

Caractérisation et suivi par télédétection de l'activité phytoplanctonique aux îles Kerguelen



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master 2 Mention GAED
Spécialité TELENVI (Télédétection et Environnement)
Co-accrédité par l'Université Rennes 2 et l'Institut Agro Rennes-Angers
Présenté par Léa Moing

Soutenu à Rennes le 18 septembre 2025

Devant le jury composé de :

Président : *Youssef FOUAD* (Enseignant-chercheur - Institut Agro Rennes-Angers / INRAe Rennes - UMR SAS)

Autres membres : *Alexandre GUYOT* (ATER - LETG – UMR CNRS 6554) et *Laurence HUBERT-MOY* (Enseignante-chercheuse – LETG – UMR CNRS 6554)

Maitres de stage : *Damien FOURCY* (INRAe Rennes – UMR DECOD) et *Thomas SAUCEDE* (Biogéosciences - UMR 6282 Université Bourgogne Europe, CNRS)



Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers



ENGAGEMENT DE NON-PLAGIAT ET D'UTILISATION D'IA GÉNÉRATIVE

Je soussignée Léa Moing,

Déclare être pleinement consciente que le plagiat de documents, ou d'une partie de document publiés sur tout type de support, y compris Internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources utilisées pour la rédaction de ce rapport/mémoire.

De plus, je certifie que l'utilisation d'outils d'intelligence artificielle générative (tels que ChatGPT ou équivalents) dans le cadre de ce travail s'est limitée à une aide ponctuelle à la résolution de problèmes techniques, notamment pour la correction ou l'optimisation de scripts lors de la programmation.

Je n'ai en aucun cas utilisé ces outils pour générer automatiquement du contenu textuel à des fins de rédaction ou de plagiat, et je reste seule responsable, avec l'aide de mes encadrants, de l'ensemble des idées, interprétations et résultats présentés dans ce document.

Fait à Rennes, le 08/08/2025

Signature :

Acronymes

Acronymes

ACOLITE

Description

Le logiciel combine les algorithmes de correction atmosphérique pour les applications aquatiques de diverses missions satellitaires développées à RBINS

C2RCC

Case 2 Regional CoastColour

Chl-a

Chlorophylle-a

CDOM

Matière organique dissoute colorée

CZCS

Coastal Zone Colour Scanner (NASA)

DSF

Dark Spectrum Fitting

Eaux du cas 1

Eaux qui sont optiquement dominées par l'eau elle-même et par la *Chl-a* (et la CDOM corrélée)

Eaux du cas 2

Eaux qui sont optiquement dominées par l'eau elle-même et par les SPM et/ou CDOM (en plus de l'eau et du *Chl-a*)

ENVISAT

European ENVironmental SATellite (ESA)

ESA

European Space Agency

GAMs

Generalized Additive Models

HNLC

High Nutrient Low Chlorophyll

IPEV

Institut polaire français Paul-Emile Victor

MCI

Maximum Chlorophyll Index

MERIS

Medium Resolution Imaging Spectrometer (ESA)

MES

Matières en suspension

MODIS

Moderate Imaging Spectrometer (NASA)

NASA

National Aeronautics and Space Administration

NIR

Near-InfraRed

NOAA

National Oceanic and Atmospheric Administration

NPP

Net Primary Production

OC

Ocean Colour

OLCI

Ocean and Land Colour Instrument (ESA)

PACE

Plankton, Aerosol, Cloud and ocean Ecosystem (NASA)

RBINS

Royal Belgian Institute of Natural Sciences

SeaWiFS

Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (NASA)

SNAP

SentiNel Application Platform

SPM

Suspended Particulate Matter

SST

Sea Surface Temperature

SWIR

Short-Wave InfraRed

TAAF

Terres Australes et Antarctiques Françaises

TOA

Top-of-Atmosphere

TSM

Total Suspended Matter

Coefficients optiques

Rrs

Description

Remote Sensing Reflectance

Table des illustrations

© 2024 Mathieu Rembauville	5
Figure 1 : Diversité du phytoplancton en aval des îles Kerguelen.....	5
Tableau 1 : Inventaires des imageries utilisables sur des problématiques de la couleur de l'océan et leurs caractéristiques (Groom et al., 2019; Jeremy Werdell & McClain, 2019).....	6
Figure 2 : Localisation des îles kerguelen par rapport aux plateaux continentaux – Sources : GEBCO – Auteure : Léa Moing.....	10
Figure 3 : Distribution circumpolaire du front subtropical (STF), du front subantarctique (SAF), du front polaire (PF), du front sud de l'ACC (SACCF) et de la limite sud de l'ACC (SB), d'après (Roquet et al. 2009).	10
Figure 4 : Carte de localisation des données - Sources : OdatiS, 2025 - Auteure : Léa Moing.....	11
Figure 5 : Capteurs sur les éléphants de mer (MEOP-CTD).....	12
Tableau 2 : Caractéristiques des satellites et des capteurs utilisés.....	13
Figure 6 : Organigramme simplifié de la méthodologie générale.....	14
Tableau 3 : Coefficients pour les algorithmes bio-optiques avec le capteur Sentinel-3 OLCI.....	16
Figure 7 : Carte de localisation des zones (hauturières et côtières) –	18
Auteure : Léa Moing, 2025.....	18
Figure 8 : Comparaisons des algorithmes le 16 novembre 2022	19
Figure 9 : Concentrations en Chl-a estimées versus mesurées à la station Port-aux-Français.....	19
Figure 10 : Trois métriques d'erreurs en fonction des algorithmes	20
Figure 11 : Test post-hoc de Dunn (p-values corrigées avec Holm).....	20
Figure 12 : Ecart de prédiction en fonction de la longitude.....	21
Figure 13 : Ecart de prédiction en fonction de la latitude.....	21
Figure 14 : Ecart de prédiction en fonction de la date.....	21
Figure 15 : Comparaison de la concentration de Chl-a mesurées (in situ) et estimées (OC4SO).....	21
Figure 17 : Concentrations en Chl-a en fonction du mois sur la période 2016-2024 (Hovmöller graph).....	22
Figure 16 : Cycle saisonnier moyen de concentrations en Chl-a sur la période 2016-2024.....	22
Figure 18 : Comparaisons de deux mois avec une productivité opposée	23
Figure 19 : Evolution mensuelle de la Chl-a (zones côtières vs océan ouvert).....	23
Figure 20 : Evolution mensuelle de la concentration en Chl-a (2016-2025)	24
Figure 21 : Evolution mensuelle de la Chl-a (est vs ouest).....	24
Figure 22 : Evolution mensuelle en fonction de la région	25
Figure 22 : Comparaison entre valeurs mesurées (in situ) et estimées (OC4SO) aux stations PAF, BDS et Armor	27

Table des matières

1. Introduction	3
2. Etat de l'art	5
Le phytoplancton	5
Télédétection en milieu marin	6
Limites de la télédétection en milieu marin.....	7
Détection du phytoplancton par télédétection	8
3. Données et méthode	10
3.1 Site d'étude	10
3.2 Données	11
3.2.1 Données collectées <i>in situ</i>	11
3.2.2 Images satellitaires.....	13
3.3 Méthodes.....	14
3.3.1 Correction atmosphérique et pré-traitements.....	15
3.3.2 Estimation de la concentration en <i>Chl-a</i> (mg/m ³).....	15
3.3.3 Choix d'un algorithme	16
4. Résultats	19
4.1 Choix de l'algorithme d'estimation de la concentration en <i>Chl-a</i>	19
4.1.1 Comparaison entre algorithmes et avec des données <i>in situ</i>	19
4.1.2 Comparaison avec les modèles globaux.....	21
4.2 Dynamiques spatio-temporelles de l'activité phytoplanctonique.....	22
5. Discussion	26
5.1 Dynamiques spatio-temporelles de la <i>Chl-a</i> dans les eaux des Kerguelen.....	26
5.2 Limites des données et de l'algorithme OC4SO	26
5.3 Perspectives de recherches.....	27
5.3.1 Vers un algorithme spécifique aux Kerguelen.....	27
5.3.2 Nouvelles technologies : le satellite PACE.....	29
5.3.4 Impacts du changement climatique.....	30
6. Conclusion.....	31
Références	32
Annexe I : Inventaires des images satellites Sentinel-3 OLCI disponibles.....	38
Annexe II : Comparaison des valeurs mesurées (<i>in situ</i>) et estimées (6 algorithmes) à la station BDS.....	39
Annexe III : Comparaison des valeurs mesurées (<i>in situ</i>) et estimées (6 algorithmes) à la station Armor.....	40
Annexe IV : Ecart de prédiction entre OC4SO et C2RCC selon la longitude, la latitude et la date	41
Annexe V : Comparaison des périodes de faible et forte productivité entre 2019 et 2024.....	42
Annexe VI : Evolution mensuelle en fonction de la région (est/ouest/large/côtier)	43
Annexe VII : Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire	44
Annexe VIII : Fiche Résumé/Abstract	45

1. Introduction

L'archipel des Kerguelen, situé dans le sud de l'océan Indien occupe une position géographique singulière à la frontière des

eaux froides antarctiques (Blain *et al.*, 2007, 2008; Park *et al.*, 1993). Cette situation confère aux écosystèmes marins de l'archipel une originalité et une richesse écologique exceptionnelle, reconnues par la création de la Réserve naturelle nationale des Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF) en 2006, puis par leur inscription au patrimoine mondial de l'UNESCO en 2019.

Ces habitats marins sont aujourd'hui confrontés à des perturbations environnementales majeures. Plusieurs études récentes mettent en évidence des impacts déjà perceptibles sur les communautés biologiques (Morley *et al.*, 2020), liés notamment à l'accélération du réchauffement climatique (Pohl *et al.*, 2021; Nel *et al.*, 2023), à l'acidification des océans (McNeil & Mearns, 2008), à l'augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes et à des variations saisonnières plus marquées (Turner *et al.*, 2014). Ces changements sont susceptibles de modifier la structure, la composition et le fonctionnement de ces écosystèmes marins (Gutt *et al.*, 2015; Morley *et al.*, 2020).

Les zones littorales des Kerguelen, particulièrement riches et productives, apparaissent comme des systèmes sentinelles pour étudier l'impact de ces transformations. Les suivis menés par les équipes du CNRS (programmes MOBYDICK et PROTEKER), ont mis en évidence des perturbations déjà visibles au sein des réseaux trophiques austraux, autour de l'archipel des Kerguelen. Ces travaux montrent que les changements environnementaux, liés au réchauffement des eaux, à la variabilité de la fertilisation naturelle en fer, ou encore à la modification des régimes de vent et de glace, affectent la structure de la chaîne alimentaire depuis sa base, en modifiant sa composition et la productivité du phytoplancton, jusqu'aux prédateurs supérieurs tels que les manchots, phoques et oiseaux marins, qui dépendent fortement de la disponibilité en nourriture. Ces constats reposent sur des analyses isotopiques, des suivis *in situ* pluriannuels et des modélisations dynamiques des écosystèmes (Christaki *et al.*, 2014; Subramaniam *et al.*, 2020; Hunt *et al.*, 2021).

Contexte et objectifs

Le programme PROTEKER de l'Institut polaire français (IPEV n°1044) a pour objectif de constituer un observatoire écologique sur le long terme visant à documenter les effets du changement climatique sur les écosystèmes marins côtiers des Kerguelen. Ce programme pluridisciplinaire s'attache à constituer une référence écologique de base sur les habitats benthiques et les communautés associées, en combinant des approches écologiques, génétiques, trophiques et écophysiologiques. L'analyse des dynamiques spatio-temporelles y occupe une place centrale, en lien direct avec les objectifs de suivi et de conservation.

Au cœur de ces dynamiques, le phytoplancton joue un rôle fondamental en tant que producteur primaire des écosystèmes marins. A la base des réseaux trophiques marins, il soutient la production secondaire via le zooplancton et les organismes filtreurs benthiques. Toute modification de sa biomasse ou de sa composition peut ainsi entraîner des effets en cascade, touchant l'ensemble du réseau trophique, jusqu'aux poissons, oiseaux et mammifères marins.

De plus, la sédimentation du phytoplancton contribue à l'apport de matière organique aux fonds marins, influençant directement la disponibilité de nourriture les organismes benthiques détritivores et dépositivores (Le Bourg *et al.*, 2022). Le suivi de sa production permet donc d'interpréter les réponses écologiques des communautés benthiques, en lien étroit avec les objectifs du programme PROTEKER.

Le phytoplancton constitue également un bio-indicateur particulièrement sensible aux variations des conditions océaniques (température, salinité, lumière, apports en nutriments, hydrodynamisme). Son suivi permet de détecter précocement les signaux de changement environnemental et d'anticiper leurs effets sur des communautés marines. Enfin, en tant qu'acteur majeur des cycles biogéochimiques, notamment dans la séquestration du carbone, l'absorption des nutriments (azote, fer, phosphore) et la production d'oxygène, il offre un indicateur clé du fonctionnement global des écosystèmes côtiers.

Ainsi le suivi de la production primaire phytoplanctonique s'impose comme un axe structurant pour comprendre, anticiper et accompagner les dynamiques de transformation des écosystèmes subantarctiques, dans une perspective de gestion durable et de conservation.

Mon stage de fin d'études de Master 2 s'inscrit dans les objectifs du programme PROTEKER. Il vise à étudier les dynamiques spatio-temporelles de l'activité phytoplanctonique aux îles Kerguelen, en s'appuyant sur des données de télédétection (Sentinel-3 OLCI) et des mesures réalisées *in situ*, en zone côtière. L'objectif est de caractériser les variations de production primaire en fonction des zones maritimes, zones côtières ou océan ouvert.

De nombreuses études ont été réalisées en milieu océanique ouvert à travers des campagnes comme ARGO, OISO ou SOCCOM, cependant, les études portant spécifiquement sur les zones côtières des Kerguelen restent rares (Delille *et al.*, 2007; Irion *et al.*, 2020). Ce manque de connaissances rend la comparaison des deux zones maritimes particulièrement intéressante afin d'évaluer si leurs dynamiques sont similaires, complémentaires ou au contraire découplées.

Les Kerguelen constituent une zone difficile d'accès où les missions océanographiques sont coûteuses et la logistique complexe. À cela s'ajoute la particularité océanographique du sud de l'océan Indien (front polaire), qui accroît la complexité de l'étude des écosystèmes côtiers de cette région. Une approche basée sur la télédétection satellitaire peut permettre de contourner en partie ces difficultés.

Ce travail vise à mieux comprendre l'évolution récente de la biomasse phytoplanctonique dans cette région subantarctique en fournissant des indicateurs utiles pour le suivi écologique à long terme et la conservation des écosystèmes marins des Kerguelen.

2. Etat de l'art

Le phytoplancton

Le phytoplancton est constitué d'une grande diversité de micro-organismes unicellulaires différents (0.5 μm à 200 μm) (*Figure 1*). Essentiel à la vie sur Terre, il représente le principal producteur primaire des océans, grâce à la photosynthèse, par laquelle il assimile le CO_2 et des nutriments (fer, phosphate, silicates, manganèse...) pour produire de l'oxygène et de la matière organique en captant l'énergie lumineuse. Grâce à cette activité, environ 50% de l'oxygène produit par les organismes provient de l'océan, et la moitié du CO_2 atmosphérique est absorbée par celui-ci. Lorsque son cycle de vie est achevé, il se décompose et relâche du carbone dans l'atmosphère, mais une partie est également sédimentée au fond de l'océan pour y être stockée (5 à 10 gigatonnes / an y sont transférées) (Boyd & Trull, 2007; Falkowski *et al.*, 1998).

Le phytoplancton comporte différents pigments photosynthétiques selon les espèces. Cependant, la chlorophylle-a (*Chl-a*) est un pigment presque commun à toutes les espèces et sa concentration constitue un bon indicateur direct de la biomasse phytoplanctonique (Cullen, 1982; Blondeau-Patissier *et al.*, 2014). Elle permet également de mesurer la productivité primaire des masses d'eau, un paramètre clé pour évaluer l'état trophique des eaux côtières (Baban, 1996; Carlson, 1977; Lillesand, 1983).

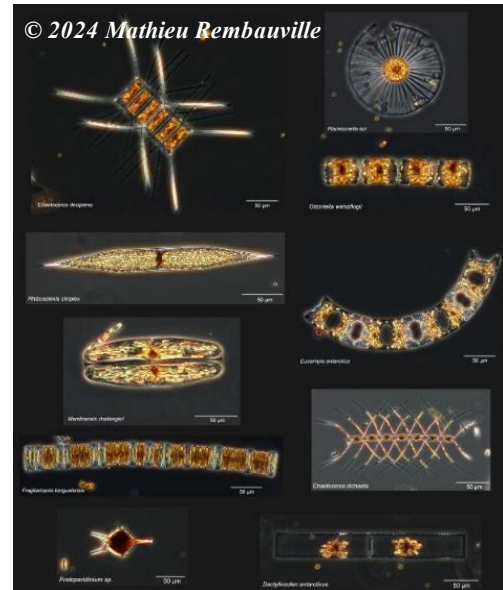


Figure 1 : Diversité du phytoplancton en aval des îles Kerguelen

Actuellement, les populations phytoplanctoniques sont en déclin à l'échelle globale, notamment en raison du réchauffement climatique qui se traduit par l'augmentation de la température de surface et par l'accentuation de la stratification océanique, qui limite l'apport vertical en nutriments nécessaires à leur croissance. Plusieurs études à long terme ont mis en évidence une diminution de près de 40% de la biomasse phytoplanctonique depuis les années 1950, corrélée à l'élévation des températures de surface (Boyce *et al.*, 2010; Constable *et al.*, 2014). Ce déclin est particulièrement marqué dans les océans tropicaux et subtropicaux, mais des signes similaires sont également observés dans certaines régions de l'océan Austral. Dans cette zone clé pour la régulation du cycle carbone, les conditions environnementales évoluent rapidement : le réchauffement des eaux de surface, l'intensification des vents circumpolaires et l'acidification progressive modifient la structure et la dynamique des écosystèmes phytoplanctoniques. Autour des îles Kerguelen, situées dans la partie subantarctique de l'océan Indien, la situation est plus contrastée. Les observations du programme KEOPS montrent une forte variabilité saisonnière, avec des floraisons massives de diatomées au printemps austral, suivies d'une succession de petites cellules flagellées. Bien qu'aucune tendance claire à long terme de diminution de la biomasse n'ait encore été détectée dans cette région, plusieurs études récentes soulignent une augmentation rapide de la température de surface et une acidification des eaux, susceptibles d'altérer à moyen terme la composition, la phénologie et la productivité des communautés phytoplanctoniques locales. Ces modifications pourraient compromettre le rôle structurant de l'océan Austral dans la pompe biologique de carbone et les flux biogéochimiques à l'échelle planétaire.

Télédétection en milieu marin

La télédétection appliquée aux milieux marins, aussi appelée télédétection de la couleur de l'océan, est un domaine clé pour le suivi environnemental, la recherche océanographique et la gestion des zones côtières et hauturières (Antoine *et al.*, 1996; Arnone *et al.*, 2006; *NASA Ocean Color*, s. d.). La couleur de l'océan désigne « la composition spectrale du champ de la lumière visible qui émane de l'océan » (Mobley, 1994). Sa télédétection consiste à observer depuis un satellite comment la lumière solaire, après avoir traversé l'atmosphère, interagit avec la surface océanique et les éléments présents dans la colonne d'eau. La lumière réfléchie vers les capteurs satellitaires renvoie ainsi l'empreinte des substances présentes, ce qui permet d'estimer certains paramètres biogéochimiques et physiques de l'eau.

Depuis les années 1970, la télédétection marine a connu un développement continu grâce à une succession de missions spatiales dédiées. Le premier satellite spécifiquement conçu pour l'observation de la couleur de l'océan fut le Coastal Zone Color Scanner (CZCS), lancé en 1978 par la NASA, qui a ouvert la voie à l'observation globale des concentrations de *Chl-a* et des structures biologiques océaniques. Par la suite, plusieurs capteurs spécialisés se sont succédés (*Tableau 1*), tels que l'OCTS (Ocean Color and Temperature Sensor) japonais, SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field of view Sensor), MODIS Terra et Aqua (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) remplacé par Sentinel-3 A et B à partir de 2016, VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer).

Tableau 1 : Inventaires des imageries utilisables sur des problématiques de la couleur de l'océan et leurs caractéristiques (Groom et al., 2019; Jeremy Werdell & McClain, 2019)

Statut	Plateforme	Agence	Capteurs	Résolution spatiale	Bandes spectrales (400 - 1000 nm)	Fréquence de revisite	Date début (date fin)
Fini	Nimbus-7	NASA	CZCS	1 km	5		1978 (- 1986)
	ADEOS	NASDA	OCTS		8		1996 (- 1997)
	Orbview-2	NASA / Orbital	SeaWiFS		8	2 jours	1997 (- 2010)
	Terra/Aqua	NASA	MODIS	1 km	9	Quotidien	1999 / 2004
	Envisat	ESA	MERIS	300 m - 1,2 km	15	2 jours	2002 (-2012)
	ISS	NASA	HICO	90 m			2009 (-2014)
	Oceansat-2	ISRO	OCM-2	300 m	8	2-3 jours	2009 (- 2023)
	KOMPSAT	KARI	GOCI	500 m	8	30 min	2010 (-2020)
	SeaHawk	NASA /					
	CubeSat	Moore Foundation	HawkEye	129 m	8		2018 (- 2023)
En cours	Suomi NPP	NOAA / NASA	VIIRS	750 m	7	Quotidien	2011
	Himawari-8 & 9	JMA	H-IIA	500 m - 2 km	4	10 min	2014 / 2016
	Landsat-8 & 9	NASA / USGS	OLI / OLI-2	15 m - 30 m	4	16 jours	2013 / 2020
	Sentinel-2 A/B	ESA	MSI	10 m - 60 m	4	5 jours	2015/2017
	Sentinel-3 A/B	ESA	OLCI	300 m	21	Quotidien (avec 2 satellites)	2016/2018
	NOAA-20	NOAA / NASA	VIIRS	375 m - 750 m	7	Quotidien	2017
	GCOM-C	JAXA	SGLI-2	250 m	9	2 - 4 jours	2017
	JPSS-2, JPSS-3	NOAA / NASA	VIIRS	750 m	7	Quotidien	2017/2022
	KOMPSAT-2B	KARI	GOCI-II	250 m - 1 km	12	1 à 3 jours	2018
	KOMPSAT-3B	KARI	GOCI	500 m	8	2,5 jours	2019
	EnMAP	DLR	EnMAP	30 m	Hyperspectral - 6,5 nm (420-1000 nm) => 89	4 jours	2022
	NOAA-21	NOAA / NASA	VIIRS	375 m - 750 m	7	2 fois par jour	2022
	Oceansat-3	ISRO	OCM-3	300 m	13	2 - 3 jours	2022
	PACE	NASA	OCI	1 km	Hyperspectral - 5 nm (340-890 nm) => 110	Quotidien	2024
Futur	Sabia-MAR	CONAE / AEB / INPE	MUS	200 - 800m	13	1 - 2 jours	2026
	Sentinel-3 C/D	ESA	OLCI	300 m	21	Quotidien (avec 2 satellites)	2026 / 2028

Ces instruments sont principalement multispectraux, capturant des informations à travers plusieurs bandes discrètes dans le spectre visible et proche infrarouge, optimisées pour détecter les principaux paramètres optiques de l'eau.

Pour le traitement des images satellitaires, il est important de différencier les milieux marins selon leurs propriétés optiques, classées en eaux de cas 1 et de cas 2. Les eaux de cas 1 sont typiques des milieux océaniques ouverts, peu influencés par les apports terrigènes, où la variabilité optique est principalement contrôlée par la concentration en *Chl-a* et ses produits de dégradation. Cela simplifie la restitution des paramètres biogéochimiques à partir des signaux spectraux. En revanche, les eaux de cas 2, trouvées principalement dans les zones côtières, estuariennes ou lacustres, présentent une complexité optique plus élevée. La lumière y est influencée non seulement par la *Chl-a*, mais aussi par d'autres constituants optiquement actifs comme la matière organique dissoute colorée (CDOM) et les matières en suspension (MES), souvent associés à une forte turbidité. Cette distinction est fondamentale car elle conditionne l'utilisation des algorithmes pour extraire correctement les paramètres biogéochimiques des données satellitaires.

Limites de la télédétection en milieu marin

Bien que la télédétection de la couleur de l'océan ait été développée depuis les années 1970, elle reste confrontée à des limites instrumentales et méthodologiques qui restreignent la précision et l'interprétation, en particulier en zones côtières et estuariennes, souvent complexes à interpréter. La complexité optique de ces zones est liée à la présence du phytoplancton, de MES et de CDOM, rendant difficile l'interprétation des signaux spectraux. A cela s'ajoutent une variabilité spatiale et temporelle, une turbidité élevée et des effets de fond en eaux peu profondes. Ces contraintes nécessitent des approches spécifiques pour avoir des informations fiables des écosystèmes marins (Gordon & Morel, 1983b, 1983a; Mobley, 1994; Boss *et al.*, 2019; Groom *et al.*, 2019; Jeremy Werdell & McClain, 2019; Baird *et al.*, 2020).

La lumière utile à la photosynthèse est comprise entre 400 et 700 nm et pénètre faiblement dans la colonne d'eau. Dans les masses d'eaux océaniques claires au large, elle peut pénétrer jusqu'à 30 ou 50 mètres. Tandis que dans les eaux côtières plus turbides, elle pénètre seulement jusqu'à 5 mètres environ. Seules les couches superficielles de l'océan sont observables par télédétection. La détection des phénomènes en profondeur (blooms profonds, zone de transition thermique sous-marine) n'est possible que si d'autres instruments de mesures (bouées, rosettes, drones, sonar...) complètent l'information satellitaire.

L'un des principaux défis auxquels la télédétection de la couleur de l'océan est confrontée, est la correction des effets atmosphériques, qui vise à distinguer le signal provenant de la colonne d'eau du signal atmosphérique. En effet, environ 80 à 85 % de la radiance mesurée au sommet de l'atmosphère est due à la diffusion de Rayleigh par les molécules atmosphériques, tandis qu'une partie supplémentaire de 0 à 10 % provient des aérosols et des molécules de gaz (poussières, polluants...), dont la distribution varie fortement dans le temps et l'espace, notamment en zone côtière.

La correction atmosphérique repose sur l'utilisation des bandes spectrales dans l'infrarouge proche (NIR) et l'infrarouge à ondes courtes (SWIR), car l'eau absorbe fortement la lumière dans ces longueurs d'onde, ce qui permet d'estimer la contribution des aérosols au signal mesuré. Cependant, cette correction est complexe, car la réflectance des aérosols n'est pas uniforme et nécessite au moins deux longueurs d'onde pour en modéliser la forme spectrale et extrapoler la correction dans le visible.

Enfin, la correction des reflets spéculaires à la surface de l'eau, notamment ceux liés aux embruns et aux déferlantes (whitecaps), est essentielle. Ces derniers sont souvent corrigés empiriquement en fonction de la vitesse du vent, mais les modèles peuvent parfois surestimer cette correction. Pour les vitesses de vent élevées, la correction des aérosols peut également contribuer à réduire l'impact des whitecaps sur le signal final.

La correction atmosphérique reste un enjeu majeur pour l'observation des couleurs océaniques par satellite, nécessitant des modèles sophistiqués pour minimiser les erreurs liées aux interactions complexes entre l'atmosphère et la surface océanique.

De nombreux algorithmes de correction atmosphérique et de détection de *Chl-a* ont été calibrés et validés pour des surfaces océaniques en domaine hauturier. La sélection des algorithmes selon notre zone d'étude en fonction de notre échelle spatiale et l'adaptation de ceux-ci basés sur des mesures *in situ* est primordiale pour restituer correctement les paramètres en milieux côtiers. De plus, en fonction du site d'étude, les propriétés physiques et chimiques de l'eau sont différentes et affectent le signal. Les eaux peuvent contenir des pigments (*Chl-a*), des MES, et des CDOM. Ces différents éléments ont des spectres de réflectance qui se superposent, rendant leurs différenciations complexes (Gordon & Morel, 1983b).

Détection du phytoplancton par télédétection

La détection et la surveillance du phytoplancton sont cruciales pour comprendre la dynamique des écosystèmes aquatiques comme l'origine des efflorescences algales (aussi appelées « blooms »). Un bloom est défini comme la « croissance d'une ou plusieurs espèces qui conduit à une augmentation de la biomasse de l'espèce. » (Richardson, 1996). Avant l'ère spatiale, ces mesures nécessitaient de nombreuses campagnes *in situ*, coûteuses et limitées en couverture spatiale et temporelle. La télédétection satellitaire, a révolutionné cette approche en offrant une perspective synoptique et une fréquence de revisite impossible auparavant.

Pour étudier l'activité phytoplanctonique, plusieurs indicateurs sont utilisés. Le principal est la concentration en *Chl-a*. Un autre indicateur important est la fluorescence de la *Chl-a*. Lors de la photosynthèse, une faible fraction (entre 0.5 et 2%) de l'énergie lumineuse absorbée par *Chl-a* et qui est réémise sous forme de fluorescence dans le proche infrarouge (685-700 nm). C'est un signal optique passif contenant une information indirecte sur la quantité et l'état physiologique du phytoplancton (Gower & King, 2007; Behrenfeld & Milligan, 2013).

La réflectance des eaux libres et claires présente un pic spectral aux longueurs d'onde bleues, car l'eau absorbe fortement dans le proche infrarouge et diffuse plus facilement la lumière bleue (diffusion de Rayleigh). Cependant, lorsque les concentrations de phytoplancton et de MES augmentent, les processus d'absorption et de diffusion réduisent la réflectance aux longueurs d'ondes bleues et l'augmentent dans les longueurs d'onde vertes, ce qui modifie la couleur de l'eau du bleu au vert, puis au brun. Ce changement spectral de la réflectance, en fonction des concentrations des constituants optiquement actifs de la colonne d'eau, peut être quantifié et utilisé pour estimer leurs concentrations (Kirk, 2010).

Quatre principaux types d'algorithmes sont employés pour estimer les concentrations de *Chl-a*.

Les algorithmes de rapport de bande de réflexion sont des méthodes empiriques qui établissent une relation entre les bandes spectrales du satellite et la concentration en *Chl-a* (Dierssen, 2010; Matthews, 2011). Elles sont particulièrement efficaces dans les eaux de cas 1 (océaniques) où le phytoplancton est le constituant optiquement dominant (Morel & Prieur, 1977; Morel, 1980). Cependant, en eaux côtières (cas 2), la présence de MES et de CDOM rend les bandes bleue et verte moins sensibles aux variations de *Chl-a*. Il devient alors nécessaire d'utiliser d'autres bandes spectrales, comme le rouge (620-700 nm) et le proche infrarouge (>780 nm), plus sensibles à ces constituants (Bowers *et al.*, 1996).

Les algorithmes basés sur des modèles bio-optiques sont plus robustes. Ils cherchent à modéliser les propriétés optiques intrinsèques (absorption et rétrodiffusion) des constituants de l'eau pour les relier à la réflectance mesurée. Ils sont particulièrement adaptés à l'étude des eaux côtières.

Parmi les algorithmes basés sur l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique, les réseaux de neurones et autres sont de plus en plus utilisés en particulier pour les eaux de cas 2 où les relations optiques sont complexes. Ils exploitent de vastes bases de données comprenant à la fois des mesures *in situ* et des données satellitaires pour « apprendre » à reconnaître les signatures spectrales des différents constituants.

Enfin, les algorithmes de correction atmosphérique visent à supprimer l'influence des aérosols et des gaz atmosphériques sur le signal mesuré par le satellite, afin d'isoler le signal provenant uniquement de la colonne d'eau. C'est un défi technique majeur, surtout pour les zones côtières.

Parmi les outils développés, ACOLITE (*ACOLITE*, s. d.) est spécialement conçu pour la télédétection des milieux aquatiques, notamment les eaux côtières, intérieures ou turbides. Il inclut l'algorithme DSF (Dark Spectrum Fitting), qui repose sur l'hypothèse que dans le proche infrarouge (NIR) et l'infrarouge à ondes courtes (SWIR), la réflectance de l'eau est quasiment nulle, surtout dans les eaux profondes et peu productives. L'algorithme DSF identifie ces pixels sombres dans les bandes SWIR et NIR, et utilise leur quasi-absence de signal pour estimer les propriétés des aérosols atmosphériques. Une fois cette estimation faite, il modélise la contribution atmosphérique sur l'ensemble du spectre et la soustrait aux radiances mesurées pour restituer la réflectance de surface (Rrs). L'approche présente l'avantage de ne pas nécessiter de données *in situ* sur les aérosols, ce qui la rend particulièrement adaptée aux zones isolées comme les Kerguelen. De plus, une version améliorée de l'algorithme DSF utilisant les bandes SWIR a montré une meilleure précision dans les bandes entre 490 et 681 nm, avec moins de bruit dans les environnements côtiers complexes, comparé à d'autres méthodes telles que L2-WFR, POLYMER, C2RCC et SeaDAS (Vanhellemont & Ruddick, 2014, 2018, 2021).

Le processeur C2RCC (Case 2 Regional CoastColour), quant à lui, est un outil développé par l'ESA pour les masses d'eaux dites de « Cas 2 », c'est-à-dire des eaux optiquement complexes, riches en matière organique dissoute, en sédiments et en phytoplancton (Schiller & Doerffer, 1999; Kyryliuk & Kratzer, 2019).

Contrairement à DSF, il est basé sur une approche par inversion, utilisant une grande base de données simulée par transfert radiatif. Ces simulations couvrent une grande diversité de conditions atmosphériques et marines. Un réseau de neurones permet alors de retrouver les propriétés de surface à partir des radiances mesurées au sommet de l'atmosphère. Il permet de faire une correction atmosphérique mais également calculer des produits bio-optiques tels que la concentration en *Chl-a* ou en MES.

Les générations successives de capteurs satellitaires ont largement amélioré la fiabilité et la précision des données. Des pionniers comme CZCS aux capteurs actuels tels que Sentinel-3 ou PACE offrant des bandes spectrales plus nombreuses ou continues et plus fines, ainsi qu'une meilleure résolution spatiale et temporelle. Ces avancées permettent de développer des algorithmes plus performants et de suivre avec une meilleure précision des dynamiques spatiales (étendue des blooms, productivité) et temporelles (développement et dissipation des blooms, variabilité saisonnière et interannuelle) des phénomènes phytoplanctoniques.

Cependant, des défis persistent, notamment la surestimation de la *Chl-a* par les algorithmes standard en eaux très claires ($> 0.12 \text{ mg/m}^3$), touchant une part significative des océans. De plus, seule la couche de surface de l'eau est accessible par télédétection, et les blooms sub-surfaciques restent indétectables. Malgré ces limites, l'intégration des données satellitaires avec les observations *in situ* et les modèles numériques continu de renforcer notre capacité à surveiller et à comprendre le rôle essentiel du phytoplancton dans les écosystèmes aquatiques.

3. Données et méthode

3.1 Site d'étude

Situé dans l'océan Indien, entre 48° et 50° de latitude sud, l'archipel des Kerguelen constitue l'un des cinq districts des Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF). D'origine volcanique, cet ensemble d'îles subantarctiques couvre environ 7 215 km². Le relief y est particulièrement accidenté et montagneux, avec comme point culminant le mont Ross (1 850 m), et la présence notable de la calotte glaciaire Cook à l'ouest. L'archipel représente la partie émergée du plateau océanique Kerguelen-Heard (*Figure 2*), un vaste plateau basaltique formé il y a environ 130 millions d'années (Rotstein *et al.*, 1992; Wallace *et al.*, 2002; Ponthus *et al.*, 2020), résultat de l'activité du point chaud de Kerguelen, qui a façonné l'ensemble de la région depuis le Crétacé.

Le plateau des Kerguelen est situé dans une région du sud de l'océan Indien très dynamique d'un point de vue océanographique. Il est traversé par le courant circumpolaire antarctique (ACC), principal moteur de la circulation océanique mondiale, qui ceinture le continent antarctique et s'écoule d'ouest en est (dans le sens horaire) (Pollard *et al.*, 2009; Wojtasiewicz *et al.*, 2019). Ce courant est structuré selon plusieurs fronts marins, dont le front subantarctique (SAF) et le front polaire (PF), qui interagissent avec la topographie du plateau (100 à 500 m de profondeur) et génèrent une forte hétérogénéité océanographique (Park *et al.*, 1993; Sokolov & Rintoul, 2009). La région est caractérisée par des masses d'eaux froides riches en nutriments, mais pauvres en fer essentiel à la photosynthèse, typiques des zones HNLC (*High-Nutrient, Low-Chlorophyll*) (Minas & Minas, 1992; Pollard *et al.*, 2009). Cependant, la présence d'une fertilisation naturelle en fer des eaux grâce à l'érosion du plateau par les courants, et aux apports sédimentaires des îles (érosion glaciaire et pluies), favorise localement de grandes efflorescences phytoplanctoniques en aval courant (Blain *et al.*, 2007; Quéguiner, 2013). Les températures de surface sont relativement stables et basses, variant généralement entre 1°C et 6°C selon la saison, tandis que les vents dominants d'ouest et les courants de bord de plateau génèrent des remontées d'eau (upwellings) et une intense dynamique de mélange vertical.

Le régime venteux est une caractéristique majeure des Kerguelen. L'archipel est soumis en permanence aux puissants flux d'ouest associés aux « cinquantièmes hurlants », générant des vents moyens de 35 km/h, souvent accompagnés de rafales dépassant 150 voire 200 km/h. Cette dynamique atmosphérique influence fortement la circulation océanique locale (*Figure 3*) et la structure des masses d'eau, jouant un rôle clé dans l'écologie marine régionale (Park *et al.*, 2014).

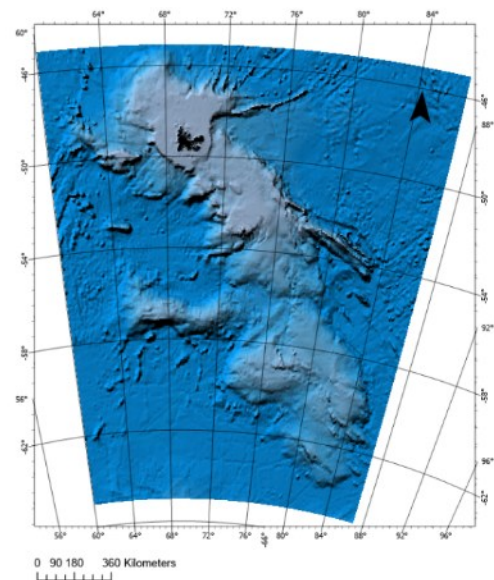


Figure 2 : Localisation des îles kerguelen par rapport aux plateaux continentaux – Sources : GEBCO – Auteure : Léa Moing

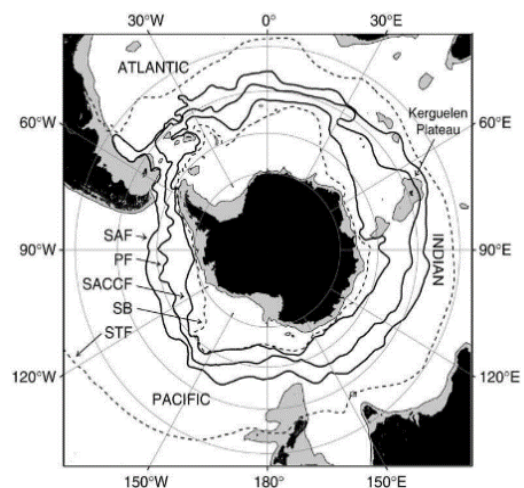


Figure 3 : Distribution circumpolaire du front subpolaire (STF), du front subantarctique (SAF), du front polaire (PF), du front sud de l'ACC (SACCF) et de la limite sud de l'ACC (SB), d'après (Roquet *et al.* 2009).

Ce contexte océanographique confère aux Kerguelen un fort intérêt pour l'étude des écosystèmes et de la biodiversité marine (Améziane *et al.*, 2011; Duhamel *et al.*, 2019), de nombreuses espèces y trouvent refuge pour se reproduire (oiseaux marins, mammifères marins) et se nourrir (krill, poissons démersaux).

3.2 Données

3.2.1 Données collectées *in situ*

Des données collectées *in situ* ont été utilisées pour valider les concentrations de *Chl-a* estimées. Cela permettant d'avoir un suivi des dynamiques spatio-temporelles le plus fiable et objectif possible. Plusieurs sources de données ont été utilisées (*Figure 4*).

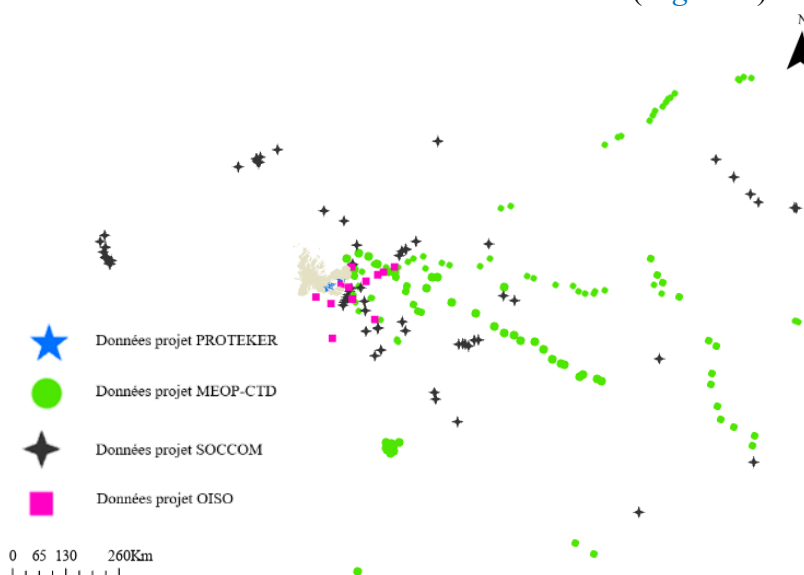


Figure 4 : Carte de localisation des données - Sources : Odatis, 2025 - Auteure : Léa Moing

3.2.1.1 Données côtières

Les campagnes de prélèvement ont été menées de novembre 2021 à décembre 2022 sur trois sites côtiers de l'archipel : Port-aux-Français (PAF), Armor, Baie des Swains (BDS) (étoile bleue sur la *Figure 4*). Sur chaque site, deux prélèvements successifs ont été réalisés en sub-surface (50 cm sous la surface), pour un volume total de 5 à 6 litres prélevés (soit deux fois 2.5 à 3 L d'eau). Ils permettent de constituer des répliques, indispensables pour évaluer la variabilité des mesures. Pour l'analyse de la composition des communautés planctoniques, un sous-échantillon de 100 ml d'eau a été placé dans deux bouteilles de verre brun de 120 ml (un par réplique). Chaque bouteille a été fixée avec 1 ml de solution de Lugol, un agent de conservation qui permet de préserver les cellules planctoniques. Les bouteilles ont ensuite été parafilmées et stockées à +4°C au réfrigérateur.

Chaque prélèvement a été utilisé pour calculer la concentration de deux pigments qui sont présents dans le phytoplancton ; la chlorophylle-a et les phéopigments ; un indicateur standard de la biomasse phytoplanctonique. L'eau a été filtrée au laboratoire Biomar, à Kerguelen sur des filtres en fibre de verre GF/F (porosité 0.7 µm), dans la même journée du prélèvement. Le volume exact filtré a été consigné à chaque fois. Les deux filtres correspondant aux deux répliques ont été conservés séparément dans des tubes de verre, puis regroupés dans un même sac et stockés à -80°C au congélateur.

Les échantillons ont été conservés jusqu'à leur retour en métropole à l'occasion des rotations OP01 du navire océanographique le *Marion Dufresne II*, en 2022 et 2023, pour y être analysés plus en détail à l'Université Libre de Bruxelles.

3.2.1.2 Données collectées *in situ* en domaine hauturier

Pour compléter les données du projet PROTEKER, trois autres sources de données ont été utilisées (OISO, SOCCOM, MEOP-CTD) par le biais du portail Odatis dédié aux données océaniques (<https://data-selection.odatis-ocean.fr/coriolis>) :

- **Programme OISO** (Océan Indien Service d'Observations)

Depuis 1998, les campagnes d'observation océanographiques du programme OISO, parcourent les océans Indien et Austral pour documenter sur le long terme l'évolution des concentrations en CO₂ océanique et l'acidification des océans (carré rose sur la [Figure 4](#)).

L'instrumentation à bord du navire océanographique *Marion Dufresne II* permet de mesurer en continu la température, la salinité et les concentrations de CO₂ des eaux de surface (entre 0 et 5 000 mètres) grâce à une sonde CTD-Rosette (*Conductivity Temperature Depth*). Des analyses d'isotopie et de biochimie (minéraux, pigments) sont ultérieurement réalisées sur des échantillons, au laboratoire LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie : Expérimentations et Approches Numériques), à Paris (Metzl, Nicolas *et al.*, 1998).

- **Projet SOCCOM** (*Southern Ocean Carbon and Climate Observations and Modeling project*).

Lancé en 2014 pour améliorer la compréhension du rôle de l'océan Austral dans le climat mondial et le cycle du carbone (étoile grise sur la [Figure 4](#)). Coordonné par la NSF Office of Polar Programs, avec le soutien de la NOAA et la NASA, ce projet mobilise plus de 20 institutions de recherche à travers le monde.

Il utilise principalement des flotteurs profilants dérivants, similaires aux flotteurs ARGO, mais équipés de capteurs supplémentaires pour mesurer la température, la salinité, l'oxygène dissous, le pH, le nitrate la *Chl-a* et les particules en suspension, fournissant des profils biogéochimiques détaillés dans l'océan Austral, souvent inaccessible par d'autres moyens.

- **Programme MEOP-CTD** (Marine Mammals Exploring the Oceans Pole to Pole) (Roquet *et al.*, 2024) (rond vert sur la [Figure 4](#)).

Ces données reposent sur l'instrumentation de mammifères marins notamment des éléphants de mers. Ils plongent continuellement à de grandes profondeurs (jusqu'à 2 000 mètres), sont équipés de capteurs de CTD-SRDL (*Conductivity-Temperature-Depth Satellite Relay Data Logger*). Ce système, attaché sur l'animal enregistre des profils hydrographiques à chaque plongée et transmet les données via satellite à chaque remontée en surface. Cette méthode, initialement conçue pour étudier les comportements alimentaires des éléphants de mer ([Figure 5](#)), s'est révélée être un outil rentable et très efficace pour collecter des données océanographiques dans les régions mal échantillonnées, notamment sous glace ou sur les plateaux continentaux du sud de l'océan Indien (Charrassin *et al.*, 2008).



Figure 5 : Capteurs sur les éléphants de mers (MEOP-CTD)

Ces trois types de mesures *in situ* fournissent des données pour le large. D'après les travaux de Delille et Bouvy 1989 et Delille, Fiala, et Razouls 1996, pour limiter la variabilité temporelle de la concentration en *Chl-a* entre les valeurs mesurées (*in situ*) et estimées (algorithmes) nous avons sélectionné des données éloignées de 3 jours maximum de la date d'acquisition des images satellitaires. De plus, seules les données issues de prélèvements effectués à moins de

1,6 bars, soit environ 6 mètres de profondeur ont été conservées, car les capteurs satellitaires ne pénètrent que dans les couches superficielles de l’océan, souvent limitées à 10 mètres (2 bars) voire moins dans les eaux turbides. Ce seuil garantit une comparaison fiable entre les concentrations de *Chl-a* mesurées et estimées à partir des observations optiques. Avec chaque jeu de données, il y a une variable de qualité (flag = 1 pour SOCCOM et MEOP-CTD et 2 pour OISO) pour ne garder que les valeurs qui ont été vérifiées et où il n’y a aucun doute sur leur qualité.

3.2.2 Images satellitaires

Le choix de données satellitaires est primordial pour détecter au mieux le phytoplancton le long des zones côtières et au large des îles Kerguelen. Il est indispensable d’utiliser des satellites et des capteurs offrant une résolution spatiale, temporelle et spectrale adéquate aux propriétés optiques de l’océan. Le *Tableau 2* récapitule les caractéristiques des principaux satellites et capteurs employés dans cette étude.

Tableau 2 : Caractéristiques des satellites et des capteurs utilisés

Plateformes	Capteurs	Lancement	Résolution spectrale	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Couverture	Précision radiométrique
Sentinel-3 (ESA)	OLCI (Ocean and Land Colour Imager)	2016	21 bandes	300 m	2-3 jours	1270 km	<2%
Produits globaux (Copernicus Marine)	SeaWiFS, MODIS, MERIS, VIIRS, OLCI	1990	1 bande	4 km	Quotidienne	Global	

Equipant les satellites européens Sentinel-3A (lancé en février 2016) et Sentinel-3B (lancé en avril 2018), OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) est un capteur de couleur de l’océan de nouvelle génération conçu pour les systèmes aquatiques. Construit à partir de l’instrument MERIS (Envisat), OLCI présente des améliorations importantes, notamment une augmentation du nombre de bandes spectrales (21 bandes dans la gamme du visible au proche infrarouge, 400-1020 nm, dont 16 dédiées à la couleur de l’océan), un meilleur rapport signal/bruit, une réduction du bruit solaire par l’inclinaison de la caméra, ainsi qu’une résolution spatiale, temporelle et radiométrique plus importante. Sa résolution spatiale est de 300 mètres (*Sentinel-3 OLCI level 1* | EUMETSAT, s. d.). La combinaison des deux satellites en orbite polaire fournit un temps de revisite de moins de deux jours à l’équateur, avec des fréquences de passage supérieures aux hautes latitudes.

Les images S-3 OLCI Level-1 EFR (Earth Observation Full Resolution) ont été téléchargées depuis la plateforme Copernicus de l’ESA (<https://browser.dataspace.copernicus.eu>). Les données ont été téléchargées au niveau L1 afin d’appliquer des corrections atmosphériques adaptées aux propriétés complexes des masses d’eau des zones d’étude ainsi qu’aux algorithmes de couleur de l’océan.

La correction atmosphérique constitue une étape essentielle et préalable à toute analyse quantitative par télédétection, notamment pour l’estimation fiable de la concentration en *Chl-a*.

Dans un premier temps, 115 images S-3 OLCI Level-1 ont été sélectionnées pour les îles Kerguelen entre avril 2016 et mai 2025 (*Annexe I* : Inventaires des images satellites Sentinel-

3 OLCI disponibles), en fonction de la couverture nuageuse sur le site d'étude. Elles couvrent l'archipel (zones côtières et océan hauturier).

En parallèle de l'analyse des données OLCI, cette étude utilise également des produits globaux de concentrations en *Chl-a* de Copernicus Marine Service (*Global Ocean Colour Bio-Geo-Chemical*, 2023). Ces produits, issus d'une fusion puis une interpolation de données provenant de multiples capteurs de couleur de l'océan (tels que SeaWiFs, MODIS, MERIS, VIIRS, et OLCI) offrent une vision globale et des séries temporelles longues (disponibles depuis 1990) à une résolution spatiale de 4 km et une résolution temporelle quotidienne.

Ces produits globaux offrant une continuité spatio-temporelle essentielle pour le suivi des floraisons phytoplanctoniques ont été utilisés pour trois raisons. D'une part, pour valider et calibrer les concentrations en *Chl-a* dérivées de nos données S-3 OLCI, notamment après l'application de nos propres algorithmes de correction atmosphérique et de détection de phytoplancton. D'autre part, pour replacer nos observations locales des îles Kerguelen dans un contexte océanique plus large, identifiant des tendances et des phénomènes à plus grande échelle qui pourraient influencer la productivité primaire de la région. Et enfin, pour combler les lacunes consécutives à la forte couverture nuageuse qui limite la disponibilité des données.

L'utilisation combinée de ces deux sources de données, l'une à haute résolution (OLCI) et l'autre à couverture globale (Copernicus Marine) (*Global Ocean Colour Bio-Geo-Chemical*, 2023), permet une analyse robuste à multi-échelle des dynamiques du phytoplancton.

3.3 Méthodes

La méthodologie mise en œuvre pour l'analyse des données satellitaires et le suivi des dynamiques spatio-temporelles de l'activité phytoplanctonique de l'archipel des Kerguelen comprend plusieurs étapes (*Figure 6*), allant de l'acquisition des données à leur traitement et à la cartographie des dynamiques. Cette approche s'appuie à la fois sur des images satellites S-3 OLCI, des mesures *in situ* collectées dans le cadre de différentes missions océanographiques (*cf.* 3.2.1 Données collectées *in situ*), sur des traitements d'algorithmes bio-optiques, ainsi que des méthodes statistiques d'analyse comparative pour évaluer la concentration en *Chl-a* à partir d'outils de traitements d'images (SNAP, ArcGIS, Python, R).

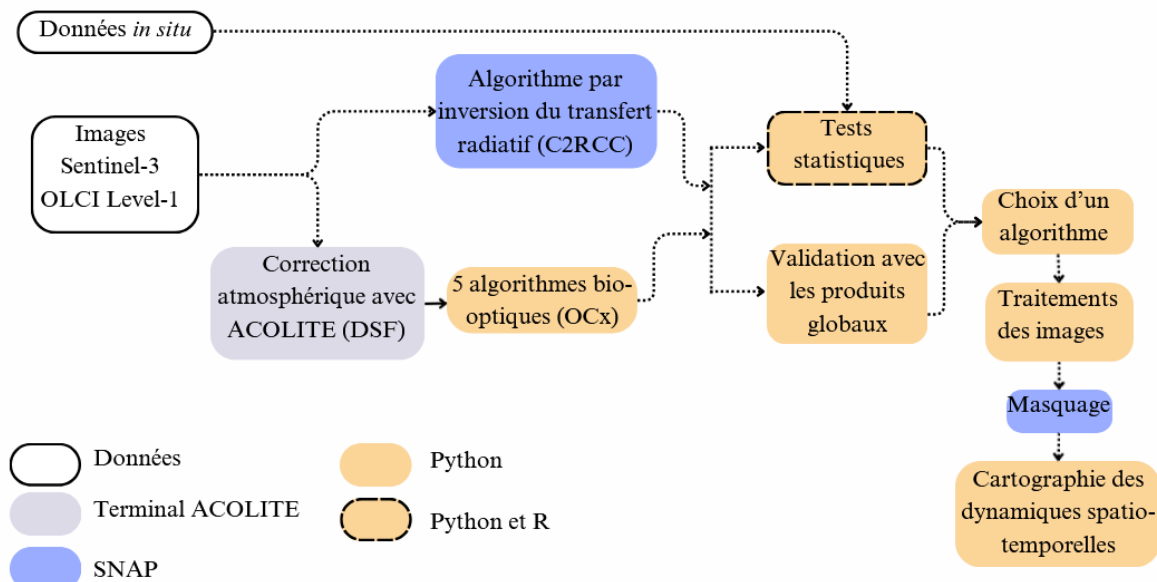


Figure 6 : Organigramme simplifié de la méthodologie générale

Parmi l'ensemble des images disponibles entre 2016 et 2025, seules 27 images ont pu être associées à des données *in situ* avec un décalage maximal de +/- 3 jours, une étape préalable indispensable de validation pour identifier l'algorithme de *Chl-a* le plus adapté à la zone d'étude.

3.3.1 Correction atmosphérique et pré-traitements

Les images S-3 OLCI utilisées sont de niveau 1, c'est-à-dire contenant les radiances mesurées au sommet de l'atmosphère (TOA). Or, plus de 90% de ce signal est d'origine atmosphérique (aérosols, molécules, vapeur d'eau...), tandis que la réflectance réelle de l'eau (R_{rs} , remote sensing reflectance) n'en représente qu'une faible portion. Une correction atmosphérique a donc été réalisée pour permettre toute estimation fiable de *Chl-a*.

Deux algorithmes de correction atmosphérique ont été utilisés, DSF via l'outil ACOLITE et C2RCC. Ils permettent d'obtenir la réflectance de surface (R_{rs}) à partir des radiances satellitaires mesurées, en tenant compte des effets atmosphériques.

Après la correction atmosphérique, les images ont été reprojctées en EPSG : 32742 (WGS 84 / UTM zone 42S) recadrées spatialement et réduite spectralement pour ne conserver que les bandes nécessaires à l'analyse.

3.3.2 Estimation de la concentration en *Chl-a* (mg/m³)

L'estimation de la concentration en *Chl-a* (mg/m³) a été réalisée grâce à deux types d'algorithmes bio-optiques : l'un empirique (OCx, basé sur la couleur de l'océan) et l'autre semi-analytique (basé sur l'inversion du transfert radiatif comme C2RCC).

Des études récentes (O'Reilly & Werdell, 2019; Tilstone *et al.*, 2021; Soriano-González *et al.*, 2022) ont montré les performances des algorithmes OC basés sur le capteur OLCI à l'échelle mondiale, pour les eaux océaniques ouvertes et les zones côtières. Cependant, il y a peu de travaux sur l'évaluation des performances des algorithmes par région, surtout dans une région aussi complexe que les Kerguelen. Dans ce contexte, il est nécessaire de trouver l'algorithme le plus adapté pour les îles Kerguelen.

Six algorithmes ont été testés dont cinq empiriques et un basé sur une inversion du transfert radiatif (*cf.* Détection du phytoplancton par télédétection).

Les cinq premiers suivent une forme polynomiale du type :

$$\log_{10}(Chl - a) = a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + a_3 R^3 + a_4 R^4$$

Où :

$$R = \log_{10} \left(\max \frac{Rrs_{(bleue)}}{Rrs_{(verte)}} \right)$$

Avec $Rrs_{(bleue)}$ correspondant respectivement aux bandes 413, 443, 490 et 510 nm et $Rrs_{(verte)}$ aux bandes 560 et 665 nm. Les coefficients a_0 à a_4 ont été ajustés de manière empirique sur la base de capteurs spécifiques d'OC et de différents algorithmes bio-optiques depuis 1978 (début des missions satellitaires de couleur de l'océan).

Cinq algorithmes bio-optiques de *Chl-a* ont été appliqués dans cette étude, à savoir OC4, OC4Me, OC4S0, OC5 et OC6.

Les bandes utilisées varient selon l'algorithme ([Tableau 3](#)). Ces formules ont été calibrées à partir de séries d'observations satellitaires depuis les années 1980 et sont mises à jour régulièrement depuis 1998 (O'Reilly *et al.*, 1998).

Tableau 3 : Coefficients pour les algorithmes bio-optiques avec le capteur Sentinel-3 OLCI

Algorithme	Bleue	Verte	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
OC4	443 > 490 > 510	560	0.42540	-3.21679	2.86907	-0.62628	-1.09333
OC4Me	443 > 490 > 510	560	0.45027	-3.259491	3.522731	-3.359422	0.9495586
OC4SO	443 > 490 > 510	560	0.366	-2.171	1.280	-0.561	0.093
OC5	413 > 443 > 490 > 510	560	0.43213	-3.13001	3.05479	-1.45176	-0.24947
OC6	413 > 443 > 490 > 510	Mean (560, 665)	0.95039	-3.05404	2.17992	-1.12097	0.15262

OC4Me (Hu *et al.*, 2012; Morel *et al.*, 2007) est l'algorithme de référence présent dans les produits Level-2 de l'ESA. OC4-SO (Ferreira *et al.*, 2022) est un algorithme spécifique à la péninsule Antarctique représentant donc un modèle susceptible de se rapprocher des conditions océaniques de la zone d'étude. Enfin, les trois versions récentes d'OC ; 4, 5 et 6 (O'Reilly *et al.*, 1998; Hu *et al.*, 2012; O'Reilly & Werdell, 2019) ; calibrées pour OLCI sont définies en fonction du nombre de bandes utilisées.

3.3.3 Choix d'un algorithme

L'objectif est de déterminer l'algorithme le plus fidèle aux observations *in situ*, afin de l'appliquer ensuite à la série temporelle complète pour suivre les dynamiques phytoplanctoniques.

Pour cela, 6 algorithmes différents ont été appliqués à 8 images Sentinel-3 OLCI, sélectionnées entre le 07 décembre 2021 et le 16 novembre 2022. Ces images coïncident à plus ou moins 3 jours avec les mesures *in situ* du projet PROTEKER. Elles proviennent de trois stations côtières situées à l'est des Kerguelen : Port-aux-Français (PAF), Baie des Swains (BDS) et Armor.

Après correction atmosphérique (via DSF ou C2RCC) et reprojection (EPSG : 32742), les six algorithmes ont été appliqués à ces images (pour C2RCC la correction atmosphérique et l'algorithme se fait au même moment). Les résultats ont ensuite été comparés aux valeurs mesurées de *Chl-a* afin d'évaluer la performance de chaque algorithme.

Des tests statistiques et des graphiques de comparaisons ont été réalisés pour révéler les tendances éventuelles. Néanmoins, le nombre d'échantillons ($n = 8$) ne permettait pas une analyse assez robuste. Le jeu de données a donc été complété par des observations en océan ouvert : 27 images Sentinel-3 OLCI coïncidant (+/- 3 jours) avec des mesures *in situ* de *Chl-a* ont été sélectionnées. Pour chaque appariement mesures/pixels estimées, une moyenne spatiale sur un carré de 3x3 pixels a été calculée autour de la position des mesures *in situ*, afin de limiter l'effet du bruit spatial. Bien que cela permette d'avoir une meilleure comparaison, il reste difficile d'établir une fiabilité spatiale car les observations sont très dispersées dans l'espace.

3.3.3.1 Tests statistiques non-paramétriques

Pour estimer les algorithmes les plus pertinents à exploiter pour les problématiques en question, nous avons réalisé une analyse statistique comparative afin d'évaluer leurs performances de manière rigoureuse à partir des données *in situ* disponibles (programmes PROTEKER, OISO, SOCCOM et MEOP-CTD).

Les valeurs mesurées de concentrations en *Chl-a* ont servi de référence pour calculer, pour chaque algorithme, trois métriques d'erreur : l'erreur absolue moyenne (MAE), la racine

de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le biais moyen. Ils permettent d'évaluer la précision, la dispersion et la tendance (surestimation et sous-estimation) des estimations.

Un test de Wilcoxon pour échantillons appariés (valeurs mesurée et estimée) a été utilisé sur les séries d'erreurs pour évaluer la significativité des écarts entre les valeurs estimées et mesurées. Lorsque les hypothèses étaient respectées (absence de NaN et variabilité importante des erreurs), un test de Friedman a été utilisé pour comparer l'ensemble des algorithmes de manière globale. Si chaque algorithme présente un biais systématique par rapport aux mesures réelles. Il a été appliqué pour déterminer si des différences significatives existaient entre les performances globales des algorithmes. Comme c'était le cas, un test post-hoc de Dunn (avec correction de Holm) a permis d'identifier les paires d'algorithmes avec des différences significatives.

Un modèle hiérarchique bayésien a également été ajouté avec PyMC (bibliothèque probabiliste de Python) pour estimer les distributions des erreurs absolues par algorithme. Cette modélisation a permis d'attribuer à chaque algorithme une probabilité d'être le plus performant (associé à la plus faible MAE), offrant ainsi une interprétation probabiliste du classement.

3.3.3.2 Analyse statistique comparative par GAMs et comparaison à des données globales de référence

Afin de vérifier la fiabilité spatiale des algorithmes d'estimation de la *Chl-a*, une comparaison statistique approfondie a été réalisée. Il est donc essentiel d'analyser dans quelles mesures les algorithmes parviennent à reproduire les variations, notamment en comparaison avec des produits globaux de référence.

Compte tenu de la faible densité des mesures *in situ*, qui ne permet pas une analyse robuste des dynamiques spatio-temporelles, une sélection de produits globaux (*Global Ocean Colour Bio-Geo-Chemical*, 2023) a été utilisée comme référence. Ces produits couvrent la période de novembre 2021 à décembre 2022 et ont une résolution spatiale de 4 km. Un carroyage de 4 km x 4 km a donc été réalisé, basé sur la grille des produits globaux. Les données Sentinel-3, quant à elles, ayant une résolution de 300 m, ont été moyennées à l'échelle de chaque carreau pour assurer la comparabilité.

Pour chaque date (7 au total), les valeurs de concentration en *Chl-a* ont été extraites dans les zones communes (63 pixels) pour chacun des algorithmes. Deux algorithmes ont été retenus pour l'analyse, OC4SO et C2RCC, les autres ayant été écartés en raison de performances insuffisantes lors des évaluations statistiques précédentes (*cf.* 4. Résultats). L'objectif étant d'évaluer leurs écarts de prédiction (Δ) par rapport aux produits globaux, en fonction de la localisation (latitude, longitude) et du temps.

Une approche de modélisation statistique par GAMs (Generalized Additive Models) a été adoptée afin de capturer les relations non linéaires entre ces écarts et les covariables spatiales et temporelles. Les GAMs permettent une modélisation flexible via des fonctions de lissage (splines), tout en prenant en compte les effets croisés.

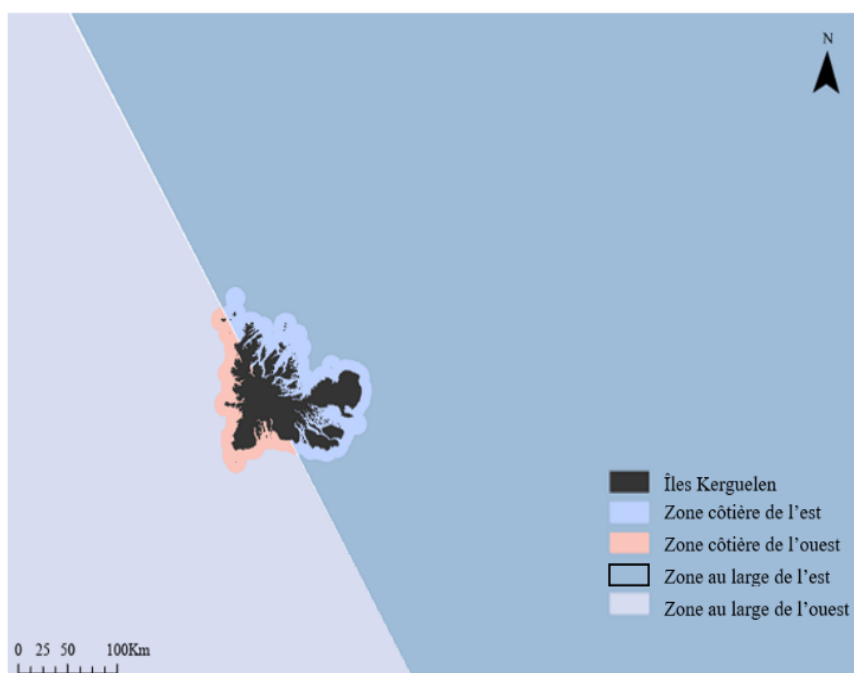
3.3.3.3 Masquage des zones terrestres et des nuages

Un masque de qualité a été appliqué aux images traitées avec l'algorithme en question. Nous avons utilisé le masque IDEPix de SNAP, spécifique à Sentinel-3 OLCI. Il est basé sur une approche de réseau neuronal qui classifie chaque pixel en fonction de sa classe (nuage, ombre de nuage, surfaces terrestres, réflexion spéculaire...).

Après masquage les pixels restants correspondent à la classe eau valide (`quality_flags = 0`). Le masque final de chaque image a été exporté et appliqué automatiquement à chaque bande Rrs pour ne sélectionner que les pixels valides. Ce prétraitement est important pour garantir une fiabilité des calculs spectraux et bio-optiques effectués par la suite.

3.3.3.4 Délimitation du site d'étude en fonction de zones homogènes

La zone a été découpée à dire d'expert (Thomas Saucède), de façon à séparer l'est et l'ouest. Cette information a donc été appliquée pour compléter le découpage de la zone d'étude, aboutissant à différencier quatre sous-zones (*Figure 7*).



*Figure 7 : Carte de localisation des zones (hauturières et côtières) –
Auteure : Léa Moing, 2025*

4. Résultats

4.1 Choix de l'algorithme d'estimation de la concentration en *Chl-a*

Les résultats obtenus avec les différents algorithmes ont des patrons spatiaux assez similaires (*Figure 8*), le choix de l'algorithme va donc reposer sur les différences temporelles et sur la cohérence avec des données de références.

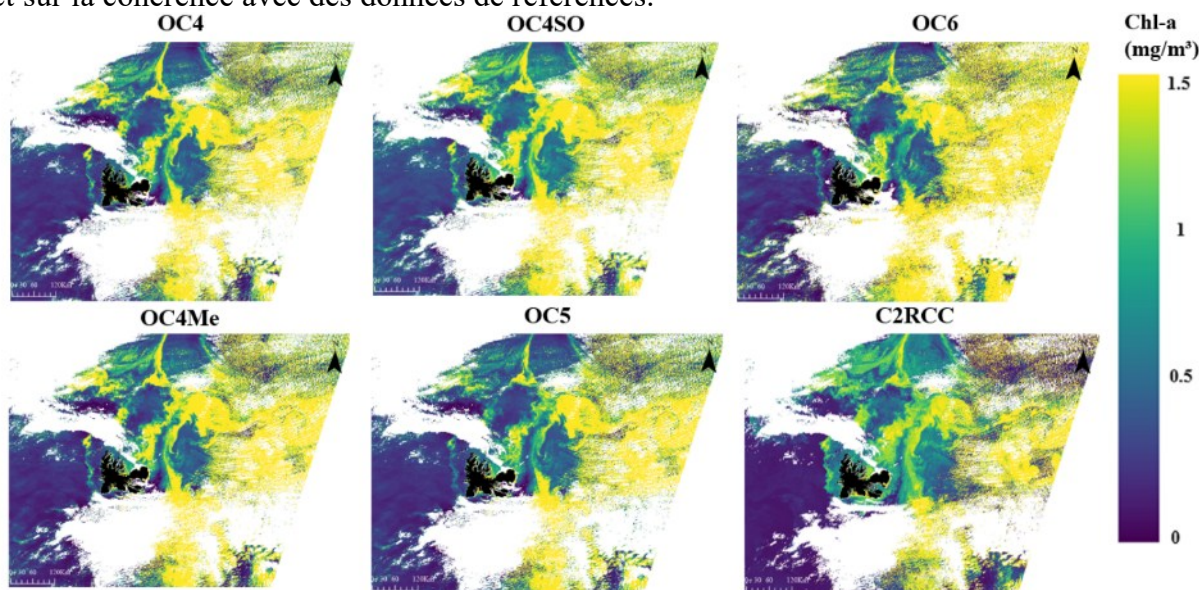


Figure 8 : Comparaisons des algorithmes le 16 novembre 2022

4.1.1 Comparaison entre algorithmes et avec des données *in situ*

Des efflorescences de phytoplancton à l'est et au nord-est des Kerguelen sont présentes pour les six algorithmes testés mais la concentration en *Chl-a* varie selon les modèles (*Figure 9*).

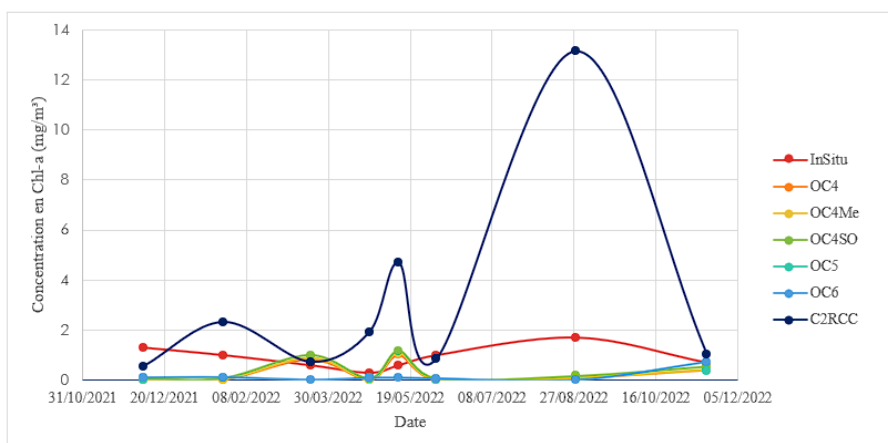


Figure 9 : Concentrations en *Chl-a* estimées versus mesurées à la station Port-aux-Français

entre algorithmes et qui permettraient de choisir le meilleur (*Annexe II* : Comparaison des valeurs mesurées (*in situ*) et estimées (6 algorithmes) à la station BDS *Annexe III* : Comparaison des valeurs mesurées (*in situ*) et estimées (6 algorithmes) à la station Armor). Par exemple, à PAF (*Figure 9*), il n'y a pas d'algorithme qui suive précisément les données obtenues *in situ* mais les algorithmes de type OCx donnent des résultats similaires car ils ont la même architecture. La plupart ont tendance à sous-estimer les valeurs mesurées. A l'inverse, C2RCC surestime les valeurs par rapport aux données de terrain.

Il faut alors faire une comparaison appariée entre valeurs mesurées et estimées pour chaque pixel (3x3 pixels autour du pixel cible).

Pour les stations PAF, BDS et Armor (projet PROTEKER), les comparaisons ne mettent pas en évidence de tendances ou d'écarts marqués

Les données disponibles du programme PROTEKER ($n = 8$) sont trop peu nombreuses pour valider un algorithme ou pour mettre en évidence plus des tendances qui ressortent clairement. Le jeu de données est donc complété par des mesures provenant d'autres missions océanographiques (OISO, SOCCOM, MEOP-CTD). Cependant, les mesures sont trop dispersées spatialement pour permettre une comparaison statistique spatio-temporelle.

Trois métriques d'erreur ont été calculées pour ces données (MAE, RMSE, biais) (Figure 10).

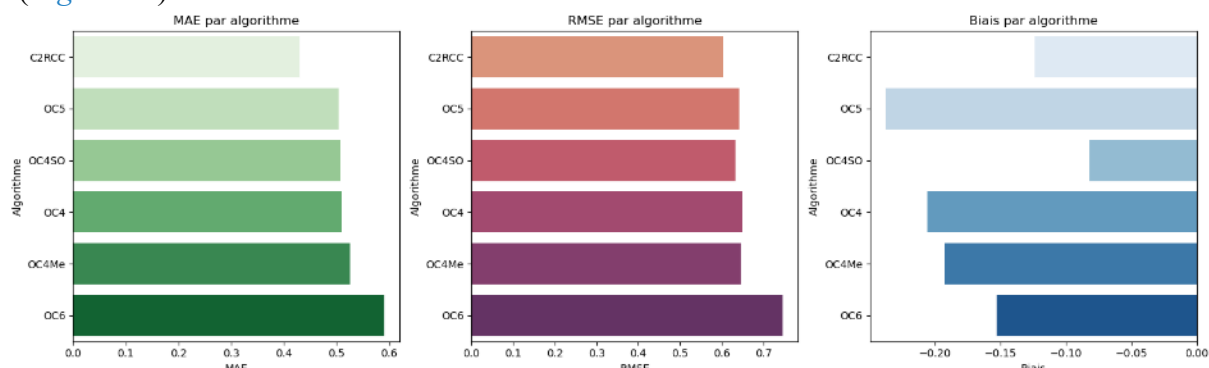


Figure 10 : Trois métriques d'erreurs en fonction des algorithmes

C2RCC a les plus faibles MAE (0.43) et RMSE (0.60), avec la meilleure performance en termes d'erreurs. Tandis qu'OC4SO a le biais le plus faible (-0.08) malgré une MAE (0.51) et une RMSE (0.63) moins précises, et non-significatives (test de Wilcoxon avec $p\text{-value} = 0.27 > 0.05$) traduisant une absence d'erreur systématique.

Les autres algorithmes (OC4, OC4Me, OC5 et OC6) ont eu des performances inférieures indiquant un biais systématique significatif ($p\text{-value} < 0.05$).

Le test de Friedman est très significatif ($p\text{-value} = 387.8153 > 0.0001$), confirmant une différence de performance significative entre algorithmes.

Le test post-hoc de Dunn avec correction de Holm (Figure 11) ne montre pas de différences significatives entre C2RCC et OC4SO ($p\text{-value} = 1$). Cependant, ils dépassent largement les autres algorithmes, avec des $p\text{-values} < 0.05$ dans toutes les comparaisons. Et, ces algorithmes semblent similaires entre eux ($p\text{-value} = 1$).

C2RCC et OC4SO sont donc les deux meilleurs algorithmes selon l'analyse statistique non-paramétrique réalisée car ils sont les plus précis. Cependant, le test de Dunn montre qu'il n'y a pas de différences statistiques significatives entre C2RCC et OC4SO, malgré des poids différents. Cela sous-entend que ce sont tous les deux des choix pertinents.

Le modèle hiérarchique bayésien montre que C2RCC a le plus de chance d'être le meilleur à 76 %. Tandis qu'OC4SO est à 5.9%.

Les résultats précédents indiquent que C2RCC serait le meilleur algorithme parmi ceux testés. Cependant, l'observation visuelle des valeurs absolues d'erreur montrent que OC4SO est meilleur. Cette différence s'explique par le fait que le modèle bayésien fournit une probabilité globale de supériorité en tenant compte des incertitudes. Au contraire, OC4SO, même s'il n'a pas un biais important et des erreurs importantes et qu'il soit conçu pour cette

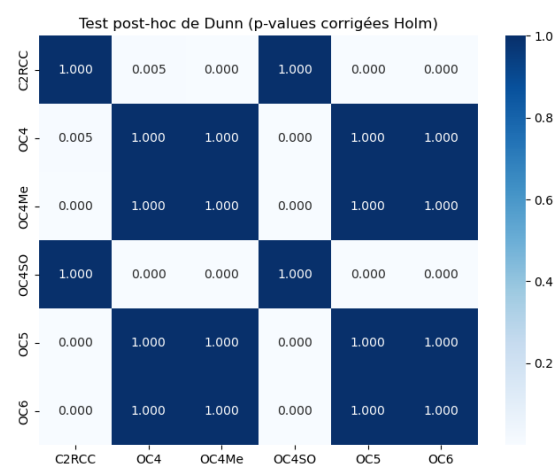


Figure 11 : Test post-hoc de Dunn ($p\text{-values}$ corrigées avec Holm)

région, n'est pas classé comme le « meilleur » en termes probabilistes globaux sur l'ensemble des données. Or, dans le cadre de cette étude, l'objectif principal n'est pas tant l'exactitude des valeurs absolues mais le suivi des dynamiques spatio-temporelles.

4.1.2 Comparaison avec les modèles globaux

Pour les deux algorithmes qui semblent les plus appropriés (C2RCC et OC4SO), les modèles ont été ajustés et leurs prédictions visualisées avec des intervalles de confiance. Les résultats mettent en évidence des différences marquées entre les deux algorithmes (*Figures 12, 13, 14*) (*Annexe IV* : Ecart de prédiction entre OC4SO et C2RCC selon la longitude, la latitude et la date).

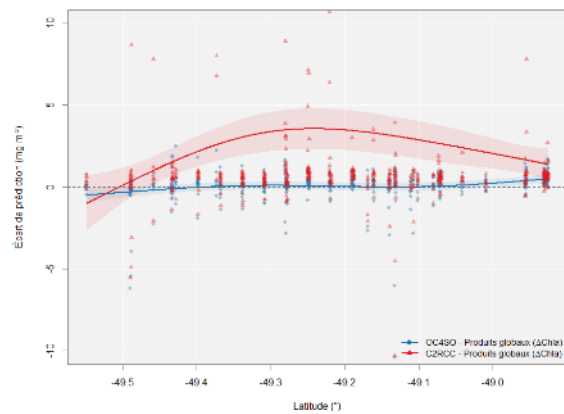
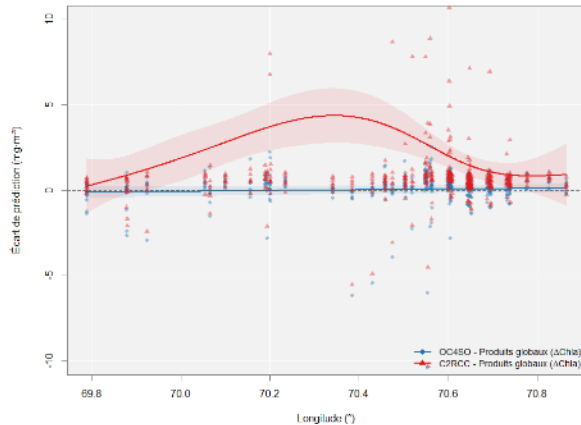


Figure 12 : Ecart de prédiction en fonction de la longitude Figure 13 : Ecart de prédiction en fonction de la latitude

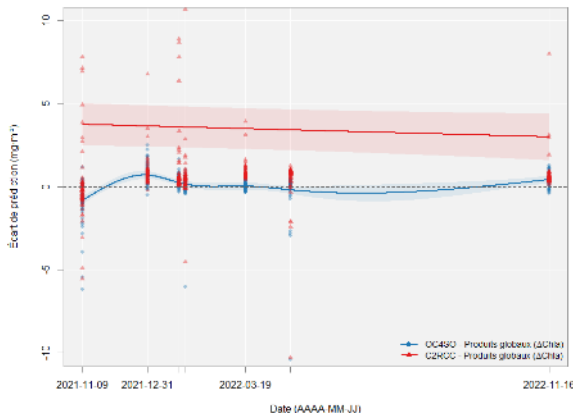


Figure 14 : Ecart de prédiction en fonction de la date

OC4SO montre une bonne stabilité. Les écarts par rapport aux produits globaux sont faibles, sans biais systématique, et avec une variabilité d'erreur limitée (bandes de confiance étroites), que ce soit en fonction de la latitude, la longitude ou de la date. Tandis, que C2RCC présente un biais positif systématique, avec une tendance générale à surestimer la concentration en *Chl-a*, ainsi qu'une variabilité d'erreur plus importante (bandes de confiance plus larges et dispersion importante des points).

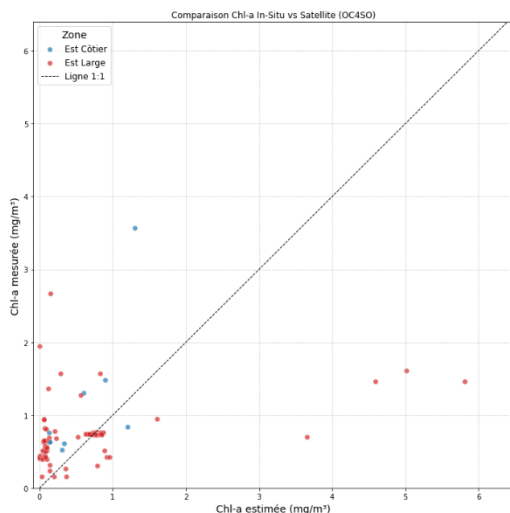


Figure 15 : Comparaison de la concentration de *Chl-a* mesurées (in situ) et estimées (OC4SO)

Ces résultats peuvent s'expliquer par l'architecture des algorithmes : les produits globaux, tout comme OC4SO, sont issus de modèles empiriques (Garnesson *et al.*, 2019), tandis que C2RCC repose sur une inversion de modèle bio-optique de transfert radiatif. Cette différence de méthodologie pourrait expliquer la meilleure cohérence d'OC4SO avec les produits globaux.

L'écart de prédiction en fonction de la latitude (*Figure 13*) est plus important que celui de la longitude (*Figure 12*) indiquant une variation entre l'ouest et l'est des îles Kerguelen.

Ceci vient confirmer les dires d'expert selon lesquels nous avons divisé nos images en fonction de l'est à l'ouest en plus de zones côtières et océan ouvert. De même pour l'écart en fonction de la date (*Figure 14*), la variation est plus soutenue lors des périodes de blooms avec une forte concentration en *Chl-a* (31/12/2021 et 16/11/2022).

Les données mesurées (*in situ*) et estimées (calculées avec OC4SO) (essentiellement des échantillons à l'est des Kerguelen) ont été comparées entre zones d'étude (*Figure 15*). L'objectif est de tester si l'algorithme retenu, OC4SO, estime différemment les valeurs.

Les mesures estimées sont pour la plupart situées sous la ligne 1:1 de référence (valeurs mesurées et estimées égales) indiquant une surestimation de la concentration en *Chl-a* par rapport aux mesures, surtout en milieu hauturier. La dispersion des valeurs est assez importante soulignant une estimation peu précise.

Le modèle semble mieux fonctionner lorsque ce sont des valeurs faibles (inférieures à 1 mg/m³) : les mesures sont plus proches de la ligne de référence. Plus la concentration en *Chl-a* est importante, plus l'écart est important.

La différence de dispersion entre zones côtières et milieu hauturier est assez conséquente. Les valeurs semblent surestimées pour le domaine hauturier alors qu'en zones côtières, elles semblent sous-estimées.

Cette méthode d'estimation de concentration en *Chl-a* a donc des limites. Mais elle montre qu'il est judicieux d'analyser les dynamiques spatio-temporelles par zone, car elles peuvent différer significativement entre elles.

4.2 Dynamiques spatio-temporelles de l'activité phytoplanctonique

4.2.1 Variabilité intra-annuelle

4.2.1.1 Cycle saisonnier moyen (2016-2025)

L'évolution de concentration moyenne pluriannuelle de *Chl-a* sur la période 2016-2025 traduit la dynamique saisonnière de l'activité chlorophyllienne aux îles Kerguelen (*Figure 16*).

Malgré une forte variabilité interannuelle, cette dynamique saisonnière est relativement constante (*Figure 17*).

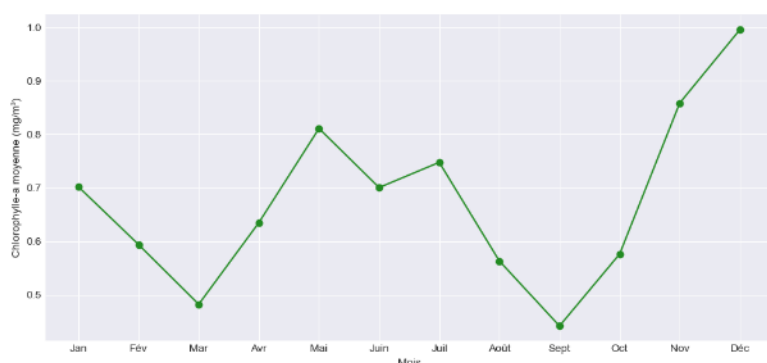


Figure 16 : Cycle saisonnier moyen de concentrations en *Chl-a* sur la période 2016-2024

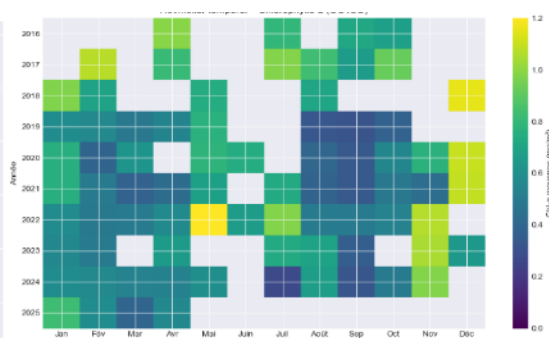


Figure 17 : Concentrations en *Chl-a* en fonction du mois sur la période 2016-2024 (Hovmöller graph)

Un pic d'activité (bloom) apparaît de fin octobre à début février (mi-printemps jusqu'en été austral) avec un maxima (> 1 mg/m³) entre novembre et décembre.

Cette période de plus forte productivité vient après la fin de l'hiver austral (septembre et octobre), où les concentrations en *Chl-a* sont faibles (< 0.5 mg/m³).

Des contrastes saisonniers notables sont aussi visibles. Le mois de septembre (période de faible productivité) et le mois de décembre (pic saisonnier de productivité phytoplanctonique) montrent d'importants contrastes (*Figure 18*) (*Annexe V* : Comparaison des périodes de faible et forte productivité entre 2019 et 2024).

En septembre, les concentrations en *Chl-a* sont faibles ($< 0.5 \text{ mg/m}^3$) dans toutes les zones, confirmant une faible productivité à la fin de l'hiver austral. Tandis qu'en décembre, des blooms intenses apparaissent principalement à l'est, au sud-est de l'archipel, et plus étendus, avec des concentrations allant jusqu'à 1.5 mg/m^3 comme en 2021 et 2024.

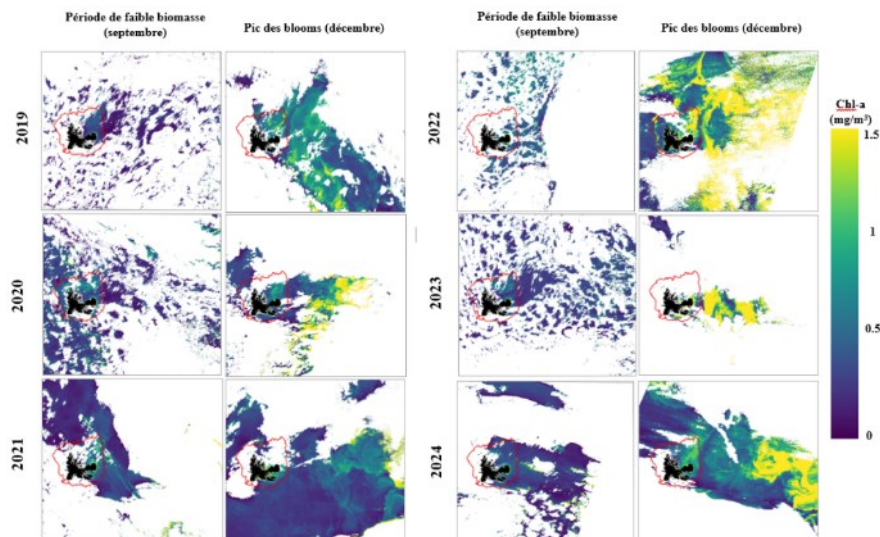


Figure 18 : Comparisons de deux mois avec une productivité opposée

Les blooms varient spatialement d'une année à l'autre. En 2020, le bloom est concentré vers le nord-est, tandis qu'en 2021-2024, il est plus étendu vers le sud et l'est.

4.2.1.2 Comparaison des variations saisonnières entre zones côtières et hauturières

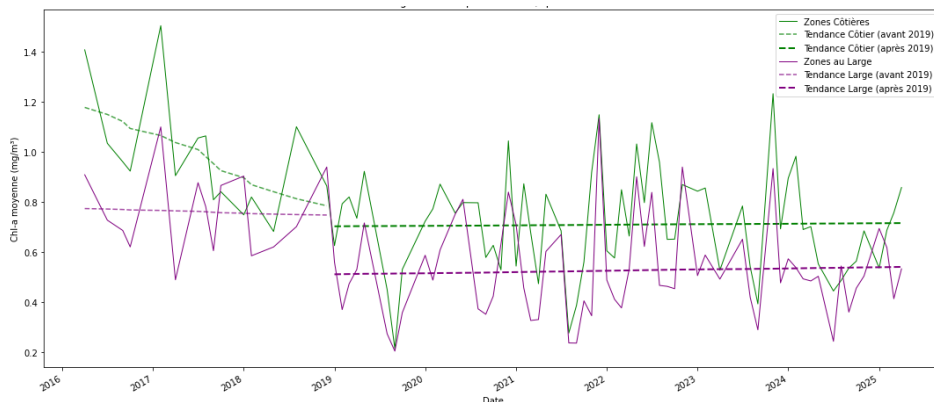


Figure 19 : Evolution mensuelle de la *Chl-a* (zones côtières vs océan ouvert)

En zones côtières, les valeurs sont en moyenne plus élevées qu'en milieu hauturier, avec des amplitudes plus importantes. Par exemple, des pics atteignent plus de 1.4 mg/m^3 en janvier 2017 en zones côtières, tandis que les valeurs en zone hauturière approchent de 1 mg/m^3 seulement.

Cette différence s'exprime par une variabilité saisonnière plus visible près des côtes : les amplitudes mensuelles y sont plus importantes, et les blooms apparaissent plus fréquents et systématiques, bien que leur intensité et leur durée varient d'une année à l'autre avec des durées et des intensités variables d'une année à l'autre. En comparaison, l'océan ouvert montre une dynamique plus atténuée, avec des pics moins fréquents et/ou moins marqués.

Sur la période 2016-2025, les courbes suggèrent moins une tendance linéaire à la baisse qu'un changement brutal en début d'année 2019, correspondant à un décalage du niveau moyen des concentrations. Ainsi, en zones côtières, les valeurs passent de 0.9 à 0.65 mg/m^3 en

moyenne, soit $0.0034 \text{ mg/m}^3/\text{mois}$, tandis qu'en milieu océanique, la diminution est de 0.65 à 0.45 mg/m^3 , soit $0.0026 \text{ mg/m}^3/\text{mois}$.

Ces résultats confirment que les zones côtières des Kerguelen ont une productivité plutôt élevée et une variabilité saisonnière marquée, alors que le milieu océanique environnant montre une dynamique plus homogène mais globalement en diminution depuis 2019 (*Figure 19*).

4.2.2 Variabilité interannuelle

4.2.2.1 Evolution interannuelle des concentrations

L'évolution de la moyenne mensuelle de la concentration en *Chl-a* montre une variabilité interannuelle conséquente au cours de la période 2016-2025 (*Figure 20*).



Figure 20 : Evolution mensuelle de la concentration en *Chl-a* (2016-2025)

Plutôt qu'une tendance générale continue, le signal est marqué par un changement net autour de 2019, ce qui justifie l'ajustement de deux tendances distinctes avant et après cette date. Cette rupture est cohérente avec un « shift » structural plutôt qu'une évolution linéaire unique sur l'ensemble de la période.

Au sein de cette dynamique, certaines années se distinguent particulièrement par l'amplitude de leurs fluctuations. Par exemple, 2019 et 2022 présentent des valeurs maximales nettement supérieures aux autres années. Cette variabilité concerne surtout les pics observés en première partie de l'année (été austral), qui apparaissent très marqués certaines années alors qu'ils sont quasiment absents d'autres années. En revanche, les maxima de fin d'année (automne et hiver austral) restent relativement constants d'une année l'autre, suggérant que la variabilité saisonnière se concentre principalement sur la période de début de l'année.

4.2.2.2 Différences interannuelles entre les zones est et ouest

La comparaison des concentrations en *Chl-a* entre les régions est et ouest des Kerguelen (*cf. Figure 7*) montre une variabilité interannuelle et des dynamiques temporelles assez synchrones tant en concentrations qu'en variabilité (*Figure 21*).

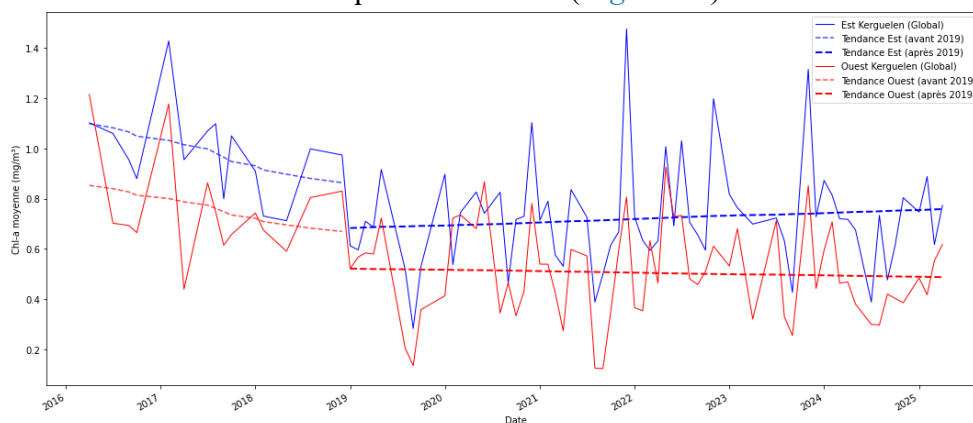


Figure 21 : Evolution mensuelle de la *Chl-a* (est vs ouest)

L'évolution mensuelle de la concentration de *Chl-a* à l'est et l'ouest des Kerguelen illustre la forte variabilité interannuelle. Les pics entre les deux zones sont différents d'un point de vue de concentration mais sont plutôt bien synchronisés. Des épisodes de fortes divergences sont apparents. Par exemple, en 2017, la saisonnalité des blooms semble être la même entre l'est et l'ouest sauf une concentration plus faible de *Chl-a* (est sup à 1.4mg/m³ et ouest à 0.8 mg/m³). En 2021, les schémas de saisonnalité des blooms semblent similaires pour l'est et l'ouest, mais avec une intensité différente. A l'est, les concentrations sont supérieures à 1.4 mg/m³ et à l'ouest elles n'excèdent pas 0.8 mg/m³. Les concentrations à l'est montrent une chute plus prononcée que celles de l'ouest (en septembre).

La concentration à l'ouest est rarement supérieure à 1 mg/m³ alors qu'à l'est, rare sont les pics inférieurs à 1 mg/m³ en partie lors des périodes printanières et estivales.

4.2.2.3 Différences entre zones côtière et hauturière

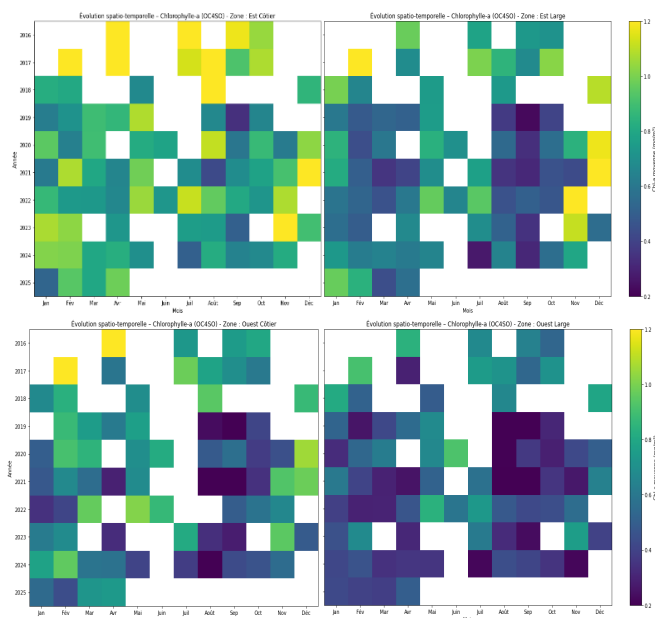


Figure 22 : Evolution mensuelle en fonction de la région

côtière, il n'y a pas de période basse comme au large, l'activité chlorophyllienne semble soutenue tout au long de l'année, malgré un léger ralentissement en aout-septembre. Il y a également une variabilité interannuelle importante pour cette zone. Par exemple, en janvier 2023 la concentration de *Chl-a* est de 1 mg/m³ alors qu'en janvier 2025 elle est de 0.6 mg/m³.

Ainsi, les différences déjà prononcées entre les régions côtières et hauturières s'intensifient avec la comparaison est et ouest. Dans l'est, les régions côtières subissent des blooms intenses et réguliers (> 1 mg/m³) en été austral, qui peuvent parfois être prolongées. Les zones au large, quant à elles, montrent des blooms plus tardifs, occasionnelles et de moindre ampleur, associées aux dynamiques de transition océanographique (convergences antarctiques). Cependant, à l'ouest, la productivité est généralement inférieure : les blooms sont moins puissants et moins fréquents, que ce soient près des côtes ou au large, reflétant un milieu plus oligotrophe et moins propice à d'énormes développements de phytoplancton.

Ces comparaisons révèlent des différences marquées en termes de dynamiques chlorophylliennes entre les zones côtières et hauturières d'une part, et entre les régions est et ouest d'autre part. Elles témoignent de l'impact conjoint des facteurs locaux (bathymétrie, apports côtiers, courants) et régionaux (circulation océanique, vents d'ouest, structures frontales) sur la productivité de l'archipel des Kerguelen.

La différence entre zones côtière et hauturière est d'autant plus nette que les régions est et ouest sont observées séparément (Figure 22) (Annexe VI : Evolution mensuelle en fonction de la région (est/ouest/large/côtier)).

A l'est, les zones côtières ont une concentration plus élevée qu'au large. Les blooms intenses (> 1 mg/m³) se trouvent entre les mois d'octobre et de février malgré des anomalies entre juillet et septembre (hiver austral) pour 2016, 2017 et 2018 (>1.2 mg/m³). Dans l'océan ouvert, les pics supérieurs à 1 mg/m³ sont rares et limités en été austral (novembre à janvier). Il y a une période de faible activité chlorophyllienne (< 0.5 mg/m³) d'août à octobre correspondant à la fin de l'hiver et le début du printemps. En zone

5. Discussion

5.1 Dynamiques spatio-temporelles de la *Chl-a* dans les eaux des Kerguelen

Les résultats précédents ont mis en évidence une forte variabilité spatiale (côtier vs large, est vs ouest) et temporelle (intra- et interannuelle) de concentrations en *Chl-a*, pouvant être cohérente avec les observations obtenues par le projet KEOPS (Blain *et al.*, 2007, 2008; Chever *et al.*, 2010; Planchon *et al.*, 2015). Cette variabilité est liée aux caractéristiques topographiques et à la configuration des courants marins du plateau des Kerguelen, qui conditionnent les apports en nutriments et le développement des blooms phytoplanctoniques.

Les pics d'activité chlorophylliennes sont soutenus par un apport naturel en fer (Blain *et al.*, 2007; Mongin *et al.*, 2009) issu de la diffusion et de la remise en suspension des sédiments du plateau peu profond (< 1000 m), des apports terrigènes et glaciaires (érosion côtière, précipitations, ruissellements), des remontées d'eaux profondes enrichies (upwellings).

La topographie du plateau est également déterminante pour ces dynamiques, en interagissant avec le courant circumpolaire antarctique (ACC). Cela crée des gyres qui piègent localement les eaux enrichies en fer et maintiennent un apport soutenu en nutriments pour le phytoplancton (Park *et al.*, 2008, p. 20). Au nord-est des Kerguelen, un bloom récurrent apparaît chaque année entre fin octobre et début février, avec des concentrations élevées en *Chl-a* (> 1.5 mg/m³) (Mongin *et al.*, 2008).

Comme expliqué plus haut (*cf.* 4.2.1.2 Comparaison des variations saisonnières entre zones côtières et hauturières), il y a à l'est de l'archipel, des concentrations plus importantes en *Chl-a* qu'à l'ouest dû à une meilleure rétention des masses d'eau enrichies et à des remontées locales liées à la faible profondeur. À l'ouest, les masses d'eau sont plus instables créant une dispersion et diminuant la rétention du fer.

Un gradient similaire se produit aussi entre zones côtières et hauturières. Un contraste côtier/large s'ajoute donc au contraste est/ouest traduisant l'affaiblissement de la source de fer à mesure que l'on s'éloigne des côtes (Mongin *et al.*, 2008). Dans les zones côtières, la productivité est renforcée par des apports terrigènes, notamment en fer, associés au ruissellement et aux précipitations pouvant affecter la salinité des masses d'eaux et donc l'apport et la distribution des nutriments. Ces enrichissements soutiennent des blooms phytoplanctoniques plus marqués et plus durables près des côtes. À l'inverse, les eaux du large sont donc moins nourries par ces apports et sont plus oligotrophes (pauvres en nutriments pendant une partie de l'année) (Sedwick *et al.*, 2002; Mongin *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2014; Thomalla *et al.*, 2023).

Durant l'été, le réchauffement des eaux de surface intensifie la stratification, diminuant le mélange vertical mais améliorant la quantité de lumière disponible pour la photosynthèse du phytoplancton. Ces conditions favoriseraient les blooms plus intenses mais limités spatialement. Dans le sud de l'océan Indien, les macronutriments (nitrates, silicates, phosphates) sont naturellement abondants ; la disponibilité en fer est la principale source de variation à l'origine des dynamiques spatio-temporelles observées (Mongin *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2014; Sedwick *et al.*, 2002; Thomalla *et al.*, 2023).

5.2 Limites des données et de l'algorithme OC4SO

L'algorithme OC4SO a tendance à surestimer les concentrations en *Chl-a*, surtout en zone côtière, même s'il a été optimisé pour l'océan Austral (Ferreira *et al.*, 2022). Cette surestimation est liée à la complexité optique des masses d'eau et aux particules en suspension (matière organique et sédiments) qui absorbent dans la même longueur d'onde que la *Chl-a*, perturbant ainsi sa détection. Ces biais sont particulièrement marqués et hétérogènes dans les eaux côtières, telles que celles observées autour des Kerguelen, où la turbidité et la fluctuation des particules

non-phytoplanctoniques sont significatives (Antoine *et al.*, 1996; Werdell *et al.*, 2013). Ces disparités sont apparentes dans la comparaison entre les valeurs mesurées *in situ* et les valeurs estimées (Figure 23) au niveau des 3 stations (PAF, BDS et Armor).

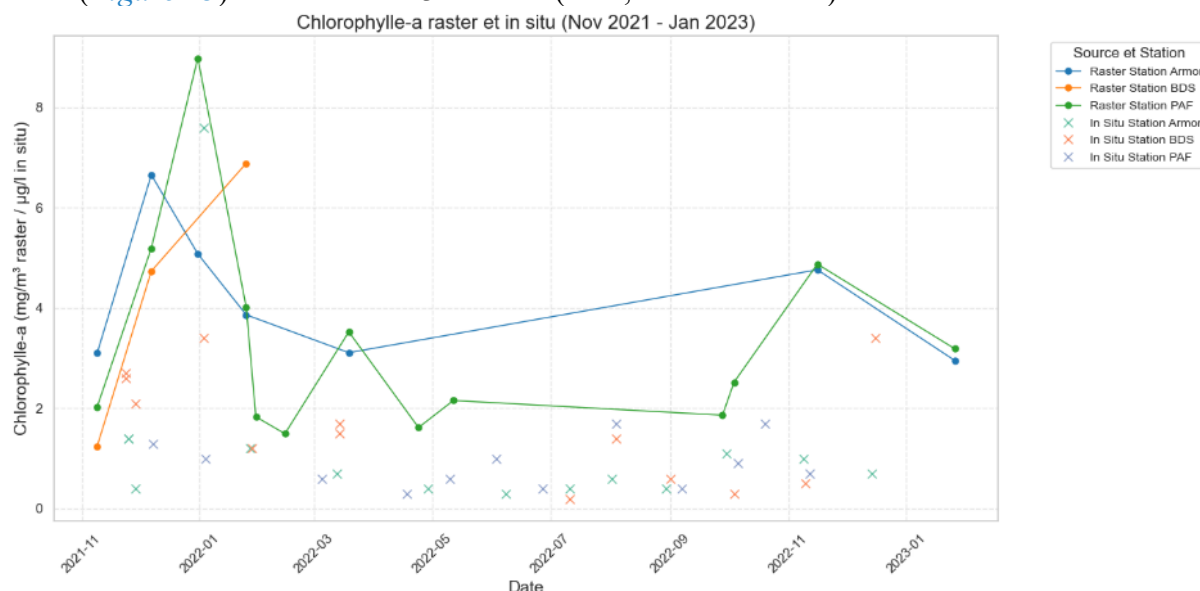


Figure 22 : Comparaison entre valeurs mesurées (*in situ*) et estimées (OC4SO) aux stations PAF, BDS et Armor

Plusieurs recherches mettent l'accent sur l'importance de concevoir des algorithmes régionaux, capables d'intégrer les signatures optiques locales ainsi que la variabilité saisonnière et spatiale des eaux riches en fer et en particules (Mongin *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2008). Les conditions côtières, la stratification estivale et les apports en nutriments engendrent des conditions où OC4SO pourrait surestimer la *Chl-a*, tandis que les algorithmes globaux restent ajustés pour des eaux plus homogènes.

De plus, une étude récente (Dutkiewicz *et al.*, 2019) a estimé la couleur de l'océan à l'horizon 2100 selon le scénario RCP 8.5 du GIEC (le plus pessimiste) : les changements sont davantage attendus dans la composition des communautés phytoplanctoniques que dans la concentration en *Chl-a* directement. Les algorithmes actuels seront sûrement obsolètes d'ici la fin du siècle. Les auteurs conseillent alors de les mettre à jour régulièrement et de les calibrer avec des données terrain (références biblio ici). Ceux qui fonctionneraient le mieux et seraient les plus robustes devront prendre en compte la *Chl-a*, mais aussi la teneur en particules et la matière organique dissoute à la surface des océans.

Enfin, les contraintes associées aux données représentent un autre élément limitatif. Dans l'océan Austral, le grand nombre de nuages diminue la disponibilité des images satellites, alors que les relevés *in situ* sont ponctuels et restreints dans l'espace et le temps. L'association de lacunes dans les données et de contraintes algorithmiques met en évidence le besoin de concevoir des stratégies hybrides, qui fusionnent les observations sur le terrain, les mesures par satellite et les modèles régionaux, afin d'obtenir des évaluations plus précises du *Chl-a* autour des Kerguelen.

5.3 Perspectives de recherches

Pour améliorer la compréhension et la modélisation des dynamiques de *Chl-a* autour des Kerguelen, il serait intéressant d'explorer plusieurs axes de recherches.

5.3.1 Vers un algorithme spécifique aux Kerguelen

Les informations *in situ* rassemblées autour des Kerguelen sont pour l'instant insuffisantes, surtout dans les régions littorales où il n'y a que quelques relevés, principalement grâce à

l'initiative du projet PROTEKER. Cette rareté complique la création d'un algorithme bio-optique véritablement ajusté à cette zone et tenant compte des particularités des eaux subantarctiques. Toutefois, diverses stratégies peuvent être envisagées pour pallier ce déficit de données.

5.3.1.1 Utilisation de données de régions similaires

Une première approche pourrait consister à augmenter l'échantillonnage des données en ajoutant des observations issues d'autres îles subantarctiques comme Crozet ou la Géorgie du Sud. Ces zones sont dotées de caractéristiques écologiques et océanographiques comparables : elles sont influencées par l'ACC, bénéficient d'un apport en nutriments importants, et connaissent des blooms saisonniers de diatomées stimulées par ces nutriments (Blain *et al.*, 2007; Korb *et al.*, 2012). L'incorporation des informations recueillies lors d'opérations telles que KEOPS aux Kerguelen (Blain *et al.*, 2007) ou CROZEX autour de Crozet (Pollard *et al.*, 2009) contribuerait à consolider les fondements de la calibration et de la validation des algorithmes. De même, des études autour de la Géorgie du Sud (Atkinson *et al.*, 2001; Korb *et al.*, 2004) ont souligné l'importance de l'interaction entre la topographie, le mouvement des eaux et la disponibilité en fer pour déterminer la dynamique des communautés phytoplanctoniques.

Cette approche aiderait à renforcer la robustesse et la généralisation des algorithmes, en prenant en compte une plus grande variété de conditions environnementales.

5.3.1.2 Modélisation bio-optique

La modélisation bio-optique est une autre approche qui s'appuie sur les liens entre les composants de l'eau (phytoplancton, matière organique dissoute, sédiments) et leurs caractéristiques optiques (absorption, rétrodiffusion). Associées à des modèles de transfert radiatif, ces corrélations permettent de reproduire la réflectance captée par les satellites (Mobley, 1994; Arnone *et al.*, 2006). Il y a deux avantages : produire des ensembles de données synthétiques englobant une vaste diversité environnementale, y compris des conditions rarement échantillonnées sur le terrain ; proposer un environnement physique cohérent pour évaluer la fiabilité des algorithmes face à la complexité des eaux subantarctiques.

Concernant les Kerguelen, ces modèles pourraient simuler des conditions spécifiques telles que les apports sédimentaires liés aux glaciers ou l'enrichissement en fer, dans le but d'élaborer des algorithmes plus appropriés aux spécificités régionales.

5.3.1.3 Approches semi-analytiques et par inversion de transfert radiatif

Les algorithmes semi-analytiques et d'inversion de modèles de transfert radiatif constituent également une autre voie à envisager. Des techniques telles que le QAA (Algorithme Quasi-Analytique, Lee *et al.*, 2002) ou GSM01 (Garver-Siegel-Maritorena,) sont en mesure de déterminer indépendamment les apports des divers composants de l'eau (phytoplancton, particules non algales, matière organique dissoute colorée - CDOM) à partir de la réflectance captée par satellite. En modifiant les paramètres des modèles afin de correspondre aux conditions subantarctiques, on pourrait obtenir des évaluations plus précises des caractéristiques optiques et biogéochimiques des eaux des Kerguelen, surtout dans les régions côtières complexes.

5.3.1.4 Machine- et deep learning

L'apprentissage machine (*machine learning*) et en particulier l'apprentissage profond (deep learning) pourrait être une solution prometteuse pour améliorer l'estimation en *Chl-a* à partir des observations satellitaires. Ces méthodes sont capables de modéliser automatiquement les relations complexes et non-linéaires entre la couleur de l'océan mesurée par satellite et la

concentration en *Chl-a* réelle, même dans des eaux très variables et complexes. Elles apporteraient un avantage important pour les côtes des Kerguelen, où les mesures *in situ* sont très limitées, en ce sens qu'elles pourraient combiner plusieurs sources d'information pour de meilleures estimations : les rares données réelles disponibles actuellement, telles que celles du projet PROTEKER, les données synthétiques à partir des modèles bio-optiques, et les images satellites et d'autres variables environnementales, telles que la température de surface de l'eau, la turbidité, le vent, et les marées.

Certaines architectures, comme les réseaux de neurones convolutionnels (CNN) ou les auto-encodeurs variationnels (VAE), ont récemment montré leur capacité à reconstruire la distribution de *Chl-a* avec des données manquantes et à fournir des estimations d'incertitude (Yang *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2025).

Leur utilisation permettrait donc de développer un algorithme robuste et flexible, qui pourrait traiter la variabilité côtière en s'appuyant mieux sur l'évolution des futures missions satellitaires, telles que PACE (Jamet *et al.*, 2019).

À ce jour, peu d'études appliquées directement aux îles subantarctiques existent, ce qui souligne un champ de recherche encore largement ouvert.

5.3.1.5 Nouvelles approches biogéochimiques : isotopes stables

Pour finir, l'utilisation des isotopes stables pour intégrer des données géochimiques se révèle être une approche prometteuse pour approfondir notre compréhension des dynamiques phytoplanctoniques aux Kerguelen. Les signatures isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) et de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) fournissent des informations uniques sur les sources de nutriments et les processus biogéochimiques, indisponibles avec la télédétection. Une récente étude (Stirnemann, 2023) a introduit le concept de « plankton isoscape », permettant de cartographier les variations spatiales des rapports isotopiques à l'échelle de l'océan Austral. Ces cartes mettent en lumière la diversité des conditions écologiques et facilitent l'identification des zones de forte productivité, ainsi que leur impact sur le transfert de carbone en profondeur. Cette approche s'avère particulièrement adaptée aux Kerguelen, où le bloom phytoplanctonique intense stimulé par l'apport naturel en fer laisse une empreinte isotopique identifiable, permettant de suivre la productivité et la séquestration du carbone.

Les isotopes stables permettent également de différencier les dynamiques saisonnières et les interactions entre les communautés planctoniques, complétant ainsi les observations satellitaires. Par exemple, une zone riche en *Chl-a* peut-être caractérisée par son empreinte isotopique, révélant la dominance de diatomées ou d'autres groupes. Cette combinaison de données *in situ* et satellitaires améliore la validation et la contextualisation des observations, offrant une vision plus complète des écosystèmes (Stirnemann *et al.*, 2024).

De plus, les isotopes sont utiles pour évaluer l'impact de la fonte accélérée des glaciers aux Kerguelen (Favier *et al.*, 2016). Le ruissellement apporte de l'eau douce, des sédiments et des nutriments aux zones côtières, modifiant ainsi la productivité phytoplanctonique et laissant une signature isotopique mesurable, révélant les effets du changement climatique sur l'écosystème marin. En combinant les observations satellitaires, la modélisation bio-optique et les analyses isotopiques, il devient possible d'aller au-delà de la simple estimation de la biomasse pour caractériser plus précisément les processus biogéochimiques. Les isotopes stables représentent ainsi un lien entre la télédétection, les observations directes et la modélisation, offrant ainsi une meilleure compréhension du rôle des Kerguelen et plus largement de la région subantarctique dans le cycle global du carbone.

5.3.2 Nouvelles technologies : le satellite PACE

Le satellite PACE (Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem), lancé par la NASA en mars 2024, enrichit les séries temporelles de couleur de l'océan grâce à sa réflectance

hyperspectrale (350–885 nm, résolution 5 nm) et ses capteurs polarimétriques multi-angles (HARP2, SPEXone). Ces innovations offrent un accès inédit à la composition pigmentaire, à la taille des particules et à la structure fonctionnelle du phytoplancton (Werdell *et al.*, 2019), des informations cruciales pour des zones à efflorescences localisées comme les Kerguelen (Bracher *et al.*, 2017).

Contrairement aux capteurs précédents (SeaWiFS, MODIS, OLCI), PACE utilise des approches hyperspectrales et des inversions non linéaires pour estimer simultanément l'absorption pigmentaire, le CDOM et la rétrodiffusion particulaire, améliorant ainsi les modèles de production primaire et la compréhension de la pompe biologique du carbone (Behrenfeld *et al.*, 2016; Catlett & Siegel, 2018). Sa capacité à distinguer *Chl-a* et carbone phytoplanctonique affine l'interprétation des variations de productivité liées à la stratification, aux apports en nutriments ou au climat (Mouw *et al.*, 2017).

L'extension des mesures dans l'ultraviolet (350–400 nm) améliore la correction atmosphérique et la séparation entre pigments et CDOM, un atout pour les environnements optiquement complexes comme les Kerguelen (Siegel *et al.*, 2002; Werdell *et al.*, 2018).

Bien que ses données récentes ne couvrent pas notre période d'étude (2016–2025), PACE constitue une perspective majeure : ses observations hyperspectrales permettront de mieux caractériser la dynamique du phytoplancton, ses réponses au changement climatique et le rôle des régions subantarctiques dans le cycle du carbone océanique.

5.3.4 Impacts du changement climatique

La variabilité à long terme de la *Chl-a* aux hautes latitudes, dont les Kerguelen, est fortement influencée par le changement climatique à travers la stratification, les apports en nutriments et la circulation océanique (Thomalla *et al.*, 2023). Sur les deux dernières décennies, une tendance au verdissement des hautes latitudes et au bluissement des régions subtropicales a été observée, traduisant une migration des zones productives vers les pôles, liée au réchauffement, à la fonte de la banquise et à l'affaiblissement des vents (Zhao *et al.*, 2025). D'ici 2100, 50 % des océans pourraient être marqués par ces transitions (Dutkiewicz *et al.*, 2019).

Dans l'océan Austral, les blooms phytoplanctoniques connaissent déjà des modifications de saisonnalité et d'intensité, contrôlées par la stratification, la profondeur de la couche de mélange et les apports en fer (Thomalla *et al.*, 2011; Ardyna *et al.*, 2017). Aux Kerguelen comme dans d'autres zones subantarctiques (Crozet, Géorgie du Sud), la fertilisation naturelle en fer interagit fortement avec ces forçages climatiques (Blain *et al.*, 2007; Boyd *et al.*, 2012). Ces dynamiques soulignent l'importance des séries temporelles locales (KERFIX, OISO, KEOPS) et des approches innovantes comme les flotteurs BGC-Argo pour documenter les changements (Claustre *et al.*, 2020; Metzl *et al.*, 2024).

Le réchauffement modifie aussi la composition des communautés phytoplanctoniques. On anticipe un déclin des diatomées, piliers de la pompe biologique à carbone, au profit de petits phytoplanctons mieux adaptés à des eaux stratifiées et pauvres en fer (Bopp *et al.*, 2005; Boyd *et al.*, 2008; Tagliabue *et al.*, 2017). Ces derniers favorisent le recyclage en surface plutôt que l'export vers les profondeurs, ce qui pourrait réduire l'efficacité de la séquestration de CO₂ et transformer les réseaux trophiques (Le Quéré *et al.*, 2016; Laufkötter *et al.*, 2015).

6. Conclusion

L'étude des dynamiques spatio-temporelles du phytoplancton autour des îles Kerguelen, réalisée grâce à la télédétection, a révélé non seulement de la productivité chlorophyllienne mais également la complexité de cette zone subantarctique. Les caractéristiques géographiques et océanographiques de la région, l'influence du Courant Circumpolaire Antarctique, la variabilité des apports en fer, les changements saisonniers intenses et la présence de masses d'eaux optiquement complexes représentent divers défis pour une analyse précise à travers les satellites. Le faible nombre d'observations *in situ*, essentielles pour la calibration et la validation des algorithmes, accentue ces contraintes.

En dépit de ces défis, ce travail a permis d'établir un premier portrait des dynamiques phytoplanctoniques de la région, là où aucune recherche par télédétection n'était encore disponible. Les prévisions restent imprécises et nécessitent une consolidation, mais elles représentent un progrès notable vers une meilleure estimation de la productivité primaire marine autour des Kerguelen. Les résultats soulignent particulièrement la grande variabilité entre l'est et l'ouest de l'archipel, ainsi qu'entre les zones côtières et le large, confirmant le rôle crucial des apports locaux de nutriments et des mouvements océaniques dans la formation des blooms.

Malgré un manque de données et les incertitudes liées, la stratégie mise en place a permis de dépasser ces contraintes et d'offrir une perspective globale sur les dynamiques spatio-temporelles du phytoplancton autour des Kerguelen. Ce travail constitue donc un socle robuste pour les futures recherches, qui tireront profit des nouvelles missions de satellites hyperspectraux et de l'amélioration des séries temporelles locales.

Références

- ACOLITE. (s.d.). GitHub. Consulté 12 février 2025, à l'adresse <https://github.com/acolite/releases/tag/20250114.0>
- Améziane, N., Hemery, L. G., Eléaume, M., Monniot, F., Hemery, A., Hautecœur, M., & Dettai, A. (2011). *Biodiversity of the benthos off Kerguelen Islands : Overview and perspectives*. 157-167.
- Antoine, D., André, J.-M., & Morel, A. (1996). Oceanic primary production : 2. Estimation at global scale from satellite (Coastal Zone Color Scanner) chlorophyll. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(1), 57-69. <https://doi.org/10.1029/95GB02832>
- Arnone, R., Babin, M., Barnard, A. H., Boss, E., Cannizzaro, J. P., Carder, K. L., Chen, F. R., Devred, E., Doerffer, R., Du, K., Hoge, F., Kopelevich, O. V., Lee, Z., Loisel, H., Lyon, P. E., Maritorena, S., Platt, T., Poteau, A., Roesler, C., ... Zaneveld, J. R. V. (2006). *Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests Algorithms, and Applications* (Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group 5; IOCCG, p. 122). <https://ioccg.org/reports/report5.pdf>
- Atkinson, A., Whitehouse, M., Priddle, J., Cripps, G., Ward, P., & Brandon, M. (2001). South Georgia, Antarctica: A productive, cold water, pelagic ecosystem. *Marine Ecology Progress Series*, 216, 279-308. <https://doi.org/10.3354/meps216279>
- Baban, S. M. J. (1996). Trophic classification and ecosystem checking of lakes using remotely sensed information. *Hydrological Sciences Journal*, 41(6), 939-957. <https://doi.org/10.1080/02626669609491560>
- Baird, M., Chai, F., Ciavatta, S., Dutkiewicz, S., Edwards, C. A., Evers-King, H., Friedrichs, M. A. M., Frolov, S., Gehlen, M., Henson, S., Hickman, A., Ibrahim, A., Jahn, O., Jones, E., Kaufman, D. E., Mélin, F., Mouw, C., Muhling, B., Rousseaux, C., ... Wiggert, J. D. (2020). *Synergy between Ocean Colour and Biogeochemical/Ecosystem Models*. (Report 19; Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, p. 194) [184pp.]. International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG). <https://www.oceanbestpractices.net/handle/11329/1194>
- Behrenfeld, M. J., & Milligan, A. J. (2013). Photophysiological Expressions of Iron Stress in Phytoplankton. *Annual Review of Marine Science*, 5 (Volume 5, 2013), 217-246. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121211-172356>
- Behrenfeld, M. J., O'Malley, R. T., Boss, E. S., Westberry, T. K., Graff, J. R., Halsey, K. H., Milligan, A. J., Siegel, D. A., & Brown, M. B. (2016). Revaluating ocean warming impacts on global phytoplankton. *Nature Climate Change*, 6(3), 323-330. <https://doi.org/10.1038/nclimate2838>
- Blain, S., Quéguiner, B., Armand, L., Belviso, S., Bombled, B., Bopp, L., Bowie, A., Brunet, C., Brussaard, C., Carlotti, F., Christaki, U., Corbière, A., Durand, I., Ebersbach, F., Fuda, J.-L., Garcia, N., Gerringa, L., Griffiths, B., Guigue, C., ... Wagener, T. (2007). Effect of natural iron fertilization on carbon sequestration in the Southern Ocean. *Nature*, 446(7139), 1070-1074. <https://doi.org/10.1038/nature05700>
- Blain, S., Sarthou, G., & Laan, P. (2008). Distribution of dissolved iron during the natural iron -fertilization experiment KEOPS (Kerguelen Plateau, Southern Ocean). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(5-7), 594-605. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2007.12.028>
- Blondeau-Patissier, D., Gower, J. F. R., Dekker, A. G., Phinn, S. R., & Brando, V. E. (2014). A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans. *Progress in Oceanography*, 123, 123-144. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.12.008>
- Boss, E., Brewin, R. J. W., Bulgarelli, B., Chauhan, P., Doerffer, R., Dutkiewicz, S., Ford, D., Franz, B. A., Frouin, R., Hieronymi, M., Hu, C., Hunt, S. E., Jackson, T., Jay, S., Jolivet, D., Jones, E., Karaköylü, E. M., Kobayashi, H., Kwiatkowska, E., ... Zheng, G. (2019). *Uncertainties in Ocean Colour Remote Sensing* (Report 18; Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, p. 163). International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG). <https://doi.org/10.25607/OBP-696>
- Bowers, D. G., Harker, G. E. L., & Stephan, B. (1996). Absorption spectra of inorganic particles in the Irish Sea and their relevance to remote sensing of chlorophyll. *International Journal of Remote Sensing*, 17(12), 2449-2460. <https://doi.org/10.1080/01431169608948782>
- Boyce, D. G., Lewis, M. R., & Worm, B. (2010). Global phytoplankton decline over the past century. *Nature*, 466(7306), 591-596. <https://doi.org/10.1038/nature09268>
- Boyd, P. W., & Trull, T. W. (2007). Understanding the export of biogenic particles in oceanic waters : Is there consensus? *Progress in Oceanography*, 72(4), 276-312. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.10.007>
- Bracher, A., Bouman, H. A., Brewin, R. J. W., Bricaud, A., Brotas, V., Ciotti, A. M., Clementson, L., Devred, E., Di Cicco, A., Dutkiewicz, S., Hardman-Mountford, N. J., Hickman, A. E., Hieronymi, M., Hirata, T., Losa, S. N., Mouw, C. B., Organelli, E., Raitos, D. E., Uitz, J., ... Wolanin, A. (2017). Obtaining Phytoplankton Diversity from Ocean Color : A Scientific Roadmap for Future Development. *Frontiers in Marine Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00055>
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361-369. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>

- Catlett, D., & Siegel, D. A. (2018). Phytoplankton Pigment Communities Can be Modeled Using Unique Relationships With Spectral Absorption Signatures in a Dynamic Coastal Environment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(1), 246-264. <https://doi.org/10.1002/2017JC013195>
- Chever, F., Sarthou, G., Bucciarelli, E., Blain, S., & Bowie, A. R. (2010). An iron budget during the natural iron fertilisation experiment KEOPS (Kerguelen Islands, Southern Ocean). *Biogeosciences*, 7(2), 455-468. <https://doi.org/10.5194/bg-7-455-2010>
- Christaki, U., Lefèvre, D., Georges, C., Colombet, J., Catala, P., Courties, C., Sime-Ngando, T., Blain, S., & Obernosterer, I. (2014). Microbial food web dynamics during spring phytoplankton blooms in the naturally iron-fertilized Kerguelen area (Southern Ocean). *Biogeosciences*, 11(23), 6739-6753. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6739-2014>
- Constable, A. J., Melbourne-Thomas, J., Corney, S. P., Arrigo, K. R., Barbraud, C., Barnes, D. K. A., Bindoff, N. L., Boyd, P. W., Brandt, A., Costa, D. P., Davidson, A. T., Ducklow, H. W., Emmerson, L., Fukuchi, M., Gutt, J., Hindell, M. A., Hofmann, E. E., Hosie, G. W., Iida, T., ... Ziegler, P. (2014). Climate change and Southern Ocean ecosystems I: How changes in physical habitats directly affect marine biota. *Global Change Biology*, 20(10), 3004-3025. <https://doi.org/10.1111/gcb.12623>
- Cullen, J. J. (1982). The Deep Chlorophyll Maximum: Comparing Vertical Profiles of Chlorophyll a. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 39(5), 791-803. <https://doi.org/10.1139/f82-108>
- Delille, D., Gleizon, F., & Delille, B. (2007). Spatial and temporal variation of bacterioplankton in a sub-Antarctic coastal area (Kerguelen Archipelago). *Journal of Marine Systems*, 68(3), 366-380. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.02.007>
- Dierssen, H. M. (2010). Perspectives on empirical approaches for ocean color remote sensing of chlorophyll in a changing climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(40), 17073-17078. <https://doi.org/10.1073/pnas.0913800107>
- Duhamel, G., Péron, C., Sinègre, R., Chazeau, C., Gasco, N., Hauteceur, M., Martin, A., Durand, I., & Causse, R. (2019). Important readjustments in the biomass and distribution of groundfish species in the northern part of the Kerguelen Plateau and Skiff Bank. 135-184.
- Dutkiewicz, S., Hickman, A. E., Jahn, O., Henson, S., Beaulieu, C., & Monier, E. (2019). Ocean colour signature of climate change. *Nature Communications*, 10(1), 578. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08457-x>
- Falkowski, P. G., Barber, R. T., & Smetacek, V. (1998). Biogeochemical Controls and Feedbacks on Ocean Primary Production. *Science*, 281(5374), 200-206. <https://doi.org/10.1126/science.281.5374.200>
- Favier, V., Verfaillie, D., Berthier, E., Menegoz, M., Jomelli, V., Kay, J. E., Ducret, L., Malbêteau, Y., Brunstein, D., Gallée, H., Park, Y.-H., & Rinterknecht, V. (2016). Atmospheric drying as the main driver of dramatic glacier wastage in the southern Indian Ocean. *Scientific Reports*, 6(1), 32396. <https://doi.org/10.1038/srep32396>
- Ferreira, A., Brito, A., Mendes, C., Brotas, V., Costa, R., Guerreiro, C., Sá, C., & Jackson, T. (2022). OC4-SO: A New Chlorophyll-a Algorithm for the Western Antarctic Peninsula Using Multi-Sensor Satellite Data. *Remote Sensing*, 14, 1052. <https://doi.org/10.3390/rs14051052>
- Garnesson, P., Mangin, A., Fanton d'Andon, O., Demaria, J., & Bretagnon, M. (2019). The CMEMS GlobColour chlorophyll a product based on satellite observation: Multi-sensor merging and flagging strategies. *Ocean Science*, 15(3), 819-830. <https://doi.org/10.5194/os-15-819-2019>
- Global Ocean Colour Bio-Geo-Chemical. (2023). [Jeu de données]. <https://doi.org/10.48670/moi-00281>
- Gordon, H. R., & Morel, A. Y. (1983a). In—Water Algorithms. In *Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery* (p. 24-67). American Geophysical Union (AGU). <https://doi.org/10.1002/9781118663707.ch3>
- Gordon, H. R., & Morel, A. Y. (1983b). Physics of Ocean Color Remote Sensing. In *Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery* (p. 3-23). American Geophysical Union (AGU). <https://doi.org/10.1002/9781118663707.ch2>
- Gower, J., & King, S. (2007). Validation of chlorophyll fluorescence derived from MERIS on the west coast of Canada. *International Journal of Remote Sensing*, 28(3-4), 625-635. <https://doi.org/10.1080/01431160600821010>
- Groom, S., Sathyendranath, S., Ban, Y., Bernard, S., Brewin, R., Brotas, V., Brockmann, C., Chauhan, P., Choi, J., Chuprin, A., Ciavatta, S., Cipollini, P., Donlon, C., Franz, B., He, X., Hirata, T., Jackson, T., Kampel, M., Krasemann, H., ... Wang, M. (2019). Satellite Ocean Colour: Current Status and Future Perspective. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00485>
- Gutt, J., Bertler, N., Bracegirdle, T. J., Buschmann, A., Comiso, J., Hosie, G., Isla, E., Schloss, I. R., Smith, C. R., Tournadre, J., & Xavier, J. C. (2015). The Southern Ocean ecosystem under multiple climate change stresses—An integrated circumpolar assessment. *Global Change Biology*, 21(4), 1434-1453. <https://doi.org/10.1111/gcb.12794>

- Hu, C., Lee, Z., & Franz, B. (2012). Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans : A novel approach based on three-band reflectance difference. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C1). <https://doi.org/10.1029/2011JC007395>
- Hunt, B. P. V., Espinasse, B., Pakhomov, E. A., Cherel, Y., Cotté, C., Delegrange, A., & Henschke, N. (2021). Pelagic food web structure in high nutrient low chlorophyll (HNLC) and naturally iron fertilized waters in the Kerguelen Islands region, Southern Ocean. *Journal of Marine Systems*, 224, 103625. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103625>
- Irion, S., Jardillier, L., Sassenhagen, I., & Christaki, U. (2020). Marked spatiotemporal variations in small phytoplankton structure in contrasted waters of the Southern Ocean (Kerguelen area). *Limnology and Oceanography*, 65(11), 2835-2852. <https://doi.org/10.1002/lno.11555>
- Jamet, C., Ibrahim, A., Ahmad, Z., Angelini, F., Babin, M., Behrenfeld, M. J., Boss, E., Cairns, B., Churnside, J., Chowdhary, J., Davis, A. B., Dionisi, D., Duforêt-Gaurier, L., Franz, B., Frouin, R., Gao, M., Gray, D., Hasekamp, O., He, X., ... Zhai, P.-W. (2019). Going Beyond Standard Ocean Color Observations : Lidar and Polarimetry. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00251>
- 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>
- Kirk, J. T. O. (2010). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems* (3^e éd.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139168212>
- Korb, R. E., Whitehouse, M. J., & Ward, P. (2004). SeaWiFS in the southern ocean : Spatial and temporal variability in phytoplankton biomass around South Georgia. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(1), 99-116. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2003.04.002>
- Korb, R. E., Whitehouse, M. J., Ward, P., Gordon, M., Venables, H. J., & Poulton, A. J. (2012). Regional and seasonal differences in microplankton biomass, productivity, and structure across the Scotia Sea: Implications for the export of biogenic carbon. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 59-60, 67-77. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2011.06.006>
- Kyryliuk, D., & Kratzer, S. (2019). Evaluation of Sentinel-3A OLCI Products Derived Using the Case-2 Regional CoastColour Processor over the Baltic Sea. *Sensors*, 19(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/s19163609>
- Le Bourg, B., Saucède, T., Charpentier, A., Lepoint, G., & Michel, L. N. (2022). What is the menu today in a subantarctic kelp food web from the Kerguelen Islands? Phytodetritus, phytoplankton and phytobenthos; not living kelp. *Marine Biology*, 169(9), 118. <https://doi.org/10.1007/s00227-022-04105-z>
- Lillesand, T. M. (1983). Use of Landsat Data to Predict the Trophic State of Minnesota Lakes. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING*.
- Matthews, M. W. (2011). A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), 6855-6899. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.512947>
- McNeil, B. I., & Matear, R. J. (2008). Southern Ocean acidification : A tipping point at 450 -ppm atmospheric CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(48), 18860-18864. <https://doi.org/10.1073/pnas.0806318105>
- Minas, H. J., & Minas, M. (1992). Net community production in "High Nutrient-Low Chlorophyll" waters of the tropical and Antarctic oceans : Grazing vs iron hypothesis. *Oceanologica Acta*, 15, 145-162.
- Mobley, C. D. (1994). Optical Properties of Water. In *Light and Water : Radiative Transfer in Natural Waters* (Academic Press, Vol. 1, p. 592). <http://www.oceanopticsbook.info/view/references/publications>
- Mongin, M., Abraham, E., & Trull, T. (2009). Winter advection of iron can explain the summer phytoplankton bloom that extends 1000 km downstream of the Kerguelen Plateau in the Southern Ocean. *Journal of Marine Research*, 67(2). https://elischolar.library.yale.edu/journal_of_marine_research/230
- Mongin, M., Molina, E., & Trull, T. W. (2008). Seasonality and scale of the Kerguelen plateau phytoplankton bloom : A remote sensing and modeling analysis of the influence of natural iron fertilization in the Southern Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(5), 880-892. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2007.12.039>
- Morel, A. (1980). In-water and remote measurements of ocean color. *Boundary-Layer Meteorology*, 18(2), 177-201. Scopus. <https://doi.org/10.1007/BF00121323>
- Morel, A., Huot, Y., Gentili, B., Werdell, P. J., Hooker, S. B., & Franz, B. A. (2007). Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach. *Remote Sensing of Environment*, 111(1), 69-88. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.03.012>
- Morel, A., & Prieur, L. (1977). Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 22(4), 709-722. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>
- Morley, S. A., Abele, D., Barnes, D. K. A., Cárdenas, C. A., Cotté, C., Gutt, J., Henley, S. F., Höfer, J., Hughes, K. A., Martin, S. M., Moffat, C., Raphael, M., Stammerjohn, S. E., Suckling, C. C., Tulloch, V. J. D.,

- Waller, C. L., & Constable, A. J. (2020). Global Drivers on Southern Ocean Ecosystems : Changing Physical Environments and Anthropogenic Pressures in an Earth System. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.547188>
- Mouw, C. B., Hardman-Mountford, N. J., Alvain, S., Bracher, A., Brewin, R. J. W., Bricaud, A., Ciotti, A. M., Devred, E., Fujiwara, A., Hirata, T., Hirawake, T., Kostadinov, T. S., Roy, S., & Uitz, J. (2017). A Consumer's Guide to Satellite Remote Sensing of Multiple Phytoplankton Groups in the Global Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00041>
- NASA Ocean Color. (s. d.). Consulté 21 juillet 2025, à l'adresse <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>
- Nel, W., Hedding, D. W., & Rudolph, E. M. (2023). The sub-Antarctic islands are increasingly warming in the 21st century. *Antarctic Science*, 35(2), 124-126. <https://doi.org/10.1017/S0954102023000056>
- O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Mitchell, B. G., Siegel, D. A., Carder, K. L., Garver, S. A., Kahru, M., & McClain, C. (1998). Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C11), 24937-24953. <https://doi.org/10.1029/98JC02160>
- 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>
- Park, Y.-H., Durand, I., Kestenare, E., Rougier, G., Zhou, M., D'Ovidio, F., Cotte, C., Lee, J.-H., Kestenare, E., Rougier, G., Zhou, M., D'Ovidio, F., Cotte, C., & Lee, J.-H. (2014). Polar Front around the Kerguelen Islands : An up-to-date determination and associated circulation of surface/subsurface waters. *Journal Of Geophysical Research-Oceans*, 119(10), 6575-6592. <https://doi.org/10.1002/2014JC010061>
- Park, Y.-H., Gamberoni, L., & Charriaud, E. (1993). Frontal structure, water masses, and circulation in the Crozet Basin. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 98(C7), 12361-12385. <https://doi.org/10.1029/93JC00938>
- Park, Y.-H., Roquet, F., Durand, I., & Fuda, J.-L. (2008). Large-scale circulation over and around the Northern Kerguelen Plateau. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(5), 566-581. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2007.12.030>
- Planchon, F., Ballas, D., Cavagna, A.-J., Bowie, A. R., Davies, D., Trull, T., Laurenceau-Cornec, E. C., Van Der Merwe, P., & Dehairs, F. (2015). Carbon export in the naturally iron-fertilized Kerguelen area of the Southern Ocean based on the ²³⁴Th approach. *Biogeosciences*, 12(12), 3831-3848. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3831-2015>
- Pohl, B., Saucède, T., Favier, V., Pergaud, J., Verfaillie, D., Féral, J.-P., Krasniqi, Y., & Richard, Y. (2021). Recent Climate Variability around the Kerguelen Islands (Southern Ocean) Seen through Weather Regimes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 60(5), 711-731. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-20-0255.1>
- Pollard, R. T., Salter, I., Sanders, R. J., Lucas, M. I., Moore, C. M., Mills, R. A., Statham, P. J., Allen, J. T., Baker, A. R., Bakker, D. C. E., Charette, M. A., Fielding, S., Fones, G. R., French, M., Hickman, A. E., Holland, R. J., Hughes, J. A., Jickells, T. D., Lampitt, R. S., ... Zubkov, M. V. (2009). Southern Ocean deep-water carbon export enhanced by natural iron fertilization. *Nature*, 457(7229), 577-580. <https://doi.org/10.1038/nature07716>
- Ponthus, L., De Saint Blanquat, M., Guillaume, D., Le Romancer, M., Pearson, N., O'Reilly, S., & Grégoire, M. (2020). Plutonic processes in transitional oceanic plateau crust : Structure, age and emplacement of the South Rallier du Baty laccolith, Kerguelen Islands. *Terra Nova*, 32(6), 408-414. <https://doi.org/10.1111/ter.12471>
- Quéguiner, B. (2013). Iron fertilization and the structure of planktonic communities in high nutrient regions of the Southern Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 90, 43-54. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.07.024>
- Richardson, L. L. (1996). Remote Sensing of Algal Bloom Dynamics. *BioScience*, 46(7), 492-501. <https://doi.org/10.2307/1312927>
- Roquet, F., Guinet, C., Charrassin, J.-B., Costa, D. P., Kovacs, K. M., Lydersen, C., Bornemann, H., Bester, M. N., Muelbert, M. C., Hindell, M. A., McMahon, C. R., Harcourt, R., Boehme, L., & Fedak, M. A. (2024). MEOP-CTD in-situ data collection : A Southern ocean Marine-mammals calibrated sea water temperatures and salinities observations [Jeu de données]. SEANO. <https://doi.org/10.17882/45461>
- Rotstein, Y., Schlich, R., Munsch, M., & Coffin, M. F. (1992). Structure and tectonic history of the Southern Kerguelen Plateau (Indian Ocean) deduced from seismic reflection data. *Tectonics*, 11(6), 1332-1347. <https://doi.org/10.1029/91TC02909>
- Schiller, H., & Doerffer, R. (1999). Neural network for emulation of an inverse model operational derivation of Case II water properties from MERIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(9), 1735-1746. <https://doi.org/10.1080/014311699212443>
- Sedwick, P. N., Blain, S., Quéguiner, B., Griffiths, F. B., Fiala, M., Bucciarelli, E., & Denis, M. (2002). Resource limitation of phytoplankton growth in the Crozet Basin, Subantarctic Southern Ocean. *Deep Sea Research*

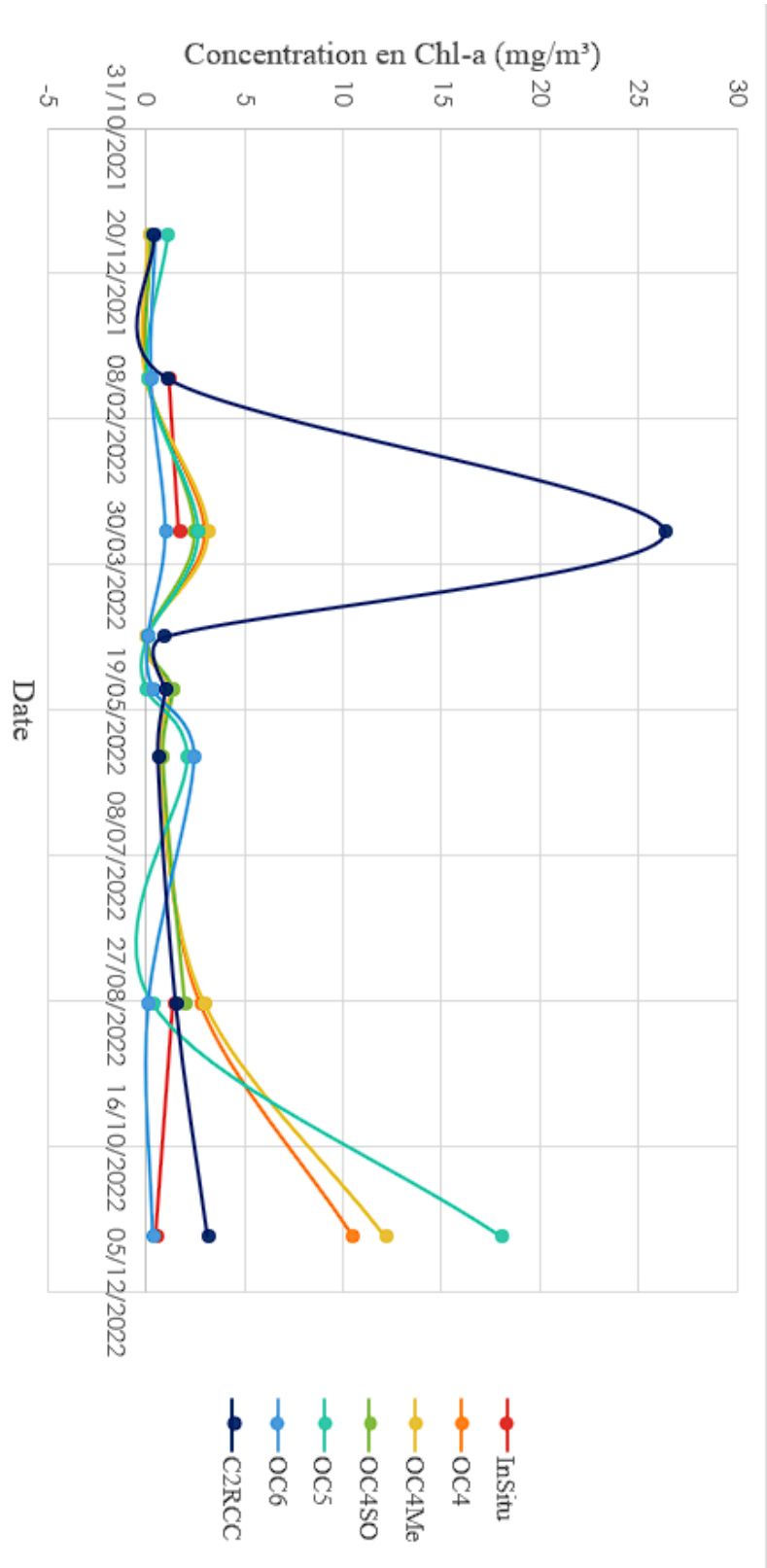
- Part II: Topical Studies in Oceanography, 49(16), 3327-3349. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00086-3](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00086-3)
- Sentinel-3 OLCI level 1 | EUMETSAT. (s.d.). Consulté 18 avril 2025, à l'adresse <https://user.eumetsat.int/resources/user-guides/sentinel-3-olci-level-1-data-guide>
- Siegel, D. A., Maritorena, S., Nelson, N. B., Hansell, D. A., & Lorenzi-Kayser, M. (2002). *Global distribution and dynamics of colored dissolved and detrital organic materials*. 107, 3228-3249. <https://doi.org/10.1029/2001JC000965>
- Sokolov, S., & Rintoul, S. r. (2009). Circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts : 1. Mean circumpolar paths. *Journal Of Geophysical Research-Oceans*, 114(C11/C11018), 1-19. <https://doi.org/10.1029/2008JC005108>
- Soriano-González, J., Urrego, E. P., Sòria-Perpinyà, X., Angelats, E., Alcaraz, C., Delegido, J., Ruíz-Verdú, A., Tenjo, C., Vicente, E., & Moreno, J. (2022). Towards the Combination of C2RCC Processors for Improving Water Quality Retrieval in Inland and Coastal Areas. *Remote Sensing*, 14(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/rs14051124>
- Stirnimann, L. (2023). *Plankton dynamics of the open Southern Ocean and surrounding the (Sub)Antarctic islands*. <http://hdl.handle.net/11427/38546>
- Stirnimann, L., Bornman, T. G., Forrer, H. J., Mirkin, J., Ryan-Keogh, T. J., Flynn, R. F., Dorrington, R. A., Verheye, H. M., & Fawcett, S. E. (2024). A Circum-Antarctic Plankton Isoscape : Carbon Export Potential Across the Summertime Southern Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 38(1), e2023GB007808. <https://doi.org/10.1029/2023GB007808>
- Subramaniam, R. C., Melbourne-Thomas, J., Corney, S. P., Alexander, K., Péron, C., Ziegler, P., & Swadling, K. M. (2020). Time-Dynamic Food Web Modeling to Explore Environmental Drivers of Ecosystem Change on the Kerguelen Plateau. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00641>
- Thomalla, S. J., Nicholson, S.-A., Ryan-Keogh, T. J., & Smith, M. E. (2023). Widespread changes in Southern Ocean phytoplankton blooms linked to climate drivers. *Nature Climate Change*, 13(9), 975-984. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01768-4>
- Tilstone, G. H., Pardo, S., Dall'Olmo, G., Brewin, R. J. W., Nencioli, F., Dessailly, D., Kwiatkowska, E., Casal, T., & Donlon, C. (2021). Performance of Ocean Colour Chlorophyll *a* algorithms for Sentinel-3 OLCI, MODIS-Aqua and Suomi-VIIRS in open-ocean waters of the Atlantic. *Remote Sensing of Environment*, 260, 112444. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112444>
- Turner, J., Barrand, N. E., Bracegirdle, T. J., Convey, P., Hodgson, D. A., Jarvis, M., Jenkins, A., Marshall, G., Meredith, M. P., Roscoe, H., Shanklin, J., French, J., Goosse, H., Guglielmin, M., Gutt, J., Jacobs, S., Li, M. C. K., Masson-Delmotte, V., Mayewski, P., ... Klepikov, A. (2014). Antarctic climate change and the environment : An update. *Polar Record*, 50(3), 237-259. <https://doi.org/10.1017/S0032247413000296>
- Vanhellemont, Q., & Ruddick, K. (2014). Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8. *Remote Sensing of Environment*, 145, 105-115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.009>
- Vanhellemont, Q., & Ruddick, K. (2018). Atmospheric correction of metre-scale optical satellite data for inland and coastal water applications. *Remote Sensing of Environment*, 216, 586-597. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.015>
- Vanhellemont, Q., & Ruddick, K. (2021). Atmospheric correction of Sentinel-3/OLCI data for mapping of suspended particulate matter and chlorophyll-a concentration in Belgian turbid coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 256, 112284. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112284>
- Wallace, P. J., Frey, F. A., Weis, D., & Coffin, M. F. (2002). Origin and Evolution of the Kerguelen Plateau, Broken Ridge and Kerguelen Archipelago: Editorial. *Journal of Petrology*, 43(7), 1105-1108. <https://doi.org/10.1093/petrology/43.7.1105>
- Werdell, P. J., Behrenfeld, M. J., Bontempi, P. S., Boss, E., Cairns, B., Davis, G. T., Franz, B. A., Gliese, U. B., Gorman, E. T., Hasekamp, O., Knobelspiesse, K. D., Mannino, A., Martins, J. V., McClain, C. R., Meister, G., & Remer, L. A. (2019). The Plankton, Aerosol, Cloud, Ocean Ecosystem Mission : Status, Science, Advances. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(9), 1775-1794. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0056.1>
- Werdell, P. J., Franz, B. A., Bailey, S. W., Feldman, G. C., Boss, E., Brando, V. E., Dowell, M., Hirata, T., Lavender, S. J., Lee, Z., Loisel, H., Maritorena, S., Mélin, F., Moore, T. S., Smyth, T. J., Antoine, D., Devred, E., d'Andon, O. H. F., & Mangin, A. (2013). Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties. *Applied Optics*, 52(10), 2019. <https://doi.org/10.1364/AO.52.002019>
- Werdell, P. J., McKinnis, L. I. W., Boss, E., Ackleson, S. G., Craig, S. E., Gregg, W. W., Lee, Z., Maritorena, S., Roesler, C. S., Rousseaux, C. S., Stramski, D., Sullivan, J. M., Twardowski, M. S., Tzortziou, M., & Zhang, X. (2018). An overview of approaches and challenges for retrieving marine inherent optical properties from ocean color remote sensing. *Progress in Oceanography*, 160, 186-212. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.01.001>

- Wojtasiewicz, B., Trull, T. W., Clementson, L., Davies, D. M., Patten, N. L., Schallenberg, C., & Hardman-Mountford, N. J. (2019). Factors Controlling the Lack of Phytoplankton Biomass in Naturally Iron Fertilized Waters Near Heard and McDonald Islands in the Southern Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00531>
- Yang, Y., Li, X., & Wang, H. (2025). Deep Learning for Enhanced Ocean Color Remote Sensing: A Foundation Model Approach. *ResearchGate*, PP, 1-1. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3600411>
- Zhang, Z., Chen, P., Zhang, S., Huang, H., Pan, Y., & Pan, D. (2025). A Review of Machine Learning Applications in Ocean Color Remote Sensing. *Remote Sensing*, 17(10), 1776. <https://doi.org/10.3390/rs17101776>

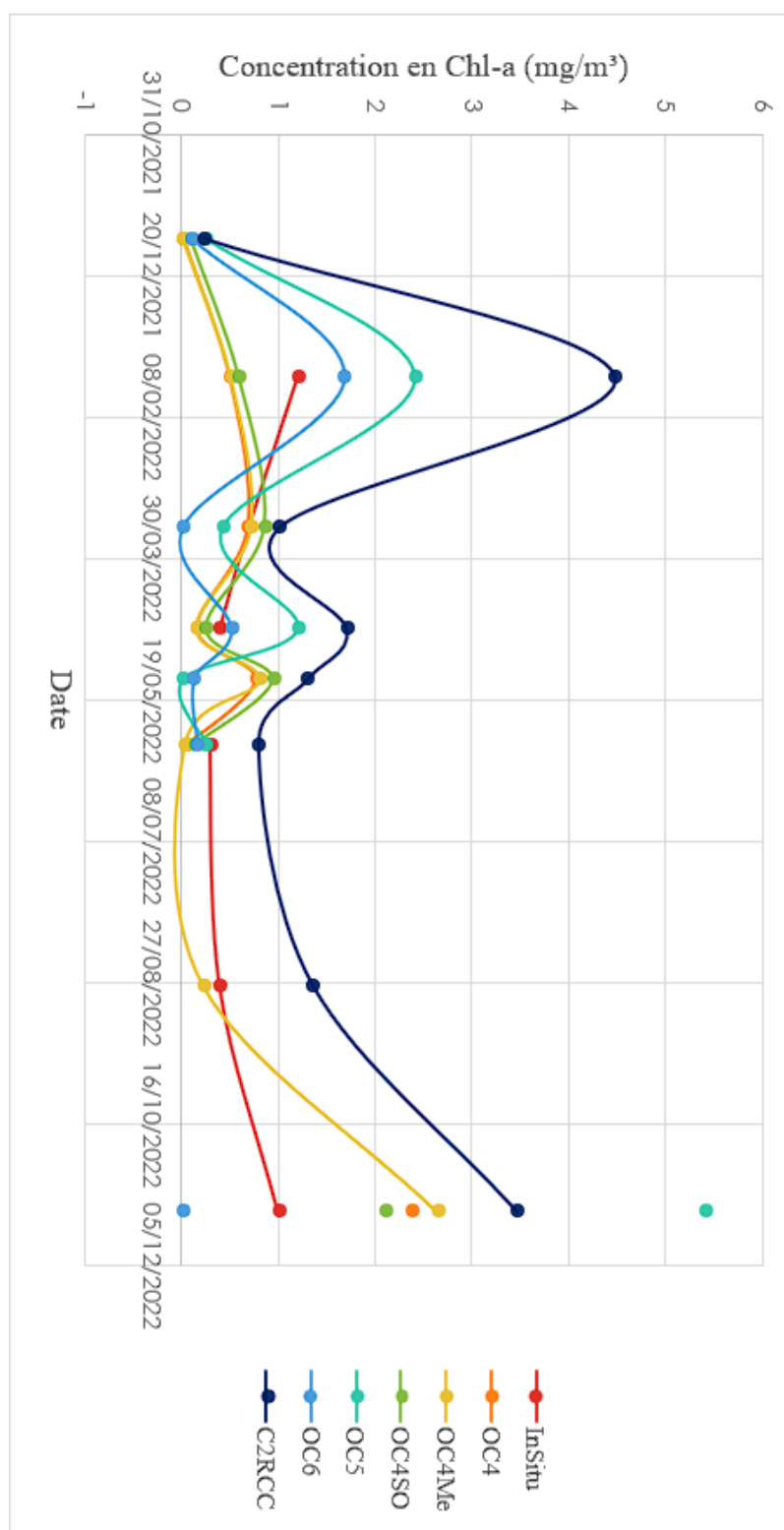
Annexe I : Inventaires des images satellites Sentinel-3 OLCI disponibles

Mois / Année	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	TOTAL
Janvier			05 24	22	02 07	14	25 30	26	10 16	06 13	13
Février		14	24	21	28	21 24	14	28	12 27	11 16	12
Mars				04 05 23	16	08 30	19		21	13 16 17 26	12
Avril	29	11 24		04 30		09	24	20	08 22	10 18	12
Mai			27	06 23	05	17	12		02 17		8
Juin					05		04				2
Juillet	21	22				19	21	14 27	25		7
Août		12 14	31	08 12 29	16 29	11 24	28	06 09	01		14
Septembre	09 17 25	04 20 22 26		13 17	13 21	12 18	28	25	05 07		17
Octobre	27	27		22	06	26	04		18 31		8
Novembre					07	09	16	08	09		5
Décembre			07		14	07 31		05			5
TOTAL	6	11	6	15	13	16	12	10	16	10	115

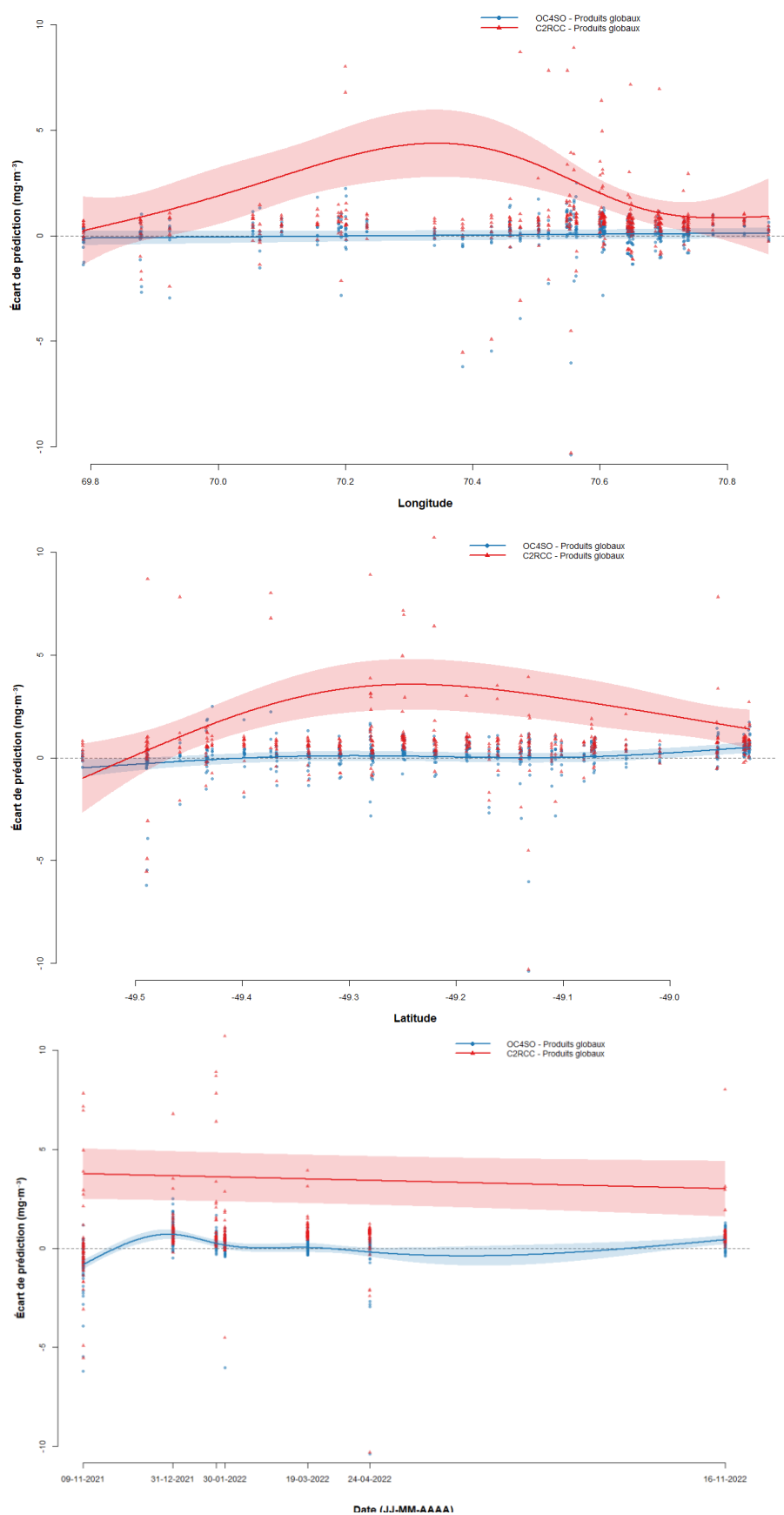
Annexe II : Comparaison des valeurs mesurées (*in situ*) et estimées (6 algorithmes) à la station BDS



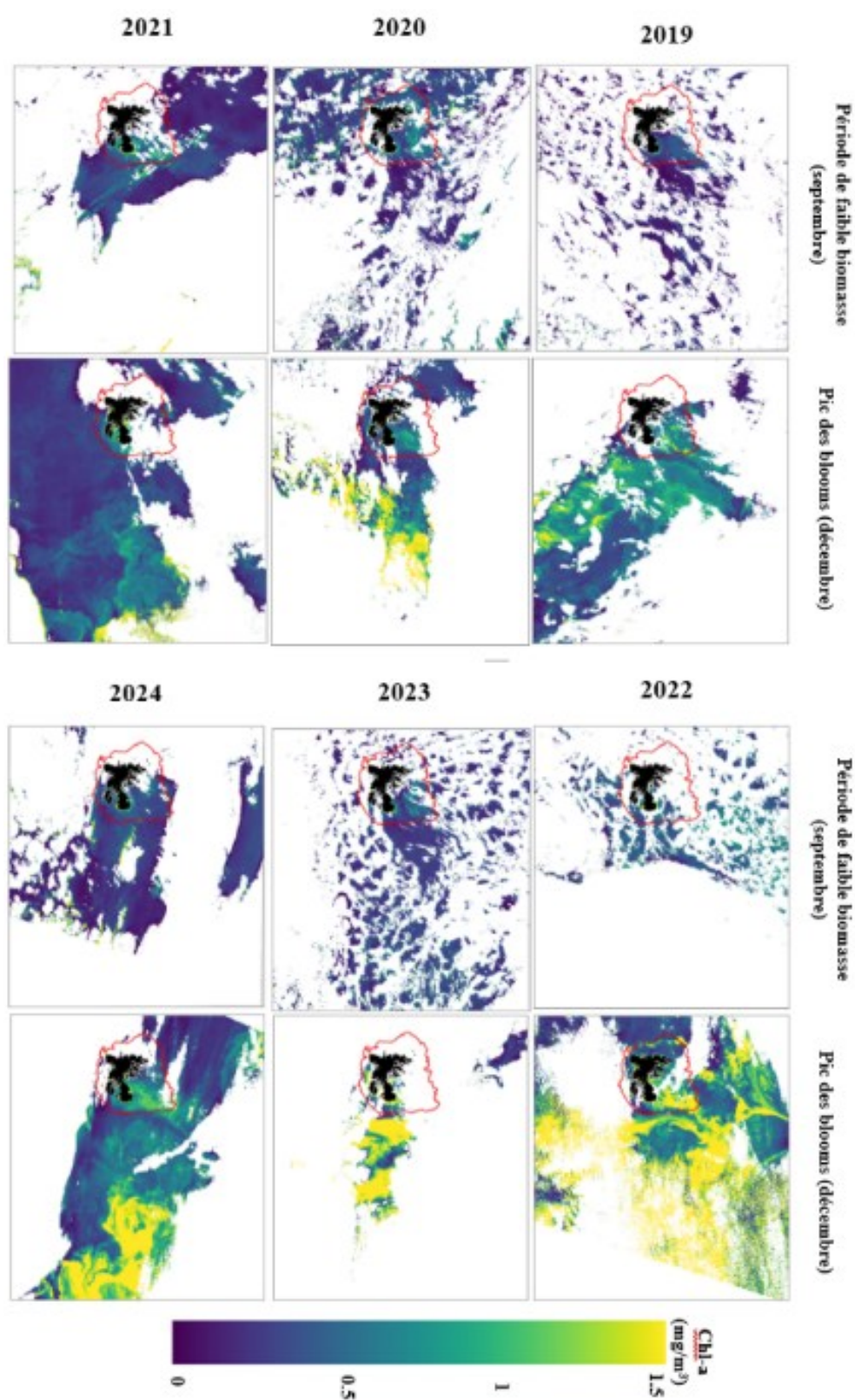
Annexe III : Comparaison des valeurs mesurées (*in situ*) et estimées (6 algorithmes) à la station Armor



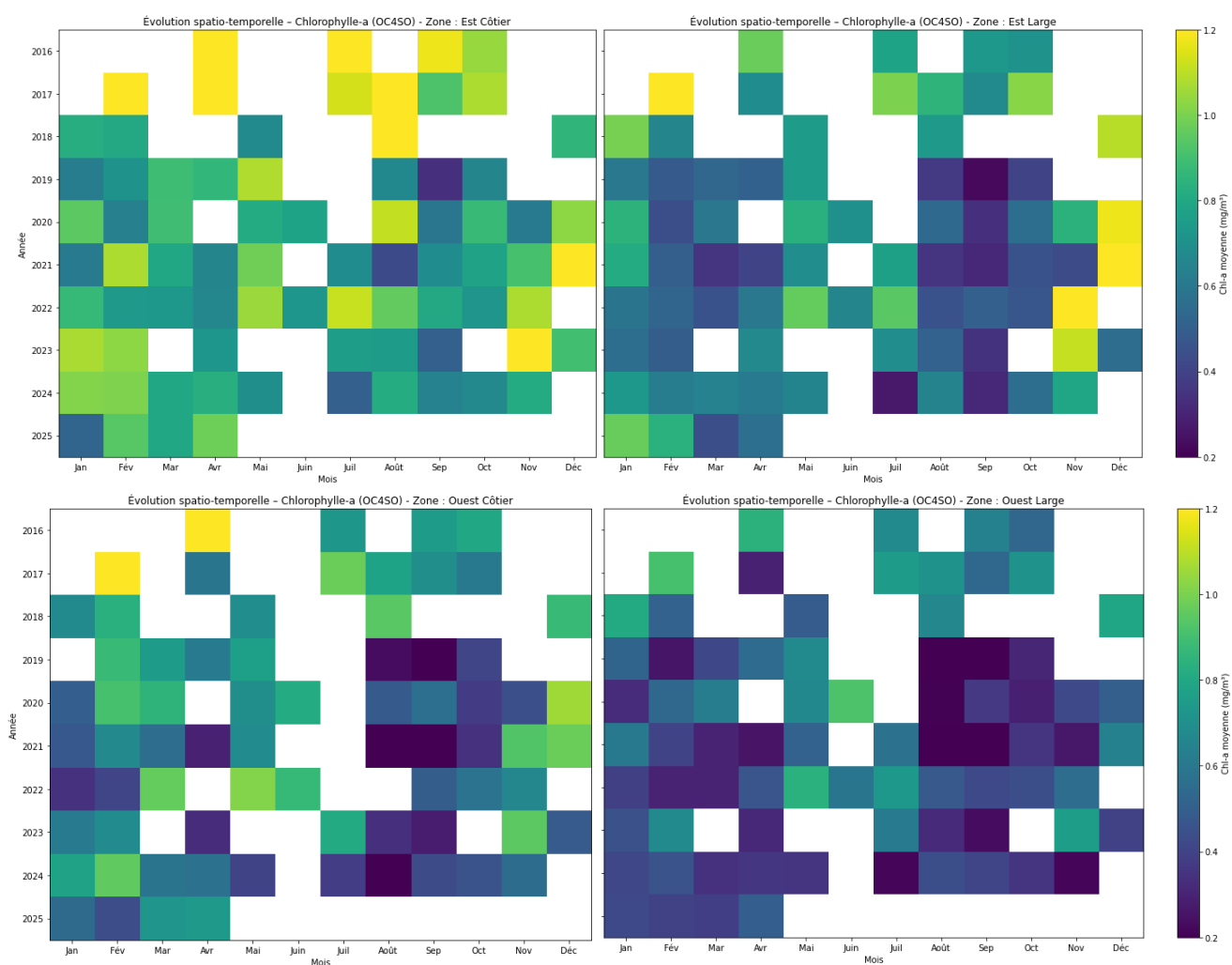
Annexe IV : Ecart de prédiction entre OC4SO et C2RCC selon la longitude, la latitude et la date



Annexe V : Comparaison des périodes de faible et forte productivité entre 2019 et 2024



Annexe VI : Evolution mensuelle en fonction de la région (est/ouest/large/côtier)



Annexe VII : Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

☐ Non ☐ Oui si oui : ☐ 1 an ☐ 5 ans ☐ 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible ⁽¹⁾.

Date et signature des maîtres de stage ⁽²⁾ :

A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

Droits d'auteur

L'auteur⁽³⁾ **Moing Léa**

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

☒ Oui ☐ Non

Si oui, elle autorise

- ☐ la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾
- ☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé
- la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche
- ☒ de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

☒ accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-BY-Nc-Nd

Date et signature de l'auteur : Le 02 septembre 2025

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

☐ Oui ☐ Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

- ☐ la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾
- ☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé
- ☐ la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

⁽¹⁾ L'administration, les enseignants et les différents services de documentation de l'Institut Agro Rennes-Angers s'engagent à respecter cette confidentialité.

⁽²⁾ Signature et cachet de l'organisme

⁽³⁾ Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

⁽⁴⁾ La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

Annexe VIII : Fiche Résumé/Abstract

Résumé

Les îles Kerguelen, situées au sud de l'océan Indien, constitue un site sentinelle pour étudier les impacts du changement climatique sur les écosystèmes marins côtiers. Leur emplacement à la frontière des eaux froides de l'Antarctique les rend très productives en termes de biodiversité, mais aussi très sensibles aux perturbations environnementales. Le phytoplancton, à la base du réseau trophique, joue un rôle essentiel et est un indicateur important des changements océanographiques. Dans le cadre du programme PROTEKER soutenu par l'Institut polaire français, une étude a été menée pour analyser l'activité du phytoplancton autour des îles Kerguelen à travers des données satellitaires (Sentinel-3 OLCI) et des mesures sur le terrain. L'objectif était de comparer les dynamiques entre les zones côtières et ouvertes pour identifier les similitudes et les différences. Les résultats ont montré une forte saisonnalité, avec des pics d'activité à la fin du printemps et en été austral, et une baisse d'activité en hiver en raison des nuages. L'étude a également révélé une grande hétérogénéité spatiale liée aux apports en nutriments du plateau et à la circulation océanique. Cependant, les données disponibles restent limitées et rares, soulignant ainsi la nécessité d'un suivi plus approfondi de ces écosystèmes.

Mots-clés : Kerguelen, phytoplancton, océan Indien, données satellitaires, Sentinel-3 OLCI, mesures *in situ*, couleur de l'océan, saisonnalité, hétérogénéité spatiale

Abstract

The Kerguelen Islands, located in the southern Indian Ocean, are a sentinel site for studying the impacts of climate change on coastal marine ecosystems. Their location at the edge of the cold Antarctic waters makes them highly productive in terms of biodiversity, but also very sensitive to environmental disturbances. Phytoplankton, at the base of the food web, plays an essential role and is an important indicator of oceanographic changes. As part of the PROTEKER programme supported by the French Polar Institute, a study was conducted to analyse phytoplankton activity around the Kerguelen Islands using satellite data (Sentinel-3 OLCI) and field measurements. The aim was to compare the dynamics between coastal and open areas to identify similarities and differences. The results showed strong seasonality, with peaks of activity in late spring and southern summer, and a decline in activity in winter due to clouds. The study also revealed significant spatial heterogeneity linked to nutrient inputs from the shelf and ocean circulation. However, the available data remain limited and scarce, highlighting the need for more in-depth monitoring of these ecosystems.

Key-words : Kerguelen, phytoplankton, Indian Ocean, satellite data, Sentinel-3 OLCI, *in situ* measurements, ocean colour, seasonality, spatial heterogeneity