

الشعبية الديمقراطية الجزائرية الجمهورية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل

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



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en sciences de la mer

SPECIALITE : Ingénierie de l'Environnement Marin et Côtier

Thème

Identification des zones propices à héberger
des filières conchylicoles par modélisation
numérique et télédétection

Présenté par :

IZEBOUDJEN Hichem

OUAMOUSA Lamia

Soutenu le 28/06/2020, devant le jury suivant :

Mme AMAROUCHE Nassima

MAA (ENSSMAL)

Présidente

Mme MOKHBI-SOUKANE Dahbia

MCB (ENSSMAL)

Promotrice

Melle KERAGHEL Mehdi

MAA (ENSSMAL)

Examinatrice

Promotion : 2020

Remerciements

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui nous ont permis d'évoluer dans la réflexion et l'élaboration de ce travail.

Plus particulièrement, nous tenons à remercier :

- ❖ **Mme. Dahbia Mokhbi Soukane**, notre promotrice, pour son soutien, son engagement à nos côtés, sa disponibilité et ses judicieux conseils depuis le début de ce projet.
- ❖ **M. Sofiane Soukane** pour son amitié, sa confiance, de nous avoir aidé et guidé tout au long de notre parcours universitaire et d'avoir toujours pris le temps de partager avec nous ses connaissances et son expérience.
- ❖ **M. Khoudir Mezouar** qui a eu l'amabilité de répondre à nos questions et de fournir les données nécessaires pour mener à bien ce travail.
- ❖ **M. Hosseyn Otmani** pour sa disponibilité, ses explications et la qualité de ses conseils.
- ❖ **Mme Boukretaoui** du ministère de la pêche et **M. Kacher** pour leur précieuse aide dans cette étude.
- ❖ Les membres du jury **Mme. Nassima Amarouche**, **Melle. Mehdiya Keraguel** d'avoir accepté d'assister à notre soutenance et d'avoir pris le temps d'évaluer ce travail.
Tous les professeurs de l'ENSSMAL qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de cette étude

Je tiens à exprimer ma gratitude envers mon binôme et ma très chère amie, Lamia, pour avoir toujours été à mes côtés au cours de ces cinq ans d'études et pour sa patience, son affection et son dévouement pendant ce travail. Je suis également très reconnaissant envers mes parents et mes frères et sœurs pour leur soutien moral et leurs encouragements. J'adresse aussi un remerciement spécial à tous mes amis pour leur inestimable compagnie durant ces années, en particulier Khaled, Haithem, Anis, Malek, Amine et Fatiha.

Hichem

J'aimerais tout d'abord remercier Hichem, mon binôme, mon meilleur ami avec qui j'ai pris beaucoup de plaisir à travailler. Sans lui ce projet n'aurait pas été pareil. Je souhaite également remercier mes chers parents pour leur soutien constant, leur amour, et leur présence à toute épreuve. Un grand merci à ma sœur Kenza et mon frère Mohamed pour leur soutien et leur précieuse aide à la relecture et la correction de ce mémoire, et aussi à ma sœur Amira pour ses encouragements malgré la distance. Pour finir, j'ai une pensée pour ma chère tante Farida qui nous a quittés. J'aurais tant aimé que tu sois encore parmi nous, merci d'avoir toujours été là pour moi. Tu resteras éternellement dans mes pensées et dans mon cœur.

Lamia

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	iii
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES ACRONYMES.....	vii
INTRODUCTION.....	1
I. GENERALITES	4
I.1 <i>La moule Mytilus galloprovincialis</i>	4
I.2 <i>L’huitre Crassostrea gigas</i>	5
I.3 La conchyliculture par filières.....	6
I.4 Impacts de la conchyliculture sur l’environnement.....	8
II. MATERIELS ET METHODES	11
II.1 Introduction	11
II.2 La zone d’étude	14
II.2.1 Limites géographiques	14
II.2.2 Géomorphologie	14
II.2.3 Hydrodynamique.....	15
II.2.4 Contexte environnemental.....	15
II.2.5 Réseau hydrographique	16
II.3 Analyse des contraintes légales et des conflits d’usage.....	18
II.3.1 Sources de données	21
II.3.2 Outils et logiciels	22
II.3.3 Acquisition et traitement des données.....	22
II.4 Analyse multicritère des facteurs environnementaux.....	24
II.4.1 Facteurs de croissance et de survie	24
II.4.2 Niveau de protection des fermes.....	31
II.4.3 Analyse multicritère	36
III. RESULTATS ET DISCUSSIONS	40
III.1 Contraintes légales et conflits d’usages	40
III.2 Facteurs environnementaux.....	43
III.2.1 Facteurs de croissance et de survie	43
III.2.2 Niveau de protection des fermes.....	45
III.3 Identification des zones.....	49
III.4 Validation des résultats	53

CONCLUSION	56
BIBLIOGRAPHIE.....	59
ANNEXES	1
Annexe A : Programme de traitement des images satellitaires sur python	1
Annexe B : cartes hydrodynamiques de la zone d'étude.....	10
Annexe C : Critères de sélection des zones d'activité aquacole d'après la circulaire N° 44 du 12 Mai 2014	Error! Bookmark not defined.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Moule <i>Mytilus galloprovincialis</i>	5
Figure I.2 : Anatomie d'une moule <i>Mytilus s</i>	5
Figure I.3 : L'huitre <i>Crassostrea gigas</i>	6
Figure I.4 : Anatomie de l'huitre creuse <i>Crassostrea gigas</i>	6
Figure I.5 : Schéma d'élevage conchylicole par système de filières	7
Figure I.6 : Schéma conceptuel de l'interaction de la conchyliculture avec les apports de nutriments dans les écosystèmes côtiers.....	8
Figure II.1 : La méthodologie appliquée pour l'identification des zones d'activité aquacole.	12
Figure II.2 : Littoral de la zone d'étude, la région centre de la côte algérienne	14
Figure II.3 : Les Oueds dans la baie de Bou-Ismaïl.....	16
Figure II.4 : Oueds dans la baie d'Alger	17
Figure II.5 : Oueds dans la baie de Zemmouri.	18
Figure II.6 : Densité du trafic maritime dans la zone d'étude	19
Figure II.7 : Cartographie de la Posidonie dans la région de Sidi Fredj	20
Figure II.8 : Cartographie de la posidonie dans les Anses de Kouali	20
Figure II.9 : Relevés ponctuels de la Posidonie dans la région de Bou-Ismaïl	21
Figure II.10 : Procédures d'acquisition et de traitement des données de contraintes légales et conflits d'usage	23
Figure II.11 : Les différentes données fournies par Earth Engine	25
Figure II.12 : Le code editor de Earth Engine.	26
Figure II.13 : Procédure de traitement des images Landsat 8 pour l'extraction de la chlorophylle, la température et les MES.....	29
Figure II.14 : Processus de génération du maillage.	33
Figure II.15 : Maillage de la zone d'étude	33
Figure II.16 : Rose des vents	35
Figure II.17 : Roses des houles de la région de Boumerdes-Alger	36
Figure II.18 : Procédure de l'Analyse Multicritère.....	38
Figure III.1 : Contraintes légales et conflits d'usage dans la baie d'Alger	40
Figure III.2 : Contraintes légales et conflits d'usage dans la baie de Bou-Ismaïl	41
Figure III.3 : Contraintes légales et conflits d'usage dans la baie de Zemmouri	42
Figure III.4 : Cartographie des zones légales	42
Figure III.5 : Moyenne de la chlorophylle sur la période de 2014 à 2019.....	43
Figure III.6 : Valeurs du FSR pour la chlorophylle	43

Figure III.7 : Moyenne des MES sur la période de 2014 à 2019.....	44
Figure III.8 : Valeurs du FSR pour les MES	44
Figure III.9 : Moyenne de la SST sur la période de 2014 à 2019.....	45
Figure III.10 : Valeurs du FSR pour la SST	45
Figure III.11 : Bathymétrie de la zone d'étude.....	46
Figure III.12 : Valeurs du FSR pour la bathymétrie	46
Figure III.13 : Vitesse des courants dans la zone d'étude	47
Figure III.14 : Valeurs du FSR pour la vitesse des courants	47
Figure III.15 : Hauteurs maximales des vagues dans la zone d'étude	47
Figure III.16 : Valeur du FSR pour la hauteur des vagues.....	48
Figure III.17 : Cartographie de l'adéquation Sx, y	48
Figure III.18 : Zones conchylicoles de Chenoua et de Tipaza	49
Figure III.19 : Zones conchylicoles de Aïn Tagourait et de Bou Haroun.....	50
Figure III.20 : Zones conchylicoles de Sidi Fredj	50
Figure III.21 : Zones conchylicoles de Sidi Fredj	51
Figure III.22 : Zones conchylicoles de Cap Djinet	51
Figure III.23 : Ferme conchylicole de Aïn Tagourait	54
Figure III.24 : Ferme conchylicole de Aïn Taya	54

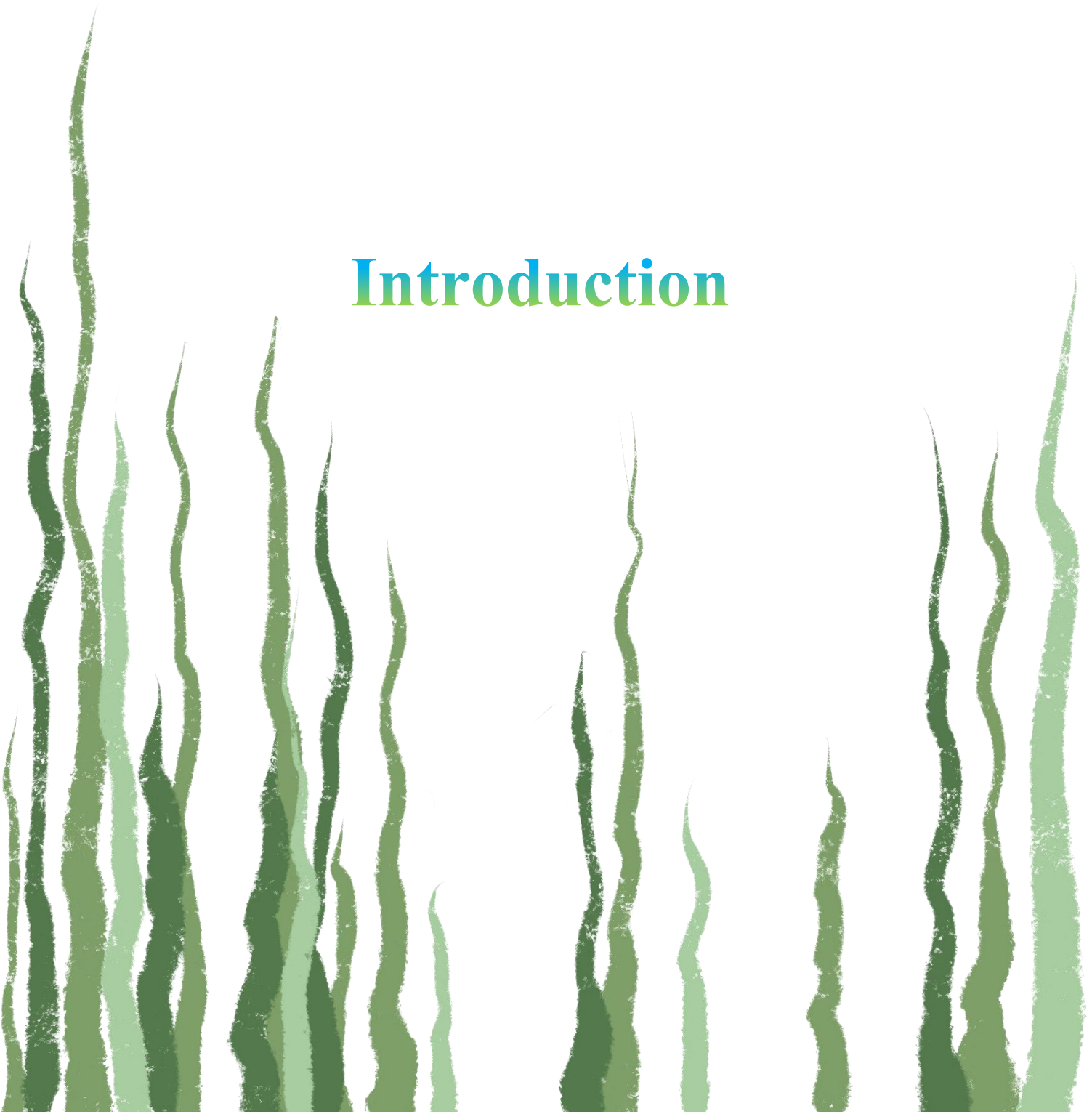
LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Critères de sélection des zones conchylicoles	13
Tableau II.2 : Bandes spectrales de Landsat 8 (source: USGS).	24
Tableau II.3 : Bibliothèques Python utilisées pour le traitement des données.	27
Tableau II.4 : Coefficients de l'algorithme OC3 pour le capteur Landsat/OLI (NASA OceanColor).....	30
Tableau II.5 : Statistiques du maillage	34
Tableau III.1 : Caractéristiques spatiales des conchylicoles	52
Tableau III.2 : Paramètres environnementaux des zones conchylicoles	53

LISTE DES ACRONYMES

AEA	Approche Ecosystémique à l'Aquaculture
Chl	Chlorophylle
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy
CMEMS	Copernicus Marine Environmental Monitoring Service
DHI	Danish Hydraulic Institute
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FAO	Food and Agriculture Organisation
FSR	Factor of Suitability Range
GIZC	Gestion Intégrée des Zones Côtières
HD	Module Hydrodynamique de DHI Mike
MES	Matière en suspension
MPRH	Ministère de la Pêche et des Ressources Halieutique
OSM	Open Street Map
PEM	Planification des Espaces Maritimes
SIG	Système d'information géographique
SST	Sea surface temperature (Température de surface de l'eau)
SW	Module Spectral Waves de DHI Mike
USGS	United State Geological Survey
ZAA	Zone d'Activité Aquacole

Introduction



INTRODUCTION

Aujourd'hui, l'aquaculture représente plus de 47% de la production halieutique mondiale (FAO, 2018). Elle concerne l'élevage et la récolte des mollusques, des poissons et des plantes aquatiques ; et assure un apport en nourriture pour une population en croissance. Présentement, l'aquaculture se lie à de nouvelles approches et techniques qui visent à rendre son développement plus responsable vis-à-vis de l'environnement. Nous en citons l'Approche Ecosystémique de l'Aquaculture (AEA), la Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC) et la Planification de l'Espace Maritime (PEM) qui sont des stratégies globalisantes qui intègrent l'activité aquacole dans l'écosystème au sens large pour favoriser la collaboration entre les secteurs afin d'exploiter les synergies qui se présentent entre les différentes activités en mer et promouvoir ainsi une utilisation durable des ressources.

En Algérie, l'aquaculture est une activité relativement récente même si les premiers essais documentés remontent à près d'un siècle (Chalabi, 2010). Elle a d'ailleurs connu des débuts compliqués en terme de développement, et ce, malgré la volonté apparente de l'état de promouvoir ce secteur avec la mise en œuvre de mesures incitatives comme le financement de projets ou l'aide à l'investissement. Ces efforts semblent, tout de même, enfin porter leurs fruits puisque la production aquacole a enregistré une croissance de +20 % en 2019 par rapport aux années antérieures d'après le ministère de la pêche et des ressources halieutiques (MPRH) et ce chiffre est attendu à la hausse pour les années à venir. Son développement sur le territoire national peut toutefois être optimisé par une meilleure jonction sur le terrain avec les acteurs locaux et aussi en donnant un rôle plus décisif aux organismes scientifiques et centres de recherche en terme d'encadrement et d'orientation ; car ils peuvent permettre d'optimiser la production, de mieux cibler les sites d'implantation et de mesurer davantage les contraintes à l'exploitation et les impacts de l'activité aquacole sur le milieu environnant.

Pendant longtemps, les données environnementales en mer provenaient exclusivement de réseaux de monitoring par capteurs, de sorties en mer, et de campagnes océanographiques. Même si ces méthodes ont toujours leur place dans les sciences de la mer ; car elles assurent une fiabilité des données et une bonne connaissance du terrain, elles demandent beaucoup de moyens et de matériels qui parfois ne sont pas accessibles et elles ne répondent pas toujours à la résolution temporelle et/ou spatiale recherchée. Les technologies actuelles de gestion et de traitement de données constituent un réel apport pour les études en environnement marin ; comme l'observation satellitaire qui produit des données à résolution satisfaisante (30 m dans

ce cas). Aujourd'hui, la télédétection, la cartographie et la modélisation numérique sont des outils indispensables pour résoudre les problématiques environnementales qui le plus souvent sont multifactorielles et exigent des données de plusieurs paramètres.

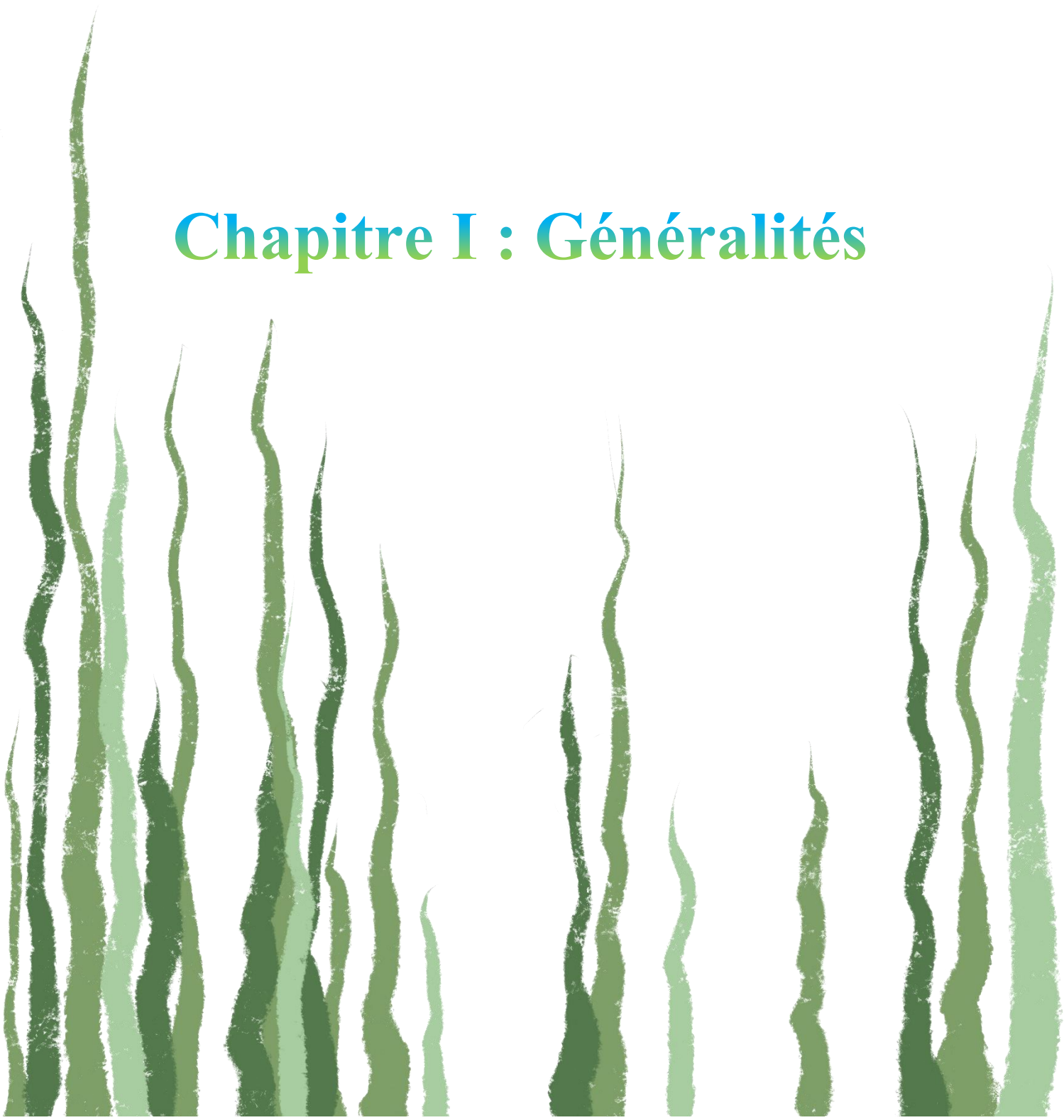
Ce mémoire étant un travail de recherche en ingénierie de l'environnement marin et côtier, nous avons souhaité nous munir d'outils y afférant. L'objectif de l'étude est d'identifier des sites propices à l'activité aquacole, plus précisément, la conchyliculture, dans la région centre du littoral algérien, par la mise en place d'une méthodologie écosystémique qui s'appuie sur les outils actuels de traitement et d'analyse de données.

En effet, le choix d'un site approprié est vital pour le succès du système aquacole ; une bonne sélection de zone résout une grande partie des problèmes de gestion de la culture et permet de minimiser significativement les éventuels effets sur les écosystèmes. La motivation derrière cette étude était d'aboutir à une méthodologie pour le choix des sites favorables à l'élevage conchylicole, qui soit applicable dans des environnements pauvres en données de terrain, soumis parfois à des difficultés sociales et où il y a une volonté d'expansion de l'aquaculture.

Pour répondre à la problématique suivante : quelles sont les zones intéressantes du littoral algérois pour des projets de conchyliculture ? cette étude a comme ambition d'analyser dans quelle mesure les outils numériques actuels peuvent assister le développement et la gestion de projets d'aquaculture.

La première partie de ce mémoire est donc dédiée aux généralités liées à l'élevage conchylicole, ainsi que les impacts qu'il peut avoir sur le milieu marin. La méthodologie d'extraction et de traitement des critères de sélection des zones à potentiel aquacole est ensuite détaillée. Celle-ci consiste en deux étapes : l'analyse des contraintes légales et conflits d'usages et l'analyse multicritère des facteurs environnementaux. Finalement, les résultats de cette recherche seront présentés sous forme de cartes et seront discutés et validés.

Chapitre I : Généralités



I. GENERALITES

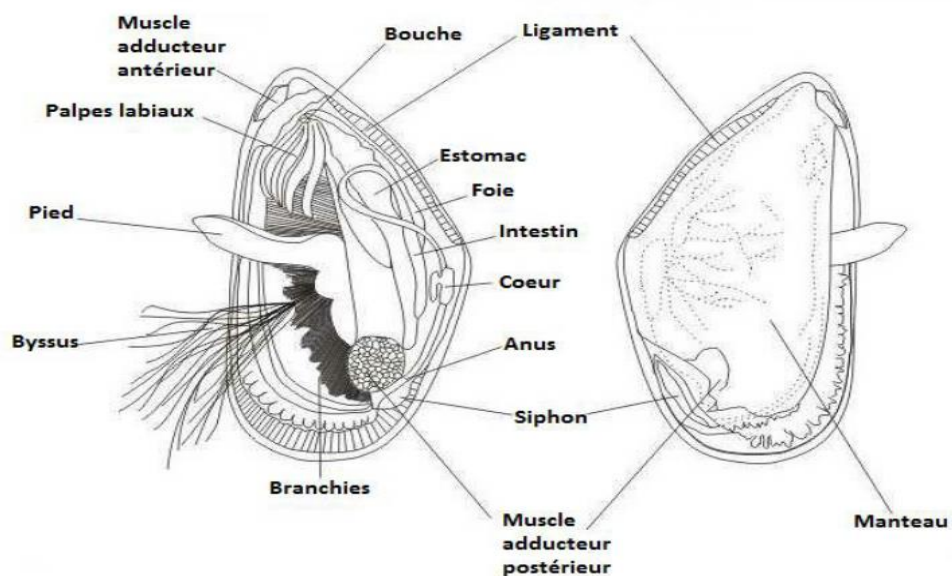
La conchyliculture est l'élevage d'invertébrés aquatiques, tels que les huîtres, les palourdes et les moules. La culture implique une participation au processus d'élevage afin d'améliorer la production, comme l'ensemencement régulier et la protection contre les prédateurs. Les systèmes utilisés pour l'élevage des mollusques ont beaucoup évolué, pour s'adapter à des espèces et des sites d'élevage spécifiques.

Les deux espèces auxquelles nous nous intéressons dans ce travail sont : la moule méditerranéenne *Mytilus galloprovincialis* et l'huître creuse *Crassostrea gigas*.

I.1 *La moule Mytilus galloprovincialis*

Toutes les espèces de moules ont une coquille distinctive dont la coloration va du noir avec des teintes bleues ou violacées au brun foncé et parfois au brun clair. La moule méditerranéenne est de couleur bleu noir et a tendance à grandir plus que les autres espèces, elle peut atteindre jusqu'à 15 cm, mais ne fait généralement que 5-8 cm (figures I.1 et I.2) (FAO, 2004).

Les moules peuvent se déplacer à l'aide de leur pied. Une glande byssus sécrète des filaments appelés aussi byssus qui permettent leur fixation au substrat. Les branchies sont deux paires de larges plaques composées d'un grand nombre de filaments parallèles qui filtrent les particules de nourriture dans l'eau. Une moule de 5 cm de long peut filtrer 5 litres/heure. La digestion s'effectue dans la glande de digestion (de couleur brun-verdâtre) située au centre du corps. Les moules se nourrissent de phytoplancton et de matière organique. Le manteau, en contact immédiat avec l'intérieur de la coquille contient les gamètes (œufs ou spermatozoïdes). Les moules produisent des millions d'œufs, perdant ainsi une quantité considérable de leur réserve de glycogène. Les moules qui se sont récemment reproduites sont si maigres qu'elles ne peuvent pas être commercialisées. La fécondation est externe, les œufs fécondés se développent en larves trochophores (en forme de toupie non segmentée qui se déplace à l'aide de cils aussi appelés "troches") puis en véligères qui sont transportés par les courants. Lorsqu'elles atteignent une longueur de coquille de 0,25 mm, les véligères s'attachent avec leurs fils de byssus à des substrats filamenteux. Elles sont capables de se détacher et de se rattacher à d'autres substrats (FAO, 2004).

Figure I.1 : Moule *Mytilus galloprovincialis* (FAO)Figure I.2 : Anatomie d'une moule *Mytilus sp* (Bachelot, 2010)

I.2 L'huitre *Crassostrea gigas*

L'huitre creuse est munie d'une coque solide, extrêmement rugueuse et stratifiée, qui peut atteindre une taille de 20 à 30 cm. Elle est généralement de forme oblongue mais est souvent déformée et très irrégulière (figures I.3 et I.4). La forme de la coquille varie en fonction de l'environnement. Elle est généralement de couleur blanchâtre avec de nombreuses stries et taches violettes (IFREMER, 2011). L'intérieur de la coquille est blanc, avec une seule cicatrice musculaire parfois de couleur sombre (Harris, 2008). Bien que très variables, les deux valves sont solides mais inégales en taille et en forme. La valve gauche est légèrement convexe et la valve droite est assez profonde et en forme de coupe.

Contrairement aux moules, les huîtres sont hermaphrodites. L'huître creuse est généralement mâle lors de sa première maturation et devient femelle à sa deuxième ou troisième saison de reproduction (dépendamment des sites), tout en gardant la possibilité de redevenir mâle au cours de sa vie (hermaphrodisme alternatif) selon les conditions de milieu (IFREMER, 2011).



Figure I.3 : L'huître *Crassostrea gigas* (FAO)

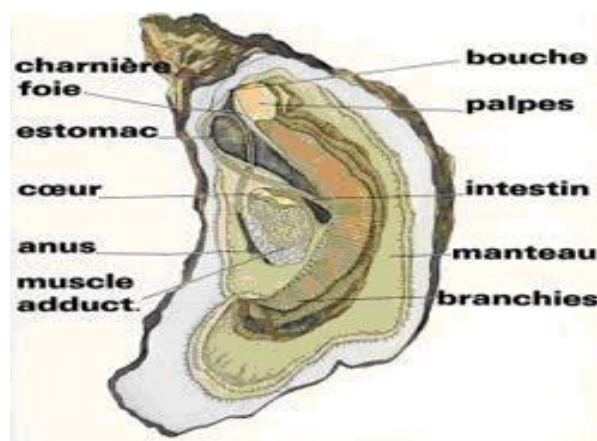


Figure I.4 : Anatomie de l'huître creuse *Crassostrea gigas* (<http://cnc-france.circum.net/>)

I.3 La conchyliculture par filières

Les mollusques commencent leur vie sous forme de larves qui deviennent des naissains et des juvéniles ensuite. Le cycle d'élevage commence par la collecte des larves, qui peuvent être prélevées dans la nature ou produites à partir de géniteurs d'écloserie (selon l'espèce et le lieu).

Les bivalves cultivées sur filières sont généralement cultivées sur des cordes suspendues à des flotteurs de surface. Une filière typique consiste en une corde simple ou double soutenue par des flotteurs en plastique à intervalles réguliers. La ligne est ancrée au fond de la mer ou sur le rivage à chaque extrémité. Le système d'ancrage dépend majoritairement des conditions locales.

La longueur de la ligne peut être modifiée en fonction de l'endroit, mais elle est généralement comprise entre 200 et 400 m. L'espacement des flotteurs en plastique (bouées) dépend de leur flottabilité et de la charge prévue sur la ligne. En général, ils sont espacés de 3 m au maximum. L'espacement entre les filières dépend largement de la taille du navire de service ; il faut prévoir un dégagement suffisant pour permettre au navire de travailler et de manœuvrer en toute sécurité. Chaque dispositif peut être ancré séparément ou peut faire partie d'un ensemble plus grand. Les filières sur lesquelles les moules sont cultivées, ont généralement un diamètre de 12 mm. Des piquets ou des disques en plastique peuvent être insérés dans la torsion de la corde pour fournir un support supplémentaire aux moules. Les filières ont généralement une longueur de 6 à 10 m, selon la profondeur de l'eau (Bompais, 1991). (Figure I.5)

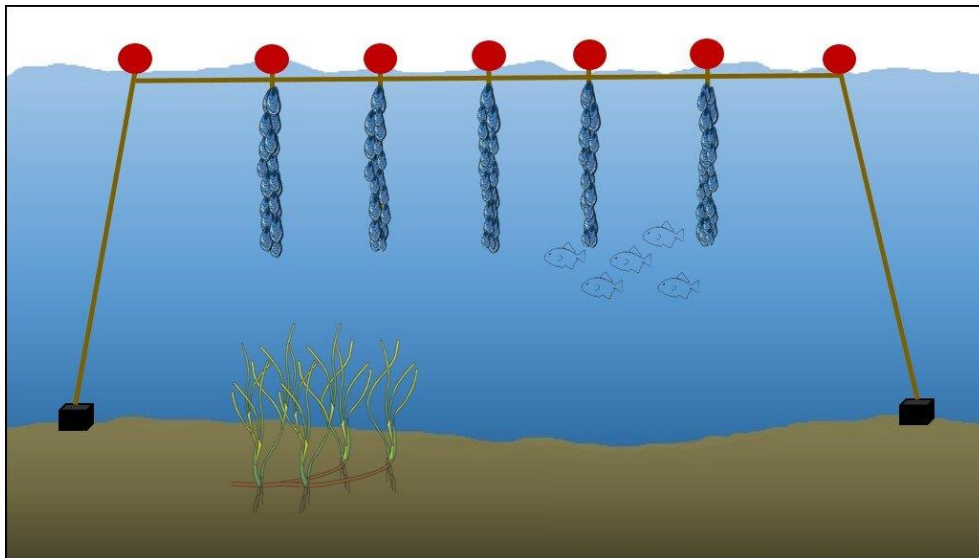


Figure I.5 : Schéma d'élevage conchylicole par système de filières

(<https://www.oceanoculus.com/>)

I.4 Impacts de la conchyliculture sur l'environnement

Les bivalves, étant des filtreurs, absorbent le phytoplancton, le seston, et les particules en suspension pour s'alimenter, et ont tendance à excréter de l'ammonium, de l'orthophosphate et du silicate (Dame et al., 1991) sous formes de fèces et de pseudofèces. Ces excrétiens, riches en nutriments, peuvent être une source d'eutrophisation et peuvent causer l'altération des sédiments aux niveaux des fermes.

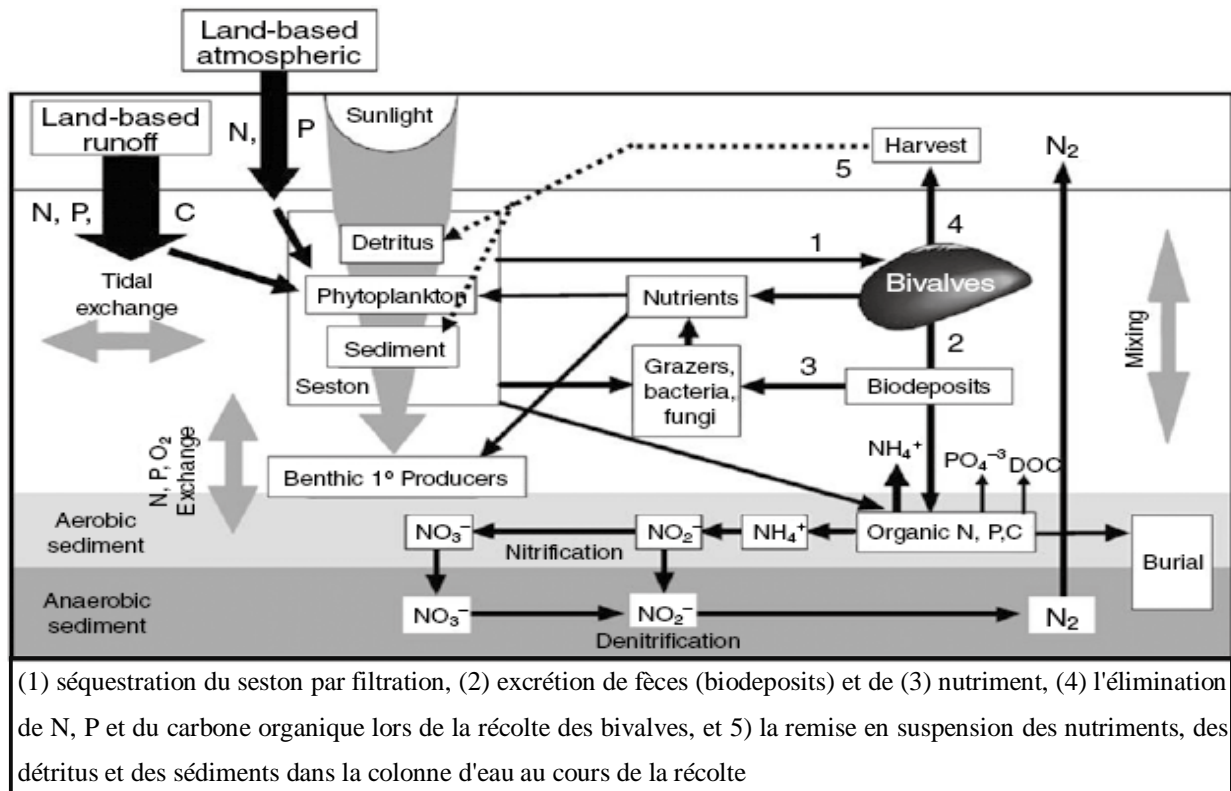


Figure I.6 : Schéma conceptuel de l'interaction de la conchyliculture avec les apports de nutriments dans les écosystèmes côtiers (Kaiser et al., 1998)

La figure I.6 illustre les différentes interactions des bivalves avec les apports de nutriments. La filtration et la biodéposition des bivalves sont considérées comme bénéfiques pour la qualité de l'eau en contrôlant les densités de phytoplancton et en séquestrant les nutriments qui sont retirés du système lorsque les coquillages sont récoltés, enfouis dans les sédiments ou perdus par dénitrification (Newell *et al.*, 2002) réduisant ainsi les risques d'eutrophisation. En plus, les mollusques bivalves renforcent le flux benthique/pélagique par la filtration du phytoplancton, le dépôt de fèces et de pseudofèces dans les sédiments et l'augmentation des taux de reminéralisation des nutriments (Prins, Smaal, 1994).

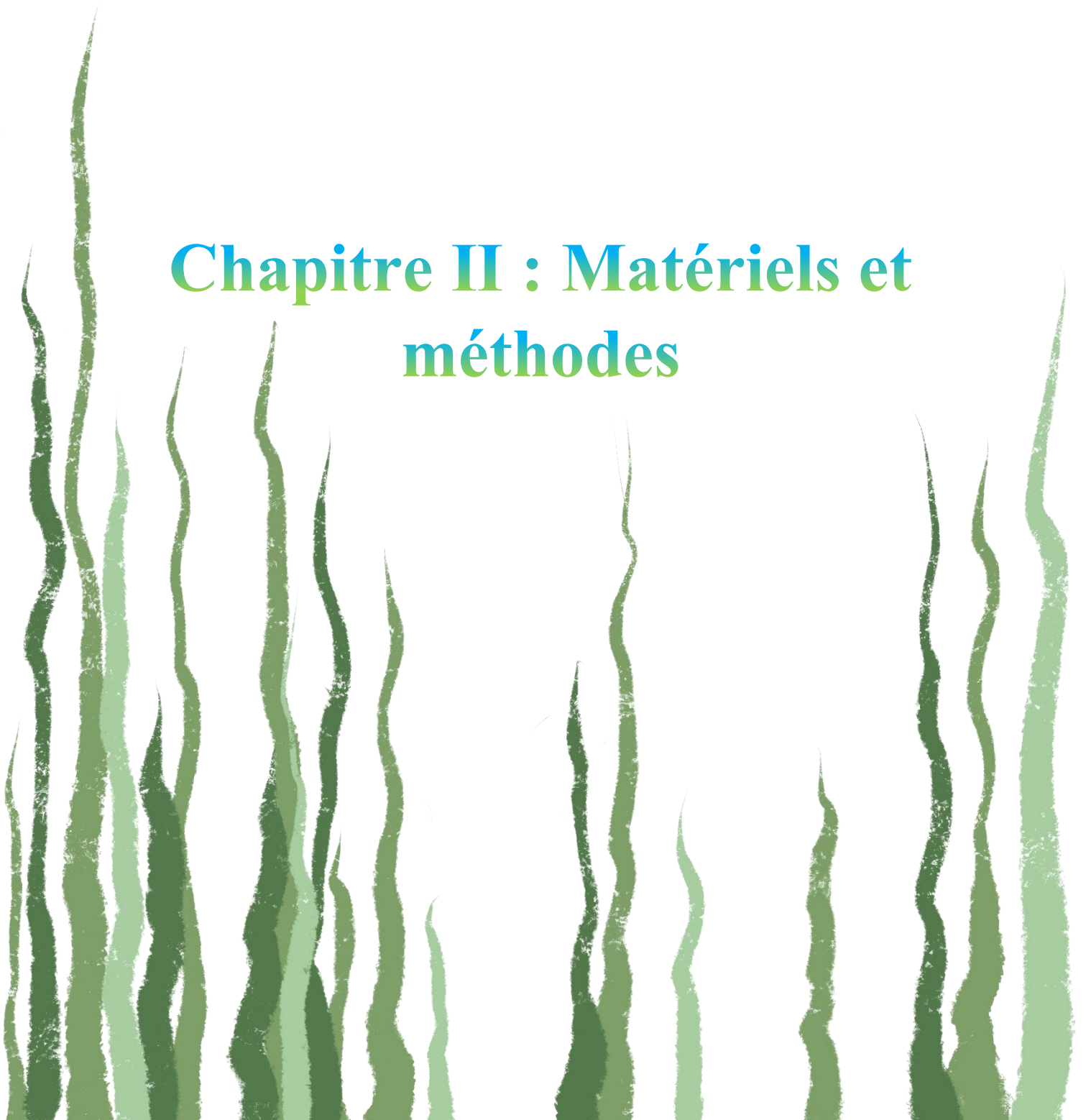
Il a aussi été démontré que l'élevage des bivalves :

- diminue la turbidité ce qui favorise la croissance de végétaux marins bénéfiques (Deslous-Paoli et al., 1998) ;
- réapprovisionne l'écosystème en nutriments et/ou améliore la productivité du phytoplancton (Songsangjinda et al., 2000) ;
- augmente l'abondance des cyanobactéries sous les cultures (Mirto et al., 2000) ;
- augmente l'abondance de la faune benthique résidente (Kaiser et al., 1998).

Il est clair que l'élevage conchylicoles engendre plusieurs effets positifs sur les écosystèmes. Cependant, de grandes densités de bivalves élevés dans des eaux côtières marquées par une faible courantologie, peut modifier les flux d'énergie pélagique-benthique en épuisant les particules en suspension par filtration, en augmentant les taux de sédimentation par le dépôt biologique de fèces et de pseudo-fèces et en diminuant l'oxygène ; ce qui engendre le changement des caractéristiques du sédiment et la composition de la communauté benthique (Callier *et al.*, 2008).

Les effets de la culture des bivalves sur l'environnement sont donc spécifiques au site d'élevage et dépendent surtout de la courantologie et de la densité de la culture. Par conséquent, les sites conchylicoles doivent répondre à un taux élevé de renouvellement des eaux afin d'assurer un apport suffisant d'oxygène à l'élevage et aux populations benthiques et assurer une bonne dispersion des déchets conchylicoles évitant ainsi tout risque de biodéposition accrue sur le sédiment.

Chapitre II : Matériels et méthodes



II. MATERIELS ET METHODES

II.1 Introduction

Comme toute activité côtière ou marine, l'aquaculture doit entrer dans un contexte de Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC). Cette activité doit alors pouvoir exister et se développer en prenant en compte toutes les interactions qu'elle peut avoir avec les différents utilisateurs de l'espace marin ainsi que ses impacts potentiels sur les écosystèmes.

De ce fait, pour déterminer les zones propices à héberger de l'aquaculture, la méthodologie que nous avons utilisée se base sur une approche écosystémique, qui intègre toutes les informations disponibles sur les usagers de l'espace côtier et les différents écosystèmes qui peuvent être affectés.

L'identification des zones est un processus qu'il est important de faire en amont de toute activité aquacole pour assurer son succès et son développement durable (Radiarta *et al.*, 2008). Une localisation appropriée des sites aquacoles permettra d'atténuer le risque d'impact environnemental, de maximiser le rendement économique global et de minimiser les conflits entre l'aquaculture et les autres utilisations des ressources existantes (Frankic, 2003).

L'étude s'applique à l'élevage conchylicole : une des deux activités aquacoles présentes sur le littoral algérien avec la pisciculture. Le choix de ce type d'élevage revient à l'existence de deux fermes de ce type dans la zone d'étude qui serviront à valider nos résultats.

Les étapes suivies durant cette étude ainsi que les critères de sélection des Zones d'Activités Aquacoles (ZAA) ont été inspirés par Silva *et al.* (2011). Cette méthodologie est applicable pour n'importe quel type d'élevage même si les critères de sélection des zones diffèrent. Elle consiste en deux étapes (voir figure II.1) :

- Analyse des contraintes légales et conflits d'usages.
- Analyse multicritère des facteurs environnementaux.

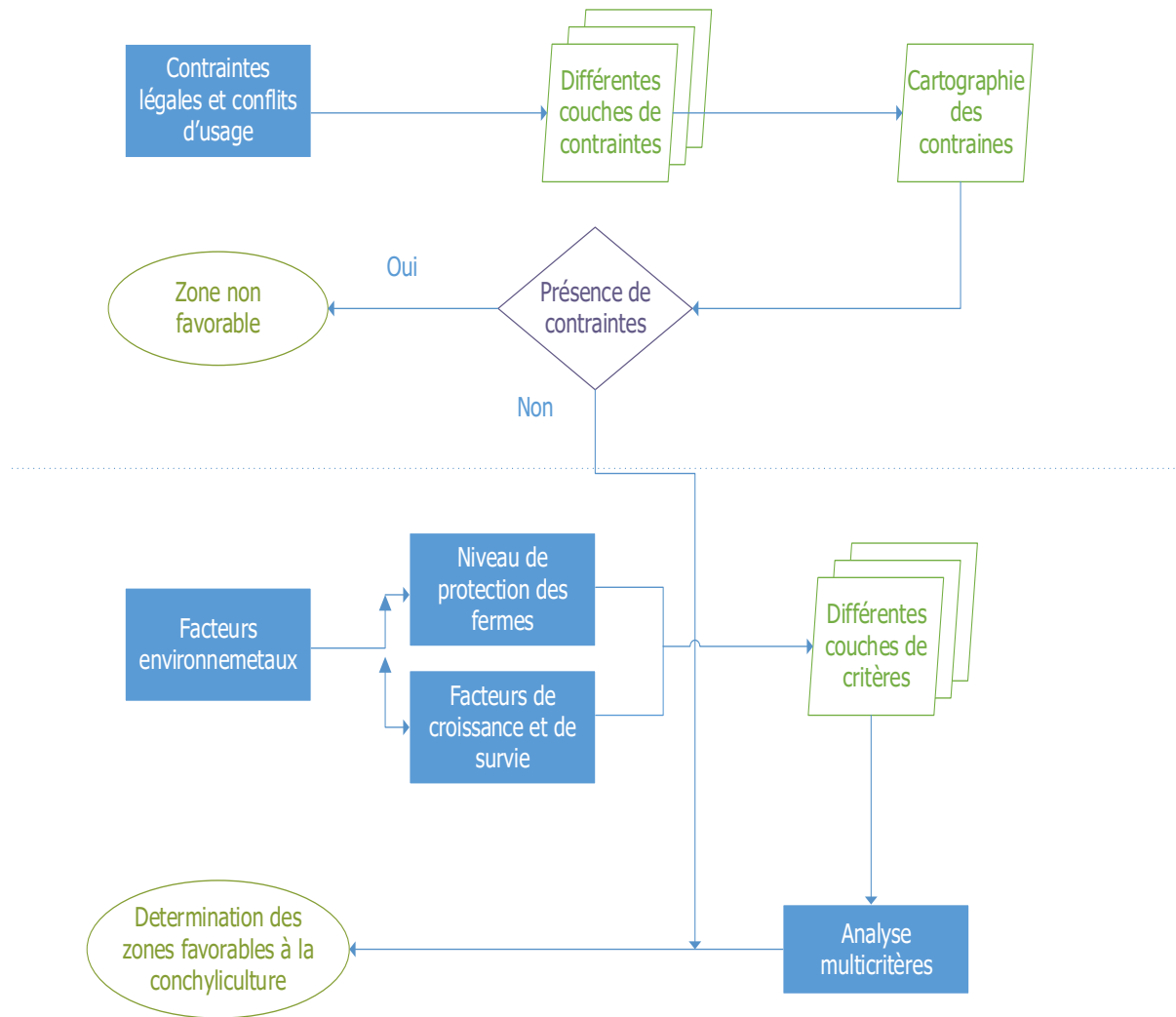


Figure II.1 : La méthodologie appliquée pour l'identification des zones d'activité aquacole.

Les critères de sélection des zones correspondent aux variables environnementales et aux contraintes légales et conflits d’usage qui peuvent avoir une influence directe ou indirecte sur l’activité aquacole. Dépendamment de la région et du type d’élevage, ces critères peuvent varier.

Puisque les données sur le littoral algérien sont récoltées par de multiples acteurs, elles sont difficilement accessibles. Sur ce, cette étude est basée sur des données issues de bases de données internationales, d’images satellitaires et de modèles numériques. Le tableau II.1 illustre les critères choisis ainsi que leurs sources et les valeurs tolérées.

Tableau II.1 : Critères de sélection des zones conchylicoles

	Variable	Sources	Norme	Référence
Facteurs de croissance et de survie	Température (°C)	Landsat 8 TIRS	8 - 34	(Silva et al., 2011)
	Chlorophylle a (µg/L)	Landsat 8 OLI	1 - 55	
	Matières en suspension (mg/L)	Landsat 8 OLI	1 - 160	
Niveau de protection des fermes	Vitesse des courants (m/s)	Modèle Mike21	0,1 - 2	(Brigolin et al., 2015)
	Bathymétrie (m)	Relevés bathymétriques	4 - 25	
	Hauteur des vagues (m)	Modèle Mike21	0 - 3	
Contraintes spatiales légales et conflits d'usage	Distances par rapport aux ports		Moins de 5 km	Circulaire N° 44 du 12 Mai 2014 (Voir Annexe A)
	Distance par rapport à la posidonie (<i>Posidonia Oceanica</i>)		Plus de 800 m	
	Distance par rapport aux zones de trafic maritime		Plus de 5 km	
	Distance par rapport aux estuaires de grands fleuves récepteurs d'eaux usées (urbaines et industriels).		Plus de 2 km	
	Distance par rapport aux autres établissements aquacoles		Plus de 1 km fermes conchylicoles et 5 km piscicoles	

II.2 La zone d'étude

II.2.1 Limites géographiques

Dans cette étude, on s'intéresse à la frange côtière du grand Algérois ; qui définit la région Nord-centre du pays autour d'Alger. La zone comprend la baie de Bou Ismail à l'Ouest, la baie d'Alger au centre et la baie de Zemmouri à l'Est. Elle s'étend sur un linéaire côtier d'approximativement 150 km, entre les références ($36^{\circ}38'00''\text{N}$ et $2^{\circ}22'00''\text{E}$) et ($36^{\circ}48'50''\text{N}$ et $3^{\circ}14'00''\text{E}$).

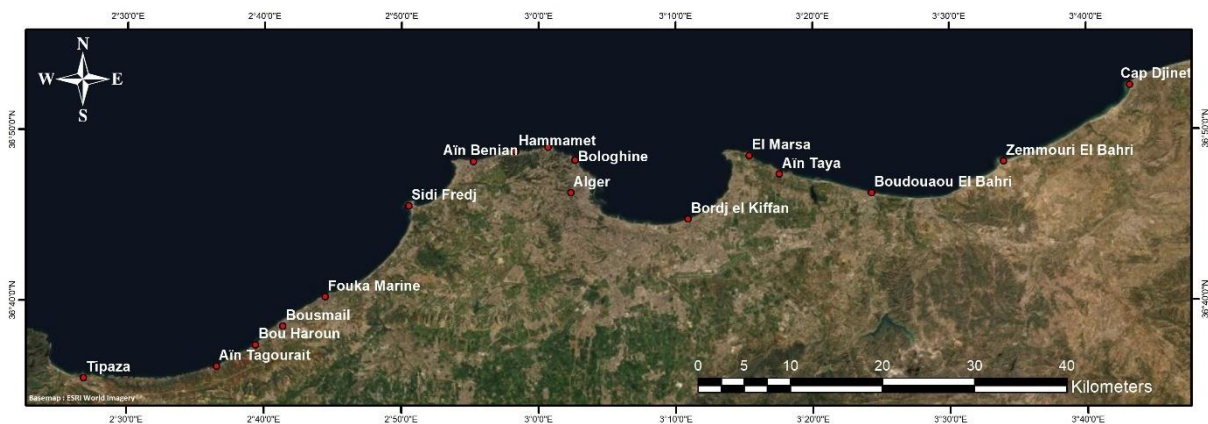


Figure II.2 : Littoral de la zone d'étude, la région centre de la côte algérienne

La région centre est la plus sujette aux activités anthropiques du littoral algérien ; notamment par les unités industrielles, l'urbanisation, les ports de plaisance et/ou de pêche. Son milieu marin est donc très convoité et subit pollution et perturbations des écosystèmes. Cependant, ces activités ne sont pas réparties de manière uniforme sur la zone d'étude, elles sont importantes sur la baie d'Alger, modérées sur la baie de Bou-Ismaïl et minimales sur la baie de Zemmouri (Lamouti, 2010).

II.2.2 Géomorphologie

La morphologie littorale sur toute la zone d'étude est depuis des années fragilisée par la surexploitation des dunes et des plages littorales, ceci entraîne une action de la mer encore plus érosive et une dégradation de l'écosystème et du paysage.

Un exemple de ce phénomène est la baie de Zemmouri qui a connu un recul de ses plages et une altération de son système dunaire (Habiki, Benslama, 2015). Sur cette dernière, la morphologie littorale est dirigée par deux bassins néogènes de l'oued Sebaou et de l'oued Isser

(Grimes, 2010). La baie d'Alger, quant à elle, est composée principalement de promontoires rocheux, de plages et de falaises. Elle subit une érosion importante car elle est directement exposée aux forces hydrodynamiques (Maouche et al., 2009). De Sidi-Fredj vers le mont Chenoua (baie de Bou-Ismaïl), se rencontre une succession de plages où Douaouda marine indique le début des falaises plus ou moins abruptes (Grimes, 2010).

II.2.3 Hydrodynamisme

L'hydrodynamisme sur les côtes algéroises se caractérise par une hauteur moyenne de vagues faibles à moyennes (entre 0,2 m et 3 m d'amplitude) (Otmani et al., 2019). Même si la hauteur de 1 m semble être la plus représentative sur la baie d'Alger (Hemdane, 2016), les vagues peuvent atteindre une hauteur maximale de 3 m lors des tempêtes ou des séismes (Yelles-Chaouche, 2009).

II.2.4 Contexte environnemental

Près de 45% de la population algérienne réside et travaille dans les wilayas littorales et augmente considérablement en période estivale. Cette forte anthropisation génère plusieurs formes de pollutions (organique, chimique, thermique, bactérienne...) qui ont un impact sur la durabilité des ressources, la préservation des écosystèmes, et la santé humaine (Grimes, 2010).

Les industries du territoire algérien se sont toutes concentrées dans la bande littorale où l'on recense plus de 50 % des unités industrielles nationales. La zone algéroise concentre à elle seule 38 % des unités industrielles du pays (Diveco, 2017).

Pour ce qui est de la pollution hydrique, les zones côtières peuvent être confrontées à diverses sources de pollution. Nous pouvons notamment citer :

- Les rejets domestiques qui sont une source de pollution organique.
- Les rejets des industries chimiques et pétrochimiques à savoir : les métaux lourds, les hydrocarbures et les composés organiques, l'acide sulfurique, les matières fibreuses et les substances chromiques, les éléments basiques, les composés azotés, les cyanures, les catalyseurs usagés et les goudrons, la soude, les pesticides, les détergents et les organochlorés (Diveco, 2017).
- Les rejets des centrales thermiques : les eaux de refroidissement des unités de Sonelgaz augmentent la température des eaux marines et leur teneur en chlore (Grimes, 2010).
- Le lessivage des sols des grands périmètres agricoles qui élève la teneur en éléments nutritifs des zones marines voisines (Grimes, 2010).

Les eaux usées sont l'une des causes majeures, si ce n'est la plus importante, de dégradation de l'écosystème marin côtier algérien. Ces eaux usées chargées pour l'essentiel de matières organiques, de matières en suspension, de détergents et d'huiles lubrifiantes génèrent des pollutions organiques et chimiques. Cette situation est aggravée par le déficit en traitement des eaux avant leur rejet en mer, ainsi que l'absence de prétraitement dans les entreprises et de la prise en charge dans l'élimination des boues d'épuration (Diveco, 2017).

II.2.5 Réseau hydrographique

Les différents oueds et rejets déversant dans le secteur centre ont été recensés comme suit :

Baie de Bou-Ismaïl (Grimes, 2010) :

- Oued Mazafran, débouchant entre Zéralda et Douaouda.
- Oued Nador, débouchant dans la petite baie de Chenoua.
- Oued Beni-Messous, entre le Ras Acrata et la pointe de Sidi – Fredj et se déversant dans la mini baie des Dunes (baie d'El Djamila).

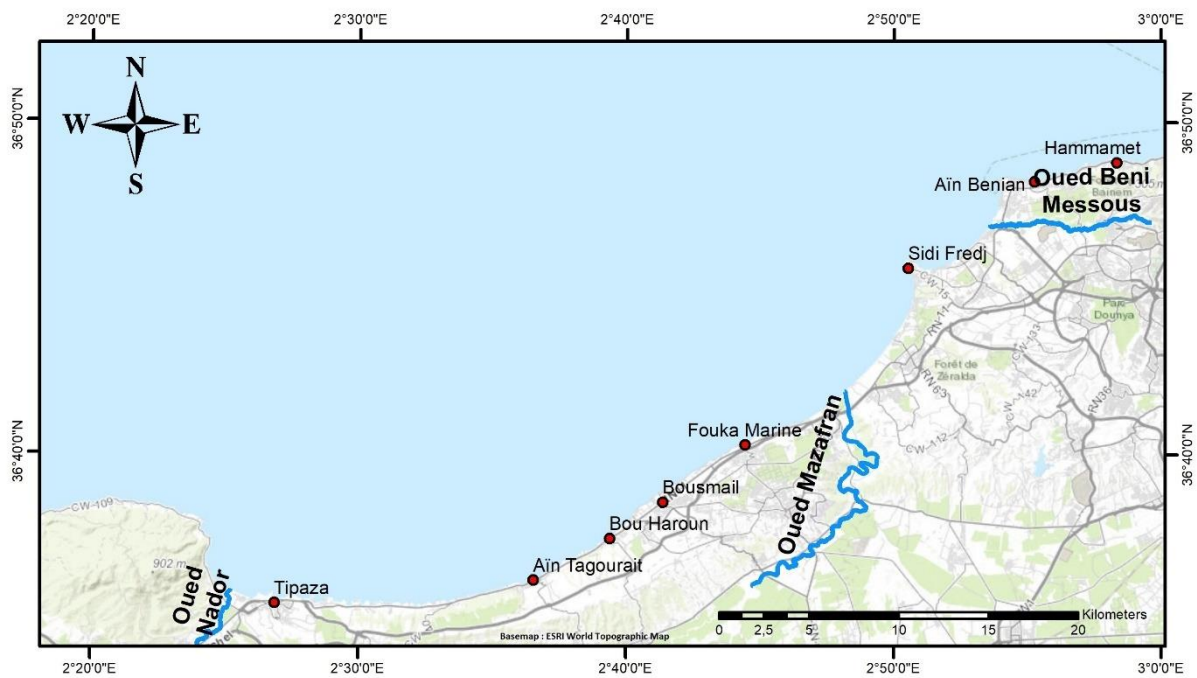


Figure II.3 : Les Oueds dans la baie de Bou-Ismaïl

Baie d'Alger (Grimes, 2010) :

- Oued El Harrach.
- Oued El Hamiz.

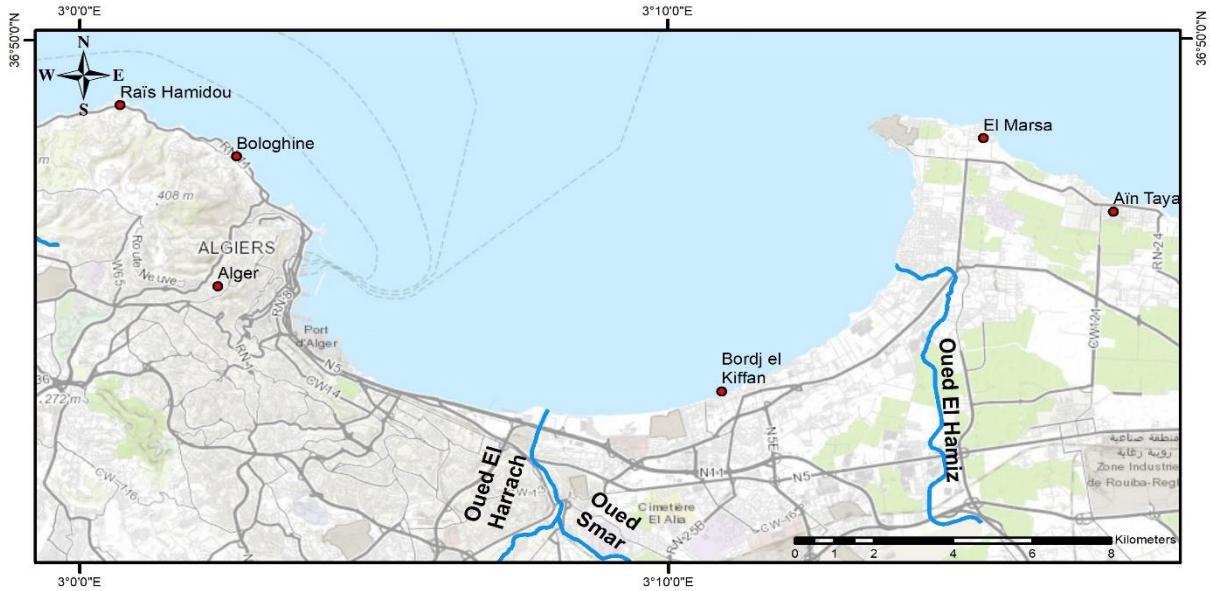


Figure II.4 : Oueds dans la baie d'Alger

Baie de Zemmouri (Bouhmadouche, 2015) :

- Oued Isser.
- Oued Merdja.
- Oued Boumerdes.
- Oued Tatareg.
- Oued Corso.
- Oued Boudouaou.
- Oued et lac de Reghaia.

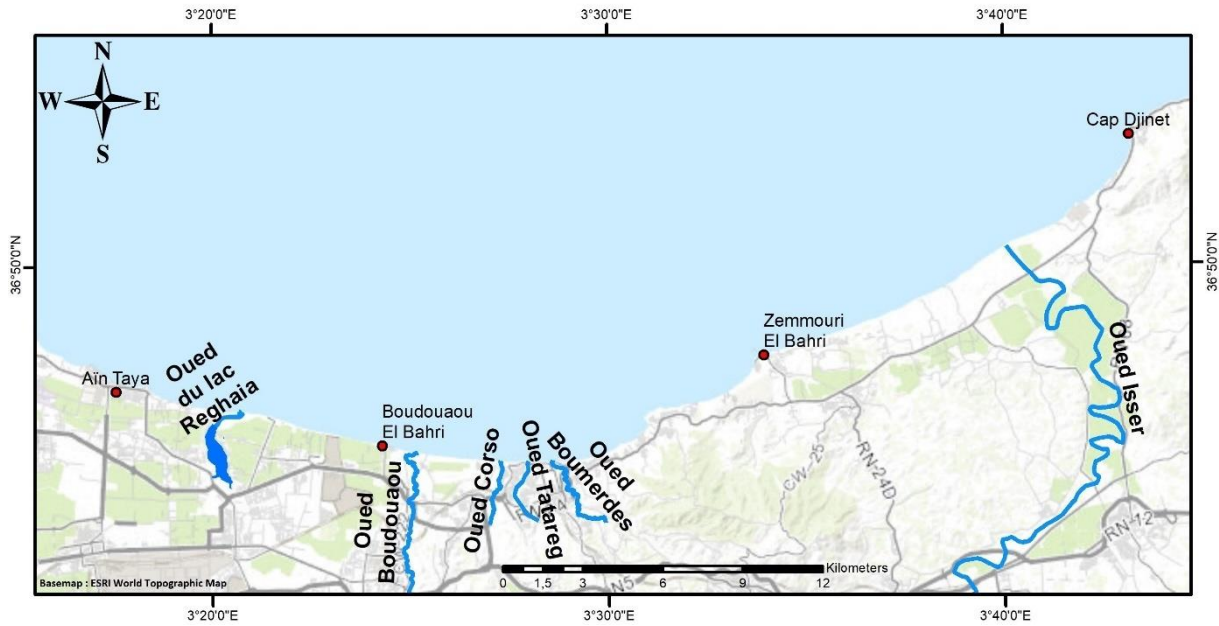


Figure II.5 : Oueds dans la baie de Zemmouri.

II.3 Analyse des contraintes légales et des conflits d’usage

Cette étape consiste en la cartographie de toutes les activités qui existent dans la zone d’étude et susceptibles affecter l’activité aquacole. Ceci rentre dans un contexte de Planification Maritime Spatiale, un outil important pour le développement durable des zones côtières.

Nous retrouvons, notamment :

- Le trafic maritime, localisé essentiellement dans la baie d’Alger (Figure II.6).
- Plusieurs sites industriels, sources de rejets et de polluants emportés par les oueds jusqu’à la mer.
- Des ports de pêche, de plaisance et de commerce (port d’Alger).
- Des plages, qui sont des lieux de détente et des destinations pour les touristes pendant la saison estivale.
- Des établissements aquacoles, dont deux fermes conchylicoles et une ferme piscicole.

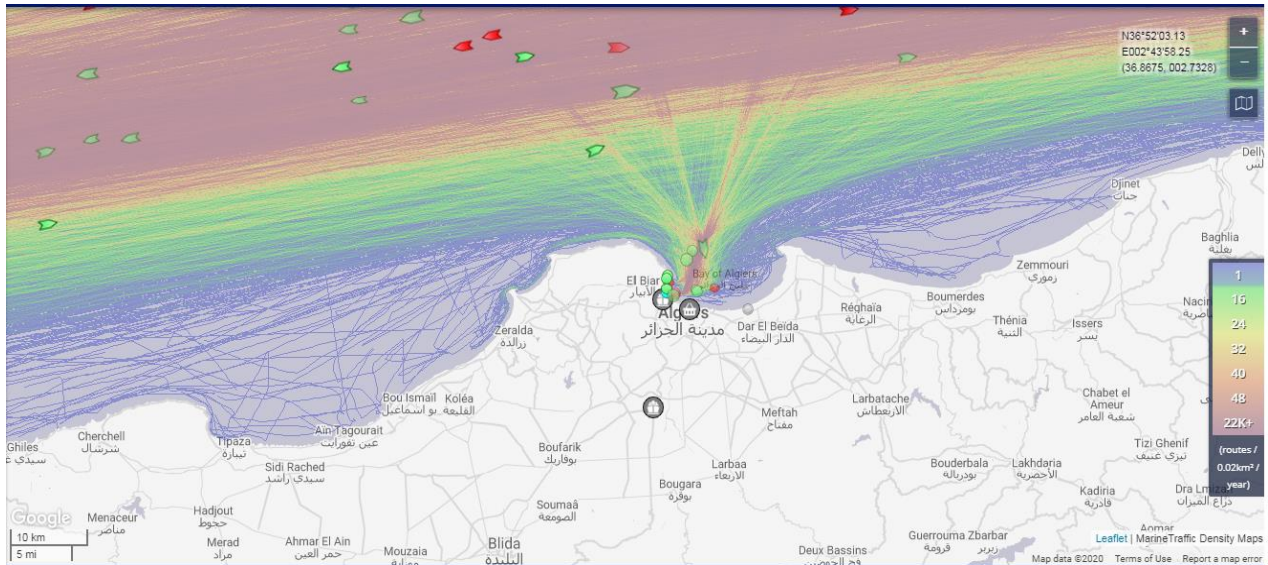


Figure II.6 : Densité du trafic maritime dans la zone d'étude (Cercles et flèches en rouge : Navires pétroliers. Cercles et flèches en vert : Navires de marchandise)

[\(https://www.marinetraffic.com/\)](https://www.marinetraffic.com/)

Tout projet aquacole doit prendre en considération les différents écosystèmes qui forment une réelle richesse biologique de par leurs services écosystémiques. Les écosystèmes remarquables de *Posidonia oceanica* sont présents sur plusieurs étendues de la zone d'étude. Ceci dit, les travaux de cartographie de la Posidonie sont localisés essentiellement dans la baie de Bou-Ismaïl, les données obtenues sont donc limitées à cette région (Figure II.7, Figure II.8, Figure II.9).

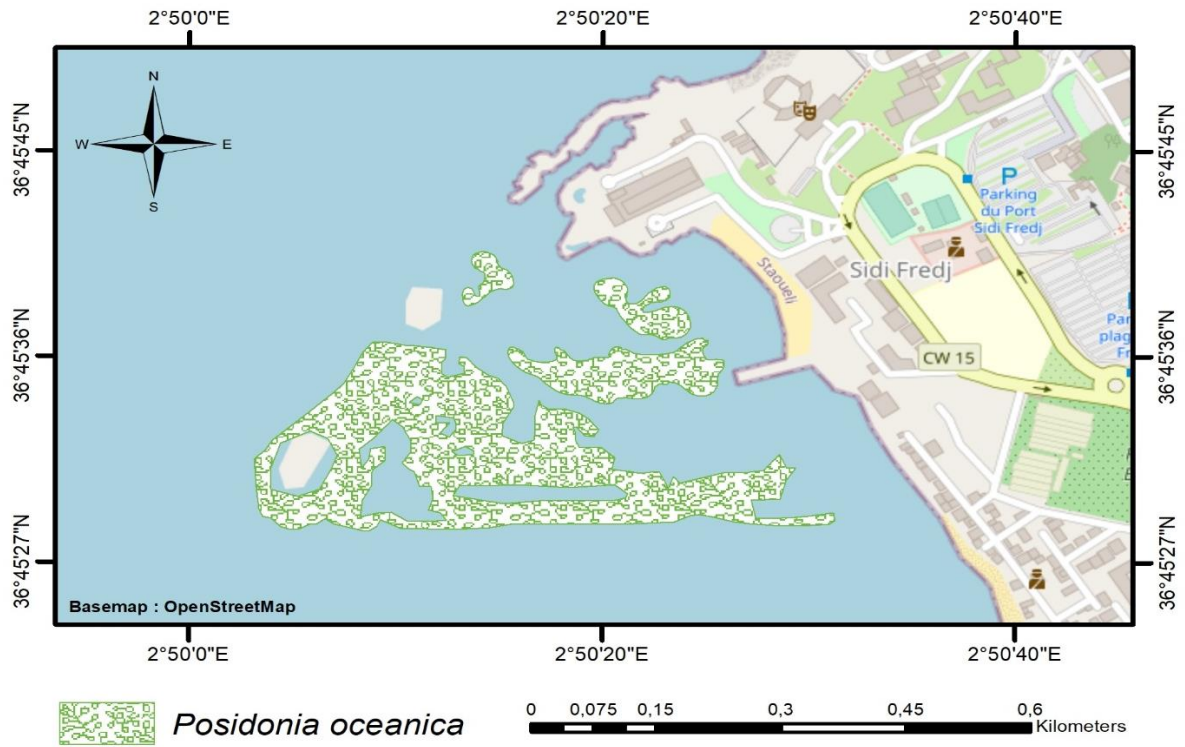


Figure II.7 : Cartographie de la Posidonie dans la région de Sidi Fredj (Lamouti, 2010, modifié)

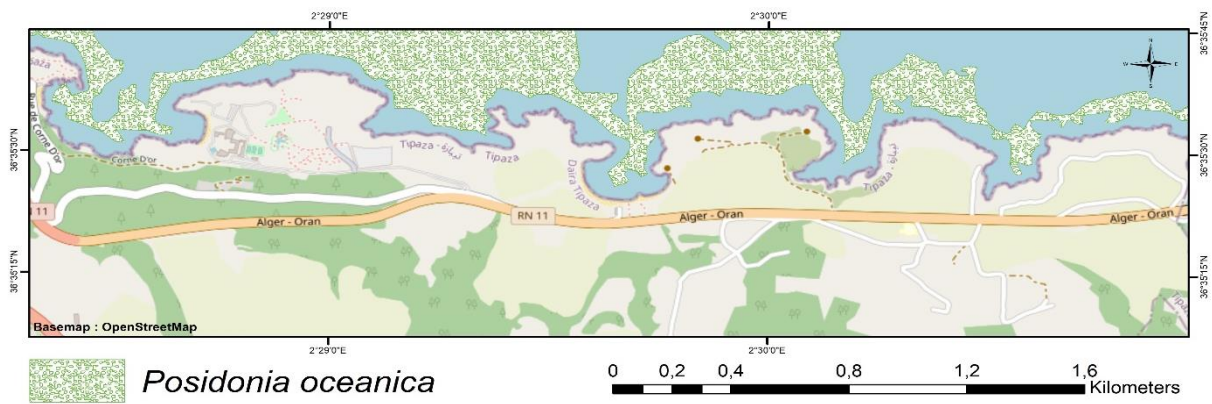


Figure II.8 : Cartographie de la posidonie dans les Anses de Kouali (Zerrouk, 2016, modifié)

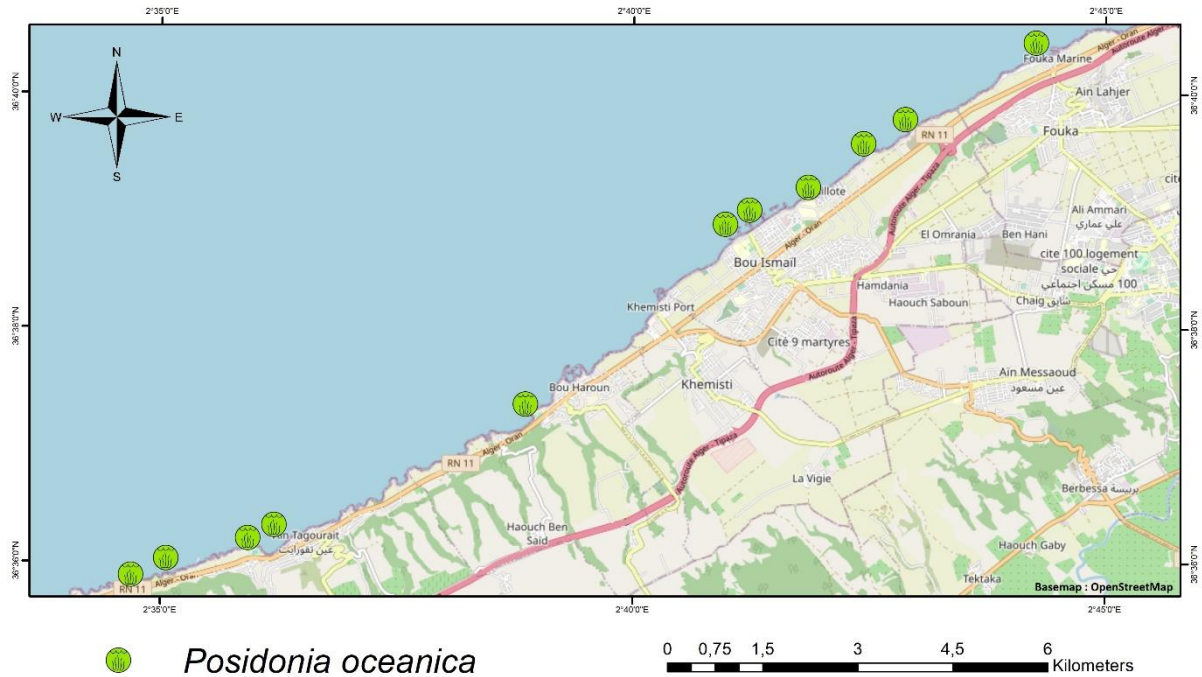


Figure II.9 : Relevés ponctuels de la Posidonie dans la région de Bou-Ismaïl (à partir de <https://www.navionics.com/>)

II.3.1 Sources de données

OpenStreetMap (OSM)

OSM est une base de données qui fournit gratuitement des données géographiques couvrant le monde entier. Ces données correspondent à des informations qui se trouvent sur le terrain notamment, le réseau routier, les réseaux hydrographiques, le couvert végétal, l’urbanisation, les infrastructures et les activités humaines de toute sorte.

Les données OSM ont été téléchargées à partir de la plateforme Overpass-Turbo (<https://overpass-turbo.eu/>) qui permet d’effectuer des requêtes et extraire les informations souhaitées dans une zone donnée. Les données téléchargées sont sous format vecteur.

II.3.2 Outils et logiciels

ArcGIS

ArcGIS est un système d'information géographique (SIG) géré par « Environmental Systems Research Institute » (ESRI). Il est utilisé pour créer des cartes, compiler des données géographiques, les analyser et les partager. Pour cette étude nous avons utilisé la version 10.5 d'ArcGIS pour cartographier et traiter la majorité de nos données.

II.3.3 Acquisition et traitement des données

Les étapes entreprises pour l'acquisition et le traitement des données de contraintes légales et conflits d'usage sont illustrées sur la figure II.10.

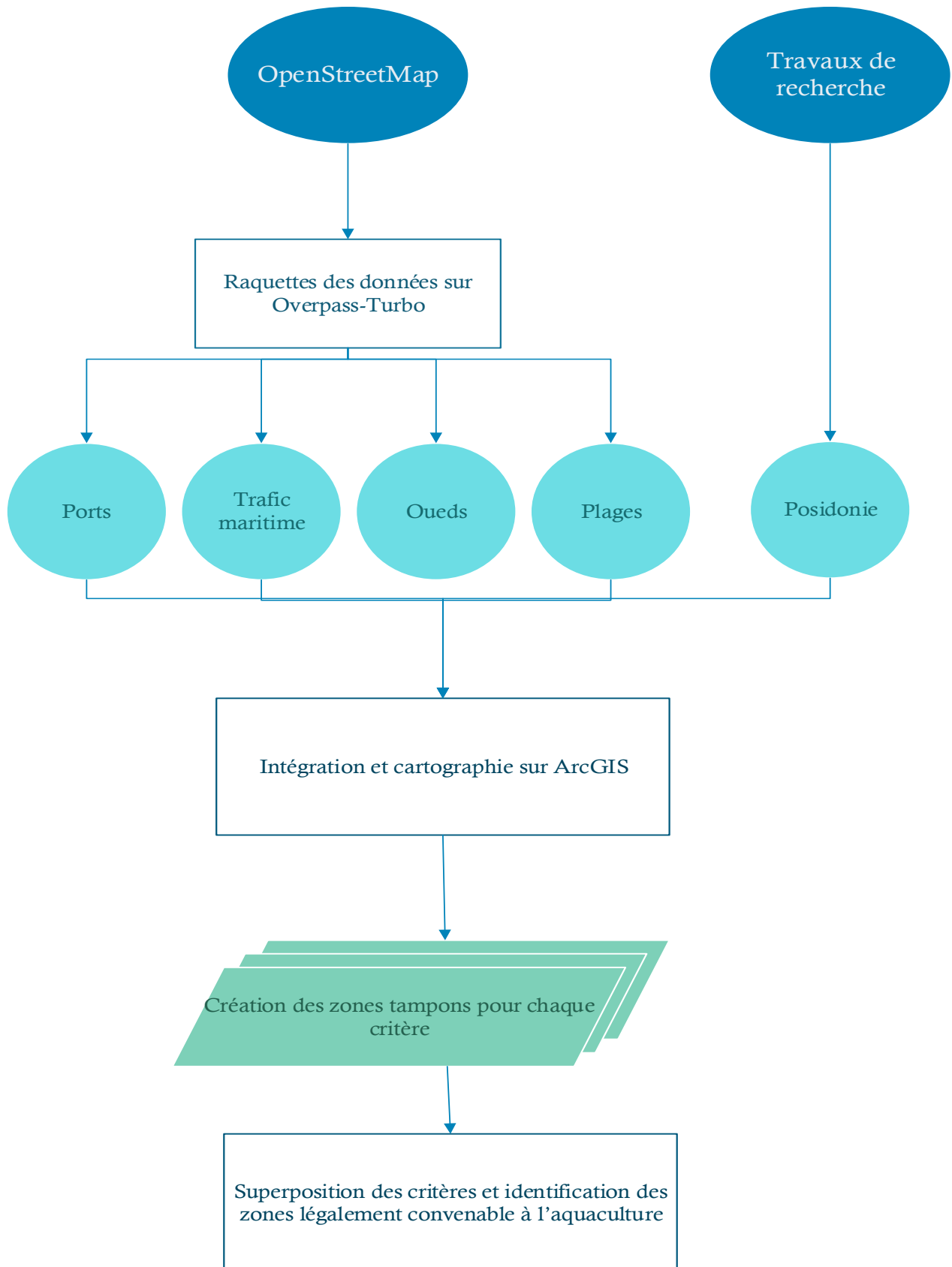


Figure II.10 : Procédures d’acquisition et de traitement des données de contraintes légales et conflits d’usage

II.4 Analyse multicritère des facteurs environnementaux

Les facteurs environnementaux correspondent aux paramètres physico-chimiques et biologiques de l’eau de mer qui influent sur la croissance et la survie de l’élevage, ainsi que les paramètres physiques du milieu qui affectent l’installation aquacole.

II.4.1 Facteurs de croissance et de survie

II.4.1.a Sources de données

Les données sur ces 3 variables ont été extraites à partir d’images satellitaires Landsat 8. Landsat 8 est un satellite américain de l’USGS (U.S Geological Survey) spécialisé en l’observation de la terre à moyenne résolution. Landsat 8 transporte à son bord 2 capteurs qui couvrent 11 bandes spectrales illustrées dans le Tableau II.2.

Tableau II.2 : Bandes spectrales de Landsat 8 (source: USGS).

Landsat 8	Bandes spectrales	Longueur d’onde (micromètres)	Résolution (mètres)
Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Band 1 - Coastal aerosol	0,43 – 0,45	30
	Band 3 - Blue	0,45 – 0,51	30
	Band 4 - Green	0,53 – 0,59	30
	Band 5 - Red	0,64 – 0,67	30
	Band 6 - Near Infrared (NIR)	0,85 – 0,88	30
	Band 7 - SWIR 1	1,57 – 1,65	30
	Band 8 - SWIR 2	2,11 – 2,29	30
	Band 9 - Panchromatic	0,50 – 0,68	15
	Band 10 - Cirrus	1,36 – 1,38	30
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10,60 – 11,90	100
	Band 12 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11,50 – 12,51	100

II.4.1.b Logiciels, langages et bibliothèques

Google Earth Engine

Earth Engine est une plateforme d'analyse scientifique et de visualisation de jeux de données géospatiales. Il héberge des images satellitaires et les emmagasine dans des archives de données publiques qui comprennent des images historiques de la Terre remontant à plus de quarante ans (Figure II.11). Les images, insérées quotidiennement, sont ensuite mises à disposition pour l'exploitation de données à l'échelle mondiale.

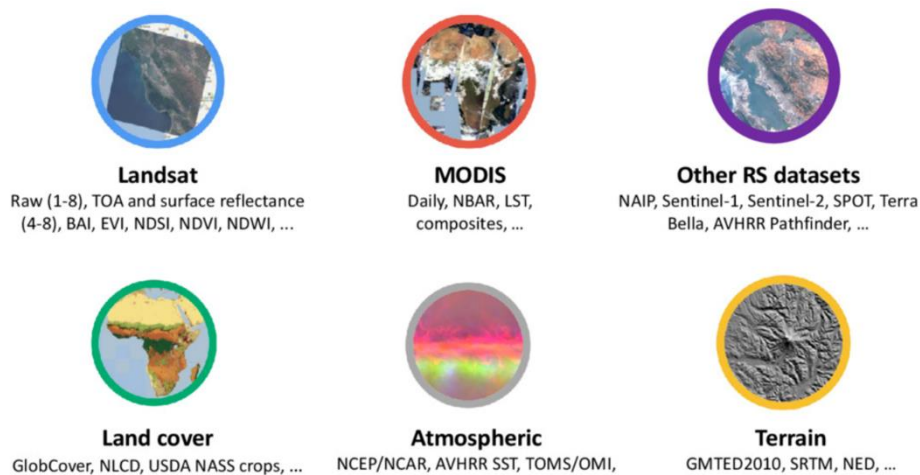


Figure II.11 : Les différentes données fournies par Earth Engine (source : United States Geological Survey USGS).

L'accès à la plateforme Earth Engine se fait par le biais d'un navigateur web via le lien <https://earthengine.google.com/>. Le traitement des données s'effectue sur le Code Editor qui permet d'écrire des programmes avec le langage JavaScript (Figure II.12). Ces programmes peuvent être des algorithmes de traitement, des procédures d'automatisation et des analyses statistiques.

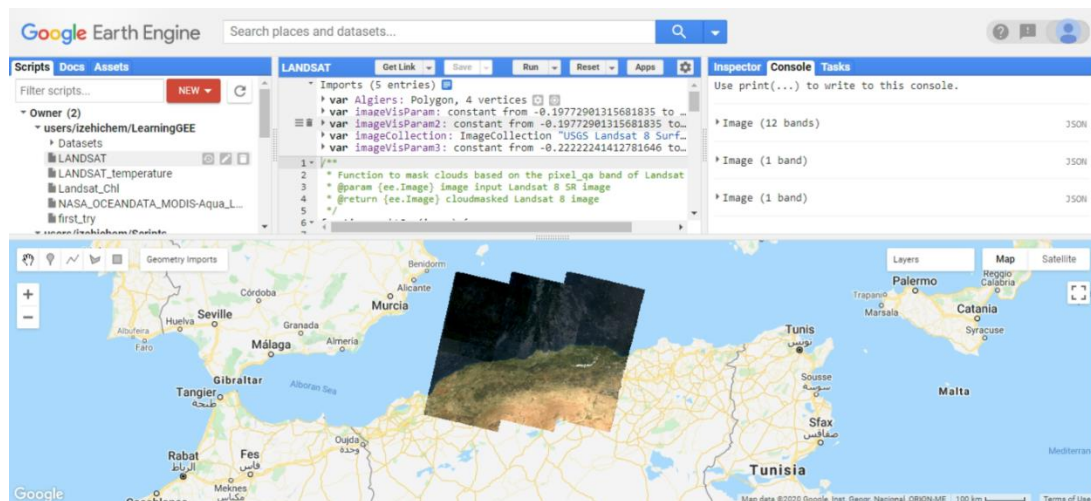


Figure II.12 : Le code editor de Earth Engine.

Python

Python est un langage commun de programmation pour le traitement et l'analyse de données. Il englobe une large communauté et dispose de plusieurs bibliothèques dans de nombreuses disciplines, l'analyse géo-spatiale et la cartographie ne sont pas en reste.

Une librairie dans Python correspond à une collection de fonctions et de méthodes qui permettent d'exécuter des tâches sans devoir écrire plusieurs lignes de code. Python peut inclure une multitude de bibliothèques pour une variété d'applications. L'essentiel des bibliothèques utilisées dans ce travail sont dédiées au traitement des données (Tableau II.3).

Tableau II.3 : Bibliothèques Python utilisées pour le traitement des données.

Librairies	Description
Numpy	NumPy est une bibliothèque pour le langage de programmation Python, ajoutant le support de grands tableaux et matrices multidimensionnels, ainsi qu'une grande collection de fonctions mathématiques de haut niveau pour opérer sur ces tableaux. (https://numpy.org/)
Pandas	Pandas est une bibliothèque logicielle écrite pour le langage de programmation Python pour la manipulation et l'analyse des données. Elle propose notamment des structures de données et des opérations de manipulation de tableaux numériques et de séries temporelles. (https://pandas.pydata.org/)
Earth Engine	Cette librairie permet l'accès à la base de données Earth Engine et offre des fonctions de manipulation, de traitement et de téléchargement de ces données. (https://github.com/google/earthengine-api)
Folium	Folium permet de visualiser facilement les données qui ont été manipulées en Python sur une carte interactive. (https://python-visualization.github.io/folium/)
GeeHydro	Librairie qui donne la possibilité de visualiser les données de Earth Engine ainsi que les inondations. (https://github.com/giswqs/geehydro)
Xarray	Xarray est un projet open source et un package Python qui facilite le travail avec des tableaux multidimensionnels étiquetés. (http://xarray.pydata.org/en/stable/)
Cartopy	Cartopy est une librairie Python conçue pour le traitement de données géospatiales afin de produire des cartes et autres analyses de données géospatiales. (https://scitools.org.uk/cartopy/docs/latest/)
Matplotlib	Matplotlib est une librairie qui permet la création de graphes et de figures de très haute qualité. (https://matplotlib.org/)

II.4.1.c Acquisition des données : température, chlorophylle et MES

Ces trois variables ont été extraites à partir des images Landsat 8 moyennées par mois sur la période entre 2014 et 2019. Les images utilisées sont des images en réflectance de surface avec le matricule LANDSAT/LC08/C01/T1 sur la plateforme Earth Engine. Ces images sont corrigées atmosphériquement avec l'algorithme LaSRC. (Source : Google Earth Engine)

Les procédures de filtration et de traitement des images Landsat 8 ont été effectuées avec un code python (Annexe B) dont l'algorithme est illustré sur la figure II.13.

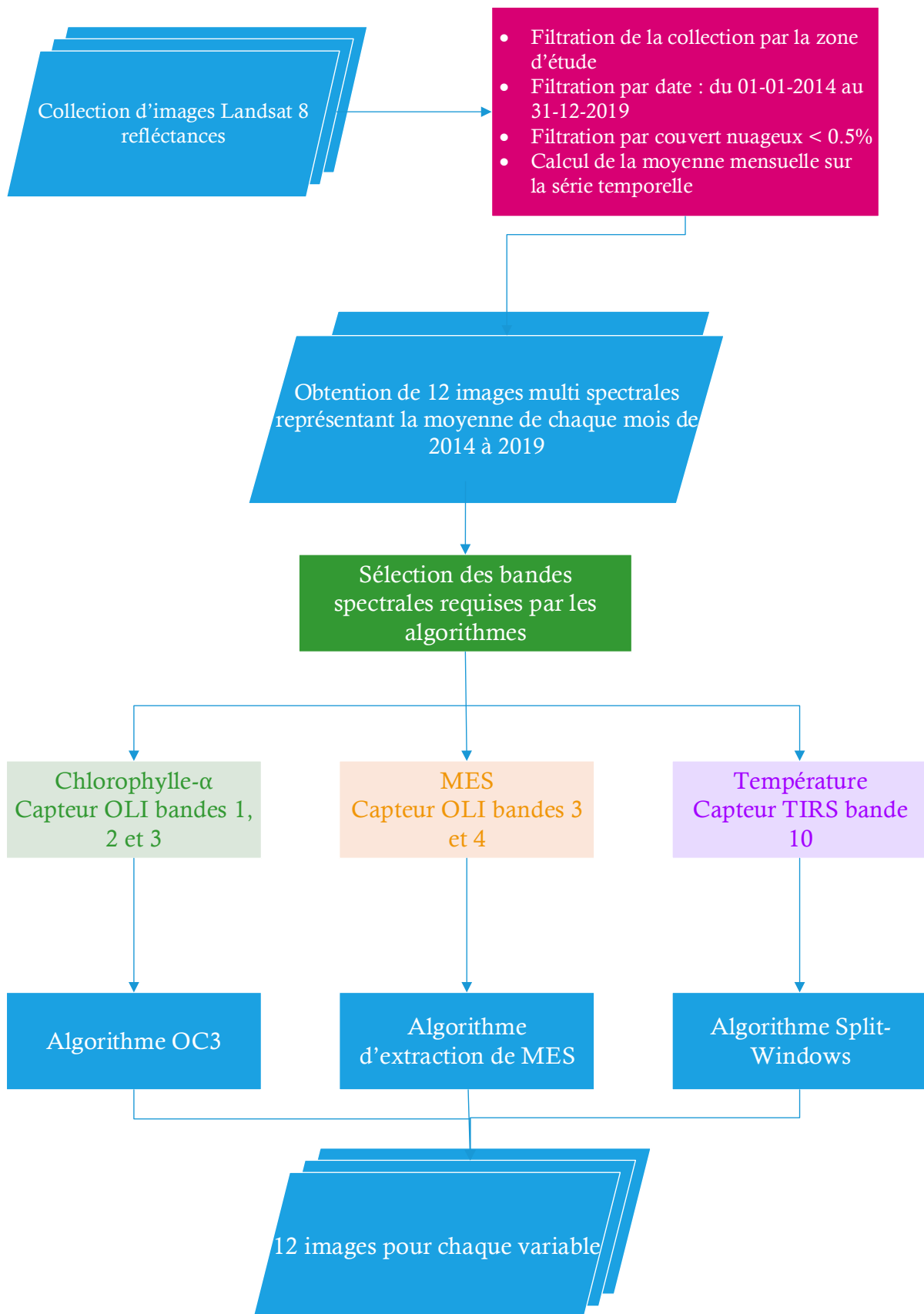


Figure II.13 : Procédure de traitement des images Landsat 8 pour l'extraction de la chlorophylle, la température et les MES

La chlorophylle

L'extraction de la chlorophylle à partir des images Landsat 8 s'est effectuée avec l'algorithme OC3 (O'Reilly et al., 1998) en utilisant la formule suivante :

$$\log_{10}(chl\ \alpha) = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i \log_{10}\left(\frac{R_{rs}(\lambda_{blue})}{R_{rs}(\lambda_{green})}\right)^i \quad (1)$$

Où a_0 et a_i sont des coefficients spécifiques au capteur (Tableau II.4), $R_{rs}(\lambda_{blue})$ qui correspond à la plus grande valeur entre la bande 443 nm et 483 nm, tandis que $R_{rs}(\lambda_{green})$ représente la bande 555 nm sur le capteur OLI à bord de Landsat 8

Tableau II.4 : Coefficients de l'algorithme OC3 pour le capteur Landsat/OLI (NASA OceanColor).

OC3 L8/OLI	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
	0,2412	-2,0546	1,1776	-0,5538	-0,4570

Matières en suspension (MES)

La formule proposée par Nechad *et al.* (2010) a été utilisée pour le calcul des MES :

$$MES\ (g\ m^{-3}) = A^{\rho_w} \frac{\rho_w}{1 - \rho_w / C^{\rho}} \quad (2)$$

Où $\rho_w = R_{rs}(655) * \pi$ la réflectance de la bande 4 de Landsat/OLI, $A^{\rho} = 289,1$ et $C^{\rho} = 16,86$ (Nechad *et al.*, 2010).

La température de surface (SST)

L'algorithme Split Windows, modifié par Cahyono *et al.* (2017) a été utilisé pour le calcul de la SST et s'exprime par :

$$SST\ (^{\circ}C) = BT_{10} + (2,946 \times (BT_{10} - BT_{11}) - 0,038) \quad (3)$$

BT_{10} et BT_{11} correspondent à la température de rayonnement des bandes 10 et 11 de Landsat8/TIRS.

II.4.2 Niveau de protection des fermes

II.4.2.a La bathymétrie

La bathymétrie est la science qui étudie les fonds des milieux subaquatiques (océan, mer, fleuve, etc.) afin d'en déterminer la topographie. En pratique, elle renseigne sur la profondeur en chaque point du domaine d'étude. Pour ce travail, la donnée bathymétrique est une donnée clé ; elle constitue l'un des critères de sélection des zones propices à l'élevage conchylicole et sert aussi comme donnée d'entrée pour effectuer le calcul hydrodynamique.

En règle générale, les mollusques peuvent être cultivés à des profondeurs comprises entre 4 et 25 m (Longdill et al., 2007). La profondeur minimale est définie par la longueur de la suspension d'élevage ; car celle-ci ne doit jamais toucher le fond. Et une profondeur qui dépasse les 25 mètres impose des installations longues et plus encombrantes et complique la mise à l'eau et la surveillance du matériel (Bompais, 1991). Ceci-dit, cet intervalle peut varier dépendamment des conditions du milieu ; du type de fond, de la courantologie, et des moyens dont disposent les fermes.

II.4.2.b L'hydrodynamique

L'hydrodynamique définit les interactions entre le mouvement des liquides et le mouvement des corps solides dans un liquide. En conchyliculture, l'hydrodynamique a un effet à chaque phase de l'élevage ; elle interagit avec d'autres facteurs environnementaux, tels que la salinité, la température, la turbidité, l'approvisionnement alimentaire et l'oxygène, qui affectent la santé et la croissance des moules par le mélange et le transport. Alors que l'industrie continue à se développer, une implantation et une gestion appropriées de ce type d'aquaculture nécessitent une compréhension approfondie de l'hydrodynamique et de son impact sur l'élevage (Campbell, Hall, 2019). L'étude de l'hydrodynamique côtier nous sert à assurer la stabilité des filières et maintenir des conditions propices à la bonne croissance de ces espèces.

La modélisation de la houle et des courants a été réalisée avec le logiciel Mike de DHI (Danish Hydraulics Institute). Les deux modules couplés utilisés sont Mike 21 SW (spectral waves) et Mike 21 HD (Hydrodynamics).

Le premier sert à modéliser la houle ; il traite la réfraction de la houle, la génération par le vent, la dissipation par le frottement, le déferlement, et l'interaction houle-courant. Le deuxième

résout les équations bidimensionnelles classiques de Saint-Venant, sur maillage structuré ou non structuré, en tenant compte du frottement sur le fond, de l'effet des événements météorologiques (vent et gradient de pression atmosphérique) et de la force de Coriolis si nécessaire ; il permet de simuler les courants littoraux induits par le vent et la houle.

Génération du maillage

Un maillage est une discrétisation spatiale d'un milieu continu. La génération de maillage est une étape importante en analyse numérique et a une influence directe sur le temps de calcul et la qualité du résultat. Le pas de temps est estimé pour que le nombre de courant (condition CFL) soit vérifié pour chaque élément du maillage, et cette condition est la plus restrictive pour la plus petite maille. La condition CFL exprime que la distance parcourue par l'information dans l'intervalle de pas de temps numérique doit être inférieure à la dimension de la maille. En pratique, le nombre de Courant est un nombre sans dimension qui sert à donner le seuil dimensionnel au-delà duquel on observe une instabilité de calcul (DHI, 2016).

En hydrodynamique côtière, le domaine de calcul est le plus souvent représenté par un espace bidimensionnel, limité par la côte et des limites ouvertes (trois dans ce cas), avec un maillage triangulaire, non structuré pour mieux épouser les détails du trait de côte.

Les étapes entreprises pour la génération du maillage sont illustrées dans la figure II.14 ainsi que le maillage résultant représenté dans la figure II.15. Le tableau II.5 résume les paramètres géométrique du maillage.

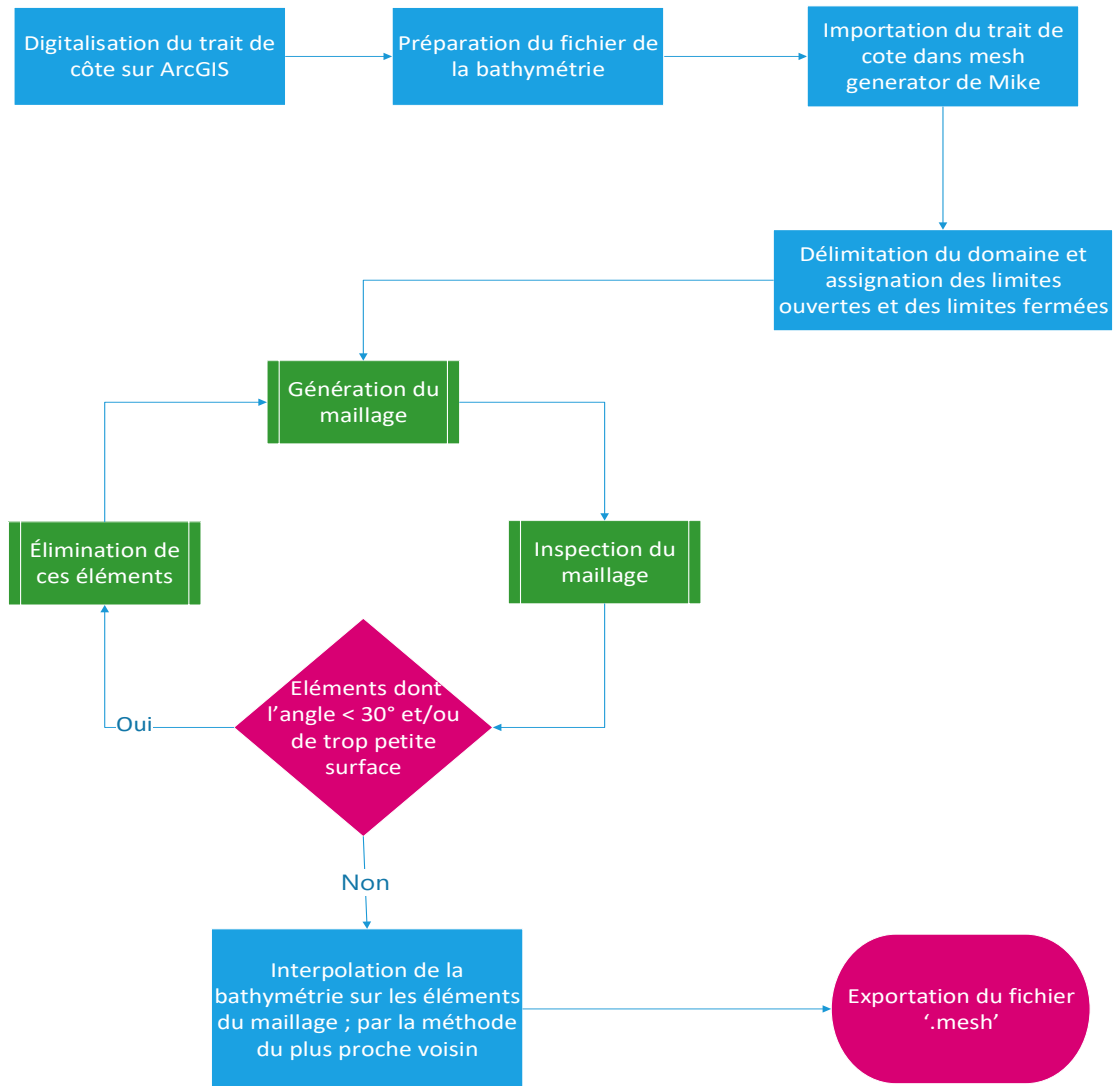


Figure II.14 : Processus de génération du maillage.

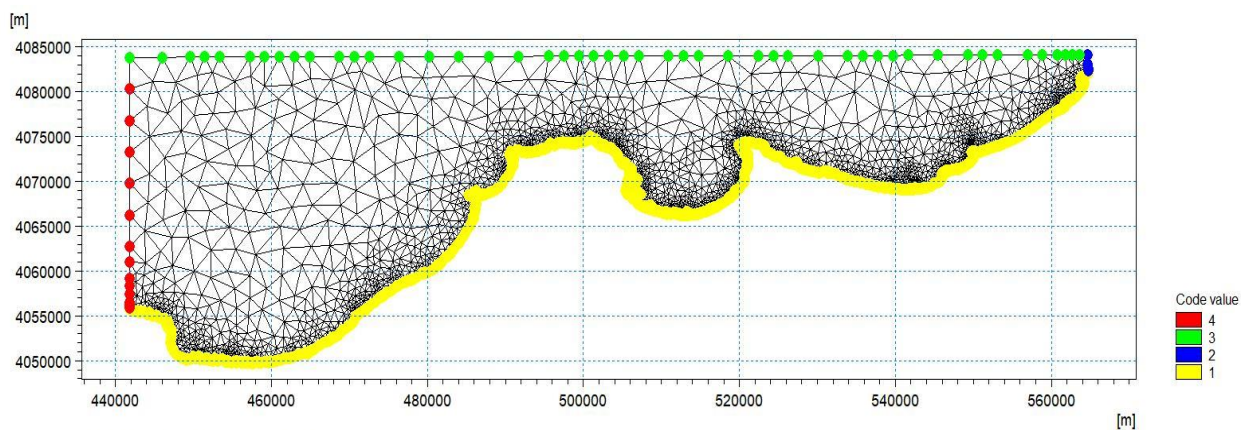


Figure II.15 : Maillage de la zone d'étude (Code value correspond aux limites du domaine : 1. Limite terre, 2. Limite Est, 3. Limite Nord, 4. Limite Ouest).

Tableau II.6 : Statistiques du maillage

Statistiques	Valeur
Nombre d'éléments	14204
Superficie totale (m²)	2.27901e+09
Moyenne (m²)	160449
Médiane (m²)	7599.82
Écart-type (m²)	723080
Minimum (m²)	24.6
Maximum (m²)	9.60726e+06
Plage (m²)	9.60724e+06
Minorité (m²)	24.6
Majorité (m²)	1330.45
Valeurs manquantes	0

Paramétrage du modèle

Il existe plusieurs paramètres dans le modèle couplé de MIKE 21. Le premier est le pas de temps ; les simulations conduites ont toutes 100 pas de temps de 500s ; ce qui fait un temps réel de 13h 53min 20s.

Le calcul des courants avec le module Mike HD a été soumis à un forçage de vent de 6m/s de secteur Nord-Est car c'est un des vents fréquents dans la zone d'étude comme le montre la rose des vents de la figure II.16, ainsi qu'à des conditions aux limites d'élévation de surface de 0,34 m aux limites ouvertes.

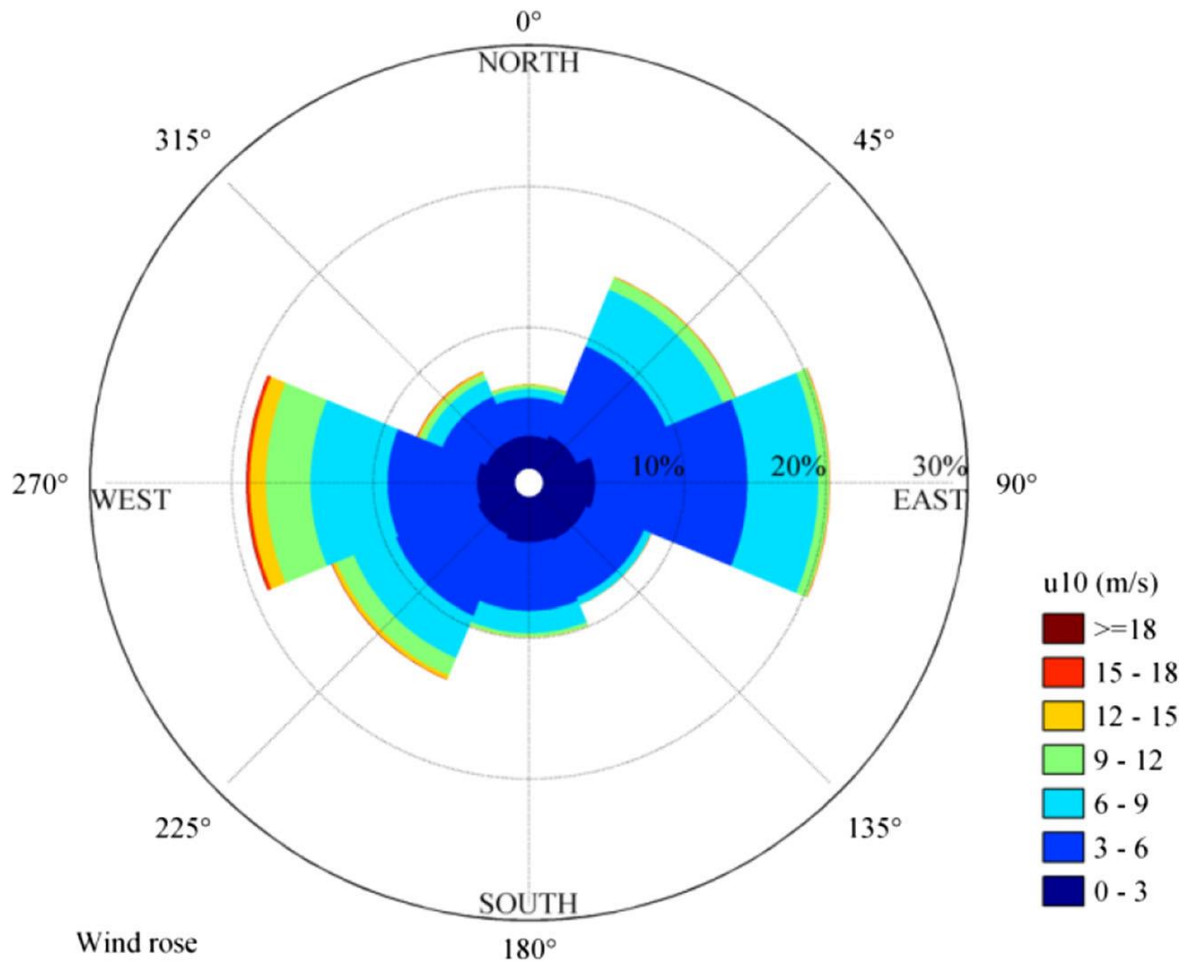


Figure II.16 : Rose des vents (Salem Cherif et al., 2019).

Les mêmes paramètres de vent ont été maintenus pour les simulations de la houle avec le module Mike SW, avec une houle de 3,5 m d'une période de 10s comme condition aux limites sur les directions NNE, N, NNW, NW, WNW. Quant aux simulations sur les directions ENE et NE, la houle choisie était de 2,5 m, de 8s de période. Le choix de ces directions, ainsi que de leurs paramètres respectifs revenait à déterminer les houles les plus contraignantes et plus ou moins fréquentes sur les roses des houles de la figure II.17. Ces roses de houles couvrent uniquement la baie de Boumerdes et la baie d'Alger. Cependant, une analyse des données de houle du CMEMS (Korres et al., 2019) sur une période d'une année montrent que la variabilité latitudinale de ce paramètres est négligeable sur la zone d'étude.

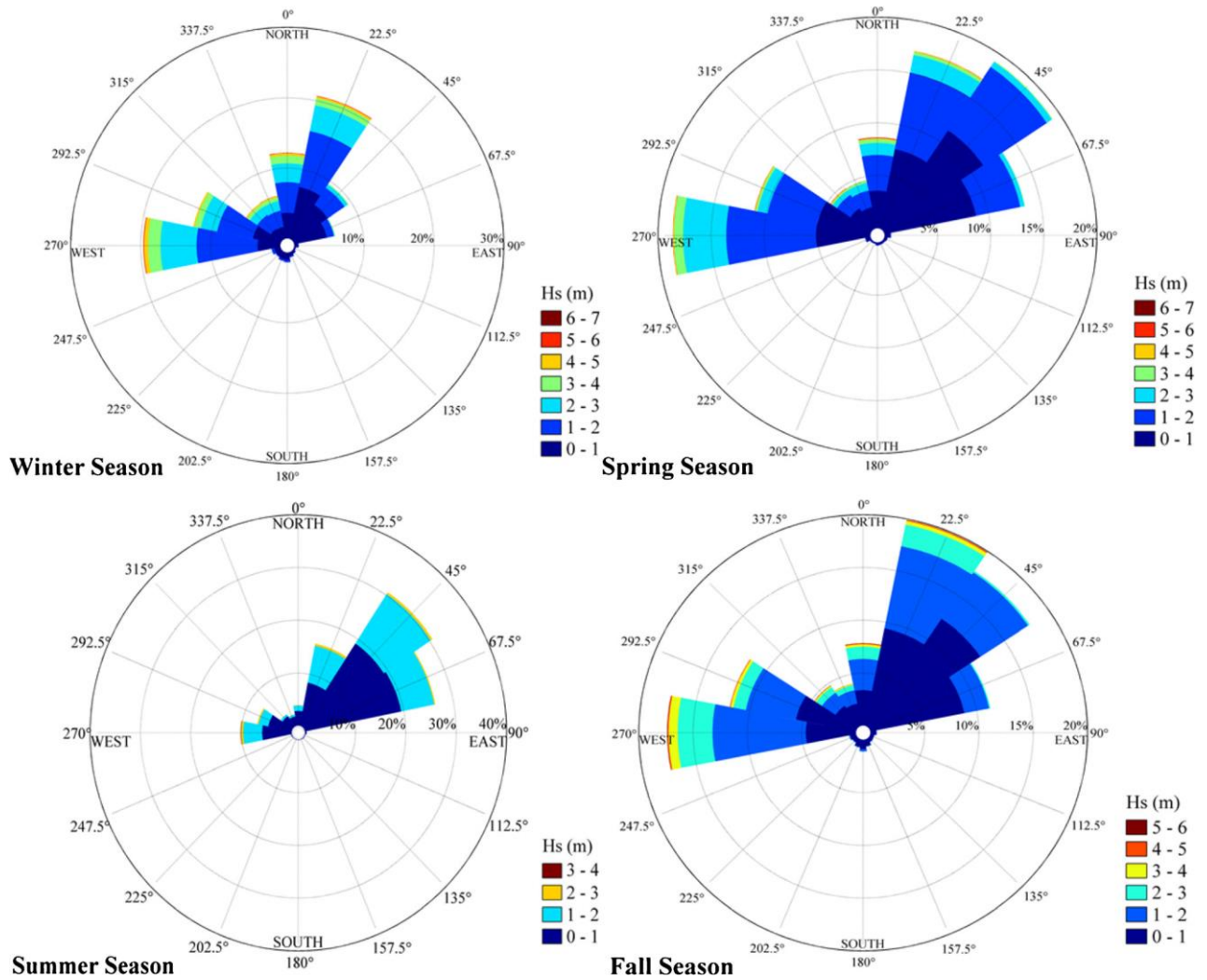


Figure II.17 : Roses des houles de la région de Boumerdes-Alger (Salem Cherif et al., 2019).

II.4.3 Analyse multicritère

Les techniques d’analyses multicritères sont utilisées pour agréger les facteurs contributifs en une variable spatiale d’adéquation $S_{(x,y)}$ (x et y coordonnées appartenant à la zone d’étude) en utilisant des fonctions SIG (Silva et al., 2011).

Cette technique consiste en la superposition des différentes données géographiques générées (facteurs environnementaux, contraintes légales et conflits d’usages) afin d’obtenir une carte illustrant les zones favorables au développement conchylicole.

Le $S_{(x,y)}$ est calculé comme la moyenne géométrique de tous les facteurs environnementaux, modifiée par leur score d’adéquation FSR (Factor of Suitability Range) qui convertit les données originales en scores normalisés d’adéquation de l’aquaculture (Arnold et al., 2000).

$$\begin{cases} S_{(x,y)} = \prod_{i=1}^n FSR_{(x,y,i)} & \text{quands } C_{(x,y)} = 1 \\ S_{(x,y)} = 0 & \text{quands } C_{(x,y)} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Où $FSR_{(x,y,i)}$ est le facteur environnemental spatialement variable modifié par son FSR en niveaux d'adéquation ; $i = \overline{1,6}$ est un indice identifiant les paramètres d'entrée correspondants ; et $C_{(x,y)}$ est l'image des contraintes spatialement variables (Silva et al., 2011) ; $C_{(x,y)} = 0$ implique la présence de contraintes légales et $C_{(x,y)} = 1$ lorsqu'il n'y a pas de contraintes.

Le FSR est de 1 lorsque la valeur du facteur dans un point donné est incluse dans l'intervalle des normes mentionnées dans le tableau II.1. Le FSR est de 0 lorsque cette valeur est en dehors de l'intervalle de la norme. $S_{(x,y)}$ est une valeur binaire qui peut être 0 (zone inadéquate) ou 1 (zone adéquate).

Pour le calcul du S (x, y), les résultats des simulations et des algorithmes d'extraction ont d'abord été traités :

- Les données mensuelles de SST, MES et chlorophylle ont été moyennés
- Les résultats du module HD sur les 7 directions ont été moyennés
- A partir des résultats du module SW, nous avons calculé le maximum des 7 directions simulées pour obtenir les hauteurs des vagues les plus contraignantes à l'élevage.

Ces traitements ont été effectués avec l'outil « Cell Statistics » de ArcGIS et la procédure générale de l'analyse multicritère est illustrée dans la figure II.18. Les résultats des calculs hydrodynamiques sont représentés dans l'Annexe C.

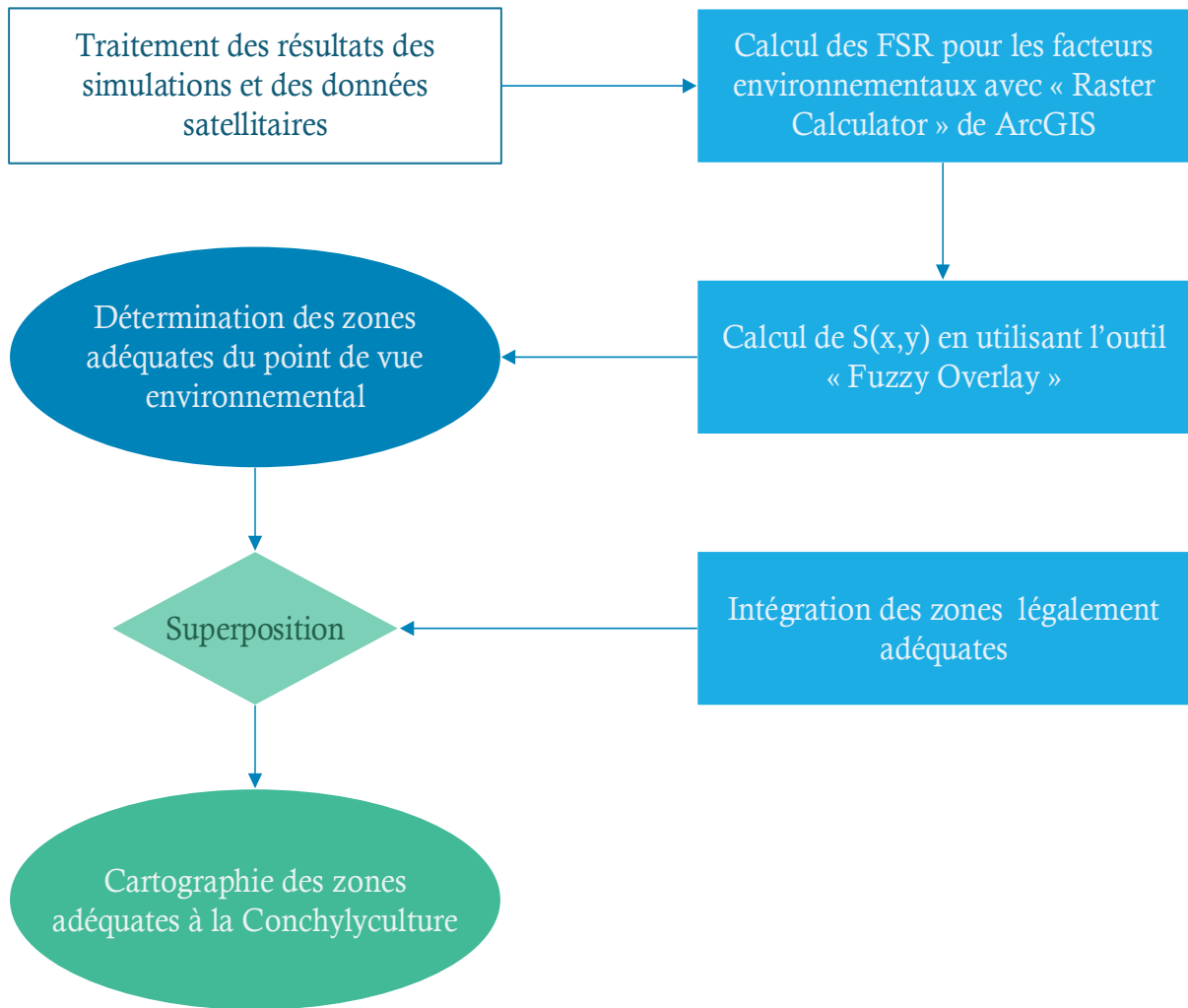
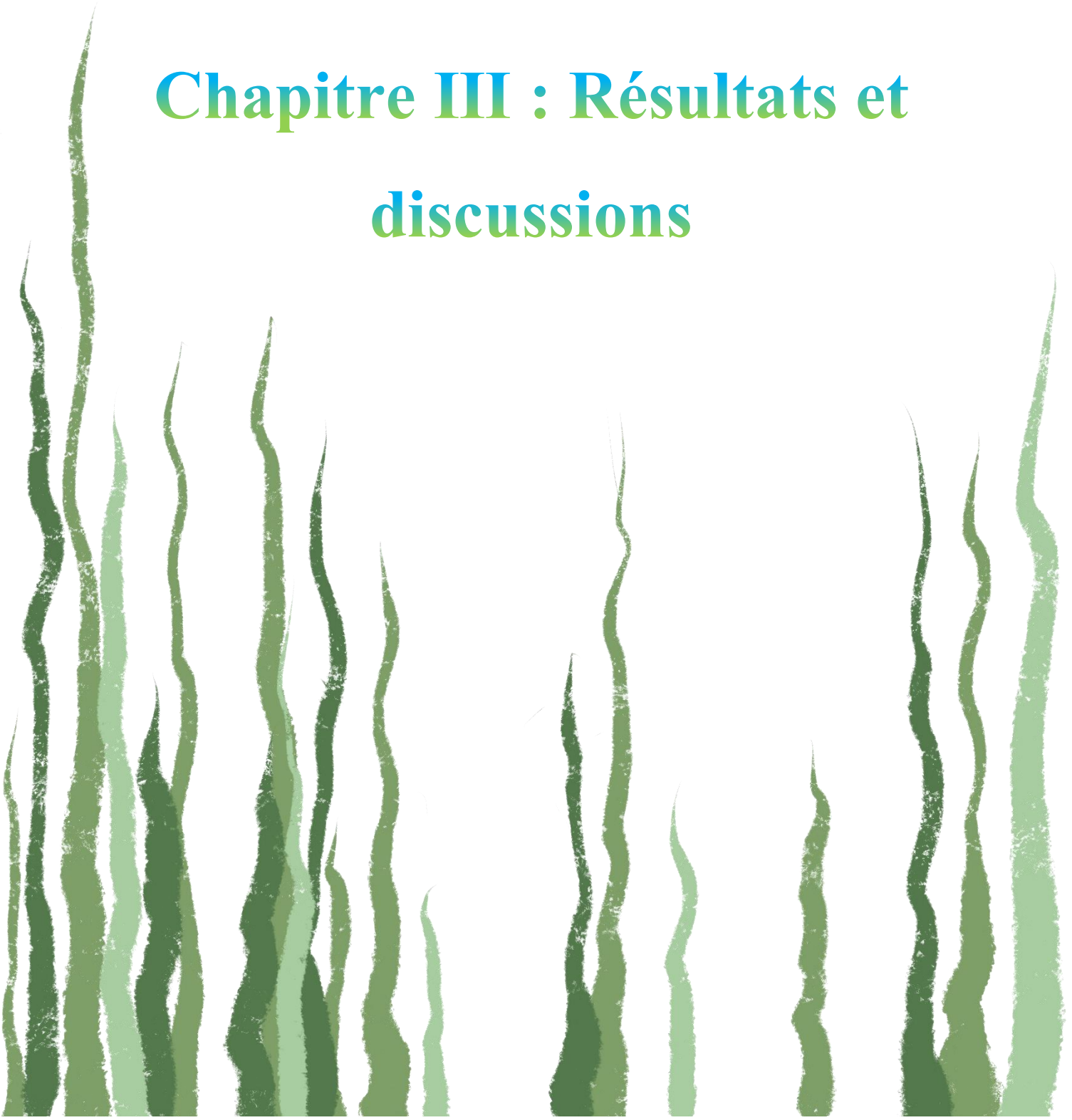


Figure II.18 : Procédure de l'Analyse Multicritère

Chapitre III : Résultats et discussions



III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 Contraintes légales et conflits d'usages

Les figures III.1, III.2 et III.3 illustrent les différentes contraintes légales et conflits d'usages présents dans la zone d'étude. La baie d'Alger est dominée par le trafic maritime, ceci rend inadéquate à l'accueil de fermes aquacoles. Par conséquent, notre analyse sera focalisée sur les deux baies de Bou-Ismaïl et de Zemmouri.

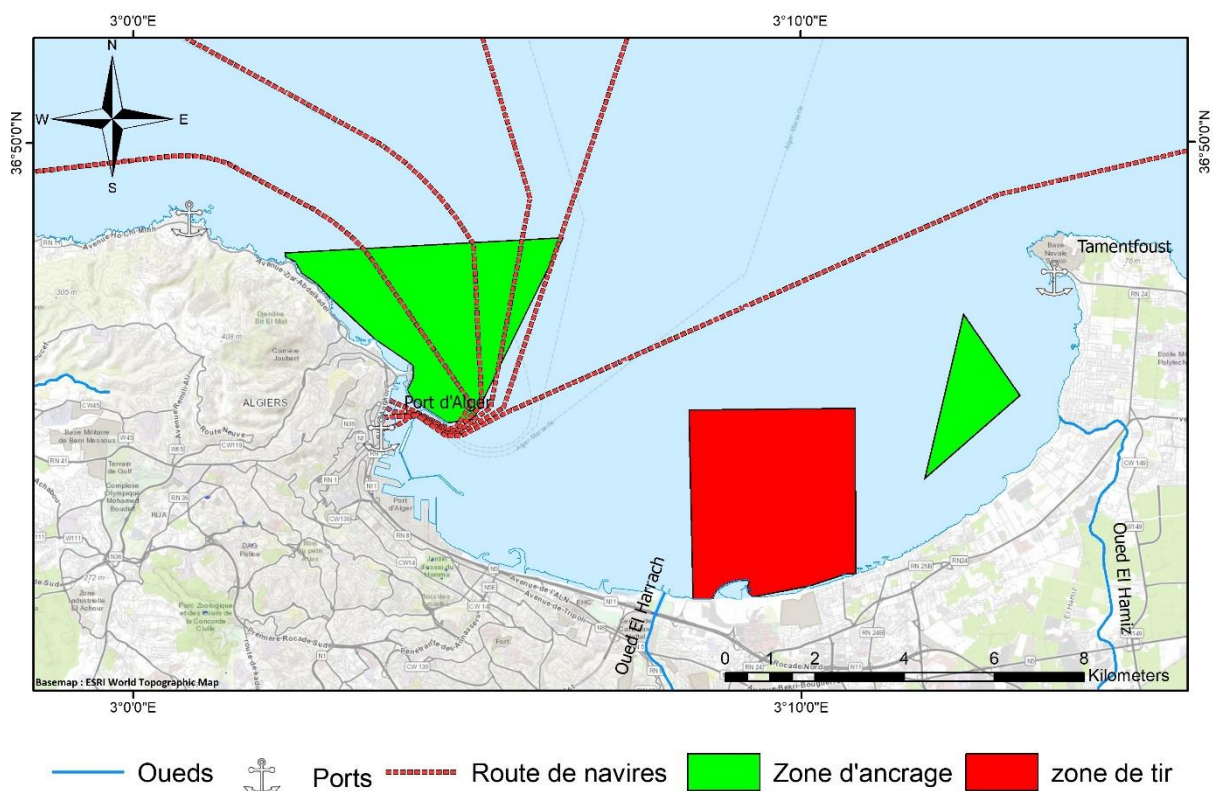


Figure III.1 : Contraintes légales et conflits d'usage dans la baie d'Alger

La baie de Bou-Ismaïl présente plusieurs contraintes légales, notamment la présence d'herbiers à *Posidonia oceanica* qui s'étendent sur une longueur de plus de 14 km, réparties dans différentes zones de la baie. En plus de l'herbier, un total de 25 plages accueille des milliers d'estivants chaque année dans la zone, qui compte pour 47 km de côte. Le trafic maritime se limite à la partie Est de la baie. Quant aux ports, il en existe cinq, ce qui est avantageux pour un développement aquacole dans la région (Figure III.2).

Après la superposition des différents critères, trois zones légalement adéquates pour la conchyliculture ont été identifiées (figure III.4), dont une située dans la partie Ouest de la baie, au niveau de la ville de Tipaza, couvrant une superficie de 31 km². La deuxième zone est située

au centre de la baie, elle inclue les villes de Bou-Ismaïl et de Ain Tagourait et couvre une superficie de 48 km². La troisième zone est localisée au niveau de Sidi Fredj, une partie dans la baie d'El Djamila et une autre à l'Ouest de Sidi Fredj, couvrant ainsi une superficie de 30 km².

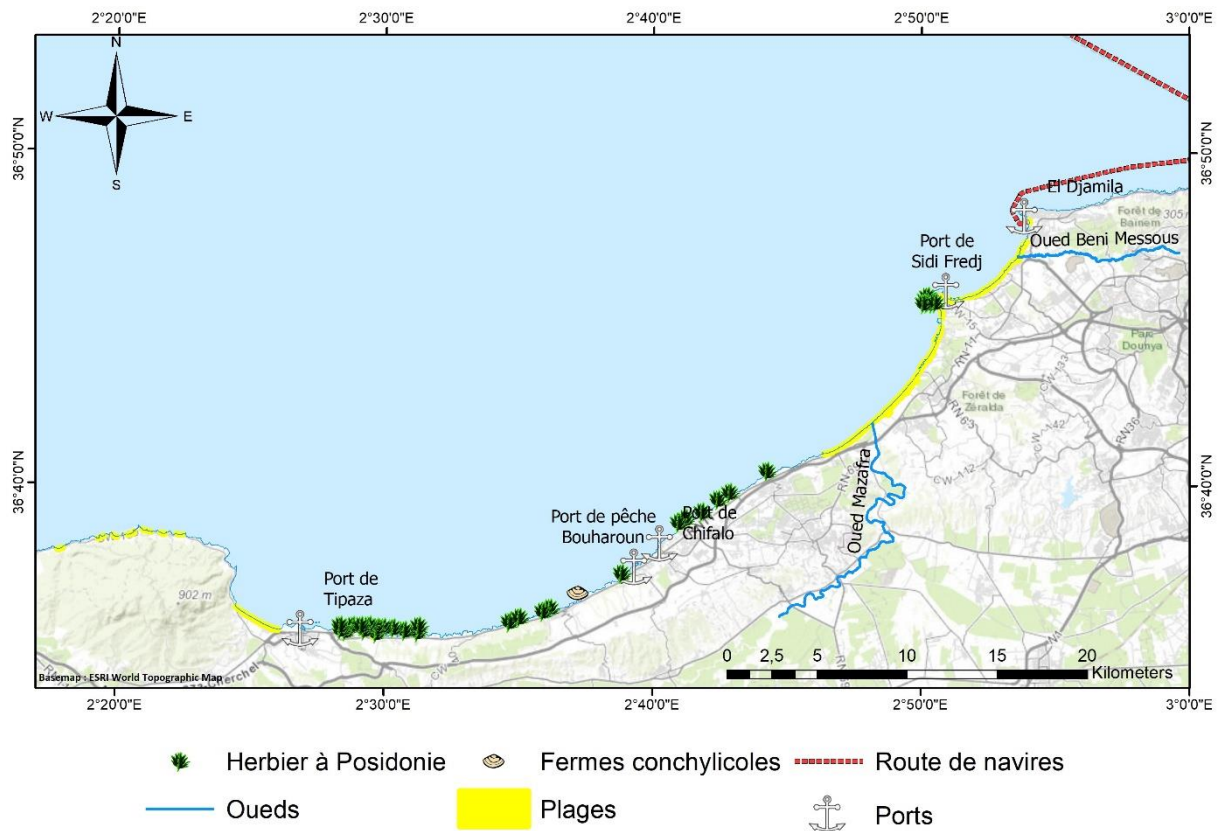


Figure III.2 : Contraintes légales et conflits d'usage dans la baie de Bou-Ismaïl

La baie de Zemmouri est aussi marquée par une succession de plages qui s'étendent sur 63 km, et qui forment plusieurs zones tampon où l'aquaculture ne peut pas avoir lieu. En plus des plages, les fermes aquacoles présentes dans la zone limitent la possibilité d'établir une nouvelle activité aquacole. Le trafic maritime n'est pas contraignant puisqu'il est localisé au large. La baie comprend uniquement deux ports, un à Zemmouri et un autre à Cap Djinet comme le montre la figure III.3.

Comme dans la baie de Bou-Ismaïl, trois zones qui répondent aux critères de sélection (tableau II.1) ont été identifiées. La première est située dans la partie Ouest de la baie, elle est comprise entre El Marsa et Ain Taya et couvre une superficie de 4 km². La deuxième zone légale s'étale sur 10 km² et se situe à l'Est de Zemmouri El Bahri. Enfin, la troisième zone comprend la région de Cap Djinet et s'étend sur une surface de 37 km². (Figure III.4)

En résumé, la zone d'étude comprend 6 zones légales d'une superficie totale de 160 km². Le trafic maritime semble être le facteur limitant du développement de projets conchylicoles dans

la baie d'Alger. Quant aux deux autres baies, la détermination des zones légales a été principalement conditionnée par la présence ou non de ports. Les plages interviennent en second lieu de par leur nombre important. Puisque ces dernières constituent des zones tampons de 1km, leur influence ne se limite qu'au eaux peu profondes entre 4 et 20 m.

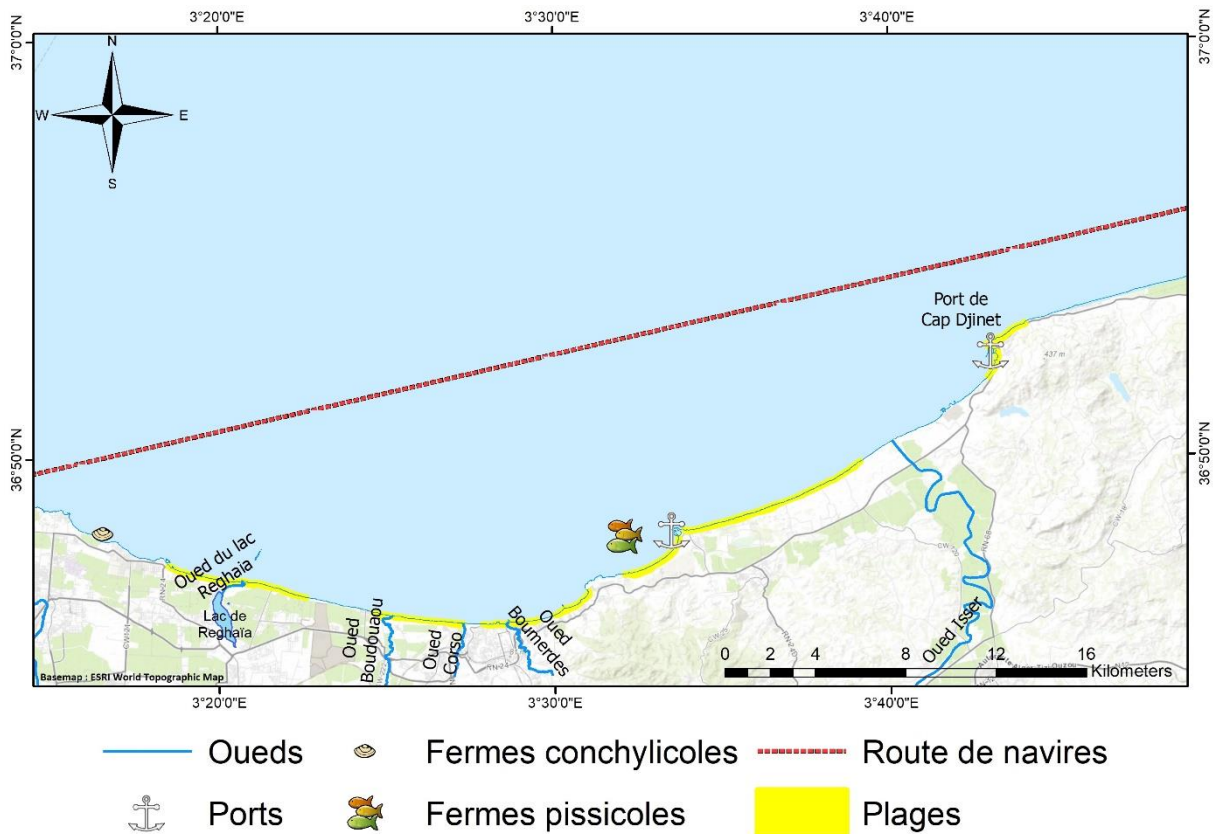


Figure III.3 : Contraintes légales et conflits d'usage dans la baie de Zemmouri

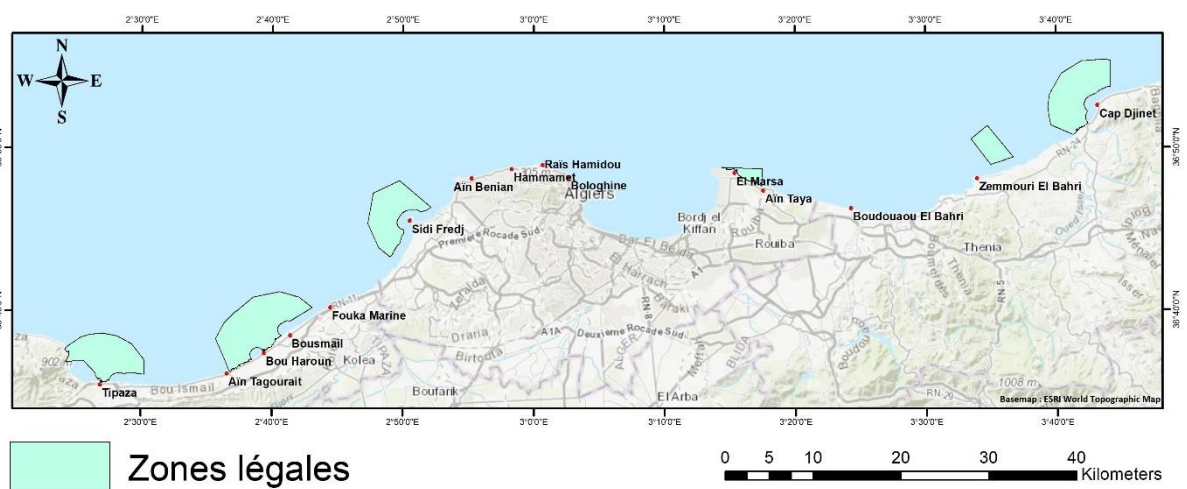


Figure III.4 : Cartographie des zones légales

III.2 Facteurs environnementaux

III.2.1 Facteurs de croissance et de survie

III.2.1.a La chlorophylle

La chlorophylle exhibe une variation spatiale entre 0,54 et 1,45 $\mu\text{g/L}$ (figure III.5). Les valeurs les plus élevées de la chlorophylle se situent à proximité de la côte, ce qui est en adéquation avec les modèles théoriques puisque les apports terrigènes en nutriments sont la source principale de la production primaire dans les côtes algériennes. Les valeurs du score d'adéquation FSR (Factor of Suitability Range) (figure III.6) indiquent que la disponibilité de la nourriture pour l'élevage dans la baie de Zemmouri et la baie de Bou-Ismaïl se limite aux eaux peu profondes, entre 0 et 25 m.

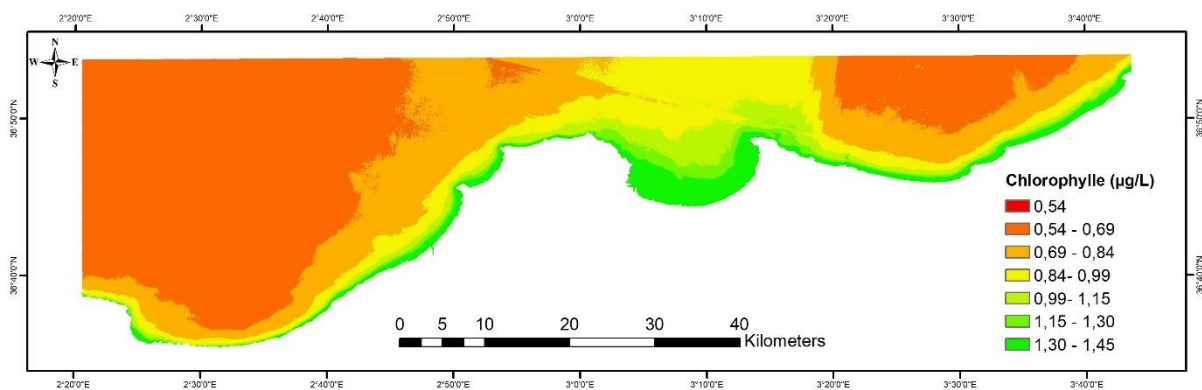


Figure III.5 : Moyenne de la chlorophylle sur la période de 2014 à 2019

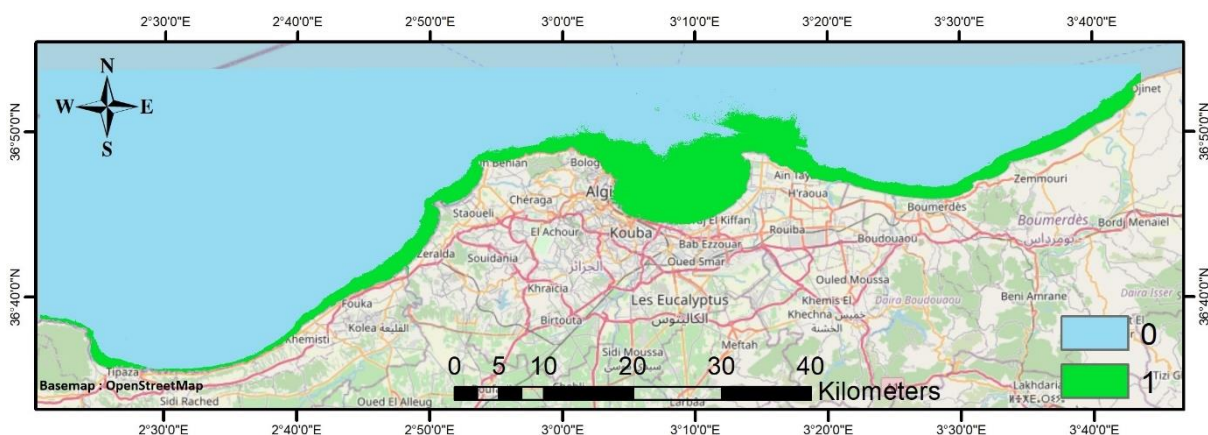


Figure III.6 : Valeurs du FSR pour la chlorophylle

III.2.1.b Matières en suspension (MES)

Les matières en suspension dans la zone d'étude varient entre 8 et 150 mg/L (Figure III.7), ce qui est conforme à l'intervalle d'adéquation de ce paramètre (voir tableau II.1). Ainsi, attribuons-nous à la totalité de la région un FSR de 1 (figure III.8).

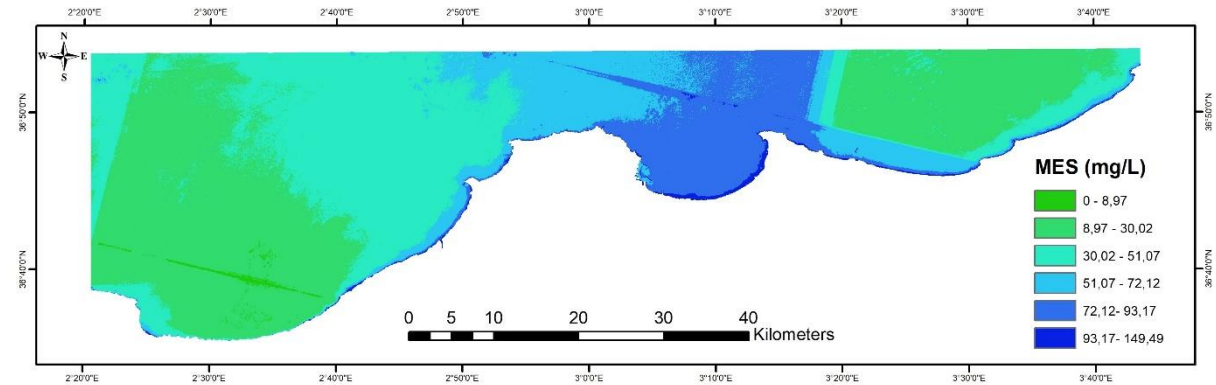


Figure III.7 : Moyenne des MES sur la période de 2014 à 2019

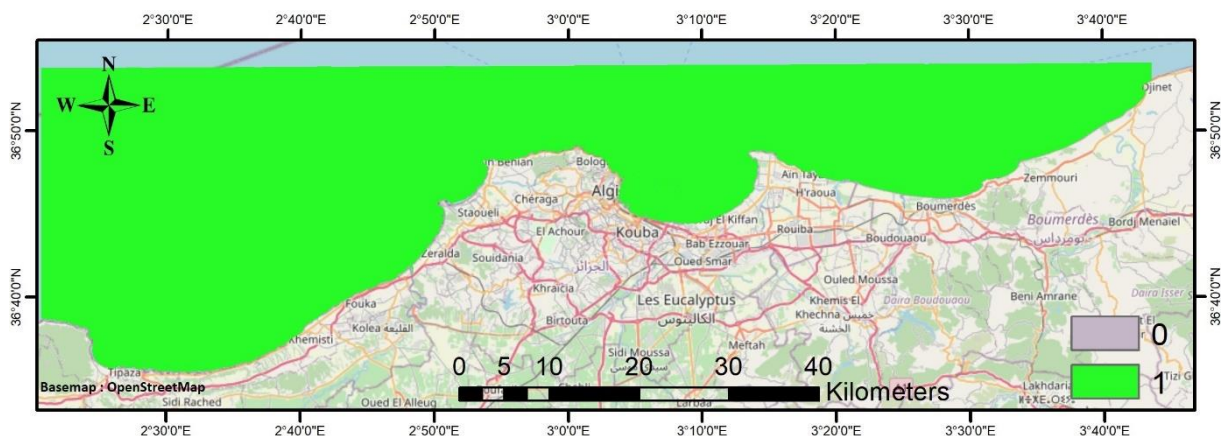


Figure III.8 : Valeurs du FSR pour les MES

III.2.1.c Température de surface (SST)

En général, les bivalves sont connues pour être des espèces eurythermes, c'est-à-dire qu'ils sont capables de supporter de larges variations de température dans leur milieu. Ceci dit, les deux espèces étudiées ont une température optimale marquée par un grand taux de croissance et un faible taux de mortalité, celle-ci est de 20 °C pour les deux espèces étudiées. Dans la zone d'étude, les moyennes de température, tel qu'illustrées dans la figure III.9 montrent des variations entre 19 et 21,3 °C. Il est déduit que la zone entière est favorable à la bonne croissance des espèces cultivées en considérant la température de surface (SST) (figure III.10).

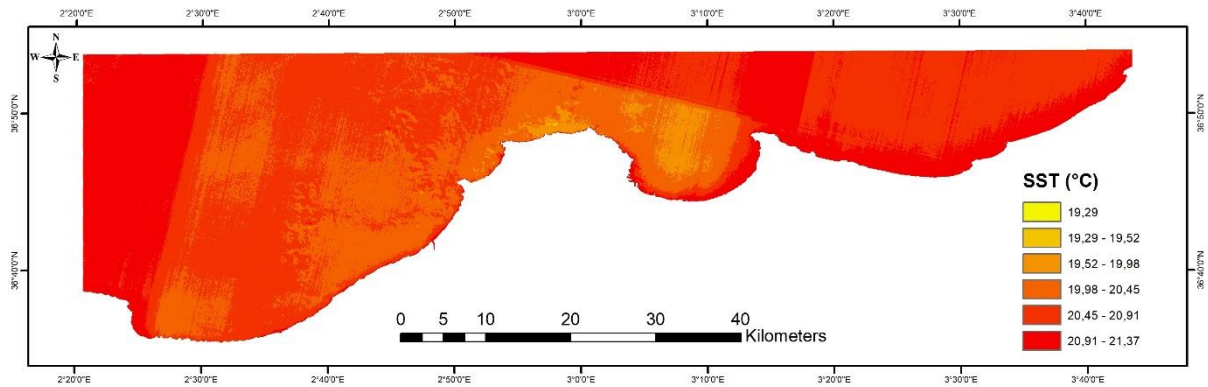


Figure III.9 : Moyenne de la SST sur la période de 2014 à 2019

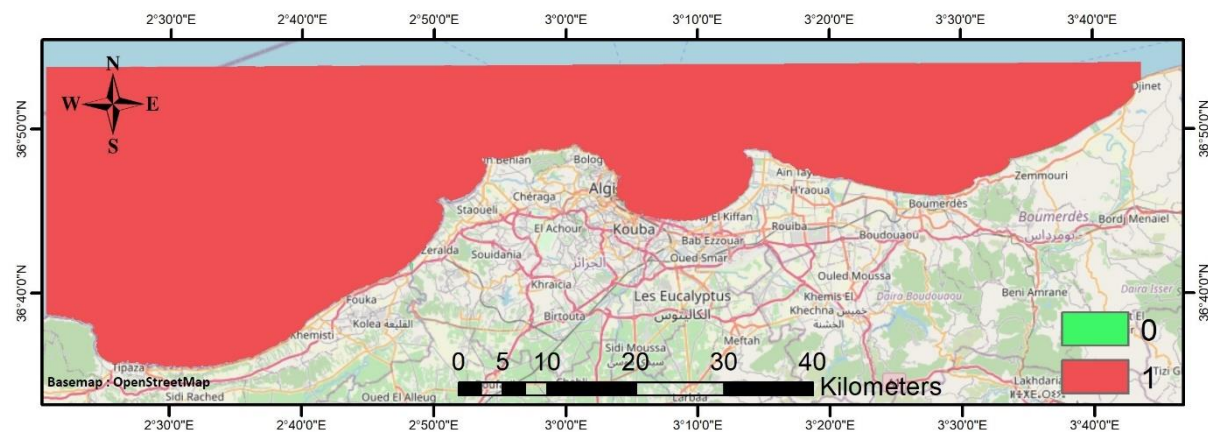


Figure III.10 : Valeurs du FSR pour la SST

III.2.2 Niveau de protection des fermes

III.2.2.a Bathymétrie

La zone d'étude est caractérisée par une pente de 1,2 à 2° dans les eaux peu profondes, nous remarquons que la profondeur augmente rapidement en allant de la côte vers le large, ceci limite la possibilité d'héberger une activité aquacole. Au niveau des caps, la profondeur limite de 25 m peut être atteinte à partir de 300 m à 1 km en allant de la côte vers le large. Tandis que dans les baies, cette distance peut atteindre 3 km (Figure III.11). Les valeurs du score d'adéquation FSR du paramètre bathymétrique sont représentées dans la carte (Figure III.12).

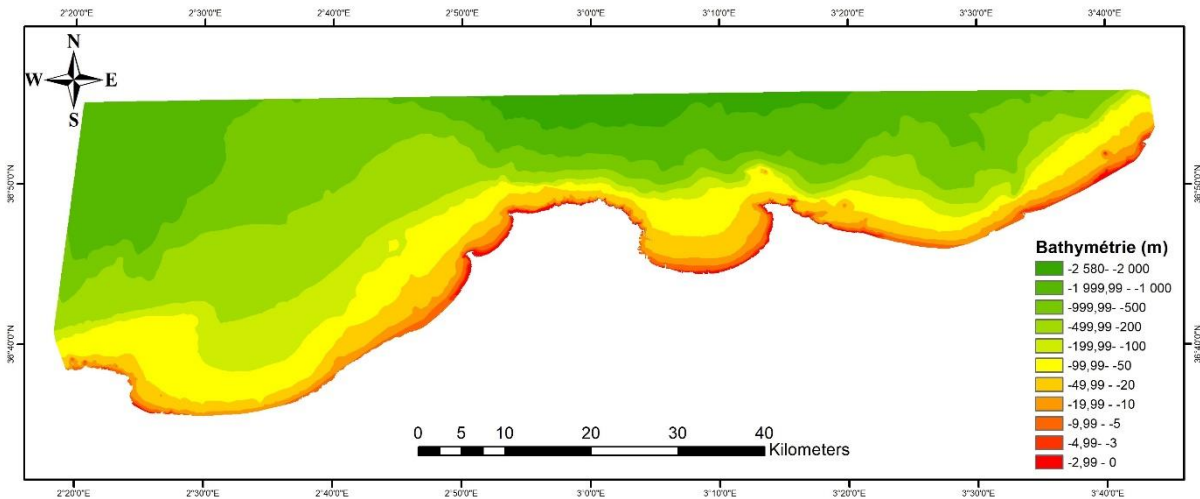


Figure III.11 : Bathymétrie de la zone d'étude

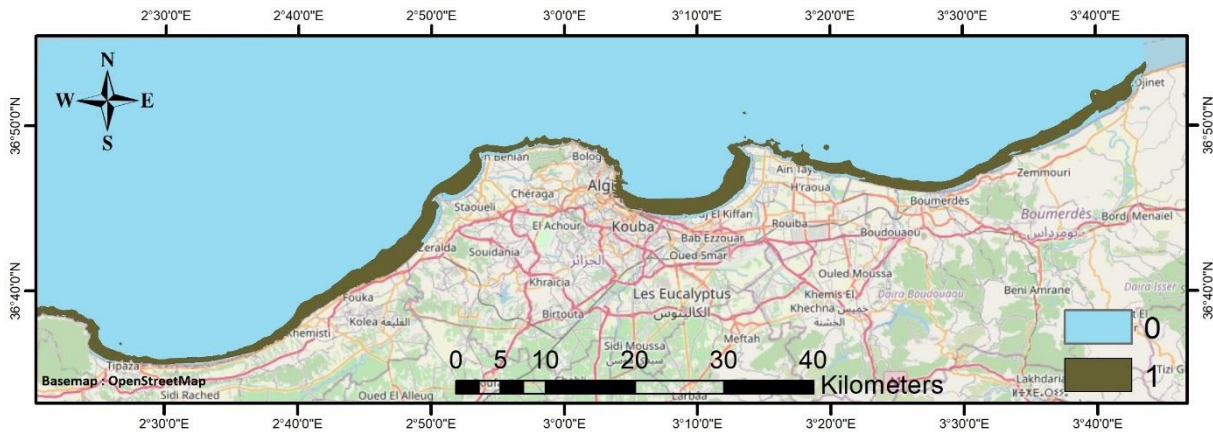


Figure III.12 : Valeurs du FSR pour la bathymétrie

III.2.2.b Vitesse des courants

La vitesse des courants dans la zone d'étude suit un gradient décroissant de la côte vers le large, et peut atteindre des vitesses maximales de 1,2 m/s dans des conditions climatiques extrêmes. Néanmoins, la vitesse moyenne des courants ne dépasse pas les 0,8 m/s à proximité de la côte (Figure III.13), ce qui résulte en un FSR de 1 dans ces zones là (Figure III.14)

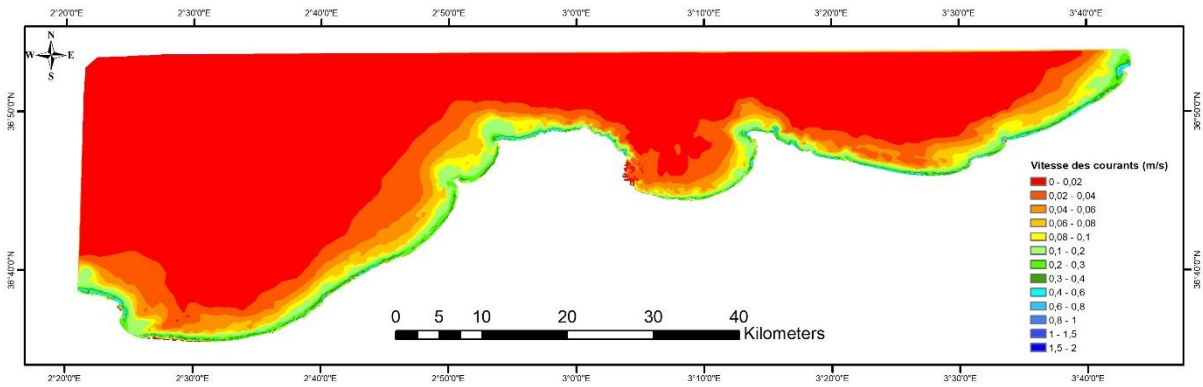


Figure III.13 : Vitesse des courants dans la zone d'étude

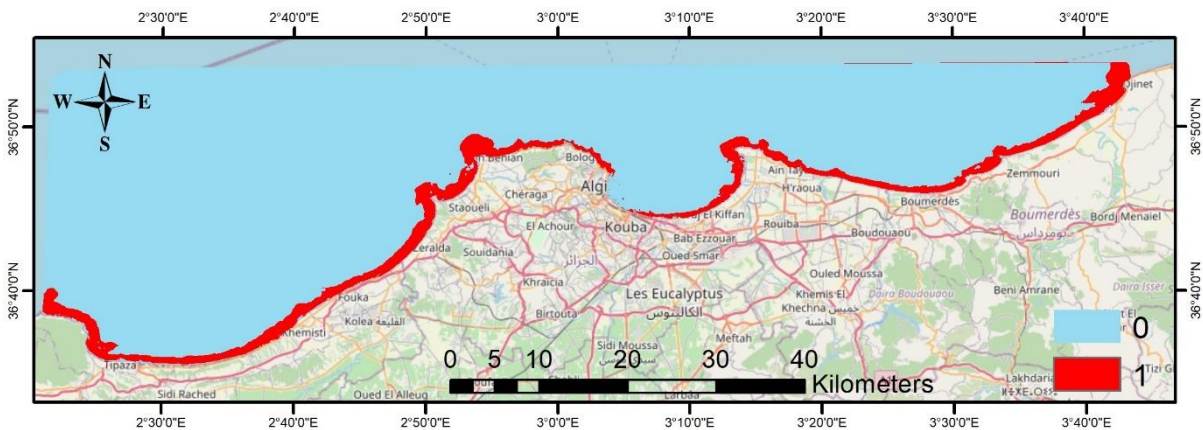


Figure III.14 : Valeurs du FSR pour la vitesse des courants

III.2.2.c Hauteur des vagues

D'après la figure III.15 et la figure III.16, les zones adéquates par rapport au critère de hauteur des vagues sont plus restreintes au niveau de la baie de Zemmouri qu'au niveau de la baie de Bou-Ismaïl, car elle est en général plus exposée aux forces hydrodynamiques.

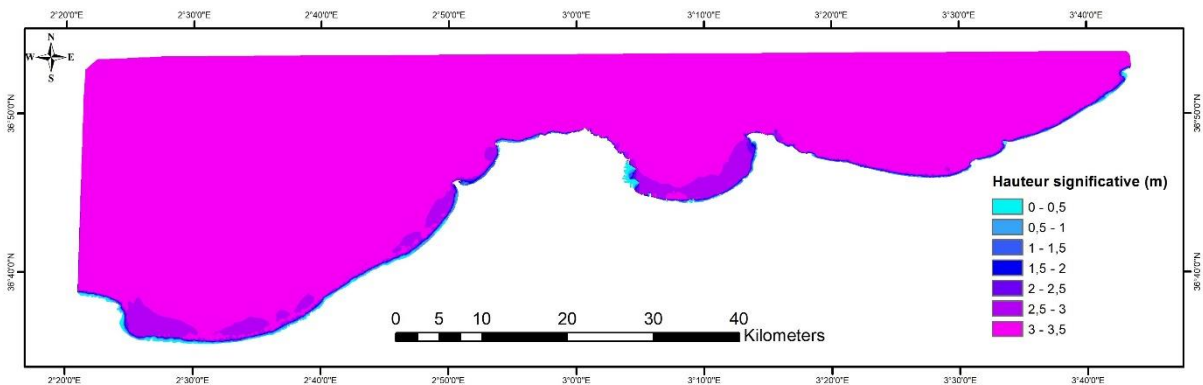


Figure III.15 : Hauteurs maximales des vagues dans la zone d'étude

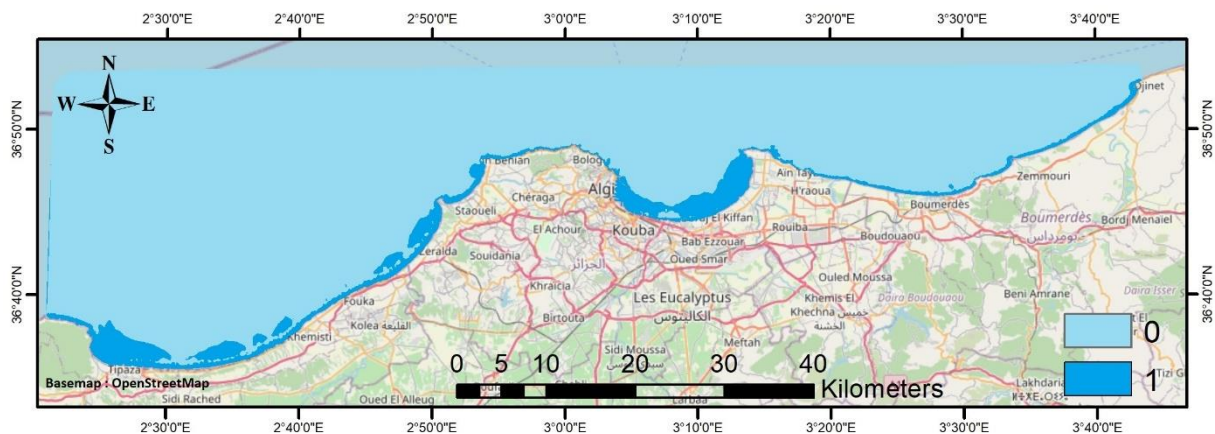


Figure III.16 : Valeur du FSR pour la hauteur des vagues

Les résultats de l'analyse multicritère exprimés par $S(x,y)$ dans la figure III.17 définissent les zones propices à l'élevage conchylicole du point de vue environnemental. Les zones identifiées couvrent une superficie totale de 455 km². Nous en déduisons que les paramètres environnementaux sur la frange littorale étudiée sont en général très favorables à l'activité conchylicole.

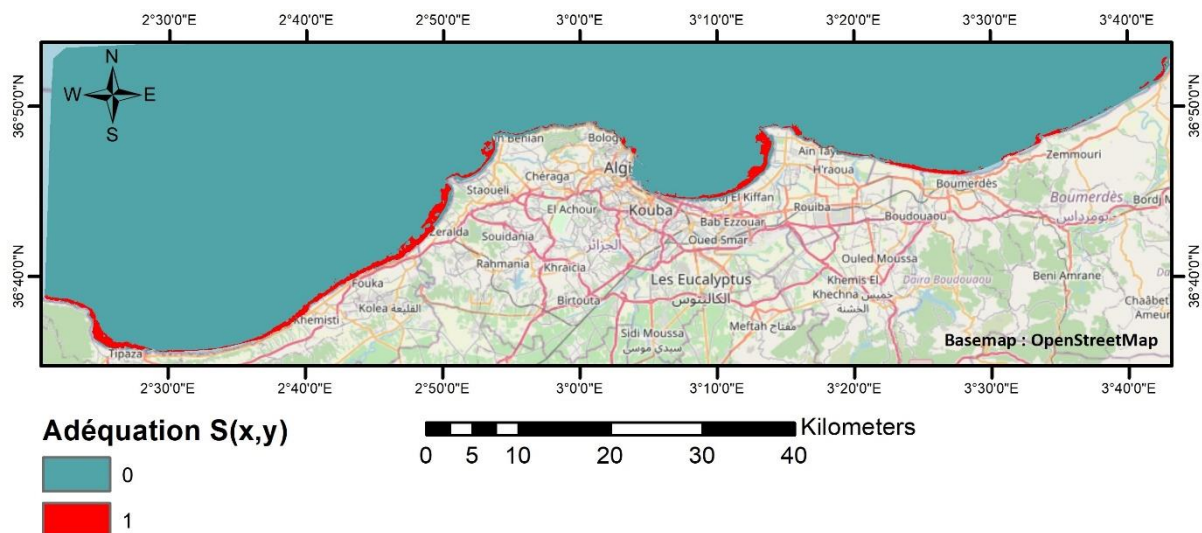


Figure III.17 : Cartographie de l'adéquation $S(x,y)$

III.3 Identification des zones

L'identification des zones propices à l'élevage conchylicole dans la zone d'étude est le résultat de la superposition des zones adéquates du point de vue environnemental (figure III.17) avec les zones adéquates du point de vue légal (figure III.4) sur le logiciel ArcGIS. Dix zones au total sont ressorties, dont quatre sont situés dans la baie de Zemmouri et six dans la baie de Bou-Ismaïl. Elles sont distribuées sur différentes étendues des deux baies et sont présentées sur les figures III.18 à III.22.



Figure III.18 : Zones conchylicoles de Chenoua et de Tipaza

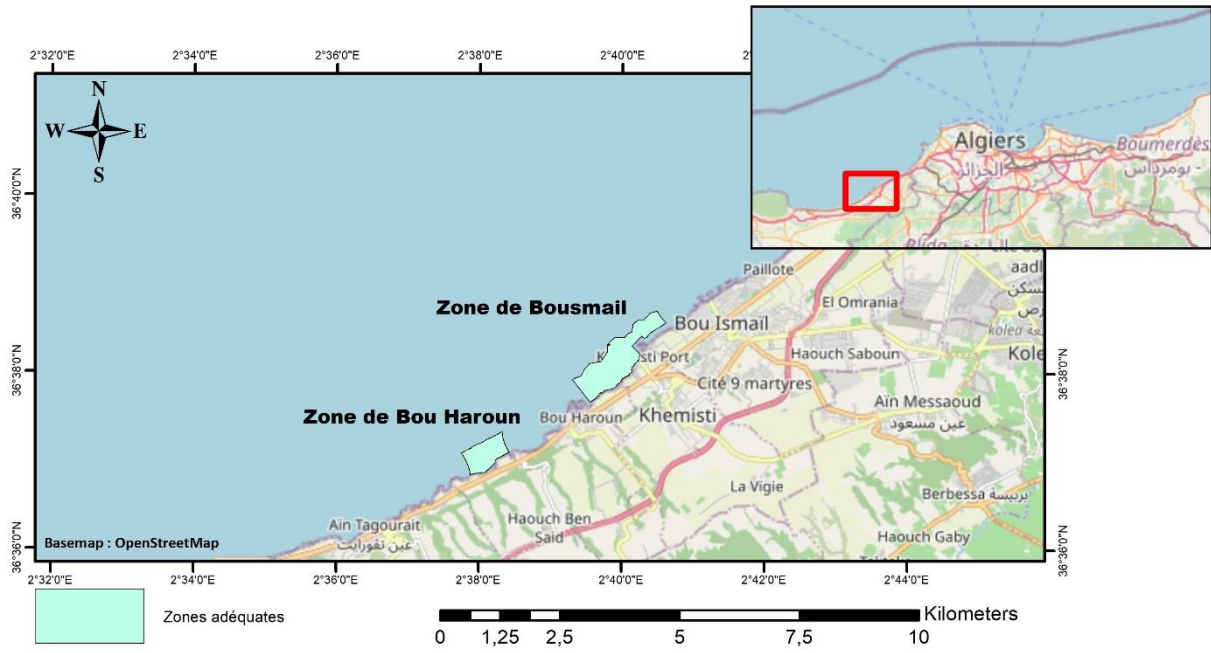


Figure III.19 : Zones conchylicoles de Aïn Tagourait et de Bou Haroun

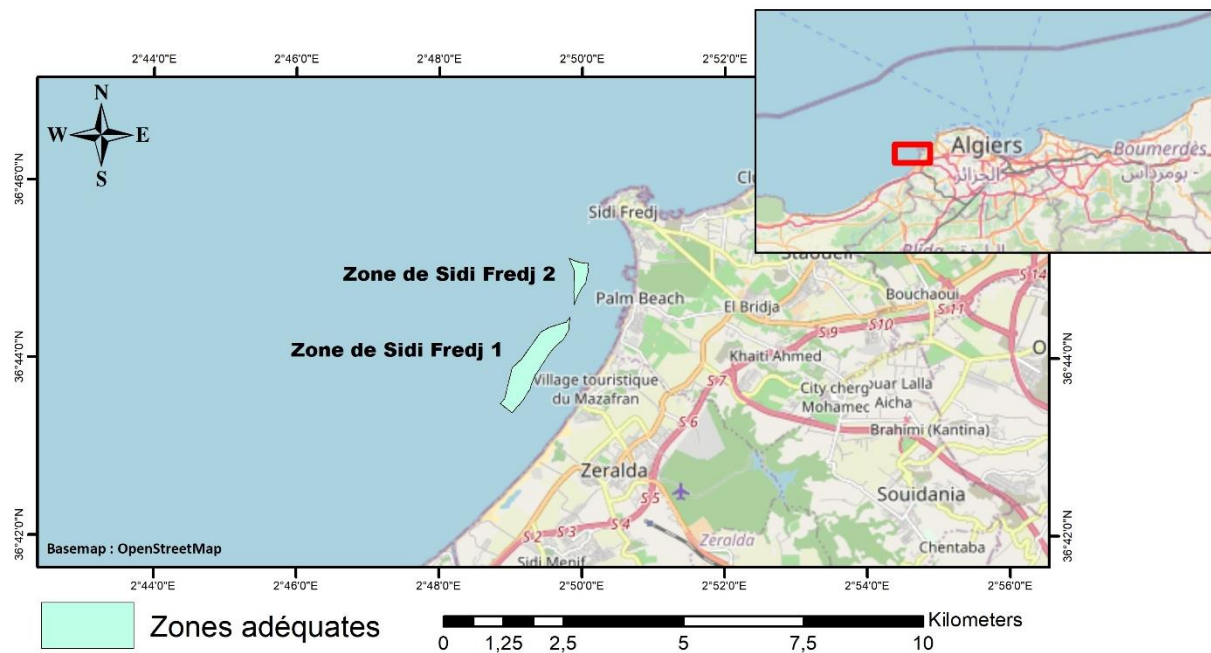


Figure III.20 : Zones conchylicoles de Sidi Fredj

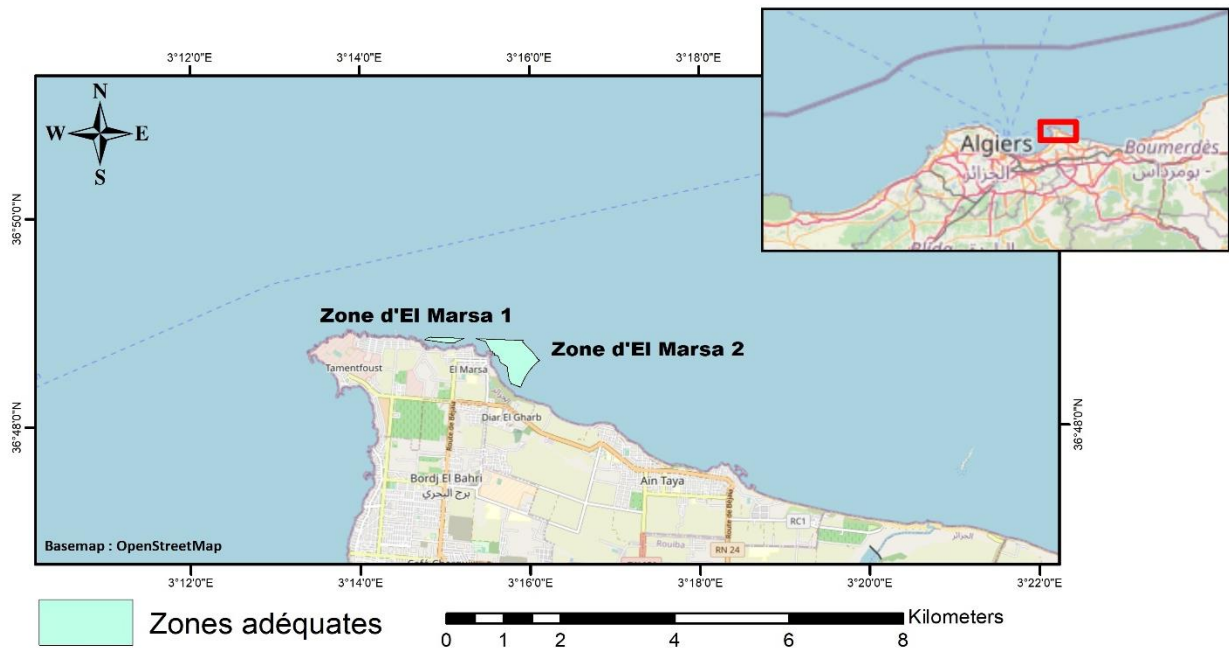


Figure III.21 : Zones conchylicoles d’El Marsa

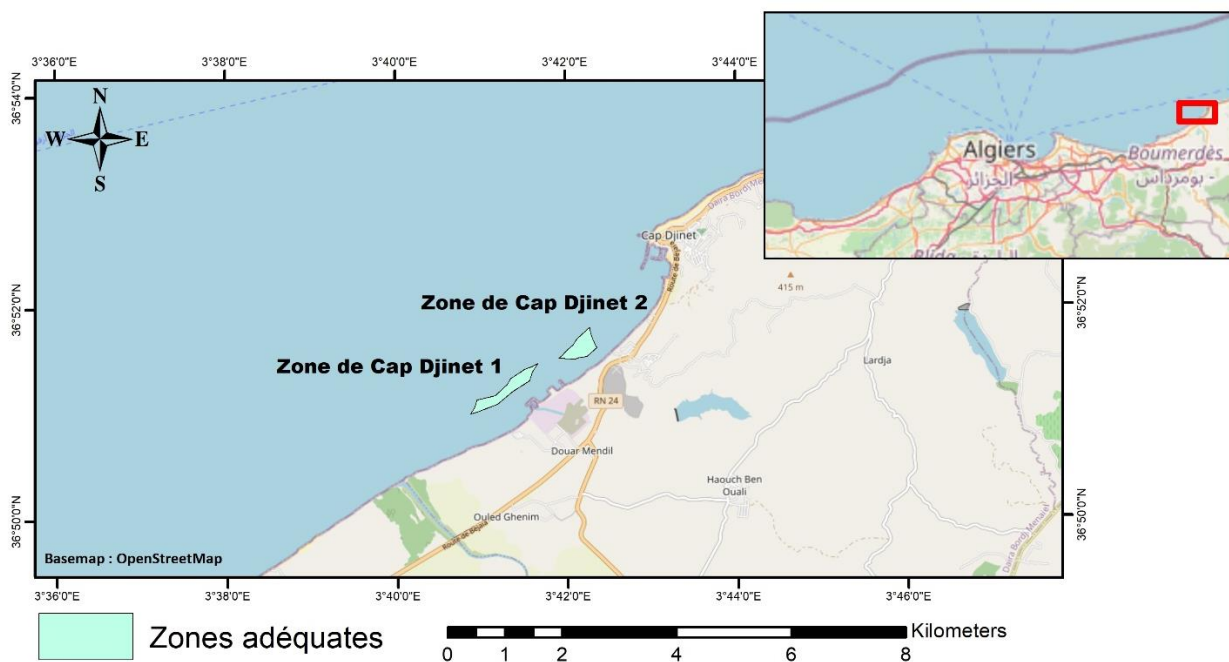


Figure III.22 : Zones conchylicoles de Cap Djinet

Les tableaux III.1 et III.2 présentent respectivement les caractéristiques spatiales et environnementales des zones identifiées. Les zones présentent des caractéristiques différentes, celles de Bou-Ismaïl sont plus grandes et plus nombreuses. Ceci peut être dû au fait que la baie est moins exposée aux vagues que celle de Zemmouri. Aussi, la présence de ports facilite le

transit des bateaux pour l'entretien des cultures ce qui rend la baie de Bou-Ismaïl encore plus attrayante pour le développement de projets de conchyliculture.

Tableau III.1 : Caractéristiques spatiales des conchylicoles

Zones	Superficie (hectare)	Distance du port le plus proche (m)	Distance la plus proche de la côte (m)
Cap Djinet 2	16,8	1757	218
Cap Djinet 1	21,6	2838	288
Tipaza	77,8	395	< 100
Chenoua	103,7	3590	< 100
Aîn Tagourait	46,2	1594	< 100
Bouharoun	139,3	134	< 100
Sidi Fredj 1	86,6	3102	931
Sidi Fredj 2	17,6	1983	716
El Marsa 2	41,8	2463	< 100
El Marsa 1	4,3	1647	< 100

Tableau III.2 : Paramètres environnementaux des zones conchylicoles

Zones	Chlorophylle (µg/L)	MES (mg/L)	SST (°C)	Bathymétrie (m)	Vitesse du courant (m/s)	Hauteur des vagues (m)
Zone Cap Djinet 2	1,71	55,33	21,49	-5,80	0,32	2,32
Zone Cap Djinet 1	1,64	56,55	21,89	-5,24	0,33	2,61
Zone Tipaza	1,17	40,88	20,41	-15,85	0,24	1,85
Zone Chenoua	1,11	44,92	21,45	-16,60	0,35	1,82
Zone Aïn Tagourait	1,49	37,47	20,95	-10,90	0,28	1,56
Zone Bouharoun	1,45	41,72	20,78	-10,48	0,30	1,60
Zone Sidi Fredj 1	1,13	55,92	20,40	-14,52	0,11	2,94
Zone Sidi Fredj 2	1,22	57,63	20,29	-13,11	0,13	2,91
Zone El Marsa 2	1,33	84,44	21,32	-13,48	0,28	2,77
Zone El Marsa 1	1,44	86,82	21,34	-9,22	0,27	2,63

III.4 Validation des résultats

Afin de valider nos résultats, le critère de présence de fermes conchylicoles a été ôté de la carte des zones légales, pour voir si ces fermes, déjà présentes et opérationnelles seraient identifiées par la méthodologie utilisée dans cette étude. En effet, d’après les figures III.23 et III.24, les deux fermes situées à Aïn Tagourait et à Aïn Taya sont bien incluses dans les zones identifiées, ce qui est en parfait accord avec les résultats présentés plus haut.

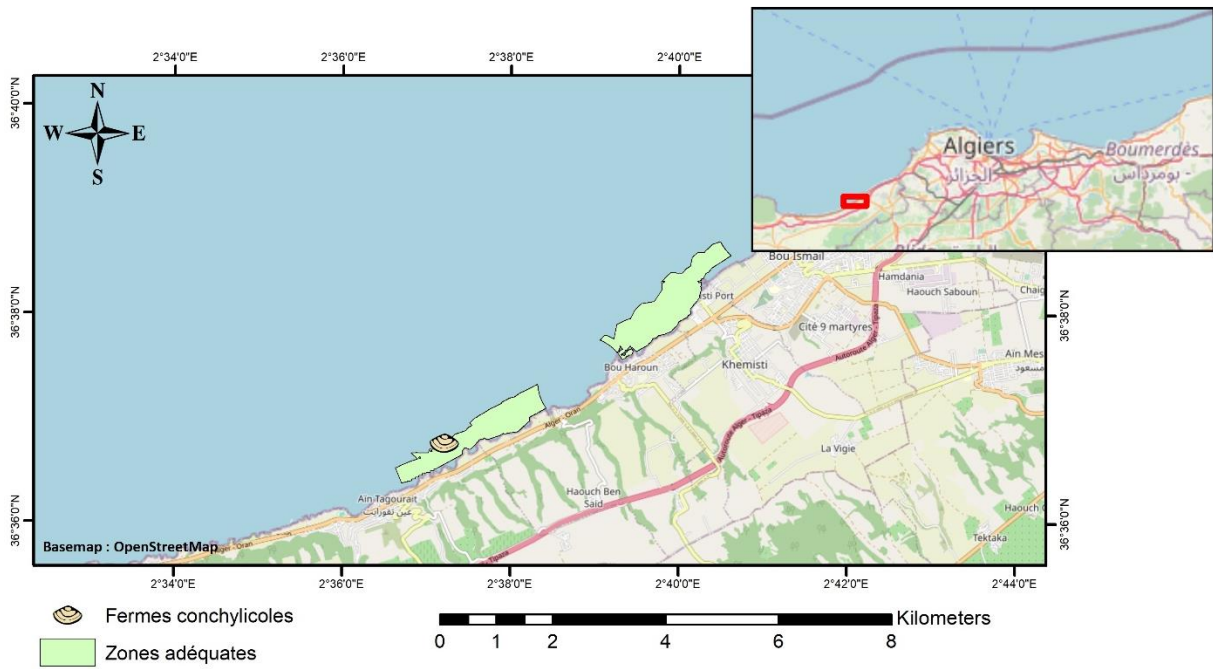


Figure III.23 : Ferme conchylicole de Ain Tagourait

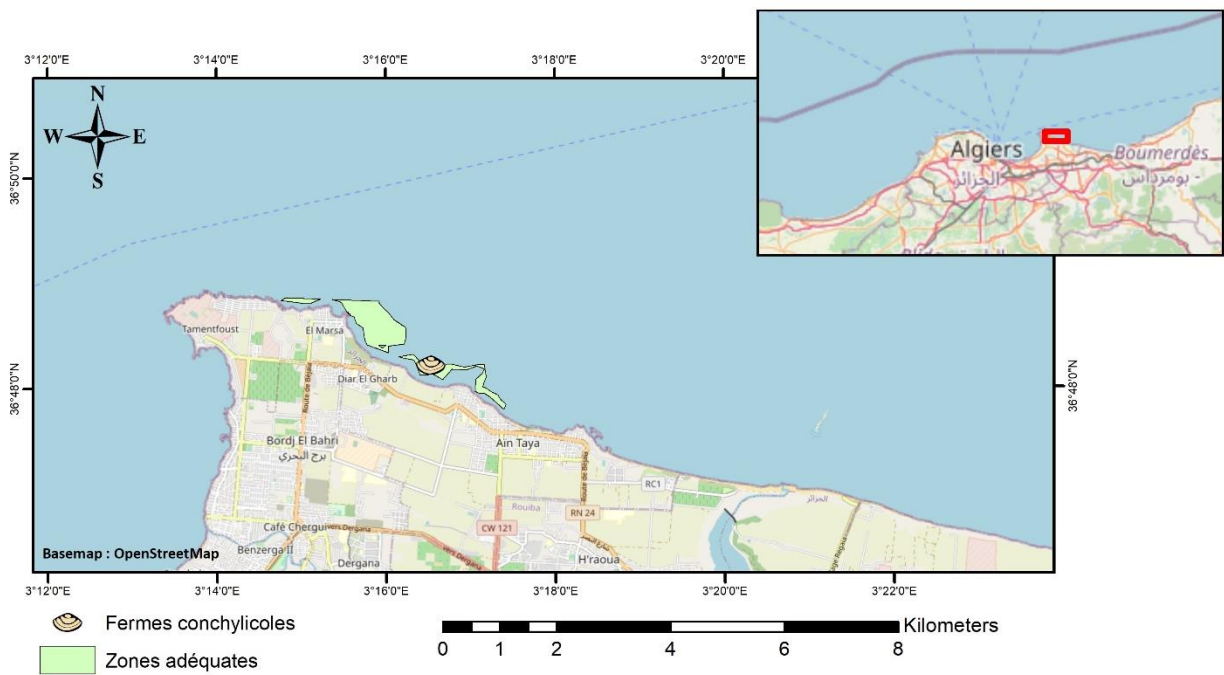
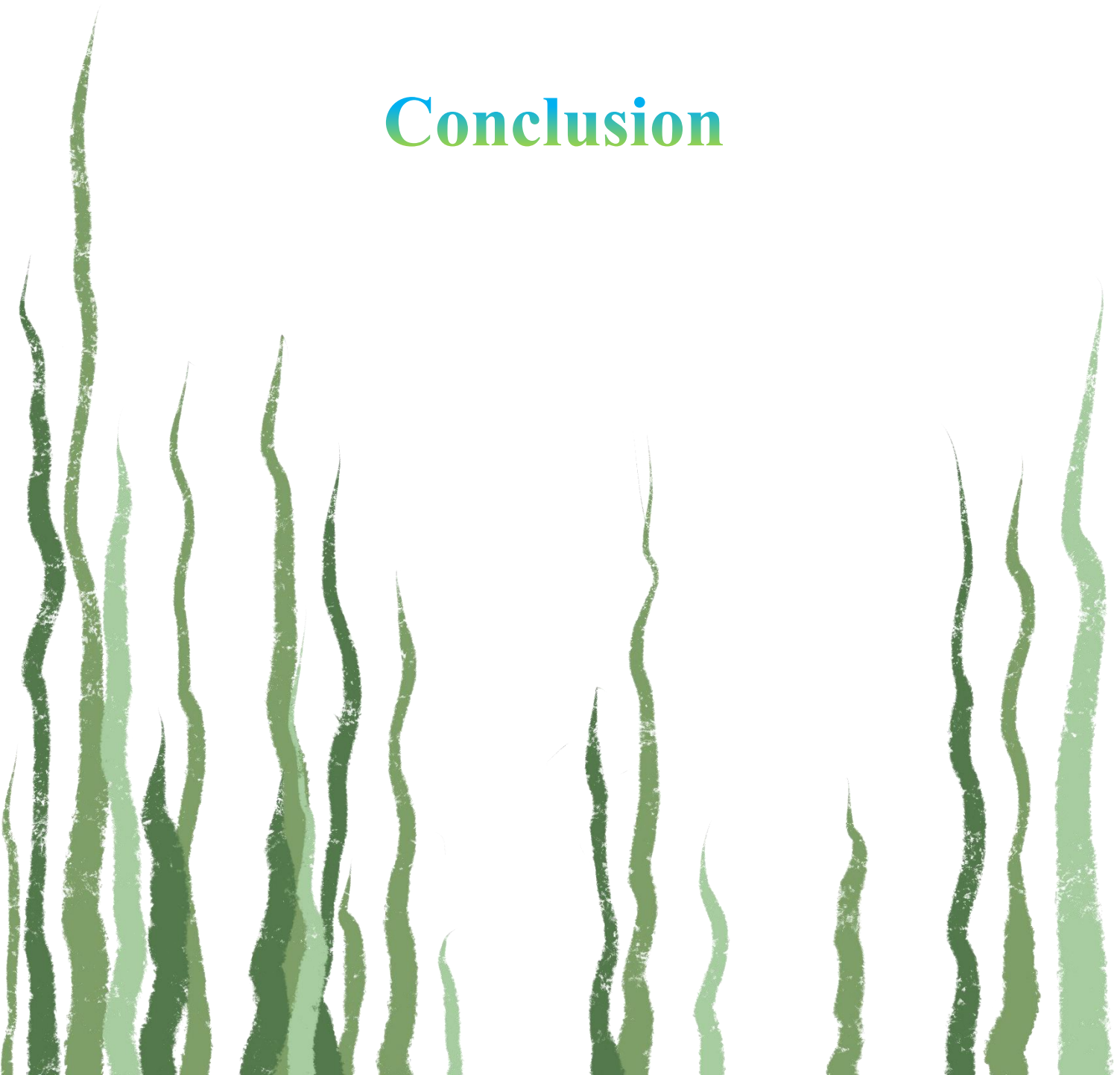


Figure III.24 : Ferme conchylicole de Ain Taya

Conclusion



CONCLUSION

Ce mémoire avait pour ambition de localiser des zones propices à l'élevage conchylicole dans la région centre du littoral algérien. La méthodologie adoptée nécessite un traitement d'images satellitaires, des systèmes d'information géographique et une modélisation numérique pour la collecte de données. Elle soumet ces dernières à une analyse multicritère pour l'identification des zones. Le but était aussi de vérifier si la méthodologie choisie pouvait produire des résultats fiables et cohérents qui renseigneraient davantage sur le potentiel aquacole du littoral algérien et serviraient comme référentiel pour le choix de futurs sites d'élevage.

L'étude suit une approche écosystémique afin d'identifier des sites qui répondent aux principes de développement durable des zones côtières. Elle prend en compte les différents usages du système littoral ainsi que les écosystèmes qui s'y trouvent. Elle consiste en la détermination des contraintes légales et des conflits d'usages, en l'analyse multicritère des facteurs environnementaux partagés entre des facteurs de croissances et de survie de l'élevage et des facteurs qui renseignent le niveau de protection des fermes.

Dix zones ont pu être identifiées dans la zone d'étude. Elles sont réparties uniquement sur la baie de Bou-Ismaïl et la baie de Zemmouri car la baie d'Alger qui connaît un trafic maritime trop important, est disqualifiée de cette sélection. Les résultats indiquent que les contraintes légales en plus du facteur hydrodynamique sont les plus limitants à l'hébergement d'une activité conchylicole dans la frange littorale étudiée car le reste des variables environnementales répondent aux normes indiquées.

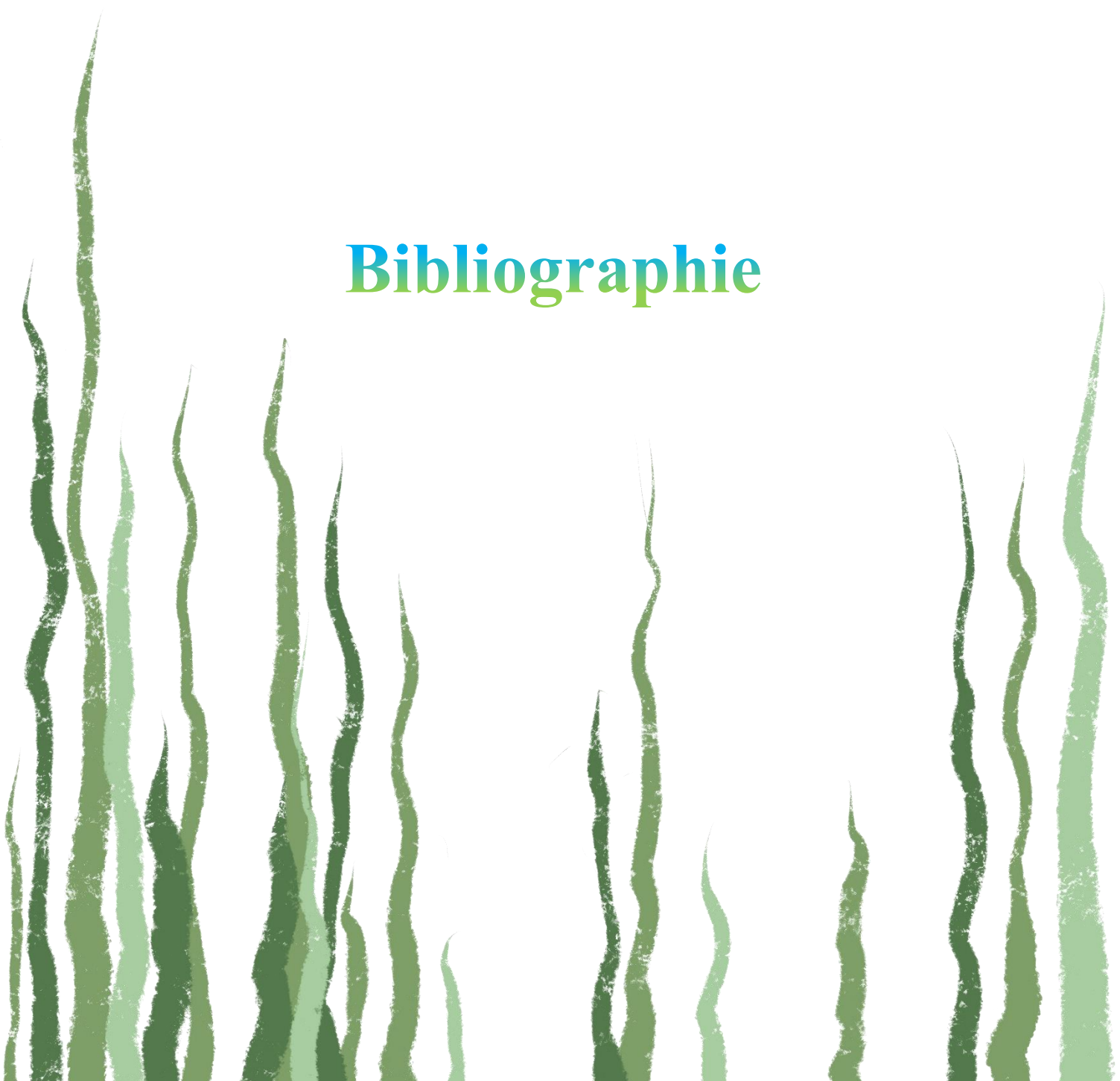
Ce travail nous a permis de repérer des sites attrayants pour la conchyliculture en partant d'une zone d'étude très large et ce en utilisant une méthodologie qui peut s'adapter à d'autres échelles spatiales ainsi qu'à d'autres types d'élevage. Elle pourrait être appliquée sur toute la côte algérienne et ses données générées peuvent également servir dans d'autres études environnementales. Ce qui rend cette étude si intéressante est son accessibilité, sa reproductibilité et grâce à ses bases mathématiques, sa fiabilité.

Cependant, l'étude a connu quelques limitations qui ont pu avoir une influence sur la précision des résultats en termes de superficies des zones et leur délimitation exacte, notamment :

- L'absence d'une cartographie précise de la posidonie sur toute la zone d'étude, ainsi que celle des faciès sédimentaires et biocénétiques.
- L'absence de données sur les paramètres qui ont une influence sur la qualité du produit comme les concentrations en éléments traces métalliques, les hydrocarbures et les pesticides.
- Les incertitudes liées aux algorithmes d'extraction des données satellites.
- L'absence de conditions aux limites sur toute la zone d'étude

Le travail réalisé peut être complété et poursuivi sous différents aspects. Les résultats permettent déjà de cibler les zones sur lesquelles des investigations complémentaires de terrain serviront à affiner l'étude. Il serait pertinent d'appuyer les données générées par les algorithmes par des données in situ, et quantifier la capacité de charge environnementale des zones identifiées par des modèles tel que le modèle FARM ou DEPOMOD-shellfish pour prévoir les impacts éventuels sur les écosystèmes locaux.

Bibliographie



BIBLIOGRAPHIE

ARNOLD, William S, WHITE, Mary W, NORRIS, Henry A et BERRIGAN, Mark E, 2000. Hard clam (*Mercenaria* spp.) aquaculture in Florida, USA: geographic information system applications to lease site selection. In : *Aquacultural Engineering* [en ligne]. 2000. Vol. 23, n° 1, p. 203-231. DOI [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(00\)00042-X](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(00)00042-X). Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014486090000042X>.

BACHELOT, Morgane, 2010. *Contamination de moules (Mytilus sp.) en milieu marin par des substances pharmaceutiques et produits de soin, Mussels (Mytilus sp.) contamination in marine environment by pharmaceutical substances and care products* [en ligne]. S.l. : Université Montpellier 1. Disponible à l'adresse : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00011/12259/>.

BOMPAIS, Xavier, 1991. *Les filières pour l'élevage des moules Guide pratique*. S.l. : Ifremer.

BOUHMADOUCHE, Mohamed, 2015. Distribution des sédiments fins depuis le bassin versant de l'oued Isser à son embouchure en Méditerranée (Boumerdès, Algérie). In : . 2015. n° January 2015, p. 15-20. DOI 10.5150/cmcm.2015.004.

BRIGOLIN, Daniele, LOURGUIOUI, Hichem, TAJI, Mohamed Amine, VENIER, Chiara, MANGIN, Antoine et PASTRES, Roberto, 2015. Space allocation for coastal aquaculture in North Africa: Data constraints, industry requirements and conservation issues. In : *Ocean & Coastal Management* [en ligne]. 1 novembre 2015. Vol. 116, p. 89-97. [Consulté le 15 décembre 2019]. DOI 10.1016/J.OCECOAMAN.2015.07.010. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0964569115001945>.

CAHYONO, Agung Budi, SAPTARINI, Dian, PRIBADI, Cherie Bhekti et ARMONO, Haryo Dwito, 2017. Estimation of Sea Surface Temperature (SST) Using Split Window Methods for Monitoring Industrial Activity in Coastal Area. In : *Ocean Science and Coastal Engineering*. S.l. : Trans Tech Publications Ltd. 2017. p. 90-95.

CALLIER, Myriam D, MCKINDSEY, Christopher W et DESROSIERS, Gaston, 2008. Evaluation of indicators used to detect mussel farm influence on the benthos: Two case studies in the Magdalen Islands, Eastern Canada. In : *Aquaculture* [en ligne]. 2008. Vol. 278, n° 1, p. 77-88. DOI <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.03.026>. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0044848608001567>.

CAMPBELL, Matthew D. et HALL, Steven G., 2019. Hydrodynamic effects on oyster aquaculture systems: a review. In : *Reviews in Aquaculture*. 2019. Vol. 11, n° 3, p. 896-906. DOI 10.1111/raq.12271.

CHALABI, Abdelhafid, 2010. L'Aquaculture En Algérie Et Son Contexte Maghrebien. In : https://Cmsdata.lucn.Org/Downloads/Aquaculture_Algerie. 2010. p. 39.

DAME, Richard, DANKERS, Norbert, PRINS, Theo, JONGSMA, Henk et SMAAL, Aad, 1991. The influence of mussel beds on nutrients in the Western Wadden Sea and Eastern Scheldt estuaries. In : *Estuaries* [en ligne]. 1991. Vol. 14, n° 2, p. 130-138. DOI 10.2307/1351686. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.2307/1351686>.

DESLOUS-PAOLI, JEAN-MARC, SOUCHU, PHILIPPE, MAZOUNI, NABILA, JUGE, CLAUDE,

DAGAULT et FRANÇOISE, 1998. Relationship between environment and resources: impact of shellfish farming on a Mediterranean lagoon (Thau, France). In : *Oceanologica Acta*. 1998. Vol. 21, p. 831-843.

DHI, 2016. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM Hydrodynamic Module: Short Description. In : . 2016. p. 14.

DIVECO, 2017. « Appui à l'élaboration du Plan d'Aménagement de l'Aquaculture Marine en Algérie ». In : . 2017.

FAO, 2004. Hatchery culture of bivalves. In : . 2004. p. 55.

FAO, 2018. *Etat mondial des pêches et de l'aquaculture*. S.l.

FRANKIC, Anamarija, 2003. *Integrated Coastal Management & Sustainable Aquaculture Development in the Adriatic Sea, Republic of Croatia* [en ligne]. S.l. Disponible à l'adresse : <http://jadran.izor.hr/smeeting/documents/ICM-SAD-CROATIA.pdf>.

GRIMES, Samir, 2010. *Peuplements Benthiques Des Substrats Meubles De La Cote Algerienne: Taxonomie, structure et statut écologique*. S.l. : s.n.

HABIKI, Hanifa et BENSLAMA, Lazreg, 2015. Exploitation des sables de plage et des dunes côtières. Impact sur l'équilibre du littoral entre Boumerdès et Zemmouri El Bahri. (Est-Algérois) Algérie. In : . 2015. p. 155-158. DOI 10.5150/cmcm.2015.031.

HARRIS, Jill, 2008. Pacific oyster, *Crassostrea gigas*. In : *Aquatic Invasions Ecology*. 2008. n° December 2008, p. 1-12.

HEMDANE, Y. et al, 2016. Identification des zones côtières à fort potentiel en énergie marine renouvelable (vagues/houles) à travers l'étude de la morphologie côtière et sous-marine et hydrodynamique. In : *Revue des énergies renouvelables*. 2016.

IFREMER, 2011. Fiche Information Ifremer. In : *Ifremer*. 2011. p. 2007-2009.

KAISER, Michel, LAING, I, UTTING, S D et BURNELL, Gavin, 1998. Environmental impacts of bivalve mariculture. In : *Journal of Shellfish Research*. 1998. Vol. 17, p. 59-66.

KORRES, G, RAVDAS, M et ZACHARIOUDAKI, A, 2019. Mediterranean Sea Waves Hindcast (CMEMS MED-Waves) [Data set]. In : *Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS)*. [en ligne]. 2019. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_HINDCAST_WAV_006_012.

LAMOUTI, Souad, 2010. *Contribution au développement de cartes biocénétiques dans la région centre de la côte Algérienne par la combinaison de méthodes de télédétection et d'observation in situ*. S.l. : Université des sciences et technologie Houari Boumediene.

LONGDILL, P. C., HEALY, T. R., BLACK, K. P. et MEAD, S. T., 2007. Integrated sediment habitat mapping for aquaculture zoning. In : *Journal of Coastal Research*. 2007. n° SPEC. ISSUE 50, p. 173-179.

MAOUCHE, Said, MORHANGE, Christophe et MEGHRAOUI, Mustapha, 2009. Large boulder accumulation on the Algerian coast evidence tsunami events in the western Mediterranean. In : . 2009. Vol. 262, p. 96-104. DOI 10.1016/j.margeo.2009.03.013.

MIRTO, S, LA ROSA, T, DANOVARO, R et MAZZOLA, A, 2000. Microbial and Meiofaunal Response to Intensive Mussel-Farm Biodeposition in Coastal Sediments of the Western Mediterranean. In : *Marine Pollution Bulletin* [en ligne]. 2000. Vol. 40, n° 3, p. 244-252.

DOI [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00209-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00209-X). Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X9900209X>.

NECHAD, B, RUDDICK, K G et PARK, Y, 2010. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. In : *Remote Sensing of Environment* [en ligne]. 2010. Vol. 114, n° 4, p. 854-866. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022>. Disponible à l'adresse : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425709003617>.

NEWELL, Roger I E, CORNWELL, Jeffrey C et OWENS, Michael S, 2002. Influence of simulated bivalve biodeposition and microphytobenthos on sediment nitrogen dynamics: A laboratory study. In : *Limnology and Oceanography* [en ligne]. 2002. Vol. 47, n° 5, p. 1367-1379. DOI 10.4319/lo.2002.47.5.1367. Disponible à l'adresse : <https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.4319/lo.2002.47.5.1367>.

O'REILLY, John E, MARITORENA, Stéphane, MITCHELL, B Greg, SIEGEL, David A, CARDER, Kendall L, GARVER, Sara A, KAHRU, Mati et MCCLAIN, Charles, 1998. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. In : *Journal of Geophysical Research: Oceans* [en ligne]. 1998. Vol. 103, n° C11, p. 24937-24953. DOI 10.1029/98JC02160. Disponible à l'adresse : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/98JC02160>.

OTMANI, Housseyn, BELKESSA, Rabah, RABEHI, Walid, GUERFI, Mokhtar et BOUKHDICHE, Walid, 2019. Dégradation des dunes côtières algéroises entre pression de l'urbanisation et conséquences sur l'évolution de la ligne de rivage. In : *Geo-Eco-Marina*. 2019. Vol. 2019, n° 25, p. 131-145. DOI 10.5281/zenodo.3609777.

PRINS, T C et SMAAL, A C, 1994. The role of the blue mussel *Mytilus edulis* in the cycling of nutrients in the Oosterschelde estuary (The Netherlands). In : NIENHUIS, P H et SMAAL, A C (éd.), *The Oosterschelde Estuary (The Netherlands): a Case-Study of a Changing Ecosystem* [en ligne]. Dordrecht : Springer Netherlands. p. 413-429. ISBN 978-94-011-1174-4. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.1007/978-94-011-1174-4_30.

RADIARTA, I Nyoman, SAITOH, Sei-Ichi et MIYAZONO, Akira, 2008. GIS-based multi-criteria evaluation models for identifying suitable sites for Japanese scallop (*Mizuhopecten yessoensis*) aquaculture in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan. In : *Aquaculture* [en ligne]. 1 novembre 2008. Vol. 284, n° 1-4, p. 127-135. [Consulté le 4 novembre 2019]. DOI 10.1016/J.AQUACULTURE.2008.07.048. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848608005437>.

SALEM CHERIF, Yousra, MEZOUAR, Khoudir, GUERFI, Mokhtar, SALLAYE, Miloud et DAHMANI, Abd El Alim, 2019. Nearshore hydrodynamics and sediment transport processes along the sandy coast of Boumerdes, Algeria. In : *Arabian Journal of Geosciences* [en ligne]. 2019. Vol. 12, n° 24, p. 800. DOI 10.1007/s12517-019-4981-0. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4981-0>.

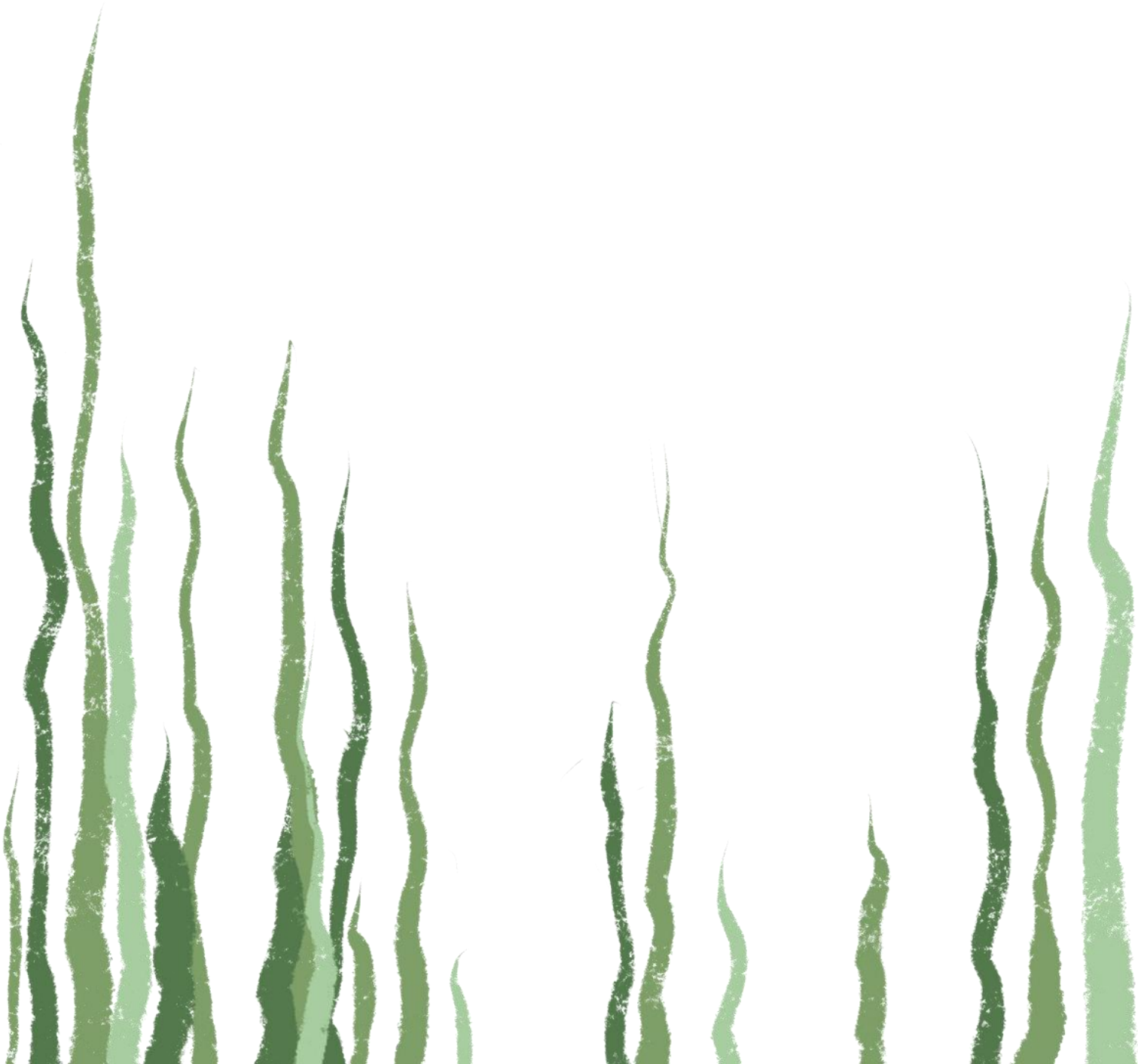
SILVA, C., FERREIRA, J.G., BRICKER, S.B., DELVALLS, T.A., MARTÍN-DÍAZ, M.L. et YÁÑEZ, E., 2011. Site selection for shellfish aquaculture by means of GIS and farm-scale models, with an emphasis on data-poor environments. In : *Aquaculture* [en ligne]. 8 août 2011. Vol. 318, n° 3-4, p. 444-457. [Consulté le 16 décembre 2019]. DOI 10.1016/J.AQUACULTURE.2011.05.033. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848611004388>.

SONGSANGJINDA, Putth, MATSUDA, Osamu, YAMAMOTO, Tamiji, RAJENDRAN, Narasimmalu et MAEDA, Hajime, 2000. The Role of Suspended Oyster Culture on Nitrogen Cycle in Hiroshima Bay. In : *Journal of Oceanography* [en ligne]. 2000. Vol. 56, n° 2, p. 223-231. DOI 10.1023/A:1011143414897. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1023/A:1011143414897>.

YELLES-CHAOUUCHE, A. et al, 2009. The 1856 Tsunami of Djidjelli (Eastern Algeria): Seismotectonics, Modelling and Hazard Implications for the Algerian Coast. In : *Pure and applied geophysics*. 2009.

ZERROUK, Chabane, 2016. *Cartographie de la limite supérieure de l'herbier à Posidonia oceanica et du Trottoir à Vermets dans la région de Tipaza*. S.l. : École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.

Annexes



ANNEXES

Annexe A : Critères de sélection des zones d'activité aquacole d'après la circulaire N° 44 du 12 Mai 2014

Tableau A.1 : Caractéristiques recommandées pour l'installation des cages en mer de
25 m de diamètre

Désignation	Critères de sélection
I- <u>Installation des cages en mer</u> ➤ <u>Sites marin à éviter :</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Les aires marines protégées et sites archéologiques ; • Les zones avec la présence phanérogames (herbiers de posidonie et des communautés benthiques sensibles). • Les zones avec pipelines sous-marins et récifs artificiels pour le repeuplement ; • Les zones caractérisées par de graves altérations de l'équilibre environnemental (changements soudains des paramètres physico-chimiques). • Sites à fond rocheux s'orientant vers un substrat composé de vase, sable ou sable-vase, compatible avec l'installation des ancrés ; • Sites en mer protégés des vents dominants (de préférence un site abrité) ; • Eviter les sites en face d'embouchure d'Oueds

- Le site en mer doit être en retrait par rapport aux plages de baignades et des zones touristiques.
- **Distance par rapport aux zones à posidonie :**
 - 800 m et plus.
- **Distance par rapport à la côte :**
 - 03 Km par rapport aux grandes agglomérations urbaines et de zones touristiques afin d'éviter la contamination
 - 05 Km par rapport aux grands sites industriels.
 - 02 km par rapport aux zones de trafic maritime
 - 02 km par rapport aux zones de pêche.
 - 02 Km par rapport aux estuaires de grands fleuves récepteurs d'eaux usées (urbaines et industriels)
- **Distance par rapport au port:**
 - Moins de 5 km (pas plus de 20 mn de trajet).

CAGES FLOTTANTES DE 25 m de diamètre :

- **Profondeur d'installation :**
 - 35 à 40 Mètres.
 - **Distance entre les établissements aquacoles :**
 - Distance entre les établissements aquacoles : 05 km
 - Houle : 02 m
-

- Courant : 0,5 à 1 m/s
- **Superficie utile pour installer un réseau de 08 cages de 25m de diamètre**
- 500m x 400 m = 20 Hectares (y compris les amarrages)

NB. : La superficie en mer devra tenir compte de la surface occupée par les cages additionnées de celle nécessaire aux ancrages des cages, à la signalisation et à une éventuelle extension (la superficie est celle du fond et non celle de la surface);

- De 10 à 25 m
- **Distance entre deux cages**

MESURES PRISES EN COMPTE POUR UN ELEVAGE EN CAGE DE 25 METRES DE DIAMETRE :

-Volume d'élevage	4 900 m ³
-Alevinsensemencés	250 000
-Taille initiale	8-10 grammes
-Densité de mise en charge	13 à 15 kg/m ³
-Production d'une cage de 25 m	70 tonnes
	300 – 350 grammes

-Taille marchande	200 000
-Nombre final de poissons	20 %
-Taux de mortalité	

II- Infrastructure portuaire

Il est important de s'assurer de :

- L'existence d'un réseau électrique, d'eau douce et d'une station d'avitaillement ;
- Avoir l'espace nécessaire (ou disponible à proximité) pour déposer les équipements permettant l'assemblage des cages et des systèmes d'amarrage.
- La disponibilité d'un poste à quai pour les catamarans et les barges.
- Etre distant de 4 à 5 Km du site en mer sélectionné.

III- Infrastructure à terre :

- Le site doit présenter une accessibilité facile et aisée ;
 - Le site doit disposer de toutes les commodités (eau, électricité, ...)
 - Le site ne doit pas présenter de conflits d'usage et environnemental ;
 - La superficie maximale nécessaire pour implanter une base de vie est :
 - 1500 m² pour les projets de pisciculture
 - 800m² pour les projets de conchyliculture
-

- Les infrastructures devant être installées seront uniquement celles liées à la production (unité de conditionnement, fabrique de glace, ...)
 - La base à terre doit être distante d'un maximum de 4 à 5 Km par rapport au port (soit 30 mn de trajet au maximum);
-

Tableau A.2 : Caractéristiques DES sites d'installations des filières conchycoliques.

Désignation	Critères de sélection
<u>Installation des filières conchycoliques en mer</u>	
Choix des sites en mer :	Eviter les sites reconnus pour le développement des microalgues ;
	Eviter les zones navigables et les zones de pêche ;
	Vitesse des courants pas plus de 1 m/s (pour éviter les frottements entre les filières) ;
	Prévoir un chenal d'accès d'au moins 50 m entre les filières ;
	Profondeur entre 7 à 35 m ;

Profondeur d'installation :

Une distance de 1 km ;

**Distance entre les
établissements conchylicoles :**

05 ha pour un établissement de 100 Tonnes.

Superficie utile :

Infrastructure à terre :

Le site doit présenter une accessibilité facile et aisée ;

Le site doit disposer de toutes les commodités (eau, électricité, ...) ;

Le local doit être proche du lieu de débarquement pour la purification du produit ;

Avoir un poste à quai pour amarrer la barge de travail.

Encourager les investissements groupés pour les infrastructures à terre.

ANNEXE B : PROGRAMME DE TRAITEMENT DES IMAGES SATELLITAIRES SUR PYTHON

Importation des librairies

```
import ee
import folium
import geehydro
import math
```

```
from datetime import datetime as dt
from IPython.display import Image
```

Connexion au serveur de Google Earth Engine

```
# initialize the connection to the server
ee.Authenticate()
ee.Initialize()
```

Définition de la fonction de masque de nuages

```
def getQABits(image, start, end, mascara):
    # Compute the bits we need to extract.
    pattern = 0
    for i in range(start,end+1):
        pattern += 2**i
    # Return a single band image of the extracted QA bits, giving the
    band a new name.
    return image.select([0], [mascara]).bitwiseAnd(pattern).rightShift(sta
rt)
#A function to mask out cloudy pixels.
def maskQuality(image):
    # Select the QA band.
    QA = image.select('pixel_qa')
    # Get the internal_cloud_algorithm_flag bit.
    sombra = getQABits(QA,3,3,'cloud_shadow')
    nubes = getQABits(QA,5,5,'cloud')
    # var cloud_confidence = getQABits(QA,6,7, 'cloud_confidence')
    cirrus_detected = getQABits(QA,9,9,'cirrus_detected')
    #var cirrus_detected2 = getQABits(QA,8,8, 'cirrus_detected2')
    #Return an image masking out cloudy areas.
    return image.updateMask(sombra.eq(0)).updateMask(nubes.eq(0)).updateMas
k(cirrus_detected.eq(0)))
```

Initialisation de l'interface graphique pour la cartographie

```
algiers_map = folium.Map(location=[36.8, 3.05], zoom_start=10)
```

Importation des ROI pour le découpage des images

```
coast = ee.Collection.loadTable('users/izehichem/coastline_poly')
coast_geo = coast.geometry()
algiers_roi = ee.Geometry.Rectangle([2.2,36.5, 3.8, 36.9])
```

Importation de la collection d'image Landsat 8

```
landsat = ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C01/T1_SR").filterBounds(algiers_roi).filterMetadata('CLOUD_COVER', 'LESS_THAN', 0.5).map(maskQuality);
```

Definition d'une fonction englobant les algorithmes d'extraction

```
def oceanL8(imageCollection, roi, folder):
    for m in [9]:
        #Filtration des images par mois
        landsat_season = imageCollection.filter(ee.Filter.calendarRange(2014, 2019, 'year')).filter(ee.Filter.calendarRange(m, m, 'month')).mean()

        #----- Chlorophyll algorithme -----
        blue1 = landsat_season.select('B1')
        blue2 = landsat_season.select('B2')
        green = landsat_season.select('B3')
        R1 = blue1.divide(green)
        R2 = blue2.divide(green)
        array = [R1, R2]
        R_max = R1.max(R2)
        R = R_max.log10()

        chl = landsat_season.expression('10**((0.2412 - 2.0546*R + 1.1776*R**2 - 0.5538*R**3 -0.4570*R**4) ', {
            'R' : R
        }).clip(roi);
        #Exportation du resultat vers google drive
        task1 = ee.batch.Export.image.toDrive(image=chl,
            folder=folder,
            region=roi,
            scale=30,
            fileNamePrefix='chl_%d' % (m))

        task1.start()

    #----- Total particulate matter algorithme -----

    b4 = landsat_season.select('B5')
    A = 2971.93
    C = 0.2115
```

```

rho = b4.multiply(math.pi)

TPM = landsat_season.expression('A*(rho/(1 - (rho/C)))', {
    'A' : A,
    'rho' : rho,
    'C' : C
}).clip(roi);

task2 = ee.batch.Export.image.toDrive(image=TPM,
                                     folder=folder,
                                     region=roi,
                                     scale=30,
                                     fileNamePrefix='TPM_%d' %(m))

task2.start()

#----- Sea surface Temperature algorithm -----

b10 = landsat_season.select('B10').multiply(0.1).subtract(273.5).c
lip(roi)
b11 = landsat_season.select('B11').multiply(0.1).subtract(273.5).c
lip(roi)

SST = landsat_season.expression('b10 + (2.946*(b10 - b11))-0.038',
{
    'b10' : b10,
    'b11' : b11
}).clip(roi);

task3 = ee.batch.Export.image.toDrive(image=SST,
                                     folder=folder,
                                     region=roi,
                                     scale=30,
                                     fileNamePrefix='SST_%d' %(m))

task3.start()

```

Initialisation de l'extraction

```
oceanL8(landsat, coast_geo, 'Landsat_images')
```

Aperçu des résultats

```
algiers_map.addLayer(ch1, {min:0,max:2,'palette':['green','yellow','orange',
', 'red', 'blue']})
algiers_map
```

Annexe C : cartes hydrodynamiques de la zone d'étude

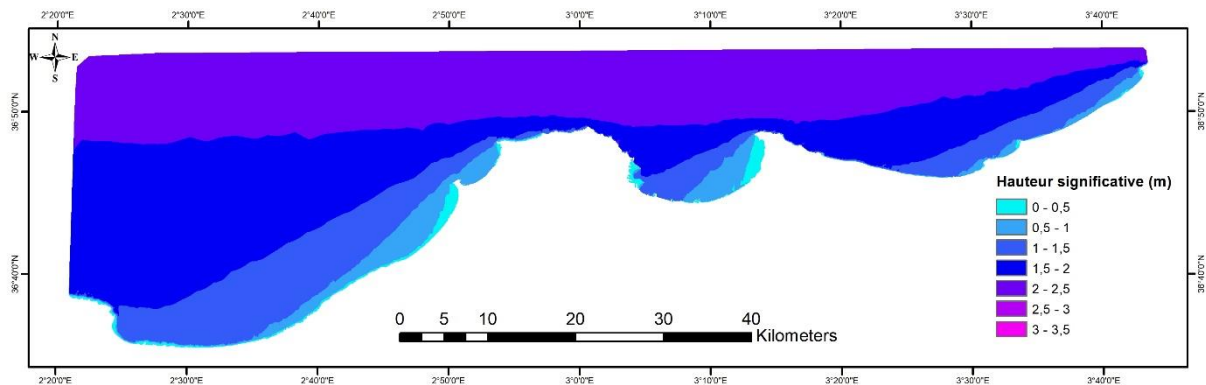


Figure C.1: Résultat du module SW de Mike 21 pour une houle de direction ENE.

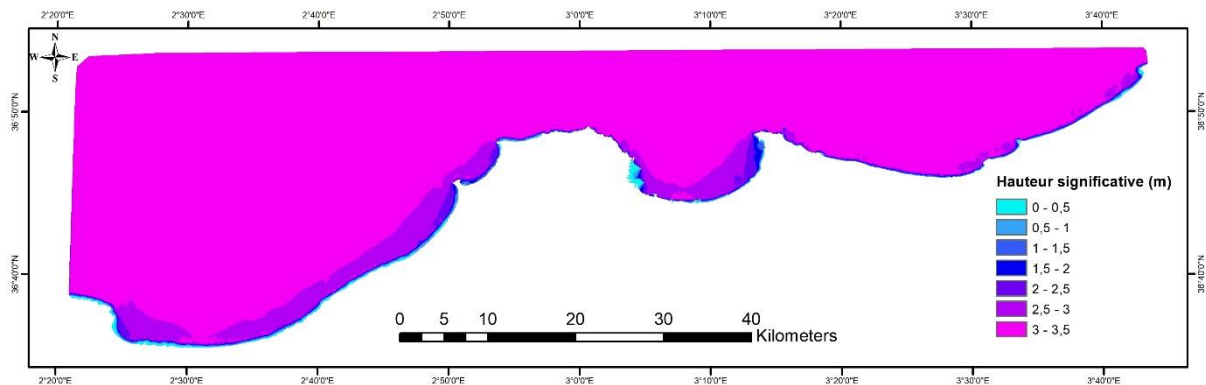


Figure C.2 : Résultat du module SW de Mike 21 pour une houle de direction N.

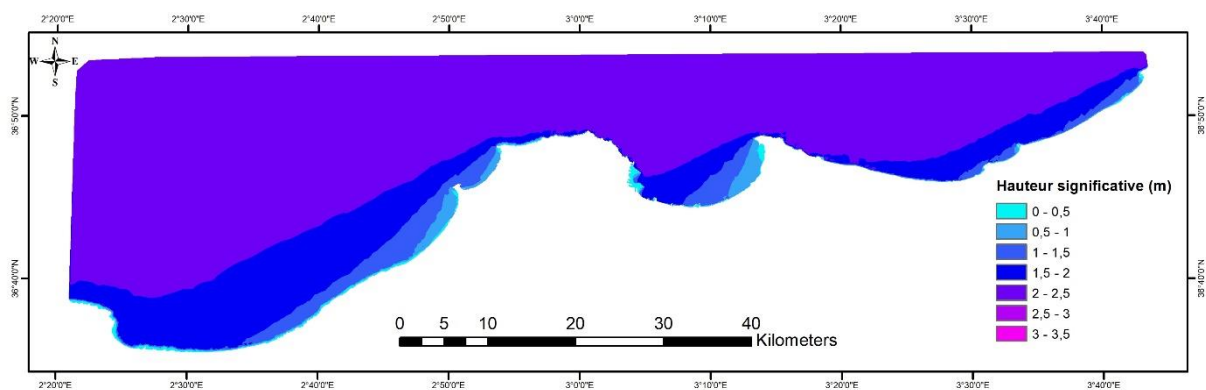


Figure C.3 : Résultat du module SW de Mike 21 pour une houle de direction NE.

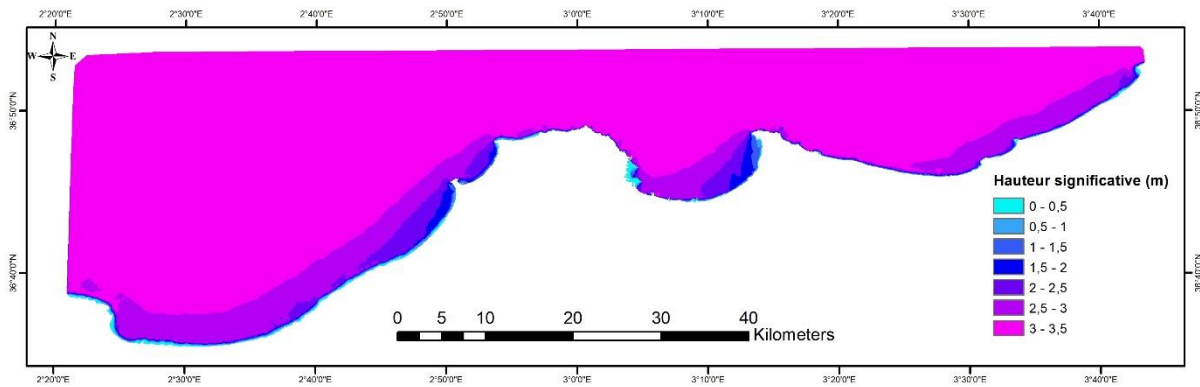


Figure C.4 : Résultat du module SW de Mike 21 pour une houle de direction NNE.

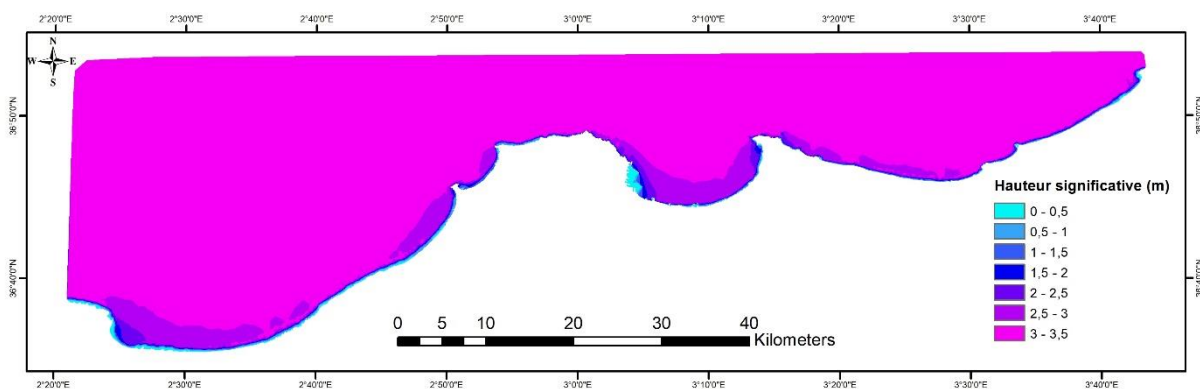


Figure C.5 : Résultat du module SW de Mike 21 pour une houle de direction NNW.

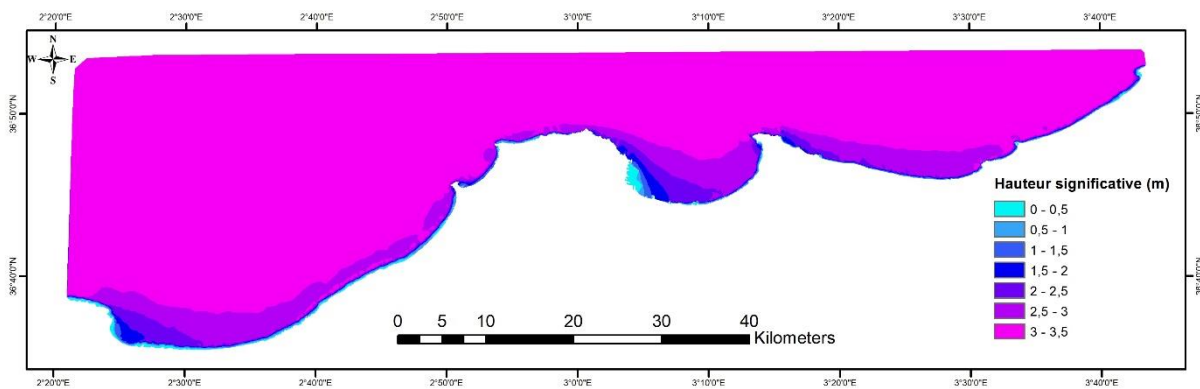


Figure C.6 : Résultat du module SW de Mike 21 pour une houle de direction NW.

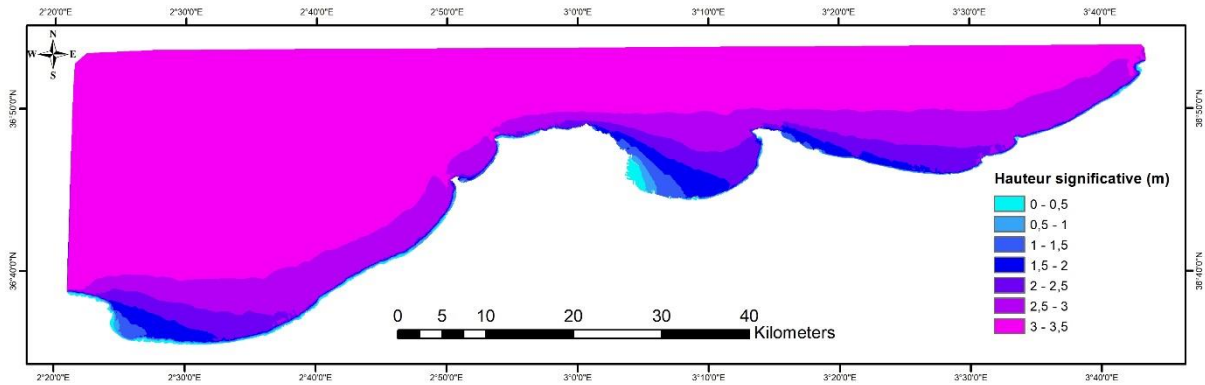


Figure C.7 : Résultat du module SW de Mike 21 pour une houle de direction WNW.

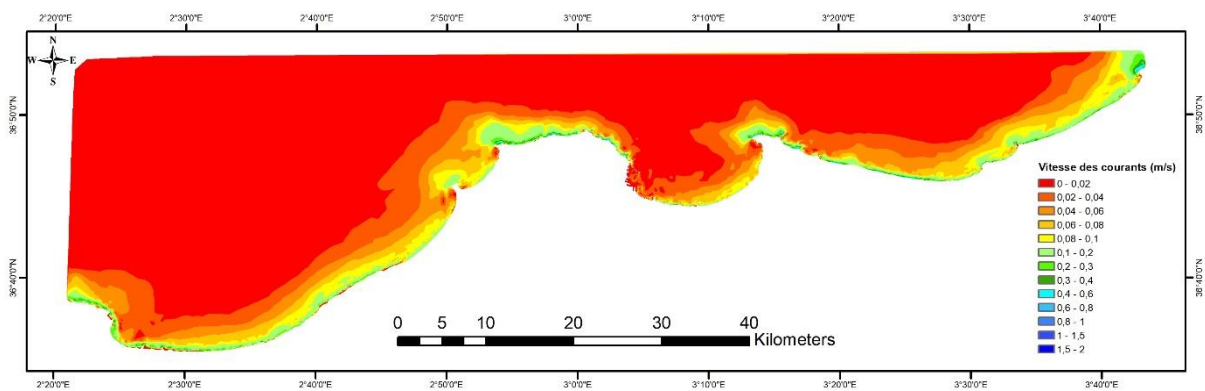


Figure C.7 : Résultat du module HD de Mike 21 pour une houle de direction ENE.

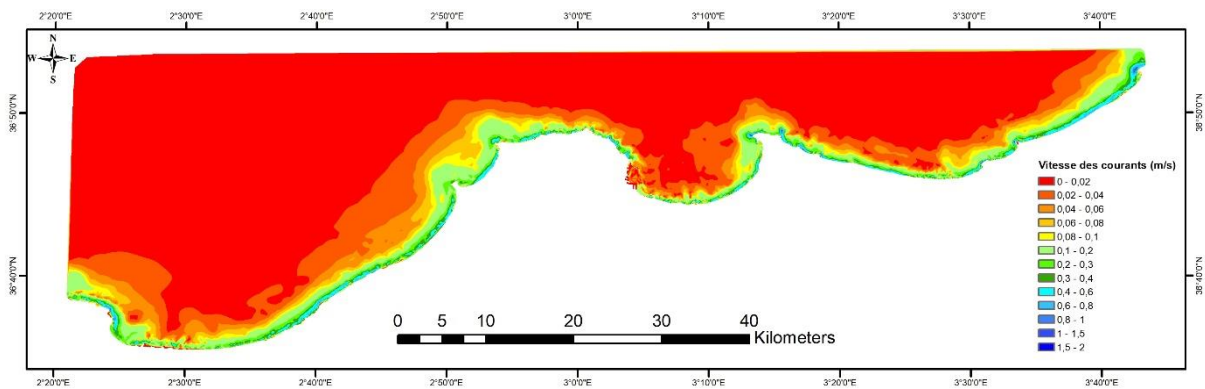


Figure C.8 : Résultat du module HD de Mike 21 pour une houle de direction N.

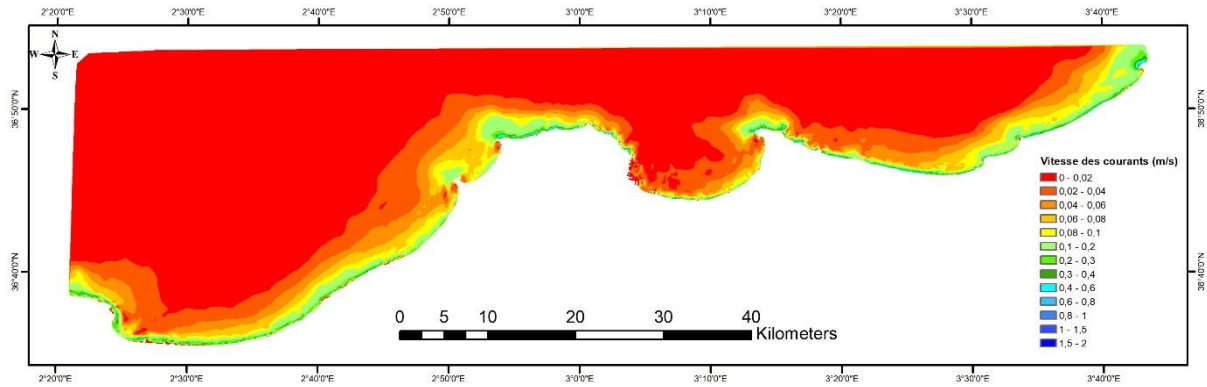


Figure C.9 : Résultat du module HD de Mike 21 pour une houle de direction NE.

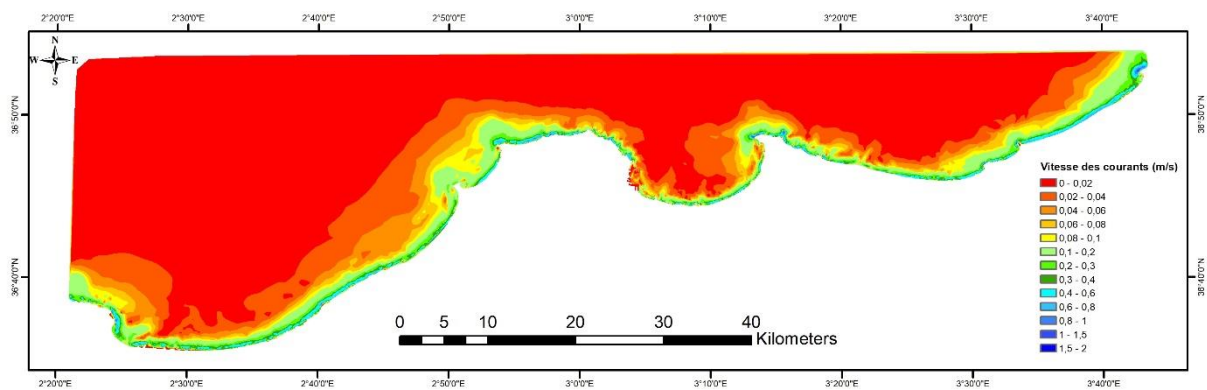


Figure C.10 : Résultat du module HD de Mike 21 pour une houle de direction NNE.

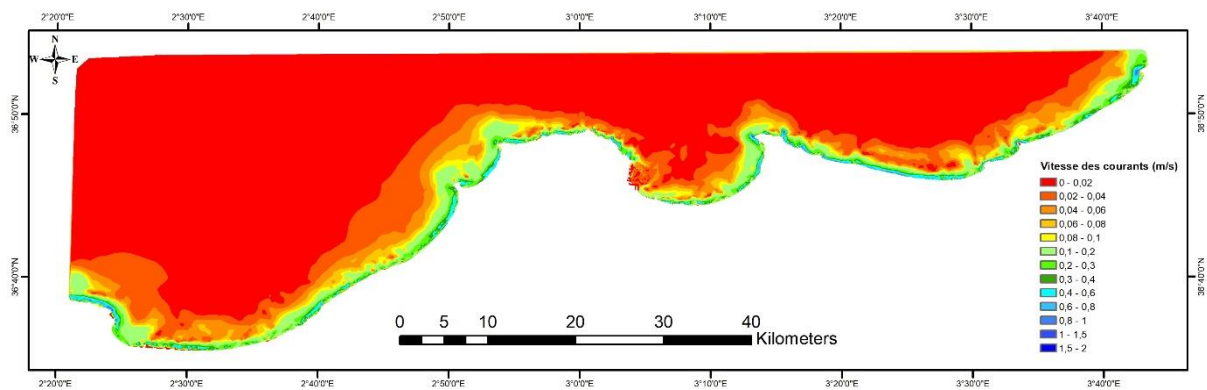


Figure C.11 : Résultat du module HD de Mike 21 pour une houle de direction NNW.

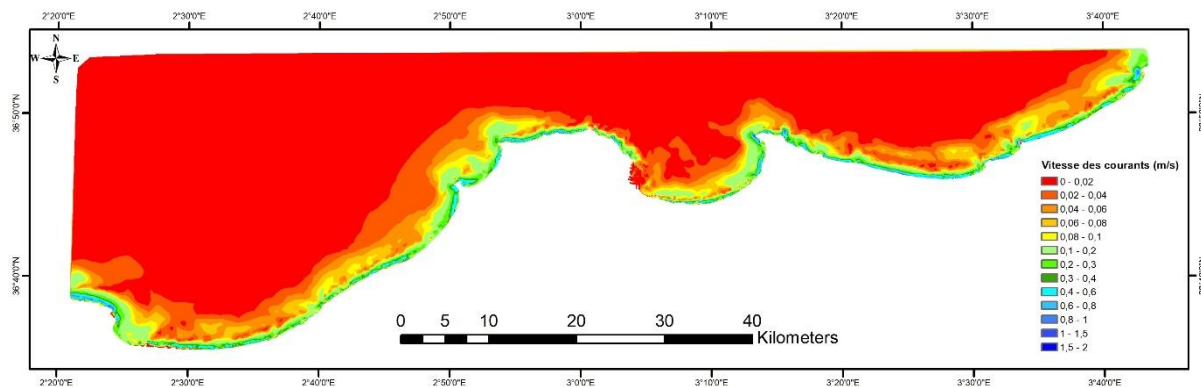


Figure C.12 : Résultat du module HD de Mike 21 pour une houle de direction NW.

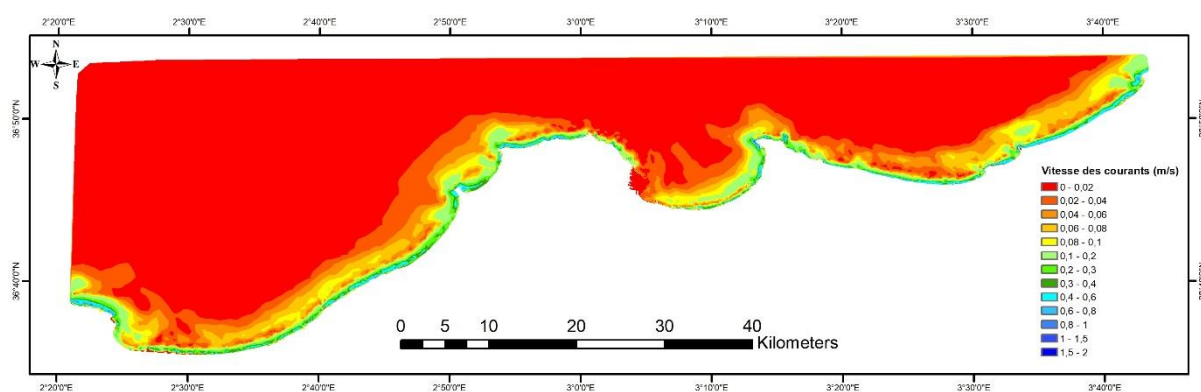


Figure C.13 : Résultat du module HD de Mike 21 pour une houle de direction WNW.

Résumé :

Une approche écosystémique pour la sélection des sites propices à l'activité conchylicole qui associe les systèmes d'information géographique (SIG), la télédétection et la modélisation numérique a été développée. La méthodologie détermine les zones aquacoles appropriées à travers deux étapes d'analyse : (i) l'analyse des contraintes légales et conflits d'usage en utilisant le SIG pour générer une carte des contraintes ; (ii) une évaluation multicritère qui prend en compte les facteurs environnementaux partagés entre des facteurs de croissance et de survie de l'élevage (température, chlorophylle, matières en suspension) et des facteurs de protection des fermes (vitesse des courants, hauteur des vagues) pour générer des cartes montrant les zones les plus appropriées pour l'élevage conchylicole. La méthodologie a été appliquée pour la culture de l'huître creuse (*Crassostrea gigas*) et la moule méditerranéenne (*Mytilus galloprovincialis*) en élevage en suspension par filières dans la région centre du littoral algérien. Dix zones ont été identifiées au total, distribuées sur différentes étendues de la baie de Zemmouri et de la baie de Bou-Ismaïl.

Mots clés : approche écosystémique à l'aquaculture, conchyliculture, modélisation numérique, systèmes d'information géographique, télédétection, analyse multicritère

Abstract:

An ecosystem approach for the selection of suitable sites for shellfish farming activity that combines geographic information systems (GIS), remote sensing and numerical modelling has been developed. The methodology identifies suitable aquaculture areas through two stages of analysis: (i) the analysis of legal constraints and usage conflicts using GIS to generate a constraints map; (ii) a multi-criteria assessment that takes into account environmental factors split between growth and farm survival factors (temperature, chlorophyll, particulate suspended matter) and farm protection factors (current velocity, wave height) to generate maps showing the most suitable areas for shellfish farming. The methodology has been tested for the culture of pacific oysters (*Crassostrea gigas*) and Mediterranean blue mussels (*Mytilus galloprovincialis*) in suspended culture in the central region of the Algerian coast. A total of ten areas have been identified, distributed over different extents of the Bay of Zemmouri and the Bay of Bou-Ismaïl.

Keywords: ecosystem approach to aquaculture, shellfish farming, numerical modelling, geographic information systems, remote sensing, multi-criteria analysis

ملخص:

تم تطوير منهجية مبنية على نهج النظام الإيكولوجي لاختيار المواقع المناسبة لنشاط تربية المحاريات التي تعتمد على نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد والنمذجة الرقمية. تحدد المنهجية المناطق المناسبة لتربية المائيات من خلال مرحلتين من التحليل: (1) تحليل القيود القانونية ونزاعات الاستخدام باستخدام باستعمال نظم المعلومات الجغرافية لإنشاء خريطة القيود القانونية ؛ (2) تقييم متعدد المعايير يأخذ بالاعتبار العوامل البيئية المنقسمة بين عوامل النمو (درجة الحرارة ، الكلوروفيل ، الجسيمات العالقة) وعوامل حماية المزرعة (سرعة التيار ، ارتفاع الامواج) لإنشاء خرائط توضح المناطق الملائمة لتربية المحار . تم اختبار المنهجية على بلح البحر الأبيض المتوسط و محار المحيط الهادي في المنطقة الوسطى من الساحل الجزائري. وقد تم تحديد مجموعة عشر مناطق ، موزعة على نطاقات مختلفة من خليج زموري وخليج بوسماعيل.

الكلمات المفتاحية : نهج النظام الإيكولوجي لتربية المائيات ، تربية المحاريات ، النمذجة الرقمية ، نظم المعلومات الجغرافية، الاستشعار عن بعد ، التحليل متعدد المعايير.