

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 : Ingénierie de l'Environnement Marin et Côtier

Thème :

Modélisation du phytoplancton marin et des
paramètres biologiques des zones côtières,
outils et imagerie satellitale

Présenté par :

M^{lle} Wafa Nour El Yakine Medjoubi

Soutenu le 06/10/2020 devant le jury suivant :

M BELKESSA. R	Professeur	(ENSSMAL)	Président du jury
Mme BACHARI HOUMA. F	Professeur	(ENSSMAL)	Promotrice
Mme HARID. R	Doctorante	(ENSSMAL)	Co-promotrice
M BOUGHRIRA. A	Maître assistant classe A	(ENSSMAL)	Examinateur
Mme MOKRANE. Z	Maître assistant classe B	(ENSSMAL)	Examinateur

Promotion : 2020

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier le bon Dieu que grâce à lui j'ai eu la chance et le pouvoir d'accomplir ce modeste travail.

Je voudrais aussi remercier grandement ma promotrice Pr. HOUMA-BACHARI d'avoir accepté de diriger ce travail ainsi que ma co-promotrice M^{lle} HARID qui a accepté de m'aider et de me soutenir. Qu'elles trouvent ici l'expression de mes plus vifs remerciements et sincères respects.

J'adresse mes plus sincères remerciements à M BELKESSA, Professeur à l'Ecole Nationale supérieure des sciences de la mer de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de mon mémoire. J'exprime mes profonds respects, mes sincères remerciements et toute ma considération

Un grand merci également à M. BOUGHRIRA, maitre-assistant classe A à l'ENSSMAL et Mme. MOKRANE, maitre-assistant classe B aussi à l'ENSSMAL qui ont bien voulu examiner, 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 à remercier tout particulièrement M. AROUA doctorant à L'ENSSMAL, Mme SATHYENDRANATH, Scientifique spécialiste de la télédétection, Laboratoire marin de Plymouth et M. SEIDERMAN, Météorologue aux centres nationaux d'information sur l'environnement de la NOAA pour leur aide précieuse pour ma recherche bibliographique et d'avoir répondu à mes E-mail pendant ces derniers mois.

Je tiens aussi vivement à remercier sincèrement tous les professeurs et toute personne de l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du littoral plus particulièrement Ami Hassan, les bibliothécaires, les agents de maintenances et de sécurité qui, m'ont porté leur précieux aide et surtout leur soutien moral durant toutes les années d'étude à l'école. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma vive reconnaissance et ma profonde gratitude.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À mes grands-parents Allah yerhamhoum

*À mes sources d'inspiration mes parents, à ma tante qui lui aussi n'a jamais
arrêté de m'aider et de m'accompagner dans ce long chemin.*

À ma sœur Manar, my partner in crime

À mes deux frères Ouail Bahaa Eddine et Mohamed Taki Eddine

À ma deuxième famille Bahdja, Ikram et Naziha ... we did it !!!

*À mes chers amis Anis, Anissa et Haïthem, Amel, Lamia (you are
a family to me too)*

À toute ma promotion de 2015 à 2020,

Liste des figures

Figure 1.1. Division cellulaire des diatomées (Mollo & Noury, 2013).....7

Figure 1.2. Cycle de la matière organique dans l’océan et des doubles rôles du phytoplancton (Antoine 1998).....10

Figure 1.3. Le rayonnement électromagnétique de la lumière (Philip et al 2013)..... 11

Figure 1.4. Gamme de taille des différents constituants présents dans l’eau de mer L’eau de mer (Stramski et al 2004).....11

Figure 1.5. Spectres d’absorption et de diffusion de l’eau de mer pure, d’après, respectivement, Pope & Fry (1997) et Morel (1974).....12

Figure 1.6. Variation du coefficient d'absorption des composants optiquement significatifs en fonction de la longueur d'onde (Gernez 2009).....13

Figure 1.7. La luminance (Benoit 2001)..... 14

Figure 1.8. 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..... 16

Figure 1.9. Différence entre les eaux de cas 1 et de cas 2 (Antoine 1998)..... 17

Figure 2.1. Localisation géographique du Bassin Algérois.....29

Figure 2.2. Localisation géographique de la baie de Zemmouri.....30

Figure 2.3. Localisation géographique de la baie d'Alger.....31

Figure 2.4. Réseau hydrographique de la baie d'Alger.....32

Figure 2.5. Sédimentologie de la baie d'Alger (Bachouch 2017).....33

Figure 2.6. Localisation géographique de la baie de Bou Ismaïl.....34

Figure 2.7. Réseau hydrographique de la baie de Bousmail (Benharkou 2017).....35

Figure 2.8. Sédimentologie de la baie de Bousmail (Bahouch 2017).....36

Figure 2.9. Température mensuelle moyenne entre 2010 à 2019 depuis la station météorologique Dar el Beida.....38

Figure 2.10. Précipitation mensuelle moyenne entre 2010 et 2019 depuis la station météorologique Dar el Beida.....	38
Figure 3.1. L'interface Ocean Color de la NASA.....	41
Figure 3.2. Choix du mode de téléchargement des données.....	41
Figure 3.3. Délimitation de la zone d'étude.....	42
Figure 3.4. Définition de l'intervalle du temps.....	43
Figure 3.5. Sélection du satellite et du niveau de traitement.....	43
Figure 3.6. Affichage et visualisation de l'image.....	44
Figure 3.7. Choix de la zone d'étude et définition de l'intervalle du temps.....	45
Figure 3.8. Sélection de l'image.....	45
Figure 3.9. Visualisation et Téléchargement de l'image.....	46
Figure 3.10. Sélection de la date et du type de capteur.....	46
Figure 3.11. Traitement des données MODIS sur le logiciel SeaDAS.....	47
Figure 3.12. Traitement des données OLI avec le logiciel ENVI.....	48
Figure 3.13. Traitement des données MSI avec le logiciel SNAP.....	49
Figure 3.14. Traitement des données OLCI avec le logiciel SNAP.....	50
Figure 3.15. Application du model C2RCC.....	51
Figure 3.16. Visualisation des informations d'une station.....	52
Figure 3.17. Extraction des données.....	52
Figure 3.18. Introduction des algorithmes pour la modélisation des groupes du phytoplancton (Hirata et al., 2011).....	53
Figure 4.1. Réponse optique de la masse d'eau côtière dans le bassin Algérois.....	56
Figure 4.2. Comparaison entre les données de la concentration de la Chl-a issues de quatre satellite dans le bassin Algérois.....	58
Figure 4.3. Distribution annuelle des groupes de phytoplanctons (2019).....	60
Figure 4.4. Distribution des Diatomées dans le bassin Algérois (2019).....	62

Figure 4.5. Distribution des Dinoflagellés dans le bassin Algérois (2019).....	62
Figure 4.6. Distribution des Microplanctons dans le bassin Algérois (2019).....	64
Figure 4.7. Distribution des Chlorophycées dans le bassin Algérois (2019).....	64
Figure 4.8. Distribution des Prymnesiophytes dans le bassin Algérois (2019).....	66
Figure 4.9. Distribution des Nanoplanctons dans le bassin Algérois (2019).....	66
Figure 4.10. Distribution des Picoplanctons dans le bassin Algérois (2019).....	68
Figure 4.11. Distribution des Procaryotes dans le bassin Algérois (2019).....	68
Figure 4.12. Distribution des Prochlorococcus dans le bassin Algérois (2019).....	69
Figure 4.13. Contribution moyenne mensuelle du Nanoplancton (2019).....	70
Figure 4.14. Contribution moyenne mensuelle du Microplancton (2019).....	71
Figure 4.15. Contribution moyenne mensuelle du Picoplancton (2019).....	73
Figure 4.16. Variation de la concentration de Chlorophylle Moyennes mensuelles.....	74
Figure 4.17. Concentration de la Chl-a dans le bassin Algérois (2019).....	75
Figure 4.18. Réponses spectrales dans la baie de Zemmouri (2019).....	78
Figure 4.19. Réponses spectrales dans la baie d'Alger (2019).....	78
Figure 4.20. Réponses spectrales dans la baie de Bousmail (2019).....	79
Figure I. Page d'inscription et de connexion à Earthdata.....	VIII
Figure II. Page d'inscription et de connexion à l'USGS.....	VIII
Figure III. L'interface Open Access de Copernicus.....	IX
Figure IV. Portail d'inscription et connexion sur EUMETSAT.....	IX
Figure V. Introduction d'un pin pour l'extraction des informations d'une station donnée.....	X
Figure VI. l'extraction des information de la totalité de la surface marine.....	X
Figure VII. Exportation des données choisies.....	XI
Figure VIII. Carte de la chlorophylle estimée par l'algorithme du model C2RCC.....	XI
Figure IX. Carte de la chlorophylle estimée par l'algorithme OC4.....	XI

Liste des figures

Figure X. Carte de la chlorophylle estimée par l'algorithme OC5.....XII

Figure XI. Carte de la chlorophylle estimée par l'algorithme OC6.....XI

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Caractéristiques des bandes spectrales du Capteur MODIS 18

Tableau 1.2. Caractéristiques des bandes spectrales du capteur OLI de Landsat-8..... 19

Tableau 1.3. Caractéristiques des bandes spectrales du capteur TIRS de Landsat-8..... 20

Tableau 1.4. Caractéristiques des bandes spectrales du capteur MSI de Sentinel -2..... 20

Tableau 1.5. Caractéristiques des bandes spectrales du capteur OLCI de sentinel -3 21

Tableau 1.6. Algorithmes et coefficients de l'estimation de la chlorophylle 24

Tableau 1.7. Equations utilisées par (Hirata et al. 2011) pour estimer les fractions (0,0 à 1,0) des classes de taille du phytoplancton (micro, nano et picoplancton) et de certains types fonctionnels du phytoplancton (Méthode basée sur l'abondance) 27

Tableau 4.1. Produits Level-2 MODIS 55

Tableau 4.2. Produits Level-2 générés par C2RCC pour OLI, MSI et OLCI..... 55

Tableau 4.3. Coefficient de corrélation et l'erreur estimée entre les concentrations in-situ et celles calculées par les algorithmes bio-optique 59

Tableau I. Les images utilisées dans les cycles annuelsVII

Tableau II. Valeurs des réflectances de la baie de ZemmouriXI

Tableau III. Valeurs des réflectances de la baie d'Alger.....XII

Tableau IV. Valeurs des réflectances de la baie de BousmailXIII

Liste des abréviations

C2RCC	Case 2 Regional CoastColour
CDOM	Matière Organique Dissoute Colorée
Chl-a	Chlorophylle a
E	Champ électrique
EO	Earth Observation
Lambda (λ)	Longueur d'onde
m	mètre
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer
MES	Matière En Suspension
MODIS	MODerate resolution Imaging Spectroradiometer
MSI	MultiSpectral Instrument
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OLCI	Ocean and Land Color Instrument
OLI	Operational Land Imager
Rrs	Remote sensing reflectance
SeaDAS	SeaWiFS Data Analysis System
SeaWIFS	Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
Sr	Stéradian
USGS	United States Geological Survey
W	Watt

Sommaire

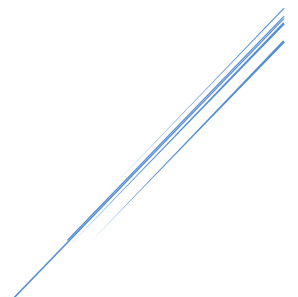
Remerciement.....	i
Dédicace	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	vii
Liste des Abréviations	viii
Sommaire	ix
Introduction	2
I. Généralités.....	6
1. Le phytoplancton (Biologie & Ecologie).....	6
1.1 <i>Bacillariophyta</i>	6
1.2 <i>Dinophyta</i>	7
1.3 <i>Prymnesiophyta</i>	7
1.4 <i>Cyanophyta</i>	8
1.5 <i>Chlorophyta</i>	8
1.6 <i>Chrysophyta</i>	8
1.7 <i>Xanthophyta</i>	8
1.8 <i>Euglèna</i>	8
2. Habitat du phytoplancton	8
3. Cycle de vie du phytoplancton	9
4. Rôles du phytoplancton	9
4.1 Photosynthétique.....	9
4.3 Etude des phénomènes océaniques	10
5. Télédétection de la couleur de l'océan	10
6. Les composantes optiquement significatives	11
6.1 Eau de mer	12

6.2	Matière en suspension.....	12
6.3	Chlorophylle	13
6.4	La matière organique dissoute colorée.....	13
6.5	Particules non algales.....	13
7.	Propriétés optique de l'eau de mer.....	14
7.1	Propriétés Optiques Apparentes.....	14
7.2	Propriétés optique inhérente.....	15
8.	Classification optiques des eaux océaniques.....	17
8.1	Les eaux du "Cas 1"	17
8.2	Les eaux du "Cas 2"	17
9.	Satellites de la couleur de la mer.....	18
9.1	Le satellite Aqua	18
9.2	Le satellite Landsat-8.....	19
9.3	Le satellite Sentinel-2	20
9.4	Le satellite Sentinel-3	20
10.	Logiciels de traitement des données satellitaires.....	22
10.1	SeaWiFS Data Analysis System	22
10.2	ENvironment for Visualizing Images	22
10.3	Sentinel Application Platform.....	22
11.	Algorithme d'estimation de la chlorophylle.....	23
12.	Algorithmes de détection du phytoplancton.....	25
12.1	Méthodes basées sur l'abondance.....	25
12.2	Méthodes basées sur les caractéristiques optiques.....	25
12.3	Approches écologiques	25
II.	Zone d'étude.....	29
1.	Bassin Algérois	29

2.	Baie de Zemmouri	29
2.1	Hydrologie de la baie	29
2.2	Source de pollution	30
3.	Baie d'Alger	31
3.1	Hydrologie de la baie	31
3.2	Sédimentologie de la baie	32
3.3	Source de pollution	33
4.	Baie de Bou-Ismaïl	34
4.1	Réseau hydrographique	34
4.2	Sédimentologie de la baie de Bousmail	35
4.3	Source de pollution	36
5.	Climatologie	37
5.1	Température	37
5.2	Pluviométrie	38
III.	Matériel et méthodes	40
1.	Acquisition données satellitaires	40
1.1	Acquisition des données MODIS	40
1.2	Acquisition des données OLI	42
1.3	Acquisition des données MSI	44
1.4	Acquisition des données OLCI	46
2.	Traitement et analyse des données	47
2.1	Traitement et analyse des données MODIS	47
2.2	Traitement et analyse des données OLI	48
2.3	Traitement et analyse des données MSI	49
2.4	Traitement et analyse des données OLCI	49
3.	Calcul et extraction de la chlorophylle satellitaire	50

4. Application des Algorithmes Bio-optiques	52
5. Modélisation du phytoplancton	53
IV. Résultats et discussion.....	55
1. Sélection du meilleur capteur pour la télédétection de la couleur de l’océan	55
1.1 Comparaison entre les produits des capteurs	55
1.2 Comparaison entre les images.....	56
2. Sélection du meilleur algorithme pour l’estimation de la chlorophylle	59
3. Cycle annuel des groupes du phytoplancton dans le bassin Algérois (année 2019)	59
3.1 Nanoplancton	70
3.2 Microplancton	70
3.3 Pico-plancton	72
4. Variabilité du cycle annuel de la Chl- <i>a</i> dans le bassin Algérois (année 2019).....	74
5. Signatures spectrales des eaux du bassin Algérien	77
Conclusion.....	81
Références bibliographiques	II
Annexes	VII

Introduction



Introduction

Aujourd'hui la télédétection marine est devenue une branche qui intéresse plusieurs scientifiques océanographes, biologistes, chimistes ... A son tour la télédétection de la couleur de l'océan est l'une de ses importantes branches qui a connu un développement remarquable. D'une part car elle permet d'observer et de surveiller multiples variations des différents phénomènes biologiques, océaniques et climatiques. D'autre part ces observations sont faites à un temps réduit et même presque en temps réel. Plusieurs capteurs sont développés depuis le premier scanner couleur des zones côtières en 1970.

Le principe de la télédétection de la couleur de l'océan est basé sur l'enregistrement du rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi par chaque élément constituant l'eau de mer en exploitant certaines propriétés géométriques (chemin du rayonnement), optique (comportement du rayonnement) ainsi que les paramètres physico-chimiques. Ensuite l'application des algorithmes bio-optique afin d'estimer certaines concentrations, tel que la Chlorophylle-*a* (Chl-*a*).

La télédétection est aussi utilisée pour l'identification de certains groupes voire espèces phyto-planctoniques génératrices des efflorescences algales. Connaître la composition taxonomique des groupes phyto-planctoniques est nécessaire pour l'évaluation de la qualité d'un milieu, ainsi que pour le suivi de sa productivité.

En Algérie, plusieurs modèles sont développés ainsi que des logiciels adaptés pour l'estimation des différents paramètres océaniques depuis le calcul d'une entité réfléchie par l'eau de mer souvent la radiance. Généralement ils utilisaient des données issues de Spot, Landsat MSS ou Landsat TM puis les traités avec par exemple le SDDS « Simulation des données satellitaires » développé par (Bachari et al., 1999).

Toutefois, la télédétection de la couleur de l'océan est un domaine plus ou moins récent par rapport aux autres applications satellitaires telles que la météorologie et la pollution marine.

La plupart des applications de la couleur de l'océan s'intéressent à l'étude du comportement des populations phyto-planctoniques et la distribution de la Chl-*a* dans la région centre de la côte algérienne utilisant différents outils et méthodes de télédétection ... (Madi., 2009, Houma., 2009 ; Kassar., 2011; Harid et al., 2017a, 2017b; Harid et al., 2018 ; Boufeniza et al., 2018, 2019, 2020 ;). Les extractions sont ensuite introduites dans les logiciels de cartographie afin de reproduire des cartes pour chaque paramètre estimé.

Une étude plus récente faite par Boufeniza et al, 2020, qui représente une étude de la distribution spatio-temporelle des diatomées et dinoflagellés associés aux blooms algaux dans la baie d'Alger où ils ont utilisé des données in-situ ainsi que des images satellitaire de Landsat-8.

L'objectif de notre travail repose premièrement sur l'application des algorithmes bio-optiques afin de calculer la Chl-*a* à partir des données satellitaires. Deuxièmement, une comparaison entre des données de Chl-*a* issues de plusieurs capteurs est réalisée, afin de mieux déterminer le satellite le plus adapter aux études de la concentration de la Chl-*a* côtière dans le bassin Algérois.

Une étude sur le cycle annuel des chlorophylles et des différents groupes phyto-planctoniques présents sur le bassin Algérois est réalisée. Les pourcentages des différents groupes phyto-planctoniques sont estimés en utilisant les outils de la télédétection et les algorithmes de (Hirata et al., 2011). Finalement une étude sur les signatures spectrales des eaux marines est réalisée.

Ce manuscrit est organisé comme suit :

Le premier chapitre de cette étude est une synthèse bibliographique. Il est divisé en deux parties, la première qui traite le phytoplancton (écologie, biologie, taxonomie, ...), et la deuxième partie qui présente les bases de la télédétection de la couleur de l'océan. Ainsi que les capteurs et les algorithmes dédiés à l'estimation des concentrations des paramètres biologiques de la surface océanique.

Le deuxième chapitre par contre, est dédié à la description de la zone d'étude, son contexte géographique, hydrologique et climatique. Le bassin Algérois est composé de trois baies principales qui sont, la baie de Bousmail, la baie d'Alger et la baie de Zemmouri qui font objet de cette étude.

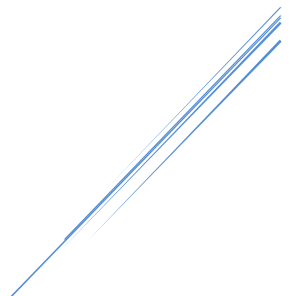
Le troisième chapitre décrit la méthodologie suivis dans cette étude. Nous avons d'abord collectés quatre images satellitaires acquises toutes le 24 février 2020 afin de comparer la performance de quatre capteurs différents. Les capteurs choisis sont MODIS, OLI, MSI et OLCI.

Nous avons aussi téléchargé des images acquises en 2019, une image par mois où la couverture nuageuse est faible voire nulle. Une série de traitement est appliqué ensuite sur des logiciels open source afin de calculer la réflectance, d'extraire les pourcentages des groupes phyto-planctoniques ainsi que, d'estimer la concentration de la chlorophylle dans la zone d'étude.

Introduction

Pour le dernier chapitre nous avons présenté les résultats obtenus après les traitements effectués sous forme de cartes de distribution des pourcentages phyto-planctoniques et des concentrations de la chlorophylle. Nous avons aussi conçus des signatures spectrales afin de savoir le comportement optique des eaux du bassin Algérois. En fin nous avons clôturé cette étude par une conclusion générale qui résume les points essentiels de notre étude.

Généralités



I. Généralités

Ce chapitre introductif est conçu pour évoquer l'ensemble des définitions sur le phytoplancton ainsi que les notions de bases utilisées dans le domaine de la télédétection de la couleur de la mer.

1. Le phytoplancton (Biologie & Ecologie)

Le mot plancton vient du grec plankton qui signifie « errer ». Il a été introduit pour la première fois par Hensen en 1887. Selon Hensen, le plancton comprend toutes les particules organiques qui flottent librement et involontairement en eau libre, indépendamment des rivages et du fond (**Hutchinson, 1957; Ruttner, 1940**). Le plancton se divise en deux grands règnes et on distingue le plancton végétal, ou phytoplancton et le plancton animal, ou zooplancton.

Le phytoplancton, ou plancton végétal, est l'ensemble des algues microscopiques formées d'une seule cellule (micro-algues). Bien qu'elles soient unicellulaires, les micro-algues présentent une grande diversité de tailles, de couleurs et de formes. Le phytoplancton comprend des milliers d'espèces se répartissant en plusieurs groupes : algues bleues ou cyanobactéries, diatomées, coccolithes, chrysophycées et chlorophycées, dinoflagellés (**Mollo & Noury, 2013**). Du point de vue dimensionnelle, le phytoplancton appartient à la fois au picoplancton (0,2-2 μm), au nanoplancton (2-20 μm), au microplancton (20-200 μm) et plus rarement au mésoplancton (0,2-20 mm)(**Mollo & Noury, 2013**).

Selon leur caractéristique morphologique et la nature de leurs pigments, le phytoplancton est constitué de très nombreuses espèces regroupées en différentes classes et familles. Il regroupe deux types d'organismes qui diffèrent au niveau cytologique : les procaryotes et les eucaryotes (**Prescott et al., 2003**). D'après Bougis, 1974 et Rossi, 2008, le phytoplancton est représenté principalement par les classes suivantes :

1.1 Bacillariophyta

Riches de plus de 14 000 espèces, Bacillariophycées dites aussi les diatomées peuvent représenter jusqu'à 80 % du phytoplancton, c'est l'un des groupes phyto-planctoniques les plus importants. Les diatomées peuvent vivre solitaires ou très souvent regroupés en colonies et sont présents aux formes diverses dans les milieux aquatiques. Beaucoup d'espèces sont sessiles ou associées aux substrats littoraux.

La cellule présente un exosquelette composé de pectine et de silicium appelé frustule, qui est constituée de deux valves de silice qui s'imbriquent l'une dans l'autre, telles un boîtier et son

couvercle (Fig 1.1), et dont l'ornementation très variée constitue la base de leur classification (Bérard-Therriault et al., 1999).

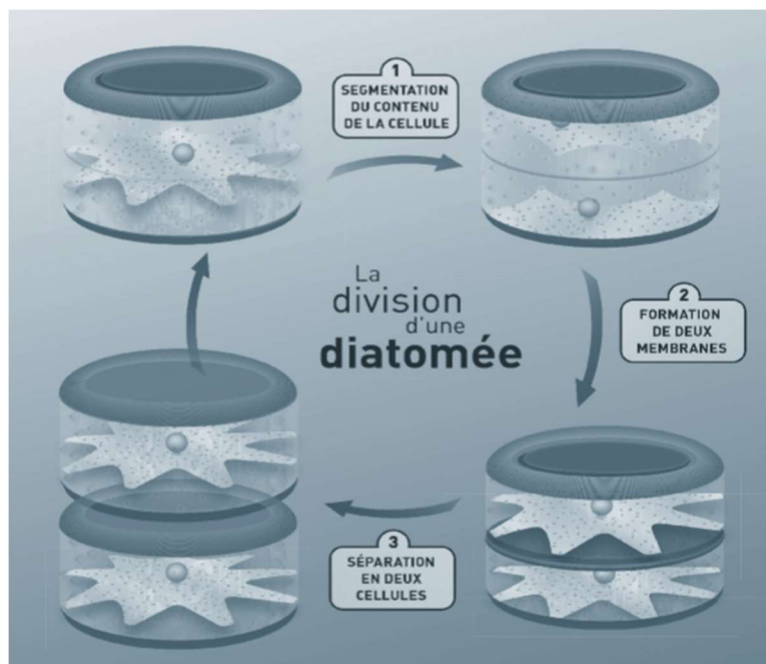


Figure 1.1. Division cellulaire des diatomées (Mollo & Noury, 2013)

1.2 Dinophyta

Dinophyta également connues sous le terme de Dinophyflagellés, désignent le deuxième plus important groupe du phytoplancton (Boudjenah, 2019). Cette classe des micro-algues a une caractéristique particulière, celle de produire des eaux colorées, ce phénomène s'explique par la prolifération intense d'une ou de plusieurs espèces, comme sous le nom de « blooms » et elle regroupe environ 300 espèces. Ce sont des organismes aux formes et aux tailles très diverses pourvus de deux flagelles distinctifs, l'un transversal et l'autre longitudinal, ces deux flagelles, leur permettent de se maintenir dans la couche supérieure de la colonne d'eau.

1.3 Prymnesiophyta

Cette classe est représentée par les coccolithophoridés, qui sont des organismes unicellulaires phyto-planctoniques (algues marines), exclusivement marins, apparus au Trias, colonisant toutes les surfaces océaniques, et forment un groupe important composé d'individus qui ont la particularité d'être ornements par une structure complexe d'éléments calcaires.

Une enveloppe sphérique entoure la cellule globuleuse (la coccosphère), qui est constituée par un assemblage de plaques calcaires qu'on appelle les coccolithes. Ce sont des très petits

flagellés de 4 à 50 μm . Plusieurs espèces adoptent la forme sphérique et ont des flagelles qui constituent leur stratégie de flottaison (**Boudjenah, 2019**).

1.4 Cyanophyta

Ce groupe englobe les espèces unicellulaires ou coloniales. Il est divisé en 3 ordres, les Chroococcales, Oscillatoriales et les Nostrocales. Son pigment photosynthétique primaire est la chlorophylle-*a* avec la présence du phycocyanin et du phycoerythrin (**Reynolds, 2006**).

1.5 Chlorophyta

La classe des chlorophycées regroupe les espèces unicellulaires ou pluricellulaires, de forme ovoïde, elles mesurent de 1 à 10 microns (**Mollo & Noury, 2013**). Leur chloroplaste contient des pigments chlorophylliens *a* et *b* (**Reynolds, 2006**).

1.6 Chrysophyta

Les chrysophycées sont des algues unicellulaires ou coloniales, de forme allongée et de petite taille (2 à 3 microns)(**Mollo & Noury, 2013**).

1.7 Xanthophyta

Cette classe englobe les espèces unicellulaires, coloniales, filamenteuses, généralement mobiles. Elles possèdent deux ou plusieurs plastides discoïdes par cellule contenant de la chlorophylle-*a*. Les Cellules sont principalement jaune-vert en raison du pigment accessoire prédominant qui est la diatoxanthine (**Reynolds, 2006**).

1.8 Euglèna

Biflagellés unicellulaires pigmentés vert. Les cellules possèdent de nombreux plastides irréguliers, contenant de la chlorophylle *a* et *b* (**Reynolds, 2006**).

2. Habitat du phytoplancton

Le phytoplancton peut vivre partout où il y a de l'eau. On le trouve aussi bien dans les eaux douces, marines que saumâtres (mélange d'eau douce et d'eau salée comme les estuaires) (**Mollo & Noury, 2013**).

Certaines espèces vivent en association avec des animaux comme des protozoaires, des éponges ou des ascidies (Endozioques) ou avec des végétaux comme des fougères aquatique ou des angiospermes (Endophytiques)(**Couté & Bernard, 2001**). Elles peuvent encore vivre en symbiose avec des champignons et des algues vertes comme dans le cas des lichens. Dans le cas où elles sont strictement aquatiques, elle peuvent être planctoniques, vivant dans la colonne

d'eau, ou benthiques fixées ou très proches des divers substrats (roches, algues, animaux) et se développent même à l'intérieur des sédiments (Couté & Bernard, 2001; Mur et al., 1999). Il se développe mieux dans les eaux plutôt calmes et riches en sels nutritifs : rivières, estuaires, marais...

3. Cycle de vie du phytoplancton

Pour vivre, le plancton végétal a besoin d'eau, de lumière, de sels minéraux (nitrate, phosphore, silicate, potassium...), d'oligoéléments (magnésium, fer...) et de CO₂.

Le développement de phytoplancton dépend des conditions climatiques générales et microclimatiques locales. D'autres facteurs d'ordre physicochimique ou hydrographique, eux-mêmes soumis directement mais dans une plus ou moins large mesure aux variations climatiques, interviennent également sur le développement du phytoplancton (Paulmier, 1972).

À l'échelle d'une année, Le phytoplancton présente une grande variabilité saisonnière. En théorie, le phytoplancton se développe de préférence au printemps et à l'automne, lorsque les conditions sont optimales. Aujourd'hui, ce rythme annuel est de moins en moins respecté en raison de l'évolution du milieu (excès d'apports en nutriments, réchauffement climatique) et certaines espèces peuvent proliférer tout au long de l'année (Mollo & Noury, 2013).

4. Rôles du phytoplancton

Le phytoplancton joue plusieurs rôles très importants, citant les suivants :

4.1 Photosynthétique

Le phytoplancton sous l'effet de la lumière et en présence de nutriment et de CO₂ se développe, produit de la matière organique par photosynthèse et respire (production primaire brute) (Fig 1. 2). Le phytoplancton est une espèce autotrophe car il produit lui-même sa matière organique. Dans la majeure partie des océans, il continue jusqu'à l'épuisement total des nutriments présents dans la couche euphotique (Moore & Abbott, 2000; Oubelkheir, 2001).

4.2 Chaîne trophique

Le phytoplancton est le premier maillon de la chaîne alimentaire marine, et de son abondance dépend le développement des échelons supérieurs. La compréhension du fonctionnement des écosystèmes marins et la quantification des échanges et flux entre leurs différents compartiments (phytoplancton, zooplancton, détritus, etc.) requiert au moins une bonne quantification du compartiment phyto-planctonique.

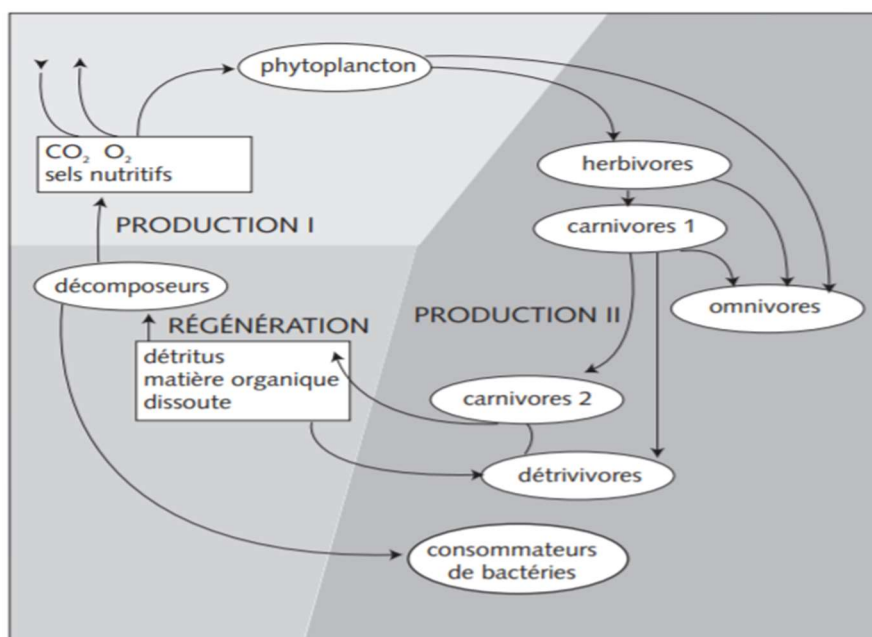


Figure 1.2. Cycle de la matière organique dans l'océan et des doubles rôles du phytoplancton (Antoine 1998)

En outre, les principales zones de pêche mondiale se situent dans des régions de forte production phyto-planctonique, qu'il convient donc de connaître au mieux (Antoine, 1998).

4.3 Etude des phénomènes océaniques

Le phytoplancton, détecté à partir de l'espace, est un excellent traceur de la distribution spatiale et de l'évolution temporelle des phénomènes océaniques, sauf dans le cas d'un développement très rapide de la population algale (Antoine, 1998).

5. Télédétection de la couleur de l'océan

La principale variable optique d'intérêt pour la télédétection dans le milieu marin est le rayonnement qui sort de l'eau, c'est-à-dire le rayonnement ascendant sous la surface se propageant à travers l'interface air-mer, et n'inclut pas uniquement le rayonnement descendant réfléchi à l'interface. Le terme "couleur de l'océan" fait référence à la composition spectrale du champ de lumière visible (Fig 1.3) qui émane de l'océan. La couleur de l'océan dépend du spectre d'irradiation solaire, des conditions atmosphériques, des géométries solaires, ainsi que des propriétés d'absorption et de diffusion de l'eau et des substances qui sont dissoutes et en suspension dans la colonne d'eau, par exemple le phytoplancton et les sédiments en suspension (Mobley, 1994).

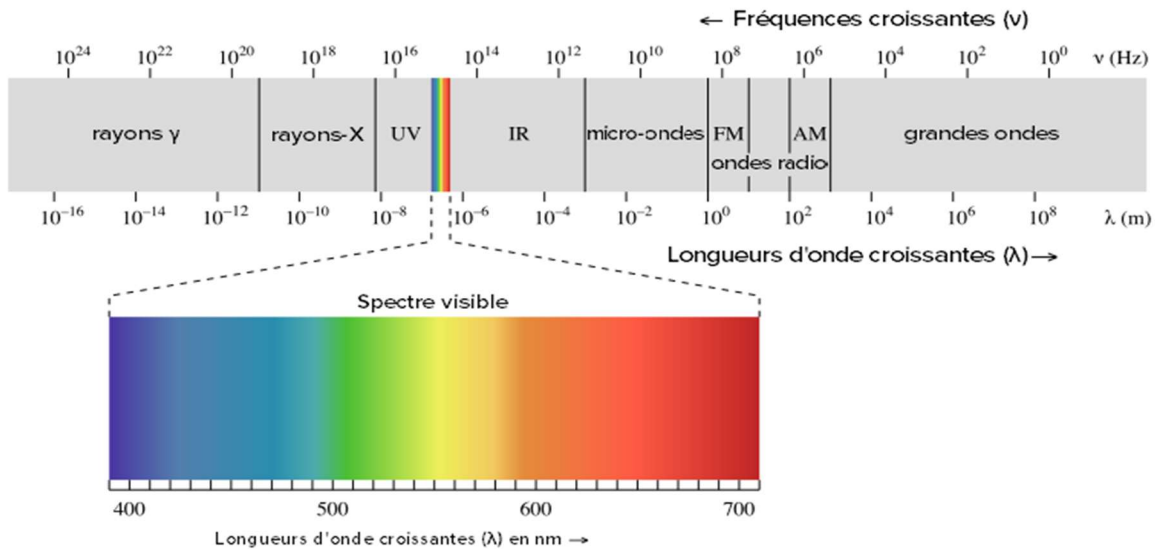


Figure 1.3. Le rayonnement électromagnétique de la lumière (Philip et al 2013)

6. Les composantes optiquement significatives

L'eau de mer est composée de molécules d'eau, de sels dissous, de matière particulaire et dissoute d'origine organique ou inorganique, vivante ou non-vivante, et dans une gamme de tailles comprise entre 0.1 nm et plusieurs mm (Fig 1.4). Les composantes optiquement significatives représentent l'ensemble de ces substances.

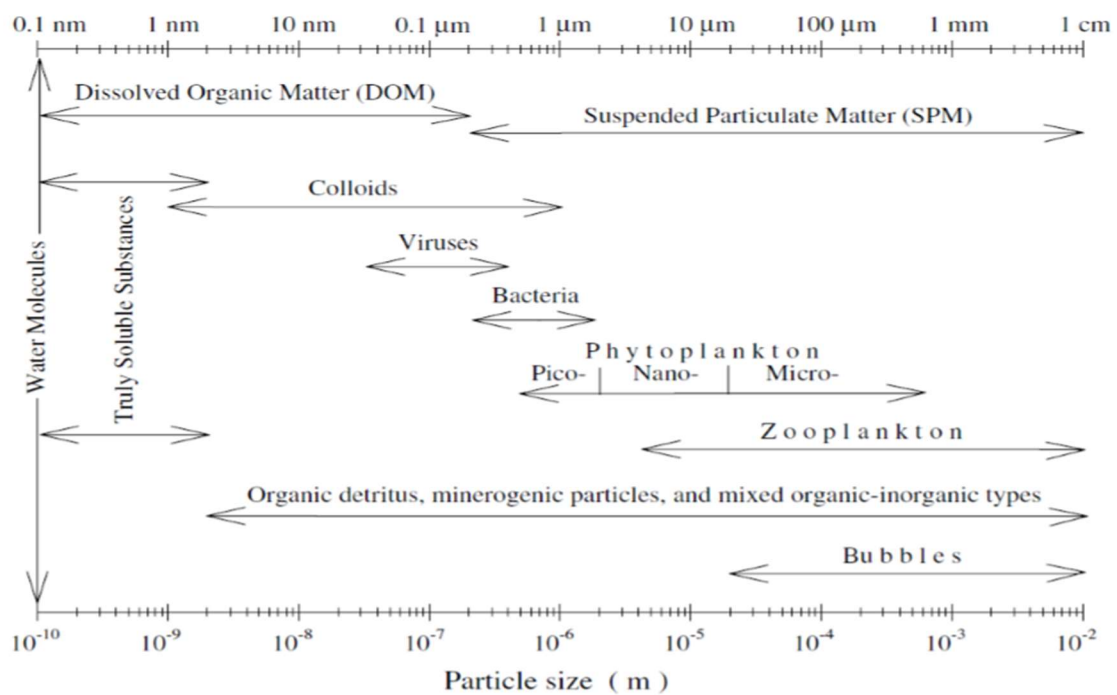


Figure 1.4. Gamme de taille des différents constituants présents dans l'eau de mer L'eau de mer (Stramski et al 2004)

6.1 Eau de mer

L'eau de mer intervient par absorption et par diffusion (Fig 1.5). La diffusion moléculaire dans l'eau de mer est décrite par la théorie d'Einstein-Schmoluchowski¹,

selon laquelle la diffusion est possible grâce aux fluctuations de densité du milieu (Antoine, 1998). L'absorption par l'eau de mer pure est faible dans les domaines du bleu et du vert du spectre lumineux, et augmente à partir de 550 nm pour devenir nettement significative dans le rouge (Fig 1.6).

L'eau de mer pure est constituée de molécules d'eau et d'ions divers (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} ,...) qui composent le sel (Ouhssain, 2014). Le phénomène est en outre accentué dans l'eau de mer, par rapport à l'eau pure, par les fluctuations de concentration des différents ions (Antoine, 1998)

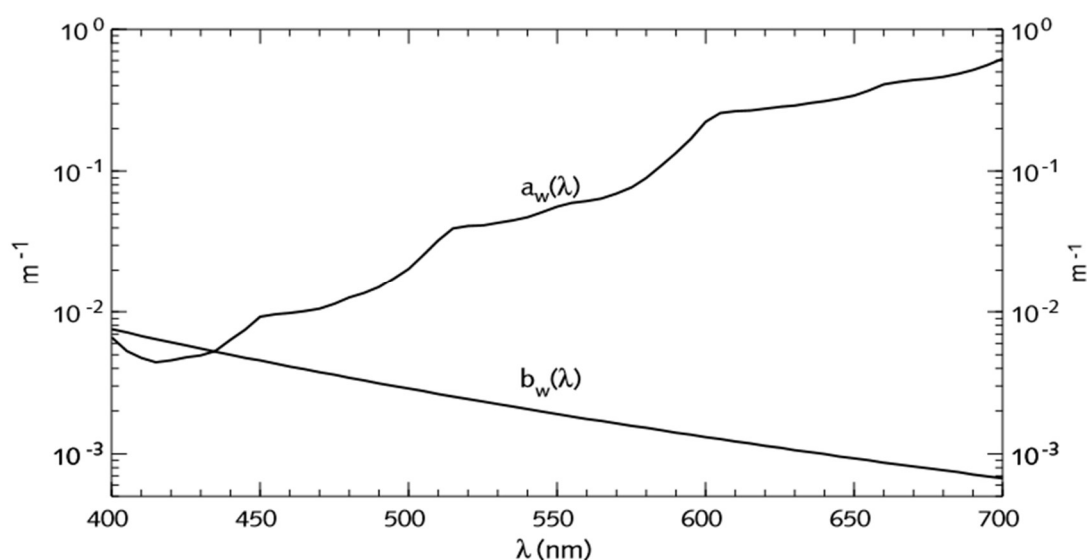


Figure 1.5. Spectres d'absorption et de diffusion de l'eau de mer pure, d'après, respectivement, Pope & Fry (1997) et Morel (1974). Avec dans l'axe des Y : à gauche le coefficient d'absorption (a_w), à droite le coefficient de diffusion (b_w).

6.2 Matière en suspension

Les matières en suspension correspondent à des particules de faibles taille et/ou densité, ce qui limite leur chute par gravité (Lefrançois, 2007). Les MES comprennent des fractions organiques et des fractions minérales ayant un diamètre supérieur à $0.45 \mu\text{m}$ dont les contributions respectives varient selon les saisons et les cours d'eau (Aminot & Chaussepied, 1983).

¹ Théorie d'Einstein-Schmoluchowski : Relation qui établit un lien entre les détails microscopiques de la diffusion des particules et les quantités macroscopiques associées à la diffusion, telles que la viscosité.

6.3 Chlorophylle

C'est le principal pigment photosynthétique du phytoplancton, absorbe relativement plus de lumière bleue et rouge que le vert. La concentration de la chlorophylle est déterminée à partir de la mesure de la quantité de lumière absorbée dans la longueur d'onde, 443 nm pour Landsat (Weber, 2002) (Fig 1.7). Des algorithmes analytiques développés par les chercheurs en optique océanographique permettent de convertir ces mesures en concentration de la Chl-*a*.

6.4 La matière organique dissoute colorée

La matière organique dissoute colorée (en Anglais : *Colored Dissolved Organic Matter*, appelée aussi : *yellow substance*, en Allemand : *gelbstoff*) représente la composante optique mesurable des matières organiques dissoutes dans les eaux naturelles. Se compose principalement des acides humiques et fulviques. Elle est opérationnellement définie par son passage à travers un filtre de faible porosité (généralement 0,2 μm) et sa capacité à absorber le rayonnement visible et ultraviolet (Sosik, 2007).

6.5 Particules non algales

Ce sont des particules marines également connues pour leur capacité à absorber la lumière. Elles comprennent des organismes hétérotrophes tels que les bactéries et les micro-broyeurs, d'autres particules organiques de nature détritique, telles que les boulettes fécales et les débris cellulaires, et diverses particules minérales d'origine à la fois biogénique (par exemple les coquilles calcaires) et terrestre (par exemple les argiles et le sable)...

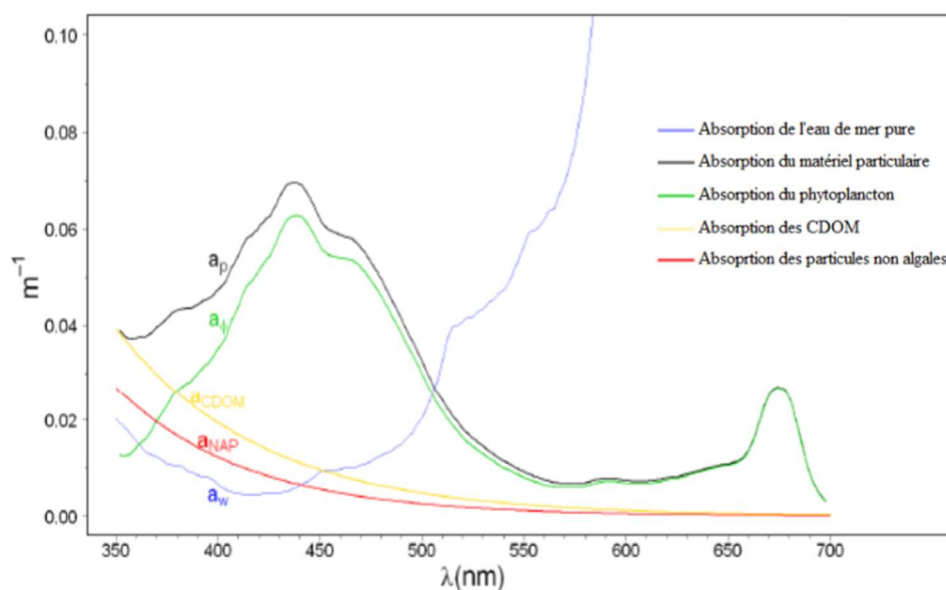


Figure 1.6. Variation du coefficient d'absorption des composants optiquement significatifs en fonction de la longueur d'onde (Gernez 2009)

Par rapport au phytoplancton, on en sait beaucoup moins sur les propriétés optiques de ces particules, mais certaines généralisations ont émergé (Sosik, 2007).

7. Propriétés optique de l'eau de mer

Les propriétés optiques globales de l'eau sont utilisées pour décrire comment la distribution spectrale et directionnelle des photons est modifiée dans la masse d'eau naturelle. Deux grandes classes de variables optiques sont utilisées pour caractériser la lumière dans l'eau: les Propriétés Optiques Apparentes (AOPs: Apparent Optical Properties) et les Propriétés Optiques Inhérentes (IOPs: Inherent Optical Properties) (Preisendorfer, 1976).

7.1 Propriétés Optiques Apparentes

Ce sont les propriétés qui dépendent à la fois du milieu et de la structure géométrique du champ lumineux. Elles sont faciles à mesurer mais sont difficiles à interpréter en raison des effets confondants sur l'environnement (Preisendorfer, 1976).

On considère une fraction de flux énergétique ($\delta\phi(\theta, \lambda)$, en W), émise depuis une source lumineuse de surface ΔS (en m^2), dans une direction (θ) et à travers un angle solide $\Delta\Omega$ (en sr) (Fig 1.7).

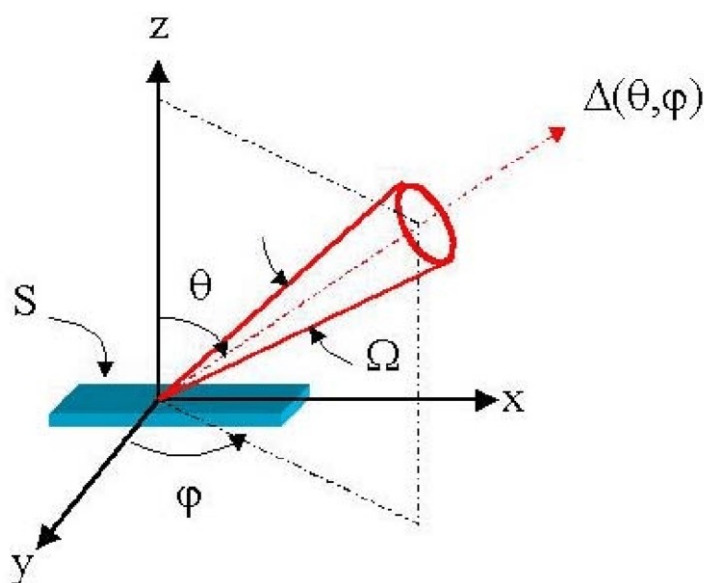


Figure 1.7. La luminance (Benoit 2001)

7.1.1 Luminance (radiance) :

Notée $L(\theta, \phi, \lambda)$ (en $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot sr^{-1}$) représente la quantité radiométrique fondamentale. Elle décrit la structure spatiale, temporelle et directionnelle (θ est l'angle zénithal et ϕ l'angle azimutal). Elle est dépendante de la longueur d'onde du champ lumineux.

La luminance est exprimée en unité de flux radiant (ϕ) par unité de surface (S) par longueur d'onde (λ) par angle solide (Ω). Elle est définie par l'équation (**Gordon et al., 1975**) :

$$L(\lambda, \theta) = \frac{\delta\phi}{\Delta S * \Delta\Omega * \cos\theta} \quad (1.1)$$

7.1.2 Eclairage (irradiance) :

Noté $E(\lambda)$ (en $W.m^{-2}.nm^{-1}$) est le flux énergétique solaire (ϕ) reçu par unité de surface (S) par unité de longueur d'onde (λ), déterminé par l'équation suivante (**Mobley, 1994**):

$$E(\lambda) = \frac{\delta\phi}{\Delta S} \quad (1.2)$$

7.1.3 Réflectance

Le terme Rrs (Remote Sensing Reflectance) ou la réflectance marine est le rapport entre la radiance quittant l'eau et l'irradiance entrante. Aussi déterminé en fonction des processus d'absorption et de diffusion (IOPs) (**Anclré Morel & Prieur, 1977**). Elle est définie comme étant le rapport entre l'éclairage ascendant et l'éclairage descendant par l'équation (**Anclré Morel & Prieur, 1977**):

$$Rrs(\theta, \varphi, \lambda) = \frac{Lw(\theta, \varphi, \lambda)}{Ed(\lambda)} \quad (1.3)$$

Avec:

Rrs: la réflectance mesurée par les satellites, généralement exprimée en %.

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

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

7.1.4 Atténuation diffuse

C'est l'affaiblissement de l'intensité émise, suite au transfert (et pertes) de flux entre départ et arrivée. Elle donne des informations sur la densité et les concentrations des matières en suspension et de la productivité biologique.

7.2 Propriétés optique inhérente

Ce sont les propriétés qui dépendent uniquement du milieu et sont donc indépendantes du champ lumineux dans le milieu. Elles sont facilement définies mais difficiles à mesurer in situ (**Preisendorfer, 1976**). On note :

- $\Phi_0(\lambda)$ flux spectral énergétique (flux incident);
- $\phi a(\lambda)$ la partie absorbée à l'intérieur du volume d'eau V
- $\phi b(\lambda)$ la partie diffusée en dehors du rayon d'incidence.
- $\phi t(\lambda)$ Le flux restant transmis à travers le volume d'eau dans la direction du flux incident

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

$$\phi_0(\lambda) = \phi a(\lambda) + \phi b(\lambda) + \phi t(\lambda) \quad (1.4)$$

Si un faisceau de rayons lumineux monochromatiques traverse une longueur l d'un volume V (Fig 1.8), on définit :

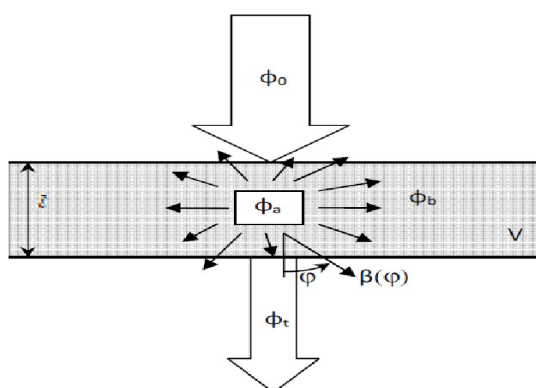


Figure 1.8. Représentation d'un flux de lumière incident traversant un volume d'eau de mer et définissant les coefficients d'absorption et de diffusion selon Morel.

7.2.1 Coefficient d'absorption

Correspond à l'absorption spectrale par unité de longueur du milieu en m^{-1} (Petus, 2009):

$$a(\lambda) = \frac{\phi a(\lambda) / \phi_0(\lambda)}{l} \quad (1.5)$$

7.2.2 Coefficient de diffusion

Correspond à la diffusion spectrale par unité de longueur du milieu en m^{-1} (Petus, 2009):

$$b(\lambda) = \frac{\phi b(\lambda) / \phi_0(\lambda)}{l} \quad (1.6)$$

7.2.3 Coefficient de rétrodiffusion

C'est cette part de la diffusion qui est mesurée par les capteurs des satellites (Petus, 2009).

7.2.4 Coefficient d'atténuation

Est défini comme la somme des coefficients d'absorption et de diffusion :

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (1.7)$$

8. Classification optiques des eaux océaniques

Selon les propriétés optiques de l'eau de mer deux grandes classes sont proposées par Morel et Prieur (1977) : les eaux du 'Cas 1' et du 'Cas 2' (Fig 1.9).

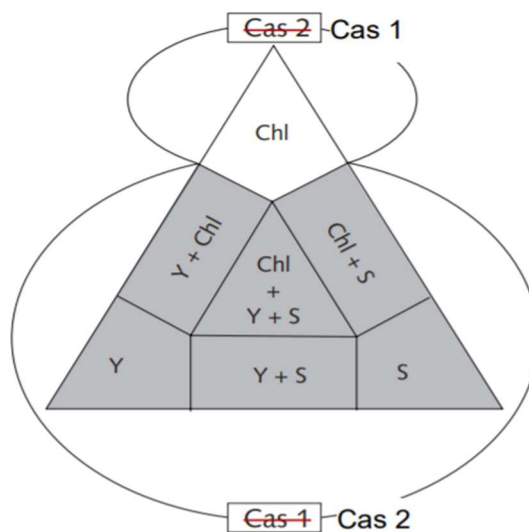


Figure 1.9. Différence entre les eaux de cas 1 et de cas 2 (Antoine 1998)

8.1 Les eaux du 'Cas 1'

Représentent les masses d'eau dont la réflectance est déterminée principalement par le phytoplancton et les propriétés optiques de l'eau (Anclré Morel & Prieur, 1977). Elles sont considérées comme des eaux claires des mers ouvertes (Weber, 2002) non affectées par les apports fluviaux ou plus généralement par l'influence de la côte ou du fond (Antoine, 1998) ;

8.2 Les eaux du 'Cas 2'

Cette classe est caractéristique des zones côtières turbides (Weber, 2002). Elle représente les masses d'eau où la diffusion est le processus dominant ou lorsque l'absorption est dominée par une substance autre que le phytoplancton ou ses dérivés comme les sédiments en suspension ou les CDOM (Colored Dissolved Organic Matter) (Anclré Morel & Prieur, 1977). Ces particules contribuent de façon indépendante à la variabilité optique de ces eaux, et elles représentent ce qu'on appelle les composants optiquement significatifs (A. Morel & Antoine, 2000).

9. Satellites de la couleur de la mer

La recherche sur la couleur de l'océan par satellite a commencé à la fin des années 1970 avec le scanner couleur des zones côtières (CZCS) à bord du satellite Nimbus-7 qui a acquis des données d'Octobre 1978 à Juin 1986 (Feldman et al., 1989; McClain, 1993). Les mesures à distance passives du CZCS au-dessus des océans ont été utilisées avec succès pour quantifier les concentrations de Chl-a in situ. En outre, la combinaison des données CZCS avec les données de bord et d'autres mesures satellitaires, telles que le Radiomètre Avancé à Très Haute Résolution (AVHRR), a permis de mieux comprendre les liens entre les propriétés physiques et biologiques des océans. À la suite de cette expérience, un certain nombre d'autres missions sur la couleur des océans ont été lancées (Jeremy Werdell & McClain, 2019) comme :

- Ocean Color Temperature Scanner (OCTS, Japan, 1996-1997);
- Sea-Viewing Wide Field Of View Sensor Read (SeaWiFS, US ,1997-2010);
- Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS, US ,2000-present) ;
- Medium-Spectral Resolution Imaging Spectrometer (MERIS, Europe, 2002-2012) ;
- Visible Infrared Imaging Radiometer (VIIRS, US, 2012-present).

9.1 Le satellite Aqua

La mission Aqua fait partie du système international d'observation de la Terre (EOS) de la NASA, appelée auparavant EOS/PM-1. La mission Aqua est axée sur l'étude multidisciplinaire du cycle de l'eau sur Terre, y compris les processus interdépendants (atmosphère, océans et surface terrestre) et leur relation avec les changements du système terrestre.

9.1.1 Capteur MODIS

Le spectroradiomètre imageur à résolution modérée (MODIS) est un spectroradiomètre avec une résolution spatiale de 250 m à 1 km et une résolution spectrale de 36 bandes (Tableau 1.1). Le premier instrument MODIS a été lancé à bord du satellite Terra en Décembre 1999, et le second a été lancé sur Aqua en Mai 2002 à 705 km d'altitude.

Tableau 1.1. *Caractéristiques des bandes spectrales du Capteur MODIS*

Bandes	Longueur d'onde (nm)	Application
1	620 - 670	Limites entre nuage, aérosol, terre
3	459 – 479	
4	545 – 565	
8	405 – 420	Couleur de l'océan /Phytoplancton /Biogéochimie
9	438 – 448	

10	483 – 493
11	526 - 536
12	546 - 556
13	662 - 672
14	673 - 683

9.2 Le satellite Landsat-8

Landsat-8 a été lancé en Février 2013 à 705 km d'altitude sa charge utile se compose de deux capteurs : l'imageur terrestre opérationnel (OLI) et le capteur infrarouge thermique (TIRS). Le satellite acquies 725 scènes par jour et doit renvoyer 400 scènes par jour à l'archive de données de l'USGS.

9.2.1 Capteur OLI

Le capteur OLI (Operational Land Imager) fournit une image dans neuf bandes spectrales (Tableau 1.2) avec une résolution spatiale de 30 mètres pour les bandes de 1 à 7 et 9, une résolution spatiale de 15 mètres pour la panchromatique (bande 8). Deux autres bandes sont exploitées par le capteur OLI, la bande 1 (ultra-bleu) destinée aux études des aérosols et la cartographie côtière et la bande 9 utile pour les études des cirrus et des nuages.

Tableau 1.2. Caractéristiques des bandes spectrales du capteur OLI de Landsat-8

Bande	Longueur d'onde (µm)	Résolution (m)	Applications
1-Aérosol	0.435-0.451	30	Etudes sur les côtes et les aérosols
2-Bleu	0.452-0.512		Bathymétrie et la distinction sol /végétation
3-Vert	0.533-0.590		Pigments - différenciation de la végétation
4-Rouge	0.636-0.673		Discriminer les pentes de végétation
5-NIR	0.851-0.879		Surveillance de la biomasse – Zones immergées
6-SWIR-1	1.566-1.651		Différenciation entre neige/ nuage et entre l'humidité sol/végétation
7-SWIR-2	2.107-2.294		Etude de l'humidité du sol et de la végétation
9-Cirrus	1.363-1.384		Panchromatique
8-Panchromatique	0.503-0.676		15	Détection des cirrus-nuages

9.2.2 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 avec une résolution spatiale de 100 m (Tableau 1.3).

Tableau 1.3. *Caractéristiques des bandes spectrales du capteur TIRS de Landsat-8*

Bande	Longueur d'onde (µm)	Résolution (m)	Applications
10-TIR-1	10.60-11.19	100	Thermique
11-TIR-2	11.50-12.51		Thermique

9.3 Le satellite Sentinel-2

Est une mission d'imagerie multi-spectrale à haute résolution en orbite polaire pour la surveillance des terres. Deux satellites ont été lancés à une altitude moyenne de 786 km :

Sentinel-2A en Juin 2015 et Sentinel-2B en Mars 2017.

9.3.2 Capteur MSI

Les deux satellites sont équipés d'un capteur MSI (MultiSpectral Instrument) qui utilise le mode d'acquisition "PUSH BROOM²" à une latitude de 786 km permettant l'observation d'une fauchée³ de 290 km de largeur. Il a une résolution spatiale de 10 à 60m et fonctionne dans treize (13) bandes spectrales (Tableau 1.4).

Tableau 1.4. *Caractéristiques des bandes spectrales du capteur MSI de Sentinel-2*

Bande	Longueur d'onde (µm)	Résolution (m)
2-Bleu	0.458-0.523	10
3-Vert	0.543-0.578	
4-Rouge	0.650-0.713	
8-NIR	0.785-0.900	
5-RE1	0.698-0.713	20
6-RE2	0.733-0.748	
7-RE3	0.773-0.793	
8a-NIRn	0.855-0.875	
11-SWIR1	1.565-1.655	60
12-SWIR2	2.100-2.280	
1-Aérosol	0.433-0.453	
9-Vapeur de l'eau	0.935-0.955	
10- SWIR-Cirrus	1.360-1.390	

9.4 Le satellite Sentinel-3

Sentinel-3 est une mission océanique et terrestre composée de trois satellites dont deux sont opérationnels Sentinel-3A lancé en Février 2016, Sentinel-3B en Avril 2018 à une altitude de 815 km et Sentinel-3C qui devrait être lancé en 2021. La mission assure la continuité des

² PUSH BROOM : méthode d'acquisition avec une barrette de détecteurs disposés perpendiculairement à la direction de vol du vaisseau spatial.

³ Fauchée : la surface imagée par le satellite sur la surface terrestre.

données pour les satellites ERS, ENVISAT et SPOT. A bord du Sentinel-3 il y'a plusieurs capteurs :

- SLSTR (Radiomètre des températures de surface de la mer et de la terre)
- OLCI (Ocean and Land Color Instrument)
- SRAL (Altimètre SAR)
- DORIS (Orbitographie Doppler et Radio-positionnement Intégré par Satellite)
- MWR (Radiomètre à micro-ondes).

9.4.2 Capteur OLCI

OLCI (Ocean and Land Color Instrument) est un instrument optique destiné à mesurer dans 21 bandes, avec une résolution spatiale de 300 m (Tableau 1.5) et une fauchée de 1 250 km de largeur. C'est une version évoluée du spectromètre imageur MERIS de ENVISAT assurant donc la continuité des données.

Tableau 1.5. *Caractéristiques des bandes spectrales du capteur OLCI de sentinel -3*

Bande	Longueur d'onde (µm)	Applications
Oa1	0,4	Correction des aérosols, récupération des constituants de l'eau
Oa2	0,412	Substance jaune et pigments (turbidité)
Oa3	0,442	chlorophylle, biogéochimie, végétation
Oa4	0,49	teneur en chlorophylle
Oa5	0,51	Chlorophylle, sédiments, turbidité, marée rouge
Oa6	0,56	Référence de la chlorophylle
Oa7	0,62	Charge sédimentaire
Oa8	0,665	Chlorophylle, sédiment, substance jaune/végétation
Oa9	0,673	récupération de la fluorescence
Oa10	0,681	Pic de fluorescence de la chlorophylle
Oa11	0,708	Ligne de base de la fluorescence de la chlorophylle
Oa12	0,753	Absorption d'O ₂ /nuages, végétation
Oa13	0,761	Bande d'absorption de l'O ₂ /correction de l'aérosol.
Oa14	0,764	Correction atmosphérique
Oa15	0,767	O ₂ A utilisé pour la pression au sommet des nuages, la fluorescence au-dessus de la terre
Oa16	0,778	Corr. atmosphérique / corr. aérosol
Oa17	0,865	Correction atmosphérique / correction des aérosols, nuages

Oa18	0,885	Bande de référence d'absorption de la vapeur d'eau. Surveillance de la végétation
Oa19	0,9	Absorption de vapeur d'eau/surveillance de la végétation
Oa20	0,94	Absorption de vapeur d'eau, Correction atmosphérique / correction des aérosols
Oa21	1,02	Correction atmosphérique / correction des aérosols

10. Logiciels de traitement des données satellitaires

Les logiciels utilisés dans ce travail pour le traitement des données satellitaires sont les suivants :

10.1 SeaWiFS Data Analysis System

SeaWiFS Data Analysis System (SeaDAS) est le logiciel officiel de la NASA destiné pour le traitement, l'affichage et l'analyse des données issues des capteurs de la couleur des océans. Développé à l'origine pour soutenir la mission SeaWiFS, il soutient aujourd'hui la plupart des missions américaines et internationales sur la couleur des océans mais il est applicable aussi à de nombreuses analyses de données de sciences de la terre par satellite. SeaDAS est un logiciel open source gratuitement téléchargeable qui va être utilisé pour le traitement des images issues du capteur MODIS.

10.2 ENvironment for Visualizing Images

ENVI est un logiciel de traitement et d'analyse d'imagerie géospatiale. ENVI traite facilement les données hyper-spectrales, LiDAR et autres ensembles de données de télédétection. ENVI dispose de workflows internes et permet aux utilisateurs de personnaliser les procédures avec leur langage de programmation IDL⁴.

10.3 Sentinel Application Platform

Sentinel Application Platform (SNAP) est un logiciel open source développé par l'ESA⁵ pour le traitement et l'analyse de l'observation de la Terre grâce aux innovations technologiques suivantes : Extensibilité, portabilité, plate-forme Modular Rich Client, abstraction génériques de données EO⁶, gestion de la mémoire en mosaïque et cadre de traitement graphique. Il est gratuitement téléchargeable.

⁴ IDL : (Interactive Data Language) langage de programmation non libre utilisé généralement pour le traitement et la visualisation des données spatiale

⁵ ESA : (European Space Agency) Agence Spatiale Européenne

⁶ EO : (Earth Observation) Observation de la terre

10.3.1 C2RCC

Le processeur « Case 2 Regional », développé à l'origine par Doerffer et Schiller, utilise comme technologie de base une vaste base de données de simulations de transfert radiatif inversé par des réseaux de neurones. Le projet « CoastColour » a permis d'apporter des améliorations majeures. Le processeur a été renommé C2RCC (Case 2 Regional CoastColour) et est applicable à tous les anciens capteurs de couleur de l'océan passés, aux actuels ainsi qu'à Sentinel-2. Il a été validé dans diverses études et est disponible via la boîte à outils Sentinel SNAP de l'ESA. Il est également utilisé pour OLCI de Sentinel-3 pour la génération des produits de l'eau de Case 2, ainsi que dans le processeur du prochain retraitement MERIS 4.

11. Algorithme d'estimation de la chlorophylle

Les algorithmes de la couleur de l'océan renvoient la concentration de Chl-*a* près de la surface en mg/m³, calculée à l'aide d'une relation empirique dérivée de mesures in situ du Chl-*a* et des réflectances de télédétection (*Rrs*) dans la région bleu-vert du spectre visible. La mise en œuvre dépend de la disponibilité d'au moins trois bandes de capteurs couvrant le régime spectral de 440 à 670 nm.

65 nouveaux algorithmes OC sont mis en évidence pour 25 capteurs de la couleur de l'océan (O'Reilly & Werdell, 2019). Ils utilisent différentes formulations : fonction de puissance, régression multiple, polynômes hyperboliques, de deuxième et troisième ordre, et la plupart utilisent des données transformées en logarithme.

$$\log_{10}(Chl_a) = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i \left(\log_{10} \left(\frac{Rrs(\text{bleu})}{Rrs(\lambda_{vert})} \right) \right)^i \quad (1.8)$$

Avec :

- $Rrs(\lambda_{bleu}) = \max(Rrs(\lambda_{bleu}))$.
- a_i Représentent les coefficients des algorithmes

Tableau 1.6. Algorithmes et coefficients de l'estimation de la chlorophylle

Algorithmes	Capteur	Bleu	Vert	a0	a1	a2	a3	a4
NASA (https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/chlor_a/)								
OC4E	MERIS/OLCI	443>490>510	560	0.3255	-2.7677	2.4409	-1.1288	-0.4990
OC3M	MODIS	443>488	547	0.2424	-2.7423	1.8017	0.0015	-1.2280
OC2M	MODIS	488	547	0.2500	-2.4752	1.4061	-2.8233	0.5405
OC2M-HI	MODIS (500-m)	469	555	0.1464	-1.7953	0.9718	-0.8319	-0.8073
OC2	OLI	482	561	0.1977	-1.8117	1.9743	-2.5635	-0.7218
OC3	OLI	443>482	561	0.2412	-2.0546	1.1776	-0.5538	-0.4570
(O'Reilly & Werdell, 2019)								
OC3	MODIS	443>488	554	0.26294	-2.64669	1.28364	1.08209	-1.76828
OC4	MODIS	412>442>488	554	0.27015	-2.47936	1.53752	-0.13967	-0.66166
OC5	MODIS	412>442>488>531	554	0.42919	-4.88411	9.57678	-9.24289	2.51916
OC6	MODIS	412>443>490>510	554 & 667	1.22914	-4.99423	5.64706	-3.53426	0.69266
OC3	OLI	443>482	561	0.30963	-2.40052	1.28932	0.52802	-1.33825
OC4	OLCI	443>490>510	560	0.42540	-3.21679	2.86907	-0.62628	-1.09333
OC5	OLCI	413>443>490>510	560	0.43213	-03.13001	3.05479	-1.45176	-0.24947
OC6	OLCI	413>443>490>510	560 & 665	0.95039	-3.05404	2.17992	-1.12097	0.15262

12. Algorithmes de détection du phytoplancton

Récemment, diverses méthodes bio-optiques et écologiques ont été établies à partir de données satellitaires permettant d'identifier et de différencier les types fonctionnels de phytoplancton ou leur taille (**Brewin et al., 2011**).

Les algorithmes qui ont été proposés jusqu'à présent se répartissent en trois catégories (**Sathyendranath et al., 2014**) :

- Méthodes basées sur l'abondance
- Méthodes basées sur les caractéristiques optiques
- Approches écologiques

12.1 Méthodes basées sur l'abondance

(**Hirata et al., 2011**) ont utilisé des données in situ sur la composition pigmentaire du phytoplancton par HPLC pour estimer la contribution fractionnaire des différents groupes à la chlorophylle-a totale dans un échantillon donné. Ces informations, recueillies à partir d'un grand nombre d'échantillons provenant de diverses régions, ont été utilisées pour tracer la fraction de chlorophylle associée à ces groupes en fonction de la concentration de chlorophylle-a totale dans l'échantillon.

Des fonctions empiriques ont ensuite été ajustées aux données pour calculer la fraction de ces groupes en fonction de la concentration de chlorophylle-a (Tableau 1.7) . Si une fraction est supérieure à 1, elle est fixée à 1, et si elle est inférieure à 0, elle est fixée à 0.

12.2 Méthodes basées sur les caractéristiques optiques

Cette méthode est conçue pour identifier si les diatomées dominent ou non les populations de phytoplancton dans un endroit particulier. Une fois cette décision prise, la valeur de chlorophylle appropriée peut être attribuée à la population. De plus, si les résultats sont cumulés sur une période donnée, disons une semaine ou une quinzaine, des cartes de probabilité de dominance des diatomées pour la zone et pour la période peuvent alors être générées. Cette méthode n'est pas conçue pour obtenir des contributions fractionnaires des diatomées à la chlorophylle-a totale dans une seule image.

12.3 Approches écologiques

Cette approche qui a été utilisée pour cartographier les types de phytoplancton depuis l'espace est basée sur les préférences écologiques et géographiques de divers types de phytoplancton. (**Raitso et al., 2008**) ont utilisé un certain nombre de données satellitaires pour cartographier

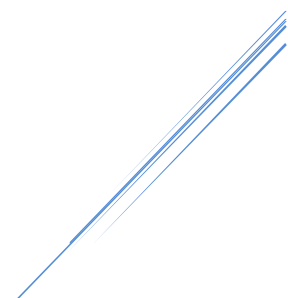
le phytoplancton, notamment la chlorophylle et le rayonnement de l' eau (water-leaving radiance à 555 nm) à partir des données de la couleur de l'océan, ainsi que les données du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) fournies par la NASA, la température de la surface de la mer (SST) du radiomètre avancé à très haute résolution (AVHRR) et les données du stress éolien provenant des diffusiomètres satellitaires.

Tableau 1.7. Equations utilisées par (Hirata et al. 2011) pour estimer les fractions (0,0 à 1,0) des classes de taille du phytoplancton (micro, nano et picoplancton) et de certains types fonctionnels du phytoplancton (Méthode basée sur l'abondance)

Groupe	Formule	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
<i>Microplancton</i>	$a_0 + \exp(a_1 x + a_2)^{-1}$	0.91	-2.7	0.40	.	.	.	.
<i>Diatomées</i>	$a_0 + \exp(a_1 x + a_2)^{-1}$	1.3	-4.0	0.20	.	.	.	.
<i>Dinoflagellés</i>	Micro - Diatomées	.	.	.	.	.	.	.
<i>Nanoplancton</i>	1-Micro-Pico	.	.	.	.	.	.	.
<i>Chlorophytes</i>	$(a_0/y) \exp(-a_1 (x+a_2)^2)$	0.25	-1.3	-0.55	.	.	.	.
<i>Picoplancton</i>	$-[(a_0 + \exp(a_1 x + a_2))^{-1} + a_3 x + a_4]$	0.15	1.0	-1.6	-1.9	3.0	.	.
<i>Prymnesiophytes</i>	Nano-chloro	.	.	.	.	.	.	.
<i>Procarvototes</i>	$(a_0/a_1 / y) \exp(a_2 (x+a_3)^2 / a_1^2) + a_4^2 x + a_5 x + a_6$	0.0067	0.62	-19	0.96	0.10	-0.12	0.063
<i>Prochlorococcus</i>	$(a_0/a_1 / y) \exp(a_2 (x+a_3)^2 / a_1^2) + a_4^2 x + a_5 x + a_6$	0.0099	0.68	-8.6	0.97	0.0074	-0.16	0.044

Avec : $x = \log_{10}(\text{Chl-}a)$ et $y = \text{Chl-}a$.

Zone d'étude



II. Zone d'étude

1. Bassin Algérois

La zone d'étude choisie s'étend de du Cap Djinet ($36^{\circ}52'41''N$; $3^{\circ}43'23''E$) à l'Est jusqu'au Mont Chenoua ($36^{\circ}36'0''N$, $2^{\circ}22'60''E$) à l'Ouest. Elle comprend trois grandes baie qui sont de l'Est à l'Ouest ; Baie de Zemmouri, Baie d'Alger et la Baie de Bousmail qui comprend à son tour une petite baie El Djamila (Fig 2.1).

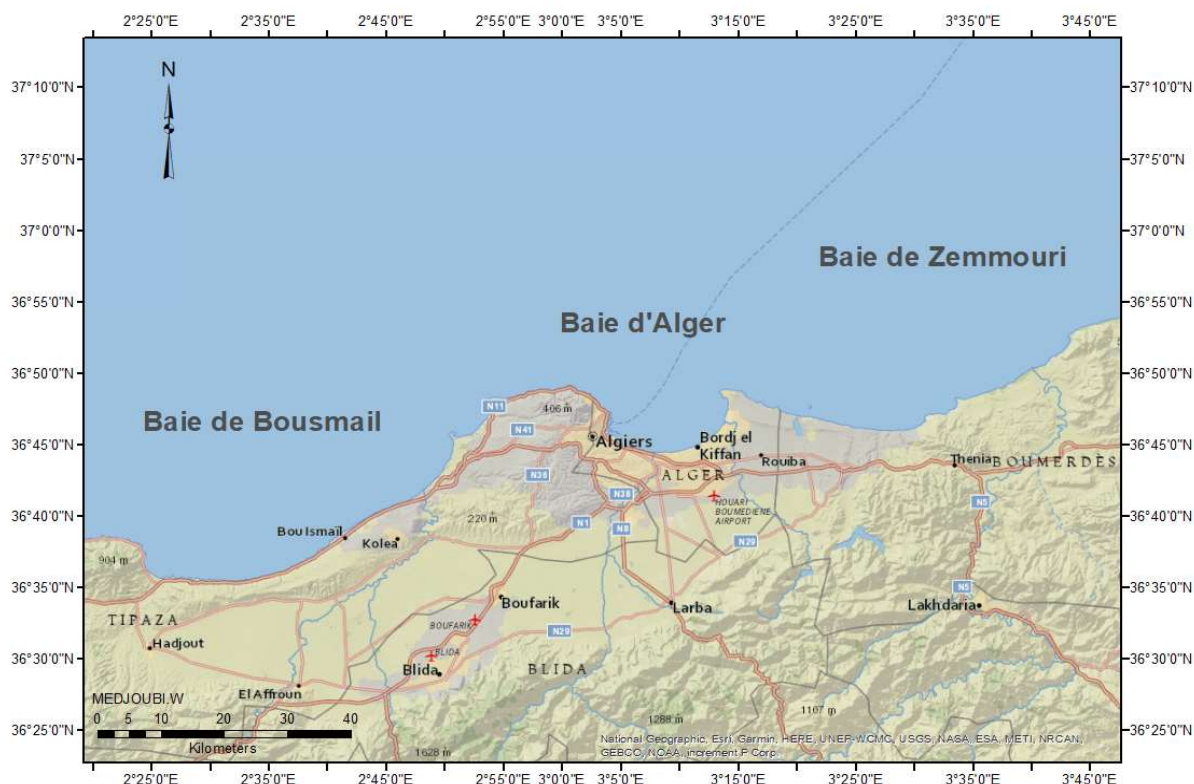


Figure 2.1. Localisation géographique du Bassin Algérois

2. Baie de Zemmouri

La baie de Zemmouri (Fig 2.2) se trouve à l'Est de la baie d'Alger. Elle est bordée par Cap Matifou ($36^{\circ}48'49''N$, $03^{\circ}14'56''E$) à l'Est et cap Djinet ($36^{\circ}52'41''N$; $3^{\circ}43'23''E$) à l'Ouest.

2.1 Hydrologie de la baie

Le réseau hydrographique de la baie de Zemmouri joue un rôle important dans le transport des sédiments vers la mer. Il existe plusieurs cours d'eau qui débouche dans cette baie ; on en cite : Oued Reghaia, Oued Keddara, Oued Boumerdes, Oued Merdja et Oued Isser,

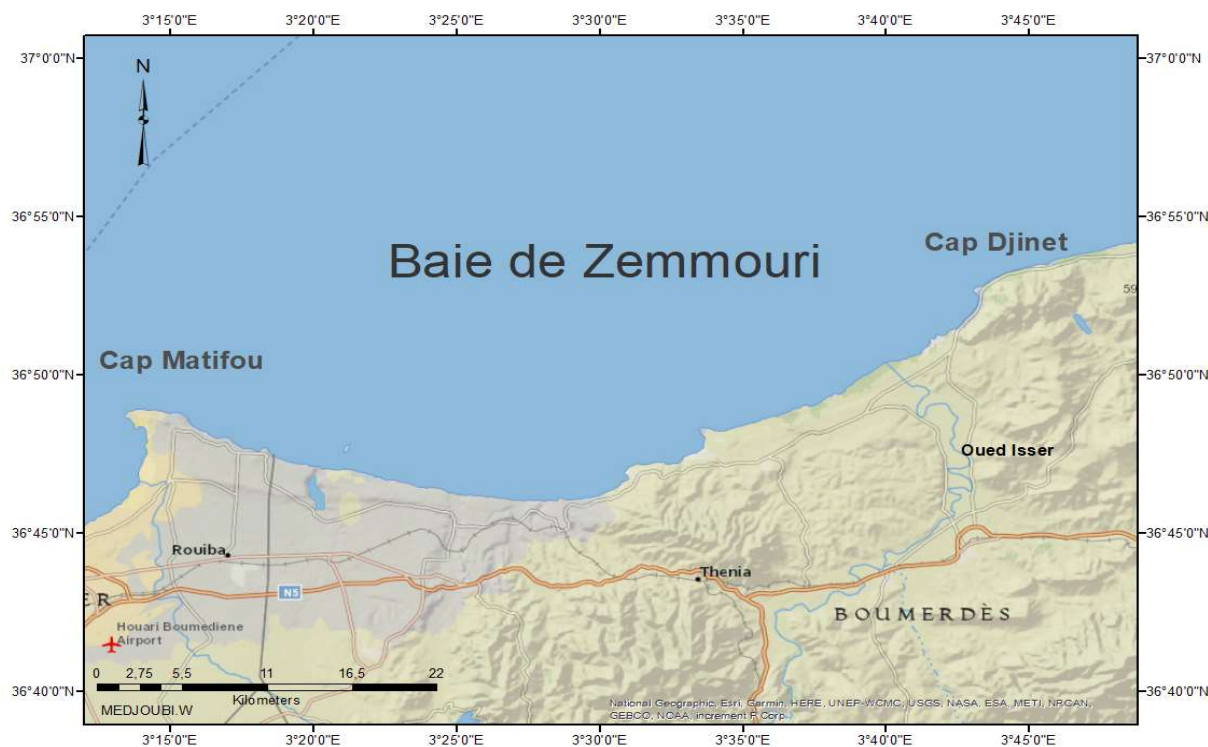


Figure 2.2. Localisation géographique de la baie de Zemmouri

2.1.1 Oued Réghaia

Se situe dans la partie Est de la baie, il prend sa source à l'Oued de ben Ammar dans la Commune de Bouzegza à 500 km d'altitude. Il alimente d'abord le lac de Réghaia avant de rejoindre la mer méditerranée. La superficie de son bassin versant va jusqu'à environ 88 km².

2.1.2 Oued Isser

Représente le plus important des oueds qui débouche dans cette baie, son bassin versant couvre une superficie de 4145 km² et s'étend à 200 km. Il prend naissance à Beni Amrane. Il a un débit moyen d'environ 14,1 m³/s.

2.2 Source de pollution

La baie de Zemmouri se situe dans une zone d'activité fortement exploitée donc elle est exposée et soumise à divers types de pollution.

2.2.1 Agriculture et pêche

Plus de 65000 Ha de la région de Zemmouri sont utilisés en agriculture, une activité qui constitue la vocation la plus importante dans cette zone surtout dans la partie inscrite dans la wilaya de Boumerdes. Ces surfaces se trouvent généralement dans les plaines près des oueds ce qui facilite leur lessivage vers la mer, plus des rejets solides issus des zones industrielles et

d'activités (Rouiba, Réghaia, Isser...) qui sont drainés aussi lors des précipitations. A cela s'ajoute l'aquaculture et les activités de pêche avec 2 ports qui se trouvent à l'intérieur de la baie.

2.2.2 Tourisme

Le tourisme à son tour joue un rôle aussi important dans l'accentuation de la pollution. Les établissements touristiques fournissent plus de 7000 lits le long de l'année produisant des tonnes de rejets domestiques non traités déversés directement dans les oueds.

3. Baie d'Alger

La baie d'Alger (Fig 2.3) se trouve dans la région centrale de la côte algérienne. Elle est délimitée par la Pointe Pescade ($36^{\circ}49'17''N$, $03^{\circ}00'37''E$) à l'Ouest, Cap Matifou ($36^{\circ}48'49''N$, $03^{\circ}14'56''E$) à l'Est, par la plaine de Mitidja au sud et la mer Méditerranée au Nord. Elle couvre une superficie de 180 km².

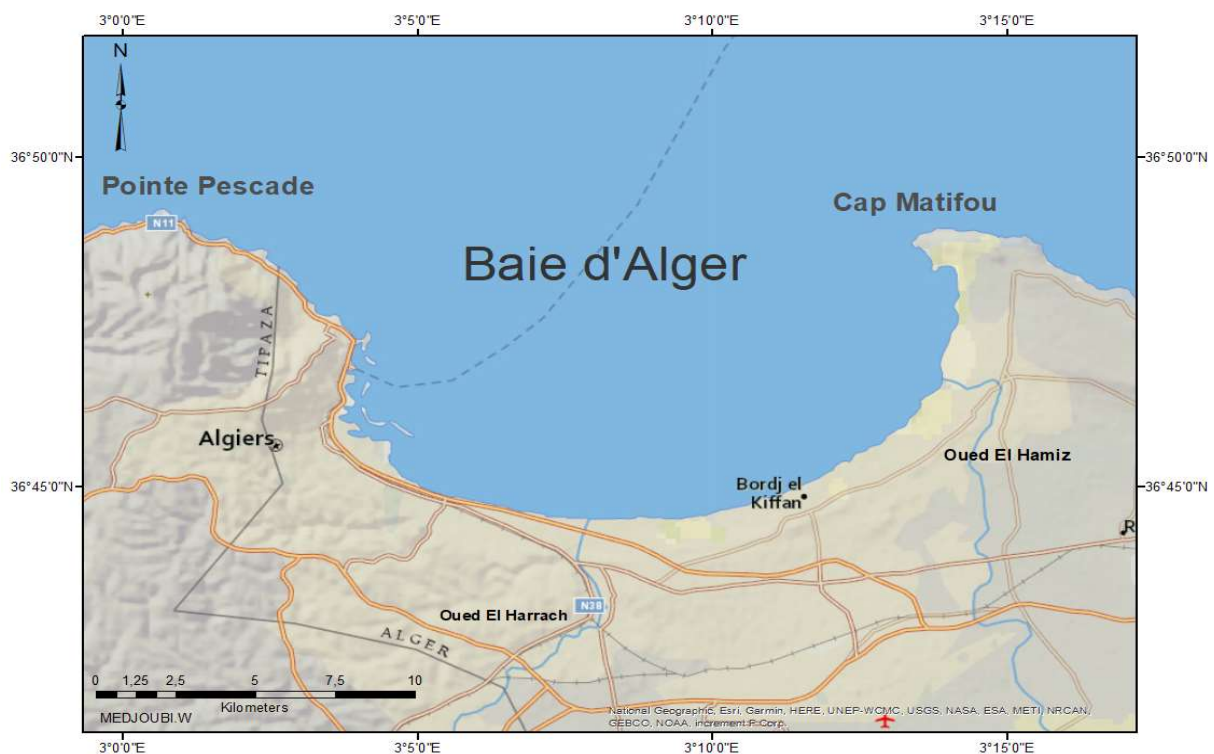


Figure 2.3. Localisation géographique de la baie d'Alger

3.1 Hydrologie de la baie

Deux Oueds débouchent dans la baie d'Alger avec des débits significatifs (Fig 2.4):

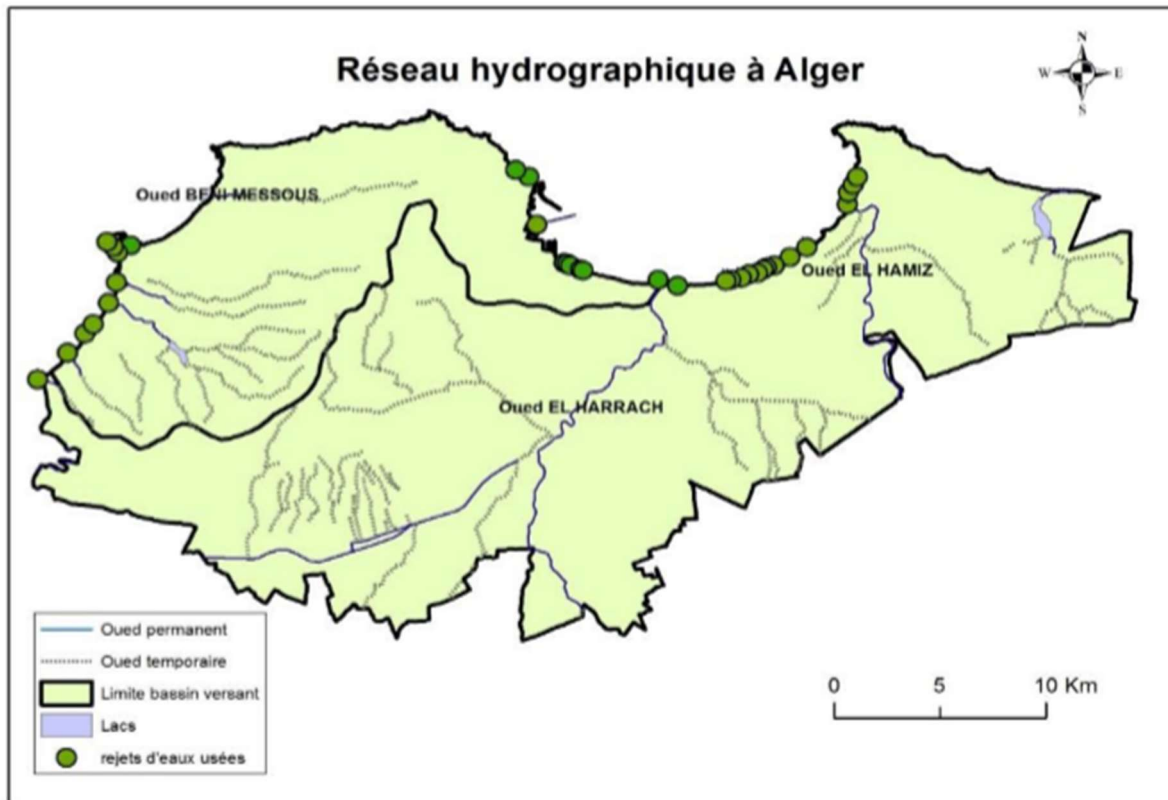


Figure 2.4. Réseau hydrographique de la baie d'Alger

3.1.1 Oued El Hamiz :

Se situe près du cap Matifou à l'Est de la baie. La superficie de son bassin versant est d'environ 160 km². Le débit est régulé par le barrage d'El Hamiz qui réduit considérablement les apports solides venant en mer (LEM, 1998).

3.1.2 Oued El Harrach :

C'est un bassin difficile d'accès caractérisé par de fortes dénivelées, une végétation peu dense et une pluviométrie importante. Son bassin versant couvre une superficie 970 km², son débit en période de pluie est de 1000 m³/s.

3.2 Sédimentologie de la baie

La sédimentologie de la baie d'Alger est représentée principalement par trois faciès sédimentaires qui sont :

3.2.1.1 Faciès sableux

D'après (Belkessa, 1999) les faciès sableux se limitent à la bordure littorale entre 10 et 35 m de profondeur au droit des émissaires, et en prolongement des caps où ils s'étendent à des profondeurs plus élevées, et ceci en direction du centre de la baie (Fig 2.5).

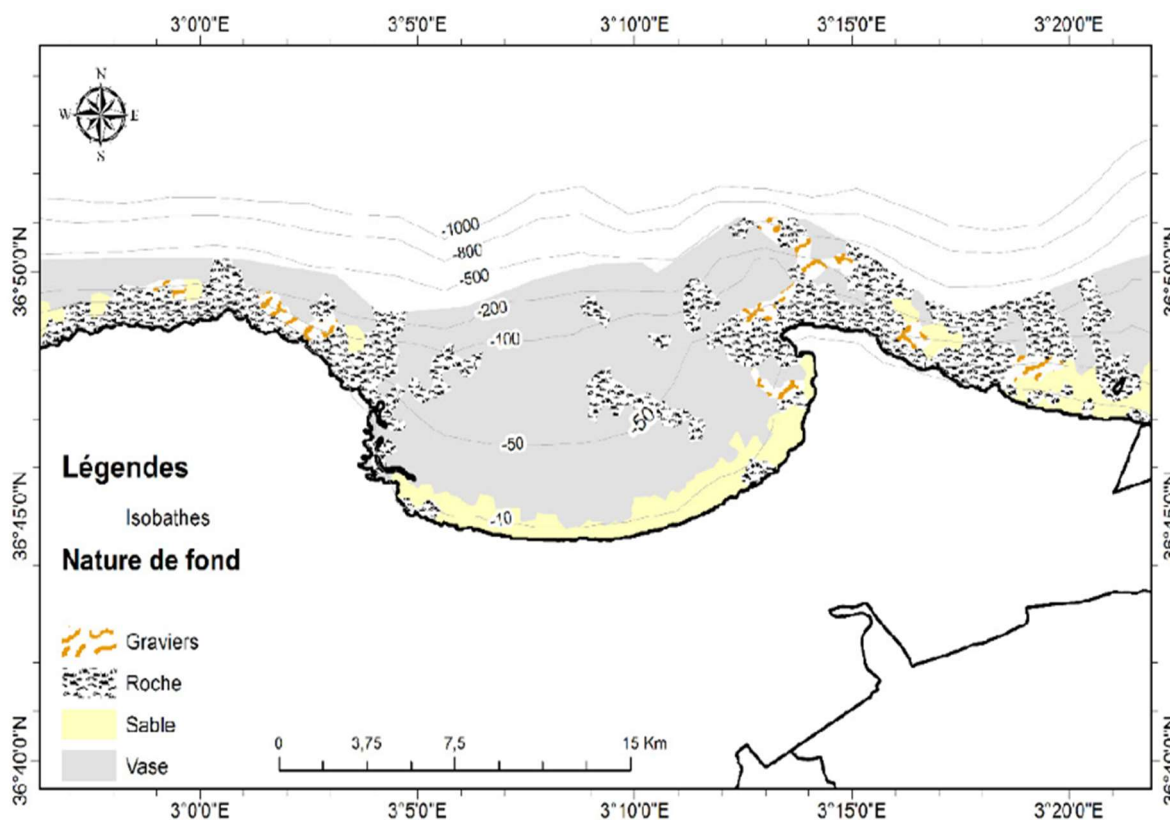


Figure 2.5. Sédimentologie de la baie d'Alger (Bachouch 2017)

3.2.1.2 Faciès carbonatés

Ils sont retrouvés dans la bordure Ouest jusqu'à des profondeurs de 35 à 50m, et dans la bordure Est à des profondeurs plus élevées, au droit du Cap Matifou. Ils sont limités aux bordures rocheuses, ainsi qu'aux hauts-fonds rocheux de la baie.

3.2.1.3 Faciès pélitiques

Selon (Bachari et al. 2004; LEM, 1998), la fraction pélitique apparaît à partir de 10 m de profondeur où elle représente 10 %, son pourcentage augmente pour atteindre plus de 50 % dès 25 m (35m au droit des oueds), à 30m (50 m au droit des oueds) cette fraction représente 75 % et plus souvent 95 %. Ils occupent la partie centrale et septentrionale de la baie d'Alger.

3.3 Source de pollution

La ville d'Alger est très urbanisée et la majorité des unités sont concentrées dans les zones industrielles plus l'activité du port d'Alger. Cette zone est principalement contaminée par différentes sources de pollution et soumise à plusieurs types de rejets urbains, industriels et pétroliers.

La zone côtière algéroise constitue le réceptacle de plusieurs types de pollution. Ces eaux usées sont chargées de matières organiques, matières en suspension, détergents et des huiles lubrifiantes ; génèrent des pollutions organiques et chimiques ; cette situation est aggravée par l'absence de traitement des eaux.

4. Baie de Bou-Ismaïl

La baie de Bou-Ismaïl (Fig 2.6) se situe à environ 20 km à l'Est de Tipaza et à environ 40 km au Sud-Ouest d'Alger. Elle est bordée par Cap Acrata à l'Est ($36^{\circ}48'0''$ N, $2^{\circ}52'60''$ E), mont Chenoua à l'Ouest ($36^{\circ}36'0''$ N, $2^{\circ}22'60''$ E), par la mer méditerranée au Nord et la plaine de la Mitidja au Sud. La baie couvre une superficie dans l'ordre de 350 km² incluant la baie d'el Djamila, avec une ouverture de 40 Km orientée du Sud-Ouest au Nord-Est.



Figure 2.6. Localisation géographique de la baie de Bou Ismaïl

4.1 Réseau hydrographique

Trois principaux oueds déversent dans cette baie avec des différents apports provenant de plusieurs sources terrigènes qui sont cités respectivement de l'Est à l'Ouest (Fig 2.7):

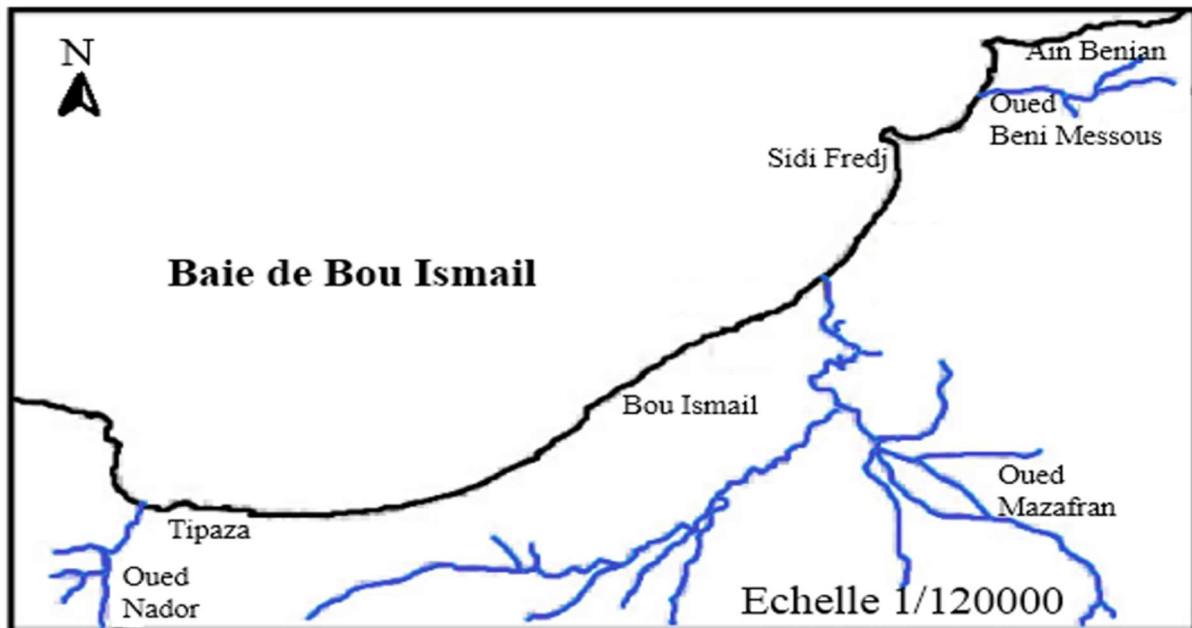


Figure 2.7. Réseau hydrographique de la baie de Bousmail (Benharkou 2017)

4.1.1 Oued Beni-Messous

Il débouche dans la baie d'El Djamila avec un débit estimé à $0.245 \text{ m}^3/\text{s}$. Son bassin versant a une superficie de 33 km^2 . Il prend naissance au massive de Bouzeréah et il est alimenté par les décharges provenant de Bouzeréah, Beni-Messous et Chéraga.

4.1.2 Oued Mazafran

Le plus importants des oueds qui déversent dans la baie de Bousmail. Son bassin versant couvre une superficie de 1850 km^2 . Il prend source au niveau du point de rencontre d'oued Chiffa et oued Djer et il débouche entre Douaouda et Zeralda avec un débit qui est estimé à environ $7.566 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant la période de Décembre à Avril.

4.1.3 Oued Nador

Il débouche entre Tipaza et Mont Chenoua avec un débit de $0.89 \text{ m}^3/\text{s}$; Il est alimenté Deux oueds qui sont : Oued Bourguiga et Oued Merrad.

4.2 Sédimentologie de la baie de Bousmail

La sédimentologie du fond de la baie (Fig 2.8) revient principalement aux apports des trois oueds et plus particulièrement de ceux d'oued Mazafran. Selon les caractéristiques sédimentologiques, deux régions apparaissent, la région orientale et la région occidentale. Les vases pures sont très développées dans la région occidentale et forment ainsi une importante vasière littorale, tandis que les graviers envasés sont dans la région orientale (Belkessa, 1999).

De même, le faciès des sables grossiers et des fins graviers et le faciès des sables graveleux ne sont présents que dans la région orientale (LEM, 1998).

Les sables fins couvrent l'ensemble des petits fonds des baies d'El Djamila 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. 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 (Al Sid Chikh, 2009).

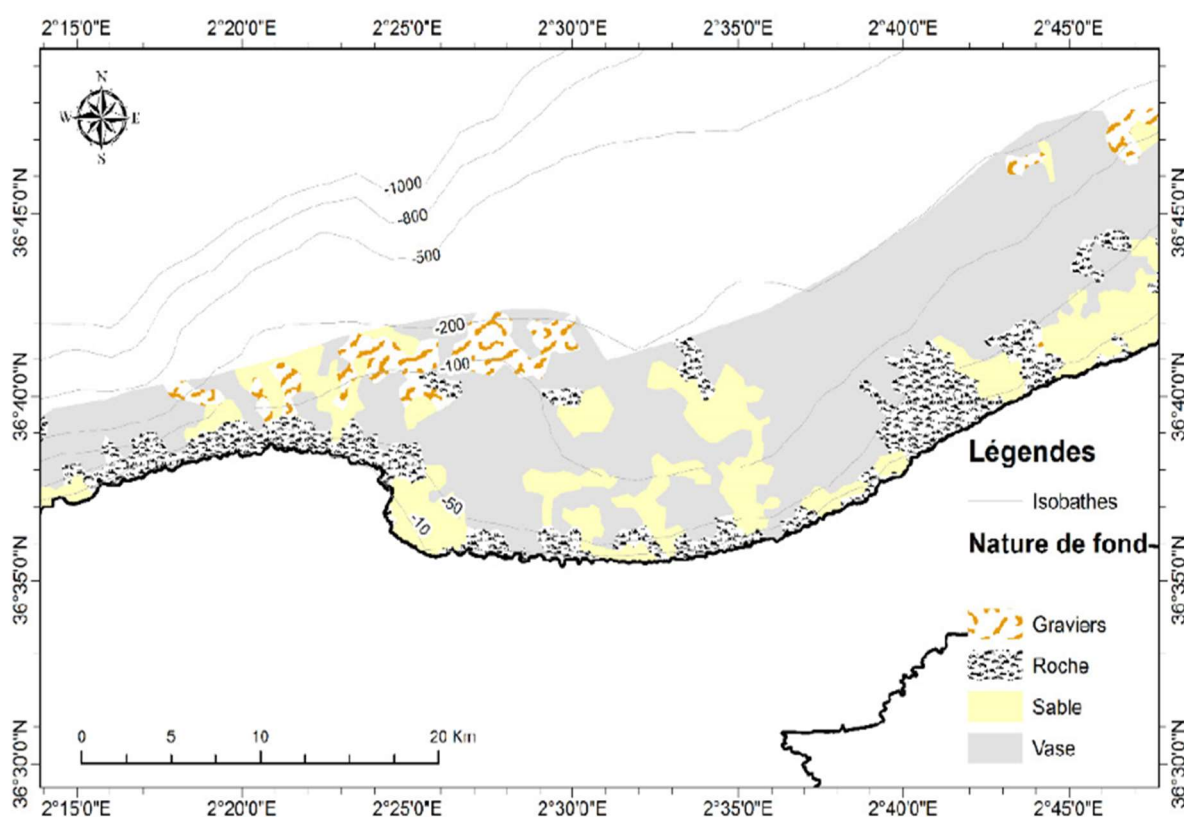


Figure 2.8. *Sédimentologie de la baie de Bousmail (Bachouch 2017)*

4.3 Source de pollution

4.3.1 Eaux usées

Le réseau d'évacuation des eaux usées n'est pas séparé des eaux pluviales. Une seule station d'épuration est opérationnelle dans la wilaya de Tipasa : la station de Koléa d'une capacité de 30 000 équivalents habitants. Une deuxième station d'épuration de 70 000 équivalents habitants est en construction à Bou Ismail destinée pour épurer les eaux usées issues de Bou Ismail,

Bouharoun, Khemisti, Fouka et Douaouda.

4.3.2 Déchets

Les quantités de déchets produites par une agglomération dépendent principalement de l'importance de sa population, du mode de vie et de consommation des populations, des conditions climatiques, du mode de conditionnement des denrées et des marchandises....

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

5. Climatologie

Les données climatiques sont téléchargées depuis Daily Observationel Data Map du NOAA⁷ (<https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei/cdo/daily>) pour la station d'Alger Dar El Bida, AG (36°42'42,01''N, 3°15'00''E). Ce site propose plusieurs types d'informations climatiques générées par l'examen des données archivées. Ces types d'informations comprennent les enregistrements de températures, des précipitations et des chutes de neige, de plus il offre des statistiques sur les évènements extrêmes et d'autres produits climatiques dérivés.

5.1 Température

La figure 2.9 représente la distribution de la température mensuelle moyenne dans une période de 10 ans entre 2010 et 2019. La région centre de l'Algérie est caractérisée par deux périodes dans le cycle annuel on distingue ;

- La période chaude se manifeste entre le mois de Mai et le mois d'Octobre avec un pic à 26.7°C en mois d'Aout et;
- La période froide qui se déroule sur le reste de l'année avec un minimum de 11.3°C enregistré durant le mois de Février.

⁷ NOAA :National Oceanic and Atmospheric Administration

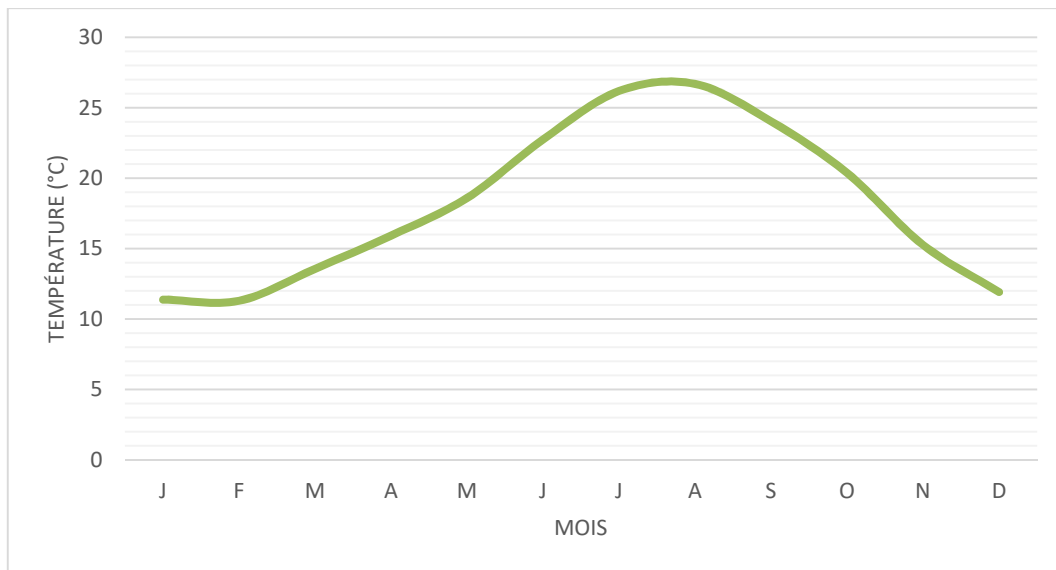


Figure 2.9. *Température mensuelle moyenne entre 2010 à 2019 depuis la station météorologique Dar el Beida*

5.2 Pluviométrie

La précipitation mensuelle (Fig 2.10) moyenne présentée dans la figure ci-dessous est comprise entre un minimum de 0.12 mm enregistré pendant la période chaude durant le mois de juillet et un maximum de 87,16 mm enregistré dans le mois de novembre qui correspond à une période froide. Il est clair que les épisodes de pluie dans la région centre est inversement proportionnelle aux enregistrements de la température, ce qui est caractéristique du climat méditerranéen.

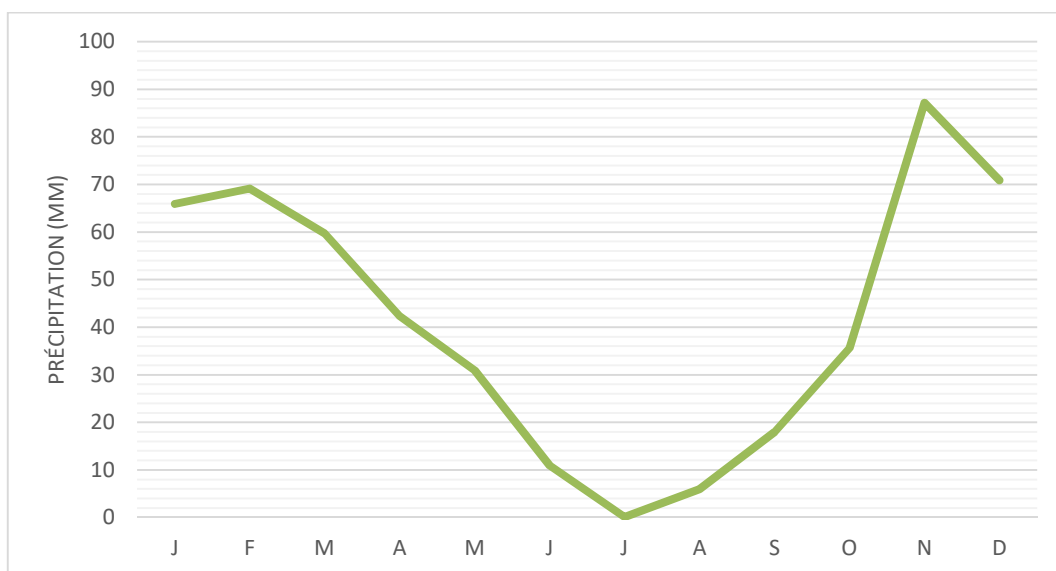
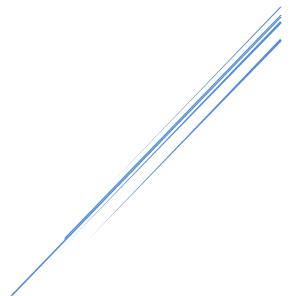


Figure 2.10. *Précipitation mensuelle moyenne entre 2010 et 2019 depuis la station météorologique Dar el Beida*

Matériel et méthodes



III. Matériel et méthodes

1. Acquisition données satellitaires

Dans le but de choisir le meilleur satellite destiné à l'étude de la concentration de la Chl-*a* de la zone côtière du bassin Algérois, Une comparaison entre les données fournies par les quatre capteurs cités auparavant est établi (Tableau 3.1).

Tableau 3.1. Images téléchargées des quatre capteurs destinés à la comparaison

Image	Niveau du traitement	Capteur	Date	Plateforme de téléchargement
A2020055131000.L2_LAC_OC.nc	L2	MODIS		NASA
LC08_L1TP_196034_20200224_20200313_01_T1.tar.gz	L1	Landsat-8		USGS
S2A_MSIL1C_20200224T103021_N0209_R108_T31SDA_20200224T123554.zip	L1	Sentinel-2	24/02/2020	Copernicus
S3A_OL_1_EFR___20200224T101218_20200224T101518_20200225T165812_0179_055_179_2340_MAR_O_NT_002.zip	L1	Sentinel-3		Eumatsat

Après avoir choisi le meilleur capteur pour l'étude des variations annuelles du phytoplancton et de la chlorophylle. Une image par mois durant toute l'année 2019 dont la couverture nuageuse est nulle est téléchargée depuis ce capteur (Annexe 01).

- Note : Toutes les images sont de niveau 1 de traitement.

1.1 Acquisition des données MODIS

Le site⁸ de la NASA dispose d'une base de données satellitaire issue de plusieurs satellites. Les images de MODIS sont acquises selon les étapes suivantes :

- 1- Choisir le capteur MODIS de Aqua et définir la date et la région ou bien spécifier les coordonnées de la zone d'étude (Fig 3.1).
- 2- Il faut choisir le type de téléchargement soit par l'option **Order Data** qui va permettre le téléchargement d'une gamme de données sur un intervalle de temps ou bien de télécharger une seule image prédéfinie (Fig 3.2).

⁸ <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=amod>

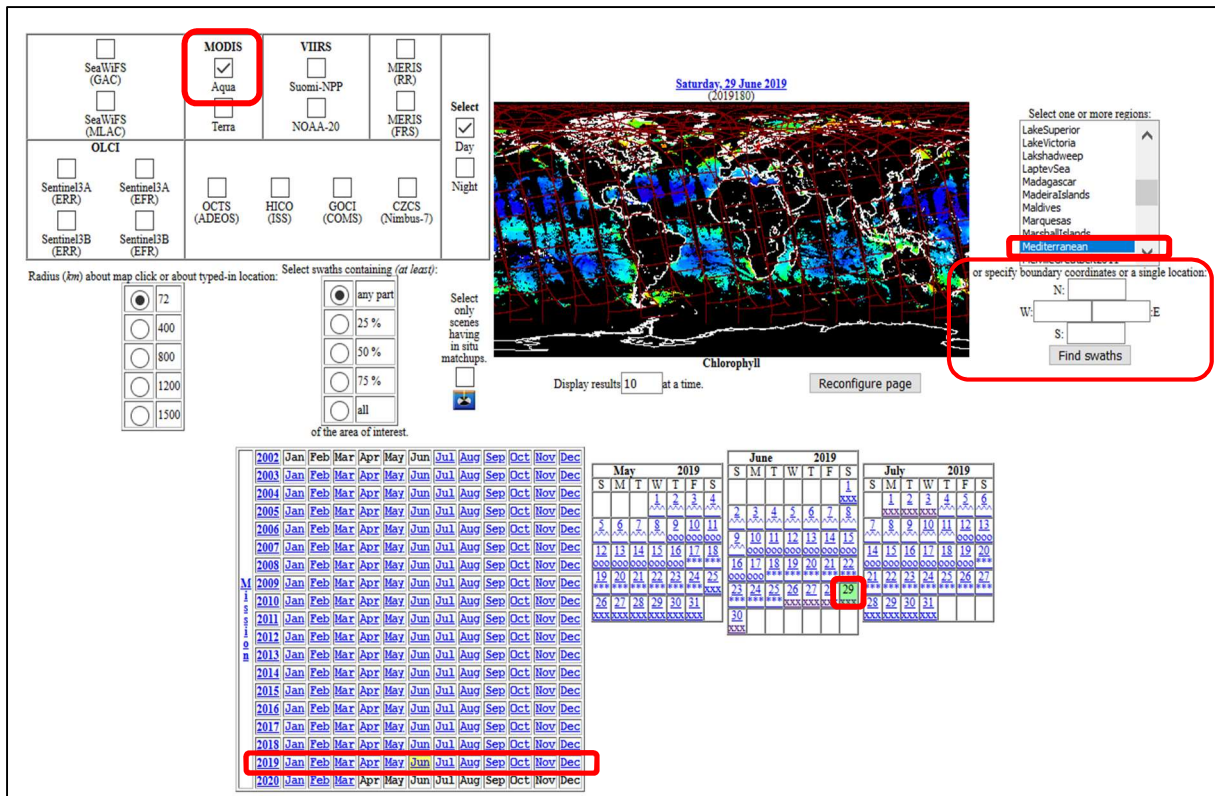


Figure 3.1. L'interface Ocean Color de la NASA

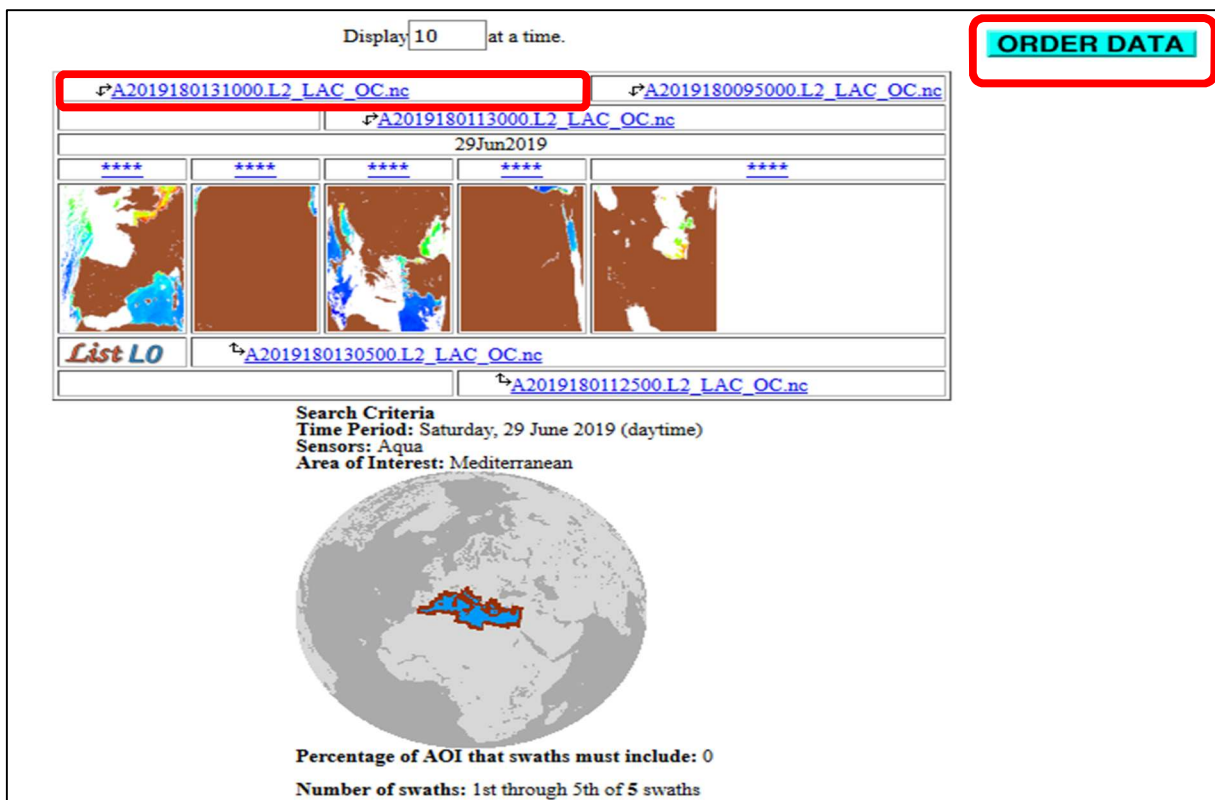


Figure 3.2. Choix du mode de téléchargement des données

1.2 Acquisition des données OLI

Les données landsat-8 sont téléchargeables depuis le site⁹ de l'USGS¹⁰. Cette plateforme propose aussi des données provenant de plusieurs autres satellites comme le Sentinel. Le téléchargement des images est réalisé selon les étapes suivantes :

- 1- Une fois connecté, zoomer puis délimiter la zone d'étude soit en cliquant sur la carte pour dessiner un polygone soit en ajoutant des coordonnées comme il est montré dans la figure suivante (Fig 3.3) :

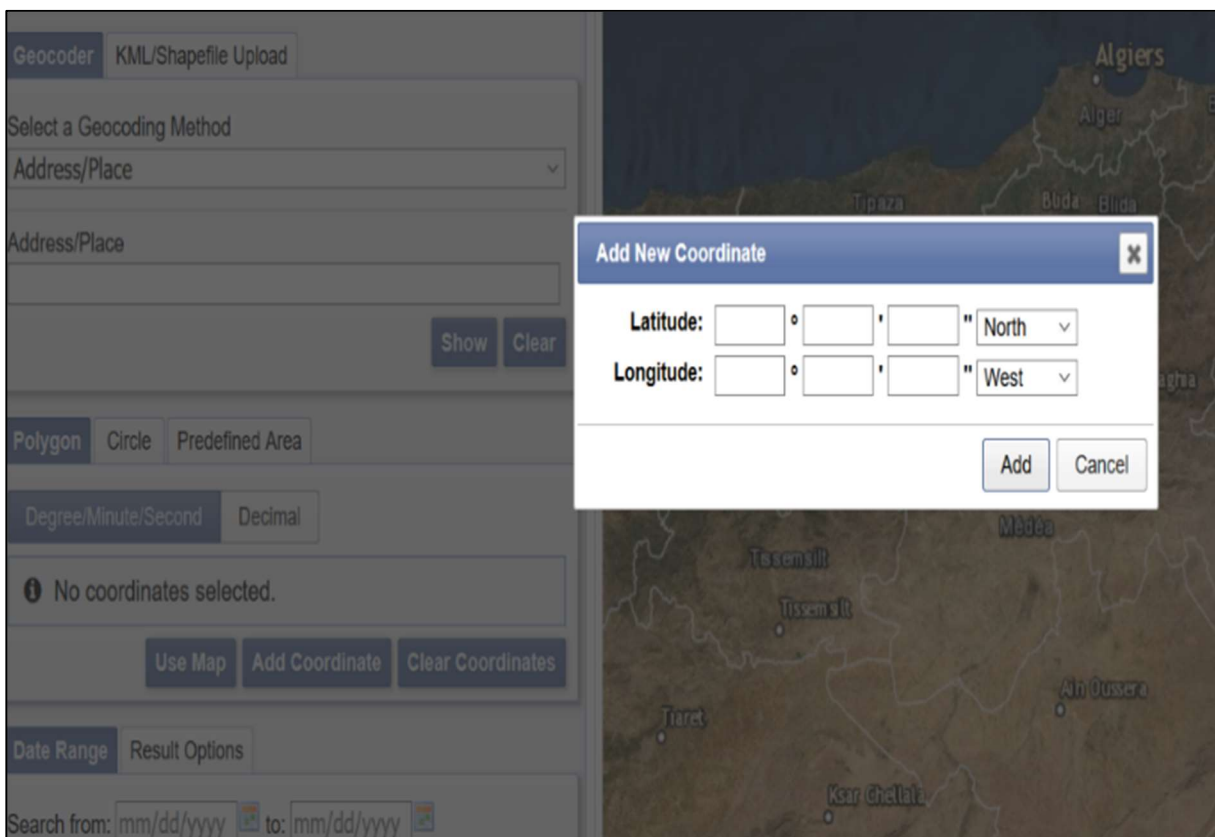


Figure 3.3. *Délimitation de la zone d'étude*

- 2- Définir l'intervalle de temps (Fig 3.4) puis sélectionner le satellite et le capteur utilisé pour l'étude et le niveau de traitement des images (Fig 3.5).

⁹ <https://earthexplorer.usgs.gov/>

¹⁰ USGS : (United States Geological Survey) Institut d'étude géologique des Etats-Unis qui est un organisme gouvernementale dédié aux sciences de la terre

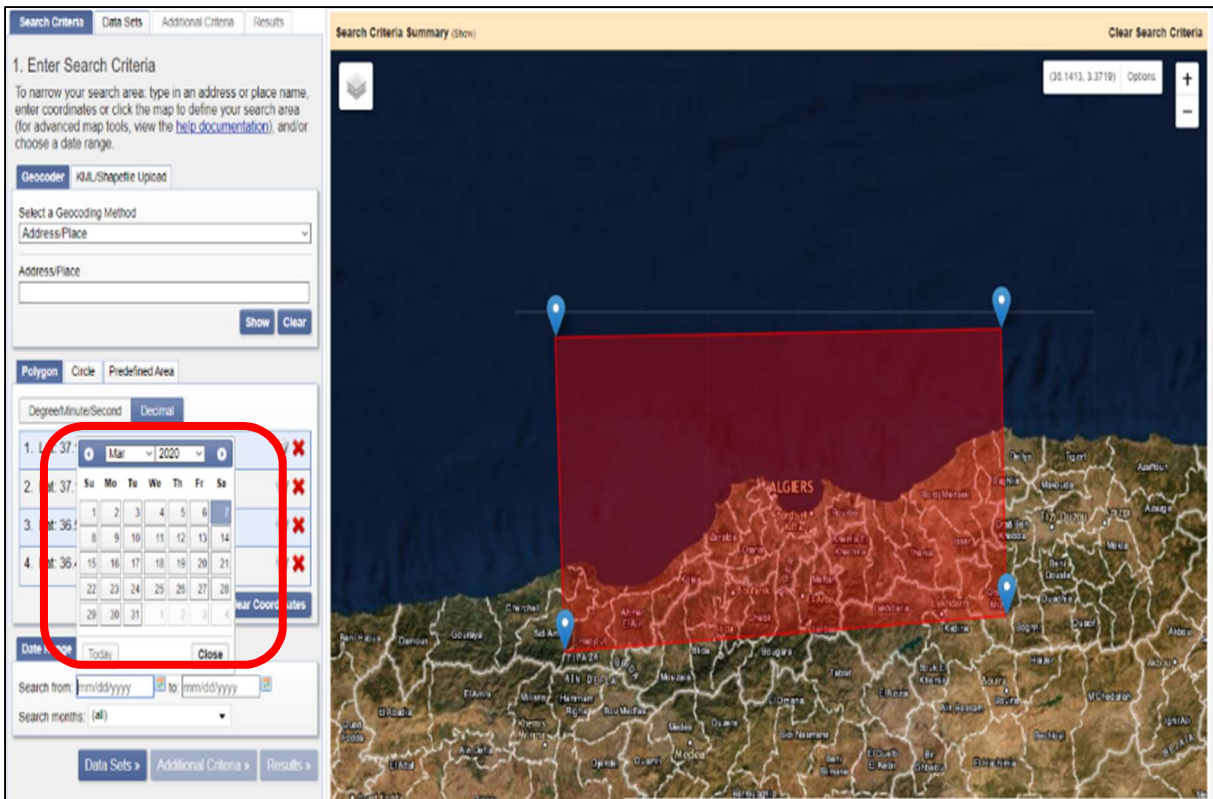


Figure 3.4. Définition de l'intervalle du temps

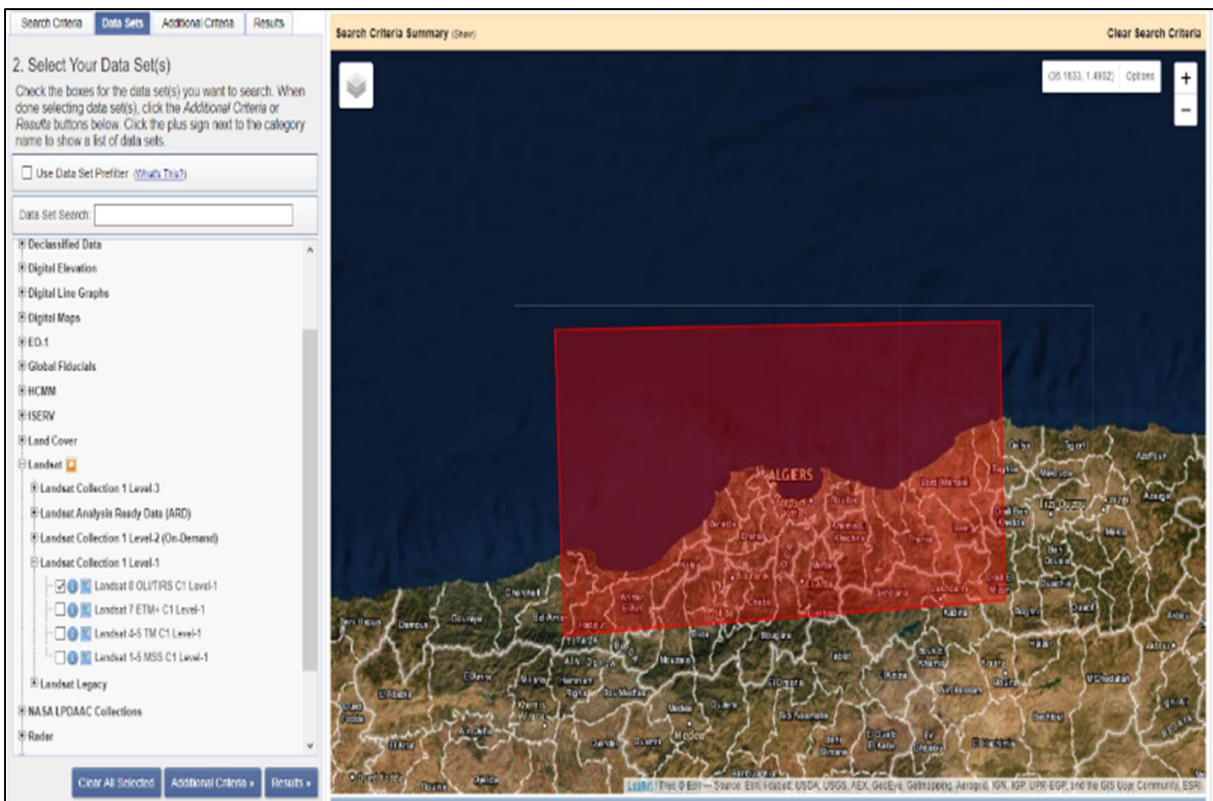


Figure 3.5. Sélection du satellite et du niveau de traitement

- 3- Cliquer sur le bouton ‘**results**’, pour obtenir une liste d’images où il y a la possibilité de les visualiser ou de les télécharger (Fig 3.6).

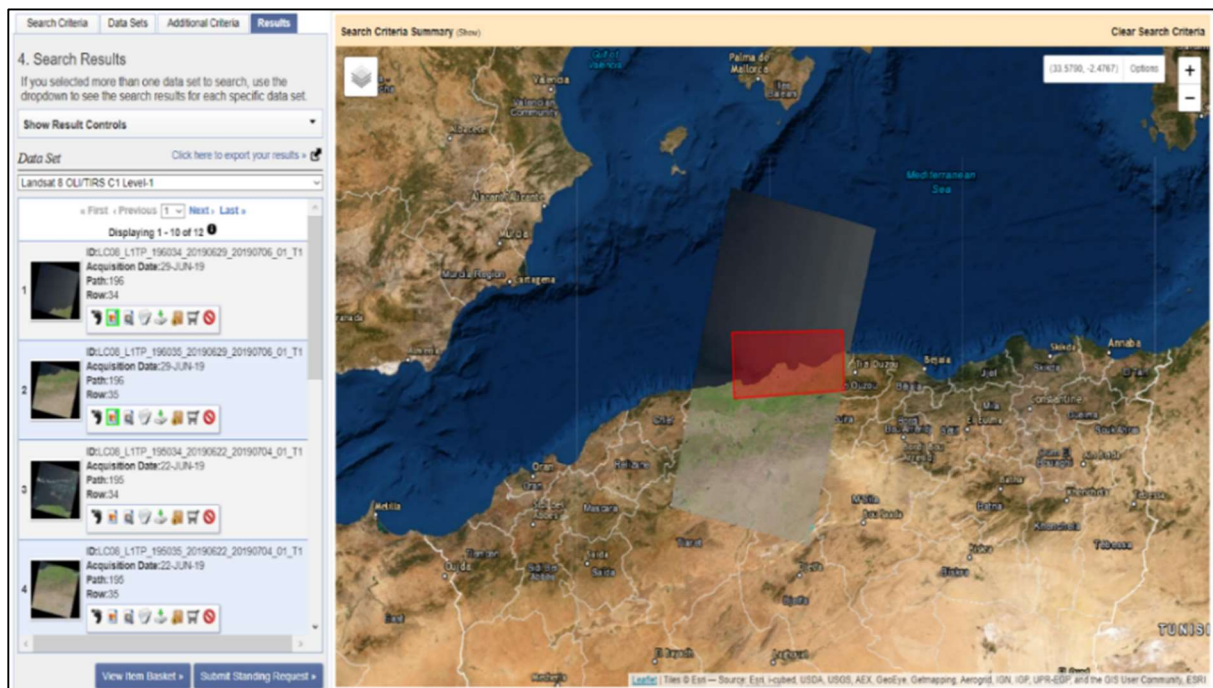


Figure 3.6. *Affichage et visualisation de l'image*

- 4- Choisir un produit **GeoTIFF**¹¹ car il contient tous les métadonnées nécessaires.

1.3 Acquisition des données MSI

Le site d'ESA¹² fournit des images issues de Sentinel 1, 2 et 3 avec la possibilité de sélectionner les 3 satellites au même temps donc la possibilité de comparer entre eux et de choisir le niveau de traitement de l'image.

- 1- Zoomer sur la région d'étude puis délimiter la zone d'étude ensuite définir l'intervalle de temps (Fig 3.7). Il est possible aussi d'enregistrer la recherche.
- 2- Cliquer sur le bouton de la recherche. Une liste d'images s'affiche où il y a la possibilité de sélectionner l'image souhaitée (Fig 3.8), la visualiser ou ensuite la télécharger (Fig 3.9).

¹¹ GeoTIFF : le standard des images TIFF géoréférencés approuvé par le système Earth Data de la Nasa

¹² <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

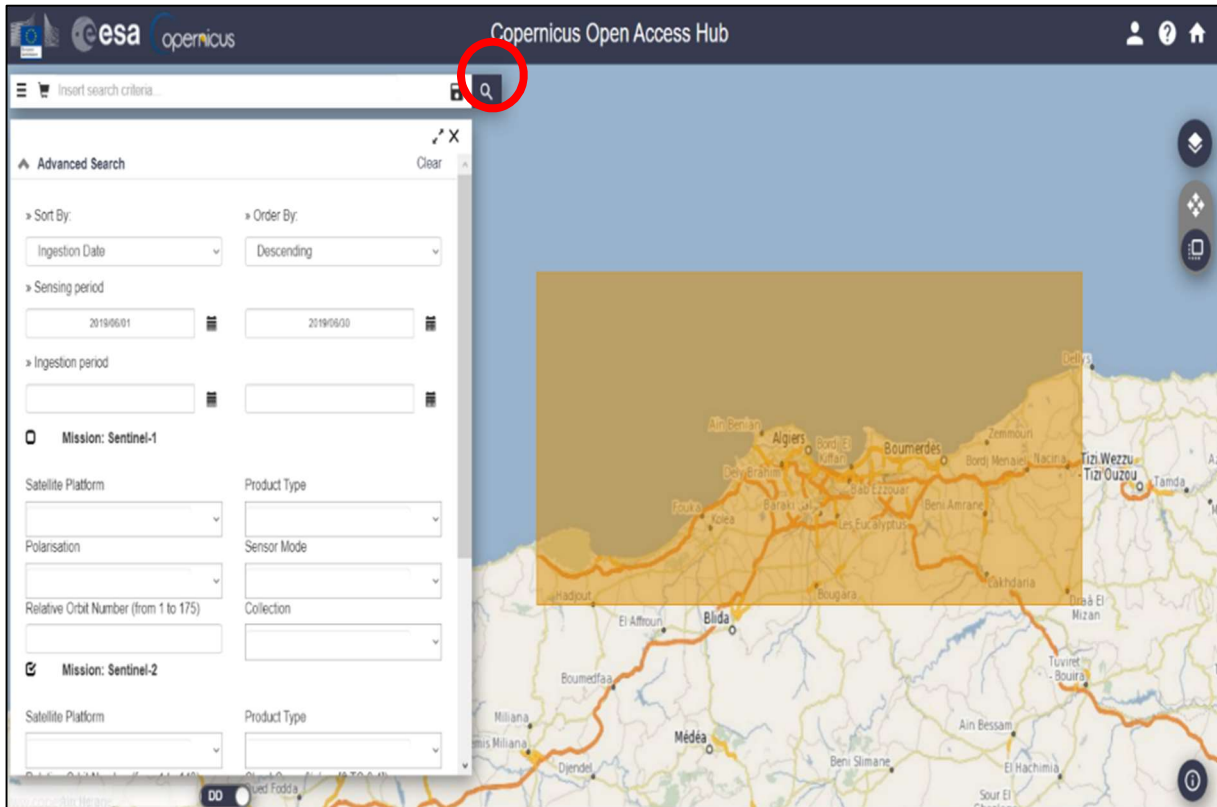


Figure 3.7. Choix de la zone d'étude et définition de l'intervalle du temps

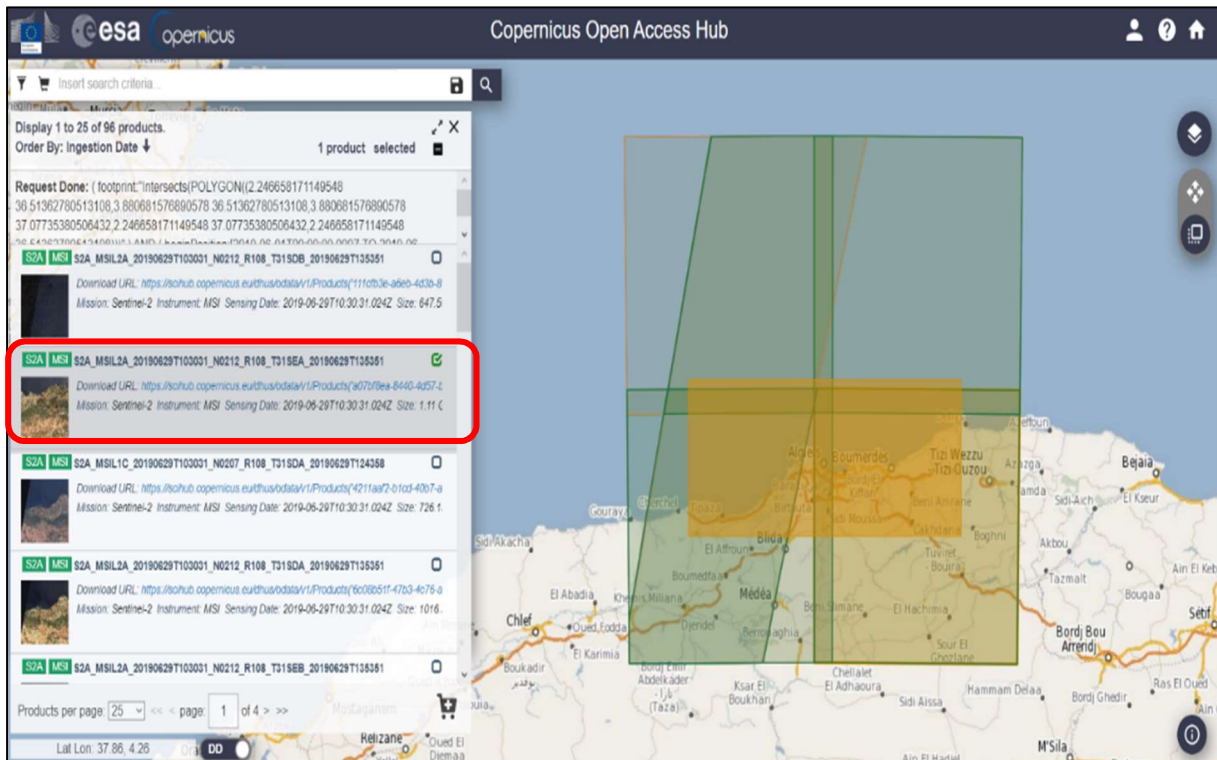


Figure 3.8. Sélection de l'image

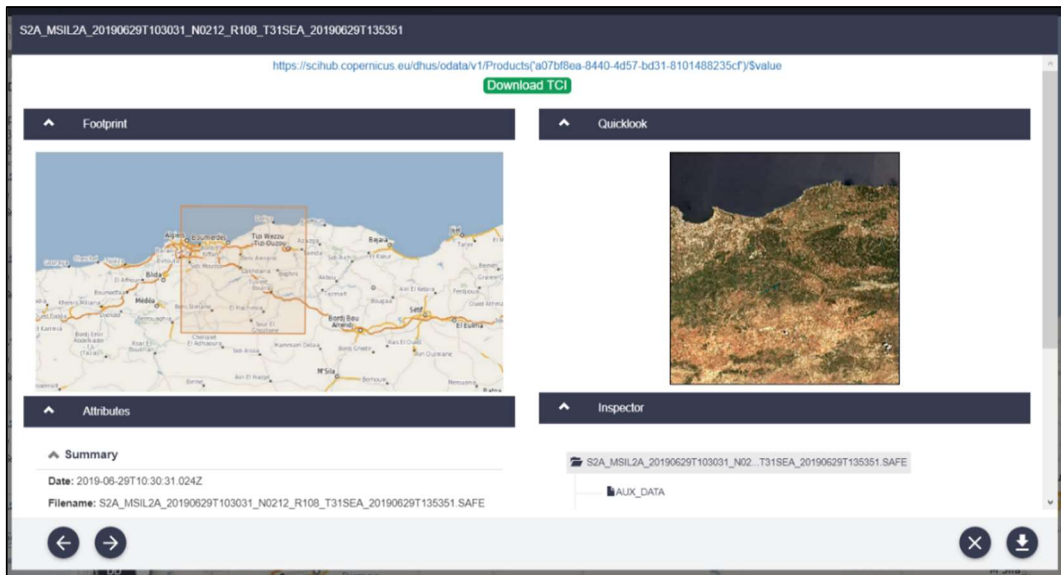


Figure 3.9. Visualisation et Téléchargement de l'image

1.4 Acquisition des données OLCI

Les images sentinel-3 peuvent être téléchargées depuis les sites précédents mais on a choisi le site¹³ EUMETSAT¹⁴ de Copernicus¹⁵.

- 1- Suivre les mêmes étapes dans SciHub Copernicus car l'interface est presque la même sauf que EUMETSAT dispose des données sentinel-3 uniquement (Fig 3.10).

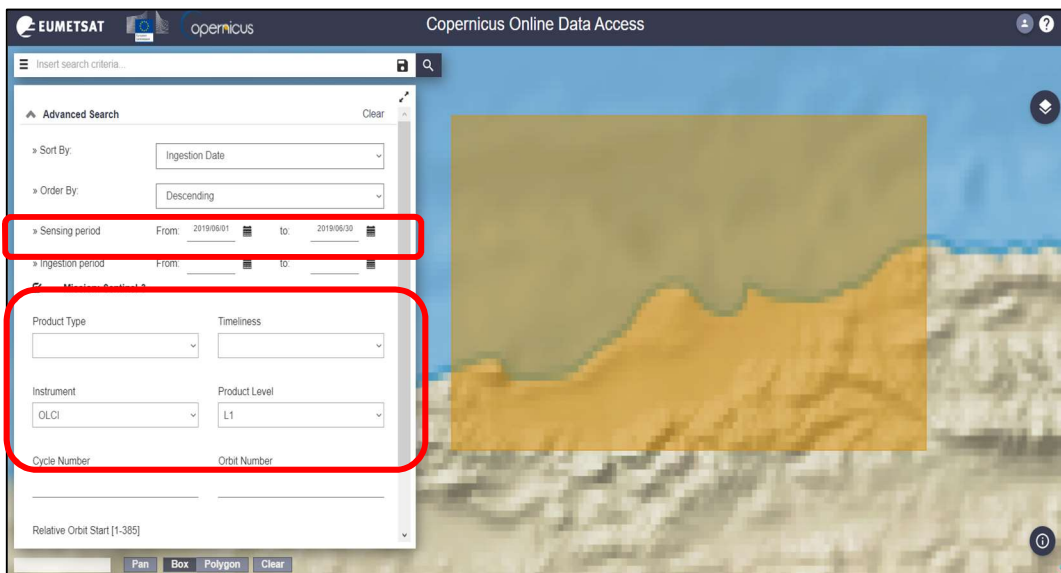


Figure 3.10. Sélection de la date et du type de capteur

¹³ <https://coda.eumetsat.int/#/home>.

¹⁴ EUMETSAT : l'Organisation Européenne pour l'Exploitation des Satellites Météorologiques

¹⁵ Copernicus : Program Européen de Surveillance de la Terre

2. Traitement et analyse des données

Dans cette étude, les données utilisées sont recueillies pour calculer la concentration de la Chl-*a*. Les données brutes téléchargées, représentent des mesures de radiance donc il est nécessaire de passer par le calcul de la réflectance, sauf pour les données MODIS.

2.1 Traitement et analyse des données MODIS

Les données MODIS recueillis correspondent à des mesures de réflectance donc l'extraction de la concentration de la chlorophylle se fait directement mais il faut d'abord réaliser une projection de l'image sur le système UTM/WGS84 (Fig 3.11).

Etape n°1 (visualisation de l'image) : Ouvrir l'image ".nc" sur le logiciel SeaDAS en cliquant sur "file", puis appuyer "open". Aller sur "File manager", avec un clic droit sur l'image, appuyer sur "RGB¹⁶ image".

Etape n°2 (re-projection de l'image): Aller sur "Raster" puis appuyer sur "Reproject". Choisir le répertoire de sortie et le système de projection. L'image s'affiche automatiquement sur "File manager".

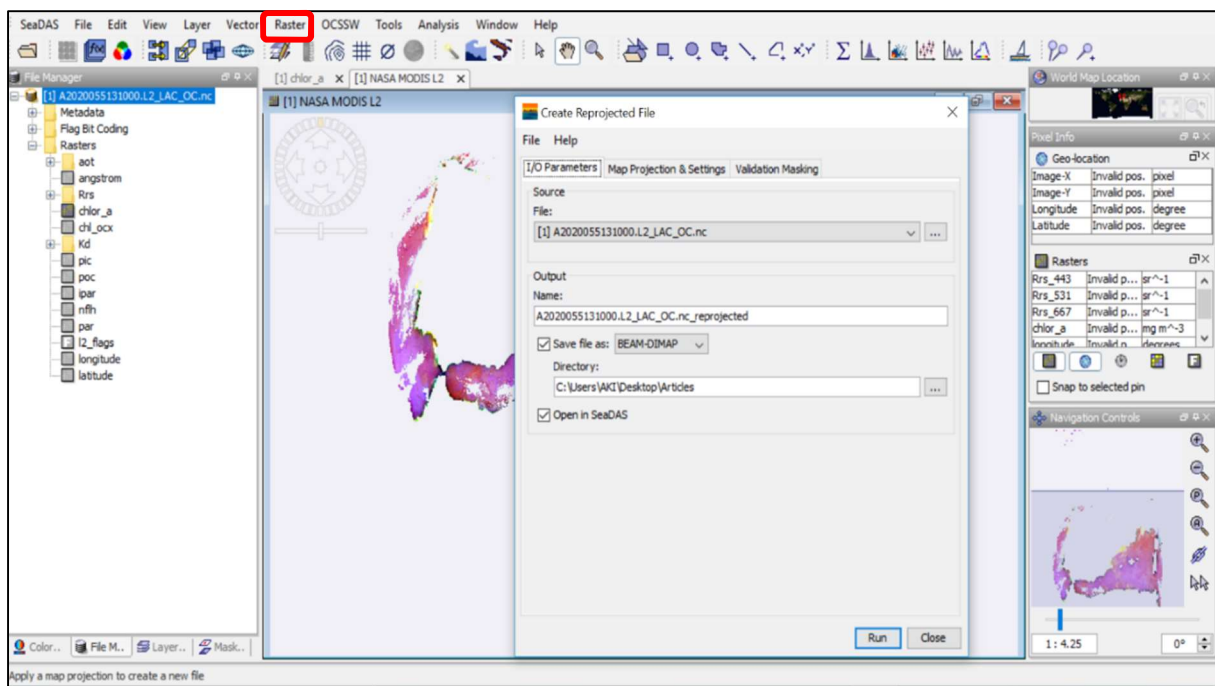


Figure 3.11. Traitement des données MODIS sur le logiciel SeaDAS

¹⁶ RGB : Red Green Bleu

Etape n°3 (délimitation de la zone) : Faire un **subset**, aller sur ‘‘Raster’’, choisir ‘‘Crop’’, délimiter la zone d’étude et cliquer sur ‘‘ok’’.

2.2 Traitement et analyse des données OLI

Le calcul de la réflectance peut être effectué sur SNAP avec l’outil C2RCC ou bien sur le logiciel ENVI (Fig 3.12) comme suit :

Etape n°1 (visualisation de l’image) : Ouvrir l’image multispectrale sur le logiciel ENVI à partir du menu ‘‘ File ‘’, appuyer sur ‘‘ open as ‘’ puis, cliquer sur ‘‘ Landsat’’ et il est nécessaire de choisir ‘‘Geotiff with metadata’’.

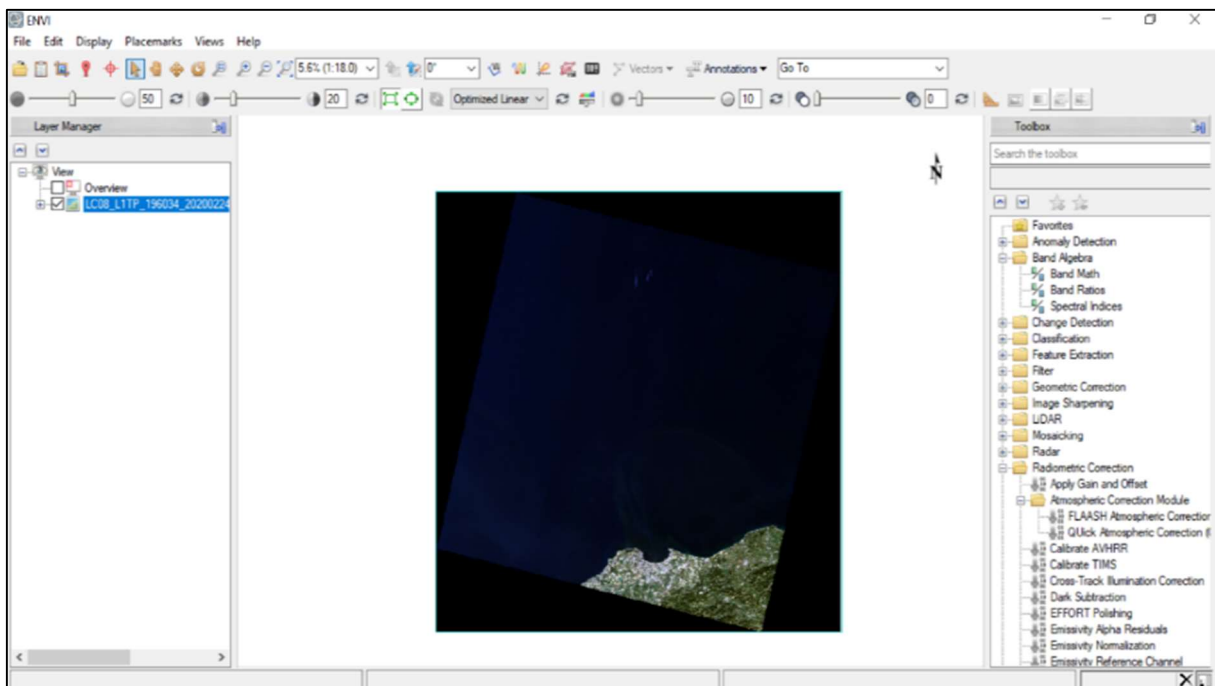


Figure 3.12. *Traitement des données OLI avec le logiciel ENVI.*

Etape n°2 (calibration radiométrique) : Effectuer une calibration radiométrique en allant sur ‘‘Toolbox’’ puis ‘‘Radiometric correction’’, choisir ‘‘Radiometric calibration’’ puis ‘‘reflectance’’ et déterminer le fichier de sortie.

Etape n°3 (correction atmosphérique) : Faire une correction atmosphérique en allant sur aussi ‘‘Toolbox’’ puis ‘‘Radiometric correction’’, choisir ‘‘Atmospheric correction module’’ puis le type de correction.

2.3 Traitement et analyse des données MSI

Les données téléchargées nécessitent une série de traitements sur le logiciel SNAP (Fig 3.13) pour pouvoir passer des radiances aux réflectances.

Etape n°1 (visualisation de l'image) : Sur le menu de SNAP, ouvrir l'image ".zip" en cliquant sur "file", puis appuyer "Open product". Aller sur "Product explorer", avec un clic droit sur l'image, appuyer sur "RGB image".

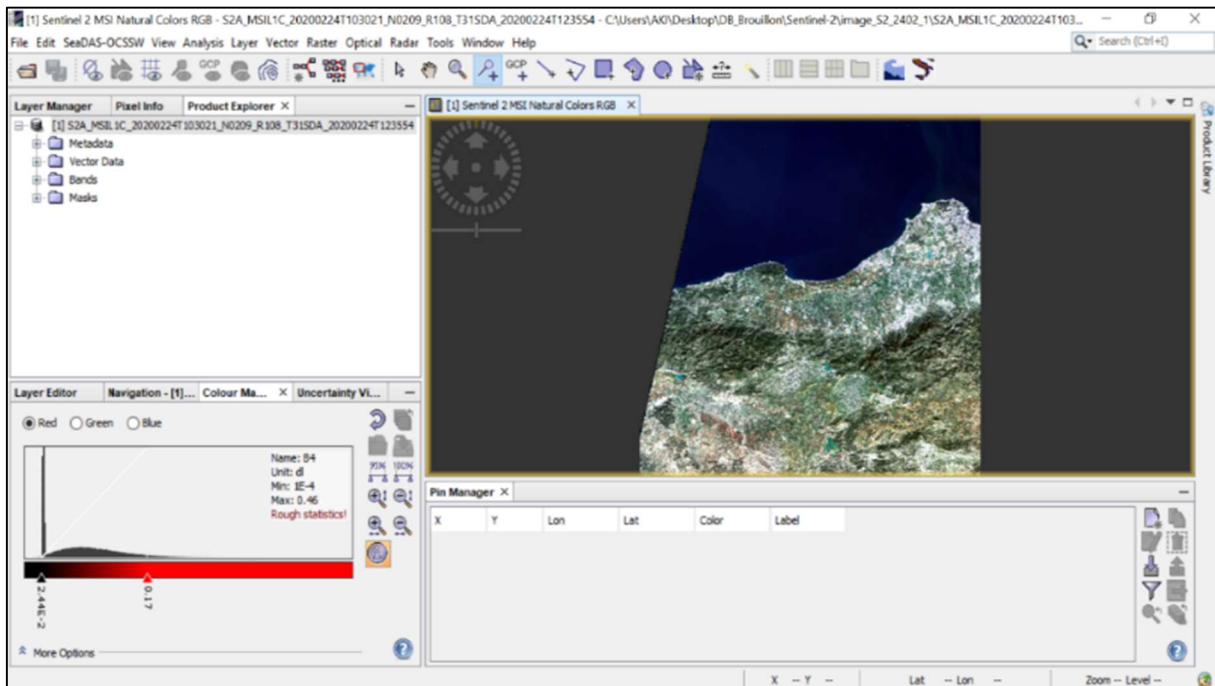


Figure 3.13. *Traitement des données MSI avec le logiciel SNAP*

Etape n°2 (re-projection de l'image): Aller sur "Raster " puis appuyer sur "Reproject". Choisir le répertoire de sortie et le système de projection. L'image s'affiche automatiquement sur "File manager".

Etape n°3 (délimitation de la zone) : Faire un **subset**, aller sur "Raster", choisir "subset", délimiter la zone d'étude et cliquer sur "ok". Afficher l'image en RGB.

2.4 Traitement et analyse des données OLCI

Etape n°1 (visualisation de l'image) : Sur le menu de SNAP, ouvrir l'image ".zip" en cliquant sur "file", puis appuyer "Open product". Aller sur "Product explorer", avec un clic droit sur l'image, appuyer sur "RGB image" (Fig 3.14).

Etape n°2 (re-projection de l'image): Aller sur "Raster " puis appuyer sur "Reproject". Choisir le répertoire de sortie et le système de projection. L'image s'affiche automatiquement sur "File manager".

Etape n°3 (délimitation de la zone) : Faire un **subset**, aller sur "Raster", choisir "subset", délimiter la zone d'étude et cliquer sur "ok". Afficher l'image en RGB.

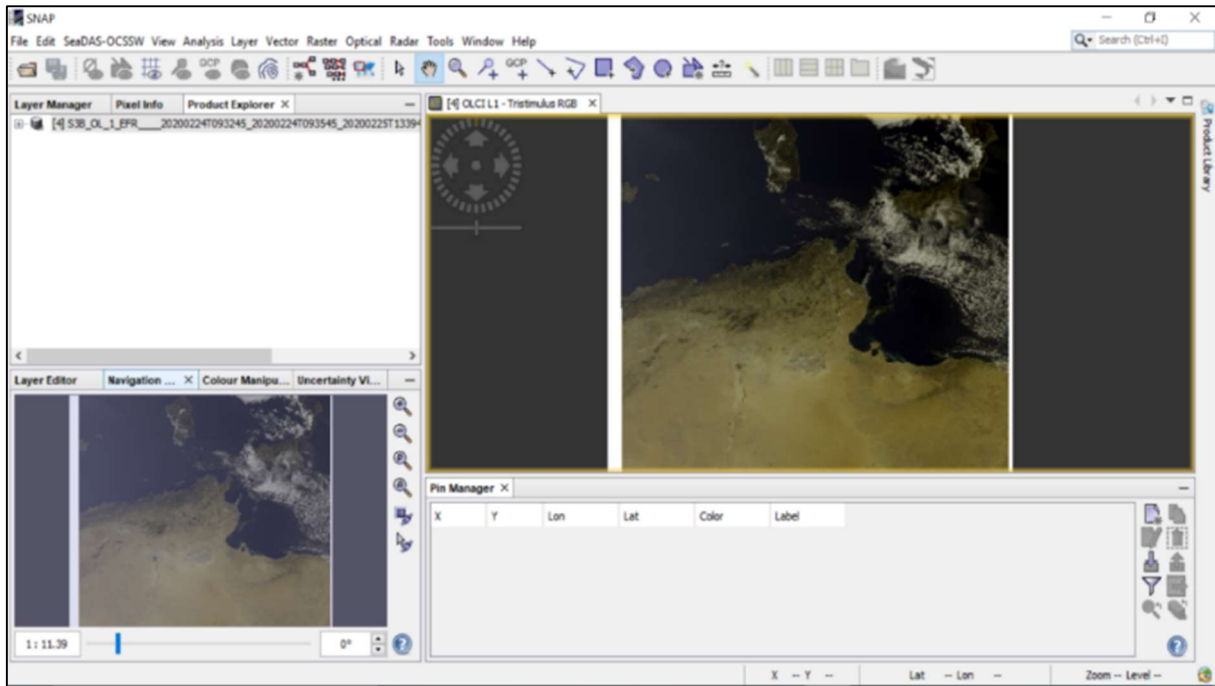


Figure 3.14. *Traitement des données OLCI avec le logiciel SNAP*

3. Calcul et extraction de la chlorophylle satellitaire

Pour le calcul et l'extraction de la Chl-*a* issue du landsat-8, Sentinel-2 et Sentinel- 3 d'abord le model C2RCC sur SNAP est appliqué (Fig 3.15). Ce modèle est aussi appliqué pour calculer la réflectance.

Sur SNAP :

Etape n°1 : Aller à « Optical » puis « Thematic Water Processing » ensuite « C2RCC » puis choisir le type du capteur.

Etape n°2 : Une fenêtre s'affiche. Dans « I/O paramètres », il faut d'abord choisir le « input » et le nom du fichier de sortie et son emplacement, sélectionner les paramètres de sorties puis cliquer « run ».

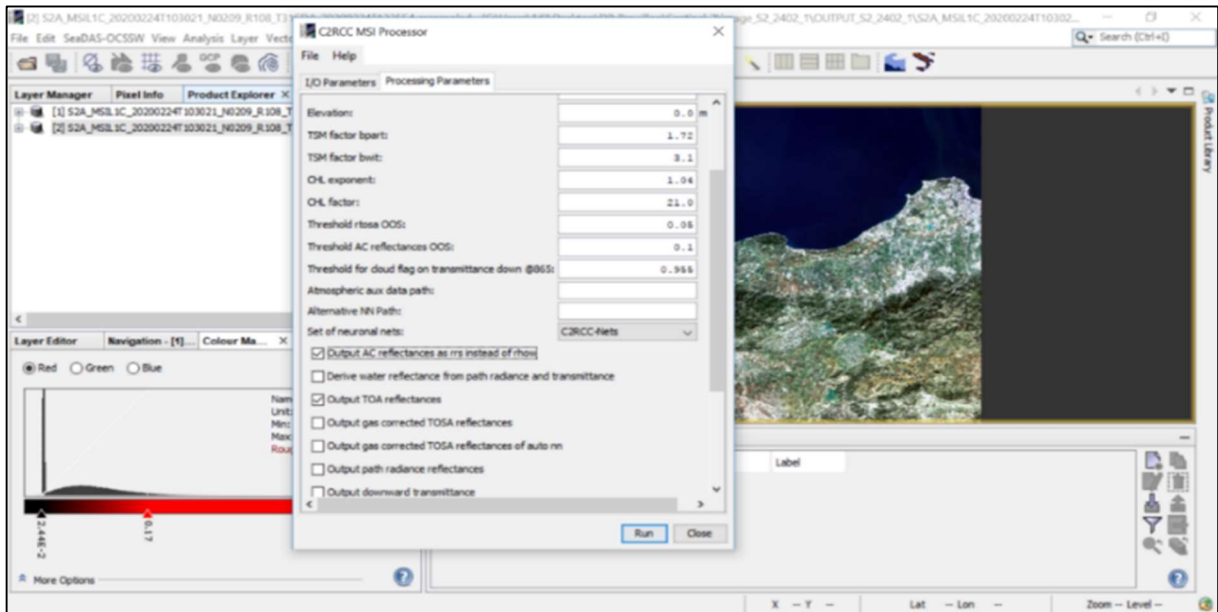
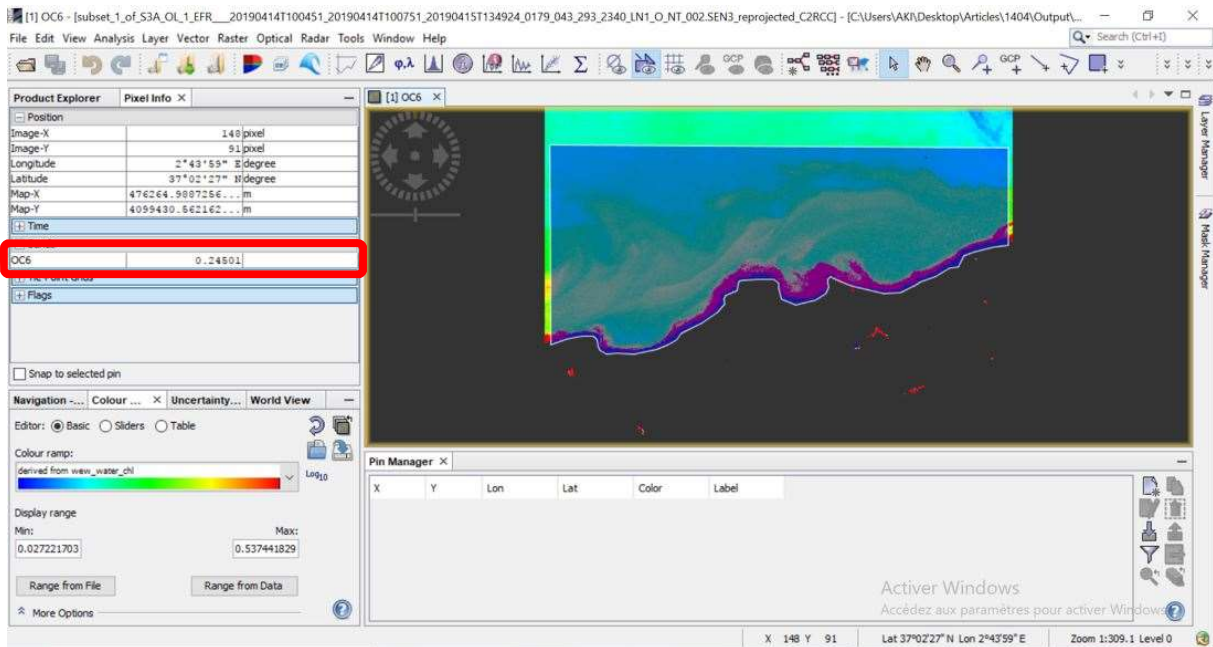


Figure 3.15. Application du model C2RCC

Les cartes établies permettent d’extraire la concentration de la chlorophylle pour chaque point (Station) sur la zone d’étude.

Etape n°3 : Pour visualiser la concentration, Aller sur « Pixel info », toutes les informations s’affichent (Fig 3.16).



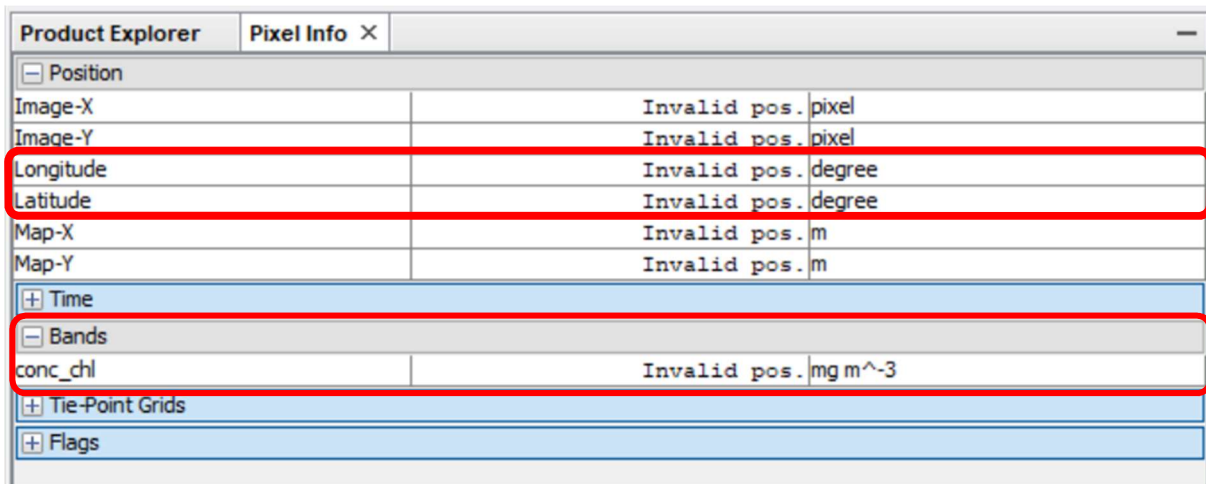


Figure 3.16. Visualisation des informations d'une station

Etape n°4: Pour extraire les informations d'une station. Cliquer sur l'icône "Pin". Pour l'extraction des données d'une surface ou d'une géométrie cliquer sur, Créer un mask de Géométrie. (Fig 3.17).

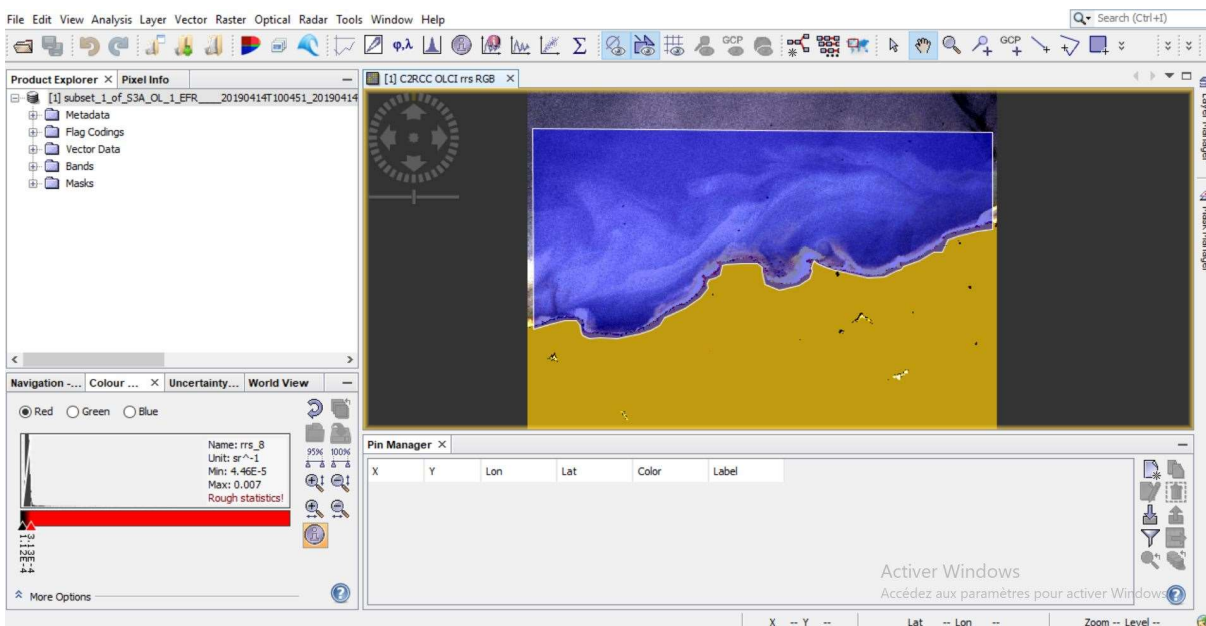


Figure 3.17. Extraction des données

4. Application des Algorithmes Bio-optiques

Nous avons appliqué les algorithmes Bio-optiques proposé par O'reilly et al 2019. Une étude de corrélation est effectuée entre résultats des traitements et les données in-situ (Djemaoun,L, Fernani.A., 2019).

Sur SNAP :

Etape n°1 : Aller sur « Raster », cliquer ensuite sur « Band Maths » puis introduire les formules (Fig 3.18).

Etape n°2 : Extraire les données de la même manière que dans l'étape précédente.

5. Modélisation du phytoplancton

Dans cette partie, les algorithmes de Hirata présentés dans le tableau 1.7 de la page 26 sont utilisés pour élaborer le cycle annuel des différents groupes phyto-planctoniques dans le bassin Algérois. Pour cela nous avons utilisé les mêmes images traitées pour l'extraction de la chlorophylle annuelle.

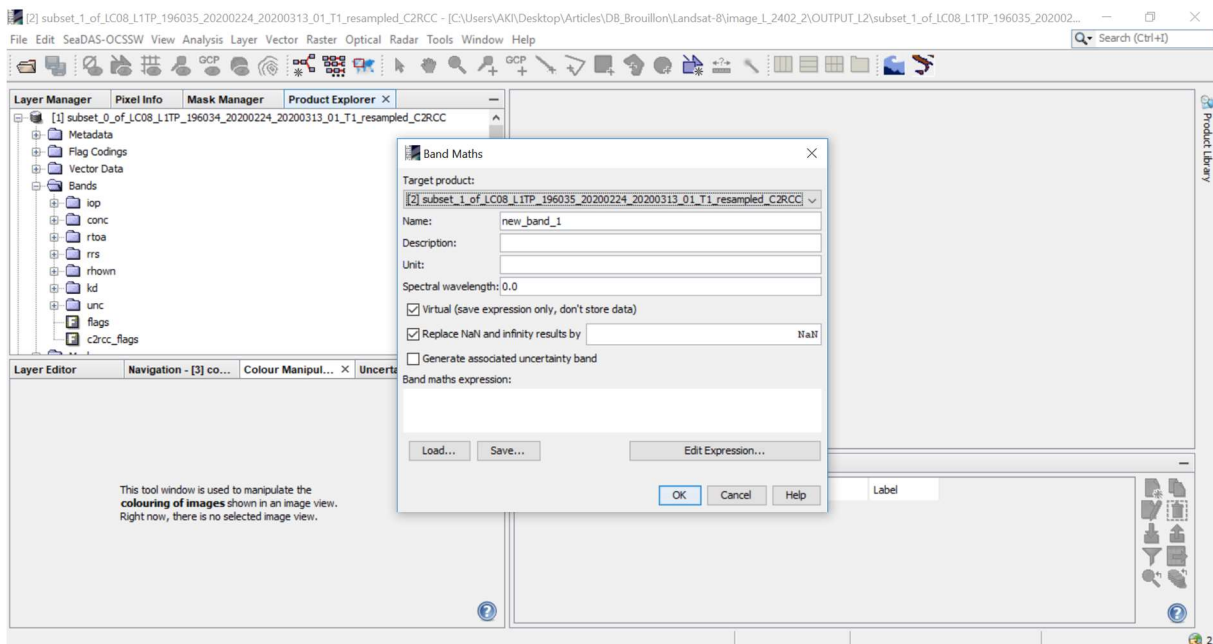
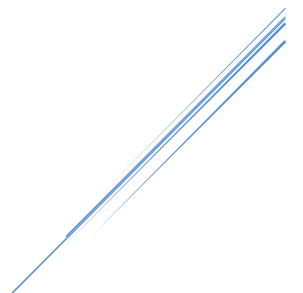


Figure 3.19. Introduction des algorithmes pour la modélisation des groupes du phytoplancton (Hirata et al., 2011)

Résultats et discussion



IV. Résultats et discussion

1. Sélection du meilleur capteur pour la télédétection de la couleur de l’océan

Les critères de comparaison dans cette étude sont principalement la résolution spectrale et la résolution spatiale.

1.1 Comparaison entre les produits des capteurs

Nous avons pris en considération les produits Level-2 de MODIS (Tableau 4.1) et les produits Level-2 générés par le model C2RCC (Tableau 4.2). Comme il est mentionné dans la partie matériel et méthode les données MODIS sont directement exploitées avec seulement l’application de la re-projection.

Tableau 4.1. Produits Level-2 MODIS

Nom	Unité	Description
Rrs 412-687	sr ⁻¹	Réfectances
Kd 490	m ⁻¹	coefficient d'atténuation diffuse
aot_869	m ⁻¹	épaisseur optiques des aérosols
angstrom	/	Aérosol Angstrom exposent
chlor_a	mg.m ⁻³	concentration de la chlorophylle (l'algorithme OCI)
chlor_ocx		concentration de la chlorophylle (l'algorithme OC3)
pic	mol.m ⁻³	concentration de la calcite (Balch & Gordon)
poc	mg.m ⁻³	carbone organique particulaire
ipar	einstein.m ⁻² .s ⁻¹	rayonnement instantané disponible par photosynthèses
nfln	w.m ⁻² .µm ⁻¹ .sr ⁻¹	hauteur de ligne de fluorescence normalisée
par	einstein.m ⁻² .d ⁻¹	rayonnement disponible par photosynthèses
l2_flags	/	
longitude	° E	
latitude	° N	

Tableau 4.2. Produits Level-2 générés par C2RCC pour OLI, MSI et OLCI

Nom	unité	Description	
iop	iop_apig	m ⁻¹	coefficient d'absorption des pigments phytoplanctoniques à 443 nm
	iop_adet		coefficient d'absorption des détritres à 443 nm
	iop_agelb		coefficient d'absorptions des CDOM à 443 nm
	iop_bpart		coefficient de diffusion des particules marines à 443
	iop_bwit		coefficient de diffusion des particules blanches 443
	iop_adg		absorption des détritres + les CDOM à 433 nm
	iop_atot		absorption des détritres + les CDOM+ phytoplancton à 443 nm
	iop_btot		diffusion des particules totales
Conc	conc_tsm	g.m ⁻³	concentration absolue du poids sec de la matière en suspension totale
	conc_chl	mg.m ⁻³	concentration de la chlorophylle
Rtoa			reflectance Top-Of-Atmosphere

Rhow/ Rrs		sr ⁻¹	réflectance de la sortie de l'eau corrigée atmosphériquement dépendante de l'angle à 400–1020 nm
Rhown			réflectances normalisées de la sortie de l'eau à 400–1020 nm
Kd	kd489	m ⁻¹	coefficient d'atténuation de l'irradiance
	kadmin		coefficient d'atténuation de la moyenne des irradiances à trois bandes avec kd minimum
	kd_z90max		Profondeur de la colonne d'eau d'où proviennent 90 % de l'irradiation de sortie de l'eau
unc		m ⁻¹	Estimations de l'incertitude pour les iop, kd et conc
quality_flags		/	
c2rcc_flag		/	

Les deux tableaux 4.1 & 4.2 présentent les produits issus des capteurs satellitaires. Nous pouvons clairement observer que les produits sont pratiquement les mêmes sauf que les Produits générés par C2RCC sont plus distinctifs. Ils offrent différents types de paramètres, dont ceux qui sont biologique (Chl-a, POC), et d'autres qui sont optique (K_d, PAR, iPAR).

1.2 Comparaison entre les images

Le graphe suivant représente la réponse spectrale d'un point côtier (36°36'9.36" N, 2°25'50.52" E) dans le bassin Algérois issu des quatre capteurs. Sur l'axe des ordonnées, les valeurs des réflectances et sur l'axe des abscisses, les longueurs d'ondes du visible.

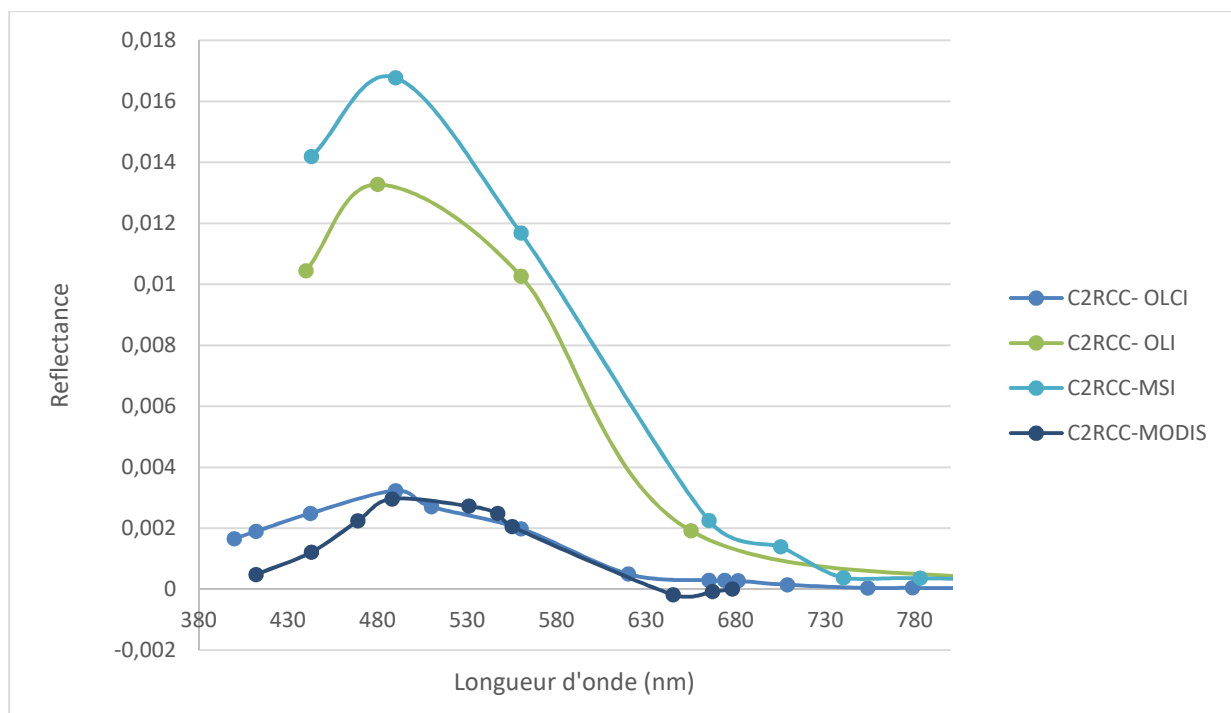
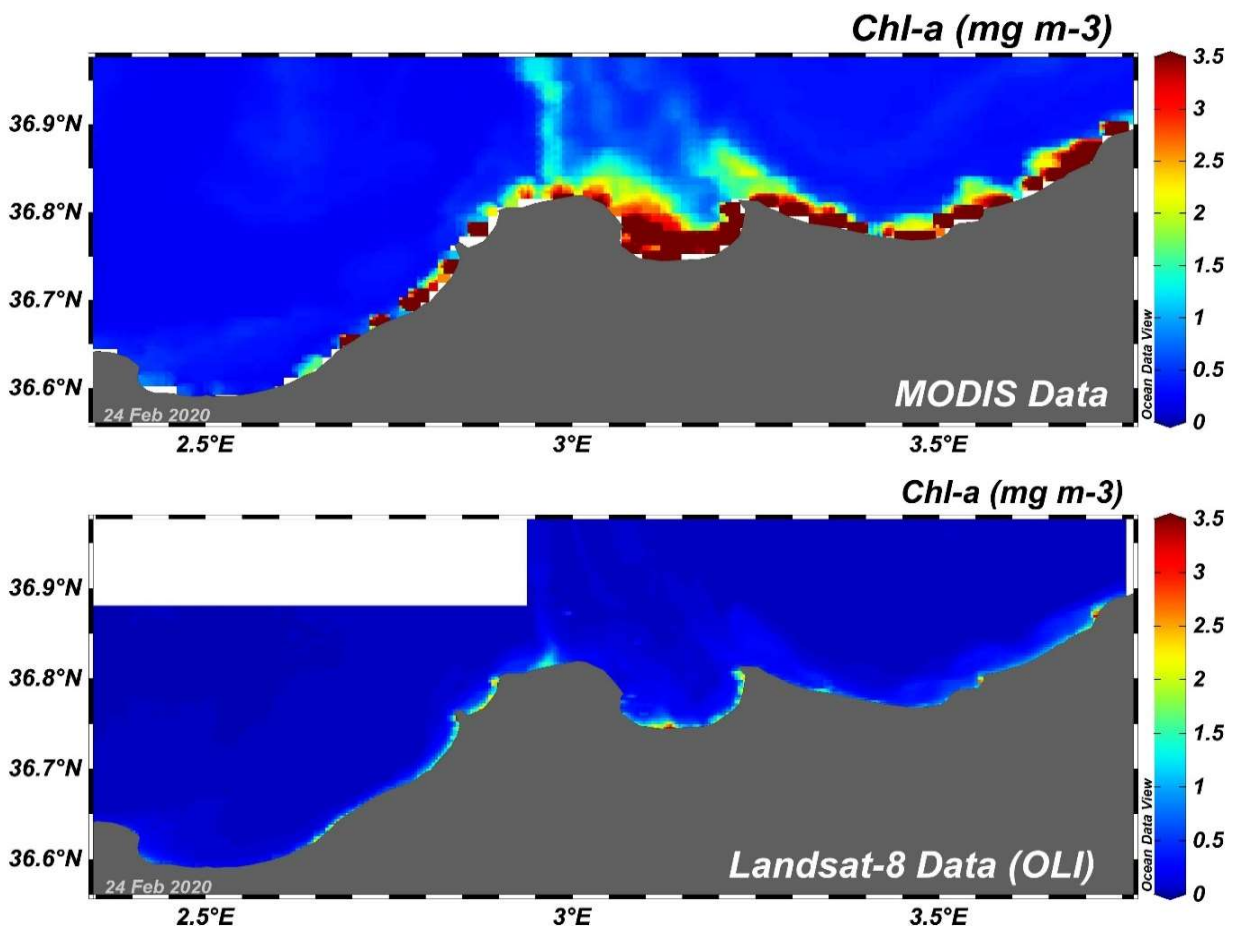


Figure 4.1. Réponse optique de la masse d'eau côtière dans le bassin Algérois

Nous observons qu'OLI et MSI ont surestimé les valeurs de la réflectance, ce qui signifie qu'ils ont sous-estimé les concentrations de la chlorophylle. Tandis qu'avec MODIS nous avons enregistré des valeurs négatives qui sont probablement dû aux calculs mathématiques, alors qu'OLCI nous a montré une distribution parfaite des réflectances.

Les figures suivantes représentent des cartes de la Chl-*a* obtenues pour les quatre capteurs avec, une même échelle de Chl-*a*. Il est clair que MODIS et OLCI sont des capteurs développés essentiellement pour des études océanographiques, mais ça n'empêche pas d'utiliser OLI et MSI. En se basant sur la comparaison entre les réponses spectrales (Fig 4.1), les cartes obtenues après traitement (Fig 4.2) et les tableaux des produits (Tableau 4.1 & 4.2), nous avons constaté que:

1. MODIS offre des images quotidiennes depuis 2002 avec une bonne configuration spectrale dédiée à l'étude de la couleur de l'océan ce qui permet de construire des séries temporelles pour pouvoir ensuite élaborer les variations saisonnières et interannuelles de la chlorophylle et du phytoplancton. Toutefois, les données issues de ce capteur possèdent une résolution spatiale de 1 km qui ne permet pas de surveiller ou de quantifier précisément les épisodes de bloom algal à petite échelle géographique.



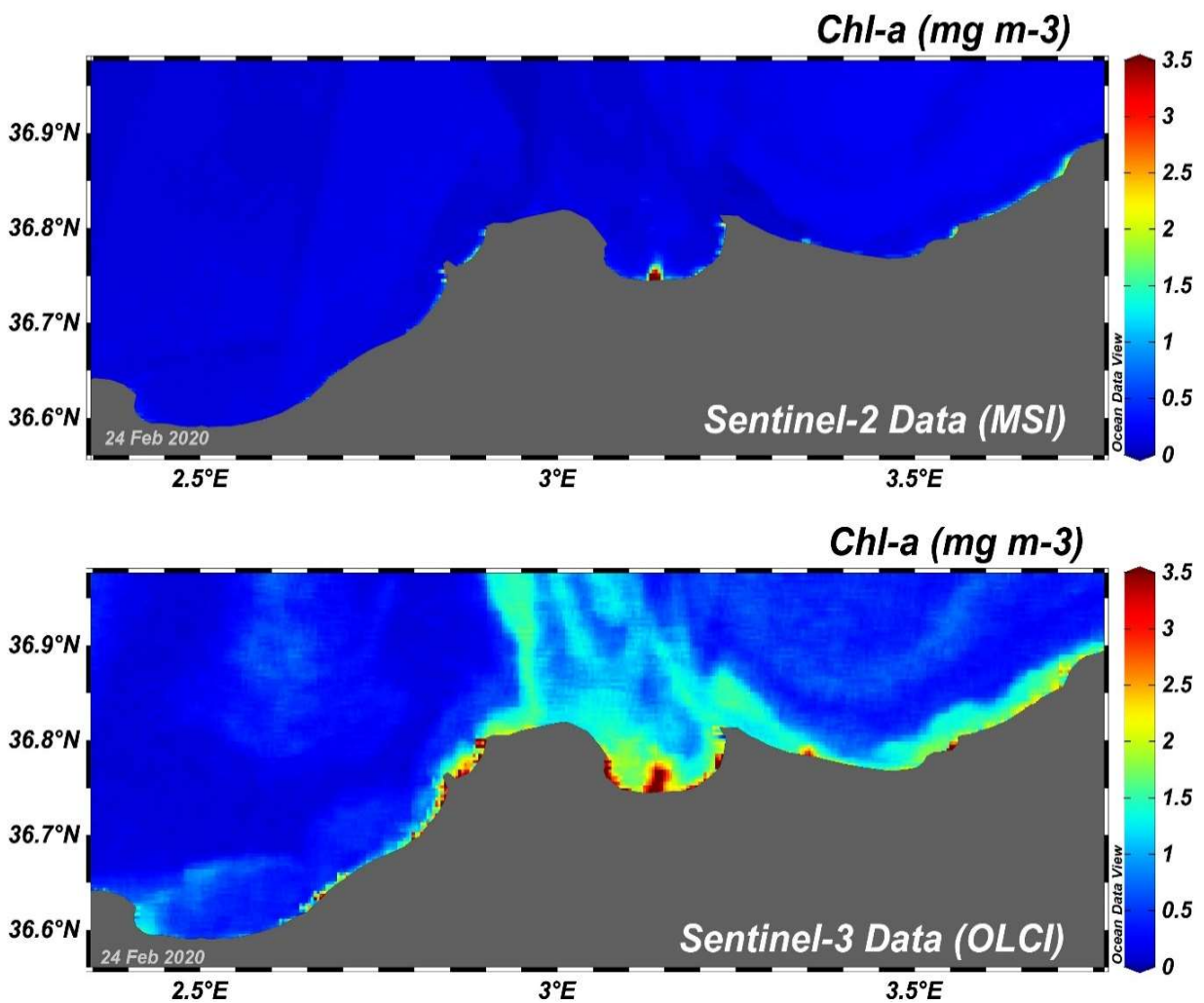


Figure 4.2. Comparaison entre les données de la concentration de la Chl-a issues de quatre satellite dans le bassin Algérois

2. Contrairement à OLI qui propose des images depuis 2013 à une résolution spatiale variée entre 15 à 30 m sauf que la configuration spectrale n'est pas adaptée pour l'estimation de la chlorophylle.
3. MSI de Sentinel-2 à son tour peut être utilisé pour la surveillance des blooms algaux presque en temps réel à une résolution spatiale qui varie entre 10-60 m mais sa résolution spectrale ne permet pas d'estimer les concentrations de la chlorophylle avec une précision.
4. OLCI est un capteur récent dédié spécialement aux études océanographiques depuis 2017 presque en temps réel à une résolution spatiale modérée de 300 m avec une large configuration spectrale, ce qui permet d'estimer les concentrations de la chlorophylle et de surveiller les blooms algaux.

Donc nous pouvons déduire qu'en termes de résolution spatiale le meilleur capteur ou les meilleurs sont OLI (30m) et MSI (10-60 m). Toutefois, en termes de résolution spectrale, le meilleur est OLCI (10 bandes dans le visible, 300m) et MODIS (10 bandes dans le visible, 1000m). En revanche, MODIS possède la plus longue couverture depuis 2002. OLCI, a une résolution spectrale élevée avec une résolution spatiale modérée pour les études et le monitoring de Chl-*a* et phytoplancton.

L'importance de la résolution spatiale repose dans le pouvoir de différencier entre les plus petits éléments dans une scène donnée et donc pouvoir estimer ou surveiller les variations des concentrations des éléments dans des zones à grande échelle. Pour la résolution spectrale, c'est la possibilité de capter les petites variations donc le pouvoir d'attribuer à chaque élément, une réponse spectrale spécifique. Dans notre travail, nous utilisons donc les données issues du capteur OLCI afin de modéliser la chlorophylle et la variabilité des groupes phytoplanctoniques dans le bassin Algérois.

2. Sélection du meilleur algorithme pour l'estimation de la chlorophylle

Le tableau suivant résume l'erreur estimée et l'étude de corrélation entre la concentration de la chlorophylle in-situ et celle calculées depuis les algorithmes bio-optiques pour l'image de 14-04-2019 :

Tableau 4.3. Coefficient de corrélation et l'erreur estimée entre les concentrations in-situ et celles calculées par les algorithmes bio-optique

	C2RCC	OC4	OC5	OC6
Type de corrélation	Linéaire	Linéaire	Linéaire	Linéaire
Coefficient de détermination	0.2625	0.8693	0.8697	0.8733
Coefficient de corrélation	0.5123	0.9324	0.9325	0.9345
Pente	0.0712	0.8697	0.8788	1.0802
Erreur	77%	45%	40%	28%

Nous remarquons depuis le tableau si dessus que l'application de l'algorithme OC6 a donné des résultats qui sont plus ou moins près de la réalité avec 28% d'erreur comparant à OC4, OC5 et celui appliqué par le C2RCC qui présente une erreur importante de 77%.

3. Cycle annuel des groupes du phytoplancton dans le bassin Algérois (année 2019)

Plusieurs paramètres rentrent en jeu lors de l'échantillonnage du phytoplancton (couts, climat, l'état de la mer, disponibilités des équipements...) ce qui le rend un peu difficile. Pour cela des algorithmes ont été développés et misent en évidence afin de différencier entre les groupes

phyto-planctoniques présents dans une masse d'eau ou d'identifier le groupe qui domine cette masse. Dans notre cas, nous avons pris en considération, seulement la concentration de la chlorophylle-a.

L'application des algorithmes de Hirata et al., (2011) sur le bassin Algérois ont révélé que lorsque la concentration de la chlorophylle augmente, la fraction des microplanctons présentée principalement par les diatomées et les dinoflagellés augmente, cependant pour les pico-planctons c'est le cas inverse. Ces distributions ne sont pas observées pour les nanoplanctons.

La figure suivante représente la moyenne des pourcentages mensuelle des groupes phyto-planctonique pendant l'année 2019 :

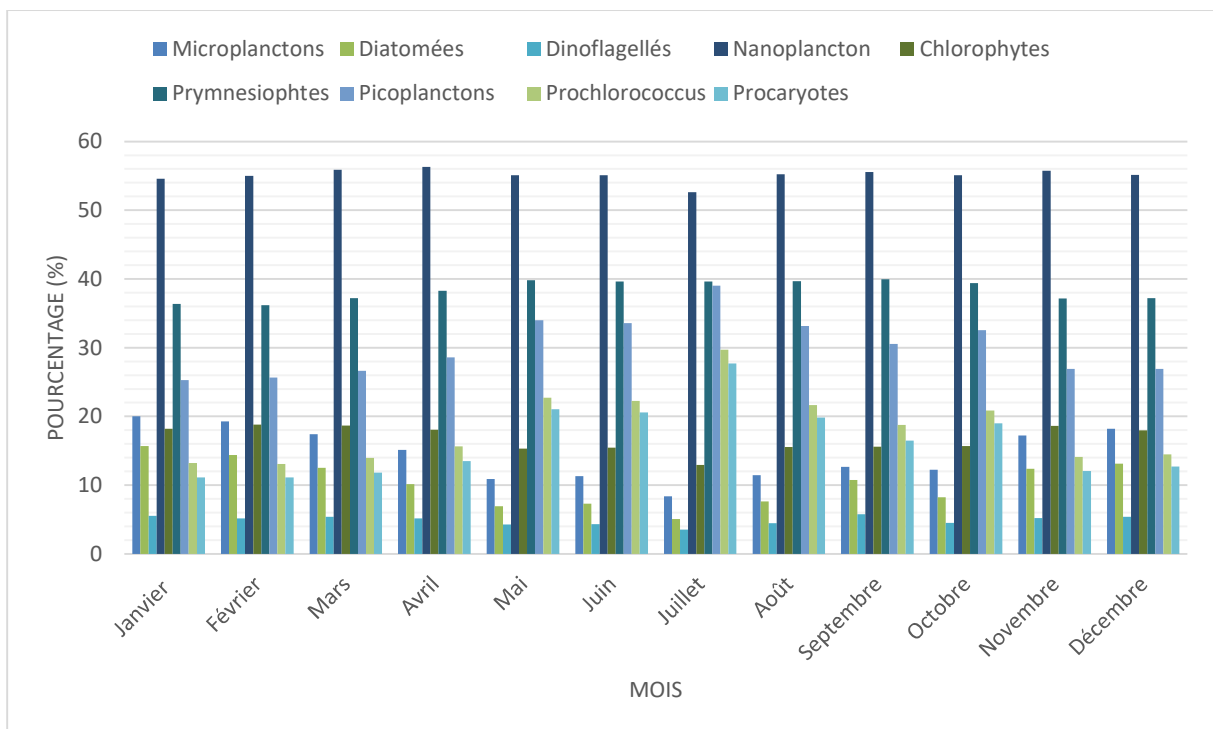
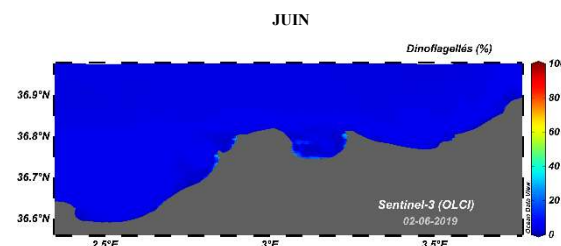
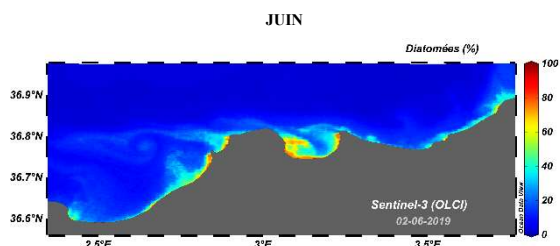
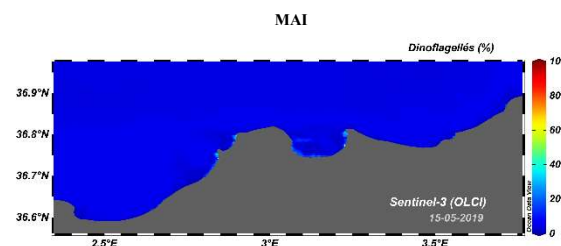
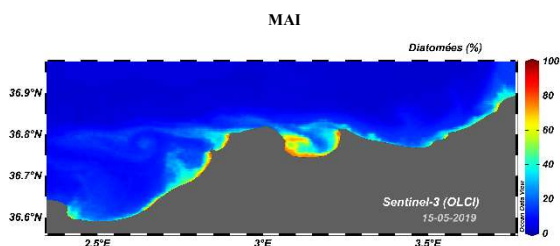
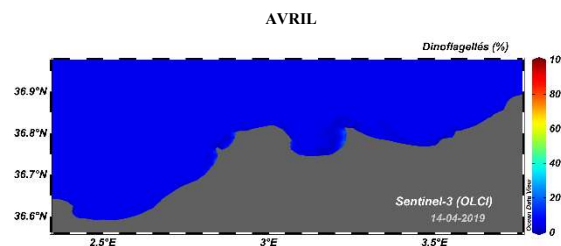
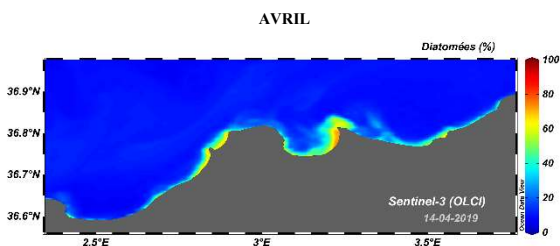
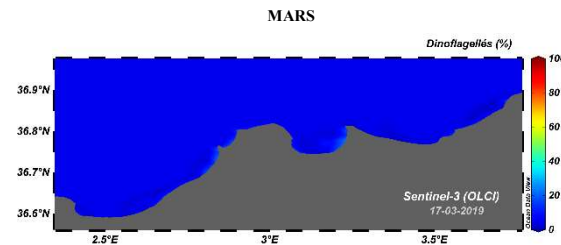
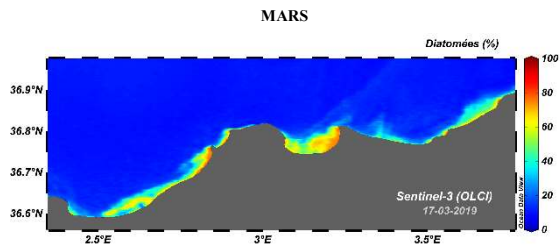
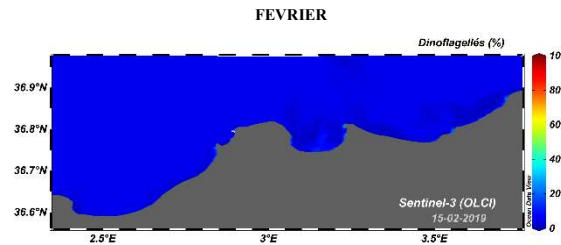
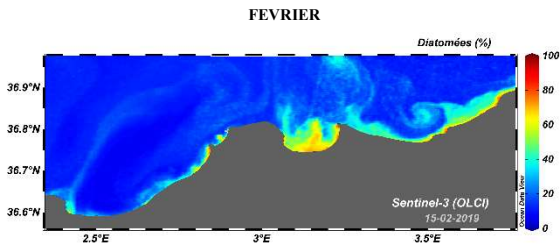
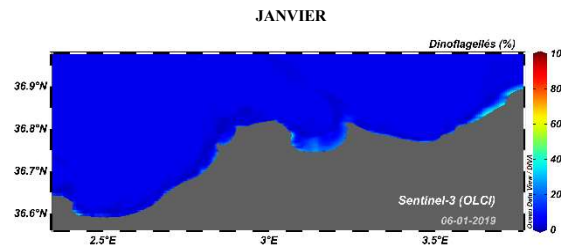
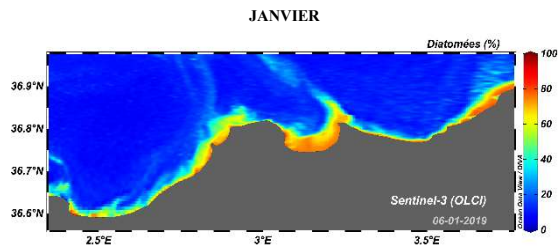


Figure 4.3. Distribution annuelle des groupes de phytoplanctons (2019)

Moyenne des Pourcentages mensuelles



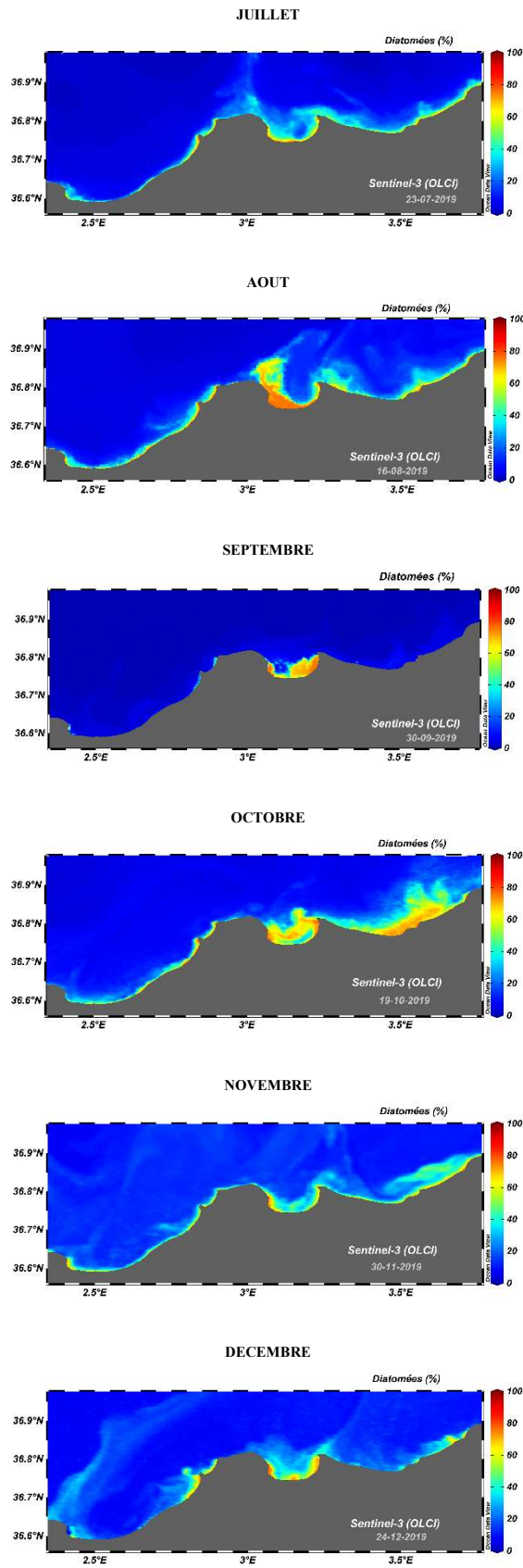


Figure 4.4. Distribution des Diatomées dans le bassin Algérois (2019).

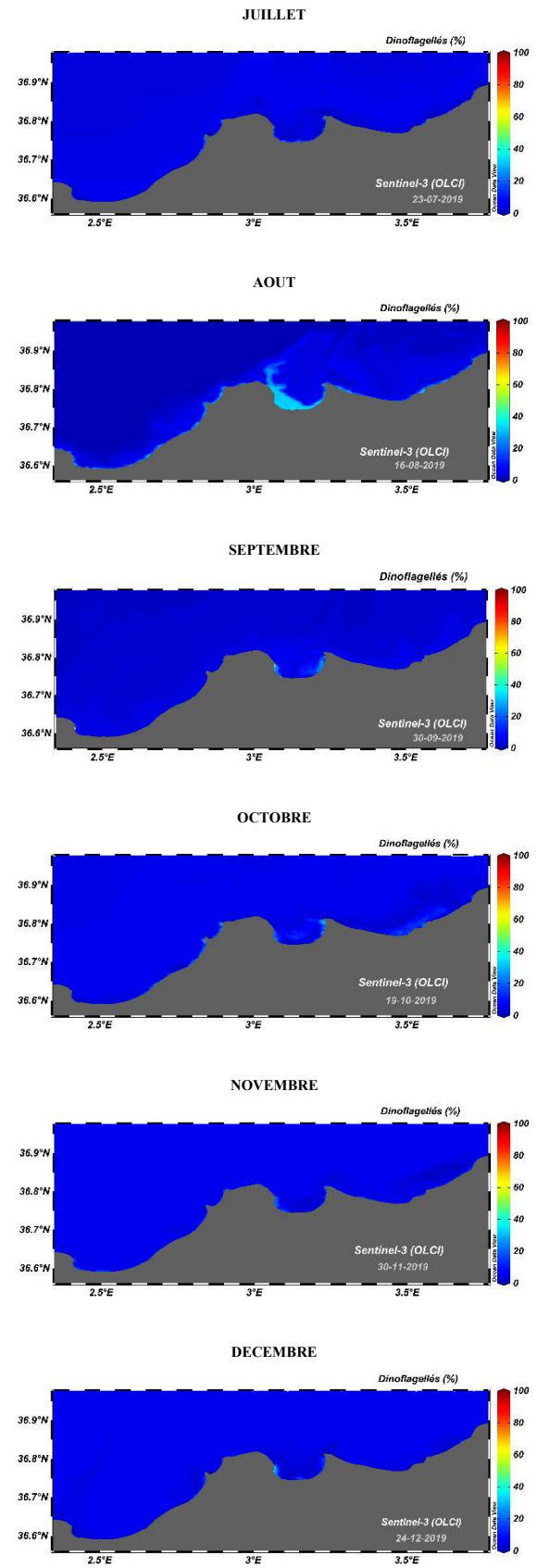
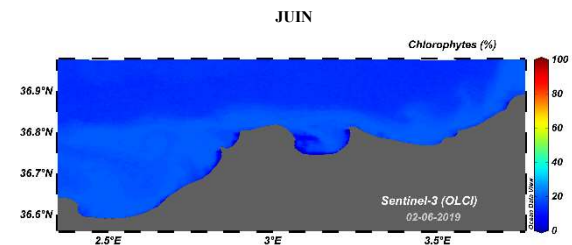
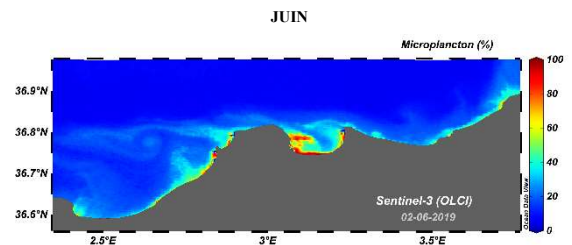
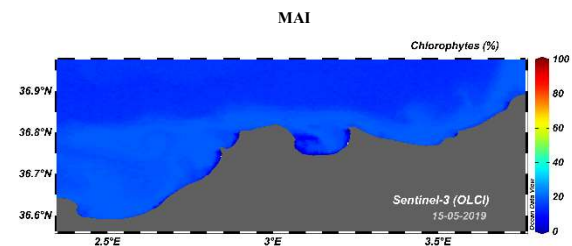
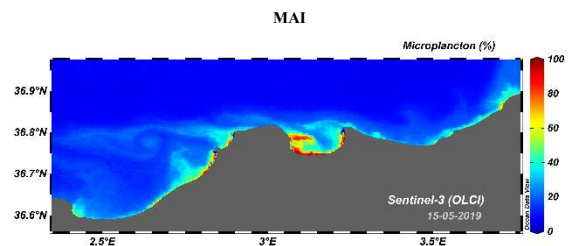
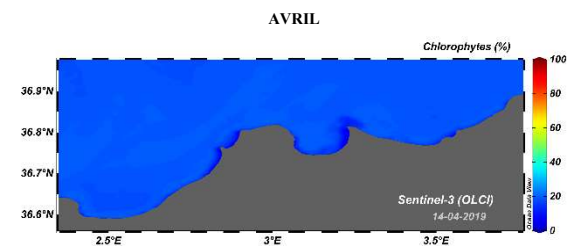
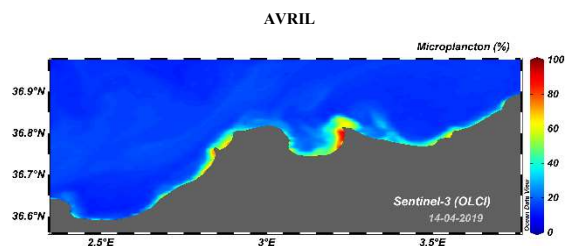
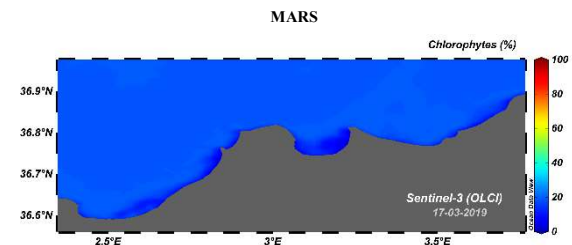
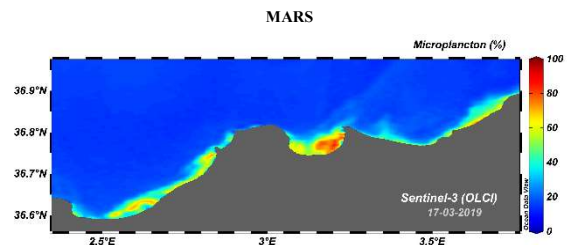
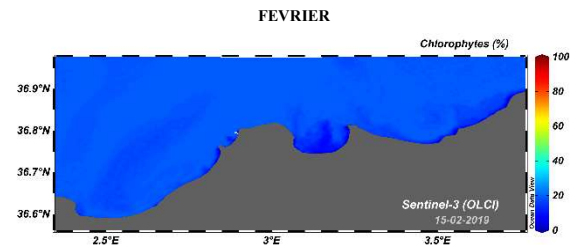
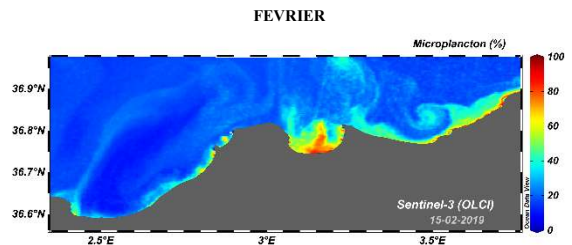
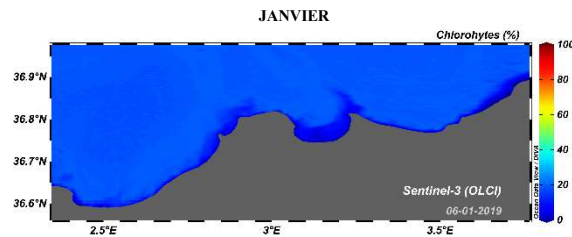
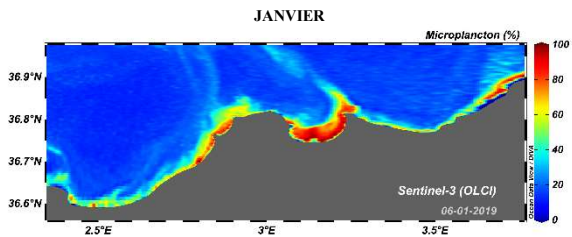


Figure 4.5. Distribution des Dinoflagellés dans le bassin Algérois (2019).



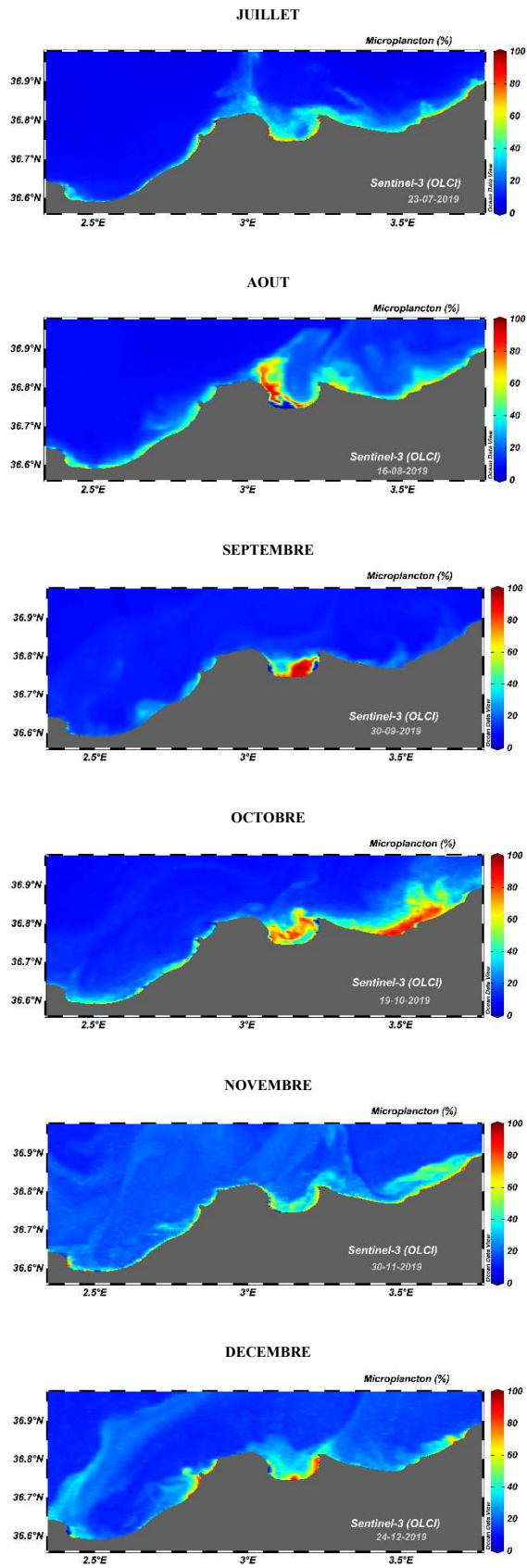


Figure 4.6. Distribution des Microplanctons dans le bassin Algérois (2019).

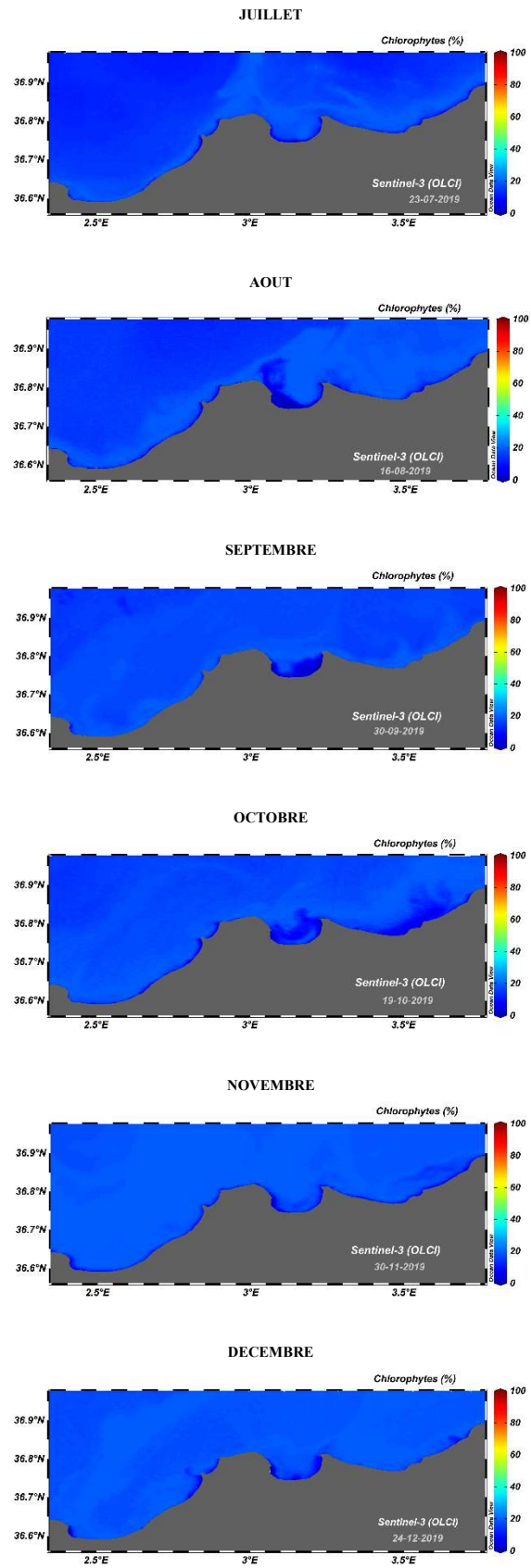
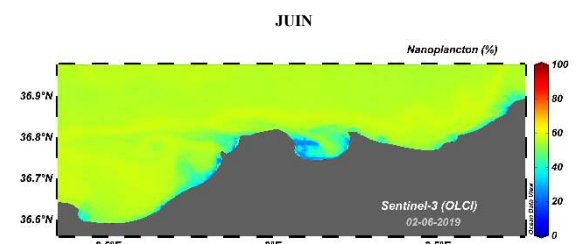
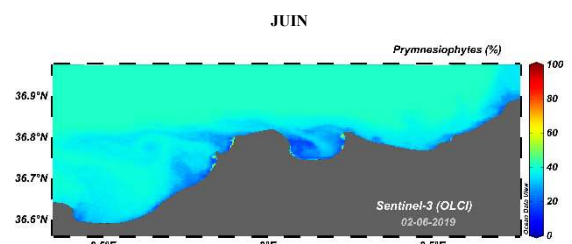
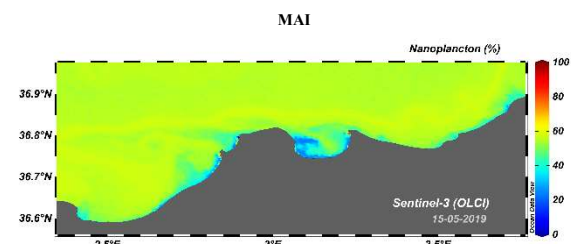
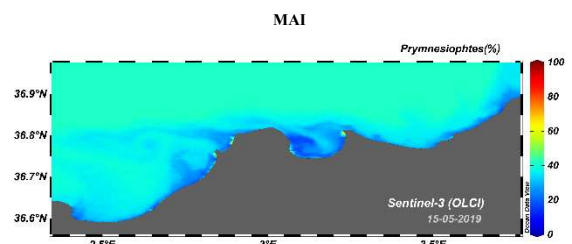
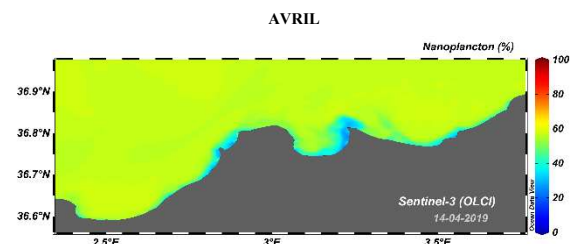
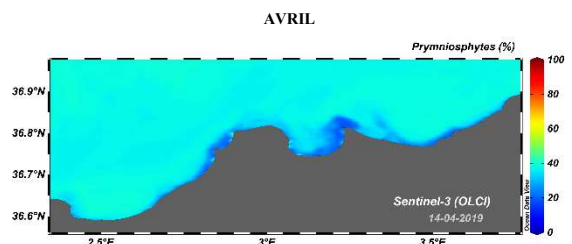
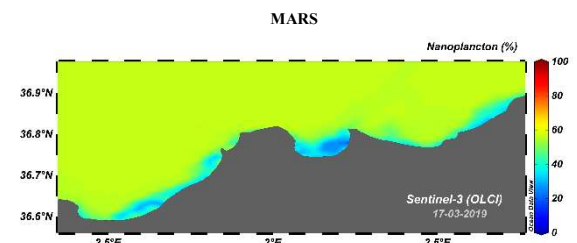
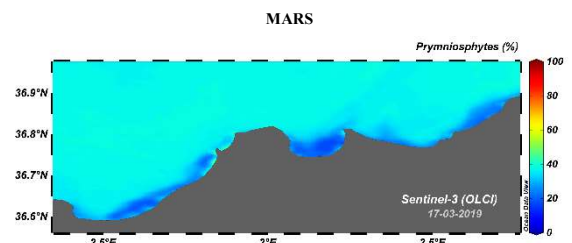
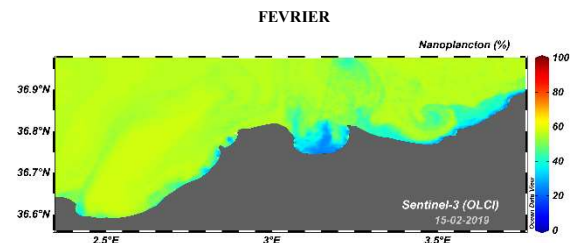
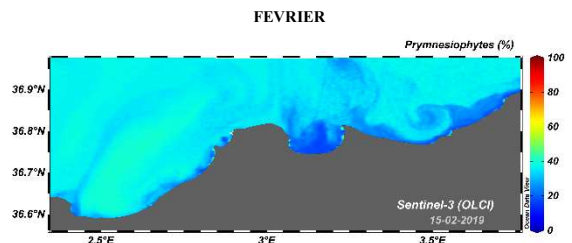
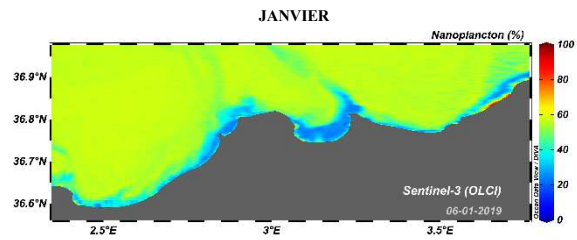
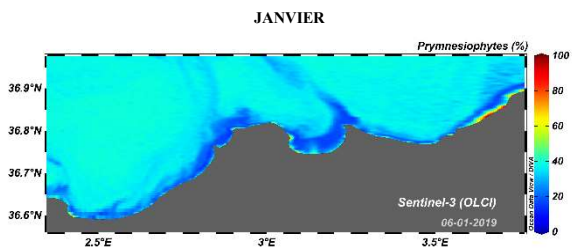


Figure 4.7. Distribution des Chlorophycées dans le bassin Algérois (2019).



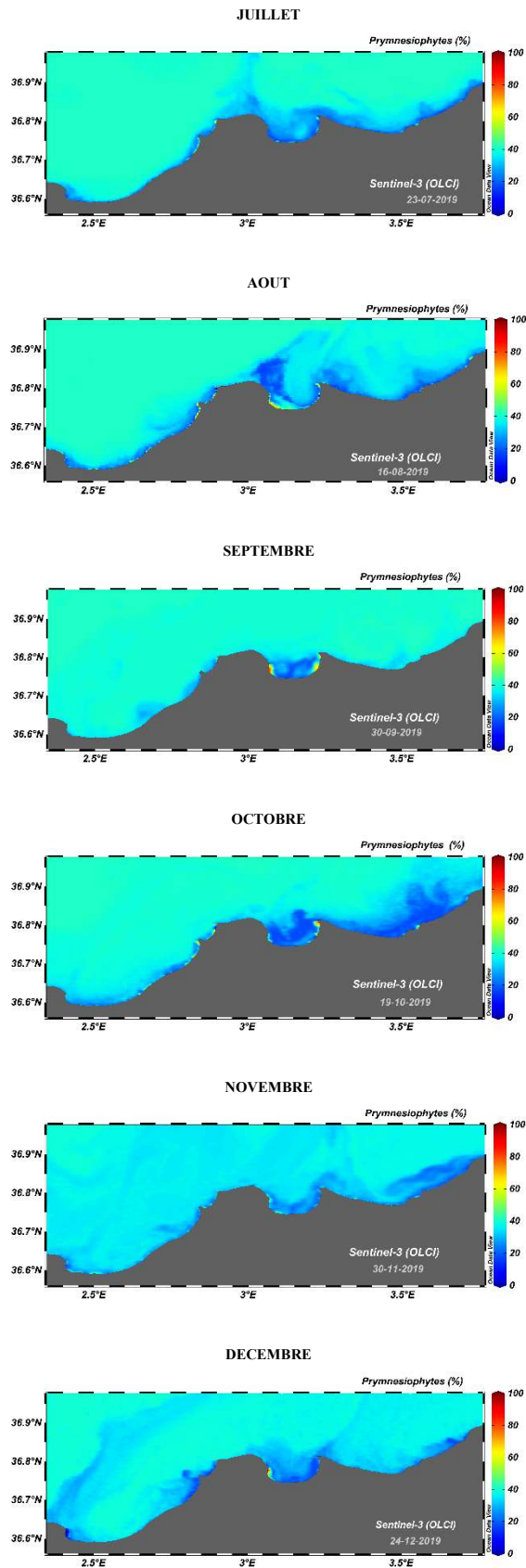


Figure 4.8. Distribution des Prymnesiophytes dans le bassin Algérois (2019).

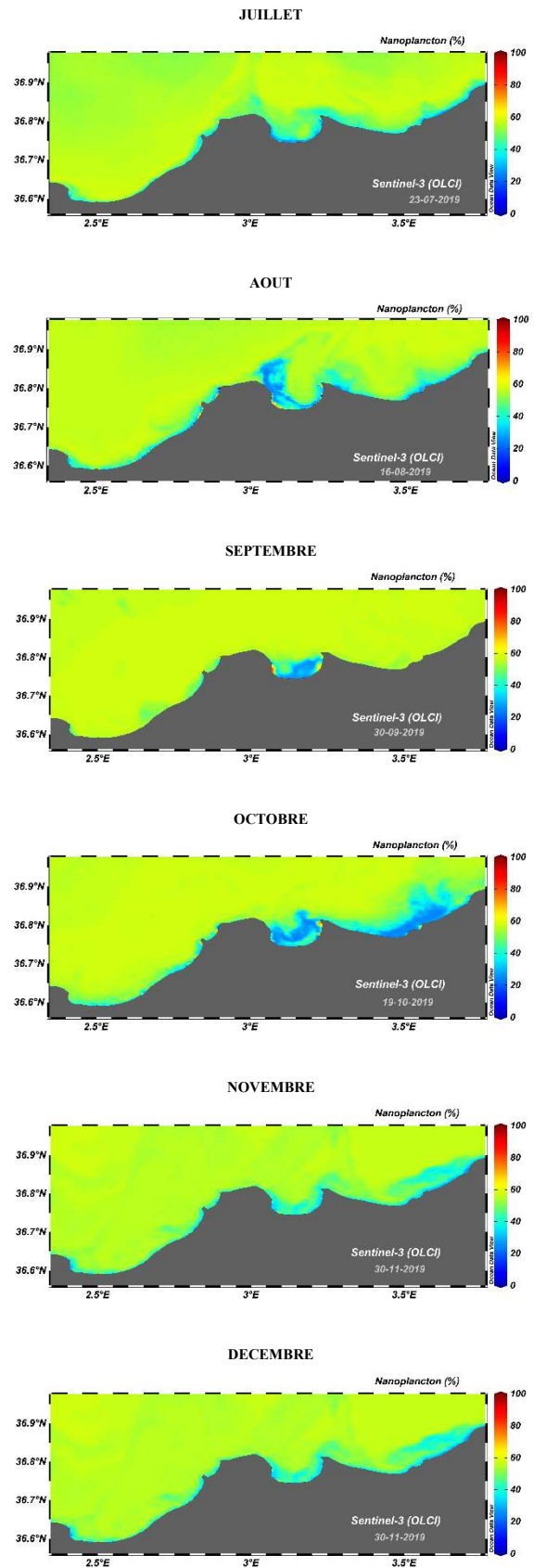
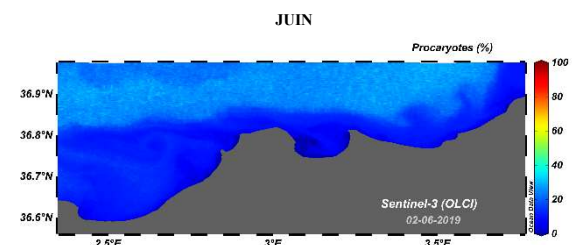
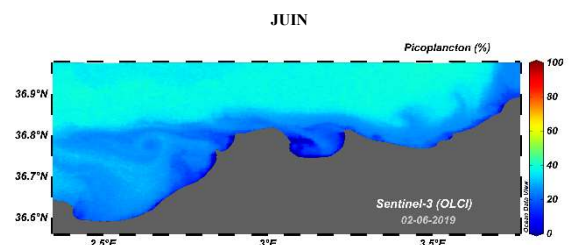
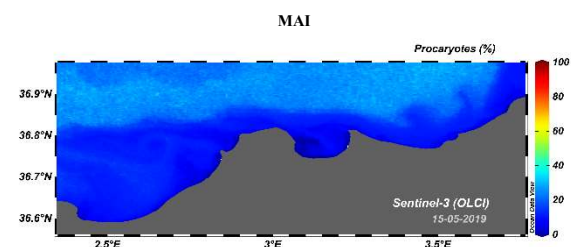
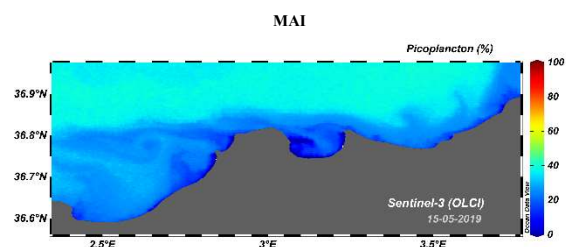
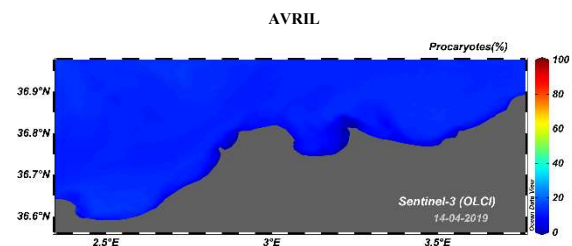
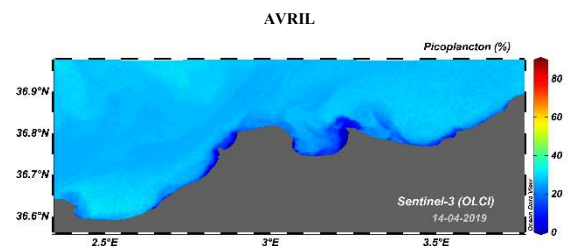
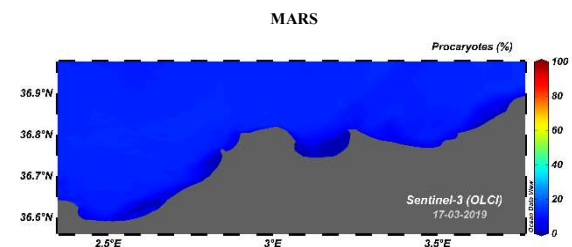
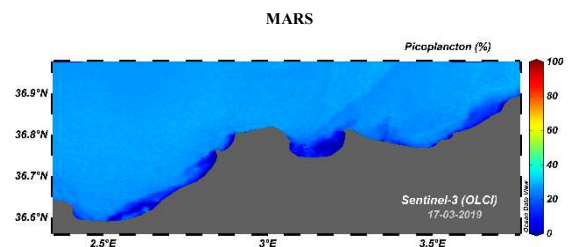
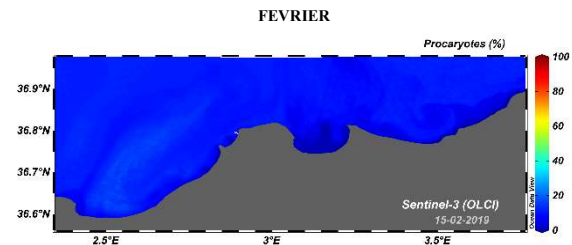
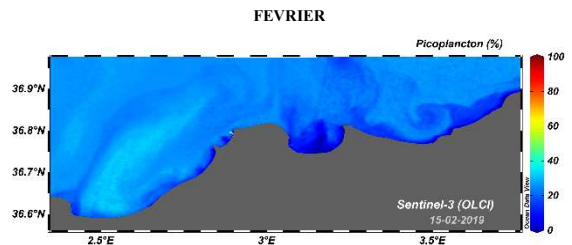
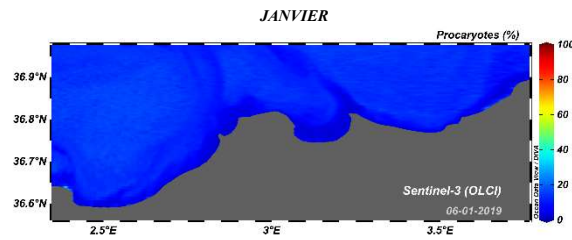
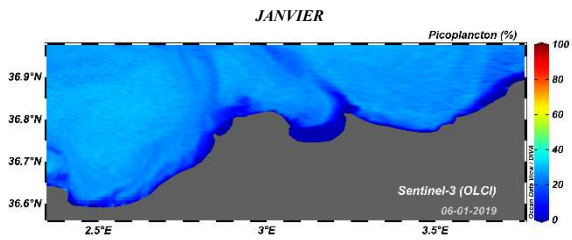


Figure 4.9. Distribution des Nanoplanktons dans le bassin Algérois (2019).



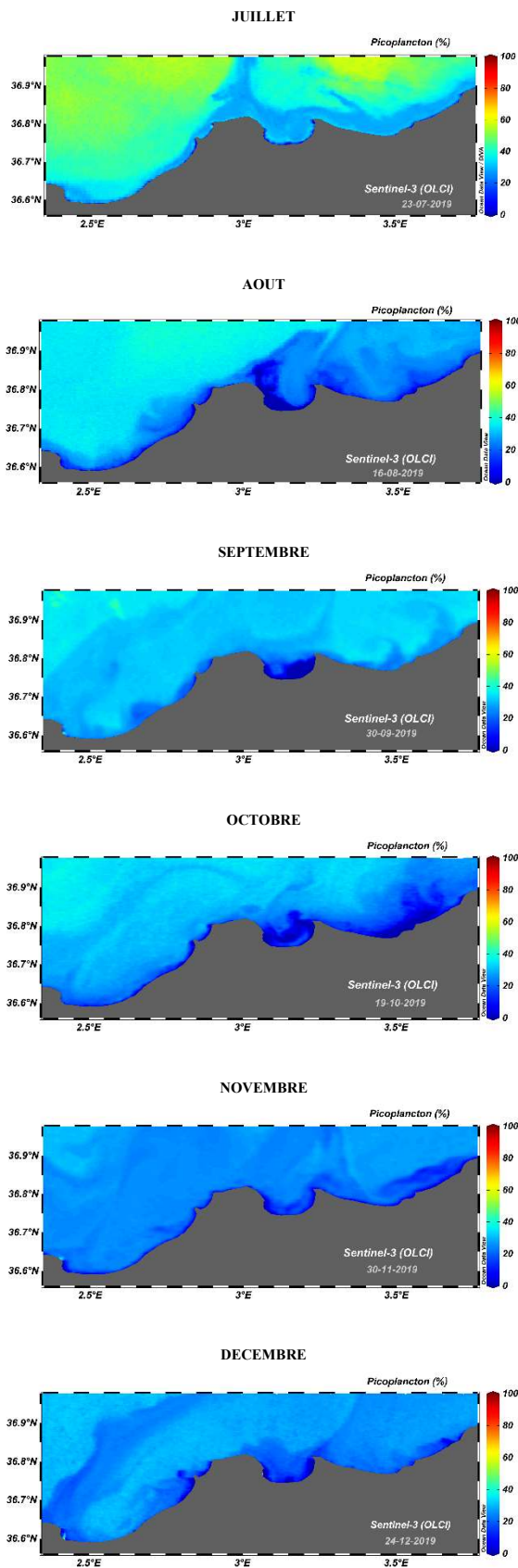


Figure 4.10. Distribution des Picoplanktons dans le bassin Algérois (2019).

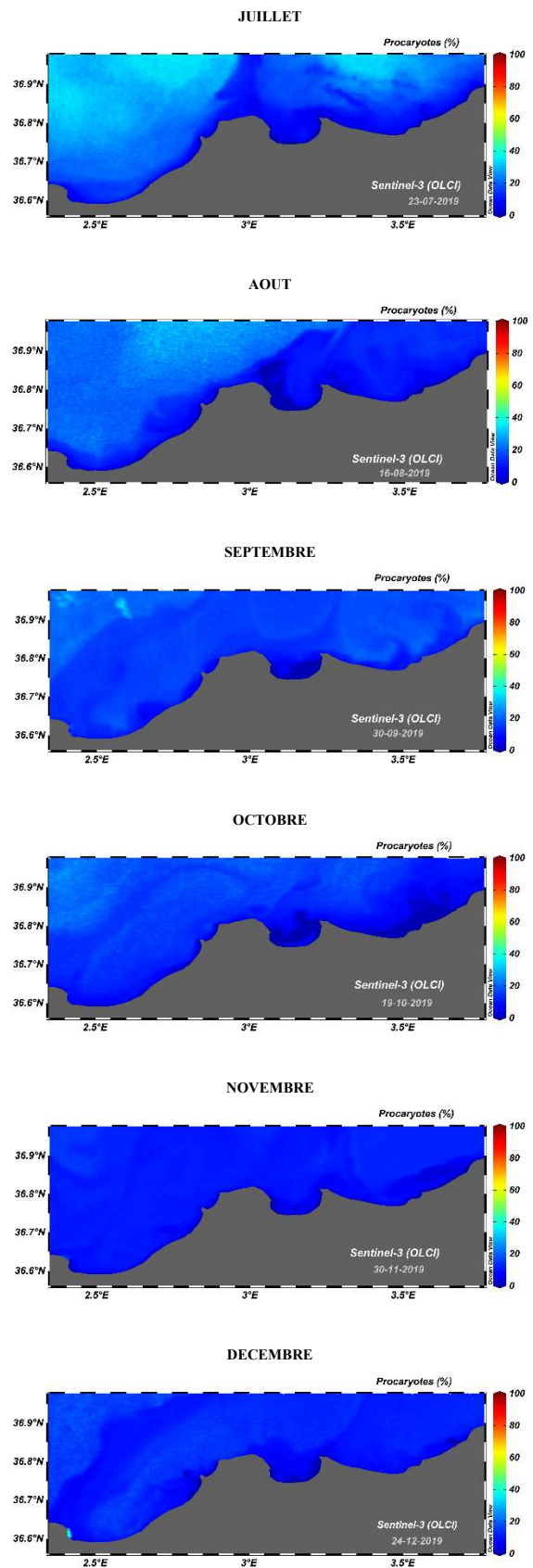


Figure 4.11. Distribution des Procaryotes dans le bassin Algérois (2019).

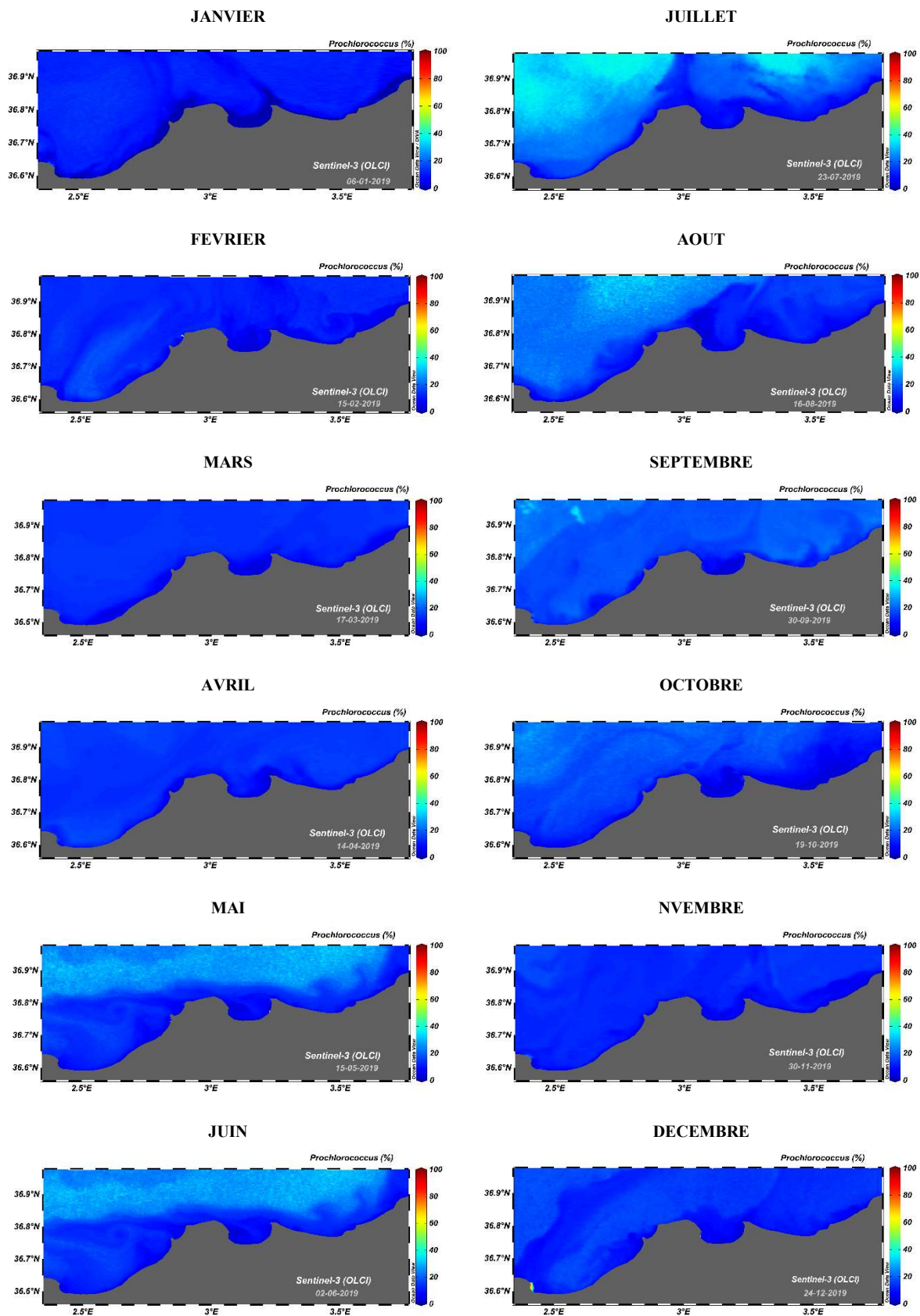


Figure 4.12. Distribution des *Prochlorococcus* dans le bassin Algérois (2019)

3.1 Nanoplancton

Le Nanoplancton a une distribution spatiale importante observée durant toute l'année. Cette classe contribue avec un pourcentage moyenné supérieur à 50% (Fig 4.13). Sa contribution maximale est enregistrée en Avril (56,32%) tandis que le pourcentage minimal est enregistré en Juillet (52.60%).

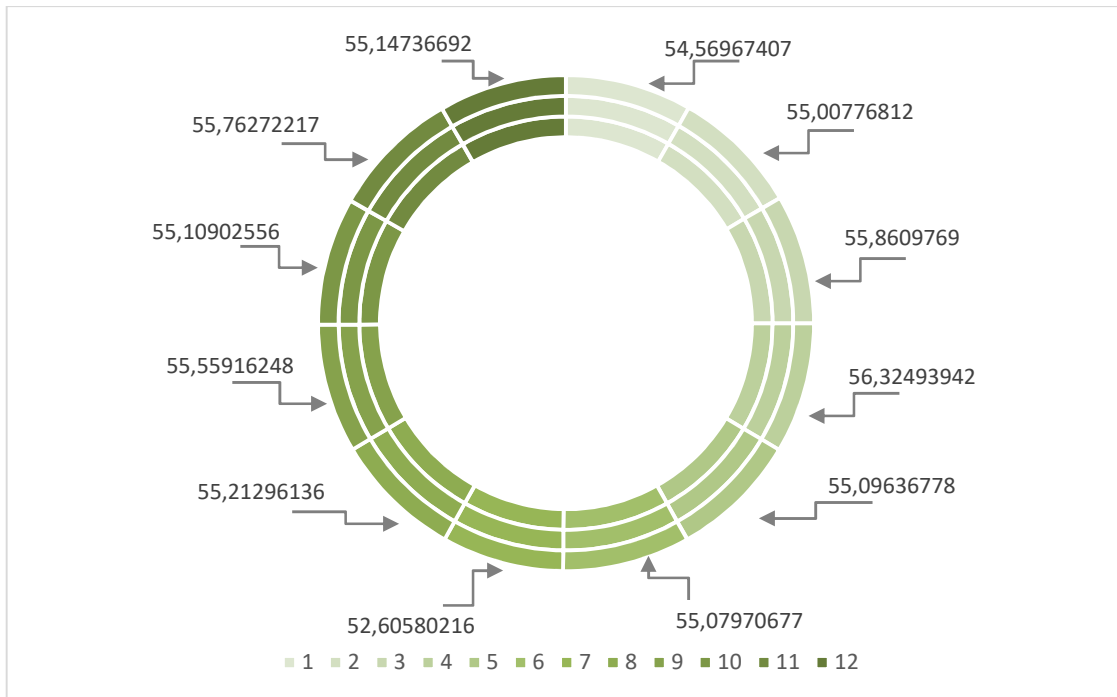


Figure 4.13. Contribution moyenne mensuelle du Nanoplancton (2019)

Pour cette étude ce groupe est divisé en deux classes, les Chlorophycées et les Prymnesiophytes. Sa contribution totale dans la population de la zone d'étude varie entre 40 % et 60%, elle augmente en allant vers le large pour tous les mois de l'année. Contrairement au Microplancton, le Nanoplancton est présent loin des embouchures des oueds et il est faiblement observable surtout dans la baie d'Alger.

Cette distribution revient principalement aux Prymnesiophytes qui interviennent avec plus de 60 % de la population tandis que les chlorophycées sont à moins de 35%. Leur présence commence à s'accroître du mois de Mai jusqu'à l'enregistrement d'un pic en Juillet puis elle redescend encore une fois.

3.2 Microplancton

Cette classe de taille est caractérisée par deux groupes taxonomiques, les Diatomées et les Dinoflagellés. D'après les résultats trouvés, nous observons que la distribution des Microplanctons suit parfaitement celle des Diatomées, de ce fait nous pouvons affirmer qu'elles

sont les responsables de ces floraisons le long de l’année avec un pourcentage qui dépasse les 75%, tandis que les Dinoflagellés sont à moins 20%.

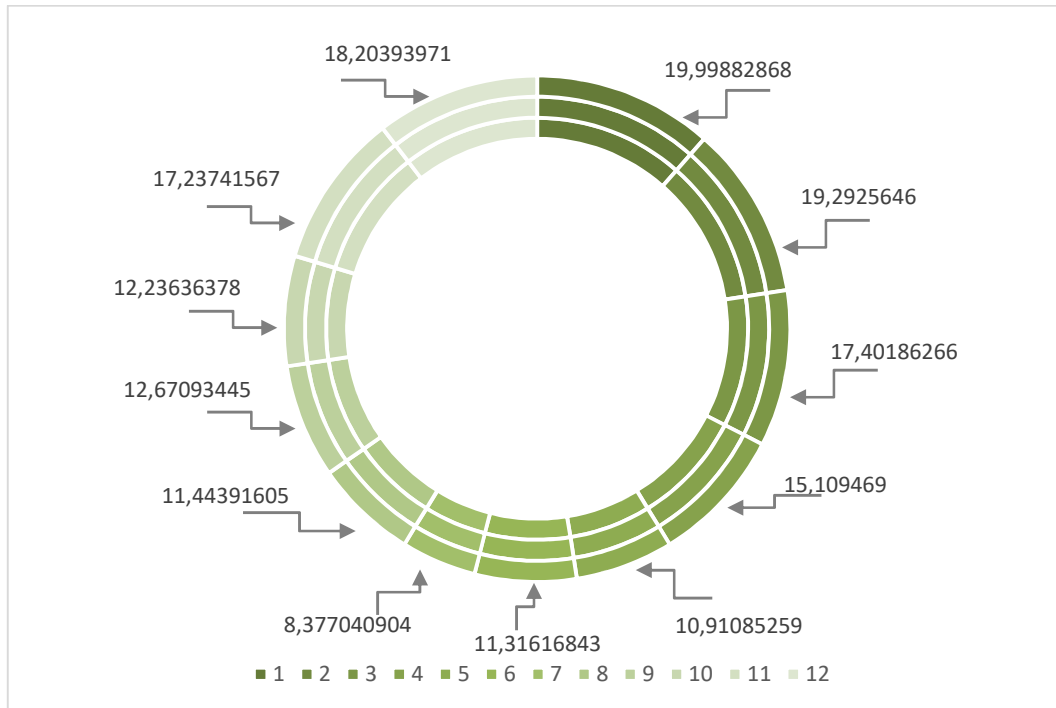


Figure 4.14. Contribution moyenne mensuelle du Microplancton (2019)

En moyenne pendant toute l’année 2019, la contribution du microplancton dans la diversité des phytoplanctons ne dépasse pas les 20 % (Fig 4.14), toutefois nous observons que cette classe phyto-planctonique est présente près des côtes principalement près des embouchures.

Plus de 80% des Microplanctons est présente le long des trois baie en Janvier, avec plus de 60% de Diatomées et moins de 20% de Dinoflagellés. Leur distribution diminue en allant vers le large et sont présents le long de la côte Algéroise du Mont Chenoua jusqu’au Cap Djinet. Il est remarquable qu’ils sont plus important dans la partie centrale de la baie d’Alger et la partie Est de la baie de Zemmouri et de la baie de Bousmail. Ce développement est dû peut être à la remontée des nutriments qui est provoqué par l’hydrodynamisme ou le phénomène de l’upwelling côtier ou bien dû aux apports terrigènes des oueds.

Cette distribution a diminué brusquement en Février dans l’Est de la baie de Bousmail et presque nulle entre Ras Acrata et la Pointe Pescade, mais leur présence a resté plus ou moins importante dans la partie Est de Zemmouri et le centre de la baie d’Alger avec plus de 40% de Diatomées. Un déplacement vers l’Ouest d’une masse Micro-planctonique plus précisément

des Diatomées suivent un courant marin tourbillonnaire est observé dans le centre et l'extrême Ouest de la baie de Zemmouri.

Un développement des Microplanctons (Plus de 50%) est survenu dans la baie de Bousmail en Mars, avec aussi plus de 60% présent dans le centre de la baie d'Alger et moins de 40 % dans l'Est de la baie de Zemmouri. Ce développement a diminué encore une fois dans tout le bassin en Avril, cette diminution est peut-être due à l'affaiblissement de l'énergie hydrodynamique.

Par rapport à Mai et juin pratiquement la même distribution est observée, nous avons un pourcentage important de 80% des Microplanctons représentés principalement par les Diatomées dans la partie Est de Zemmouri, d'El Djamila ainsi que dans le centre et la partie Ouest d'Alger avec une distribution spatiale rétrécie. Un déplacement des masses Microplanctoniques vers l'Est suivant le courant est aussi remarqué.

Nous avons observé aussi un rétrécissement de la surface couverte par les Microplanctons avec moins de 45% en Juillet, avec quelques spots où il est à 80%. Une accentuation de cette classe dans la partie Ouest de la baie d'Alger avec plus de 70% est remarquée.

En Septembre, une floraison est apparue clairement dans le centre de la baie d'Alger tandis que pour le reste de la zone d'étude, le pourcentage ne dépasse pas les 30%.

Le mois d'Octobre a connu deux blooms de diatomées, un qui couvre pratiquement toute la baie d'Alger et l'autre qui s'étend sur une surface importante de la partie centrale de la baie de Zemmouri. Les diatomées représentent ainsi pratiquement 80% de la population phyto-planctonique. Ces floraisons sont clairement diminuées sur toute la zone d'étude dans les deux derniers mois. La masse Micro-planctonique qui reste est transportée par la dérive vers l'Ouest.

Nous remarquons sur nos cartes que les spots où les Diatomées sont importantes généralement, les Dinoflagellés tend à s'annuler.

3.3 Pico-plancton

Le Pico-plancton présente une distribution plus ou moins similaire à celle du Nanoplancton mais avec un pourcentage moins important. Nous observons qu'il est faible voire nulle près des côtes et des embouchures et augmente en allant vers le large, il contribue en moyenne avec plus de 30 % durant toute l'année (Fig 4.15). Il augmente jusqu'à juillet où il est à presque 40% puis il commence à diminuer encore une fois.

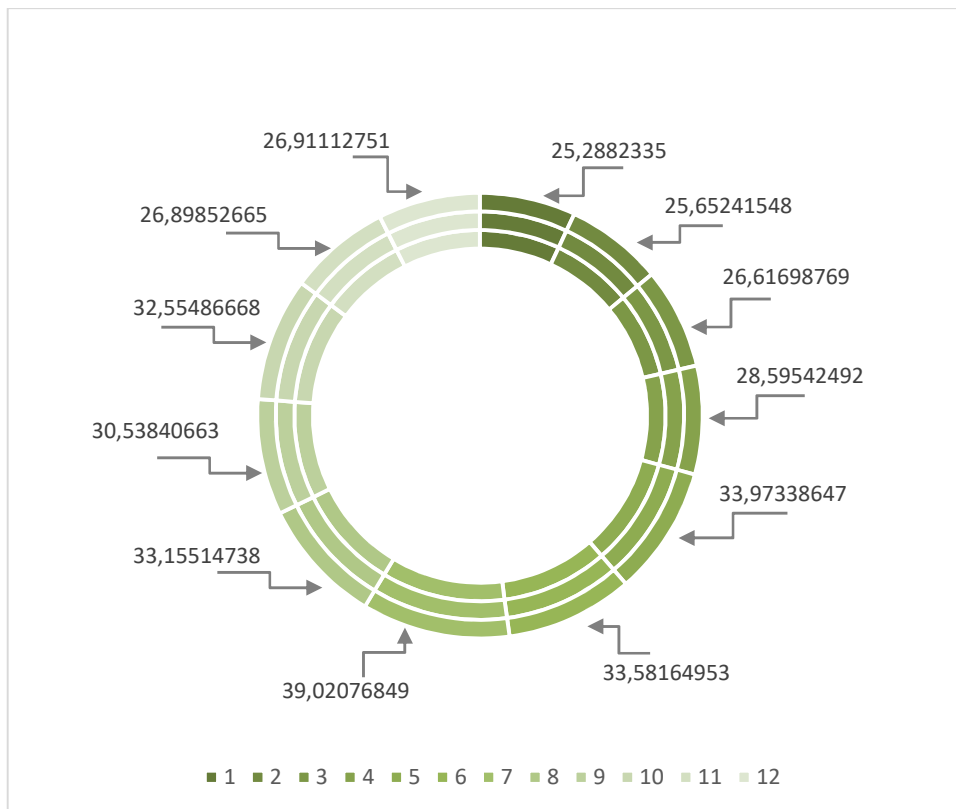


Figure 4.15. Contribution moyenne mensuelle du Picoplancton (2019)

D'après les résultats, cette classe est caractérisée par deux groupes qui contribuent en moyenne par environ 45% à 50 % chacun, nous parlons donc des procaryotes et des prochlorococcus respectivement. Les procaryotes possèdent une répartition spatiale plus ou moins stable durant toute l'année et le long de la zone d'étude, avec un pourcentage maximal est enregistré en mois juillet qui dépasse pas les 40% dans le large de la zone d'étude.

Cependant pour les prochlorococcus, les quatre premiers mois de l'année, nous avons pu observer que ce genre est plus ou moins faible dans la zone d'étude, il ne dépasse pas les 30%. Une augmentation marque le mois de mai, le pico-plancton est reparti sur la majorité de la surface d'étude. Cette répartition est maintenue jusqu'au mois de Juillet. Près des côtes ce genre ne dépasse pas les 15% voire 10%.

4. Variabilité du cycle annuel de la Chl-a dans le bassin Algérois (année 2019)

Connaitre la distribution de la chlorophylle permet de suivre la productivité d'un milieu. D'après les résultats obtenues, nous avons constaté que dans le bassin Algérois la chlorophylle possède une variation annuelle remarquable ce qui est aussi prouvé par le suivi des groupes phyto-planctoniques dans cette zone.

Le graphe suivant représente la variation de la concentration moyenne mensuelle de la Chlorophylle.

En moyenne la concentration diminue du Janvier à Février de 0.85 à 0.49 mg/m³ puis elle ré-augment faiblement en Mars jusqu'à 0.54 mg/m³. Elle commence à diminuer encore une fois jusqu'à juillet pour qu'elle atteigne 0.26 mg/m³. Un petit pic anormal est enregistré en Août avec 0.48 mg/m³, qui peut être dû aux activités touristiques. Ce pic est suivi d'une diminution jusqu'à 0.2 mg/m³, minimum enregistré en Septembre. Une augmentation est ainsi observée de septembre à décembre avec une concentration qui ne dépasse pas les 0.6 mg/m³. Cette distribution est clairement visualisée sur les cartes de la chlorophylle obtenues. Les pics hivernaux sont dus généralement à la remontée des sédiments ainsi qu'à l'apport fluviaux, qu'à l'lessivage terrestre provoqué par la pluie, donc l'alimentation des côtes par les nutriments.

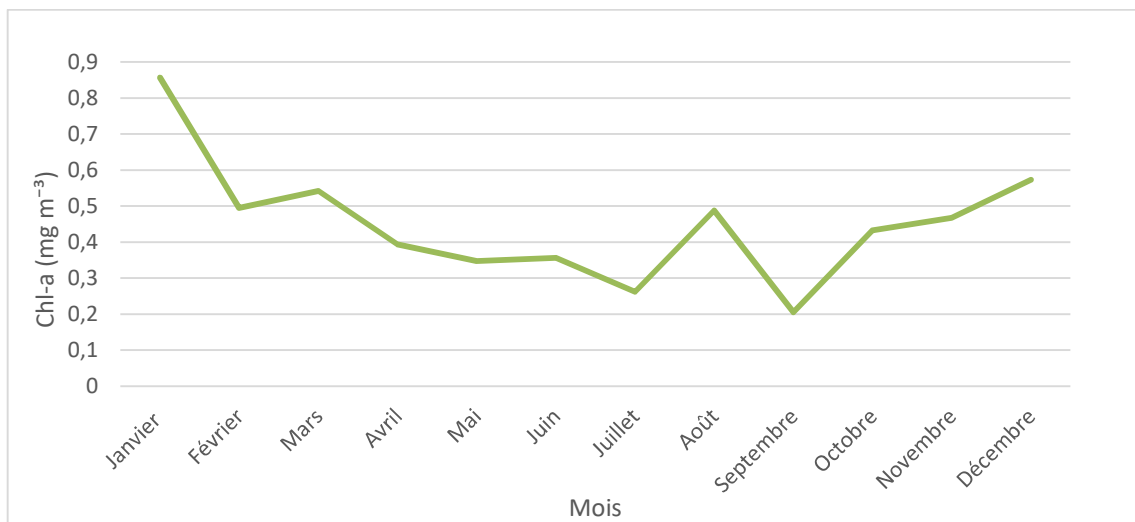


Figure 4.16. *Variation de la concentration de Chlorophylle Moyennes mensuelles (2019)*

D'abord, nous avons pu observer que la concentration de la chlorophylle est généralement décroissante en allant vers le large et elle est importante près des côtes et des oueds, ce qui est évident car généralement la majorité du phytoplancton existant dans notre zone d'étude, préfère les eaux riches en nutriments.

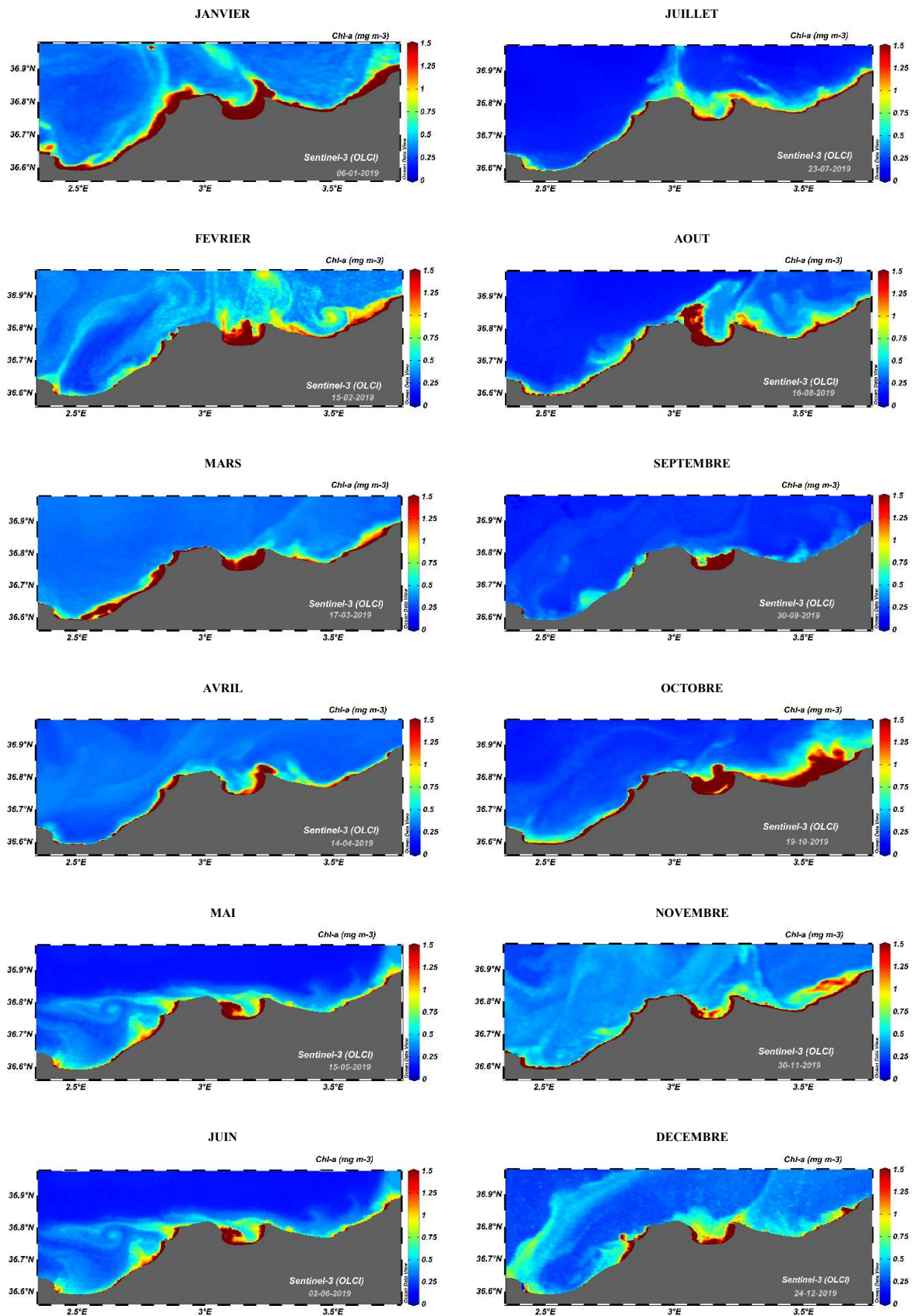


Figure 4.17. Concentration de la Chl-*a* dans le bassin Algérois (2019)

En janvier, nous avons observé que la concentration de la chlorophylle est répartie le long de la côte algéroise et forme une bande plus ou moins importante qui suit généralement la forme que prend la distribution des Microplanctons, elle dépasse les 1.5 mg/m^3 . Cette distribution a nettement rétréci en février mais deux masses importantes sont clairement observées avec une concentration supérieure à 1 mg/m^3 , une qui couvre la majorité de la baie d'Alger et une autre qui s'étend le long de la baie de Zemmouri. Un déplacement remarquable aussi apparaît qui suit parfaitement le courant.

Pour le mois de Mars par contre, une masse apparaît dans la baie de Bousmail qui couvre aussi une surface importante où la concentration de la chl-a est importante près du Mazafran, Oued Beni Messous ainsi que dans toute la baie d'Alger, nous remarquons aussi une bande chlorophyllienne rétrécie sur toute la baie de Zemmouri où la concentration varie entre 0.75 et 1.5 mg/m^3 .

La concentration de la chlorophylle est très importante supérieure à 1.25 mg/m^3 près du Cap Matifou et de l'Oued El Hamiz dans la baie d'Alger, près du Mazafran et Beni Messous dans la baie de Bousmail pour le mois d'Avril. Dans la baie de Zemmouri par contre, seulement quelques spots sont observés près de l'Oued Zemmouri et du Cap Djinet où la concentration varie entre 0.75 et 1.25 mg/m^3 .

Une distribution identique pour le mois de Mai et juin qui à son tour est similaire à celle des Microplanctons, avec une concentration supérieure à 0.5 mg/m^3 , nous remarquons clairement le déplacement des masses d'eaux riches en chlorophylle. La concentration est très importante dans la partie Ouest de la baie d'Alger ainsi que l'Est de la baie de Bousmail.

La chlorophylle en juillet représente une distribution spatiale importante au niveau de la baie d'Alger avec une concentration qui dépasse les 0.75 mg/m^3 . Cette concentration va s'accroître en Août dû à l'accumulation du phytoplancton du côté de la Pointe Pescade. Elle est aussi importante sur tout le linéaire côtier de la baie de Zemmouri.

Pour le mois de Septembre la masse phyto-planctonique va être déposée presque entièrement au niveau de la baie d'Alger ce qui implique la distribution de la concentration de la chl-a qui est égale ou supérieure à 1.5 mg/m^3 au niveau de cette baie. La concentration reste plus ou moins faible au niveau de la baie de Bousmail et la baie de Zemmouri, sauf près des embouchures où elle ne dépasse pas les 0.6 mg/m^3 .

Une concentration très importante est observable en Novembre, tout au long de la côte du bassin Algérois mais qui est plus importante sur presque toute la surface de la baie d'Alger et de la

baie de Zemmouri. Cette distribution revient principalement à des blooms phyto-planctoniques plus précisément des floraisons de Diatomées.

La distribution a diminué en épaisseur dans le mois de Novembre pour former ainsi cette sorte de ceinture le long du linéaire côtier, avec des concentrations maximales enregistrées à l'Est de la baie d'Alger, L'Ouest de la baie de Bousmail et dans la région de Zemmouri dans la baie de Zemmouri. Cette diminution est due à la disparition du Bloom enregistré en Octobre.

La concentration en Décembre suit le déplacement des phytoplanctons, qui est supérieure ou égale à 0.5 mg/m^3 . Elle plus importante près du Cap Djinet, dans la partie Est de la baie de Bousmail et toute la côte de la baie d'Alger.

Nous pouvons finalement dire que la concentration de la chlorophylle est importante sur toute la baie d'Alger, elle est présente en hautes concentrations près des embouchures et elle est variable sur la baie de Bousmail et Zemmouri.

5. Signatures spectrales des eaux du bassin Algérien

Les graphes ci-dessous représentent les réflectances moyennes de trois points prélevés au large de chaque baie de notre zone d'étude pour minimiser l'effet des matières en suspensions en fonction des longueurs d'ondes où fonctionne le capteur OLCI du Sentinel-3. Les réponses spectrales sont ainsi élaborées pour chaque mois de l'année.

La différence entre les constituants des eaux des trois baies, les facteurs climatiques ainsi que la distribution des groupes phyto-planctoniques a fait que, les signatures spectrales varient dans le temps et dans l'espace, en formes et en magnitudes. Il est important aussi de noter que les fortes réflectances enregistrées aux bleus correspondent aux faibles concentrations de la chlorophylle.

Les pics de réflectances sont observés entre 400 et 530 nm pour tous les mois de l'année. La valeur maximale est enregistrée en juin pour les trois baies qui correspond à la partie 435- 490 nm du spectre électromagnétique, un petit pic très peu observé est présent aussi à 680 nm. Toutefois les valeurs minimales sont observées en octobre entre 455 et 480 nm, où la valeur n'a pas dépassé 0.003.

Une différence importante est observée aussi dans la valeur de la réflectance du mois d'Avril pour les trois baies, où elle est à 0.0084 pour Bousmail tandis qu'elle ne dépasse pas 0.007 pour Alger et Zemmouri. Toutefois ce pic correspond à 490 nm pour toutes les stations.

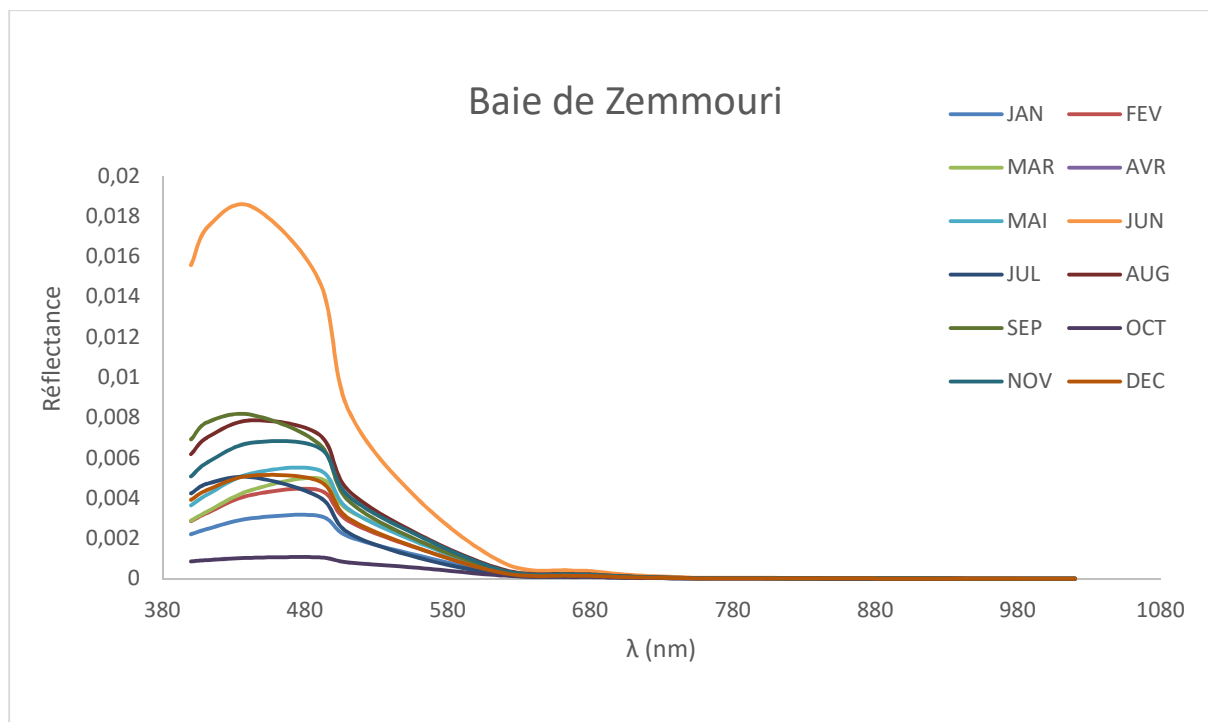


Figure 4.18. Réponses spectrales dans la baie de Zemmouri (2019)

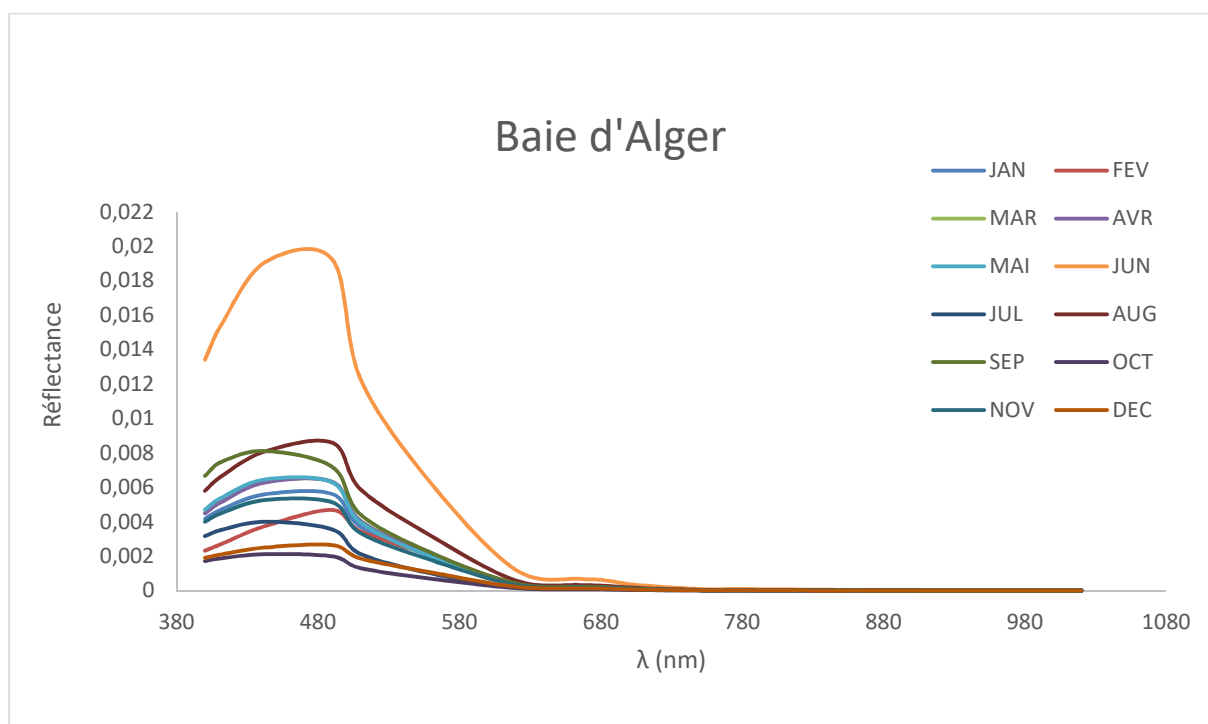


Figure 4.19. Réponses spectrales dans la baie d'Alger (2019)

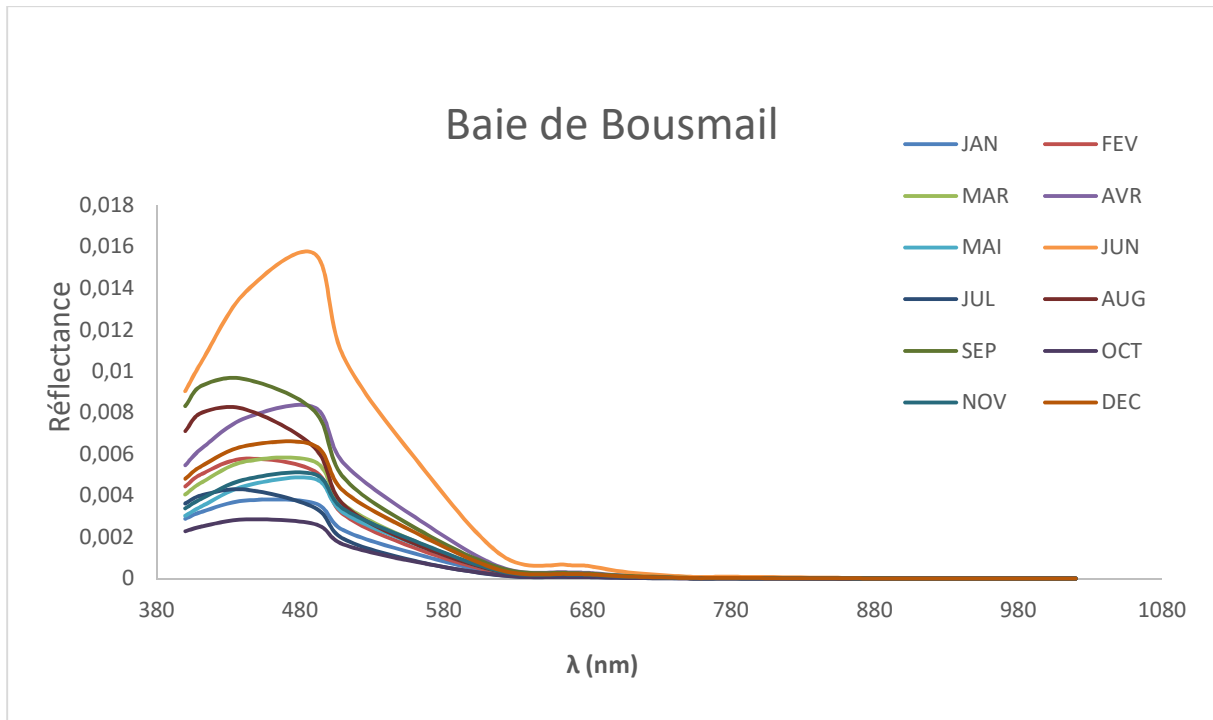
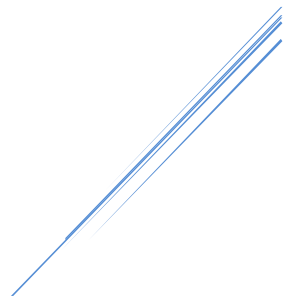


Figure 4.20. Réponses spectrales dans la baie de Bousmail (2019)

Conclusion



Conclusion

Cette étude a pour but, la modélisation des paramètres biologiques ainsi que le phytoplancton dans le bassin Algérois en utilisant des images satellitaires, pour pouvoir ensuite suivre leur développement et leur productivité dans cette région.

La première partie consiste à élaborer une comparaison de performance entre quatre capteurs (MODIS, MSI, OLI, OLCI) issue de quatre satellites pour ensuite extraire le meilleur, en termes de résolutions (Spatiale et spectrale) et de couverture temporelle.

Le Model C2RCC a été appliqué pour les images (niveau 1) du 24 février 2020 issues de MSI, OLI et OLCI, pour extraire les réflectances au niveau de chaque bande spectrale et aussi pour estimer la concentration de la chlorophylle afin de créer des cartes de comparaison. Il s'est avéré que le capteur OLCI de Sentinel-3 a une meilleure performance dans la télédétection de la couleur de l'océan avec une configuration spectrale qui est conçu spécialement pour la détection des très faibles variations, il a ainsi une résolution spatiale de 300 m qui permet plus ou moins de cartographier les petites masses d'eau.

La deuxième partie, dédiée à l'extraction des signatures spectrales et à la conception du cycle annuel pour :

- Les différents groupes phyto-planctoniques. Pour ce faire des algorithmes empiriques proposé par (Hirata et al., 2011) ont été appliquer sur des images provenant de sentinel-3 acquises pendant toute l'année 2019.
- La chlorophylle : la chlorophylle estimée par l'algorithme OC6 pour concevoir des cartes de distribution de sa concentration sur toute la zone d'étude.

Nous pouvons premièrement déduire que pour les capteurs qui existent aujourd'hui pour la télédétection de la couleur de l'océan, OLCI est le meilleur malgré que sa résolution spatiale reste plus ou moins grande. MODIS peut être aussi utilisé, il a une couverture depuis 2002 convenable surtout pour la conception des variations interannuelles, mais il est préférable pour les grandes étendues. Les produits de MSI et OLI peuvent être aussi exploité mais leur performance reste limitée dans ce domaine. Certes, les modèles bio-optiques sont très bien appliqué et ont données de bonne résultats, mais ils sont basés sur des approches qui ne sont pas forcément adapté à notre région. Ces modèles donnent seulement une estimation des variations des éléments ce qui n'est pas nécessairement juste ou fiable. Il faut aussi étudier

d'autres paramètres pour connaître mieux la relation entre le milieu et ces constituants et entre le phytoplancton et les constituants du milieu.

La télédétection représente un outil très efficace en termes de temps et de cout, plusieurs plateformes aujourd'hui offrent des images à très haute résolution et presque en temps réel avec leurs logiciels adaptés pour les différents traitements (Correction géométrique, correction atmosphériques, classification ...). Plusieurs algorithmes sont aussi proposés facilitant ainsi l'échantillonnage du phytoplancton par voie satellitaire.

Nous pouvons dire que la télédétection de la couleur de l'océan est un domaine qui est un peu négligé en Algérie. Les scientifiques généralement s'intéressent à d'autre application alors que dans la science il y a toujours une relation entre les disciplines.

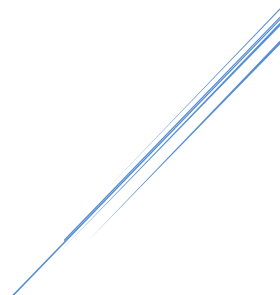
Les résultats de cette étude ont montré que chaque groupe ou classe phyto-planctonique possède une contribution différente dans la population totale, parfois une même distribution est observée mais à différentes proportions.

Le microplancton présente une variation annuelle importante. Il se trouve généralement dans les eaux près des côtes et des embouchures où les concentrations des nutriments sont élevées. Ce groupe est constitué des diatomées et des dinoflagellés, mais les diatomées sont les plus importants contributeurs dans un bloom Micro-planctonique.

Le bloom du nanoplancton est caractérisé principalement par la présence des Prymnesiophytes. Généralement les nanoplanctons observés sont présent à des faibles masses près des côtes et sont largement répandue en allant vers le large. Le pico-plancton possède une distribution spatiale plus ou moins similaire à celle du nano mais avec moins de contribution où on en observe à peine près des côtes et plus loin des côtes.

En moyenne La distribution de la chlorophylle suit parfaitement celle de l'ensemble des groupes phyto-planctoniques le long de l'année. Les réponses spectrales aussi varient en fonction des constituants de l'eau, des facteurs climatiques ainsi que de la distribution des groupes phyto-planctoniques.

Références



Références bibliographiques

Al Sid Chikh, S., Belkessa, R., Houma F., Amrouche, L.(2009). *Diagnostic du littoral ouest algérois pour une gestion intégrée*; The 5th International Symposium on Sandy beaches, which will be held in Rabat, Morocco 19-23 October 2009.

Aminot, A., & Chaussepied, M. (1983). *Manuel des analyses chimiques en milieu marin Centre national pour l'exploitation des océans*. Brest. ISBN, 2 (902721.10), 2.

Antoine, D. (1998). *Apports de la télédétection spatiale de la «couleur de l'océan» à l'océanographie*. Océanie, 24(2), 81–150.

Bachari N.E.I., 1999. *Méthodologie d'analyse des données satellitaires en utilisant des données multi-sources*. Thèse de Doctorat d'état en Physique; Rayonnement-Matière, 11 avril 1999 , Oran USTO, Algérie.222p.

Bachari, N.E.I., Belkessa, R., Houma, F. (2004).*Contribution of multispectral satellite imagery to the bathymetric analysis of coastal sea bottom*. MWWD-IEMES 3rd.

Bachouch, S., (2017). *Modélisation hydrodynamique et qualité des eaux et sédiments de la côte centre Algérienne*. Thèse en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat d'état en pollution et environnement marin; ENSSMAL.

Belkessa, R., (1999). *Causes et conséquences de l'érosion marine sur la côte Algérienne*. Revue symbiose. Alger.

Benharkou, R. (2017). *Estimation des flux terre-mer de la matière en suspension dans la Baie de Bou Ismail : Application des algorithmes de la couleur de la mer*. Mémoire De Fin D'études En Vue De L'obtention Du Diplôme d'Ingénieur En Sciences De La Mer. ENSSMAL.

Benoit, R. (2001). *Origines des propriétés thermo-radiatives d'oxydes noirs-Optimisation d'un émetteur infrarouge*. Thèse en vue de l'obtention du grade docteur à l'université d'Orléans.

Bérard-Therriault, L., Poulin, M., & Bossé, L. (1999). *Guide d'identification du phytoplancton marin de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent : Incluant également certains protozoaires*. NRC Research Press.

Boudjenah, M. (2019). *Diversity of Phytoplanktonic populations along the Algerian coastline* [PhD Thesis]. Edizioni Danaus.

Boufeniza, R., Alsahli, M., Bachari, N. E. I., & Bachari, F. (2020). *Spatio-temporal quantification and distribution of diatoms and dinoflagellates associated with algal blooms and*

Références Bibliographiques

human activities in Algiers Bay (Algeria) using Landsat-8 satellite imagery. Regional Studies in Marine Science, 101311. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101311>

Boufeniza, R., Houma, F., Alsahli, M., & Bachari, N. E. I. (2019). *Quantification of Phytoplanktonic Algae Density in Algiers Bay (Algeria) by Combining In Situ Measurements and Landsat Satellite Images : IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development* (p. 329-332). https://doi.org/10.1007/978-3-030-01440-7_73

Boufeniza, R., Houma, F., Alsahli, M., Bachari, N. E. I., Chekroun, N., Boudjema, S., & Benm'barek, G. (2018). *Estimation of Dinoflagellate and Diatoms Algae in Algiers Bay from Landsat Satellite Data* (p. 1795-1796). https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4_520

Bougis, P. (1974). *Écologie du plancton marin : Tome I: Le phytoplancton*. Masson et Cie.

Brewin, R. J., Hardman-Mountford, N. J., Lavender, S. J., Raitsos, D. E., Hirata, T., Uitz, J., Devred, E., Bricaud, A., Ciotti, A., Gentili, B. (2011). *An intercomparison of bio-optical techniques for detecting dominant phytoplankton size class from satellite remote sensing. Remote Sensing of Environment*, 115(2), 325–339.

Couté, A., Bernard, C. (2001). *Les cyanobactéries toxiques. Toxines d'algues dans l'alimentation*. Ed. Ifremer. Paris, 89–108.

Djemaoun, L. Fernani, A. (2019). *Contribution à l'étude du phytoplancton toxique et/ou nuisible au niveau d'une ferme conchylicole : Cas de la ferme « Orcamarine » (Aïn-Taya). Mémoire De Fin D'études En Vue De L'obtention Du Diplôme d'Ingénieur En Sciences De La Mer. ENSSMAL.*

Feldman, G., Kuring, N., Ng, C., Esaias, W., McClain, C., Elrod, J., Maynard, N., Endres, D., Evans, R., Brown, J. (1989). *Ocean color : Availability of the global data set. Eos, Transactions American Geophysical Union*. 70(23), 634–641.

Gordon, H. R., Brown, O. B., Jacobs, M. M. (1975). *Computed Relationships Between the Inherent and Apparent Optical Properties of a Flat Homogeneous Ocean. Applied Optics*, 14(2), 417-427. <https://doi.org/10.1364/AO.14.000417>

Harid, R., Ait kaci, M., & Houma, F. (2017a, avril 22). *Distribution of non-algal suspended matter in Bou Ismail Bay (central part of the Algerian basin) : Application of the ocean colour.*

Harid, R., Ait kaci, M., & Houma, F. (2017b, octobre 23). *Tendances de la chlorophylle-a dans le bassin Algérien par application de la couleur de l'océan.*

Références Bibliographiques

- Harid, R., Ait kaci, M., Keraghel, M., Zerrouki, M., & Houma, F.** (2018). *Seasonal and Interannual Variability of Primary Production and Chlorophyll Concentrations in the Algerian Basin : Application of Ocean Color* (p. 1641-1643). https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4_475
- Harid, R., Shara, A., Ait kaci, M., & Houma, F.** (2017a). *Utilisation de la télédétection spatiale pour distinguer le bloom phytoplanctonique dans le bassin Algérois.*
- Harid, R., Shara, A., Ait kaci, M., & Houma, F.** (2017b, novembre 2). *Using spatial remote sensing to distinguish phytoplankton bloom in the Algerian basin (Algeria).*
- Hirata, T., Hardman-Mountford, N. J., Brewin, R. J. W., Aiken, J., Barlow, R., Suzuki, K., Isada, T., Howell, E., Hashioka, T., Noguchi-Aita, M.** (2011). *Synoptic relationships between surface Chlorophyll-a and diagnostic pigments specific to phytoplankton functional types.* *Biogeosciences*, 8(2), 311–327.
- Houma, F.** (2009). *Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l'imagerie satellitaire.* Thèse pour obtenir grade Docteur, Spécialité : Sciences de l'Univers et Environnement. Université du Val de Marne Paris XII.
- Hutchinson, G. E.** (1957). *A Treatise on. Limnology*, 1, 243.
- Jeremy Werdell, P., McClain, C. R.** (2019). *Satellite Remote Sensing : Ocean Color.* In *Encyclopedia of Ocean Sciences* (p. 443-455). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10817-6>
- Kassar, A.** (2011). *Suivi de la chlorophylle et du phytoplancton dans les zones côtières Algéroises: apport des mesures satellitaires à leur modélisation.* Thèse En Vue De L'obtention Du Diplôme de Magister En Sciences De La Mer. ENSSMAL.
- Lefrançois, J.** (2007). *Dynamiques et origines des matières en suspension sur de petits bassins versants agricoles sur schiste.* [Phdthesis, Université Rennes 1]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00178187>
- Madi, F.** (2009). *Apport du système d'information géographique (SIG) pour la modélisation de la couleur des eaux marines (Cas : la baie d'Alger).* Mémoire De Fin D'études En Vue De L'obtention Du Diplôme d'Ingénieur En Sciences De La Mer. ENSSMAL.
- McClain, C. R., Esaias, W. E., Barnes, W., et al.** (1992). *In SeaWiFS Calibration and Validation Plan.* SeaWiFS Technical Report Series, Vol. 3, ed. Hooker, S. B., & Firestone, E.

Références Bibliographiques

R., NASA Technical Memorandum 104566. Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center.

McClain, C. R. (1993). *Review of major CZCS applications : US case studies. In Ocean colour : Theory and applications in a decade of CZCS experience.* (p. 167–188). Springer.

Mobley, C. (1994). *Light and Water : Radiative Transfer in Natural Waters.* In Academic Press.

Mollo, P., Noury, A. (2013). *Le Manuel du plancton.* ECLM.

Moore, J. K., Abbott, M. R. (2000). *Phytoplankton chlorophyll distributions and primary production in the Southern Ocean.* Journal of Geophysical Research: Oceans, 105(C12), 28709–28722.

Morel, A., Antoine, D. (2000). *Pigment index retrieval in Case 1 waters. MERIS ATBD, 2.*

Morel, Anclré, Prieur, L. (1977). *Analysis of variations in ocean color I : Ocean color analysis.* Limnology and Oceanography, 22(4), 709-722.
<https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>

Mur, R., Skulberg, O. M., & Utkilen, H. (1999). *. CYANOBACTERIA IN THE ENVIRONMENT.*

O'Reilly, J. E., Werdell, P. J. (2019). *Chlorophyll algorithms for ocean color sensors—OC4, OC5 & OC6.* Remote Sensing of Environment, 229, 32-47.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.021>

Oubelkheir, K. (2001). *Caractérisation biogéochimique de provinces océaniques al'aide d'indicateurs bio-optiques, adiverses échelles spatio-temporelles.* Université de la Méditerranée, Marseille.

Ouhssain, M. (2014). *Caractéristiques et origines de la variabilité diurne des propriétés optiques* [Thesis, Paris 6]. In <Http://www.theses.fr>. <http://www.theses.fr/2014PA066138>

Paulmier, G. (1972). *Seston, phytoplankton et microphytobenthos en rivière d'Auray. Leur role dans le cycle biologique des huitres (Oystrea edulis L.).* Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes, 36(4), 373–506.

Petus, C. (2009). *Qualité des eaux côtières du sud du golfe de Gascogne par télédétection spatiale : Méthodologie de détermination et de quantification de substances particulières et dissoutes* [PhD Thesis]. Bordeaux 1.

Références Bibliographiques

- Preisendorfer, R. W.** (1976). *Hydrologic Optics. Volume 1. Introduction*. [Technical Report]. Honolulu : U.S. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Pacific Marine Environmental Laboratory. <http://udspace.udel.edu/handle/19716/1577>
- Prescott, L. M., Harley, J. P., Klein, D. A., Bacq-Calberg, C. M., Dusart, J.** (2003). *Microbiologie. 2ème édition française*. Éditions De Boeck Université, Bruxelles, Belgique.
- Reynolds, C. S.** (2006). *The Ecology of Phytoplankton*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511542145>
- Rossi, N.** (2008). *Écologie des communautés planctoniques méditerranéennes et étude des métaux lourds (Cuivre, Plomb, Cadmium) dans différents compartiments de deux écosystèmes côtiers*. (Toulon, France) [PhD Thesis].
- Ruttner, F.** (1940). *Grundriss der Limnologie*.
- Sathyendranath, S., Aiken, J., Alvain, S., Barlow, R., Bouman, H., Bracher, A., Brewin, R., Bricaud, A., Brown, C. W., Ciotti, A. M.** (2014). *Phytoplankton functional types from Space*. In (Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG); 15) (p. 1–156). International Ocean-Colour Coordinating Group
- Sosik, H. M.** (2007). *Characterizing seawater constituents from optical properties*. op. cit., this volume.
- Weber, B.** (2002). *Suivi multi-temporel de la concentration de la chlorophylle a en Méditerranée Orientale à l'aide de SeaWiFS et de Landsat TM*. Rapport de stage, UNEP (United Nations Environment Programme)/GRID (Global Resource Information Database) Genève, 77.

Annexes

Annexe 01 : Images satellitaires

Comme il est mentionné dans la partie matériel et méthodes voici les Douze (12) images utilisées pour l'étude des cycles annuelles.

Tableau I. Les images utilisées dans les cycles annuels

Nom	Mois	Niv
S3B_OL_1_EFR__20190106T100624_20190106T100924_20200111T122504_017 9_020_293_2340_MR1_R_NT_002	Jan	
S3A_OL_1_EFR__20190215T100832_20190215T101132_20190216T140422_018 0_041_236_2340_LN1_O_NT_002	Fev	
S3B_OL_1_EFR__20190317T095132_20190317T095432_20200112T024700_017 9_023_136_2340_MR1_R_NT_002	Mar	
S3A_OL_1_EFR__20190414T100451_20190414T100751_20190415T134924_017 9_043_293_2340_LN1_O_NT_002	Avr	
S3A_OL_1_EFR__20190515T100109_20190515T100409_20190516T145436_017 9_044_350_2340_LN1_O_NT_002	Mai	
S3B_OL_1_EFR__20190602T095512_20190602T095812_20190603T170651_017 9_026_079_2340_MAR_O_NT_002	Jun	L1
S3A_OL_1_EFR__20190723T101221_20190723T101521_20190724T135356_017 9_047_179_2340_LN1_O_NT_002	Jul	
S3A_OL_1_EFR__20190816T094951_20190816T095251_20190817T143138_017 9_048_136_2340_LN1_O_NT_002	Aout	
S3B_OL_1_EFR__20190930T094357_20190930T094657_20191001T130549_017 9_030_250_2340_LN1_O_NT_002	Sep	
S3B_OL_1_EFR__20191019T095124_20191019T095424_20191020T134632_018 0_031_136_2340_LN1_O_NT_002	Oct	
S3B_OL_1_EFR__20191130T100243_20191130T100543_20191201T140827_017 9_032_350_2340_LN1_O_NT_002	Nov	
S3B_OL_1_EFR__20191224T094015_20191224T094315_20191225T130744_017 9_033_307_2340_LN1_O_NT_002	Dec	

Annexe 02: Inscription aux plateformes de téléchargement des données

1- Pour l'acquisition des données MODIS

Etape 01 : Pour pouvoir télécharger l'image MODIS sur le site précédent, il faut créer un compte sur le site d'Earth Data de la NASA (<https://urs.earthdata.nasa.gov>) (Fig I).

Etape 02 : Aller sur <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=amod>.

Earthdata Login

You must be logged in to access this page

Username

Password

LOG IN **REGISTER**

[I don't remember my username](#)
[I don't remember my password](#)
[Help](#)

Why must I register?

The Earthdata Login provides a single mechanism for user registration and profile management for all EOSDIS system components (DAACs, Tools, Services). Your Earthdata login also helps the EOSDIS program better understand the usage of EOSDIS services to improve user experience through customization of tools and improvement of services. EOSDIS data are openly available to all and free of charge except where governed by international agreements.

Figure I. Page d'inscription et de connexion à Earthdata.

2- Pour l'acquisition des données OLI

Etape 01 : Il faut d'abord créer un compte puis se connecter pour pouvoir accéder à l'interface de téléchargement (Fig II).

USGS
science for a changing world

EROS Registration System (ERS)

ERS consolidates user profile and authentication for all EROS web services into a single independent application.

Sign In

sign in by using USGS registered username and password

Registered USGS Username

Registered USGS Password

[forgot password?](#)

Sign In

[Don't have an account?](#)

Create New Account

Figure II. Page d'inscription et de connexion à l'USGS.

3- Pour l'acquisition des données MSI et OLCI il faut aussi créer un compte sur les deux plateformes de téléchargement.

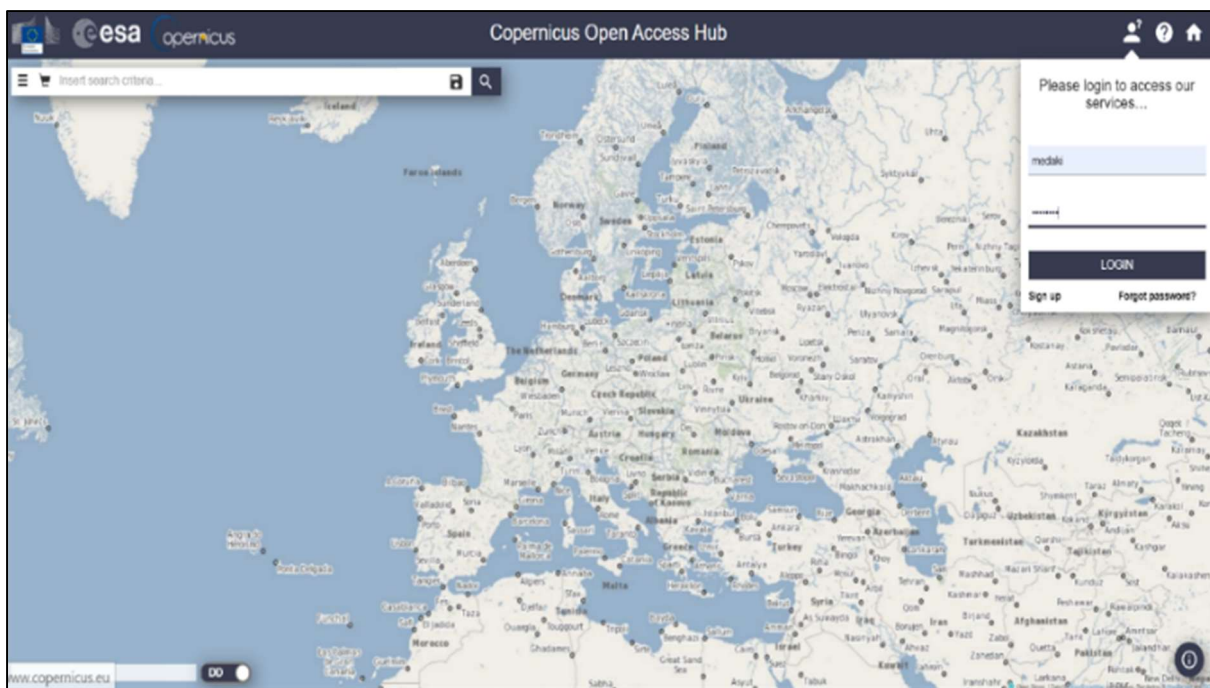


Figure III. L'interface Open Access de Copernicus.

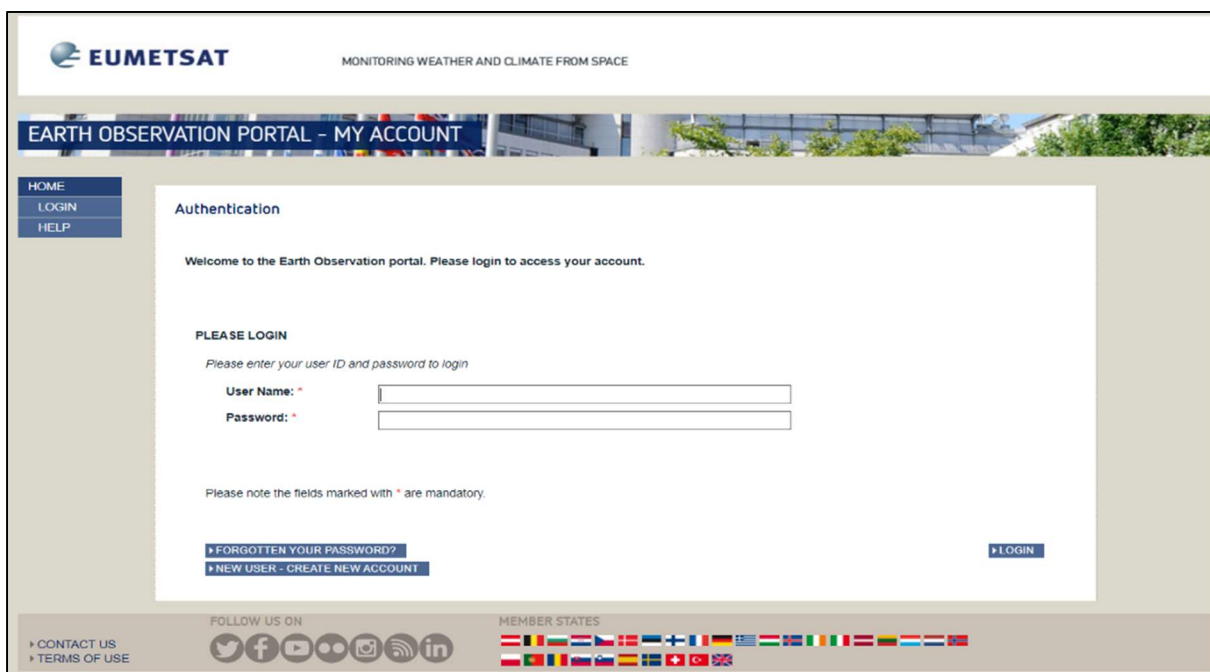





Figure IV. Portail d'inscription et connexion sur EUMETSAT

Annexe 03: Extraction de la chlorophylle et des fractions phytoplanctoniques

Etape n°1 : Pour extraire les données :

- D'une station : Cliquer sur  , une fenêtre s'affiche où il faut appuyer sur  pour introduire les coordonnées géographiques de chaque station (Fig V).

- D'une géométrie (Surface) : Délimiter la zone d'étude en allant sur , Zoomer la carte puis dessiner la surface (Fig VI).

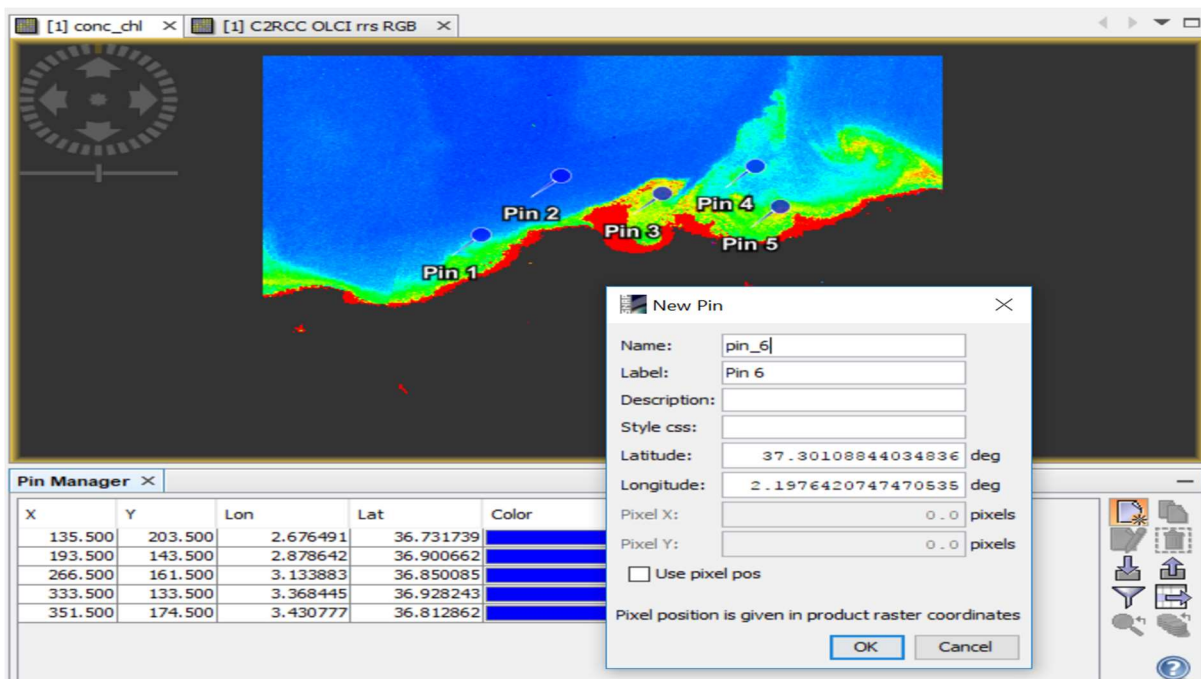


Figure V. Introduction d'un pin pour l'extraction des informations d'une station donnée

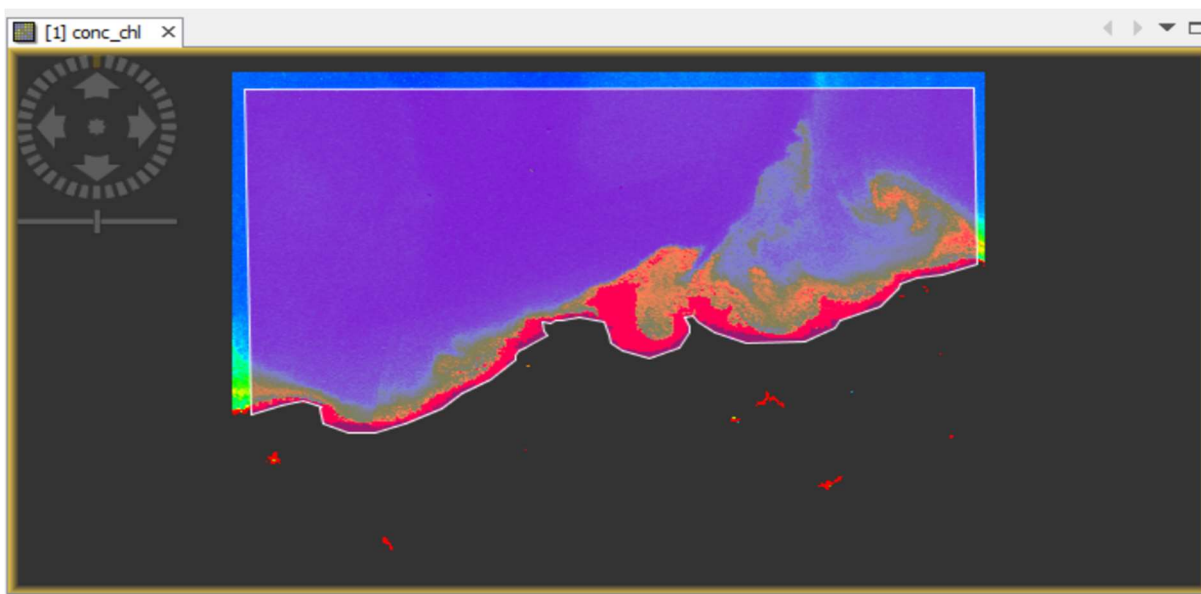


Figure VI. L'extraction des informations de la totalité de la surface marine

Etape n°2 : Sur la carte on fait un clic droit, choisir « Export Mask Pixel » pour un « Pin » ou une « Geometry » puis sélectionner le répertoire de sortie.

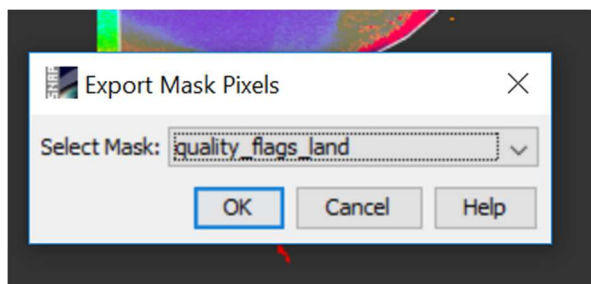


Figure VII. Exportation des données choisies

Annexe 03: Comparaison entre les algorithmes bio-optiques

Cartes établit lors de l'identification du meilleur algorithme destiné à l'estimation de la concentration de la chlorophylle dans les eaux côtières.

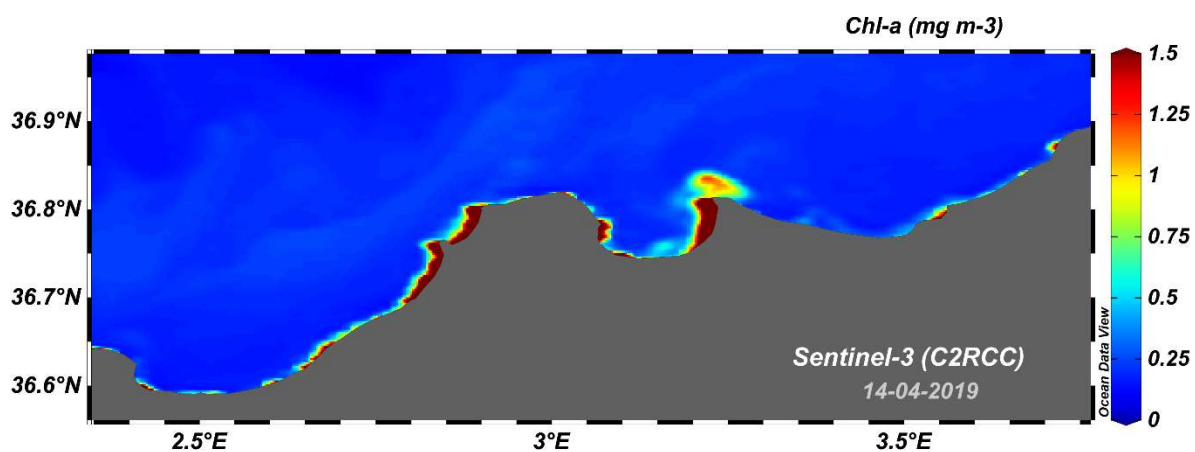


Figure VIII Carte de la chlorophylle estimée par l'algorithme du model C2RCC

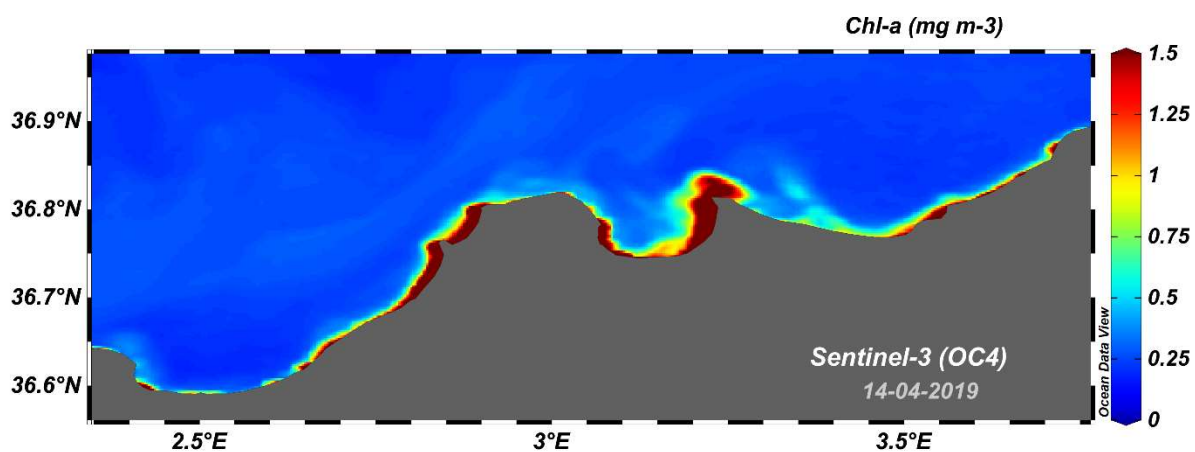


Figure IX. Carte de la chlorophylle estimée par l'algorithme OC4

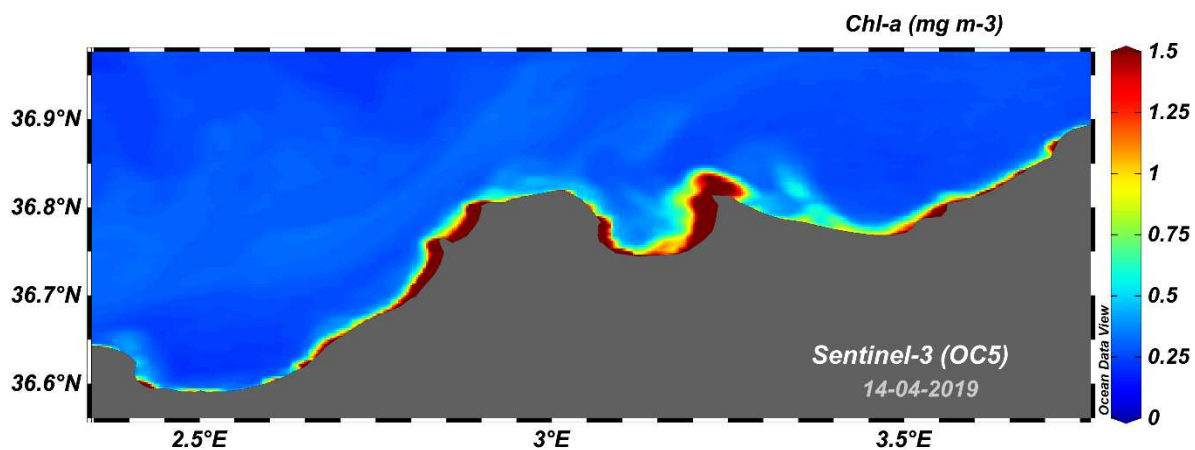


Figure X. Carte de la chlorophylle estimée par l'algorithme OC5

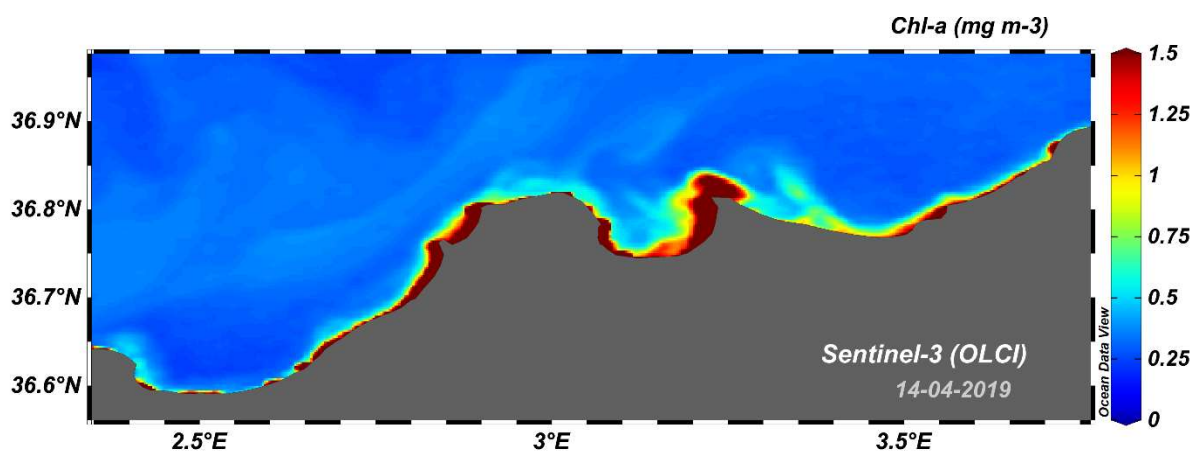


Figure XI. Carte de la chlorophylle estimée par l'algorithme OC6

Annexe 04: Calcul d'erreur

Un calcul d'erreur a été effectué sur les algorithmes bio-optiques. La formule utilisée, est la suivante :

$$\varepsilon = \frac{((\sum_1^i |C_{in} - C_{md}|)/i)}{C_{moy}}$$

Avec :

ε : l'erreur sur le modèle.

C_{in} : Concentration in-situ.

C_{md} : Concentration modélée.

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

i : Nombre de points

Annexe 05 : Les réflectances extraites depuis SNAP

Tableau II. Valeurs des réflectances de la baie de Zemmouri

Mois	Long	Lat	400	412	442,5	490	510	560	620	665	673,75	681,25	708,75	753,75	778,75	865	885	1020
JAN	3°33'00"E	36°52'12"N	0,0022 09	0,0024 82	0,003	0,0031 14	0,0021 1	0,0011 47	2,28E- 04	1,30E- 04	1,27E- 04	1,22E- 04	5,95E- 05	1,65E- 05	1,75E- 05	6,55E- 06	5,42E- 06	9,02E- 07
FEB			0,0028 51	0,0032 87	0,0041 62	0,0043 93	0,0028 84	0,0014 88	2,86E- 04	1,64E- 04	1,59E- 04	1,50E- 04	7,32E- 05	2,03E- 05	2,16E- 05	8,18E- 06	6,76E- 06	1,12E- 06
MAR			0,0028 83	0,0033 54	0,0044 03	0,0049 78	0,0034 23	0,0018 65	3,71E- 04	2,18E- 04	2,09E- 04	1,97E- 04	9,89E- 05	2,79E- 05	3,00E- 05	1,16E- 05	9,60E- 06	1,62E- 06
AVR			0,0036 43	0,0041 96	0,0052 29	0,0053 87	0,0034 84	0,0017 76	3,35E- 04	1,93E- 04	1,85E- 04	1,75E- 04	8,63E- 05	2,40E- 05	2,56E- 05	9,76E- 06	8,07E- 06	1,34E- 06
MAI			0,0049 14	0,0055 18	0,0058 37	0,0046 7	0,0026 61	0,0012 28	2,39E- 04	1,30E- 04	1,24E- 04	1,17E- 04	5,72E- 05	1,54E- 05	1,61E- 05	5,83E- 06	4,76E- 06	7,35E- 07
JUN			0,0155 64	0,0174 82	0,0184 78	0,0147 79	0,0084 39	0,0038 96	7,62E- 04	4,14E- 04	3,94E- 04	3,72E- 04	1,82E- 04	4,87E- 05	5,10E- 05	1,84E- 05	1,50E- 05	2,31E- 06
JUL			0,0042 35	0,0047 26	0,0050 4	0,0040 54	0,0022 98	0,0010 3	1,85E- 04	9,95E- 05	9,52E- 05	8,99E- 05	4,27E- 05	1,14E- 05	1,19E- 05	4,24E- 06	3,45E- 06	5,33E- 07
AUG			0,0061 83	0,0070 35	0,0078 64	0,0071 47	0,0044 13	0,0021 9	4,27E- 04	2,38E- 04	2,25E- 04	2,12E- 04	1,07E- 04	2,93E- 05	3,10E- 05	1,16E- 05	9,54E- 06	1,51E- 06
SEP			0,0069 14	0,0077 85	0,0081 33	0,0066 76	0,0039 02	0,0018 75	3,65E- 04	2,02E- 04	1,91E- 04	1,80E- 04	9,23E- 05	2,51E- 05	2,65E- 05	9,84E- 06	8,07E- 06	1,27E- 06
OCT			8,58E- 04	9,27E- 04	0,0010 37	0,0010 59	8,09E- 04	5,34E- 04	1,50E- 04	8,69E- 05	8,71E- 05	8,52E- 05	4,02E- 05	1,10E- 05	1,16E- 05	4,22E- 06	3,45E- 06	5,49E- 07
NOV			0,0050 77	0,0057 9	0,0067 51	0,0064 9	0,0041 34	0,0021 19	3,87E- 04	2,17E- 04	2,07E- 04	1,95E- 04	9,85E- 05	2,72E- 05	2,89E- 05	1,10E- 05	9,08E- 06	1,50E- 06
DEC			0,0039 16	0,0044 2	0,0051 2	0,0048 4	0,0030 24	0,0015	2,66E- 04	1,49E- 04	1,44E- 04	1,36E- 04	6,72E- 05	1,85E- 05	1,96E- 05	7,32E- 06	6,05E- 06	9,95E- 07

Tableau III. Valeurs des réflectances de la baie d'Alger

Mois	Long	Lat	400	412	442,5	490	510	560	620	665	673,75	681,25	708,75	753,75	778,75	865	885	1020
JAN	3°09'00" E	36°49'48" N	0,00417 2	0,0047 26	0,005 599	0,00561 2	0,003 72	0,0020 04	3,65E- 04	2,06E- 04	1,97E- 04	1,88E- 04	9,56E- 05	2,66E- 05	2,84E- 05	1,09 E-05	9,05E- 06	1,53E- 06
FEV			0,00231 9	0,0027 18	0,003 748	0,00468 2	0,003 457	0,0020 34	4,29E- 04	2,55E- 04	2,46E- 04	2,32E- 04	1,18E- 04	3,36E- 05	3,62E- 05	1,42 E-05	1,18E- 05	2,02E- 06
MAR			0,00453 4	0,0052 13	0,006 309	0,00632 5	0,004 063	0,0020 58	3,76E- 04	2,13E- 04	2,03E- 04	1,91E- 04	9,49E- 05	2,63E- 05	2,79E- 05	1,06 E-05	8,74E- 06	1,43E- 06
AVR			0,00448 6	0,0051 63	0,006 283	0,00631 9	0,004 051	0,0020 39	3,77E- 04	2,14E- 04	2,04E- 04	1,92E- 04	9,48E- 05	2,62E- 05	2,79E- 05	1,05 E-05	8,69E- 06	1,41E- 06
MAY			0,00471 2	0,0054 14	0,006 462	0,00628 6	0,003 963	0,0019 73	3,75E- 04	2,12E- 04	2,02E- 04	1,89E- 04	9,39E- 05	2,59E- 05	2,75E- 05	1,04 E-05	8,53E- 06	1,38E- 06
JUN			0,01341 5	0,0155 05	0,019 08	0,01923 6	0,012 3	0,0062 26	0,0011 98	6,88E- 04	6,55E- 04	6,15E- 04	3,08E- 04	8,57E- 05	9,15E- 05	3,49 E-05	2,88E- 05	4,74E- 06
JUL			0,00316 6	0,0035 37	0,004 004	0,00355 8	0,002 133	9,95E- 04	1,81E- 04	9,85E- 05	9,49E- 05	8,98E- 05	4,24E- 05	1,13E- 05	1,19E- 05	4,27 E-06	3,49E- 06	5,46E- 07
AUG			0,00580 3	0,0066 62	0,008 085	0,00859 7	0,005 89	0,0031 76	5,80E- 04	3,27E- 04	3,09E- 04	2,90E- 04	1,46E- 04	4,05E- 05	4,31E- 05	1,65 E-05	1,36E- 05	2,21E- 06
SEP			0,00666 6	0,0074 92	0,008 112	0,00719 1	0,004 421	0,0022	4,14E- 04	2,30E- 04	2,18E- 04	2,06E- 04	1,06E- 04	2,92E- 05	3,09E- 05	1,16 E-05	9,58E- 06	1,54E- 06
OCT			0,00172 84	0,0018 118	0,002 118	0,00199 4	0,001 309	6,91E- 04	1,48E- 04	8,21E- 05	8,03E- 05	7,69E- 05	3,61E- 05	9,70E- 06	1,02E- 05	3,63 E-06	2,96E- 06	4,65E- 07
NOV			0,00400 5	0,0045 15	0,005 266	0,00513 1	0,003 343	0,0017 76	3,21E- 04	1,81E- 04	1,73E- 04	1,65E- 04	8,38E- 05	2,32E- 05	2,48E- 05	9,45 E-06	7,85E- 06	1,33E- 06
DEC			0,00190 4	0,0021 12	0,002 504	0,00264 9	0,001 868	0,0010 56	2,24E- 04	1,28E- 04	1,25E- 04	1,21E- 04	5,91E- 05	1,64E- 05	1,74E- 05	6,51 E-06	5,38E- 06	8,92E- 07

Tableau IV. Valeurs des réflectances de la baie de Bousmail

Mois	Long	Lat	400	412	442,5	490	510	560	620	665	673,75	681,25	708,75	753,75	778,75	865	885	1020
JAN	2°36'00"E	36°43'48"N	0,0028 81	0,0032 3	0,00376 7	0,0036 37	0,0023 37	0,0012 06	2,26E- 04	1,28E- 04	1,24E- 04	1,18E- 04	5,79E- 05	1,59E- 05	1,69E- 05	6,29E- 06	5,20E- 06	8,59E- 07
FEV			0,0044 41	0,0050 61	0,00578 1	0,0051 83	0,0031 02	0,0014 75	2,69E- 04	1,49E- 04	1,43E- 04	1,35E- 04	6,55E- 05	1,78E- 05	1,88E- 05	6,94E- 06	5,70E- 06	9,08E- 07
MAR			0,0040 57	0,0046 59	0,00565 6	0,0056 37	0,0035 87	0,0017 99	3,32E- 04	1,88E- 04	1,80E- 04	1,70E- 04	8,39E- 05	2,32E- 05	2,47E- 05	9,35E- 06	7,71E- 06	1,27E- 06
AVR			0,0054 65	0,0063 06	0,00775 6	0,0082 53	0,0055 91	0,0029 63	5,43E- 04	3,07E- 04	2,92E- 04	2,73E- 04	1,36E- 04	3,76E- 05	4,00E- 05	1,52E- 05	1,25E- 05	2,03E- 06
MAY			0,0030 28	0,0035 05	0,00448 2	0,0048 1	0,0031 85	0,0016 6	3,21E- 04	1,86E- 04	1,79E- 04	1,68E- 04	8,33E- 05	2,33E- 05	2,49E- 05	9,49E- 06	7,85E- 06	1,31E- 06
JUN			0,0090 38	0,0105 21	0,01384 8	0,0156 61	0,0107 29	0,0058 04	0,0011 4	6,67E- 04	6,41E- 04	6,04E- 04	3,02E- 04	8,54E- 05	9,16E- 05	3,53E- 05	2,93E- 05	4,95E- 06
JUL			0,0036 18	0,0040 28	0,00428 6	0,0034 22	0,0019 23	8,51E- 04	1,49E- 04	7,98E- 05	7,66E- 05	7,23E- 05	3,39E- 05	8,94E- 06	9,31E- 06	3,27E- 06	2,66E- 06	4,05E- 07
AUG			0,0071 12	0,0080 12	0,00814 4	0,0063 22	0,0035 74	0,0016 76	3,25E- 04	1,78E- 04	1,68E- 04	1,58E- 04	8,01E- 05	2,16E- 05	2,27E- 05	8,30E- 06	6,79E- 06	1,05E- 06
SEP			0,0083 12	0,0093 15	0,00960 5	0,0080 76	0,0048 92	0,0024 49	4,98E- 04	2,75E- 04	2,58E- 04	2,44E- 04	1,29E- 04	3,52E- 05	3,72E- 05	1,39E- 05	1,14E- 05	1,78E- 06
OCT			0,0022 82	0,0025 21	0,00285 5	0,0026 33	0,0016 51	8,17E- 04	1,59E- 04	8,77E- 05	8,53E- 05	8,13E- 05	3,83E- 05	1,03E- 05	1,08E- 05	3,88E- 06	3,17E- 06	5,00E- 07
NOV			0,0033 87	0,0038 75	0,00479 3	0,0050 32	0,0033 7	0,0018 09	3,41E- 04	1,96E- 04	1,88E- 04	1,78E- 04	8,96E- 05	2,50E- 05	2,68E- 05	1,03E- 05	8,52E- 06	1,44E- 06
DEC			0,0048 15	0,0054 53	0,00640 5	0,0064 21	0,0042 32	0,0022 24	3,96E- 04	2,23E- 04	2,13E- 04	2,02E- 04	1,02E- 04	2,84E- 05	3,02E- 05	1,15E- 05	9,55E- 06	1,59E- 06

Résumé :

En raison de la nécessité de comprendre les processus marins et les changements dans les environnements côtiers, plusieurs algorithmes et satellites ont été développés au cours de ces dernières années.

Actuellement, les capteurs de la couleur de l'océan sont largement utilisés pour surveiller, cartographier et détecter les plus petites variations dans les populations de phytoplancton à l'aide des paramètres mesurables. La chlorophylle est connue pour être le principal paramètre et indicateur permettant d'évaluer la qualité et la biochimie de l'eau.

Dans cette étude, nous nous intéressons à la cartographie de la chlorophylle et à l'identification des groupes phyto-planctoniques dans le bassin Algérois par une approche satellitaire. Tout d'abord, une comparaison des performances a été faite entre quatre images issues de quatre capteurs différents acquises dans le même jour (MODIS, OLI, MSI, OLCI) afin d'identifier la meilleure en termes de résolution spatiale et spectrale. Pour ce faire, les données de niveau 2 du MODIS et les données de niveau 1 de l'OLI, du MSI et de l'OLCI ont été utilisées. Le modèle C2RCC a été appliqué afin de calculer la réflectance et les concentrations de la chlorophylle pour l'image du niveau 1.

La deuxième partie de l'étude est consacrée à la réalisation d'un cycle annuel des différents groupes phyto-planctoniques, par l'application des algorithmes empiriques basés sur l'abondance (Hirata et al., 2011) sur des images niveau 1 de Sentinel-3 issues en 2019.

La discussion des résultats de la première partie ont révélé que pour notre cas d'étude, les images provenant du Sentinel-3 sont plus pertinentes comparant aux autres capteurs. La deuxième partie de l'étude a montré que la distribution des groupes phyto-planctoniques et de la concentration de la chlorophylle est variable selon la région et sa climatologie.

Mots clés :

C2RCC, Chlorophylle, Couleur de l'océan, cycle annuel, Phytoplancton.

Abstract

Due to the need to understand marine processes and changes in coastal environments, several algorithms and satellites have been developed in recent years.

Currently, ocean color sensors are widely used to monitor, map and detect the smallest variations in phytoplankton populations using measurable parameters. Chlorophyll is known to be the main parameter and indicator for assessing water quality and biochemistry.

This study focuses on chlorophyll mapping and the identification of phytoplankton groups in the Algerian basin using a satellite approach. First of all, a performance comparison was made between four images from four different sensors acquired in the same day (MODIS, OLI, MSI, and OLCI) in order to identify the best in terms of spatial and spectral resolution. To do so, MODIS level 2 data and OLI, MSI and OLCI level 1 data were used. The C2RCC model was applied to calculate reflectance and chlorophyll concentrations for the level 1 images.

The second part of the study is devoted to the realization of an annual cycle of Chl-a and for the different phytoplankton groups, by applying empirical abundance-based algorithms (Hirata et al., 2011) on Sentinel-3 Level 1 images from 2019.

Discussion of the results of the first part revealed that for our case study, images from Sentinel-3 are more relevant compared to other sensors. The second part of the study showed that the distribution of phytoplankton groups and chlorophyll concentration are variable depending on the region and its climatology.

Key words: Annual cycle, , C2RCC, Chlorophyll, phytoplankton, Ocean color.

الملخص

نظرًا للحاجة إلى فهم العمليات البحرية والتغيرات في البيئات الساحلية، تم في السنوات الأخيرة تطوير العديد من الخوارزميات والأقمار الصناعية.

حاليًا، تُستخدم مستشعرات ألوان المحيطات على نطاق واسع لرصد وتخطيط واكتشاف أصغر الاختلافات في مجموعات العوالق النباتية باستخدام معايير قابلة للقياس. ومن المعروف أن الكلوروفيل هو المعيار والمؤشر الرئيسي لتقييم جودة المياه والكيمياء الحيوية للوسط البحري.

تركز هذه الدراسة على رسم خرائط الكلوروفيل وتحديد مجموعات العوالق النباتية في الحوض الجزائري باستخدام الأقمار الصناعية. أولاً وقبل كل شيء، تم إجراء مقارنة أداء بين أربع صور من أربعة أجهزة استشعار مختلفة تم الحصول عليها في نفس اليوم (MODIS وOLI وMSI وOLCI) من أجل تحديد الأفضل من حيث الدقة المكانية والطيفية. للقيام بذلك، تم استخدام بيانات MODIS من المستوى 2 وبيانات OLI وMSI وOLCI المستوى 1. تم تطبيق نموذج C2RCC لحساب تركيز الكلوروفيل وقيمة الانعكاس الطيفي للصور من المستوى 1.

الجزء الثاني من الدراسة مخصص لإنجاز دورة سنوية للكلوروفيل ولمجموعات العوالق النباتية المختلفة، من خلال تطبيق خوارزميات قائمة على الوفرة التجريبية (Hirata et al. 2011)، على صور Sentinel-3 المستوى 1 من عام 2019. كشفت مناقشة نتائج الجزء الأول أنه بالنسبة لدراسة الحالة التي أجريناها، فإن الصور المأخوذة من Sentinel-3 أكثر ملاءمة مقارنة بأجهزة الاستشعار الأخرى. وأظهر الجزء الثاني من الدراسة أن توزيع مجموعات العوالق النباتية وتركيز الكلوروفيل متغيران حسب المنطقة. ومناخها.

الكلمات المفتاحية:

اليخضور-العوالق – الأقمار الصناعية-لون المحيط