

République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل  
Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur  
d'état en sciences de la mer et de l'aménagement du littoral  
**Spécialité** : Ingénierie de l'Environnement Marin et Côtier

**Thème :**

**Cartographie de la bathymétrie des eaux côtières :  
Apport de l'océanographie spatiale**

Préparé par :

**BOUGHERARA Alla Eddine**

Soutenu le 18 /07/2023 devant le jury composé de :

M <sup>me</sup> KERGHEL	ENSSMAL	<b>Présidente</b>
M <sup>me</sup> BENZOUAI	ENSSMAL	<b>Promotrice</b>
M <sup>me</sup> GHAZI	ENSSMAL	<b>Examinatrice</b>
M.LARGIUOI	ENSSMAL	<b>Examinateur (BMC)</b>
M <sup>me</sup> SELM CHERIF	ENSSMAL	<b>Examinatrice (Invité)</b>

Année universitaire : 2022- 2023

République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل  
Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



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

**Domaine :** Science de la nature et de la vie

**Filière :** Hydrobiologie marine et continentale

**Spécialité :** Ingénierie de l'Environnement Marin et Côtier

**Thème :**

**Cartographie de la bathymétrie des eaux côtières :  
Apport de l'océanographie spatiale**

Préparé par :

**BOUGHERARA Alla Eddine**

Soutenu le 18/07/2023 devant le jury composé de :

M <sup>me</sup> KERGHÉL	ENSSMAL	<b>Présidente</b>
M <sup>me</sup> BENZOUAI	ENSSMAL	<b>Promotrice</b>
M <sup>me</sup> GHAZI	ENSSMAL	<b>Examinatrice</b>
M.LARGIUOI	ENSSMAL	<b>Examinateur (BMC)</b>
M <sup>me</sup> SELM CHERIF	ENSSMAL	<b>Examinatrice (Invité)</b>

Année universitaire : 2022- 2023



## *Remerciement*

---

Je tiens tout d'abord à exprimer mes sincères remerciements à ma promotrice, Mme BENZOUAI, pour son soutien constant, ses conseils précieux et son encadrement tout au long de mon projet de fin d'études. Sa patience et sa bienveillance ont été des éléments clés de ma réussite, et je lui suis profondément reconnaissant pour son implication et son accompagnement tout au long de ce parcours.

Je souhaite également exprimer ma gratitude à l'incubateur de notre école, Bleu Start, et en particulier à Mme MAOUAL, pour son soutien et son assistance dans la réalisation de notre Business Model Canvas (BMC).

Je tiens également à remercier chaleureusement le comité du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail de fin d'études.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de mon projet de fin d'études. Leur soutien, leur expertise et leur collaboration ont été essentiels pour la réussite de ce travail.

Enfin, un grand merci à tous les enseignants de l'ENSSMAL pour leur précieuse contribution à mon parcours scientifique.

## **Résumé**

Cette étude se concentre sur la cartographie et la modélisation du fond marin de la baie de Bou-Ismaïl en utilisant des données de bathymétrie satellitaire (SDB). L'objectif principal de cette recherche était d'évaluer l'applicabilité de la SDB dans cette région côtière et de comparer les résultats obtenus avec la cartographie traditionnelle basée sur les données de carte marine. Deux méthodes ont été utilisées, à savoir la méthode de Stumpf et al. (2003) et la méthode de Hedley et al. (2005), pour modéliser le fond marin. Les résultats ont révélé que la méthode de Stumpf et al. a fourni des résultats plus précis et détaillés ( $R^2=0.96$ ), permettant une représentation plus fine des caractéristiques bathymétriques de la baie. L'utilisation de la SDB présente des avantages significatifs, tels que des coûts réduits et une mise à jour régulière des données, offrant ainsi de nouvelles opportunités pour la cartographie et la gestion des fonds marins côtiers. Et aussi les mesures bathymétriques précises sont essentielles pour la classification et la cartographie benthique des fonds marins, ainsi que pour le dragage des ports et la recherche sur l'érosion côtière et la migration des sédiments Cette recherche est une première dans notre zone d'étude. Elle contribue à l'avancement des techniques de cartographie bathymétrique dans notre pays et souligne l'importance croissante de la SDB dans l'étude des environnements marins côtiers.

## **Abstract**

This study focuses on the mapping and modeling of the seafloor in Bou-Ismaïl Bay using satellite-derived bathymetry (SDB) data. The main objective of this research was to assess the applicability of SDB in this coastal region and compare the results with traditional mapping based on nautical charts. Two methods, namely Stumpf et al. (2003) and Hedley et al. (2005), were employed to model the seafloor. The findings revealed that the Stumpf et al. method provided more accurate and detailed results, enabling a finer representation of the bathymetric features of the bay. The use of SDB offers significant advantages such as reduced costs and regular data updates, thereby opening up new opportunities for mapping and managing coastal seafloor environments. This research is a first in our study area. It contributes to the advancement of bathymetric mapping techniques in our country and highlights the growing importance of SDB in the study of coastal marine environments.

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	2
<b>Chapitre I : Généralités</b> .....	5
<b>Introduction</b> .....	5
<b>1.1 La bathymétrie</b> .....	5
1.1.1. Définition .....	5
1.1.2. Historique .....	5
1.1.3. Méthodes de mesure de la bathymétrie : sondeurs monofaisceaux et sondeurs multifaisceaux .....	6
1.1.4. Applications de la cartographie de la bathymétrie .....	7
1.1.5. Variations de la bathymétrie au fil du temps.....	7
1.1.6. Effets de la variation de la bathymétrie sur les écosystèmes marins.....	8
1.1.7. Sources d'acquisition des données bathymétriques .....	8
<b>1.2 L'océanographie spatiale</b> .....	10
1.2.1. La télédétection .....	11
1.2.2. Principe de base de la télédétection.....	12
1.2.3. La détection passive et active .....	12
1.2.4. Rayonnement électromagnétique et spectre électromagnétique .....	13
1.2.5. Les fenêtres atmosphériques et leur impact sur la télédétection .....	14
1.2.6. La signature spectrale .....	15
1.2.7. Caractéristiques des images des satellites de télédétection .....	15
1.2.8. Interaction de la lumière avec une colonne d'eau .....	17
1.2.9. Image satellitaire : cas de Sentinel-2.....	19
<b>Contexte général de la zone d'étude</b> .....	21
<b>2.1. Description géographique</b> .....	21
<b>2.2. Morphologie côtière de la Bai de Bou-Ismaïl</b> .....	21
<b>2.3. Cadre sédimentologique</b> .....	21
<b>2.4. Réseau Hydrographique</b> .....	22
<b>2.5. La pollution dans la Baie de Bou-Ismaïl</b> .....	23
<b>Chapitre III : Matériels et Méthodes</b> .....	25
<b>3.1. Données</b> .....	25
<b>3.2. Matériels</b> .....	25
<b>3.3. Méthode</b> .....	25
<b>3.3.1 Pré-traitement</b> .....	27
3.3.1.1. Rééchantillonnage (Resample).....	27
3.3.1.2. Création des masques (Land_mask).....	27

3.3.1.3 Correction des reflets solaires (Sun-Glint).....	27
3.3.1.4. Correction Atmosphérique de l'objet sombre (Dark Object Subtraction - DOS).....	28
<b>3.3.2 Extraction de la bathymétrie.....</b>	<b>29</b>
3.3.2.1 Méthode de Stumpf.....	29
3.3.2.2 Méthode de Hedley.....	29
<b>3.4. Calibration/Validation des Résultats.....</b>	<b>30</b>
<b>3.5. Utilisation de SDB.....</b>	<b>30</b>
3.5 .1 Modélisation du fond marin.....	31
<b>Chapitre IV : Résultats et Discussions.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1. Résultats.....</b>	<b>33</b>
4.1.1. Pré-traitement.....	33
4.1.2Extraction de la bathymétrie.....	38
4.1.2.2. Méthode de Hedley (2006).....	41
4.1.3. Les Résultats de la modélisation du fond marin.....	43
<b>4.2. Discussion.....</b>	<b>44</b>
4.2.1. Discussion sur les résultats de SDB.....	44
4.2.2. Discussion sur la modélisation du fond marin.....	45
<b>Bibliographie.....</b>	<b>51</b>
<b>Annexe (BMC).....</b>	<b>54</b>

## Liste des figures

<b>Figure1.1.</b> A gauche, un sondeur multifaisceaux et à droite un sondeur mono faisceau.....	7
---	---

<b>Figure 1.1</b>	Les informations essentielles de la carte marine.....	9
<b>Figure 1.3</b>	Éléments de système de la télédétection. (RemoteSensing-Bersi.p2) .....	12
<b>Figure 1.4.</b>	Détection passive et active.....	13
<b>Figure 1.5.</b>	Le spectre électromagnétique.....	14
<b>Figure 1.6.</b>	Signature spectrale de quelques surfaces naturelles.....	15
<b>Figure 1.7.</b>	Signature spectrale de quelques surfaces naturelles.....	16
<b>Figure 1.8.</b>	Résolution radiométrique.....	16
<b>Figure 1.9.</b>	Notion de la résolution Spectrale.....	16
<b>Figure 1.10.</b>	Notion de la résolution Spectrale.....	17
<b>Figure 1.11.</b>	Interactions du rayonnement solaire avec une colonne d'eau.....	18
<b>Figure 2.1.</b>	Situation géographique de la zone d'étude.....	21
<b>Figure 2.2.</b>	Carte sédimentologique de la baie de Bou-Ismaïl (LEM,1998).....	22
<b>Figure 2.3.</b>	Les variations mensuelles des températures dans la baie de Bou-Ismaïl.....	23
<b>Figure 2.4.</b>	Les variations des moyennes annuelles des précipitations dans la région de Bou-Ismaïl...24	
<b>Figure 3.1.</b>	Algorithme de travail.....	27
<b>Figure 3.2.</b>	Explication de l'équation de Hedley et al. (2005).....	29
<b>Figure 3.3.</b>	Les étapes de modélisation du fond marin.....	32
<b>Figure 4.1.</b>	Résultat de l'étape Rééchantillonnage.....	34
<b>Figure 4.2.</b>	Les différentes résultats de l'étape Land_mask.....	35
<b>Figure 4.3.</b>	Le Résultat de Sun-glint.....	37
<b>Figure 4.4.</b>	Les différentes résultats de DOS.....	38
<b>Figure 4.5.</b>	La bande B2B3.....	39
<b>Figure 4.6.</b>	La régression linéaire entre la bande B3B2 et les profondeurs.....	39
<b>Figure 4.7.</b>	La bande SDB.....	40
<b>Figure 4.8.</b>	La régression linéaire entre SDB et les sondes Navionics .....	41
<b>Figure 4.9.</b>	La régression linéaire entre SDB et les sondes de la carte marine .....	41
<b>Figure 4.10.</b>	La bande Empirical Bathymetry .....	42
<b>Figure 4.11.</b>	La régression entre EmpiricalBathymetry entre les sondes de Navionics.....	43
<b>Figure 4.12.</b>	La régression entre EmpiricalBathymetry entre les sondes de la carte marine ..	43
<b>Figure 4.13.</b>	La modélisation du fond marin à partir de SDB.....	44
<b>Figure 4.14.</b>	La modélisation du fond marin à partir de la carte marine .....	45
<b>Figure 4.15.</b>	La carte SDB de la Baie de Bou-Ismaïl.....	47
<b>Figure 4.16.</b>	Application de le modèle SDB sur la carte marine .....	48

### Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1.</b> Caractéristiques des bandes spectrales de Sentinel-2.....	18
<b>Tableau 4.1.</b> Résumé des résultats.....	44

## Liste des acronymes

- SDB : Bathymétrie Satellitaire
- SMF : Sondeur Multifaisceaux
- IHO : Organisation International Hydrographique
- SHFN : Service Hydrographique des forces Navales
- GEBCO: General Bathymetric Chart of the Oceans
- AUV: Autonomous Underwater Vehicle
- DOS: Dark Object Subtraction
- CMEMS : Service Copernicus de surveillance du milieu marin
- BMC: Business Model Canvas

# **Introduction Générale**

## Introduction générale

La côte algérienne, longue de 2148 km selon la déclaration du Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables, est un joyau naturel d'une importance capitale, abritant des écosystèmes marins d'une grande diversité et des zones humides d'une valeur écologique inestimable. Cependant, la préservation de ces écosystèmes et la gestion durable de leurs ressources nécessitent une compréhension approfondie de la bathymétrie marine, de la biodiversité marine et de l'importance des zones humides dans cette région.

Les fonds marins ont longtemps été une énigme pour l'humanité, et leur exploration a été l'un des plus grands défis de l'histoire de la science. Les fonds marins de la partie côtière sont très fragiles et dynamiques car ils subissent l'influence du continent avec tous les apports terrigènes surtout près des embouchures d'oueds, mais aussi celle de l'érosion côtière. La bathymétrie des eaux peu profondes revêt une importance cruciale pour la collecte de données environnementales marines et constitue une information fondamentale pour le génie maritime (**Liang Cheng et al., 2022**). De plus, les mesures bathymétriques précises sont essentielles pour la classification et la cartographie benthique des fonds marins (**Mishra et al., 2005 ; Bajjouk et al., 2019**), ainsi que pour la modélisation hydrodynamique et des vagues (**Murray et al., 2017**) et la recherche sur l'érosion côtière et la migration des sédiments (**Limber et al., 2017**). La collecte traditionnelle des données bathymétriques par l'utilisation des sondeurs mono et multi-fuseaux présente cependant des limites significatives et a un impact sur l'environnement marin. Les levés hydrographiques traditionnels peuvent être difficiles et coûteux dans les zones d'eau peu profonde, limitant ainsi la couverture des données bathymétriques (**M. Ashphaq et al., 2022**). De plus, ces méthodes peuvent entraîner des risques pour le personnel et l'équipement, en particulier dans des endroits éloignés et dangereux tels que les récifs cachés, les estuaires et les zones de houle. Les technologies télécommandées et autonomes, telles que les ROV (Remotely Operated Vehicle) et les AUV (Autonomous Underwater Vehicle), sont également coûteuses à acquérir et à entretenir (**M. Ashphaq et al., 2022**).

Dans ce contexte, la cartographie de la bathymétrie par des méthodes satellitaires est devenue une alternative prometteuse. La bathymétrie satellitaire (SDB) offre une solution efficace pour les régions côtières (**M. Ashphaq et al., 2022**), en réduisant les efforts d'acquisition de données et en permettant une mise à jour périodique des cartes de navigation. De plus, l'utilisation de la SDB pourrait être un moyen viable de caractériser l'environnement des récifs coralliens (**Stumpf et al., 2003**).

Cette étude se concentre sur l'analyse d'images satellitaires Open Source Sentinel-2 niveau 2 (L2) pour dériver la bathymétrie, entre 0 m et 20 m, de la Baie de Bou-Ismaïl, située au centre de la côte algérienne. Notre objectif est d'évaluer l'applicabilité des techniques de dérivation de

## **Introduction générale**

la SDB dans cette région. Pour ce faire, nous examinons différentes méthodes, telles que la méthode de Stumpf et al. (2003) et la méthode de Hedley et al. (2005).

Pour valider notre modèle, nous avons comparé les résultats de la SDB avec les données bathymétriques provenant de carte marine et de la plateforme Navionics, afin de confirmer la concordance entre la SDB et la bathymétrie provenant de ces sources.

La modélisation du fond marin revêt une importance cruciale dans le cadre de cette étude. Afin de mieux appréhender les caractéristiques et la structure sous-marine de la baie de Bou-Ismaïl, nous avons réalisé deux types de modélisation distinctes. Dans un premier temps, nous avons utilisé les données provenant d'une carte marine préexistante pour générer une représentation initiale de la bathymétrie de la baie. Toutefois, conscient des limites de résolution et de précision inhérentes à cette approche, nous avons complété notre modélisation en nous appuyant sur les données de la bathymétrie numérique (SDB).

Notre travail expérimental est organisé en quatre chapitres qui couvrent différents aspects de notre étude :

- **Chapitre I** : Introduction à la bathymétrie et à l'océanographie spatiale.
- **Chapitre II** : Présentation de la zone d'étude, mettant en évidence ses caractéristiques principales.
- **Chapitre III** : Méthodologie et outils utilisés dans notre étude, en fournissant des détails sur les logiciels et la méthodologie de travail adoptée.
- **Chapitre IV** : Présentation des résultats obtenus et leur interprétation, permettant de tirer des conclusions pertinentes.

Ces quatre chapitres sont conçus de manière à offrir une vision globale de notre recherche, en couvrant les aspects théoriques, méthodologiques et les résultats obtenus.

# Chapitre I

## Généralités

## Chapitre I : Généralités

### Introduction

La cartographie de la bathymétrie des eaux côtières est essentielle pour la navigation maritime, car elle fournit des informations vitales sur la profondeur de l'eau et la topographie des fonds marins. Pour bien comprendre l'importance de la bathymétrie, il est nécessaire de se pencher sur les méthodes traditionnelles utilisées pour la déterminer ainsi que sur les enjeux liés à son utilisation en navigation. Dans nos généralités, nous nous attachons donc à présenter la bathymétrie en général et à expliquer son rôle primordial dans la navigation maritime. Nous aborderons ensuite les avantages offerts par l'océanographie spatiale pour améliorer la précision de la cartographie de la bathymétrie dans les eaux côtières.

### 1.1 La bathymétrie

#### 1.1.1. Définition

La bathymétrie (du grec "bathys" qui signifie "profond") est la science de mesure des profondeurs sous-marines. Elle permet de déterminer la topographie des fonds marins en produisant des cartes hydrographiques qui montrent les caractéristiques du relief sous-marin, telles que les falaises et les isobathes. Ces cartes aident à assurer la sécurité de la navigation maritime et sous-marine en aidant les navigateurs à éviter les dangers sous-marins (<https://oceanservice.noaa.gov/facts/bathymetry.html>). La bathymétrie appliquée à différentes échelles, de la zone littorale à la haute mer en passant par les eaux profondes. La bathymétrie des eaux côtières s'intéresse aux profondeurs de la zone littorale (*shallow waters*), tandis que la bathymétrie des eaux profondes explore les fonds marins situés à des centaines, voire des milliers de mètres de profondeur. La différence entre ces deux approches réside dans les techniques de mesure utilisées, qui peuvent varier considérablement en fonction de la profondeur et des caractéristiques géologiques des fonds marins. La bathymétrie des eaux côtières est souvent réalisée à l'aide d'échosondeurs à balayage latéral, tandis que la bathymétrie des eaux profondes peut être réalisée à l'aide de sonars multifaisceaux ou de robots sous-marins autonomes (Hillier et Watts, 2007).

#### 1.1.2. Historique

L'histoire de la cartographie de la bathymétrie remonte à l'Antiquité, où les marins grecs et romains utilisaient des plongées avec des poids pour mesurer la profondeur de la mer. Au fil des siècles, les techniques de mesure de la bathymétrie se sont améliorées avec l'utilisation d'instruments tels que des lignes à plomb, des sondes à ressort et des sondes échosondeurs. (*Documentation-Historique-de-la-plongee-Version-legere.pdf*, s. d., p. 16).

Au 20<sup>ème</sup> siècle, l'avènement de la technologie électronique a permis une révolution dans la cartographie de la bathymétrie, avec la création de sondes échosondeurs monofaisceaux et multifaisceaux. Les sondes échosondeurs multifaisceaux modernes permettent une couverture large et une résolution élevée pour la mesure de la bathymétrie. (Arnaud *et al.*, 2018).

En plus de l'utilisation de sondes échosondeurs, d'autres méthodes de mesure de la bathymétrie incluent le sonar à balayage latéral, la photogrammétrie aérienne et satellite, et la vidéo bathymétrique.

En résumé, l'histoire de la cartographie de la bathymétrie est marquée par l'amélioration constante des techniques de mesure de la profondeur de l'eau, avec un accent sur la précision et la couverture de la mesure.

### **1.1.3. Méthodes de mesure de la bathymétrie : sondeurs monofaisceaux et sondeurs multifaisceaux**

Pour explorer les fonds marins, les navires océanographiques et les engins sous-marins sont équipés de sondeurs acoustiques, ou sondeurs bathymétriques, qui permettent de déterminer la profondeur de l'eau en émettant des impulsions sonores à partir d'un transducteur, et en enregistrant le temps que met le capteur à recevoir l'écho de retour du fond marin. Les transducteurs sont généralement montés sur la coque d'un navire, mais peuvent également être montés sur d'autres plates-formes. Il existe deux principaux types de sondeurs acoustiques : à faisceau unique (monofaisceau) et à faisceaux multiples (multifaisceaux). (OHI.2020).

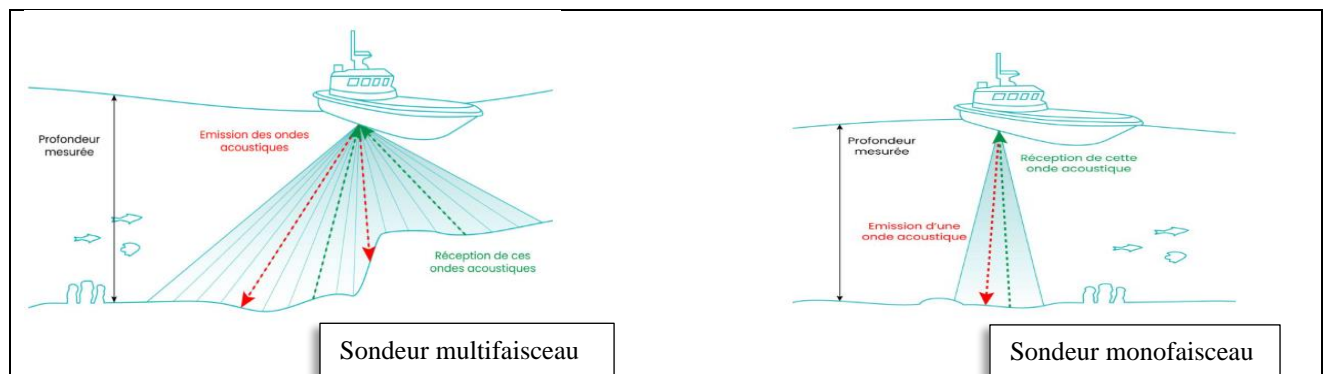
#### **1.1.3.1 Mesure de la bathymétrie avec des sondeurs monofaisceaux**

Le sondeur monofaisceau mesure la bathymétrie en émettant un signal acoustique en direction du fond marin, dirigé selon la verticale. Lorsque le signal atteint le fond, il envoie un écho retour qui est analysé par le sondeur. L'arrivée de l'écho est identifiée par un fort retour sonore provenant du fond. Le début de l'enveloppe de l'écho est utilisé pour déterminer la position du fond. En connaissant la vitesse de propagation du son dans l'eau et le temps entre l'émission du signal et la réception de l'écho, la distance entre le sondeur et le fond est calculée en utilisant la relation :  $R = cdt/2$  où R représente la distance mesurée, c la célérité du son dans l'eau, d représente la distance parcourue par le signal sonore entre le sondeur et le fond marin, exprimée en mètres. et t le temps écoulé entre l'émission et la réception du signal. (Figure 1.1). En revanche, les échosondeurs à faisceau unique ont une couverture spatiale et une résolution spatiale plus limitées que les échosondeurs multifaisceaux. La couverture spatiale se réfère à la surface de la zone sous-marine cartographiée par l'échosondeur, tandis que la résolution spatiale se réfère à la capacité de l'échosondeur à détecter des objets de petite taille. (Ashphaq *et al.*, 2022)

### 1.1.3.2 Mesure de la bathymétrie avec des sondeurs multifaisceaux

Le sondeur multifaisceaux (SMF) est un appareil qui émet et reçoit des signaux sonores à travers plusieurs capteurs. Son calcul numérique de plusieurs faisceaux permet d'obtenir une fauchée large avec une excellente résolution. Depuis sa création, le SMF est principalement utilisé pour la mesure de la bathymétrie. (Arnaud *et al.*,2018).

La mesure de la profondeur avec un SMF est similaire à celle d'un sondeur monofaisceau. Elle consiste à mesurer le temps de retour d'une onde émise, réfléchiée par le fond et reçue. La principale différence entre les deux est que le SMF émet et reçoit plusieurs faisceaux simultanément, ce qui permet de couvrir une surface plus large et de gagner du temps sur les mesures.



**Figure 1.1.** A gauche, un sondeur multifaisceaux et à droite un sondeur mono faisceau.

### 1.1.4. Applications de la cartographie de la bathymétrie

Les applications de la bathymétrie sont vastes et variées, allant de la sécurité de la navigation maritime à la cartographie des fonds marins pour des fins scientifiques et écologiques. La bathymétrie est cruciale pour assurer la sécurité des navires en permettant aux pilotes de connaître les fonds marins, les récifs et les épaves potentiels sur leur trajet (Ashphaq *et al.*, 2022). Elle est également utilisée par le service hydrographique des forces navales pour surveiller les fonds marins et les zones côtières, ainsi que pour aider à planifier les activités militaires en mer (Ashphaq *et al.*, 2021). En outre, la bathymétrie est utilisée en archéologie marine pour localiser et étudier les sites archéologiques sous-marins, ainsi qu'en océanographie pour cartographier les fonds marins, évaluer les écosystèmes marins et étudier les processus géologiques en mer. (David *et al.*,2019)

### 1.1.5. Variations de la bathymétrie au fil du temps

La zone littorale est un lieu en constante évolution, où les échanges de sédiments entre l'océan et le continent se produisent à différentes échelles de temps et de l'espace. Cette activité modifie la topographie et la bathymétrie de la côte, qui peut avancer ou reculer. Il est important de comprendre ces mécanismes pour évaluer les conséquences potentielles sur la bathymétrie et la topographie de la côte (Benjamin *et al.*, 2021). En plus des échanges sédimentaires, d'autres

facteurs océaniques ont un impact sur la bathymétrie de la zone littorale. Les vagues, les marées, les courants, et la variation des niveaux d'eau à la côte peuvent, sous l'influence de certaines conditions météorologiques, entraîner des changements importants dans la topographie et la bathymétrie de la côte (**Benjamin et al., 2021**).

Par exemple, les tempêtes peuvent causer des érosions côtières massives, réduisant ainsi la bathymétrie dans certaines zones. Il est important de surveiller ces facteurs pour comprendre comment ils affectent la bathymétrie de la zone littorale.

#### **1.1.6. Effets de la variation de la bathymétrie sur les écosystèmes marins**

Les changements de bathymétrie dans les zones côtières ont un impact considérable sur les écosystèmes marins. La bathymétrie définit la profondeur de l'océan, et les variations de cette profondeur peuvent influencer la distribution des espèces marines, l'énergie des vagues et des courants, la qualité de l'eau et la disponibilité de la nourriture. Des variations importantes de bathymétrie peuvent entraîner la mort de certains écosystèmes et la création de nouveaux habitats pour d'autres espèces (**Eleanor et al., 2021**). Par exemple, une baisse de la bathymétrie peut provoquer une élévation de la température de l'eau, ce qui peut être défavorable pour les espèces sensibles à la température. De plus, des variations de la bathymétrie peuvent affecter la qualité de l'eau en modifiant les niveaux de nutriments et de pollution, ce qui peut avoir des conséquences sur les populations d'espèces marines. En fin de compte, il est important de surveiller les changements de bathymétrie pour comprendre leur impact sur les écosystèmes marins et adopter les mesures appropriées pour en minimiser les conséquences négatives.

#### **1.1.7. Sources d'acquisition des données bathymétriques**

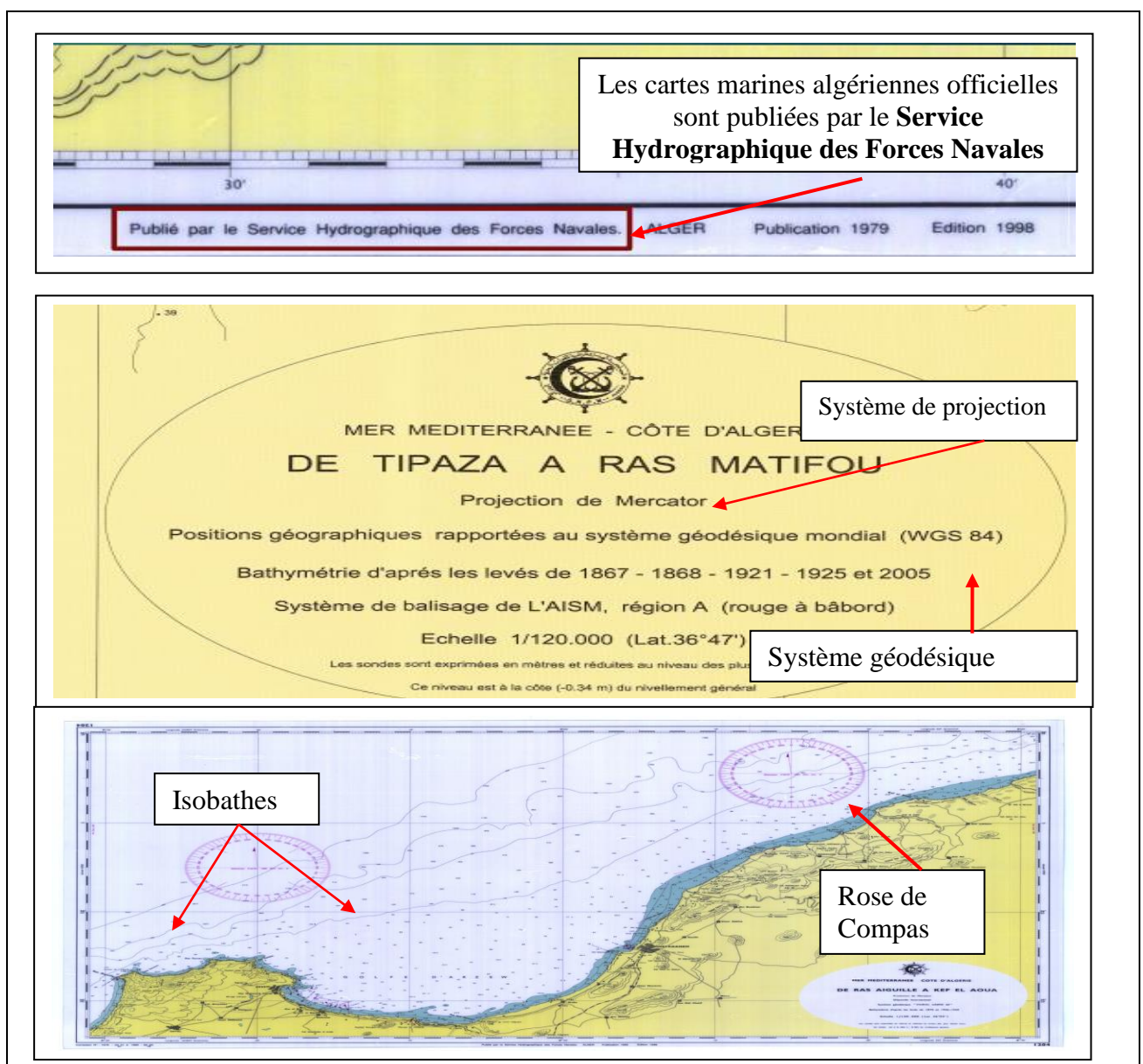
##### **1.1.7.1. Carte marine**

Les cartes marines sont des représentations graphiques des caractéristiques géographiques, topographiques et hydrographiques des zones marines et côtières. Elles contiennent des informations précises sur la profondeur de l'eau, les contours des côtes, les ports et les phares, les courants marins, les rochers et les récifs, les zones de pêche, les routes maritimes et les dangers pour la navigation, représentées à l'aide de symboles linéaires, ponctuels et surfaciques universels pour permettre aux marins du monde entier de visualiser facilement et intuitivement les caractéristiques de la zone en question. (Figure 1.2).

Les cartes marines sont une source importante de données bathymétriques pour la cartographie des eaux côtières, mais leur utilisation peut présenter des limites et des inconvénients. Comme le souligne **Gade (2009)**, la carte marine est une source d'acquisition intermédiaire des données bathymétriques puisqu'elle-même est réalisée à partir des données collectées lors de campagnes de mesure in situ. Ainsi, pour garantir la précision et la fiabilité de la carte marine, il est crucial de

prendre en compte le pas des sondes et l'équidistance des courbes lors de la création de la carte (IHO, 2017). Le pas des sondes correspond à la distance entre chaque point de mesure lors de la collecte de données bathymétriques, tandis que l'équidistance des courbes représente la distance verticale entre chaque courbe de niveau ou isobathe. Ces éléments permettent de déterminer la résolution et la précision des données utilisées pour créer la carte marine.

Malgré ces limites, les cartes marines restent un outil indispensable pour la navigation en mer et pour la planification de missions maritimes. Comme le soulignent **Kaper et Feringa (2017)**, "les cartes marines sont des documents vivants qui évoluent en fonction des nouvelles données et des changements environnementaux". Ainsi, la qualité des données collectées et la précision de leur traitement sont cruciales pour garantir la pertinence et la fiabilité de la carte marine dans le temps."



**Figure 1.2** Les informations essentielles de la carte marine.

### 1.1.7.2. GEBCO

GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) est un projet international qui vise à produire une carte bathymétrique mondiale la plus précise possible. Le projet a été lancé en 1903 et est géré conjointement par la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO et l'Organisation hydrographique internationale (OHI). ([GEBCO | IHO](#))

La carte bathymétrique de GEBCO est créée en combinant des données bathymétriques provenant d'une variété de sources, notamment des mesures par navires, des données satellitaires et des données de sonar. La carte est continuellement mise à jour à mesure que de nouvelles données sont collectées et traitées. ([GEBCO - The General Bathymetric Chart of the Oceans](#))

La carte bathymétrique de GEBCO est utilisée par une grande variété de personnes et d'organisations, notamment les scientifiques, les navigateurs, les pêcheurs et les planificateurs d'infrastructures sous-marines. Elle est également disponible gratuitement en ligne pour le grand public.

Le pas de la profondeur est de 15 arc-secondes ([GEBCO\\_2022 Grid](#)). Cela peut être considéré comme une limitation de la précision de la carte, car les détails sous-marins plus petits que cette taille, ne peuvent pas être distingués.

### 1.1.7.3. Navionics

Navionics est une entreprise spécialisée dans la cartographie marine. Elle fournit des cartes électroniques détaillées pour la navigation de plaisance, la pêche et d'autres activités nautiques. Les cartes de Navionics sont utilisées sur des appareils électroniques tels que les traceurs de cartes et les applications mobiles. Les cartes Navionics sont basées sur des données collectées à partir de différentes sources, y compris des données bathymétriques de l'hydrographie nationale et des données recueillies par les utilisateurs de Navionics. Cependant, un inconvénient de ces cartes est qu'elles sont payantes. Ce qui peut être un obstacle pour certains utilisateurs. De plus, les cartes de Navionics peuvent ne pas couvrir toutes les zones maritimes, en particulier dans les zones reculées ou peu fréquentées. Cela peut être problématique pour les navigateurs qui souhaitent accéder à ces zones. Par conséquent, il est important de prendre en compte ces facteurs lors du choix d'une source de cartes marines. ([Navionics.com](#)).

## 1.2 L'océanographie spatiale

L'océanographie spatiale est une discipline qui traite de l'observation de la surface de la mer à l'aide de satellites. Elle regroupe plusieurs domaines d'application, notamment la cartographie marine, l'hydrographie et l'océanographie. Depuis les années 1970, la télédétection par satellite a considérablement amélioré la capacité des scientifiques à étudier les océans en temps réel et à grande échelle. ([https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/))

Aujourd'hui, de nombreux satellites sont déployés pour observer la surface de la mer. Ils fournissent des données en temps réel sur de vastes régions, couvrant pratiquement tous les océans. Bien que ces données ne couvrent que la surface de l'eau, elles sont néanmoins cruciales pour comprendre l'état de l'océan et pour améliorer les modèles de prévision. En somme, l'océanographie spatiale est un outil indispensable pour la gestion rationnelle des secteurs marins et côtiers.

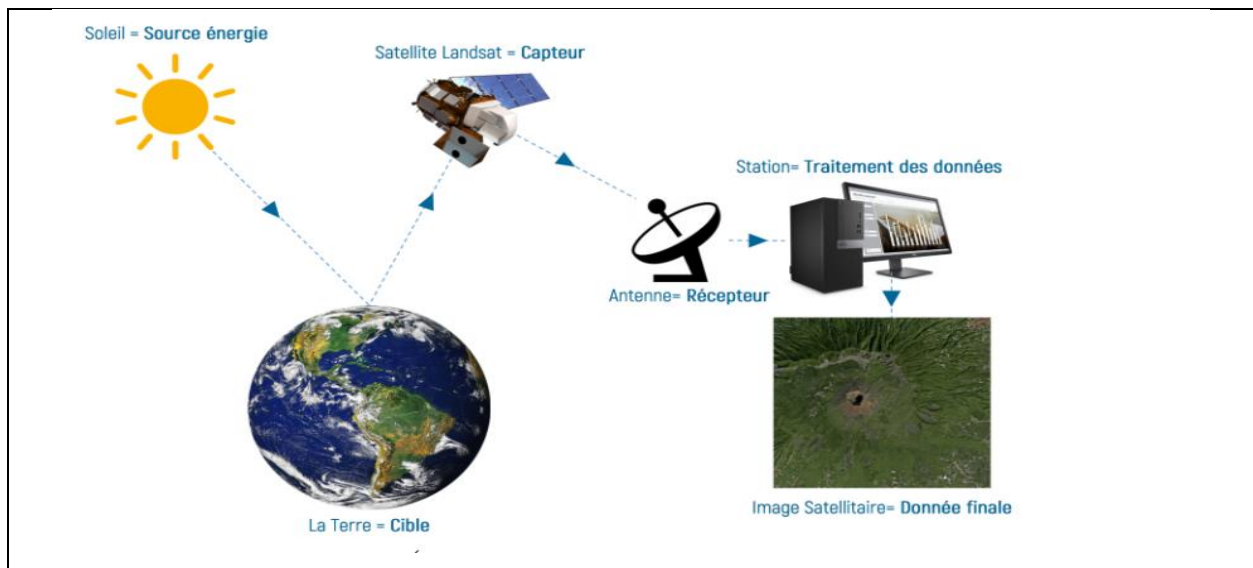
L'océanographie spatiale offre également de nombreux avantages pour la détection des fonds marins clairs (non turbides) et peu profonds. Les fonds marins représentent une partie importante du monde sous-marin et ont une influence considérable sur les conditions environnementales, les écosystèmes marins et les activités humaines. La télédétection par satellite permet d'acquérir des informations sur les fonds marins de manière efficace et économique. Les images satellites peuvent couvrir de vastes régions et sont capables de fournir des images détaillées des fonds marins en temps réel. De plus, les données satellites peuvent être combinées avec des données enregistrées in situ pour une meilleure compréhension de la topographie et de la morphologie des fonds marins. Les avancées technologiques en matière de télédétection par satellite continuent de développer de nouvelles capacités pour détecter et surveiller les fonds marins, ce qui est essentiel pour la protection des écosystèmes marins et la gestion durable des ressources marines. (**[Ocean Surface Topography Mission/Jason 2 Begins Mapping Oceans \(nasa.gov\)](#)**).

### 1.2.1. La télédétection

La télédétection permet, à l'aide d'un capteur distant, "d'observer" et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci. Le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de cette cible : géométriques (position, forme et dimensions), optiques (réflexion, transmission, absorption, etc.) et physico-chimiques (température, teneur en eau, chlorophylle, phyto-masse, matière organique du sol, etc.). En utilisant la télédétection, les scientifiques peuvent accéder à des informations sur la surface de la Terre et les zones qui y sont associées sans être présents physiquement. Cette technique est basée sur le fait que les objets émettent, réfléchissent ou absorbent des ondes électromagnétiques. En collectant et en analysant ces ondes, les scientifiques peuvent obtenir des informations précieuses sur la géographie, la géologie, la végétation, les températures et même les activités humaines. (**ESA - Eduspace FR - Accueil - Qu'est-ce que la télédétection**) La télédétection est un outil puissant qui permet de mieux comprendre notre planète et de prendre des décisions éclairées pour la protéger.

### 1.2.2. Principe de base de la télédétection

Comme illustré dans la figure 1.3 Les principes de base de la télédétection reposent sur cinq éléments essentiels : la source d'énergie, la cible, le capteur, le récepteur et la station de traitement de données. La source d'énergie, telle que le soleil, éclaire la cible qui interagit avec le rayonnement reçu. Ce rayonnement réfléchi est capté par un capteur, généralement un satellite, qui transforme l'énergie captée en informations utiles. Cette information est reçue par un récepteur sous forme d'images brutes, qui sont ensuite transformées en images exploitables par une station de traitement de données. (Bersi.M., 2018)



*Figure 1.3 Éléments de système de la télédétection. (RemoteSensing-Bersi.p2)*

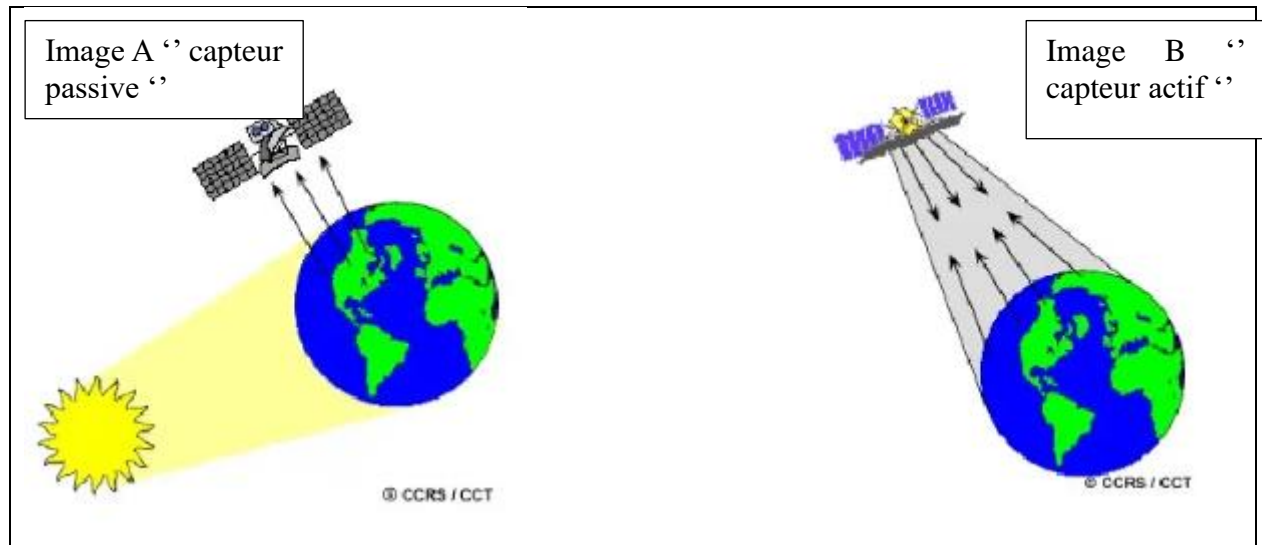
### 1.2.3. La détection passive et active

Dans la télédétection, la source d'énergie la plus courante est le Soleil, qui peut être utilisé pour illuminer la cible. La lumière du Soleil peut être réfléchie ou absorbée par la cible et renvoyée. Les dispositifs qui ne mesurent que l'énergie disponible naturellement sont appelés capteurs passifs et ils ne peuvent être utilisés que lorsque le Soleil est présent (image A dans la figure 1.4). Ils sont limités dans leur capacité à mesurer l'énergie dégagée par la cible et ne peuvent être utilisés que lorsque le Soleil est présent.

Contrairement aux capteurs passifs, les capteurs actifs peuvent produire leur propre énergie pour illuminer la cible. Ils utilisent un rayonnement électromagnétique dirigé vers la cible, qui est ensuite réfléchi et mesuré par le capteur (image B dans la figure 1.4). Les capteurs actifs peuvent être utilisés à n'importe quel moment de la journée ou de la saison et ils ne sont pas limités par les longueurs d'onde produites par le Soleil. Cependant, ils ont besoin de produire une quantité importante d'énergie pour bien illuminer la cible. Les exemples de capteurs actifs incluent le laser fluoromètre et le radar à synthèse d'ouverture (RSO).

En conclusion, les capteurs passifs et actifs ont chacun leurs avantages et leurs limites dans la

télétection. Les capteurs passifs sont plus simples et plus économes en énergie, mais sont limités par la disponibilité de la lumière du Soleil. Les capteurs actifs sont plus flexibles et plus capables de mesurer la cible à n'importe quel moment, mais ils sont plus complexes et nécessitent plus d'énergie. Il est important de comprendre les caractéristiques de chaque type de capteur pour choisir le plus approprié pour chaque application.



**Figure 0.4.** Détection passive et active. (Page 20 Section 1,6 Détection passive et active Centre canadien de télétection)

## 1.2.4. Rayonnement électromagnétique et spectre électromagnétique

### 1.2.4.1. Définition du rayonnement électromagnétique

La télétection s'appuie sur des méthodes d'acquisition à distance de l'information basée sur le rayonnement électromagnétique. Le rayonnement électromagnétique est une forme d'énergie qui se propage à travers l'espace vide en tant que vagues. Il est généré par les mouvements des charges électriques et magnétiques dans les atomes et les molécules. En même temps, il est défini par un double champ périodique électrique et magnétique. La vitesse de propagation du rayonnement électromagnétique est de 300 000 km/s dans le vide (vitesse de la lumière), ainsi que par son amplitude ou sa longueur d'onde et sa fréquence (sa répétitivité). La longueur d'onde détermine les propriétés du rayonnement électromagnétique et sa capacité à interagir avec la matière.

(Application de la télétection : manuel d'initiation (fao.org))

### 1.2.4.2. Les différentes longueurs d'onde du spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique comprend une variété de longueurs d'onde, allant des ondes radio les plus longues aux rayons gamma les plus courtes. Il est généré par les mouvements des charges électriques et magnétiques dans les atomes et les molécules et se propage dans le vide avec la vitesse de la lumière. Les longueurs d'onde les plus courantes utilisées en télétection incluent le visible, le proche infrarouge, le moyen infrarouge et le radar, chacune avec des propriétés uniques

et révélant différentes informations sur la cible. La source du spectre électromagnétique peut être directe, comme lorsqu'elle provient du soleil, ou indirecte, lorsqu'elle est réfléchiée par un autre objet. Les photons transportent une quantité d'énergie appelée quantum d'énergie, selon la théorie d'Einstein. Le domaine visible du spectre électromagnétique se situe entre  $0,4 \mu\text{m}$  et  $0,8 \mu\text{m}$ , précédé par les domaines des UV, des rayons X et des rayons gamma, et suivi par les domaines IR et les ondes radio. (Bersi.M., 2018). (Figure1.5)

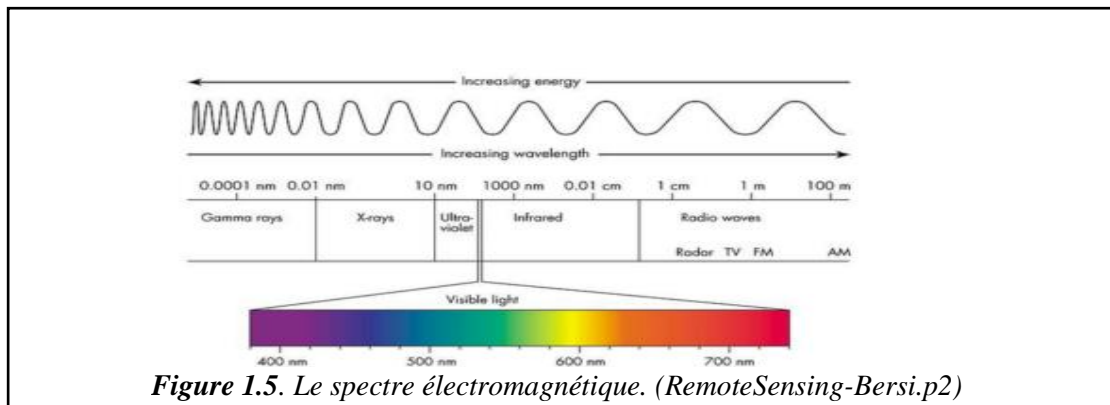


Figure 1.5. Le spectre électromagnétique. (RemoteSensing-Bersi.p2)

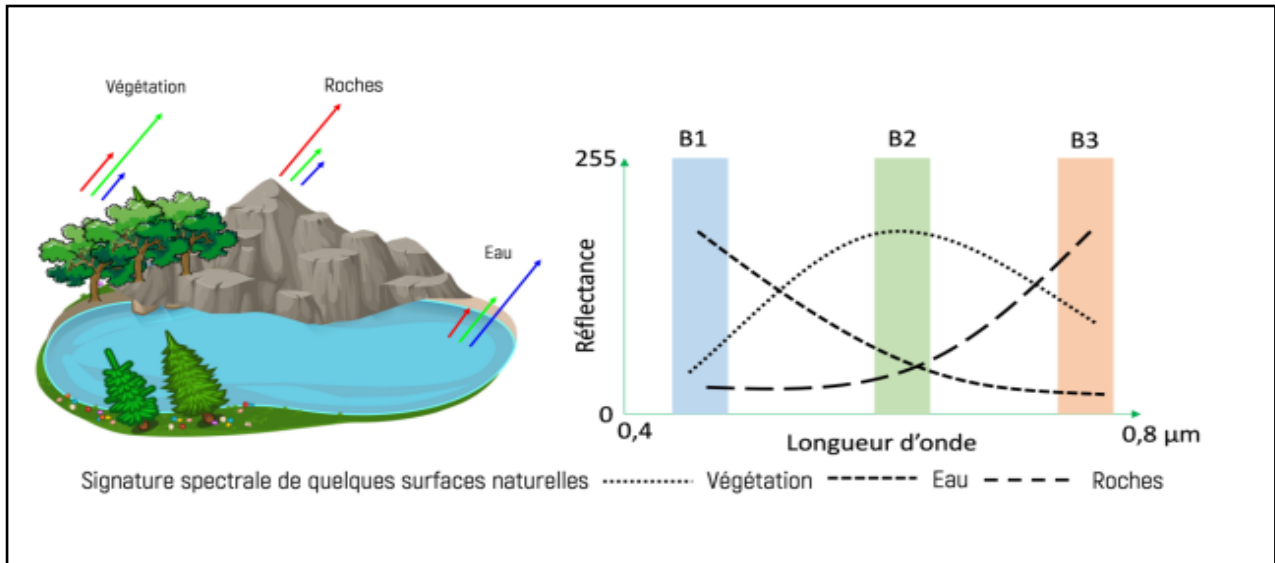
### 1.2.5. Les fenêtres atmosphériques et leur impact sur la télédétection

Les fenêtres atmosphériques jouent un rôle crucial dans la télédétection en déterminant les portions du spectre électromagnétique dans lesquelles les mesures peuvent être effectuées sans être perturbées par les gaz et la vapeur d'eau dans l'atmosphère. (**Application de la télédétection : manuel d'initiation (fao.org)**). Les portions du spectre électromagnétique dans lesquelles l'atmosphère est la plus transparente, appelées fenêtres spectrales, permettent la transmission de la lumière sans être absorbée et sont donc les plus utiles pour la télédétection. Les principales fenêtres spectrales sont l'ultraviolet et la lumière visible, le proche infrarouge, l'infrarouge moyen, l'infrarouge thermique et les hyperfréquences. (Bersi.M., 2018)

L'impact des fenêtres atmosphériques sur la télédétection dépend du choix des longueurs d'onde à utiliser pour les observations. Certaines longueurs d'onde peuvent être bloquées par les gaz et la vapeur d'eau dans l'atmosphère, ce qui peut limiter la capacité de la télédétection à voir à travers la couche atmosphérique. Par conséquent, le choix des longueurs d'onde doit tenir compte des fenêtres atmosphériques pour assurer une observation précise. Les fenêtres atmosphériques peuvent également influencer les observations en ce que les objets au sol ont des comportements et des réponses spécifiques liés à leur état, leur taille, leur morphologie et la période d'observation, ce qui peut entraîner des variations dans les mesures effectuées à travers les différentes fenêtres atmosphériques. (ESA - Eduspace FR - Accueil - Perturbations atmosphériques).

### 1.2.6. La signature spectrale

Tout objet (ou toute surface géographique) émet une quantité spécifique d'énergie électromagnétique à différentes longueurs d'onde en fonction de ses caractéristiques, telles que sa composition, sa température, etc. Cette quantité d'énergie émise est appelée "signature spectrale" de l'objet et permet de le distinguer d'autres objets ou surfaces. La couleur visible de l'objet n'est qu'une partie de cette signature spectrale, qui peut être étudiée en utilisant des techniques de télédétection pour obtenir des informations sur les caractéristiques de l'objet. ( **ESA - Eduspace FR - Accueil - Signatures spectrales - printer version**). (Figure 1.6)

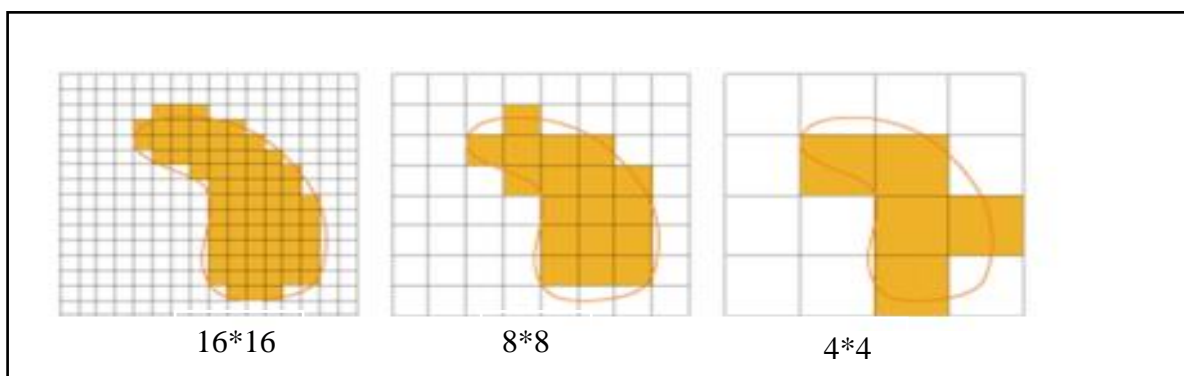


**Figure 0.6.** Signature spectrale de quelques surfaces naturelles. (RemoteSensing-Bersi.p7)

### 1.2.7. Caractéristiques des images des satellites de télédétection

#### La résolution spatiale

La résolution spatiale d'une image satellite se rapporte à la taille du pixel, qui est généralement un carré et représente l'élément le plus petit de l'image. Une forte résolution spatiale correspond à une petite taille de pixel, ce qui permet d'obtenir un niveau de détail élevé dans la représentation des objets. (Figure 1.7)



**Figure 1.7.** Résolution spatiale de quelques surfaces naturelle (A gauche, très haute résolution, au centre, moyenne résolution, à droite, faible résolutions).

### La résolution radiométrique

La résolution radiométrique d'une image dépend de son système de stockage ou d'encodage, qui est mesuré en nombre de bits. Une résolution radiométrique élevée correspond à un système de stockage en nombre de bits important, ce qui permet d'avoir plus de niveaux de gris dans l'image. Ainsi, plus le nombre de bits est élevé, plus la qualité de l'image est améliorée. (Figure 1.8)



Figure 1.8. Résolution radiométrique (RemoteSensing-Bersi.p11)

### La résolution spectrale

La résolution spectrale d'un satellite dépend des détecteurs qui captent l'énergie réfléchiée par les surfaces naturelles, en fonction des différentes longueurs d'onde du spectre électromagnétique. Ces détecteurs stockent ensuite cette information dans des bandes spectrales, qui sont combinées pour former une image numérique. La qualité de la résolution spectrale est déterminée par le nombre de bandes d'un satellite, ainsi que par la répartition de ces bandes dans le spectre. Les satellites de télédétection sont généralement classés en trois types en fonction de leur résolution spectrale : les satellites à images multispectrales (qui ont généralement de 4 à 30 bandes), les satellites à images hyperspectrales (qui ont plus de 100 bandes) et les satellites à images ultraspectrales (qui ont plus de 1000 bandes). ([www.esa.int](http://www.esa.int)).

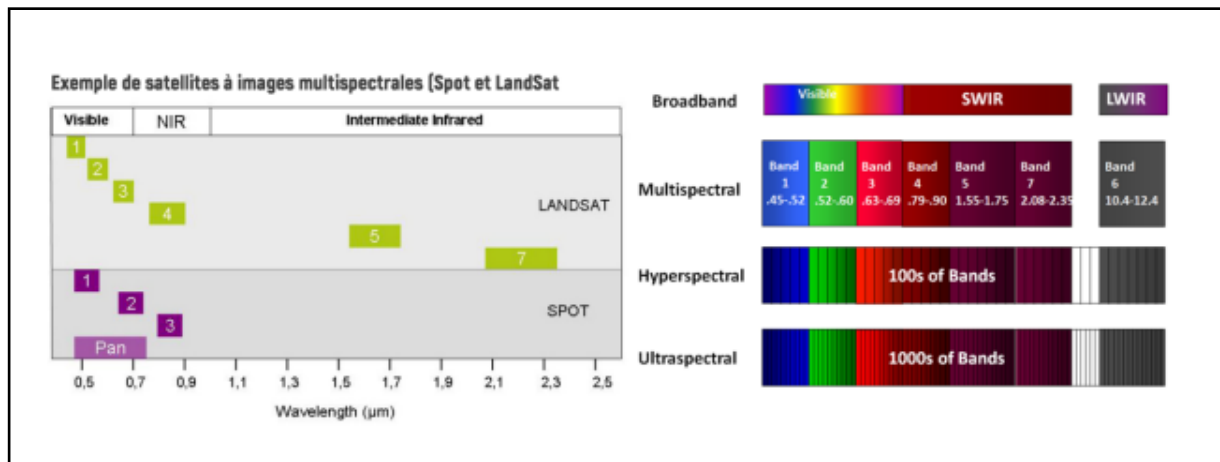


Figure 0.9. Notion de la résolution Spectrale

## La résolution temporelle

La capacité d'un satellite à capturer des images de la même zone au fil du temps est appelée résolution temporelle. Elle est influencée par l'orbite du satellite et son objectif de mission. Cette résolution est souvent exprimée en unités de temps, comme le nombre de jours que met le satellite à repasser sur la même région (appelé répétitivité). Une résolution temporelle plus courte signifie que le satellite peut capturer des images plus fréquemment, ce qui permet une meilleure analyse des changements au fil du temps. Les satellites ayant une bonne résolution temporelle sont souvent utilisés pour surveiller et analyser les catastrophes naturelles telles que les inondations. (Figure 1.10).

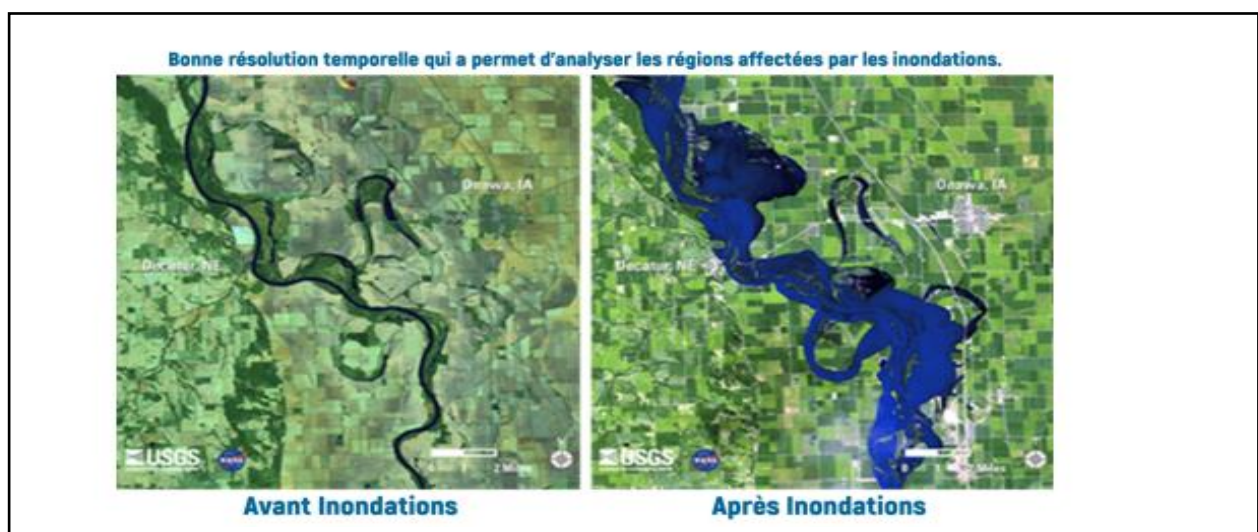


Figure 0.10. Notion de la résolution Spectrale

## La fauchée

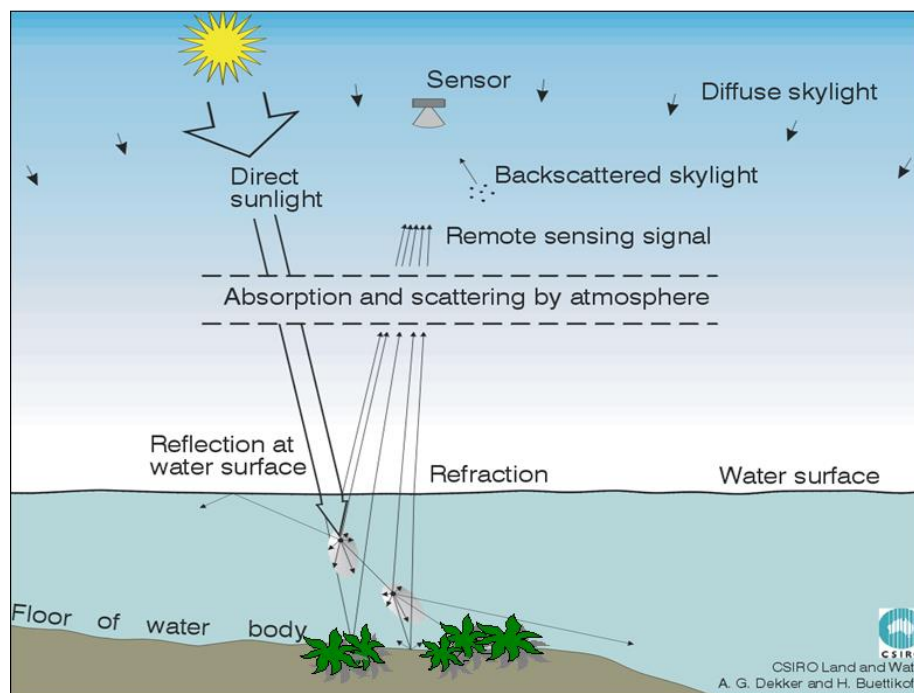
La fauchée d'un satellite désigne la portion de la surface terrestre qui est captée par le satellite à un moment donné. Elle est généralement exprimée en termes de longueur et de largeur, en kilomètres. Par exemple, le satellite Landsat a une fauchée de 185 kilomètres de longueur par 185 kilomètres de largeur. Il est important de noter que la fauchée d'un satellite n'a pas nécessairement une relation directe avec sa résolution spatiale. En d'autres termes, un satellite peut avoir une grande fauchée et une bonne résolution spatiale en même temps. Par exemple, Sentinel 2A a une fauchée de 295 kilomètres de longueur par 295 kilomètres de largeur, et une résolution spatiale de 10 mètres.

### 1.2.8. Interaction de la lumière avec une colonne d'eau

La vitesse de la lumière dans le vide est fixe et égale à  $c$ , soit environ 299 792,458 km/s. Lorsque la lumière traverse un milieu dense tel que l'eau, sa vitesse diminue par rapport à sa vitesse dans le vide, ce qui permet de calculer l'indice optique de l'eau  $n$  en tant que rapport entre les vitesses

de la lumière dans le vide et dans l'eau. Ce changement de vitesse de la lumière entraîne deux phénomènes à l'interface entre les deux milieux : la réflexion et la réfraction. Dans l'eau, la lumière se déplace en ligne droite mais perd de l'énergie par absorption. Les particules présentes dans l'eau, comme le plancton et les sédiments, ainsi que les molécules d'eau elles-mêmes, provoquent également une diffusion de la lumière. (*Frigerio.J .,2015*).

Il est à noter que l'interaction de la lumière avec une colonne d'eau diffère amplement avec celle d'une cible continentale. A l'interface air/mer, un rayonnement solaire incident et soit réfléchi à la surface sans qu'il n'est le temps de traverser la colonne d'eau. Ceci se produit généralement lorsque l'eau est huileuse ou très calme. Ce cas de figure en télédétection optique est nommé « sun-glint » ou « réflexion spéculaire ». La deuxième interaction se produit lorsque le rayonnement solaire traverse la colonne d'eau et rencontre des particules organiques et inorganiques qui l'absorbent et/ou le diffusent. Dans le cas particulier où la colonne d'eau est claire (non turbide) et peu profonde, le rayonnement solaire atteint le fond marin et s'y interagit (Figure 1.11). Les corrections de la colonne d'eau varient en fonction des objectifs de l'étude. Dans les études qui s'intéressent à la SDB, en plus des corrections atmosphériques, les deux premières interactions doivent d'être minutieusement corrigés.



*Figure 1.11. Interactions du rayonnement solaire avec une colonne d'eau*

### 1.2.9. Image satellitaire : cas de Sentinel-2

Copernicus est le programme de l'Union européenne pour l'observation et la surveillance de la Terre. Copernicus fournit de façon ouverte et gratuite des données opérationnelles et des services d'informations pour une grande variété d'applications. ([Www.copernicus.eu/fr](http://www.copernicus.eu/fr)). Sentinel-2 est un satellite développé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) dans le cadre du programme Copernicus pour surveiller la Terre et fournir des images de haute qualité pour une utilisation dans diverses applications, telles que la cartographie, la surveillance environnementale et la gestion des ressources naturelles. Il est équipé d'un instrument appelé MSI (Multispectral Imager) qui capte des images dans différentes bandes spectrales de la lumière visible et infrarouge. (**Sentinel-2 - Missions - (esa.int)**). Sentinel-2 utilise 13 bandes spectrales différentes pour capturer des images de la Terre. Chaque bande est conçue pour mesurer une partie différente de la lumière réfléchie par la Terre, ce qui permet d'obtenir une variété d'informations, telles que la couleur et la texture de la surface, la biomasse végétale, les minéraux, les masses d'eau et plus encore.

*Tableau 1.1. Caractéristiques des bandes spectrales de Sentinel-2*

Sentinel-2 Bands	Central Wavelength (µm)	Resolution (m)
Band 1 - Coastal aerosol	0.443	60
Band 2 - Blue	0.490	10
Band 3 - Green	0.560	10
Band 4 - Red	0.665	10
Band 5 - Vegetation Red Edge	0.705	20
Band 6 - Vegetation Red Edge	0.740	20
Band 7 - Vegetation Red Edge	0.783	20
Band 8 - NIR	0.842	10
Band 8A - Vegetation Red Edge	0.865	20
Band 9 - Water vapour	0.945	60
Band 10 - SWIR - Cirrus	1.375	60
Band 11 - SWIR	1.610	20
Band 12 - SWIR	2.190	20

Sentinel-2 produit des images de haute qualité grâce à sa résolution spatiale relativement élevée (10 m pour les bandes en couleur visible) et à ses nombreuses bandes spectrales. Les images sont également garanties d'être à jour et de grande qualité grâce à la fréquence de la mission Sentinel-2, qui garantit que toutes les zones cibles soient captées tous les 5 à 10 jours. Cette qualité d'image est importante pour les applications telles que la cartographie, la surveillance environnementale et la gestion des ressources naturelles, car elle permet de suivre les changements sur la Terre de manière fiable et précise. (**User Guides - Sentinel-2 MSI - Sentinel Online - Sentinel Online (esa.int)**).

# **Chapitre II :**

# **Contexte Général de la Zone d'étude**

## Contexte général de la zone d'étude

### 2.1. Description géographique

La Baie de Bou-Ismaïl, anciennement connue sous le nom de Castiglione, occupe une place prépondérante parmi les baies de la côte algérienne en raison de sa superficie de 287 km<sup>2</sup> et de sa situation géographique privilégiée. Limitée à l'est Sidi Ferruch et à l'ouest par le cap du Mont Chenoua (2°25' E et 36°38' N), cette baie s'étend entre la Mer Méditerranée au nord et la plaine de la Mitidja au sud. (Haddouch , 2003). (Figure 2.1).



Figure 2.1. Situation géographique de la zone d'étude

### 2.2. Morphologie côtière de la Bai de Bou-Ismaïl

Le littoral de la baie de Bou-Ismaïl s'étend sur environ 48 km, de Mont Chenoua au cap Caxine (Ain Benian). Il se distingue par une morphologie côtière variée, comprenant des côtes rocheuses, des falaises, des plages et des dunes. (ZERROUK, 2016)

### 2.3. Cadre sédimentologique

Le cadre sédimentologique de la baie de Bou-Ismaïl présente une grande diversité en termes de types de sédiments. Vers l'embouchure de l'oued Mazafran et jusqu'à une profondeur de 25 m, on observe la présence de sables grossiers qui caractérisent cette partie de la baie. Au-delà de ce dépôt fluvial marin, entre une profondeur de 10 à 15 m, les sables moyens réapparaissent, s'étendant de Khemisti jusqu'à Tipaza (Al Sid Chikh et al., 2009). Cette variation dans la granulométrie des

sédiments peut être attribuée à l'influence des apports fluviaux et des processus de transport côtier. L'analyse des sédiments dans la baie de Bou-Ismaïl a permis d'identifier neuf faciès sédimentaires distincts, témoignant de la grande diversité des fonds de cette baie. Les faciès comprennent des sables fins, des sables envasés, des vases sableuses, des sables graveleux, des graviers envasés, des sables grossiers et fins graviers, des vases pures et des faciès rocheux. Cependant, la répartition de ces faciès n'est pas uniforme dans la baie. (Figure 2.2). Deux régions distinctes émergent, à savoir la région orientale et la région occidentale. Chaque région présente des caractéristiques sédimentologiques spécifiques, telles qu'observées et signalées par **BELKESSA (1999)**.

Ces résultats soulignent l'influence de différents processus, tels que les apports fluviaux, les courants marins et les vagues, sur la morphologie et la distribution des sédiments dans la baie de Bou-Ismaïl. La compréhension de cette diversité sédimentaire et de la répartition spatiale des faciès est essentielle pour une étude approfondie de la dynamique côtière et de l'évolution du fond marin de cette région.

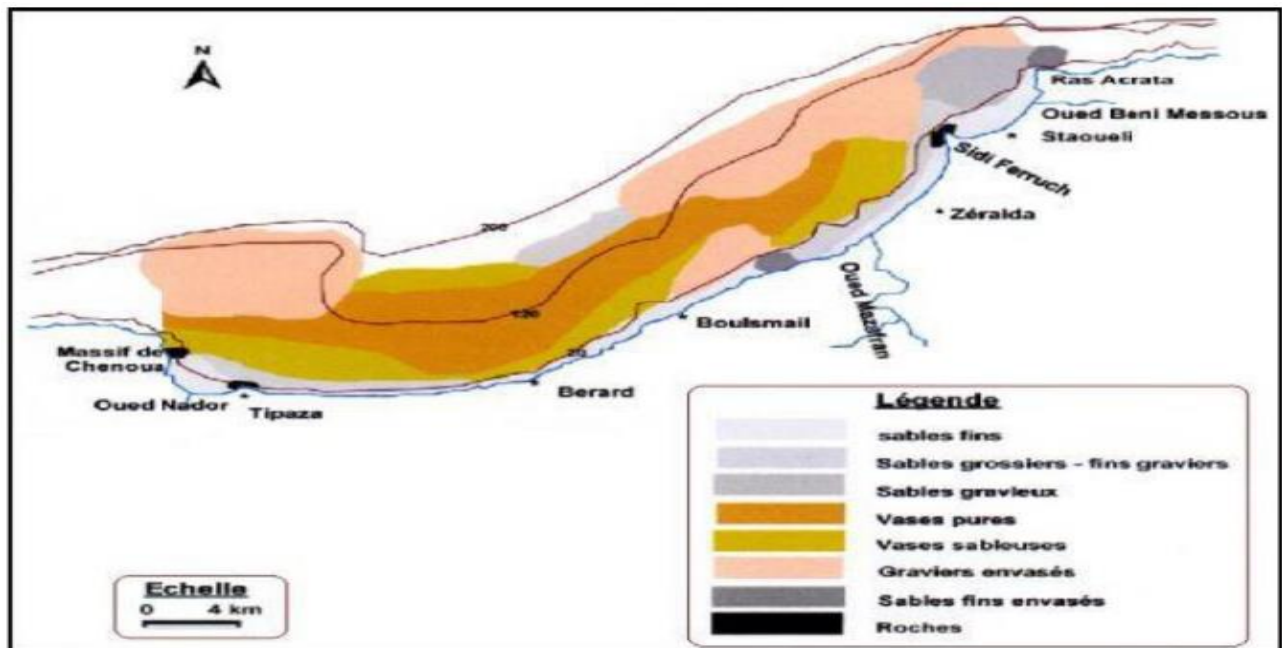


Figure 2.2. Carte sédimentologique de la baie de Bou-Ismaïl (LEM, 1998).

## 2.4. Réseau Hydrographique

Le réseau hydrographique qui se déversent dans la baie est principalement composé des oueds, tels que Mazafran, Nador et Béni Messous, qui s'écoulent perpendiculairement à la côte. Bien que leur régime soit irrégulier, ces cours d'eau jouent un rôle crucial dans la sédimentologie de la baie.

## 2.5. La pollution dans la Baie de Bou-Ismaïl

La baie de Bou-Ismaïl présente une morphologie caractérisée par sa large ouverture sur la mer Méditerranée. Cette configuration permet un échange constant entre les eaux de la baie et celles de la mer, créant ainsi une connexion hydrique et une interaction entre les deux écosystèmes.

Cette ouverture à la mer Méditerranée offre à la baie de Bou-Ismaïl un hydrodynamisme particulière. Les courants marins et les marées jouent un rôle important dans la circulation des eaux et des sédiments à l'intérieur de la baie. Ces mouvements influencent la dispersion des polluants et contribuent à maintenir l'équilibre écologique de la baie.

Il convient de souligner que la baie de Bou-Ismaïl abrite également des sites qui peuvent être considérés comme des références en termes de préservation de l'environnement. Parmi ces sites, on peut citer Ain Tagourait et Kouali, qui ont été identifiés par **Boumaza et al. (2022)** comme des zones présentant une qualité environnementale relativement préservée.

# **Chapitre III**

## **Matériels et Méthodes**

---

## Chapitre III : Matériels et Méthodes

Ce chapitre présente les outils, les données et la méthodologie utilisés pour extraire la bathymétrie des eaux côtières à partir des images satellitaires Sentinel-2. Cette section est fondamentale pour comprendre comment les résultats ont été obtenus et pour évaluer leur précision. Nous décrivons les deux méthodes utilisées pour extraire la bathymétrie, à savoir la méthode de Stumpf et al. (2003) et la méthode de Hedley (2006), ainsi que les étapes de pré-traitement appliquées sur l'image satellitaire Sentinel-2. De plus, nous présenterons les deux sources de données utilisées pour valider la précision de la bathymétrie satellitaire, les données de Navionics et les données de la carte marine de la zone d'étude issue des levés entre 1867 et 2005. Nous présentons à la fin les étapes de la modélisation du fond marin.

### 3.1. Données

Les données utilisées dans cette étude ont été soigneusement sélectionnées pour garantir la qualité des résultats obtenus. La faible, voire l'inexistante couverture nuageuse, est un critère primordial dans le choix de l'image sur laquelle se fera le travail. Elles comprennent l'image satellite Sentinel-2 au niveau L2 acquise le 24/05/2022 (S2A\_MSIL2A\_20220524T102611\_N0400\_R108\_T31SDA\_20220524T175611). Cette image a une résolution spatiale de 10 mètres pour les bandes du visible et du proche-infrarouge. En outre, des données de bathymétrie ont été obtenues à partir de la carte de navigation Navionics à l'aide du logiciel SASplanet, ainsi que d'une carte marine du SHFN. Toutes ces données ont été essentielles pour la calibration de différentes méthodes utilisées dans cette étude.

### 3.2. Matériels

Dans le cadre de cette étude, les logiciels utilisés pour le traitement et l'analyse de données sont à licence publique. Le logiciel SNAP (Sentinel Application Platform) est un outil de traitement d'images satellitaires qui a permis de prétraiter et de corriger les images Sentinel-2. Le deuxième logiciel est QGIS, un logiciel de Système d'Information Géographique (SIG), qui a été utilisé pour la création des cartes bathymétriques et pour l'analyse spatiale des données. Enfin, SASplanet a été utilisé pour extraire les données de la bathymétrie à partir des cartes de navigation Navionics. La combinaison de ces différents logiciels a permis une analyse et une interprétation précise des données.

### 3.3. Méthode

Pour mener à bien cette étude, nous avons suivi une méthodologie rigoureuse, en passant par plusieurs étapes définies dans l'organigramme présenté dans la figure 3.1. En effet, la méthode adoptée s'articule autour des trois points suivants : Pré-traitement, traitement et post-traitement.

Le pré-traitement comprend essentiellement le rééchantillonnage spatiale et la correction de surface. Le traitement est basé sur la génération d'un modèle SDB à partir des données in-situ. Pour cela deux méthodes ont été expérimentées. Le post traitement consiste à évaluer quantitativement les résultats et ensuite, générer des produits à valeur ajoutée utiles au **secteur socio-économique**.

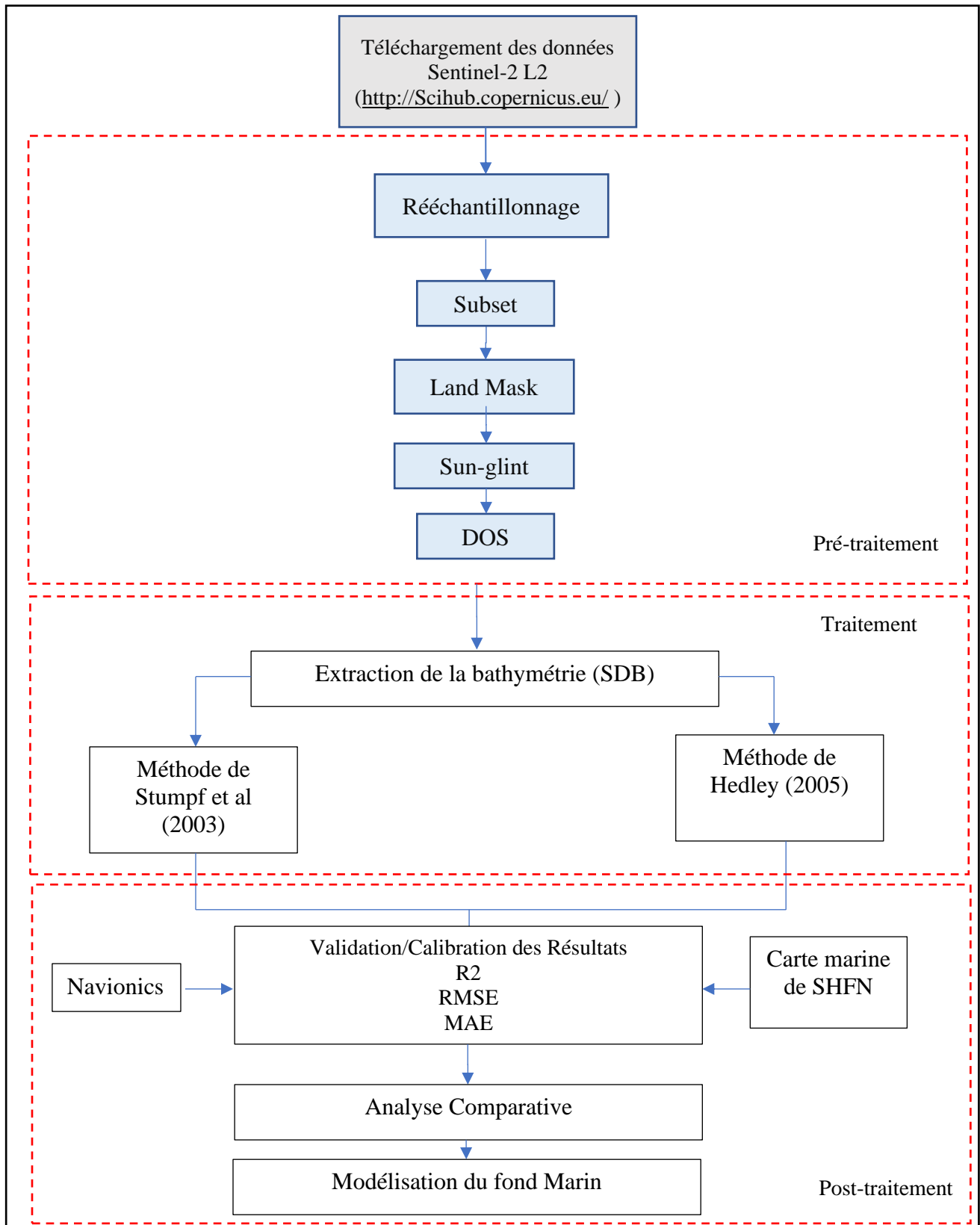


Figure 3.1. Organigramme de la méthodologie adoptée

### 3.3.1 Pré-traitement

#### 3.3.1.1. Rééchantillonnage (Resample)

Les différentes bandes des produits Sentinel-2 ont des résolutions variables. Cela pose des problèmes pour les outils de traitement de données. Pour remédier à cela, nous devons rééchantillonner les bandes à une résolution égale. Nous avons choisi d'utiliser la bande B2 comme référence en raison de sa résolution spatiale la plus élevée et qui est de 10 mètres.

#### 3.3.1.2. Création des masques (Land\_mask)

Pour poursuivre la suite les étapes, nous devons tout d'abord masquer l'occupation du sol dans les bandes B2, B3, B4 et B8. Pour ce faire, nous créons un masque terrestre en utilisant la bande NIR pour masquer la terre de l'image, car l'eau apparaît sombre et facilite la distinction entre l'eau et la terre. Le masque peut être créé soit avec une valeur seuil de la bande NIR, soit avec un polygone qui décrit le terrain. En appliquant ensuite le masque terrestre dans chaque bande, nous créons une image masquée ne contenant que les éléments aquatiques. Ainsi, pour les bandes B2, B3, B4 et B8, nous appliquons les expressions suivantes :  $B2 * Land\_mask$ ,  $B3 * Land\_mask$ ,  $B4 * Land\_mask$  et  $B8 * Land\_mask$ . Enfin, l'expression de la bande Land\_mask est définie dans le langage Map Algebra comme suit : si  $B8 > 0,05$  then NaN else 1.

#### 3.3.1.3 Correction des reflets solaires (Sun-Glint)

Le "sun-glint" est un phénomène courant dans les images satellites. Il est dû essentiellement à la réflexion spéculaire du soleil sur les surfaces d'eau. La réflectance de l'eau peut être difficile à observer en raison de la réflexion de la lumière directe du soleil sur l'interface air-eau (sun-glint) dans la direction du satellite. La géométrie de vision du satellite Sentinel-2 le rend vulnérable à la contamination par le sun-glint. L'élimination du sun-glint est une étape de prétraitement des images multispectrales qui est nécessaire lorsque la quantité de sun-glint empêche la visibilité du fond marin. Il existe plusieurs méthodes d'élimination du sun-glint pour les images à haute résolution et les applications côtières, nous appliquerons la méthodologie de deglint proposée par **Hedley et al. (2005)** (figure 3.2) qui décrit les relations linéaires entre les bandes NIR et visible en utilisant une régression linéaire basée sur un échantillon des pixels de l'image. L'équation décrit par Hedley et al. (2005) c'est le suivant :

$$R'_i = R_i - b_i(R_{NiR} - Min_{NiR}) \quad \text{(Equation 1)}$$

$R'_i$ : Réflectance du pixel de la bande i corrigée du sun-glint

$R_i$ : Réflectance de la bande i du visible

$b_i$ : Pente de la régression

$R_{NiR}$ : Réflectance de la bande du Proche Infra Rouge

$Min_{NiR}$ : Valeur minimale de l'échantillon

Pour appliquer la correction, il est nécessaire d'utiliser un ou plusieurs échantillons d'image des régions de sun-glint pour mettre à l'échelle la relation entre le signal NIR et le sun-glint. Ces régions sont choisies pour inclure une gamme de niveaux de brillance des pixels, mais une brillance sous-jacente supposée constante et une très faible réflectance de l'eau dans le PIR (NIR), généralement dans des zones d'eau profonde (Kay et al., 2009). Pour établir la relation, une régression linéaire entre les bandes (B2\_Land mask, B3\_Land mask et B4\_Land mask) et la bande B8\_Lans mask, est effectuée sur une zone d'eau profonde, où la contribution de sous-surface de l'eau est supposée homogène, et donc la relation dérivée est uniquement basée sur la réflectance de la surface (Figure 3.2).

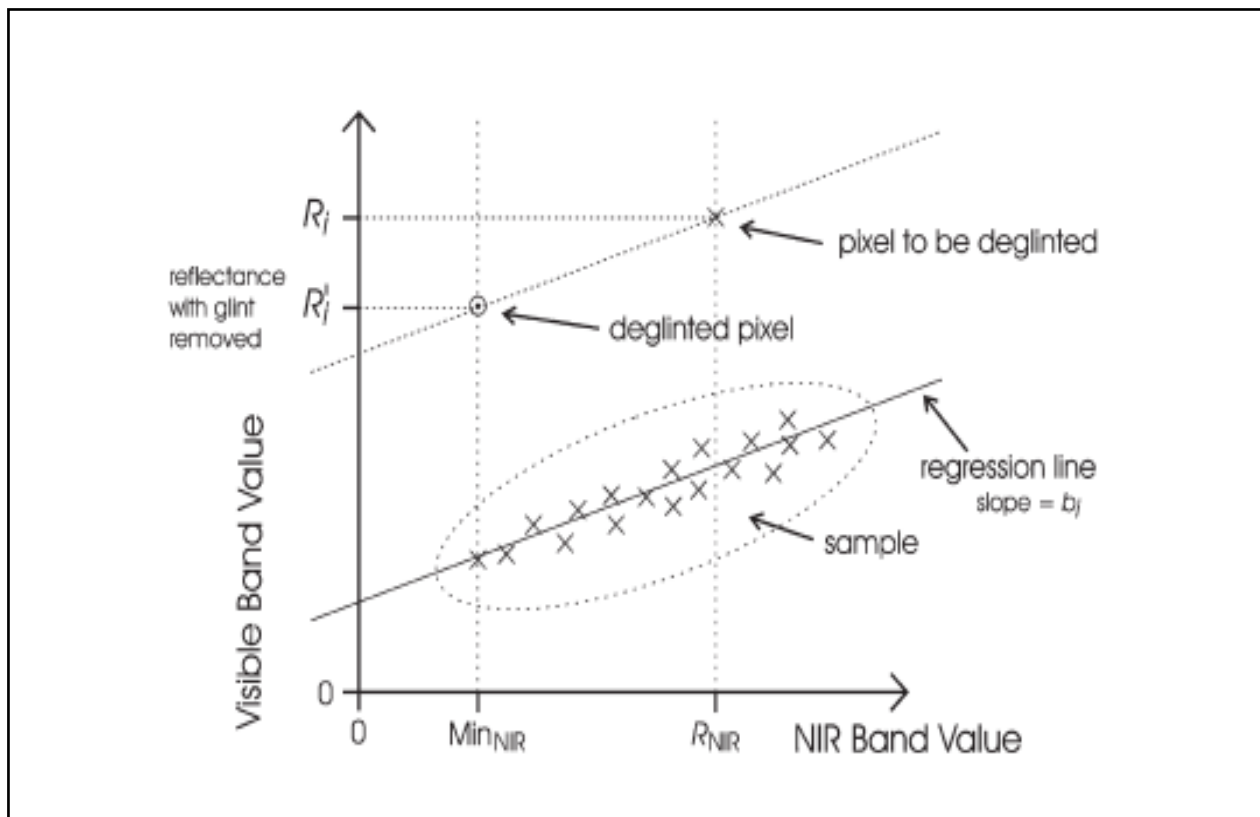


Figure 3.2. Explication de l'équation de Hedley et al. (2005).

#### 3.3.1.4. Correction Atmosphérique de l'objet sombre (Dark Object Subtraction - DOS)

La correction atmosphérique de l'objet sombre (ou Dark Object Subtraction, DOS) est une méthode empirique d'élimination des effets de l'atmosphère terrestre sur les images satellitaires. Bien que les images de niveau 2 (comme Sentinel-2) soient déjà corrigées des effets de l'atmosphère, il peut être nécessaire d'appliquer des corrections supplémentaires pour des objets sombres ou des zones d'ombre qui n'ont pas été correctement corrigées par les algorithmes standards, comme dans l'étape

3.1.3.4 de la correction atmosphérique de l'objet sombre (DOS), où les bandes **B2** et **B3** sont sélectionnées pour la correction (Ashphaq et al., 2022). Ces bandes sont les plus sensibles aux effets atmosphériques, tels que la diffusion et l'absorption de la lumière, et sont souvent utilisées pour la cartographie de la bathymétrie en raison de leur capacité à pénétrer dans l'eau peu profonde. En appliquant la correction DOS à ces bandes, on peut améliorer la qualité de l'image et réduire les effets de l'atmosphère pour une estimation plus précise de la profondeur de l'eau. Pour obtenir les bandes : B2\_DOS et B3\_DOS nous appliquons les expressions suivantes : B2\_Sunglint - 0.016 ; B3\_sunglint - 0.005

### 3.3.2 Extraction de la bathymétrie

#### 3.3.2.1 Méthode de Stumpf

La méthode de Stumpf et al. (2003) est une méthode couramment utilisée pour l'extraction de la bathymétrie à partir d'images satellitaires. Elle est basée sur la relation exponentielle entre la réflectance de l'eau et la profondeur, en utilisant les réflectances dans les bandes bleue et verte de l'image satellitaire pour déterminer les coefficients de régression  $m_0$  et  $m_1$ . Cependant, cette méthode nécessite des données de profondeur in situ pour l'étalonnage des coefficients de régression. Pour extraire les données bathymétriques à partir de l'image Sentinel-2, nous utiliserons donc le modèle développé par Stumpf et al. (2003) :

$$Z = m_1 \frac{\ln(n R_w(\lambda_i))}{\ln(n R_w(\lambda_j))} - m_0 \quad (\text{Equation 2})$$

Où  $Z$  est la profondeur en mètres,  $n$  est l'indice de réfraction de l'eau,  $R_w$  est la réflectance de l'eau,  $\lambda_i$  et  $\lambda_j$  sont les longueurs d'onde des bandes utilisées, et  $m_0$  et  $m_1$  sont des coefficients empiriques déterminés pour chaque paire de bandes utilisées.

#### 3.3.2.2 Méthode de Hedley

La méthode de Hedley est une technique empirique permettant d'estimer la profondeur de l'eau à partir d'images satellitaires en mesurant l'atténuation de la lumière en fonction de la profondeur. Cette méthode repose sur la modélisation de la relation entre la réflectance de la surface de l'eau et la profondeur. Elle diffère de la méthode de Stumpf par le choix des bandes spectrales utilisées et la méthode d'étalonnage des coefficients de régression. Dans notre étude, nous avons utilisé la méthode de Hedley en combinant l'outil EmpiricalBathymetry Processus avec des données in situ de la bathymétrie et les bandes de réflectance corrigées des effets du sung-lint de l'image Sentinel-2 (bande 2 et bande 3) pour la calibration. L'outil EmpiricalBathymetry Processus utilise les coefficients de régression pour estimer la profondeur à partir de l'image satellitaire, et nous

obtenons ainsi une carte de bathymétrie haute résolution.

### 3.4. Calibration/Validation des Résultats

Pour valider les données bathymétriques satellitaires, nous avons utilisé deux sources de référence : Navionics et la carte marine du SHFN issue de la nouvelle édition. À cet effet, nous avons sélectionné de manière aléatoire 21 points le long de la côte dans la baie de Bou-Ismaïl. Et nous utilisons les mesures de performance suivantes : le coefficient de détermination ( $R^2$ ), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur absolue moyenne (MAE).

- **Le coefficient de détermination ( $R^2$ )** est une mesure statistique qui évalue la qualité de l'ajustement d'un modèle aux données observées. Il varie entre 0 et 1, où une valeur de 1 indique une correspondance parfaite entre le modèle et les données observées, tandis qu'une valeur proche de 0 indique une mauvaise adéquation.
- **L'erreur quadratique moyenne (RMSE)** est une mesure de l'écart moyen entre les valeurs prédites par un modèle et les valeurs observées. Le RMSE exprime donc une mesure de dispersion des erreurs de prédiction.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - y_i)^2}{n}} \quad \text{(Equation 3)}$$

Où  $X_i$  est la profondeur SDB dérivée des images satellites,  $y_i$  est la profondeur de validation in-situ et  $n$  est le nombre total de points de profondeur.

- **L'erreur absolue moyenne (MAE)** est une mesure de l'écart moyen entre les valeurs prédites par un modèle et les valeurs observées, sans tenir compte du signe des écarts. Le MAE représente donc une mesure de la magnitude des erreurs de prédiction.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - Y_i| \quad \text{(Equation 4)}$$

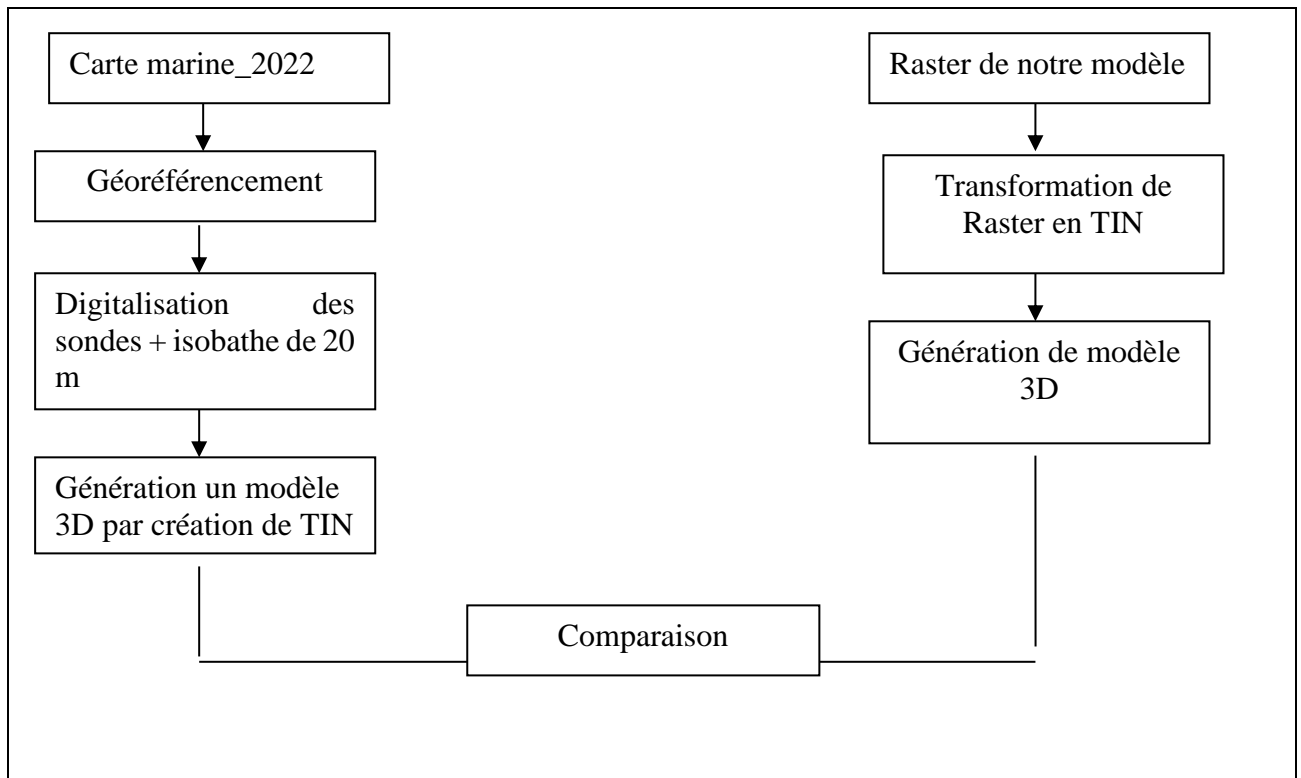
Une calibration précise a été effectuée sur le modèle de bathymétrie. La sélection minutieuse des meilleurs modèles a permis de créer une bande dans le logiciel SNAP. Par la suite, l'équation du graphique résultant de la régression linéaire entre la bathymétrie estimée (SDB) et les mesures des sondes de la carte marine a été intégrée.

### 3.5. Utilisation de SDB

Après avoir sélectionné la méthode qui offre les meilleurs résultats, nous utilisons les données SDB de celle-ci pour effectuer une modélisation du fond marin en 3D et créer une carte bathymétrique de la baie de Bou-Ismaïl.

### 3.5.1 Modélisation du fond marin

La modélisation est très importante pour l'étude approfondie des fonds marins, car elle permet d'obtenir une représentation virtuelle et détaillée de leur structure et de leurs caractéristiques. Dans cette étude, (Figure3.3), nous avons utilisé un logiciel de Système d'Information Géographique (SIG) et suivi une méthodologie rigoureuse pour mener à bien cette modélisation.



*Figure 3.3. Les étapes de modélisation du fond marin*

# **Chapitre IV**

## **Résultats et Discussions**

## 4. Chapitre IV : Résultats et Discussions

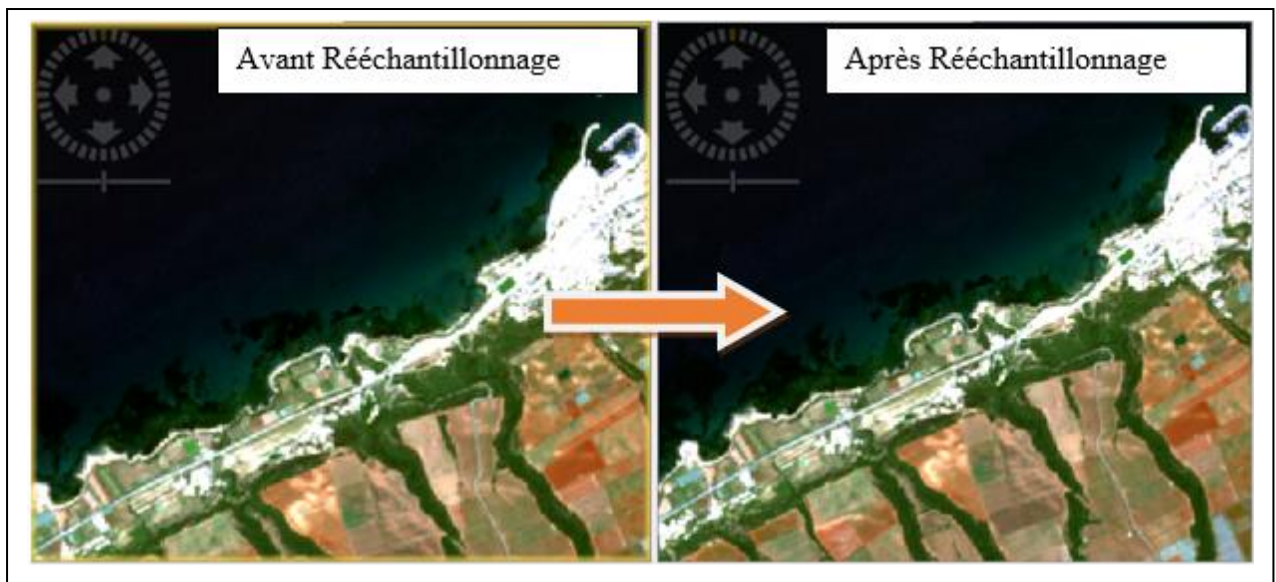
Dans ce chapitre, nous présentons les résultats essentiels de notre étude ainsi que leur analyse critique. Nous aborderons les résultats du pré-traitement et de deux méthodes utilisées pour l'extraction de la bathymétrie, en fournissant une interprétation approfondie de ces résultats. Cette section clé dévoile nos avancés et met en évidence notre compréhension du sujet.

### 4.1. Résultats

#### 4.1.1. Pré-traitement

##### 4.1.1.1. Rééchantillonnage

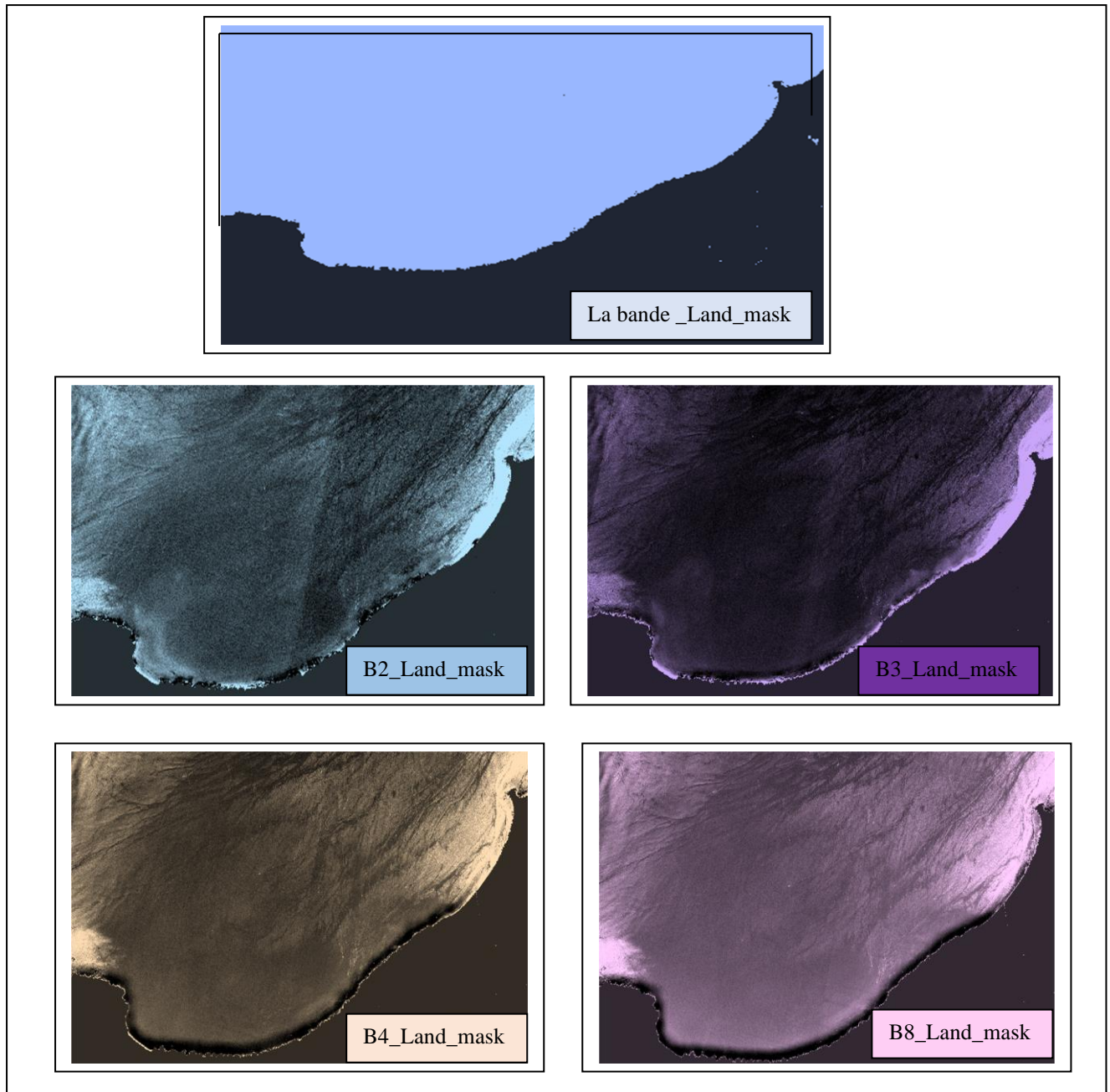
La figure (4.1) représente le résultat de la première étape de pré-traitement qui consiste à générer une image dont l'ensemble des bandes spectrales rééchantillonnent à meilleure résolution spatiale qui est 10 m.



*Figure 4.1. Résultat de l'étape Rééchantillonnage*

##### 4.1.1.2. Génération des masques (*Land\_mask*)

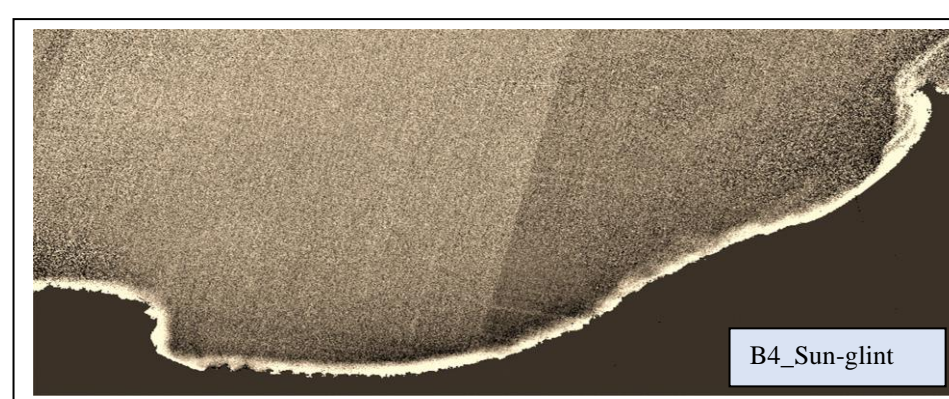
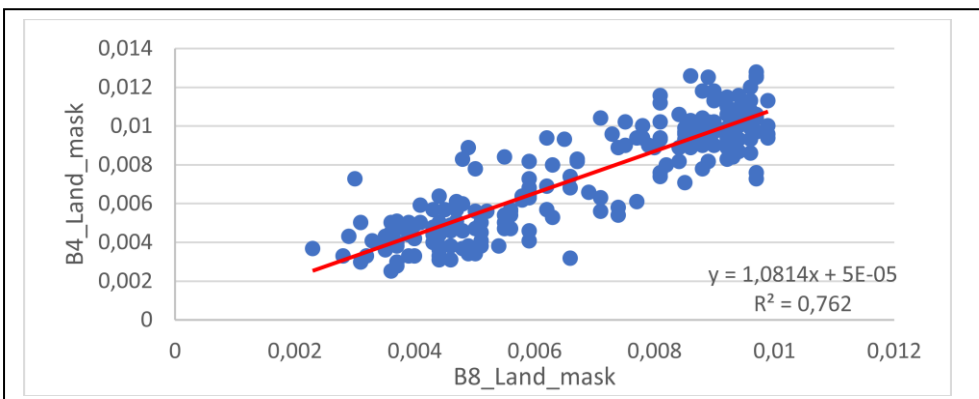
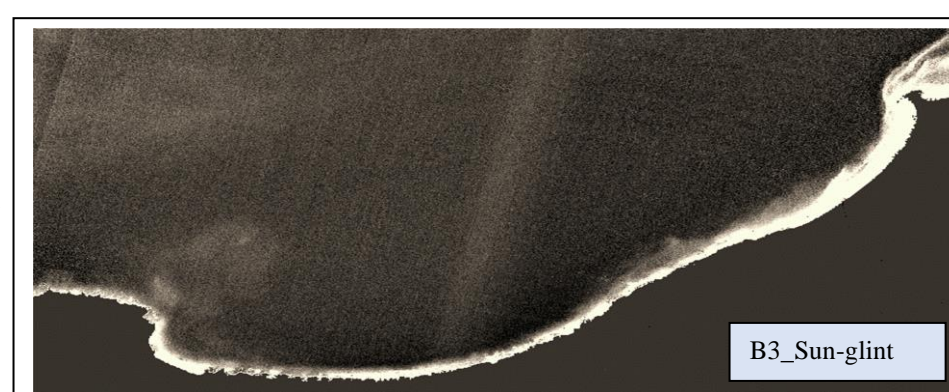
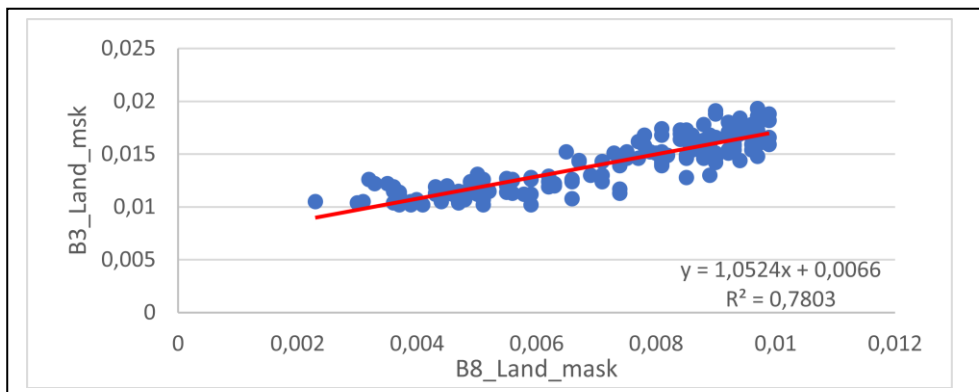
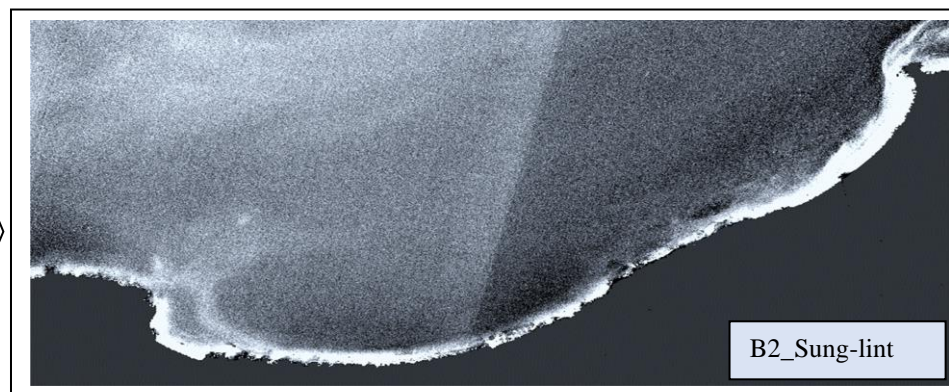
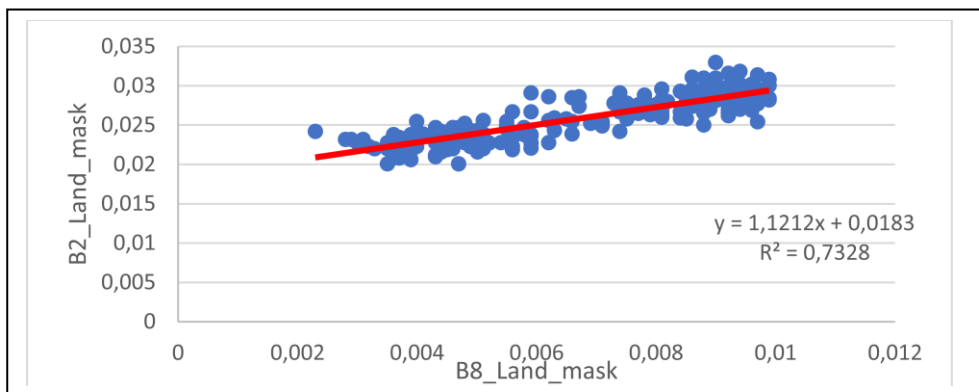
Dans cette section, nous exposons les résultats de l'étape de génération de masques terrestres visant à distinguer la partie continentale de la partie marine dans notre zone d'étude. Les images capturées dans les bandes B2, B3, B4 et B8 ont été traitées afin de créer un masque précis. (Figure 4.2).



*Figure 4.2. Les différents résultats de l'étape Land\_mask*

#### 4.1.1.3. Sun-glint

Dans cette partie, nous présentons les résultats de l'étape Sun-glint (Figure 4.3). Nous procédons à l'analyse des régressions linéaires entre les bandes B2\_Land mask, B3\_Land mask, B4\_Land mask et la bande B8\_Land mask. De plus, nous affichons les images de Sun-glint pour chaque bande, obtenues grâce à ces régressions linéaires.



Après l'application de sun-glint on obtient le résultat suivant :

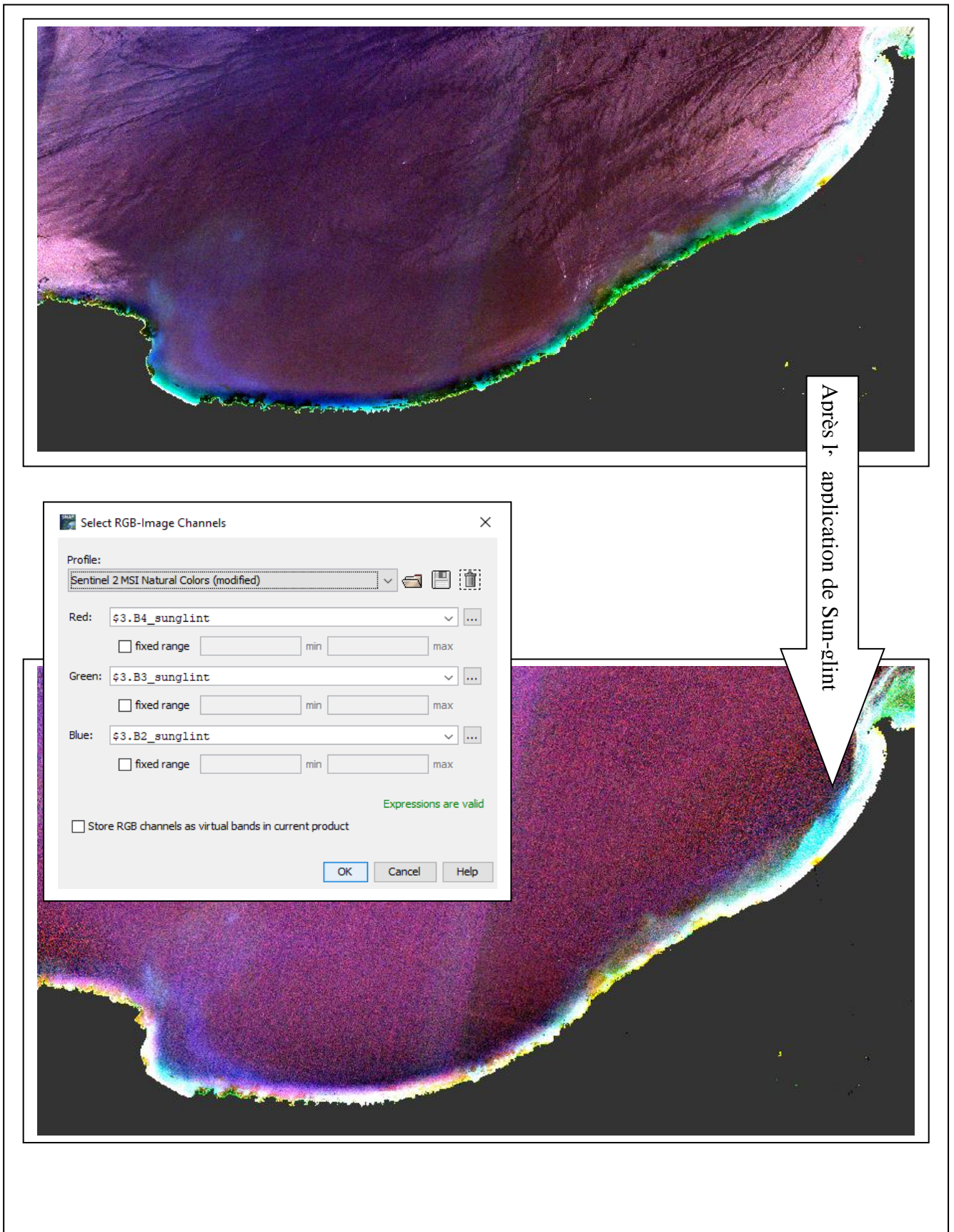


Figure 4.3. Le Résultat de Sun-glint

4.1.1.4.DOS

La figure suivante illustre les résultats de l'application de la technique DOS sur les bandes B2\_sunlint et B3\_sunlint.

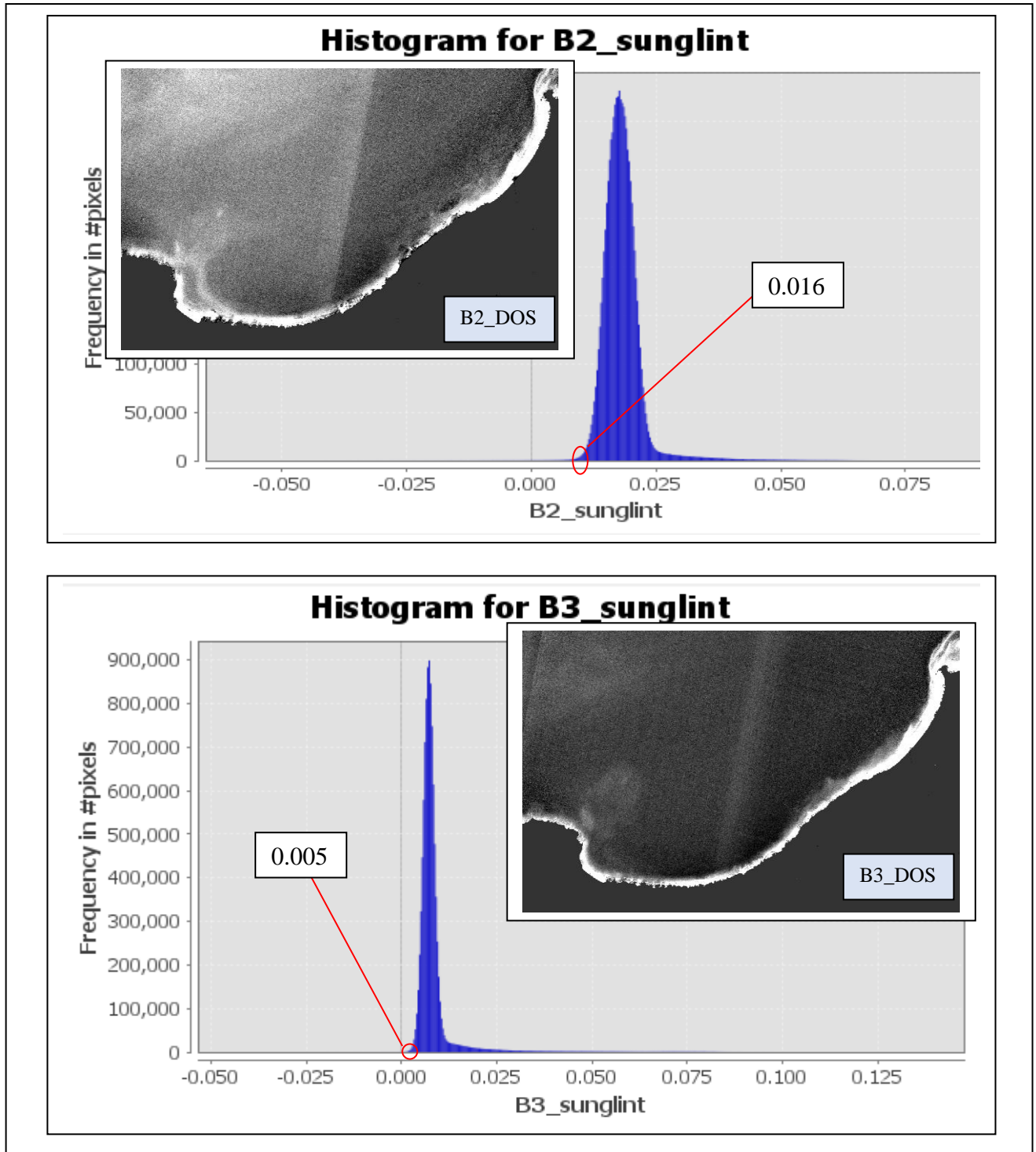


Figure 4.4. Les différents résultats de DOS

4.1.2 Extraction de la bathymétrie

4.1.2.1. Méthode de stumpf et al .2003

Le rapport de l'équation 2 de stumpf et al (2003) sera appliqué sur les bandes Bleu et vert (B2B3), Expression mathématique de bande :  $\log(1000 * B3\_DOS) / \log(1000 * B2\_DOS)$ . (Figure 4.5).

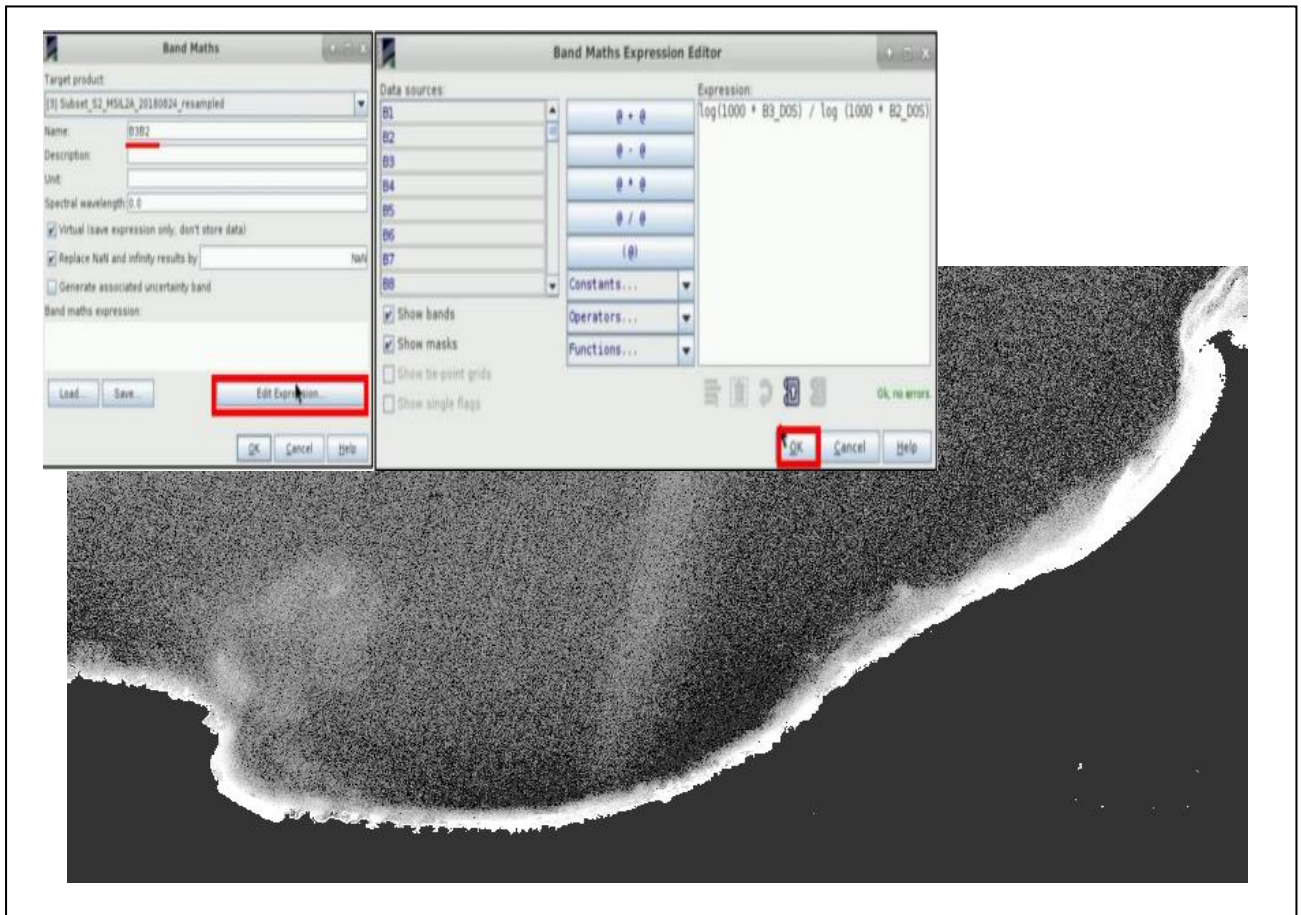


Figure 4.5. La bande B2B3

- Détermination des coefficients m0 et m1 de l'équation (2)

Le graphe suivant représente la régression linéaire entre les valeurs extraire depuis la bande B2B3 et les valeurs de profondeurs (en mètres) (les données de Navionics) ainsi que R2 indique la valeur de corrélation.

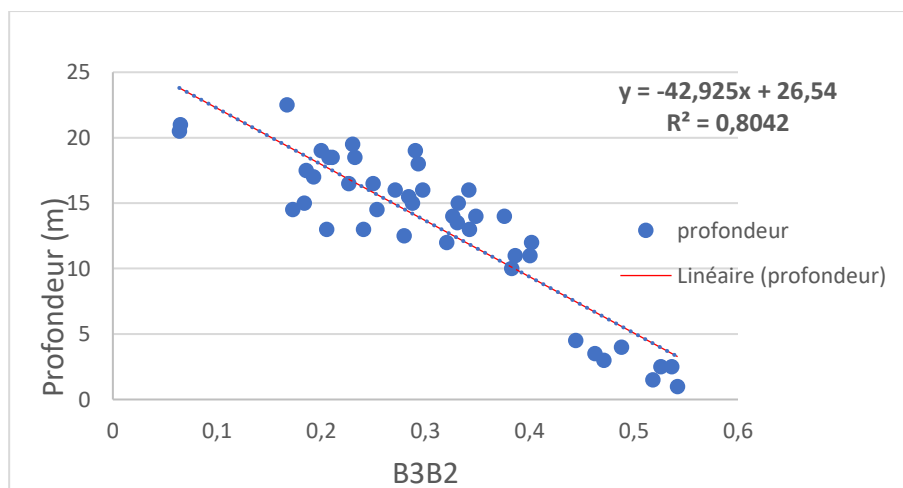


Figure 4.6. La régression linéaire entre la bande B3B2 et les profondeurs

Selon Stumpf et al. (2003) :  $m_1 = -42.925$  et  $m_0 = 26.54$

Donc l'expression mathématique pour extraire la bathymétrie satellitaire (La bande SDB) devient :

$$Z = m_1 \frac{\ln(nRw(\lambda_i))}{\ln(nRw(\lambda_j))} - m_0 \longrightarrow -42.925 * B2B3 + 26.54$$

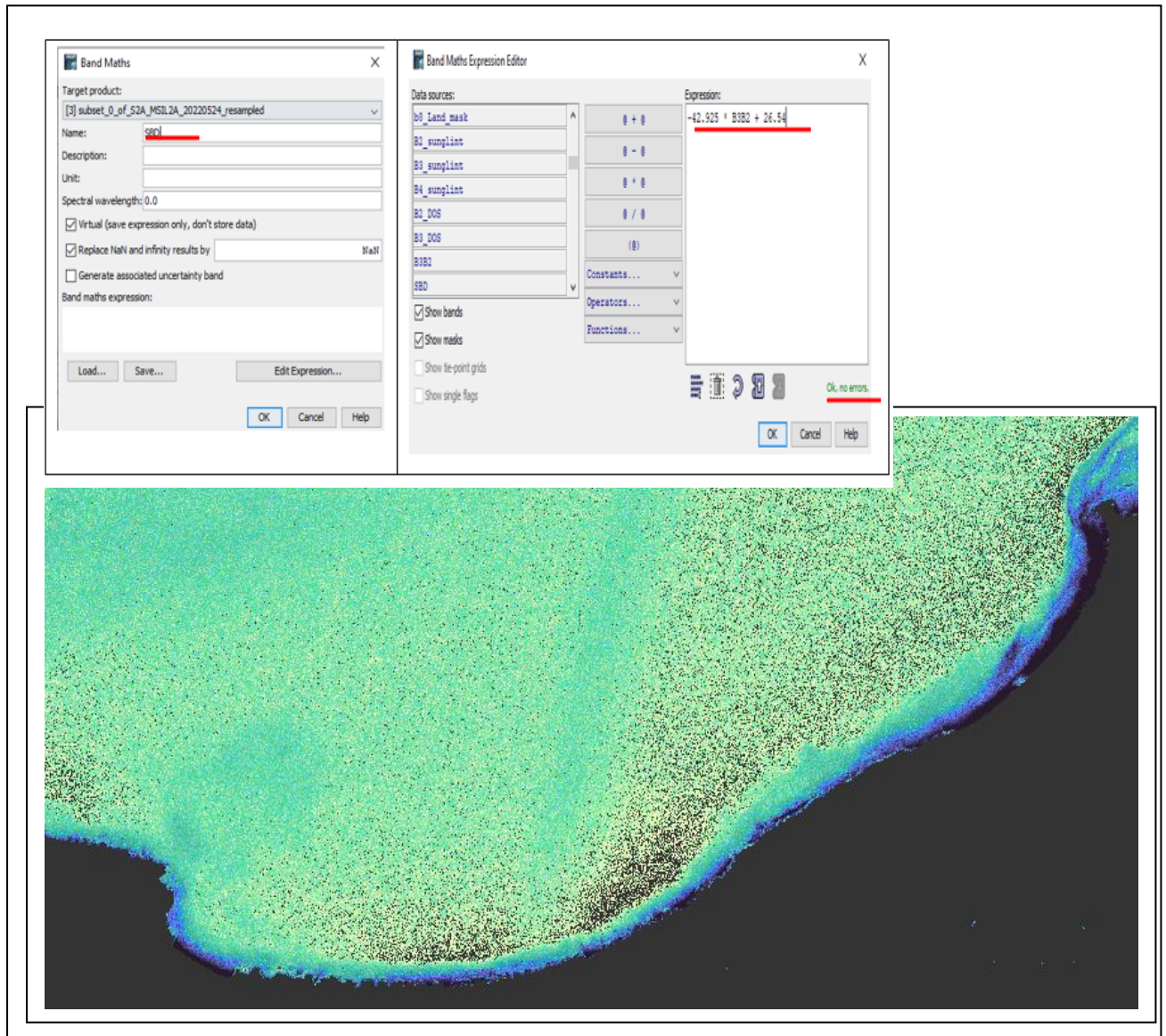
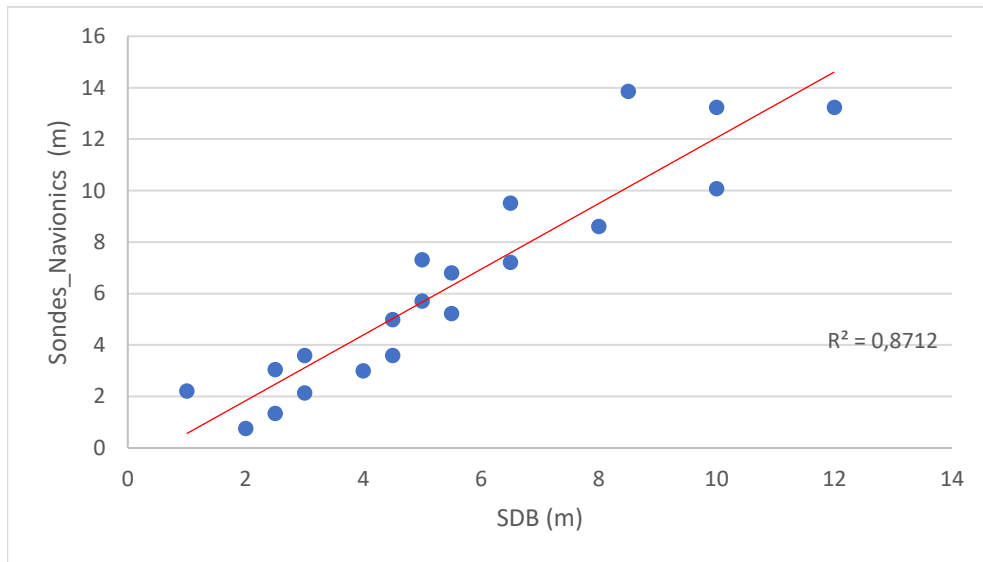


Figure 4.7. La bande SDB

#### 4.1.2.1.1. Validation de la Méthode de Stumpf et al. (2003)

##### Navionics

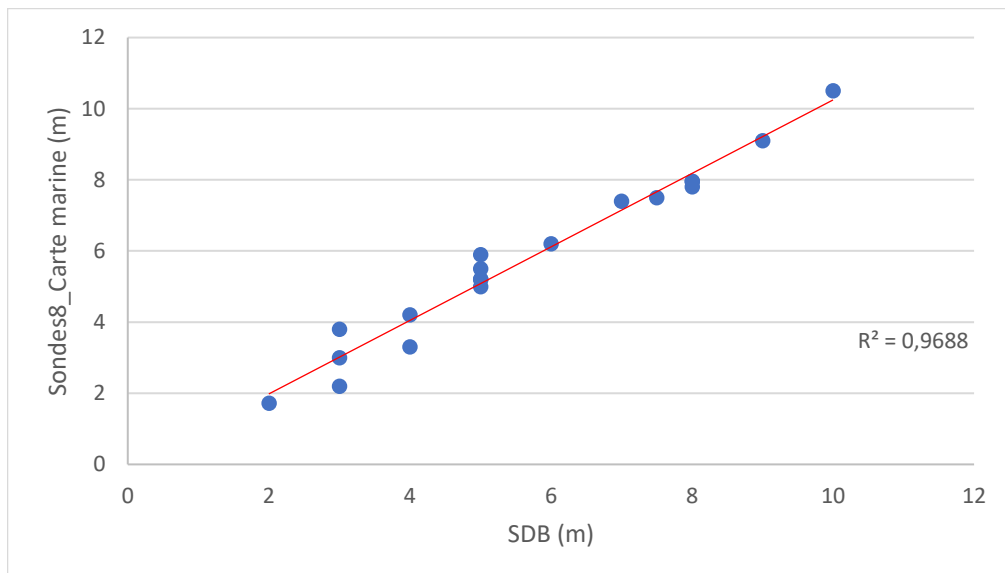
Le graphique ci-dessous (Figure 4.8) illustre la régression linéaire entre les sondes de Navionics et les valeurs bathymétriques de SDB, en incluant les mesures de R2, RMSE et MAE.



*Figure 4.8. La régression linéaire entre SDB et les sondes Navionics*

##### Carte Marine

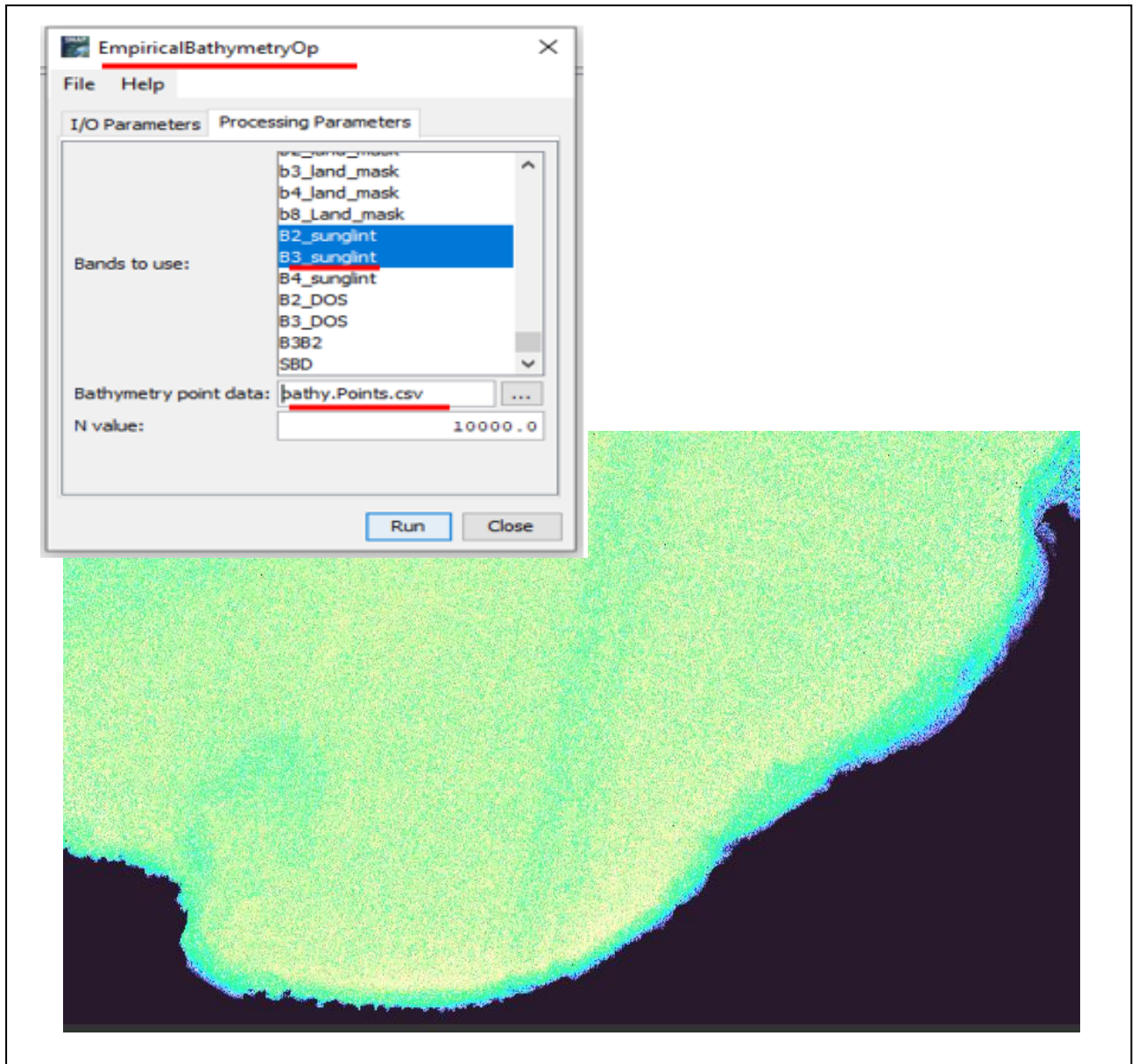
Le graphique ci-dessous (Figure 4.9) représente la régression linéaire entre les sondes de la carte marine et les valeurs bathymétriques de SDB, en incluant les paramètres R2, RMSE et MAE.



*Figure 4.9. La régression entre SDB et les sondes de la carte marine*

#### 4.1.2.2. Méthode de Hedley (2006)

Pour cette méthode, nous utilisons l'outil **EmpiricalBathymetryProcessor** sur SNAP en sélectionnant les bandes de référence B2\_sunglint et B3\_sunglint (**Hedley 2006**) et en important 40 sondes. Le résultat obtenu est une bande Empirical Bathymetry contenant les données bathymétriques satellitaires. (Figure 4.10).



*Figure 4.10. La bande Empirical Bathymetry*

#### 4.1.2.2.1. Validation de la Méthode Hedley (2006)

Pour confirmer et valider les données bathymétriques satellitaires, nous avons utilisé deux sources : Navionics et la carte marine du SHFN. À cet effet, nous avons sélectionné de manière aléatoire 21 points le long de la côte dans la baie de Bou-Ismaïl.

##### Navionics

Le graphique ci-dessous (Figure 4.11) illustre la régression linéaire entre les sondes de Navionics et les valeurs bathymétriques de la bande Empirical Bathymetry, en incluant les mesures de R<sup>2</sup>, RMSE et MAE.

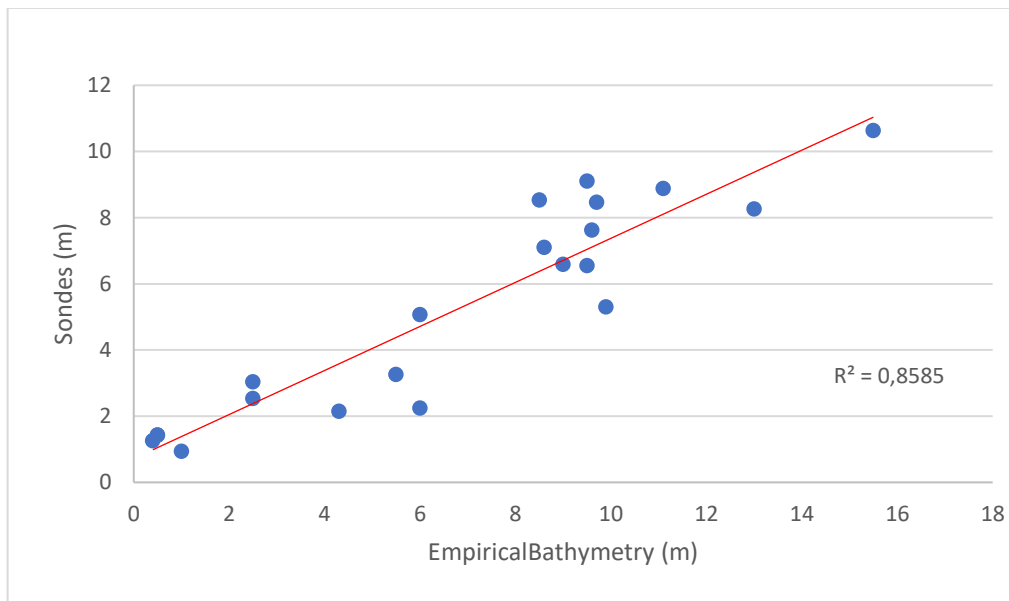


Figure 4.11. La régression entre Empirical Bathymetry entre les sondes de Navionics

##### Carte Marine

Le graphique ci-dessous (figure 4.12) représente la régression linéaire entre les sondes de la carte marine et les valeurs bathymétriques de la bande Empirical Bathymetry, en incluant les paramètres R<sup>2</sup>, RMSE et MAE.

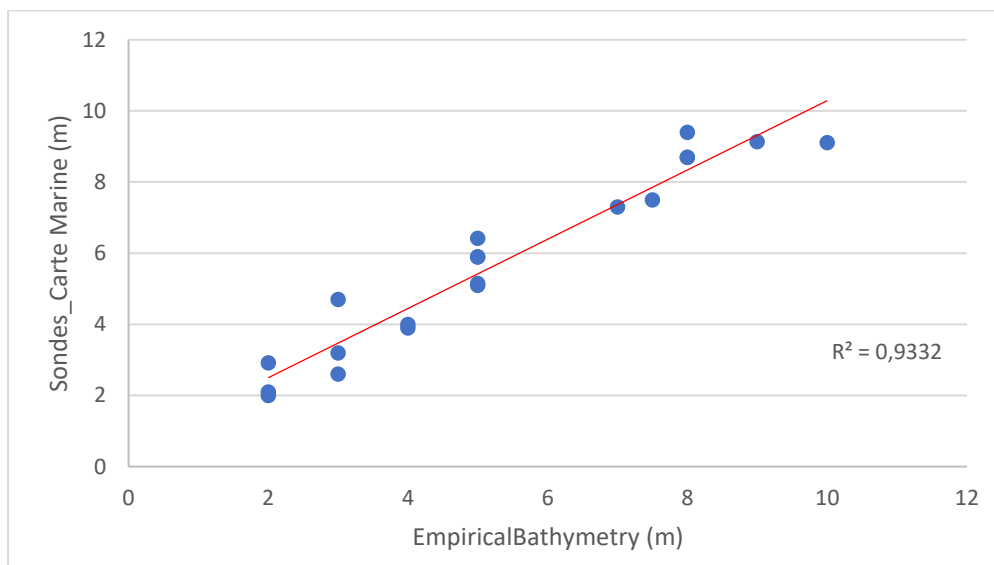


Figure 4.12. La régression linéaire entre Empirical Bathymetry et les sondes de la carte marine

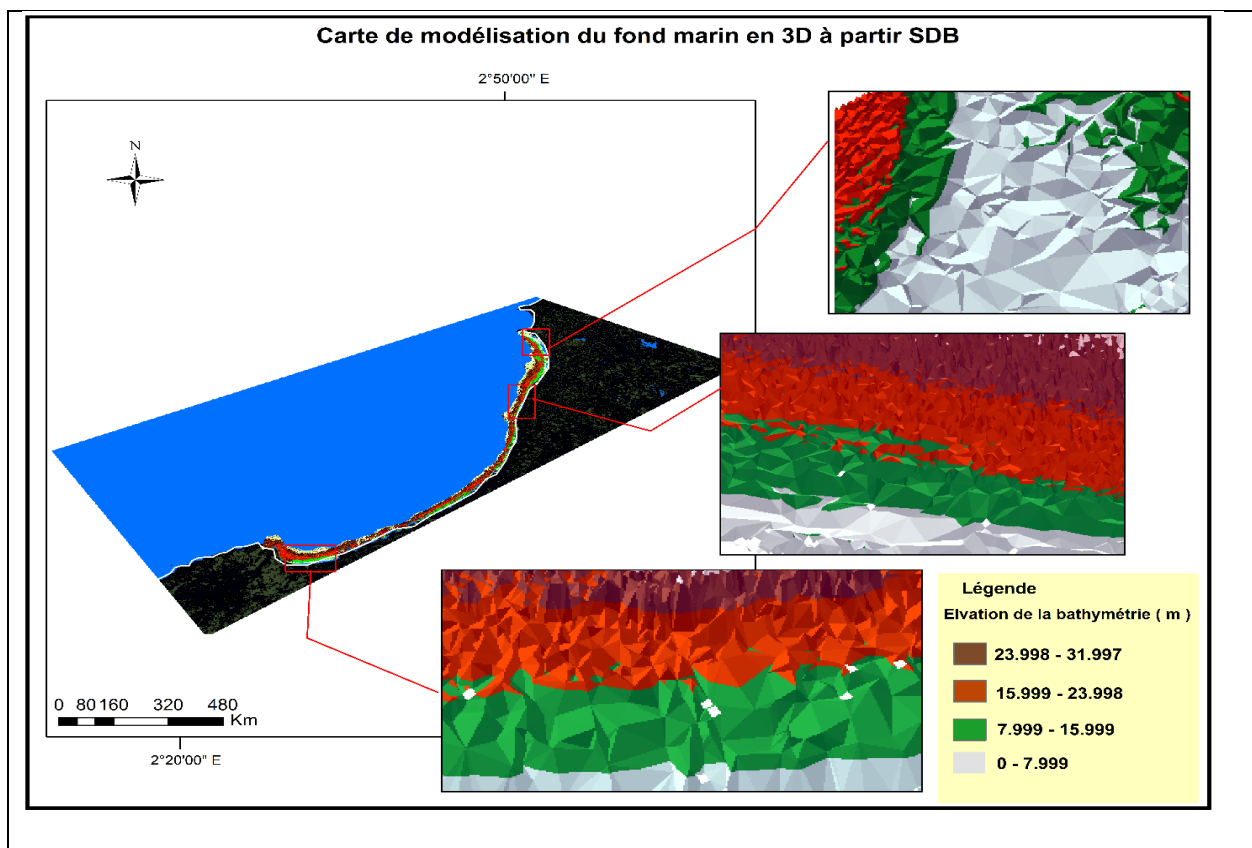
Donc on résume les résultats obtenir par ces deux méthodes dans le tableau suivant :

**Tableau 1.4** : Résumé des résultats

	Méthode de Stumpf et al (2003)	Méthode de Hedley (2006)
Navionics	R2=0,87 RMSE= 6m MAE= 1,34m	R2= 0,85 RMSE = 8,6m MAE= 1,9 m
Carte Marine	R2= 0,96 RMSE = 1,36 m MAE= 0,30 m	R2= 0,93 RMSE = 2,5 m MAE = 0,5 m

**4.1.3. Les Résultats de la modélisation du fond marin**

La figure ci-dessous présente la modélisation du fond marin à partir des données SDB ainsi que la modélisation basée sur les données de la carte marine. Ces deux approches permettent de représenter la bathymétrie de la zone d'étude.



*Figure 4.13. La modélisation du fond marin à partir de SDB*

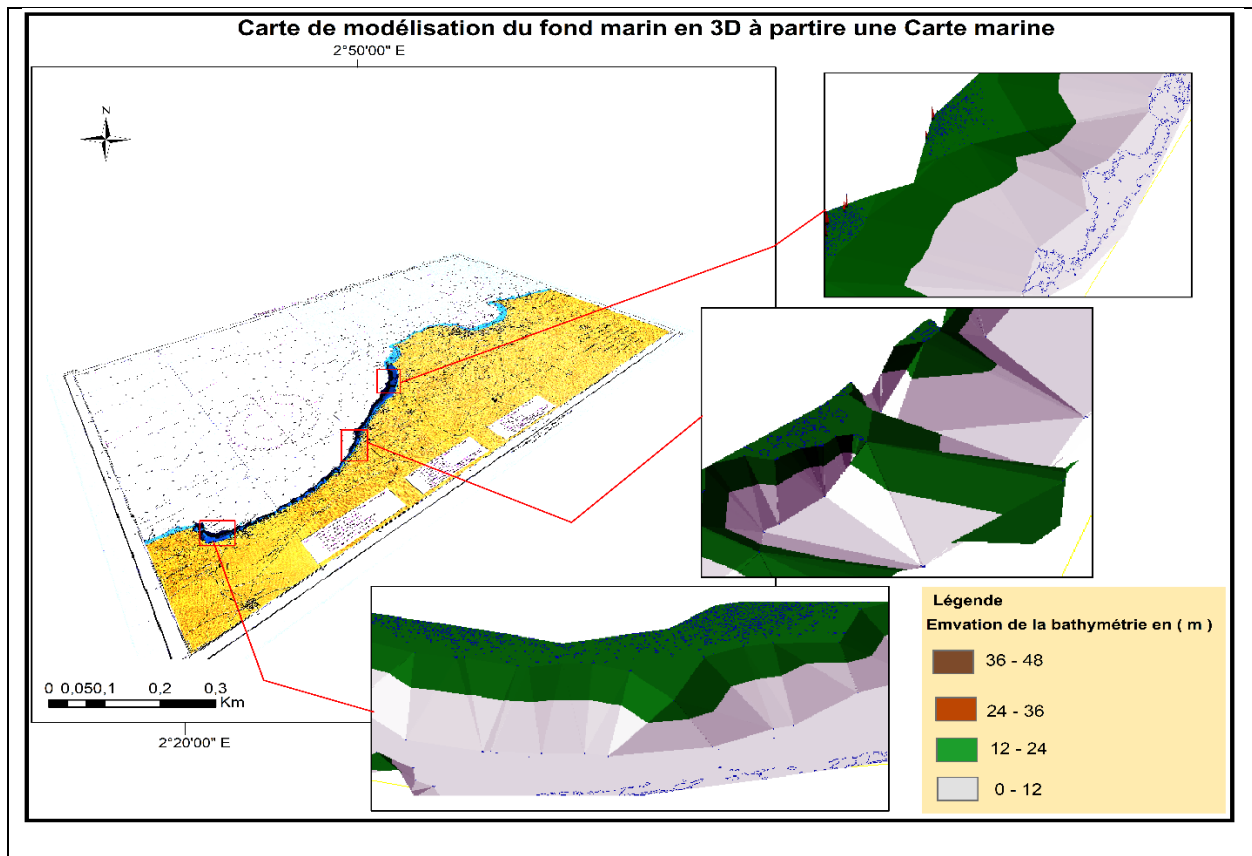


Figure 4.14. La modélisation du fond marin à partir d'une carte marine

## 4.2. Discussion

### 4.2.1. Discussion sur les résultats de SDB

Les résultats de cette étude de validation montrent que les deux méthodes, celle de Stumpf et al. (2003) ainsi que la méthode de Hedley (2006), ont la capacité d'estimer la bathymétrie des eaux côtières dans la baie de Bou-Ismaïl. Les performances des deux méthodes ont été évaluées en utilisant deux sources de données, à savoir Navionics et la carte marine du SHFN nouvelle édition. Les résultats obtenus ont révélé une corrélation satisfaisante entre les estimations de la bathymétrie satellitaire et les valeurs de référence. En ce qui concerne la méthode de Stumpf et al. (2003), l'utilisation de Navionics a montré un coefficient de détermination ( $R^2$ ) de 0,87, ce qui indique une concordance acceptable entre les estimations et les mesures de référence. Le RMSE a été mesuré à 6 mètres, ce qui représente l'erreur moyenne entre les estimations et les mesures de référence, tandis que l'erreur absolue moyenne (MAE) était de 1,34 mètre. L'utilisation de la carte marine a donné des résultats encore meilleurs, avec un  $R^2$  de 0,96, un RMSE de 1,36 mètre et une MAE de 0,30 mètre. Ces résultats mettent en évidence une corrélation plus forte et des erreurs réduites avec la méthode de cartographie basée sur la carte marine.

En ce qui concerne la méthode de Hedley (2006), les résultats obtenus ont également montré une

corrélation satisfaisante avec les données de référence pour les deux sources de données. L'utilisation de Navionics a donné un R2 de 0,85, un RMSE de 8,6 mètres et une MAE de 1,9 mètre, tandis que l'utilisation de la carte marine a montré des résultats légèrement meilleurs, avec un R2 de 0,93, un RMSE de 2,5 mètres et une MAE de 0,5 mètre.

L'interprétation de ces résultats met en évidence l'importance du choix de la méthode de cartographie et de la source de données pour estimer la bathymétrie des eaux côtières. Dans cette étude, la méthode de Stumpf et al. (2003) a montré des performances légèrement supérieures, avec des erreurs moyennes réduites, par rapport à la méthode de Hedley (2006). Cependant, il convient de noter que les performances des méthodes peuvent varier en fonction des caractéristiques spécifiques de la zone d'étude.

Cette étude met en évidence l'importance du choix de la méthode et de la source de données dans la cartographie de la bathymétrie des eaux côtières. Les résultats obtenus dans la baie de Bou-Ismaïl démontrent la précision et la fiabilité des méthodes de Stumpf et al. (2003) et de Hedley (2006) dans cette zone spécifique. Ces résultats fournissent des bases solides pour l'amélioration des techniques de cartographie de la bathymétrie et ouvrent des perspectives prometteuses pour la surveillance et la gestion des zones côtières.

En outre, nos résultats sont cohérents avec les études précédentes menées par **Liang Cheng et al., (2022)** dans les îles de Ganquan et d'Oahui de l'océan Pacifique, où la méthode de Stumpf et al. (2003) a également démontré de meilleurs résultats pour l'extraction de la bathymétrie. De plus, l'article de **Mahammad Ashpaq et al., (2022)** portant sur les sites de Vengurla et Mormugao en Inde a également corroboré notre constatation quant à l'efficacité de la méthode de Stumpf et al. (2003).

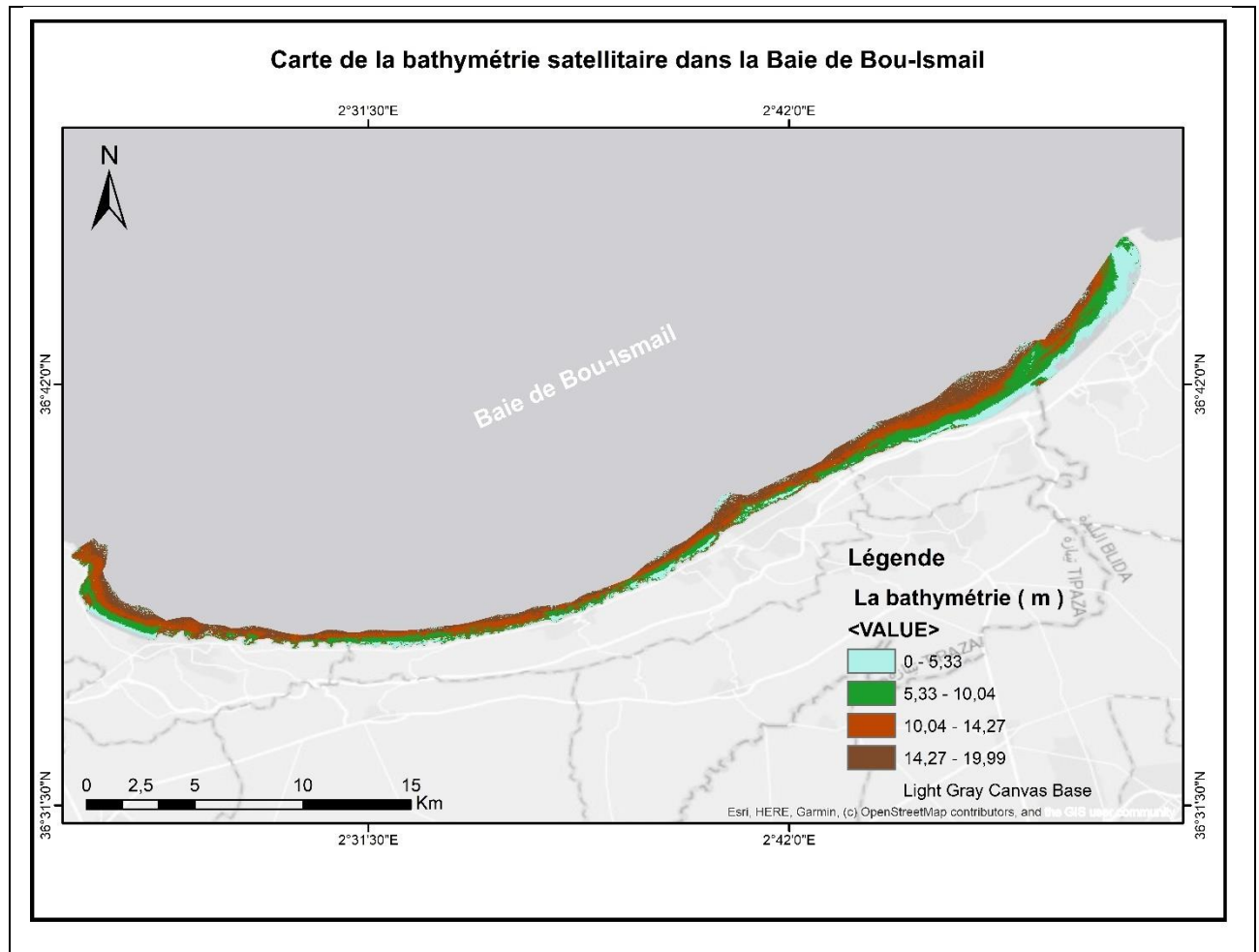
Ces similitudes entre nos résultats et les études précédentes renforcent la validité et la fiabilité de la méthode de Stumpf et al. (2003) dans différentes zones géographiques. Cela confirme également l'importance de la méthode choisie pour l'extraction précise de la bathymétrie, ce qui contribue à une meilleure compréhension des fonds marins et à la gestion efficace des zones côtières.

#### 4.2.2. Discussion sur la modélisation du fond marin

La comparaison entre la modélisation du fond marin à partir des données SDB et celle à partir des données de la carte marine révèle une différence significative en termes de niveau de détail. Le modèle basé sur les données SDB offre une représentation plus précise et détaillée de la bathymétrie de la zone étudiée par rapport à la carte marine. Cette observation met en évidence l'importance de notre travail dans la fourniture d'un modèle plus détaillé grâce à la richesse des données bathymétriques utilisées.

Nous concluons ce chapitre en présentant fièrement le fruit exceptionnel de notre travail : la carte

de variation de la bathymétrie dans la baie de Bou-Ismaïl, (Figure 1.15), qui a été générée à partir des résultats de notre modèle. Cette carte met en évidence les différentes profondeurs présentes dans la baie, permettant ainsi de mieux comprendre la topographie sous-marine de la zone étudiée.



*Figure 4.15. La carte SDB de la Baie de Bou-Ismaïl*

En outre, la figure 4.16 présente une carte marine saisissante qui intègre les données de bathymétrie satellitaire. Grâce à l'application de notre modèle, cette carte se distingue par son abondance de données bathymétriques d'une qualité inégalée, surpassant de loin la carte marine traditionnelle qui ne contient qu'un aperçu limité de la bathymétrie dans les eaux côtières peu profondes. Ces résultats démontrent également la possibilité de mettre à jour les données bathymétriques de la carte marine en utilisant notre modèle novateur.

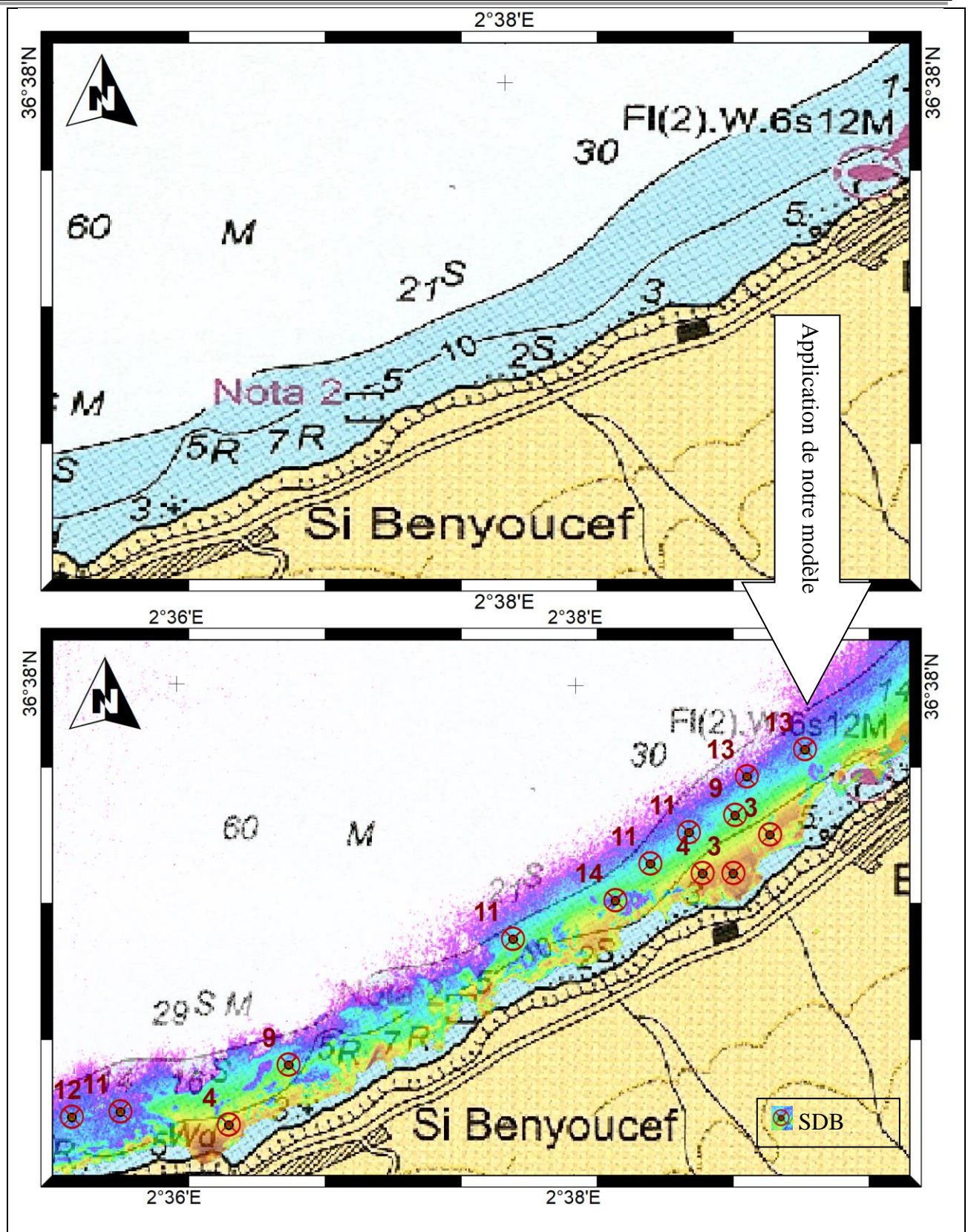


Figure 4.16. Extrait de la carte marine du SHFN (panneau supérieur). Superposition du modèle SDB sur la carte marine et densification par des sondes des parties mal loties de la côte (panneau inférieur).

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

En conclusion, cette étude sur la bathymétrie dans les eaux côtières peu profondes de la Baie de Bou-Ismaïl a démontré la pertinence de la modélisation du fond marin à partir de données satellitaires. Les résultats ont mis en évidence la qualité et la fiabilité d'une part des données Sentinel-2 et d'une autre part, la précision des méthodes utilisées, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour la cartographie et la surveillance des fonds marins, de faible profondeur, le long de la côte algérienne.

Les avancées dans la dérivation de la bathymétrie satellitaire offrent une complémentarité prometteuse aux méthodes traditionnelles coûteuses en temps et en moyens et limitées en termes de couverture spatiale. Cette étude encourage donc la poursuite des recherches dans ce domaine afin d'approfondir notre compréhension des fonds marins côtiers et de faciliter la gestion durable de ses écosystèmes fragiles.

Les méthodes de Stumpf et al. (2003) et Hedley (2006), expérimentées pour la première fois dans une zone côtière algérienne, ont montré leur efficacité dans l'estimation de la bathymétrie des eaux côtières de la baie de Bou-Ismaïl. Les résultats obtenus soulignent l'importance du choix de la méthode. Le choix des données Sentinel-2 est sans doute judicieux car elles sont les plus appropriées, vu leurs caractéristiques inégalées à l'heure actuelle, dans la catégorie des images à accès libre. Cette étude contribue à l'amélioration de la cartographie de la bathymétrie des eaux côtières et offre des perspectives prometteuses pour l'océanographie spatiale dans le domaine de l'ingénierie de l'environnement marin et côtier.

Après notre travail deux questions importantes s'imposent :

- Quel est l'apport de la bathymétrie satellitaire dans la cartographie de la distribution des herbiers marins ? Quelles sont les caractéristiques ou les indicateurs spécifiques que l'on peut identifier pour détecter la présence et la densité des herbiers marins à partir de ces données ?
- Quel est l'apport de la bathymétrie satellitaire dans la cartographie des fonds marins tels que la présence de sable, de rochers ou de récifs coralliens ? Quelles sont les techniques ou les indices utilisés pour extraire ces informations à partir des données de bathymétrie satellitaire ?

En conclusion, cette recherche représente une étape importante dans l'utilisation de la bathymétrie satellitaire pour la cartographie des fonds marins le long de la côte algérienne. Toutefois, elle appelle à des efforts continus et à une collaboration soutenue afin de développer et d'appliquer des solutions novatrices pour la préservation de nos écosystèmes marins et la gestion durable de nos zones côtières. L'accès à des données in situ permettra d'enrichir et d'améliorer la précision des modèles afin i) de faire valoir cette recherche auprès de nos pairs et ii) mettre en application ce travail dans le secteur socioéconomique. En travaillant ensemble, nous pouvons tracer la voie vers

## **Conclusion générale**

un avenir où la beauté et la richesse de nos fonds marins seront préservées pour les générations futures.

## Bibliographie

- Ashphaq, M., Srivastava, P., & Mitra, D. (2022).** Analysis of univariate linear, robust-linear, and non-linear machine learning algorithms for satellite-derived bathymetry in complex coastal terrain. *Regional Studies in Marine Science*.
- LIANG, C., ZHIXIN, D., SENSEN, C., et al. (January 2022).** Satellite-derived bathymetry from Landsat-8 and Sentinel-2A images: Assessment of atmospheric correction and depth derivation models for shallow waters. *Optics Express*.
- Abadie, A., & Christophe, V. (2018).** Le sondeur multifaisceaux en hydrographie : utilisations actuelles et futures.
- ALsid Chikh . (2009).** *Baie de Bou-Isamil et d'El Djamel : Paramètres océanographiques , gestion littorale et imagerie bathymétrique.* Mémoire d'ingénieur. ENSSMAL. Alger
- Bajjouk, T., Pascal, M., Ropert, M., et al., . . . Christophe, D. (January 2019).** Detection of changes in shallow coral reefs status: Towards a spatial approach using hyperspectral and multispectral data. *Ecological Indicators*.
- Benjamin, J., & Emil V, S. (2021).** Understanding the Impact of Bathymetric Changes in the German Bight on Coastal Hydrodynamics: One Step Toward Realistic Morphodynamic Modeling. *Coastal Ocean Processes*.
- Boumaza, S., Sengouga, A., Misraoui, A., & Pergent, G. (2022).** Patterns of *Posidonia oceanica* (L.) Delile tannin cells and leaf characteristics according to environmental conditions. *Mediterranean Marine Science*.
- Chardon, V., Schmitt, L., Piégay, H., et al. (2018).** Geomorphic effects of gravel augmentation on the Old Rhine River downstream from the Kembs dam (France, Germany). *Ninth International Conference*.
- David, P., Héctor, R.-B., Miguel, Á.-R., et al. (2019).** Bathymetry and seabed classification in marine protected areas using remote sensing.
- Deepak R, M., Sunil, N., Donald, R., & Merlin, L. (2005).** High-resolution ocean color remote sensing of benthic habitats: a case study at the Roatan island, Honduras. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing ( Volume: 43)*.
- Eleanor M, C., & Sönke, J. (2021).** The sensory impacts of climate change: bathymetric shifts and visually mediated interactions in aquatic species. *BIOLOGICAL SCIENCES* .
- Bersi M ; 2018 ; principes et Applications en Géosciences | Première Partie.**
- Grid, M. (2009).** Understanding maps and charts . *the Rosen Publishing*.
- Haddouch. (2003).** *Etude de la dynamique sédimentaire devant Bou-Isamil.* Mémoire de Magister, Géologie marine. Alger, USTHB

- Hedley, J., Harborne, A., & Mumby, P.** (2005). Technical note: Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*.
- Hillier, J., & Watts, A.** (2007). Global distribution of seamounts from ship-track bathymetry data. *Geophysical Research Letters*.
- Isabel, C., & Stumpf, R.** (2021). On the use of Sentinel-2 satellites and lidar surveys for the change detection of shallow bathymetry: The case study of North Carolina inlets. *Coastal Engineering*.
- Kaper, H., & Feringa, W.** (2017). Living maps: a brief history. *Cartographica*.
- Kay, S., Hedley, J., & Lavender.** (2009). Sun glint correction of High and Low spatial resolution images of aquatic seascapes. *Remote Sens*.
- Limber, P., Adams, P., & Murray, A.** (2017). Modeling large-scale shoreline change caused by complex bathymetry in low-angle wave climates. *Marine Geology*.
- Murray, R., & Gallego, A.** (October 2017). Data review and the development of realistic tidal and wave energy scenarios for numerical modelling of Orkney Islands waters, Scotland. *Ocean & Coastal Management*.
- Stumpf, R., & Holderied, K.** (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable. *Limnol. Oceanogr*.
- Frigerio, J.** (2015). Propriétés optiques de l'eau. CNR Editions
- Menasri, H. Aid, T.** (2022). Etude de la vulnérabilité de la région de Bou-Ismaïl : Recours à la modélisation pour l'étude de la submersion marine : Mémoire d'ingénieur : gestion et protection du littoral. Alger, ENSSMAL
- Zerrouk, C.** (2016). *Cartographie de la limite supérieure de l'herbier à Posidonie Oceanica dans la région de Tipaza*. Alger, ENSSMAL: Thèse de Magister.

<https://oceanservice.noaa.gov/facts/bathymetry.html>

GEBCO - The General Bathymetric Chart of the Oceans

Documentation-Historique-de-la-plongee-Version-legere.pdf, s. d., p. 16)

[GEBCO | IHO](#)

GEBCO\_2022 Grid

Navionics.com

[https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/)

[Ocean Surface Topography Mission/Jason 2 Begins Mapping Oceans \(nasa.gov\)](#)

ESA - Eduspace FR - Accueil - Qu'est-ce que la télédétection

Application de la télédétection : manuel d'initiation (fao.org)

ESA - Eduspace FR - Accueil - Perturbations atmosphériques

ESA - Eduspace FR - Accueil - Signatures spectrales - printer version

Sentinel-2 - Missions - (esa.int)

(User Guides - Sentinel-2 MSI - Sentinel Online - Sentinel Online (esa.int))

Www.copernicus.eu/fr

www.esa.int

Copernicus - Portail des données marines (ifremer.fr).

Connaissance du milieu marin 2020 - Publications Office of the EU (europa.eu)).

# **Annexes**

Dans le cadre de l'arrêté ministériel 1275, qui encourage le développement de startups à partir de projets de fin d'études, notre projet a été transformé en un bureau d'études spécialisé : **Belau Carto Consulting**. Nous nous concentrons sur les études de topographie sous-marine côtière, offrant des services de cartographie et de modélisation du fond marin.

Belau Carto Consulting se positionne comme un acteur clé dans le domaine de la cartographie marine, en mettant en œuvre des méthodes novatrices et précises, basées sur le traitement d'images satellitaires avancées. Notre objectif est d'apporter des solutions techniques fiables et adaptées aux besoins des industries maritimes. Nous visons à soutenir les décisions éclairées et durables en matière de gestion des ressources marines et de développement des infrastructures côtières.

### **1. La valeur Ajoutée de notre bureau d'étude**

La valeur ajoutée de BlueCarto Consulting réside dans notre capacité à compléter les méthodes traditionnelles de collecte de données bathymétriques en proposant des solutions novatrices basées sur l'utilisation de technologies satellitaires avancées. Les méthodes classiques, telles que l'utilisation de sondeurs mono et multi-faisceaux, sont souvent coûteuses, chronophages et peuvent présenter des risques pour l'environnement marin et le personnel impliqué.

En utilisant des images satellitaires de haute résolution et des techniques de traitement d'images avancées, nous sommes en mesure de générer des données bathymétriques précises, couvrant de vastes zones côtières de manière efficace et économique. Cette approche nous permet d'obtenir une connaissance détaillée de la structure du fond marin, de la topographie sous-marine et de la distribution des ressources marines.

### **2. L'objectif de notre bureau d'étude**

Dans un **premier temps**, notre bureau d'étude propose les services suivants :

- Des études approfondies sur la topographie sous-marine, permettant de comprendre la structure et les caractéristiques des fonds marins.
- La modélisation du fond marin en 2D et 3D, offrant une représentation visuelle précise et détaillée de la topographie sous-marine.
- La cartographie spécialisée, comprenant la création de cartes bathymétriques qui fournissent des informations essentielles sur la profondeur des océans, mers et lacs.
- La fourniture de bases de données complètes sur la bathymétrie, permettant aux clients d'accéder à des informations détaillées pour leurs projets.

Dans un **deuxième temps**, notre bureau d'étude a la capacité de développer des études complémentaires liées à la bathymétrie. Cela inclut des études de **suivi, d'évaluation des risques et de vulnérabilité des zones côtières** face aux changements de la bathymétrie. De plus, nous sommes en mesure de mener **des études sur le dragage de ports**, qui consistent à évaluer les besoins en dragage et à proposer des solutions pour optimiser les voies navigables.

### 3. Le Marché

Le marché de notre bureau d'étude est prometteur et offre de nombreuses opportunités. En tant qu'entreprise spécialisée dans la cartographie et la modélisation du fond marin, nous visons à répondre à une demande croissante **dans différents secteurs (Nous concentrons nos efforts sur le marché régional)**.

- Parmi nos clients potentiels, deux acteurs majeurs attirent notre attention : tout d'abord, **SONATRACH**, la principale compagnie pétrolière et gazière en Algérie. Avec sa nouvelle politique axée sur l'extraction et l'exploitation des ressources offshore, SONATRACH a un besoin crucial d'études approfondies sur la topographie sous-marine. En tant que bureau d'étude spécialisé dans la cartographie et la modélisation du fond marin, nous sommes parfaitement capables de répondre à cette demande et fournir les données et les analyses nécessaires à SONATRACH pour optimiser ses opérations
- Ensuite, **les forces Navales** représentent un autre client potentiel important pour nous. Leur intérêt se concentre sur la cartographie du fond marin et la collecte de données bathymétriques dans des zones côtières inaccessibles. Grâce à notre expertise et à notre utilisation **de technologies avancées** telles que les drones, nous sommes en mesure de réaliser ces cartographies avec précision, fournissant ainsi aux forces Navales les informations vitales dont elles ont besoin pour leurs opérations maritimes.
- Et il y'a aussi des autres clients comme : l'entreprise MEDITERRAM, Ministère de l'environnement...

### 4. Estimation Techno-Economique

#### 4.1.Le cout de projet

On résume le cout de projet dans le tableau suivant :

L'Objet	Description	Unité (DA/an)
Local ( Au niveau de la wilaya d'Alger)	F4	70000DA/mois = 840.000 DA
1 Ordinateurs simples	Pour régler les affaires de notre bureau d'étude	70.000 DA
2 ingénieurs d'Etat	2 ingénieurs dans le domaine de la télédétection marine et génie géomatique . La priorité est pour les ingénieurs de l'ENSSMAL	50.000DA/mois (salaire <b>Net</b> pour chaque ingénieure) Totale : 1.584.000 DA/an <b>Brut</b>
Les accessoires bureautiques (chasses + ... )	Pour les 3 bureaux	150.000DA
Infrastructures de communication	Des moyens de communication efficaces tels que des lignes téléphoniques, internet et une Plateforme virtuelle	Ligne téléphoniques : 8400 DA /an. Plateforme virtuelle 200.000 DA
Imprimante multifonction HP DesignJet T2600 PostScript de 36 pouces est un traceur et scanner A0	Parmi les produits de notre bureau d'étude c'est fournir des cartes ... C'est pour ça on a besoin d'imprimante bien avancé	1.200.000 DA
Drone		1.500.000 DA
Unités de stockage + Licence de logiciel ArcGis		3.000.000 DA

**Le cout total : 8.694.400DA**

#### 4.2 Estimation du Coûts du produit

Les études de notre bureau d'étude reposent sur deux types de sources différentes : 1) les images satellitaires Sentinel 2 et 2) les images collectées grâce à l'utilisation des drones. Le choix entre l'une ou l'autre source dans un projet donné dépend de la demande de notre client et des objectifs du projet.

##### 4.2.1. L'Utilisation des images satellitaires

Pour une étude topographique sous-marine (création des bases de données sur la bathymétrie et

des cartes cartographiques de la bathymétrie, la modélisation en 2D ou 3D et un rapport) :

Notre objectif pour la première année après l'installation de notre bureau d'étude sur le marché est de réaliser des études avec l'utilisation des images satellitaires sur une superficie de **300 km<sup>2</sup>**. Le coût estimé de ce projet est de : **1.894.000DA** et nous le vendons à notre client au prix suivant : **2.500.000DA**

Dépense	Unité
Electricité	90.000DA/an
Réseau d'internet	12.000DA/an
Images satellitaires	1.000.000DA
1 ingénieur	792.000DA/an
Total	1.894.000DA

Revenu de ce projet c'est : **2.500.000DA – 1.894.000DA = 606.000DA**

#### 4.2.2 L'Utilisation de Drone

Pour une étude topographique sous-marine (création des bases de données sur la bathymétrie et des cartes cartographiques de la bathymétrie, la modélisation en 2D ou 3D et un rapport) :

Dépenses	Unité
Electricité	90.000DA/an
Réseau d'internet	12.000DA/an
Prix pour sortie sur terrain (3 sorties par semaine)	2000DA/jour = 12.000DA/mois = 144.000DA
Ingénieur	792.000DA/an
Total	1.038.000DA

Revenu de ce projet c'est : **1.800.000DA – 1.038.000DA = 762000DA**

Donc, compte tenu de nos capacités humaines et matérielles, nous sommes en mesure de réaliser ces deux projets au cours **de la première année**. Ainsi, le revenu total de notre bureau d'étude pour la première année c'est **1.368.000DA**

#### 4.3. Production Envisagé

	Dépenses	Admission (recette)	REVENU
1 ère année	2.932.000 DA	4.300.000 DA	1.368.000 DA
2 ème année	3.500.000 DA	5.000.000 DA	1.500.000 DA

### 5. Les besoins fondamentaux

- **Incubation ou financement** : Nous cherchons à bénéficier d'un soutien financier ou d'une

incubation pour aider à l'installation de notre bureau d'étude.

- **Local**
- **Autorisation d'utiliser le drone**
- Nous prévoyons de participer à **des stages de courte durée à l'étranger** pour améliorer notre compétence en topographie sous-marine et assurer une gestion efficace de notre bureau d'étude.

Avec notre équipe d'experts qualifiés et notre engagement envers l'excellence, nous sommes confiants dans notre capacité à apporter des contributions significatives dans le domaine de la cartographie du fond marin en Algérie. Nous sommes déterminés à poursuivre nos recherches, à améliorer continuellement nos méthodes et à élargir notre champ d'application.

En conclusion, cette annexe marque non seulement la fin d'un chapitre de recherche, mais aussi le début d'une entreprise ambitieuse. BlueCarto Consulting est prêt à relever les défis, à explorer de nouvelles possibilités et à contribuer au développement durable des zones côtières algériennes. Nous résumons toutes ces informations dans le BMC (Business Model Canvas) suivant :

<p><b>Partenaires clés</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Financement</b> :</li> <li>- ANADE</li> <li>- ASF</li> <li>- Les banques islamiques</li> <li>• <b>Agences gouvernementales</b> :</li> <li>-LEM</li> <li>• <b>Entreprises internationales</b> :</li> <li>Copernicus</li> </ul>	<p><b>Activités Principales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Création de cartes bathymétriques précises</li> <li>- Études approfondies du fond marin</li> <li>Etudes prospectives sur le changement de la bathymétrie.</li> </ul>	<p><b>Valeur Ajutée</b></p> <p>Notre valeur ajoutée réside dans notre capacité à développer un modèle ou une technique innovante permettant l'extraction précise des données bathymétriques à partir du traitement d'images satellitaires sur ordinateur et cartographie du fond marin</p>	<p><b>Relation Client</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Formations gratuites sur les bases de cartographie et de télédétection marine : Nous offrons des sessions de formation gratuites à nos clients fidèles Faire des contrats</li> <li>- Contrats de collaboration : Nous établissons des contrats de collaboration avec nos clients, leur garantissant un accès privilégié à nos services et à notre expertise.</li> <li>- Service après-vente et garantie de qualité</li> </ul>	<p><b>Clients</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- SONATRACH</li> <li>- Les forces Navales</li> <li>- Ministère de l'environnement</li> <li>- Entreprises maritimes : MEDITERAM</li> </ul>
<p><b>Coûts</b></p> <p>D'après l'estimation techno-économique (page 56) le cout total de projet c'est :</p> <p style="text-align: right;"><b>8.694.400DA</b></p>	<p><b>Canaux de distribution</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Plateforme en ligne</li> <li>- Services sur mesure pour les clients</li> </ul>		<p><b>Revenu</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dans la 1 ère année : 1.368.000 DA</li> <li>- Dans la 2 ème année : 1.500.000 DA</li> </ul>	