

Mémoire

Auteur : Renouvel, Quentin

Promoteur(s) : Goffart, Anne

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en océanographie, à finalité approfondie

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/12856>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université de Liège
Faculté des Sciences

Impact de l'activité humaine sur les communautés phytoplanctoniques des eaux côtières de La Réunion

Quentin RENOUVEL

En vue de l'obtention du diplôme
Master en océanographie, à finalité

Année académique
2020-2021

"Conformément aux règles imposées à la rédaction, ce mémoire ne doit pas dépasser 50 pages, rédigées en Times 12 ou équivalent

Remerciements

Je remercie en premier lieu le Dr Anne Goffart de m'avoir mis à disposition les données pour la réalisation de ce mémoire ainsi que son encadrement tout au long de mon travail. Ses nombreuses relectures et sa patience ont été précieuses.

Je remercie l'Office de l'Eau de la Réunion de m'avoir autorisé à utiliser les données acquises dans le cadre des réseaux de surveillance des eaux côtières de La Réunion par le Réseau Hydrologique du Littoral Réunionnais (RHLR).

Je remercie enfin Jonathan et Hugo pour leur présence quasi quotidienne pendant ces 2 années et tous les bons moments partagés.



Résumé

Afin d'étudier la réponse du phytoplancton des eaux côtières de La Réunion aux pressions induites par les activités humaines, les données de surface acquises entre février 2015 à novembre 2020 ont été analysées. Ces données ont été acquises dans le cadre des réseaux de surveillance des eaux côtières de La Réunion par le Réseau Hydrologique du Littoral Réunionnais (RHLR). Elles sont bancarisées dans la base de données Quadrigé² de l'Ifremer.

Les paramètres physico-chimiques (température de l'eau, salinité, turbidité, silicates, ammonium, nitrates, nitrites, phosphates) et la biomasse phytoplanctonique ont été étudiés au niveau de 8 stations. Sur 3 de ces stations, les abondances du pico- et du nano phytoplancton ont été mesurées par cytométrie en flux. Le site l'Ermitage Large, faiblement impacté par les activités anthropiques [GT DCE Réunion, 2020] a été étudié par Goffart (2020). Ces données serviront de référence à celles obtenues sur les 8 sites de l'étude afin de mettre en évidence d'éventuelles modifications des communautés pico- et nano-phytoplanctoniques et d'essayer d'en déterminer les causes.

Ce sont les phénomènes naturels comme la baisse de la température de l'eau en hiver et le transport de particules via les cours d'eau qui jouent le rôle le plus important dans la régulation de la biomasse phytoplanctonique totale. Des pressions induites par les nutriments azotés *a priori* d'origine anthropique lors du milieu de l'été austral sont tout de même visibles sur les stations à proximité des zones agricoles (Sainte-Marie, Petite-Île) et du site de Saint-Paul, une zone fortement urbanisée et touristique.

L'étude du nano-phytoplancton montre que même si les concentrations sont plus importantes, la saisonnalité reste identique ce qui signifierait que cette classe de taille est surtout impactée par des pressions d'origine naturelle. Le pico-phytoplancton montre une saisonnalité différente de celle du site de référence. L'hiver austral connaît des concentrations bien plus importantes en pico-phytoplancton, notamment due à une forte augmentation de la concentration en *Prochlorococcus*. Cette modification semblerait cependant ne pas être d'origine anthropique mais liée à la resuspension des nutriments, facilitée par le refroidissement de la température de l'eau lors de l'hiver austral.

On observe un décalage entre les pressions émises sur le littoral et les concentrations mesurées lors de l'étude. L'explication pourrait se trouver dans le régime des vents de l'île qui forme des courants et une houle entraînant les sels nutritifs au large. Placer les stations plus proches des estuaires et des zones urbanisées pourrait nous en apprendre plus sur les réelles pressions exercées sur les masses d'eau côtières.

Abstract

In order to study the response of phytoplankton to pressure induced by human activities in the coastal waters of Reunion, surface data acquired between February 2015 and November 2020 were analyzed. These data were acquired from the monitoring networks of the coastal waters of Reunion Island by the Réseau Hydrologique du Littoral Réunionnais (RHLR). They are stored in the Quadrigé2 database of Ifremer.

Physico-chemical parameters (water temperature, salinity, turbidity, silicates, ammonium, nitrates, nitrites, phosphates) and phytoplankton biomass were studied at 8 stations. At 3 of these stations, the abundance of pico- and nano phytoplankton was measured by flow cytometry. The Ermitage Large site, which is slightly impacted by human activities [GT DCE Réunion, 2020] was studied by Goffart (2020). These data will be used as a reference for those obtained at the 8 sites of the study, in order to highlight possible modifications of the pico- and nano-phytoplanktonic communities and to determine their causes.

Natural phenomena, such as the decrease in water temperature in winter and the transport of particles via rivers, play the most important role in the regulation of the total phytoplankton biomass. Pressure induced by nitrogenous nutrients a priori from anthropogenic origin during midsummer are nevertheless visible at stations near agricultural areas (Sainte-Marie, Petite-Île) and at the site of Saint-Paul, a highly urbanized and tourist area.

The study of nano-phytoplankton shows that, even if the concentrations are higher, the seasonality remains the same, which would mean that this size class is mainly impacted by pressure of natural origin. The pico-phytoplankton shows a different seasonality from that of the reference site. The austral winter has much higher concentrations of pico-phytoplankton, notably due to a strong increase in the concentration of *Prochlorococcus*. However, this change does not seem to be of anthropogenic origin but linked to the resuspension of nutrients, facilitated by the cooling of the water temperature during the austral winter.

There is a discrepancy between the pressure emitted on the coast and the concentrations measured during the study. The explanation could be found in the wind regime of the island, which forms currents and swell carrying nutrient salts offshore. Placing the stations closer to estuaries and urbanized areas could tell us more about the real pressure on coastal water bodies.

Table des matières

Remerciements	I
Résumé	II
Abstract	III
Table des figures.....	VI
Table des tableaux.....	VII
1. Introduction	- 1 -
2. Etat de l'art	- 2 -
2.1 Le phytoplancton dans l'Océan Indien	- 2 -
2.1.1 Biomasse totale	- 2 -
2.1.2 Communautés phytoplanctoniques	- 3 -
2.2 Le phytoplancton à La Réunion	- 7 -
2.2.1 Biomasse totale	- 7 -
2.2.2 Communautés phytoplanctoniques	- 8 -
.....	- 8 -
2.3 Etat des lieux de la Réunion	- 9 -
2.3.1 Météorologie.....	- 9 -
2.3.2 Géologie et hydrologie	- 11 -
2.3.3 Activités humaines	- 12 -
2.4 Impact des activités humaine sur le phytoplancton	- 18 -
2.4.1 Impact du dérèglement climatique	- 18 -
2.4.2 Impact de changements locaux des paramètres.....	- 20 -
3. Objectifs.....	- 21 -
4. Matériel & Méthodes	- 22 -
4.1 Origine des données.....	- 22 -
4.2 Zone d'étude	- 22 -
4.3 Période d'échantillonnage	- 23 -
4.4 Paramètres mesurés.....	- 24 -
4.5 Analyse des échantillons	- 25 -
4.5.1 Paramètres physico-chimiques	- 25 -
4.5.2 Paramètres phytoplanctoniques	- 25 -
4.6 Statistiques	- 26 -

5. Résultats	- 27 -
5.1 Paramètres physico-chimiques	- 27 -
5.1.1 Température de l'eau	- 27 -
5.1.2 Salinité	- 28 -
5.1.3 Turbidité	- 28 -
5.1.4 Silicates	- 29 -
5.1.5 Phosphates	- 30 -
5.1.6 Nitrites + nitrates	- 31 -
5.1.7 Ammonium	- 31 -
5.2 Paramètres phytoplanctoniques (chlorophylle a, nano- et pico-phytoplancton).....	- 32 -
5.2.1 Chlorophylle a.....	- 32 -
5.2.2 Cytométrie en flux	- 33 -
5.2.2.1 Nano-phytoplancton	- 33 -
5.2.2.2 Pico-phytoplancton	- 34 -
5.4 Corrélations entre les paramètres physico-chimiques et les paramètres phytoplanctoniques (chlorophylle a, pico-phytoplancton et nano-phytoplancton).....	- 35 -
5.4.1 Hiver austral (Juillet-Août-Septembre)	- 36 -
5.4.2 Début de l'été austral (Novembre-Décembre)	- 37 -
5.4.3 Milieu de l'été austral (Janvier-Février-Mars)	- 39 -
6. Discussion	- 41 -
6.1 Paramètres physico-chimiques	- 41 -
6.1.1 Température.....	- 41 -
6.1.2 Salinité	- 41 -
6.1.3 Turbidité et silicates	- 41 -
6.1.4 Ammonium.....	- 42 -
6.2 Chlorophylle a.....	- 43 -
6.3 Communautés phytoplanctoniques (nano et pico-phytoplancton).....	- 45 -
6.3.1 Nano-phytoplancton	- 45 -
6.3.2 Pico-Phytoplancton	- 46 -
7. Conclusion	- 49 -
Bibliographie.....	- 50 -

Table des figures

FIGURE 1 : CONCENTRATION MOYENNE EN CHLOROPHYLLE A (EN MG CHL A/M ³) EN FEVRIER 2006 AU LARGE DE MADAGASCAR (WWW.SAEON.AC.ZA)	- 2 -
FIGURE 2 : CONCENTRATION MOYENNE EN CHLOROPHYLLE (EN MG CHL A/M ³) SUR L'ANNEE 2009 A PARTIR DE DONNEES SATELLITES DANS L'OUEST DE L'OCEAN INDIEN ET L'EST DE L'OCEAN ATLANTIQUE [KYEWALYANGA 2005]	- 3 -
FIGURE 3 : CARTE DU CANAL DU MOZAMBIQUE (REALISATION DE LA CARTE SUR LE LOGICIEL R A L'AIDE DU PACKAGE « GGLOT2 » AVEC DES DONNEES DE LA DATABASE OF GLOBAL ADMINISTRATIVE AREAS (GADM.ORG))	- 4 -
FIGURE 4 : MOYENNE DE CONCENTRATION (EN MG CHL A/M ³) ENTRE 2002 ET 2014 DE LA CHLOROPHYLLE A ET DES 3 CLASSES DE TAILLE DU PHYTOPLANCTON DANS LE CANAL DU MOZAMBIQUE (DONNEES SATELLITE : MODIS) [BARLOW, 2013]	- 5 -
FIGURE 5 : COMPOSITION MOYENNE DU MICRO-PHYTOPLANCTON (>45 MICROMETRES) SUR 1 AN AU NIVEAU DE 4 SITES COTIERS DE TANZANIE (BACILLIARIOPHYCEAE = DIATOMEES, DICTYOCOPHYCEAE = SILICOFLAGELLES, CYANOPHYCEAE = CYANOBACTERIES, DINOPHYCEAE = DINOFLAGELLES) [LIMBU ET AL., 2015]	- 6 -
FIGURE 6 : EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN CHLOROPHYLLE A (EN NG CHL A/L-1) AU POINT ERMITAGE LARGE (55,2060, -21,0910) (FIGURE 16) [GOFFART, 2020] SITUE DANS LA RESERVE NATURELLE MARINE DE LA REUNION ENTRE 2010 ET 2020 (A) ET ENTRE 2014 ET 2015 (B) (DONNEES SATELLITES : HTTPS://OCEANCOLOUR.ORG).....	- 7 -
FIGURE 7 : COMPOSITION MOYENNE DES COMMUNAUTES PICO-PHYTOPLANCTONIQUES (A), NANO-PHYTOPLANCTONIQUES (B) ET MICRO-PHYTOPLANCTONIQUES (C) AU POINT ERMITAGE LARGE (FIGURE 16) ENTRE 2015 ET 2019 [GOFFART, 2020].....	- 8 -
FIGURE 8 : CARTE DE LA PLUVIOMETRIE MOYENNE SUR L'ILE DE LA REUNION EN 2016 (SOURCE : METEOFRANCE)	- 9 -
FIGURE 9 : REPRESENTATION DES HOULES A L'ILE DE LA REUNION D'APRES GABRIE (1984) ET PRECISEE PAR MODELISATION (HYDRORUN 2011) [PROJET BON ETAT]	- 10 -
FIGURE 10 : COURANT MOYEN ANNUEL DE SURFACE EN 2010 AUX ALENTOURS DE L'ILE DE LA REUNION [LE BERRE ET AL., 2012]-	- 11 -
FIGURE 11 : VUE D'ENSEMBLE DES FORMATIONS GEOLOGIQUES ET DES PRINCIPALES RIVIERES DE L'ILE DE LA REUNION. LA LIGNE EN POINTILLEE REPRESENTE LA SEPARATION ENTRE LES 2 MASSIFS VOLCANIQUES (PITON DES NEIGES AU SUD-EST ET PITON DE LA FOURNAISE AU NORD-OUEST) [SISAVATH ET AL., 2011]	- 12 -
FIGURE 12 : DENSITE DE POPULATION SUR L'ILE DE LA REUNION EN 2010 [LE BERRE ET AL., 2012]	- 13 -
FIGURE 13 : REPARTITION DE L'ASSAINISSEMENT COLLECTIF ET NON-COLLECTIF A LA REUNION EN 2018 (ETAT DES LIEUX 2019) -	- 14 -
FIGURE 14 : PRESSIONS INDIUITES PAR LE RUISSELLEMENT URBAIN SUR LES EAUX COTIERES DE LA REUNION [ETAT DES LIEUX 2019] -	- 15 -
-	
FIGURE 15 : FLUX D'AZOTE RUISELE SUR LES BASSINS VERSANTS DES EAUX LITTORALES [PROJET BON ETAT 2019]	- 16 -
FIGURE 16 : LOCALISATION DES INSTALLATIONS CLASSEES POUR LA PROTECTION DE ENVIRONNEMENT (ICPE) SUR L'ILE DE LA REUNION [ETAT DES LIEUX 2019]	- 16 -
FIGURE 17 : CARTE DE REPARTITION DES EMPLOIS DANS LE SECTEUR DU TOURISME EN 2018 (SOURCE : INSEE)	- 17 -
FIGURE 18 : ÉVOLUTION TEMPORELLE DU NOMBRE DE TOURISTES EN FONCTION DU MOIS SUR LES ANNEES 2018 ET 2019 [COMITE DU TOURISME 2020]	- 18 -
FIGURE 19 : DISCOSPHAERA TUBIFER, UNE PRYMNESIOPHYCEE A COCCOLITES FREQUENTE DANS LES EAUX COTIERES DE LA REUNION (GOFFART, COMMUNICATION PERSONNELLE, CREDIT PHOTO : WWW.MIKROTAX.ORG, BARRE D'ECHELLE : 5 µM).....	- 19 -
FIGURE 20 : LOCALISATION DES 9 SITES ETUDIES (REALISATION DE LA CARTE SUR LE LOGICIEL R A L'AIDE DU PACKAGE « GGLOT2 » AVEC DES DONNEES DE LA DATABASE OF GLOBAL ADMINISTRATIVE AREAS (GADM.ORG))	- 23 -
FIGURE 21 : BOXPLOTS (CONCENTRATION MOYENNE, P10, P90, MIN, MAX) DES ABONDANCES DU NANO-PHYTOPLANCTON SUR LES 3 SITES (PETITE-ILE, SAINT-PAUL, SAINTE-MARIE) POUR LES 3 PERIODES D'ÉCHANTILLONNAGE (HIVER AUSTRAL, DEBUT DE L'ÉTE AUSTRAL ET MILIEU DE L'ÉTE AUSTRAL) ET POUR LA TOTALITE DE LA DUREE DE L'ÉTUDE (2015-2020). DONNEES ISSUES DE CYTOMETRIE EN FLUX.	- 34 -
FIGURE 22 : BOXPLOTS (CONCENTRATION MOYENNE, P10, P90, MIN, MAX) DES ABONDANCES DU PICO-PHYTOPLANCTON SUR LES 3 SITES (PETITE-ILE, SAINT-PAUL, SAINTE-MARIE) POUR LES 3 PERIODES D'ÉCHANTILLONNAGE (HIVER AUSTRAL, DEBUT DE L'ÉTE AUSTRAL ET MILIEU DE L'ÉTE AUSTRAL) ET POUR LA TOTALITE DE L'ÉTUDE (2015-2020). DONNEES ISSUES DE CYTOMETRIE EN FLUX	- 35 -
FIGURE 23 : ANALYSE DE COMPOSANTE PRINCIPALE (ACP) RELIANT LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET LA CHLOROPHYLLE A (A) ET LES GROUPES PHYTOPLANCTONIQUES (NANO ET PICO-PLANCTON) (B) LORS DE L'HIVER AUSTRAL (2015-2020) (PICO=PICO-PHYTOPLANCTON, NANO=NANO-PHYTOPLANCTON, CYANO FIL=CYANOBACTERIES FILAMENTEUSES, SYNECHO=SYNECHOCOCCUS, PROCHLORO=PROCHLOROCOCCUS)	- 37 -

FIGURE 24 : ANALYSE DE COMPOSANTE PRINCIPALE (ACP) RELIANT LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET LA CHLOROPHYLLE A (B) ET LES GROUPES PHYTOPLANCTONIQUES (NANO ET PICO-PLANCTON) (A) AU DEBUT DE L'ETE AUSTRAL (2015-2020) (PICO=PICO-PHYTOPLANCTON, NANO=NANO-PHYTOPLANCTON, EU=EUCARYOTE, CYANO FIL=CYANOBACTERIES FILAMENTEUSES, SYNECHO=SYNECHOCOCCUS, PROCHLORO=PROCHLOROCOCCUS)	- 39 -
FIGURE 25 : ANALYSE DE COMPOSANTE PRINCIPALE (ACP) RELIANT LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET LA CHLOROPHYLLE A (A) ET LES GROUPES PHYTOPLANCTONIQUES (NANO ET PICO-PLANCTON) (B) AU MILIEU DE L'ETE AUSTRAL (2015-2020) (PICO=PICO-PHYTOPLANCTON, NANO=NANO-PHYTOPLANCTON, EU=EUCARYOTE, CYANO FIL=CYANOBACTERIES FILAMENTEUSES, SYNECHO=SYNECHOCOCCUS, PROCHLORO=PROCHLOROCOCCUS)	- 40 -
FIGURE 26 : RECAPITULATIF DES INFLUENCES DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES SUR CHAQUE SITE DE L'ETUDE (MODIFIE A PARTIR DE LA FIGURE 20).....	- 45 -

Table des tableaux

TABLEAU 1 : LISTE DES PARAMETRES MESURES SUR CHAQUE SITE D'ETUDE REFERENCE [GT DCE REUNION, 2020].....	- 24 -
TABLEAU 2 : LISTE DES METHODES D'ANALYSE ET DES LIMITES DE QUANTIFICATION POUR CHAQUE NUTRIMENT [GT DCE REUNION, 2020]	- 25 -
TABLEAU 3 : TEMPERATURE DE L'EAU (°C) : MOYENNES ET ECART-TYPES POUR LA PERIODE 2015-2020.	- 27 -
TABLEAU 4 : SALINITE MOYENNE A CHAQUE STATION ET A CHAQUE PERIODE D'ETUDE.....	- 28 -
TABLEAU 5 : TURBIDITE MOYENNE (FNU) A CHAQUE STATION ET A CHAQUE PERIODE D'ETUDE	- 29 -
TABLEAU 6 : CONCENTRATION MOYENNE EN SILICATES A CHAQUE STATION ET A CHAQUE PERIODE D'ETUDE.....	- 30 -
TABLEAU 7 : CONCENTRATION MOYENNE EN PHOSPHATES A CHAQUE STATION ET A CHAQUE PERIODE D'ETUDE	- 30 -
TABLEAU 8 : CONCENTRATION MOYENNE EN NITRITES + NITRATES A CHAQUE STATION ET A CHAQUE PERIODE D'ETUDE	- 31 -
TABLEAU 9 : CONCENTRATION MOYENNE EN AMMONIUM A CHAQUE STATION ET A CHAQUE PERIODE D'ETUDE	- 32 -
TABLEAU 10 : CONCENTRATION MOYENNE EN CHLOROPHYLLE A A CHAQUE STATION ET A CHAQUE PERIODE D'ETUDE	- 33 -
TABLEAU 11 : MATRICE DE CORRELATION (SPEARMAN) ENTRE LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET LES PARAMETRES PHYTOPLANCTONIQUES (NANO ET PICO-PHYTOPLANCTON (N=49) ET CHLOROPHYLLE A (N=263)) LORS DE L'ENSEMBLE DE LA DUREE DE L'ETUDE (2015-2020) TOUTES STATIONS CONFONDUES. LES CASES EN GRAS REPRESENTENT DES CORRELATIONS AVEC UNE P-VALUE INFÉRIEURE OU ÉGALE À 0,05, *** P-VALUE <0.001, ** P-VALUE <0.01, * P-VALUE <0.05. (PICO=PICO-PHYTOPLANCTON, NANO=NANO-PHYTOPLANCTON, CYANO FIL=CYANOBACTERIES FILAMENTEUSES).....	- 36 -
TABLEAU 12 : MATRICE DE CORRELATION (SPEARMAN) ENTRE LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET LES PARAMETRES PHYTOPLANCTONIQUES (NANO ET PICO-PHYTOPLANCTON (N=20) ET CHLOROPHYLLE A (N=86)) LORS DE L'HIVER AUSTRAL (2015-2020) TOUTES STATIONS CONFONDUES. LES CASES EN GRIS REPRESENTENT DES CORRELATIONS AVEC UNE P-VALUE INFÉRIEURE OU ÉGALE À 0,05, *** P-VALUE <0.001, ** P-VALUE <0.01, * P-VALUE <0.05. (PICO=PICO-PHYTOPLANCTON, NANO=NANO-PHYTOPLANCTON, CYANO FIL=CYANOBACTERIES FILAMENTEUSES).....	- 37 -
TABLEAU 13 : MATRICE DE CORRELATION (SPEARMAN) ENTRE LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET LES PARAMETRES PHYTOPLANCTONIQUES (NANO ET PICO-PHYTOPLANCTON (N=14) ET CHLOROPHYLLE A (N=84)) LORS DU DEBUT DE L'ETE AUSTRAL (2015-2020) TOUTES STATIONS CONFONDUES. LES CASES EN GRAS REPRESENTENT DES CORRELATIONS AVEC UNE P-VALUE INFÉRIEURE OU ÉGALE À 0,05, *** P-VALUE <0.001, ** P-VALUE <0.01, * P-VALUE <0.05. (PICO=PICO-PHYTOPLANCTON, NANO=NANO-PHYTOPLANCTON, CYANO FIL=CYANOBACTERIES FILAMENTEUSES).....	- 38 -
TABLEAU 14 : MATRICE DE CORRELATION (SPEARMAN) ENTRE LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET LES PARAMETRES PHYTOPLANCTONIQUES (NANO ET PICO-PHYTOPLANCTON (N=16) ET CHLOROPHYLLE A (N=66)) LORS DU MILIEU DE L'ETE AUSTRAL (2015-2020) TOUTES STATIONS CONFONDUES. LES CASES EN GRIS REPRESENTENT DES CORRELATIONS AVEC UNE P-VALUE INFÉRIEURE OU ÉGALE À 0,05, *** P-VALUE <0.001, ** P-VALUE <0.01, * P-VALUE <0.05. (PICO=PICO-PHYTOPLANCTON, NANO=NANO-PHYTOPLANCTON, CYANO FIL=CYANOBACTERIES FILAMENTEUSES).....	- 40 -

1. Introduction

Les océans sont des puissants régulateurs du climat notamment via leur capacité de stockage du CO₂ atmosphérique [Sabine et al., 2004], qui est le principal gaz à effet de serre d'origine anthropique. Ce stockage est en partie réalisé par la "pompe biologique", qui est le processus de fixation du carbone inorganique en matière organique, son transport à travers la chaîne alimentaire, son mixage dans la colonne d'eau et sa sédimentation [Ducklow et al., 2001]. C'est dans la première étape que le phytoplancton est actif : grâce à son activité photosynthétique, il capte dans la zone euphotique le CO₂ atmosphérique, en plus de l'énergie lumineuse et des sels nutritifs, pour former de la matière organique [Field et al., 1998]. Annuellement, 20 à 35% du CO₂ lié à l'activité humaine est capté par le phytoplancton [Sabine et al., 2004] [Khaliwala et al., 2009]. En plus de son activité fixatrice, le phytoplancton est aussi la base du réseau trophique océanique. Il est consommé par le zooplancton, dont se nourrit l'ichtyoplancton et représente donc la base trophique des pêcheries commerciales [Blanchard et al., 2012]. Enfin, le phytoplancton est à l'origine de près de 50% de l'oxygène atmosphérique [Field et al., 1998].

Le phytoplancton est un groupe paraphylétique qui regroupe les organismes aquatiques photosynthétiques qui ne peuvent lutter contre les courants. Il regroupe des espèces de tailles très différentes allant du picomètre au millimètre. Il est présent en eaux douces et saumâtres et en milieu marin. En plus de son ubiquité et de sa diversité, le phytoplancton réagit rapidement aux modifications du milieu et notamment les apports de nutriments engendrés par les activités humaines.

Les îles tropicales sont des milieux fragiles qui font l'objet de pressions anthropiques intenses, liées au développement des activités humaines comme le tourisme et l'industrie ainsi qu'à une croissance démographique importante. Nous verrons dans ce travail comment ces activités humaines vont impacter les communautés phytoplanctoniques côtières de l'île de la Réunion.

2. Etat de l'art

2.1 Le phytoplancton dans l'Océan Indien

2.1.1 Biomasse totale

Pendant l'été austral, entre janvier et mars, un bloom phytoplanctonique important est observé entre la pointe sud de l'île de Madagascar et 70°E et entre les latitudes 20°S et 30°S environ (Figure 1). Ce bloom est lié à la présence d'un upwelling le long de la côte est de Madagascar [Raj et al., 2010]. On retrouve cependant une influence de ce bloom jusque dans le canal du Mozambique et dans l'archipel des Mascareignes, où se situe l'île de la Réunion.

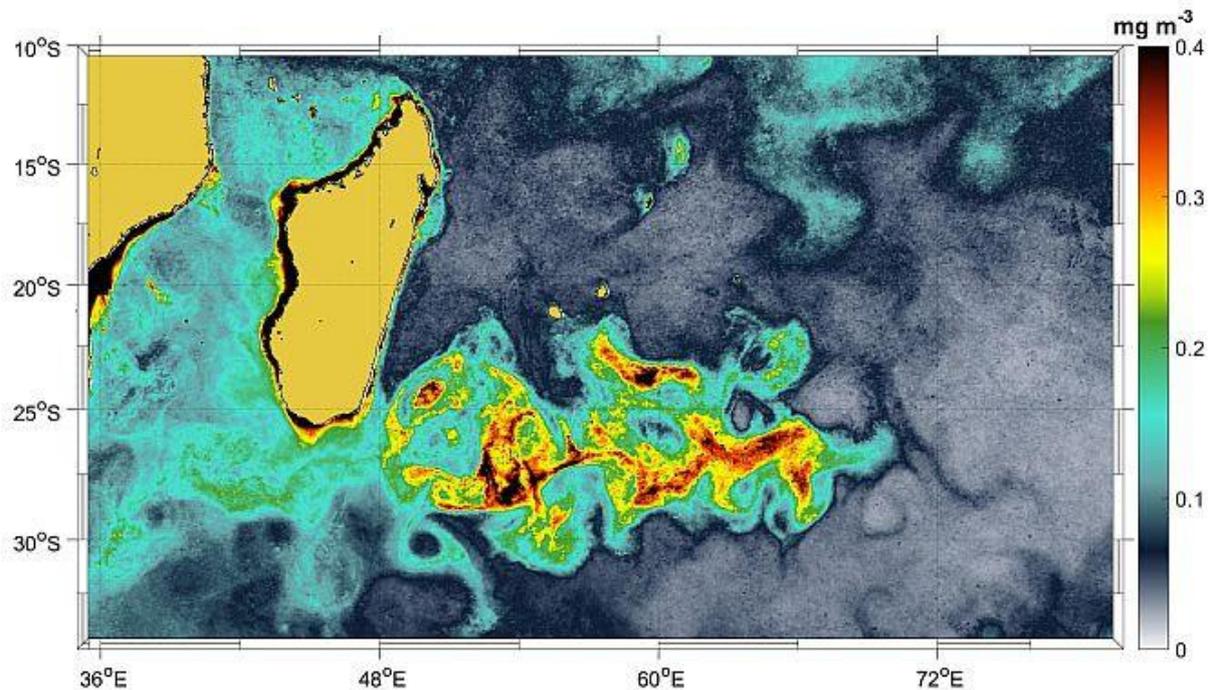


Figure 1 : Concentration moyenne en chlorophylle a (en mg chl a/m³) en février 2006 au large de Madagascar (www.saeon.ac.za)

En dehors des épisodes de bloom, le sud-ouest de l'Océan Indien se caractérise par une production relativement faible induite par des eaux chaudes et faibles en nutriments [Karl et al., 1999]. Au niveau de l'archipel des Mascareignes, les concentrations moyennes annuelles en chlorophylle a sont comprises entre 0,2 et 0,5 mg chl a/m³, contre des valeurs supérieures à 2 mg chl a/m³ dans les eaux froides de la Mer Baltique et de la Mer du Nord ainsi qu'au niveau des zones d'upwelling importants comme sur les littoraux namibiens et d'Afrique de l'Ouest (Figure 2).

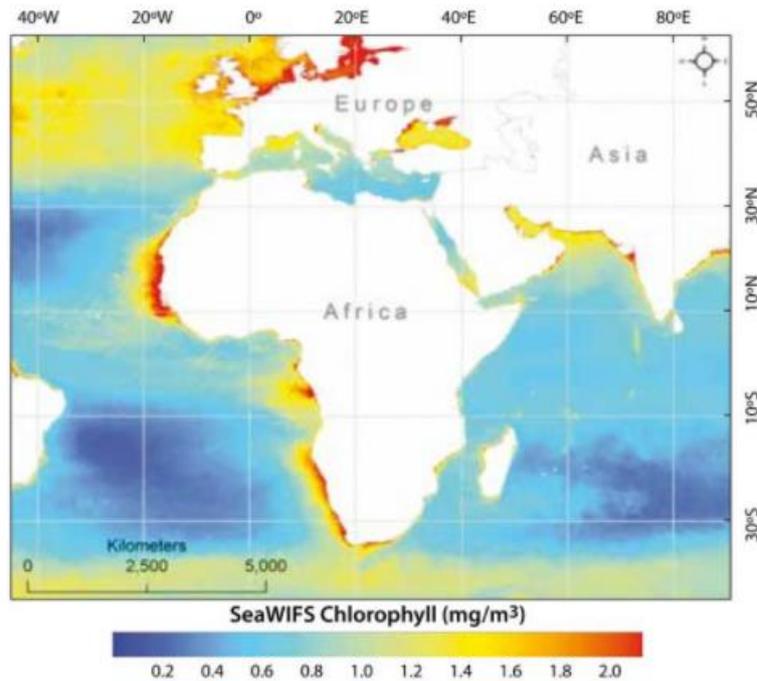


Figure 2 : Concentration moyenne en chlorophylle (en mg chl a/m³) sur l'année 2009 à partir de données satellites dans l'ouest de l'Océan Indien et l'est de l'Océan Atlantique [Kyewalyanga 2005]

2.1.2 Communautés phytoplanctoniques

Les communautés phytoplanctoniques du sud-ouest de l'Océan Indien sont peu étudiées comparées à celles des océans et mers d'Europe et d'Amérique du Nord. On peut néanmoins trouver quelques études dans le canal du Mozambique, qui proposent des conditions proches de celles de l'île de la Réunion.

2.1.2.1 Caractérisation des classes de taille

La taille du phytoplancton comporte de fortes disparités en fonction des espèces. On peut le diviser en différentes classes de tailles. Le pico-phytoplancton est compris entre 0,2 et 2 micromètres. Le nano-phytoplancton varie entre 2 et 20 micromètres et le micro-phytoplancton se situe entre 20 et 200 micromètres.

Dans les zones oligotrophes de l'Océan Indien, ce sont les cellules pico- et nano-phytoplanctoniques qui dominent, avec 80% des cellules mesurant moins de 3 micromètres [Goericke et al., 1998]. Les régions comportant de forts apports extérieurs en azote sont dominées par de grosses cellules phytoplanctoniques appartenant au micro-phytoplancton [Laws et al., 2000] [Dunne et al., 2005] [Oloffson et al., 2017]. Par exemple, dans une étude analysant les résultats des prélèvements d'environ 50 stations lors de l'été austral (septembre à décembre) dans le canal du Mozambique, on observe une dominance du pico-phytoplancton

sur les stations situées au large. Les stations côtières montrent quant à elles une dominance du micro-phytoplancton, ce qui est typique des eaux plus froides et riches en nutriments [Sà et al. 2013]. Cette tendance se confirme au large du delta du Zambèze, à proximité du banc de Sofala (Figure 3) dans le canal du Mozambique. Les communautés phytoplanctoniques des eaux côtières dans cette région, faiblement impactée par les apports anthropiques en azote, sont dominées par des cellules nano-phytoplanctoniques [Leal et al., 2009] alors que Oloffson et al. (2017) montrent qu'en baie de Maputo (Figure 3), les communautés phytoplanctoniques sont dominées par le micro-phytoplancton lors des grandes marées, ce qui concorde avec une augmentation des apports en azote extérieur.

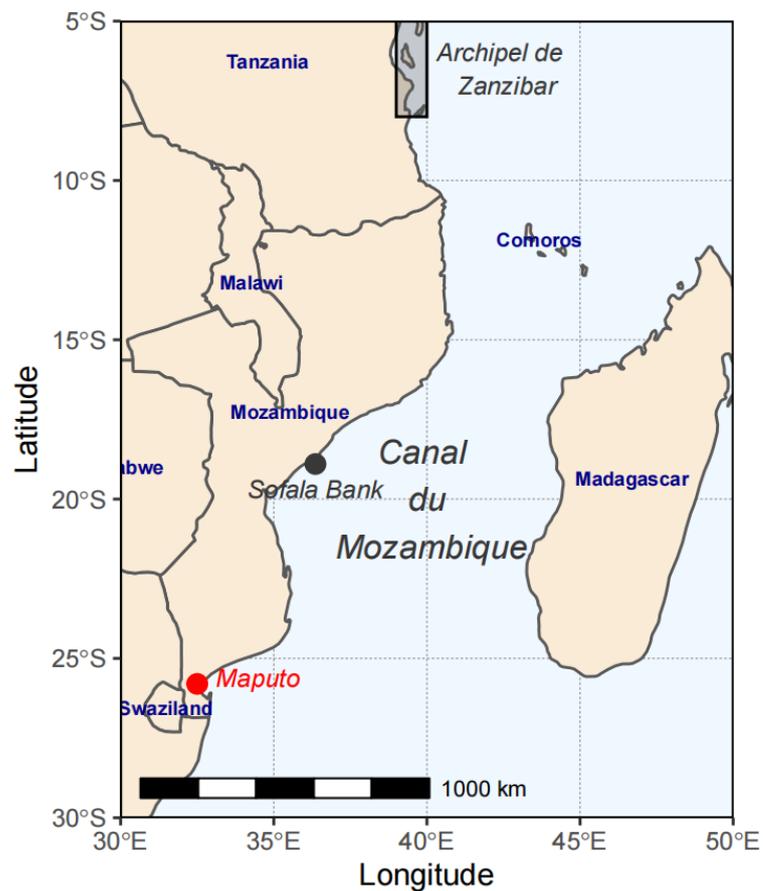


Figure 3 : Carte du canal du Mozambique (Réalisation de la carte sur le logiciel R à l'aide du package « ggplot2 » avec des données de la Database of Global Administrative Areas (GADM.org))

Ces observations sont confirmées par Barlow (2011) grâce à des analyses satellite. La méthode utilisée pour estimer les classes de taille est celle de Berwin (2010), qui est adaptée au phytoplancton des régions du sud de l'Afrique. Cette méthode se base sur l'hypothèse que les petites cellules phytoplanctoniques dominent dans des eaux à faible concentration de chlorophylle a et que les grosses cellules dominent dans des eaux à forte concentration de

chlorophylle a. On remarque que le micro-phytoplancton est très peu présent au large et qu'il est majoritaire dans les régions côtières par rapport au pico- et nano-phytoplancton (Figure 4).

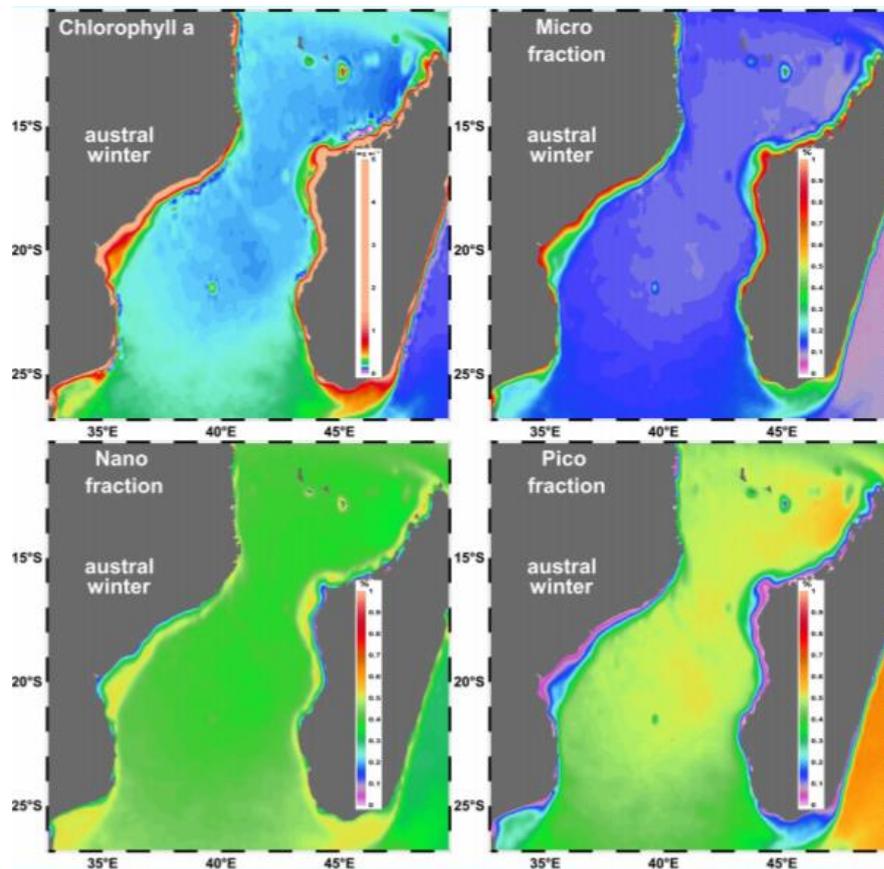


Figure 4 : Moyenne de concentration (en mg chl a/m³) entre 2002 et 2014 de la chlorophylle a et des 3 classes de taille du phytoplancton dans le canal du Mozambique (Données satellite : MODIS) [Barlow, 2011]

2.1.2.2 Caractérisation des grands groupes phytoplanctoniques

Les grosses cellules phytoplanctoniques (gros nano-phytoplancton et micro-phytoplancton) dans l'Océan Indien sont majoritairement des diatomées [Limbu et al., 2015] [Barlow et al., 2007] [Sa et al., 2013] comme sur le littoral tanzanien (Figure 5). Les taxons les plus représentés dans le canal du Mozambique sont *Chaetoceros spp.*, *Pseudo nitzschia spp.*, *Proboscia alata*, *Cerataulina pelagica* et *Thalassionema nitzschioides* [Sa et al., 2013].

Les dinoflagellés représentent aussi une composante importante de micro-phytoplancton dans l'Océan Indien [Barlow et al., 2007]. *Ceratium spp.*, *Dinophysis spp.*, *Protoperidinium spp.* et *Prorocentrum spp.* sont les principales espèces retrouvées sur le littoral de Zanzibar dans le détroit du Mozambique [Limbu et al., 2015].

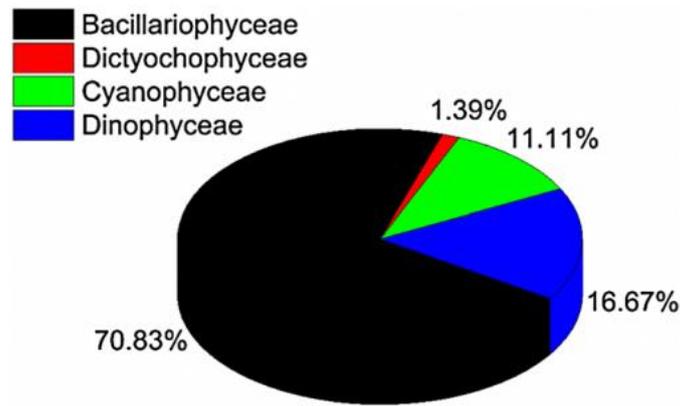


Figure 5 : Composition moyenne du micro-phytoplancton (>45 micromètres) sur 1 an au niveau de 4 sites côtiers de Tanzanie (Bacillariophyceae = Diatomées, Dictyochophyceae = Silicoflagellés, Cyanophyceae = Cyanobactéries, Dinophyceae = Dinoflagellés) [Limbu et al., 2015]

Les coccolithophores sont les principaux composants du nano-phytoplancton dans l’Océan Indien. On peut citer comme espèces principales *Discosphaera tubifera* et *Acanthoica quattrosipina* qui sont retrouvées dans le canal du Mozambique [Sà et al., 2013] ainsi que *Emiliana huxleyi* et *Gephyrocapsa oceanica* (haptophytes) [Schlüter et al., 2011]. Les cyanobactéries filamenteuses sont aussi des composantes importantes du nano- et du micro-phytoplancton des eaux tropicales côtières [Goffart 2020].

Parmi ces cellules pico-phytoplanctoniques, ce sont les cyanobactéries qui dominent à des latitudes proches de celle de la Réunion comme à l’ouest de l’Australie [Schlüter et al., 2011], dans le canal du Mozambique [Sa et al., 2013] ou même sur tout le sud-ouest de l’Océan Indien [Barlow et al., 2007]. On peut citer comme principaux groupes les *Prochlorococcus* et les *Synechococcus*. Ces 2 groupes représentent près de 95% des cyanobactéries dans 18 sites de prélèvement répartis dans tout l’Océan Indien. Les *Prochlorococcus* sont majoritaires avec 75% des cyanobactéries totales et les *Synechococcus* atteignent 20% [Diez et al., 2016], les 5% restants étant représentés par des grosses cyanobactéries (>3 micromètres) [Diez et al., 2016]. Cette tendance semble cependant s’inverser sur les zones littorales, avec une dominance des *Synechococcus* [Diez et al., 2016]. Cette dominance peut s’expliquer par la capacité des *Synechococcus* à capter le nitrate [Ahlgren and Rocab, 2006] alors que la majorité des *Prochlorococcus* n’en sont pas capables [Moore et al., 2002] [Bérube et al., 2014, 2015] et peuvent ainsi mieux se développer dans les milieux plus riches en nutriments comme les zones côtières [Partensky et al., 1999].

2.2 Le phytoplancton à La Réunion

Bien que la Réunion soit un Département français d’Outre-Mer (DOM) et qu’il existe un gros effort de prélèvement notamment sous la Directive Cadre-Eau (DCE), peu de travaux scientifiques de synthèse sont publiés sur le phytoplancton de ses eaux côtières.

A La Réunion, le site Ermitage Large est considéré comme relativement peu impacté par les pressions anthropiques. Il est donc considéré comme point de référence pour les eaux côtières de La Réunion [GT DCE Réunion, 2020]. Les caractéristiques phytoplanctoniques du point Ermitage Large ont été étudiées par Goffart (2020).

2.2.1 Biomasse totale

La concentration en chlorophylle a au point Ermitage Large (55,206, -21,091) [GT DCE Réunion, 2020] varie de 50 à 275 ng chl a/L-1 (Figure 6A) et est donc caractéristique des milieux oligotrophes, voire ultra-oligotrophes [Goffart, 2020] [GT DCE Réunion, 2020].

La saisonnalité y est très marquée. On trouve des pics de concentration compris entre juin et septembre pendant l’hiver austral avec des valeurs de 100 à 150 ng chl a /L⁻¹ avec un pic de 275 ng chl a/L-1 début 2015. Les minimas de concentration sont eux atteints lors de l’été austral, entre les mois de janvier et mars et sont situés aux alentours 50 ng chl a/L-1 (Figure 6B).

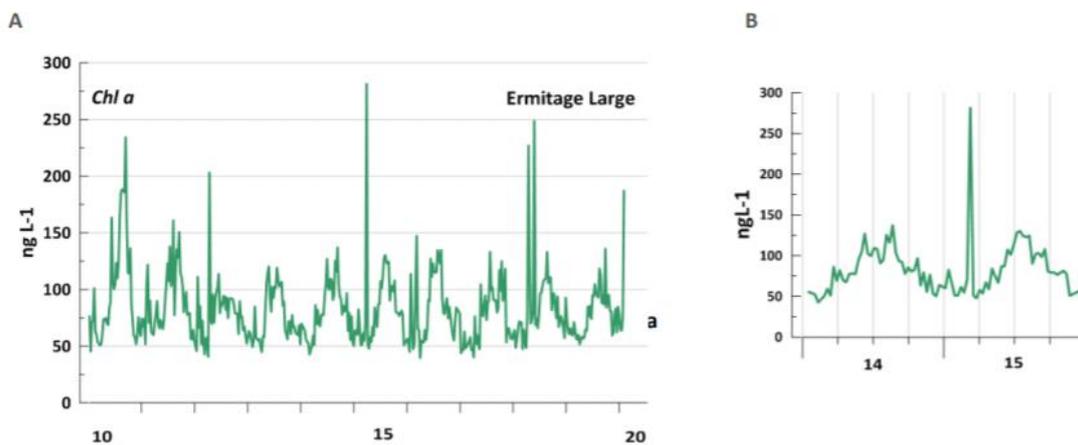


Figure 6 : Evolution de la concentration en chlorophylle a (en ng chl a/L-1) au point Ermitage Large (55,2060, -21,0910) (Figure 16) [Goffart, 2020] situé dans la réserve naturelle marine de la Réunion entre 2010 et 2020 (A) et entre 2014 et 2015 (B) (Données satellites : <https://oceancolour.org>)

2.2.2 Communautés phytoplanctoniques

Au point Ermitage Large, le pico-phytoplancton est largement majoritaire en terme d'abondance cellulaire par rapport aux autres classes de taille (Figure 7). Le pico-phytoplancton est dominé tout au long de l'année par les genres *Prochlorococcus* et *Synechococcus*. On peut aussi noter que leur abondance varie peu en fonction des saisons, à l'exception des mois de l'hiver austral, où des abondances plus faibles sont observées (Figure 7A).

Au sein du micro-phytoplancton, les prymnésiophycées sont en moyenne les plus abondantes (Figure 7C). Leur pic d'abondance se retrouve au début de la saison chaude, c'est à dire aux mois de novembre et décembre. Viennent ensuite les dinoflagellés dont l'abondance maximale est présente sur les mois de février et mars et enfin les diatomées qui sont maximales entre novembre et décembre.

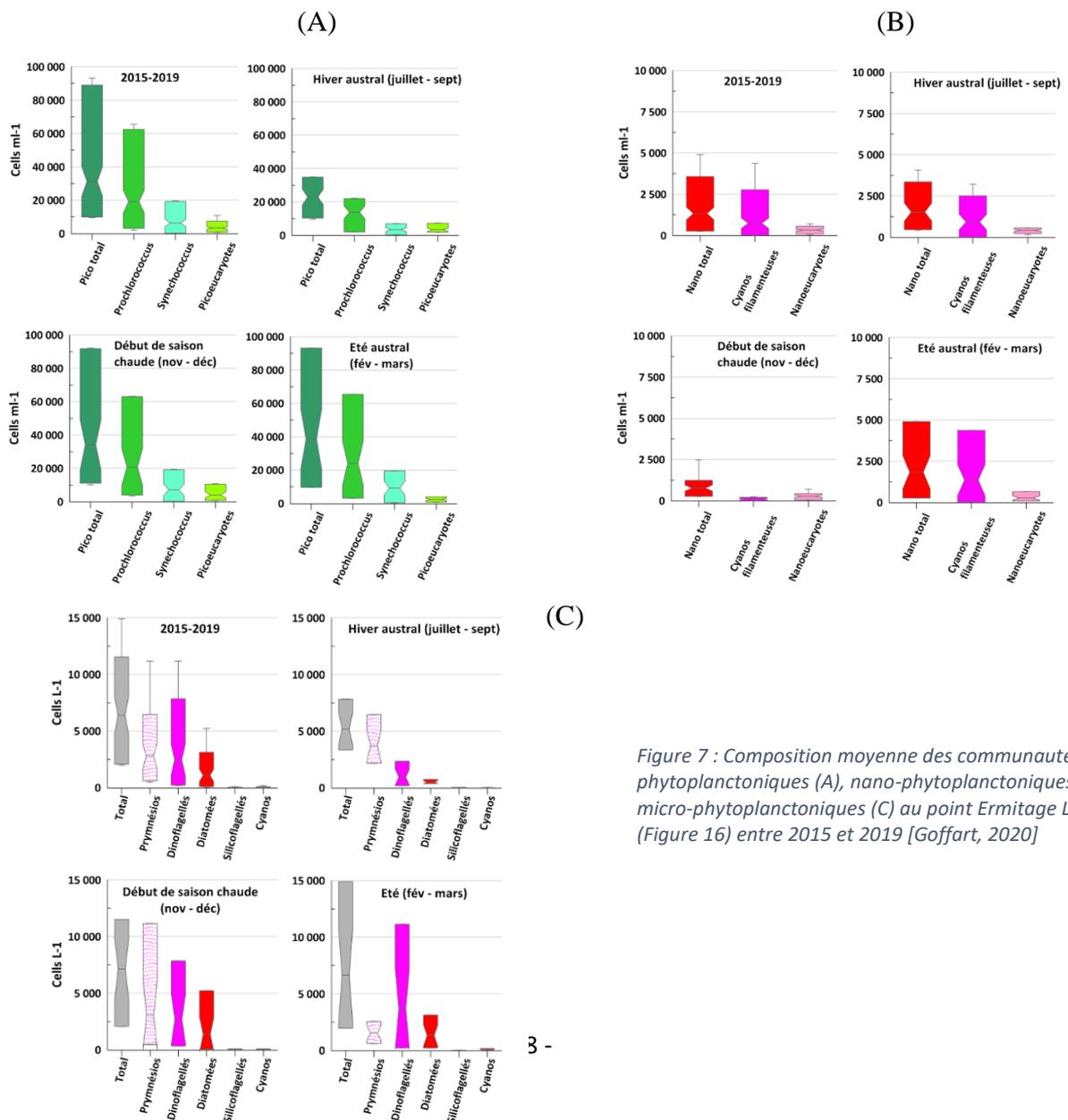


Figure 7 : Composition moyenne des communautés pico-phytoplanctoniques (A), nano-phytoplanctoniques (B) et micro-phytoplanctoniques (C) au point Ermitage Large (Figure 16) entre 2015 et 2019 [Goffart, 2020]

2.3 Etat des lieux de la Réunion

2.3.1 Météorologie

En raison de sa proximité avec le tropique du Capricorne, le climat global de l'île de la Réunion est tropical humide, c'est à dire qu'il y a deux grandes saisons : la saison de pluies (ou été austral) de janvier à mars, et la saison sèche (ou hiver austral) de mai à novembre. Les mois d'avril et de décembre sont des mois de transition, et peuvent alterner entre les temps pluvieux et sec. Les températures sont globalement douces avec une température moyenne à l'année de 25°C. On observe cependant une augmentation de la température entre novembre et avril, pouvant atteindre plus d'une trentaine de degrés Celsius.

Les vents exercent une forte influence sur les conditions météorologiques de la Réunion. Le relief apporte une grande dissymétrie entre les régions est et ouest de l'île. Les hauts reliefs du centre « coupent » du vent la région ouest des alizés provenant du sud-est et donc de l'influence humide de l'océan. Cela va avoir pour conséquence une pluviométrie plus importante dans la zone sud-est, qui est appelée zone « sous le vent ». La pluviométrie peut atteindre plus de 10 mètres par an (Figure 8).

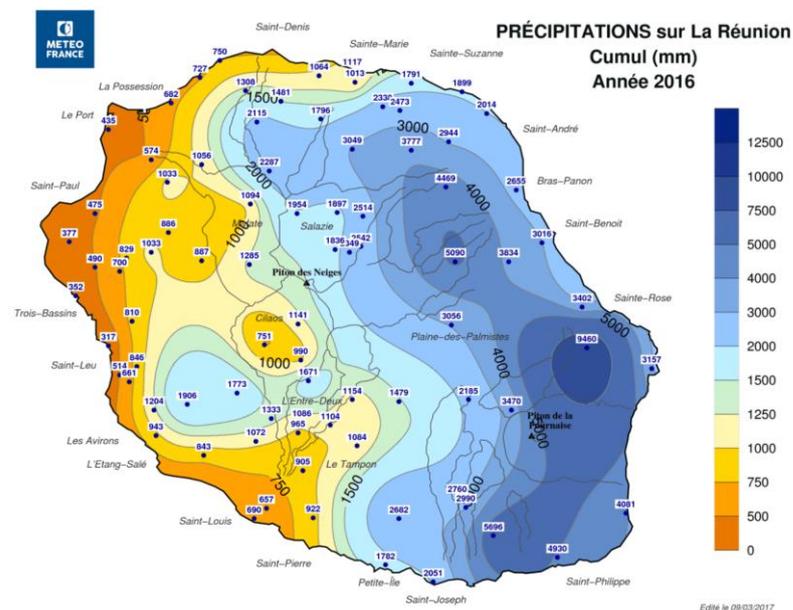


Figure 8 : Carte de la pluviométrie moyenne sur l'île de la Réunion en 2016 (source : MétéoFrance)

L'île subit plusieurs houles différentes (Figure 9). La houle d'alizés est formée par le vent du même nom et arrive par le sud-est. Cette houle est aussi à l'origine de la formation des courants parallèles le long des rivages est et ouest. Les houles australe (sud-ouest) et

cyclonique (nord-est) sont formées par des événements de forte énergie ayant lieu à des milliers de kilomètres des côtes réunionnaises.

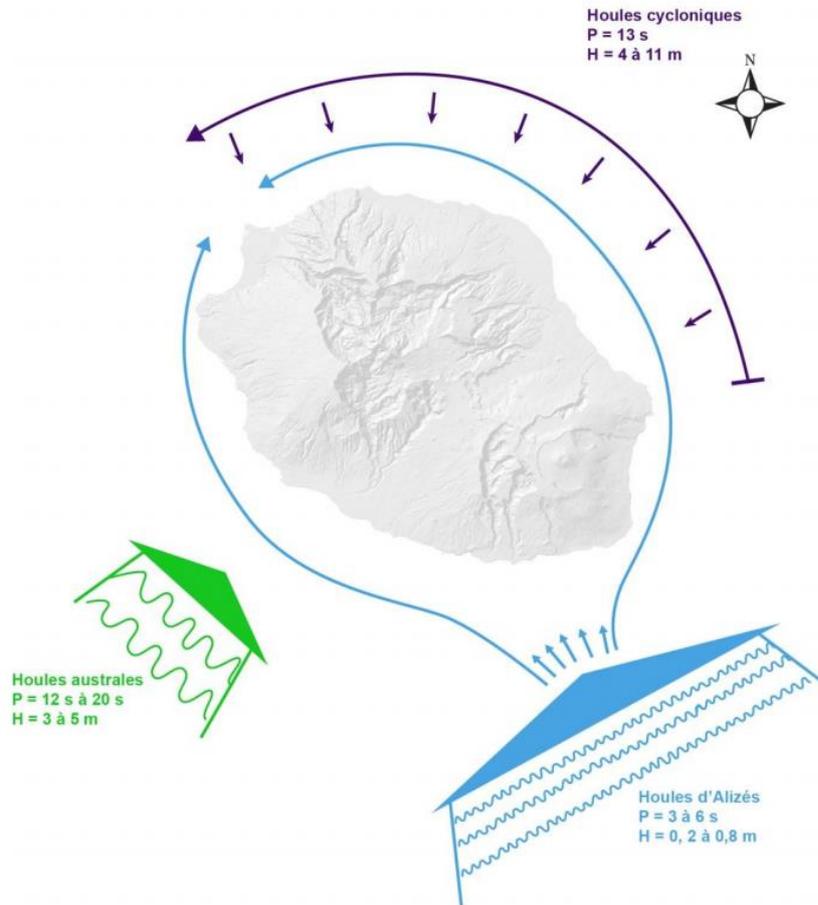


Figure 9 : Représentation des houles à l'île de la Réunion d'après Gabrié (1984) et précisée par modélisation (HYDRORUN 2011) [Projet Bon Etat II, 2012]

A l'échelle océanique, l'île subit principalement l'influence du courant sud équatorial en provenance de l'est. A l'échelle littorale, les courants principaux longent la côte sud-ouest en direction du nord-ouest parallèlement à la ligne de côte (dérive littorale) (Figure 10).

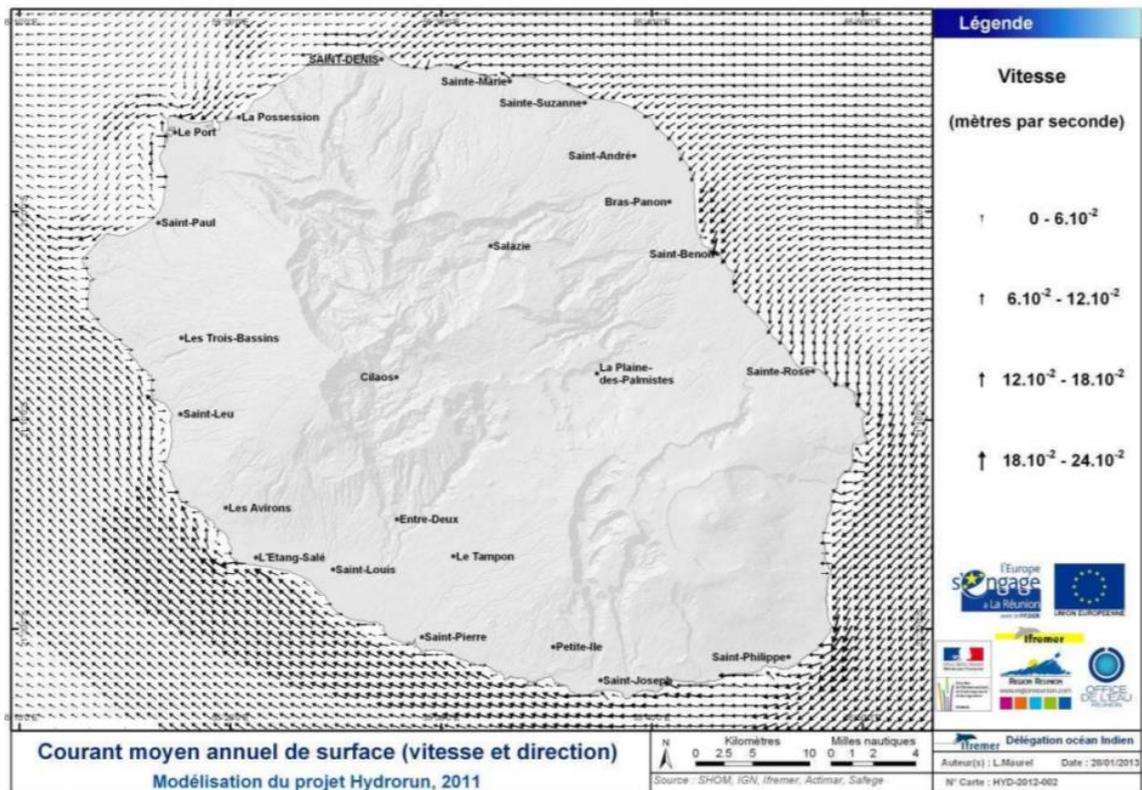


Figure 10 : Courant moyen annuel de surface en 2010 aux alentours de l'île de la Réunion [Le Berre et al., 2012]

2.3.2 Géologie et hydrologie

L'île de la Réunion est une île volcanique composée de 2 massifs volcaniques principaux : le Piton des Neiges et le Piton de la Fournaise. Le climat tropical extrêmement pluvieux de l'île associé à la nature faiblement consolidée de ces 2 jeunes volcans entraîne de forts apports terrigènes depuis l'île vers l'océan via le réseau de cours d'eau [Bret et al., 2003] [Garcin et al., 2005]. Ces épisodes pluvieux sont encore plus importants lors des épisodes cycloniques de l'été austral, ce qui engendrent une augmentation de l'érosion et des charges en sédiments des rivières [Louvât & Allègre 1997].

Les principales rivières du massif du Piton de la Fournaise sont les rivières du Mât, Saint-Etienne et des Galets (Figure 11). Elles prennent leur origine dans les cirques, de grandes zones érodées au centre du volcan. La rivière des Remparts est la principale rivière prenant sa source dans le massif du Piton des Neiges (Figure 11).

L'ensemble de la Réunion est composé de roches basaltiques d'origines volcaniques. Les roches basaltiques sont classées en fonction de leur teneur en silice [Fitton, 2020]. Les basaltes de l'île de la Réunion sont compris entre les classes tholéitiques et alcalines [Upton

& Wadsworth 1966] c'est-à-dire à des niveaux de silice variant de moyennement sous-saturés à saturés [Fitton, 2020]. De ce fait, les concentrations en silice des rivières de la Réunion sont importantes et relativement homogènes sur tout le territoire avec une moyenne de 440 $\mu\text{mol.L}^{-1}$ [Louvat & Allègre, 1997].

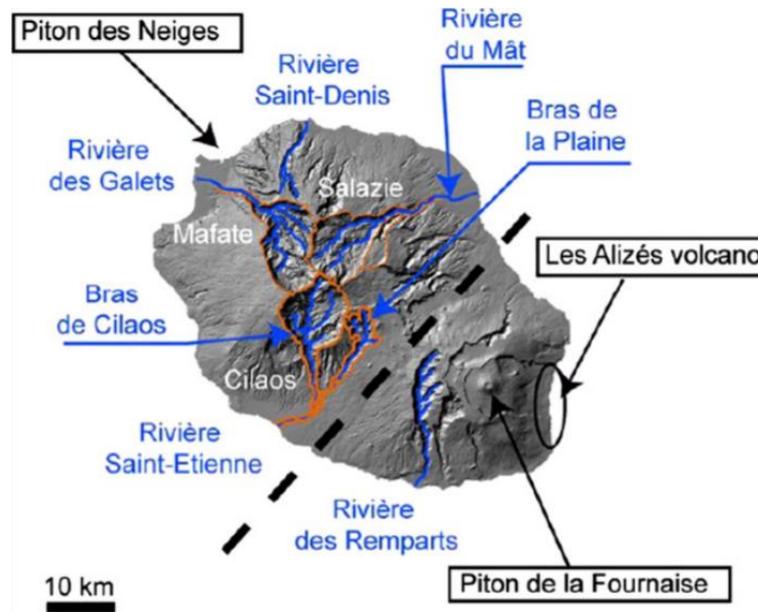


Figure 11 : Vue d'ensemble des formations géologiques et des principales rivières de l'île de la Réunion. La ligne en pointillée représente la séparation entre les 2 massifs volcaniques (Piton des Neiges au sud-est et Piton de la Fournaise au nord-ouest) [Sisavath et al., 2011]

2.3.3 Activités humaines

2.3.3.1 Urbanisme et démographie

L'île de la Réunion est globalement une zone dense en population avec environ 854 000 habitants en 2017 pour une surface de 2 500 km^2 , soit une densité de 340 habitants/ km^2 environ (INSEE) contre environ 120 habitants/ km^2 en France métropolitaine. On peut noter une augmentation de 0,5% entre 2012 et 2017, ce qui montre que la tendance récente est à l'augmentation (INSEE). Le million d'habitants est attendu à l'horizon 2040.

La répartition de l'urbanisation est paradoxalement peu dense ; seulement 10% de l'île est urbanisée et la grande majorité de la population se concentre dans les grandes villes comme St Denis, St Paul, Saint Pierre qui regroupent à elles seules près de 40% de la population réunionnaise totale. De manière plus globale, on peut aussi noter que la quasi-totalité des grandes aires urbaines se situe sur le littoral (Figure 12), qui concentre plus de 80% de la population totale de l'île [Le Berre et al., 2012].

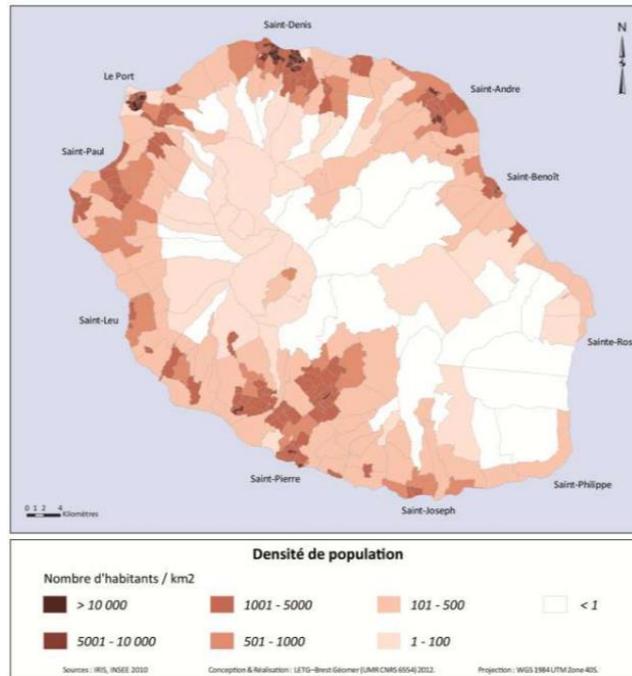


Figure 12 : Densité de population sur l'île de la Réunion en 2010 [Le Berre et al., 2012]

2.3.3.2 Gestion des eaux usées

Le premier impact de l'urbanisation sur les masses d'eaux côtières provient de la gestion des eaux usées. Le traitement des eaux usées à la Réunion est réparti en parts égales entre l'assainissement collectif et l'assainissement non collectif (Figure 13). Les régions les plus rurales sont majoritairement à assainissement non collectif alors que les régions les plus denses sont équipées d'assainissement collectif [Etat des lieux 2019].

Les 2 principales sources de pressions provenant de l'assainissement collectif proviennent des rejets d'eaux usées par les stations d'épuration et le rejet d'eaux brutes au niveau des trop-pleins des postes de refoulement. Pour l'assainissement non-collectif, les principales pressions proviennent directement des rejets d'eaux usées. Cette tendance s'accroît par le fait que 70% des assainissements non-collectifs ne sont pas aux normes à la Réunion (Etat des lieux 2019). Les paramètres représentant les pressions liées à l'assainissement sont les résidus azotés et phosphatés liés au métabolisme humain et aux produits ménagers comme les lessives.

La tendance générale est que ce sont les zones les plus densément peuplées, c'est à dire les côtes nord et sud-ouest, qui sont celles qui entraînent le plus de pression sur les eaux côtières, quel que soit le type d'assainissement.

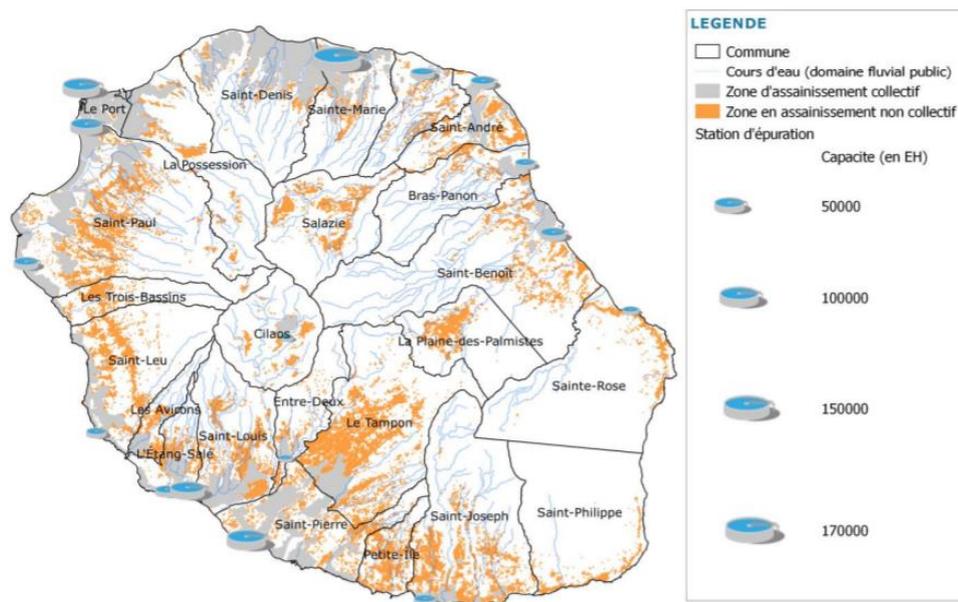


Figure 13 : Répartition de l'assainissement collectif et non-collectif à la Réunion en 2018 (Etat des lieux 2019)

2.3.3.3 Ruissellement urbain

Le ruissellement urbain est aussi un facteur à prendre en compte. Les forts événements pluvieux entraînent divers polluants directement vers les masses d'eaux côtières, dont l'origine peut être les toitures, la voirie... Les apports peuvent être de différente nature : métaux (zinc, plomb, cuivre etc...), nutriments (résidus azotés et phosphatés)... en fonction de l'utilisation des sols à proximité et des activités urbaines [Etat des lieux 2019]. La pression liée au ruissellement urbain est paradoxalement localisée sur les zones dont la pluviométrie est la moins importante de l'île, c'est à dire les côtes nord et ouest (Figure 14). Cela peut s'expliquer par une urbanisation bien plus importante dans ces zones. L'agriculture, qui engendre aussi des pressions sur les bassins versant via le ruissellement, sera développée au prochain chapitre.

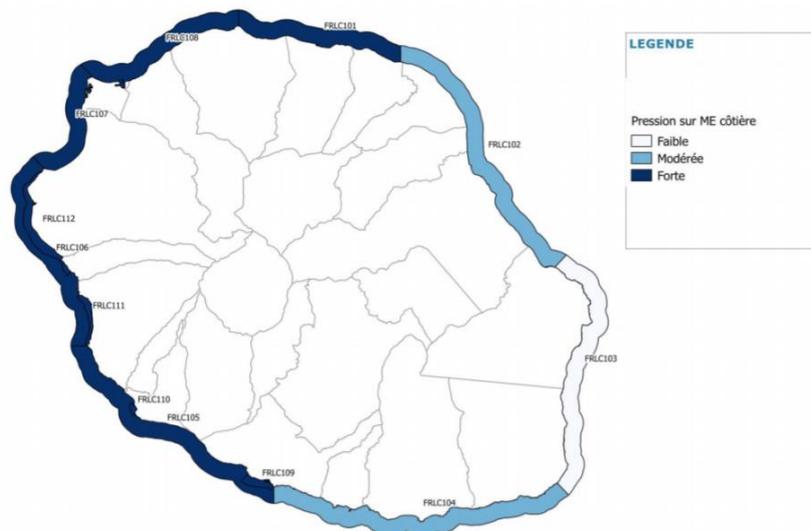


Figure 14 : Pressions induites par le ruissellement urbain sur les eaux côtières de la Réunion [Etat des lieux 2019]

2.3.3.4 Activités économiques

L'agriculture s'étend sur plus de 40 000 hectares, soit environ 20% de la surface totale de l'île. Plus de la moitié de cette surface est réservée à la culture de canne à sucre, vient ensuite l'élevage avec 30% et le reste est composé de cultures maraîchères et fruitières [Etat des lieux 2019]. Les pressions agricoles majeures sur les masses d'eau côtières sont les pressions azotées et phosphorées. Cependant, la problématique des pressions phosphorées est peu connue en raison des faibles connaissances sur les quantités ajoutées ainsi que sur la capacité des sols à stabiliser et mobiliser les phosphates (Etat des lieux 2019). L'azote et le phosphore sont les 2 principaux facteurs limitant pour la productivité des écosystèmes terrestres et leur utilisation est cruciale pour la production agricole. Les pressions azotées peuvent se manifester sous différentes formes : l'ammonium (NH_4), les nitrates (NO_3) et les nitrites (NO_2). L'importation d'engrais minéraux azotés atteint 25 000 tonnes par an entre 2008 et 2016 [Etat des lieux 2019], ce qui représente 5 600 tonnes annuelles d'azote pour les besoins agricoles. On peut ajouter à cela les apports d'azote organique imputable à l'élevage qui atteint 1 120 tonnes d'azote équivalent engrais [Etat des lieux 2019]. Le surplus d'azote qui n'est pas utilisé par les plantes et les rejets d'élevage peuvent ensuite se retrouver dans les masses d'eau côtières par ruissellement et infiltration dans les sols. On remarque qu'à l'île de la Réunion, les côtes sud et ouest sont les plus touchées par ce ruissellement (Figure 15).

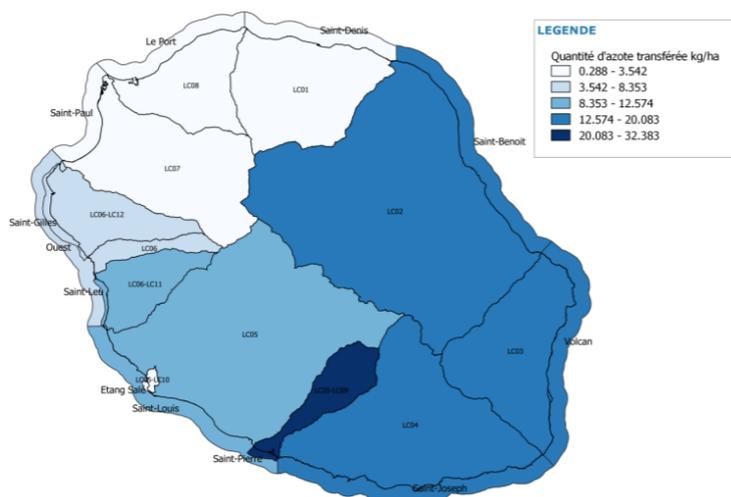


Figure 15 : Flux d'azote ruisselé sur les bassins versants des eaux littorales [Etat des lieux 2019]

Le secteur industriel est dominé par la filière sucre-rhum, basée sur la culture de cannes à sucre ainsi que le domaine de la construction. La métallurgie, le travail du bois et l'imprimerie sont aussi des activités présentes sur l'île [Etat des lieux 2019]. De nombreux sites industriels sont raccordés au système de traitement des eaux usées. Certains établissements ne le sont pas et sont appelés les ICPE (Installations Classées pour la Protection de Environnement). Ces établissements réalisent des rejets ponctuels de leurs effluents directement dans le milieu et doivent se déclarer auprès des pouvoirs publics. Il en existe 336 sur toute l'île (Figure 16) dont près de 45% sont localisés sur 2 centres principaux : Le Port et Saint-Pierre [Etat des lieux 2019]. Les paramètres les plus représentatifs des pressions liées aux sites industriels sont la matière organique, les résidus azotés et phosphatés, les fluorures, les sulfates... [Etat des lieux 2019].

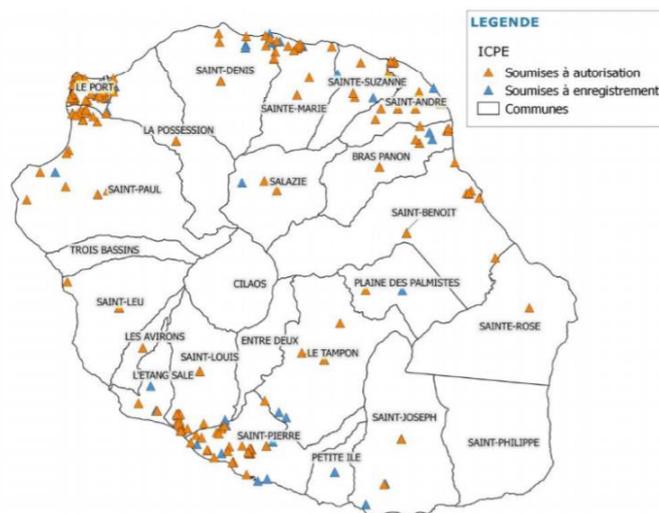


Figure 16 : Localisation des Installations Classées pour la Protection de Environnement (ICPE) sur l'île de la Réunion [Etat des lieux 2019]

Le tourisme est une part non négligeable de l'emploi sur l'île. En 2018, le tourisme regroupe 13 500 emplois. On peut noter une hausse entre 2011 et 2018, puisqu'il est passé de 3,9 à 4,6% des emplois totaux, soit une augmentation de 37% (INSEE). Cette augmentation du nombre d'emplois liés au tourisme s'explique par une hausse du nombre de touristes venant de l'extérieur, qui sont passés de 420 000 en 2010 à 507 000 en 2017 (INSEE). Ce chiffre atteint même 533 000 en 2019 [Comité Régional du Tourisme de la Réunion, 2020].

Il existe de fortes disparités en matière de tourisme en fonction des arrondissements de l'île. En effet 2 emplois sur 3 dans ce secteur se situent dans les communautés d'agglomération bordant la réserve naturelle marine de l'île : le Territoire de la Côte Ouest (TCO) avec 36% des emplois et la Communauté Intercommunale des Villes Solidaires (CIVIS) avec 30% des emplois (Figure 17).

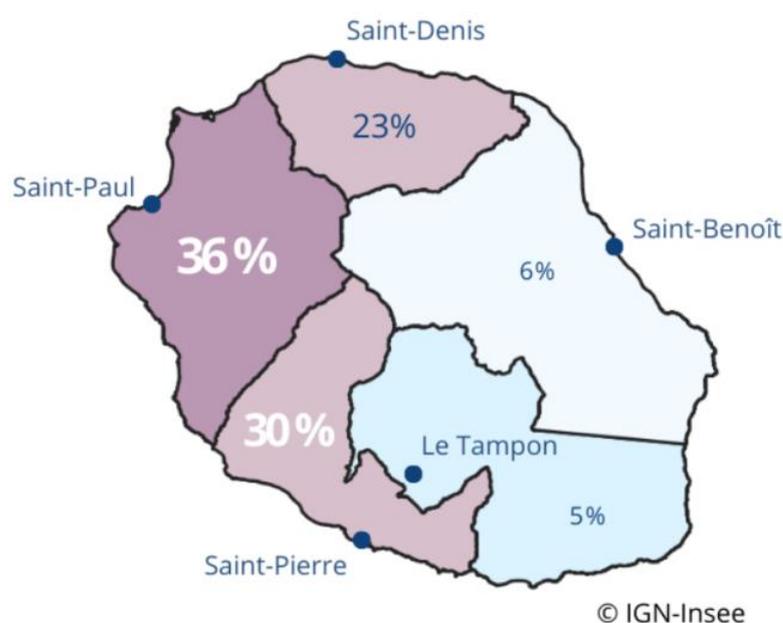


Figure 17 : Carte de répartition des emplois dans le secteur du tourisme en 2018 (source : INSEE)

Le nombre de touristes n'est pas équivalent pour chaque période de l'année. On peut cependant remarquer 2 tendances : le nombre de touristes augmente fortement aux mois d'été (juillet, août) et d'hiver (décembre, janvier) (Figure 18). Ces 4 mois rassemblent en effet à eux seuls près de 40% du nombre total de touristes. Cela peut s'expliquer tout d'abord par les périodes de vacances qui permettent aux personnes d'avoir plus de temps pour voyager. Ensuite, les mois de décembre et de janvier correspondent avec l'été austral et donc à des températures plus clémentes pour le voyage et la découverte de l'île.



Figure 18 : Évolution temporelle du nombre de touristes en fonction du mois sur les années 2018 et 2019 [Comité du tourisme 2020]

2.4 Impact des activités humaine sur le phytoplancton

Le phytoplancton et sa productivité sont contrôlés par de nombreux facteurs environnementaux, dont une partie est influencée par les activités humaines [Häder and Gao, 2015]. Ces pressions d'origine anthropique peuvent être globales, induites par le dérèglement climatique ou bien locales. Elles proviennent alors des activités citées ci-dessus comme le tourisme, l'agriculture et l'industrie, ainsi que l'urbanisation.

2.4.1 Impact du dérèglement climatique

Le dérèglement climatique est un bouleversement pour l'environnement et l'écosystème océanique n'y échappe pas. Le phytoplancton va ainsi être perturbé par différents phénomènes directement liés aux changements climatiques comme l'acidification des océans et le réchauffement des eaux. En effet l'augmentation de la concentration de CO₂ atmosphérique engendre une augmentation de la température globale ainsi qu'une plus forte dissolution de ce gaz augmentant potentiellement l'acidité de l'eau de mer [Gao et al., 2018]. Chaque groupe phytoplanctonique réagit de manière différente aux changements. En effet, ces changements vont avoir un impact sur la composition des communautés : ils favoriseront les espèces les plus tolérantes en matière de température et de pH au détriment des plus sensibles [Gao et al., 2018]. Par exemple, l'augmentation de la température de l'eau a réduit la

biomasse des grosses cellules phytoplanctoniques comme de la diatomée *Cylindrotheca closterium*, mais a augmenté celle des petites chlorophytes dans un lagon récifal au Mexique [Halac et al., 2013].

L'acidification peut aussi impacter les organismes qui comportent un squelette calcaire comme les coraux [Hoegh-Guldberg et al., 2007], qui forment le lagon de l'île de la Réunion ainsi que les prymnésiofycées à coccolites (Figure 19) [Beaufort et al., 2011]. En effet, la survie de ces organismes est directement liée à leur capacité à réaliser la calcification, c'est à dire la cristallisation de CaCO_3 afin de former leur exosquelette pour les coraux et leurs plaques calcaires pour les prymnésiofycées. Cette action est facilitée par un pH élevé et une concentration élevée en ions $[\text{CO}_3^{2-}]$. Or, l'acidification des océans va induire l'inverse, c'est à dire une baisse du pH et de la concentration en ion $[\text{CO}_3^{2-}]$ [Riebesell and Tortell 2011].

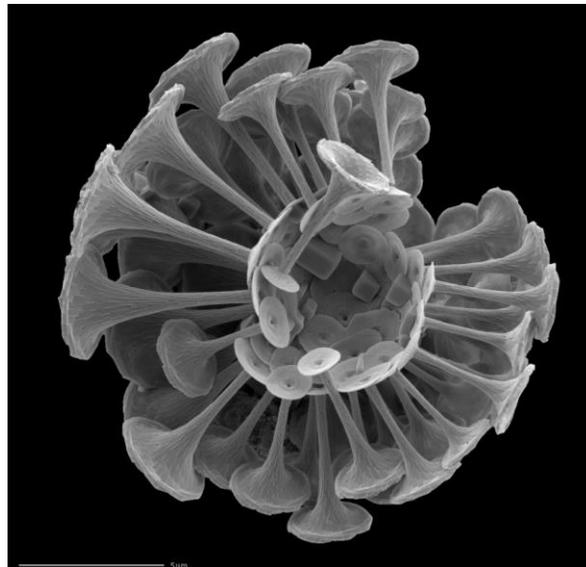


Figure 19 : *Discosphaera tubifer*, une prymnésiofycée à coccolites fréquente dans les eaux côtières de La Réunion (Goffart, communication personnelle, credit photo : www.mikrotax.org, barre d'échelle : 5 μm).

Le réchauffement global de l'atmosphère va engendrer dans un autre temps une plus forte stratification qui, dans les régions tropicales et aux latitudes moyennes, limitera de plus en plus les échanges entre la couche de surface et le reste de la colonne d'eau [Beardall et al., 2009]. Cela aura pour conséquence une limitation de la disponibilité en nutriments pour les organismes de la couche de mélange, dont fait partie le phytoplancton.

Un autre facteur à prendre en compte est l'augmentation des rayonnements solaires. Les émissions d'origine anthropique de chlorofluorocarbures (CFC), entre autres, ont participé à la détérioration de la couche d'ozone permettant de filtrer les rayons ultraviolets (longueur d'onde compris entre 200 et 400 nanomètres) émis par le soleil [Lindley, 1988]. Le

phytoplancton est spécialement sensible aux UV-B (longueur d'onde entre 280 et 315 nanomètres) [Häder and Gao, 2015]. Ceux-ci endommagent en effet le photosystème II en dégradant la protéine D1, que les cellules devront réparer afin de limiter la photoinhibition [Bouchard et al., 2006]. Ces mêmes UV-B vont aussi altérer les phycobiliprotéines, qui forment les phycobilisomes, les complexes collecteurs de l'énergie lumineuse chez certaines espèces de phytoplancton [Sinha et al., 2005]. Cela va avoir pour conséquence, dans les 2 cas, une baisse de la productivité des cellules phytoplanctoniques.

2.4.2 Impact de changements locaux des paramètres

Les activités humaines décrites plus tôt engendrent des phénomènes qui peuvent prendre plusieurs formes : rejets de stations d'épuration, ruissellement urbain, utilisation de fertilisants et de phytosanitaires, lavement des sols... Ceux-ci vont modifier les apports en nutriments dans les zones estuariennes ou côtières et ainsi modifier la biomasse et les compositions phytoplanctoniques [Glibert et al., 2016]. De manière générale, la perturbation liée à l'apport de nutriments va faire baisser la diversité spécifique en favorisant les espèces à croissance rapide par rapport à celles à croissance lente [Zhou et al., 2018]. L'apport d'azote (N) par les estuaires, les rivières et les zones côtières est un des principaux facteurs responsables de l'eutrophisation [Nwankwegu et al., 2019], la concentration d'azote étant en effet un facteur limitant à la production primaire [Olofsson et al., 2017]. La biodisponibilité en nutriments comme le phosphore ainsi que la silice influence aussi la diversité et la productivité du phytoplancton [Li et al., 2020]. Ces différentes formes d'azote, comme l'ammonium (NH_4) et le nitrate (NO_3) ainsi que le phosphore sont typiquement rejetés par des activités humaines comme l'agriculture avec l'usage de fertilisants, l'utilisation d'énergies fossiles et les rejets des eaux usées [Li et al., 2020]. Il a été montré que les modifications en apports nutritifs, notamment en azote inorganique dissout (DIN) et en phosphore inorganique dissout (DIP) modifiaient la production et entraînaient la formation de bloom phytoplanctoniques, particulièrement de diatomées et de dinoflagellés [Schiewer, 1998] [Pastres et al., 2004].

3. Objectifs

L'objet de cette étude visera à déterminer les variations saisonnières et interannuelles des communautés de phytoplancton du littoral réunionnais entre 2015 et 2020 en terme de biomasse phytoplanctonique totale et de composition du nano- et du pico-phytoplancton. Il s'agira ensuite de les mettre en relation avec les variables environnementales et les proxys de pression afin de déterminer de possibles corrélations. Chacun des sites étudiés sera comparé au point de référence Ermitage (Large), peu impacté par les pressions anthropiques, afin de quantifier leur dégradation par les activités humaines. L'objectif final est de fournir des informations utiles aux gestionnaires de l'environnement marin afin de caractériser l'état des communautés phytoplanctoniques et prendre d'éventuelles décisions en terme de protection des masses d'eau côtières.

4. Matériel & Méthodes

4.1 Origine des données

Les données utilisées dans ce travail ont été acquises dans le cadre des réseaux de surveillance des eaux côtières de La Réunion par le Réseau Hydrologique du Littoral Réunionnais (RHLR) dont les actions sont coordonnées par l'Office de l'Eau de la Réunion. L'IFREMER vient en appui au bassin de la Réunion pour des points spécifiques, dont la bancarisation des résultats dans la base de données Quadrige².

Face à l'impossibilité de se rendre à la Réunion en raison de la crise sanitaire, les données bancarisées dans Quadrige² et couvrant la période 22 septembre 2015 au 4 novembre 2020 ont été utilisées ici. L'extraction des données a été réalisée par le Dr Anne Goffart le 13 avril 2021.

4.2 Zone d'étude

Les prélèvements ont lieu sur 8 stations placées tout autour de l'île (Figure 20), auxquelles est ajouté le point Ermitage (Large), qui est reconnu comme point de référence [GT DCE Réunion, 2020]. Les différentes stations sont classées en 4 catégories :

-les stations de Saint-Paul, La Possession et Sainte-Marie sont caractérisées par une faible profondeur et un substrat meuble, souvent vaso-sableux. Cette zone est influencée par les houles cycloniques (Figure 9),

-Bras Panon et Saint-Philippe sont des stations orientées à l'est et sont fortement exposées aux houles cycloniques et faiblement aux houles australes (Figure 9). La profondeur y est plus importante, comprise entre 140 et 240 mètres. Le substrat est hétérogène et passe de type meuble à affleurement rocheux au nord à substrat rocheux au sud

-Petite-Île est la station la plus exposée aux houles alizéennes (Figure 9) et est composé de substrat rocheux. La profondeur est de 200 mètres environ.

-la côte exposée au sud-ouest est la plus propice au développement de récifs coraliens. On y trouve les stations de L'Ermitage (Large), L'Ermitage et de Saint-Louis. Les houles australes y sont majoritaires (Figure 9) et le substrat y est dur à faible profondeur puis devient sableux au-delà [GT DCE Réunion, 2020].

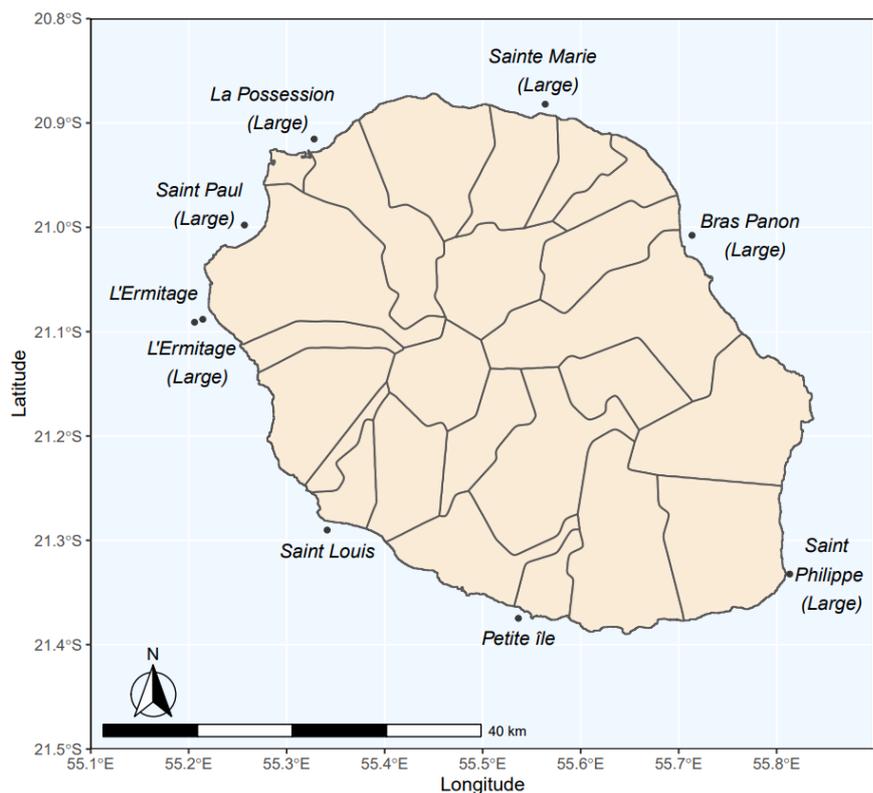


Figure 20 : Localisation des 9 sites étudiés (réalisation de la carte sur le logiciel R à l'aide du package « ggplot2 » avec des données de la Database of Global Administrative Areas (GADM.org))

4.3 Période d'échantillonnage

Les données utilisées couvrent la période de septembre 2015 à novembre 2020. Les prélèvements sont effectués chaque année lors de 6 campagnes à la mer :

- 2 en période sèche et fraîche de l'hiver austral (juillet-août-septembre),
- 2 au début de l'été austral (novembre-décembre) concordant avec les premières pluies qui entraînent les premiers lessivages des substances accumulées dans les sols lors de la saison sèche,
- 2 en pleine période chaude de l'été austral (janvier-février-mars) correspondant au pic des précipitations.

Les prélèvements ont été réalisés dans le cadre des réseaux de surveillance des eaux côtières de La Réunion par le RHLR (cfr § 4.2).

4.4 Paramètres mesurés

2 catégories de paramètres sont mesurées : les paramètres physico-chimiques et les paramètres liés au phytoplancton. Tous les prélèvements et mesures sont réalisés en surface (0-1m) par les partenaires du RHLR (cfr § 4.2).

Les paramètres physico-chimiques mesurés in situ à l'aide d'une sonde multi-capteurs sont la turbidité, la température de l'eau et la salinité.

Les nutriments et les paramètres liés au phytoplancton sont prélevés à l'aide d'une bouteille Niskin de 5 à 8 litres et analysés en laboratoire. Les sels nutritifs mesurés sont les nutriments azotés (ammonium (NH_4^+), nitrates (NO_3^-) + nitrites (NO_2^-)) ainsi que les phosphates (PO_4^-) et les silicates ($\text{Si}(\text{OH})_4$). Les paramètres phytoplanctoniques utilisés dans ce travail sont la concentration en chlorophylle a ainsi qu'un dénombrement des cellules pico- et nano-phytoplanctoniques par cytométrie en flux.

Les paramètres physico-chimiques et la chlorophylle a sont mesurés à chaque station. Les prélèvements en vue d'un dénombrement sont effectués aux stations L'Ermitage Large, Saint-Paul, Sainte-Marie et Petite-Île (Table 1, Figure 20).

Tableau 1 : Liste des paramètres mesurés sur chaque site d'étude référence [GT DCE Réunion, 2020]

<u>STATION</u>	<u>Température</u> <u>Salinité</u> <u>Turbidité</u>	<u>Nutriments</u>	<u>Chlorophylle a</u>	<u>Dénombrement</u> <u>(cytométrie en</u> <u>flux)</u>
L'Ermitage (Large)	X	X	X	X
L'Ermitage	X	X	X	
Saint-Paul	X	X	X	X
La Possession	X	X	X	
Sainte-Marie	X	X	X	X
Bras Panon	X	X	X	
Saint-Philippe	X	X	X	
Petite-Île	X	X	X	X
Saint-Louis	X	X	X	

4.5 Analyse des échantillons

4.5.1 Paramètres physico-chimiques

Les techniques utilisées ainsi que les précisions de mesures pour chaque sel nutritif sont listées dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2 : Liste des méthodes d'analyse et des limites de quantification pour chaque nutriment [GT DCE Réunion, 2020]

Paramètre	Méthode d'analyse	Limite de Quantification
Nitrites + nitrates	Spectrophotométrie, Aminot et Kérouel 2004	0,08 $\mu\text{mol.L}^{-1}$
	Spectrophotométrie flux, Aminot et Kérouel 2007	
Ammonium	Spectrophotométrie, Aminot et Kérouel 2004	0,05 $\mu\text{mol.L}^{-1}$
	Spectrophotométrie flux, Aminot et Kérouel 2007	
	Fluorimétrie flux, Aminot et Kérouel 2007	
Phosphate	Spectrophotométrie, Aminot et Kérouel 2004	0,04 $\mu\text{mol.L}^{-1}$
	Spectrophotométrie flux, Aminot et Kérouel 2007	
Silicate	Spectrophotométrie, Aminot et Kérouel 2004	0,4 $\mu\text{mol.L}^{-1}$
	Spectrophotométrie flux, Aminot et Kérouel 2007	

4.5.2 Paramètres phytoplanctoniques

La chlorophylle a est analysée par fluorométrie selon la technique décrite par Amniot & Kerouel (2004). La précision est de 0,02 $\mu\text{g chl. L}^{-1}$.

Les cellules pico-phytoplanctoniques et les cellules nano-phytoplanctoniques sont analysées par cytométrie en flux selon la technique décrite par Gregori et al. (2011).

Le picophytoplancton est séparé en 3 catégories : les *Prochlorococcus*, les *Synechococcus*, les pico-eucaryotes et le pico-phytoplancton total. Le nano-phytoplancton comporte les groupes des cyanobactéries filamenteuses, des nano-eucaryotes et du nano-phytoplancton total.

A certaines dates, 3 valeurs de concentrations en chlorophylle a ou en nano- et pico-phytoplancton sont effectuées. Des moyennes de ces triplicats sont alors réalisées.

4.6 Statistiques

Des matrices de corrélations ainsi que des ACP (Analyse en composante principale) basés sur la méthode de Spearman entre les paramètres physico-chimiques et les paramètres phytoplanktoniques seront réalisés. Les corrélations sont jugées significatives lorsque la p-value est inférieure à 0,05. Les statistiques sont réalisées avec le logiciel Xlstat sur Excel.

5. Résultats

5.1 Paramètres physico-chimiques

5.1.1 Température de l'eau

La température de l'eau moyenne entre 2015 et 2020 et sur toutes stations confondues est de $26,0 \pm 1,9$ °C. La différence de température de l'eau entre les saisons est marquée avec une moyenne de $23,9 \pm 0,5$ °C en hiver austral, de $26,1 \pm 1,1$ °C au début de l'été austral pour atteindre $28,2 \pm 0,7$ °C au milieu de l'été austral (Tableau 3).

Il existe peu de différence entre les stations mais les stations de L'Ermitage (Large), L'Ermitage, Saint-Paul et La Possession ont des températures de l'eau moyenne légèrement supérieure avec respectivement $26,1 \pm 2$, $26,2 \pm 1,9$, $26,3 \pm 2,0$, $26,3 \pm 1,9$ °C (Tableau 3).

Tableau 3 : Température de l'eau (°C) : moyennes et écart-types pour la période 2015-2020.

Stations	Températures moyenne de l'eau (en °C)			
	hiver austral (juil-août-sept)	début été austral (nov-déc)	pic été austral (jan-fév-mars)	2015-2020
L'Ermitage (Large)	$24,1 \pm 0,5$	$26,3 \pm 1,3$	$28,4 \pm 0,6$	$26,1 \pm 2,0$
L'Ermitage	$24,1 \pm 0,5$	$26,2 \pm 1,2$	$28,4 \pm 0,6$	$26,2 \pm 1,9$
Saint-Paul (Large)	$24,2 \pm 0,6$	$26,4 \pm 1,2$	$28,8 \pm 0,6$	$26,3 \pm 2,0$
La Possession (Large)	$24,2 \pm 0,6$	$26,2 \pm 1,0$	$28,6 \pm 0,7$	$26,3 \pm 1,9$
Sainte-Marie (Large)	$23,8 \pm 0,5$	$26,0 \pm 1,2$	$28,2 \pm 0,7$	$25,8 \pm 2,0$
Bras Panon (Large)	$23,6 \pm 0,4$	$25,7 \pm 1,1$	$28,1 \pm 0,7$	$25,8 \pm 2,0$
Saint-Philippe (Large)	$23,7 \pm 0,5$	$25,6 \pm 1,1$	$28,1 \pm 0,6$	$25,7 \pm 1,9$
Petite-Île	$23,9 \pm 0,6$	$26,1 \pm 1,1$	$28,2 \pm 1,1$	$25,9 \pm 2,0$
Saint-Louis	$23,9 \pm 0,5$	$26,0 \pm 1,3$	$28,2 \pm 0,6$	$25,9 \pm 1,9$
Toutes stations confondues	$23,9 \pm 0,5$	$26,1 \pm 1,1$	$28,3 \pm 0,7$	$26,0 \pm 1,9$

5.1.2 Salinité

La salinité moyenne entre 2015 et 2020 et sur toutes les stations confondues est de $35,4 \pm 0,6$. Les moyennes saisonnières sont comprises entre $35,4 \pm 0,6$ et $35,5 \pm 0,5$ (Tableau 4).

La salinité moyenne sur les stations ne permet pas de déterminer de différences entre elles. L'effet de la saisonnalité ne se marque pas non plus.

Tableau 4 : Salinité moyenne à chaque station et à chaque période d'étude

Stations	Salinité moyenne			
	hiver austral (juil-aout-sept)	début été austral (nov-déc)	pic été austral (jan-fév-mars)	2015-2020
L'Ermitage (Large)	$35,5 \pm 0,5$	$35,6 \pm 0,6$	$35,2 \pm 0,6$	$35,5 \pm 0,6$
L'Ermitage	$35,5 \pm 0,5$	$35,6 \pm 0,6$	$35,6 \pm 0,4$	$35,6 \pm 0,5$
Saint-Paul (Large)	$35,5 \pm 0,5$	$35,5 \pm 0,6$	$35,4 \pm 0,6$	$35,5 \pm 0,5$
La Possession (Large)	$35,5 \pm 0,5$	$35,5 \pm 0,6$	$35,6 \pm 0,4$	$35,5 \pm 0,5$
Sainte-Marie (Large)	$35,4 \pm 0,4$	$35,4 \pm 0,6$	$35,5 \pm 0,5$	$35,4 \pm 0,5$
Bras Panon (Large)	$35,0 \pm 0,4$	$35,2 \pm 0,7$	$35,2 \pm 0,4$	$35,1 \pm 0,5$
Saint-Philippe (Large)	$35,1 \pm 0,8$	$35,1 \pm 0,4$	$35,5 \pm 0,7$	$35,2 \pm 0,6$
Petite-Île	$35,7 \pm 0,9$	$35,6 \pm 0,6$	$35,6 \pm 0,6$	$35,6 \pm 0,7$
Saint-Louis	$35,4 \pm 0,6$	$35,6 \pm 0,6$	$35,5 \pm 0,5$	$35,5 \pm 0,5$
Toutes stations confondues	$35,4 \pm 0,6$	$35,5 \pm 0,6$	$35,5 \pm 0,5$	$35,4 \pm 0,6$

5.1.3 Turbidité

La turbidité moyenne entre 2015 et 2020 et sur toutes les stations confondues est de $0,23 \pm 0,34$ FNU. La turbidité moyenne est plus importante lors de l'hiver austral et au milieu de l'été austral avec des valeurs de $0,28 \pm 0,35$ et $0,26 \pm 0,45$ FNU respectivement contre $0,17 \pm 0,2$ FNU au début de l'été austral (Tableau 5).

Les différences de turbidité moyenne entre les stations sont importantes. Bras Panon et Sainte-Marie se démarquent avec des turbidités moyennes élevées de $0,57 \pm 0,58$ et $0,35 \pm 0,34$ FNU respectivement. Les stations dont la turbidité moyenne est située en-dessous de la moyenne globale (L'Ermitage Large, L'Ermitage, La Possession, Saint-Philippe, Petite-Île) n'observent pas ou peu de différences entre les saisons. Les stations dont la turbidité moyenne est située au-dessus de la turbidité moyenne globale (Saint-Paul, Bras Panon, Sainte-Marie et

Saint-Louis) observent une saisonnalité marquée avec des valeurs moyennes plus élevées pendant l'hiver austral et au milieu de l'été austral (Tableau 5).

Tableau 5 : Turbidité moyenne (FNU) à chaque station et à chaque période d'étude

Stations	Turbidité moyenne (FNU)			
	hiver austral (juil-aout-sept)	début été austral (nov-déc)	pic été austral (jan-fév-mars)	2015-2020
L'Ermitage (Large)	0,12±0,09	0,12±0,17	0,13±0,19	0,12±0,15
L'Ermitage	0,16±0,17	0,08±0,08	0,09±0,09	0,11±0,12
Saint-Paul (Large)	0,27±0,29	0,10±0,12	0,43±0,90	0,26±0,51
La Possession (Large)	0,17±0,13	0,15±0,13	0,18±0,16	0,16±0,13
Sainte-Marie (Large)	0,47±0,39	0,26±0,18	0,31±0,41	0,35±0,34
Bras Panon (Large)	0,67±0,70	0,34±0,25	0,71±0,69	0,57±0,58
Saint-Philippe (Large)	0,22±0,30	0,14±0,12	0,16±0,24	0,17±0,23
Petite-Île	0,14±0,13	0,14±0,17	0,16±0,22	0,14±0,17
Saint-Louis	0,27±0,20	0,21±0,33	0,20±0,22	0,23±0,25
Toutes stations confondues	0,28±0,35	0,17±0,20	0,26±0,45	0,23±0,34

5.1.4 Silicates

La concentration moyenne des silicates entre 2015 et 2020 sur toutes les stations confondues est de $5,3 \pm 4,4 \mu\text{mol. L}^{-1}$. La concentration moyenne en silicates du milieu de l'été austral ($6,0 \pm 5,0 \mu\text{mol. L}^{-1}$) est plus élevée que le reste de l'année ($5,0 \pm 3,7$ et $5,0 \pm 4,4 \mu\text{mol. L}^{-1}$ pour l'hiver austral et pour le début de l'été austral respectivement) (Tableau 6). Les stations de Bras Panon et Saint-Philippe sont les seules dont la concentration moyenne en silicates est au-dessus de la moyenne globale avec $8,7 \pm 4,5$ et $11,8 \pm 7,1 \mu\text{mol. L}^{-1}$ (Tableau 6). Les sites de Saint-Paul et Sainte-Marie possèdent aussi des concentrations moyennes en silicates importantes avec des valeurs de $4,6 \pm 4,6$ et $4,8 \pm 1,6 \mu\text{mol.L}^{-1}$.

Tableau 6 : Concentration moyenne en silicates à chaque station et à chaque période d'étude

Stations	Concentration en silicates moyenne (en $\mu\text{mol.L}^{-1}$)			
	hiver austral (juil-aout-sept)	début été austral (nov-déc)	pic été austral (jan-fév-mars)	2015-2020
L'Ermitage (Large)	3,2±0,5	2,8±0,6	4,1±1,9	3,3±1,2
L'Ermitage	3,3±1,0	2,9±0,7	3,5±1,07	3,2±0,9
Saint-Paul (Large)	3,7±1,2	3,3±1,0	7,3±8,2	4,6±4,6
La Possession (Large)	3,7±1,2	3,5±0,8	4,1±0,9	3,8±1,0
Sainte-Marie (Large)	4,7±1,1	4,7±1,8	5,0±1,97	4,8±1,6
Bras Panon (Large)	7,8±2,6	7,4±2,9	11,2±6,8	8,7±4,5
Saint-Philippe (Large)	11,0±7,7	13,5±7,7	10,5±6,1	11,8±7,1
Petite-Île	4,2±1,4	3,4±0,7	4,2±1,5	3,9±1,2
Saint-Louis	3,5±0,6	3,1±0,6	3,5±1,0	3,4±0,7
Toutes stations confondues	5,0±3,7	5,0±4,4	6,0±5,0	5,3±4,4

5.1.5 Phosphates

La concentration moyenne de phosphate entre 2015 et 2020 et sur toutes stations confondues est de $0,10\pm0,04 \mu\text{mol.L}^{-1}$. La concentration moyenne de toutes les stations se situe aux alentours de la moyenne globale. La concentration moyenne de chaque saison est aussi comprise à des valeurs relativement équivalentes à celle de la concentration moyenne (Tableau 7).

Tableau 7 : Concentration moyenne en phosphates à chaque station et à chaque période d'étude

Stations	Concentration en phosphates moyenne (en $\mu\text{mol.L}^{-1}$)			
	hiver austral (juil-aout-sept)	début été austral (nov-déc)	pic été austral (jan-fév-mars)	2015-2020
L'Ermitage (Large)	0,09±0,02	0,08±0,02	0,08±0,02	0,08±0,02
L'Ermitage	0,09±0,02	0,10±0,04	0,09±0,03	0,09±0,03
Saint-Paul (Large)	0,08±0,01	0,08±0,02	0,11±0,06	0,09±0,03
La Possession (Large)	0,09±0,01	0,10±0,05	0,08±0,02	0,09±0,03
Sainte-Marie (Large)	0,10±0,02	0,08±0,02	0,10±0,03	0,09±0,02
Bras Panon (Large)	0,11±0,01	0,09±0,02	0,10±0,04	0,10±0,03
Saint-Philippe (Large)	0,13±0,05	0,15±0,07	0,12±0,04	0,13±0,05
Petite-Île	0,09±0,02	0,08±0,03	0,10±0,04	0,09±0,03
Saint-Louis	0,09±0,01	0,10±0,04	0,11±0,08	0,10±0,05
Toutes stations confondues	0,10±0,02	0,09±0,04	0,10±0,04	0,10±0,04

5.1.6 Nitrites + nitrates

La concentration moyenne en nitrates + nitrites entre 2015 et 2020 et sur toutes les stations confondues est de $0,14 \pm 0,21 \mu\text{mol. L}^{-1}$. Cette concentration moyenne est plus importante lors du milieu de l'été austral avec $0,18 \pm 0,36 \mu\text{mol. L}^{-1}$ contre $0,12 \pm 0,14$ et $0,12 \pm 0,07 \mu\text{mol. L}^{-1}$ pour l'hiver austral et le début de l'été austral, respectivement (Tableau 8).

Les stations de Saint-Paul, Bras Panon et Petite-Île sont les stations avec la concentration en nitrates + nitrites qui est la plus importante avec respectivement $0,19 \pm 0,55$, $0,17 \pm 0,12$ et $0,21 \pm 0,26 \mu\text{mol. L}^{-1}$. On peut noter que sur la station de Saint-Paul, les concentrations moyennes en nitrates + nitrites restent en dessous de la moyenne contrairement au milieu de l'été austral où cette concentration moyenne atteint $0,49 \pm 1,07 \mu\text{mol. L}^{-1}$ (Tableau 8).

Tableau 8 : Concentration moyenne en nitrites + nitrates à chaque station et à chaque période d'étude

Stations	Concentration en nitrites + nitrate moyenne (en $\mu\text{mol.L}^{-1}$)			
	hiver austral (juil-aout-sept)	début été austral (nov-déc)	pic été austral (jan-fév-mars)	2015-2020
L'Ermitage (Large)	$0,08 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,09$	$0,18 \pm 0,18$	$0,13 \pm 0,11$
L'Ermitage	$0,08 \pm 0,01$	$0,15 \pm 0,10$	$0,11 \pm 0,06$	$0,11 \pm 0,08$
Saint-Paul (Large)	$0,08 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,03$	$0,49 \pm 1,07$	$0,19 \pm 0,55$
La Possession (Large)	$0,09 \pm 0,03$	$0,09 \pm 0,03$	$0,11 \pm 0,06$	$0,10 \pm 0,04$
Sainte-Marie (Large)	$0,09 \pm 0,03$	$0,08 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,03$	$0,09 \pm 0,02$
Bras Panon (Large)	$0,20 \pm 0,12$	$0,11 \pm 0,06$	$0,21 \pm 0,15$	$0,17 \pm 0,12$
Saint-Philippe (Large)	$0,13 \pm 0,09$	$0,14 \pm 0,08$	$0,15 \pm 0,15$	$0,14 \pm 0,10$
Petite-Île	$0,27 \pm 0,36$	$0,13 \pm 0,11$	$0,21 \pm 0,26$	$0,21 \pm 0,26$
Saint-Louis	$0,10 \pm 0,06$	$0,11 \pm 0,04$	$0,08 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,04$
Toutes stations confondues	$0,12 \pm 0,14$	$0,12 \pm 0,07$	$0,18 \pm 0,36$	$0,14 \pm 0,21$

5.1.7 Ammonium

La concentration moyenne en ammonium entre 2015 et 2020 et sur toutes les stations confondues est de $0,08 \pm 0,11 \mu\text{mol. L}^{-1}$. Aucune station ne se démarque par rapport à la moyenne globale. On peut noter le pic lors de l'hiver austral sur la station Saint-Louis avec une concentration moyenne de $0,22 \pm 0,5 \mu\text{mol. L}^{-1}$ sur cette saison (Tableau 9).

Tableau 9 : Concentration moyenne en ammonium à chaque station et à chaque période d'étude

Stations	Concentration en ammonium moyenne (en $\mu\text{mol.L}^{-1}$)			
	hiver austral (juil-aout-sept)	début été austral (nov-déc)	pic été austral (jan-fév-mars)	2015-2020
L'Ermitage (Large)	0,06±0,04	0,06±0,02	0,09±0,07	0,07±0,05
L'Ermitage	0,05±0,00	0,06±0,02	0,06±0,03	0,06±0,02
Saint-Paul (Large)	0,06±0,02	0,10±0,13	0,11±0,10	0,09±0,09
La Possession (Large)	0,05±0,00	0,08±0,09	0,08±0,03	0,07±0,06
Sainte-Marie (Large)	0,05±0,00	0,11±0,10	0,06±0,02	0,07±0,06
Bras Panon (Large)	0,05±0,01	0,08±0,09	0,07±0,04	0,07±0,06
Saint-Philippe (Large)	0,06±0,01	0,08±0,08	0,07±0,03	0,07±0,05
Petite-Île	0,05±0,00	0,07±0,04	0,07±0,04	0,06±0,03
Saint-Louis	0,22±0,50	0,06±0,02	0,07±0,04	0,12±0,29
Toutes stations confondues	0,07±0,17	0,08±0,07	0,08±0,05	0,08±0,11

5.2 Paramètres phytoplanctoniques (chlorophylle a, nano- et pico-phytoplancton)

5.2.1 Chlorophylle a

La concentration moyenne en chlorophylle a entre 2015 et 2020 et sur toutes les stations confondues est de $0,14\pm 0,09 \mu\text{g chla. L}^{-1}$. La concentration moyenne en chlorophylle a est minimale au début de l'été austral avec $0,11\pm 0,06 \mu\text{g chla. L}^{-1}$ et maximale au milieu de l'été austral avec $0,17\pm 0,10 \mu\text{g chla. L}^{-1}$ (Tableau 10).

La station Bras Panon est celle qui présente la concentration moyenne la plus élevée avec $0,22\pm 0,1 \mu\text{g chla. L}^{-1}$. Les stations de La Possession, Sainte-Marie, Saint-Philippe et Petite-Île possèdent des concentrations moyennes élevées par rapport au site de référence de L'Ermitage (Large) avec $0,15\pm 0,1$, $0,16\pm 0,1$, $0,15\pm 0,07$, $0,18\pm 0,09 \mu\text{g chla. L}^{-1}$ respectivement contre $0,09\pm 0,06$ (Tableau 10).

Tableau 10 : Concentration moyenne en chlorophylle a à chaque station et à chaque période d'étude

Stations	Concentration en chlorophylle a moyenne (en $\mu\text{g chl}a.L^{-1}$)			
	hiver austral (juil-aout-sept)	début été austral (nov-déc)	pic été austral (jan-fév-mars)	2015-2020
L'Ermitage (Large)	0,09±0,06	0,08±0,05	0,10±0,07	0,09±0,06
L'Ermitage	0,13±0,10	0,10±0,05	0,11±0,04	0,11±0,07
Saint-Paul (Large)	0,11±0,07	0,09±0,04	0,13±0,11	0,11±0,08
La Possession (Large)	0,15±0,10	0,11±0,04	0,20±0,14	0,15±0,10
Sainte-Marie (Large)	0,17±0,12	0,13±0,06	0,20±0,10	0,16±0,10
Bras Panon (Large)	0,17±0,11	0,21±0,09	0,29±0,07	0,22±0,10
Saint-Philippe (Large)	0,13±0,08	0,13±0,06	0,20±0,05	0,15±0,07
Petite-Île	0,17±0,11	0,14±0,05	0,24±0,07	0,18±0,09
Saint-Louis	0,14±0,10	0,11±0,05	0,15±0,06	0,13±0,07
Toutes stations confondues	0,13±0,09	0,11±0,06	0,17±0,10	0,14±0,09

5.2.2 Cytométrie en flux

Les concentrations en nano- et pico-phytoplancton obtenues par cytométrie en flux ne sont présentes que sur les stations de Petite-Île, Saint-Paul et Sainte-Marie (Tableau 1). Ces valeurs de concentrations seront comparées à celles obtenue par Goffart (2020) (Figure 7) sur le site de référence de l'Ermitage (Large). Les valeurs des concentrations du site de référence ont ensuite été utilisées lors de la réalisation des matrices de corrélation et des ACP.

5.2.2.1 Nano-phytoplancton

Sur l'ensemble de la période de l'étude, le nano-phytoplancton total sur les 3 sites (Petite-Île, Saint-Paul et Sainte-Marie) d'étude est d'environ 2500 cellules.mL⁻¹. Les cyanobacteries filamenteuses sont majoritaires au sein du nano-phytoplancton en hiver austral et en milieu d'été austral. Les nano-eucaryotes présentent une concentration d'environ 500 cellules.mL⁻¹ tout au long de l'année et à chaque station (Figure 21).

La saisonnalité est peu marquée sur les sites Petite-Île et Saint-Paul où l'on observe une légère baisse de concentration lors du début de l'été austral. Le site Sainte-Marie observe une moyenne de concentration plus élevée lors de l'hiver austral, atteignant pratiquement les 5000 cellules.mL⁻¹ alors qu'au début et en milieu de l'été austral, on comptabilise moins de 500 cellules.mL⁻¹ (Figure 21).

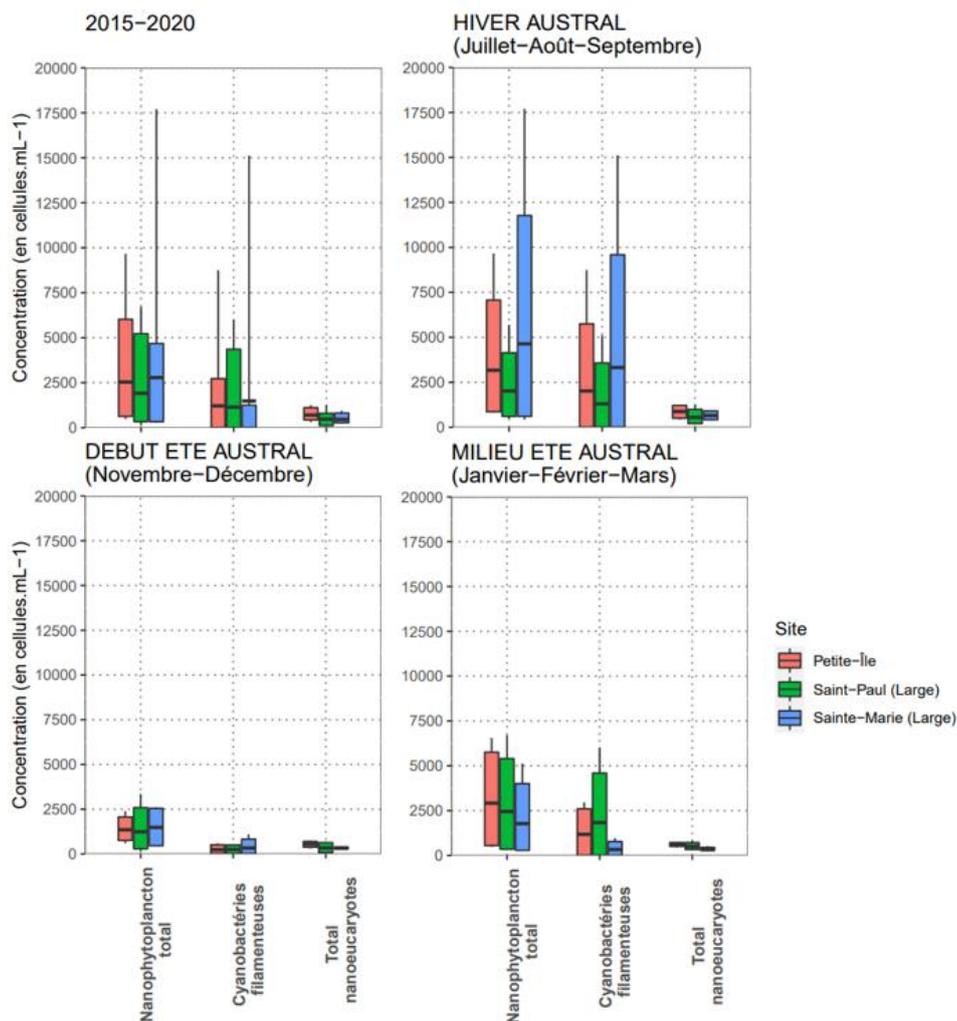


Figure 21 : Boxplots (concentration moyenne, P10, P90, min, max) des abondances du nano-phytoplancton sur les 3 sites (Petite-Île, Saint-Paul, Sainte-Marie) pour les 3 périodes d'échantillonnage (Hiver austral, début de l'été austral et milieu de l'été austral) et pour la totalité de la durée de l'étude (2015-2020). Données issues de cytométrie en flux.

5.2.2.2 Pico-phytoplancton

Sur l'ensemble de la durée de l'étude, la concentration en pico-phytoplancton total aux stations de Petite-Île et Saint-Paul est d'environ 60 000 cellules.mL⁻¹ et de 115 000 cellules.mL⁻¹ au site Sainte-Marie, soit plus du double des 2 autres sites (Figure 22). La saisonnalité est forte : chaque site atteint son pic de concentration moyenne en hiver austral et son minimum au début de l'été austral.

Au sein du pico-phytoplancton, les *Prochlorococcus* sont largement majoritaires par rapport aux *Synechococcus* à chaque saison de l'année sur le site Sainte-Marie. Sur les sites Petite-Île et Saint-Paul, cette tendance s'observe en hiver austral, mais pas lors de l'été austral (début et milieu de l'été austral), période à laquelle les abondances cellulaires de *Synechococcus* et de *Prochlorococcus* sont équivalentes (Figure 22).

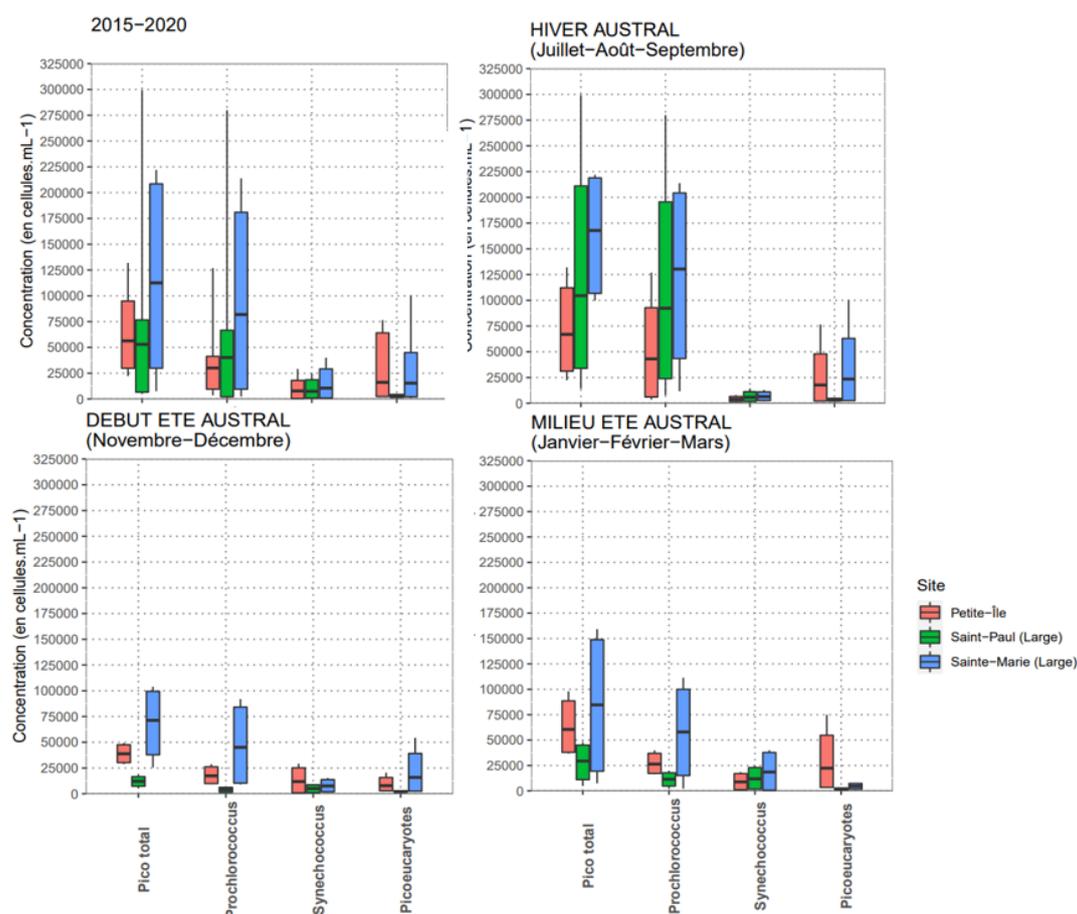


Figure 22 : Boxplots (concentration moyenne, P10, P90, min, max) des abondances du pico-phytoplancton sur les 3 sites (Petite-Ile, Saint-Paul, Sainte-Marie) pour les 3 périodes d'échantillonnage (hiver austral, début de l'été austral et milieu de l'été austral) et pour la totalité de l'étude (2015-2020). Données issues de cytométrie en flux

5.4 Corrélations entre les paramètres physico-chimiques et les paramètres phytoplanctoniques (chlorophylle a, pico-phytoplancton et nano-phytoplancton)

Les valeurs des concentrations moyennes en phosphates sont très basses, homogènes entre les stations et les périodes d'étude ainsi que très proches des limites de détection. Ce paramètre ne sera pas retenu lors de la réalisation des corrélations entre les paramètres physico-chimiques et phytoplanctoniques.

Les corrélations entre les paramètres physico-chimiques et la chlorophylle a, le pico-phytoplancton et le nano-phytoplancton ont été étudiées en considérant (i) l'ensemble des données entre 2015 et 2020 sur les 9 sites, et (ii) chaque période d'étude (hiver austral, début de l'été austral et milieu de l'été austral).

Lorsque l'on prend en compte les données des 9 sites sur l'ensemble de la durée de l'étude (2015-2020), les coefficients de corrélation entre les paramètres physico-chimiques et

les paramètres phytoplanctoniques sont tous $< 0,5$ (Tableau 11), ce qui montre qu'un découpage par saison est nécessaire pour pouvoir mieux comprendre leurs relations.

Tableau 11 : Matrice de corrélation (Spearman) entre les paramètres physico-chimiques et les paramètres phytoplanctoniques (nano et pico-phytoplancton ($n=49$) et chlorophylle a ($n=263$)) lors de l'ensemble de la durée de l'étude (2015-2020) toutes stations confondues. Les cases en gras représentent des corrélations avec une p-value inférieure ou égale à 0,05, *** p-value < 0.001 , ** p-value < 0.01 , * p-value < 0.05 . (Pico=Pico-phytoplancton, Nano=Nano-phytoplancton, cyano fil=Cyanobactéries filamenteuses)

Variabiles	Chlorophylle a	Pico-eucaryotes	Prochlorococcus	Synechococcus	Nano total	Nano-eucaryotes	Nano cyano fil
Ammonium	0,04	0,10	-0,17	-0,27	0,13	-0,09	0,18
Nitrate + nitrite	0,07	0,01	-0,09	-0,16	-0,04	0,13	-0,10
DIN	0,07	0,06	-0,15	-0,18	0,07	0,08	0,01
Silicates	0,34***	0,22	0,41**	0,50***	0,11	0,39**	-0,03
Température	-0,05	-0,29*	-0,33*	0,20	-0,34*	-0,39*	-0,06
Turbidité	0,16*	-0,06	0,47***	0,42**	-0,18	0,24	-0,45***
Salinité	0,31***	-0,11	0,14	0,07	0,59***	0,12	0,40**

5.4.1 Hiver austral (Juillet-Août-Septembre)

Lors de l'hiver austral, la chlorophylle a est corrélée de manière négative avec la température. Une corrélation positive est observée entre la chlorophylle a et la salinité ainsi que dans une moindre mesure avec les nitrites + nitrates (Tableau 12). Ces tendances se confirment avec l'ACP, qui montre à la fois la corrélation négative très forte de la chlorophylle a avec la température ainsi que la corrélation positive avec la salinité (Figure 23A).

Le pico-phytoplancton en général mais plus précisément les *Prochlorococcus* sont positivement corrélés avec la turbidité et les silicates. Les cellules eucaryotes, qu'elles soient pico ou nano-phytoplanctoniques sont négativement corrélées avec la température de l'eau (Tableau 12). L'ACP (Figure 23B) permet de confirmer la corrélation positive entre le pico-phytoplancton et la turbidité et la corrélation négative entre la température et les eucaryotes.

Tableau 12 : Matrice de corrélation (Spearman) entre les paramètres physico-chimiques et les paramètres phytoplanctoniques (nano et pico-phytoplancton (n=20) et chlorophylle a (n=86)) lors de l'hiver austral (2015-2020) toutes stations confondues. Les cases en gris représentent des corrélations avec une p-value inférieure ou égale à 0,05, *** p-value <0.001, ** p-value <0.01, * p-value <0.05. (Pico=Pico-phytoplancton, Nano=Nano-phytoplancton, cyano fil=Cyanobactéries filamenteuses)

Variables	Chlorophylle a	Pico total	Pico-eucaryotes	Prochloro-coccus	Synecho-coccus	Nano total	Nano-eucaryotes	Nano cyano fil
Ammonium	0,02	0,22	0,2	0,27	0,33	0,03	0,44	-0,37
Nitrate + nitrite	0,25**	0,01	0,07	0,11	-0,01	0,07	0,14	-0,09
DIN	0,20	0,19	0,12	0,28	0,17	0,12	0,31	-0,23
Silicates	0,21**	0,50*	0,11	0,56*	0,35	-0,04	0,35	-0,26
Température	-0,76***	-0,58**	-0,56*	-0,28	-0,28	-0,32	-0,78***	0,25
Turbidité	0,05	0,54*	-0,05	0,65**	0,29	0,09	0,21	-0,29
Salinité	0,46***	0,02	-0,42	0,22	0,26	0,39	-0,02	0,19

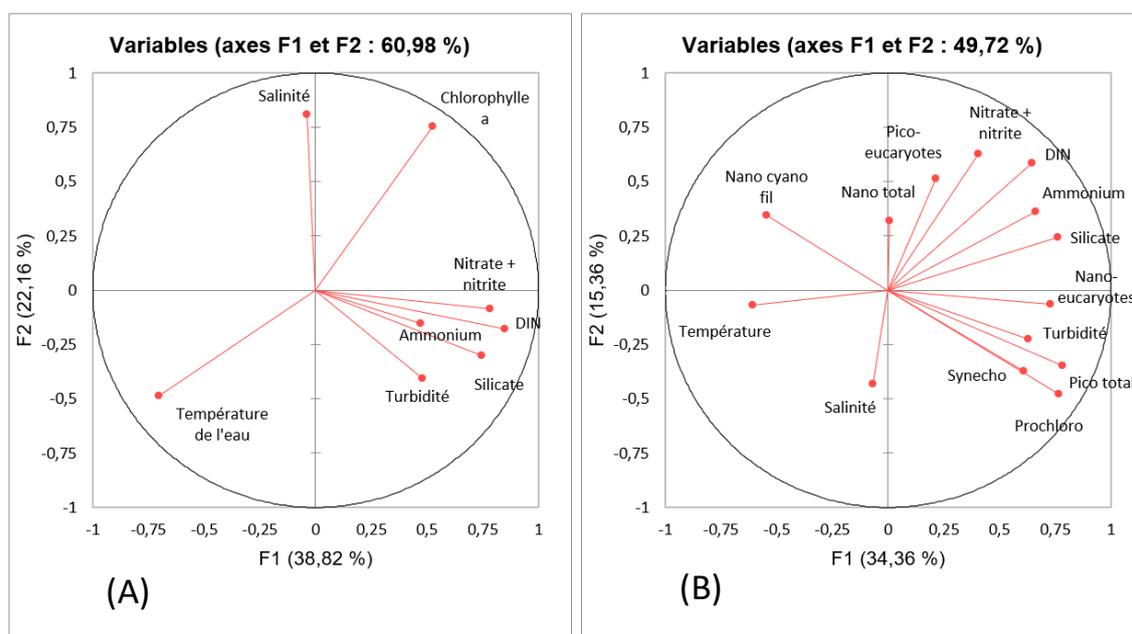


Figure 23 : Analyse de composante principale (ACP) reliant les paramètres physico-chimiques et la chlorophylle a (A) et les groupes phytoplanctoniques (nano et pico-plancton) (B) lors de l'hiver austral (2015-2020) (Pico=Pico-phytoplancton, Nano=Nano-phytoplancton, cyano fil=Cyanobactéries filamenteuses, Synecho=Synechococcus, Prochloro=Prochlorococcus)

5.4.2 Début de l'été austral (Novembre-Décembre)

La salinité est corrélée positivement avec la chlorophylle a. La température est corrélée négativement avec la chlorophylle a mais de manière moins marquée que lors de l'hiver austral. Les DIN sont aussi corrélés négativement avec la chlorophylle a (Tableau 13).

Ces informations se confirment avec l'ACP (Figure 24B), où l'on retrouve la corrélation positive avec la salinité ainsi que la corrélation négative avec les nutriments azotés et la température.

Le pico-phytoplancton, que ce soit les *Synechococcus* et les *Prochlorococcus*, est corrélés positivement avec les silicates. Seuls les *Synechococcus* sont corrélés positivement avec la turbidité. Les cyanobactéries filamenteuses sont négativement corrélées avec la température (Tableau 13). Ces informations ne sont que partiellement confirmées par l'ACP (Figure 24A) puisque la relation entre les *Synechococcus* et la turbidité ainsi que les silicates est évidente mais pas celle entre les silicates et les *Prochlorococcus*. La corrélation négative entre les cyanobactéries filamenteuses et la température de l'eau n'est pas non plus visible sur l'ACP (Figure 24A).

Tableau 13 : Matrice de corrélation (Spearman) entre les paramètres physico-chimiques et les paramètres phytoplanctoniques (nano et pico-phytoplancton (n=14) et chlorophylle a (n=84)) lors du début de l'été austral (2015-2020) toutes stations confondues. Les cases en gras représentent des corrélations avec une p-value inférieure ou égale à 0,05, *** p-value <0.001, ** p-value <0.01, * p-value <0.05. (Pico=Pico-phytoplancton, Nano=Nano-phytoplancton, cyano fil=Cyanobactéries filamenteuses)

Variables	Chlorophylle a	Pico total	Pico-eucaryotes	Prochlorococcus	Synechococcus	Nano total	Nano-eucaryotes	Nano cyano fil
Ammonium	-0,06	-0,35	0,19	-0,37	-0,35	-0,09	-0,5	0,2
Nitrate + nitrite	-0,31**	0,06	0,15	-0,1	0,24	-0,15	0,21	-0,33
DIN	-0,29**	-0,15	0,16	-0,29	0,03	-0,14	-0,06	-0,11
Silicates	0,21	0,67**	0,24	0,56*	0,86***	-0,49	0,37	-0,46
Température	-0,29**	-0,06	-0,17	-0,23	0,54*	-0,59*	0,19	-0,77**
Turbidité	-0,12	0,59*	0,19	0,45	0,76**	-0,34	0,41	-0,5
Salinité	0,32**	-0,26	-0,56*	-0,05	-0,5	0,49	0,06	0,2

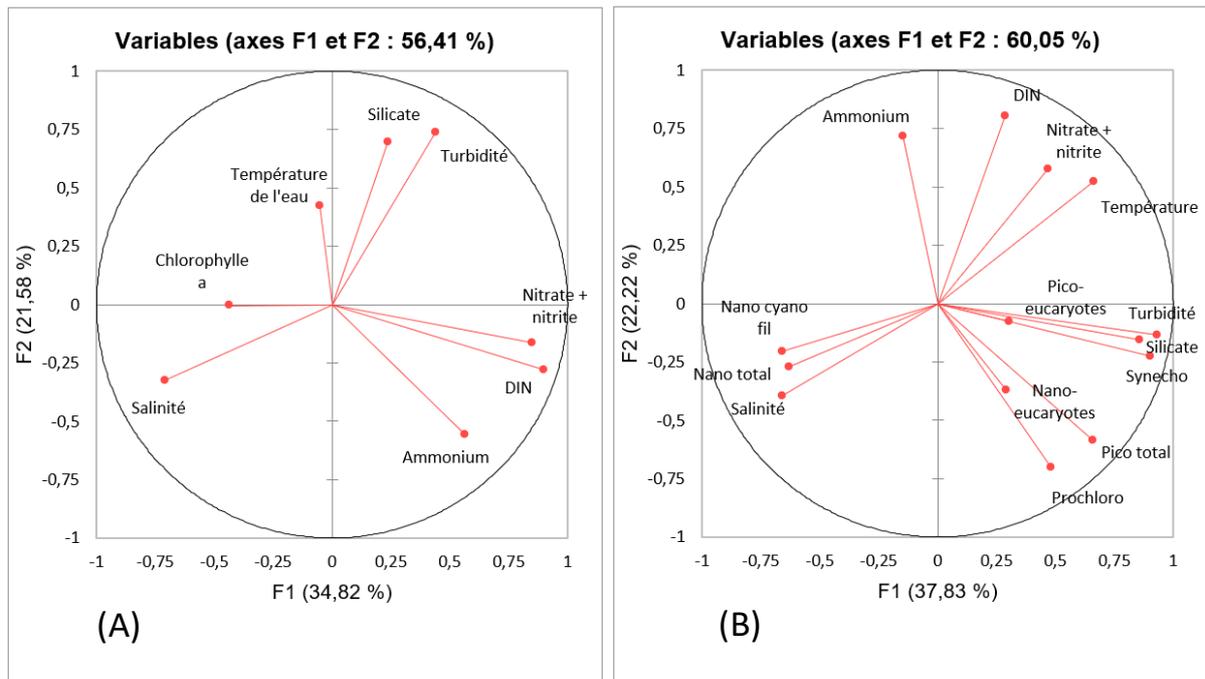


Figure 24 : Analyse de composante principale (ACP) reliant les paramètres physico-chimiques et la chlorophylle a (B) et les groupes phytoplanctoniques (nano et pico-plancton) (A) au début de l'été austral (2015-2020) (Pico=Pico-phytoplancton, Nano=Nano-phytoplancton, eu=Eucaryote, cyano fil=Cyanobactéries filamenteuses, Synecho=Synechococcus, Prochloro=Prochlorococcus)

5.4.3 Milieu de l'été austral (Janvier-Février-Mars)

Les corrélations positives principales avec la chlorophylle a lors du milieu de l'été austral sont les silicates et la turbidité. L'azote inorganique dissout (DIN) est aussi corrélé positivement avec la chlorophylle a (Tableau 16). Comme lors des 2 autres périodes d'échantillonnage, la température est corrélée négativement avec la chlorophylle a (Tableau 16). Ces tendances sont confirmées par l'ACP qui montre clairement la corrélation positive de la chlorophylle a avec les silicates et la turbidité ainsi que la corrélation négative avec la température (Figure 25B).

Les *Synechococcus* sont corrélées négativement avec les nutriments azotés et positivement avec les silicates (Tableau 14). Le nano-phytoplancton et notamment les cyanobactéries filamenteuses sont positivement corrélées avec la salinité et l'ammonium et négativement corrélées à la turbidité (Tableau 14). Toutes ces tendances sont confirmées par l'ACP (Figure 25A).

Tableau 14 : Matrice de corrélation (Spearman) entre les paramètres physico-chimiques et les paramètres phytoplanctoniques (nano et pico-phytoplancton (n=16) et chlorophylle a (n=66)) lors du milieu de l'été austral (2015-2020) toutes stations confondues. Les cases en gris représentent des corrélations avec une p-value inférieure ou égale à 0,05, *** p-value <0.001, ** p-value <0.01, * p-value <0.05. (Pico=Pico-phytoplancton, Nano=Nano-phytoplancton, cyano fil=Cyanobactéries filamenteuses)

Variabiles	Chlorophylle a	Pico total	Pico-eucaryotes	Prochloro-coccus	Synecho-coccus	Nano total	Nano-eucaryotes	Nano cyano fil
Ammonium	0,13	-0,09	0,09	-0,28	-0,62*	0,40	-0,04	0,54*
Nitrate + nitrite	0,28**	-0,09	0,04	0	-0,60*	0,02	0,13	-0,01
DIN	0,30**	-0,14	0,09	-0,14	-0,66**	0,26	0,15	0,24
Silicates	0,57***	0,26	0,21	0,06	0,59*	0,44	0,40	0,27
Température	-0,32***	-0,17	-0,25	-0,24	0,34	-0,37	-0,29	0,03
Turbidité	0,58***	0,07	-0,27	0,43	0,33	-0,20	0,25	-0,52*
Salinité	0,04	0,46	0,44	0,02	0,34	0,64**	0,29	0,77***

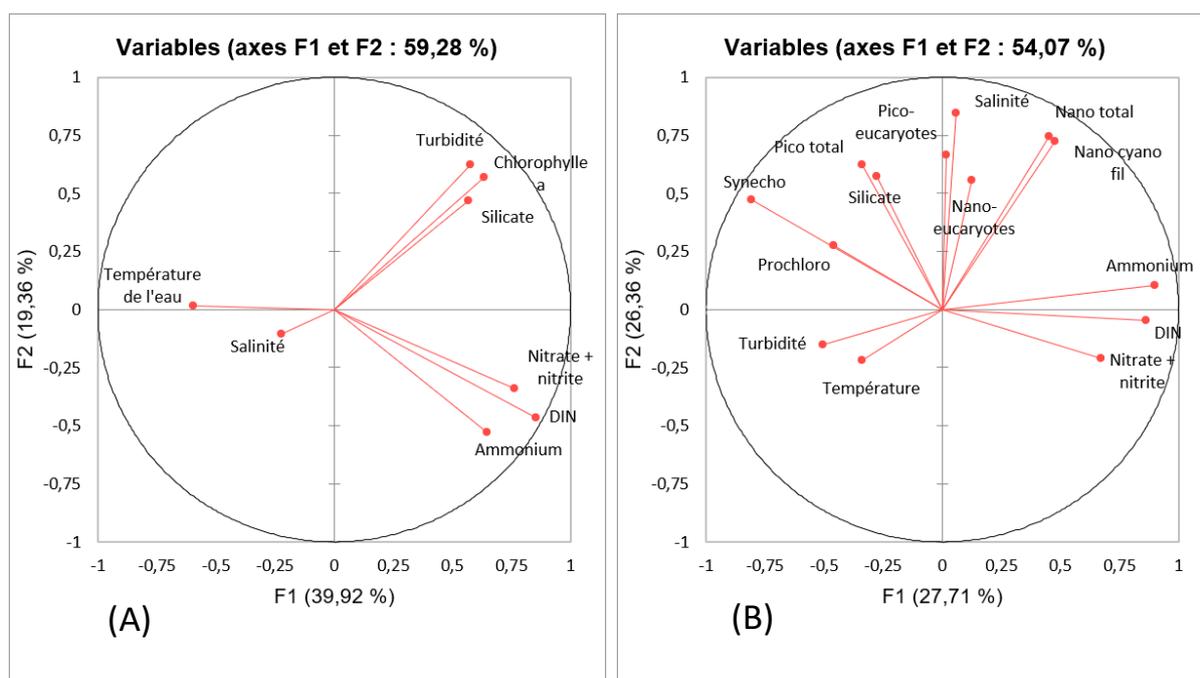


Figure 25 : Analyse de composante principale (ACP) reliant les paramètres physico-chimiques et la chlorophylle a (A) et les groupes phytoplanctoniques (nano et pico-plancton) (B) au milieu de l'été austral (2015-2020) (Pico=Pico-phytoplancton, Nano=Nano-phytoplancton, eu=Eucaryote, cyano fil=Cyanobactéries filamenteuses, Synecho=Synechococcus, Prochloro=Prochlorococcus)

6. Discussion

6.1 Paramètres physico-chimiques

6.1.1 Température

L'évolution de la **température** moyenne de l'eau est typique des océans tropicaux : l'hiver austral constitue la **période** la plus froide puis l'eau se réchauffe pour atteindre un maximum au milieu de l'été austral (Donguy & Meyers, 1996). Les 4 stations les plus chaudes sont situées au nord-ouest de l'île. Cette séparation entre le nord-ouest et le sud-est est aussi mise en évidence par Ganberoni et al., (1984) et sépare les eaux froides sous l'influence des alizées (sud-est) de celles plus chaudes coupées du vent (nord-ouest).

6.1.2 Salinité

La **salinité** moyenne sur toute la durée de l'étude est toujours comprise entre 35,1 et 35,6, ce qui est en accord avec Donguy & Meyers (1996). Aucune saisonnalité ni différence entre les stations n'est observée.

6.1.3 Turbidité et silicates

La re-suspension de sédiments provenant de l'interface eau-sédiment [Fernandes et al., 2018] et l'apport de sédiments par les rivières [Wright & Coleman, 1973][He et al., 2019] sont les principaux phénomènes entraînant une augmentation de la concentration totale de la matière en suspension et donc de la turbidité en eaux côtières.

D'un point de vue saisonnier, les pics de turbidité se situent en hiver austral et au milieu de l'été austral. Lors de la saison « sèche » de **l'hiver austral**, l'augmentation de la turbidité est due à la re-suspension des sédiments de fonds. Ce phénomène est expliqué par une plus faible stratification de la colonne d'eau lors de cette saison plus froide favorisant les perturbations d'origine éolienne [Gaxiola-Castro et al., 1994]. Au **milieu de l'été austral**, les fortes précipitations augmentent le taux d'érosion et donc la charge de sédiments se déversant dans les eaux côtières via les cours d'eau [He et al., 2019]. Au **début de l'été austral**, les précipitations ne sont pas encore importantes et la hausse de la température engendre une stratification limitant les échanges entre le fond et la surface [Sallé et al., 2021].

La même saisonnalité que pour la turbidité est présente pour les **silicates**. La composition basaltique de l'île charge les sédiments érodés par les pluies en silice (voir partie

2.3.2) qui se retrouvent dans les zones côtières via les rivières. Les silicates sont aussi une composante importante des sédiments du plancher continental et sont donc entraînés par la re-suspension des sédiments de l'hiver austral [Fanning et al., 1982].

On observe une forte turbidité et des grandes concentrations en silicates sur le site de Bras-Panon. Ce site se situe à proximité de l'embouchure de la rivière du Mât (Figure 11), qui draine le matériel provenant du cirque de Salazie. Cette hypothèse est étayée par les courants qui se dirigent dans le sens de l'embouchure vers le site de Bras Panon (Figure 12). La même observation est réalisée sur le site de Saint-Paul, qui est situé à proximité de l'embouchure de la rivière des Galets (Figure 11). Les valeurs élevées des concentrations en silicates peuvent aussi être en partie expliquées par la nature meuble du substrat associé aux sites de Saint-Paul et Bras-Panon (voir partie 4.2).

Les concentrations en silicates et turbidité du site de Saint-Philippe sont différentes : la concentration en silicate moyenne globale est la plus élevée parmi les 9 sites mais sa turbidité moyenne globale fait partie des plus faibles. Etant donné qu'aucune rivière ne se déverse dans cette zone (Figure 11), l'hypothèse est que les apports en silicates proviennent directement de l'érosion due aux précipitations, sans passer par les cours d'eau. Cette zone est en effet une des plus pluvieuses de l'île (Figure 8) et les pentes y sont comprises entre 20 et 30° [Michon & Saint-Ange, 2008].

6.1.4 Ammonium

La concentration moyenne d'**ammonium** reste faible et ne diffère pas significativement des valeurs du point de référence de l'Ermitage Large. Cela peut s'expliquer par le fait que l'ammonium est la forme la moins stable de l'azote. L'ammonification est en effet la première étape du cycle de l'azote dans l'océan et ce nutriment est rapidement utilisé [Chester and Jickells 2012]. L'atome d'azote dans l'ammonium est de plus utilisé préférentiellement par le phytoplancton, dû à son plus faible coût énergétique [Amniot & Kérouel, 2004].

Les concentrations en **nitrate** + **nitrite** correspondent à des zones oligotrophes [Goffart 2020]. Les 3 sites dont la concentration moyenne sur toute la durée de l'étude se démarque sont Saint-Paul, Bras Panon et Petite-Île.

Sur le site Saint-Paul, cette augmentation de concentration est due à un pic important lors du milieu de l'été austral. Cette période correspond au pic de pluviométrie, on peut donc faire l'hypothèse que ce pic de nitrites + nitrates est imputable au ruissellement urbain, en raison de la forte urbanisation de la zone (Figure 14). Saint-Paul étant situé dans la zone la plus touristique de l'île (Figure 17) et le mois de janvier correspondant à une période touristique importante (Figure 18), une hausse des rejets issus du traitement des eaux usées causée par l'augmentation de la population ce mois-ci semble aussi plausible.

Sur les sites de Bras Panon et Petite-Île, les concentrations en nitrate + nitrite connaissent 2 pics : un lors de l'hiver austral et un lors du milieu de l'été austral. Le site de Saint-Philippe connaît cette même évolution saisonnière mais dans des concentrations moins élevées. Le pic lors du milieu de l'été austral peut s'expliquer par les fortes pluies. Ces 3 sites sont en effet situés dans des zones côtières qui subissent de fortes pressions azotées via le ruissellement agricole (Figure 15).

Le pic de concentration en nitrites + nitrates de l'hiver austral est lié à la remise en suspension de nutriments ayant sédimenté induite par une faible stratification de la colonne d'eau [Fanning et al., 1981].

6.2 Chlorophylle a

Les concentrations en **chlorophylle a** observées au point de référence l'Ermitage (Large) sont proches des concentrations de moins de $0.07 \mu\text{g.L}^{-1}$ observées dans le gyre de l'Océan Indien sud [Polovina et al., 2008] et qui sont considérées comme ultra-oligotrophes [Morel et al., 2010] [Goffart, 2020]. Les concentrations moyennes en chlorophylle a observées sur le site de référence sont plus faibles que sur les 8 autres sites étudiés (Tableau 10) ce qui suggère que les sels nutritifs provenant de l'île peuvent influencer les concentrations de chlorophylle a.

Les concentrations saisonnières moyennes en chlorophylle a observent leur maximum lors de la saison des pluies (milieu de l'été austral) et leur minimum lors du début de cette saison des pluies (début de l'été austral) comme c'est typique dans les eaux côtières tropicales [Dominguez-Hernandez et al., 2020]

Lors de **l'hiver austral**, la forte corrélation négative entre la chlorophylle a et la température s'explique par le mixage des eaux de surface. Les eaux froides sont en effet plus riches en nutriments via la re-suspension de nutriments et permettant un meilleur

développement du phytoplancton. La pluviométrie est faible à cette période et les apports en nutriments via les cours d'eau sont faibles.

Lors du **début de l'été austral**, le minimum des concentrations en chlorophylle a est observé. Cela est expliqué par le fait que la stratification se met en place à cause de réchauffement des eaux de surface (Tableau 3) et que les pluies ne sont pas aussi importantes que lors du milieu de l'été austral. Ces 2 phénomènes induisent une baisse de l'apport en nutriments et donc de plus faibles concentrations en chlorophylle a. De plus, la majorité des nutriments présents lors de l'hiver austral ont été consommés par la production de phytoplancton.

Lors du **milieu de l'été austral**, la turbidité et les concentrations en silicates sont les valeurs les mieux corrélées positivement avec la chlorophylle a. La pluviométrie intense de cette saison entraîne une érosion et un apport terrestre important via les rivières. Une corrélation est aussi présente pour les nitrites + nitrates, provenant certainement des lessivages des sols engendrés par ces mêmes événements pluvieux.

Les stations dont la concentration en chlorophylle a sont les plus élevées sont celles de La Possession, Sainte-Marie, Bras-Panon, Saint-Philippe et Petite-Île. Le point commun de ces stations est qu'elles sont toutes « au vent », c'est-à-dire qu'elles sont situées dans la zone dont la pluviométrie est très importante (Figure 8), ce qui a pour conséquence d'augmenter les apports fluviaux en nutriments. Les stations de Bras-Panon et de Petite-Île semblent être les plus touchées : il est clair que les valeurs élevées des concentrations en chlorophylle a sont provoquées par les fortes concentrations en nitrites + nitrates d'origine agricole.

Un point important à noter est que malgré de fortes pressions de la part de l'agriculture (Figure 15), l'urbanisation (Figure 12), le tourisme et les apports en matière organique d'origine fluviale, les concentrations en nutriments restent bien plus faibles que dans de nombreuses zones côtières eutrophisées [Xu et al., 2010] [Arndt et al., 2011]. Une explication pourrait être la forte influence qu'on les vents sur l'île. La houle et les courants pourraient en effet évacuer ces nutriments plus au large et ainsi minimiser leur impact sur les concentrations en chlorophylle a côtières. Ces résultats sont résumés dans la figure 26.

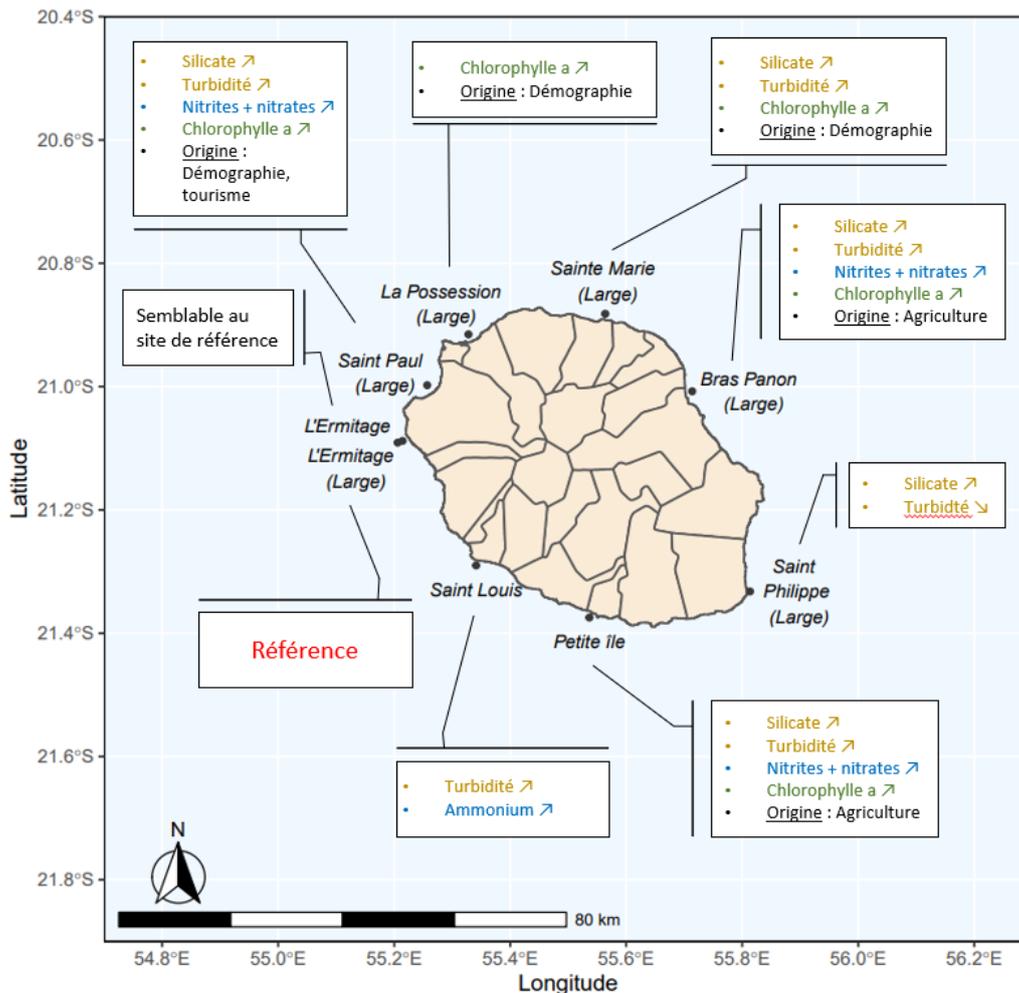


Figure 26 : Récapitulatif des influences des paramètres physico-chimiques sur chaque site de l'étude (modifié à partir de la Figure 20)

6.3 Communautés phytoplanctoniques (nano et pico-phytoplancton)

La figure 27 compile les concentrations en nano- et pico-phytoplancton sur les 3 sites étudiés (Sainte-Marie, Petit-Île et Saint-Paul) ainsi que sur le site de référence.

6.3.1 Nano-phytoplancton

Les concentrations moyennes en nano-phytoplancton total entre 2015 et 2020 sont multipliées par un facteur 2 entre les concentrations au site de référence l'Ermitage (Large) et les concentrations des 3 sites de Saint-Paul, Petite-Île et Sainte-Marie, passant d'environ 1250 (Figure 7B) à 2500 cellules.mL (Figure 21).

L'évolution saisonnière des concentrations moyennes de nano-phytoplancton des sites Petite-Île et Saint-Paul est identique à celle de l'Ermitage (Large) : le maximum est atteint lors de l'hiver austral et du milieu de l'été austral. La saisonnalité de la concentration en nano-

phytoplancton au site Sainte-Marie est différente de celle du site de référence : le maximum est atteint en hiver austral alors que les 2 autres périodes d'étude correspondent à des concentrations très faibles.

Le nano-phytoplancton ne semble pas être influencé par les pressions d'origines anthropiques de fait de la majorité de corrélations avec des paramètres naturels comme la température ou la turbidité ainsi qu'une saisonnalité identique au site de référence.

6.3.2 Pico-Phytoplancton

Les concentrations moyennes en pico-phytoplancton total entre 2015 et 2020 sont multipliées par un facteur 2 entre les concentrations au site l'Ermitage (Large) et les concentrations des sites Petite-Île et Saint-Paul, passant d'environ 30 000 à 60 000 cellules.mL. Les concentrations moyennes globales sur cette période en nano-phytoplancton total sont quant à elles multipliées par 4 au site Sainte-Marie, dont la valeur atteint près de 120 000 cellules.mL

L'évolution saisonnière des concentrations moyennes de pico-phytoplancton des 3 sites est comparable : un maximum de concentration en hiver austral et un minimum au début de l'été austral. Cette saisonnalité est différente de celle observée au site de référence. Le minimum y est en effet atteint lors de l'hiver austral (Figure 7A).

En **hiver austral**, la corrélation positive entre la température, la turbidité et les silicates et le pico-phytoplancton total semble montrer que le pic de concentration observé à cette saison est lié à la fois à la re-suspension des sédiments et à l'apport de nutriments par les rivières. Les stations de Sainte-Marie et Petite-Île sont en effet situées « au vent », c'est-à-dire que les précipitations sont présentes même en hiver austral (MétéoFrance). Ces 2 phénomènes n'influencent pas le site de référence, ce qui pourrait expliquer les différences de concentrations en pico-phytoplancton à cette saison.

Le pic de concentration en pico-phytoplancton de l'hiver austral est grandement dû à l'augmentation de la concentration en *Prochlorococcus* (Figure 23) qui possèdent une forte corrélation positive avec la turbidité et les silicates. Cette corrélation n'étant présente qu'en hiver austral, l'hypothèse peut être faite que ce sont les remontés de nutriments depuis le fond qui sont responsables de ces augmentations de concentration.

Au **début de l'été austral**, la corrélation entre les silicates et la turbidité avec la concentration de pico-phytoplancton total montre encore une influence de l'apport fluvial. Cette hypothèse est corroborée par le fait qu'à cette saison, les concentrations en pico-phytoplancton au site Saint-Paul sont très faibles par rapport aux autres sites (Figure 22). Ce site est en effet situé « sous le vent » et que les précipitations y sont encore relativement faibles à cette saison.

Au **milieu de l'été austral**, aucune corrélation significative n'est observée pour le pico-phytoplancton total. La forte corrélation négative entre les nutriments azotés et les *Synechococcus* pourrait être expliquée par la capacité de fixation de l'azote atmosphérique (N₂) par certaines souches de *Synechococcus* [Bergman et al., 2006] dont certaines ne sont découvertes que récemment [Singh & Bhadury, 2019]. Mais l'explication la plus probable reste que, même si les *Synechococcus* se développent lors d'apports en nutriments, des concentrations trop importantes en nutriments azotés inhibent la production des *Synechococcus* [Agawin et al., 2000].

Le pico-phytoplancton, en particulier les *Prochlorococcus*, semble être influencé par les pressions d'origines insulaires, notamment en hiver austral où les concentrations y sont différentes de celles du point de référence. On peut cependant noter que les forçages sur cette classe de taille sont majoritairement dus aux phénomènes naturels comme la turbidité, la concentration en silicates et la température.

La figure 27 résume les concentrations en nano- et pico-phytoplancton sur les 3 sites étudiés ainsi que sur le site de référence.

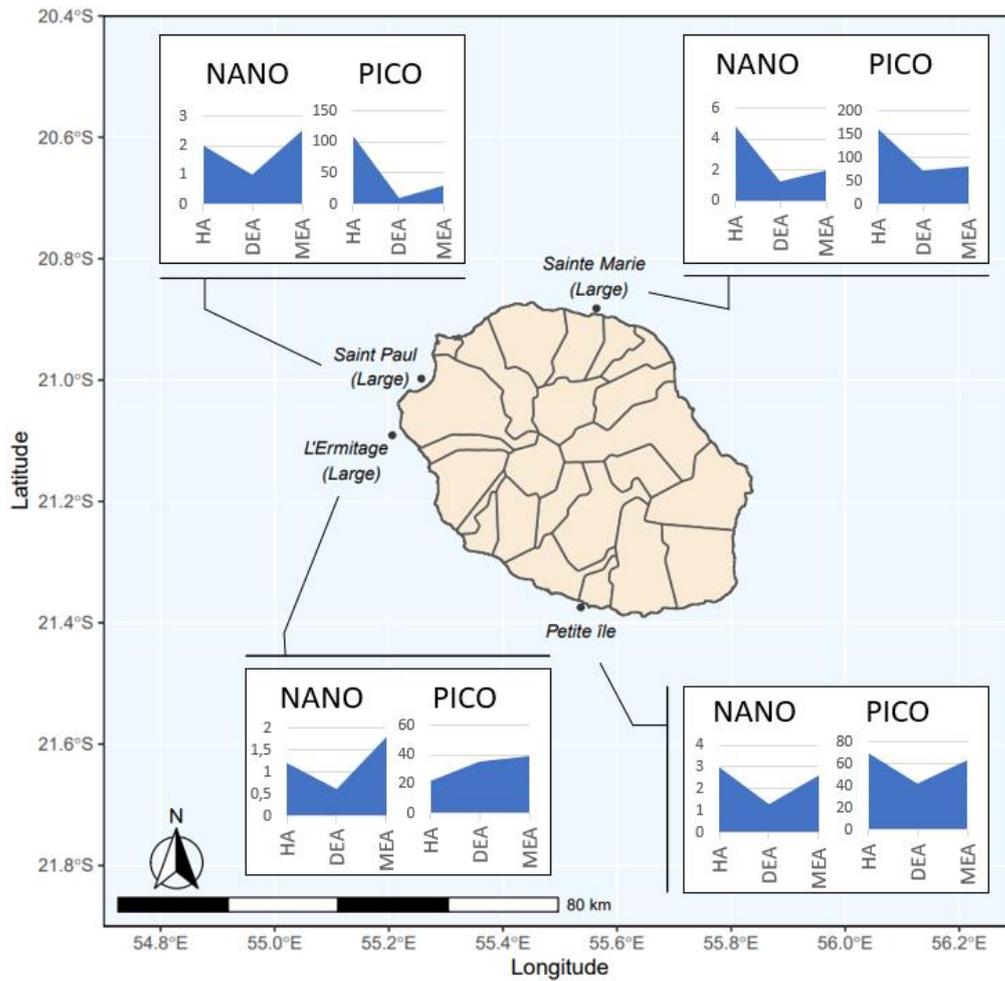


Figure 27 : Carte récapitulative des concentrations en nano- et pico-phytoplancton aux 3 sites étudiés (Sainte-Marie, Petite-Île et Saint-Paul) et du site de référence Ermitage (Large). Les concentrations sont en 10³ cellules.mL. NANO=nano-phytoplancton, PICO=Pico-phytoplancton, HA=Hiver austral, MEA=Milieu de l'été austral, DEA=Début de l'été austral)(Modifiée à partir de la Figure 20)

7. Conclusion

L'analyse des activités humaines de l'île de la Réunion montre de fortes pressions sur le littoral, notamment d'origine agricole et urbaine. Cependant, les mesures de concentrations en sels nutritifs sur les stations de l'étude ne reflètent pas l'importance de ces pressions. L'impact sur la biomasse phytoplanctonique s'en retrouve donc limité. Une des raisons expliquant cette différence pourrait être le régime éolien de l'île. Les vents engendrent en effet des houles et des courants entraînant au large les sels nutritifs. Des stations d'étude plus proches des côtes, des estuaires et des zones urbanisées pourraient permettre de résoudre ce problème.

La comparaison entre les concentrations de chlorophylle a au site de référence l'Ermitage Large et les 8 sites côtiers de la Réunion suggère que les sels nutritifs provenant de l'île peuvent influencer la biomasse phytoplanctonique côtière. Ce sont les phénomènes naturels comme la baisse de la température de l'eau en hiver et le transport de particules via les cours d'eau qui jouent le rôle le plus important dans la régulation de la biomasse phytoplanctonique totale. Des pressions induites par les nutriments azotés lors du milieu de l'été austral sont tout de même visibles sur les stations à proximité des zones agricoles (Sainte-Marie, Petite-Île) et du site Saint-Paul, une zone fortement urbanisée et touristique.

L'étude du nano-phytoplancton montre que même si les concentrations sont plus importantes, la saisonnalité reste identique ce qui signifierait que cette classe de taille est surtout impactée par des pressions d'origine naturelle.

L'étude du pico-phytoplancton montre que la saisonnalité est différente par rapport à celle du site de référence. Les périodes d'étude du début de l'été austral (novembre-décembre) et du milieu de l'été austral (janvier-février-mars) conservent les mêmes tendances comparées au site de référence. L'hiver austral connaît cependant des concentrations bien plus importantes en pico-phytoplancton, notamment due à une forte augmentation de la concentration en *Prochlorococcus*. Cette modification semblerait cependant ne pas être d'origine anthropique mais liée à la resuspension des nutriments, facilitée par le refroidissement de la température de l'eau lors de l'hiver austral.

. L'étude du micro-phytoplancton nous permettrait d'avoir un point de vue plus global sur l'ensemble des communautés phytoplanctoniques de l'île.

Bibliographie

- Agawin, N. S., Duarte, C. M., and Agusti, S. (2000). Response of Mediterranean *Synechococcus* growth and loss rates to experimental nutrient inputs. *Marine Ecology Progress Series*, 206(August 2014) :97–106.
- Ahlgren, N. A. and Rocap, G. (2006). Culture isolation and culture-independent clone libraries reveal new marine *Synechococcus* ecotypes with distinctive light and N physiologies. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(11) :7193–7204.
- Aminot, A. and K erouel, R. (2004a). Dissolved organic carbon, nitrogen and phosphorus in the N-E Atlantic and the N-W Mediterranean with particular reference to nonrefractory fractions and degradation. *Deep-Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, 51(12) :1975–1999.
- Aminot, A. and K erouel, R. (2004b). *Hydrologie des écosystèmes marins : paramètres et analyses*. Ifremer edition.
- Aminot, A. and K erouel, R. (2007). *Dosage automatique des nutriments dans les eaux marines : méthodes en flux continu*. Ifremer edition.
- Arndt, S., Lacroix, G., Gypens, N., Regnier, P., and Lancelot, C. (2011). Nutrient dynamics and phytoplankton development along an estuary-coastal zone continuum : A model study. *Journal of Marine Systems*, 84(3-4) :49–66. B.
- Bergman, J.R. Gallon, A.N. Rai, L. S. (1996). N₂ Fixation by non-heterocystous cyanobacteria. *FEMS Microbiology Reviews*, 19 :139–185.
- Barlow, R., Lamont, T., and Gibberd, M.-J. (2011). Phytoplankton size classes for pigments and absorption : CHEMTAX versus chlorophyll weighted coefficients.
- Barlow, R., Stuart, V., Lutz, V., Sessions, H., Sathyendranath, S., Platt, T., Kyewalyanga, M., Clementson, L., Fukasawa, M., Watanabe, S., and Devred, E. (2007). Seasonal pigment patterns of surface phytoplankton in the subtropical southern hemisphere. *Deep-Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, 54(10) :1687–1703.
- Beardall, J., Stojkovic, S., and Larsen, S. (2009). Living in a high CO₂ world : Impacts of global climate change on marine phytoplankton. *Plant Ecology and Diversity*, 2(2) :191– 205. 2
- Beaufort, L., Probert, I., De Garidel-Thoron, T., Bendif, E. M., Ruiz-Pino, D., Metzl, N., Goyet, C., Buchet, N., Coupel, P., Grelaud, M., Rost, B., Rickaby, R. E., and De Vargas, C. (2011). Sensitivity of coccolithophores to carbonate chemistry and ocean acidification. *Nature*, 476(7358) :80–83.
- Berube, P. M., Biller, S. J., Kent, A. G., Berta-Thompson, J. W., Roggensack, S. E., Roache-Johnson, K. H., Ackerman, M., Moore, L. R., Meisel, J. D., Sher, D., Thompson, L. R.,

- Campbell, L., Martiny, A. C., and Chisholm, S. W. (2015). Physiology and evolution of nitrate acquisition in *Prochlorococcus*. *ISME Journal*, 9(5) :1195–1207.
- Berube, P. M., Coe, A., Roggensack, S. E., and Chisholm, S. W. (2016). Temporal dynamics of *Prochlorococcus* cells with the potential for nitrate assimilation in the subtropical Atlantic and Pacific oceans. *Limnology and Oceanography*, 61(2) :482–495.
- Blanchard, J. L., Jennings, S., Holmes, R., Harle, J., Merino, G., Allen, J. I., Holt, J., Dulvy, N. K., and Barange, M. (2012). Potential consequences of climate change for primary production and fish production in large marine ecosystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 367(1605) :2979–2989.
- Bouchard, J. N., Roy, S., and Campbell, D. A. (2006). Symposium-in-Print : UV Effects on Aquatic and Coastal Ecosystems UVB Effects on the Photosystem II-D1 Protein of Phytoplankton and Natural Phytoplankton Communities. *Photochemistry and Photobiology*, 82 :936–951.
- Bret, L., Fevre, Y., Join, J. L., Robineau, B., and Bachelery, P. (2003). Deposits related to degradation processes on Piton des Neiges Volcano (Reunion Island) : Overview and geological hazard. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123(1-2) :25–41.
- Brewin, R. J., Sathyendranath, S., Hirata, T., Lavender, S. J., Barciela, R. M., and Hardman-Mountford, N. J. (2010). A three-component model of phytoplankton size class for the Atlantic Ocean. *Ecological Modelling*, 221(11) :1472–1483.
- CAUE et DEAL de La Réunion (2015). Densité et qualité urbaine. Comité Régional du Tourisme de la Réunion (2020). Fréquentation touristique.
- Chester, R., & Jickells, T. (2012). *Marine geochemistry* 3rd ed. *London (UK): Willey-Blackwell*.
- Díez, B., Nylander, J. A., Ininbergs, K., Dupont, C. L., Allen, A. E., Yooseph, S., Rusch, D. B., and Bergman, B. (2016). Metagenomic analysis of the Indian Ocean picocyanobacterial community : Structure, potential function and evolution. *PLoS ONE*, 11(5) :1– 20. 3
- Direction de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DEAL) – RÉUNION (2015). *Industrie & Environnement à la Réunion*.
- Domínguez-Hernández, G., Cepeda-Morales, J., Soto-Mardones, L., Rivera-Caicedo, J. P., Romero-Rodríguez, D. A., Inda-Díaz, E. A., Hernández-Almeida, O. U., and RomeroBañuelos, C. (2020). Semi-annual variations of chlorophyll concentration on the Eastern Tropical Pacific coast of Mexico. *Advances in Space Research*, 65(11) :2595–2607.
- Donguy, J. R. and Meyers, G. (1996). Seasonal variations of sea-surface salinity and temperature in the tropical Indian Ocean. *Deep-Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, 43(2) :117–138.
- Ducklow, H. W., Steinberg, D. K., and Buesseler, K. O. (2001). Upper Ocean Carbon Export and the Biological Pump. *Oceanography*, 14. Dunne, J. P., Armstrong, R. A., Gnnadesikan,

- A., and Sarmiento, J. L. (2005). Empirical and mechanistic models for the particle export ratio. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(4) :1–16.
- Fanning, K. A., Carder, K. L., and Betzer, P. R. (1982). Sediment resuspension by coastal waters : a potential mechanism for nutrient re-cycling on the ocean's margins. 29(8).
- Fernandes, L. L., Rao, V. P., Kessarkar, P. M., and Suresh, S. (2018). Estuarine turbidity maximum in six tropical minor rivers, central west coast of India. *Hydrology Research*, 49(4) :1234–1254.
- Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., and Falkowski, P. (1998). Primary Production of the Biosphere : Integrating Terrestrial and Oceanic Components. *Science*, 281.
- Fitton, J. G. (2021). *Basalt and Related Rocks*. Elsevier Inc., 2 edition.
- Gamberoni, L., Geronimi, J., & Murail, J. F. (1984). Structure hydrologique aux abords immédiats de l'île de La Réunion en période hivernale (août.–sept. 1982). *Comm. Natl. Fr. Rech. Antarct*, 55, 41-47.
- Gao, K., Zhang, Y., and Häder, D. P. (2018). Individual and interactive effects of ocean acidification, global warming, and UV radiation on phytoplankton. *Journal of Applied Phycology*, 30(2) :743–759.
- Garcin, M., Poisson, B., and Pouget, R. (2005). High rates of geomorphological processes in a tropical area : The Remparts River case study (Réunion Island, Indian Ocean). *Geomorphology*, 67(3-4) :335–350.
- Gaxiola-Castro, G., Garcia-Cordova, J., Eduardo Valdez-Holguin, J., and BotelloRuvalcaba, M. (1995). Spatial distribution of chlorophyll α and primary productivity in relation to winter physical structure in the Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 15(9). 4
- Glibert, P. M., Wilkerson, F. P., Dugdale, R. C., Raven, J. A., Dupont, C. L., Leavitt, P. R., Parker, A. E., Burkholder, J. M., and Kana, T. M. (2016). Pluses and minuses of ammonium and nitrate uptake and assimilation by phytoplankton and implications for productivity and community composition, with emphasis on nitrogen-enriched conditions. *Limnology and Oceanography*, 61(1) :165–197.
- Goericke, R. and Welschmeyer, N. A. (1998). Response of Sargasso Sea phytoplankton biomass, growth rates and primary production to seasonally varying physical forcing. *Journal of Plankton Research*, 20(12) :2223–2249.
- Goffart, A. (2020). PROJET « INDICES PHYTOPLANCTONIQUES POUR LES EAUX COTIERES DE LA REUNION ». Grégori, G., Colosimo, A., and Denis, M. (2001). Phytoplankton group dynamics in the Bay of Marseilles during a 2-year survey based on analytical flow cytometry. *Cytometry*, 44(3) :247–256.
- GT DCE Réunion (2020). Fascicule technique pour la mise en oeuvre des suivis "PhysicoChimie et Phytoplankton" des réseaux de contrôle de surveillance DCE dans l'océan Indien.

- Häder, D. P. and Gao, K. (2015). Interactions of anthropogenic stress factors on marine phytoplankton. *Frontiers in Environmental Science*, 3(MAR) :1–14.
- Halac, S. R., Guendulain-García, S. D., Villafaña, V. E., Helbling, E. W., and Banaszak, A. T. (2013). Responses of tropical plankton communities from the Mexican Caribbean to solar ultraviolet radiation exposure and increased temperature. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 445 :99–107.
- Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., and Eakin, C. M. (2008). Change and Ocean Acidification. (December 2007) :1737–1743. He, Z., Jia, L., Jia, Y., and He, J. (2020). Effects of flood events on sediment transport and deposition in the waterways of Lingding Bay, Pearl River Delta, China. *Ocean and Coastal Management*, 185(November) :105062.
- Institut d'émission des départements d'outre-mer (IEDOM) (2018). Rapport annuel La Réunion 2017.
- Karl D. M., J. R. Christian, J. E. Dore, D. V. H. and R. M. Letelier, L. M. Tupas, C. D. W. (1996). Seasonal and interannual variability in primary production and particle flux at Station ALOHA. *Deep Sea Research*, 43(SPEC. ISSUE 65) :539–568.
- Khatiwala, S., Primeau, F., and Hall, T. (2009). Reconstruction of the history of anthropogenic CO₂ concentrations in the ocean. *Nature*, 462(7271) :346–349.
- Kywalyanga, M. (2015). Phytoplankton Primary Production. In *Regional state of the coast report : Western Indian Ocean*, chapter 16, pages 213–230. 5 Laws, E. A., Falkowski, P. G., Smith, W. O.,
- Ducklow, H., and McCarthy, J. J. (2000). Temperature effects on export production in the open ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(4) :1231–1246.
- Le Berre, I., Louze, J., and David, L. (2012). Atlas de sensibilité du littoral aux pollutions marines, Dispositif opérationnel ORSEC départemental de la Réunion. Annexe technique du dispositif spécifique Polmar-Terre.
- Leal, M. C., Sá, C., Nordez, S., Brotas, V., and Paula, J. (2009). Distribution and vertical dynamics of planktonic communities at Sofala Bank, Mozambique. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84(4) :605–616. Li, Y.,
- Nwankwegu, A. S., Huang, Y., Norgbey, E., Paerl, H. W., and Acharya, K. (2020). Evaluating the phytoplankton, nitrate, and ammonium interactions during summer bloom in tributary of a subtropical reservoir. *Journal of Environmental Management*, 271(March) :110971.
- Limbu, S. M. and Kywalyanga, M. S. (2015). Spatial and temporal variations in environmental variables in relation to phytoplankton composition and biomass in coral reef areas around Unguja, Zanzibar, Tanzania. *SpringerPlus*, 4(1).
- Lindley, D. (1988). CFCs cause part of ozone decline. *Nature*, 332(6162) :293.

Louvat, P., Jean, C., and Gre, A. (1997). Present denudation rates on the island of Réunion determined by river geochemistry : Basalt weathering and mass budget between chemical and mechanical erosions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(17).

Michon, L. and Saint-Ange, F. (2008). Morphology of Piton de la Fournaise basaltic shield volcano (La Réunion Island) : Characterization and implication in the volcano evolution. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 113(3) :1–19.

Moore, L. R., Post, A. F., and Rocap, G. (2002). MOORE, LISA R., ANTON F. POST, GABRIELLE ROCAP, AND SALLIE W. CHISHOLM Utilization of different nitrogen sources by the marine cyanobacteria *Prochlorococcus* and *Synechococcus*, 989-996. *47(4)* :1–8.

Morel, A., Claustre, H., and Gentili, B. (2010). The most oligotrophic subtropical zones of the global ocean : Similarities and differences in terms of chlorophyll and yellow substance. *Biogeosciences*, 7(10) :3139–3151.

Nwankwegu, A. S., Li, Y., Huang, Y., Wei, J., Norgbey, E., Sarpong, L., Lai, Q., and Wang, K. (2019). Harmful algal blooms under changing climate and constantly increasing anthropogenic actions : the review of management implications. *3 Biotech*, 9(12). 6

Olofsson, M., Karlberg, M., Lage, S., and Ploug, H. (2017). Phytoplankton community composition and primary production in the tropical tidal ecosystem, Maputo Bay (the Indian Ocean). *Journal of Sea Research*, 125 :18–25.

Partensky, F. and Vaultot, D. (1999). Cyanobacterial photosynthetic apparatus : an overview. *Marine Cyanobacteria*, 19(19) :457–475. Pastres, R., Solidoro, C., Ciavatta, S., Petrizzo, A., and Cossarini, G. (2004). Long-term changes of inorganic nutrients in the Lagoon of Venice (Italy). *Journal of Marine Systems*, 51(1-4 SPEC. ISS.) :179–189.

Polovina, J. J., Howell, E. A., and Abecassis, M. (2008). Ocean's least productive waters are expanding. *Geophysical Research Letters*, 35(3) :2–6. R, C. and TD, J. (2012). *Marine biochemistry*.

Raj, R. P., Peter, B. N., and Pushpadas, D. (2010). Oceanic and atmospheric influences on the variability of phytoplankton bloom in the Southwestern Indian Ocean. *Journal of Marine Systems*, 82(4) :217–229.

Riebesell, U. and Tortell, P. D. (2011). Effects of ocean acidification on pelagic organisms and ecosystems. In *Ocean Acidification*, chapter 6, pages 99–121.

Ropert, M., Duval, M., Maurel, L., Vermenot, C., Mouquet, P., Nicet, J.-B., Talec, P., and Le Goff, R. (2012). *Projet " Bon Etat II " Actualisation de l'état des lieux du SDAGE, volet eaux côtières réunionnaises Rapport final*.

Sá, C., Leal, M. C., Silva, A., Nordez, S., André, E., Paula, J., and Brotas, V. (2013). Variation of phytoplankton assemblages along the Mozambique coast as revealed by HPLC and microscopy. *Journal of Sea Research*, 79 :1–11.

Schiewer, U. (1998). 30 years of eutrophication in shallow brackish waters -lessons to be learned In :Eutrophication in Marine Ecosystems : Food Web Dynamics and Elemental Cycling.

Schlüter, L., Henriksen, P., Nielsen, T. G., and Jakobsen, H. H. (2011). Phytoplankton composition and biomass across the southern Indian Ocean. *Deep-Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, 58(5) :546–556.

Singh, T. and Bhadury, P. (2019). Description of a new marine planktonic cyanobacterial species *synechococcus moorigangaii* (Order chroococcales) from sundarbans mangrove ecosystem. *Phytotaxa*, 393(3) :263–277.

Sinha, R. P., Kumar, A., Tyagi, M. B., and Häder, D. P. (2005). Ultraviolet-B-induced destruction of phycobiliproteins in cyanobacteria. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 11(2) :313–319. 7

Sisavath, E., Babonneau, N., Saint-Ange, F., Bachèlery, P., Jorry, S. J., Deplus, C., De Voogd, B., and Savoye, B. (2011). Morphology and sedimentary architecture of a modern volcanoclastic turbidite system : The Cilaos fan, offshore La Réunion Island. *Marine Geology*, 288(1-4) :1–17.

Upton, B. G. and Wadsworth, W. J. (1966). The basalts of Réunion Island, Indian Ocean. *Bulletin Volcanologique*, 29(1) :7–23.

Wright, L. D. and Coleman, J. M. (1973). Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 57(2 (Feb. 1973)) :370–398.

Xu, H., Paerl, H. W., Qin, B., Zhu, G., and Gao, G. (2010a). Xu, Hai, Hans W. Paerl, Boqiang Qin, Guangwei Zhu, and Guang Gao. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. *Limnol. Oceanogr.*, 55(1), 2010, 420–432. *Limnology and Oceanography*, 55(1) :420–432.

Xu, J., Yin, K., Lee, J. H., Liu, H., Ho, A. Y., Yuan, X., and Harrison, P. J. (2010b). Long-term and seasonal changes in nutrients, phytoplankton biomass, and dissolved oxygen in deep bay, Hong Kong. *Estuaries and Coasts*, 33(2) :399–416.

Zhao, C. S., Shao, N. F., Yang, S. T., Ren, H., Ge, Y. R., Zhang, Z. S., Feng, P., and Liu, W. L. (2019). Quantitative assessment of the effects of human activities on phytoplankton communities in lakes and reservoirs. *Science of the Total Environment*, 665 :213–225.

Zhou, Y., Hu, B., Zhao, W., Cui, D., Tan, L., and Wang, J. (2018). Effects of increasing nutrient disturbances on phytoplankton community structure and biodiversity in two tropical seas. *Marine Pollution Bulletin*, 135(March) :239–248.