perpendiculaires de longueur 500m et de distances de séparations entre les transects de 20m.

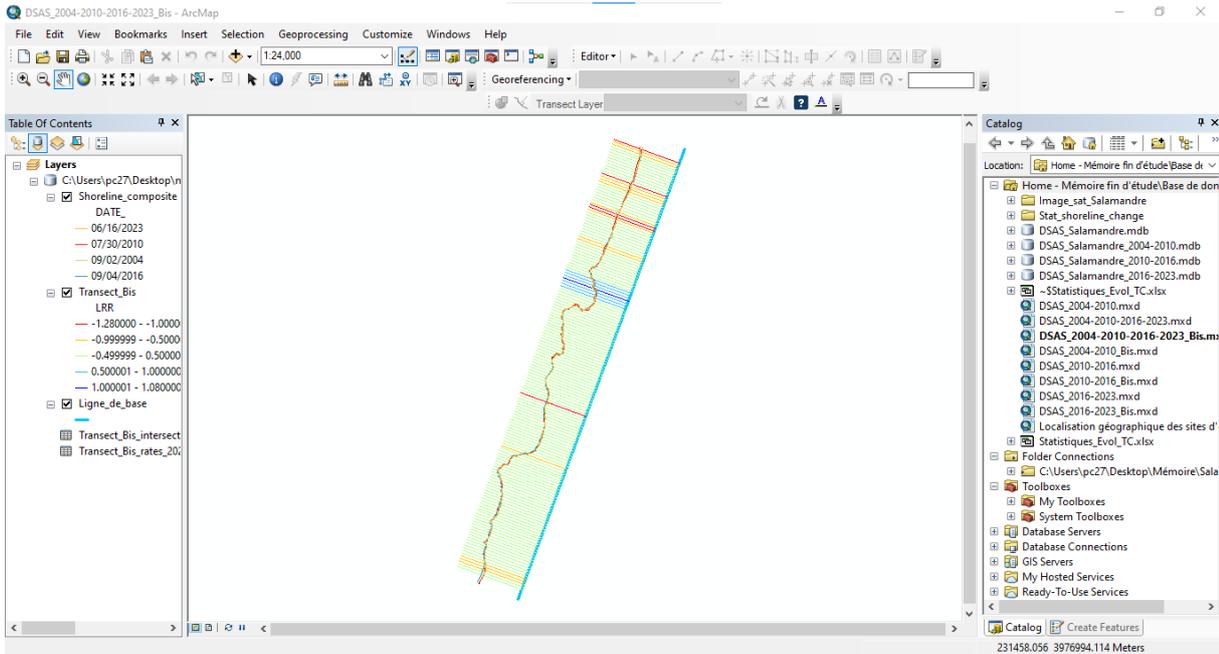


Figure 27: Importation des trois limites supérieures en vue de leur suivi par l'extension DSAS.

Chapitre III : Résultat et Discussion

1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique des sédiments a pour un but de connaître la répartition quantitative de certains échantillons de différents sites de prélèvements (la plage aérienne, la plage sous-marine, et de trait de côte), et déterminer la distribution dimensionnelle des grains, selon les tableaux suivants :

1.1. La plage de La Crique : Salamandre

1.1.1. Station 1

1.1.1.1. Prélèvement : PM-1

L'analyse granulométrique des sédiments de la plage « La Crique : Salamandre ». Le sédiment prélevé est homogène pour l'échantillon de la plage La Crique : Salamandre « Station 1 : PM-1 » qui correspondent le sédiment de la plage sous-marine. La fraction dominante est 0.2 mm (51.08%) et 0.1 mm (47.68%), et des traces sur les autres fractions : 2, 1, 0.08, 0.05.

Tableau 8: Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 1- prélèvement : PM-1

| Prélèvement | Diamètre Tamis (mm) | Refus (g) | Refus % | Refus Cumulé % |
|-------------|---------------------|-----------|---------|----------------|
| PM-1 | 2 | 0.55 | 0.55% | 99.96% |
| | 1 | 0.30 | 0.30% | 99.41% |
| | 0.2 | 51.08 | 51.08% | 99.11% |
| | 0.1 | 47.68 | 47.68% | 48.03% |
| | 0.08 | 0.28 | 0.28% | 0.35% |
| | 0.05 | 0.07 | 0.07% | 0.07% |
| | <0.05 | 0 | 0% | 0% |

1.1.1.2. Prélèvement : TC-1

L'analyse granulométrique des sédiments de la plage « La Crique : Salamandre ». Le sédiment prélevé est homogène pour l'échantillon de la plage La Crique : Salamandre « Station 1 : TC-1 » qui correspondent le sédiment de la plage trait de côte. La fraction dominante est 0.2 mm (51.12%) et 0.1 mm (48.55%), et des traces sur les autres fractions : 2, 1, 0.08, 0.05.

Tableau 9: Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : station 1- prélèvement : TC-1

| Prélèvement | Diamètre Tamis (mm) | Refus (g) | Refus % | Refus Cumulé % |
|-------------|---------------------|-----------|---------|----------------|
| | 2 | 0.10 | 0.10% | 100% |
| | 1 | 0.05 | 0.05% | 99.90% |
| | 0.2 | 51.12 | 51.12% | 99.85% |

| | | | | |
|------|-------|-------|--------|--------|
| TC-1 | 0.1 | 48.55 | 48.55% | 48.73% |
| | 0.08 | 0.17 | 0.17% | 0.18% |
| | 0.05 | 0.01 | 0.01% | 0.01% |
| | <0.05 | 0 | 0% | 0% |

1.1.1.3.Prélèvement : PA-1

L'analyse granulométrique des sédiments de la plage « La Crique : Salamandre ». Le sédiment prélevé est homogène pour l'échantillon de la plage La Crique : Salamandre « Station 1 : PA-1 » qui correspondent le sédiment de la plage Aérienne. La fraction dominante est 0.2 mm (66.38%) et 0.1 mm (33.23%), et des traces sur les autres fractions : 2, 1, 0.08, 0.05.

Tableau 10: Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 1- prélèvement : PA-1

| Prélèvement | Diamètre Tamis (mm) | Refus (g) | Refus % | Refus Cumulé % |
|-------------|---------------------|-----------|---------|----------------|
| PA-1 | 2 | 0.10 | 0.10% | 100% |
| | 1 | 0.09 | 0.09% | 99.90% |
| | 0.2 | 66.38 | 66.38% | 99.81% |
| | 0.1 | 33.23 | 33.23% | 33.43% |
| | 0.08 | 0.15 | 0.15% | 0.2% |
| | 0.05 | 0.05 | 0.05% | 0.05% |
| | <0.05 | 0 | 0% | 0% |

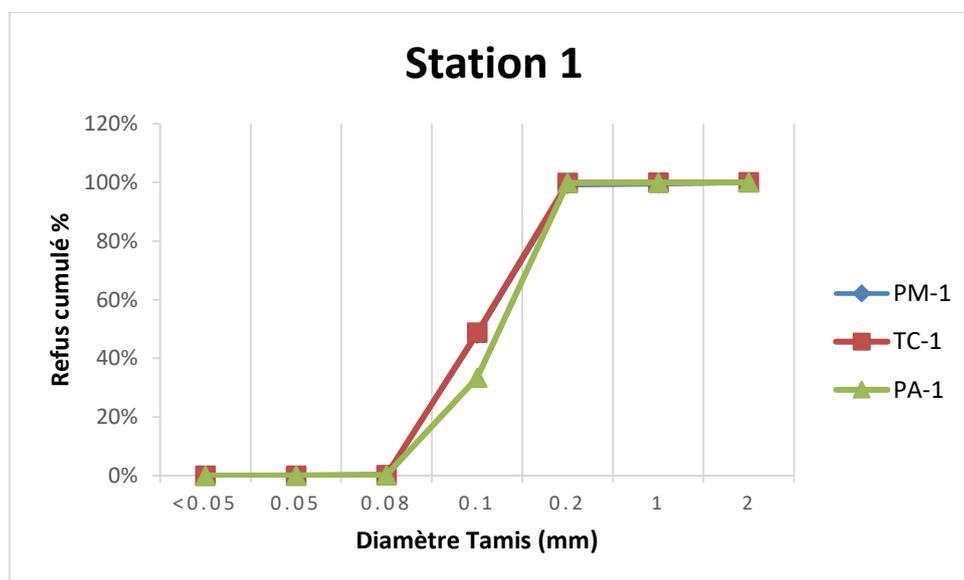


Figure 28: Courbe granulométrique du sédiment prélevé au niveau de la plage la Crique : Salamandre : station 1

1.1.2. Station 2

1.1.2.1.Prélèvement : PM-2

L'analyse granulométrique des sédiments de la plage « La Crique : Salamandre ». Le sédiment prélevé est homogène pour l'échantillon de la plage La Crique : Salamandre « Station 2 : PM-2 » qui correspondent le sédiment de la plage sous-marine. La fraction dominante est 0.2 mm (73.78%) et 0.1 mm (23.90%) 2 mm (1.43%) et des traces sur les autres fractions : 1, 0.08, 0.05.

Tableau 11 : Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 2- prélèvement : PM-2

| Prélèvement | Diamètre Tamis (mm) | Refus (g) | Refus % | Refus Cumulé % |
|-------------|---------------------|-----------|---------|----------------|
| PM-2 | 2 | 1.43 | 1.43% | 99.93% |
| | 1 | 0.77 | 0.77% | 98.50% |
| | 0.2 | 73.78 | 73.78% | 97.73% |
| | 0.1 | 23.90 | 23.90% | 23.95% |
| | 0.08 | 0.04 | 0.04% | 0.05% |
| | 0.05 | 0.01 | 0.01% | 0.01% |
| | <0.05 | 0 | 0% | 0% |

1.1.2.2.Prélèvement : TC-2

L'analyse granulométrique des sédiments de la plage « La Crique : Salamandre ». Le sédiment prélevé est homogène pour l'échantillon de la plage La Crique : Salamandre « Station 2 : TC-2 » qui correspondent le sédiment de la plage trait de côte. La fraction dominante est 0.2 mm (94.13%) et 0.1 mm (5.30%), et des traces sur les autres fractions : 2 mm, 1 mm.

Tableau 12: Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 2- prélèvement : TC-2

| Prélèvement | Diamètre Tamis (mm) | Refus (g) | Refus % | Refus Cumulé % |
|-------------|---------------------|-----------|---------|----------------|
| TC-2 | 2 | 0.44 | 0.44% | 99.98% |
| | 1 | 0.11 | 0.11% | 99.54% |
| | 0.2 | 94.13 | 94.13% | 99.43% |
| | 0.1 | 5.30 | 5.30% | 5.30% |
| | 0.08 | 0 | 0% | 0% |
| | 0.05 | 0 | 0% | 0% |
| | <0.05 | 0 | 0% | 0% |

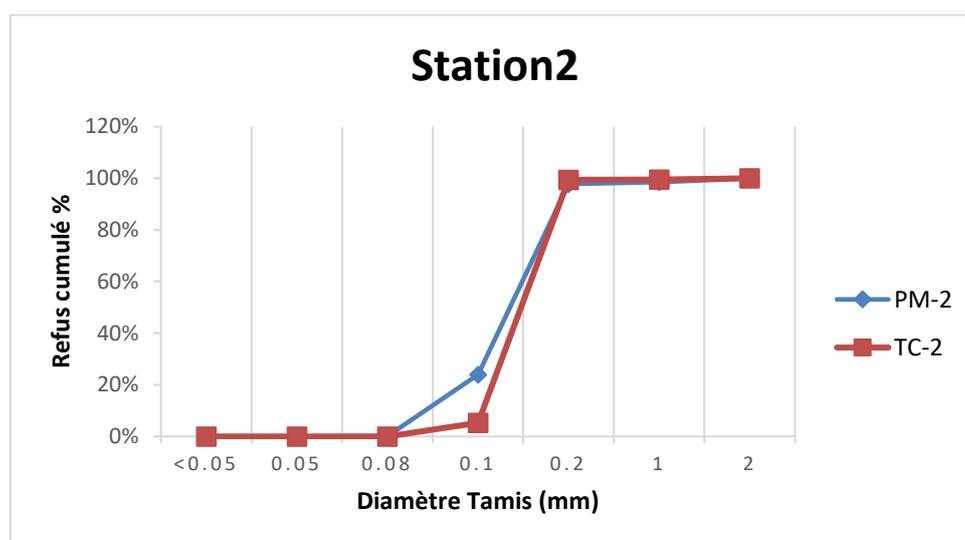


Figure 29: Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 2

1.1.3. Station 3

1.1.3.1. Prélèvement : PM-3

L'analyse granulométrique des sédiments de la plage « La Crique : Salamandre ». Le sédiment prélevé est homogène pour l'échantillon de la plage La Crique : Salamandre « Station 3 : PM-3 » qui correspondent le sédiment de la plage sous-marine. La fraction dominante est 0.2 mm (52.27%) et 1 mm (23.94%) et 2 mm (22.47%) et 1 mm (1.12%), et des traces sur les autres fractions : 0.08, 0.05.

Tableau 13: Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 3- prélèvement : PM-3

| Prélèvement | Diamètre Tamis (mm) | Refus (g) | Refus % | Refus Cumulé % |
|-------------|---------------------|-----------|---------|----------------|
| PM-3 | 2 | 22.47 | 22.47% | 99.85% |
| | 1 | 23.94 | 23.94% | 77.38% |
| | 0.2 | 52.27 | 52.27% | 53.44% |
| | 0.1 | 1.12 | 1.12% | 1.17% |
| | 0.08 | 0.04 | 0.04% | 0.05% |
| | 0.05 | 0.01 | 0.01% | 0.01% |
| | <0.05 | 0 | 0% | 0% |

1.1.3.2. Prélèvement : TC-3

L'analyse granulométrique des sédiments de la plage « La Crique : Salamandre ». Le sédiment prélevé est homogène pour l'échantillon de la plage La Crique : Salamandre « Station 3 : TC-3 » qui

correspondent le sédiment de la plage trait de côte. La fraction dominante est 0.2 mm (86.96%) et 0.1 mm (11.85%), et des traces sur les autres fractions : 2, 1, 0.08, 0.05.

Tableau 14: Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 3- prélèvement : TC-3

| Prélèvement | Diamètre Tamis (mm) | Refus (g) | Refus % | Refus Cumulé % |
|-------------|---------------------|-----------|---------|----------------|
| TC-3 | 2 | 0.14 | 0.14% | 99.96% |
| | 1 | 0.96 | 0.96% | 99.82% |
| | 0.2 | 86.96 | 86.96% | 98.86% |
| | 0.1 | 11.85 | 11.85% | 11.90% |
| | 0.08 | 0.03 | 0.03% | 0.05% |
| | 0.05 | 0.02 | 0.02% | 0.02% |
| | <0.05 | 0 | 0% | 0% |

1.1.3.3.Prélèvement : PA-3

L'analyse granulométrique des sédiments de la plage « La Crique : Salamandre ». Le sédiment prélevé est homogène pour l'échantillon de la plage La Crique : Salamandre « Station 3 : PA-3 » qui correspondent le sédiment de la plage Aérienne. La fraction dominante est 0.2 mm (89.77%) et 0.1 mm (6.16%) et 2 mm (2.05%) et 1 mm (1.93%), et des traces sur les autres fractions : 0.08, 0.05.

Tableau 15: Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 3- prélèvement : PA-3

| Prélèvement | Diamètre Tamis (mm) | Refus (g) | Refus % | Refus Cumulé % |
|-------------|---------------------|-----------|---------|----------------|
| PA-3 | 2 | 2.05 | 2.05% | 100% |
| | 1 | 1.93 | 1.93% | 97.95% |
| | 0.2 | 89.77 | 89.77% | 96.02% |
| | 0.1 | 6.16 | 6.16% | 6.25% |
| | 0.08 | 0.06 | 0.06% | 0.09% |
| | 0.05 | 0.03 | 0.03% | 0.03% |
| | <0.05 | 0 | 0% | 0% |

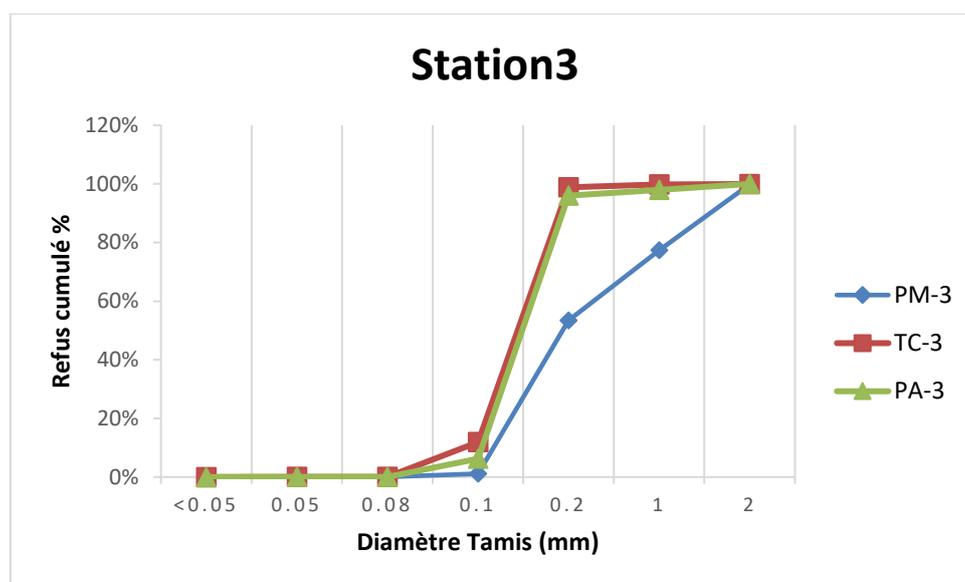


Figure 30:Taux de refus pour chaque Tamis de la plage la Crique : Salamandre : station 3

2. Matière organique

2.1.La plage de La Crique : Salamandre

La quantité de taux de matières organiques dans tous les échantillons de la plage de « La Crique : Salamandre » est varié entre 1.3% et 2% de matière organique. Les chiffres enregistrés correspondent à une faible quantité.

Tableau 16: Taux de matière organique de la plage la Crique : Salamandre (station 1,2,3)

| Station | Prélèvement | N° Du Creuset | Creusets (g) | Sédiment (g) | Creuset+ sédiment (g) | Creuset +sédiment (après calcination) (g) | Poids M.M (g) | Poids s M.O (g) | Taux M.O % | Teneur M.O |
|---------|-------------|---------------|--------------|--------------|-----------------------|---|---------------|-----------------|------------|------------|
| 1 | PM-1 | 10 | 35.02 | 10 | 45.02 | 44.86 | 9.84 | 0.16 | 1.6 % | Faible |
| | TC-1 | 11 | 36.43 | 10 | 46.43 | 46.30 | 9.87 | 0.13 | 1.3 % | Faible |
| | PA-1 | 12 | 31.49 | 10 | 41.49 | 41.36 | 9.87 | 0.13 | 1.3 % | Faible |
| 2 | PM-2 | 13 | 33.16 | 10 | 43.16 | 43.00 | 9.84 | 0.16 | 1.6 % | Faible |
| | TC-2 | 15 | 33.07 | 10 | 43.07 | 42.88 | 9.81 | 0.19 | 1.9 % | Faible |
| 3 | PM-3 | 18 | 34.96 | 10 | 44.96 | 44.77 | 9.80 | 0.2 | 2% % | Faible |
| | TC-3 | 19 | 34.05 | 10 | 44.05 | 43.88 | 9.83 | 0.17 | 1.7 % | Faible |
| | PA-3 | 20 | 31.66 | 10 | 41.66 | 41.48 | 9.82 | 0.18 | 1.8 % | Faible |

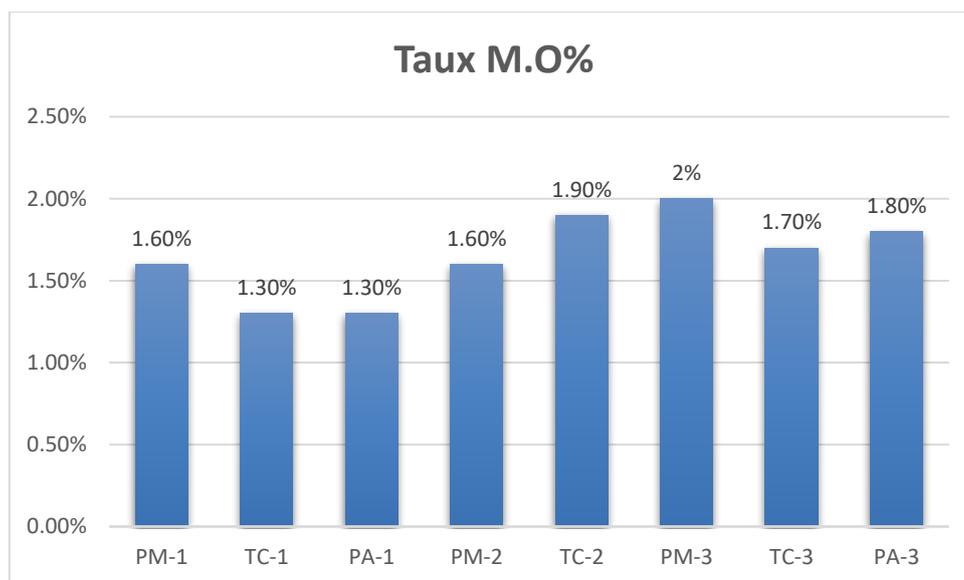


Figure 31: Taux de matière organique de la plage la Crique : Salamandre (station 1,2,3)

3. Calcimétrie

3.1. La plage de la Crique : Salamandre

3.1.1. Station 1

La réaction de l'acide chlorhydrique sur tous les échantillons de la plage de la crique : Salamandre « station 1 » est positive. Le volume de CO₂ dégagé varie entre 22 ml et 37 ml, équivalent à 32.83% et 55.22% de carbonates. Les chiffres enregistrés correspondent à forte effervescence et par conséquent à un taux de carbonate entre moyenne et faible.

Tableau 17: Taux de carbonates dans le sédiment (plage la Crique : Salamandre) : station 1

| Prélèvements | V1 ml | V2 ml | Vco2(caco3) ml | Taux (caco3) % | Description |
|--------------|-------|-------|----------------|----------------|----------------------|
| PM-1 | 3 | 40 | 37 | 55.22 | Moyenne carbonaté |
| TC-1 | 4 | 26 | 22 | 32.83 | Faiblement carbonaté |
| PA-1 | 4 | 30 | 26 | 38.80 | Faiblement carbonaté |

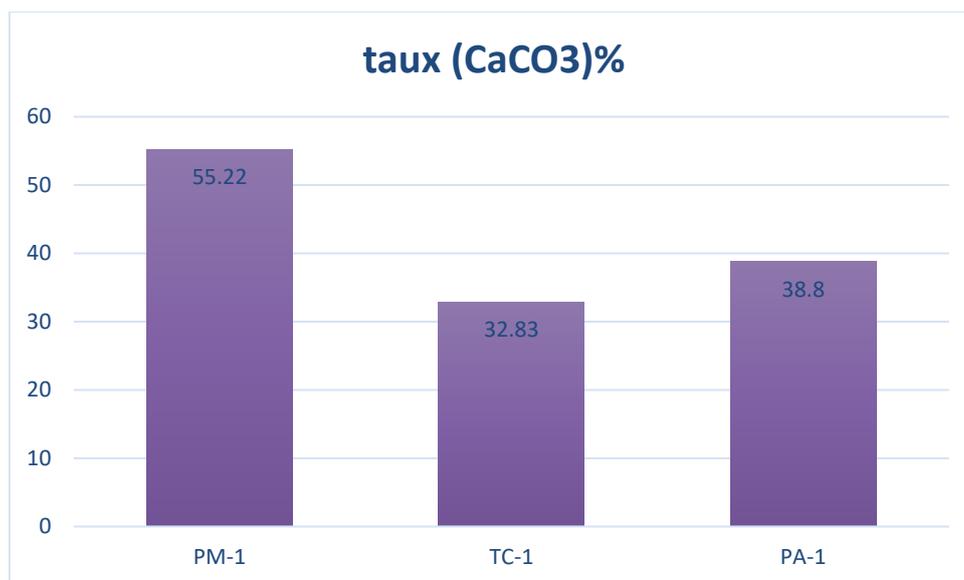


Figure 32: Taux de carbonates dans le sédiment (plage la Crique : Salamandre) : station 1

3.1.2. Station 2

La réaction de l'acide chlorhydrique sur tous les échantillons de la plage de la crique : Salamandre « station 2 » est positive. Le volume de CO₂ dégagé varie entre 26 ml et 45 ml, équivalent à 38.80% et 67.16% de carbonates. Les chiffres enregistrés correspondent à forte effervescence et par conséquent à un taux de carbonate entre forte et faible.

Tableau 18: Taux de carbonates dans le sédiment (plage la Crique : Salamandre) : station 2

| Prélèvements | V1 ml | V2 ml | Vco2(caco3) ml | Taux (caco3) % | Description |
|--------------|-------|-------|----------------|----------------|----------------------|
| PM-2 | 4 | 30 | 26 | 38.80 | Faiblement carbonaté |
| TC-2 | 4 | 49 | 45 | 67.16 | Fortement carbonaté |

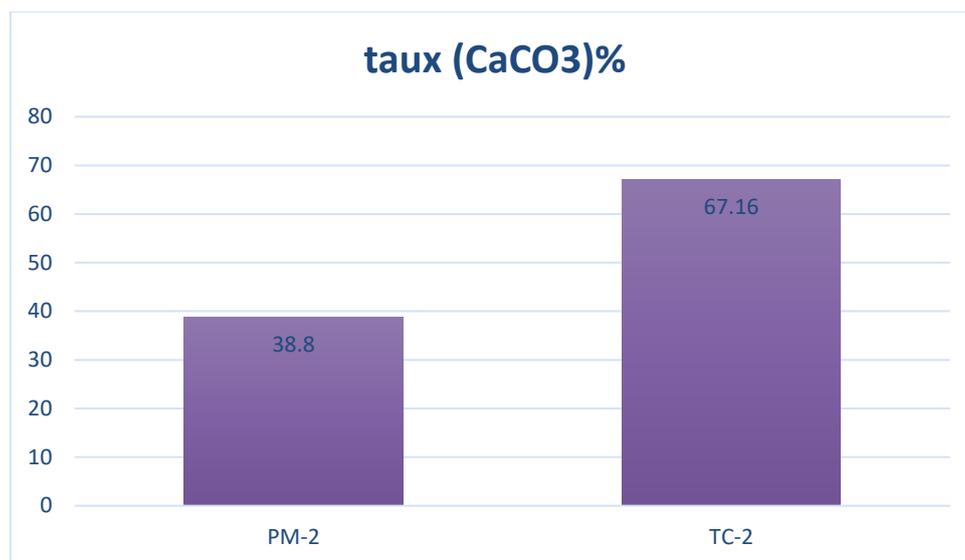


Figure 33: Taux de carbonates dans le sédiment (plage la Crique : Salamandre) : station 2

3.1.3. Station 3

La réaction de l'acide chlorhydrique sur tous les échantillons de la plage de la crique : Salamandre « station 3 » est positive. Le volume de CO₂ dégagé varie entre 47 ml et 65 ml, équivalent à 70.15% et 97.01% de carbonates. Les chiffres enregistrés correspondent à une très fortement carbonaté et par conséquent à un taux de carbonate élevé.

Tableau 19: Taux de carbonates dans le sédiment (plage la Crique : Salamandre) : station 3

| Prélèvements | V1 ml | V2 ml | Vco2(caco3) ml | Taux (caco3) % | Description |
|--------------|-------|-------|----------------|----------------|--------------------------|
| PM-3 | 3 | 68 | 65 | 97.01 | Très fortement carbonaté |
| TC-3 | 4 | 51 | 47 | 70.15 | Fortement carbonaté |
| PA-3 | 4 | 57 | 53 | 79.10 | Fortement carbonaté |

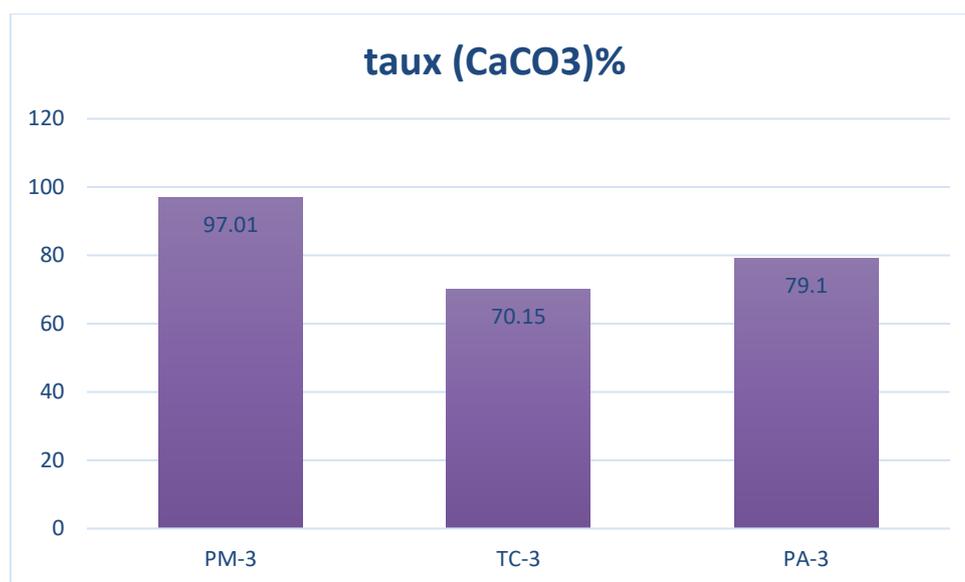


Figure 34: Taux de carbonates dans le sédiment (plage la Crique : Salamandre) : station 3

4. Analyse cartographique de l'évolution spatio-temporelle des herbiers de *Posidonia*

La cartographie spatio-temporelle des herbiers de la *Posidonia* le long de plusieurs plages à Mostaganem (Salamandre, La Crique, Sablette) a été réalisée dans le cadre de ce mémoire. Nous nous sommes concentrés sur la limite supérieure de ces herbiers marins, plus précisément leur évolution entre le trait de côte (entre 0m et 10m) de profondeur.

Les images satellitaires fournissent des données essentielles pour la gestion durable des herbiers marins en permettant une surveillance continue, à large échelle et à moindre coût. Ils sont réponsus 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. L'analyse par photo-interprétation des imageries satellitaires, nous ont permis d'observer dans la tranche d'eau les différentes taches parmi lesquelles on peut distinguer l'herbier dans autres habitats benthiques.

Quatre cartes ont été réalisées selon 4 périodes : Septembre 2004 (Figure35), Juillet 2010 (Figure 36), Septembre 2016 (Figure37), Juin 2023 (Figure38), afin d'approcher la dynamique évolutive de la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* et du trait de côte le long de plusieurs plages. Ces cartes présentent également les différentes typologies des habitats marins (Herbier de *Posidonia*, Herbier dégradé et autre).

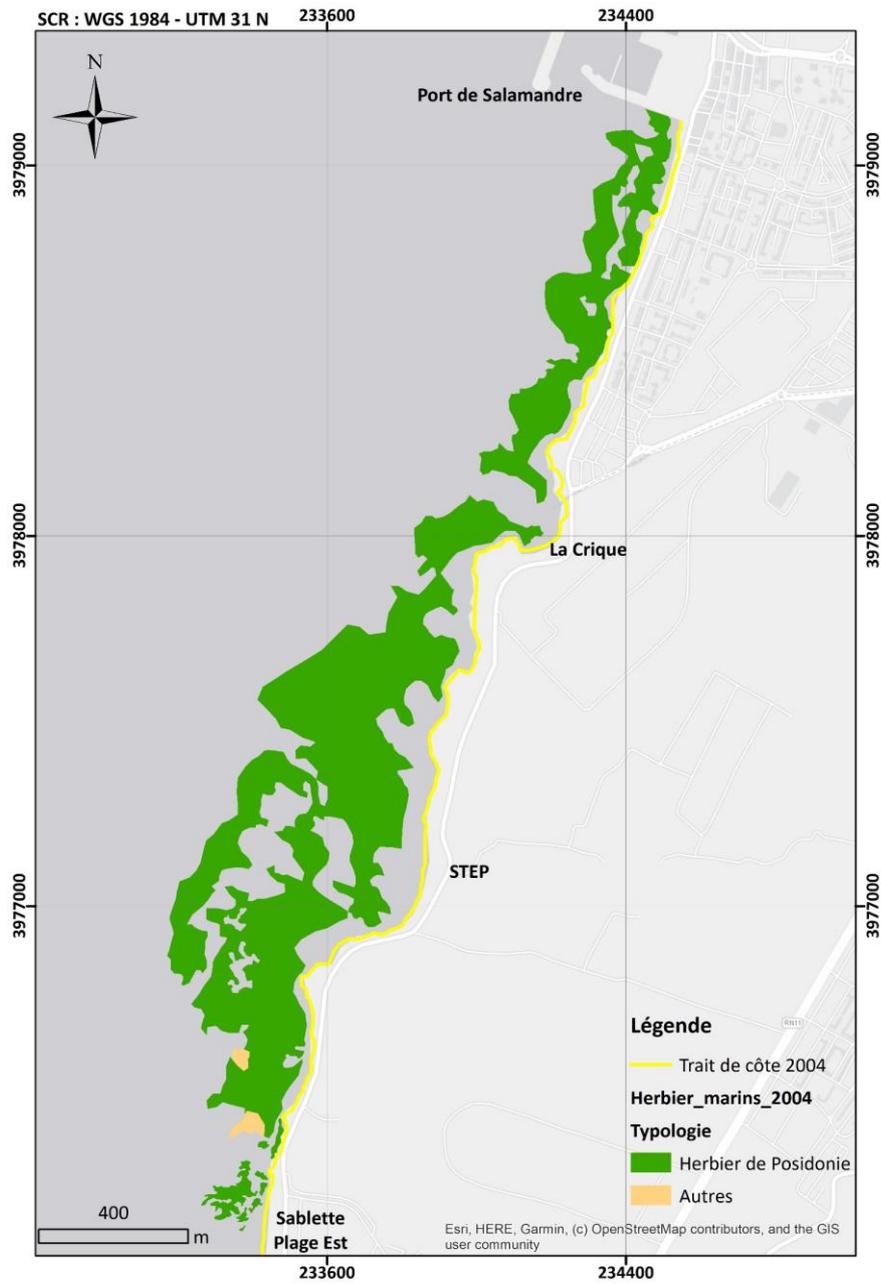


Figure 35: Cartographie des surfaces potentiellement occupées par les herbiers de *Posidonie* au-devant de plusieurs plages : Port de Salamandre, La Crique, Sablette Est (2004)

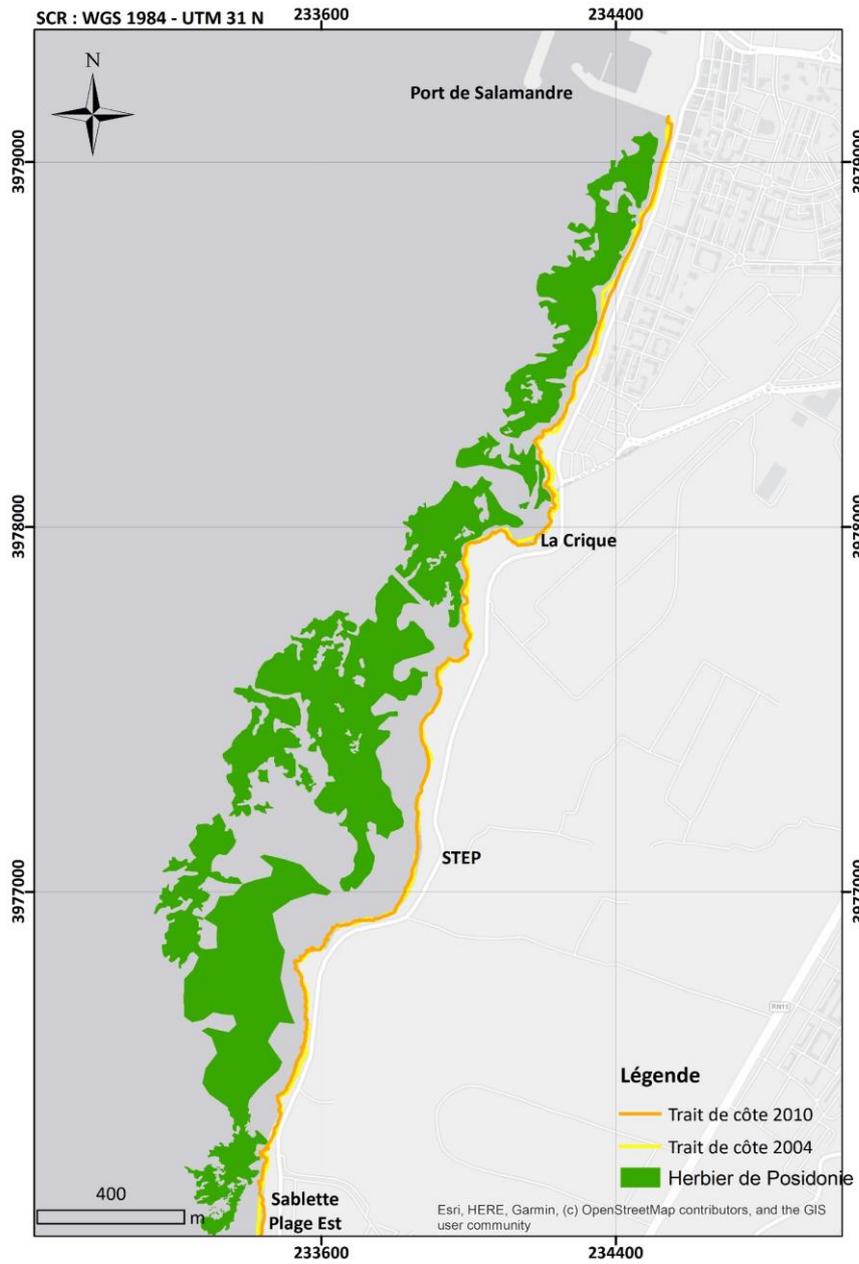


Figure 36: Cartographie des surfaces potentiellement occupées par les herbiers de *Posidonie* au-devant de plusieurs plages : Port de Salamandre, La Crique, Sablette Est (2010)

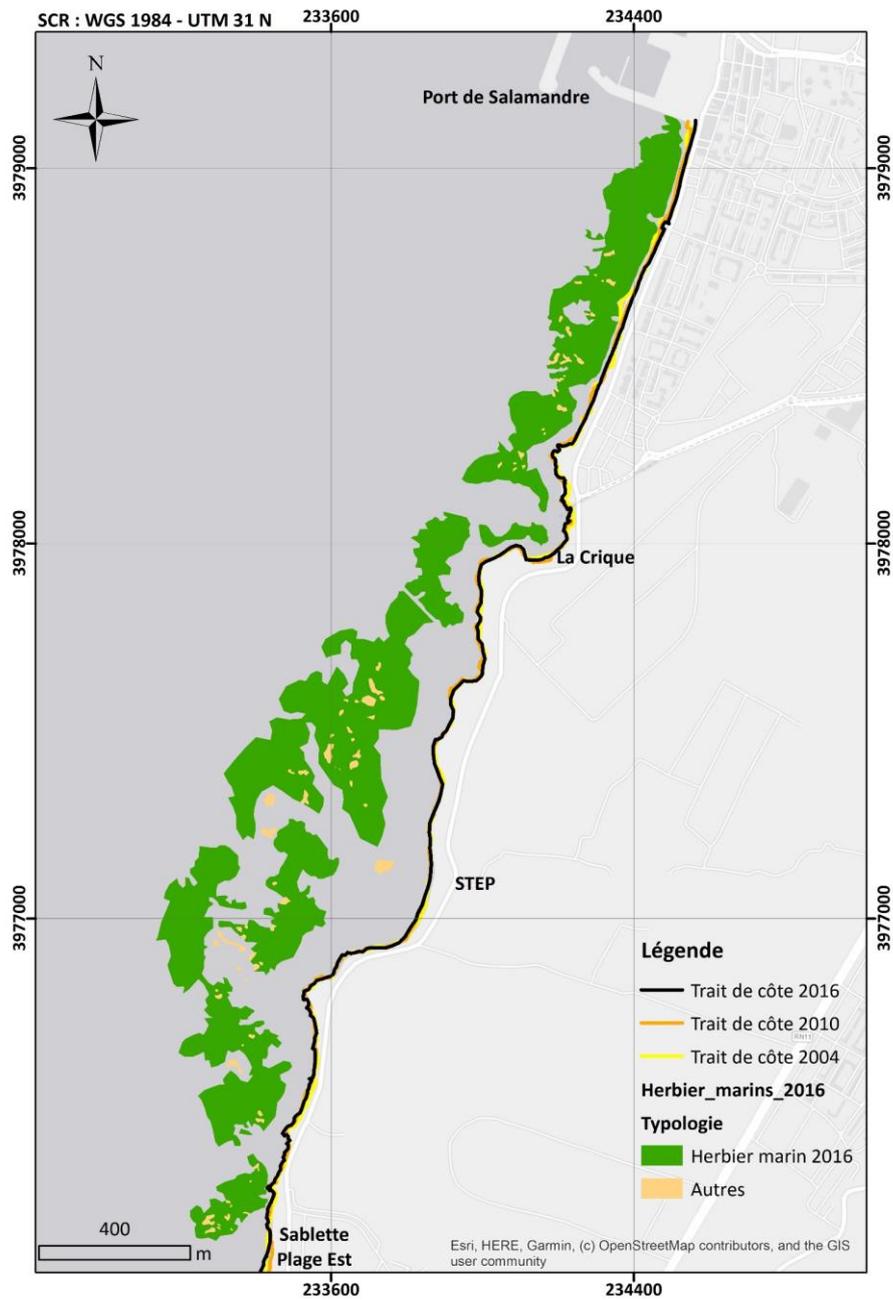


Figure 37: Cartographie des surfaces potentiellement occupées par les herbiers de *Posidonia* au-devant de plusieurs plages : Port de Salamandre, La Crique, Sablette Est (2016).

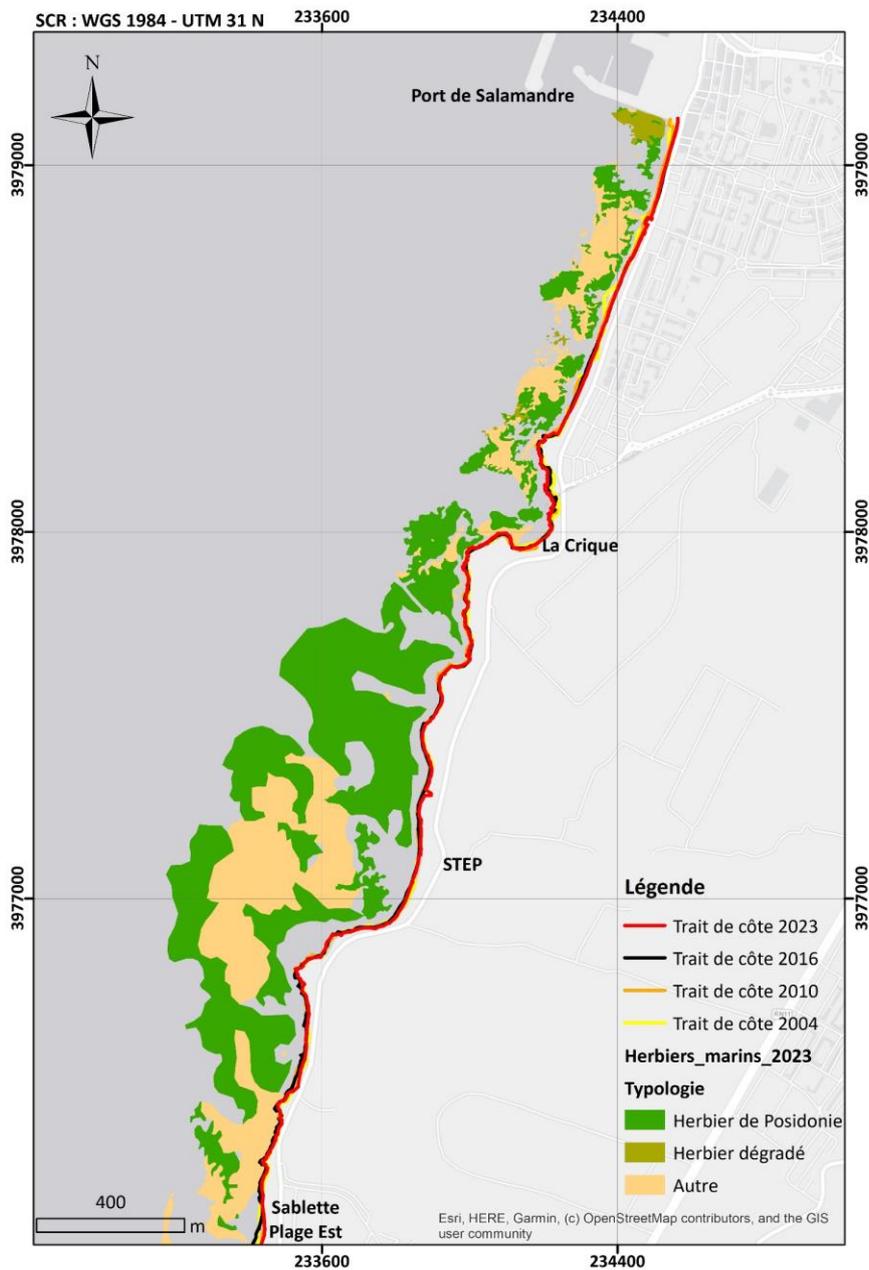


Figure 38: Cartographie des surfaces potentiellement occupées par les herbiers de *Posidonie* au-devant de plusieurs plages : Port de Salamandre, La Crique, Sablette Est (2023)

Selon les résultats qui ont été extraite après l'étape de la numérisation des typologies occupées par les différents habitats marins on observe que l'évolution globale des herbiers à *Posidonia oceanica* elle montrent une stabilité entre 2004 et 2010 tandis qu'entre 2010 et 2016 une petite régression faible mais dans le période entre 2016 et 2023 on observe qu'il y a une forte régression ce qui en a résulté des herbiers de *Posidonie* dégradée et autre.

D’ailleurs, pour la numérisation de trait de côte de ces plages, on observe une stabilité entre 2004 et 2010, mais à partir de 2016 il y’a une faible régression jusqu’à 2023.

5. Analyse statistique de l’évolution spatio-temporelle des surfaces occupées par les habitats marins

Les résultats statistiques des surfaces occupées par les différents habitats marins le long de ces plages (Port de Salamandre, La Crique, Sablette) sont présentés dans le (Tableau 20).

Tableau 20: les surfaces de chaque type d'habitats marins.

| Typologie | 2004 | 2010 | 2016 | 2023 |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Herbier de Posidonie (m) | 577439.22383 | 562210.69686 | 479113.81417 | 466308.001887 |
| Herbier dégradé (m) | 0 | 0 | 0 | 9822.387184 |
| Substrat meuble (m) | 0 | 0 | 15562.3193 | 159019.48611 |
| Surface totale (m) | 577439.22383 | 562210.69686 | 494676.13347 | 635149.875181 |

Sur la base de (Tableau 9), nous avons créés les graphiques en histogramme, qui montrent les variations des surfaces occupées par l’herbier de *Posidonie* le long des plages (Port de Salamandre, La Crique, Sablette), représentés dans les cartes précédentes (Figure 39).

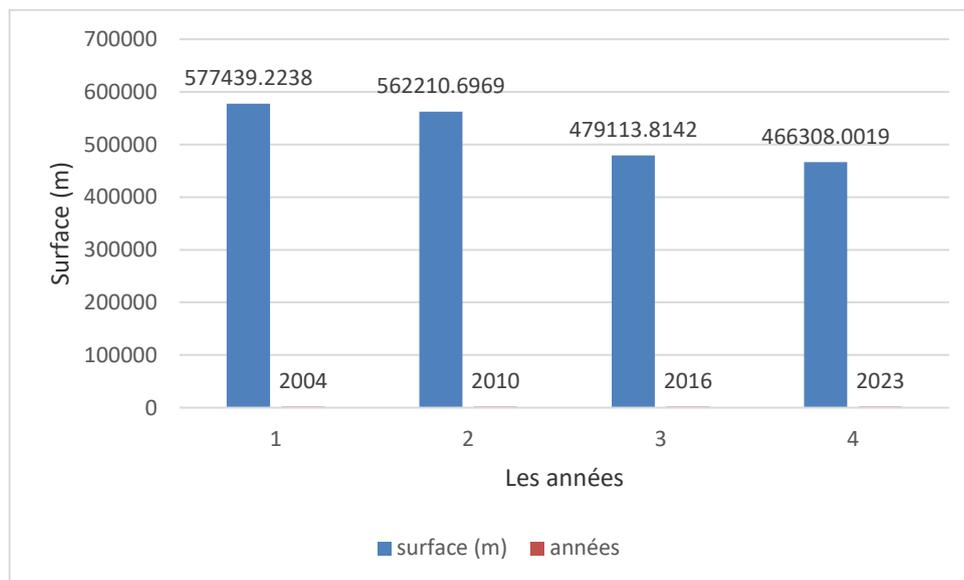


Figure 39: Evolution spatio-temporelle de l'herbier à *Posidonia oceanica*

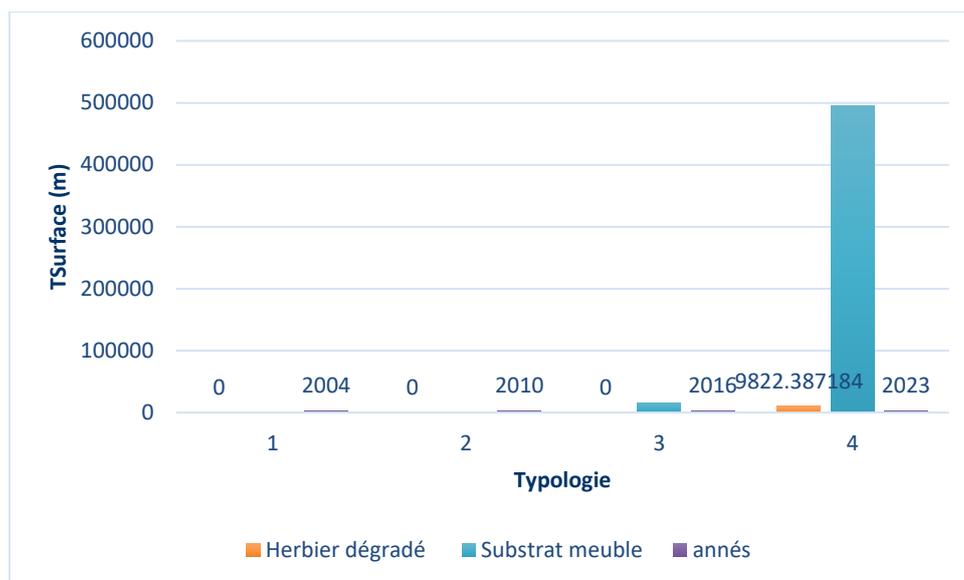


Figure 40: Evolution spatio-temporelle d’Herbier dégradé de *Posidonie* et le substrat meuble.

6. Evolution linéaire du trait de côte

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 à *Posidonia oceanica* par les mesures de LRR (Taux), NSM (Distance) et EPR (Trait de côte).

Les calculs sont faits de manière que l’outil DSAS mesuré la distance entre la ligne de base et la limite supérieure pour chaque transects.

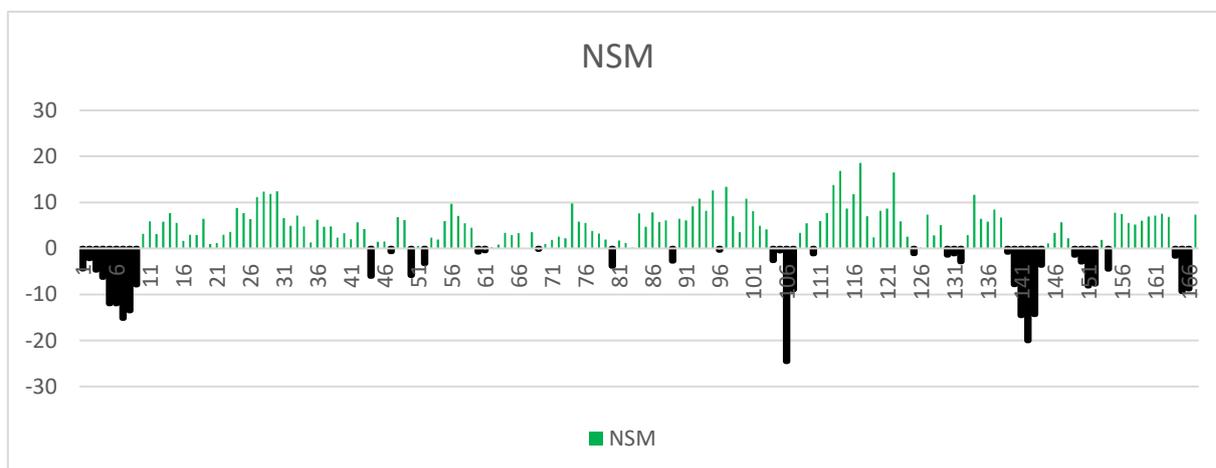


Figure 41: Evolution diachronique des transects (NSM) entre (2004-2010)

7. 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 une dégradation significative le long de

la limite supérieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* et un changement dans les traits de côte entre 2016 et 2023 et une stabilité pour les deux entre 2004 et 2010 et une petite variation entre 2010 et 2016 ponctuée par une faible régression. Nous supposons que la raison principale est la création du Port de Salamandre, qui a un impact négatif sur la biodiversité marine, la station de dessalement de l'eau rejets au niveau de la plage La Crique, les rejets domestiques de la ville de Salamandre qui rejetées dans l'eau de mer qui provoque la pollution, les aménagements côtiers de la plage de Salamandre et sans oubliées les pêcheurs qui dérégler totalement l'écosystème marine.



Figure 42: Prise de vue sur le Port de Salamandre

8. Les solutions de protection et de restauration des herbiers à *Posidonia oceanica*

Les herbiers de *Posidonie* sont un des écosystèmes les plus riches de la Méditerranée, riches par leur biodiversité et les nombreux services rendus à l'être humain. Dans ce contexte particulier, les actions qui visent à la protection et la restauration de la Posidonie, sont devenues plus que prioritaires. Parmi les solutions on peut citer plusieurs approches :

- Zone de protection marine (ZPM) : établir des réserves marines pour limiter l'accès humain et réduire les impacts des activités telles que la pêche et le mouillage des bateaux.
- Réglementation et gestion : appliquer des régulations strictes sur la pêche, le tourisme côtier et les activités maritimes pour minimiser les perturbations et la pollution.

- Réduction de la pollution : limiter les apports de polluants terrestres (nutriments, déchets plastiques, produits chimiques) qui peuvent affecter la qualité de l'eau et la santé des herbiers.
- Restauration écologique : engager des efforts pour restaurer les zones endommagées en replantant des techniques de transplantation naturelle.
- Education et sensibilisation : informer et sensibiliser les communautés locales, les pêcheurs, les plaisanciers et les touristes sur l'importance des herbiers de *Posidonie* et les bonnes pratiques pour les préserver.
- Surveillance et recherche scientifique : mettre en place des programmes de surveillance pour suivre l'état de santé des herbiers et mener des recherches pour améliorer les techniques de restauration et de gestion

Ces mesures combinées peuvent contribuer à protéger et restaurer les herbiers de *Posidonie*, essentiels à la biodiversité et à la résilience des écosystèmes côtiers méditerranéens. Mais la régulation des activités humaines qui endommagent l'herbier à *Posidonia oceanica* reste la meilleure stratégie.

Conclusion

Conclusion

L'objectif de notre étude était de produire une base de données et d'informations sur la distribution spatio-temporelle des herbiers à *Posidonia oceanica* et du trait de côte le long de plusieurs plages (Port de Salamandre, La Crique, Sablette). La cartographie des herbiers à *Posidonia oceanica* est essentielle pour mener des études écologiques et de conservation à grande échelle.

La cartographie a été réalisée à l'aide d'images satellitaires, selon une approche diachronique. Le suivi de l'évolution temporelle de la limite supérieure des herbiers de *Posidonie* a été effectué à quatre dates : 2004, 2010, 2016 et 2023. Cette cartographie s'est concentrée sur la limite supérieure des herbiers de *Posidonie* (entre 0 et 10 m de profondeur) ainsi que sur le trait de côte. Les cartes produites présentent également les différentes typologies des habitats marins : herbier de *Posidonie*, herbier de *Posidonie* dégradé et autres substrats meubles.

Ces cartes constituent des documents de référence qui témoignent de la position actuelle des herbiers et permettront d'évaluer leur évolution future. Cependant, il existe un manque d'études portant sur la cartographie des herbiers de *Posidonie* le long des côtes algériennes. C'est pourquoi cette cartographie des herbiers de *Posidonie* sur plusieurs plages (Port de Salamandre, La Crique, Sablette) est la première réalisée à l'aide d'un système d'information géographique (SIG).

La cartographie de l'herbier à *Posidonia oceanica* des sites allant du Port de Salamandre à Sablette a révélé une dynamique régressive, nous permettant de caractériser la nature des menaces qui pèsent sur ces écosystèmes. Cette dégradation s'explique par des activités humaines telles que la pêche (mouillage et chalutage), le rejet des eaux usées, les aménagements côtiers (urbanisation incontrôlée et tourisme mal planifié), qui provoquent des dommages importants aux herbiers de *Posidonie* et, plus généralement, à l'écosystème marin.

L'analyse granulométrique du site de la plage de La Crique : Salamandre a montré que les sédiments des stations de prélèvement (PM, TC, PA) présentent un bon classement. La fraction la plus dominante est celle de 0,2 mm, suivie par celle de 0,1 mm. Les autres fractions (2 mm, 1 mm, 0,05 mm, 0,08 mm) sont presque négligeables.

En ce qui concerne l'analyse de la matière organique, nous avons constaté que les trois stations de prélèvement contiennent de la matière organique, tant sur la plage sous-marine que sur la plage aérienne et même sur le trait de côte de la plage La Crique : Salamandre. Ces variations soulignent que les milieux sont bien oxygénés et diversifiés.

La calcimétrie a permis de déterminer le taux de carbonates présents dans les sédiments. Les huit échantillons présentent des taux de carbonates compris entre 32,83 % et 97,01 %. Le taux de CaCO_3 le plus élevé, à 97,01 %, a été relevé dans la station 3 sur la plage sous-marine (PM-3) de La Crique : Salamandre (très fortement carbonatée). Le taux le plus faible, 32,83 %, a été mesuré dans la station 1 sur le trait de côte (faiblement carbonatée).

Ces analyses montrent que l'écosystème de la plage La Crique : Salamandre est diversifié, riche en matière organique et en CaCO_3 . Comme tout travail scientifique, ce mémoire n'est pas exempt d'erreurs. Cependant, il ouvre des perspectives intéressantes pour la cartographie in situ future.

Références bibliographique

Références bibliographiques

- **Drupal (2021).** *11 projets pour réduire l'impact des ancres des navires de plaisance sur l'herbier de Posidonie.* <https://www.ofb.gouv.fr/actualites/11-projets-pour-reduire-limpact-des-ancres-des-navires-de-plaisance-sur-lherbier-de>.
- **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.*
- **Abadie, A. (2019, septembre 23).** Les prairies de posidonies. *Sea(e)scape*.
- **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(12), 774.
- **Anne, t. (2022).** *R104 : La préservation des posidonies, par Julie Deter et al.* sfecologie.org.
- **Augier, H., Robert, P., & Maffre, R. (1980).** *Étude du régime thermique annuel des eaux au niveau des peuplements de phanérogames marines de la baie de Port-Cros (Îles d'Hyères, Méditerranée, France) | Parc national de Port-Cros et Porquerolles.*
- **Balestri, E., Benedetti-Cecchi, L., & Lardicci, C. (2004).** Variability in patterns of growth and morphology of *Posidonia oceanica* exposed to urban and industrial wastes: Contrasts with two reference locations. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 308(1), 1-21.
- **Belbachir. (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.*
- **Belbachir, N. (2012).** *Contribution à l'étude écologique de l'herbier à *Posidonia oceanica* (L.) Delile (1813) de la frange côtière de Mostaganem : Etat de santé et relation entre plante et échinoderme* [Thesis].
- **Bensabra, H., Hemissi, F., & Belbacha, S. (Encadreur). (2012).** *Répartition de la posidonie (limite supérieure) dans l'aire marine protégée de Taza* [Thesis, Université de Jijel].
- **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.
- **Bonhomme, d, & Rouanet, E. (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. (2004).** *Marine biodiversity in the mediterranean status of species, populations and communities.*
- **Boudouresque, Bernard, G., Bonhomme, P., Charbonnel, E., Diviacco, G., Meinesz, A., Pergent, G., Pergent-Martini, C., Ruitton, S., & Tunesi, L. (2006).** *Préservation et conservation des herbier à *Posidonia oceanica*.*
- **Boudouresque, C., Bernard, G., Pergent, G., Shili, A., & Verlaque, M. (2009).** Regression of Mediterranean seagrasses caused by natural processes and anthropogenic disturbances and stress : A critical review. *Botanica Marina*, 52.
- **Boudouresque, C., & Grissac, A. (1983).** L'herbier à *Posidonia oceanica* en Méditerranée : Les interactions entre la plante et le sédiment. *Journal de Recherche Océanographique*, 8, 99-122.

- **Boulenger, A. (2022, mars 20).** REPAIR : Des solutions fondées sur la nature pour réhabiliter les herbiers de posidonie. *Sea(e)scape*.
- **Campagne, C. S., Salles, J.-M., Boissery, P., & Deter, J. (2015).** The seagrass *Posidonia oceanica* : Ecosystem services identification and economic evaluation of goods and benefits. *Marine Pollution Bulletin*, 97(1), 391-400.
- **Cancemi, G. (2000).** (PDF) *Impact of a fish farming facility on a Posidonia oceanica meadow*. https://www.researchgate.net/publication/313479871_Impact_of_a_fish_farming_facility_on_a_Posidonia_oceanica_meadow
- **Charles-Francois, B. (2006).** *La posidonie, un miracle en Méditerranée | Dossier*.
- **Chartrer, B. (2019, juillet 19).** Posidonie : Le poumon vert de Méditerranée en danger ? *Fishipedia*.
- **cicely. (2012, octobre 20).** PPT - Contribution à la connaissance de la biodiversité associée à l'herbier à *Posidonia oceanica* dans le site sensible des PowerPoint Presentation—ID:873761. SlideServe.
- **Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997).** The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253-260.
- **De Paola, D., Chimienti, G., Degryse, B., Vendramin, G. G., Bagnoli, F., & de Virgilio, M. (2024).** *Posidonia oceanica* meadows of the Italian southern Adriatic Sea display different genetic structure. *Journal for Nature Conservation*, 78, 126585.
- **Delgado, O., Ruiz, J., Pérez, M., Romero, J., & Ballesteros, E. (1999).** Effects of fish farming on seagrass (*Posidonia oceanica*) in a Mediterranean bay : Seagrass decline after organic loading cessation. *Oceanologica Acta*, 22(1), 109-117.
- **Deter, julie. (2020, juin 12).** Cartographie automatique d'herbiers de posidonie par Photogrammétrie. *Andromède Océanologie*.
- **EASTMAN. (1993).** *3-fonctionnalités du SIG*.
- **Elkalay, K., Frangoulis, C., Skliris, N., Goffart, A., Gobert, S., Lepoint, G., & Hecq, J.-H. (2003).** A model of the seasonal dynamics of biomass and production of the seagrass *Posidonia oceanica* in the Bay of Calvi (Northwestern Mediterranean). *Ecological Modelling*, 167(1), 1-18.
- **ESRI FRANCE. (2024).** *SIG : Tout savoir sur les Systèmes d'Information Géographique | Esri France*.
- **Fontan, E. (2011).** *Méthode de cartographie, de caractérisation et de suivi des herbiers marins* [Text]. ZONÉCO Nouvelle-Calédonie.
- **Francour, P. (1990).** *Dynamique de l'écosystème à Posidonia oceanica dans le parc national de Port-Cros : Analyse des compartiments matte, litière, faune vagile, échinodermes et poissons* [These de doctorat, Paris 6].
- **Fullgrabe, L. (2020, octobre 20).** Les banquettes de posidonie. *Sea(e)scape*.
- **Gacia, E., & Duarte, C. M. (2001).** Sediment Retention by a Mediterranean *Posidonia oceanica* Meadow : The Balance between Deposition and Resuspension. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 52(4), 505-514.

- **Ganteaume, A., Bonhomme, P., Bernard, G., Poulain, M., & Boudouresque, C. (2005).** Impact de l’ancrage des bateaux de plaisance sur la prairie à *Posidonia oceanica* dans le Parc national de Port-Cros (Méditerranée Nord-occidentale). *Sci. Rep. Port-Cros Natl. Park*, 21, 147-162.
- **Girud, G. (1977).** Recensement des floraisons de *Posidonia oceanica* (Linné) Delile en Méditerranée. Rapp.P.V. Rém. Commiss. internation. Explor. sci. Médit., Monaco, 24(4):126-130.
- **Gourmelon, F., & Robin, M. (2005).** SIG et littoral. *Traité IGAT (Information Géographique et Aménagement du Territoire)*. Hermès.
- **Gourmelon, F., Robin, M., Creuseveau, J. G., Pennober, G., Silva, A. S. da, Affian, K., Hauhouot, C., & Pottier, P. (2006).** Contraintes d’utilisation des technologies de l’information géographique pour la gestion intégrée des zones côtières en Afrique. *VertigO - la revue électronique en sciences de l’environnement*, Volume 7 Numéro 3, Article Volume 7 Numéro 3.
- **Grissac, A., & Boudouresque, C. (1985).** Rôles des herbiers de phanérogames marines dans les mouvements des sédiments côtiers : Les herbiers à *Posidonia oceanica*. *Marseille*, 1, 143-151.
- **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. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105734>
- **Harmelin, M., Francour, P., & Harmelin, J.-G. (1999, janvier 1).** Impact of *Caulerpa taxifolia* on Mediterranean fish assemblages : A six year study.
- **Hattour, A., & Ben Mustapha, K. (2013).** *Le Couvert Vegetal Marin du Golfe de Gabes : Cartographie et Réseau de Surveillance de l’Herbier de Posidonie.*, *The Gulf of Gabes meadows: mapping and monitoring of Posidonia*. Institut National des Sciences et Technologies de la Mer.
- **Hemminga, M. A. (1998).** The root/rhizome system of seagrasses: An asset and a burden. *Journal of Sea Research*, 39(3), 183-196.
- **jimenez, s. (1996).** *Las praderas de Posidonia oceanica como zona de protección de juveniles de especies de interés comercial.*
- **Jones, C. G., Lawton, J. H., & Shachak, M. (1994).** Organisms as Ecosystem Engineers. *Oikos*, 69(3), 373-386.
- **Julie Renson, M. (2023).** Réchauffement climatique : «Les herbiers de posidonie ont stocké de 10 à 40 % des émissions de CO2 des pays méditerranéens». Libération.
- **MedWet. (2017, octobre 25).** *La Posidonie, le poumon de la Méditerranée*
- **Lafabrie, C. (2007).** *Utilisation de Posidonia oceanica (L.) Delile comme bio-indicateur de la contamination métallique* [Université de Corse].
- **Ledireach, L. (2013, mars 18).** *Importance des herbiers – GIS Posidonie.*
- **M. Yassine Ramzi. (2013).** *Les magnoliophytes marines de la Tunisie : Distribution, croissance et production primaire.*
- **Mancini, G., Mastrantonio, G., Pollice, A., Jona Lasinio, G., Belluscio, A., Casoli, E., Silvia Pace, D., Ardizzone, G., & Ventura, D. (2023).** Detecting trends in seagrass cover through aerial imagery interpretation : Historical dynamics of a *Posidonia oceanica* meadow subjected to anthropogenic disturbance. *Ecological Indicators*, 150, 110209.

- **Marmonier, P. (2002).** *L'information géographique. Ecole nationale des sciences géographiques, France.*
- **Mateo, M. A., & Romero, J. (1996).** Evaluating seagrass leaf litter decomposition : An experimental comparison between litter-bag and oxygen-uptake methods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 202(2), 97-106.
- **McKenzie, L. J., Finkbeiner, M. A., & Kirkman, H. (2001).** Methods for mapping seagrass distribution. In *Global Seagrass Research Methods* (p. 101-121). Elsevier.
- **Meinesz, A., & Laurent, R. (1978a).** *Cartographie et état de la limite inférieure de l'herbier de Posidonia oceanica dans les Alpes-maritimes (France) – Campagne Poseïdon 1976—.*
- **Meinesz, & Laurent. (1978b).** *Figure 3: Typologie de la limite inférieure des herbiers à Posidonia...* ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/typologie-de-la-limite-inferieure-des-herbiers-a-Posidonia-oceanica-en-fonction-de-leur_fig1_259961812
- **Molinier, R., & Picard, J. (1952).** *Recherches sur les herbiers de phanérogames marines du littoral méditerranéen français.* Masson).
- **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.
- **Montefalcone, M., Parravicini, V., Vacchi, M., Albertelli, G., Ferrari, M., Morri, C., & Bianchi, C. N. (2010).** Human influence on seagrass habitat fragmentation in NW Mediterranean Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86(2), 292-298.
- **Pastor, A., Catalán, I. A., Terrados, J., Mourre, B., & Ospina-Alvarez, A. (2023).** Connectivity-based approach to guide conservation and restoration of seagrass *Posidonia oceanica* in the NW Mediterranean. *Biological Conservation*, 285, 110248.
- **Peirano, A., Damasso, V., Montefalcone, M., Morri, C., & Bianchi, C. N. (2005).** Effects of climate, invasive species and anthropogenic impacts on the growth of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile in Liguria (NW Mediterranean Sea). *Marine Pollution Bulletin*, 50(8), 817-822.
- **Pergent. (2012, mai 28).** *Herbiers de Magnoliophytes marines de Méditerranée : Conservation et contribution à la lutte contre le changement climatique | IUCN.*
- **Pergent. (2016).** *III.5.1. - Biocénose de l'herbier à Posidonia oceanica (NatHab-Méditerranée).* Inventaire National du Patrimoine Naturel.
- **Pergent, G., Pergent-Martini, C., & Boudouresque, C. (1995).** Utilisation de l'herbier à *Posidonia oceanica* comme indicateur biologique de la qualité du milieu littoral en Méditerranée : État des connaissances. *Mésogée*, 54, 3-27.
- **Pergent-Martini, C. (2016, juin 6).** *Les herbiers de Posidonies.* Planet-Vie. <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/les-herbiers-de-posidonies>
- **Pergent-Martini, C., Leoni, V., Pasqualini, V., Ardizzone, G., Balestri, E., Bedini, R., Belluscio, A., T, B., Borg, J. A., Boudouresque, C., Boumaza, S., M, B., Buia, M., S, C., Cebrian, J., Charbonnel, E., Cinelli, F., Cossu, A., Di Maida, G., & Velimirov, B. (2005).** Descriptors of *Posidonia oceanica* meadows : Use and application. *Ecological Indicators*, 5, 213-230.

- **Piazzì, L., Acunto, S., & Cinelli, F. (2000).** Mapping of *Posidonia oceanica* beds around Elba Island (western Mediterranean) with integration of direct and indirect methods. *Oceanologica Acta*, 23(3), 339-346.
- **Pisani, D., De Lucia, C., Paziienza, P., Mastrototaro, F., Tursi, A., & Chimienti, G. (2024).** Assessing the economic value of *Posidonia oceanica* (L.) at Tremiti Islands (Mediterranean Sea): An ecosystem condition-based approach. *Marine Pollution Bulletin*, 202, 116274.
- **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*, 470-471, 364-378.
- **Ravallec, C. L., & Pergent-Martini. (2007).** *LIGNES DIRECTRICES POUR LES ETUDES D'IMPACTS SUR LES HERBIERS MARINS.*
- **Rodríguez, I., Montoya, I., Sánchez, M. J., & Carreño, F. (2009).** Geographic Information Systems applied to Integrated Coastal Zone Management. *Geomorphology*, 107(1), 100-105.
- **Ruitton, S., Boudouresque, C., Thibaut, T., Rastorgueff, P.-A., Personnic, S., Boissery, P., & Daniel, B. (2017).** *Guide méthodologique pour l'évaluation écosystémique des habitats marins.*
- **Ruiz Fernández, J. M. (2000).** *Respuesta de la fanerogama marina posidonia oceanica (l.) delile a perturbaciones antropicas* [[Http://purl.org/dc/dcmitype/Text](http://purl.org/dc/dcmitype/Text), Universidad de Murcia].
- **Ruiz Fernandez, J. M., & Romero, J. (2004).** Effects of disturbances caused by coastal constructions on spatial structure, growth dynamics and photosynthesis of the seagrass *Posidonia oceanica*. *Marine pollution bulletin*, 46, 1523-1533.
- **Sghaier. (2013).** *Les MAGNOLIOPHYTES MARINES DE LAA TUNISIE: DISTRIBUTION, CROISSANCE ET PRODUCTION PRIMAIRE.*
- **sip. (2013, mars 17).** *Posidonie : Mesures de protection légale – GIS Posidonie.*
- **Team, N. (2023, juin 30).** L'importance des herbiers de Posidonie. *Navily Le Blog.*
- **Tunesi, L., Diviacco, G., & Mo, G. (2001).** Observation by submersible on the Biocoenosis of the deep-sea corals off Portofino Promontory (Northwestern Mediterranean Sea). *Proceedings of the First International Symposium on Deep-Sea Corals*, 76-87.
- **Veettil, 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.
- **Zakhama-Sraieb, R., Sghaier, Y., & Charfi, F. (2011).** Sensibilisation sur l'importance des banquettes de *Posidonia oceanica* dans la protection des plages sableuses : Approche participative. *Travaux de l'Institut Scientifique de Rabat*, 6, 115-119.

Annexes

Annexes :

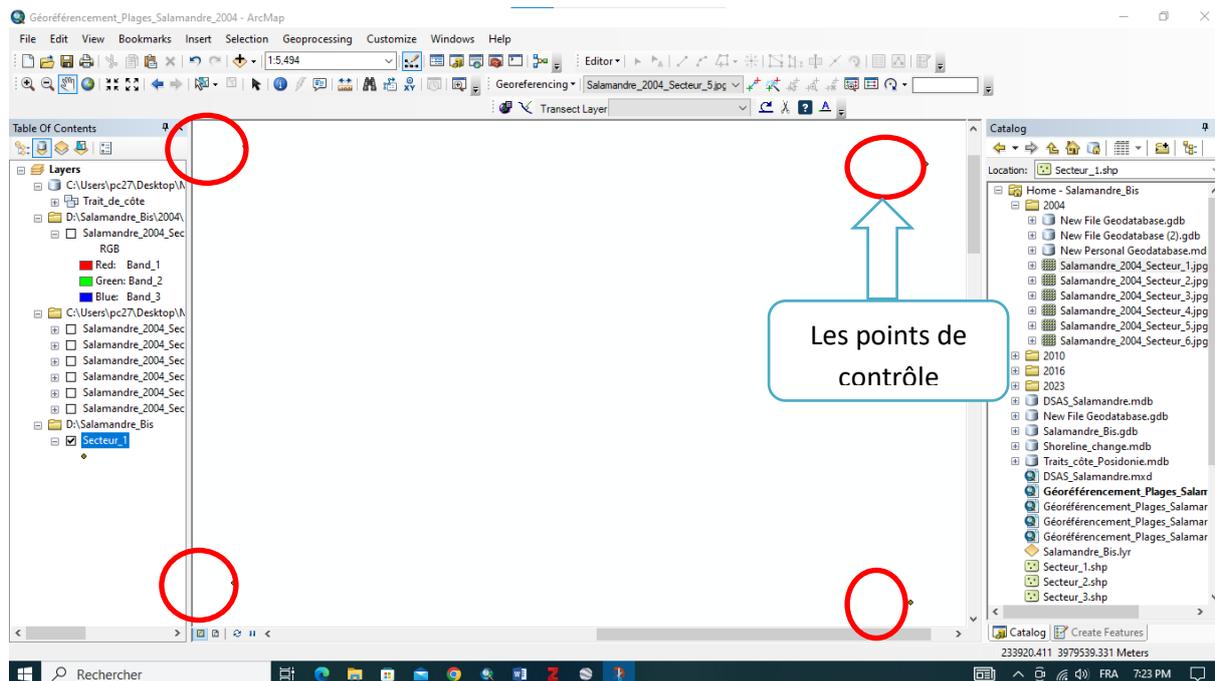


Figure 43: Importation des points de contrôle sur l’environnement de travail ArcMAP.

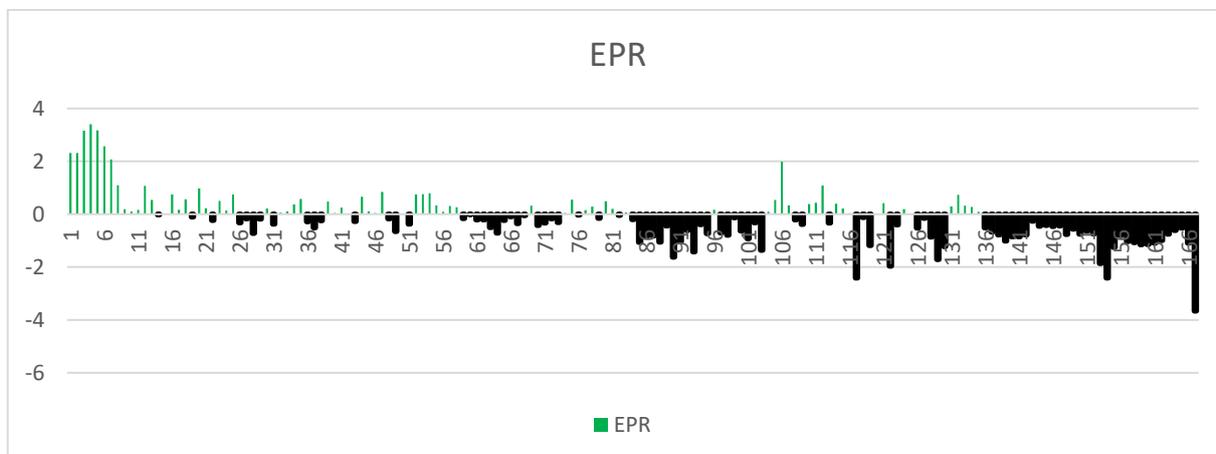


Figure 44: Evolution diachronique du trait de côte selon le modèle EPR entre 2010-2016.

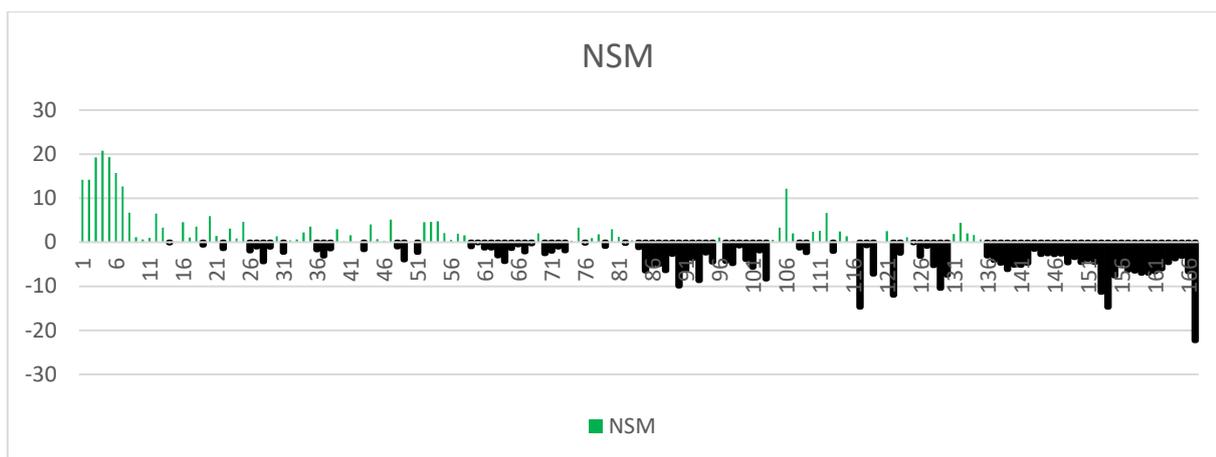


Figure 45: Evolution diachronique du trait de côte selon le modèle NSM entre 2010-2016.

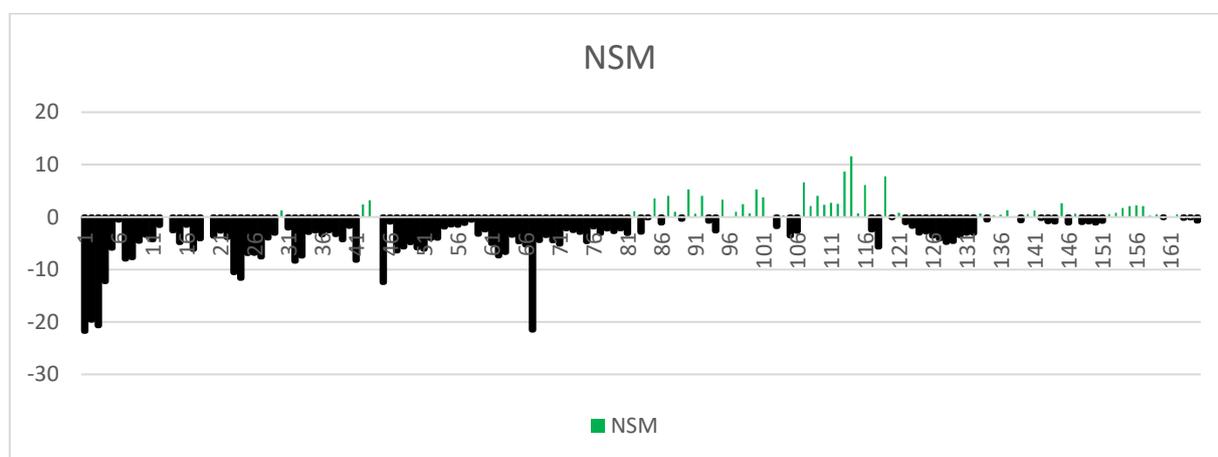


Figure 46: Evolution diachronique du trait de côte selon le modèle NSM entre 2016-2023.

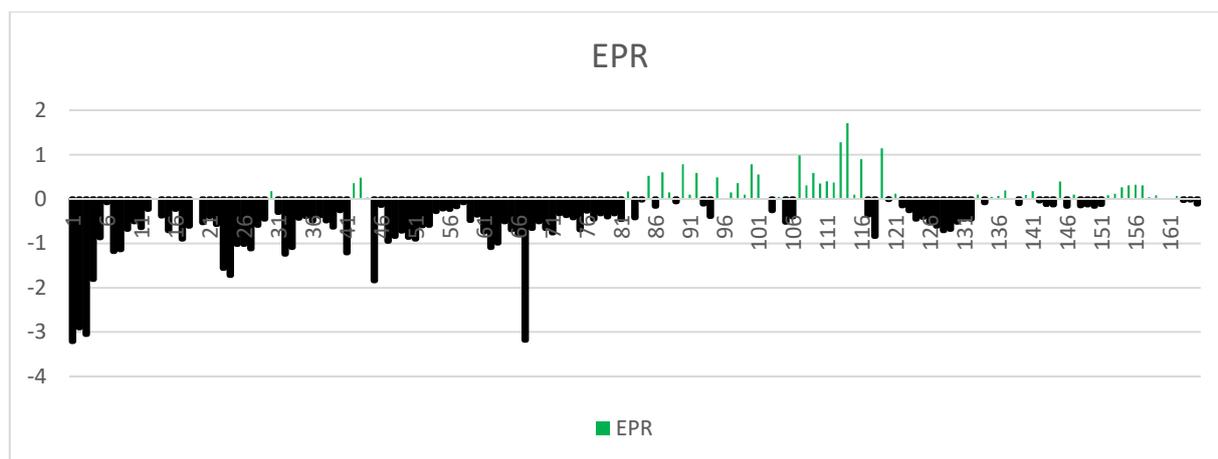


Figure 47: Evolution diachronique du trait de côte selon le modèle EPR entre 2016-2023

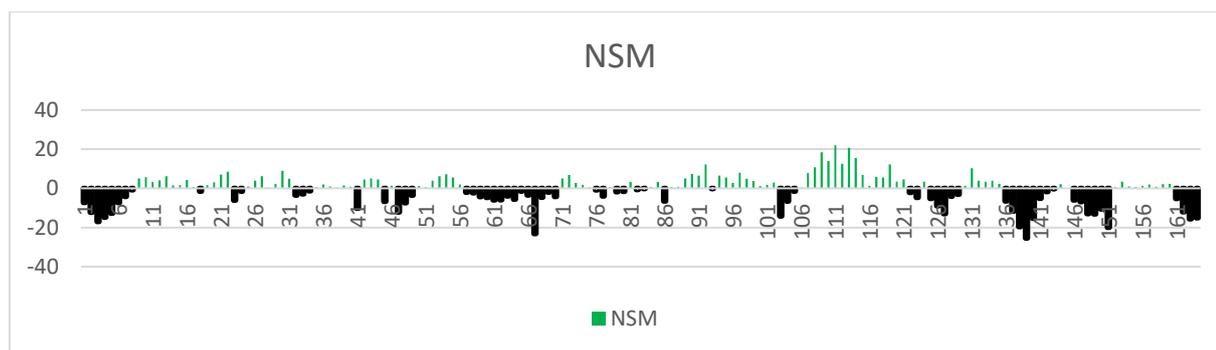


Figure 48: Evolution diachronique du trait de côte selon le modèle NSM entre 2004-2023.

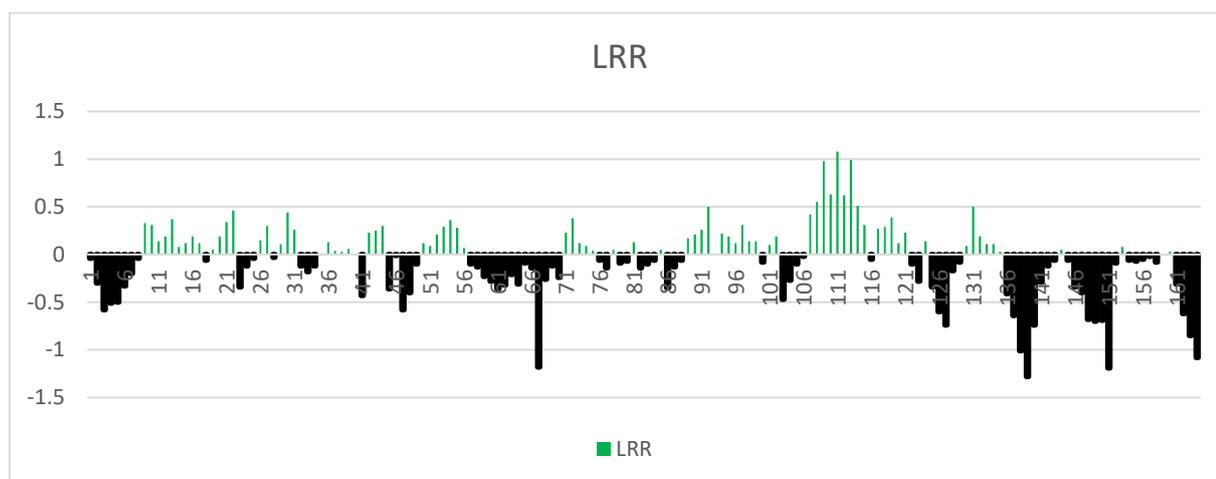


Figure 49: Evolution diachronique du trait de côte selon le modèle LRR entre 2004-2023.