

L'Institut Agro Rennes-Angers

☐ Site d'Angers ☒ Site de Rennes

Année universitaire : 2024 - 2025

Spécialité : Ingénieur agronome

Spécialisation (et option éventuelle) :

Sciences halieutiques et aquacoles,
préparée à L'Institut Agro Rennes-Angers
(ECOLH)

Mémoire de fin d'études

☒ d'ingénieur de l'ISTOM (Ecole supérieur d'agro-développement international)

☐ de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement
supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

☐ de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)

☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Variabilité spatiale et temporelle de la ressource trophique pour l'huître perlière *Pinctada margaritifera* : approche par télédétection sur trois atolls polynésiens

Par : Erell ECHELARD

Soutenu à Rennes le 12/09/2025

Devant le jury composé de :

Président : Pablo BROSSET

Maître de stage : Sébastien LEFEBVRE

Co – encadrants : Serge ANDRÉFOUËT,

Charles VERPOORTER, Jacques DESCLOITRES

Enseignant référent : Etienne RIVOT

Autres membres du jury :

Olivier LE PAPE (Enseignant-chercheur L'Institut Agro
Rennes-Angers)

Pierre GERNEZ (Enseignant-chercheur l'Université de
Nantes)

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

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation «Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de
Modification 4.0 France» disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



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 du maître de stage ⁽²⁾ : Lefebvre Sébastien
(ou de l'étudiant-entrepreneur)



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⁾ Echelard Erell

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

☒ Oui ☐ Non

Si oui, il autorise

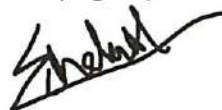
☐ la diffusion papier du mémoire uniquement ⁽⁴⁾

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

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

(Facultatif) ☐ accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-BY-NC-ND (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'auteur : 9 septembre 2023



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 :

12/09/2023


(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

REMERCIEMENTS

Ce stage n'aurait pas été possible sans l'encadrement exceptionnel de mon maître de stage et de mes co-encadrants. Je remercie sincèrement Sébastien LEFEBVRE pour la confiance qu'il m'a accordée, pour son accompagnement constant tout au long de ce travail et pour ses nombreux encouragements. Je tiens également à remercier Serge ANDRÉFOUËT pour nos échanges, parfois très tôt le matin ou tard le soir, ainsi que pour son regard éclairé lié à sa connaissance directe de la Polynésie et pour le partage de précieuses données terrain. Le domaine de la télédétection étant presque une découverte pour moi, j'exprime toute ma gratitude à Jacques DESCLOITRES pour nos nombreux échanges, toujours riches et constructifs, qui m'ont permis d'y voir plus clair, ainsi que pour le temps qu'il a su m'accorder chaque fois que j'en avais besoin. J'adresse aussi mes remerciements à Charles VERPOORTER pour le partage de son expérience, pour ses précieux conseils et pour sa grande réactivité lors de mes sollicitations. Enfin, je remercie les doctorants Loïc-Cabrel YOUNBI et plus particulièrement Julien MASSON pour ses conseils sur l'utilisation de l'algorithme de correction atmosphérique POLYMER. J'adresse également mes remerciements à Hubert LOISEL qui nous a conseillé d'utiliser la correction atmosphérique POLYMER pour notre étude.

Ce stage a été financé par l'IRD via l'UMR ENTROPIE (Écologie Marine Tropicale des Océans Pacifique et Indien) via la convention n°7848A1 entre l'IRD et la DRM (Direction des Ressources Marines) de Polynésie.

SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION	1
I.1.	La filière perlicole en Polynésie française	1
I.2.	L'huître <i>Pinctada margaritifera</i> , espèce clé de la perliculture.....	2
I.3.	La chlorophylle-a dans les atolls, un proxy de la disponibilité alimentaire pour les huîtres	3
I.4.	La modélisation bioénergétique pour modéliser des traits d'histoires de vie des huîtres	4
I.5.	Les conséquences de la variabilité spatiale et temporelle de la concentration en chlorophylle-a	4
I.6.	La télédétection, une méthode pour cartographier la concentration en chlorophylle-a dans les lagons	5
I.7.	Problématisation	6
II.	MATÉRIELS ET MÉTHODES	7
II.1.	Sites de l'étude	7
II.2.	Stations de suivi temporel de la concentration en chlorophylle-a par télédétection	8
II.3.	Données satellitaires et données terrain de validation	8
II.4.	Modèles additifs généralisés (GAM)	12
II.5.	Dynamic Energy Budget (DEB).....	13
II.6.	Dynamic Time Warping (DTW) et clustering hiérarchique.....	13
III.	RÉSULTATS.....	14
III.1.	Comparaison des corrections atmosphériques ACOLITE et POLYMER	14
III.2.	Effet de bandes (striping) et comparaison entre Landsat 8 et Landsat 9	17
III.3.	Concentration moyenne en chlorophylle-a au sein des trois lagons	18
III.4.	Variabilité inter-atoll de la concentration en chlorophylle-a	19
III.5.	Variabilité spatio-temporelle de la concentration en chlorophylle-a intra-lagon	21
III.5.1.	Regroupement des stations selon leur saisonnalité	23
III.6.	Modélisation bioénergétique (DEB)	24
III.6.1.	Durées de croissance et potentiel de reproduction pour 3 stations de Ahe	24
III.6.2.	Classification des 20 stations de Ahe	27
IV.	DISCUSSION	29
IV.1.	Choix d'une correction atmosphérique	29
IV.2.	Importance des bandes et stries des images Landsat.....	30
IV.3.	Variabilités spatiales des concentrations moyennes en chlorophylle-a dans les lagons.....	31
IV.4.	Saisonnalité de la concentration en chlorophylle-a.....	31
IV.5.	Variabilités de durées de croissance et d'investissement reproductif	33
V.	PERSPECTIVES.....	34
VI.	CONCLUSION	35

I. INTRODUCTION

I.1. La filière perlicole en Polynésie française

La Polynésie française est un vaste territoire, situé dans l’océan Pacifique Sud central. Elle se compose de cinq archipels principaux (**Figure 1.A**) et compte 33 îles et 84 atolls dont 77 sont situés dans l’archipel des Tuamotus-Gambier.

La définition du terme atoll reste à ce jour encore un peu floue et ambiguë. Selon Woodroffe et Biribo (2011) « les atolls sont des récifs océaniques annulaires ; la couronne récifale supporte des îles récifales isolées ou quasi continues, composées de sable ou de gravier non lithifiés ou faiblement consolidés, et renferme un lagon central ». En Polynésie française, de nombreux lagons d’atolls accueillent la culture d’huîtres perlières. La morphologie de ces atolls est très diversifiée en termes de tailles, de profondeurs et de degrés d’ouverture du lagon sur l’océan (Andréfouët et al., 2022b ; Andréfouët et al., 2023).

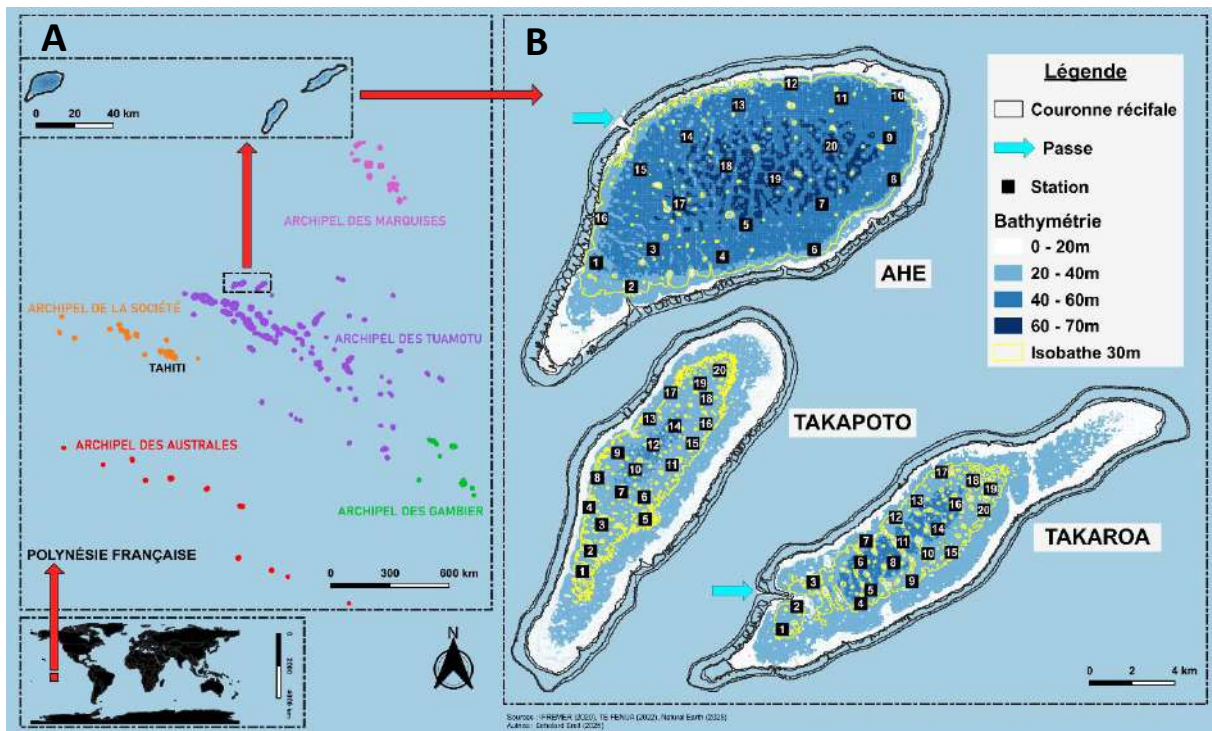


Figure 1 : Localisation de la Polynésie française et sites de l’étude

La perliculture constitue la seconde source de revenus de la Polynésie française, après le tourisme. Elle repose sur une seule espèce d’huître, *Pinctada margaritifera*, productrice des célèbres perles noires, principal produit d’exportation du territoire. L’activité a connu un essor massif dans les années 1990, puis, une surproduction de perles de faible qualité a fait drastiquement baisser le prix au gramme et a indirectement entraîné dans les années 2000 une diminution du nombre de fermes, devenues peu rentables. Par ailleurs, plusieurs épisodes de mortalité ont frappé différents atolls perlicoles entraînant d’importantes chutes de production. Malgré ces crises de marché et environnementales, et le fait que le prix de la perle soit désormais bien plus bas qu’à ses débuts, l’activité demeure toujours une source importante de revenus pour le territoire. De nombreux projets

et travaux de recherches ont été réalisés depuis les années 1990 pour mieux comprendre la biologie de l'huître, le fonctionnement et la productivité des atolls ou encore l'impact des pratiques aquacoles afin d'optimiser la production de perles de qualité (Andréfouët et al., 2019). Aussi, plus récemment, des recherches ont été effectuées afin de définir des stratégies de gestion spatiale visant à maintenir au mieux l'activité perlicole, notamment en caractérisant l'état des stocks naturels d'huîtres perlières et les facteurs pouvant influencer la collecte de naissains (Andréfouët et al., 2022c).

1.2. L'huître *Pinctada margaritifera*, espèce clé de la perliculture

L'huître perlière, *Pinctada margaritifera* (Linnaeus, 1758) est présente dans tout l'Indopacifique et est particulièrement naturellement abondante dans certains atolls de Polynésie française. C'est cette abondance qui a permis sa culture et la production de perles. Il s'agit d'un organisme filtreur suspensivore dont les taux de filtration sont parmi les plus élevés chez les bivalves, lui permettant de subvenir à ses besoins dans des lagons à faible concentration en matière organique particulaire (Pouvreau et al., 2000). Les huîtres perlières sont capables de filtrer uniquement des particules de taille supérieure à 3 μm (Pouvreau et al., 1999). Dans les lagons d'atolls perlicoles des Tuamotu (**Figure 1.A**), la biomasse de phytoplancton est constituée à 80 % de picophytoplancton (<2 μm) (Fournier et al., 2012a). Le picophytoplancton n'est pas directement consommable par les huîtres mais il est consommé par des protistes hétéro-mixotrophes jouant le rôle de médiateurs trophiques entre le picophytoplancton et les huîtres (Loret et al., 2000).

Le cycle de vie de l'huître *Pinctada margaritifera* est composé de deux phases principales, la phase pélagique qui comprend la phase larvaire et la phase benthique, phase fixée. La durée de la phase larvaire est variable en milieu naturel, et elle est de 3 semaines environ en élevage en milieu contrôlé dans des conditions propices standards. A la fin de la phase pélagique, la larve se fixe à un substrat puis se métamorphose en jeune naissain (huître juvénile). La croissance est plutôt rapide et des huîtres de 10 à 12 cm peuvent être obtenues en 2 ans (Thomas, 2009 ; Pouvreau & Prasil, 2001).

L'approvisionnement des fermes en huîtres se fait majoritairement par captage naturel des naissains, car la collecte d'adultes sauvages dans le milieu est interdite depuis 1988. Les larves se fixent sur des collecteurs placés dans les lagons. Généralement, après 6 mois, lorsque les naissains ont atteint une taille d'environ 5 cm, ils sont déplacés vers des systèmes d'élevage. Les huîtres sont principalement élevées sur des cordes fixées verticalement. Lorsqu'elles atteignent une taille d'environ 10 cm, les huîtres sont greffables. Le greffe consiste à faire une petite incision dans la poche perlière pour y insérer un nucleus, bille issue d'un morceau de coquillage, qui sert de support initial autour duquel la nacre se dépose. Un greffon est également inséré, morceau de manteau prélevé sur une huître donneuse et qui fournit les cellules vivantes qui vont proliférer et sécréter la nacre. Cette greffe permet 12 à 24 mois plus tard d'obtenir des perles noires. Les huîtres en bonne santé peuvent être greffées plusieurs fois (Pouvreau & Prasil, 2001).

L'huître perlière est une espèce protandrique donc avec généralement un changement de sexe de mâle à femelle au cours de la vie. Il a été démontré que les stocks d'huîtres sauvages présentent une plus grande proportion de femelles que les stocks d'huîtres d'élevage (Thielley, 1993). La présence d'huîtres sauvages dans les atolls est donc nécessaire à la reproduction, et au bon recrutement de naissains. Trois atolls (Marutea Sud, Ahe et Arutua) et une île (Mangareva) concentrent la moitié des concessions perlicoles. L'autre moitié se répartit entre 26 atolls et îles (Andréfouët et al., 2019). Les concessions perlicoles sont présentes généralement sur des fonds de faible profondeur aux abords des couronnes récifales qui entourent les lagons (DRM, 2025). Généralement, les plus fortes abondances d'huîtres sauvages sont situées sur les fonds de faible profondeur, entre 0 et 10 m. Il n'y en a quasiment plus après 30 m. Il y a également une inégale répartition des structures de taille et du renouvellement des populations au sein des lagons (Andréfouët et al., 2016 ; Andréfouët, 2022a ; Bionaz et al., 2023). Les stocks d'huîtres sauvages sont en baisse dans plusieurs atolls : à Ahe il y a eu une baisse par un facteur 3 entre 2013 et 2024, et par un facteur 7 à Takaroa entre 2013 et 2022. Les raisons de ces baisses restent encore mal comprises (Andréfouët, 2022 ; Andréfouët, 2024).

Les conditions climatiques au sein des atolls permettent aux huîtres perlières de se reproduire toute l'année (Sangare et al., 2020 ; Thomas et al., 2012b). Pour cette raison, l'abondance de larves d'huîtres dans les atolls est élevée en permanence (Thomas et al., 2010). Toutefois, la distribution des larves d'huîtres est hétérogène dans les lagons (Thomas et al., 2010 ; Lo-Yat et al., 2022) puisque leur concentration varie temporellement et spatialement en lien avec les conditions climatiques et le fonctionnement hydrologique des atolls. A Ahe, il a été montré que l'abondance de larves est corrélée positivement à la concentration en chlorophylle-a (Thomas et al., 2010 ; Thomas et al., 2012a).

1.3. La chlorophylle-a dans les atolls, un proxy de la disponibilité alimentaire pour les huîtres

La concentration en chlorophylle-a, pigment présent dans le phytoplancton, est un proxy pertinent de la disponibilité alimentaire pour les huîtres perlières et donc du potentiel du lagon pour élever des huîtres. En effet, même si une grande part du phytoplancton est constituée de cellules trop petites pour être directement consommées par les huîtres, la présence de protistes jouant le rôle d'intermédiaire trophique permet à la biomasse totale en chlorophylle-a de refléter indirectement la part réellement consommable. L'intégration de la chlorophylle-a dans des modèles bioénergétiques (DEB) a d'ailleurs fourni des résultats cohérents avec les croissances observées en lagon (Sangare et al., 2020).

La concentration en chlorophylle-a dans les atolls de la Polynésie française a été caractérisée, à l'aide de mesures fluorimétriques *in vivo* (Sangare et al., 2020), d'extraction (Thomas et al., 2012a ; Fournier et al., 2012a ; Rodier et al., 2021 ; Andréfouët, 2022a) et plus récemment par télédétection pour l'atoll de Ahe (Lefebvre et al., 2022). Des différences de concentration moyenne en chlorophylle-a entre atolls ont été démontrées (Charpy et al., 1997). Intra-lagon, même si les études n'ont pas été réalisées sur de longues périodes et n'ont pas exactement les mêmes conclusions, la plupart se rejoignent sur le fait que la concentration en chlorophylle-a présente une variabilité spatiale et temporelle, dans une gamme de variation pouvant aller jusqu'à 0.6µg/L (Sangare et al., 2020, Rodier

et al., 2021). Des variations saisonnières se traduisent par une augmentation de la concentration en saison chaude et une diminution en saison fraîche (Delesalle et al., 2001 ; Thomas et al., 2010 ; Lefebvre et al., 2012 ; Lefebvre et al., 2022). Les variations journalières observées sont parfois plus importantes que les variations saisonnières (Torreton et al. 2010, ; Thomas et al., 2010). Pour l'atoll de Ahe, les variations saisonnières sont différentes entre sites dans l'étude de Lefebvre et al. (2022) ce qui n'avait pas été observé dans Lefebvre et al. (2012). La variabilité spatiale verticale dans les lagons profonds dépend de la stratification des eaux lagunaires présente en période de vent calme ou absent (Thomas et al., 2010 ; Charpy et al., 1998 ; Andréfouët, 2022b). Néanmoins, suivant les vents et les profondeurs de mesure, les auteurs ont pu conclure différemment sur la variabilité de la concentration en chlorophylle-a en profondeur (Lefebvre et al., 2012 ; Charpy et al., 2012).

I.4. La modélisation bioénergétique pour modéliser des traits d'histoires de vie des huîtres perlières

Les modèles bioénergétiques permettent d'étudier les processus d'allocation d'énergie dans des organismes vivants. Ces modèles visent à comprendre comment l'énergie est acquise et allouée aux différentes fonctions biologiques. La théorie DEB est une approche générale qui considère que toutes les espèces partagent la même organisation métabolique et les mêmes règles d'allocation d'énergie, quel que soit leur stade de vie, à travers un ensemble de paramètres dont certains sont spécifiques à chaque espèce. Cette théorie considère que l'énergie assimilée est allouée à trois compartiments biologiques distincts : les réserves, la croissance (structure) et la maturation ou reproduction, la reproduction n'ayant lieu qu'une fois la maturation terminée. Ces trois compartiments sont appelés variables d'état (Kooijman, 2009). Le modèle DEB est particulièrement intéressant car il permet de simuler des traits d'histoires de vie des huîtres perlières dans des environnements variables. Un modèle DEB a été développé pour tous les stades de vie de *Pinctada margaritifera* (Sangare et al., 2020). Il a été utilisé à différentes reprises pour simuler la croissance des huîtres perlières ou encore leur potentiel de reproduction. La modélisation DEB permet notamment d'étudier l'effet des variations de la concentration en chlorophylle-a sur les traits d'histoire de vie des huîtres perlières (Sangare et al., 2020 ; Monaco et al., 2021 ; Lefebvre et al., 2022).

I.5. Les conséquences de la variabilité spatiale et temporelle de la concentration en chlorophylle-a

La concentration en chlorophylle-a influence la durée de vie larvaire, la croissance et la reproduction des huîtres perlières (Lefebvre et al., 2022). Des variations spatiales de croissance intra et inter atolls ont ainsi été observées (Sangare et al., 2020, Lefebvre et al., 2022, Pouvreau & Prasil, 2001) en fonction des variations spatiales de chlorophylle-a. À l'échelle du lagon de Ahe, il a été observé des durées de vie larvaire plus faibles (Lefebvre et al., 2022) ainsi que des croissances plus rapides à l'ouest du lagon (Thomas et al., 2011, Sangare et al., 2020). La variation de la disponibilité alimentaire est aussi à mettre en rapport avec l'intensité des pontes au cours de l'année (Fournier et al., 2012b). Les variations de la concentration moyenne en chlorophylle-a, mais aussi de l'amplitude des pics et de l'intervalle temporel entre ceux-ci, influencent fortement la croissance et la capacité de reproduction des huîtres (Sangare et al., 2020).

I.6. La télédétection, une méthode pour cartographier la concentration en chlorophylle-a dans les lagons

Il est possible d'estimer la concentration en chlorophylle-a dans l'eau par télédétection optique. En effet, en raison de la forte capacité des pigments de chlorophylle à absorber la lumière, la présence de chlorophylle-a dans l'eau en modifie sensiblement la signature spectrale. Ainsi, l'exploitation de la réflectance spectrale de l'eau dans le domaine visible, appelée communément « couleur de l'eau », permet d'estimer la concentration en chlorophylle-a. L'utilisation de données satellitaires, combinées à des algorithmes bio-optiques, est reconnue comme une méthode efficace pour estimer la concentration en chlorophylle-a dans l'eau (Mueller et al., 2004). L'efficacité de la méthode varie toutefois selon les satellites et algorithmes utilisés, ainsi que selon les caractéristiques optiques propres à chaque zone d'étude. Pour cette raison, des validations et calibrations spécifiques doivent être réalisées pour chaque contexte d'application.

Les données satellitaires brutes nécessitent une correction atmosphérique afin de s'affranchir des effets d'interface de l'eau et de l'atmosphère (Emberton et al., 2015) et estimer ainsi la réflectance de l'eau, qui est la composante sensible à la présence de chlorophylle. Le principe de la correction atmosphérique est d'estimer la réflectance de l'océan à partir d'observations réalisées au sommet de l'atmosphère. Les algorithmes de correction atmosphérique intègrent parfois une correction de la réflexion du soleil à l'interface eau-atmosphère, afin de restituer la réflectance de l'océan. La relation entre réflectance de surface et rayonnement au sommet de l'atmosphère, régie par les processus de diffusion et d'absorption, est complexe. Cette relation dépend de la composition de l'atmosphère qui reste en général largement inconnue. Les différents algorithmes de correction atmosphérique proposent des résolutions analytiques ou numériques pour modéliser cette relation, font éventuellement appel à des données ancillaires exogènes pour contraindre le système, mais doivent aussi faire appel à des hypothèses ou recourir à des simplifications. Toute correction atmosphérique présente donc une incertitude qui dépend de l'adéquation entre la scène observée et le domaine de validité du modèle utilisé. Il existe de nombreux algorithmes de correction atmosphériques, plus ou moins efficaces et plus ou moins adaptés à l'environnement océanique de la Polynésie. Les algorithmes de correction atmosphérique corrigent les données de réflectance mais lorsque les réflectances d'un pixel sont hors du domaine de validité prévu par l'algorithme de correction atmosphérique, celui-ci peut ne pas produire de valeur de réflectance de surface et induire la présence de pixels manquants (NA) après correction.

La télédétection permet d'obtenir des données sur de longues durées, dépendant des dates de lancement des satellites et de leur résolution temporelle, sans avoir à se déplacer sur le terrain. CZCS (Coastal Zone Color Scanner), le premier satellite porteur d'un capteur permettant d'étudier la couleur de l'eau et d'en retirer la concentration en chlorophylle-a, a été envoyé dans l'espace par la NASA en 1978 (Werdell et al., 2023). Depuis ce jour, de nombreux autres satellites avec différents capteurs ont également été mis en orbite et permettent aujourd'hui d'estimer la concentration en chlorophylle-a dans l'eau à partir d'observations multispectrales. De nombreuses études ont été réalisées pour améliorer les résultats, avec des missions spatiales dédiées ou avec des missions plus génériques.

En Polynésie française, différents capteurs multispectraux en orbite survolent les atolls perlicoles et pourraient servir à obtenir des données de concentrations en chlorophylle-a : MSI (Multi Spectral Instrument) à bord des satellites Sentinel-2 de Copernicus, OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) à bord de Sentinel-3 (Copernicus), OLI (Operational Land Imager) à bord de Landsat 8 et 9 (NASA/USGS), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) à bord des satellites Terra et Aqua (NASA), VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) à bord des satellites Suomi-NPP, NOAA-20 et NOAA-21 (NASA/NOAA). Chaque capteur a des caractéristiques différentes : date de lancement, orbite, résolution spatiale et temporelle. Les travaux utilisant la télédétection pour estimer la concentration en chlorophylle-a sur des sites polynésiens sont rares et récents. Vollbrecht et al., (2021) se sont intéressés à la concentration en chlorophylle-a dans les eaux périphériques d'un atoll. Par la suite, Lefebvre et al., (2022) ont étudié la concentration en chlorophylle-a d'un lagon d'atoll. En exploitant les données issues du satellite Landsat 8, ils ont pu étudier la concentration en chlorophylle-a dans les eaux d'un lagon d'atoll sur le long terme. Leur étude a également permis de quantifier l'impact de la réflexion du fond, concluant que celui-ci devient négligeable à partir d'une profondeur de 30 m.

I.7. Problématisation

Les campagnes scientifiques en Polynésie française sont difficiles logistiquement et coûteuses sur de longues durées. La majeure partie des échantillonnages de chlorophylle-a ont été réalisés sur quelques jours, quelques mois au mieux, pour certains lagons d'atolls très étudiés comme Takapoto et Ahe. Il n'y a pas eu de suivi sur plusieurs années effectué systématiquement, si ce n'est pour l'atoll de Ahe à l'aide d'une approche par télédétection a posteriori proposée par Lefebvre et al. (2022), sur des données de 2013 à 2021 issues de Landsat 8 et corrigées par la correction atmosphérique ACOLITE (Vanhellemont & Ruddick, 2018). Depuis cette étude, le satellite Landsat 9 a été mis en orbite et peut fournir des données supplémentaires afin d'améliorer la résolution temporelle. De plus, d'autres corrections atmosphériques ont montré des résultats très satisfaisants et souvent meilleurs que la correction ACOLITE, notamment en eaux claires (Yan et al., 2023 ; Sun et al., 2024). Des données terrain supplémentaires, de concentrations en chlorophylle-a, notamment pour d'autres atolls que Ahe sont également disponibles depuis peu. Lefebvre et al. (2022) ont mis en évidence des variations spatiales et temporelles, mais sans les étudier de manière approfondie. Lors de cette étude, seul l'atoll de Ahe a été étudié, 3 stations ont été suivies et comparées au sein du lagon, ce qui représente une faible couverture spatiale compte tenu de la taille de l'atoll (**Figure 1.B**). À ce jour, aucune étude similaire n'a été réalisée sur d'autres atolls polynésiens. Chaque atoll possédant une morphologie et un fonctionnement propres, les résultats observés sur un atoll ne peuvent être généralisés à l'ensemble des autres.

Cette présente étude fait donc suite à celle de Lefebvre et al., 2022. L'objectif est d'une part d'étudier la faisabilité de l'utilisation de données Landsat 9 en plus de celles de Landsat 8 et de comparer la correction atmosphérique ACOLITE à une autre correction atmosphérique qui pourrait s'avérer plus simple d'utilisation et plus cohérente d'après la littérature. Et d'autre part de compléter les séries temporelles déjà acquises pour Ahe et en acquérir de nouvelles pour deux autres atolls :

Takaroa et Takapoto. La finalité serait de décrire plus précisément les variations spatiales et temporelles de la concentration en chlorophylle-a intra et inter-atoll. Ainsi que d'étudier les conséquences de ces variabilités sur la croissance et la capacité de reproduction des huîtres perlières.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

II.1. Sites de l'étude

Ahe, Takaroa et Takapoto (**Figure 1.B**) sont trois atolls situés au nord-ouest de l'archipel des Tuamotu (Andréfouët et al., 2016). Ces trois atolls font partie des atolls les plus étudiés et ayant joué ou jouant encore un rôle important pour la filière perlicole (Andréfouët et al., 2012b). Takaroa se trouve à environ 10 km au nord-est de Takapoto et Ahe se trouve à environ 100 km à l'est de ces deux atolls. Tahiti se situe à environ 500 km au sud-ouest de ces trois atolls. Ahe, Takaroa et Takapoto ont respectivement un volume de 144.63 km², 85.96 km² et 78.64 km² et une profondeur moyenne de 40.6 m, 25.8 m et 24.8 m. Ahe se différencie par sa plus grande taille et ses plus grandes profondeurs, il est qualifié d'atoll profond. Des structures réticulées sont visibles sur les fonds de Ahe et Takaroa ; elles apparaissent clairement sur les cartes bathymétriques sous forme de bassins plus profonds (Andréfouët et al., 2020). Ahe et Takaroa sont des atolls semi-fermés, chacun possède une passe profonde assurant une connexion avec l'océan environnant, ainsi que de nombreux chenaux peu profonds (hoa). Les échanges d'eau avec l'océan sont modérés, car l'exposition aux vagues océaniques est faible et les marées atteignent en moyenne 30 cm (Andréfouët et al. 2012a). Takapoto est un atoll fermé, dépourvu de passe, et uniquement relié à l'océan par quelques hoa peu profonds situés sur les flancs est et ouest de sa couronne récifale (Bionaz et al., 2023 ; Andréfouët et al., 2022a). Ces différences morphologiques et les différences de volume, entraînent des temps de résidence de l'eau différents, avec une durée moyenne d'environ 350 jours pour Ahe, 330 jours pour Takaroa et 460 jours pour Takapoto (Andréfouët et al., 2022a).

Le climat est de type tropical humide. La saison des pluies qui s'étend de novembre à avril, coïncide avec des températures plus élevées. La température de l'eau varie généralement entre 26 et 30 °C (Thomas et al., 2010 ; Sangaré et al., 2020).

Les atolls des Tuamotu concentrent 77 % de la surface des concessions perlières de Polynésie française (Andréfouët et al., 2019). Le nombre exact de concessions par atoll est difficile à déterminer avec précision car certaines concessions sont officiellement enregistrées mais ne sont pas actives. D'après les données de la Direction des Ressources Marines (DRM, 2025), on recense 55 concessions à Ahe, 20 à Takaroa et 30 à Takapoto. Elles couvrent respectivement 5.4 % de la surface de l'atoll de Ahe, 3.5 % de celui de Takaroa et 1.7 % de celui de Takapoto (**Annexe 1**). Pour ce qui est des stocks d'huîtres sauvages, environ 259 000 huîtres ont été recensées à Ahe en 2024 et 9.1 millions à Takapoto en 2021 (**Annexe 2**). Pour Takaroa, il n'y a pas de chiffres disponibles pour l'ensemble de l'atoll mais l'atoll a subi une mortalité massive de 2013 à 2014 dû à un bloom phytoplanctonique et le stock est très faible.

II.2. Stations de suivi temporel de la concentration en chlorophylle-a par télédétection

Afin d'éviter au maximum les effets de la réflectance du fond, la concentration en chlorophylle-a a été étudiée par télédétection uniquement dans les zones des lagons ayant une bathymétrie supérieure à 30m (Lefebvre et al., 2022). L'étude de la variabilité spatiale et temporelle de la concentration en chlorophylle-a intra et inter-lagon s'est faite à l'aide du suivi de 20 stations par lagon (**Annexe 3**). Ces stations ont été choisies à l'aide d'un échantillonnage aléatoire stratifié après un découpage des lagons en 20 secteurs de surfaces égales. Ces secteurs étaient prédéfinis pour Ahe et Takaroa dans Violette et al. (2023) et nous les avons définis ici pour Takapoto dans la zone de bathymétrie supérieure à 30 m. Les stations de suivi ont été positionnées aléatoirement dans chaque zone. Pour Ahe et Takaroa, lorsqu'une zone se situait entièrement hors de la zone des 30 m, une station supplémentaire a été positionnée dans une autre zone d'intérêt. Les stations sont des carrés de 210 m de côté environ.

II.3. Données satellitaires et données terrain de validation

Afin d'étudier à la fois la variabilité spatiale et temporelle, il a été choisi d'utiliser les satellites Landsat, comme dans Lefebvre et al. (2022) qui ont utilisé Landsat 8. Le choix d'utiliser des données Landsat 8 et Landsat 9 est un compromis entre résolution spatiale et longueur de la série temporelle. En effet Sentinel 2 possède une meilleure résolution spatiale que Landsat 8 ou 9 mais celui-ci survole la zone d'étude seulement depuis 2019 contre 2013 pour Landsat 8.

Des données journalières de Niveau 1, radiances mesurées au sommet de l'atmosphère, collection 2, version la plus récente, issues des satellites Landsat 8 et 9, provenant du capteur multispectral OLI, ont été utilisées. Ces données ont été téléchargées via la plateforme de l'USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), et couvrent la période du 26 mai 2013 au 19 mai 2025 (les données Landsat 9 s'ajoutant à celles de Landsat 8 à partir du 10 novembre 2021). Landsat 9, mis en orbite huit ans après Landsat 8, possède un capteur OLI légèrement amélioré. Les deux satellites embarquent un capteur OLI composé de 9 bandes (Bande 1 : aérosols côtiers, Bande 2 : Bleu, Bande 3 : Vert, Bande 4 : Rouge, Bande 5 : Proche Infrarouge (NIR), Bande 6 : Infrarouge à bandes courtes (SWIR1), Bande 7 : SWIR2, Bande 8 : Panchromatique, Bande 9 : Cirrus). Le capteur OLI de Landsat 9 offre une quantification sur 14 bits, contre 12 bits pour celui de Landsat 8, permettant une détection plus fine des variations radiométriques, notamment sur les surfaces sombres. Les plages spectrales sont légèrement différentes entre les capteurs OLI des deux satellites, il y a quelques nanomètres de différence selon les bandes. La résolution spatiale des bandes multispectrales est de 30 m. Chacun de ces deux satellites survole la même scène tous les 16 jours, et la combinaison des deux offre un temps de revisite de 8 jours car ils sont sur la même orbite en opposition de phase. Des données sont donc disponibles tous les 16 jours de mai 2013 à novembre 2021, puis tous les 8 jours lorsque L9 a été opérationnel. Les scènes Landsat ont des tailles de 170 par 183 km, soit environ 35 millions de pixels, les atolls Takapoto et Takaora sont sur la même scène (path/row = 052/070) et Ahe est sur une scène différente (path/row = 051/070). Les satellites Landsat 8 et 9 passent au-dessus de la zone d'étude le matin vers 9h45, heure locale. Le choix des scènes à traiter a été réalisé en fonction de la couverture

nuageuse observée et du nombre de pixels valides sur la zone du lagon des atolls. 305 scènes ont été retenues pour l'atoll de Ahe et 287 pour les atolls de Takapoto et Takaroa.

Les données de Niveau 1 fournissent des valeurs de radiances au sommet de l'atmosphère. Ces données brutes nécessitent une correction atmosphérique afin de s'affranchir des effets d'interface de l'eau et de l'atmosphère (Emberton et al., 2015) et estimer ainsi la réflectance de l'eau, qui est la composante sensible à la présence de chlorophylle-a. Dans cette étude, deux corrections atmosphériques ont été testées, ACOLITE (Vanhellemont & Ruddick, 2018) et POLYMER (Steinmetz et al., 2011). ACOLITE est la correction qui a été utilisée dans Lefebvre et al. (2022), à partir d'une version (2021) aujourd'hui obsolète. L'algorithme POLYMER a montré son efficacité peu après l'étude de Lefebvre et al. (2022). Il s'agit d'un algorithme plus simple à mettre en place et qui montre de très bons résultats (Yan et al., 2023 ; Sun et al., 2024). POLYMER est un algorithme de correction atmosphérique « clé en mains », peu modifiable ou adaptable contrairement à ACOLITE qui possède de nombreux paramètres modifiables manuellement.

POLYMER a été développé par Steinmetz et al. (2011) spécifiquement pour les environnements côtiers et marins complexes. L'un des points forts de cet algorithme est sa capacité à obtenir une bonne couverture spatiale des données. En effet, il corrige particulièrement bien la réflexion du soleil par la surface (sun-glint) et également les nuages semi-transparents tels que les cirrus. POLYMER réussit à obtenir des données au niveau du sol même lorsque le ciel est voilé. La Polynésie étant une zone où la réflexion du soleil est souvent présente, il était intéressant de tester cette correction. L'algorithme utilise une méthode d'ajustement spectral reposant sur deux modèles. Un modèle atmosphérique polynomial simple, représentant la diffusion atmosphérique et la réflexion du soleil par la surface et un modèle bio-optique de réflectance de l'eau, décrivant la couleur de l'océan. Les paramètres de ces deux modèles sont ajustés de manière itérative pour obtenir la meilleure correspondance avec les mesures satellitaires (Steinmetz et al., 2011). L'algorithme arrive donc à séparer les signaux liés à la couleur de l'eau de ceux liés à l'atmosphère ou à la réflexion du soleil et c'est ce qui en fait son point fort. POLYMER utilise toutes les bandes mises à sa disposition pour réaliser la correction atmosphérique. La performance de cet algorithme est reconnue et il est notamment utilisé par l'ESA, la NASA et les services Copernicus. La correction POLYMER qui a été utilisée est la version 4 par défaut, aucune modification n'a été apportée si ce n'est que nous avons légèrement adapté le code pour le faire fonctionner sur les images Landsat 9.

L'algorithme ACOLITE est particulièrement adapté au traitement des eaux turbides et des petits plans d'eau intérieurs, mais peut également être utilisé avec un succès raisonnable sur des eaux plus claires (Vanhellemont, 2025). Il repose sur l'hypothèse que l'atmosphère est homogène sur tout ou partie de la scène traitée, ce qui est une hypothèse raisonnable pour les lagons de petite taille. Pour la correction atmosphérique, ACOLITE utilise l'ensemble des bandes disponibles et sélectionne automatiquement celle présentant les réflectances les plus faibles afin d'estimer la réflectance due à l'atmosphère. Il met ainsi en œuvre la méthode du Dark Spectrum Fitting (Vanhellemont & Ruddick, 2018), qui consiste à utiliser un ou plusieurs pixels présentant les plus faibles réflectances pour estimer l'effet de l'atmosphère et l'épaisseur optique des aérosols. Contrairement à POLYMER, ACOLITE ne corrige pas les nuages semi-transparents, il les masque seulement. La correction ACOLITE qui a été

utilisée est la version 20250402.0 par défaut, adaptée au capteur OLI. Deux modifications ont été effectuées : l'ajout de la correction de la réflexion du soleil, calculée à partir des bandes SWIR ; ainsi que la réduction du seuil de masquages des bandes SWIR de 0.0215 à 0.04 afin de réduire la perte de données. Ces deux modifications font partie de celles appliquées par Lefebvre et al. (2022). De plus, afin d'optimiser les temps de calculs, les scènes ont été coupées pour réduire leur taille.

Après correction atmosphérique, la concentration en chlorophylle-a à la surface a été calculée à l'aide de l'algorithme OCI (Ocean Color Index) de la NASA (Werdell et al., 2023). L'algorithme de la NASA combine deux algorithmes distincts, CI (Color Index) (Hu et al., 2019) et OC3 (Ocean Color 3-band algorithm) (O'Reilly et al., 2019), à l'aide de deux valeurs seuils. Pour des concentrations en chlorophylle-a inférieures au premier seuil, la valeur est estimée à partir de l'algorithme CI ; pour des concentrations supérieures au second seuil, c'est l'algorithme OC3 qui est utilisé. Entre ces deux seuils, la valeur finale résulte d'une pondération entre les résultats des deux algorithmes. CI et OC3 sont des algorithmes empiriques, leurs coefficients ont été déterminés à l'aide de données *in situ* et sont mis à jour régulièrement pour améliorer leurs estimations. Cet algorithme combiné permet d'estimer des concentrations en chlorophylle-a sur une large gamme de conditions optiques, des eaux oligotrophes aux eaux plus productives. La chlorophylle-a absorbe différemment la lumière bleue, verte et rouge selon sa concentration. Cela modifie l'intensité de la lumière ressortant de la colonne d'eau et donc la couleur de l'eau. Ces variations permettent d'établir des relations entre la lumière réfléchie par l'eau et la concentration en chlorophylle-a (Hu et al., 2019). La concentration en chlorophylle-a a donc été estimée à l'aide des réflectances de surface issues des données satellitaires corrigées. Les produits POLYMER et ACOLITE fournissent des valeurs de réflectances quittant l'eau, sans unités. Ces valeurs ont été divisées par π pour obtenir des valeurs en réflectance de télédétection R_{rs} (sr^{-1}), utilisées comme entrées des algorithmes bio-optiques. Les fichiers de sorties après correction atmosphérique sont au format netcdf, ils sont transformés en fichiers Geotiff (ESPG 32706) avant l'application de l'algorithme OCI de la NASA.

La concentration en chlorophylle-a est initialement calculée à partir de l'algorithme CI. Cet algorithme utilise les données de réflectance des bandes bleue (bande 2), verte (bande 3) et rouge (bande 4) ; il est adapté spécifiquement aux eaux claires oligotrophes ayant des concentrations en chlorophylla-a inférieures à $0.15 \mu g L^{-1}$ (Hu et al., 2012). Les coefficients utilisés sont ceux issus de Hu et al. (2019) modifiés à partir de Hu et al. (2012). C'est à partir de cette concentration que le choix est fait entre CI, OC3 et la pondération. L'algorithme OC3 est un algorithme polynomial utilisant le rapport maximal entre les bandes bleues (bandes 1 et 2) et la bande verte (bande 3). Il donne de très bons résultats en eaux claires (Shanmugam, 2011), mais il est moins adapté que CI pour les eaux très oligotrophes. Il n'y a pas de différences de formule ou coefficients entre Landsat 8 et 9. Les coefficients de la formule d'OC3 utilisés sont ceux de O'Reilly et al. (2019) modifiés à partir de ceux de O'Reilly et al. (1998). Les valeurs seuils choisies sont $0.15 \mu g \cdot L^{-1}$ et $0.20 \mu g \cdot L^{-1}$. Ce sont les valeurs seuils qui ont été utilisées dans Lefebvre et al. (2022) car c'était les valeurs seuils utilisées par la NASA (Werdell et al., 2023).

Les formules qui ont été utilisées sont les suivantes :

Algorithme CI

$$CI = Rrs\ 561 - [Rrs\ 483 + \frac{561-483}{655-483} \times (Rrs655 - Rrs\ 483)] \quad Chlo_{CI} = 10^{-0.4287 + 230.47 \times CI}$$

Algorithme OC3

$$R = \frac{\max(Rrs443, Rrs483)}{Rrs\ 561} \quad \chi = \log_{10}(R)$$

$$y = 0.30963 - 2.40052\chi + 1.28932\chi^2 + 0.52802\chi^3 - 1.33825\chi^4 \quad Chlo_{OC3} = 10^y$$

Seuils

Si $Chlo_{CI} \leq 0.25$ alors : $Chl_{OC3CI} = Chlo_{CI}$

Si $Chlo_{CI} > 0.35$ alors : $Chl_{OC3CI} = Chlo_{OC3}$

Sinon : $Chl_{OC3CI} = \left(\frac{Chlo_{CI} - 0.25}{0.35 - 0.25}\right) \times Chlo_{OC3} + \left(\frac{0.35 - Chlo_{CI}}{0.35 - 0.25}\right) \times Chlo_{CI}$

Après l'estimation de la concentration en chlorophylle-a, un seuil a été appliqué sur les pixels, les pixels ayant une concentration supérieure à 1 µg/L ont été masqués. Les atolls polynésiens ont rarement des concentrations supérieures à 1 µg/L, ce masquage permet de s'affranchir entre autres des nuages mal corrigés.

Chaque station de suivi de la concentration en chlorophylle a est constituée de 49 pixels, le pixel central est donné par les coordonnées GPS de chaque station. La concentration en chlorophylle-a d'une station est donc une moyenne de la concentration de 49 pixels.

Quelques données de chlorophylle-a *in vivo* et extraites sont disponibles pour les trois atolls étudiés et ont permis de vérifier qualitativement la validité des données issues de la télédétection (Sangare et al., 2020 ; Rodier et al., 2021 ; Andréfouët, 2022a). Les données d'un transect à Ahe permettent notamment d'observer la cohérence spatiale des données obtenues par télédétection. Des données de concentrations en chlorophylle-a fournies par le projet Climate Change Initiative (OC-CCI) de l'Agence spatiale européenne (ESA), version 6.0, ont également été utilisées afin de valider qualitativement les tendances des séries temporelles. Ces données sont issues de mesures venant de différents satellites, ayant subi différentes corrections atmosphériques et utilisant différents algorithmes bio-optiques. Les produits de Niveau 3 ont été téléchargés via le site de l'ESA (<https://www.oceancolour.org/portal/>), pour des zones de 4 km x 4 km sur chaque atoll, correspondant à 4 pixels du produit ESA. La localisation des points de mesures des données terrain et des zones utilisées pour la comparaison avec l'ESA sont disponibles en **Annexe 4**.

Dans un premier temps, les corrections atmosphériques ACOLITE et POLYMER ont été comparées afin de choisir la plus adaptée au site d'étude et à la problématique. La comparaison a été réalisée uniquement sur les données de l'atoll de Ahe, car c'est celui ayant le plus de données disponibles et également le seul qui a déjà été étudié par télédétection (Lefebvre et al., 2022). Pour ne pas induire un biais inter-satellite, il a été choisi de réaliser cette comparaison uniquement sur les données Landsat 8, plus nombreuses que celles Landsat 9. 231 scènes Landsat 8 ont été utilisées. La comparaison entre les deux corrections atmosphériques a été réalisée entre les données de concentrations en chlorophylle-a dérivées des réflectances de surface et des données de concentrations issues d'expéditions sur le terrain et des données de l'ESA car il n'y a aucune donnée radiométrique *in situ* disponible à ce jour. Les données satellitaires ont subi des corrections

atmosphériques différentes et ensuite le même algorithme OCI a été appliqué à toutes les données Landsat 8 corrigées.

Enfin, des données de température de surface de la mer (SST) MODIS-Aqua, obtenues depuis le site NASA Ocean Colour (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>), ont été utilisées pour l'atoll de Ahe. Les produits SST de niveau 3 ont été regroupés temporellement en climatologies de 8 jours et présentent une résolution spatiale de 4 km. Ces données n'ont pas été utilisées pour étudier en détail l'évolution de la température dans l'atoll de Ahe mais principalement pour être utilisées dans un modèle bioénergétique (DEB).

II.4. Modèles additifs généralisés (GAM)

Des modèles additifs généralisés (GAM), et GAM mixtes, ont été utilisés afin d'étudier la variabilité spatiale et temporelle de la concentration en chlorophylle-a inter et intra lagon. Les GAM permettent de modéliser des relations potentiellement non linéaires entre une variable réponse et plusieurs variables explicatives, en intégrant des fonctions lissées (splines) pour représenter les effets continus. Ces modèles permettent à la fois de prédire la valeur de la variable réponse lorsqu'il manque des données mais également d'en expliquer ses variations à l'aide de différents facteurs spatiaux, temporels et environnementaux. Les modèles GAM utilisés ont été ajustés à l'aide du package *mgcv* (Wood, 2017) sous R (version 4.5.0). Dans le cadre de l'étude, la variable réponse était la concentration en chlorophylle-a ($\mu\text{g/L}$) obtenue à l'aide des données satellitaires, et les variables explicatives testées étaient : année, mois, atoll et station.

Des interactions entre certaines variables explicatives ont été testées afin de voir si l'effet d'un facteur dépendait d'un autre. Pour ce faire, des effets lissés bidimensionnels, $ti()$, ont été utilisés. Enfin, l'argument *by* a permis de définir des fonctions de lissage spécifiques à certaines modalités, *s* (variable, *by* = facteur), afin d'obtenir des courbes propres à chaque niveau du facteur. Les années 2013 et 2025 n'étant pas complètes, elles ont été exclues des modèles. Les modèles ont été construits avec une loi Gamma, avec fonction de lien logarithmique. Ce choix a été fait car les données sont strictement positives et présentent une asymétrie positive marquée. Lors du calcul de la moyenne par station sur 49 pixels, il pouvait arriver qu'il n'y ait qu'un ou deux pixels valide, ce qui est peu satisfaisant. Aucun seuil de validité n'a été appliqué mais un facteur de pondération (Weights) a été utilisé afin de réduire le poids des données qui semblaient moins fiables. Le facteur Weights a été calculé de cette manière :

$$\text{Weights} = \frac{\text{nombre de pixels valides}}{\text{moyenne du nombre de pixels valides}}$$

Les modèles GAM ont été sélectionnés à la fois sur la base des comparaisons d'AIC et des résultats des tests ANOVA entre modèles, de manière à retenir la structure la plus parcimonieuse tout en conservant un pouvoir explicatif satisfaisant. Leur validité a été vérifiée en examinant les diagnostics standards (résidus, homogénéité de la variance, normalité) ainsi que les PACF pour contrôler l'autocorrélation résiduelle. Lorsque le nombre de données était trop élevé pour un ajustement efficace en GAM, un modèle BAM (Big Additive Model) a été utilisé.

II.5. Dynamic Energy Budget (DEB)

Le modèle DEB qui a été utilisé est celui qui a été développé par Sangare et al. (2020), c'est également leurs paramètres qui ont été utilisés (**Annexes 5**). Ce modèle utilise la température de l'eau et la concentration en chlorophylle-a comme variables d'entrée, la chlorophylle-a étant un proxy de la disponibilité alimentaire. Dans le cadre de cette étude, les variables d'entrée utilisées sont : les concentrations en chlorophylle-a obtenues à l'aide des données satellitaires et la température de surface de la mer (SST) Modis Aqua. La température a été corrigée à l'aide de la fonction complète de correction de température (TC), qui prend en compte les bornes inférieure et supérieure de la plage optimale (**Annexe 6**). Cette correction permet de représenter plus fidèlement l'effet de la température sur le métabolisme, en tenant compte du ralentissement en dessous du seuil inférieur et de l'inhibition qui apparaît au-delà du seuil supérieur. Des données *in situ* de croissances ont permis d'ajuster le paramètre X_k , paramètre de demi-saturation de la fonction de réponse alimentaire. Ce paramètre X_k permet de calculer la fonction de réponse alimentaire f à l'aide de la formule suivante :

$$f = \frac{\text{concentration en chlorophylle-a}}{\text{concentration en chlorophylle-a} + X_k}$$

Deux scénarios ont été exécutés sur R (version 4.5.0) à l'aide de ce modèle DEB :

- Durée pour une huître récemment fixée d'atteindre une taille de 5 cm, c'est-à-dire la taille moyenne à partir de laquelle il y a transfert du collecteur à la ligne d'élevage.
- Potentiel de reproduction et nombre de pontes pour une huître de 13 cm.

II.6. Dynamic Time Warping (DTW) et clustering hiérarchique

Afin de comparer les dynamiques entre stations et de regrouper celles présentant des évolutions similaires de la concentration en chlorophylle-a, l'algorithme dynamic time warping (DTW) a été utilisé, suivi d'un clustering hiérarchique. Le DTW est une mesure de distance qui compare des séries temporelles en recherchant l'alignement temporel optimal entre leurs points, de manière à minimiser la distance totale entre les valeurs alignées. Cette approche est particulièrement adaptée lorsque les séries présentent des décalages temporels ou des variations de rythme, car elle ne suppose pas que les événements se produisent au même moment dans chaque série. Dans l'algorithme DTW, le *step pattern* définit la façon dont la distance entre deux séries temporelles est calculée. Le *step pattern symmetricP1* (Sakoe & Chiba, 1978) a été utilisé car il fournit une distance équilibrée entre les séries. Cet algorithme a été utilisé sur les sorties des modèles GAM et DEB. Une fois les matrices de distances calculées, un clustering hiérarchique a permis de regrouper les stations similaires. Le clustering hiérarchique est une méthode de classification qui regroupe progressivement les objets en clusters, en fonction de leur similarité, pour former une structure arborescente appelée dendrogramme. Dans cette étude, la méthode de liaison utilisée était la méthode complète. Le nombre de clusters (k) a été déterminé à l'aide du score silhouette, indicateur de la qualité du regroupement. Un score proche de 1 traduit des clusters bien séparés, tandis qu'une valeur proche de 0 indique une faible structure. L'ensemble des calculs a été réalisé sous R (version 4.5.0) à l'aide des packages *dtw* (Giorgino, 2009) et *stats*.

III. RÉSULTATS

III.1. Comparaison des corrections atmosphériques ACOLITE et POLYMER

La correction ACOLITE aboutit à une plus grande quantité de pixels manquants que POLYMER (**Tableau 1**), avec une différence d'environ 30 %, ce qui n'est pas négligeable notamment pour la réalisation d'une étude spatio-temporelle. Il y a en moyenne 75 données journalières de concentration en moins par station avec ACOLITE qu'avec POLYMER. Néanmoins, les gammes de concentrations moyennes en chlorophylle-a dans les stations sont très proches ; les valeurs dérivées des données traitées par ACOLITE sont légèrement plus fortes que POLYMER pour toutes les stations, sauf pour la station 14, proche de la passe. Les différences sont variables d'une station à une autre, de 0.001 à 0.04 µg/L (**Annexe 7**).

Tableau 1 : Comparaison du nombre de données obtenues et de la gamme de concentration en chlorophylle-a en fonction de la correction atmosphérique utilisée.

Correction	% NA	Nombre de données par stations	Moyennes dans les stations
ACOLITE	41.6 %	204 à 215 (moyenne = 210)	0.246 à 0.351 (µg/L)
POLYMER	8.98 %	127 à 145 (moyenne = 135)	0.243 à 0.315 (µg/L)

Les tendances de la concentration en chlorophylle-a par station sont les mêmes entre les deux corrections, les différences sont faibles et généralement inférieures à 0.1 µg/L (**Figure 2**). La variabilité entre les deux corrections diffère d'une station à l'autre. Les données sont plus dispersées pour la station 2 que pour la station 4, notamment pour des concentrations en chlorophylle-a supérieures à 0.2 µg/L.

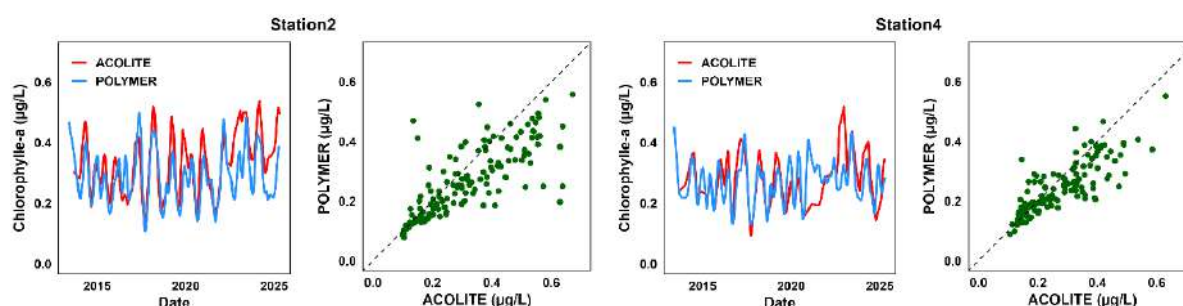


Figure 2 : Comparaison des séries temporelles de concentrations en chlorophylle-a des stations 2 et 4 (à titre d'exemple), en fonction de la correction atmosphérique utilisée. Les séries ont été lissées à l'aide d'un spline cubique. La relation linéaire (bissectrice) est non significative pour la station 2, mais elle l'est pour la station 4 ($Y = X$, $R^2 = 0.30$, $p < 10^{-10}$)

Les données de concentrations en chlorophylle-a issues de la correction POLYMER sont plus cohérentes avec les observations de terrain que celles obtenues avec ACOLITE (**Figure 3**). En effet, la relation linéaire est significative avec les données POLYMER alors qu'elle ne l'est pas avec les données ACOLITE.

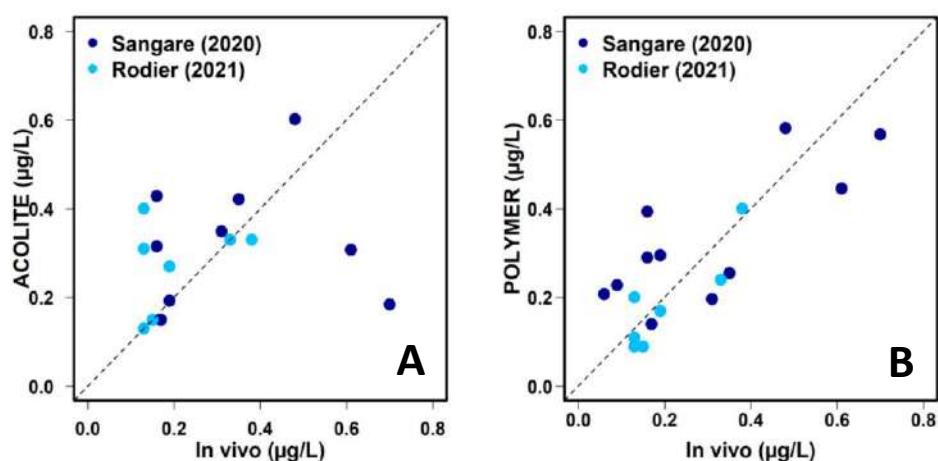


Figure 3 : Comparaisons entre les données de concentration en chlorophylle-a observées (Sangare et al., 2020 ; Rodier et al., 2021) et celles issues de la correction ACOLITE (A) et POLYMER (B). La relation linéaire (bissectrice) est non significative pour ACOLITE mais elle l'est pour POLYMER ($Y = X$, $R^2 = 0.43$, $p = 0,0033$).

Pour les données *in vivo* (Sangare et al., 2020), les dates des mesures terrain, de mars à juillet 2017, toutes les 6 semaines environ, correspondent exactement aux dates des scènes satellite. Il y a trois données manquantes pour le traitement ACOLITE. Pour les données extraites (Rodier et al., 2021), les données terrain correspondent à des moyennes de mesures réalisées entre le 27 novembre et le 7 décembre 2017. Elles sont comparées aux valeurs de concentration en chlorophylle-a du 13 novembre pour POLYMER et du 31 décembre pour ACOLITE.

Comme attendu, pour des profondeurs de bathymétries inférieures à 20 m les estimations ne montrent pas de bonnes concordances par rapport aux données terrain, à l'exception de la station 12, située au centre du lagon. Dans l'ensemble, les concentrations en chlorophylle-a issues de la télédétection suivent une évolution similaire à celle observée dans les données terrain le long du transect (**Annexe 4**), notamment pour les stations 4 à 13 (**Figure 4**).

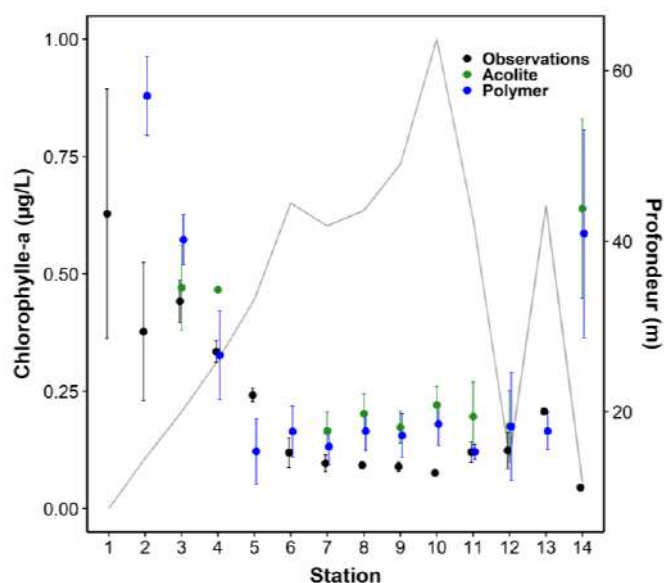


Figure 4 : Comparaison des concentrations en chlorophylle-a le long d'un transect entre des données extraites (Rodier et al., 2021) et les estimations issues des corrections ACOLITE et POLYMER (moyennes et écart-type), avec le profil bathymétrique associé.

Globalement, les données corrigées avec POLYMER sont plus cohérentes avec les observations de terrain que celles obtenues avec ACOLITE (**Figures 3 et 4**).

Qualitativement, les trois séries de chlorophylle-a suivent les mêmes tendances (**Figure 5.A**), bien que POLYMER et ACOLITE ne reproduisent pas fidèlement les fortes valeurs observées par l'ESA. La comparaison avec l'ESA met en évidence une relation linéaire significative avec ACOLITE ($Y = 0.97 X + 0$, $R^2_{\text{ajusté}} = 0.88$, $p < 2.2 \times 10^{-16}$) et avec POLYMER ($Y = 0.82 X + 0$, $R^2_{\text{ajusté}} = 0.95$, $p < 2.2 \times 10^{-16}$), ACOLITE présente une dispersion des données bien plus importante que POLYMER mais celles-ci sont plus centrées sur la droite $X = Y$ qu'avec POLYMER (**Figure 5.B et .C**). POLYMER présente une meilleure cohérence pour des valeurs inférieures à $0.3 \mu\text{g/L}$.

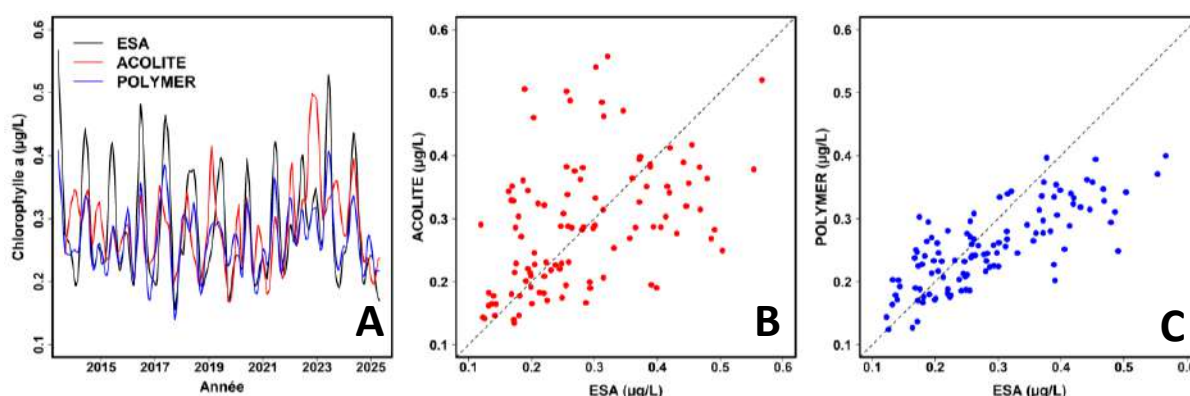


Figure 5 : A : Comparaison des séries temporelles de concentration en chlorophylle-a de l'ESA avec celles issues des corrections ACOLITE et POLYMER. Les séries ont été lissées à l'aide d'un spline cubique. Comparaisons pour les dates communes entre données de concentration en chlorophylle-a de l'ESA et celles obtenues par POLYMER (B) et ACOLITE (C).

Finalement, dû au fait que POLYMER présente un plus grand nombre de données qu'ACOLITE et une meilleure cohérence lors des comparaisons avec les données à la fois de terrain et celles de l'ESA, il a été décidé d'appliquer cette correction atmosphérique pour la suite de l'étude. Les valeurs estimées de concentration en chlorophylle-a par télédétection sur Takaroa et Takapoto sont comparées pour validation avec des données de concentration en chlorophylle-a mesurées après filtration (Rodier & Le Gendre, données personnelles non publiées) et avec les données de l'ESA à titre indicatif (**Figure 6**).

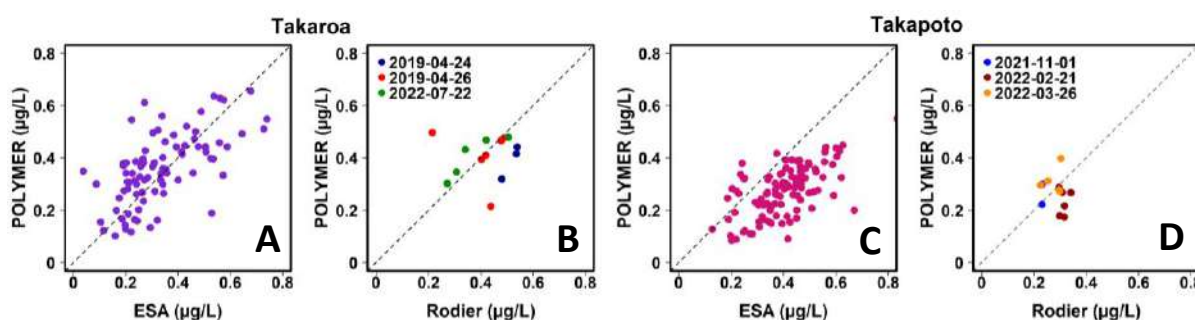


Figure 6 : Comparaison des données de concentrations en chlorophylle-a issues des données satellite corrigées par POLYMER avec les données ESA (A et C) et les données de chlorophylle-a extraites (B et D) pour les atolls de Takaroa et Takapoto. Les dates indiquées sont les dates des mesures sur le terrain.

Il n'y a pas de relation linéaire significative entre les données issues de la télédétection et les données terrain, néanmoins les résultats sont cohérents (**Figure 6.B et D**), les valeurs restent proches de la droite $X = Y$, notamment pour Takaroa. Les données satellitaires sont issues respectivement des scènes datant de 18/04/2019, 04/05/2022 et 23/07/2022 pour Takaroa et 01/11/2021, 21/02/2022, 25/03/2022 pour Takapoto. Toutes ces scènes sont issues du satellite Landsat 8 sauf celle de juillet 2022 qui est issue du satellite Landsat 9. La comparaison avec l'ESA (**Figure 6.A et C**), donne des relations linéaires significatives pour Takaroa ($Y = 0.91 X + 0$, $R^2_{\text{ajusté}} = 0.80$, $p < 2.2 \times 10^{-16}$) et Takapoto ($Y = 0.66 X + 0$, $R^2_{\text{ajusté}} = 0.93$, $p < 2.2 \times 10^{-16}$). La cohérence des données issues de la correction POLYMER avec les données de l'ESA est différente suivant les atolls. Takaroa présente une meilleure cohérence entre les deux jeux de données qu'Ahe et Takapoto.

III.2. Effet de bandes (striping) et comparaison entre Landsat 8 et Landsat 9

Lors de l'observation visuelle des scènes, certaines images de concentration en chlorophylle-a présentaient du *striping*, c'est-à-dire des bandes larges et des rayures plus fines, plus ou moins prononcées, orientées NNE-SSW, parallèles à la trace du satellite. Ces artefacts, qui sont du bruit radiométrique apparaissaient généralement aux mêmes positions dans les images lorsqu'ils étaient présents. Toutefois, il a été constaté qu'entre Landsat 8 et Landsat 9, ces bandes n'étaient pas positionnées de manière identique. Par exemple, pour les atolls de Ahe et Takaroa, les bandes observées sur les scènes Landsat 8 ne coupaient pas l'atoll en deux, alors que c'était le cas sur les scènes Landsat 9. Deux principaux types de *striping* ont été observés : des bandes larges de plusieurs kilomètres et des bandes fines de quelques mètres. Les bandes larges induisaient généralement de plus grandes différences de concentration (jusqu'à $0.1 \mu\text{g/L}$), entre les pixels présents dans la bande et ceux hors de la bande, alors que les bandes fines induisaient des différences plus faibles (de 0.01 à $0.05 \mu\text{g/L}$).

A titre d'exemple, pour la scène Landsat 8 du 03/10/2022 (**Figure 7.A**), la présence de bandes d'environ 12 km de largeur est clairement visible. L'impact de cet effet sur la concentration en chlorophylle-a est plus marqué dans l'océan ($\approx 0.05 \mu\text{g/L}$) qu'à l'intérieur du lagon de Takaroa ($\approx 0.01 \mu\text{g/L}$). Takapoto est quant à lui totalement inclus dans la bande. Une scène Landsat 9 du 19/07/2024 (**Figure 7.B**) met en évidence des bandes plus étroites, de quelques mètres de largeur, qui affectent ponctuellement la concentration en chlorophylle-a au sein du lagon de Ahe (≈ 0.02 – $0.05 \mu\text{g/L}$). Enfin, une scène Landsat 9 du 23/10/2024 (**Figure 7.C**) montre une large bande traversant l'atoll de Ahe, induisant une différence de concentration en chlorophylle-a d'environ $0.1 \mu\text{g/L}$ entre les pixels du lagon présents dans ou hors de la bande.

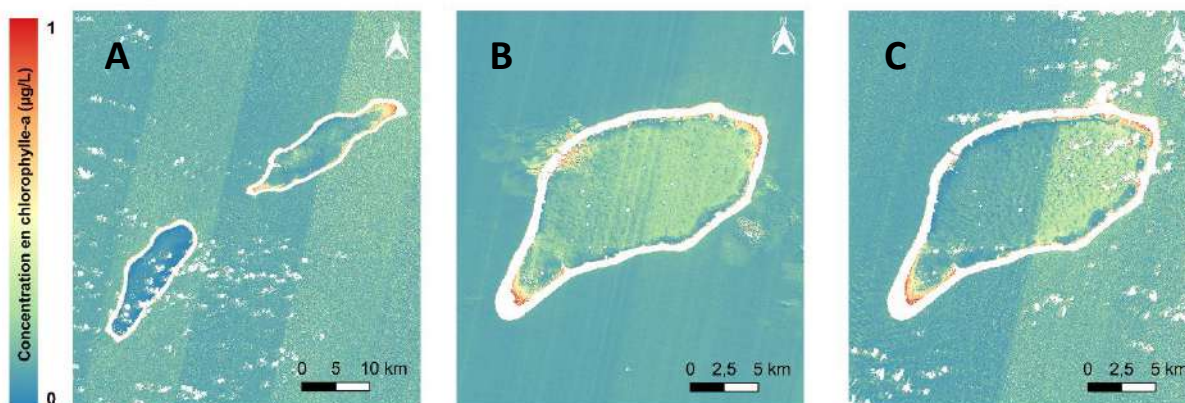


Figure 7 : Visualisation de l'effet de *striping* sur des images Landsat 8 et 9. Les valeurs supérieures à 1 µg/L sont masquées.

Des modèles additifs généralisés (GAM) ont été utilisés pour comparer les séries des données Landsat 8 et Landsat 9. Les résultats (AIC) montrent que les deux satellites présentent à la fois des niveaux moyens (intercepts) et des dynamiques temporelles différents pour chacun des trois atolls étudiés (**Annexe 8**). Ce sont principalement les dynamiques temporelles qui diffèrent, les intercepts sont significativement différents mais les différences sont faibles (≈ 0.06 µg/L). Ceci se rajoutant aux effets de *striping* observés plus pénalisants pour Landsat 9, seules les données issues de Landsat 8 ont été conservées pour la comparaison intra et inter-atolls.

III.3. Concentration moyenne en chlorophylle-a au sein des trois lagons

Les données Landsat 8 ont permis de produire des cartes de concentration moyenne en chlorophylle-a pour chacun des atolls étudiés et sur l'ensemble de la période 2013-2025 (**Figure 8**). La valeur de chaque pixel correspond donc à la moyenne des valeurs de ce pixel pour l'ensemble des scènes disponibles pour l'atoll concerné. Cela permet de visualiser la répartition moyenne de la chlorophylle-a au sein de chaque lagon sur le long terme. Les atolls de Takapoto et de Takaroa, dont la profondeur moyenne est inférieure à celle de Ahe, présentent une couverture spatiale des données moins étendue.

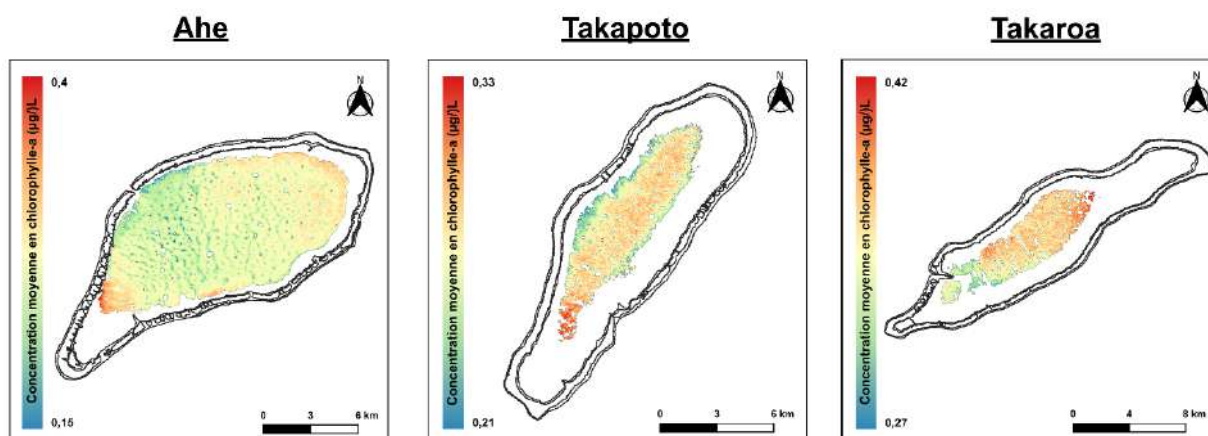


Figure 8 : Cartes moyennes de la concentration en chlorophylle-a (µg/L) des trois lagons étudiés (les échelles de couleurs sont différentes entre atolls afin d'observer au mieux les variabilités spatiales).

L'atoll de Ahe présente la gamme de valeurs la plus étendue, tandis que les concentrations moyennes maximales sont plus faibles à Takapoto. Des répartitions spatiales sont perceptibles dans chaque atoll. A Ahe, les concentrations les plus élevées se trouvent à l'est et à l'ouest, tandis que les valeurs sont plus faibles au centre et à proximité de la passe. Les structures réticulées visibles sur la carte bathymétrique (**Figure 1.B**) de cet atoll semblent également apparaître sur la carte des concentrations moyennes en chlorophylle-a. À Takapoto, la chlorophylle-a est plus concentrée dans le sud du lagon. Les valeurs sont plus élevées au centre du lagon qu'à sa périphérie. Enfin, à Takaroa, les concentrations les plus fortes se situent à l'est, tandis que les valeurs les plus faibles sont observées à l'ouest, près de la passe.

III.4. Variabilité inter-atoll de la concentration en chlorophylle-a

La concentration moyenne en chlorophylle-a par lagon suit des tendances cycliques avec des pics et des creux qui se répètent. Les cycles sont plus courts et plus nombreux à Ahe, et la concentration moyenne est plus élevée à Takaroa que dans les deux autres atolls (**Figure 9**). Ces données brutes permettent d'observer qualitativement des différences inter-atoll de concentration en chlorophylle-a.

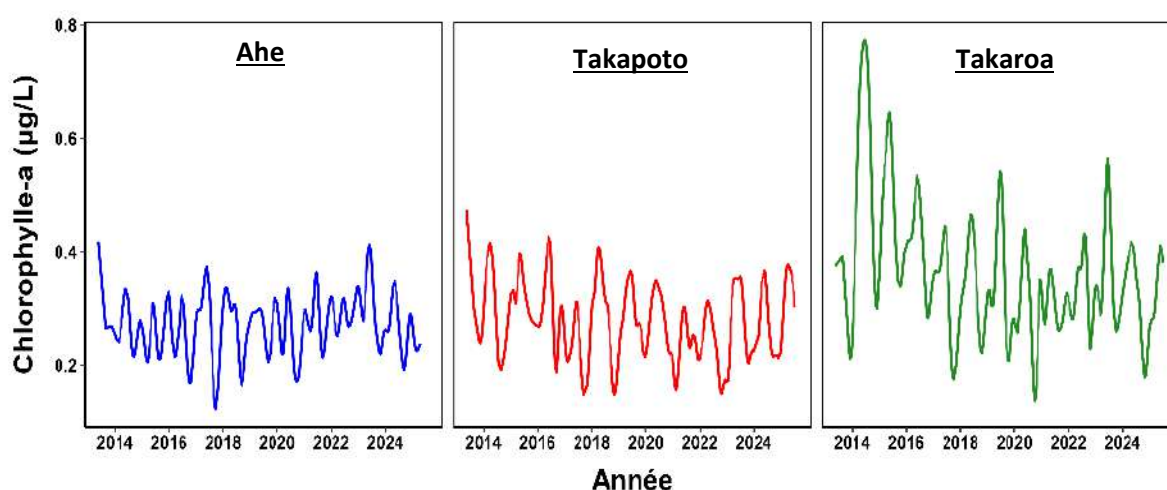


Figure 9 : Séries temporelles des concentrations moyennes en chlorophylle-a par atoll, obtenues en utilisant l'ensemble des stations de suivi par atoll. Un lissage par spline cubique a été appliqué.

Un modèle GAM mixte a été ajusté aux données afin d'étudier plus précisément ces variabilités.

Le modèle retenu est le suivant :

$\text{bam}(\text{chloa} \sim \text{ti}(\text{year}, \text{month}, \text{bs} = \text{c}(\text{"cr"}, \text{"cr"}), \text{k} = \text{c}(11, 11), \text{by} = \text{atoll}) + \text{s}(\text{year}, \text{bs} = \text{"cr"}, \text{k} = 11, \text{by} = \text{atoll}) + \text{s}(\text{month}, \text{bs} = \text{"cr"}, \text{k} = 11, \text{by} = \text{atoll}) + \text{s}(\text{station}, \text{bs} = \text{"re"})$

Ce modèle permet de modéliser à la fois la variabilité temporelle à différentes échelles et spatiale entre atolls. Il inclut un effet conjoint de l'année et du mois permettant de modéliser les variabilités saisonnières interannuelles propres à chaque atoll. Un effet mois ainsi qu'un effet année permettent de représenter les variations interannuelles ainsi que les variations saisonnières par atoll. Un effet aléatoire "station" a été inclus afin de refléter la structure des données (dépendance des

résidus d'une même station) et de limiter le risque de sur-ajustement. Le modèle présente une bonne convergence et explique 60.9 % de la déviance, avec un $R^2_{\text{ajusté}}$ de 0.62, ce qui traduit un ajustement satisfaisant aux données. Les diagnostics (**Annexe 9**) confirment un bon ajustement : les résidus suivent globalement la distribution théorique et la relation entre les valeurs observées et prédites est cohérente. Il y a une faible autocorrélation résiduelle, probablement liée aux mesures répétées par station, mais cela reste modéré et n'affecte pas la validité globale du modèle.

Takaroa se distingue des deux autres atolls par des effets interannuels et saisonniers un peu plus marqués, de -33 % à +49 % par rapport à la concentration moyenne (**Figure 10**). La variabilité interannuelle présente les effets les plus faibles ; des tendances similaires sont observables entre les atolls, avec toutefois des légers décalages dans le temps. Ahe présente les plus faibles amplitudes. Dans l'ensemble, les trois atolls présentent une saisonnalité comparable, avec deux périodes de plus forte concentration et deux périodes de plus faible concentration, dont l'amplitude et le moment varient légèrement entre atolls. Au contraire, Takapoto présente une plus forte variabilité saisonnière-interannuelle (interaction année x mois) avec des augmentations de concentration jusqu'à 123 % par rapport à la moyenne (**Figure 11**). Les variabilités saisonnières interannuelles des trois atolls ne suivent pas vraiment les mêmes tendances.

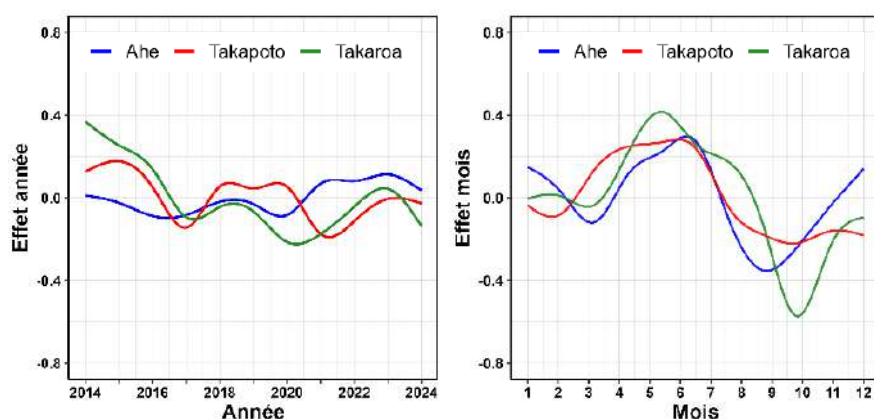


Figure 10 : Effet de l'année (gauche) et effet du mois (droite) sur la concentration en chlorophylle-a par atoll. Les valeurs des effets sont exprimées sur une échelle logarithmique.

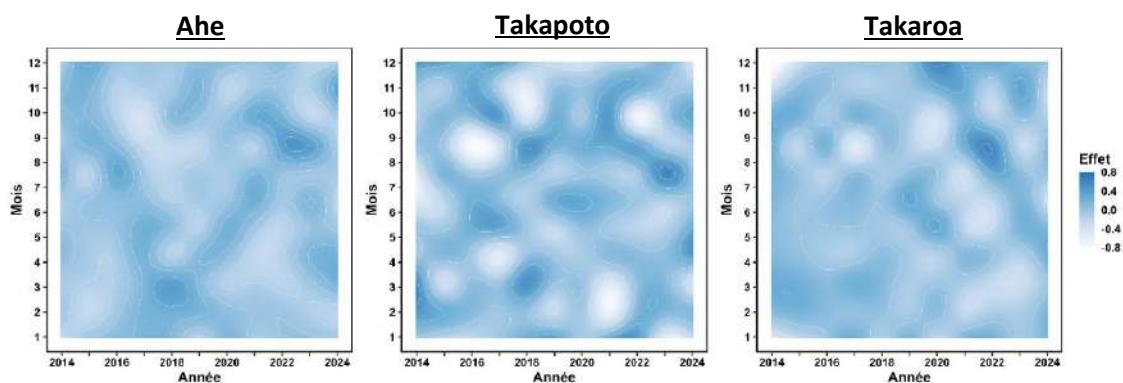


Figure 11 : Effet de l'interaction mois x année sur la concentration en chlorophylle-a par atoll. Les valeurs des effets sont exprimées sur une échelle logarithmique.

III.5. Variabilité spatio-temporelle de la concentration en chlorophylle-a intra-lagon

Comme précédemment, on observe une certaine cyclicité des données de concentration en chlorophylle-a au sein des trois atolls (**Annexe 10**), les stations suivent les mêmes tendances avec plus ou moins de variabilité selon les années et selon les lagons. L'atoll de Ahe semble à première vue présenter une plus grande variabilité de la chlorophylle-a entre stations. Un modèle GAM a été ajusté aux données de chaque lagon afin d'étudier plus précisément la variabilité spatio-temporelle de la concentration en chlorophylle-a. L'intégration d'un lissage de l'année par station n'a pas amélioré significativement l'ajustement des modèles pour les trois lagons, et l'inclusion de l'interaction mois x année par station a empêché la convergence des modèles. En revanche, l'ajout d'un lissage du mois par station améliore significativement l'ajustement pour Ahe et Takapoto, tandis que pour Takaroa cette amélioration n'est pas significative ($p > 0,05$). Afin d'assurer la comparabilité entre lagons, cet effet a été conservé dans les trois modèles.

Le modèle retenu pour chacun des atolls est le suivant :

$\text{gam}(\text{chloa} \sim \text{ti}(\text{année, mois}, \text{bs} = \text{c}(\text{"cr"}, \text{"cr"}), k = \text{c}(11, 11)) + \text{s}(\text{année}, \text{bs} = \text{"cr"}, k = 11) + \text{s}(\text{mois}, \text{bs} = \text{"cr"}, k = 11, \text{by} = \text{station}) + \text{station}$

Ce type de modèle permet de modéliser à la fois la variabilité temporelle à différentes échelles et spatiale entre stations, il est très similaire au précédent. Si ce n'est qu'un effet fixe de la station permettant de modéliser les différences spatiales de la concentration en chlorophylle-a dans les lagons a été ajouté. Les modèles présentent une bonne convergence et un bon ajustement aux données. Le modèle ajusté pour Ahe explique 53.3 % de la déviance, avec un $R^2_{\text{ajusté}}$ de 0.46. Pour Takapoto, le modèle explique 57.4 % de la déviance et présente un $R^2_{\text{ajusté}}$ de 0.53. Enfin, pour Takaroa, la déviance expliquée atteint 63.7 %, avec un $R^2_{\text{ajusté}}$ de 0.65. Les diagnostics (**Annexes 11, 12 et 13**) confirment un bon ajustement : les résidus suivent globalement la distribution théorique et la relation entre les valeurs observées et prédites est cohérente. Il n'y a pas ou peu d'autocorrélation, signe que les résidus sont indépendants et que les modèles expliquent bien la structure des données.

Les intercepts estimés par station varient entre 0.22 et 0.30 $\mu\text{g/L}$, avec une moyenne de 0.26 $\mu\text{g/L}$ pour Ahe. Entre 0.23 et 0.28 $\mu\text{g/L}$, avec une moyenne de 0.26 $\mu\text{g/L}$ pour Takapoto et entre 0.30 et 0.38 $\mu\text{g/L}$, avec une moyenne de 0.35 $\mu\text{g/L}$ pour Takaroa (**Annexe 14**). Les différences entre intercepts sont faibles, leur répartition coïncide avec les concentrations moyennes observées précédemment (**Figure 8**)

L'effet interannuel est le plus faible pour chacun des lagons, et c'est l'effet de l'interaction mois x année qui est le plus fort (**Figure 12**), notamment pour Takaroa. L'effet saisonnier est également fort. On observe que les tendances sont similaires entre stations dans les lagons, et il y a principalement des variations d'amplitudes entre stations. Néanmoins il y a toutefois quelques différences : pour Ahe deux stations se démarquent (stations 2 et 14) ; à Takapoto la variabilité de la saisonnalité entre station est plus marquée entre septembre et décembre et à Takaroa deux stations se démarquent également notamment entre mai et juin (stations 9 et 4). La saisonnalité est légèrement plus marquée à Takaroa, avec des baisses de concentration jusqu'à - 50 % en octobre, à Ahe les variations varient entre + 49 % et - 33 %. A Takapoto on ne retrouve pas exactement la même saisonnalité composée de deux cycles comme dans les autres atolls, l'amplitude est similaire à Ahe. Il n'y a pas vraiment de schémas clairs observables sur les graphiques des effets d'interaction mois x année.

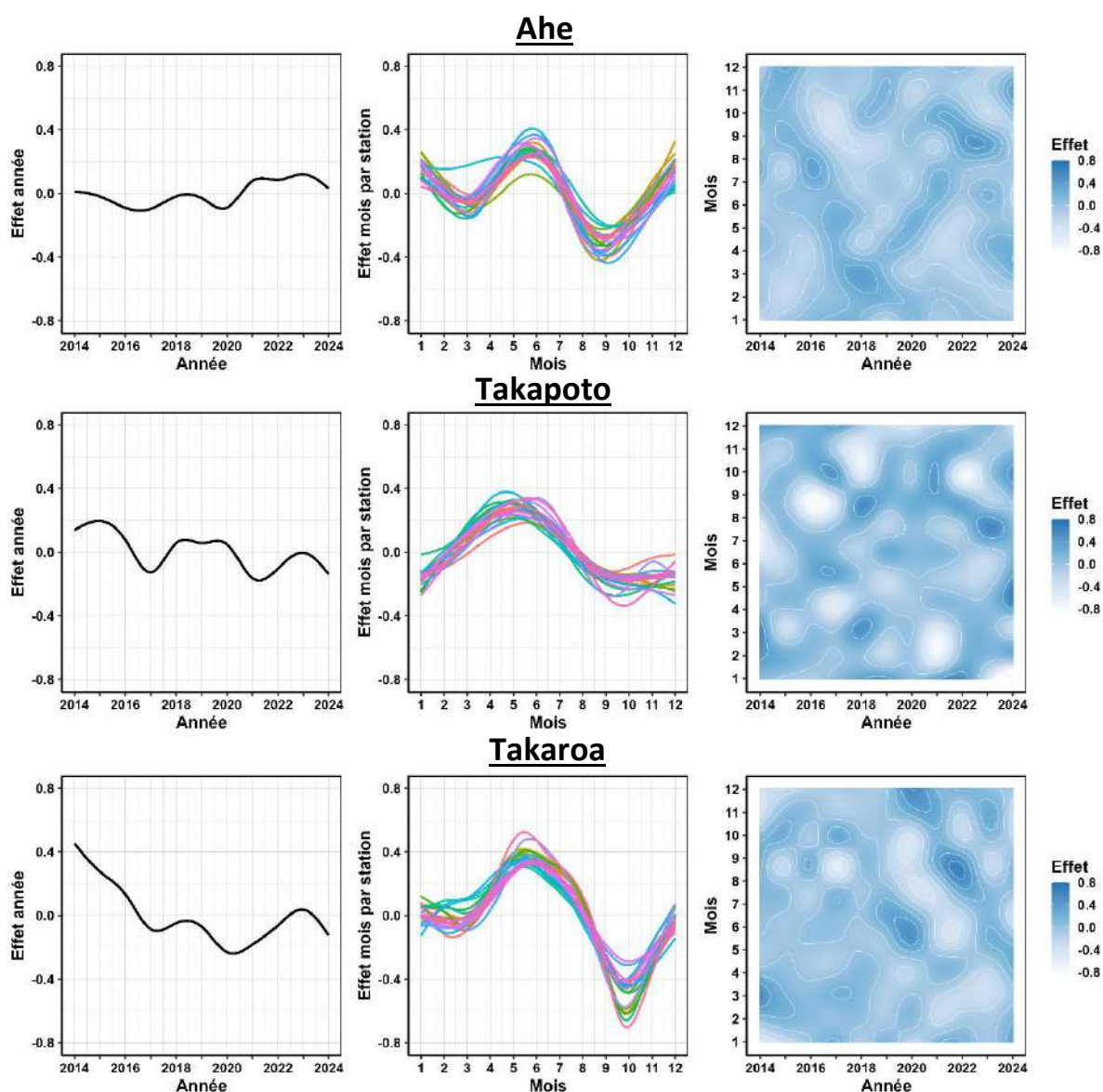


Figure 12 : Effet de l'année, effets du mois par station et effets de l'interaction mois x année sur la concentration en chlorophylle-a pour Ahe, Takapoto et Takaroa. Les valeurs des effets sont exprimées sur une échelle logarithmique.

III.5.1. Regroupement des stations selon leur saisonnalité

Les dendrogrammes des trois lagons sont relativement bien équilibrés, avec deux principaux groupes (**Figure 13**), trois pour Ahe car la station 2 se démarque. Pour Ahe, le meilleur score silhouette est obtenu pour $k = 3$ (0.276), très proche de celui de $k = 2$ (0.275) ; pour Takapoto, on obtient $k = 2$ (0.41) et pour Takaroa, $k = 2$ (0.43). Les scores sont meilleurs pour Takapoto et Takaroa, indiquant une meilleure séparation entre les clusters. Une organisation spatiale plutôt claire se dégage dans chacun des lagons. A Ahe et Takaroa, le cluster bleu correspond aux stations centrales et proches de la passe, à Takapoto il n'y a pas de passe mais le cluster bleu est constitué principalement des stations centrales. Le cluster vert correspondant aux stations plus périphériques. Pour chacun des lagons, le cluster vert est composé de stations présentant des amplitudes saisonnières plus marquées que les stations présentes dans le cluster bleu. En effet, le cluster bleu se caractérise par des stations ayant des variations plus modérées, généralement plus proches des concentrations moyennes. Enfin, le cluster orange, de Ahe (station 2), montre un profil beaucoup plus atténué en début d'année, traduisant une dynamique particulière (**Annexe 15**).

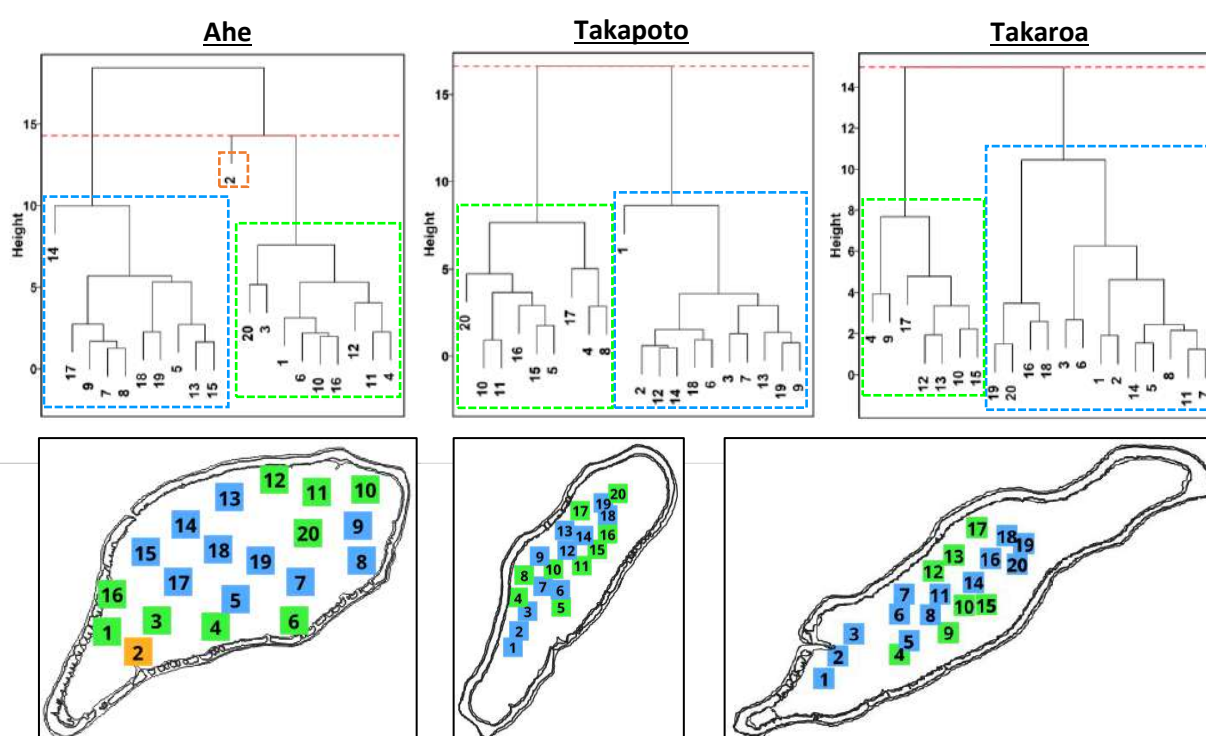


Figure 13 : Dendrogrammes issus des clustering hiérarchiques, réalisés entre les courbes des effets mois des 20 stations de chaque lagon (haut). La ligne rouge horizontale indique la hauteur de coupe pour le k ayant le meilleur score silhouette. Les clusters sont encadrés. Cartes des atolls avec les stations colorées selon leur cluster (bas).

III.6. Modélisation bioénergétique (DEB)

Le meilleur ajustement entre les données de taille issues du modèle DEB et les données de terrain disponibles a été obtenu pour un $X_k = 0.30 \mu\text{g/L}$ (**Figure 14**). Les courbes de croissance sur six mois obtenues par le modèle DEB s'ajustent bien aux données de terrain, malgré une légère surestimation de la taille au mois de juin pour la station 6 (en vert). Ce bon ajustement confirme une nouvelle fois la validité des données de concentrations en chlorophylle-a estimées à partir des données satellitaires.

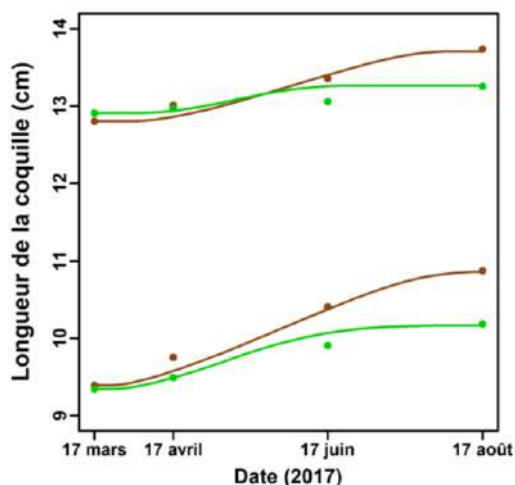


Figure 14 : Validation du modèle DEB sur des valeurs de longueur de coquille d'huîtres perlières (Sangare et al., 2020) pour la station 2 (marron) et la station 6 (vert) de l'atoll de Ahe.

Afin de faciliter l'analyse et la lecture des graphiques, les résultats présentés concernent, dans un premier temps, trois stations représentatives de l'atoll de Ahe.

III.6.1. Durées de croissance et potentiel de reproduction pour 3 stations de Ahe

La température à la surface de l'eau (SST), une des variables forçant du modèle DEB, variait entre 26 et 31 °C au sein de l'atoll de Ahe durant la durée de l'étude (**Figure 15.A**). La série possède une cyclicité avec des températures plus élevées de janvier à avril et plus basses de juillet à octobre. La température en 2022 est globalement inférieure à celle des autres années. Les valeurs de températures étant toujours en dessous mais proche de l'optimum (**Figure 15.B**), les courbes de SST et SST corrigée suivent des tendances quasi-identiques.

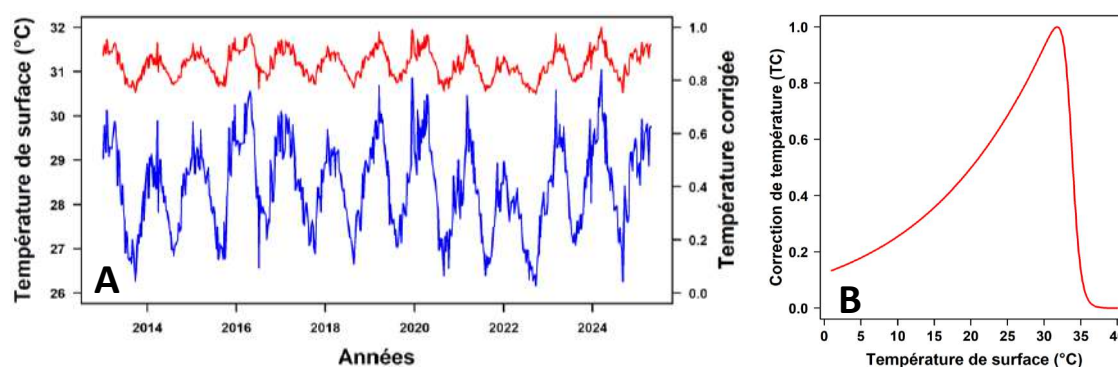


Figure 15 : **A** : Séries temporelles de la température à la surface de l'eau (SST) et de la température corrigée dans le lagon de Ahe. **B** : Relation entre la correction de température (TC) et la température de surface de l'eau.

La calibration du X_k permet d'ajuster la fonction de réponse alimentaire f (**Figure 16**). Comme les concentrations en chlorophylle-a mesurées dans les stations de l'atoll de Ahe ne dépassent jamais $0.60 \mu\text{g/L}$, la fonction alimentaire reste en dessous de son asymptote maximale. Sa forme hyperbolique fait que f varie plus faiblement que la chlorophylle-a.

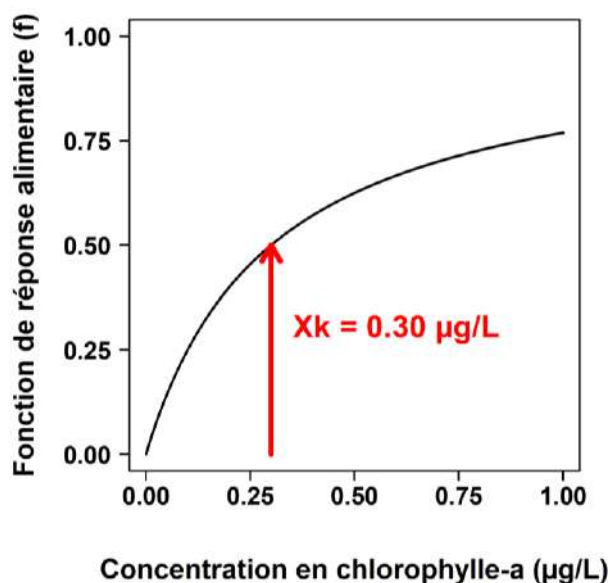


Figure 16 : Fonction de réponse alimentaire (f) de *Pinctada margaritifera* en fonction de la concentration en chlorophylle-a. La flèche rouge indique le coefficient de demi-saturation.

La fonction de réponse alimentaire f varie d'une station à une autre mais on retrouve une cyclicité similaire. La station 10 présente les valeurs de f les plus élevées, tandis que la station 3 présente les plus faibles. Les oscillations et amplitudes diffèrent d'une station à une autre (**Figure 17**). La station 17 se démarque notamment vers 2022, elle présente un moins grand nombre d'oscillations que les station 10 et 3 à cette période.

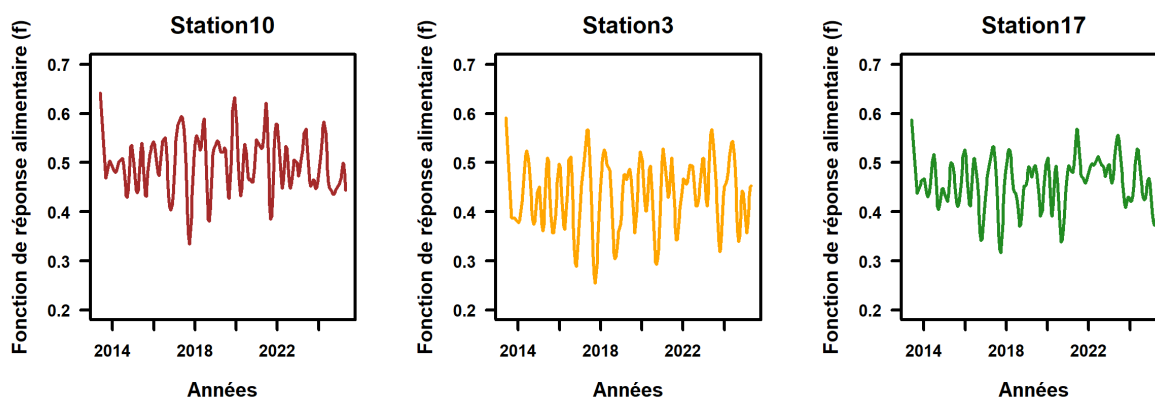


Figure 17 : Séries temporelles des fonctions de réponses alimentaires obtenues à l'aide des concentrations en chlorophylle-a et du X_k , pour les stations 10, 3 et 17 de l'atoll de Ahe. Un spline cubique a été appliqué aux données.

La durée pour atteindre une taille de 5 cm pour une huître récemment fixée varie dans le temps et l'espace à Ahe. Elle varie de 10 à 16 mois et peut être très différente d'une station à une autre pour une date donnée (**Figure 18**), néanmoins les moyennes sont proches (à 2 mois près). La station 10 est celle qui possède les durées les plus courtes, 11.8 mois en moyenne, et la station 3 est celle possédant les durées les plus longues, 13.9 mois en moyenne. Globalement, pour les trois stations, il y a une baisse de la durée de croissance à partir de fin 2021.

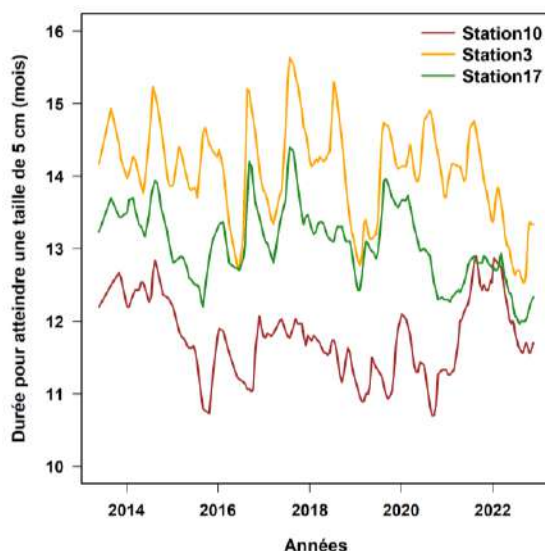


Figure 18 : Durée (en mois) nécessaire à une huître récemment fixée pour atteindre une taille de 5 cm pour 3 stations de l'atoll de Ahe. Une fenêtre glissante a été utilisée pour la réalisation de ce graphique, la durée de croissance a été calculée à partir de chaque date où une donnée de concentration en chlorophylle-a était disponible

L'investissement reproductif est également variable d'une station à une autre à Ahe, ainsi le cumul d'investissement reproductif et le nombre de pontes varie entre stations (**Figure 19**). La station ayant le plus faible cumul d'investissement reproductif est la station 3 (483 kJ) et la station ayant le plus fort cumul est la station 10 (626 kJ). En termes de pontes, cela ne représente pas une grande différence, 11 pontes pour la station 10 sur les 12 années de suivi et 8 pontes pour la station 3. La station 17 présente quant à elle 9 pontes.

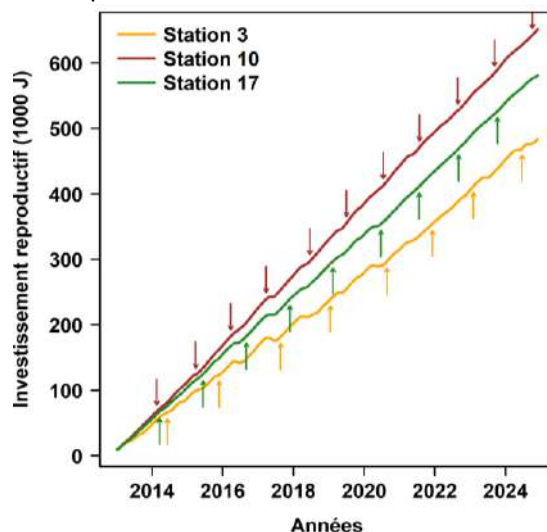


Figure 19 : Investissement reproductif cumulé et pontes potentielles (flèches) pour une huître adulte de 13 cm, pour trois stations de l'atoll de Ahe.

III.6.2. Classification des 20 stations de Ahe

Le dendrogramme est relativement bien équilibré, le meilleur score silhouette a été obtenu pour $k = 2$ (0.43) ; ce score est correct et indique que les clusters sont relativement cohérents, même s'ils ne sont pas parfaitement séparés (**Figure 20.B**). Le cluster bleu est constitué de stations ayant généralement des durées plus longues de croissance et le cluster rouge est composé de stations ayant généralement des durées plus courtes de croissance (**Figure 20.A**). Les durées de croissance pour les stations du cluster rouge sont bien plus importantes en 2020 et 2021 que les autres années, sauf pour les stations 1 et 10. Les clusters sont spatialement cohérents (**Figure 20.C**) et sont similaires à ceux obtenus avec les effets de la saisonnalité sur la concentration en chlorophylle-a.

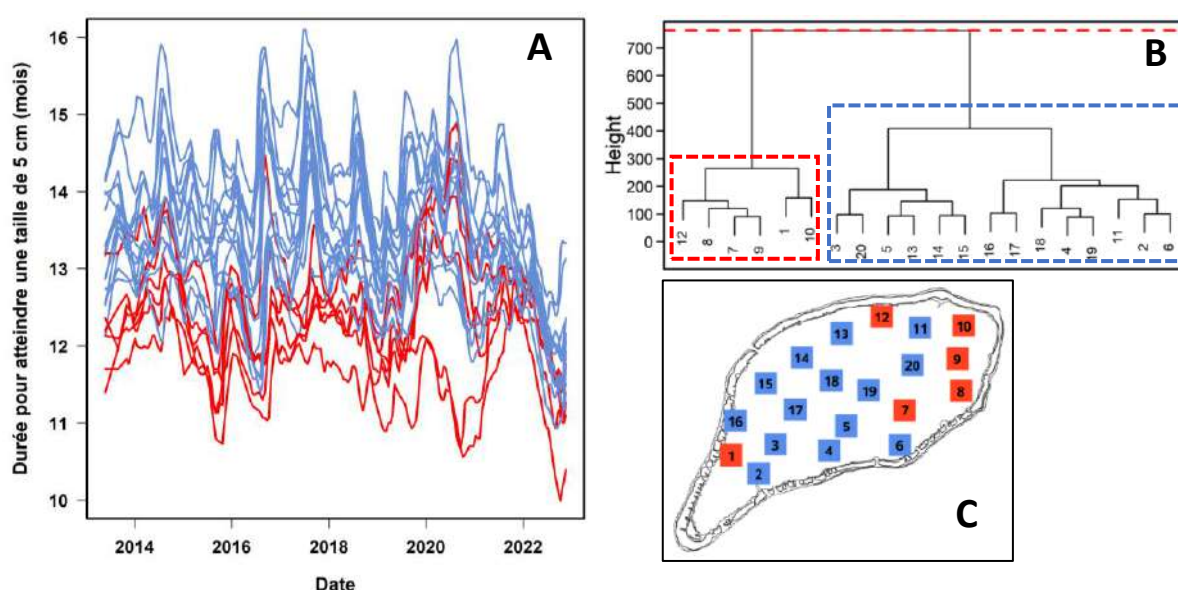


Figure 20 : **A :** Durée (en mois) nécessaire à une huître fraîchement fixée pour atteindre une taille de 5 cm selon les stations, colorées par cluster. **B :** Dendrogramme du clustering hiérarchique, réalisé à partir des distances calculées par l'algorithme DTW entre les courbes de durées des 20 stations de l'atoll de Ahe. La ligne rouge horizontale indique la hauteur de coupe pour $k = 2$, les deux clusters sont encadrés par leur couleur respective. **C :** Carte des stations de l'atoll de Ahe colorées selon leur cluster.

Pour l'investissement reproducteur, le dendrogramme est également bien équilibré, le meilleur score silhouette a été obtenu pour $k = 5$ (0.58), pour $k = 2$ il est plutôt similaire (0.54). Avec $k = 2$, on retrouve exactement les mêmes clusters qu'avec les durées de croissance (**Figure 21.B**). Les clusters sont mieux séparés et de meilleure qualité avec les séries d'investissement reproductifs qu'avec les durées de croissance.

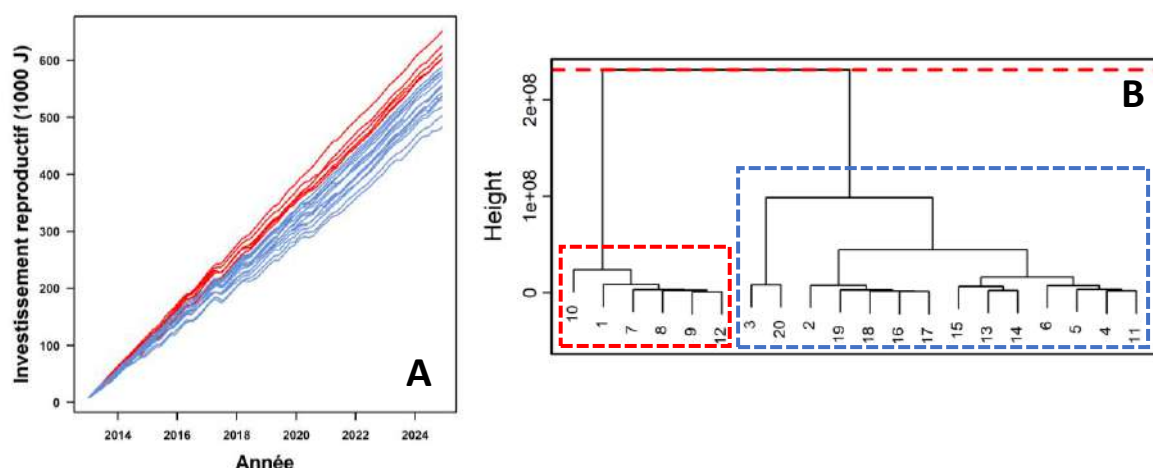


Figure 21 : A : Investissement reproductif cumulé pour une huître adulte de 13 cm, par stations, colorées par cluster. **B :** Dendrogramme du clustering hiérarchique, réalisé à partir des distances calculées par l'algorithme DTW entre les courbes d'investissement des 20 stations de l'atoll de Ahe. La ligne rouge horizontale indique la hauteur de coupe pour $k = 2$, les deux clusters sont encadrés par leur couleur respective.

Les clustering hiérarchiques réalisés à partir des distances calculées par l'algorithme DTW sur les sorties du DEB mettent en évidence deux grands groupes de stations présentant des dynamiques similaires. Un cluster composé de stations présentant des durées de croissance plus courtes et un investissement reproductif plus important, et un cluster présentant des durées de croissance plus longues et un investissement reproducteur moins important (**Figure 20.A** et **21.A**). Ces résultats sont cohérents et cette classification reflète une certaine structuration spatiale similaire (**Figure 20.C**) à celle obtenue lors du clustering des effets mois par stations.

Un clustering a également été réalisé sur les durées de croissances des stations de Takapoto et Takaroa, en utilisant le même X_k et les mêmes données de température que pour Ahe, les résultats sont très similaires, deux clusters principaux par lagons, l'un avec des faibles durées et l'autre avec de plus longues. La spatialisation des clusters est également très cohérente et similaire à celle obtenue avec les effets de la saisonnalité (**Annexe 16**).

IV. DISCUSSION

La présente étude a permis, dans un premier temps, de montrer que la correction atmosphérique POLYMER semblait plus adaptée qu'ACOLITE. L'utilisation des données Landsat 9 telles quelles n'a pas été possible du fait de la présence d'un effet bande non négligeable et de l'observation d'un niveau moyen et de dynamiques temporelles différentes par rapport aux données Landsat 8. Des structures spatiales de la répartition moyenne de la concentration en chlorophylle-a dans les lagons ont été observées, celles-ci variaient d'un atoll à un autre. Des différences de concentrations moyennes entre atolls, de l'ordre de 0.01 µg/L entre Ahe et Takapoto, et 0.1 µg/L entre ces deux atolls et Takaroa, ont été observées. Ainsi que des différences de concentrations moyennes entre stations, de l'ordre de 0.07 µg/L pour Ahe et Takapoto et 0.08 µg/L pour Takaroa. Les différences des concentrations moyennes entre stations sont faibles, néanmoins pour une même date les différences pouvaient aller jusqu'à 0.22 µg/L pour Takapoto et Takaroa et 0.28 µg/L pour Ahe. Des variations interannuelles et saisonnières de la concentration en chlorophylle-a ont également été mises en évidence, ainsi que de fortes variations interannuelles de la saisonnalité. La saisonnalité est très marquée et plus ou moins similaire d'un atoll à un autre. Cette saisonnalité est également quasiment identique d'une station à une autre dans chaque atoll, néanmoins les amplitudes varient et certaines stations se démarquent. Ces différences de saisonnalité peuvent s'expliquer par l'emplacement des stations dans les lagons, car des groupements cohérents sont observés. En utilisant un modèle DEB on s'aperçoit que ces différences à la fois de concentrations moyennes et de saisonnalité entre stations et entre atolls induisent des différences de durées de croissance, de l'ordre de 2 mois, et des différences de pontes par stations pour Ahe (jusqu'à trois pontes).

IV.1. Choix d'une correction atmosphérique

Le choix de la correction POLYMER est cohérent avec les conclusions d'autres études qui ont comparé l'efficacité de différentes corrections atmosphériques appliquées à des images Landsat. En effet, ces précédentes études avaient conclu que POLYMER présente de plus faibles incertitudes d'estimations par rapport à ACOLITE, et également que POLYMER conserve un plus grand nombre de données (Yan et al., 2023 ; Sun et al., 2024). Contrairement à notre étude, ces comparaisons ont été effectuées directement avec des réflectances de surface mesurées *in situ*. Elles ont également montré que les incertitudes diffèrent d'une bande à une autre. Une validation similaire n'a pas pu être réalisée lors de cette étude car nous n'avons pas de données radiométriques de terrain. Sun et al. (2024) ont comparé l'efficacité d'ACOLITE et POLYMER en eaux claires à turbides et ont conclu qu'ACOLITE est moins juste en eaux claires qu'en eaux turbides. En effet, ACOLITE surestime les réflectances de surface en eaux claires, un effet que l'on a pu observer également dans notre étude. Yan et al. (2023) ont montré que POLYMER surestime légèrement les réflectances de surface des bandes bleues, ce qui pourrait expliquer que l'on observe une légère sous-estimation de la concentration en chlorophylle-a avec POLYMER, notamment lors des comparaisons avec les données de l'ESA. Ces études ont également montré que d'autres corrections atmosphériques donnent des incertitudes encore plus faibles que POLYMER, la correction L2GEN notamment montrait les meilleurs résultats.

Le fait qu'ACOLITE induise une plus grande perte de données par rapport à POLYMER est très certainement lié au fait qu'ACOLITE ne corrige pas les nuages fins, corrige moins bien les effets de la réflexion du soleil et qu'il y a des masques plus contraignants, notamment le masque nuage et le masque des éléments non-eau. Ces masques sont appliqués aux réflectances à la surface de l'atmosphère avant correction. Néanmoins, la faible quantité de données terrain ne permet pas non plus d'affirmer qu'ACOLITE est moins précis que POLYMER. Lefebvre et al. (2022) avaient montré une meilleure validation des données issues de la correction ACOLITE que dans notre étude ; principalement dues au fait que c'était une ancienne version de l'algorithme qui a été utilisée (2021) et que différents ajustements complémentaires avaient pu être réalisés.

Le choix de la correction atmosphérique s'est fait principalement en considérant que POLYMER conserve une plus grande quantité de données, ce qui renforçait la faisabilité d'une étude spatio-temporelle pertinente.

IV.2. Importance des bandes et stries des images Landsat

Les effets de bandes et stries observés sont bien connus. Yan et al. (2023) et Sun et al. (2024) les ont décrits lors de comparaisons d'algorithmes de correction atmosphérique. L'algorithme utilisé peut, jusqu'à un certain point, atténuer ou au contraire exacerber ces effets. Ces artefacts proviennent des données satellitaires brutes du capteur OLI. En effet, OLI est un capteur à balayage (push-broom), c'est-à-dire qu'une même rangée de 69 160 détecteurs (couvrant les 185 km de fauchée) orientée perpendiculairement à l'avance du satellite assure l'acquisition ligne par ligne de toute la scène. Ces 69 160 détecteurs sont répartis en 14 modules de plans focaux disposés en quinconce pour former le plan focal. Chaque module contient 494 détecteurs par bande spectrale. Les champs de vue respectifs des modules focaux se chevauchent légèrement afin d'assurer la couverture spatiale complète de la scène. Les défauts résiduels d'inter-étalonnage des plans focaux conduisent à l'apparition de 14 bandes parallèles, de largeurs de plusieurs kilomètres. Par ailleurs, il existe aussi des défauts résiduels d'inter-étalonnage des détecteurs au sein d'un même module. De façon similaire, ces disparités se reproduisent de ligne en ligne et se traduisent par des stries d'une largeur d'un à quelques pixels (Pesta et al., 2015, Morfitt et al., 2015). Les différences d'emplacement des bandes et stries observées entre Landsat 8 et Landsat 9 s'expliquent par le fait que ces deux satellites n'ont pas une orbite rigoureusement identique et par les défauts de leurs capteurs respectifs. Le fait que ces artefacts soient plus ou moins visibles selon les scènes dépend principalement des contrastes optiques entre objets présents sur chaque image. A ce jour, de nombreuses avancées en termes de calibration des détecteurs ont été réalisées, néanmoins il n'est pas encore possible de faire disparaître complètement ces artefacts. La stabilité intra/inter-scène est évaluée à $\approx 0,25\%$ à 2σ , ce qui permet généralement d'ignorer ces petites variations (Morfitt et al., 2015). Néanmoins, dans notre cas, lorsque les bandes traversaient la moitié d'un lagon, comme avec Landsat 9, cela induisait des augmentations de la concentration en chlorophylle-a et des variabilités inter-stations non négligeables, jusqu'à $0.1\ \mu\text{g/L}$. L'impact de ce fort effet bande était clairement visible avec Landsat 9 sur les cartes moyennes de concentrations ainsi que sur les courbes brutes de concentrations en chlorophylle-a.

IV.3. Variabilités spatiales des concentrations moyennes en chlorophylle-a dans les lagons

Les cartes moyennes de concentration en chlorophylle-a (**Figure 8**) mettent en évidence la présence d'organisations spatiales permanentes ; en effet, on observe des structurations bien marquées sur chaque lagon. A première vue, ces structures semblent fortement liées à la structure de la couronne récifale des atolls. La porosité de la couronne induit en effet des entrées d'eau océanique plus ou moins importantes, l'eau océanique étant moins concentrée en chlorophylle-a, environ 0.13 µg/L, elle induit une dilution de la concentration en chlorophylle-a dans eaux lagunaires aux abords de passes et des hoa (Thomas et al., 2010 ; Thomas et al., 2011 ; Charpy et al., 2012 ; Sangare et al., 2020 ;). En effet, à Ahe les concentrations les plus élevées se trouvent à l'est et à l'ouest, tandis que les valeurs sont plus faibles au centre et à proximité de la passe. L'est et l'ouest correspondent à des zones éloignées de la passe et présentant peu d'hoa sur la couronne récifale. Cette structuration avait déjà été remarquée par les études précédentes (Lefebvre et al., 2022 ; Thomas et al., 2010, Lefebvre et al., 2012, Rodier et al., 2021). Une structuration spatiale similaire est observée à Takaroa avec des concentrations en chlorophylle-a plus faibles à l'ouest, proche de la passe et de plus en plus fortes vers l'est là où il n'y a pas d'hoa. Des concentrations plus élevées de 0.1 µg/L avaient également été observées par Bouvy et al. (2012) entre des stations situées proches et éloignées de la passe à Takaroa. A Takapoto il n'y a pas de passe, la concentration est plus élevée au centre de l'atoll et d'autant plus au sud du lagon, correspondant à la zone où il y a le moins d'hoa. Cette plus forte concentration au sud avait déjà été reportée sur le terrain (Delesalle et al., 2001). Les gammes de concentrations moyennes sont similaires entre Ahe et Takapoto (de l'ordre de 0.27 µg/L) mais sont supérieures à Takaroa, de l'ordre de 0.35 µg/L. Les gammes de valeurs observées sont cohérentes avec les données *in situ* (Delesalle et al., 2001, Charpy et al., 2012, Rodier et al., 2021 ; Andréfouët 2022a, Rodier et al., 2019). Les fortes valeurs de concentrations observées en 2014 dans ce lagon correspondent à un événement de bloom algale qui a d'ailleurs induit des fortes mortalités d'huîtres à cette époque (Rodier et al., 2019).

IV.4. Saisonnalité de la concentration en chlorophylle-a

Les GAM ont permis de mettre en évidence la présence d'une saisonnalité marquée de la concentration en chlorophylle-a dans les lagons. La saisonnalité varie d'un atoll à un autre, mais avec des tendances similaires avec 2 pics (mai-juin et décembre-janvier) et 2 creux (février-mars et septembre-octobre) plus ou moins marqués. La saisonnalité est plus discrète dans l'atoll de Takapoto, où les variations d'amplitudes sont plus faibles. La saisonnalité est également similaire d'une station à une autre au sein du même atoll, donc la structure spatiale de la répartition de la concentration en chlorophylle-a au sein des lagons est conservée au cours du temps. Ceci explique qu'on observe des structures claires sur les cartes moyennes et que des différences spatiales aient été remarquées même au cours d'expéditions ponctuelles. On note des différences inter-stations pour le même lagon, notamment au niveau de l'amplitude. Généralement, pour Ahe et Takaroa les stations sous l'influence directe de la passe sont celles ayant les pics de saisonnalité les plus faibles et les creux les plus forts. La station 14 à Ahe, située proche de la passe, se démarque en juin avec un pic plus faible d'environ

0.1 µg/L par rapport aux autres stations. A Takapoto, les stations périphériques présentent un pic légèrement inférieur aux stations centrales mais principalement un creux plus important.

La géomorphologie semble jouer un rôle important dans la saisonnalité de la concentration en chlorophylle-a. En effet, la géomorphologie est un des facteurs influençant la variabilité de la concentration en chlorophylle-a, notamment en lien avec le temps de résidence de l'eau (Dumas et al., 2012, Lefebvre et al., 2012, Charpy et al., 1997). Les atolls, selon leur géomorphologie et leur degré d'ouverture à l'océan, présentent des temps de renouvellement de l'eau très variables, allant d'une trentaine à plus de cinq cents jours (Andréfouët et al., 2022a). Les temps de renouvellement de l'eau entre les trois atolls sont similaires, 350 jours pour Ahe, 330 pour Takaroa et 460 pour Takapoto (Andréfouët et al., 2022b). Takapoto possède un temps renouvellement de l'eau plus long d'environ 100 jours par rapport aux deux autres atolls, principalement dû au fait que cet atoll ne possède pas de passe et seulement quelques hoas. Toutefois, Takapoto ne possède pas des concentrations moyennes en chlorophylle-a supérieures aux deux autres atolls. Le temps de renouvellement plus long à Takapoto traduit de plus faibles échanges d'eau avec l'océan extérieur ce qui pourrait expliquer que la saisonnalité soit moins marquée que dans les deux autres atolls.

La géomorphologie n'est pas le seul facteur pouvant influencer indirectement la variabilité de la concentration en chlorophylle-a. En effet, la circulation de l'eau dans les lagons est aussi un facteur à prendre en compte, elle dépend de la géomorphologie et des entrées d'eau, mais elle est aussi principalement contrôlée par le vent et suivant les atolls, plus faiblement par les vagues et les marées (Charpy et al., 1997 ; Dumas et al., 2012). Le vent influence fortement la circulation de l'eau dans les atolls et la répartition de la chlorophylle-a dans les lagons (Charpy et al., 1997 ; Lefebvre et al., 2012 ; Thomas et al., 2010 ; Dumas et al., 2010). Le vent, ou son absence, contrôle également la stratification de la colonne d'eau des lagons. Un fort vent induit un brassage des eaux, alors que la baisse prolongée de la force du vent induit une stratification (Thomas et al., 2010 ; Dumas et al., 2012). Quatre régimes de vent ont été identifiés dans la région : un flux dominant d'est-sud-est correspondant aux alizés, prédominant en période fraîche ; deux régimes d'est, l'un présent toute l'année mais peu persistant, l'autre plus stable et fréquent en période chaude ; et un régime de nord-est, plus rare, observé principalement en période chaude (Dutheil et al., 2020). Pour l'atoll de Ahe, il a été montré que des vents d'est entraînent une plus forte concentration en chlorophylle-a dans l'est du lagon (Fournier et al., 2012b). A Ahe, lorsque l'atoll subit des vents d'est soutenus, il en résulte à l'échelle du lagon une structure de circulation en trois cellules distinctes caractérisées par des temps de résidence différents. La cellule proche de la passe a le plus faible temps de renouvellement, de 20 à 50 jours, contre jusqu'à 100 jours pour les deux autres cellules situées l'une à l'est et l'autre à l'ouest (Dumas et al., 2012). Cette structure de circulation est cohérente avec les structures de concentrations moyennes en chlorophylle-a observées dans l'atoll de Ahe.

La température influence la concentration en chlorophylle-a (Thomas et al., 2010 ; Lefebvre et al., 2022 ; Lefebvre et al., 2012). Lefebvre et al., (2022) ont montré une corrélation entre la concentration en chlorophylle-a et la température pour deux stations dans l'atoll de Ahe. Les périodes chaudes induisent une plus forte concentration en chlorophylle-a (Thomas et al., 2010). La température évolue spatialement et temporellement au sein et entre les lagons d'atolls (Van Wynsberge et al., 2024). De ce fait, la température pourrait influencer à la fois les variations intra et

inter atolls. Des variations saisonnières ont été observées avec des températures plus élevées en mars (29°C) et plus faibles en août (26°C) (Thomas et al., 2010 ; Van Wynsberge et al., 2020). Cette saisonnalité de la température est similaire à la saisonnalité de la concentration en chlorophylle-a que l'on a pu observer dans les atolls de Ahe, Takaroa et Takapoto. Il y a toutefois un léger décalage, les augmentations et baisses de températures précèdent les augmentations et baisses de la concentration en chlorophylle-a. En effet, un pic de concentration est généralement observé vers avril-juin, et un creux est généralement observé vers septembre-octobre.

La présence d'un fort effet mois x année indique que la saisonnalité de la concentration en chlorophylle-a varie d'une année à une autre, cela semble cohérent avec le fait que la variabilité de la concentration soit drivée par des facteurs environnementaux tels que la température ou le vent. En effet, ces facteurs ne sont pas stables dans le temps et subissent eux-mêmes des variabilités saisonnières et interannuelles, celles-ci pourraient expliquer que la saisonnalité de la concentration en chlorophylle-a dans les lagons varie plus ou moins fortement d'une année à une autre. D'ailleurs cela pourrait expliquer que lors des expéditions terrain la saisonnalité ne soit pas toujours observée ou différente d'une année à une autre. En effet, à Takapoto par exemple, Buestel et Pouvreau (2000) ont montré une faible saisonnalité entre 1990-1991, tandis que Charpy (1996) ont montré une saisonnalité plus marquée l'année suivante en 1992.

IV.5. Variabilités de durées de croissance et d'investissement reproductif

Les résultats de durées de croissance et d'investissement reproductif issus du modèle DEB sont cohérents avec les résultats issus des modèles GAM. En effet, on observe des variations intra et inter atolls de la durée de croissance pour les trois atolls, et de la reproduction pour Ahe. Les différences de durées de croissance sont de l'ordre de 2 mois entre stations et entre atolls. Pour ce qui est des données d'investissement reproducteur pour l'atoll de Ahe, des différences d'environ 150 kJ sont observées induisant jusqu'à des différences de trois pontes entre stations. Des différences de croissances entre stations dans l'atoll de Ahe avaient déjà été montrées par Sangare et al. (2020) et Lefebvre et al. (2022) avaient également observé des différences de durées de croissance et d'investissement reproductif. Les résultats de Lefebvre et al. (2022) étaient plus marqués que dans notre étude, avec, entre deux stations, des différences de l'ordre de 20 mois d'écart pour les durées de croissance et de 8 pontes. Cela peut s'expliquer par l'usage d'ACOLITE par Lefebvre et al. (2022) qui induit de plus grandes différences de concentrations que POLYMER. Des différences de croissances entre atolls avaient aussi été mesurées par Pouvreau & Prasil. (2001) avec des différences de 4 mois avant d'atteindre une taille de 10 cm entre Takaroa et Takapoto. L'ordre de grandeur est cohérent avec nos résultats. Les différences de concentration en chlorophylle-a peuvent être directement liées à ces variations. Ici, l'ordre de grandeur des faibles différences observées, 2 mois, 3 pontes est cohérent avec les différences de concentrations inter-stations qui ne sont pas très prononcées. Les différences maximales entre stations sont de l'ordre de 0.08 µg/L, elles-mêmes étant imputables aux structures hydrodynamiques dans les lagons, avec notamment les plus faibles concentrations en chlorophylle-a aux abords des passes de Takaroa et Ahe, et les concentrations les plus importantes avec des croissances les plus rapides et des investissements reproductifs plus importants au plus loin

des passes. De manière similaire, pour Takapoto ce sont les stations les plus centrales, éloignées des haies, qui ont des croissances plus rapides et des investissements reproductifs plus élevés. Le paramètre de demi saturation de la fonction alimentaire que nous avons ajusté à $X_k = 0.30 \mu\text{g/L}$ est légèrement inférieur à celui qui avait été ajusté par Lefebvre et al ; (2022), $X_k = 0.34 \mu\text{g/L}$. Cette légère différence est cohérente avec le fait qu'ACOLITE fournit des concentrations en chlorophylle-a légèrement supérieures à POLYMER.

V. PERSPECTIVES

En ce qui concerne les données de concentrations en chlorophylle-a, plusieurs pistes d'amélioration sont possibles. Premièrement, il y a trop peu de données *in situ* de concentration en chlorophylle-a et aucune donnée radiométrique pour statuer sur le fait que POLYMER est réellement la meilleure correction atmosphérique à utiliser. L'utilisation de données radiométriques de terrain permettrait de séparer les biais liés à la correction atmosphérique de ceux liés aux algorithmes bio-optiques. De cette manière, il serait d'une part plus simple d'évaluer la cohérence des corrections atmosphériques et d'autre part il serait possible d'optimiser davantage, si besoin, les algorithmes bio-optiques. Notamment en jouant sur le seuil appliqué, et peut-être modifier les coefficients pour les données Landsat 9 si besoin. De plus, d'autres corrections atmosphériques montrant de bons résultats tels que L2GEN pourraient être également testées. L'usage d'ACOLITE en changeant certains paramètres, dont les seuils des masques, pourrait aussi être performant. Le fait qu'ACOLITE donne plus de variabilité inter-stations que POLYMER n'a pas été investigué en détail. Cela peut être uniquement lié au fait qu'ACOLITE génère moins de données, mais cela peut également refléter une réalité biologique non captée par l'usage de POLYMER. Il faudrait donc vérifier que POLYMER ne lisse pas exagérément des variabilités spatiales existantes. Deuxièmement, il serait intéressant de regarder les données du satellite Sentinel 2 pour augmenter le nombre de jours disponibles, et investir davantage sur Landsat 9 en utilisant, par exemple, un algorithme de detriping pour contrer les problèmes rencontrés ici. Enfin, le seuil bathymétrique de validité des estimations de concentrations en chlorophylle-a étant de 30 m pour s'affranchir de l'influence optique du fond, il serait intéressant de tester des seuils plus faibles avec POLYMER ou d'autres corrections autres qu'ACOLITE (Lefebvre et al., 2022). Cela permettrait d'augmenter la surface traitée des lagons étudiés ici, et également d'étudier un plus grand nombre d'atolls car beaucoup sont peu profonds.

La saisonnalité de la concentration en chlorophylle-a est marquée. Il serait intéressant d'en comprendre plus précisément les sources, en testant l'impact de différents facteurs tels que la température, le vent, le temps de résidence ou encore la houle sur les réponses de chaque station au sein des lagons.

Le modèle DEB utilisé a été ajusté à l'aide de quelques données de croissances *in situ* issues de l'atoll de Ahe. Il conviendrait idéalement d'ajuster le modèle pour chaque atoll avec des données propres à chacun, notamment de croissance d'huîtres de tailles différentes et situées à différents endroits du lagon. Les données actuellement disponibles sont trop peu nombreuses mais il faut aussi

bien reconnaître la difficulté logistique et le coût d'un suivi à long terme dans un lagon d'atoll difficile d'accès. Si d'autres données deviennent disponibles, d'autres scénarios DEB pourraient être testés, notamment la modélisation de la durée de croissance des huîtres entre 5 et 10 cm, période pendant laquelle les huîtres sont sur les lignes d'élevage avant la greffe. Des échanges avec les perliculteurs permettraient d'avoir des données de tailles et de durées de croissance, ou plus simplement d'avoir leurs avis sur les différences de durées de croissance estimées à l'aide du modèle DEB.

Des résultats spatialisés pourraient être utiles à l'amélioration de la gestion de l'activité perlicole. Par exemple, les données spatiales d'investissement reproductif pourraient être intéressantes afin de choisir les zones où réimplanter préférentiellement des huîtres sauvages afin d'optimiser au mieux la reproduction au sein des atolls. Des diagnostics a posteriori pourraient être faits pour mieux comprendre certains événements ou tendances constatés par les perliculteurs.

VI. CONCLUSION

Cette étude a permis d'étudier la faisabilité d'utiliser différentes sources de données satellitaires et une autre correction atmosphérique que celle déjà utilisée dans l'étude de Lefebvre et al. (2022). A ce stade, les données Landsat 9 n'ont pas pu être utilisées mais en investiguant un peu plus il semble possible de les ajouter aux données Landsat 8. Cela serait très intéressant notamment pour améliorer la résolution temporelle des données et capter des variations de concentrations en chlorophylle-a plus fines. La comparaison entre les corrections ACOLITE et POLYMER a conclu que POLYMER présentait une meilleure cohérence. Mais cette comparaison a surtout soulevé le fait que l'on manque grandement de données terrain pour affirmer qu'une correction est vraiment meilleure qu'une autre et qu'elle reflète bien les réalités biologiques du terrain. En effet, le choix de la source des données, de la correction atmosphérique et des algorithmes bio-optiques est crucial et peut induire des différences de résultats notables.

L'acquisition de données satellites pour les atolls de Takaroa et Takapoto a permis pour la première fois la réalisation d'une comparaison inter atolls sur le long terme. Le suivi d'un grand nombre de stations par lagon a permis également pour la première fois la réalisation d'une comparaison intra lagon plus fine que celles qui avaient déjà été réalisées. Il a été montré que la concentration en chlorophylle-a présente des variabilités spatiales et temporelles intra et inter lagons ; ces variabilités semblent fortement dépendantes des morphologies propres à chaque atoll et sont principalement dues à la présence d'une saisonnalité. Cette variabilité de la concentration en chlorophylle-a influence les traits d'histoire de vie des huîtres perlières, notamment la croissance et la reproduction. Ces traits de vie ont un impact direct sur la durée d'élevage, le recrutement des naissains, et donc sur la production des perles noires de Polynésie, ainsi que sur l'économie locale. Une meilleure compréhension de ces phénomènes permettrait la mise en place d'une gestion spatiale de l'activité permettant d'optimiser et pérenniser la production.

BIBLIOGRAPHIE

ANDRÉFOUËT, S., GENTHON, P., PELLETIER, B., LE GENDRE, R., FRIOT, C., SMITH, R. et LIAO, V., 2020. The lagoon geomorphology of pearl farming atolls in the Central Pacific Ocean revisited using detailed bathymetry data. *Marine Pollution Bulletin*. novembre 2020. Vol. 160, pp. 111580. DOI 10.1016/j.marpolbul.2020.111580.

ANDRÉFOUËT, S. et PAUL, M., 2023. Atolls of the world: A reappraisal from an optical remote sensing and global mapping perspective. *Marine Pollution Bulletin*. septembre 2023. Vol. 194, pp. 115400. DOI 10.1016/j.marpolbul.2023.115400.

ANDRÉFOUËT, Serge, 2022a. Rapport interne non publié : Etude de l'environnement des lagons de Takaroa et Takapoto.

ANDRÉFOUËT, Serge, 2024. Premiers résultats sur l'étude de stock d'huitres perlières sauvages de Ahe d'octobre 2024. Rapport intermédiaire non publié.

ANDRÉFOUËT, Serge et ADJEROUD, Mehdi, 2019. French Polynesia. In : *World Seas: an Environmental Evaluation* [en ligne]. Elsevier. pp. 827-854. [Consulté le 27 août 2025]. ISBN 978-0-08-100853-9. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081008539000397>

ANDRÉFOUËT, Serge, ARDHUIN, Fabrice, QUEFFEULOU, Pierre et LE GENDRE, Romain, 2012a. Island shadow effects and the wave climate of the Western Tuamotu Archipelago (French Polynesia) inferred from altimetry and numerical model data. *Marine Pollution Bulletin*. 2012. Vol. 65, n° 10-12, pp. 415-424. DOI 10.1016/j.marpolbul.2012.05.042.

ANDRÉFOUËT, Serge, CHARPY, Loic, LO-YAT, Alain et LO, Cédrik, 2012b. Recent research for pearl oyster aquaculture management in French Polynesia. *Marine Pollution Bulletin*. 2012. Vol. 65, n° 10-12, pp. 407-414. DOI 10.1016/j.marpolbul.2012.06.021.

ANDRÉFOUËT, Serge, DESCLAUX, Terence, BUTTIN, Julie, JULLIEN, Swen, AUCAN, Jérôme, LE GENDRE, Romain et LIAO, Vetea, 2022b. Periodicity of wave-driven flows and lagoon water renewal for 74 Central Pacific Ocean atolls. *Marine Pollution Bulletin*. juin 2022. Vol. 179, pp. 113748. DOI 10.1016/j.marpolbul.2022.113748.

ANDRÉFOUËT, Serge, LO-YAT, Alain, LEFEBVRE, Sebastien, BIONAZ, Océane et LIAO, Vetea, 2022c. The MANA (MANagement of Atolls, 2017–2022) project for pearl oyster aquaculture management in the Central Pacific Ocean using modelling approaches: Overview of first results. *Marine Pollution Bulletin*. mai 2022. Vol. 178, pp. 113649. DOI 10.1016/j.marpolbul.2022.113649.

ANDRÉFOUËT, Serge, THOMAS, Yoann, DUMAS, Franck et LO, Cédrik, 2016. Revisiting wild stocks of black lip oyster *Pinctada margaritifera* in the Tuamotu Archipelago: The case of Ahe and Takaroa atolls and implications for the cultured pearl industry. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. décembre 2016. Vol. 182, pp. 243-253. DOI 10.1016/j.ecss.2016.06.013.

BIONAZ, Océane, LE GENDRE, Romain, LIAO, Vetea et ANDRÉFOUËT, Serge, 2022. Natural stocks of *Pinctada margaritifera* pearl oysters in Tuamotu and Gambier lagoons: New assessments, temporal evolutions, and consequences for the French Polynesia pearl farming industry. *Marine Pollution Bulletin*. octobre 2022. Vol. 183, pp. 114055. DOI 10.1016/j.marpolbul.2022.114055.

CHARPY, L, 1996. Phytoplankton biomass and production in two Tuamotu atoll lagoons (French Polynesia). *Marine Ecology Progress Series*. 1996. Vol. 145, pp. 133-142. DOI 10.3354/meps145133.

CHARPY, L et BLANCHOT, J, 1998. Photosynthetic picoplankton in French Polynesian atoll lagoons: estimation of taxa contribution to biomass and production by flow cytometry. *Marine Ecology Progress Series*. 1998. Vol. 162, pp. 57-70. DOI 10.3354/meps162057.

CHARPY, L, DUFOUR, P et GARCIA, N, 1997. Particulate organic matter in sixteen Tuamotu atoll lagoons (French Polynesia). *Marine Ecology Progress Series*. 1997. Vol. 151, pp. 55-65. DOI 10.3354/meps151055.

CHARPY, Loïc, RODIER, Martine, FOURNIER, Jonathan, LANGLADE, Marie-José et GAERTNER-MAZOUNI, Nabila, 2012. Physical and chemical control of the phytoplankton of Ahe lagoon, French Polynesia. *Marine Pollution Bulletin*. 2012. Vol. 65, n° 10-12, pp. 471-477. DOI 10.1016/j.marpolbul.2011.12.026.

DELESALLE, Bruno, SAKKA, Asma, LEGENDRE, Louis, PAGÈS, Jean, CHARPY, Loïc et LORET, Pascale, 2001. The phytoplankton of Takapoto Atoll (Tuamotu Archipelago, French Polynesia): time and space variability of biomass, primary production and composition over 24 years. .

DUMAS, F., LE GENDRE, R., THOMAS, Y. et ANDRÉFOUËT, S., 2012. Tidal flushing and wind driven circulation of Ahe atoll lagoon (Tuamotu Archipelago, French Polynesia) from in situ observations and numerical modelling. *Marine Pollution Bulletin*. 2012. Vol. 65, n° 10-12, pp. 425-440. DOI 10.1016/j.marpolbul.2012.05.041.

[Auteur ?], 2010. Exploring thermal tolerance across time and space in a tropical bivalve, *Pinctada margaritifera*.

DUTHEIL, Cyril, ANDRÉFOUËT, S., JULLIEN, S., LE GENDRE, R., AUCAN, J. et MENKES, C., 2020. Characterization of south central Pacific Ocean wind regimes in present and future climate for pearl farming application. *Marine Pollution Bulletin*. novembre 2020. Vol. 160, pp. 111584. DOI 10.1016/j.marpolbul.2020.111584.

DRM – Direction des Ressources Marines (2025). Concessions perlicoles [Données géographiques : ESRI Shapefile]. Gouvernement de la Polynésie française.

EMBERTON, Simon, CHITTKA, Lars, CAVALLARO, Andrea et WANG, Menghua, 2015. Sensor Capability and Atmospheric Correction in Ocean Colour Remote Sensing. *Remote Sensing*. 22 décembre 2015. Vol. 8, n° 1, pp. 1. DOI 10.3390/rs8010001.

FOURNIER, Jonathan, DUPUY, Christine, BOUVY, Marc, COURAUDON-RÉALE, Marine, CHARPY, Loïc, POUVREAU, Stephane, LE MOULLAC, Gilles, LE PENNEC, Marcel et COCHARD, Jean-Claude, 2012a. Pearl oysters *Pinctada margaritifera* grazing on natural plankton in Ahe atoll lagoon (Tuamotu archipelago, French Polynesia). *Marine Pollution Bulletin*. 2012. Vol. 65, n° 10-12, pp. 490-499. DOI 10.1016/j.marpolbul.2012.03.026.

FOURNIER, Jonathan, LEVESQUE, Emmanuelle, POUVREAU, Stephane, PENNEC, Marcel Le et MOULLAC, Gilles Le, 2012b. Influence of plankton concentration on gametogenesis and spawning of the black lip pearl oyster *Pinctada margaritifera* in Ahe atoll lagoon (Tuamotu archipelago, French polynesia). *Marine Pollution Bulletin*. 2012. Vol. 65, n° 10-12, pp. 463-470. DOI 10.1016/j.marpolbul.2012.03.027.

GIORGINO, Toni, 2009. Computing and Visualizing Dynamic Time Warping Alignments in R : The dtw Package. *Journal of Statistical Software* [en ligne]. 2009. Vol. 31, n° 7. [Consulté le 28 août 2025]. DOI 10.18637/jss.v031.i07. Disponible à l'adresse : <http://www.jstatsoft.org/v31/i07/>

HU, Chuanmin, FENG, Lian, LEE, Zhongping, FRANZ, Bryan A., BAILEY, Sean W., WERDELL, P. Jeremy et PROCTOR, Christopher W., 2019. Improving Satellite Global Chlorophyll a Data Products Through Algorithm Refinement and Data Recovery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. mars 2019. Vol. 124, n° 3, pp. 1524-1543. DOI 10.1029/2019JC014941.

HU, Chuanmin, LEE, Zhongping et FRANZ, Bryan, 2012. Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. janvier 2012. Vol. 117, n° C1, pp. 2011JC007395. DOI 10.1029/2011JC007395.

KOOIJMAN, Bas, 2009. Dynamic Energy Budget Theory for Metabolic Organisation [en ligne]. 3. Cambridge University Press. [Consulté le 27 août 2025]. ISBN 978-0-521-13191-9. Disponible à l'adresse : <https://www.cambridge.org/core/product/identifiant/9780511805400/type/book>

LEFEBVRE, Sébastien, CLAQUIN, Pascal, ORVAIN, Francis, VÉRON, Benoît et CHARPY, Loïc, 2012. Spatial and temporal dynamics of size-structured photosynthetic parameters (PAM) and primary production (13C) of pico- and nano-phytoplankton in an atoll lagoon. *Marine Pollution Bulletin*. 2012. Vol. 65, n° 10-12, pp. 478-489. DOI 10.1016/j.marpolbul.2012.04.011.

LEFEBVRE, Sébastien, VERPOORTER, Charles, RODIER, Martine, SANGARE, Nathanaël et ANDRÉFOUËT, Serge, 2022. Remote sensing provides new insights on phytoplankton biomass dynamics and black pearl oyster life-history traits in a Pacific Ocean deep atoll. *Marine Pollution Bulletin*. août 2022. Vol. 181, pp. 113863. DOI 10.1016/j.marpolbul.2022.113863.

LORET, P, LE GALL, S, DUPUY, C, BLANCHOT, J, PASTOUREAUD, A, DELESALLE, B, CAISEY, X et JONQUIÈRES, G, 2000. Heterotrophic protists as a trophic link between picocyanobacteria and the pearl oyster *Pinctada margaritifera* in the Takapoto lagoon (Tuamotu Archipelago, French Polynesia). *Aquatic Microbial Ecology*. 2000. Vol. 22, pp. 215-226. DOI 10.3354/ame022215.

LO-YAT, Alain, MONACO, Cristián J., THOMAS, Yoann, CZORLICH, Yann, LE BORGNE, Florian, MUYLAERT, Morgan, LE MOULLAC, Gilles, VANAA, Vincent, BELIAEFF, Benoît et GAREN, Pierre, 2022. Mismatch between the ecological processes driving early life-stage dynamics of bivalves at two contrasting French Polynesian lagoons. *Marine Pollution Bulletin*. octobre 2022. Vol. 183, pp. 114099. DOI 10.1016/j.marpolbul.2022.114099.

MONACO, Cristián J., SANGARE, Nathanael, LE MOULLAC, Gilles, BASSET, Caline, BELLIARD, Corinne, MIZUNO, Keiichi, SMITH, Diane L. et LO-YAT, Alain, 2021. Dynamic Energy Budget model suggests feeding constraints and physiological stress in black-lip pearl oysters, 5 years post mass-mortality event. *Marine Pollution Bulletin*. juin 2021. Vol. 167, pp. 112329. DOI 10.1016/j.marpolbul.2021.112329.

MORFITT, Ron, BARSİ, Julia, LEVY, Raviv, MARKHAM, Brian, MICIJEVIC, Esad, ONG, Lawrence, SCARAMUZZA, Pat et VANDERWERFF, Kelly, 2015. Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Radiometric Performance On-Orbit. *Remote Sensing*. 17 février 2015. Vol. 7, n° 2, pp. 2208-2237. DOI 10.3390/rs70202208.

MUELLER, James L, FARGION, Giulietta S, MCCLAIN, Charles R, MUELLER, J L, BROWN, S W, CLARK, D K, JOHNSON, B C, YOON, H, LYKKE, K R, FLORA, S J, SOUAIDIA, N, PIETRAS, C, STONE, T C, YARBROUGH, M A, KIM, Y S et BARNES, R A, 2004. Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 5, Volume VI: Special Topics in Ocean Optics Protocols, Part 2. . 2004.

O'REILLY, John E., MARITORENA, Stéphane, MITCHELL, B. Greg, SIEGEL, David A., CARDER, Kendall L., GARVER, Sara A., KAHRU, Mati et MCCLAIN, Charles, 1998. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 15 octobre 1998. Vol. 103, n° C11, pp. 24937-24953. DOI 10.1029/98JC02160.

O'REILLY, John E. et WERDELL, P. Jeremy, 2019. Chlorophyll algorithms for ocean color sensors - OC4, OC5 & OC6. *Remote Sensing of Environment*. août 2019. Vol. 229, pp. 32-47. DOI 10.1016/j.rse.2019.04.021.

PESTA, Frank, BHATTA, Suman, HELDER, Dennis et MISHRA, Nischal, 2014. Radiometric Non-Uniformity Characterization and Correction of Landsat 8 OLI Using Earth Imagery-Based Techniques. *Remote Sensing*. 31 décembre 2014. Vol. 7, n° 1, pp. 430-446. DOI 10.3390/rs70100430.

POUVREAU, Stéphane, BACHER, Cédric et HÉRAL, Maurice, 2000. Ecophysiological model of growth and reproduction of the black pearl oyster, *Pinctada margaritifera*: potential applications for pearl farming in French Polynesia. *Aquaculture*. juin 2000. Vol. 186, n° 1-2, pp. 117-144. DOI 10.1016/S0044-8486(99)00373-7.

POUVREAU, Stéphane, JONQUIÈRES, Gérard et BUESTEL, Dominique, 1999. Filtration by the pearl oyster, *Pinctada margaritifera*, under conditions of low seston load and small particle size in a tropical lagoon habitat. *Aquaculture*. juin 1999. Vol. 176, n° 3-4, pp. 295-314. DOI 10.1016/S0044-8486(99)00102-7.

POUVREAU, Stéphane et PRASIL, Vincent, 2001. Growth of the black-lip pearl oyster, *Pinctada margaritifera*, at nine culture sites of French Polynesia: synthesis of several sampling designs conducted between 1994 and 1999.

RODIER, Martine, PINAZO, Christel, SECEH, Claire et VARILLON, David, 2021. Pelagic stocks and carbon and nitrogen uptake in a pearl farming atoll (Ahe, French Polynesia). *Marine Pollution Bulletin*. juin 2021. Vol. 167, pp. 112352. DOI 10.1016/j.marpolbul.2021.112352.

SAKOE, H. et CHIBA, S., 1978. Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. février 1978. Vol. 26, n° 1, pp. 43-49. DOI 10.1109/TASSP.1978.1163055.

SANGARE, Nathanaël, LO-YAT, Alain, MOULLAC, Gilles Le, PECQUERIE, Laure, THOMAS, Yoann, LEFEBVRE, Sébastien, GENDRE, Romain Le, BELIAEFF, Benoît et ANDRÉFOUËT, Serge, 2020. Impact of environmental variability on *Pinctada margaritifera* life-history traits: A full life cycle deb modeling approach. *Ecological Modelling*. mai 2020. Vol. 423, pp. 109006. DOI 10.1016/j.ecolmodel.2020.109006.

SUN, Aoxiang, HE, Shuangyan, GU, Yanzhen, LI, Peiliang, LIU, Cong, YE, Guanqiong et ZHOU, Feng, 2024. Performance Assessment of Landsat-9 Atmospheric Correction Methods in Global Aquatic Systems. *Remote Sensing*. 2 décembre 2024. Vol. 16, n° 23, pp. 4517. DOI 10.3390/rs16234517.

SHANMUGAM, Palanisamy, 2011. A new bio-optical algorithm for the remote sensing of algal blooms in complex ocean waters. *Journal of Geophysical Research*. 16 avril 2011. Vol. 116, n° C4, pp. C04016. DOI 10.1029/2010JC006796.

STEINMETZ, François, DESCHAMPS, Pierre-Yves et RAMON, Didier, 2011. Atmospheric correction in presence of sun glint: application to MERIS. *Optics Express*. 9 mai 2011. Vol. 19, n° 10, pp. 9783. DOI 10.1364/OE.19.009783.

THIELLEY, Maryse, 1993. Etude cytologique de la gamétogenèse, de la sex-ratio et du cycle de reproduction chez l'huître perlière *Pinctada margaritifera* (L) var. *cumingii* (Jameson), (mollusques, bivalves). Comparaison avec le cycle de *Pinctada maculata* (Gould).

THOMAS, Y., GAREN, P., BENNETT, A., LE PENNEC, M. et CLAVIER, J., 2012a. Multi-scale distribution and dynamics of bivalve larvae in a deep atoll lagoon (Ahe, French Polynesia). *Marine Pollution Bulletin*. 2012. Vol. 65, n° 10-12, pp. 453-462. DOI 10.1016/j.marpolbul.2011.12.028.

THOMAS, Y, GAREN, P, COURTIES, C et CHARPY, L, 2010. Spatial and temporal variability of the pico- and nanophytoplankton and bacterioplankton in a deep Polynesian atoll lagoon. *Aquatic Microbial Ecology*. 24 mars 2010. Vol. 59, pp. 89-101. DOI 10.3354/ame01384.

THOMAS, Y., GAREN, P. et POUVREAU, S., 2011. Application of a bioenergetic growth model to larvae of the pearl oyster *Pinctada margaritifera* L. *Journal of Sea Research*. novembre 2011. Vol. 66, n° 4, pp. 331-339. DOI 10.1016/j.seares.2011.04.005.

THOMAS, Y., LE GENDRE, R., GAREN, P., DUMAS, F. et ANDRÉFOUËT, S., 2012b. Bivalve larvae transport and connectivity within the Ahe atoll lagoon (Tuamotu Archipelago), with application to pearl oyster aquaculture management. *Marine Pollution Bulletin*. 2012. Vol. 65, n° 10-12, pp. 441-452. DOI 10.1016/j.marpolbul.2011.12.027.

TORRÉTON, Jean-Pascal, ROCHELLE-NEWALL, Emma, PRINGAULT, Olivier, JACQUET, Séverine, FAURE, Vincent et BRIAND, Enora, 2010. Variability of primary and bacterial production in a coral reef lagoon (New Caledonia). *Marine Pollution Bulletin*. 2010. Vol. 61, n° 7-12, pp. 335-348. DOI 10.1016/j.marpolbul.2010.06.019.

VANHELLEMONT, Quinten et RUDDICK, Kevin, 2018. Atmospheric correction of metre-scale optical satellite data for inland and coastal water applications. *Remote Sensing of Environment*. octobre 2018. Vol. 216, pp. 586-597. DOI 10.1016/j.rse.2018.07.015.

VANHELLEMONT, Quinten, 2025. Acolite User Manual [en ligne]. 2025. Disponible à l'adresse : https://github.com/acolite/acolite/releases/download/20250402.0/acolite_manual_20250402.0.pdf

VIOLETTE, Clémentine, LE GENDRE, Romain, CHAUVEAU, Mathilde et ANDRÉFOUËT, Serge, 2023. A multivariate approach to synthesize large amount of connectivity matrices for management decisions: Application to oyster population restocking in the pearl farming context of Tuamotu Archipelago semi-closed atolls. *Marine Pollution Bulletin*. avril 2023. Vol. 189, pp. 114748. DOI 10.1016/j.marpolbul.2023.114748.

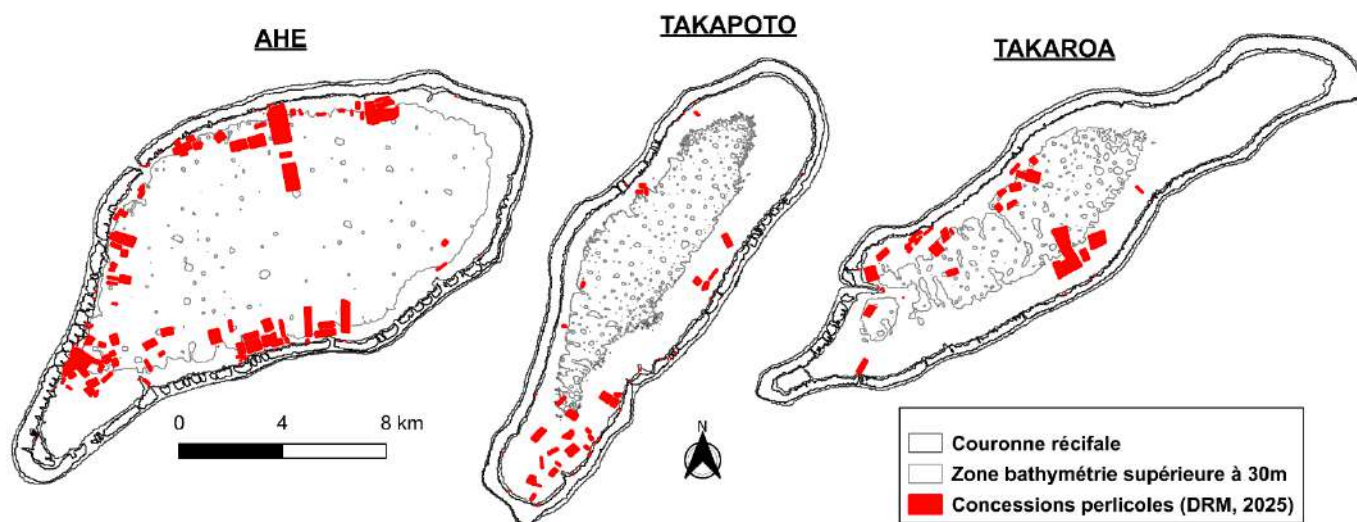
VOLLBRECHT, Carleigh, MOEHLENKAMP, Paula, GOVE, Jamison M., NEUHEIMER, Anna B. et MCMANUS, Margaret A., 2021. Long-Term Presence of the Island Mass Effect at Rangiroa Atoll, French Polynesia. *Frontiers in Marine Science*. 13 janvier 2021. Vol. 7, pp. 595294. DOI 10.3389/fmars.2020.595294.

WOOD, Simon N., LI, Zheyuan, SHADDICK, Gavin et AUGUSTIN, Nicole H., 2017. Generalized Additive Models for Gigadata: Modeling the U.K. Black Smoke Network Daily Data. *Journal of the American Statistical Association*. 3 juillet 2017. Vol. 112, n° 519, pp. 1199-1210. DOI 10.1080/01621459.2016.1195744.

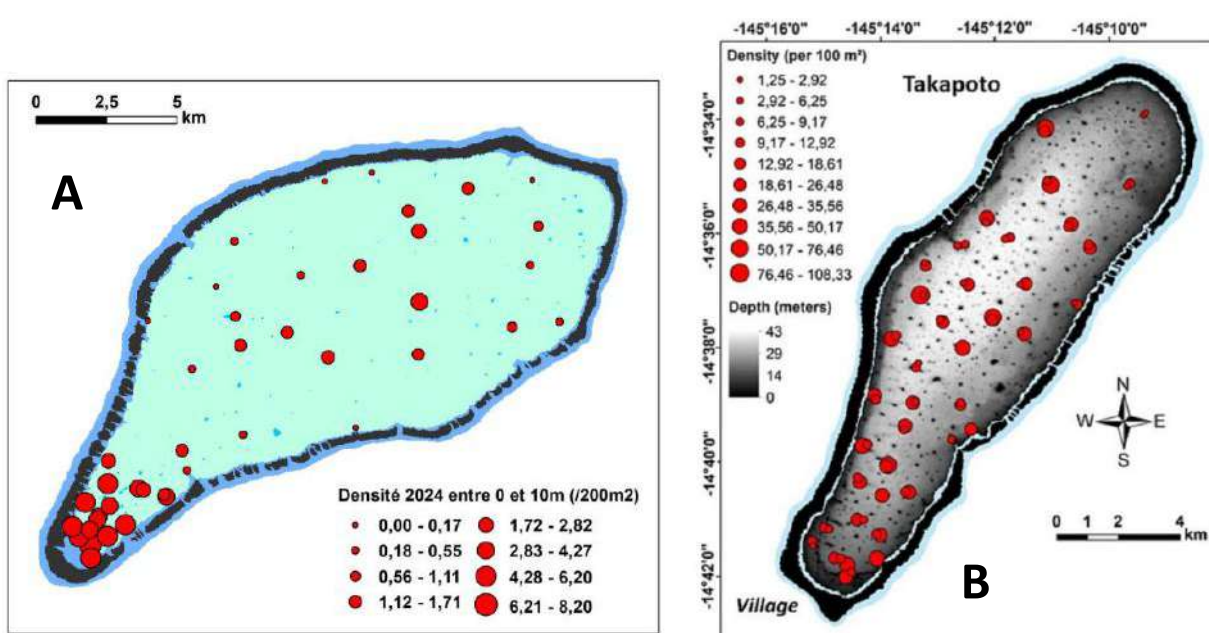
WOODROFFE, Colin D. et BIRIBO, Naomi, 2011. Atolls. In : HOPLEY, David (éd.), *Encyclopedia of Modern Coral Reefs* [en ligne]. Dordrecht : Springer Netherlands. pp. 51-71. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. [Consulté le 12 juillet 2025]. ISBN 978-90-481-2638-5. Disponible à l'adresse : https://link.springer.com/10.1007/978-90-481-2639-2_4

ANNEXES

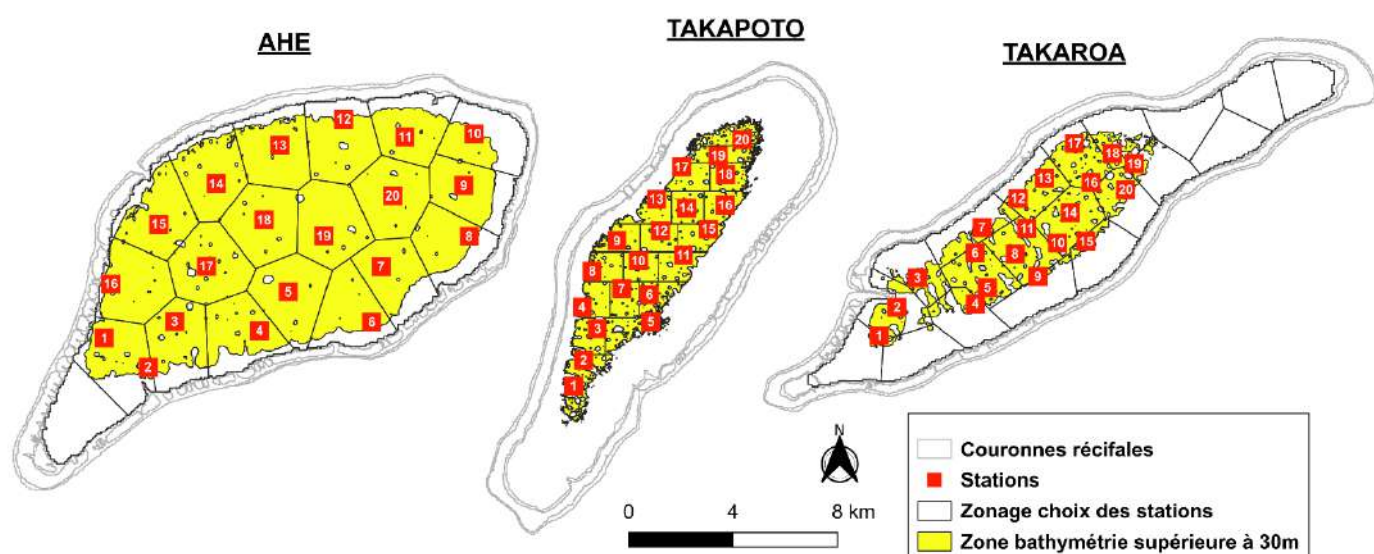
Annexe 1 : Localisation des concessions perlicoles au sein des lagons étudiés (DRM, 2025)



Annexe 2 : Cartes des évaluations de stocks d'huîtres sauvages réalisées à Ahe (A) (Andréfouët, 2024) et Takapoto (B) (Bionaz et al., 2022)

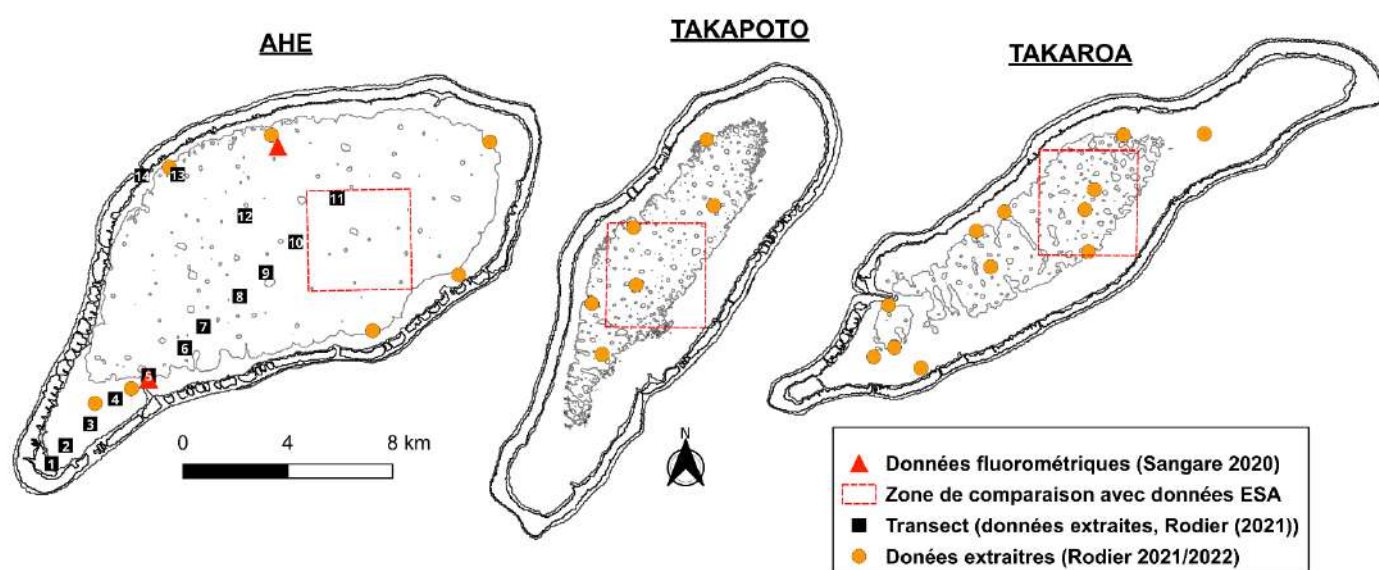


Annexe 3 : Localisation des stations de suivis de la chlorophylle-a par atoll, les coordonnées sont en EPSG 32706.



	AHE		TAKAPOTO		TAKAORA	
Station	x	y	x	y	x	y
1	567812	8395115	690338	8378269	712170	8397149
2	569488	8393999	690725	8379256	712855	8398238
3	570505	8395752	691258	8380472	713631	8399366
4	573758	8395399	690663	8381297	715858	8398368
5	574859	8396894	693299	8380729	716316	8398993
6	578069	8395732	693246	8381776	715846	8400319
7	578425	8397864	692181	8381998	716113	8401298
8	581799	8399015	691054	8382682	717380	8400289
9	581597	8400975	692003	8383844	718261	8399421
10	581991	8402965	692820	8383072	719010	8400712
11	579345	8402834	694551	8383285	717836	8401257
12	576991	8403521	693672	8384226	717492	8402418
13	574526	8402511	693512	8385442	718505	8403184
14	572101	8401036	694675	8385104	719483	8401877
15	569899	8399490	695509	8384297	720102	8400756
16	568060	8397197	696148	8385211	720290	8403027
17	571727	8397874	694480	8386675	719651	8404529
18	573930	8399652	696166	8386391	721113	8404141
19	576223	8399036	695882	8387110	721952	8403744
20	578860	8400581	696796	8387723	721628	8402751

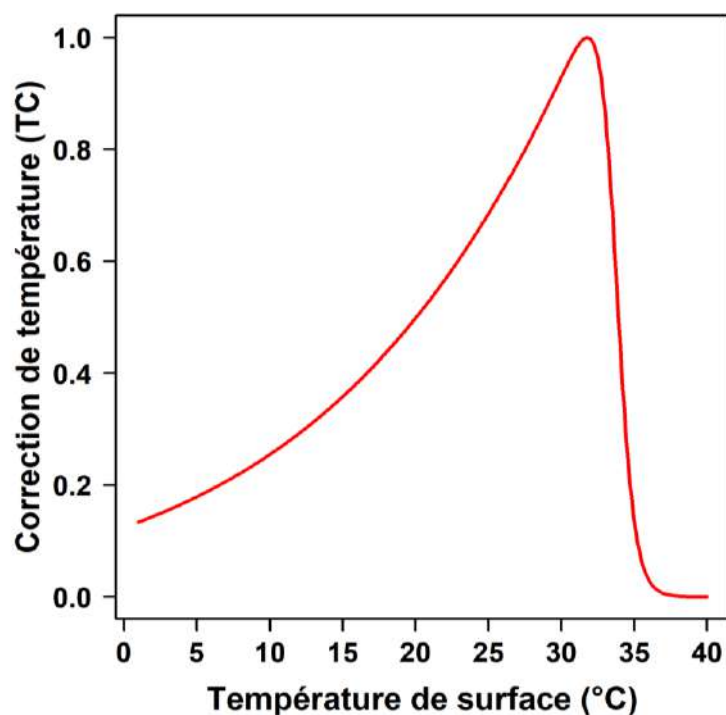
Annexe 4 : Localisation des stations ayant été utilisées lors des mesures de chlorophylle-a sur le terrain et zone de comparaison des données POLYMER et ACOLITE avec celles de l'ESA.



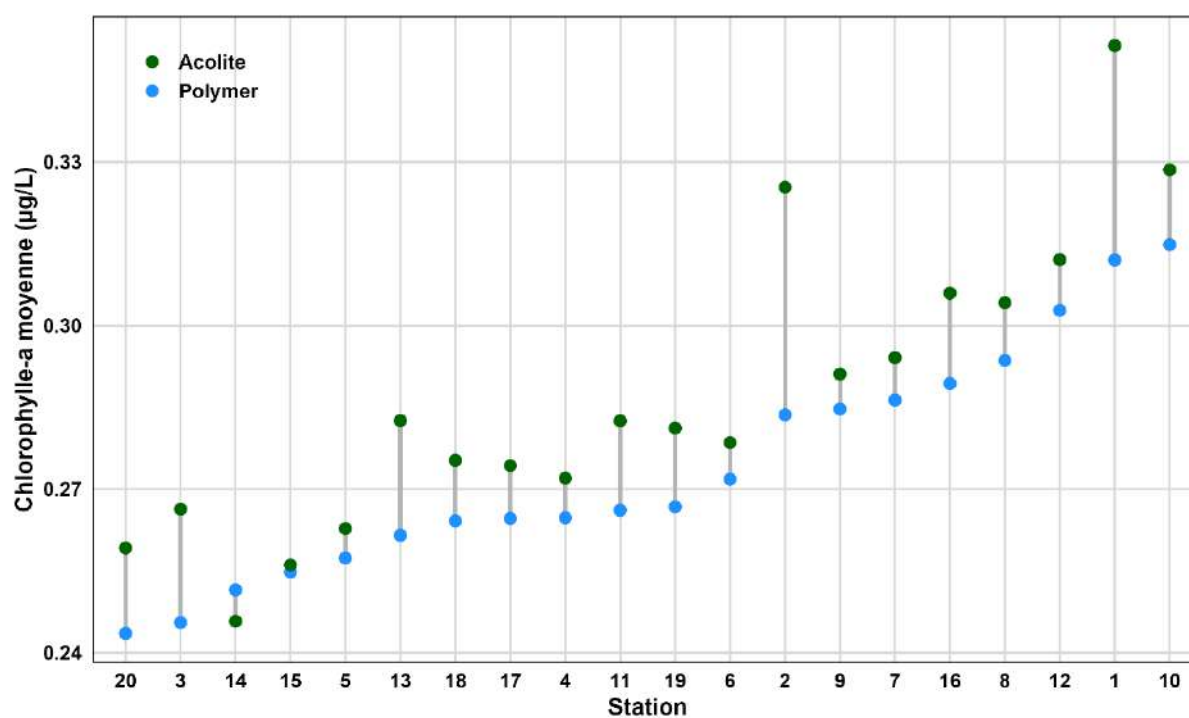
Annexe 5 : Paramètres utilisées pour la modélisation DEB de *Pinctada margaritifera* (Sangare et al., 2020)

Paramètre	Valeur	Commentaire
T_A	5785 °K	Arrhenius temperature
T_ref	293.15 °K	Reference temperature
T_AL	137.61 °K	Arrhenius temperature for lower boundary
T_L	291.77 °K	Lower boundary temperature
T_AH	157978.8572 °K	Arrhenius temperature for higher boundary
T_H	306.4749	Higher boundary temperature
del_Me	0.59	Shape for embryo length
del_M	0.27	Shape for trunk length
E_Hb	6.326e-05 J	Maturity at birth
E_Hs	3.537e-04 J	Maturity at settlement
E_Hj	3.011 J	Maturity at metamorphosis
E_Hp	3015 J	Maturity at puberty
Lb	0.00430346 cm	Structural length at birth
Ls	0.00762647 cm	Structural length at settlement
Lj	0.155534 cm	Structural length at metamorphosis
p_Am	3.07 J/d/cm ²	Max assimilation before acceleration at reference temperature
v	0.010753 cm/d	Energy conductance before acceleration at reference temperature
p_M	5.3975 J/d/cm ³	Vol specific maintenance rate at reference temperature
k_J	0.0016381	Maturity maintenance rate at reference temperature
kap	0.75028	Kappa
kap_R	0.95	Kappa_R
E_G	2383.2089 J/cm ³	Specific cost for structure
d_V	0.09 g/cm ³	Density of structural volume
d_E	0.09 g/cm ³	Density of wet reserves
W_Ed	23.9 g/Cmole	Molecular weight of reserve
mu_E	550000 J/C Mole	Chemical potential of reserve

Annexe 6 : Relation entre la correction de température (TC) et la température de surface de l'eau utilisée pour la modélisation DEB (Sangare et al., 2020)



Annexe 7 : Différences de concentrations en chlorophylle-a entre stations, selon la correction atmosphérique utilisée



Annexes 8 : Modèles utilisés pour la comparaison Landsat 8 – Landsat 9 et AIC obtenus

Liste des modèles (famille Gamma, lien log et Weights) :

Modèle 1 : bam (chlorophylle – a ~ s (date, bs = cr, k = 50) + s(station, bs = "re")

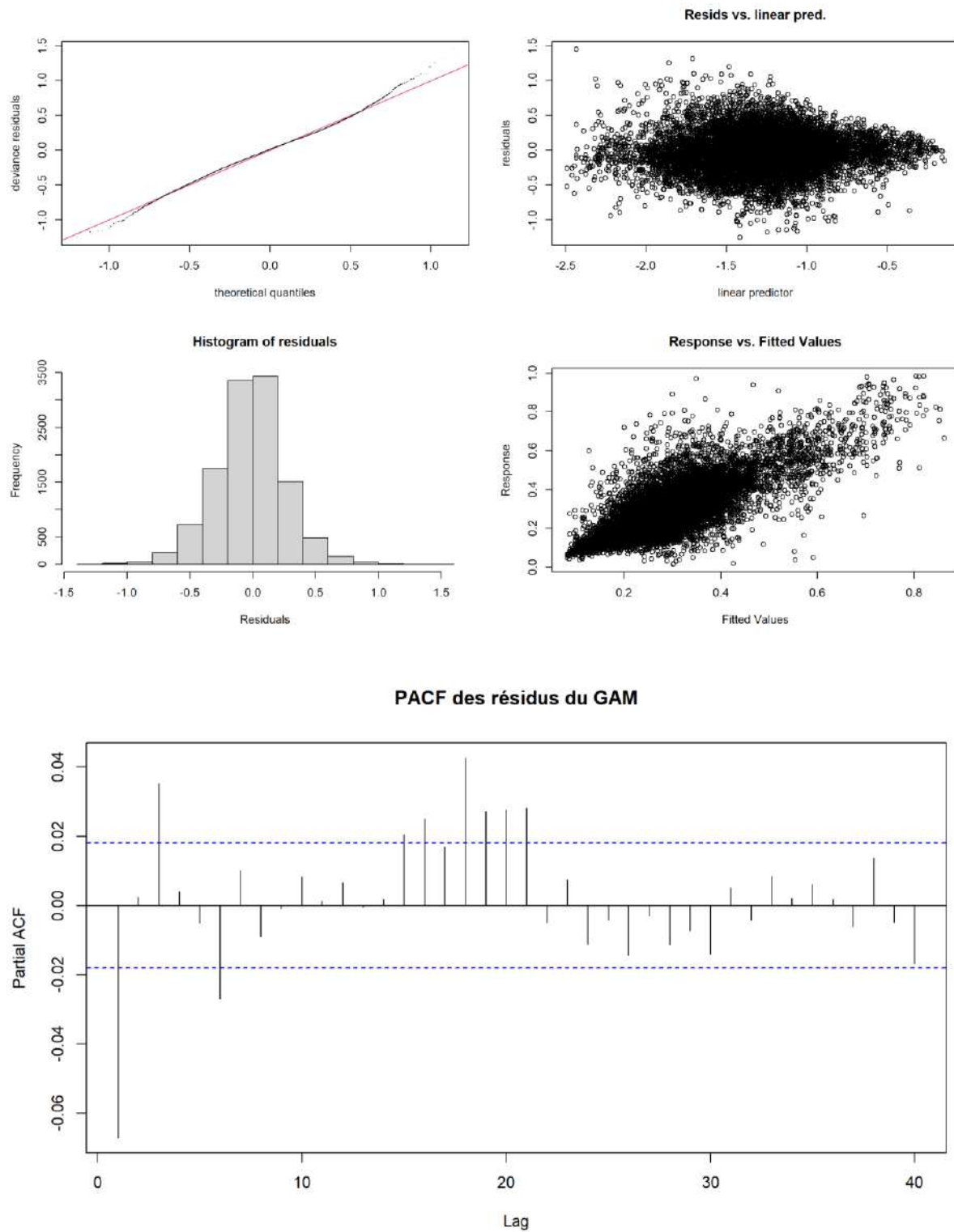
Modèle 2 : bam (chlorophylle – a ~ s (date, bs = cr, k = 50) + sat + s(station, bs = "re")

Modèle 3 : bam (chlorophylle – a ~ s (date, bs = cr, k = 50, by = sat) + s(station, bs = "re")

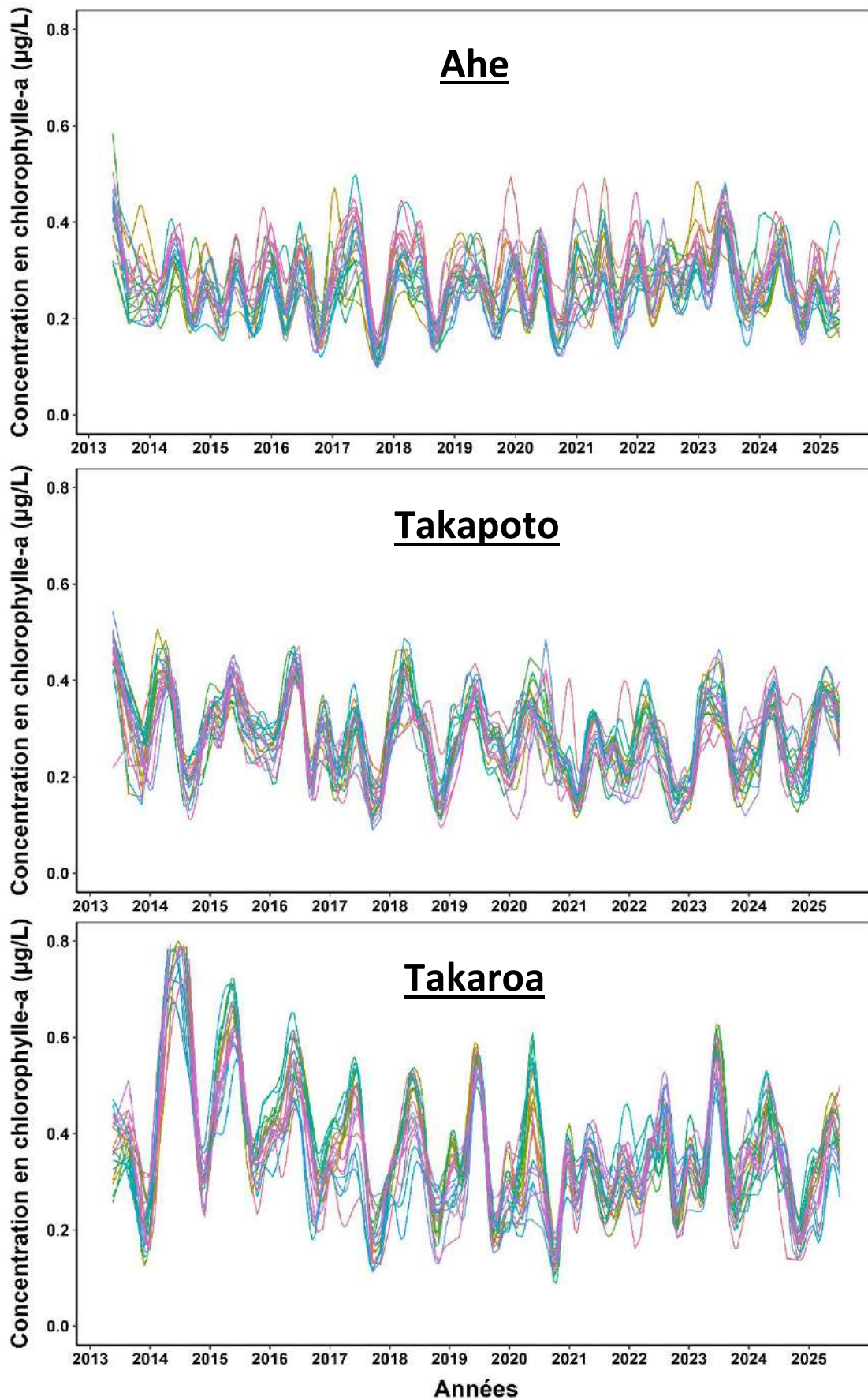
Modèle 4 : bam (chlorophylle – a ~ s (date, bs = cr, k = 50, by = sat) + sat + s(station, bs = "re")

Modèles	df	AIC
Ahe		
M1	62.67	-5539.10
M2	63.80	-5559.95
M3	103.93	-5811.91
M4	104.92	-584.79
Takaroa		
M1	63.38	-3577.90
M2	64.50	-3651.06
M3	104.33	-4202.30
M4	104.37	-4202.38
Takapoto		
M1	65.36	-4434.33
M2	66.53	-4541.17
M3	103.16	-5082.41
M4		

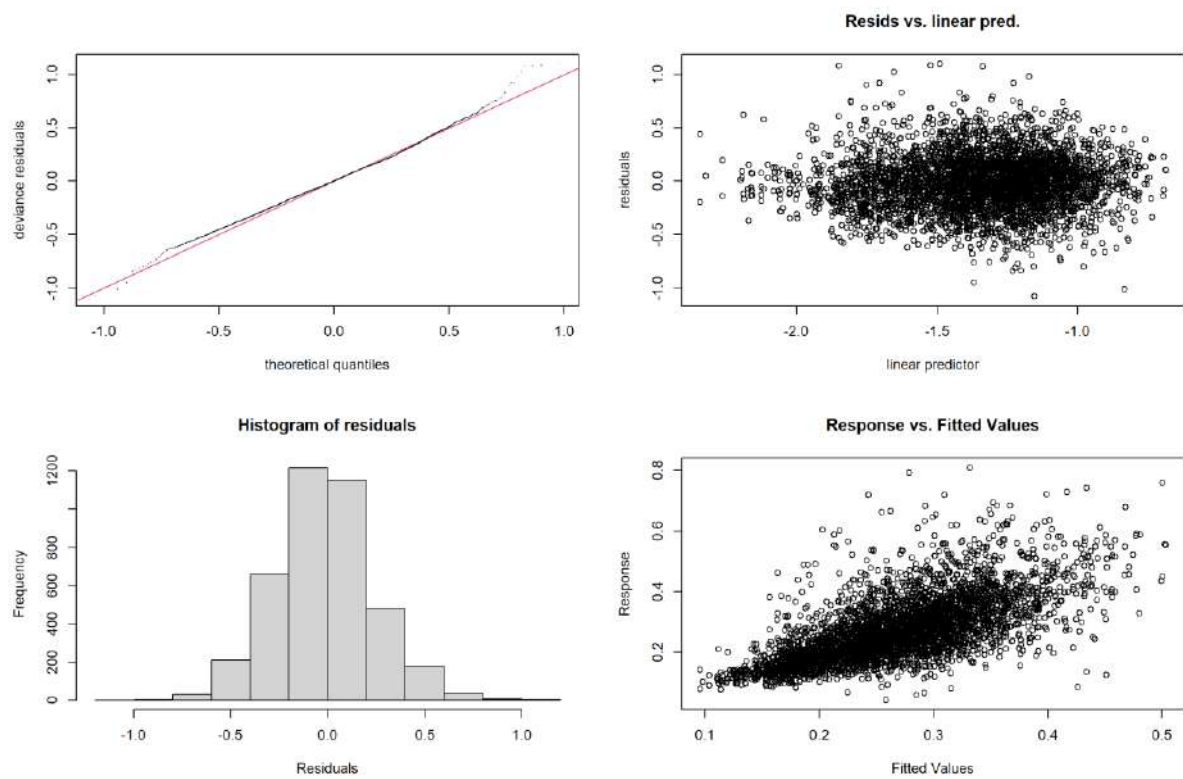
Annexe 9 : Gam-check et PACF pour le GAM mixte inter-atolls



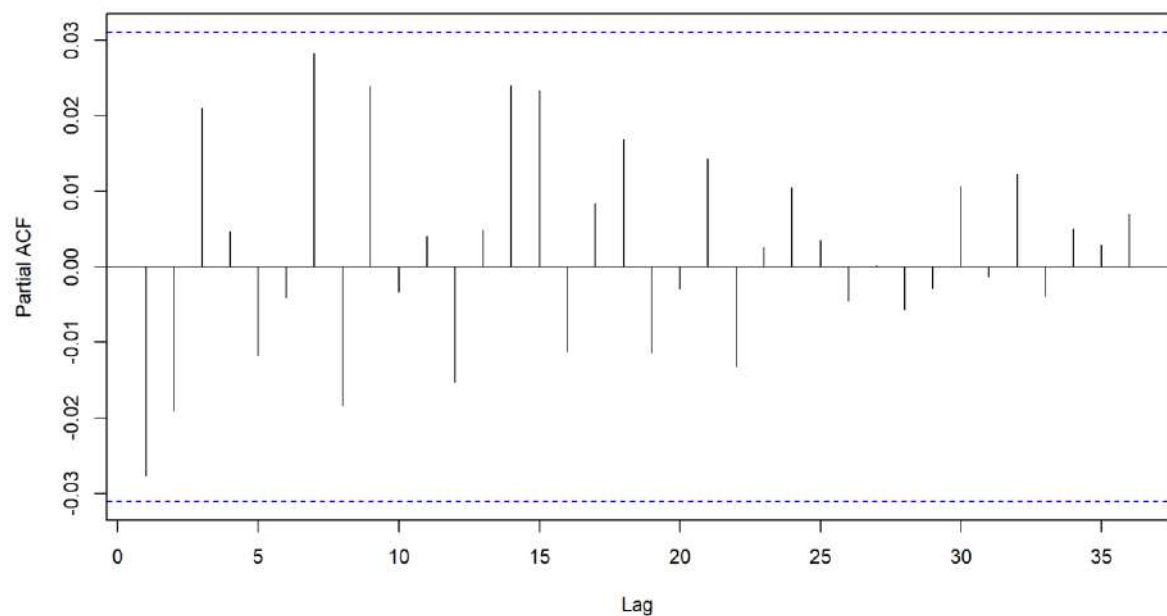
Annexe 10 : Séries temporelles des concentrations en chlorophylle-a par stations pour chaque atoll étudié. Un lissage par spline cubique a été appliqué à chaque courbe.



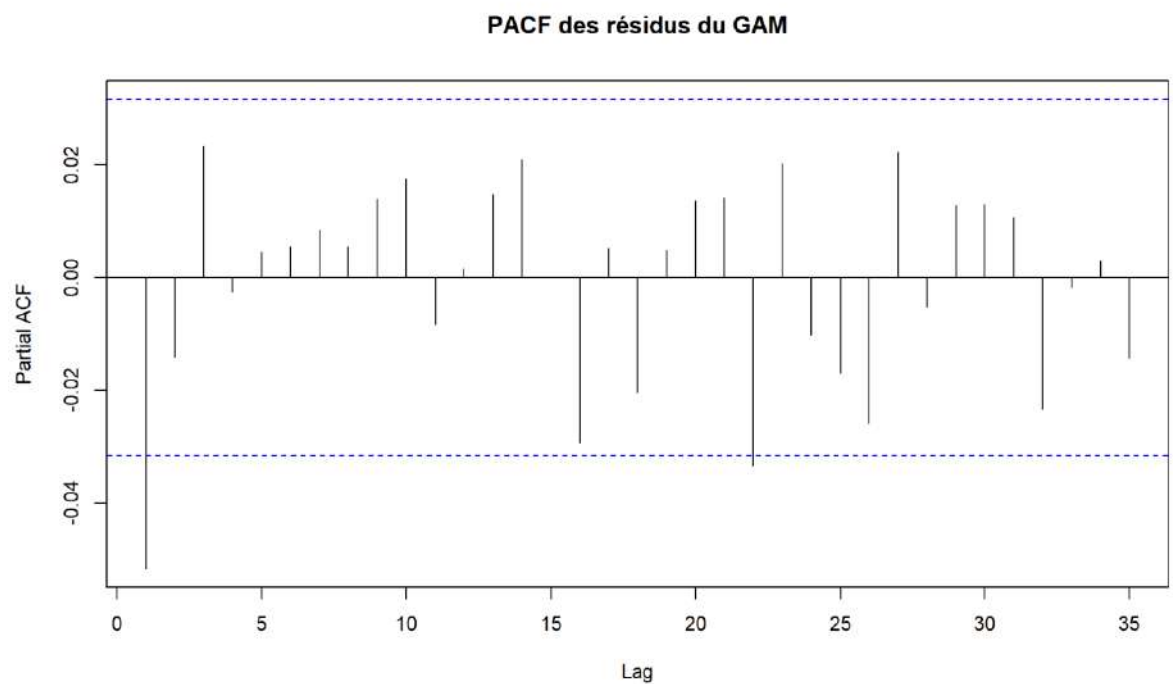
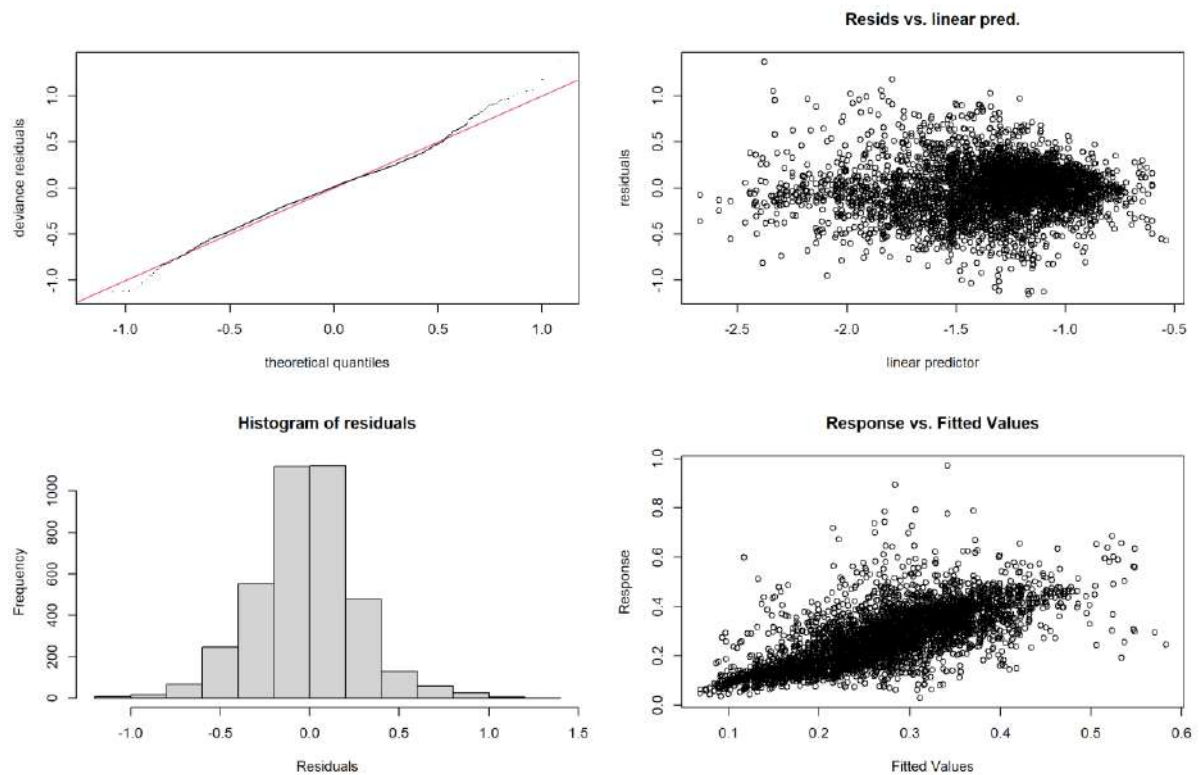
Annexe 11 : Gam-check et PACF pour le GAM de l'atoll Ahe



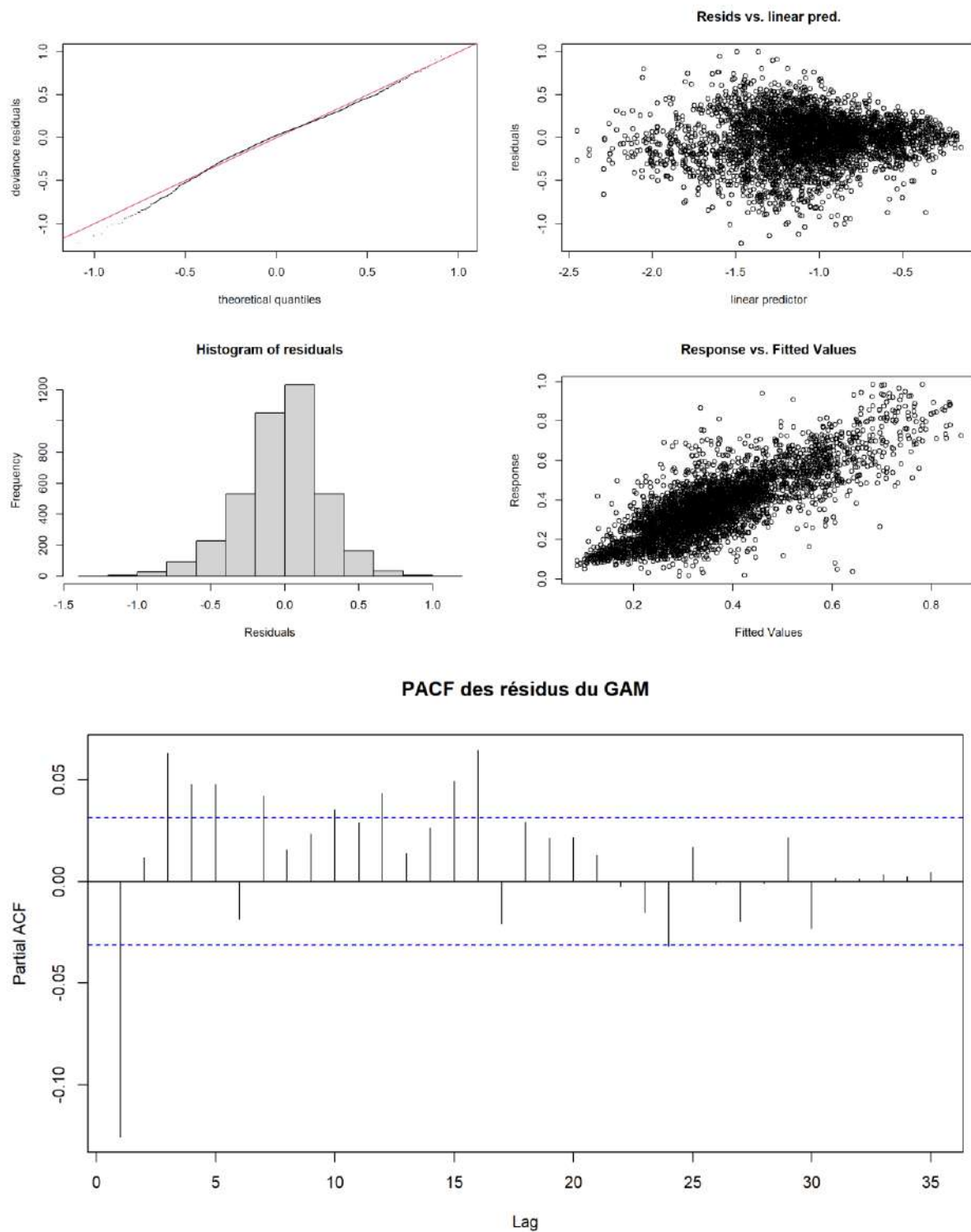
PACF des résidus du GAM



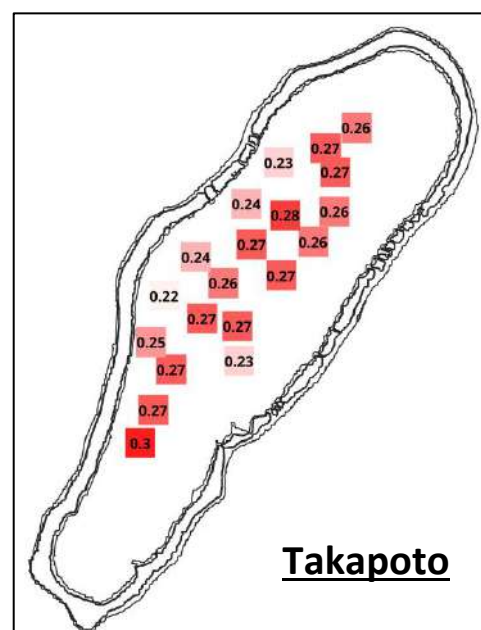
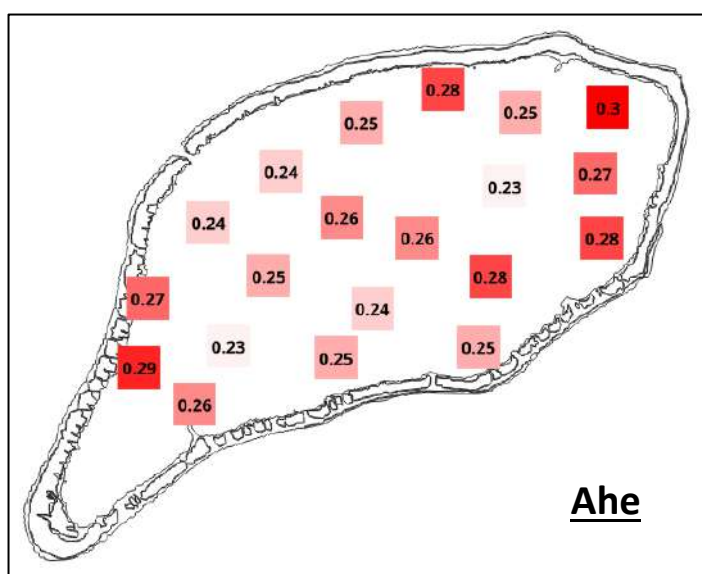
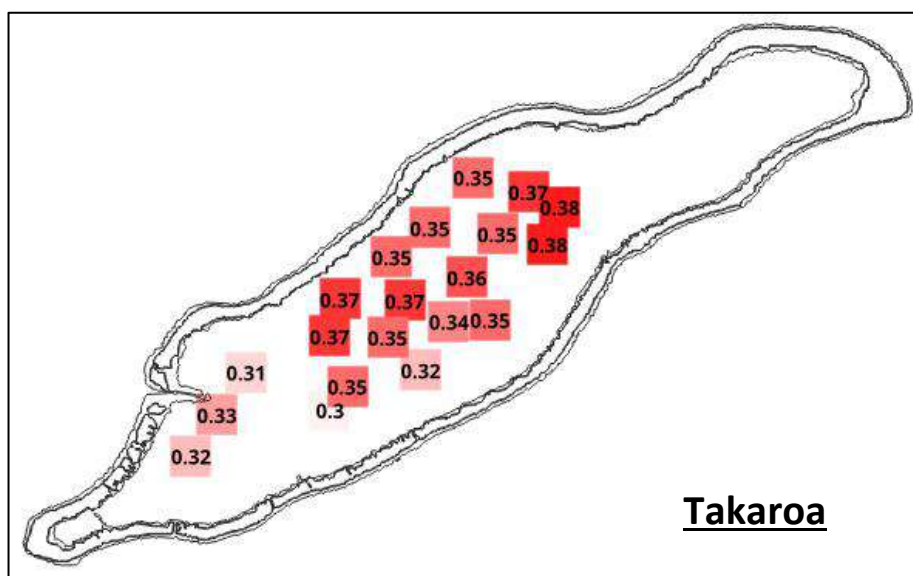
Annexe 12 : Gam-check et PACF pour le GAM de l'atoll Takapoto



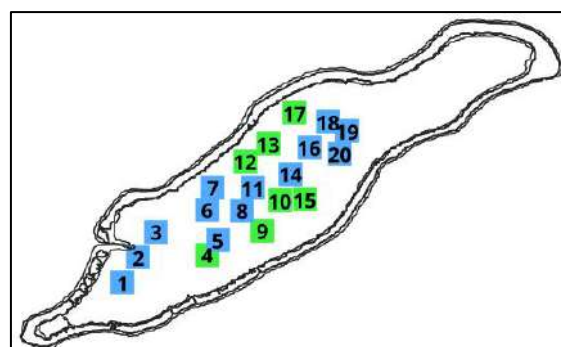
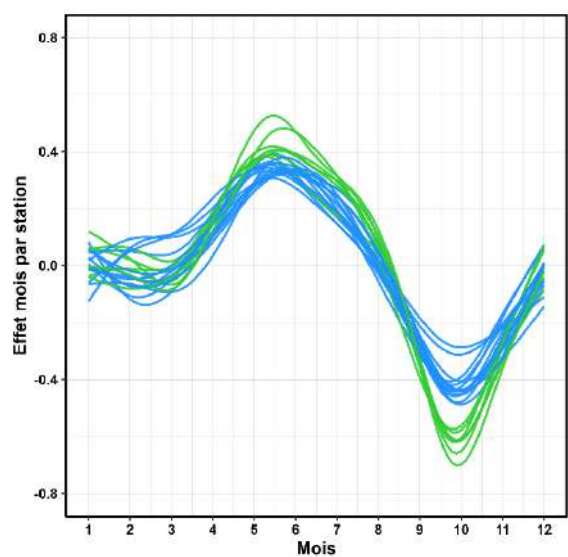
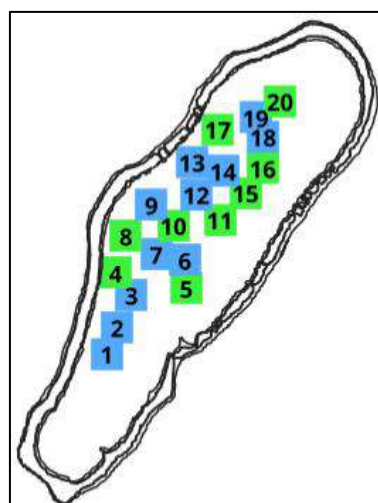
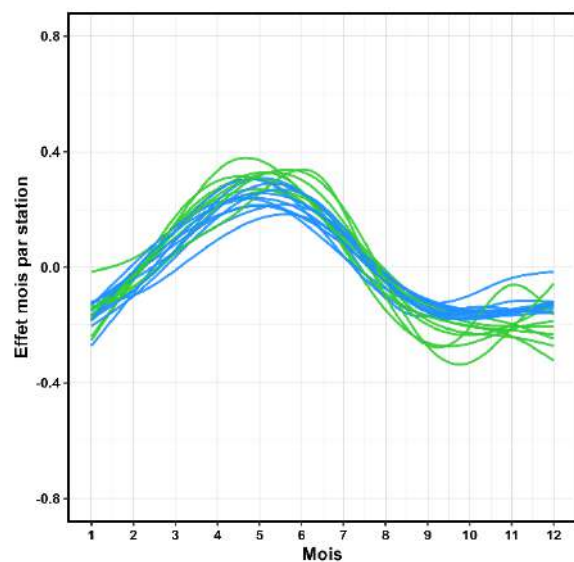
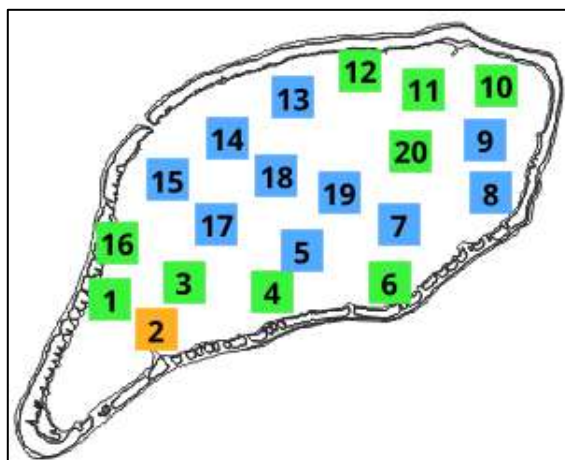
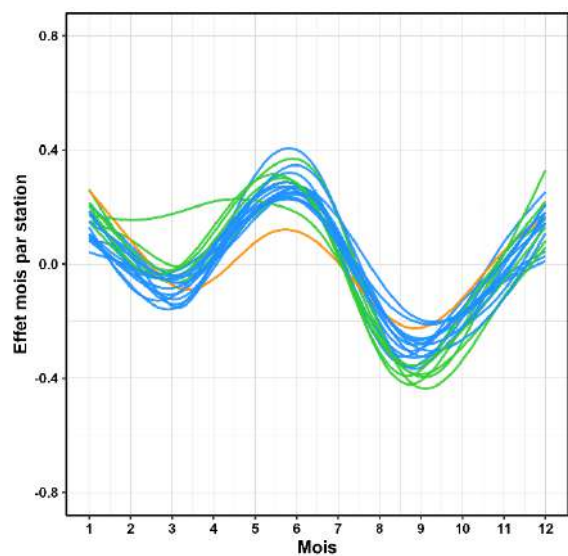
Annexe 13 : Gam-check et PACF pour le GAM de l'atoll Takaroa



Annexe 14 : Cartes des atolls avec les valeurs d'intercepts par station, issus des GAM.

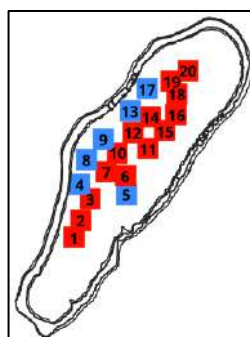
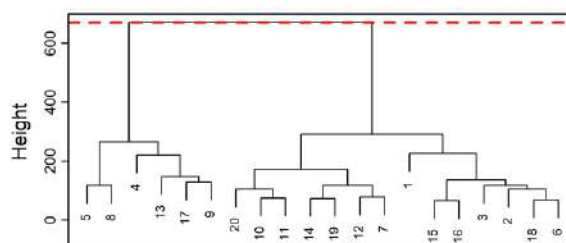
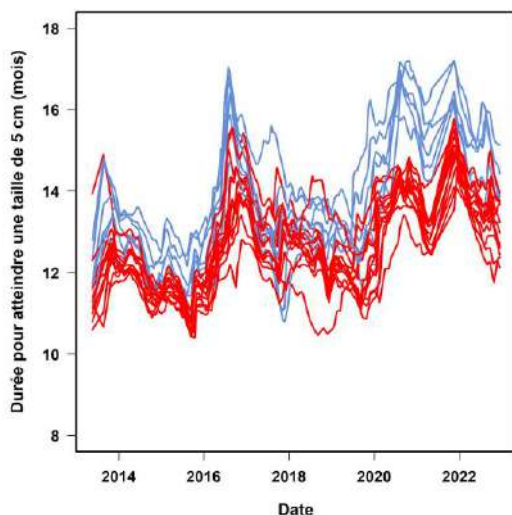


Annexe 15 : Courbes des effets mois par stations colorées par cluster et carte associée pour les trois atolls étudiés.

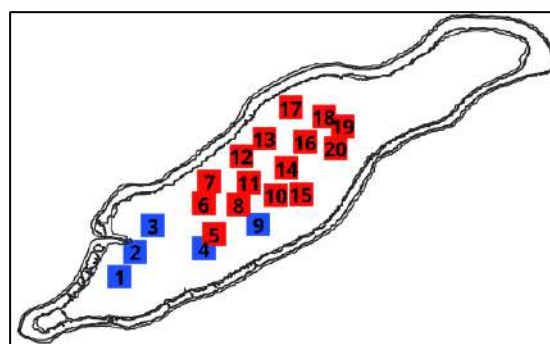
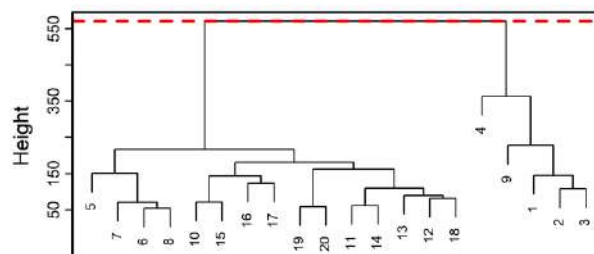
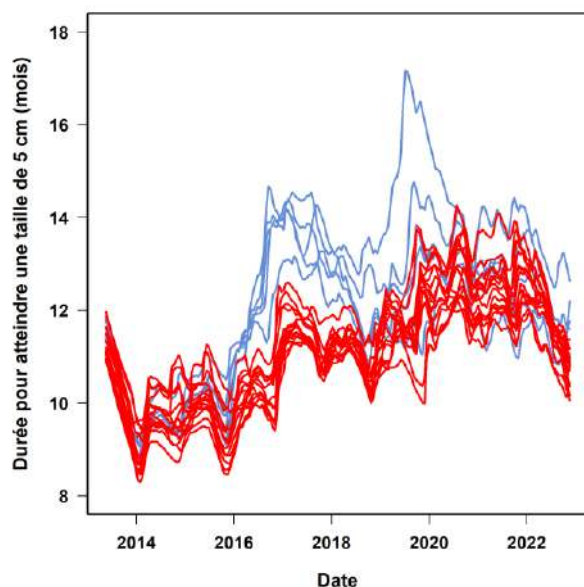


Annexe 16 : Durée (en mois) nécessaire à une huître fraîchement fixée pour atteindre une taille de 5 cm selon les stations, colorées par cluster pour les atolls de Takapoto et Takaroa. Dendrogrammes des clustering hiérarchiques, réalisés à partir des distances calculées par l’algorithme DTW entre les courbes de durées des 20 stations par atolls. La ligne rouge horizontale indique la hauteur de coupe pour $k = 2$, les deux clusters sont encadrés par leur couleur respective. Carte des stations de des atolls colorées selon leur cluster.

Takapoto, $k = 2$ (0.54)



Takaroa, $k = 2$ (0.47)



	Diplôme : Ingénieur de l'ISTOM Spécialité : Ingénieur agronome Spécialisation / option : Sciences halieutiques et aquacoles, préparée à L'Institut Agro Rennes-Angers (ECOLH) Enseignant référent : Etienne RIVOT
Auteur : Erell ECHELARD Date de naissance : 21/09/2000	Organisme d'accueil : UMR 8187 (LILLE/CNRS/ULCO/IRD) Laboratoire d'océanologie et de géoscience Adresse : 28 avenue Foch 62930 Wimereux FRANCE
Nb pages : 35 Annexe(s) : 16	
Année de soutenance : 2025	Maître de stage : Sébastien LEFEBVRE Co-encadrants : Serge ANDRÉFOUËT, Jacques DESCLOITRES, Charles VERPOORTER
Titre français : Variabilité spatiale et temporelle de la ressource trophique pour l'huître perlière <i>Pinctada margaritifera</i> : approche par télédétection sur trois atolls polynésiens. Titre anglais : Spatial and temporal variability of the trophic resource for pearl oyster <i>Pinctada margaritifera</i> : remote sensing approach on three Polynesian atolls.	
Résumé : L'utilisation de la télédétection a rendu possible une analyse spatio-temporelle sur le long terme de la concentration en chlorophylle-a dans trois lagons d'atolls polynésiens, exploités pour la culture d'huîtres perlières. Les données Landsat 9 n'ont pas pu être utilisées, notamment en raison d'un problème de striping, mais leur ajout futur aux séries Landsat 8 offrirait un gain de résolution temporelle non négligeable. La comparaison des corrections atmosphériques a mis en évidence une meilleure cohérence de POLYMER par rapport à ACOLITE, tout en soulignant le manque de mesures in situ nécessaires pour valider réellement ces approches et les algorithmes bio-optiques associés. L'étude montre une variabilité spatiale et temporelle intra et inter-atolls marquée de la concentration en chlorophylle-a, liée notamment à la morphologie des atolls et à la saisonnalité. Cette variabilité entraîne des conséquences biologiques importantes chez les huîtres perlières, avec des différences de croissance pouvant atteindre deux mois et des écarts de reproduction allant jusqu'à trois pontes. Ces dynamiques influencent donc directement la durée d'élevage, le recrutement des naissains et la production de perles noires.	
Abstract: The use of remote sensing has made possible a long-term spatio-temporal analysis of chlorophyll-a concentration in three lagoons of Polynesian atolls, exploited for pearl oyster cultivation. Landsat 9 data could not be used, notably because of a striping problem, but their future addition to the Landsat 8 series would offer a significant gain in temporal resolution. The comparison of atmospheric corrections highlighted a better coherence of POLYMER compared to ACOLITE, while highlighting the lack of in situ measurements necessary to really validate these approaches and the associated bio-optical algorithms. The study shows a spatial and temporal variability within and between atolls marked by chlorophyll-a concentration, particularly related to atoll morphology and seasonality. This variability leads to significant biological consequences in pearl oysters, with growth differences of up to two months and reproduction gaps of up to three clutches. These dynamics therefore directly influence the duration of rearing, the recruitment of seed and the production of black pearls.	
Mots-clés : Télédétection, chlorophylle-a, atolls polynésiens, <i>Pinctada margaritifera</i> Key Words: Remote sensing, chlorophyll-a, Polynesian atolls, <i>Pinctada margaritifera</i>	