

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



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
D'INGENIEUR EN SCIENCES DE LA MER

OPTION : Environnement

Thème :

**Conception des algorithmes empiriques  
pour l'estimation de la chlorophylle-*a* et la  
turbidité dans la baie de Bou Ismail**

Présenté par :

**M<sup>lle</sup> Roufeida BENHARKOU**

Soutenu le 02/10/2017 devant le jury suivant :

<b>M. Housseyn Otmani</b>	<b>MAB (ENSSMAL)</b>	<b>Président du jury</b>
<b>Mme Fouzia Houma-Bachari</b>	<b>Professeur (ENSSMAL)</b>	<b>Promotrice</b>
<b>M<sup>lle</sup> Româissa Harid</b>	<b>Doctorante (ENSSMAL)</b>	<b>Co-promotrice</b>
<b>M. Malik Aït Kaci</b>	<b>Doctorant (ENSSMAL)</b>	<b>Examineur</b>
<b>M. Amine Kabrane</b>	<b>MAB (ENSSMAL)</b>	<b>Examineur</b>

Promotion : 2017

## **Remerciement**

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement le bon Dieu grâce à qui j'ai eu la chance et le pouvoir de réaliser ce modeste travail.

Mes respects et profonds remerciements à ma promotrice Pr. Fouzia HOUMA-BACHARI d'avoir accepté de diriger ce travail malgré ses multiples occupations. Ainsi pour son accompagnement, la confiance qu'elle m'a accordée dès mes premiers pas.

J'adresse mes sincères remerciements à ma co-promotrice Mlle Romaïssa HARID qui a assuré la bonne direction de ce travail avec ses conseils et ses critiques judicieuses qui auront été indispensables à la bonne réalisation de ce mémoire, qu'elle trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Je tiens à remercier les membres du jury ; vous me faites un grand honneur et un grand plaisir en acceptant de participer à ce jury.

Je tiens à remercier M. OTMANI H. de m'avoir fait le grand honneur d'accepter la présidence du jury, qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect. Un grand merci également à M. KABRANE A. et M. AIT KACI M. qui ont bien voulu faire partie du jury et d'apporter leurs vives contributions à l'enrichissement de ce travail par leurs commentaires constructifs, leur bon sens et leur expérience.

Je tiens aussi à remercier tous mes enseignants de mon cursus d'étude, qui m'ont bien formé, je leur exprime ici ma plus sincère gratitude.

Mille mercis à mes chers parents qui font mon bonheur au quotidien, rien n'était possible sans leur aide, leur soutien et leur encouragement.

Je tiens à remercier tout particulièrement messieurs : Malik AIT KACI, Mohamed AROUA, Mohamed ZERROUKI pour le temps qu'ils m'ont consacré, pour leurs efforts et leur aide, qu'ils sachent que j'en serai toujours reconnaissante, grâce à eux ce travail a pu s'accomplir comme je le souhaitais.

J'associe à mes remerciements l'ensemble des ingénieurs et des techniciens du laboratoire de l'ENSSMAL ainsi que les bibliothécaires de l'école pour leur dévouement et leur collaboration.

Au final, je réserve un remerciement chaleureux à mes collègues et mes amis(es), à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire et avec qui j'ai partagé mes meilleurs souvenirs, du fond du cœur : Merci

***Roufeida BENHARKOU***

## Dédicace

*Je dédie ce travail :*

*A mes très chers parents, qui n'ont jamais cessé de m'encourager, aider et soutenir pendant mes années d'étude, qu'Allah les protège*

*A mon neveu : Mohamed Redha*

*A mon cher frère : Mohamed dhyae Eddine*

*Et mes chères sœurs : Nor el houda et Ibtihel*

*A mon cousin : Mohamed Amine*

*Vous étiez toujours une source de courage et d'espoir pour moi*

*A mes amis(es) : Charaf Eddine, Imad, Hajder, Sihem, Chahinez, Fahima.*

*A tous mes camarades de la promotion 2016-2017,*

*Ils sont bien trop nombreux pour être cités mais qu'ils sachent que je pense à eux et je suis très heureuse d'avoir pu croiser leurs chemins*

*Roufeida Benharkou*

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Onde électromagnétique monochromatique (C : vitesse de la lumière et $\lambda$ : longueur d'onde) .....	5
<b>Figure 2.</b> Les domaines du spectre électromagnétique .....	6
<b>Figure 3.</b> Les longueurs d'onde correspondant au domaine du visible.....	6
<b>Figure 4.</b> Géométrie utilisée pour définir la luminance (radiance) .....	9
<b>Figure 5.</b> Géométrie utilisée pour définir la luminance ascendante et la luminance émergente .....	10
<b>Figure 6.</b> Représentation d'un flux de lumière incident traversant un volume d'eau de mer et définissant les coefficients d'absorption et de diffusion selon Morel (2008). .....	12
<b>Figure 7.</b> Facteurs influençant la lumière émergente de la surface de l'eau .....	13
<b>Figure 8.</b> Variation du coefficient d'absorption des composants optiquement significatifs en fonction de la longueur d'onde selon Gernez (2009).....	15
<b>Figure 9.</b> Schéma explicatif des eaux du Cas 1 et Cas 2 selon Antoine (2000) .....	16
<b>Figure 10.</b> Le satellite Landsat-8.....	21
<b>Figure 11.</b> Satellite sentinel-2.....	22
<b>Figure 12.</b> La circulation à moyenne échelle dans le bassin occidental de la Méditerranée selon Millot (1989).....	24
<b>Figure 13.</b> Situation géographique de la baie de Bou Ismail.....	26
<b>Figure 14.</b> Réseau hydrographique de la baie de Bou Ismail .....	27
<b>Figure 15.</b> Carte sédimentologique de la baie de Bou-Ismaïl (Bachouche, 2017).....	28
<b>Figure 16.</b> Températures mensuelles moyennes entre 2010 et 2016 de Bou Ismail .....	29
<b>Figure 17.</b> Précipitations mensuelles moyennes entre 2010 et 2016 de Bou Ismail .....	29
<b>Figure 18.</b> Les principales sources de pollution dans la baie de Bou Ismail.....	31
<b>Figure 19.</b> Positionnement des stations de prélèvement.....	40
<b>Figure 20.</b> La centrifugeuse SIGMA 2-6.....	43
<b>Figure 21.</b> Le spectrophotomètre JASCO V-730 .....	44

<b>Figure 22.</b> Un turbidimètre optique .....	47
<b>Figure 23.</b> Concentration de la Chl-a estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Janvier 2017.....	52
<b>Figure 24.</b> Estimation de la concentration de la Chl-a par l'algorithme OC2 Landsat-8 de la NASA (O'Reilly, et al., 2000) en Janvier 2017 .....	52
<b>Figure 25.</b> Concentration de la Chl-a estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Février 2017.....	52
<b>Figure 26.</b> Estimation de la concentration de la Chl-a par l'algorithme OC2 Landsat-8 de la NASA (O'Reilly, et al., 2000) en Février 2017 .....	52
<b>Figure 27.</b> Concentration de la Chl-a estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Mars 2017 .....	53
<b>Figure 28.</b> Estimation de la concentration de la Chl-a par l'algorithme OC2 Landsat-8 de la NASA (O'Reilly, et al., 2000) en Mars 2017 .....	53
<b>Figure 29.</b> Concentration de la Chl-a estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Avril 2017.....	53
<b>Figure 30.</b> Estimation de la concentration de la Chl-a par l'algorithme OC2 Landsat-8 de la NASA (O'Reilly, et al., 2000) en Avril 2017 .....	53
<b>Figure 31.</b> Concentration de la Chl-a estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Janvier 2017.....	54
<b>Figure 32.</b> Estimation de la concentration de la Chl-a par l'algorithme OC4E Sentinel-2 de la NASA (O'Reilly, et al., 2000) en Janvier 2017 .....	54
<b>Figure 33.</b> Concentration de la Chl-a estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Février 2017.....	54
<b>Figure 34.</b> Estimation de la concentration de la Chl-a par l'algorithme OC4E Sentinel-2 de la NASA (O'Reilly, et al., 2000) en Février 2017 .....	54
<b>Figure 35.</b> Concentration de la Chl-a estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Mars 2017 .....	55
<b>Figure 36.</b> Estimation de la concentration de la Chl-a par l'algorithme OC4E Sentinel-2 de la NASA (O'Reilly, et al., 2000) en Mars 2017 .....	55

<b>Figure 37.</b> Concentration de la Chl-a estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Avril 2017.....	55
<b>Figure 38.</b> Estimation de la concentration de la Chl-a par l'algorithme OC4E Sentinel-2 de la NASA (O'Reilly, et al., 2000) en Avril 2017 .....	55
<b>Figure 39.</b> Turbidité estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Janvier 2017.....	57
<b>Figure 40.</b> Turbidité estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Février 2017.....	57
<b>Figure 41.</b> Turbidité estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Mars 2017.....	57
<b>Figure 42.</b> Turbidité estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Avril 2017.....	57
<b>Figure 43.</b> Correspondance Chl-a, Turbidité et Réflectance (PIR) d'une image du capteur Sentinel-2 en Janvier 2017 .....	62
<b>Figure 44.</b> Correspondance Chl-a, Turbidité et Réflectance (PIR) d'une image du capteur Sentinel-2 en Mars 2017 .....	63
<b>Figure 45.</b> Débit et Flux de la matière en suspension dans l'embouchure de Mazafran en Février et Mars 2017 .....	64
<b>Figure 46.</b> L'interface du site de l'USGS.....	VII
<b>Figure 47.</b> Localisation et délimitation de la zone d'étude sur l'interface USGS .....	VIII
<b>Figure 48.</b> Détermination de la date .....	VIII
<b>Figure 49.</b> Choix du capteur et le niveau de traitement de données.....	IX
<b>Figure 50.</b> Résultats de la recherche des images sur un intervalle de temps.....	IX
<b>Figure 51.</b> Calcul des réflectances sur le logiciel ENVI 5.1 .....	X
<b>Figure 52.</b> Affichage de l'image avec les réflectances calculés sur le logiciel SeaDAS .....	X
<b>Figure 53.</b> L'interface du site de Copernicus .....	XI
<b>Figure 54.</b> Localisation et délimitation de la zone d'étude sur l'interface Copernicus .....	XI
<b>Figure 55.</b> Filtre de Copernicus pour le téléchargement de données .....	XII

<b>Figure 56.</b> Affichage de l'image Sentinel-2 sur SNAP.....	XII
<b>Figure 57.</b> Insertion des coordonnées de stations.....	XIII
<b>Figure 58.</b> Délimitation de la zone d'étude avec un polygone.....	XIII
<b>Figure 59.</b> Extraction des données du polygone.....	XIV
<b>Figure 60.</b> Turbidité estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Janvier 2017.....	X
<b>Figure 61.</b> Turbidité estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Février 2017.....	X
<b>Figure 62.</b> Turbidité estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Mars 2017.....	X
<b>Figure 63.</b> Turbidité estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Avril 2017.....	X

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.</b> Les constantes et les longueurs d'ondes utilisées pour l'estimation de la chlorophylle. OC5 (Gohin, et al., 2002) et OCx (O'Reilly, et al., 1998) (O'Reilly, et al., 2000) .....	17
<b>Tableau 2.</b> Caractéristiques techniques de quelques capteurs satellites visibles (Vis.) et proche-infrarouge (PIR) (Petus, 2009).....	20
<b>Tableau 3.</b> Caractéristiques des différentes bandes spectrales du capteur OLI .....	21
<b>Tableau 4.</b> Caractéristiques des différentes bandes spectrales du capteur TIRS .....	22
<b>Tableau 5.</b> Les vitesses moyennes mensuelles du vent de l'année 2010 jusqu'à l'année 2016 .....	30
<b>Tableau 6.</b> Débit des rejets d'eau usée dans la baie de Bou Ismail (Ministère de l'Aménagement de Territoire et de l'Environnement in (Inal, 2011) .....	30
<b>Tableau 7.</b> Détermination du coefficient de corrélation des différents ratio par une régression linéaire OLI .....	36
<b>Tableau 8.</b> Détermination du coefficient de corrélation des différents ratio par une régression linéaire MSI.....	36
<b>Tableau 9.</b> Détermination du coefficient de corrélation des différents ratios par une régression linéaire OLI .....	37
<b>Tableau 10.</b> Détermination du coefficient de corrélation des différents ratios par une régression linéaire MSI .....	38
<b>Tableau 11.</b> Les coordonnées géographiques des stations d'échantillonnage .....	40
<b>Tableau 12.</b> Les paramètres destinés à l'analyse et le nombre des échantillons .....	41
<b>Tableau 13.</b> Erreur estimée pour les algorithmes empiriques .....	60
<b>Tableau 14.</b> Débit et Flux de la matière en suspension de l'embouchure de Mazafran en Février et Mars 2017 .....	64
<b>Tableau 15.</b> Etude de corrélations des modèles biogéo-optiques pour l'estimation de la chlorophylle.....	XIV
<b>Tableau 16.</b> Etude de corrélations des modèles biogéo-optiques pour l'estimation de la turbidité .....	XV

<b>Tableau 17.</b> Etude de corrélations des modèles biogéo-optiques pour l'estimation de la chlorophylle MSI.....	XV
<b>Tableau 18.</b> Etude de corrélations des modèles biogéo-optiques pour l'estimation de la turbidité .....	XVI

## Liste des abréviations

<b>Symbole</b>	<b>Signification</b>
AOP	Apparent Optical Property
CDOM	Matière Organique Dissoute Colorée
E	Champ électrique
EO	Earth Observation
ENVI	ENvironment for Visualizing Images
ESA	European Space Agency
ETM	Enhanced Thematic Mapper
GF/F	Glass Fiber Filters
IOP	Inherent Optical Property
LANDSAT	Land Remote-Sensing Satellite
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer
MODIS	MODerate resolution Imaging Spectroradiometer
MSI	Imageur Multi-Spectral
NASA	National Aeronautic Space Administration
ODV	Ocean Data View
OLI	Operational Land Imager
Rrs	Remote sensing reflectance
SeaDAS	SeaWiFS Data Analysis System
SeaWIFS	Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
SNAP	Sentinel Application Platform
SPM	Suspended Particular Matter
TIRS	Thermal Infrared Sensor
USGS	United States Geological Survey

# Table des matières

<b>Remerciement</b> .....	<b>i</b>
<b>Dédicace</b> .....	<b>ii</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>iii</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>viii</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>x</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>xi</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>2</b>
<b>1 Généralités</b> .....	<b>5</b>
1.1 La télédétection.....	5
1.2 Bases physiques de la télédétection .....	5
1.2.1 Le rayonnement électromagnétique .....	5
1.2.2 Le spectre électromagnétique : .....	5
1.2.3 Interaction rayonnement-matière .....	6
1.2.3.1 Interaction avec l’atmosphère .....	6
1.2.3.2 Interaction avec la surface océanique .....	7
1.2.4 Profondeur optique.....	8
1.3 Télédétection de la couleur de l’océan .....	8
1.4 Propriétés optiques de l’eau de mer.....	9
1.4.1 Propriétés optiques apparentes.....	9
1.4.1.1 Luminance (ou la radiance).....	9
1.4.1.2 Eclairement (ou irradiance).....	10
1.4.1.3 Réflectance .....	10
1.4.1.4 Atténuation diffuse .....	11
1.4.2 Propriétés optiques inhérentes .....	11
1.4.2.1 Le coefficient d’absorption $a(\lambda)$ .....	12

1.4.2.2	Le coefficient de diffusion $b(\lambda)$ .....	12
1.4.2.3	Le coefficient de rétrodiffusion.....	12
1.4.2.4	Le coefficient d'atténuation $c(\lambda)$ .....	12
1.5	Les composants optiquement significatifs de la masse d'eau .....	13
1.5.1	Matière en suspension.....	13
1.5.2	La chlorophylle $a$ .....	14
1.5.3	La matière organique dissoute colorée.....	14
1.5.4	Les particules non algales .....	14
1.5.5	L'eau de mer .....	14
1.6	Classification optique des eaux océaniques.....	15
1.6.1	Les eaux du « cas 1 » .....	15
1.6.2	Les eaux du « cas 2 » .....	16
1.7	Algorithmes validés pour la couleur de l'eau.....	16
1.7.1	Estimation de la chlorophylle .....	16
1.7.2	Estimation des matières en suspension.....	17
1.8	Transfert radiatif .....	18
1.9	Problème inverse .....	18
1.10	Couleur de la mer et la biogéochimie.....	19
1.11	Capteurs de la couleur de la mer : .....	19
1.12	Les satellites utilisés .....	20
1.12.1	Landsat-8.....	20
1.12.1.1	Le capteur OLI .....	21
1.12.1.2	Le capteur TIRS .....	22
1.12.2	Le satellite Sentinel-2.....	22
1.12.2.1	MSI (Imageur Multi-Spectral) .....	23
1.13	Logiciels de traitement .....	23

1.13.1	SeaDAS .....	23
1.13.2	SNAP.....	23
1.13.3	ENVI .....	23
1.14	La circulation des eaux de surface dans le bassin Algérien .....	23
<b>2</b>	<b>Zone d'étude .....</b>	<b>26</b>
2.1	Description géographique et présentation du site.....	26
2.2	Réseau hydrographique .....	27
2.3	Sédimentologie de la baie de Bou Ismail .....	27
2.4	Climatologie .....	28
2.4.1	Température de l'air.....	28
2.4.2	Pluviométrie.....	29
2.4.3	Vents .....	29
2.5	Les sources de pollution dans la baie de Bou Ismail.....	30
<b>3</b>	<b>Matériel et méthodes.....</b>	<b>33</b>
3.1	Données satellitaires .....	33
3.1.1	Acquisition des données OLI Landsat-8.....	33
3.1.2	Traitement et analyse des données OLI Landsat-8.....	34
3.1.3	Acquisition des données MSI Sentinel-2.....	34
3.1.4	Extraction des données (OLI et MSI) .....	35
3.1.5	Algorithmes de calcul des paramètres biogéochimiques .....	35
3.1.5.1	Calcul de la chlorophylle .....	35
3.1.5.2	Calcul de la turbidité .....	36
3.1.6	Application de l'algorithme .....	38
3.1.7	Calcul d'erreur sur l'algorithme empirique .....	38
3.2	Données <i>in-situ</i> .....	39
3.2.1	Sortie en mer .....	39

3.2.2	Les conditions météorologiques .....	39
3.2.3	Choix et localisation des stations .....	39
3.2.4	Conditionnement du matériel .....	41
3.2.5	Prélèvement de l'eau de mer .....	41
3.2.6	Mesure des paramètres biogéochimiques .....	41
3.2.6.1	La chlorophylle- <i>a</i> .....	41
3.2.6.2	Calcul d'incertitude .....	46
3.2.6.3	La matière en suspension .....	46
3.2.6.4	La turbidité .....	47
3.2.7	Les flux de la matière en suspension .....	48
3.2.7.1	Calcul du flux de la matière en suspension .....	48
<b>4</b>	<b>Résultats et discussion.....</b>	<b>51</b>
4.1	Résultats.....	51
4.1.1	Concentration de la Chl- <i>a</i> .....	51
4.1.2	Turbidité.....	56
4.2	Discussion.....	58
4.2.1	Evolution de la concentration de la Chl- <i>a</i> satellitaire dans la baie de Bou Ismail estimé par l'algorithme empirique .....	58
4.2.2	Evolution de la turbidité satellitaire dans la baie de Bou Ismail estimé par l'algorithme empirique .....	59
4.2.3	Erreur et évaluation de la performance des algorithmes empiriques .....	60
4.2.3.1	Erreur.....	60
4.2.3.2	Evaluation .....	61
4.2.4	Limites d'application des algorithmes empiriques .....	61
4.2.5	Comparaison entre la concentration de la Chl- <i>a</i> et la turbidité satellitaire .....	62
4.2.6	Flux de la matière en suspension .....	64
	<b>Conclusion.....</b>	<b>67</b>

<b>Perspectives.....</b>	<b>68</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>II</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>VII</b>

# *Introduction*

---

## Introduction

Dans l'univers de la science, la télédétection consiste en l'observation de la Terre à l'aide de satellites embarquant des capteurs placés bien au-dessus de la surface de la terre, permettant une vision globale et régulière dans le temps. L'utilisation de l'imagerie satellitaire dans l'étude des processus océaniques est devenue essentielle pour la recherche océanographique et la surveillance des océans, et particulièrement l'imagerie dédiée à l'étude de la *couleur de l'océan*.

En effet, les instruments embarqués sur les satellites mesurent la réponse spectrale de la surface océanique, en exploitant un intervalle de fréquences allant du visible au proche infrarouge (Mobley, 1994). Les radiances correspondant au signal océanique sont obtenues après une série de calibrations, corrections atmosphériques et autres traitements. Elles sont ensuite converties en concentration en chlorophylle-*a* par des algorithmes analytiques, semi-analytiques ou empiriques (O'Reilly, et al., 1998).

Cependant, l'utilisation des algorithmes standards aux zones côtières turbides et dynamiques s'avère très délicate, car elles sont le siège de rejets d'eaux chargées en particules en suspension, notamment les effluents des oueds, qui sont considérés comme le vecteur majeur qui véhicule la matière en suspension de la terre vers la mer, en augmentant considérablement sa concentration dans l'eau.

Il en résulte que l'algorithme d'estimation de la chlorophylle-*a* serait influencé par le signal de la matière particulaire en suspension, car beaucoup de particules en suspension (particules sédimentaires, CDOM,...) absorbent presque à la même longueur d'onde que celle de la chlorophylle, ce qui induit une surestimation de la concentration de la chlorophylle-*a*.

Pour bien cerner cette problématique, on a choisi d'utiliser deux capteurs à haute résolution spatiale OLI et MSI, de concevoir des algorithmes empiriques en se basant sur des mesures in-situ et les réflectances fournies par ces deux derniers, et de les appliquer sur la baie de Bou Ismail. Cette technique est la première à être adoptée en Algérie, et la baie de Bou Ismail a fait l'objet de l'étude car elle reçoit en permanence des apports d'oueds chargés en matière en suspension. Ce qui aide à mieux apprécier l'influence de la matière particulaire en suspension sur le signal télédétekté de la chlorophylle, ou à mettre en cause d'autres phénomènes pouvant être à l'origine de la perturbation de ce signal.

Cette étude est abordée dans quatre chapitres comme suit :

- Le 1<sup>er</sup> chapitre introduit des connaissances de base portant sur la télédétection spatiale, les fondamentaux physiques...etc.
- Le 2<sup>ème</sup> chapitre présente la zone d'étude.
- Le 3<sup>ème</sup> chapitre montre les techniques de traitement numérique d'images de télédétection visant à extraire les informations pertinentes à l'aide des logiciels SeaDAS, ENVI et SNAP ainsi que le travail effectué au laboratoire.
- Le 4<sup>ème</sup> chapitre présente les résultats obtenus et leur discussion.
- Enfin, le travail est clôturé par une conclusion générale.

# *Généralités*

## 1 Généralités

Ce chapitre introductif est conçu pour évoquer l'ensemble des notions de base utilisées dans le domaine de la télédétection spatiale, et plus précisément la télédétection de la couleur de la mer, pour ouvrir la voie à de multiples applications souhaitées de cet outil.

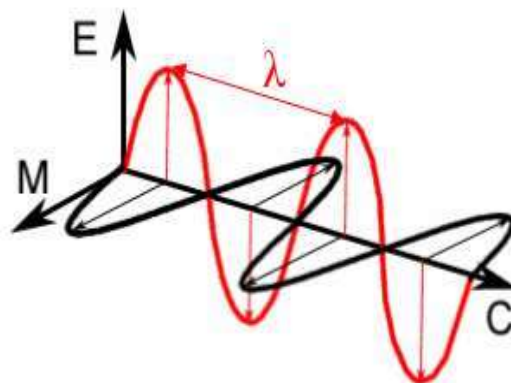
### 1.1 La télédétection

La télédétection est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, "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, concentration de la chlorophylle-*a*, phytoplanctons, matière organique et inorganique, sédiment en suspension, ...) (Soudani, 2005).

### 1.2 Bases physiques de la télédétection

#### 1.2.1 Le rayonnement électromagnétique

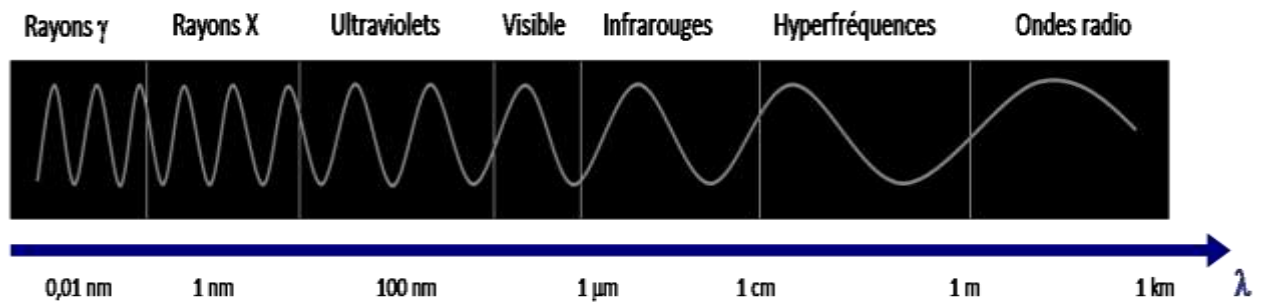
Le rayonnement électromagnétique peut être considéré comme étant un flux de particules élémentaires appelés photons. Il est composé de deux vecteurs ; champ électrique (E) et champ magnétique (M) perpendiculaires et se déplaçant à la vitesse de la lumière (Fig.1).



**Figure 1.** *Onde électromagnétique monochromatique (C : vitesse de la lumière et  $\lambda$  : longueur d'onde)*

#### 1.2.2 Le spectre électromagnétique :

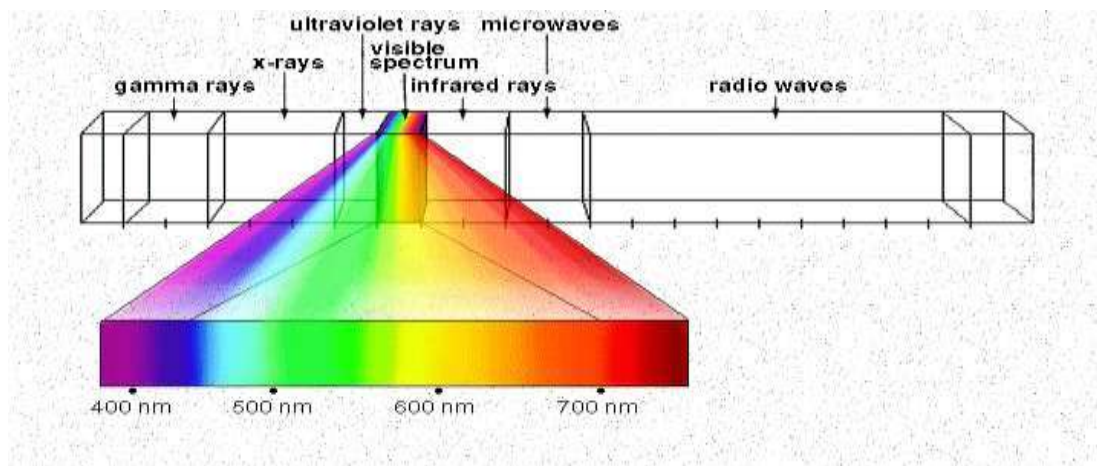
Le spectre électromagnétique s'étend des courtes longueurs d'onde (dont font partie les rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio) (Fig.2).



**Figure 2.** Les domaines du spectre électromagnétique  
(Source : <https://e-cours.univ-paris1.fr> )

### Le domaine du visible

Le spectre visible ou spectre optique est la partie du spectre électromagnétique visible pour l'humain, il s'étend de 380 à 700 nm (Fig.3).



**Figure 3.** Les longueurs d'onde correspondant au domaine du visible  
(Source : <https://copublications.greenfacts.org> )

En océanographie, le domaine du rayonnement visible est indissociable de la notion de couleur de l'océan. Grâce à des capteurs mesurant la couleur de l'océan c'est à dire la luminance (radiance) de l'eau pour différentes longueurs d'onde du spectre visible, il est possible de déterminer certaines caractéristiques biologiques qui sont liées aux propriétés diffusantes et absorbantes de l'eau de mer et de ses composants (Demarcq, 1985).

## 1.2.3 Interaction rayonnement-matière

### 1.2.3.1 Interaction avec l'atmosphère

Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit en premier avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur (Robin, 1998). En fonction de l'interaction, on distingue deux phénomènes : la diffusion et l'absorption.

**La diffusion** : elle correspond à des phénomènes de réflexion multiples entre le rayonnement et les atomes, les molécules et les particules atmosphériques. Selon la longueur d'onde et les dimensions de ces obstacles, on distingue trois types de diffusion différents (Hou, 2013):

La diffusion de Rayleigh : se produit dans les couches supérieures de l'atmosphère, lorsque les particules qui constituent le milieu traversé sont beaucoup plus petites que la longueur d'onde.

La diffusion de Mie : affecte les composés atmosphériques des basses couches atmosphériques dont la taille est presque identique à celle de la longueur d'onde (par exemple les aérosols et les molécules d'eau).

La diffusion non sélective : concerne des grosses particules et les gouttelettes d'eau qui diffusent toutes les longueurs d'onde (courtes et longues) sans préférence. Les nuages, chargés de gouttelettes d'eau et d'aérosols, diffusent toutes longueurs d'onde du visible et apparaissent dans des teintes blanches sur l'image satellitaire.

**L'absorption** : un phénomène intimement lié aux niveaux énergétiques des composantes de l'objet absorbant. Le rayonnement absorbé modifie l'énergie interne des molécules et se manifeste le plus souvent par une augmentation de leur température (Soudani, 2005). Cette modification est due aux transitions électroniques des atomes et des molécules ainsi qu'aux mouvements de rotation et de vibration. Les principaux gaz absorbants de l'atmosphère sont : l'oxygène, l'ozone, la vapeur d'eau, le gaz carbonique, l'azote, l'oxyde de carbone et le méthane (Bonn et Rochon, 1996).

### 1.2.3.2 Interaction avec la surface océanique

Dès son contact avec la masse d'eau océanique, le rayonnement électromagnétique est réfléchi, absorbé et transmis dans des proportions variables (Soudani, 2005). En fonction de son comportement, on distingue trois phénomènes : la réflexion, l'absorption et la transmission.

**La réflexion** : ce phénomène est lié aux propriétés géométriques et spectrales de la surface réfléchissante (Centre Canadien de télédétection). Il concerne des photons n'ayant subi aucune diffusion dans l'atmosphère, et seulement réfléchis à la surface de l'océan (Antoine, 2000). Selon l'état de la surface réfléchissante, deux situations extrêmes sont possibles :

- La réflexion est dite *spéculaire* lorsque les surfaces incidentes sont lisses ou à très faible rugosité, c'est le cas d'une mer calme (rugosité largement inférieure à la longueur d'onde incidente), la réflexion se fait alors dans une direction privilégiée et unique (Centre Canadien de télédétection).

- La réflexion est dite *diffuse* lorsque les surfaces présentent des rugosités qui peuvent atteindre la longueur d'onde incidente. C'est lorsque la surface de l'océan n'est pas parfaitement plate (ce qui est d'autant plus vrai que le vent est fort), la réflexion se fait donc dans plusieurs directions (Antoine, 2000).

**La transmission :** c'est lorsque la cible est traversée par l'énergie du rayonnement électromagnétique en provoquant ce qu'on appelle une transmission ou une réfraction due au changement de milieu (Centre Canadien de télédétection).

**L'absorption :** une cible peut absorber une partie du rayonnement incident, ce qui entraîne son échauffement (Centre Canadien de télédétection).

#### 1.2.4 Profondeur optique

Dans la partie visible du spectre, l'épaisseur optique  $E_o$  peut être formulée comme suit :

$$E_o = R + M + A \quad (1)$$

$R$  : diffusion de Rayleigh,  $M$  : diffusion de Mie et  $A$  : absorption par les molécules de gaz.

### 1.3 Télédétection de la couleur de l'océan

La terminologie de télédétection « *couleur de l'océan* » est fréquemment utilisée pour les études portant sur des capteurs spatiaux ou aéroportés dédiés à la mesure du rayonnement solaire rétrodiffusé par les surfaces océaniques dans le domaine visible et proche infrarouge. Ces capteurs sont passifs car ils n'émettent pas de signal. Les bandes spectrales de ces capteurs sont définies en fonction des propriétés optiques de l'atmosphère et des constituants marins à détecter (phytoplancton, particules inorganiques, substances dissoutes). Le signal mesuré peut provenir de photons ayant subi plusieurs processus (Lorthiois, 2012) :

- Diffusion dans l'atmosphère.
- Réflexion par la surface de l'océan vers le capteur dans l'atmosphère.
- Pénétration dans l'océan puis rétrodiffusion vers l'espace.

L'intensité du signal émis par la surface des océans résultant de ces différentes interactions est mesurée dans certaines longueurs d'onde données à l'aide d'un instrument optique monté sur un satellite : le radiomètre. Cette technique est appelée radiométrie de la couleur de l'océan. Les mesures enregistrées peuvent ensuite être mises en relation avec les divers constituants de la colonne d'eau interférant avec la lumière visible, tels que la chlorophylle (Weber, 2002).

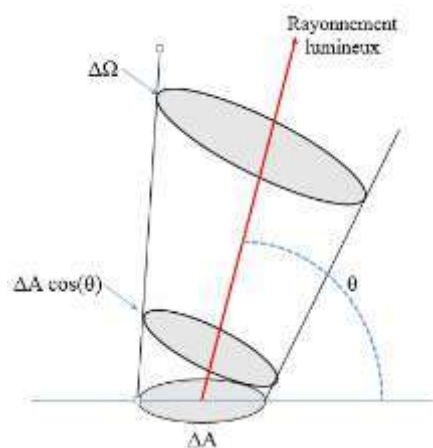
## 1.4 Propriétés optiques de l'eau de mer

Deux grandes classes de variables optiques sont utilisées pour caractériser la lumière dans l'eau : les Propriétés Optiques Apparentes ( $AOP_s$  : *Apparent Optical Properties*) et les Propriétés Optiques Inhérentes ( $IOP_s$  : *Inherent Optical Properties*) (Preisendorfer, 1976). Preisendorfer (1961) a effectué une distinction entre les propriétés optiques inhérentes ( $IOP_s$ ) qui dépendent exclusivement des propriétés du milieu et de ses constituants, et les propriétés optiques apparentes ( $AOP_s$ ), qui dépendent des  $IOP_s$  et également des conditions d'éclairement du milieu.

### 1.4.1 Propriétés optiques apparentes

Les  $AOP_s$  dépendent des constituants présents dans l'eau, et des conditions d'éclairement (structure géométrique du champ lumineux). Elles sont déterminées à partir des mesures de quantités radiométriques telles que l'éclairement et la luminance (Åas et Højerslev, 1999).

On considère la fraction d'un flux énergétique ( $\delta\phi(\theta, \lambda)$ , en Watt), rayonnée depuis une source lumineuse de surface  $\Delta A$  (en  $m^2$ ), dans une direction ( $\theta$ ) et à travers un angle solide  $\Delta\Omega$  (en stéradian) (Fig.4).



**Figure 4.** Géométrie utilisée pour définir la luminance (radiance)

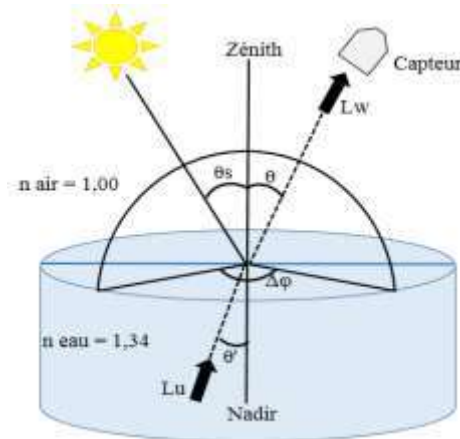
#### 1.4.1.1 Luminance (ou la radiance)

Notée  $L(\theta, \varphi, \lambda)$  (en  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$ ), est le flux ( $\phi$ ) radiatif par unité d'angle solide ( $\Omega$ ) et par unité de surface ( $A$ ) projetée (Antoine, 2000). La direction de mesure est signifiée par les termes  $\theta$  et  $\varphi$  ( $\theta$  est l'angle zénithal et  $\varphi$  l'angle azimutal). Elle est définie par l'équation (2) de (Gordon, et al., 1975) :

$$L(\lambda, \theta) = \frac{\delta\phi}{\Delta A * \Delta\Omega * \cos\theta} \quad (2)$$

Pour les applications de la télédétection en océanographie, on distingue :

- **La luminance ascendante** (ou *upwelling radiance*,  $L_u(\theta, \theta', \varphi, \lambda)$ ) : la luminance ascendante juste sous la surface de l'eau (Fig.5) à une profondeur nulle (notée  $\theta$  ), dont la direction de propagation est définie par les angles zénithal  $\theta'$  et azimutal  $\varphi'$  (Mobley, 1994).
- **La luminance émergente** (ou *water-leaving radiance*,  $L_w(\theta, \varphi, \lambda)$ ) : la luminance provenant de l'eau (Fig.5), transmise à travers l'interface eau/air et captée dans la direction de propagation définie par les angles zénithal et azimutal (Mobley, 1999). La relation entre les angles  $\theta$  et  $\theta'$  est donnée par la loi de Snell-Descartes (in (Descartes, 1637)) (Annexe 1).



**Figure 5.** Géométrie utilisée pour définir la luminance ascendante et la luminance émergente

- **La luminance émergente normalisée** (ou *normalised water leaving radiance*,  $L_{wn}(\theta, \Phi, \lambda)$ ). Ce type de luminance a été introduit pour les mesures effectuées au moyen de capteurs satellitaires (Mobley, 1994).

#### 1.4.1.2 Eclairage (ou irradiance)

Noté  $E(\lambda)$  (en  $\text{W.m}^{-2}.\text{nm}^{-1}$ ), définit le flux  $\phi$  reçu par unité de surface  $A$ . S'il est exprimé en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ , il est dénommé éclairage spectral et s'écrit selon la formule suivante (3) (Mobley, 1994) :

$$E(\lambda) = \frac{\delta\phi}{\Delta A} \quad (3)$$

#### 1.4.1.3 Réflectance

La réflectance de l'eau à la longueur d'onde  $\lambda$ , est le paramètre clé utilisé dans les algorithmes de la couleur de l'océan. Elle est définie comme étant le rapport entre l'éclairage ascendant, ou la luminance qui émerge juste sous la surface de l'eau, et l'éclairage descendant y pénétrant (Jerlov, 1976). Elle dépend aussi des propriétés optiques inhérentes de l'eau (les

IOP<sub>s</sub>: absorption et diffusion), donc des différentes composantes en suspension ou dissoutes. La réflectance est donnée par l'équation (4) de (Morel et Prieur, 1977) :

$$R_{rs}(\theta, \varphi, \lambda) = \frac{L_w(\theta, \varphi, \lambda)}{E_d(\lambda)} \quad (4)$$

Avec :

$R_{rs}$  (*reflectance remote sensing*) : la réflectance mesurée par les satellites en sr<sup>-1</sup>.

$L_w(\theta, \varphi, \lambda)$  : luminance sortante juste au-dessus de l'interface air/mer et dans la direction ( $\theta, \varphi$ ).

$E_d(\lambda)$  : l'éclairement descendant (irradiance) juste au-dessus de la surface.

La couleur de l'eau est définie par les variations spectrales de la réflectance juste au-dessous de la surface de la mer, décrit la capacité de l'océan à renvoyer un signal lumineux vers l'atmosphère (Kheireddine, 2014).

#### 1.4.1.4 Atténuation diffuse

C'est la densité surfacique de flux d'énergie émise par rayonnement sur l'ensemble du spectre électromagnétique.

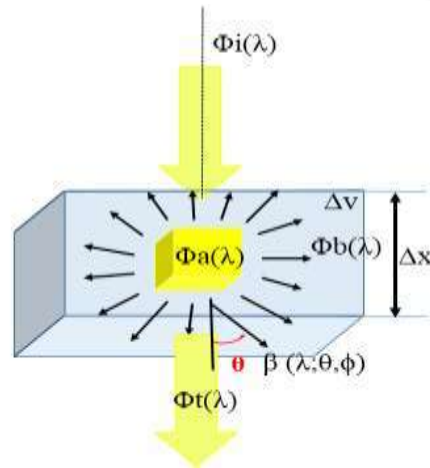
#### 1.4.2 Propriétés optiques inhérentes

Les propriétés optiques inhérentes d'une eau naturelle définissent son comportement optique, c'est à dire ses propriétés d'interaction avec un rayonnement incident, indépendamment des conditions d'éclairement. Les photons issus du rayonnement solaire incident qui pénètrent dans la colonne d'eau sont soumis à deux phénomènes physiques : **l'absorption et la diffusion** (Petus, 2009). Si nous considérons un volume élémentaire d'eau  $\Delta V$ , d'épaisseur  $\Delta r$ , éclairé par un rayonnement monochromatique étroit, dont le flux spectral énergétique est noté  $\phi_i(\lambda)$  (Fig.6).

Le flux incident  $\phi_i(\lambda)$  subit différentes transformations :

- Une partie ( $\phi_a(\lambda)$ ) est absorbée à l'intérieur du volume d'eau  $\Delta V$ .
- Une partie ( $\phi_b(\lambda)$ ) est diffusée en dehors du rayon d'incidence.
- Le flux restant est transmis à travers le volume d'eau dans la direction du flux incident ( $\phi_t(\lambda)$ ).
- $\beta(\lambda, \theta, \varphi)$  le coefficient angulaire de diffusion en m<sup>-1</sup>.sr<sup>-1</sup>.
- $\theta$  l'angle de diffusion compris entre 0 et  $\pi$ .
- $\varphi$  l'angle azimutal compris entre 0 et  $2\pi$ .

On obtient l'équation (5) de conservation du flux qui s'écrit :



$$\phi_i(\lambda) = \phi_a(\lambda) + \phi_b(\lambda) + \phi_t(\lambda) \quad (5)$$

**Figure 6.** Représentation d'un flux de lumière incident traversant un volume d'eau de mer et définissant les coefficients d'absorption et de diffusion selon Morel (2008).

#### 1.4.2.1 Le coefficient d'absorption $a(\lambda)$

Correspond à l'absorption spectrale par unité de longueur du milieu en  $m^{-1}$  (Petus, 2009). Si un faisceau de rayons lumineux monochromatiques traverse une longueur  $\Delta x$  d'un volume  $\Delta v$ , on définit le coefficient d'absorption  $a(\lambda)$  par la formule (6) ( $m^{-1}$ ) :

$$a(\lambda) = \frac{\phi_a(\lambda)/\phi_i(\lambda)}{\Delta x} \quad (6)$$

#### 1.4.2.2 Le coefficient de diffusion $b(\lambda)$

Correspond à la diffusion spectrale par unité de longueur du milieu en  $m^{-1}$  (Petus, 2009). Si un faisceau de rayons lumineux monochromatiques traverse une longueur  $\Delta x$  d'un volume  $\Delta v$ , on définit le coefficient de diffusion  $b(\lambda)$  par la formule (7) ( $m^{-1}$ ) :

$$b(\lambda) = \frac{\phi_b(\lambda)/\phi_i(\lambda)}{\Delta x} \quad (7)$$

#### 1.4.2.3 Le coefficient de rétrodiffusion

Représente la diffusion lorsque l'angle est dans un l'intervalle de  $[\pi/2, \pi]$ . C'est cette part de la diffusion qui est mesurée par les capteurs des satellites (Petus, 2009).

#### 1.4.2.4 Le coefficient d'atténuation $c(\lambda)$

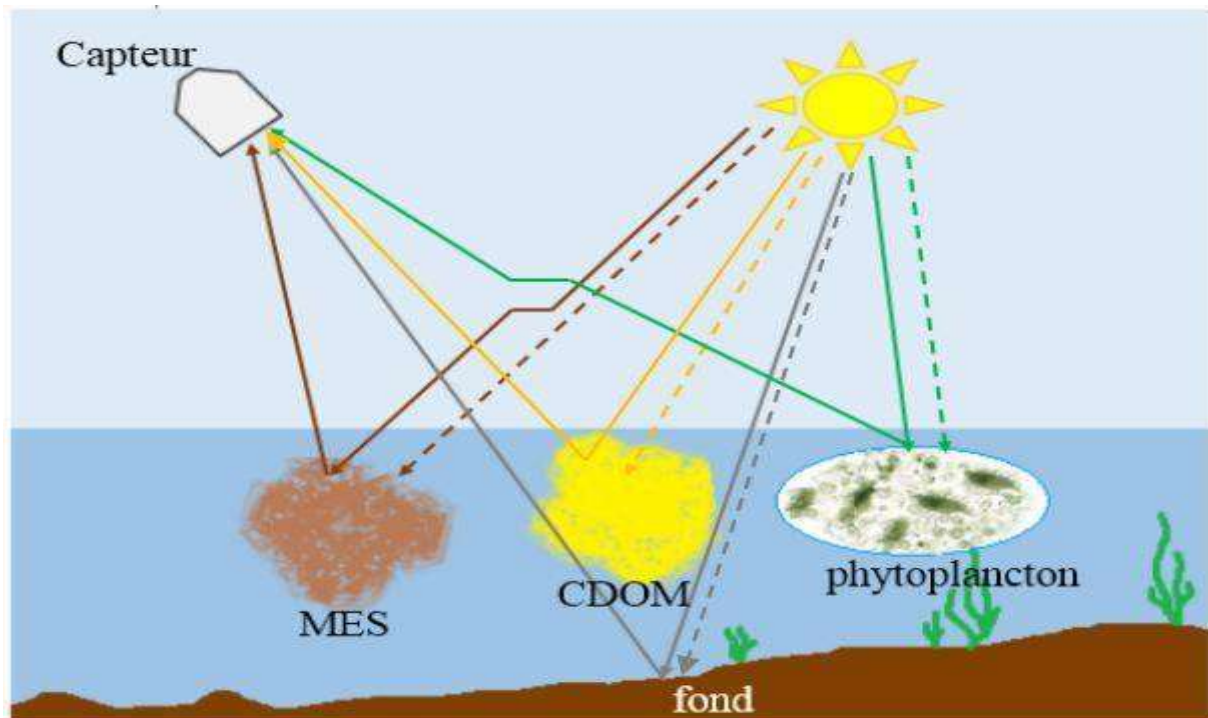
Est défini comme la somme des coefficients d'absorption et de diffusion selon la formule (8):

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (8)$$

*Remarque* : la réflectance peut être exprimée en fonction des propriétés optiques inhérentes selon la formule (9), c'est à dire le coefficient de rétrodiffusion ( $b_b$ ), et le coefficient d'absorption ( $a$ ) (Morel et Prieur, 1977), avec  $F_{L,\beta}$  est un paramètre du modèle (sans dimension) :

$$R(\lambda) = F_{L,\beta} * \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)} \quad (9)$$

### 1.5 Les composants optiquement significatifs de la masse d'eau



**Figure 7.** Facteurs influençant la lumière émergente de la surface de l'eau

On appelle constituants « optiquement significatifs » l'ensemble des substances en suspension ayant un effet sur la propagation du champ lumineux dans un milieu (Fig.7). Les principaux constituants optiquement significatifs présents dans l'océan sont ; les molécules d'eau, les virus, les phytoplanctons, les particules non algales, les matières dissoutes colorées, etc. (Gernez, 2009).

#### 1.5.1 Matière en suspension

Les matières en suspensions (MES) représentent l'ensemble des matières solides et colloïdales flocculées, organiques ou minérales, de très faible diamètre, contenues dans une eau et pouvant être retenues par filtration ou centrifugation. La quantité de matière en suspension varie selon les saisons et le régime d'écoulement des eaux, ces matières affectent la

---

transparence de l'eau, diminuent la pénétration de la lumière et par la suite la photosynthèse. Elle s'exprime en milligramme par litre.

#### - **La turbidité**

La turbidité d'une eau est due à la présence des particules en suspension, notamment colloïdales : argiles, limons, grains de silice, matières organiques, etc. L'appréciation de l'abondance de ces particules mesure son degré de turbidité, à cette fin, il est recommandé d'utiliser un turbidimètre optique (Rodier, 2009).

#### **1.5.2 La chlorophylle *a***

La chlorophylle-*a* (Chl-*a*) est le pigment photosynthétique prédominant du phytoplancton, responsable de l'assimilation de l'énergie solaire pour la photolyse de l'eau et la production de la matière organique. La manière principale pour déterminer la concentration de la chlorophylle par satellite est de mesurer la quantité de lumière absorbée pour une longueur d'onde particulière (443 nm pour le capteur Landsat-8 (Weber, 2002), 412 nm pour SeaWiFS, ...etc).

Des algorithmes analytiques développés par les chercheurs en optique océanographique permettent de convertir ces mesures en concentration de Chl-*a* (Weber, 2002).

#### **1.5.3 La matière organique dissoute colorée**

La matière organique dissoute colorée (CDOM : *Colored Dissolved Organic Matter*, appelée aussi : *yellow substance*, *gelbstoff*) est le composant optiquement visible de la matière organique dissoute dans l'eau. Il a un effet important sur l'activité biologique des écosystèmes aquatiques (González, et al., 2013). La CDOM composée en grande partie par les acides fulviques et humiques, et absorbe la lumière dans les mêmes longueurs d'onde que la Chl-*a*.

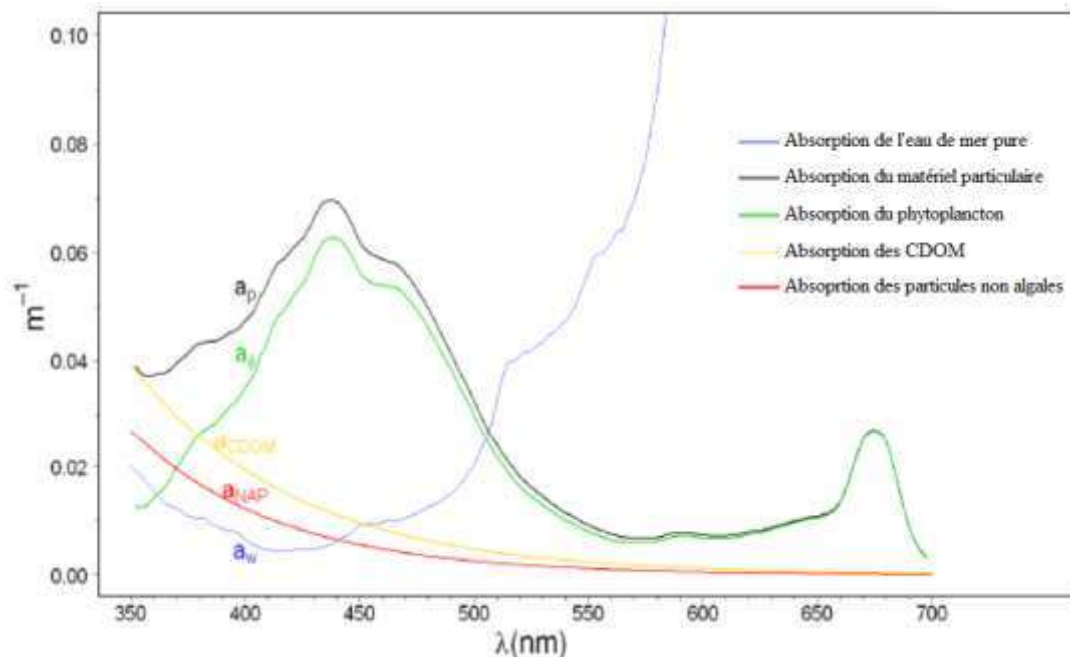
#### **1.5.4 Les particules non algales**

Les particules non algales comprennent les bactéries et les autres organismes hétérotrophes, ainsi que les détritiques directement produits par les algues et les autres organismes. Ces derniers étant plus ou moins transparents, ils ont les mêmes propriétés d'absorption que la Chl-*a* (Fig.8) (Antoine, 2000).

#### **1.5.5 L'eau de mer**

L'eau de mer intervient par absorption et par diffusion. La diffusion est possible grâce aux fluctuations de densité du milieu, ou plus précisément les fluctuations de concentration des différents ions (Antoine, 2000). Les changements de salinité ne semblent pas avoir d'effet sur

les valeurs d'absorption dans le domaine visible, par contre l'augmentation de la température du milieu induit une augmentation de l'absorption de  $0.0015 \text{ m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$  à 600 nm, et  $0.01 \text{ m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$  à 750 nm, pour un milieu dont la température varie entre 10 °C et 30 °C (Pegau et Zaneveld, 1993). L'absorption par l'eau de mer pure est faible dans les domaines spectraux du bleu et du vert, et augmente à partir de 550 nm pour devenir nettement significative dans le rouge (Fig.8).



**Figure 8.** Variation du coefficient d'absorption des composants optiquement significatifs en fonction de la longueur d'onde selon Gernez (2009)

## 1.6 Classification optique des eaux océaniques

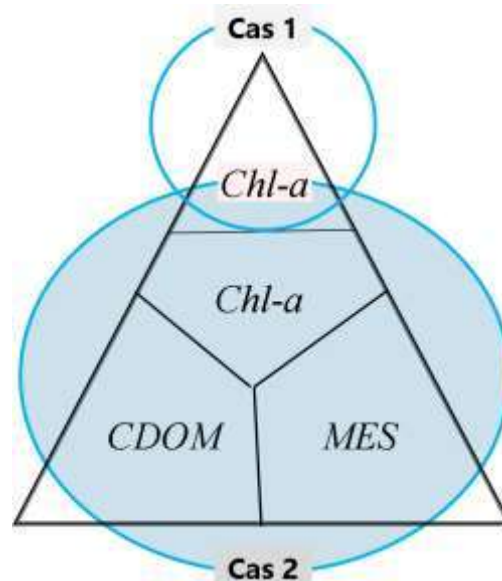
Divers auteurs ont défini un système de classification des eaux naturelles selon leurs propriétés optiques. Morel et Prieur (1977) ont proposé une classification des eaux marines en deux grandes classes : les eaux du « cas 1 » et celles du « cas 2 ».

### 1.6.1 Les eaux du « cas 1 »

Les eaux du cas 1 représentent les eaux claires des mers ouvertes (Weber, 2002), non affectées par les apports fluviaux et plus généralement par toute influence de la côte ou du fond (Antoine, 2000). Les propriétés optiques y sont déterminées d'une part par les propriétés optiques de l'eau de mer pure, et d'autre part par celles du phytoplancton (Fig.9), et de l'ensemble de ses produits associés (détritus organiques sous forme de particules ou de substances dissoutes et organismes hétérotrophes) (Antoine, 2000).

### 1.6.2 Les eaux du « cas 2 »

Ce type est caractéristique des zones côtières où les eaux sont plus turbides (Weber, 2002). Les propriétés optiques dépendent d'une part des mêmes composantes que dans les eaux du « cas 1 », mais aussi, d'autre part, d'autres substances actives d'un point de vue optique, comme des sédiments en suspension ou du CDOM provenant du lessivage des terres (Fig.9). Ces particules contribuent de façon indépendante à la variabilité optique de ces eaux, et elles représentent ce qu'on appelle « les composants optiquement significatifs » (Antoine, 2000).



**Figure 9.** Schéma explicatif des eaux du Cas 1 et Cas 2 selon Antoine (2000)

## 1.7 Algorithmes validés pour la couleur de l'eau

### 1.7.1 Estimation de la chlorophylle

On peut estimer, avec des méthodes d'inversion, la concentration en chlorophylle par l'observation de la couleur de l'océan (Lei, 2011).

Les algorithmes empiriques classiquement utilisés pour les eaux du cas 1 sont basés sur des rapports de bandes de réflectance de télédétection (Petus, 2009). Il est plus difficile d'estimer la chlorophylle dans les eaux du cas 2, où la difficulté est grandement renforcée, d'après (González, et al., 2013), par :

- Variabilité temporelle et spatiale
- Pollution terrestre ou des fonds marins
- Aérosols (poussières, pollution)
- Sédiments en suspension et CDOM
- Effets atmosphériques et émissions anthropogéniques.

Pour estimer la chlorophylle, les algorithmes dits *Ocean Color* « OC » sont les plus utilisés. Il existe des variations en fonction du nombre de bandes dans la gamme de vert et de bleu (González, et al., 2013), et selon le capteur utilisé. Ils prennent la forme suivante (10) (O'Reilly, et al., 1998) ; (O'Reilly, et al., 2000):

$$\log_{10}[Chl_a] = a_0 + a_1 * R + a_2 * R^2 + a_3 * R^3 + a_4 * R^4 \quad (10)$$

Avec R qui représente le rapport suivant :

$$R_{max} = \text{Maximum de } \left( \frac{R_{rs}(\lambda_{bleu})}{R_{rs}(\lambda_{vert})} \right) \quad (11)$$

$$R = \log_{10}(R_{max}) \quad (12)$$

Les constantes  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  ont été déterminées d'une manière empirique (NASA, 2017). Dans ce qui suit, l'expression générale des algorithmes mis en œuvre pour quelques capteurs de la couleur de la mer (tableau 1).

**Tableau 1.** Les constantes et les longueurs d'ondes utilisées pour l'estimation de la chlorophylle. OC5 (Gohin, et al., 2002) et OCx (O'Reilly, et al., 1998) ; (O'Reilly, et al., 2000)

Capteur	Algorithme	Blue (nm)	Green (nm)	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
MERIS Sentinel-3	OC4E	443>490>510	560	0.3255	-2.7677	2.4409	-1.1288	-0.4990
SeaWiFS	OC5	490	555	0.2818	-2.783	1.863	-2.387	--
	OC4	443>490>510	555	0.3272	-2.9940	2.7218	-1.2259	-0.5683
	OC3S	443>490	555	0.2515	-2.3798	1.5823	-0.6372	-0.5692
	OC2S	490	555	0.2511	-2.0853	1.5035	-3.1747	0.3383
MODIS	OC3M	443>488	547	0.2424	-2.7423	1.8017	0.0015	-1.2280
	OC2M	488	547	0.2500	-2.4752	1.4061	-2.8233	0.5405
Landsat-8	OC2	482	561	0.1977	-1.8117	1.9743	-2.5635	-0.7218
	OC3	443>482	561	0.2412	-2.0546	1.1776	-0.5538	-0.4570

### 1.7.2 Estimation des matières en suspension

Les algorithmes d'estimation de la matière en suspension ou de la turbidité sont souvent basés sur la relation entre les mesures de concentration *in-situ* et la valeur de réflectance dans les bandes verte (561.3 nm pour Landsat-8), rouge (654.6 nm pour Landsat-8) ou proche infrarouge (PIR). Plusieurs auteurs ont travaillé sur l'estimation de la MES en fonction des réflectances satellitaires sur les zones côtières.

a. Tassan (1994) pour le capteur SeaWiFS ( $c_0, c_1, c_2$  sont déterminés en fonction de la région) :

$$MES = 10^{(c_0 + c_1 * (R_{555} + R_{670}) + c_2 * (\frac{R_{490}}{R_{555}}))} \quad (13)$$

b. Doxaran et al (2009) pour le capteur MODIS :

$$MES = 12.996 * e^{\left(\frac{R_{\lambda 1} / R_{\lambda 2}}{0.189}\right)} \quad (14)$$

c. Siswanto et al (2011) pour le capteur SeaWiFS, basé sur l'approche de Tassan (1994) :

$$MES = 10^{(0.649 + 25.623 * (R_{555} + R_{670}) - 0.646 * (\frac{R_{490}}{R_{555}}))} \quad (15)$$

d. Loisel et al (2014) pour le capteur MERIS, basé sur l'approche de Tassan (1994) :

$$MES = 10^{(0.695 + 27.29 * (R_{560} + R_{665}) - 0.638 * (\frac{R_{450}}{R_{560}}))} \quad (16)$$

## 1.8 Transfert radiatif

C'est l'ensemble des modalités de modification d'un signal à travers l'atmosphère. Ces modalités peuvent être modélisées pour être corrigées (en appliquant des modèles de transfert radiatif) (Robin, 1998). L'atmosphère joue le rôle d'un filtre et modifie les signaux qui transitent à travers elle. Deux composantes de l'atmosphère doivent être discernées :

- Une composante relativement constante : ce sont les molécules de gaz atmosphérique dont l'azote, l'oxygène, le dioxyde de carbone, l'argon, l'ozone. Le diamètre de ces molécules est de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $10^{-4}$   $\mu\text{m}$ .

- Une composante variable : les aérosols, dont la concentration change d'un endroit à l'autre et d'un moment à l'autre dans les basses couches de l'atmosphère : poussière, vapeur d'eau...leur diamètre varie entre  $10^{-3}$  (les fumées) à 2000  $\mu\text{m}$  (la pluie).

La contribution de l'atmosphère dépend aussi de facteurs géométriques : élévation du soleil sur l'horizon, angle de prise de vue. Plus le rayonnement chemine longuement au travers de l'atmosphère et plus les effets atmosphériques sont importants.

## 1.9 Problème inverse

Le *problème direct* du transfert radiatif consiste à estimer les AOP<sub>s</sub> à partir des IOP<sub>s</sub>. L'exploitation des mesures de la télédétection de la couleur de l'océan nécessite au contraire une démarche inverse c'est à dire l'estimation des IOP<sub>s</sub> à partir des AOP<sub>s</sub> ou *problème inverse* du transfert radiatif (Lorthiois, 2012). Autrement dit, déterminer les paramètres biogéochimiques à partir de la radiance (Lee, 2006).

L'analyse du problème inverse ainsi que l'interprétation de la couleur de l'océan en terme de constituants optiquement actifs peut être réalisée selon trois méthodes (Lorthiois, 2012) :

- La première méthode dite *empirique* est entièrement basée sur des relations empiriques établies entre la réflectance de l'eau et la concentration des constituants optiquement actifs recherchés (exemple de la chlorophylle ou la matière en suspension).
- La deuxième dite *analytique* nécessite la résolution de l'équation de transfert radiatif afin d'établir des relations entre l'éclairement ascendant ( $E_u$ ) ou de la luminance montante ( $L_u$ ) et les propriétés optiques des constituants du milieu.
- La troisième méthode (intermédiaire entre les deux méthodes précédentes) est appelée *semi-analytique*, l'équation de transfert radiatif y est résolue en introduisant des relations empiriques.

### 1.10 Couleur de la mer et la biogéochimie

Lorsque la lumière solaire illumine la surface des océans, une partie est directement réfléchi, mais la majeure partie pénètre sous la surface de l'océan et interfère avec les particules optiquement significatives qui sont à l'origine de la couleur de la mer.

L'interprétation des signaux satellites couleur de l'océan pour l'estimation des différentes composantes de la masse d'eau de surface océanique (Chl-a, MES, Phytoplacton, DCOM...) a donné lieu à de nombreuses études qui travaillent sur les développements des techniques pour étudier les processus biogéochimiques de l'océan. En effet, l'estimation satellitaire des données couleur de l'océan peut servir en tant que donnée de calibration/assimilation dans les modèles biogéochimiques.

L'estimation de la production primaire à partir de la donnée 'couleur de l'océan' et sans l'intermédiaire d'un modèle couplant physique et biologie est possible. Cette estimation se base sur la donnée de Chl-a satellitaire, un profil de biomasse sur la profondeur, la lumière disponible, et une paramétrisation de la courbe reliant lumière et photosynthèse (Longhurst, et al., 1995).

### 1.11 Capteurs de la couleur de la mer :

Les dispositifs de télédétection qui mesurent l'énergie disponible sont de deux types : *passifs* qui peuvent seulement percevoir l'énergie réfléchi lorsque le soleil illumine la terre, ou *actifs* qui produisent leur propre énergie pour illuminer la cible, le rayonnement réfléchi par la cible est alors perçu et mesuré par le capteur.

Les capteurs type 'couleur de l'océan' sont des capteurs passifs. Ils mesurent la lumière solaire renvoyée par les surfaces terrestres dans le domaine du visible et du proche infrarouge.

Ils fournissent des produits contenant une information quantitative sur les concentrations en éléments contenus dans l'eau (Huret, 2005).

L'utilisation de ces produits satellitaires dans l'étude des processus océaniques est devenue essentielle pour la recherche océanographique et la surveillance des océans. Il existe beaucoup de satellites, ayant un capteur couleur de l'océan à bord pour des applications à l'échelle globale ou régionale, ils sont présentés dans le tableau 2.

**Tableau 2.** *Caractéristiques techniques de quelques capteurs satellites visibles (Vis.) et proche-infrarouge (PIR) (Petus, 2009).*

<i>Capteurs moyenne et basse résolution</i>						
Capteur/satellite	Mise en service	Couverture spectrale (nm)	Bandes spectrales VIS et PIR	Résolution spatiale(m)	Couverture (km)	Répétitivité (jours)
SeaWiFS / OrbView2	1997	402 – 885	8	1000	2806	1-2
MODIS / Aqua	2002	405 – 965	36	1000/500/250	2330	1 ou 2
MERIS / ENVISAT1	2002	390 – 1040	15	300/1200	1150	1-3
<i>Capteurs haute résolution</i>						
Capteurs / satellite	Mise en service	Couverture Spectrale (nm)	Bandes Spectrales Vis et PIR	Résolution spatiale(m)	Couverture (km)	Répétitivité (jours)
OLI/ LANDSAT8	2013	435 – 1384	9	30/15	185	16
ETM+ / LANDSAT7	1999	450 – 2350	7	30/15	183	16
MSI/Sentinel-2A	2015	440 - 1370	13	10/20/60	290	10

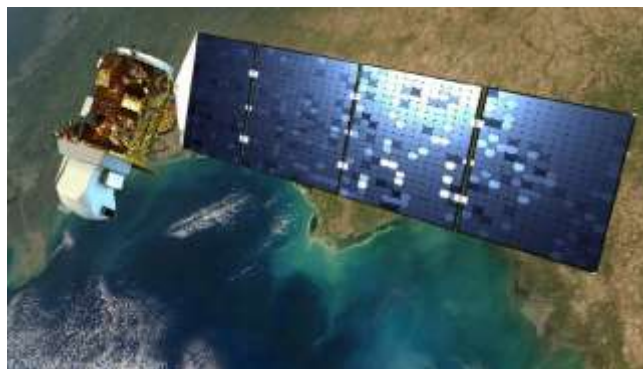
Dans les larges baies et les embouchures estuariennes, les structures marines sont plus fines et varient plus rapidement. Leur surveillance nécessite donc des capteurs à haute résolution.

Dans cette étude, on s'intéresse au capteur américain OLI embarqué sur le satellite Landsat-8, parce que ce dernier offre une meilleure résolution spatiale (de l'ordre de dizaines de mètre), et ses données sont téléchargeables gratuitement sur le site USGS (United States Geological Survey).

## 1.12 Les satellites utilisés

### 1.12.1 Landsat-8

Le programme américain Landsat de télédétection spatiale (NASA et USGS ) a été le premier programme civil d'observation de la Terre par satellite. Il a commencé avec le lancement du premier Landsat en 1972 et se poursuit encore actuellement avec Landsat-8.



**Figure 10.** Le satellite Landsat-8 (Source : <https://www.satimagingcorp.com>)

Le satellite Landsat-8 a été lancé en 2013 à 705 km d'altitude, et il est équipé d'un capteur multispectral appelé *Operational Land Imager* (OLI) et d'un capteur infrarouge thermique (TIRS).

### 1.12.1.1 Le capteur OLI

Le capteur OLI (*Operational Land Imager*) offre une image de neuf bandes spectrales avec une résolution spatiale de 30 mètres pour les bandes de 1 à 7 et 9, la bande 8 (panchromatique) a une résolution spatiale de 15 mètres. Deux nouvelles bandes sont offertes par le capteur OLI, la bande 1 (ultra-bleu) utile pour les études des aérosols et la cartographie côtière et la bande 9 utile pour les études des cirrus et des nuages.

**Tableau 3.** Caractéristiques des différentes bandes spectrales du capteur OLI

Bande	Bande spectrale	Résolution	Application
1	0,435 - 0,451 $\mu\text{m}$	30 m x 30 m	Aérosols, zones côtières
2	0,452 - 0,512 $\mu\text{m}$	30 m x 30 m	Pigment, Différenciation sol/végétaux, zones côtières
3	0,533 - 0,590 $\mu\text{m}$	30 m x 30 m	Pigment, zones côtières
4	0,636 - 0,673 $\mu\text{m}$	30 m x 30 m	Pigment, zones côtières
5	0,851 - 0,879 $\mu\text{m}$	30 m x 30 m	Feuillages, zones côtières
6	1,566 - 1,651 $\mu\text{m}$	30 m x 30 m	Feuillages
7	2,107 - 2,294 $\mu\text{m}$	30 m x 30 m	Minéral, lithologie
8	0,503 - 0,676 $\mu\text{m}$	15 m x 15 m	Panchromatique
9	1,363 - 1,384 $\mu\text{m}$	30m x 30 m	Cirrus et nuages

### 1.12.1.2 Le capteur TIRS

Le capteur TIRS (Thermal Infrared Sensor) offre plus de précision dans la détection des surfaces tempérées et cela grâce à deux nouvelles bandes 10 et 11 qui ont une résolution spatiale de 100 mètres et qui était absent dans les versions précédentes de Landsat.

**Tableau 4.** *Caractéristiques des différentes bandes spectrales du capteur TIRS*

<b>Bande</b>	<b>Bande spectrale</b>	<b>Résolution</b>	<b>Application</b>
<b>10</b>	10,60 -11,19 $\mu\text{m}$	100 m x100 m	Thermique
<b>11</b>	11,50 -12,51 $\mu\text{m}$	100 m x100 m	Thermique

### 1.12.2 Le satellite Sentinel-2

Le satellite d'observation européen Sentinel-2A (Fig.11) a décollé le 23 juin 2015 de Kourou à bord d'une fusée Vega, la mission Sentinel-2 fournit des clichés dans 13 bandes spectrales de notre planète. Le Centre National d'Etudes Spatiales met à disposition de manière libre et gratuite les données des Sentinel-2 sur sa plateforme Internet (<https://sentinel2.cnes.fr/>).



**Figure 11.** *Satellite sentinel-2 (Source : <https://sentinel2.cnes.fr/>).*

Ce satellite est équipé d'un capteur MSI (Imageur Multi-Spectral) positionné à une altitude de 786 km de la terre.

---

### 1.12.2.1 MSI (Imageur Multi-Spectral)

Le capteur MSI fonctionne dans treize bandes spectrales allant du visible au moyen infrarouge, il permet d'observer une fauchée de 290 km de largeur. Cet instrument est d'une résolution de 10 à 60 m selon les bandes spectrales.

Quatre bandes spectrales (bleu : 490 nm, vert : 560 nm, rouge : 670 nm) et proche infrarouge (850 nm) sont fournies à 10 m de résolution, trois bandes spectrales (440, 940 et 1370 nm) sont destinées aux corrections atmosphériques ont une résolution de 60 m, les six bandes restantes sont fournies à 20 m de résolution.

## 1.13 Logiciels de traitement

### 1.13.1 SeaDAS

SeaDAS (*SeaWiFS Data Analysis System*) est un logiciel *open source* de la NASA pour la visualisation, le traitement et l'analyse des images des capteurs de la couleur de l'océan. Développé à l'origine pour soutenir la mission SeaWiFS, il prend actuellement en charge la plupart des missions américaines de couleurs océaniques (NASA, 2017). SeaDAS est gratuitement téléchargeable à partir d'internet.

### 1.13.2 SNAP

SNAP (*Sentinel Application Platform*) est un logiciel *open source* de l'ESA. C'est une plateforme idéale pour le traitement, l'analyse et l'observation de la terre grâce aux innovations technologiques suivantes : extensibilité, portabilité, plate-forme client modulaire, abstraction générique des données EO et un cadre de traitement des graphiques. SNAP est gratuitement téléchargeable à partir d'internet.

### 1.13.3 ENVI

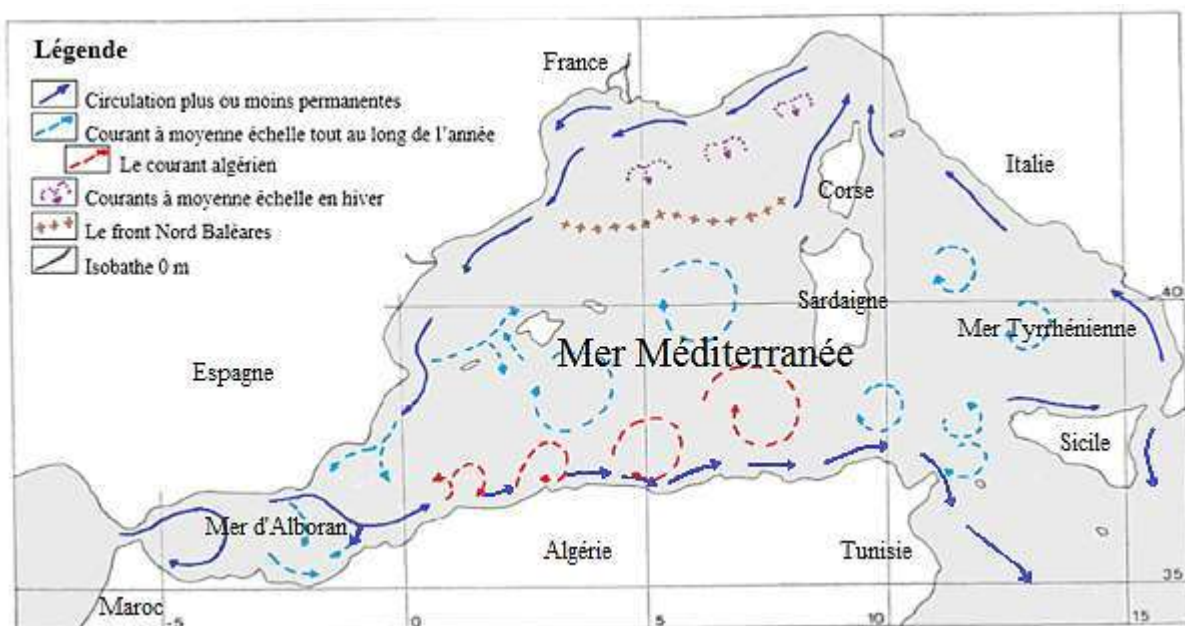
ENVI (*ENvironment for Visualizing Images*) est un logiciel de traitement d'images performant et puissant. Il répond aux besoins des utilisateurs d'images satellites (optiques et radars). Le logiciel ENVI est développé par le langage de programmation IDL (Interactive Data Language).

## 1.14 La circulation des eaux de surface dans le bassin Algérien

Dans le bassin algérien, la variabilité spatio-temporelle due à des structures turbulentes ne permettait pas une description correcte de la circulation à partir des quelques mesures hydrologiques existantes. Ce bassin montre des caractéristiques très spécifiques (Millot,

1989). Le bassin algérien est considéré comme une unité géographique caractérisée par des processus hydrodynamiques particuliers. Il est soumis à l'influence directe du courant très turbulent, de secteur Est, qui longe les côtes algériennes (Millot, 1989).

A la sortie de la mer d'Alboran, la circulation de l'Eau Atlantique Modifiée est pratiquement stable, elle se dirige des côtes espagnoles vers les côtes algériennes ( $1^{\circ}\text{E}$ ). A partir de  $1-2^{\circ}\text{E}$ , cette circulation devient généralement instable, des méandres puis des tourbillons cycloniques et anticycloniques se développent ; les tourbillons dérivent le long de la côte à des vitesses de quelques kilomètres/jour, mais seuls les anticycloniques croissent jusqu'à atteindre un diamètre de l'ordre de 100 km, ces structures sont peu profondes (100-200 m) (Millot, 1989). Puis leur dérive ralentit, ils s'éloignent de la côte et sont parfois repérés par des thermographies pendant plusieurs mois. Ils peuvent alors atteindre des dimensions de plus de 200 km et revenir vers l'Ouest. Entraînés par la force de Coriolis et en raison de phénomènes d'instabilité, ces eaux s'écoulent vers le large, ce qui fait du bassin Algérien un réservoir qui va pouvoir alimenter en particulier le bassin Nord.



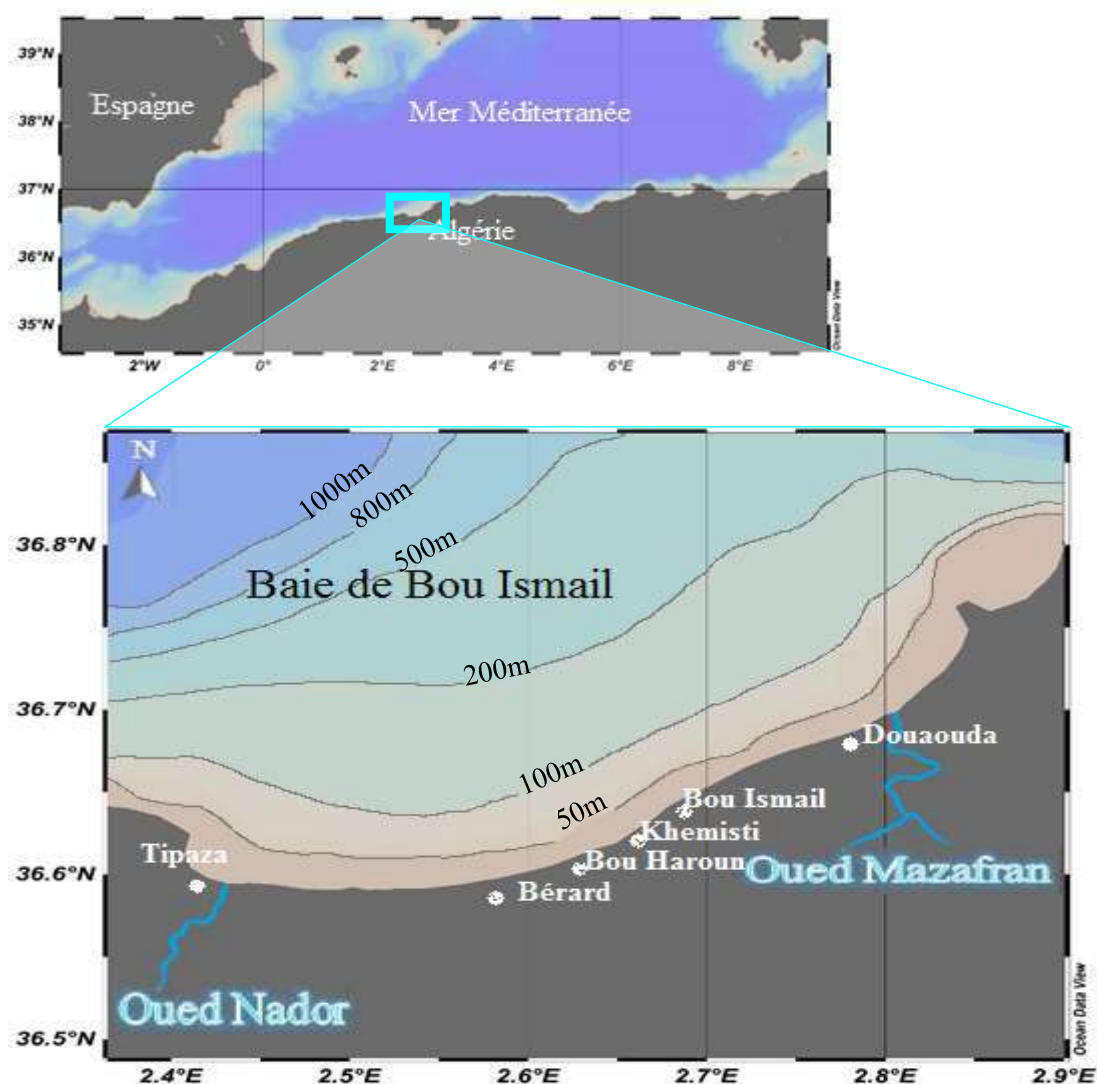
**Figure 12.** La circulation à moyenne échelle dans le bassin occidental de la Méditerranée selon Millot (1989)

*Zone d'étude*

## 2 Zone d'étude

### 2.1 Description géographique et présentation du site

Le territoire de la commune de Bou Ismail est situé au Nord-Est de la wilaya de Tipaza. Bou Ismail est une ville située au bord de la mer Méditerranée, à environ 20 km à l'Est de Tipaza et à environ 40 km au Sud-Ouest d'Alger. Elle est bordée par la mer Méditerranée au Nord et par la plaine de Mitidja au Sud. La baie de Bou Ismail occupe la partie Ouest du littoral algérois, elle s'étend du méridien du Mont Chenoua à l'Ouest ( $2^{\circ}25'$  E et  $36^{\circ}38'$  N) à celui du Ras Acrata à l'Est ( $2^{\circ}55'$  E et  $36^{\circ}48'$  N). Cette dernière couvre une superficie de 350 km<sup>2</sup> avec une ouverture de 40 Km orientée du Sud-Ouest au Nord-Est.



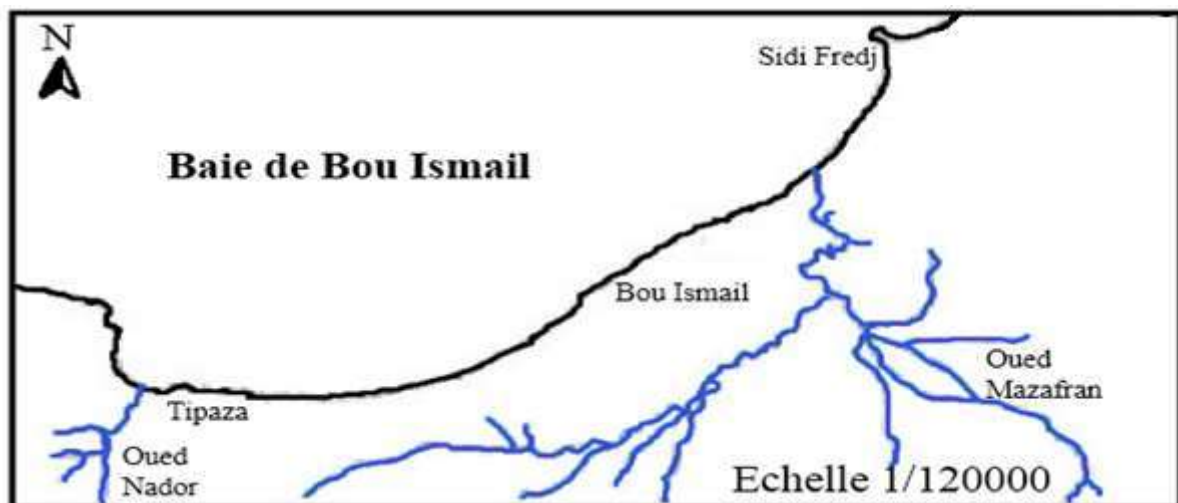
**Figure 13.** Situation géographique de la baie de Bou Ismail

## 2.2 Réseau hydrographique

La baie de Bou Ismail reçoit les décharges de trois oueds qui déversent de grandes quantités de particules dissoutes ou particulaires d'origine terrigènes. Les principaux oueds qui débouchent dans la baie de Bou Ismail sont :

**Oued Mazafran** : c'est le plus important des oueds qui débouchent dans la baie. Il se situe à l'Ouest de Sidi Fredj (figure 14). Son débit est estimé à environ  $7.566 \text{ m}^3/\text{s}$  (43.8 millions  $\text{m}^3/\text{année}$ ), pendant la période de Décembre à Avril. Il possède un bassin versant de  $1850 \text{ km}^2$ .

**Oued Nador** : situé dans la partie occidentale de la baie entre Tipaza et le Mont Chenoua (figure 14). Son bassin versant est drainé par un réseau d'affluents : les Oueds Bou Yersen, Bou Haroun et Oued Merad, qui jouent un rôle important dans les apports en eaux usées et sédiments. Son étendue est de  $300 \text{ km}^2$  avec un débit de  $0.89 \text{ m}^3/\text{s}$  (28 millions  $\text{m}^3/\text{année}$ ). Il débouche sous forme d'un collecteur dans la petite Baie du Chenoua, entre Djebel Chenoua et Tipaza (ANRH, 2013).



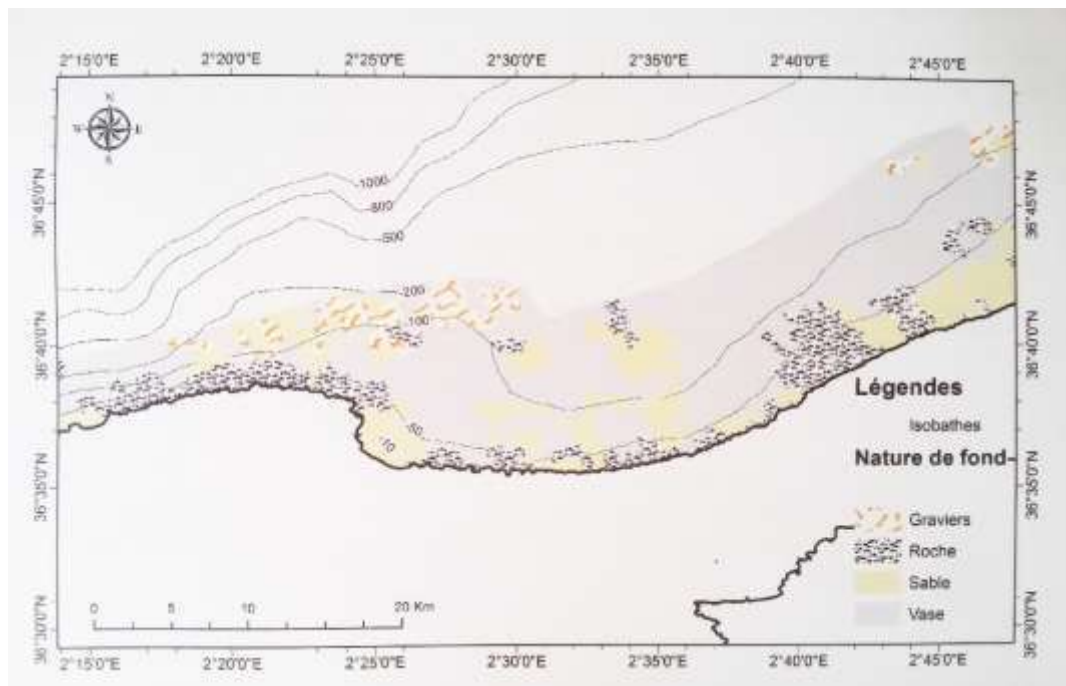
**Figure 14.** Réseau hydrographique de la baie de Bou Ismail

## 2.3 Sédimentologie de la baie de Bou Ismail

Les apports des trois oueds de la baie de Bou Ismail, plus particulièrement ceux de l'oued Mazafran, contribuent à la sédimentation des fonds de la baie. Les divers faciès sédimentaires identifiés en baie de Bou Ismail sont principalement : les vases pures et les graviers. Les sables fins couvrent l'ensemble des petits fonds des baies d'El Djamilia et du Chenoua, et du secteur s'étendant de la presqu'île de Sidi Fredj à Douaouda-Marine, et tapissent le fond de 15 m à 25 m tout le large de la baie (Grimes S., et al., 2004).

Les sables grossiers sont localisés à une zone côtière restreinte et jusqu'à une profondeur de 25m en face de Ras Acrata et au niveau de l'embouchure de l'oued Mazafran, au-delà de ce dépôt fluvio-marin et jusqu'à une profondeur de 10 à 15 m, les sables moyens apparaissent au niveau de Khemisti sur une zone étroite qui continue jusqu'à Tipaza.

D'une manière générale, la baie de Bou Ismail se caractérise par une distribution classique des sédiments de la côte vers le large : sables fins, sédiments de transition, vases pures (Grimes S., et al., 2004).



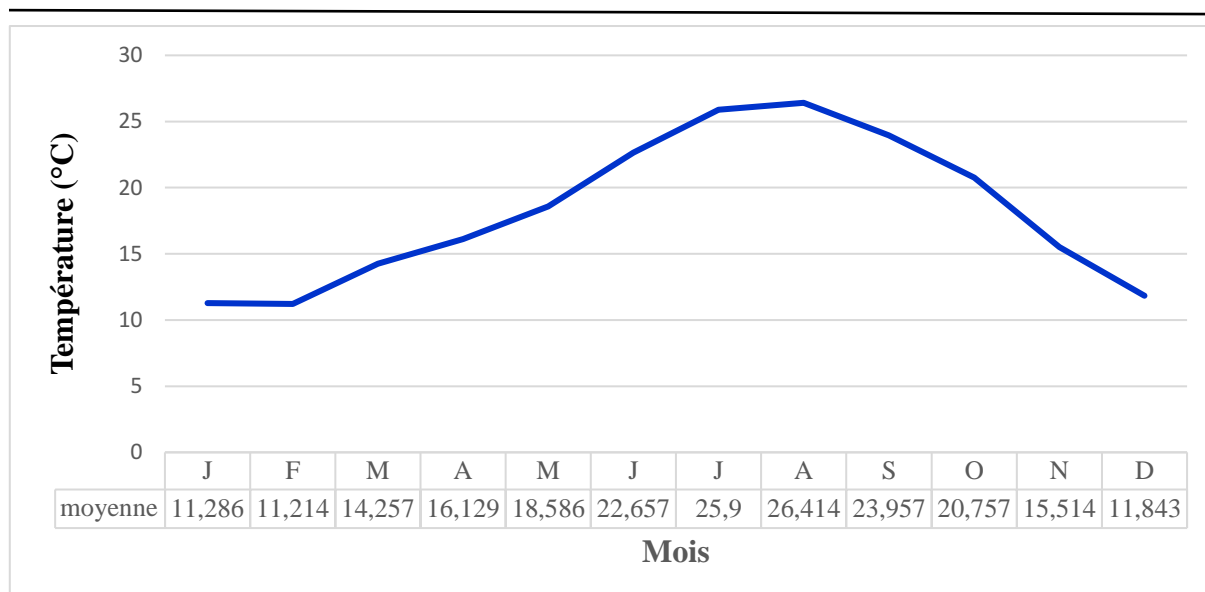
**Figure 15.** Carte sédimentologique de la baie de Bou-Ismaïl (Bachouche, 2017)

## 2.4 Climatologie

Les données climatiques suivantes sont téléchargées à partir du site <https://fr.tutiempo.net/> et précisément de la station météorologique : 603900 (DAAG). Ce site fournit des informations de tous les pays du monde entier avec des données historiques.

### 2.4.1 Température de l'air

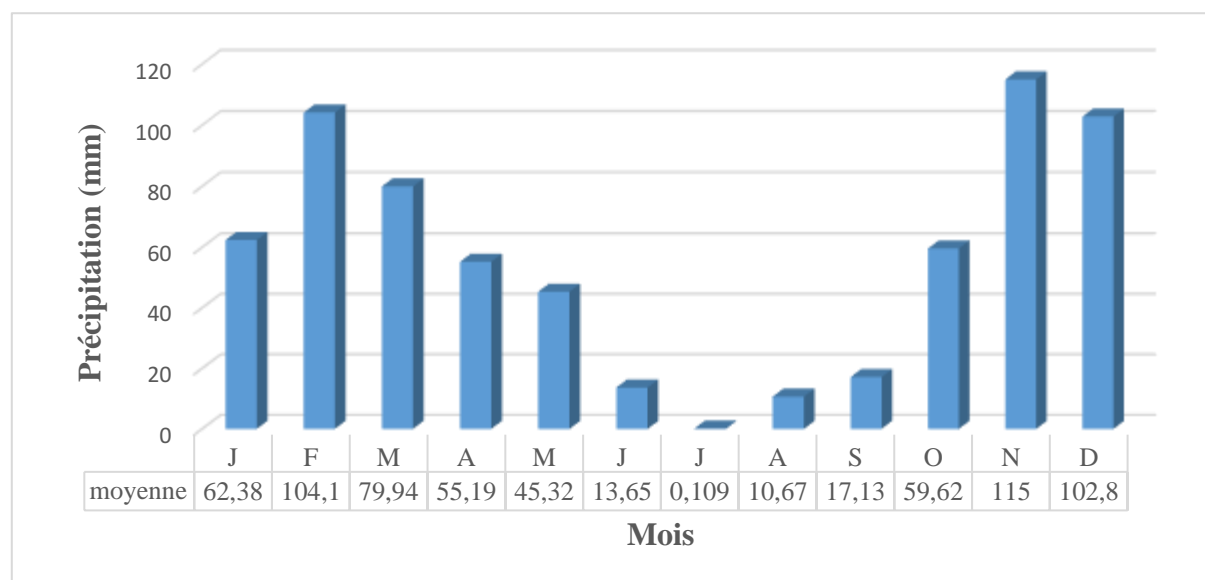
Le tableau sur la figure ci-après récapitule les valeurs mensuelles moyennes de la température de l'air de la Willaya de Tipaza, de l'année 2010 jusqu'à l'année 2016. Cette région est caractérisée par un climat méditerranéen qui se distingue par deux périodes dans le cycle annuel ; une période chaude (entre mai et octobre) et une autre froide (couvre les autres mois de l'année). Les températures varient entre un minimum de 11.21°C enregistrée durant le mois de Février et un maximum de 26.41°C enregistrée durant le mois d'Août.



**Figure 16.** Températures mensuelles moyennes entre 2010 et 2016 de Bou Ismail

### 2.4.2 Pluviométrie

Les précipitations moyennes mensuelles enregistrées au niveau de cette région sont comprises entre 0,11 mm au mois d'Août et 114,99 mm au mois de Novembre. Dans l'ensemble, les moyennes mensuelles des précipitations sont plus importantes en période froide qu'en période sèche (période d'été).



**Figure 17.** Précipitations mensuelles moyennes entre 2010 et 2016 de Bou Ismail

### 2.4.3 Vents

Dans la baie de Bou Ismail, le régime du vent change entre la période hivernale et estivale. Lors de la période hivernale (Novembre-Mars) les vents dominants ont une direction Ouest et

Nord-Ouest, mais la période estivale (Avril-Octobre) est caractérisée par des vents de secteur Est et Nord-Est.

**Tableau 5.** *Les vitesses moyennes mensuelles du vent de l'année 2010 jusqu'à l'année 2016*

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
Vitesse du vent (km/h)	10	11.9	11.5	10.7	11.1	11.3	11.7	11.2	10.3	8.71	9.66	7.81

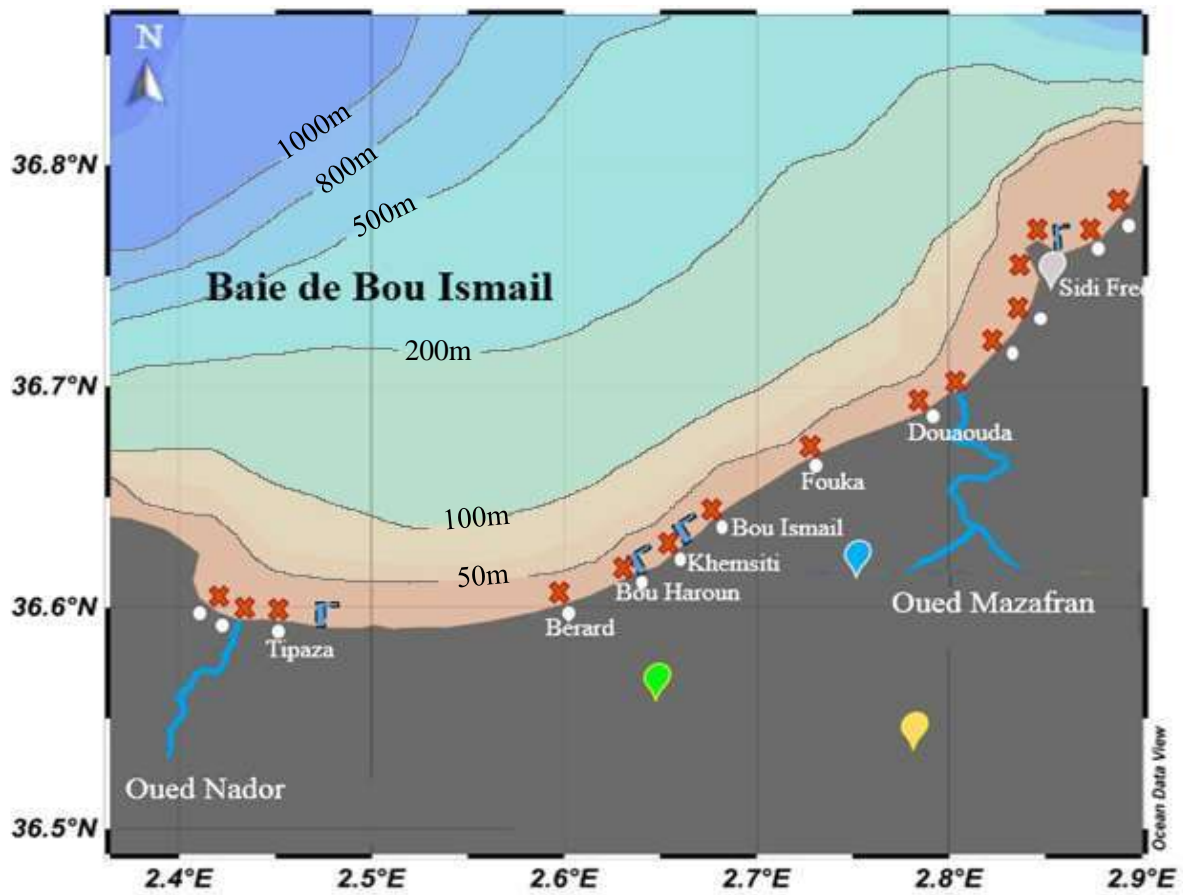
## 2.5 Les sources de pollution dans la baie de Bou Ismail

La baie de Bou Ismail est considérée comme une zone touristique soumise principalement aux rejets domestiques des villes et des complexes touristiques qui se déversent directement dans le milieu naturel sans aucun traitement au préalable. Ainsi, les rejets d'eaux usées véhiculées par les oueds qui traversent les centres urbains et drainent les eaux de ruissellement des terres agricoles, des effluents urbains et industriels ; à cela s'ajoute la pollution due à l'activité de la pêche (LEM, 1998). D'après les données statistiques du Ministère de l'Aménagement de Territoire et de l'Environnement 37 points de rejets d'eau usées collectées par le réseau d'assainissement se déversent directement en mer sans aucun traitement (tableau 6 & Fig.17).

Les terres agricoles se trouvant dans cette baie, sont fertilisées par des produits phytopharmaceutiques tels que les organochlorés, et les engrais à base de nitrate, de phosphate et de potassium, ensuite par le biais du ruissellement ces produits contaminent les eaux superficielles marines (Grimes S., et al., 2004).

**Tableau 6.** *Débit des rejets d'eau usée dans la baie de Bou Ismail (Ministère de l'Aménagement de Territoire et de l'Environnement (in (Inal, 2011))*

Communes	Nombre de rejets	Débit (m <sup>3</sup> .j <sup>-1</sup> )	Lieu de rejet
Bou-Ismaïl	9	4000	Mer
Bou-Haroun	4	320	Mer
Khemisti	6	400	Oued Khemisti et Mer
Fouka	5	3600	Mer
Douaouda	5	1600	Oued Mazafran et Mer
Tipaza	8	7140	Mer



**Figure 18.** Les principales sources de pollution dans la baie de Bou Ismail

Légende

- Agglomérations
- ✕ Rejets d'eaux usées
- ⌚ Ports
- 📍 Office national des aliments de bétail d'Attaba
- 📍 Base centrale logistique de Béni Mered
- 📍 Unité Satti de Koléa
- 📍 Thalassothérapie

# *Matériel et Méthodes*

---

## 3 Matériel et méthodes

### 3.1 Données satellitaires

Afin d'étudier la concentration de la chlorophylle, la matière en suspension et la turbidité dans la baie de Bou Ismail, on s'est basé sur des données satellitaires fournies par :

- Le capteur OLI du satellite Landsat-8 : il s'agit de données de radiances brutes dans chacune des 9 bandes que l'on peut obtenir gratuitement sur le site de l'agence gouvernementale américaine <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- Le capteur MSI du Sentinel-2 : il s'agit de données de niveau 2, c'est-à-dire des réflectances de 36 bandes spectrales que l'on peut obtenir gratuitement sur le site de Copernicus <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.

Dans ce qui suit, la procédure de téléchargement des images ainsi que leur traitement jusqu'à l'élaboration des cartes de chaque paramètre étudié.

#### 3.1.1 Acquisition des données OLI Landsat-8

Les images satellitaires sont disponibles sur le site Web : <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Pour l'acquisition des données, on a suivi les étapes suivantes :

**Etape n°1** : S'inscrire sur le site précédemment cité (Fig.46/Annexe 2).

**Etape n°2** : Faire un zoom sur la zone d'étude si elle bien connue par l'acquéreur de l'image, ou entrer son adresse dans le champ de saisie comme le montre la figure ci-après. Délimiter la zone d'étude en traçant un polygone par des simples clics sur la carte (Fig.47/Annexe 2).

**Etape n°3** : Déterminer la date de l'image que l'on veut obtenir avec précision en se basant directement sur le calendrier disponible, ou entrer un intervalle de temps pour obtenir toutes les images possibles que le capteur a pu collecter durant cet intervalle (Fig.48/Annexe 2).

**Etape n°4** : Sélectionner les données Landsat Archive de niveau 1 pour télécharger les radiances brutes de l'image sur laquelle se porte notre intérêt, puis choisir le satellite Landsat-8 pour avoir les données de capteurs OLI/TIRS (Fig.49/Annexe 2).

**Etape n°5** : Appuyer sur « Results », plusieurs imageries s'affichent, ce qui permet de visualiser l'extension spatiale de l'image proposée, sa qualité ou sa couverture nuageuse. Il convient donc de sélectionner l'image adéquate et qui représente le mieux notre zone d'intérêt (Fig.50/Annexe 2).

---

On a choisi un produit de niveau 1 GeoTIFF, car il contient toutes les métadonnées dont on a besoin, l'image est ensuite téléchargée sous forme d'archives zippées contenant toutes les 11 bandes des deux capteurs rassemblés (OLI/ TIRS).

### 3.1.2 Traitement et analyse des données OLI Landsat-8

Dans cette étude, on utilise les données recueillies pour faire une corrélation entre la réflectance et les données in-situ de la chlorophylle ou de la turbidité. Mais les données correspondent à des mesures de radiance, d'où la nécessité de passer par un calcul de la réflectance des différentes bandes.

Le calcul des réflectances a été effectué à l'aide du logiciel ENVI (version 5.1).

**Etape n°1** : Ouvrir l'image sur le logiciel ENVI à partir du menu « File », appuyer sur « open ». Choisir l'image de la bande multispectrale sur la boîte de dialogue qui apparaît (le fichier ayant une extension MTL).

**Etape n°2** : Calculer les réflectances en suivant cette procédure (Fig.51/Annexe 2) :

- A partir du menu Toolbox, sélectionner sur « Radiometric correction », choisir «Radiometric calibration ».
- Sur la boîte de dialogue qui s'affiche, sélectionner la bande multispectrale, ensuite choisir « Reflectance » à partir du menu « Calibration type » et enregistrer le lien.
- L'image contenant les réflectances calculées s'affiche automatiquement, il faut l'enregistrer sous format « Tiff » pour que l'on puisse l'ouvrir sur le logiciel SeaDAS.

**Etape n°3** : Afficher l'image avec la réflectance calculée associée sur le logiciel SeaDAS (Fig.52/Annexe 2).

### 3.1.3 Acquisition des données MSI Sentinel-2

Les images satellitaires sont disponibles sur le site Web: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> . Pour l'acquisition des données, on a suivi les étapes suivantes :

**Etape n°1** : s'inscrire sur le site précédemment cité (Fig.53/Annexe 2).


**Etape n°2** : Délimiter la zone d'étude en traçant un polygone par des simples clics sur la carte (Fig.54/Annexe 2).

**Etape n°3** : Faire rentrer les informations nécessaires dans le filtre (Fig.55/Annexe 2).

**Etape n°4** : Afficher l'image sur le logiciel SNAP (Fig.56/Annexe 2).

### 3.1.4 Extraction des données (OLI et MSI)

Les mêmes étapes ont été suivies sur les deux logiciels SeaDAS (Landsat-8) et SNAP (Sentinel-2).

**Étape n°1 :** Introduire les coordonnées des stations de prélèvements déjà effectués in-situ (sur le terrain) en appuyant sur l'icône , ensuite, extraire les données de toutes les bandes dans un fichier Excel afin de réaliser la calibration entre les données satellitaires et les données in situ (Fig.57/Annexe 2).

**Étape n°2 :** Cette étape consiste à faire une étude de corrélation entre les données in-situ et chacune des bandes ou leurs ratios afin d'établir le meilleur lien statistique possible.

### 3.1.5 Algorithmes de calcul des paramètres biogéochimiques

#### 3.1.5.1 Calcul de la chlorophylle

L'expression générale de l'algorithme empirique est la suivante :

$$[Chl_a \text{ in\_situ}] = a * \left( \frac{\lambda_{bleu}}{\lambda_{vert}} \right) + b$$

$a$  et  $b$  sont déterminés de façon empirique.

#### Landsat-8

L'étude des différentes corrélations possibles entre les données in-situ et les bandes de la partie visible du spectre ou leur ratio (Annexe 2), a révélé un coefficient de détermination  $R^2 = 0.8721$  et un écart-moyen de 0.0607, établi par une corrélation linéaire entre les données in-situ et le ratio  $\left( \frac{R_{482.6}}{R_{561.3}} \right)$ .

Le numérateur est choisi dans les longueurs d'onde du bleu (482.6 nm), où l'absorption par la chlorophylle est la plus forte. A l'inverse, le dénominateur correspond à une longueur d'onde dans le vert (561.3 nm), où l'absorption par la chlorophylle est minimale.

A partir de l'équation de corrélation obtenue qui représente notre algorithme empirique pour l'estimation de la concentration de la Chl-a satellitaire, on peut déduire les concentrations de la Chl-a dans toute la baie pendant la période hivernale (les données in-situ ont été faites en hiver).

Une comparaison avec les algorithmes 'Ocean Color' de la NASA a été réalisée.

**Tableau 7.** Détermination du coefficient de corrélation des différents ratio par une régression linéaire OLI

<b>R<sub>rs</sub>_Ratio</b>	<b>Type de corrélation</b>	<b>Coefficient de détermination (R<sup>2</sup>)</b>	<b>Coefficient de corrélation (r)</b>	<b>Ecart-type moyen</b>
<b>R<sub>443</sub>/R<sub>561</sub></b>	Linéaire	0.7204	0.8487	0.0624
<b>R<sub>482</sub>/R<sub>561</sub></b>	Linéaire	0.7606	0.8721	0.0607
<b>R<sub>482+443</sub>/R<sub>561</sub></b>	Linéaire	0.7420	0.8613	0.0618

Sentinel-2

L'étude des différentes corrélations possibles entre les données in-situ et les bandes de la partie visible du spectre ou leur ratio (Annexe 4), a révélé un coefficient de détermination R<sup>2</sup> = 0.7065 et un écart-moyen de 0.06137, établi par une corrélation linéaire entre les données in-situ et le ratio  $\left(\frac{R_{496.6}}{R_{560}}\right)$ .

A partir de l'équation de corrélation obtenue qui représente notre algorithme empirique pour l'estimation de la concentration de la Chl-a par MSI, on peut déduire les concentrations de la Chl-a dans toute la baie pendant la période hivernale. Une comparaison avec les algorithmes 'Ocean Color' a été réalisée.

**Tableau 8.** Détermination du coefficient de corrélation des différents ratio par une régression linéaire MSI

<b>R<sub>rs</sub>_Ratio</b>	<b>Type de corrélation</b>	<b>Coefficient de détermination (R<sup>2</sup>)</b>	<b>Coefficient de corrélation (r)</b>	<b>Ecart-type moyen</b>
<b>R<sub>443.9</sub>/R<sub>560</sub></b>	Linéaire	0.5734	0.7572	0.0344
<b>R<sub>496.6</sub>/R<sub>560</sub></b>	Linéaire	0.7065	0.8405	0.0614
<b>R<sub>496.6+R<sub>443.9</sub></sub>/R<sub>560</sub></b>	Linéaire	0.6258	0.7911	0.0350

**3.1.5.2 Calcul de la turbidité**

De même, on établit l'expression générale de l'algorithme d'estimation de la turbidité :

$$[Turbidité\ in\_situ] = a * \left( \frac{\lambda_{rouge}}{\lambda_{vert\ ou\ bleu}} \right) + b$$

*a* et *b* sont déterminés de façon empirique.

Landsat-8

L'étude des différentes régressions possibles entre les données in-situ et les bandes de la partie visible du spectre ou leur ratio (Annexe 3), a révélé un coefficient de détermination  $R^2 = 0.8615$  et un écart-moyen de 0.3190, établi par une corrélation linéaire entre les données in-situ et le ratio  $\left(\frac{R_{654.6}}{R_{561.3}}\right)$ .

Le numérateur est choisi dans les longueurs d'onde du rouge (654.4 nm), qui correspondent au maximum d'absorption de la matière en suspension (sachant que la Chl-a absorbe aussi dans le rouge), le dénominateur correspond à une longueur d'onde dans le vert (561.3 nm), c'est la même longueur d'onde réfléchiée par les pigments chlorophylliens ce qui induit une erreur lors de la détection du signal.

**Tableau 9.** Détermination du coefficient de corrélation des différents ratios par une régression linéaire OLI

<b>R<sub>rs</sub>_Ratio</b>	<b>Type de corrélation</b>	<b>Coefficient de détermination (R<sup>2</sup>)</b>	<b>Coefficient de corrélation (r)</b>	<b>Ecart-type moyen</b>
<b>R<sub>654.6</sub>/R<sub>561.3</sub></b>	Linéaire	0,8615	0.9282	0,3190
<b>R<sub>654.6</sub>/482.6</b>	Linéaire	0,8350	0.9138	0,3202
<b>R<sub>654.6</sub>/443</b>	Linéaire	0,8232	0.9073	0,3042

A partir de l'équation de corrélation obtenue qui représente notre algorithme empirique pour l'estimation de la turbidité satellitaire, on peut déduire les valeurs de la turbidité dans toute la baie pendant la période hivernale (les données in-situ ont été faites en hiver).

Sentinel-2

L'étude des différentes régressions possibles entre les données in-situ et les bandes de la partie visible du spectre ou leur ratio (Annexe 5), a révélé un coefficient de détermination  $R^2 = 0.7913$  et un écart-moyen de 0.256, établi par une corrélation linéaire entre les données in-situ et le ratio  $\left(\frac{R_{664.5}}{R_{560}}\right)$ .

**Tableau 10.** Détermination du coefficient de corrélation des différents ratios par une régression linéaire MSI

<b>R<sub>rs</sub>_Ratio</b>	<b>Type de corrélation</b>	<b>Coefficient de détermination (R<sup>2</sup>)</b>	<b>Coefficient de corrélation (r)</b>	<b>Ecart-type moyen</b>
<b>R<sub>664.5</sub>/R<sub>560</sub></b>	Linéaire	0.7913	0.8896	0.2564
<b>R<sub>664.5</sub>/R<sub>496.6</sub></b>	Linéaire	0.7024	0.8381	0.2786
<b>R<sub>664.5</sub>/R<sub>443.9</sub></b>	Linéaire	0.6791	0.8241	0.2777

Remarque : d'après Aminot et al (1983), lorsque la concentration de la matière en suspension est inférieure à 5 mg/l et la turbidité ne dépasse pas 1 NTU, il est très précis d'utiliser les valeurs de la turbidité pour étudier les particules en suspensions. Et dans notre zone d'étude, les valeurs de la turbidité sont inférieures à 1 NTU et les MES ne dépassent pas 5 mg/l. C'est pour cette raison qu'on a utilisé la turbidité dans notre travail.

### 3.1.6 Application de l'algorithme

On résume les points essentiels à aborder lors de l'extrapolation de l'algorithme sur toute la baie ainsi que la construction d'une carte de la chlorophylle et de la turbidité sur le logiciel ODV (Ocean Data View).

**Étape 1 :** sur le logiciel SeaDAS (pour le Landsat) et le logiciel SNAP (pour Sentinel), tracer le polygone couvrant toute la zone d'intérêt avec précision en utilisant l'outil encadré en rouge sur la figure ci-après (Fig.58/Annexe 2).

**Étape 2 :** Extraire les données de cette géométrie sur un fichier Excel par un clic droit, le menu contextuel s'affiche, choisir « Export Mask Pixels », ensuite, sélectionner « geometry » et enregistrer le fichier texte. Appliquer l'algorithme prédéterminé sur l'ensemble de données sur Excel (Fig.59/Annexe 2).

### 3.1.7 Calcul d'erreur sur l'algorithme empirique

Un calcul d'erreur a été effectué sur les algorithmes empiriques construits dans ce travail.

La formule utilisée pour les deux paramètres ; Chl-*a* et turbidité, est la suivante :

$$E = \frac{((\sum_{i=1}^n |C_{insitu} - C_{mod}|) / n)}{C_{moy}} * 100 \quad (18)$$

Avec :

---

$E$  : l'erreur sur le modèle.

$C_{insitu}$ : Concentration *in-situ*.

$C_{mod}$ : Concentration modelée.

$C_{moy}$ : Concentration moyenne des données *in-situ*.

$n$  : Nombre de points.

### **3.2 Données *in-situ***

Les analyses ont été effectuées dans les Laboratoires de l'ENSSMAL à Dely Ibrahim. Les méthodes d'analyses suivent les procédures décrites dans le manuel des analyses chimiques en milieu marin d'Aminot et Chaussepied (1983) et Aminot et Kérouel (2004).

#### **3.2.1 Sortie en mer**

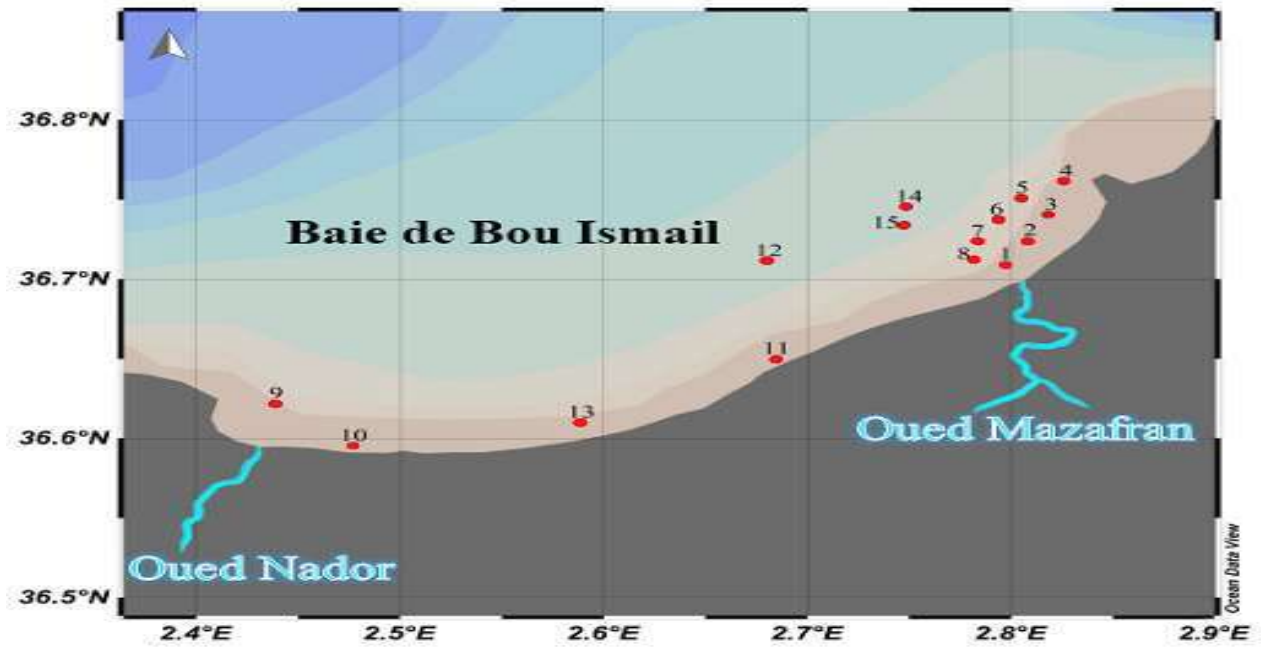
Trois sorties en mer ont été effectuées dans la baie de Bou Ismail, le 12, 26 et 28 Mars 2017 (selon la disponibilité du bateau et les conditions météo). Notre travail consiste à prélever des échantillons d'eau de mer, sur l'ensemble de la baie de Bou Ismail en se concentrant sur l'embouchure d'oued Mazafran. Quinze stations ont été échantillonnées afin de couvrir toute la baie.

#### **3.2.2 Les conditions météorologiques**

Temps ensoleillé, avec une température de l'air maximale de 20°C et minimale de 17°C. Mer calme pendant toute la journée (les 3 jours de la sortie).

#### **3.2.3 Choix et localisation des stations**

La figure ci-dessous présente les différents points d'échantillonnage effectué durant la sortie en mer. La majorité des points ont été localisés autour de l'embouchure de l'Oued Mazafran qui est caractérisé par son haut débit. Les autres points ont été choisis de façon à balayer toute la baie.



**Figure 19.** Positionnement des stations de prélèvement

Le tableau suivant montre les coordonnées des stations échantillonnées.

**Tableau 11.** Les coordonnées géographiques des stations d'échantillonnage

N° Station	Latitude	Longitude	Profondeur (m)	Emplacement de la station
La 1 <sup>ère</sup> sortie (12/03/2017)				
1	36° 42' 32.05"	2° 47' 50.04"	5	Face oued Mazafran
2	36° 43' 26.64"	2° 48' 28.60"	5	Face oued Mazafran
3	36° 44' 26.08"	2° 49' 4.74"	5	Face oued Mazafran
4	36° 45' 42.06"	2° 49' 32.39"	5	Face oued Mazafran
5	36° 45' 3.01"	2° 48' 17.47"	5	Face oued Mazafran
6	36° 44' 15.23"	2° 47' 36.46"	5	Face oued Mazafran
7	36° 43' 26.49"	2° 47' 1.52"	5	Face oued Mazafran
8	36° 42' 43.63"	2° 46' 54.38"	5	Face oued Mazafran
La 2 <sup>ème</sup> sortie (26/03/2017)				
12	36° 42' 41.83"	2° 40' 47.98"	5	Large de la baie
14	36° 44' 44.12"	2° 44' 55.48"	5	Large de la baie
15	36° 44' 2.26"	2° 44' 49.57"	5	Large de la baie
La 3 <sup>ème</sup> sortie (28/03/2016)				
9	36° 37' 18.31"	2° 26' 20.88"	5	Face oued Nador
10	36° 35' 43.51"	2° 28' 36.80"	5	kouâli
11	36° 38' 58.92"	2° 41' 4.61"	5	Bou Ismail
13	36° 36' 35.71"	2° 35' 18.60"	5	Bouharroun

### 3.2.4 Conditionnement du matériel

Le matériel utilisé lors de la sortie en mer a été conditionné comme suit :

- Rinçage à l'eau de robinet.
- Rinçage à l'eau acidulée préparée à partir d'acide chlorhydrique à 0.1 N.
- Rinçage à l'eau distillée.
- Séchage à l'étuve à 70 °C.

### 3.2.5 Prélèvement de l'eau de mer

Le prélèvement des échantillons a été effectué à l'aide de la bouteille Niskin de 5 L de capacité. Une fois les bouteilles de prélèvements remontées à bord, on rince deux fois nos flacons avec l'eau de mer à analyser, puis on remplit chaque flacon de façon à ne pas provoquer des contaminations sur nos échantillons. Ces échantillons sont destinés à l'analyse des paramètres suivants :

**Tableau 12.** *Les paramètres destinés à l'analyse et le nombre des échantillons*

Paramètre	Nombre d'échantillon	Matériel	Volume	Lieu d'analyse
Température	Mesurée in-situ	-	-	Bateau
Salinité	Mesurée in-situ	-	-	Bateau
Chl-a	15	Flacon en plastique	1.5 L	Laboratoire
MES	15	Flacon en plastique	1 L	Laboratoire
Turbidité	15	Flacon en plastique	100 ml	Laboratoire
Phytoplancton	15	Flacon en plastique	250 ml	Laboratoire

Ces échantillons ont été par la suite conservés dans des glacières (à une température basse et à l'abri de la lumière) et transportés directement au laboratoire.

### 3.2.6 Mesure des paramètres biogéochimiques

#### 3.2.6.1 La chlorophylle-a

##### Principe de la mesure de la chlorophylle-a

Dans cette étude, la mesure des pigments chlorophylliens se base sur leurs caractéristiques spectroscopiques ; absorption de lumière (spectrophotométrie). La chlorophylle *a* présente deux bandes de forte absorption lumineuse, l'une dans le bleu (< 460 nm), l'autre dans le

---

rouge (630-670 nm). Comme les caroténoïdes, co-extraits avec les chlorophylles, absorbent eux aussi intensément dans le bleu, les mesures spectrophotométriques sont limitées aux bandes d'absorption dans le rouge. La chlorophylle *a* est un paramètre « particulière » qui, pour une mesure précise en laboratoire, nécessite la récolte du matériel en suspension par filtration, suivie d'une extraction du filtre par solvant (Aminot, et al., 2004).

### **Analyse au laboratoire**

L'analyse de la chlorophylle-*a* passe impérativement par 4 étapes (méthodes non séparatives). Tout au long de la procédure d'analyse, il faut manipuler à l'abri de la lumière pour éviter la dégradation de la chlorophylle en phéopigments (Aminot, et al., 2004).

#### **a. Filtration des échantillons**

Les pigments chlorophylliens font partie du matériel particulaire, d'où l'intérêt de procéder à une filtration. Après l'échantillonnage, l'eau doit être le plus rapidement possible filtrée.

La filtration des échantillons se fait comme suit :

- Préparation du système de filtration, en reliant la rampe de filtration avec la bouteille de la récupération de l'eau et cette dernière avec la pompe de pression (pompe de la mise sous vide).
- Rinçage des entonnoirs de la rampe par l'eau distillée.
- A l'aide d'une éprouvette et après une homogénéisation de l'échantillon par des mouvements de rotation, mesurer 1.5 L de l'échantillon.
- Par une pince, placer un filtre de type GF/F de porosité 0.7  $\mu\text{m}$  sur la base de l'entonnoir.
- Verser l'échantillon dans l'entonnoir, appliquer le vide et s'assurer que la dépression n'est pas excessive (0,2 bar).
- Juste avant que le filtre ne vienne à sec, rincer les parois de l'entonnoir avec un peu d'eau distillée.
- Après assèchement du filtre, laisser fluer l'air quelques instants pour éliminer l'eau du filtre.
- Si l'échantillon n'a pas été préfiltré, éliminer à la pince, si nécessaire, le zooplancton visible à l'œil nu sur le filtre.
- A l'aide de deux pinces, plier le filtre une première fois, face chargée à l'intérieur, plier une seconde fois le filtre et l'introduire dans le tube pour l'extraction.

- Si une extraction immédiate n'est pas possible, envelopper le tube avec une feuille d'aluminium pour le conserver au congélateur à  $-20^{\circ}\text{C}$ .

### **b. L'extraction des pigments chlorophylliens**

Pour l'extraction on utilise l'acétone comme un solvant d'extraction, le solvant recommandé selon Aminot et al (1983). Ce dernier fait extraire et disperser les pigments chlorophylliens des chloroplastes dans le milieu, ce qui facilite leur analyse ultérieurement, on procède comme suit :

- Introduire le filtre plié dans le tube à centrifuger, ajouter 5 ml ( $\pm 0.4$ ) d'acétone (dans un premier temps) pour éviter le débordement du solvant.
- Déchiqueter le filtre à l'aide d'une baguette en verre et bien agiter, ceci aide à disperser les fibres dans le milieu.
- Rajouter les 5 ml ( $\pm 0.4$ ) restants du solvant, boucher le tube, pour éviter une volatilisation éventuelle de l'acétone.
- Laisser agir une nuit au réfrigérateur.

### **c. Centrifugation**

Le but de cette étape c'est de séparer la fraction lourde (fragments du filtre) de la fraction légère (la chlorophylle ainsi que ses dérivés). A cette fin, on utilise une centrifugeuse de la marque SIGMA 2-6 (Fig.34), ensuite, on récupère le surnageant à l'aide d'une micropipette.



**Figure 20.** *La centrifugeuse SIGMA 2-6*

- Placer les tubes dans la centrifugeuse, tout en gardant l'équilibre du rotor.
- Fixer la centrifugeuse à 3500 tour/minute et centrifuger pendant 5 minutes environ.
- Cinq minutes écoulées, retirer les tubes pour remettre en suspension les fibres plaquées contre les parois des tubes.
- Refaire une deuxième centrifugation qui peut aller jusqu'à 10 à 15 minutes à la même vitesse.

#### **d. Analyse par spectrophotomètre**

Une fois la centrifugation est achevée, transférer le surnageant de centrifugation dans la cuve de mesure en le prélevant par aspiration lente, en veillant à ne pas prendre les fibres avec, puis, on mesure l'absorbance à 665 nm (longueur d'onde caractéristique de la chlorophylle) à l'aide d'un spectrophotomètre de la marque JASCO V-730 (Fig.35).



**Figure 21.** *Le spectrophotomètre JASCO V-730*

L'absorbance mesurée par le spectrophotomètre est due à plusieurs composants : le solvant, la chlorophylle, les phéopigments et les fibres du filtre, d'où la nécessité de corriger l'absorbance par rapport à toutes ces interférences.

Pour estimer l'absorbance due à la turbidité, on passe le même échantillon au spectrophotomètre mais à 750 nm (longueur d'onde à laquelle absorbent les fibres du filtre).

Les dérivés de la chlorophylle sont susceptibles d'induire une erreur énorme, car ils absorbent presque à la même longueur d'onde caractéristique de la chlorophylle (~665nm) ; la solution sera donc d'acidifier l'échantillon par quelques gouttes d'acide chlorhydrique (HCl 0.3N) pendant 2 à 5 minutes pour décomposer la totalité des pigments chlorophylliens en phéopigments. Ensuite, on mesure l'absorbance aux deux longueurs d'onde précédemment décrites.

#### Mode opératoire

- Lancer le logiciel pour le spectrophotomètre JASCO V-730.
- Fixer les deux longueurs d'onde auxquelles on effectue la mesure 665 nm et 750 nm.

- Dans une cuve, verser 3 ml environ d'acétone, puis tarer l'appareil en appuyant sur l'icône « Auto zéro », pour ne pas prendre en considération, lors de la mesure, l'absorbance due au solvant ainsi de la cuve elle-même.
- Rincer la cuve une fois avec un peu de l'extrait à analyser.
- Transférer dans la cuve assez de volume pour faire la mesure.
- Vérifier la propreté des faces de la cuve et la positionner correctement sur le portoir.
- Mesurer les absorbances brutes de l'extrait non acidifié aux longueurs d'ondes de 665 et 750 nm, en appuyant sur l'icône « Sample ».
- Sortir la cuve et ajouter l'acide chlorhydrique 0,3 N à raison de 10 à 20 µl par millilitre d'extrait.
- Laisser agir l'acide entre 2 et 5 min (mais pas plus).
- Mesurer à nouveau les absorbances brutes des extraits acidifiés à 665 et 750 nm.
- Rincer plusieurs fois la cuve au solvant pour éliminer toute trace d'acidité de l'échantillon précédent, et faire la même chose pour les autres échantillons.

On aura donc :

$$\text{Avant acidification : } Abs_{éch-665}^{NA} = Abs_{665} - Abs_{750} \quad (19)$$

$$\text{Après acidification : } Abs_{éch-665}^A = Abs_{665} - Abs_{750} \quad (20)$$

Après avoir corrigé l'absorbance, on peut déduire aisément la concentration de la chlorophylle dans l'échantillon prélevé en appliquant la formule suivante :

$$[Chl_a](\mu g/l) = 27.7 * (Abs_{éch-665}^{NA} - Abs_{éch-665}^A) * \frac{v}{V * l} \quad (21)$$

$$[\text{Phéopigments } a](\mu g/l) = 27.7 * [(1.7 * Abs_{éch-665}^A) - Abs_{éch-665}^{NA}] * \frac{v}{V * l} \quad (22)$$

Avec :

$V$  : volume d'eau filtrée (*litre*).

$v$  : volume de solvant d'extraction (*millilitre*).

$l$  : longueur du trajet optique de la cuve de mesure (*centimètre*).

$Abs_{éch-665}^{NA}$  : absorbance de l'échantillon non acidifié à 665 nm.

$Abs_{éch-665}^A$  : absorbance de l'échantillon acidifié à 665 nm.

### 3.2.6.2 Calcul d'incertitude

L'incertitude sur la concentration de la chlorophylle peut être calculée par la formule suivante :

$$\delta[Chl_a] = [Chl_a] * \sqrt{\left(\frac{\delta v}{v}\right)^2 + \left(\frac{\delta V}{V}\right)^2} \quad (23)$$

- $\delta[Chl_a]$  : incertitude sur la concentration de la Chl-a.
- $[Chl_a]$  : concentration de la Chl-a.
- $\delta v$ : erreur sur le volume de la pipette utilisé.
- $v$ : volume pipeté de l'acétone (10 ml).
- $\delta V$ : erreur sur volume de la burette utilisé.
- $V$ : volume de l'échantillon filtré (litre).

### 3.2.6.3 La matière en suspension

#### Principe

La méthode consiste à filtrer l'eau de mer sur membrane filtrante afin de retenir toutes les particules de taille supérieure à 0,5  $\mu\text{m}$  environ. La membrane est rincée, séchée à 105 °C et pesée avant et après filtration. La différence de poids permet de connaître la masse sèche totale de matières en suspension dans le volume filtré correspondant (Aminot, et al., 2004).

#### Analyse au laboratoire

##### a. Conditionnement des filtres

- Mettre les filtres de fibre de verre de 0.7  $\mu\text{m}$  de porosité au four à 450-500 °C pendant 1 h environ pour éliminer toute substance organique.
- A l'aide du système de filtration, laver abondamment les membranes à l'eau distillée en les plaçant sur la base du support-filtre sous un très léger vide.
- Déposer les filtres dans leurs boîtes, mettre les boîtes, sans leur couvercle, à l'étuve (70 à 105 °C).
- Laisser les filtres sécher environ 6 heures.
- Sortir les boîtes à filtres de l'étuve, replacer les couvercles et mettre aussitôt les boîtes au dessiccateur.
- Numéroter les filtres de façon indélébile.
- Peser chaque filtre. Soit  $P_1$  ce poids.
- Conserver les filtres dans leurs boîtes à l'abri de la poussière dans un dessiccateur.

**b. Filtration**

- Homogénéiser l'échantillon.
- Mesurer le volume à filtrer à l'aide d'une éprouvette.
- Placer un filtre dans le dispositif de filtration.
- Verser l'échantillon sur le filtre puis appliquer le vide, veiller à ne pas amener le filtre à sec.
- Rincer les parois de l'entonnoir à l'eau distillée.
- Remettre chaque filtre dans sa boîte numérotée.
- Avant de passer un autre échantillon, rincer les parois de l'entonnoir à l'eau acidulée puis à l'eau distillée.
- Conserver les boîtes au frais et à l'abri de la lumière ou les sécher immédiatement à 70°C pendant 6 heures.
- Sortir les boîtes à filtres de l'étuve. Les laisser refroidir dans le dessiccateur.
- Peser chaque filtre. Soit  $P_2$  ce poids.

La concentration de MES est donnée par l'expression :

$$MES (mg/l) = (P_2 - P_1)/V \quad (24)$$

- $P_1$ : le poids du filtre avant filtration (mg).
- $P_2$ : le poids du filtre après filtration (mg).
- $V$  : le volume filtré (litre).

**3.2.6.4 La turbidité**

La mesure de la turbidité consiste à déterminer la dispersion et l'absorption de la lumière, il s'agit donc d'un paramètre lié à la présence des particules en suspension (Aminot et Chaussepied, 1983). Pour ce faire, on s'est servi d'un turbidimètre optique de la marque HANNA.



**Figure 22.** Un turbidimètre optique

### Principe de la méthode

- Rincer la cuve une fois avec un peu de l'extrait à analyser.
- Remplir le flacon avec de l'échantillon à analyser.
- Vérifier la propreté du flacon avant de le positionner sur le portoir.
- Mesurer l'absorbance correspondante en appuyant sur « read »

### 3.2.7 Les flux de la matière en suspension

La quantification des flux de MES nécessite de connaître à la fois les concentrations des matières en suspension et le débit d'oued écoulé dans la mer. Selon (Doxaran, et al., 2015), le flux MES pour chaque mois, peut être calculé en multipliant la concentration mensuelle de MES (en grammes par mètre cube) par le débit mensuel déversé par la rivière (en mètre cube par seconde) et par la durée (en secondes) du mois :

$$Flux_{MES}(g) = C_{MES} * Q * 2\,592\,000 \quad (17)$$

Avec :

$Flux_{MES}$ : Flux de la matière en suspension déversé par mois en (g).

$C_{MES}$ : Concentration des matières en suspension en (g/m<sup>3</sup>).

$Q$ : Débit d'oued en (m<sup>3</sup>/s).

2592 000 : Durée du mois en secondes.

#### 3.2.7.1 Calcul du flux de la matière en suspension

Deux échantillons de MES ont été prélevés au niveau de l'oued Mazafran (le 1 Février et le 7 Mars 2017), on s'est focalisé sur ce dernier car il a le plus grand débit par rapport aux autres oueds de la baie (ANRH, 2017).

Le flux total de la matière en suspension est calculé à la surface, à partir de la relation de (Doxaran, et al., 2015) :

$$Flux_{MES}(g) = C_{MES} * Q * 2\,592\,000 \quad (25)$$

D'après cette formule, on doit d'abord passer par un calcul du débit des oueds. Pour ce faire, on applique la formule de Rolland (2006) comme suivant :

$$\log Q = \frac{1}{2.17} * \log MES + 2 \quad (26)$$

Ce qui nous donne :

$$Q = 10^{\left(\frac{1}{2.17} * \log MES + 2\right)} \quad (27)$$

Avec :

MES : Concentration de la matière en suspension de l'embouchure d'oued Mazafran (mg/l).

# *Résultats et discussion*

---

## **4 Résultats et discussion**

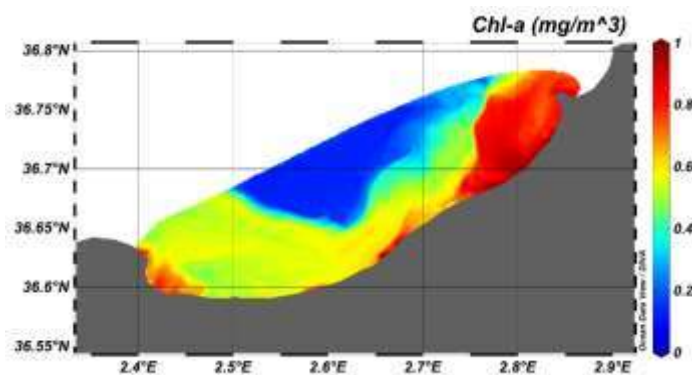
### **4.1 Résultats**

Ce dernier chapitre s'achève par une synthèse des principaux résultats obtenus de la chlorophylle-*a* et la turbidité, après application des algorithmes empiriques Landsat 8 et Sentinel-2A sur la baie de Bou Ismail. Ces résultats sont présentés sous forme de cartes visualisées sur ODV.

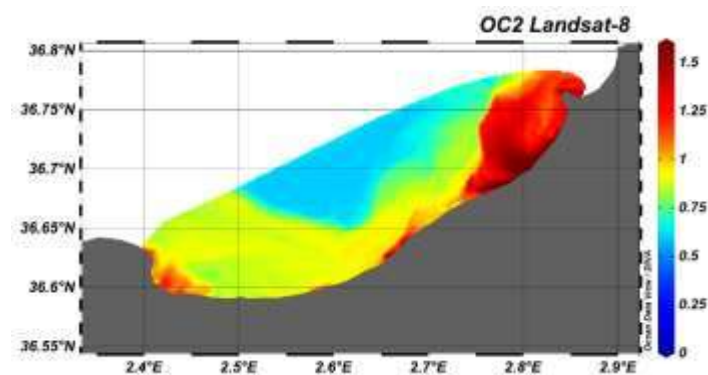
#### **4.1.1 Concentration de la Chl-a**

##### *Landsat-8*

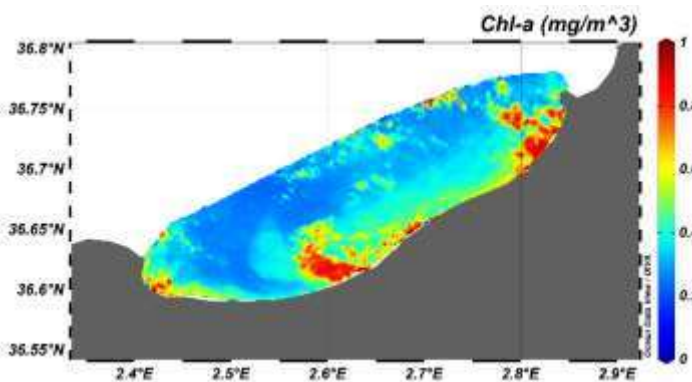
Dans ce qui suit, les résultats obtenus des algorithmes : empirique Landsat 8 et OC2 Landsat, après interpolation sur ODV de la chlorophylle-*a*.



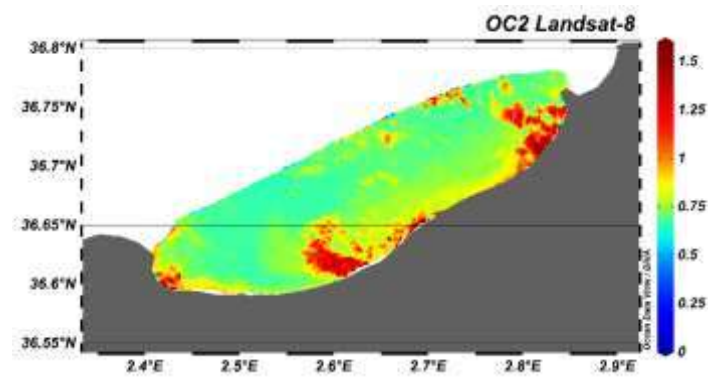
**Figure 23.** Concentration de la Chl-a estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Janvier 2017



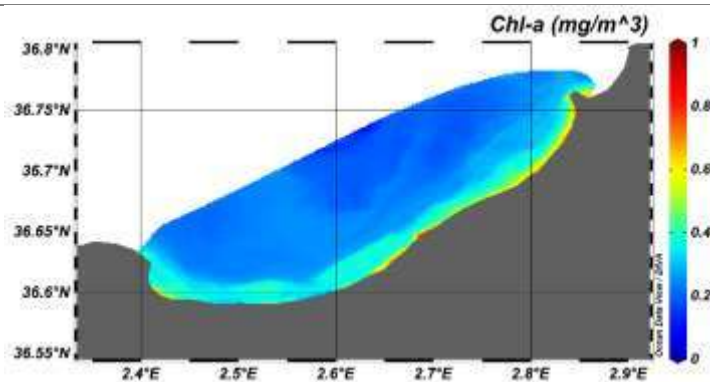
**Figure 24.** Estimation de la concentration de la Chl-a par l'algorithme OC2 Landsat-8 de la NASA (O'Reilly, et al., 2000) en Janvier 2017



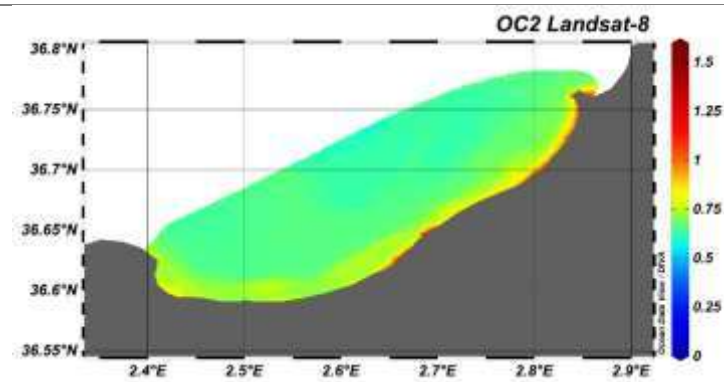
**Figure 25.** Concentration de la Chl-a estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Février 2017



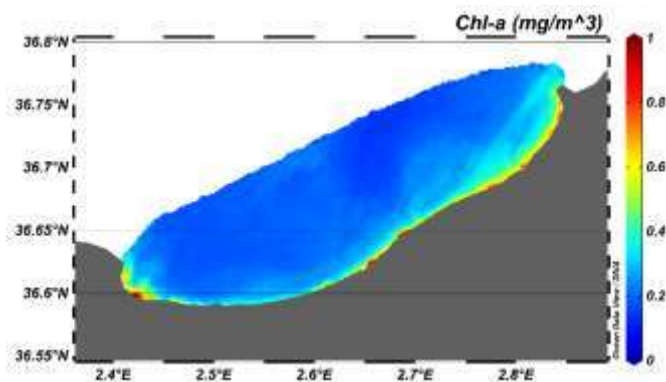
**Figure 26.** Estimation de la concentration de la Chl-a par l'algorithme OC2 Landsat-8 de la NASA (O'Reilly, et al., 2000) en Février 2017



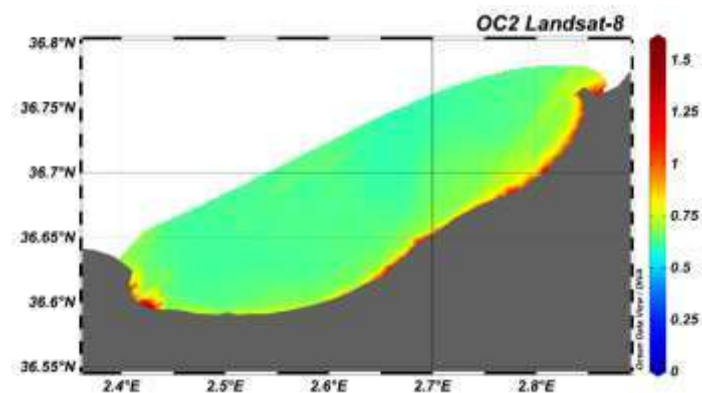
**Figure 27.** Concentration de la Chl-a estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Mars 2017



**Figure 28.** Estimation de la concentration de la Chl-a par l'algorithme OC2 Landsat-8 de la NASA (O'Reilly, et al., 2000) en Mars 2017

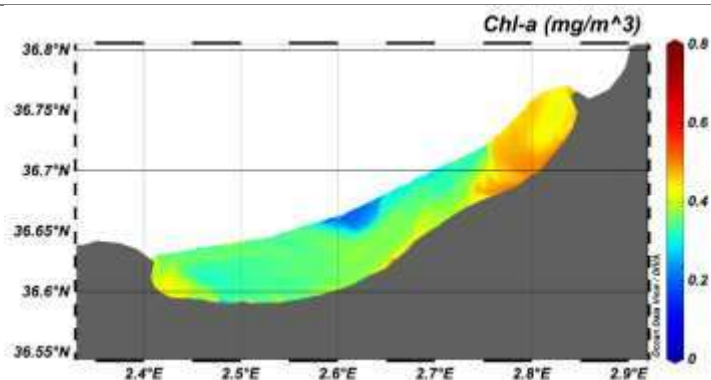


**Figure 29.** Concentration de la Chl-a estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Avril 2017

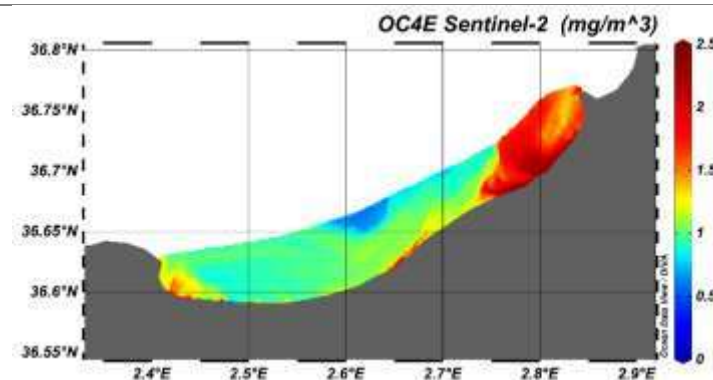


**Figure 30.** Estimation de la concentration de la Chl-a par l'algorithme OC2 Landsat-8 de la NASA (O'Reilly, et al., 2000) en Avril 2017

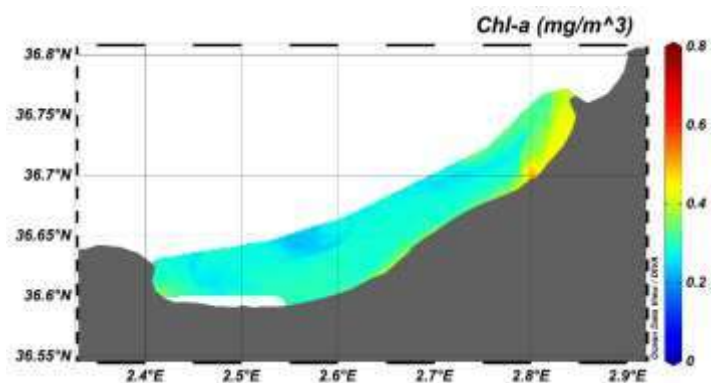
Sentinel-2



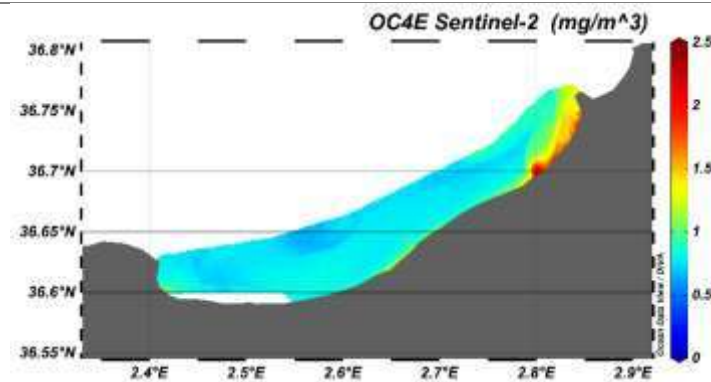
**Figure 31.** Concentration de la Chl-a estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Janvier 2017



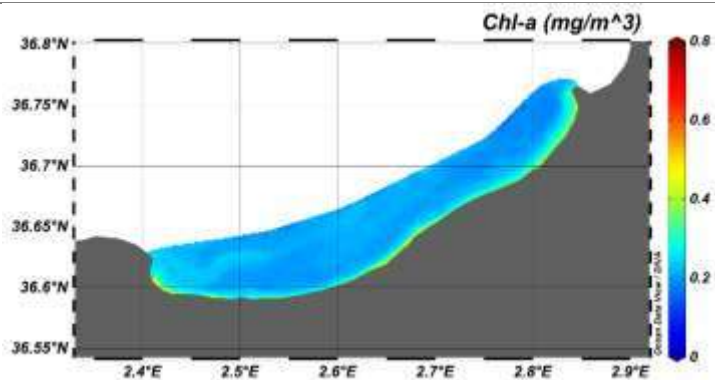
**Figure 32.** Estimation de la concentration de la Chl-a par l'algorithme OC4E Sentinel-2 de la NASA (O'Reilly, et al., 2000) en Janvier 2017



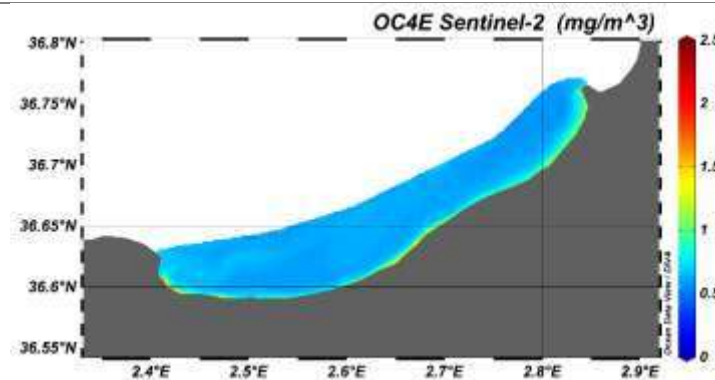
**Figure 33.** Concentration de la Chl-a estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Février 2017



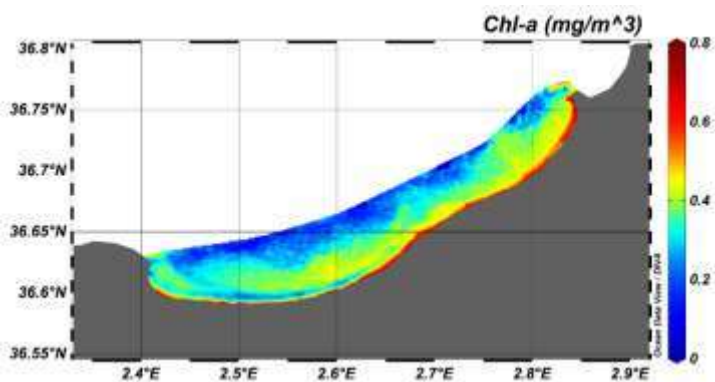
**Figure 34.** Estimation de la concentration de la Chl-a par l'algorithme OC4E Sentinel-2 de la NASA (O'Reilly, et al., 2000) en Février 2017



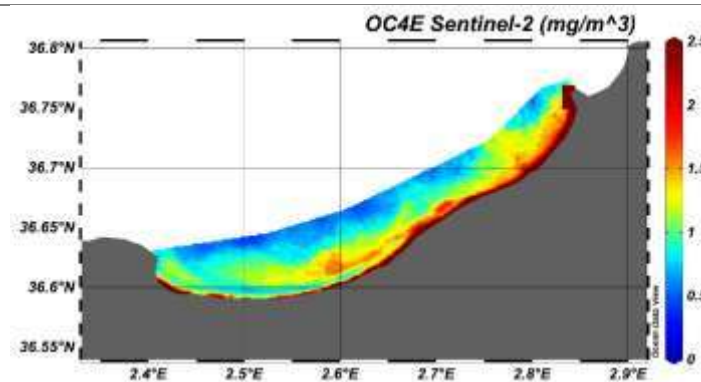
**Figure 35.** Concentration de la Chl-a estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Mars 2017



**Figure 36.** Estimation de la concentration de la Chl-a par l'algorithme OC4E Sentinel-2 de la NASA (O'Reilly, et al., 2000) en Mars 2017



**Figure 37.** Concentration de la Chl-a estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Avril 2017



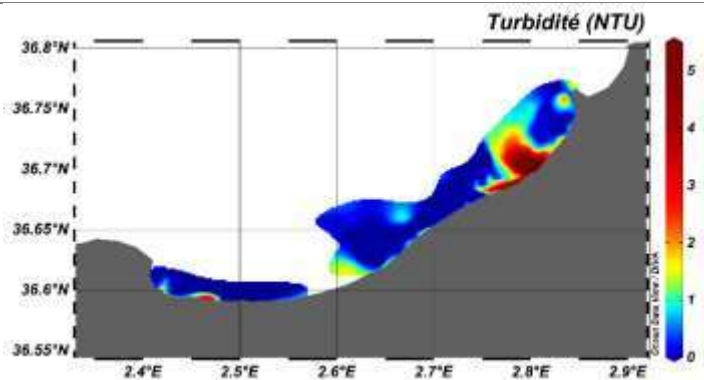
**Figure 38.** Estimation de la concentration de la Chl-a par l'algorithme OC4E Sentinel-2 de la NASA (O'Reilly, et al., 2000) en Avril 2017

#### **4.1.2 Turbidité**

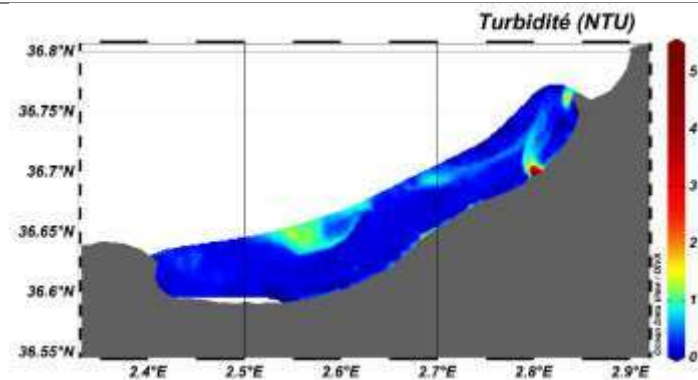
##### Landsat-8

D'après les résultats du calcul d'erreur trouvé sur l'algorithme empirique de Landsat-8 pour l'estimation de la turbidité dans la baie de Bou Ismail, on ne va pas prendre en considération la turbidité estimée par le capteur OLI (Annexe 6).

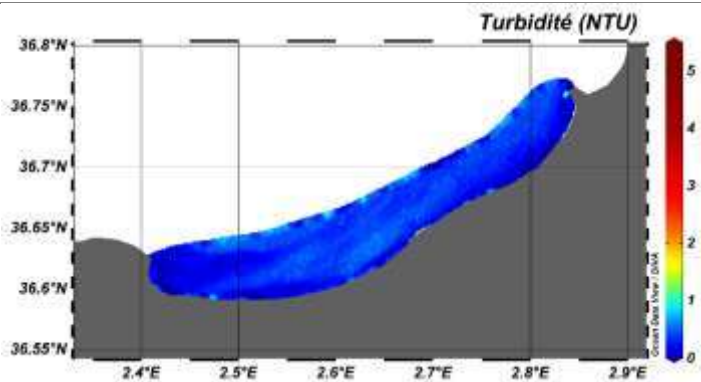
Sentinel-2



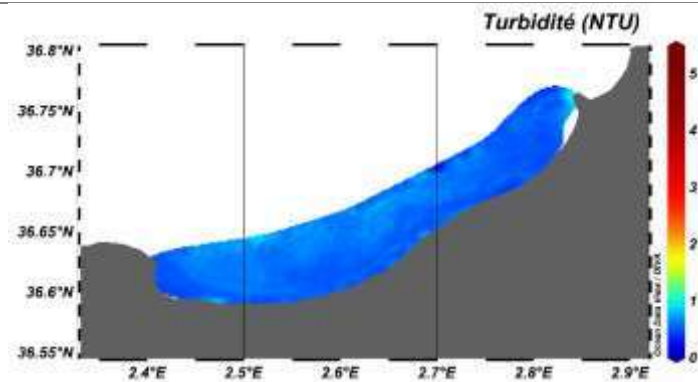
**Figure 39.** Turbidité estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Janvier 2017



**Figure 40.** Turbidité estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Février 2017



**Figure 41.** Turbidité estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Mars 2017



**Figure 42.** Turbidité estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Avril 2017

---

## 4.2 Discussion

### 4.2.1 Evolution de la concentration de la Chl-a satellitaire dans la baie de Bou Ismail estimé par l'algorithme empirique

#### Janvier

Les concentrations en chlorophylle-*a* atteignent un maximum de 0.9 mg/m<sup>3</sup> au niveau de la côte et elles chutent en allant vers le large jusqu'à un minimum de 0.2 mg/m<sup>3</sup>, avec une moyenne de 0.55 mg/m<sup>3</sup>. D'après les figures 23 et 31, le mois de Janvier 2017 est marqué par des concentrations élevées en chlorophylle-*a* autour de l'embouchure des oueds Mazafran et Nador, ainsi qu'au niveau des ports de Bou Haroun et Khemisti. Ces valeurs enregistrées correspondent à un développement important du phytoplancton qui pourrait avoir comme origine :

- Naturelle, la remontée des éléments nutritifs stagnés au fond par l'effet du brassage des eaux qui contribue de façon considérable au développement des organismes photosynthétiques.
- Anthropique qui se figure dans les apports fluviaux importants (~175 m<sup>3</sup>/s au niveau de Mazafran Fig.45) charriant différentes sortes de rejets (les rejets des unités industrielles : industries textiles (Douaouda et Fouka), papeteries (Zéralda et Fouka), plastiques/ caoutchouc et verre (Fouka), industries textiles de Bou Haroun et de Bou Ismail, cuire/ peaux et plastiques de Bou Ismail) ainsi que les rejets des bateaux des ports de plaisance de Bou Haroun et Khemisti.

#### Février

Les concentrations en chlorophylle-*a* montrent une variation allant de 0.3 mg/m<sup>3</sup> à 0.8 mg /m<sup>3</sup> pour les deux satellite Landsat-8 et Sentinel-2 (Fig. 25 et 33).

On note de fortes concentrations en chlorophylle-*a* au niveau des zones critiques connues par les rejets importants des eaux polluées ; les ports de Tipaza, Bou Haroun, Khemisti et Sidi Fredj, ainsi que les embouchures de l'oued Nador et Mazafran qui sont propice au développement des peuplements phytoplanctoniques durant cette période de l'année.

#### Mars

Les valeurs en chlorophylle-*a* enregistrées sont comprises entre un minimum de 0.2 mg/m<sup>3</sup> et un maximum de 0.7 mg/m<sup>3</sup> (Fig. 27 et 35).

La baie de Bou Ismail en Mars 2017 (Fig. 27 et 35), présente de moyennes concentrations au niveau de la ligne côtière, ce qui pourrait indiquer la consommation du phytoplancton développé aux mois écoulés, mais il y a toujours des poussées phytoplanctoniques auprès des rejets des eaux usées notamment dans la partie Est de la baie.

Le panache observé au mois de janvier a disparu, et a laissé place à de faibles concentrations en chlorophylle-*a*. Cette disparition pourrait être due à la consommation du phytoplancton développé par les espèces phytophages. Cependant, les zones côtières montrant de moyennes concentrations en chlorophylle-*a*, ces zones pourraient être le siège de rejets permanents d'eaux polluées chargées en éléments nutritifs (eaux urbaines, eaux polluées de l'industrie...).

### Avril

Le taux de la chlorophylle-*a* le plus important est enregistré au niveau du port de Sidi Fredj (0.9 mg/m<sup>3</sup>), le minimum est toujours observé au niveau des eaux du large (0.1 mg/m<sup>3</sup>) (Fig. 29 et 37).

Au mois d'Avril, un abaissement des valeurs de concentration de la chlorophylle-*a* est visible en pleine mer alors qu'elles sont toujours élevées autour des rejets des oueds et des eaux usées, ainsi qu'au niveau des ports.

## **4.2.2 Evolution de la turbidité satellitaire dans la baie de Bou Ismail estimé par l'algorithme empirique**

### Janvier

Les valeurs de la turbidité pendant ce mois sont comprises entre 0.1 NTU et 5 NTU (Fig. 39). La turbidité se distribue spatialement d'une manière inégale. On constate de fortes turbidités dans la partie Est de la baie, particulièrement au niveau de l'oued Mazafran. La turbidité est estimée forte au niveau de l'embouchure d'oued Nador aussi. Ces valeurs diminuent en allant vers le large, puis elles s'annulent à l'Est de la baie, ce qui reste une ambiguïté à lever. Cette turbidité pourrait être liée aux rejets des agglomérations et des ports, notamment les eaux usées chargées en matière en suspension (organique et particulaire). En outre, la précipitation durant ce mois était très importante, de ce fait, les courants débitent encore plus et déversent plus de matière en suspension en mer durant ce mois. La distribution de cette turbidité est ainsi, probablement à cause de la direction du courant côtier de secteur ouest qui fait transporter les masses d'eau de l'ouest vers l'est, ce qui en résulte un panache suivant la même direction.

**Février**

Les valeurs de la turbidité (Fig. 40) varient de 0.3 NTU à 4 NTU. Durant ce mois, la turbidité n'a pas été si forte ce qui est probablement due à la précipitation qui était moins annoncée, sauf l'embouchure de l'oued Nador et le port de Tipaza qui rejette en permanence de l'eau polluée.

**Mars**

Les valeurs de la turbidité (Fig.41) oscillent entre un maximum de 1.8 NTU enregistré au niveau de l'embouchure de Nador, les ports de Tipaza, Bou Haroun, Khemisti et Sidi Fredj, et un minimum de 0.4 NTU. On constate que la turbidité a diminué sur l'ensemble de la baie, ce qui est en accord avec la littérature, les débits des oueds diminuent avec la diminution de la précipitation, ce qui fait déverser moins de matière en suspension dans la mer, et du coup la turbidité est moindre.

**Avril**

Les valeurs (Fig.42) sont comprises entre un maximum de 2 NTU et un minimum de 0.2 NTU. On observe que la turbidité diminue de plus en plus au niveau des zones qui connaissent les rejets quotidiens des eaux polluées, à savoir : l'embouchure de Nador, les ports de Tipaza, Bou Haroun, Khemisti et Sidi Fredj.

**4.2.3 Erreur et évaluation de la performance des algorithmes empiriques****4.2.3.1 Erreur**

Les erreurs estimées des algorithmes empiriques pour les deux capteurs OLI et SMI sont représentées dans le tableau suivant :

**Tableau 13.** *Erreur estimée pour les algorithmes empiriques*

<b>Capteur</b>	<b>Erreur Chlorophylle-a</b>	<b>Erreur Turbidité</b>
<b>Landsat-8 OLI</b>	22,17 %	24,26 %
<b>Sentinel-2 MSI</b>	11,03 %	22,75 %

D'après les résultats trouvés et les erreurs (Tableau 13) estimées pour chaque capteur, on constate que le capteur MSI de Sentinel-2 donne des résultats qui sont plus proches de la réalité. En revanche, les résultats trouvés à partir du capteur OLI de Landsat-8 surestiment les valeurs réelles des paramètres étudiés.

### 4.2.3.2 Evaluation

A la lumière des résultats obtenus, on constate que les cartes résultantes des algorithmes empiriques et celles de l'algorithme OC présentent une superposition quasi parfaite de la distribution de la chlorophylle-*a*, mais, il semble que les algorithmes OC surestiment la quantité de phytoplancton présente dans l'eau par rapport aux données collectées sur le terrain. Cette surestimation se fait sentir majoritairement en zone côtière où la contribution des matières en suspension à l'absorption dans le bleu s'ajoute à la chlorophylle.

La présence des particules en suspension - qui sont optiquement actifs - n'est pas prise en compte dans la valeur des radiances associées à la chlorophylle-*a* enregistrées par le capteur ; une augmentation des valeurs de matières en suspension non corrélées à la chlorophylle réduit la radiance mesurée dans le bleu, diminuant par conséquent les rapports de réflectance et induisant une surestimation de la concentration en chlorophylle.

En effet, dans la partie bleue du spectre du visible, la réflectance diminue au fur et à mesure que la concentration en Chl-*a* augmente, et pour de l'eau du « cas 2 » contenant à la fois de la chlorophylle et des matières particulaires en suspension en assez forte proportion, la réflectance mesurée par le satellite sera donc une combinaison de celles provenant des deux composantes. A l'opposé, dans la partie verte du spectre du visible, la réflectance augmente en même temps que la concentration en chlorophylle, car il s'agit d'un effet de rétrodiffusion dépendant de la chlorophylle uniquement.

En ce qui concerne l'efficacité des deux modèles empiriques, une étude comparative révèle que le modèle empirique se basant sur les données du capteur MSI de Sentinel-2 donne des résultats plus proches de la réalité, ce qui le qualifie d'être utile, performant et efficace.

### 4.2.4 Limites d'application des algorithmes empiriques

Il est clair que les modèles empiriques qu'on a établis par cette approche ne donnent qu'un aperçu imparfait sur la distribution de la chlorophylle et de la turbidité dans la baie, d'où la nécessité de cerner les limites de son application comme suivant :

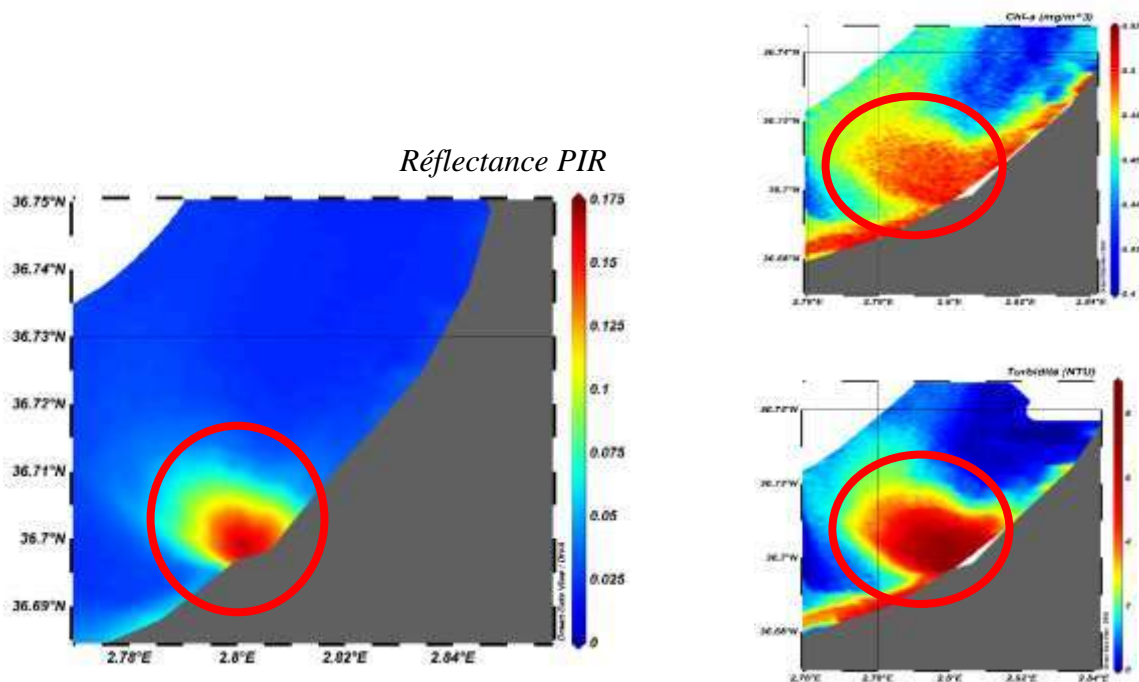
- Les algorithmes établis ne peuvent être appliqués qu'aux mesures satellitaires Sentinel 2 de niveau L1.
- *Limite temporelle* : il s'applique uniquement durant la période hivernale, du fait qu'il s'est basé sur des mesures biogéochimiques effectuées en hiver.
- *Limite spatiale* : il est limité à la zone d'étude ; baie de Bou Ismail.

- *Intervalle de concentration précis* : les deux algorithmes ont été développés sur une gamme limitée de concentrations. Donc, ils ne peuvent pas être opérationnels de manière satisfaisante pour des concentrations dépassant cet intervalle. A titre d'exemple : on ne peut exploiter l'algorithme pour avoir des teneurs en turbidité supérieures à 2.5 NTU pour le modèle empirique Landsat-8 et supérieure à 5.5 NTU pour le modèle empirique Sentinel-2 (ceci apparait sous forme de taches blanches sur les cartes).

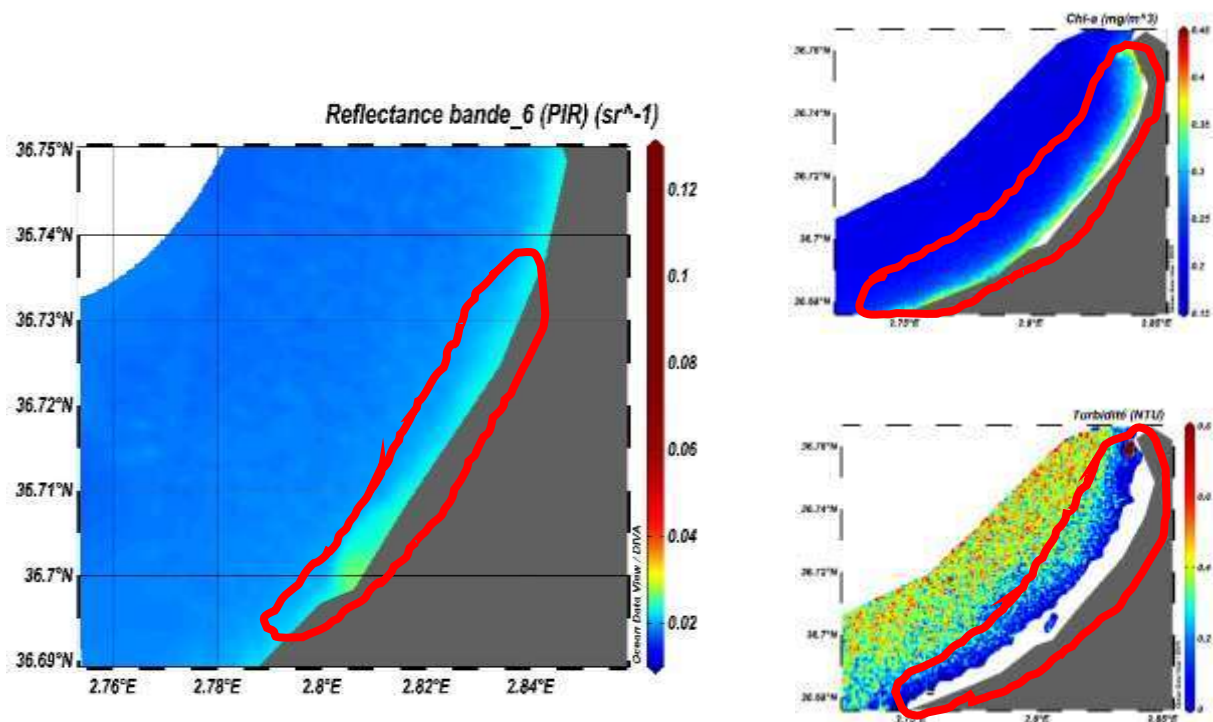
#### 4.2.5 Comparaison entre la concentration de la Chl-a et la turbidité satellitaire

Dans le proche infrarouge on peut détecter la présence des espèces vivantes (produits biologiques), ce qui nous donne une idée sur la nature des panaches au niveau des embouchures dans la baie, afin de mieux interpréter les résultats des flux de la matière en suspension estimés dans notre travail.

Plusieurs systèmes de télédétection multi-spectraux captent la radiation proche-infrarouge, elle permet de distinguer les surfaces végétatives des surfaces minérales car les surfaces couvertes par la végétation se distinguent par une forte réflectance dans les longueurs d'onde du proche-infrarouge. C'est l'approche qu'on va adopter pour déterminer la nature du panache en face d'oued Mazafran (qui est dû au flux déversé dans la baie par oued Mazafran).



**Figure 43.** Correspondance Chl-a, Turbidité et Réflectance (PIR) d'une image du capteur Sentinel-2 en Janvier 2017



**Figure 44.** Correspondance Chl-a, Turbidité et Réflectance (PIR) d'une image du capteur Sentinel-2 en Mars 2017

Les deux figures 43 et 44, montrent une correspondance entre les données PIR et la concentration de la Chl-*a*. Cela pourrait être expliqué par la présence de la biomasse phytoplanctonique vivante. En effet, les données de turbidité du mois de Janvier (Fig. 39), présentent une même distribution que les réflectances en PIR, cela pourrait être optique par le fait que la matière en suspension sur la carte de la turbidité est constituée majoritairement de la biomasse phytoplanctonique. En revanche, les données de turbidité du mois de Mars (Fig.41), présentent une limite sur la partie côtière de l'Est de la baie (où se trouve le rejet d'oued Mazafran), cette limite pourrait être expliquée par la présence des concentrations de turbidité qui dépassent la gamme de notre modèle empirique.

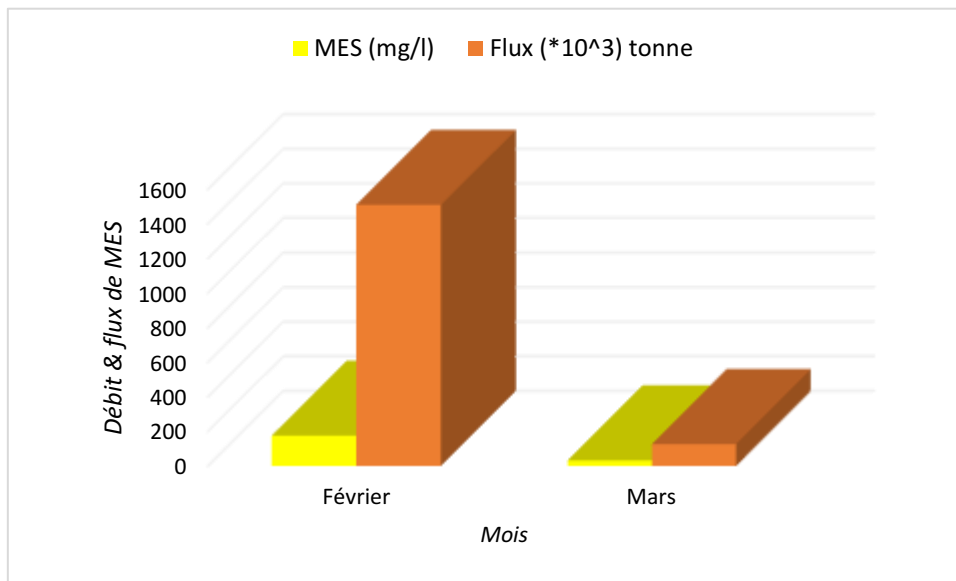
*Conclusion* : ces zones (Fig. 43 et 44) sont probablement le siège de poussées phytoplanctoniques importantes, qui ont utilisés les éléments nutritifs contenus dans les décharges des oueds pour se développer.

#### 4.2.6 Flux de la matière en suspension

En obéissant aux formules présentées dans la partie matériel et méthodes, on obtient :

**Tableau 14.** Débit et Flux de la matière en suspension de l'embouchure de Mazafran en Février et Mars 2017

Date de prélèvement	01 - 02 - 2017	07 - 03 - 2017
$C_{MES}$ (mg/l)	175	32
$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	3327,647766	1520,886357
Flux de MES (10 <sup>3</sup> tonne)	1509,421027	126,148398



**Figure 45.** Débit et Flux de la matière en suspension dans l'embouchure de Mazafran en Février et Mars 2017

Les résultats obtenus (Fig. 45) sont en conformité avec la littérature, car les flux et les débits sont fonction de la pluviométrie et les concentrations de la turbidité obtenues dans ce travail.

Durant le mois de Février (tableau 14), une augmentation du flux de la MES ( $\sim 1510 \cdot 10^3$  tonne) est cohérente avec l'augmentation du débit liquide d'oued Mazafran ( $\sim 3328$  m/s) et les concentrations en turbidité obtenues, qui est vraisemblablement due à une précipitation aussi importante que celle observée un mois plus tard en Mars. En mois de Mars (tableau 14), le débit a diminué ( $\sim 1521$  m/s), ce qui est consécutif à une diminution des flux de MES ( $\sim 126 \cdot 10^3$  tonne).

Au mois de février, la pluviométrie était plus annoncée par rapport au mois de mars, par conséquent, le débit sera plus important et entraîne de grandes charges en suspension vers la mer en le comparant à celui du mois de Mars.

D'après les comparaisons obtenues dans la partie précédente, les flux de la matière en suspension estimés pourraient être composés en grande partie des éléments nutritifs qui font pousser par la suite la production phytoplanctonique en face des rejets des oueds.

*Conclusion*

---

## Conclusion

Les conclusions majeures sont résumées dans les points suivants :

- L'algorithme empirique Sentinel-2 peut être validé et exploité d'une manière efficace et satisfaisante dans ses limites d'application.

- Les capteurs satellitaires enregistrent des réflectances dans le bleu combiné de la chlorophylle et de la matière en suspension ce qui induit une erreur lors de l'estimation de la chlorophylle-*a*.

- Les algorithmes OC (Ocean Color) ainsi que l'algorithme empirique Landsat-8 surestiment nettement la concentration en chlorophylle-*a*, car ils sont influencés par certains composants optiquement actifs dans l'eau de mer, entre autre, on cite la matière en suspension.

- La concentration en pigments chlorophylliens dépend des rejets des oueds de la baie, principalement pendant la période hivernale, ce qui rend l'influence des flux plus visible.

- L'estimation du flux d'oued Mazafran donne un aperçu sur l'évolution spatio-temporelle de la turbidité ainsi que la production phytoplanctonique. Les flux s'avèrent une source potentielle d'éléments nutritifs qui contribuent à la forte production biologique de la zone côtière de Bou Ismail. Cette conclusion s'appuie sur l'hypothèse de la rétrodiffusion du single PIR au niveau de l'embouchure de Mazafran.

- La télédétection permet de suivre précisément l'évolution spatio-temporelle de la chlorophylle-*a* et de la turbidité, mais elle donne des mesures quantitatives estimées.

- La télédétection se révèle un outil performant et prometteur, qui doit être considéré comme un maillon important dans de nombreux programmes de recherche en océanographie, ce qui nécessite la mise en place sur le terrain d'une stratégie d'échantillonnage adaptée, mais aussi complémentaire de la précision spatiale et temporelle apportée par le satellite.

---

## Perspectives

Les différentes perspectives découlant de cette étude sont les suivantes :

- Une stratégie d'échantillonnage concentrée sur la baie de Bou Ismail est recommandée en mois de janvier et février, pour avoir une meilleure corrélation entre les mesures *in-situ* et les réflectances du satellite. Le but sera d'ajuster les algorithmes empiriques et les rendre plus efficaces.

- La prise en considération des autres substances pouvant influencer la concentration en chlorophylle-*a*, à titre d'exemple les CDOM.

- Des mesures effectuées sur des intervalles de temps plus courts permettent d'élargir la limite temporelle d'application de l'algorithme.

- La concordance entre les mesures satellitaires et *in-situ* : la mesure de la chlorophylle et de la turbidité *in-situ* doit être concomitante aux jours du passage des satellites sur la zone d'étude concernée.

- Utilisation d'un appareillage de mesure plus performant pour quantifier le matériel biogéochimique et des paramètres optiques. On recommande de prévoir des méthodes de mesure *in-situ* de la réflectance, chlorophylle-*a* et la turbidité, ce qui permet une prospection rapide des eaux de surface et avoir des résultats plus fiables.

# *Bibliographie*

---

## Bibliographie

**Åas, E et Højerslev, N-K (1999).** Analysis of underwater radiance observations: Apparent optical properties and analytic function describing the angular radiance distribution. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 104. N°4. pp 8015-8024.

**Aminot, A et Chaussepied, M (1983).** *Manuel des analyses chimiques en milieu marin*. Paris : Centre National pour l'Exploitation des Océans. 396p.

**Aminot, A et Kérouel, R (2004).** Hydrologie des écosystèmes marins : Paramètres et analyses. 2<sup>ème</sup> Edition. France : Ifremer. 336p.

**ANRH (2013).** *Agence Nationale des Ressources Hydrauliques*. Alger : ANRH.

**Antoine, D (2000).** Apports de la télédétection spatiale de la « couleur de l'océan » à l'océanographie. *Océanis*. Vol. 24, N°2, pp 81-150.

**Bachouche, S (2017).** *Modélisation hydrodynamique et qualité des eaux et sédiments de la côte centre algérienne*. Thèse. Pollution et environnement marin. Alger: ENSSMAL, 234p.

**Bonn, F et Rochon, G (1996).** *Précis de télédétection : Principes et méthodes*. Canada : Presses de l'université du Québec. 485p.

**Centre Canadien de télédétection .** Notions fondamentales de télédétection. Rapport. Document non publié. Canada : Centre Canadien de télédétection.

**Chuanmin, H, Zhongping, L et Franz, B (2012).** Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 117, N°10, 25p.

**Demarcq, H (1985).** *Applications de la télédétection infrarouge et visible en océanographie*. Thèse. Océanologie. France : Université d'Aix Marseille II, 233p.

**Descartes, R (1637).** Discours de la méthode . Rapport. Document non publié.

**Doxaran, D, Devred, E et Babin, M (2015).** A 50% increase in the mass of terrestrial particles delivered by the Mackenzie River into the Beaufort Sea (Canadian Arctic Ocean) over the last 10 years. *Biogeosciences*. Vol. 12, N°1, pp 3551–3565.

**Doxaran, D, Froidefond, J-M, Castaing, P et Babin, M (2009).** Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data. *Elsevier*. Vol. 81, N°2, pp 321–332.

- 
- Gernez, M P (2009).** *Analyse de la variabilité temporelle des propriétés optiques en mer Ligure depuis un mouillage instrumenté (site Boussole):fluctuations à haute fréquence, cyclicité diurne,changements saisonniers et variabilité interannuelle.* Thèse. Océan, Atmosphère, Climat et Observations Spatiales. France : Université Pierre et Marie Curie, 254p.
- Gohin, F, Druon, J N et Lampert, L (2002).** A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters . *Remote sensing.* Vol. 23, N°8, pp 1639–1661.
- González, F-E, Ruiz, J-M et Acosta, F-M (2013).** Manuel de télédétection spatiale. Rapport. Document non publié. Espagne : Université de Las palmas de gran canaria.
- Gordon, H R, Brown, O B et Jacobs, M M (1975).** Computed relationship between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean. *APPLIED OPTICS.* Vol.14, N°. 2, pp 417-427.
- Grimes, S, Boutiba, Z, Bakalem, A, Bouderbala, M, Boudjellal, B, Boumaza, S, Boutiba, M, Guedioura, A, Haffersas, A, Hemida, F, Kaidi, N, Khelifi, H, Kerzabi, F, Merzoug, A, Nouar, A, Sellali, B, Sellali-Merabtine, H, Semroud, R, Seridi, H, Taleb, M-Z, et Touahria, T (2004).** *Biodiversité marine et littorale algérienne.* Oran: Université d'Es Senia. 362p.
- Hou, W (2013).** Ocean sensing and monitoring. 1<sup>ère</sup> Edition . Washington : SPIE. 252p. pp23-30.
- Huret, M (2005).** *Apports des données 'couleur de l'eau' à la modélisation couplée physique-biogéochimie en milieu dynamique côtier.* Thèse. Océanographie Physique et Biologique. France : Université Toulouse III, 274p.
- Inal, A (2011).** *les métaux traces dans les sédiments de la baie de Bou Ismail: surveillance de la pollution et étude des processus géochimiques.* Mémoire de Magister. Gestion et surveillance de l'environnement marin et littoral. Alger : ENSSMAL, 320p.
- Jerlov, N. G (1976).** Marine optics. Rapport. Document non publié. Copenhagen : Elsevier Science.
- Kheireddine, M (2014).** *Caractéristiques et origines de la variabilité diurne des propriétés optiques.* Thèse. Océan Atmosphère, Climat et Observations spatiales. France : Université Pierre et Marie Curie, 265p.

- 
- Lee, ZhongPing (2006).** Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications. Rapport. Document non publié. Canada : The International Ocean-Colour Coordinating Group.
- Lei, M (2011).** *Étude de l'influence des angles d'observation et d'éclairement sur la luminance mesurée et sur l'erreur d'estimation en chlorophylle.* Thèse. Instrumentation et Informatique de l'Image. France : Université de Bourgogne, 164p.
- Loisel, H, Mangin, A, Vantrepotte, V, Dessailly, D, Dinh, D, Garnesson, P, Ouillon, S, Lefebvre, J-P, Mériaux, X et Phan, T (2014).** Variability of suspended particulate matter concentration in coastal waters under the Mekong's influence from ocean color (MERIS) remote sensing over the last decade. In: *Remote Sensing of Environment*. pp 218-230.
- Lorthiois, T (2012).** *Dynamique des matières en suspension dans le panache du Rhone (Méditerranée occidentale) par télédétection spatiale " couleur de l'océan ".* Thèse. Sciences de l'environnement. France : Université Pierre et Marie Curie, 250p.
- Longhurst, A, Sathyendranath, S, Platt, T et Caverhill, C (1995).** An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data. *Journal of Plankton Research*. Vol.17, N°6, pp 1245-1271.
- Millot (1989).** La circulation générale en Méditerranée occidentale : Aperçu de nos connaissances et projets d'études. *Annales de Géographie*. Vol. 98, N°549, pp 497-515.
- Mobley, C-D (1994).** Light and Water; Radiative Transfer in Natural Waters.
- Mobley, C-D (1999).** Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied optics*. Vol. 38, N°. 36, pp 7442-7455.
- Morel, A et Prieur, L (1977).** Analysis of variations in ocean color. *Limnology and oceanography*. Vol. 22, N° 4, pp 709-722.
- O'Reilly, JE, et al (2000).** Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. In: *O'Reilly JE (ed) SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series*. pp 9-23.
- O'Reilly, JE, et al. 1998.** *Ocean Color Chlorophyll Algorithms for SeaWiFS*. Journal of Geophysical Research. Vol.32, N°12, pp 571-582.
- Pegau, W. S. et Zaneveld, J. R. V (1993).** Temperature-dependent absorption of water in the red and near-infrared portions of the spectrum. *Limnology and oceanography*. Vol. 38, N° 1, pp 188-192.

---

**Petus, C (2009).** *Qualité des eaux cotières du sud du golfe de Gascogne par télédétection spatiale.* Thèse. Physique de l'environnement. France : Université Bordeaux I, 409p.

**Preisendorfer, R W (1976).** Hydrologic Optics. Rapport. Document non publié. Honolulu : National Technical Information.

**Robin, M (1998).** *La télédétection.* 2<sup>ème</sup> Edition. Paris : Nathan. 320 p.

**Rodier, J et Legube, b (2009).** *Analyse de l'eau.* 10<sup>ème</sup> Edition. Paris : Dunod. 794 p.

**Rolland, B (2006).** *Transfert des radionucléides artificiels par voie fluviale : conséquences sur les stocks sédimentaires rhodaniens et les exports vers la Méditerranée.* Thèse. Géosciences de l'Environnement. France : Université Paul Cézanne Aix-Marseille, 322p.

**Soudani, K (2005).** Introduction générale à la télédétection. Rapport. Document non publié. France : Université Paris Sud.

**Tassan, S (1994).** Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters. Rapport. Document non publié. USA: Optical Society of America.

**Weber, B (2002).** suivi multi-temporel de la concentration de la chlorophylle en Méditerranée orientale à l'aide de SeaWIFS et de Landsat TM. Rapport. Document non publié. Genève : Univers

#### **Référence web**

**CNES, 2017.** (Page consultée le 20 juin 2017). Sentinel2 : Des vues de la Terre d'une qualité radiométrique sans précédent. [En ligne]. Adresse URL : <https://sentinel2.cnes.fr/>

**ESA, 2017.** (Page consultée le 25 Avril 2017). Téléchargement des images Sentinel. [En ligne]. Adresse URL : <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

**NASA, 2017.** (Page consultée le 25 Avril 2017). Les algorithmes OC. [En ligne]. Adresse URL : [https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/chlor\\_a/](https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/chlor_a/).

**USGS, 2017.** (Page consultée le 15 Avril 2017). Téléchargement des images Landsat. [En ligne]. Adresse URL : <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

# *Annexe*

## Annexes

### Annexe 1

La loi de (Descartes, 1637) :  $n_{\text{eau}} \sin(\theta')$  =  $n_{\text{air}} \sin(\theta)$

Avec :

$n_{\text{eau}}$  : indice de réfraction de l'eau (1.34).

$n_{\text{air}}$  : indice de réfraction de l'air (1).

$\theta'$  : angle incident.

$\theta$  : angle transmis.

### Annexe 2

#### 1. Acquisition des données OLI Landsat-8

##### Étape n°1 :

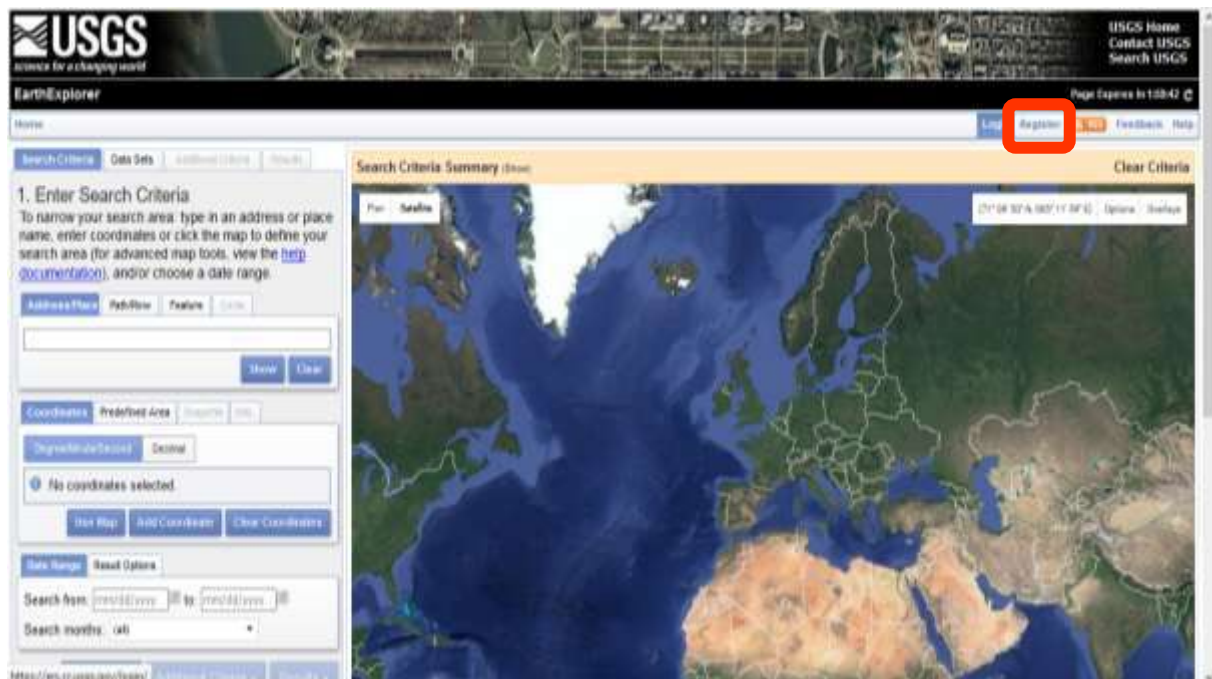
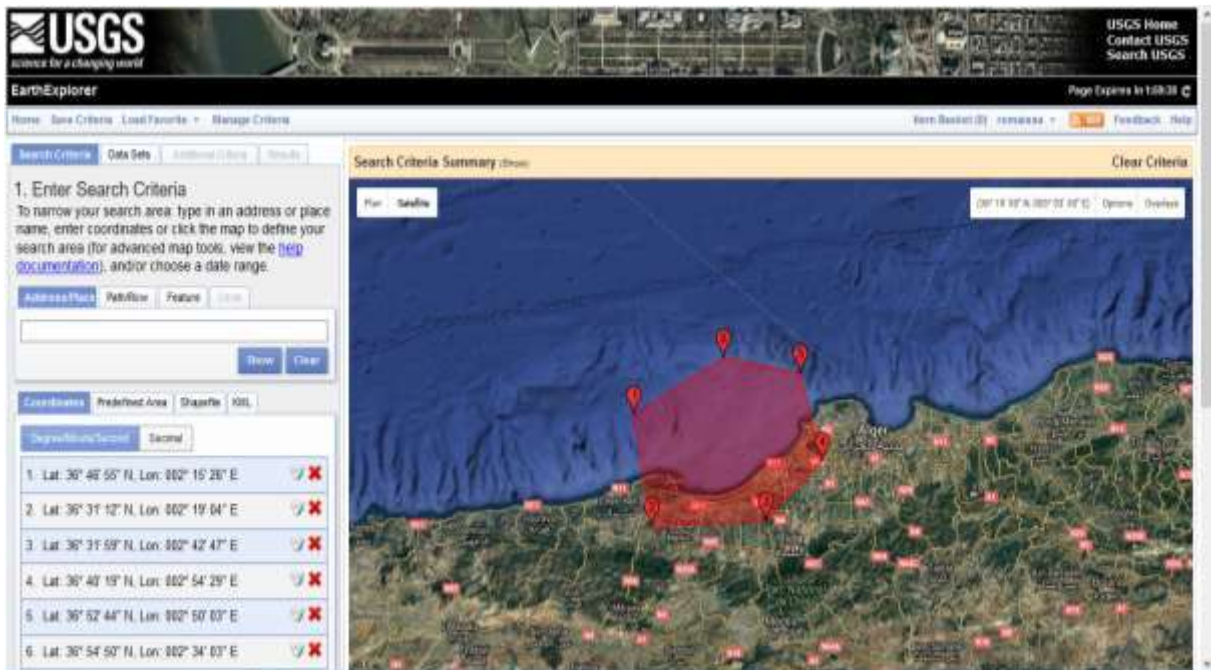


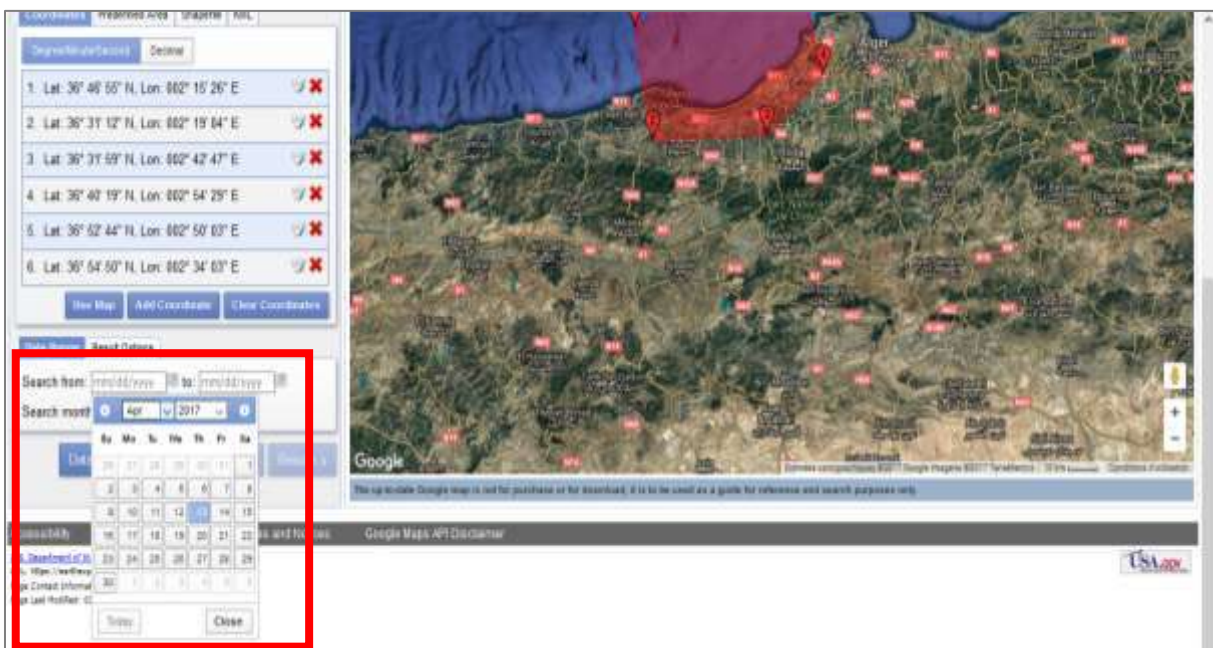
Figure 46. L'interface du site de l'USGS.

**Etape n°2 :**



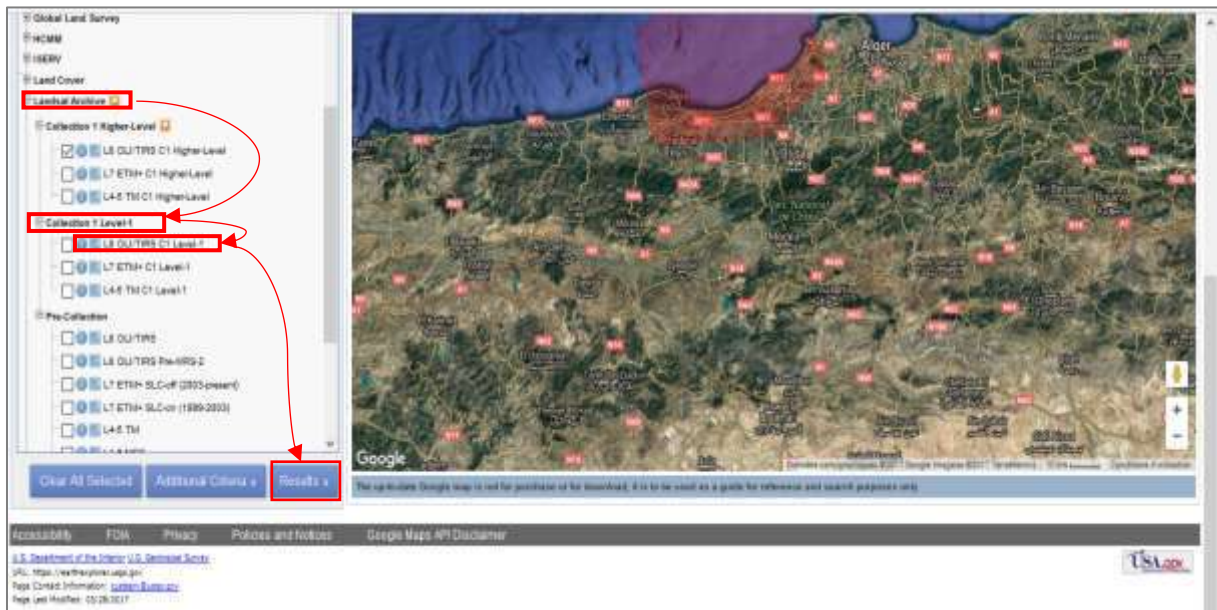
**Figure 47.** Localisation et délimitation de la zone d'étude sur l'interface USGS

**Etape n°3 :**



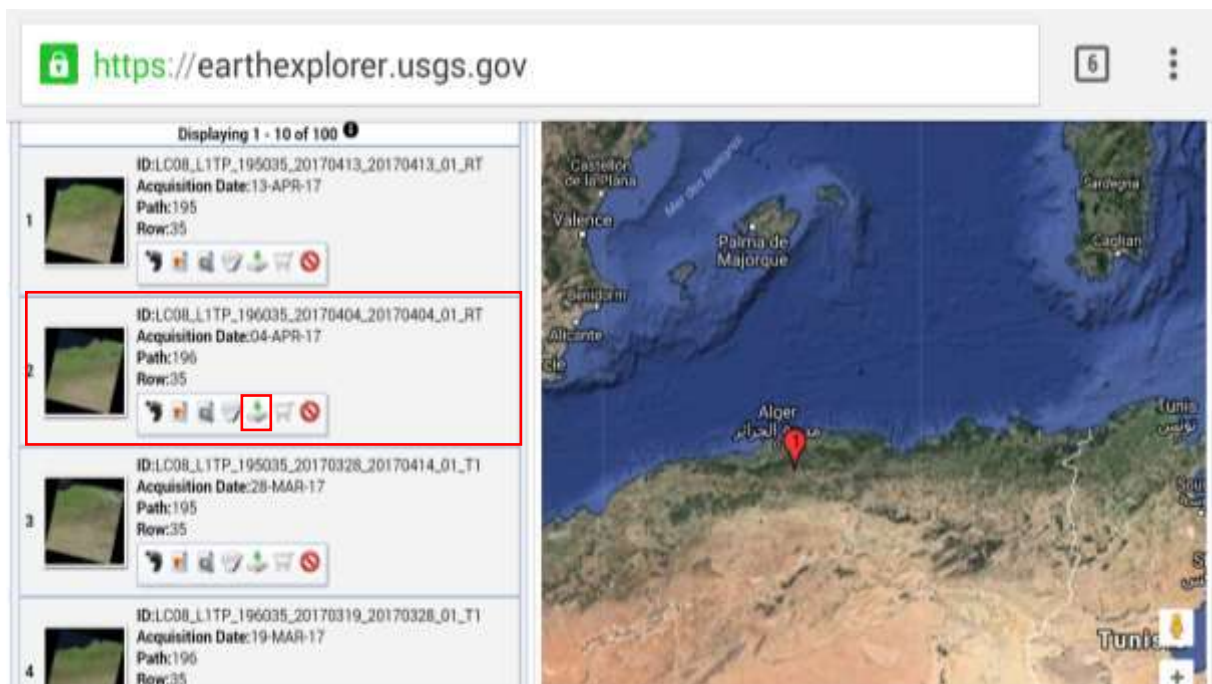
**Figure 48.** Détermination de la date

**Etape n°4 :**



**Figure 49.** *Choix du capteur et le niveau de traitement de données*

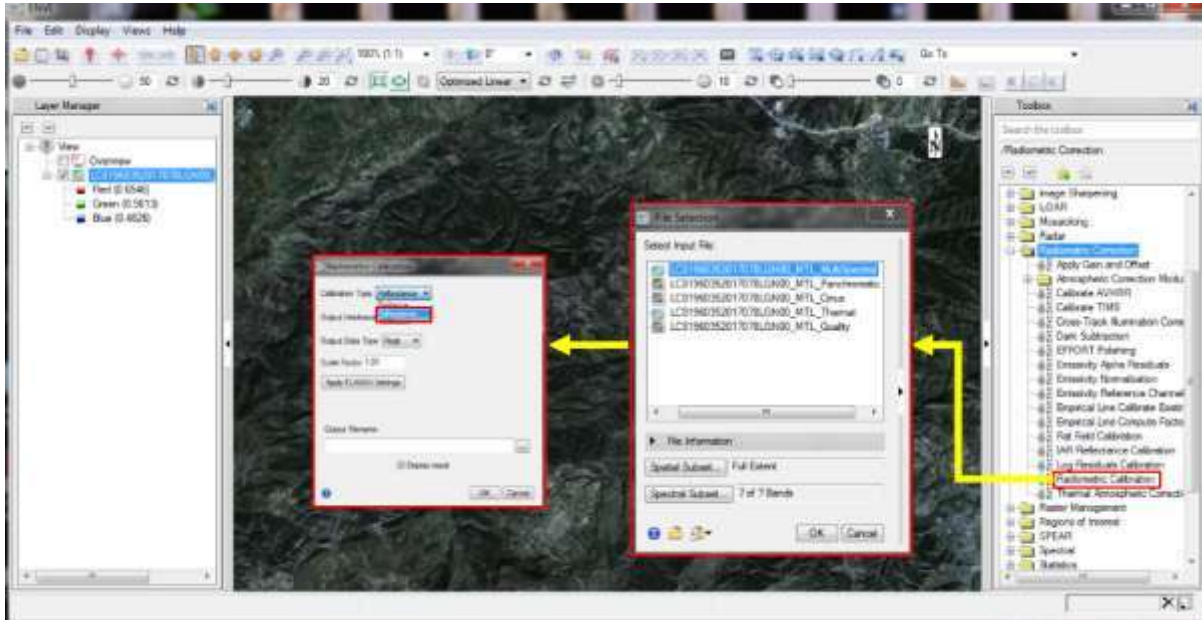
**Etape n°5 :**



**Figure 50.** *Résultats de la recherche des images sur un intervalle de temps*

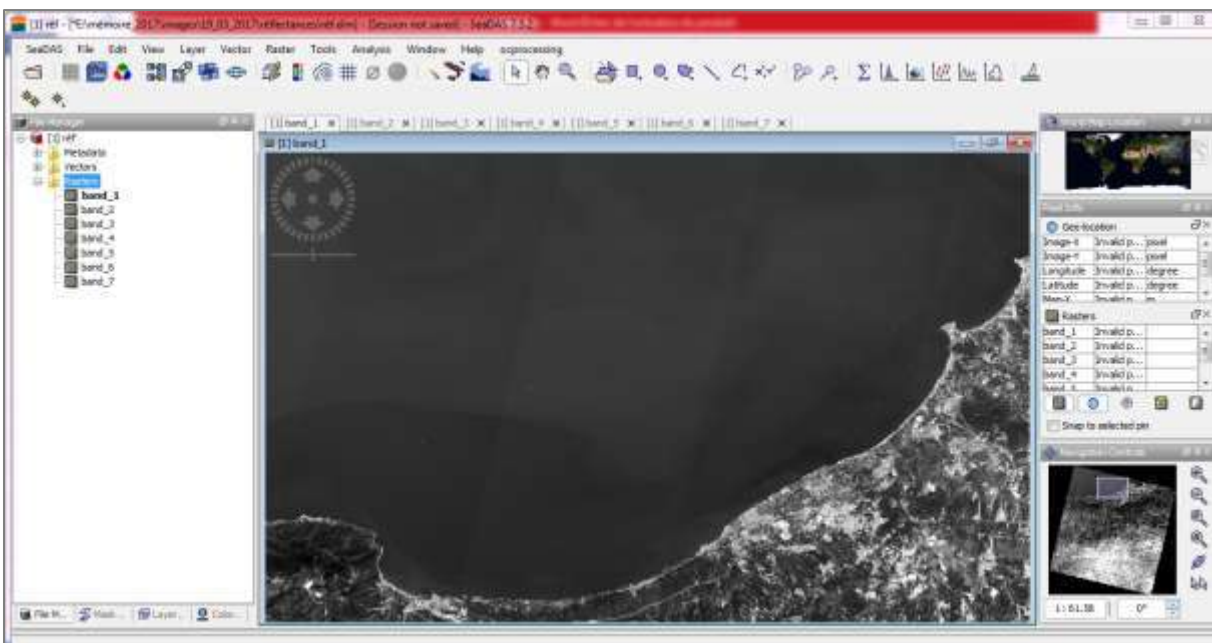
## 2. Traitement et analyse des données OLI Landsat-8

### Etape n°2 :



**Figure 51.** Calcul des réflectances sur le logiciel ENVI 5.1

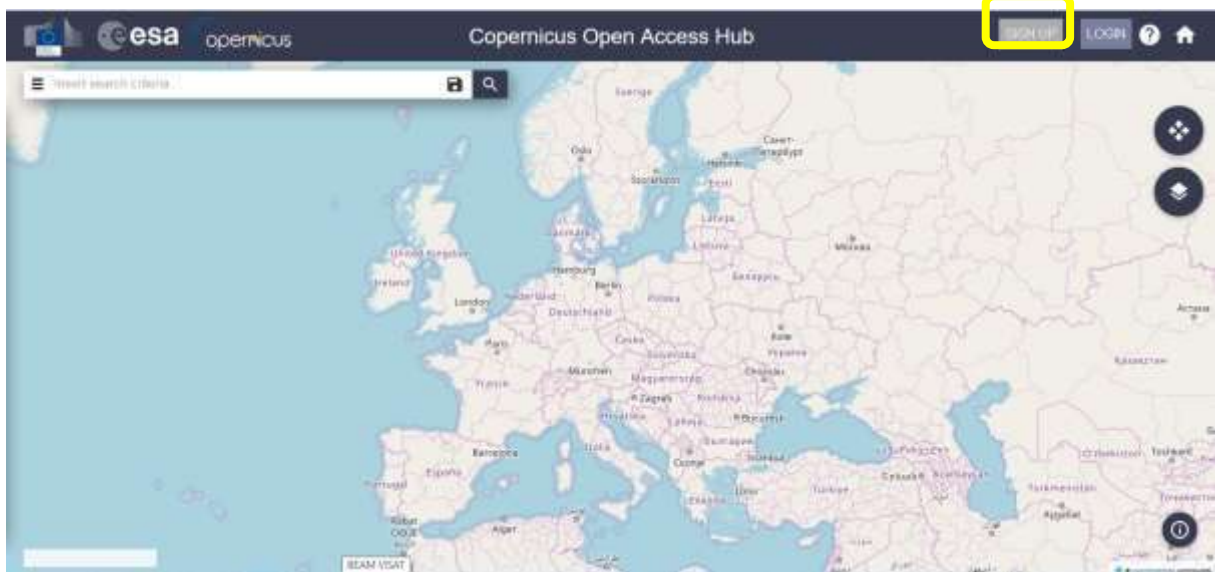
### Etape n°3 :



**Figure 52.** Affichage de l'image avec les réflectances calculés sur le logiciel SeaDAS

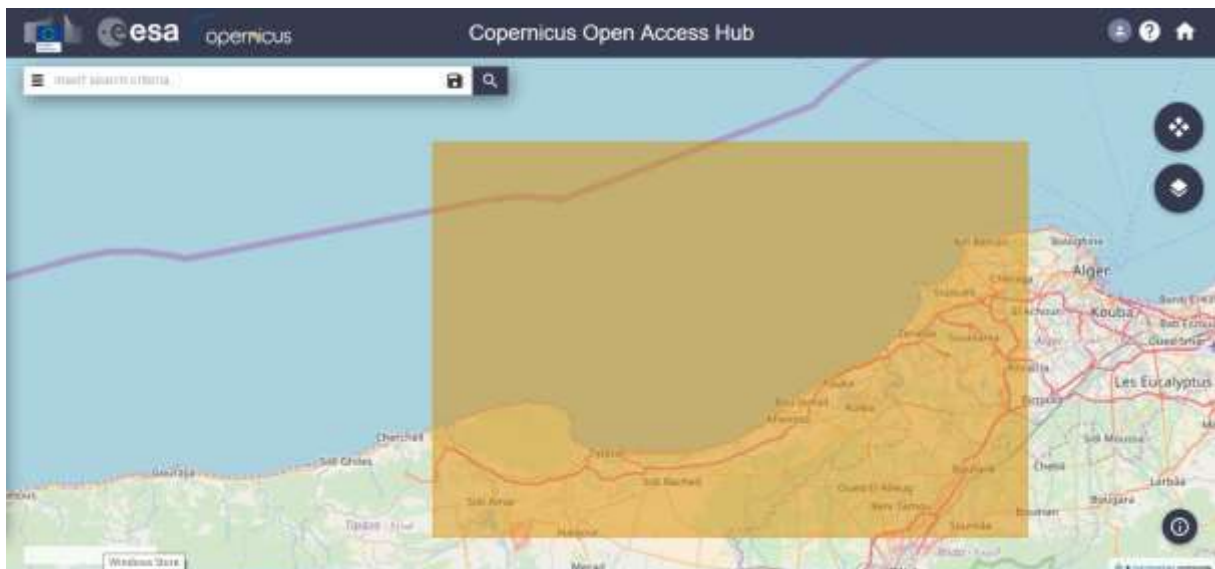
### 3. Acquisition des données MSI Sentinel-2

#### Étape n°1 :

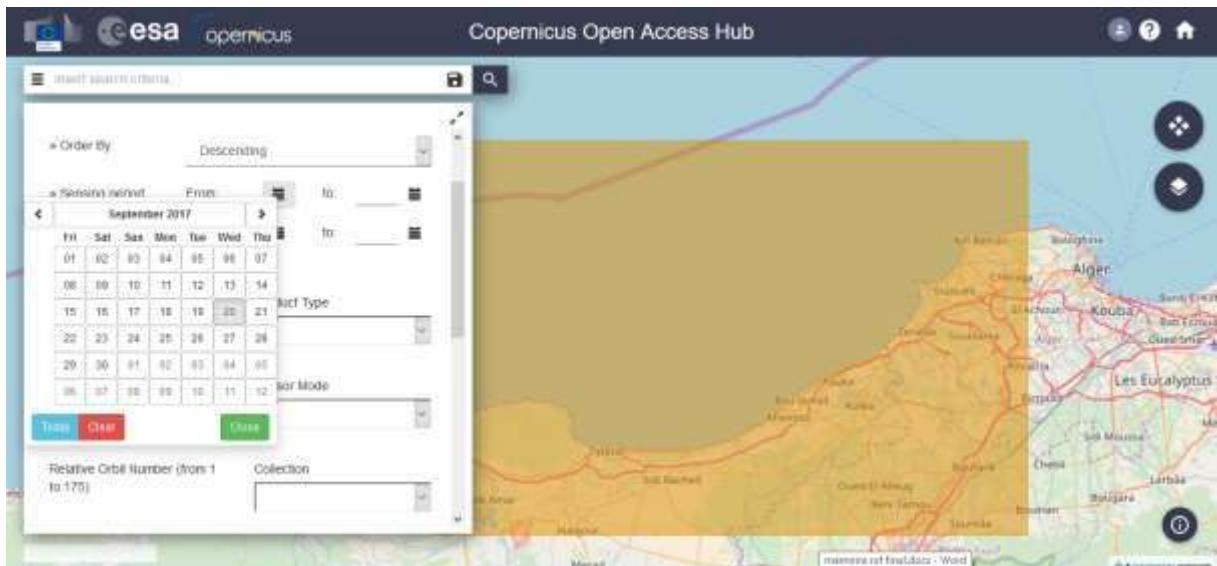


**Figure 53.** *L'interface du site de Copernicus*

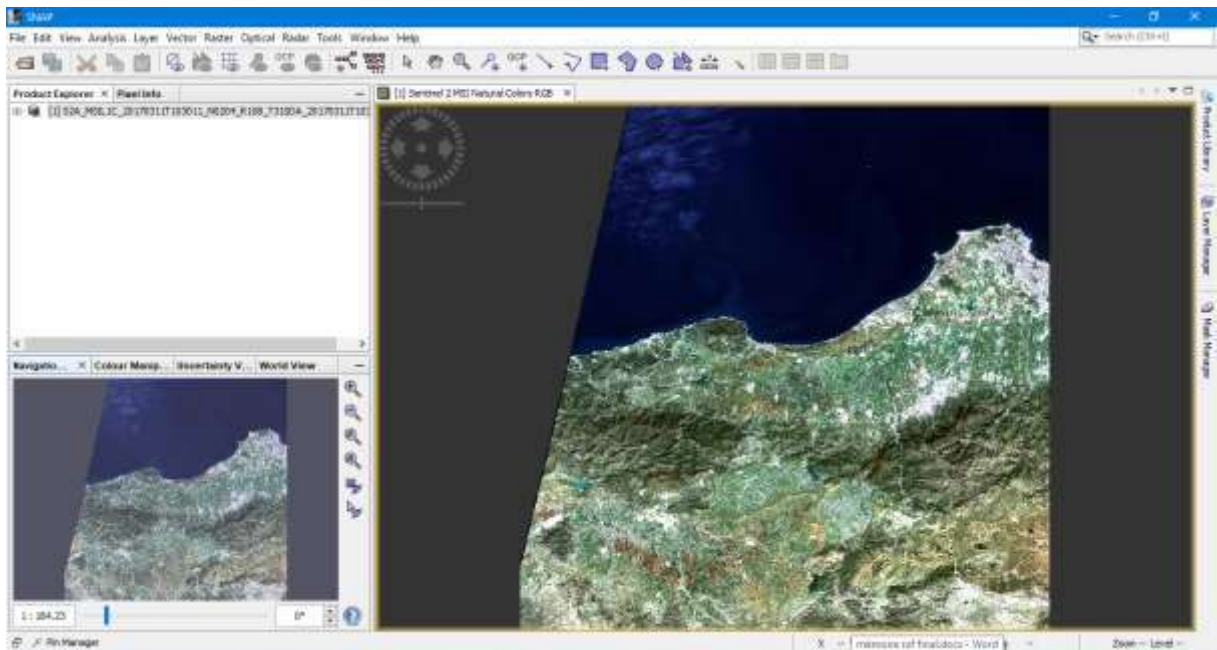
#### Étape n°2 :



**Figure 54.** *Localisation et délimitation de la zone d'étude sur l'interface Copernicus*

**Etape n°3 :**

**Figure 55.** *Filtre de Copernicus pour le téléchargement de données*

**Etape n°4 :**

**Figure 56.** *Affichage de l'image Sentinel-2 sur SNAP*

#### 4. Extraction des données (OLI et MSI)

##### Etape n°1 :

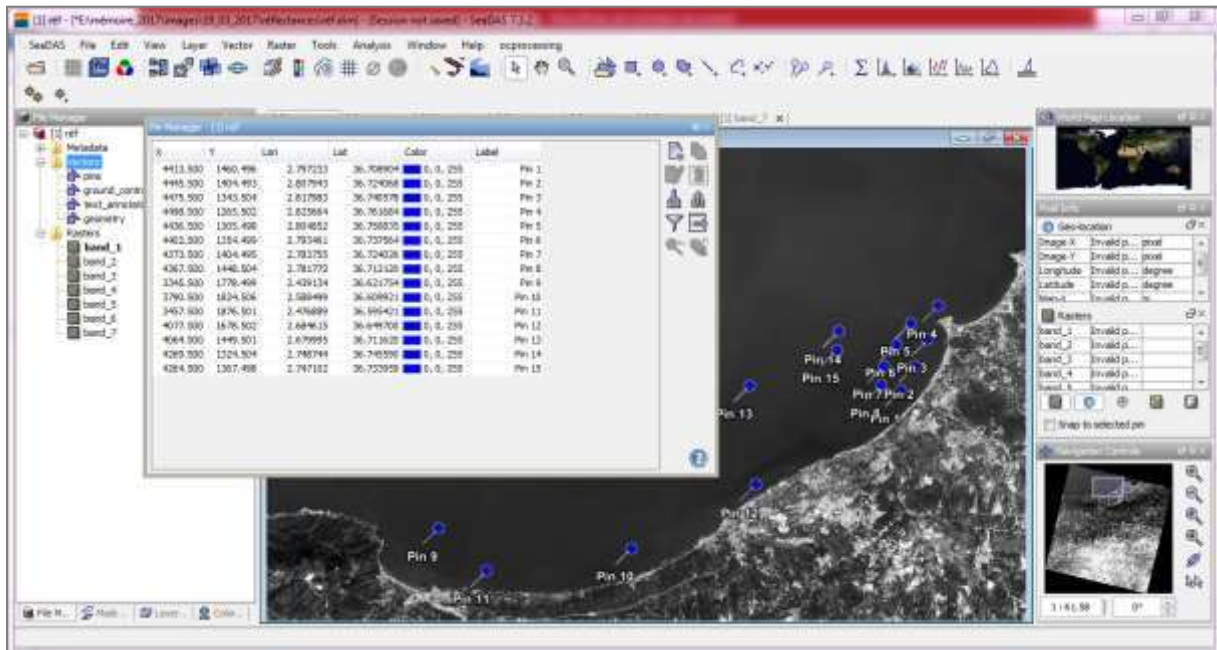


Figure 57. Insertion des coordonnées de stations

#### 5. Application de l'algorithme

##### Etape 1 :

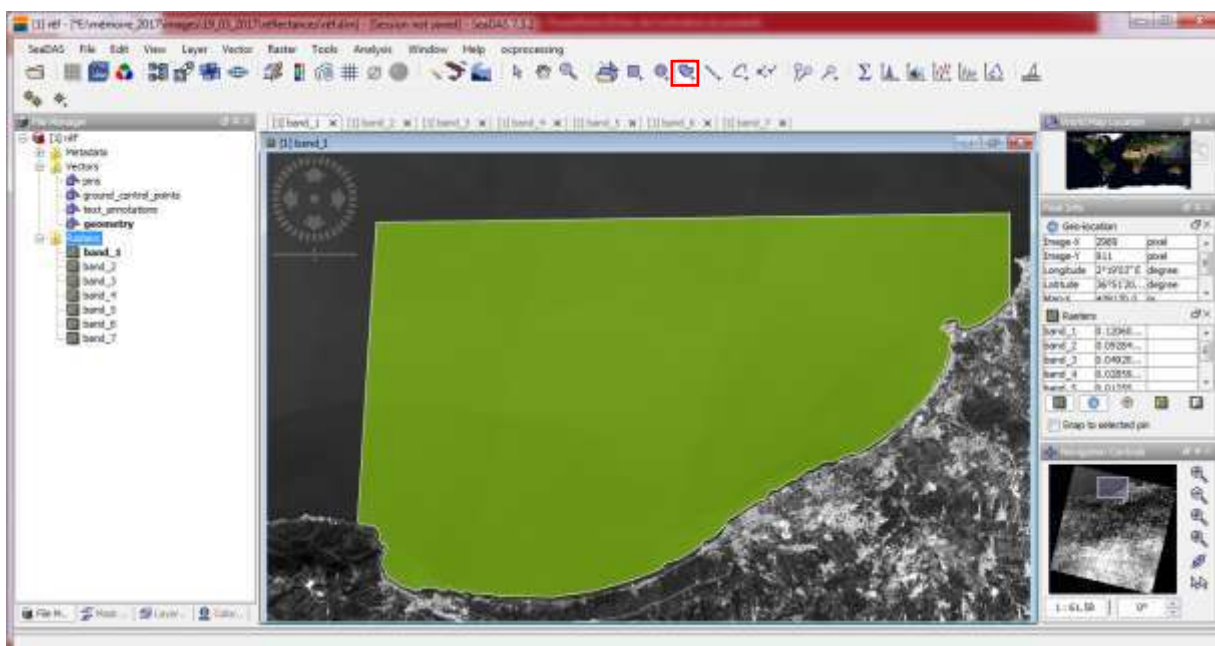


Figure 58. Délimitation de la zone d'étude avec un polygone

**Etape 2 :**



**Figure 59.** Extraction des données du polygone

**Annexe 3**

L'étude des corrélations possibles entre les données in-situ de la chlorophylle et les bandes de la partie visible du spectre ou leur ratio de OLI.

**Tableau 15.** Etude de corrélations des modèles biogéo-optiques pour l'estimation de la chlorophylle

<b>R<sub>rs</sub>_Ratio</b>	<b>Type de corrélation</b>	<b>Coefficient de détermination (R<sup>2</sup>)</b>	<b>Ecart-type moyen</b>
<b>R<sub>482</sub>/R<sub>561</sub></b>	Expo	0.7462	0.06321
	Logarithmique	0.7662	0.06132
	Polynomiale	0.7977	0.06781
	Puissance	0.7496	0.06421
<b>R<sub>443</sub>/R<sub>561</sub></b>	Expo	0.6978	0.06534
	Logarithmique	0.7277	0.06328
	Polynomiale	0.7729	0.07191
	Puissance	0.7036	0.06661
<b>R<sub>482+443</sub>/R<sub>561</sub></b>	Expo	0.7233	0.06483
	Logarithmique	0.7487	0.06262
	Polynomiale	0.7895	0.07052
	Puissance	0.7276	0.6579
<b>R<sub>443</sub></b>	Linéaire	0.1204	0.0488
<b>R<sub>482</sub></b>	Linéaire	0.0123	0.0421

#### Annexe 4

L'étude des corrélations possibles entre les données in-situ de la turbidité et les bandes de la partie visible du spectre ou leur ratio OLI.

**Tableau 16.** *Etude de corrélations des modèles biogéo-optiques pour l'estimation de la turbidité*

<b>R<sub>rs</sub>_Ratio</b>	<b>Type de corrélation</b>	<b>Coefficient de détermination (R<sup>2</sup>)</b>	<b>Ecart-type moyen</b>
<b>R<sub>654.6</sub></b>	linéaire	0,3392	0,21661
	Polynomiale	0,5782	0,25650
<b>R<sub>561.3</sub></b>	linéaire	0,0851	0,17629
	Polynomiale	0,0982	0,19788
<b>R<sub>654.6</sub>/R<sub>561.3</sub></b>	Expo	0,8082	0,38052
	linéaire	0,8615	0,31898
	Polynomiale	0,9389	0,39612
	Puissance	0,8113	0,46349
<b>R<sub>654.6</sub>/482.6</b>	Linéaire	0,835	0,32015
	Expo	0,7114	0,34968
	Polynomiale	0,8451	0,31849
	Puissance	0,7113	0,26839
<b>R<sub>654.6</sub>/443</b>	Linéaire	0,8232	0,30422
	Expo	0,7058	0,27591
	Polynomiale	0,8657	0,29594
	Puissance	0,7096	0,29271

#### Annexe 5

L'étude des corrélations possibles entre les données in-situ de la chlorophylle et les bandes de la partie visible du spectre ou leur ratio de MSI.

**Tableau 17.** *Etude de corrélations des modèles biogéo-optiques pour l'estimation de la chlorophylle MSI*

<b>R<sub>rs</sub>_Ratio</b>	<b>Type de corrélation</b>	<b>Coefficient de détermination (R<sup>2</sup>)</b>	<b>Ecart-type moyen</b>
<b>R<sub>482</sub>/R<sub>561</sub></b>	Expo	0,6595	0,1453
	Logarithmique	0,7183	0,2345
	Polynomiale	0,761	0,0610
	Puissance	0,6649	0,1515
<b>R<sub>443</sub>/R<sub>561</sub></b>	Expo	0,5474	0,0606
	Logarithmique	0,582	0,0606
	Polynomiale	0,6134	0,0603
	Puissance	0,5527	0,0607
	Expo	0,5923	0,0610

<b>R<sub>482+443</sub>/R<sub>561</sub></b>	Logarithmique	0,6367	0,0610
	Polynomiale	0,685	0,0605
	Puissance	0,5986	0,0611
<b>R<sub>443</sub></b>	Linéaire	0,0519	0,0527
<b>R<sub>482</sub></b>	Linéaire	0,5712	0,0605

## Annexe 6

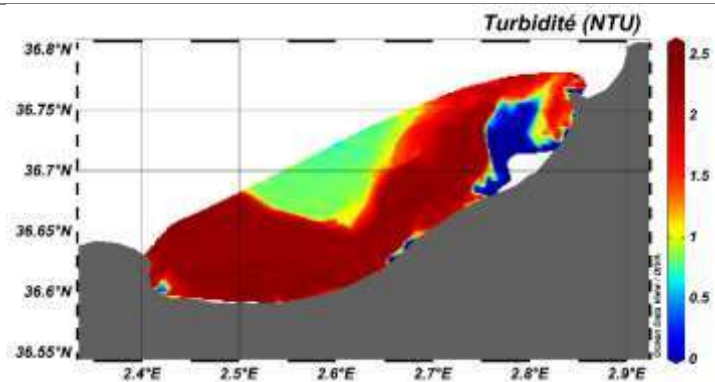
L'étude des corrélations possibles entre les données in-situ de la turbidité et les bandes de la partie visible du spectre ou leur ratio MSI.

*Tableau 18. Etude de corrélations des modèles biogéo-optiques pour l'estimation de la turbidité*

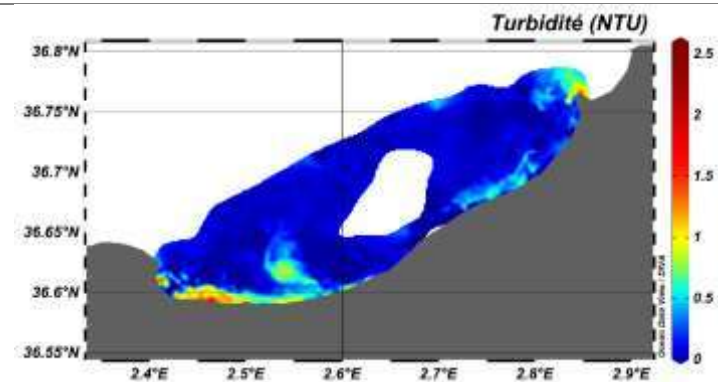
<b>R<sub>rs</sub>_Ratio</b>	<b>Type de corrélation</b>	<b>Coefficient de détermination (R<sup>2</sup>)</b>	<b>Ecart moyen</b>
<b>R<sub>664.5</sub></b>	linéaire	0,729	0,2880
	Polynomiale	0,7807	0,2773
<b>R<sub>560</sub></b>	linéaire	0,6318	0,2948
	Polynomiale	0,6551	0,2753
<b>R<sub>664.5</sub>/R<sub>560</sub></b>	Expo	0,6851	0,2553
	Linéaire	0,7913	0,2564
	Logarithmique	0,7915	0,2563
	Polynomiale	0,7917	0,2564
	Puissance	0,6859	0,2614
<b>R<sub>664.5</sub>/R<sub>496.6</sub></b>	Expo	0,5929	0,2906
	Linéaire	0,7024	0,2786
	Logarithmique	0,7146	0,2791
	Polynomiale	0,7845	0,2726
	Puissance	0,6017	0,2932
<b>R<sub>664.5</sub>/443.9</b>	Expo	0,5746	0,2928
	Linéaire	0,6791	0,2777
	Logarithmique	0,6927	0,2783
	Polynomiale	0,7497	0,2734
	Puissance	0,5846	0,2921

## Annexe 7

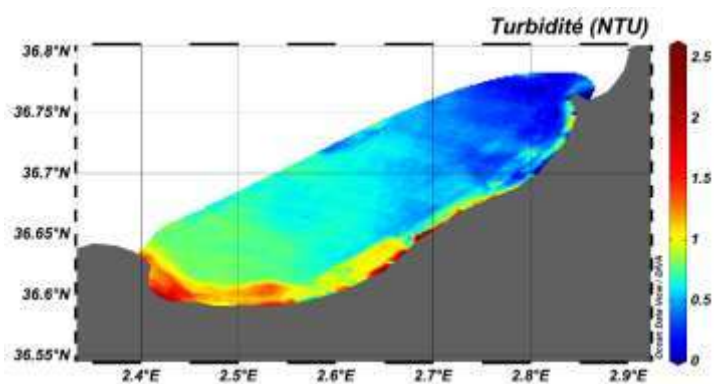
Résultats de la turbidité estimée par l'algorithme empirique de Landsat-8.



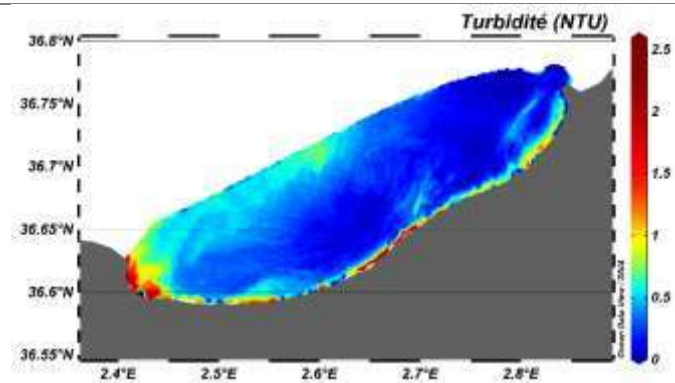
**Figure 60.** Turbidité estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Janvier 2017



**Figure 61.** Turbidité estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Février 2017



**Figure 62.** Turbidité estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Mars 2017



**Figure 63.** Turbidité estimée par l'algorithme empirique dans la baie de Bou Ismail en Avril 2017

## Résumé

L'objectif général de ce travail a été axé sur la conception d'un algorithme qui estime la concentration de la chlorophylle et de la turbidité, et le valider en le comparant à des algorithmes semi-analytiques de deux capteurs estimant ces paramètres : OC2 Landsat 8 et OC4E Sentinel2.

Pour ce faire, la démarche suivie était de concevoir des algorithmes empiriques, en faisant une calibration des mesures in-situ par des réflectances provenant des deux capteurs OLI et MSI afin d'élaborer des produits de couleur de l'océan plus proches de la réalité.

Il s'avère que les algorithmes OC (Ocean Color) ainsi que l'algorithme empirique Landsat-8 surestiment nettement la concentration en chlorophylle-*a*, car ils sont influencés par certains composants optiquement actifs dans l'eau de mer, entre autre, on cite la matière en suspension. Cependant, l'algorithme empirique Sentinel-2 a montré une efficacité et une meilleure performance, donc on l'a adopté pour répondre à notre problématique.

Une fois l'algorithme le plus efficace est choisi, cet algorithme a été appliqué aux mesures satellitaires Landsat-8 et Sentinel-2 de la réflectance. Ensuite, on s'est penché sur une étude comparative entre les produits de l'algorithme empirique estimant la chlorophylle et celui estimant la turbidité pour mettre en évidence l'influence de la turbidité ou des flux de la matière en suspension.

**Mots clés :** télédétection, domaine visible, Bou Ismail, chlorophylle-*a*, turbidité, matière en suspension, Landsat 8, Sentinel-2A.

## **Abstract**

The general objective of this work was to conceive algorithms of estimation of two parameters: chlorophyll-*a* and turbidity. To validate them, we chose to compare them to semi-analytical algorithms of two sensors Landsat- 8 and Sentinel-2. In order to do this, the approach was to design two empirical estimation algorithms for chlorophyll-*a* and turbidity by performing a calibration of in-situ measurements by reflectances of OLI and MSI sensors in order to develop color ocean products closer to reality. To validate them, they were compared to two standard algorithms OC2 Landsat 8 and OC4E Sentinel-2.

The OC (Ocean Color) algorithms and the Landsat-8 empirical algorithm clearly overestimate the chlorophyll-*a* concentration because they are influenced by some optically active components in seawater (in this case the suspended matter). However, the empirical Sentinel-2 algorithm has shown efficiency and better performance, so it has been adopted to resolve our problem.

This algorithm has been applied to the Landsat-8 and Sentinel-2 satellite measurements of the reflectance. Then, a comparative study was carried out between the products of the empirical algorithm estimating chlorophyll and that estimating the turbidity to show the influence of the turbidity or the fluxes of the suspended matter on Chlorophyll concentration.

**Keywords:** remote sensing, visible domain, Bou Ismail, chlorophyll-*a*, turbidity, suspended matter, Landsat 8, Sentinel-2A.

## ملخص

يتمحور الهدف العام من هذا العمل حول إنشاء خوارزميات، والتي من خلالها يتم تقدير تركيز كل من اليخضور والمواد العالقة بالماء. وحتى تتمكن من اعتمادها، قمنا بمقارنتها مع خوارزميات تابعة لجهازي استشعار عن بعد OLI و MSI.

لهذا الغرض، اتبعنا منهجية تجريبية والتي تقتصر على تصميم كل من هذه وذلك عن طريق معايرة قياسات اليخضور والمواد العالقة بالماء وطريق الانعكاس لهذه المواد بواسطة أجهزة الاستشعار عن بعد، وذلك للحصول على صور وقياسات أقرب إلى الواقع.

لقد تبين أن خوارزميات OC والخوارزمية التجريبية لـ Landsat-8 قد اظهرت مبالغة بشكل كبير في تقدير تركيز اليخضور، لأنها تتأثر ببعض المكونات النشطة التي تعكس الموجات الضوئية بصفة مطابقة لليخضور في مياه البحر، والتي من بينها المواد العالقة بالماء. إلا أن الخوارزمية التجريبية لـ Sentinel-2 قد أظهرت فعالية وتقدير أفضل للقياسات المراد تحصيلها، ولهذا تم اعتماده للإجابة على الإشكالية المطروحة في البداية. كانت المرحلة الموالية تقتضي بمقارنة النتائج المتحصل عليها بالطريقة التجريبية (Sentinel-2) لكل من اليخضور والمواد العالقة بالماء، وكان الهدف من هذه المرحلة التعرف على مدى تأثير التعكر وتدفقات المواد العالقة بالماء عن طريق الأودية على تركيز اليخضور.

**كلمات البحث:** الاستشعار عن بعد، المجال المرئي للضوء، بو إسماعيل، اليخضور، التعكر، المواد العالقة بالماء،

Sentinel-2A·Landsat 8