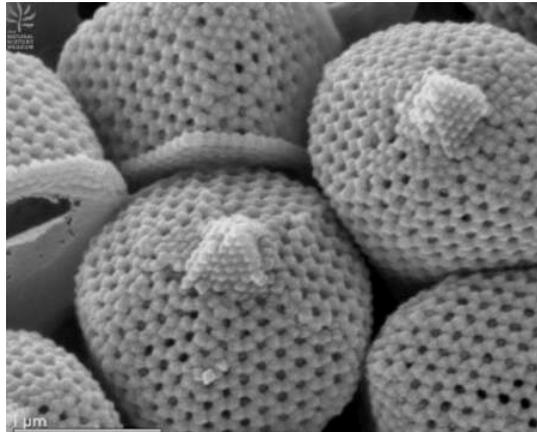




OFB
OFFICE FRANÇAIS
DE LA BIODIVERSITÉ



Syracosphaera pulchra eol.org

Indices phytoplanctoniques pour les eaux côtières de La Réunion

Rapport final

Anne GOFFART, Université de Liège
A.Goffart@uliege.be

Décembre 2021

Document réalisé dans le cadre du contrat de recherche et développement relatif au projet « Indices phytoplanctoniques pour les eaux côtières de La Réunion » entre l'Agence Française pour la Biodiversité et l'Université de Liège.

- **AUTEUR**

Anne GOFFART, Université de Liège, A.Goffart@uliege.be

- **CONTRIBUTEUR**

- **CORRESPONDANTS**

Maïa AKOPIAN, Office Français de la Biodiversité, maia.akopian@ofb.gouv.fr

Olivier MONNIER, Office Français de la Biodiversité, olivier.monnier@ofb.gouv.fr

Droits d'usage : [par ex. accès libre ou accès réservé à XXX]

Niveau géographique : national

Couverture géographique : La Réunion

Niveau de lecture : Professionnels et experts

DECEMBRE 2021

Indices phytoplanctoniques pour les eaux côtières de La Réunion

- **RESUME**

Le projet vise à mettre en place un indicateur « Phytoplancton » qui soit adapté aux spécificités des eaux côtières de La Réunion et qui cible en particulier la composition. Le travail se base l'expertise développée dans les eaux côtières corses. Il valorise les données de surface acquises entre 2015 et 2020 dans le cadre de la DCE par le Réseau Hydrologique Littoral Réunionnais (RHLR) et bancarisées dans Quadrige².

Les paramètres hydrologiques et la chlorophylle *a* totale (fluorimétrie) sont suivis 6 fois par an à 9 stations, dont un point de référence. Les abondances cellulaires des fractions pico- et nano-phytoplanctoniques (cytométrie en flux) et les dénombrements de flore totale du microphytoplancton et du « grand » nanophytoplancton (comptages) sont réalisés 3 fois par an à 4 stations. La signature pigmentaire du phytoplancton total (mesures HPLC) est mesurée 6 fois par an à 2 stations.

L'analyse des résultats montre que le forçage physique très fort auquel sont soumises les eaux côtières de La Réunion entraîne une dilution rapide des nutriments provenant des bassins versants. Il en résulte un contraste fort entre les pressions intenses issues des bassins versants et liées à l'urbanisation du littoral, à l'agriculture et au tourisme et l'oligotrophie ou l'ultra-oligotrophie des stations étudiées.

Aucune station du réseau de surveillance « Phytoplancton » ne se situant directement au droit d'une pression particulière, l'amplitude des concentrations en nutriments et des paramètres phytoplanctoniques est très faible. Les données disponibles ne permettent pas de sélectionner les variables phytoplanctoniques qui répondent aux proxys de pression, prérequis pour développer des indices de composition phytoplanctoniques écologiquement significatifs. Des suggestions pour remédier à ce constat sont faites.

- **MOTS CLES (THEMATIQUE ET GEOGRAPHIQUE)**

Phytoplancton, floristique, cytométrie en flux, pigments HPLC, nutriments, pressions, indice de composition phytoplanctonique, Océan Indien, La Réunion.

Indices phytoplanctoniques pour les eaux côtières de La Réunion

SYNTHESE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE

Le projet vise à mettre en place un indicateur « Phytoplancton » qui soit adapté aux spécificités des eaux côtières de La Réunion et qui cible en particulier la composition. Le travail se base l'expertise développée dans les eaux côtières corses. Il valorise les données de surface acquises entre 2015 et 2020 dans le cadre de la DCE par le Réseau Hydrologique Littoral Réunionnais (RHLR) et bancarisées dans Quadrigé².

Les paramètres hydrologiques et la chlorophylle *a* totale (fluorimétrie) sont suivis 6 fois par an à 9 stations, dont un point de référence. Les abondances cellulaires des fractions pico- et nano-phytoplanctoniques (cytométrie en flux) et les dénombrements de flore totale du microphytoplancton et du « grand » nanophytoplancton (comptages) sont réalisés 3 fois par an à 4 stations. La signature pigmentaire du phytoplancton total (mesures HPLC) est mesurée 6 fois par an à 2 stations.

L'analyse des résultats montre que le forçage physique très fort auquel sont soumises les eaux côtières de La Réunion entraîne une dilution rapide des nutriments provenant des bassins versants. Il résulte un contraste fort entre les pressions intenses issues des bassins versants et liées à l'urbanisation du littoral, à l'agriculture et au tourisme et l'oligotrophie ou l'ultra-oligotrophie des stations étudiées : partout, les concentrations en nutriments azotés et en phosphates sont basses ou très basses, les moyennes sur la période d'étude (2015 - 2020) étant respectivement de $0.09 \pm 0.20 \mu\text{M}$ pour NO_3 et de $0.10 \pm 0.04 \mu\text{M}$ pour PO_4 . Néanmoins, l'analyse des paramètres environnementaux réalisée sur les 9 stations permet de distinguer le groupe des « stations au vent » (Sainte-Marie, Bras-Panon, Saint-Philippe, Petite Ile) et le groupe des stations « sous le vent » (L'Ermitage Large, Saint-Louis, L'Ermitage, Saint-Paul et La Possession). Les stations au vent, qui subissent de plein fouet les Alizés et des précipitations extrêmement abondantes, se distinguent des stations sous le vent par des températures de l'eau un peu moins élevées, une salinité plus faible, une eau généralement plus turbide et des concentrations en NO_3 , PO_4 , Si(OH)_4 et chl *a* plus élevées.

Cependant, la composition du phytoplancton n'étant pas étudiée au niveau des stations qui présentent les conditions environnementales les plus contrastées (Bras-Panon et de Saint-Philippe), les différences entre « stations au vent » et « stations sous le vent » s'atténuent ou disparaissent quand on considère les variables phytoplanctoniques. Les communautés de 4 stations « Phytoplancton » sont dominées par le picophytoplancton et les *Prochlorococcus* en particulier. Elles sont typiques des milieux ultra-oligotrophes de l'Océan Indien tropical et subtropical. Dès lors, très peu de corrélations significatives sont mises en évidence entre les groupes phytoplanctoniques et les nutriments azotés : les seules corrélations positives concernent les diatomées et les picoeucaryotes qui répondent respectivement aux NO_3 et à l'azote inorganique dissous. L'analyse des corrélations positives entre les nutriments et les pigments phytoplanctoniques, mesurés seulement à deux stations, n'apporte que peu d'informations supplémentaires, essentiellement en raison de la faible amplitude des concentrations en nutriments et en pigments qui caractérisent les sites étudiés. Les concentrations en PO_4 sont trop faibles pour être exploitées. Dès lors, si ces résultats ouvrent la voie à des recherches complémentaires, les données disponibles ne permettent pas de sélectionner les variables phytoplanctoniques qui répondent le mieux aux variations des concentrations en nutriments, prérequis pour développer des indices de composition phytoplanctoniques écologiquement significatifs (*e.g.* Birk et al. 2012, Garmendia et al. 2013, Goffart 2019).

A La Réunion, il nous paraît dès lors utile :

1. d'acquérir des données complémentaires dans des zones caractérisées par un gradient croissant d'eutrophisation et/ou par une concentration des pressions (*e.g.* Baie de Saint-Paul), en mettant l'accent sur les mesures de cytométrie en flux et sur les analyses pigmentaires par HPLC;
2. d'augmenter la fréquence des prélèvements pour mieux intégrer les variations temporelles des communautés et tendre vers un suivi bi-mensuel des communautés;
3. de pérenniser ces suivis à moyenne fréquence pendant au moins la durée d'un plan de gestion (6 ans) afin de disposer de suffisamment de données pour définir des seuils et calculer des incertitudes.

La nouvelle feuille de route des suivis phytoplanctoniques devrait aussi envisager de développer un indice de composition élargi à l'Océan Indien tropical et subtropical, en cohérence avec la grille de chl *a* définie pour les territoires ultramarins de l'Océan Indien. L'intégration des données de Mayotte, où des concentrations en chl *a* et en PO₄ plus élevées qu'à la Réunion sont observées (*cfr* visualisation des données via SURVAL), apporterait une partie des informations manquantes.

Sachant que dans les eaux côtières de Zanzibar, les concentrations en chl *a* sont corrélées positivement avec les concentrations en phosphates et en nitrates d'origine anthropique (Limbu & Kyewalyanga 2015) et qu'à l'île Maurice, l'abondance du microphytoplancton total, des diatomées et des cyanobactéries est corrélée positivement aux forts gradients de nutriments (NO₃ : 0.1 - 25 µM, PO₄ : 0.1 - 6 µM) (Sadally et al. 2014), il serait utile de développer des partenariats avec les scientifiques et les gestionnaires des îles voisines afin de mutualiser les données et d'améliorer notre connaissance de la réponse du phytoplancton tropical et subtropical aux pressions.

Birk S., Bonne W., Borja A., Brucet S., Courrat A., Poikane S., Solimini A., van de Bund W., Zampoukas N., Hering D. (2012). Three hundred ways to assess Europe's surface waters : An almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive. *Ecological Indicators* 18, 31-41.

Garmendia M., Borja Á., Franco J., Revilla M. (2013). Phytoplankton composition indicators for the assessment of eutrophication in marine waters : Present state and challenges within the European directives. *Marine Pollution Bulletin* 66, 7-16.

Goffart A. (2019). Consolidation de l'indice composition IC Médit pour les eaux côtières de Méditerranée. Rapport final de l'action 1 du projet « Indicateur de composition phytoplanctonique ». Convention de subvention ONEMA - Université de Liège, 38 pp.

GTs DCE La Réunion et Mayotte « Physico-Chimie et Phytoplancton » (2019). Fascicule technique pour la mise en oeuvre des suivis « Paramètres Physico-Chimiques & Phytoplancton » des réseaux de contrôle de surveillance DCE dans l'océan Indien, 61 pp.

Limbu S.M., Kyewalyanga 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, 646.

Sadally S.B., Taleb-Hossenkhan N., Bhagooli R. (2014). Spatio-temporal variation in density of microphytoplankton genera in two tropical coral reefs of Mauritius. *African Journal of Marine Science* 36, 423-438.

SOMMAIRE

Résumé	3
Mots clés (thématique et géographique)	3
Synthèse pour l'action opérationnelle	4
1. Contexte de l'étude et objectifs du travail	7
2. Principaux forçages hydrologiques et climatiques à La Réunion	8
2.1 Les houles et le courant océanique	8
2.2 Les précipitations, les brises de mer et les courants côtiers	9
3. Les pressions sur les eaux côtières de La Réunion	10
3.1 Les eaux usées	11
3.2 Le ruissellement urbain	12
3.3 L'agriculture	12
4. Sites d'étude, échantillonnage, source et traitement des données	14
5. Caractérisation des eaux côtières de La Réunion	15
5.1 Paramètres hydrologiques	15
5.2 Sels nutritifs	17
5.3 Biomasse phytoplanctonique totale	18
5.3.1 Précision sur les termes « chl <i>a</i> » et « Tchl <i>a</i> »	18
5.3.2 Biomasse phytoplanctonique au point de référence Ermitage Large	19
5.3.3 Biomasse phytoplanctonique de l'ensemble des stations	20
5.4 Pico- et nano-phytoplancton	20
5.5 Microphytoplancton	23
5.6 Pigments phytoplanctoniques (mesures HPLC)	25
6. Relations entre les paramètres environnementaux et les variables phytoplanctoniques	26
7. Discussion et conclusions	29
8. Liste des légendes et des tableaux	31
9. Références	33
10. Remerciements	35

1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE ET OBJECTIFS DU TRAVAIL

La DCE prévoit une évaluation de la qualité des eaux fondée sur plusieurs éléments. Le phytoplancton figure parmi les éléments de qualité biologique retenus pour la classification de l'état écologique des masses d'eau littorales. Il doit être évalué à partir de trois indices : la biomasse, l'abondance et la composition.

Au niveau européen, seule la chlorophylle a (chl *a*), utilisée pour l'indice de biomasse, fait l'objet d'un consensus. Sa réponse aux pressions a été intercalibrée, mais les métriques et les méthodes de calcul varient entre les états membres (Carletti & Heiskanen 2009).

Dans les eaux côtières françaises, l'indice de biomasse a été défini par le percentile 90 de la concentration en chlorophylle a (P_{90} chl *a*), qui correspond à une valeur telle que 90% des observations lui sont inférieures (Soudant & Belin 2010). A La Réunion, le P_{90} chl *a* est calculé sur l'ensemble des mesures effectuées au cours des 6 ans d'un plan de gestion. La grille retenue pour la biomasse est celle de l'Océan Indien. La valeur de référence est de $0.40 \mu\text{g chl } a \text{ L}^{-1}$ et la limite inférieure du bon état est fixée à $0.90 \mu\text{g chl } a \text{ L}^{-1}$ (Ropert et al. 2012).

Quand ils sont développés, les indices d'abondance se basent sur les résultats de dénombrement de taxons exprimés en nombre de cellules L^{-1} et sur le dépassement éventuel de valeurs seuils variables selon les tailles des cellules et les groupes de masses d'eau (Soudant & Belin 2010). Néanmoins, les relations entre l'abondance et les pressions ne sont pas bien connues (UNEP/MAP 2011).

L'importance des changements de composition phytoplanctonique dus aux activités anthropiques a été reconnue par la DCE (Ní Longphuirt et al. 2019). La réponse aux proxys de pression des indices de composition phytoplanctoniques est une condition préalable pour qu'ils soient écologiquement significatifs (e.g. Birk et al. 2012, Garmendia et al. 2013). Néanmoins, cette réponse n'est pas toujours testée (e.g. Lampert 2017). Dans d'autres cas, le choix des indices retenus (e.g. indice de diversité de Menhinick) repose sur la bonne correspondance entre les classifications issues de ces indices et les évaluations antérieures basées sur d'autres données de nutriments ou de phytoplancton) (Spatharis & Tsirtsis 2010).

Lors d'un travail antérieur réalisé dans les eaux côtières de Méditerranée Occidentale, nous avons développé un nouvel indice de composition phytoplanctonique, l'indice ICPP Médit (Goffart 2019). Cet indice a été conçu pour être robuste scientifiquement mais facile à mettre en œuvre par des acteurs ne disposant pas d'expertise spécifique en biodiversité et en écologie du phytoplancton. Notre démarche a été de sélectionner *a priori* les variables phytoplanctoniques qui répondent le mieux aux variations des concentrations en nutriments pour construire l'indice de composition ICPP Médit. Cette approche, retenue aussi par Pachès et al. (2013), se base sur l'analyse écologique des spécificités des communautés phytoplanctoniques des régions étudiées. Elle nous semble mieux adaptée aux systèmes oligotrophes et ultra-oligotrophes que sont la Corse et La Réunion que celles qui testent uniquement *a posteriori* la sensibilité d'indicateurs aux pressions estimées (i) à dire d'experts (e.g. Lugoli et al. 2012), (ii) par des métriques fortement agrégées (moyennes annuelles des concentrations en sels nutritifs, Lampert & Farinas 2018) ou par des approches de type Lusival difficiles à mettre en œuvre (Romero et al. 2013). De plus, notre approche contient des informations qui peuvent indiquer une altération précoce ou saisonnière des communautés phytoplanctoniques, ces informations n'étant pas mises en évidence par des indices basés sur un traitement uniquement statistique des données (e.g. indices de similarité ou de diversité).

A La Réunion comme en Corse, les eaux côtières sont soumises à un forçage hydrodynamique important. Les communautés phytoplanctoniques des sites de référence corses et réunionnais présentent des biomasses relativement faibles (respectivement généralement < 1.0 et $< 0.7 \mu\text{g chl } a \text{ L}^{-1}$), des abondances

cellulaires comparables et des communautés dominées par des cellules de petite taille (nano- et pico-phytoplancton) (e.g. Kyewalyanga 2016, Goffart 2020).

L'objectif de ce projet est d'exporter l'expertise développée dans les eaux côtières méditerranéennes, et corses en particulier, aux eaux côtières de La Réunion pour mettre en place des indices phytoplanctoniques, ciblant en particulier la composition. Les travaux utilisent et valorisent les données existantes bancarisées dans Quadrige².

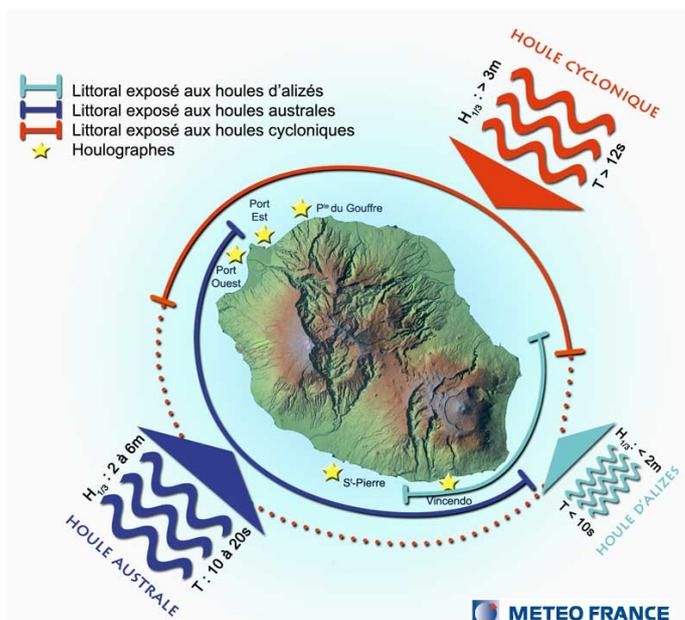
2. PRINCIPAUX FORÇAGES HYDROLOGIQUES ET CLIMATIQUES A LA REUNION

2.1 Les houles et le courant océanique

La Réunion est soumise à un forçage hydrologique important. Elle est affectée par trois catégories de houles d'origine et de caractéristiques (longueur d'onde, périodes) différentes (Figure 1). Ces houles ont un impact important sur les côtes et contribuent au renouvellement des masses d'eau côtières. On distingue :

- **Les houles d'Alizés**, petites à modérées et de courte période. Elles résultent des Alizés établis de secteur Est à Sud-Est. Elles affectent principalement les côtes Nord, Est et Sud de l'île et épargnent habituellement la côte Ouest.
- **Les houles cycloniques**, générées par les tempêtes et cyclones tropicaux. Ce sont de grandes houles qui concernent principalement les côtes Nord et Est de l'île et peuvent engendrer des dégâts considérables.
- **Les houles australes**, modérées à fortes, qui sont de grande longueur d'onde. Elles sont générées par les tempêtes des moyennes latitudes (40^{èmes} et 50^{èmes} Sud), et se propagent vers le Nord-Est sur de très longues distances. Elles n'affectent que les côtes Ouest et Sud de l'île et peuvent engendrer des dégâts comparables à ceux occasionnés par les houles cycloniques.

Figure 1. Représentation schématique des houles qui affectent La Réunion (source : Météo France).



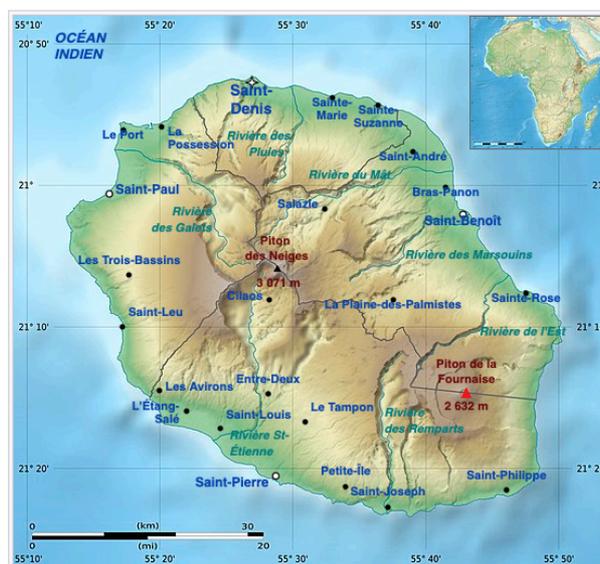
A l'échelle océanique, La Réunion est soumise à l'influence d'un Courant Sud-Equatorial qui s'écoule à une vitesse moyenne de 0.5 nœuds d'Est en Ouest, sur près de 2000 km de large. Le régime des vents dominants, les Alizés, entraîne une circulation générale de surface venant du Sud-Sud-Est tout au long de l'année (Jamon 2002).

2.2 Les précipitations, les brises de mer et les courants côtiers

En raison de sa proximité avec le tropique du Capricorne, La Réunion bénéficie d'un climat tropical humide, globalement marqué par deux saisons : l'hiver austral (saison fraîche et sèche), de mai à octobre, et l'été austral (saison chaude et humide marquée par des pluies parfois violentes et des cyclones), de novembre à avril.

Le relief apporte une grande dissymétrie dans le climat des régions Est et Ouest de l'île. Il est très accidenté, particulièrement dès qu'on s'éloigne du littoral. Les massifs du Piton des Neiges et du Piton de la Fournaise culminent respectivement à 3 071 et 2 632 m (Figure 2).

Figure 2. Géographie de la Réunion (source : Wikipédia)



La côte Est, ou région « au vent », est très exposée aux Alizés. Pendant la saison humide, l'humidité océanique apportée par les Alizés se condense sur les reliefs. Les cumuls de pluie qui en résultent sont importants. Ils atteignent des valeurs maximales dans la zone Sud-Est. Certaines années, ils dépassent 10 mètres par an, ce qui est exceptionnel à l'échelle mondiale (Figure 3). La direction de provenance des Alizés est en moyenne Est-Sud-Est, mais elle oscille entre Nord-Est et Sud-Est (<http://www.meteofrance.re/climat/description-du-climat>).

A l'inverse, la côte Ouest, « sous le vent », bénéficie de l'abri du relief. Les précipitations y sont nettement moins importantes que sur la côte Est (Figure 3) et les régimes de brise y sont prédominants (<http://www.meteofrance.re/climat/description-du-climat>). Les brises de mer (brises thermiques) s'installent en cours de matinée et soufflent vers la côte, perpendiculairement à celle-ci. Elles s'additionnent au flux d'Alizés, ce qui crée des vents de direction Est-Sud-Est sur la façade Nord et Sud-Sud-Est sur la façade Sud Ouest (Figure 4). En soirée, les brises de mer disparaissent et les brises de terre s'installent. Les résultantes des brises de terre et du flux d'Alizés ont alors des directions qui favorisent le renouvellement des eaux côtières.

Figure 3. Cumul des précipitations à La Réunion en 2019 (source : Météo France).

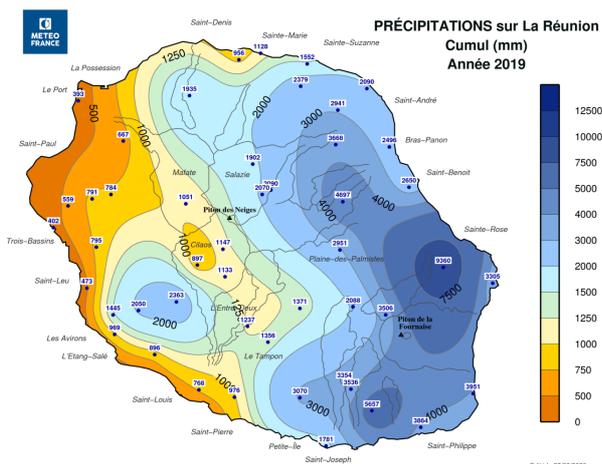
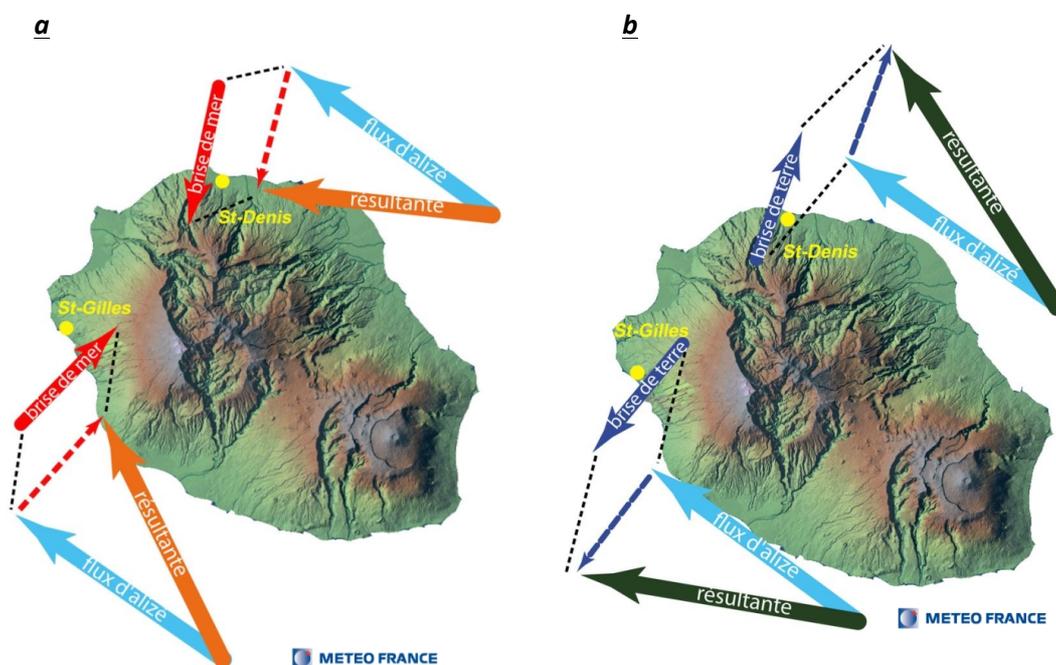


Figure 4. Influence des brises de mer (a) et de terre (b) sur la direction du vent dominant à La Réunion (source : Météo France)



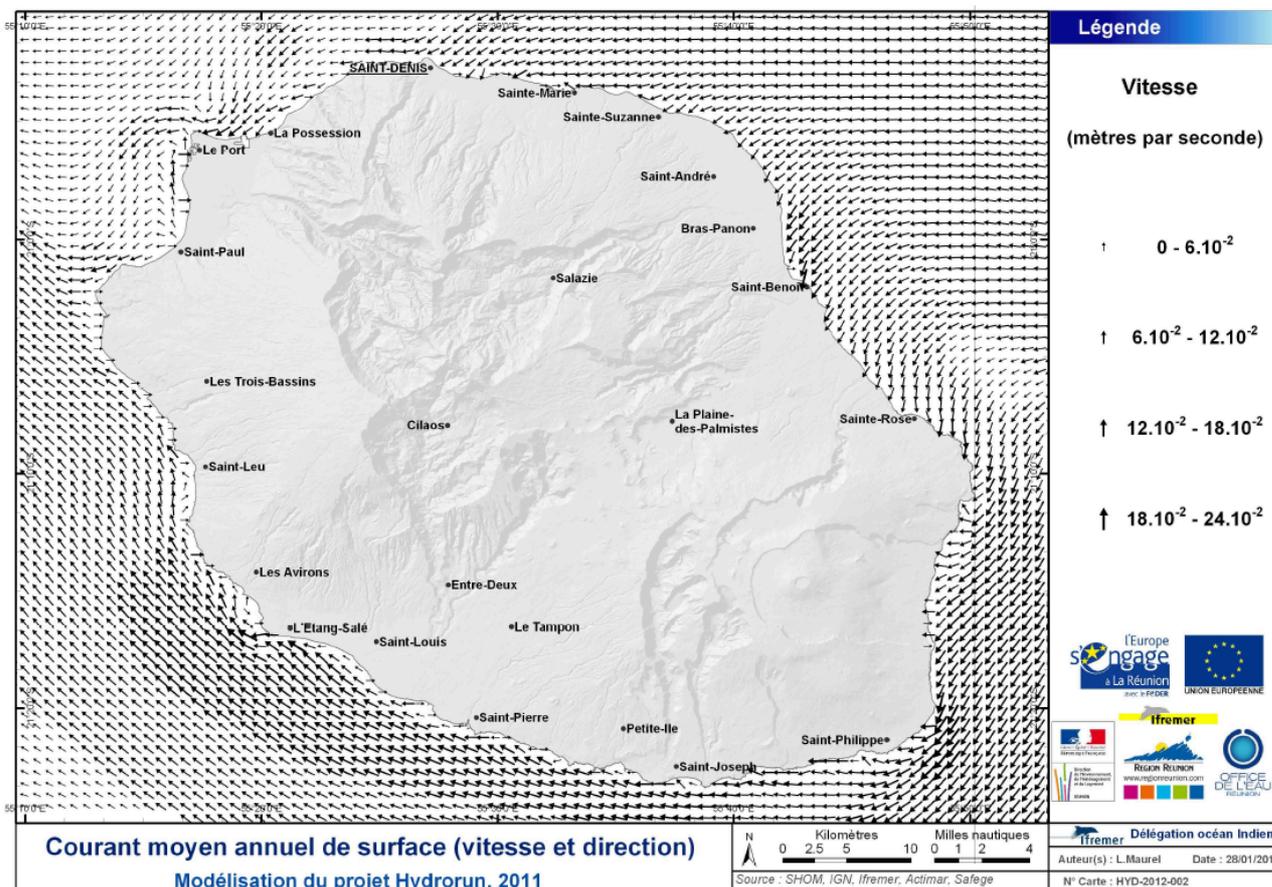
L'interaction complexe entre les Alizés, les différents types de brise et les marées résulte en des courants côtiers dont les trajectoires sont globalement parallèles au littoral, avec pour résultat des temps de résidence faibles favorables à la dispersion des polluants. Seule la baie de Saint-Paul présente une configuration tourbillonnaire (Figure 5) pouvant être susceptible d'augmenter le temps de résidence (Ropert et al. 2012).

3. LES PRESSIONS SUR LES EAUX COTIERES DE LA REUNION

L'île de la Réunion est une zone dense en population avec, en 2017, une densité de 340 habitants/km² contre environ 120 habitants/km² en France métropolitaine (INSEE). La population y est jeune et 80% de la population se concentre sur une frange littorale d'une vingtaine de kms de large. Cette exigüité de l'espace habité se traduit par des enjeux exacerbés et des conflits d'usages entre urbanisation galopante, développement industriel, essor touristique, agriculture et problématiques environnementales (Le Berre et

al. 2012). Les eaux usées, le ruissellement urbain et les activités agricoles figurent parmi les forces de pression principales à La Réunion.

Figure 5. Vitesse et direction moyennes des courants de surface de La Réunion (modélisation du projet HYDRORUN, dans Ropert et al. 2012).



Carte 4. Courant moyen de surface (modélisation du projet Hydrorun, 2011)

3.1 Les eaux usées

Le traitement des eaux usées se fait pratiquement à parts égales entre l'assainissement collectif et l'assainissement non collectif. Les zones urbaines se concentrant sur le littoral, ce sont les eaux côtières qui sont principalement impactées par les rejets de stations d'épuration, les débordements de réseaux (notamment les postes de refoulement) et/ou les rejets de réseau de collecte d'eaux pluviales (Etat des lieux 2019a).

Les deux principales sources de pression qui caractérisent l'assainissement collectif sont les rejets d'eaux usées traitées des stations d'épuration et les rejets d'eaux usées brutes au niveau des trop-pleins des postes de refoulement. Les flux annuels d'azote et de phosphore induits par l'assainissement collectif et rejetés dans les eaux côtières sont présentés au Tableau 1. Les pressions les plus fortes ($> 20\,000 \text{ kg N an}^{-1}$) sont observées dans les masses d'eau de Saint-Denis, Saint-Benoit, Saint-Louis et Saint-Paul (Etat des lieux 2019a) (Figure 6).

Les installations d'assainissement non collectif influencent principalement les eaux souterraines. Des transferts potentiels entre les masses d'eau souterraines et les eaux côtières ont probablement lieu, mais ils sont mal connus (Etat des lieux 2019b).

Tableau 1. Flux annuels d'azote et de phosphore apportés dans les masses d'eau côtières de La Réunion par l'assainissement collectif (Etat des lieux 2019a).

Nom masse d'eau	Masse d'eau	Somme de Flux rejeté en NGL (kg/an)	Somme de Flux rejeté en Pt (kg/an)
Saint-Denis	FRLC101	74 522	10 808
Saint-Benoît	FRLC102	31 187	5 042
Volcan	FRLC103	1 424	454
Saint-Joseph	FRLC104	1 998	567
Saint-Louis	FRLC105	43 751	4 717
Saint-Paul	FRLC107	39 113	3 402
Saint-Leu	FRLC111	6 006	1 550
Saint-Gilles	FRLC112	6 251	1 515
Planète Ouest	FRLG110	6 224	1 519
Plaine des Cafres - Le Dimitile	FRLG119	4 366	812
Cirque de Cilaos	FRLG126	1 004	318
Etang du Gol	FRL02	25 284	731
	Total général	241 130	31 435

3.2 Le ruissellement urbain

Le ruissellement urbain, provoqué par des précipitations sur des zones urbanisées, engendre un apport de diverses pollutions. La mobilisation des polluants résulte du lessivage des surfaces imperméabilisées (toitures, routes, installations industrielles) et d'un phénomène d'érosion des matériaux de surface. Ces polluants (résidus azotés et phosphatés, métaux : zinc, plomb, cuivre) sont mobilisés sous formes dissoute ou particulaire et sont entraînés par les eaux de ruissellement (Etat des lieux 2019c).

La pression du ruissellement urbain est d'avantage marquée sur les masses d'eau de la façade Ouest de l'île, là où la forte urbanisation et l'imperméabilisation des sols conduit à des pressions fortes sur les masses d'eau. Sur les zones Est et Sud de l'île, moins soumises à des contraintes d'urbanisation et d'imperméabilisation, les pressions du ruissellement sont qualifiées comme faibles ou modérées (Figure 6).

3.3 L'agriculture

L'agriculture couvre environ 17% de la surface de l'île de La Réunion. La culture de la canne à sucre est majoritaire avec près de 55% des surfaces, puis viennent l'élevage (30% des surfaces) et les cultures maraichères, fruitières et de diversification (15% des surfaces). Les pressions diffuses agricoles mesurables sur le bassin sont des pressions azotées, phosphorées et celles liées aux phytosanitaires. Pour l'azote et le phosphore, l'origine peut être liée à une sur-fertilisation et à une gestion perfectible des effluents d'élevage. La pression sur les eaux côtières est liée à la fertilisation des sols est appréhendée au regard des surplus d'azote ruisselés annuellement. Ce flux est estimé de manière semi-quantitative. Il permet de déterminer la classe de pression qui s'exerce sur chaque masse d'eau (Tableau 2) (Etat des lieux 2019d).

Pour les eaux littorales, les pressions s'exercent principalement sur les façades Est et Sud-Ouest (Figure 6). Elles s'exercent aussi sur les masses d'eau récifales dont plusieurs présentent des états dégradés, à l'exception de celle de Saint-Pierre, pourtant soumise à une forte pression d'origine agricole (Etat des lieux 2019d).

A l'échelle de l'île, les flux de phosphates d'origine agricole vers les eaux côtières sont peu connus en raison des faibles connaissances sur la quantification des apports sur les sols et sur de leur capacité à stabiliser ou mobiliser le phosphore (Etat des lieux 2019d).

Figure 6. Répartition géographique des pressions sur les masses d'eau côtières de La Réunion. Pressions liées (a) à l'assainissement collectif (Etat des lieux 2019a), (b) au ruissellement urbain (Etat des lieux 2019c) et (c) au flux d'azote lixivié issu de la fertilisation des sols (Etat des lieux 2019d).

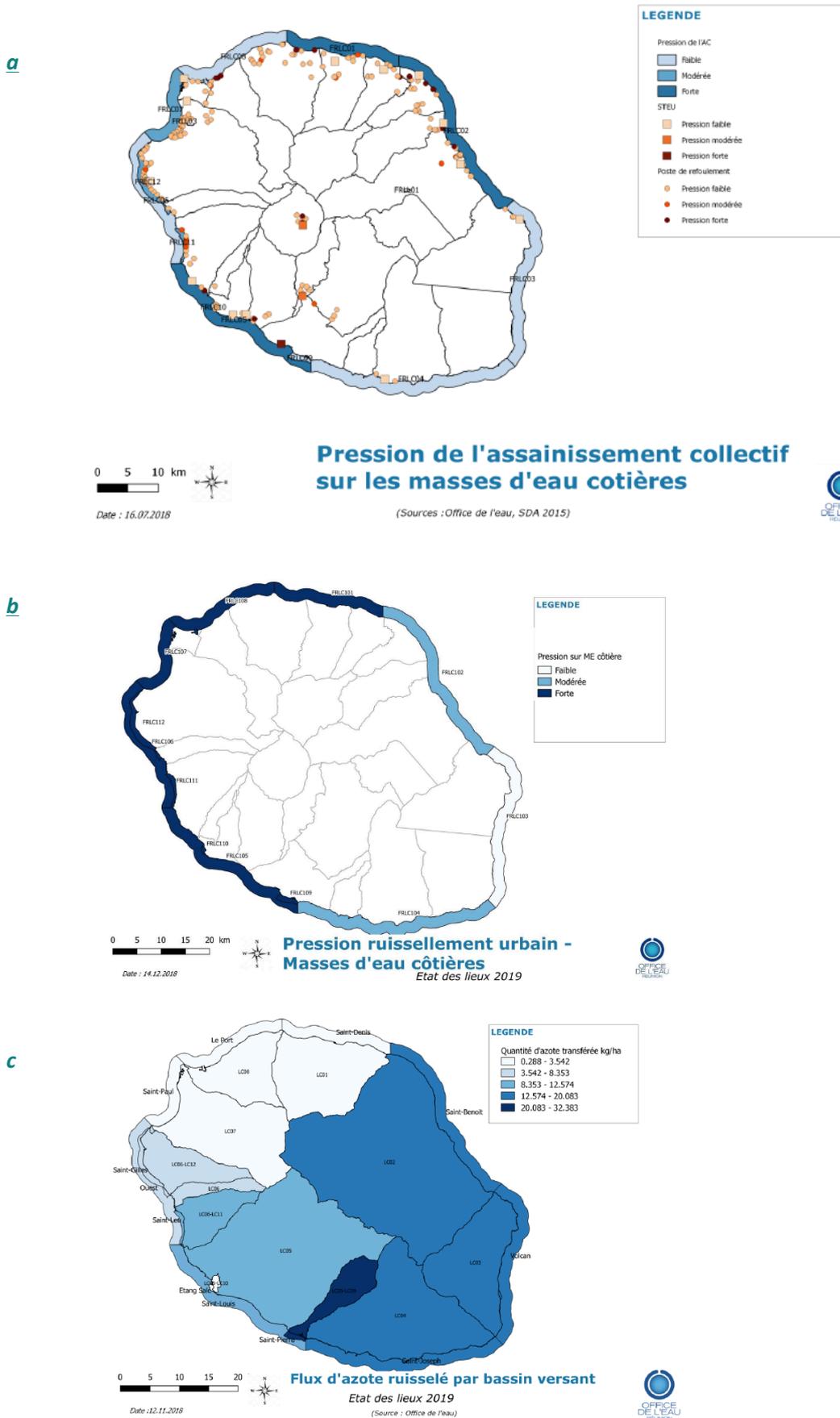


Tableau 2. Flux annuels d'azote apportés dans les masses d'eau côtières de La Réunion par l'azote lixivié issu de la fertilisation des sols (Etat des lieux 2019d).

Code masse d'eau	nom masse d'eau	Azote transféré en kg/ha	Pression
LC01	Saint-Denis	3,54	nulle ou faible
LC02	Saint-Benoit	16,07	forte
LC03	Volcan	17,17	forte
LC04	Saint-Joseph	20,08	forte
LC05	Saint-Louis	12,57425467	moyenne
LC06	Ouest	8,352673022	modérée
LC07	Saint-Paul	2,36	nulle ou faible
LC08	Le Port	0,29	nulle ou faible
LC09	Saint-Pierre	32,38	très forte
LC10	Etang Salé	0,32	nulle ou faible
LC11	Saint-Leu	11,61	moyenne
LC12	Saint-Gilles	7,1	modérée

4. SITES D'ETUDE, ECHANTILLONNAGE, SOURCE ET TRAITEMENT DES DONNEES

Ce travail repose sur les données acquises dans les eaux côtières de La Réunion dans le cadre du réseau de surveillance de la DCE, nommé Réseau Hydrologique Littoral Réunionnais (RHLR).

A La Réunion, la salinité est globalement homogène et le marnage est faible avec une amplitude qui ne dépasse pas 80 cm. Les masses d'eau ont été délimitées par des points « naturels » (cap, pointe, limite de bassin versant, ...). Les conditions de mise en œuvre du suivi et les positions des stations sont détaillées dans le fascicule GTs DCE La Réunion et Mayotte (2019).

Une station de référence (Ermitage large) et 8 lieux de surveillance sont échantillonnés en surface 6 fois par an :

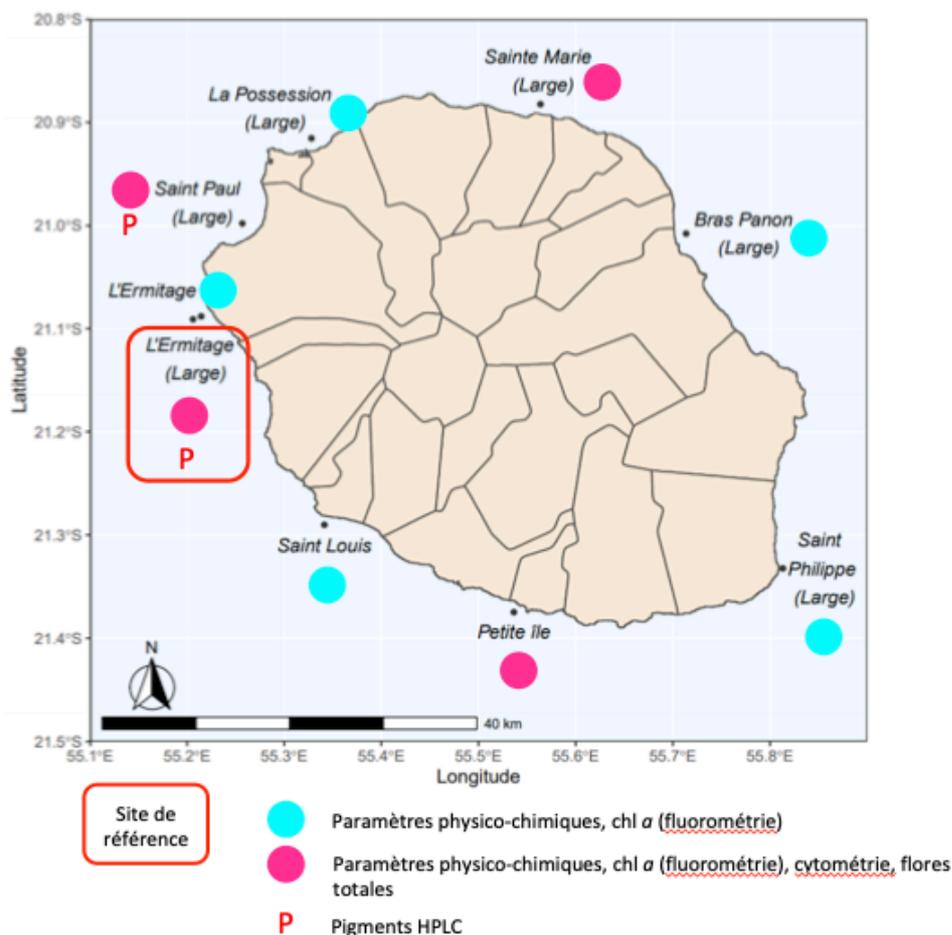
- 2 fois pendant l'hiver austral (juillet et août),
- 2 fois en début de saison chaude (novembre et décembre),
- 2 fois en milieu de saison chaude et en saison cyclonique (février et mars).

Nous travaillerons sur la **période novembre 2015 - novembre 2020** pour laquelle le programme de surveillance a permis d'obtenir un jeu de données cohérent comprenant :

- les paramètres hydrologiques, les concentrations en nutriments et la chl *a* (fluorimétrie) mesurés à *toutes les stations 6 fois par an*,
- les abondances cellulaires des fractions pico- et nano-phytoplanctoniques, respectivement < 2 µm et comprise entre 2 et 20 µm (cytométrie en flux) mesurés à *4 stations 3 fois par an*,
- les dénombrements de flore totale (comptages) portant sur la fraction microphytoplanctonique (> 20 µm) et le « grand » nanophytoplancton » réalisés à *4 stations 3 fois par an*,
- les concentrations en pigments phytoplanctoniques du phytoplancton total (mesures HPLC) mesurés à *2 stations 6 fois par an* (Figure 7).

Les données utilisées ont été extraites de Quadrigé². La dernière extraction a été réalisée le 13/04/2021. Les analyses statistiques (tests de Kruskal-Wallis et corrélations de Spearman) ont été réalisées à l'aide du logiciel XLStat.

Figure 7. Position des stations et paramètres mesurés (voir GTs DCE La Réunion et Mayotte 2019 pour les détails). Carte de Renouvel (2021) modifiée.



En raison de l'exposition des stations aux différents forçages hydrologiques et climatiques qui caractérisent La Réunion (cfr chapitre 2), nous regrouperons dans la suite du texte les stations de Sainte-Marie, Bras-Panon (Large), Saint-Philippe (Large) et Petite-Ile sous l'appellation de « **stations au vent** ». Les stations de Saint-Louis, L'Ermitage Large, L'Ermitage, Saint-Paul Large et La Possession Large seront nommées « **stations sous le vent** ».

Les paramètres phytoplanctoniques n'ont pas été mesurés dans les masses d'eau récifales. Elles ne sont donc pas couvertes par cette étude.

5. CARACTERISATION DES EAUX COTIERES DE LA REUNION

5.1 Paramètres hydrologiques

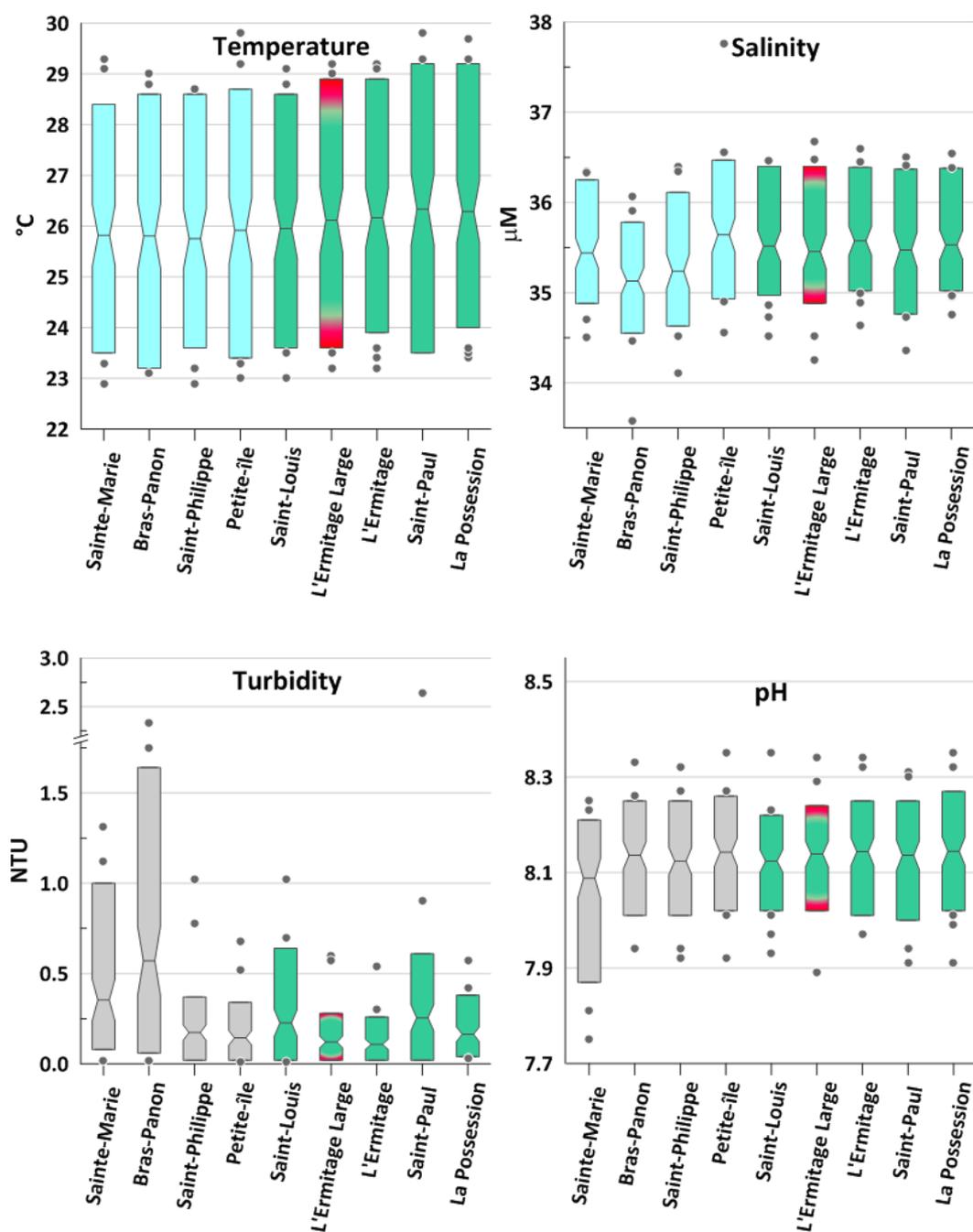
Afin de caractériser la zone d'étude, nous analyserons dans un premier temps les variations moyennes des paramètres environnementaux mesurés aux 9 stations pendant la période d'étude (2015 - 2020).

En surface, la température moyenne de l'eau est de 26.0 ± 1.9 °C. Une faible variabilité entre les stations est observée. Toutefois, la température moyenne des stations sous le vent est légèrement supérieure à celle des stations au vent (Figure 8).

La salinité moyenne est de 35.45 ± 0.57 . Les valeurs moyennes sont très stables entre les stations à l'exception des stations de Bras-Panon et de Saint-Philippe qui présentent des salinités inférieures à la

moyenne (Figure 8). Il est probable que ces salinités plus basses soient en partie expliquées par l'abondance des précipitations, maximales dans la région concernée (Figure 3), et par la présence d'une rivière pérenne, la rivière du Mât, à proximité de Bras-Panon. A l'opposé, la station de Petite-Ile présente une salinité légèrement supérieure à la moyenne. Compte tenu de l'exposition très forte de la station aux Alizés, il est possible que des remontées d'eau plus profonde, et donc plus salée, y aient lieu (Cuet et al. 2006).

Figure 8. Boxplots (concentrations moyennes, P₁₀ et P₉₀, min, max) des paramètres hydrologiques de surface (température, salinité, turbidité et pH) mesurés entre novembre 2015 et novembre 2020 dans les eaux côtières de La Réunion. Données extraites de Quadrigé². Station de référence : L'Ermitage Large.



La turbidité moyenne est de 0.23 ± 0.34 NTU, mais toutes les stations sont caractérisées par une forte dispersion des mesures (Figure 8), probablement liée aux apports par les rivières et par le ruissellement lors d'épisodes pluvieux intenses. Les stations de Sainte-Marie et de Bras-Panon, sur la côte au vent, se distinguent par des valeurs de turbidité plus élevée que la valeur moyenne.

Le pH moyen est de 8.13 ± 0.10 . Il est stable entre les stations, à l'exception de la station de Sainte-Marie où le pH moyen est plus faible (Figure 8).

Lorsque l'on limite l'analyse aux 4 stations où des données de composition phytoplanctonique sont disponibles (Sainte-Marie, Petite-Ile, L'Ermitage Large et Saint-Paul) (Figure 7), les tests de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0.05$) ne montrent pas de différences significatives entre les paramètres hydrologiques (température, salinité, turbidité, pH), à l'exception de la station de référence Ermitage Large qui se distingue de la station de Sainte-Marie pour la turbidité.

5.2 Sels nutritifs

Sur la période d'étude, les NO_3 constituent la forme majoritaire de l'azote inorganique dissous présent dans les eaux côtières. La concentration moyenne en NO_3 est de 0.09 ± 0.20 μM . Cette concentration, très basse, souligne le caractère ultra-oligotrophe des différentes stations échantillonnées (Figure 9). Seule la station au vent de Petite-Ile présente une concentration moyenne en NO_3 légèrement supérieure à la moyenne et une dispersion importante des mesures, témoin probable d'apports profonds liés à la très forte exposition de la station aux Alizés (Cuet et al. 2006) et/ou d'apports ruisselés par le bassin versant (Figure 6c).

Les concentrations en NO_2 et NH_4 sont souvent sous la limite de détection des techniques de mesure utilisées. Les concentrations moyennes en NO_2 et en NH_4 sont respectivement de 0.04 ± 0.02 μM et de 0.07 ± 0.11 μM (Figure 9). On ne distingue pas de différence majeure entre les stations qui sont toutefois caractérisées par une dispersion importante des concentrations en NH_4 . Néanmoins, la station de Saint-Paul, située dans la baie du même nom, présente des concentrations en NH_4 légèrement supérieures à la moyenne, peut-être à mettre en relation avec la configuration tourbillonnaire de la baie (Figure 5).

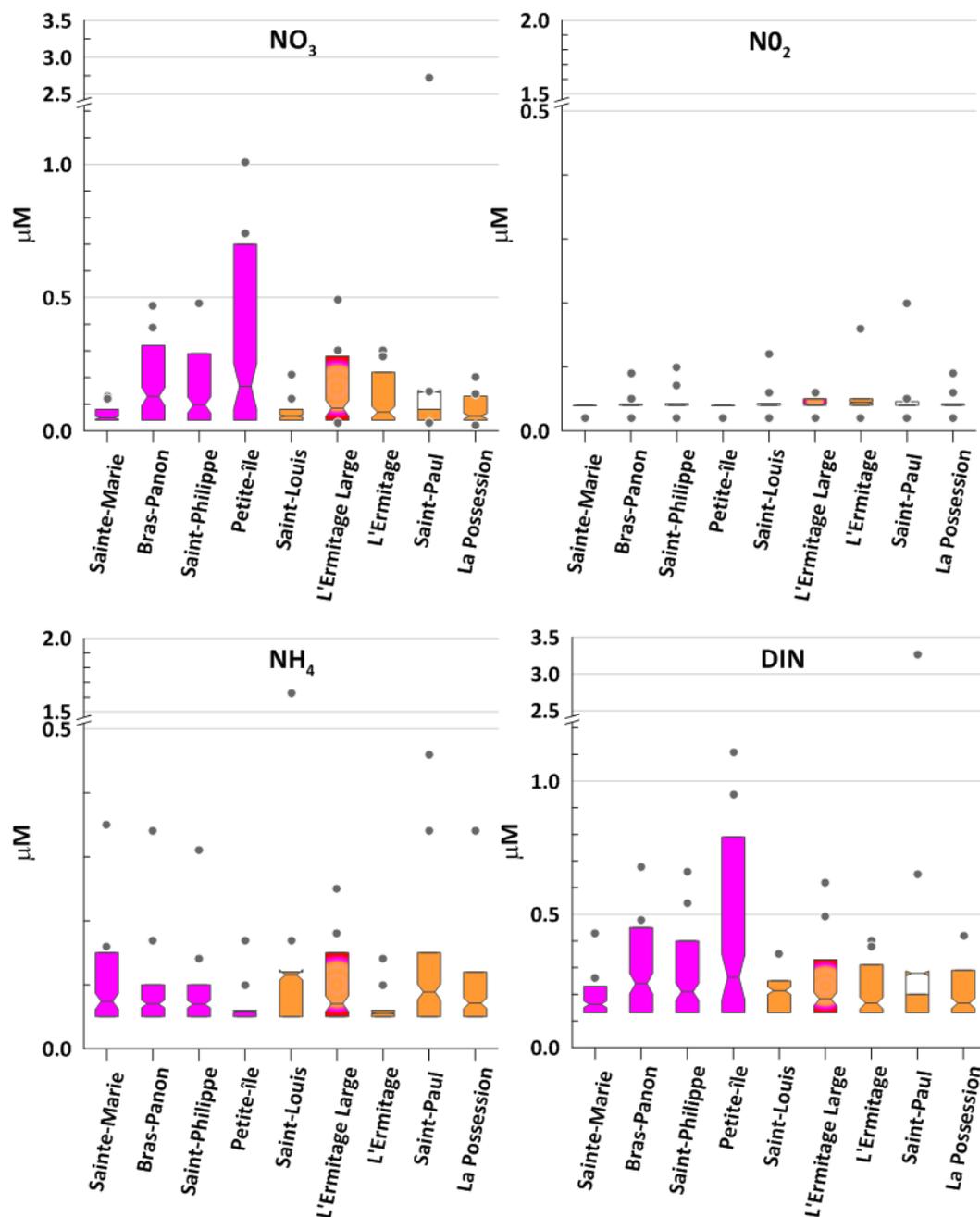
Les variations de l'azote inorganique dissous (DIN) reflètent essentiellement les variations des concentrations en NO_3 .

Les concentrations en silicates dans les eaux côtières sont très élevées, avec une concentration moyenne de 5.3 ± 4.4 μM (Figure 10). Les stations au vent de Saint-Philippe et Bras-Panon présentent des concentrations particulièrement élevées en silicates, qui sont probablement à mettre en relation avec les apports liés aux importantes précipitations qui touchent la zone (Figure 3) et les courants de surface qui peuvent limiter les échanges avec le large (Figure 6). Parmi les stations sous le vent, c'est à Saint-Paul que les concentrations sont les plus élevées.

Les concentrations en PO_4 sont basses et uniformes avec une concentration moyenne de 0.10 ± 0.04 μM (Figure 10). Seule la station au vent de Saint-Philippe présente une concentration moyenne un peu plus élevée. Cette station étant située dans un secteur peu peuplé de l'île, les phosphates y seraient donc d'origine naturelle (Cuet et al. 2006).

Les tests de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0.05$) réalisés sur les 4 stations où des données de composition phytoplanctonique sont disponibles ne montrent pas de différences significatives entre les concentrations en nutriments mesurés aux différentes stations, à l'exception de la station de référence Ermitage Large qui se distingue de la station de Sainte-Marie pour les silicates.

Figure 9. Boxplots (concentrations moyennes, P₁₀ et P₉₀, min, max) des concentrations en nutriments azotés mesurées en surface dans les eaux côtières de La Réunion entre novembre 2015 et novembre 2020. Données extraites de Quadrigé². Station de référence : L'Ermitage Large.



5.3 Biomasse phytoplanctonique totale

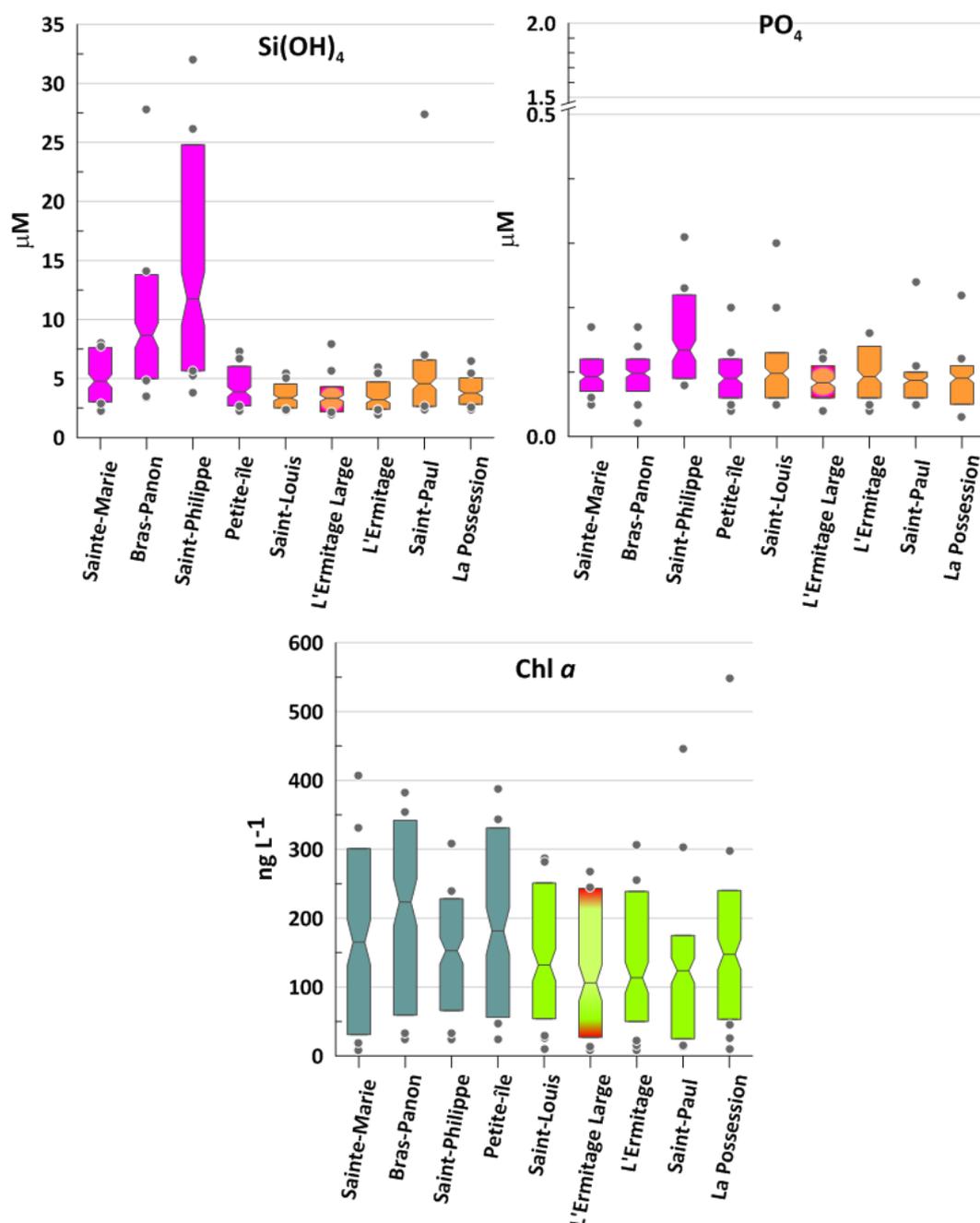
5.3.1 Précision sur les termes « chl *a* » et « Tchl *a* »

La chlorophylle *a* (chl *a*) est présente dans tous les groupes phytoplanctoniques, à l'exception des prochlorophytes où elle est remplacée par la divinyl-chlorophylle *a* (DV-chl *a*). La mesure de la chlorophylle *a* totale (Tchl *a* = chl *a* + DV-chl *a*) permet donc de déterminer la biomasse phytoplanctonique totale.

La fluorimétrie et la télédétection ne permettent pas de séparer la chl *a* de la DV-chl *a*. Ces deux techniques mesurent donc la Tchl *a*, qui, par abus de langage, est appelée chl *a*. Par contre, les techniques de dosage des pigments phytoplanctoniques par HPLC permettent de séparer la chl *a* de la DV-chl *a*. Dans la suite du

texte, nous conserverons l'appellation « chl *a* » quand il s'agit de données obtenues par fluorimétrie et par télédétection. Nous utiliserons le terme de « Tchl *a* » pour les concentrations mesurées par HPLC.

Figure 10. Boxplots (concentrations moyennes, P₁₀ et P₉₀, min, max) des concentrations en phosphates, silicates et chl *a* mesurées en surface dans les eaux côtières de La Réunion entre novembre 2015 et novembre 2020. Chl *a* mesurée par fluorimétrie. Données extraites de Quadrigé². Station de référence : L'Ermitage Large.



5.3.2 Biomasse phytoplanctonique au point de référence Ermitage Large

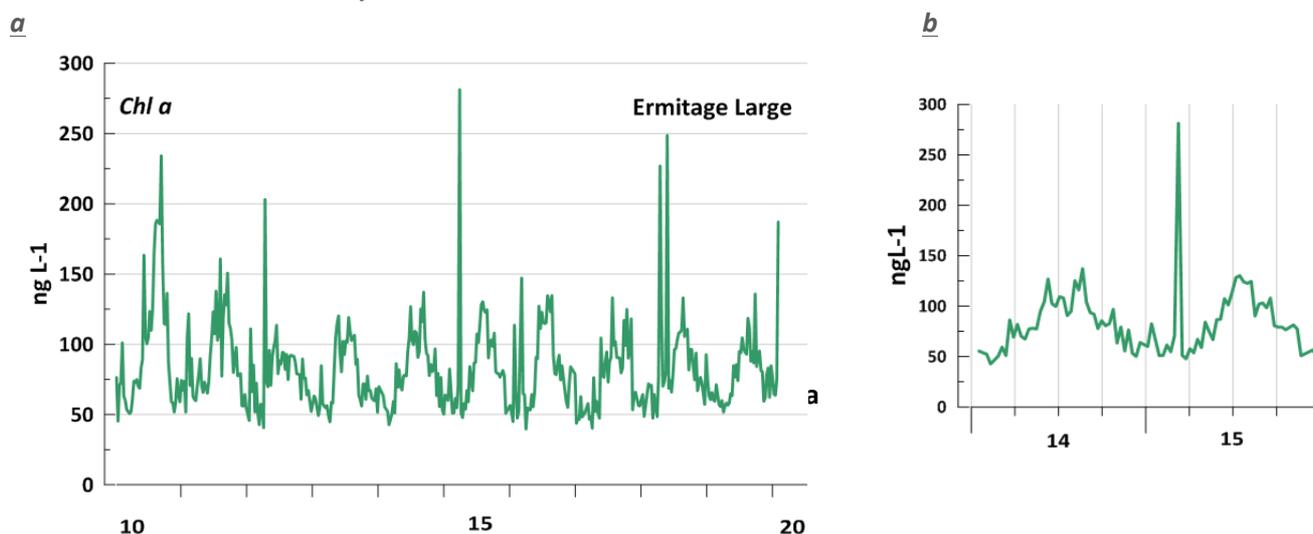
L'évolution saisonnière de la biomasse phytoplanctonique totale de la zone incluant le point de référence Ermitage Large a été décrite dans Goffart (2020).

En surface, les données satellitaires montrent une saisonnalité bien marquée de la chl *a* de surface moyennée sur 8 jours (Figure 11a). A l'exception de quelques « spikes », les concentrations sont typiques des milieux ultra-oligotrophes. Chaque année, les concentrations minimales en chl *a* (≈ 50 ng L⁻¹) sont

observées pendant l'été austral entre janvier et mars. Les concentrations en chl a augmentent ensuite pour atteindre 100 - 150 ng L⁻¹ entre juin et septembre pendant l'hiver austral (Figure 11b). Quelques pics >200 ng L⁻¹ apparaissent parfois en saison chaude ou en début de saison froide.

A la station Ermitage Large, les mesures *in situ* réalisées par HPLC montrent des concentrations moyennes annuelles très basses (Tchl a : 108 ± 51 ng L⁻¹, données 2015-2019) et des variations saisonnières qui sont peu marquées. En hiver (juillet - septembre), la Tchl a moyenne y est de l'ordre de 125 ng L⁻¹, puis elle diminue en début de saison chaude, ce qui est en très bon accord avec les informations issues de l'imagerie satellitaire. En été, la Tchl a augmente légèrement à la station Ermitage Large alors qu'elle est minimale un peu plus au large (*cf* Figure 12 dans Goffart 2020). Les niveaux de concentration restent cependant inférieurs aux valeurs hivernales. Cette augmentation, bien que modeste, pourrait être mise en relation avec des apports ponctuels en nutriments.

Figure 11. Série temporelle de chl a de surface dans la zone Ermitage Large. Mesures satellitaires générées par SEADAS utilisant des données OCI, OC3 et/ou OC5 (version 4.2, résolution de 4 km), moyennes par périodes de 8 jours dans un polygone incluant le point Ermitage Large dans sa partie Est. Source des données : <https://www.oceancolour.org/portal/>. a : Série temporelle 2010 - 2020; b : Zoom sur les années 2014 et 2015. D'après Goffart 2020.



5.3.3 Biomasse phytoplanctonique de l'ensemble des stations

Sur l'ensemble des stations, la concentration moyenne en chl a mesurée par fluorimétrie est de 149 ± 91 ng L⁻¹. Deux groupes de stations se distinguent : les stations au vent, plus riches en phytoplancton (concentration moyenne en chl a : 170 ± 92 ng L⁻¹) et les stations sous le vent, moins chargées en chl a (Figure 10). Au sein des stations sous le vent, Saint-Paul et La Possession sont présentes et présentent une dispersion des mesures élevée.

Lorsque l'on ne considère que les 4 stations où la composition phytoplanctonique est étudiée, la biomasse phytoplanctonique totale des deux stations sous le vent (l'Ermitage Large et Saint-Paul) se distingue significativement de celle mesurée à la station au vent de Petite-Ile (Kruskhal-Wallis, $\alpha = 0.05$).

5.4 Pico- et nano-phytoplancton

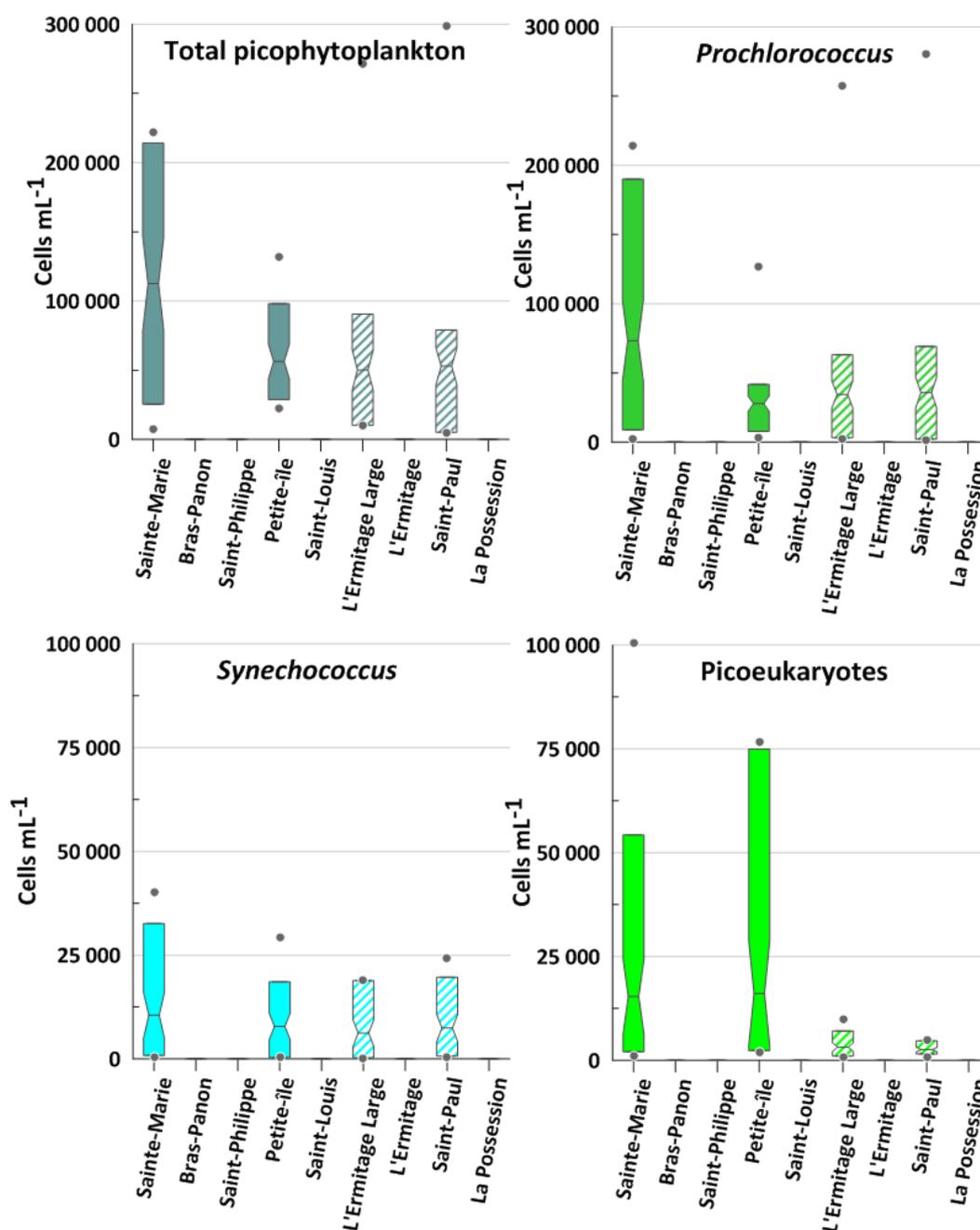
Les données de cytométrie en flux sont disponibles pour les fractions pico- et nano-phytoplanctoniques au niveau de 4 stations (Figure 7).

Sur la façade au vent de l'île, le picophytoplancton total est abondant (abondance moyenne de $84\,421 \pm 59\,354$ cellules mL^{-1} pour les stations Sainte-Marie et Petite-Ile). Les communautés picophytoplanctoniques y sont dominées par les *Prochlorococcus* et les picoeucaryotes (Figure 12).

Le picophytoplancton total est moins abondant sur la côte sous le vent ($51\,572 \pm 73\,518$ cellules mL^{-1} pour les stations Ermitage Large et Saint-Paul). Les communautés picophytoplanctoniques y sont dominées par les *Prochlorococcus* et les *Synechococcus* qui représentent le second groupe le plus abondant (Figure 12).

Les différences observées sur base de l'interprétation des graphiques ne sont pas suffisantes pour que le test de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0.05$), basé sur l'analyse des médianes, détecte des différences significatives entre le picophytoplancton total et l'abondance des différents groupes aux 4 stations.

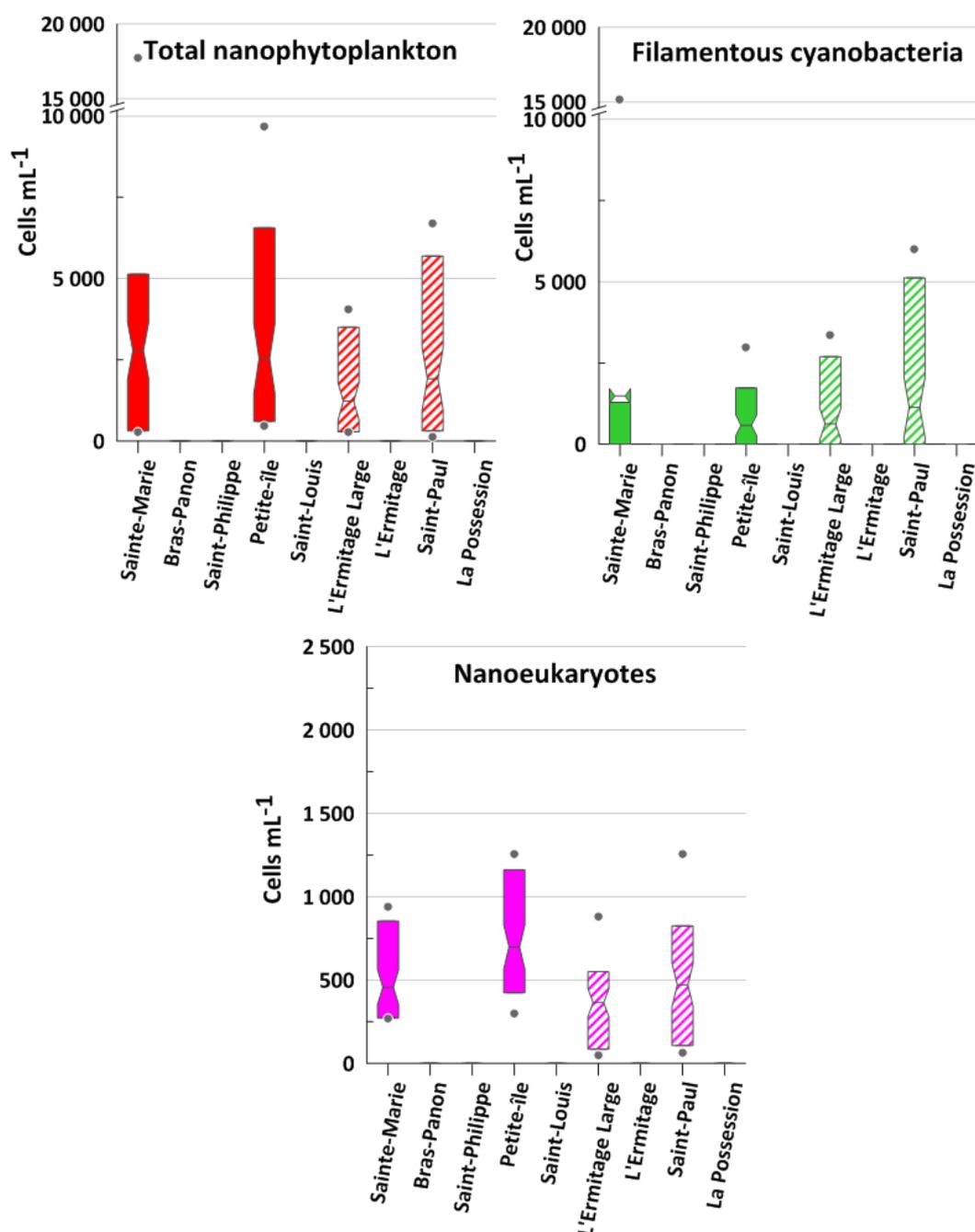
Figure 12. Boxplots (concentrations moyennes, P_{10} et P_{90} , min, max) des abondances du picophytoplancton de surface dans les eaux côtières de La Réunion entre novembre 2015 et novembre 2020. Données issues de la cytométrie et extraites de Quadrigé².



Comme pour la biomasse totale et le picophytoplancton, le nanophytoplancton total est plus abondant sur la façade au vent de l'île que sur la façade sous le vent. Les abondances moyennes y sont respectivement de $2\,659 \pm 3\,777$ cellules mL^{-1} et de $1\,566 \pm 1\,726$ cellules mL^{-1} (Figure 13). Les cyanobactéries filamenteuses constituent le second groupe nanophytoplanctonique le plus abondant sur les deux côtes. Sur la côte sous le vent, la dispersion des mesures est importante à Saint-Paul. Le développement des nanoeucaryotes, qui représentent le 3^{ème} groupe en abondance cellulaire, est favorisé à la station de Petite-Ile.

Les tests de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0.05$) ne montrent pas de différences significatives entre l'abondance du nanophytoplancton total et celle des cyanobactéries filamenteuses des 4 stations. Par contre, l'abondance des nanoeucaryotes à la station Petite-Ile est significativement différente de celle des autres stations ($\alpha = 0.05$).

Figure 13. Boxplots (concentrations moyennes, P₁₀ et P₉₀, min, max) des abondances du nanophytoplancton de surface dans les eaux côtières de La Réunion entre novembre 2015 et novembre 2020. Données issues de la cytométrie en flux et extraites de Quadrigé².



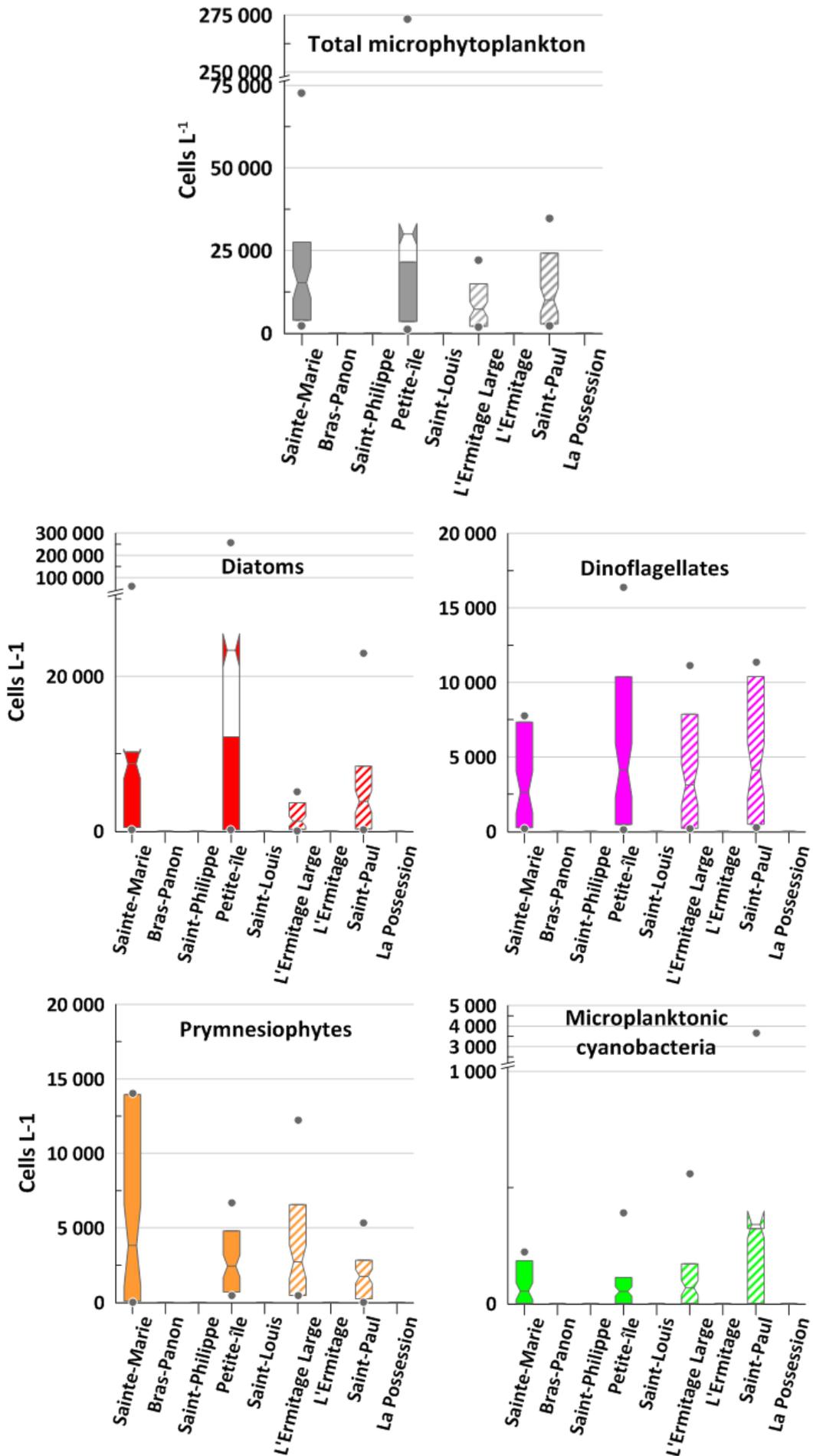
5.5 Microphytoplancton

Les résultats des abondances cellulaires du microphytoplancton obtenus par comptage au microscope classique permettent à nouveau de distinguer les stations au vent des stations sous le vent, caractérisées par des abondances cellulaires respectives de $23\,206 \pm 55\,180$ cellules L^{-1} et une forte dispersion des mesures et de $8\,613 \pm 8\,312$ cellules L^{-1} (Figure 14).

Sur la période d'étude, les diatomées sont les organismes microphytoplanctoniques les plus abondants ($9\,319 \pm 36\,778$ cellules L^{-1}), suivis par les dinoflagellés ($3\,530 \pm 3\,901$ cellules L^{-1}), les prymnesiophycées ($2\,637 \pm 3\,156$ cellules L^{-1}) et les cyanobactéries microplanctoniques (132 ± 525 cellules L^{-1}) (Figure 14). Au sein des groupes identifiés, seules les diatomées présentent un pattern d'abondance différent entre les façades au vent et sous le vent de La Réunion, avec une abondance cellulaire supérieure à l'Est de l'île. A l'Ouest, les stations de Sainte-Marie et Saint-Paul se distinguent par une dispersion importante de l'abondance des prymnesiophycées et des cyanobactéries microplanctoniques.

Les différences observées sur base de l'interprétation des graphiques ne sont pas suffisantes pour que le test de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0.05$) détecte des différences significatives entre la composition en microphytoplancton des 4 stations.

Figure 14 (page suivante). Boxplots des dénombrements de flore totale (micro- et « grand » nano-phytoplancton), de diatomées, de dinoflagellés, de prymnesiophycées et de cyanobactéries microplanctoniques dans les eaux côtières de La Réunion entre novembre 2015 et novembre 2020 (concentrations moyennes, P_{10} et P_{90} , min, max). Données de surface extraites de Quadrigé².

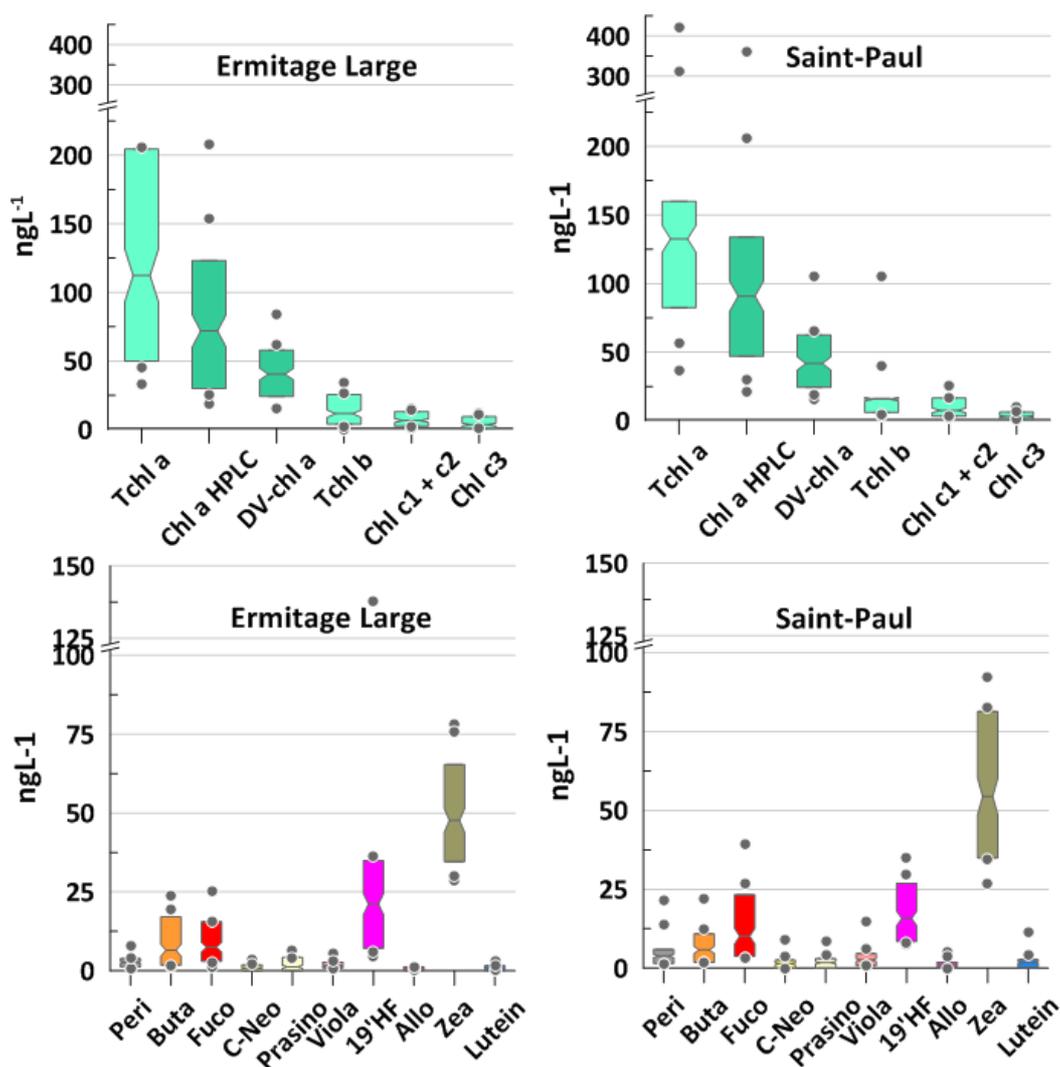


5.6 Pigments phytoplanctoniques (mesures HPLC)

Des mesures de contenu pigmentaire sont disponibles pour le point de référence Ermitage Large et pour la station de Saint-Paul sur la côte sous le vent. Les messages taxonomiques apportés par les caroténoïdes du phytoplancton marin et les abréviations d'usage sont décrits dans Goffart (2020).

Les chlorophylles les plus abondantes aux deux stations sont, en ordre décroissant, la chl *a*, la Dv-chl *a* et la Tchl *b* (Tchl *b* = chl *b* + DV-chl *b*) (Figure 15). La chl *a* et la Dv-chl *a* sont les traceurs respectifs de la biomasse

Figure 15. Boxplots des concentrations en chlorophylles et en caroténoïdes à intérêt taxonomique aux points Ermitage Large et Saint-Paul pour la période 2015 - 2020 (concentrations moyennes, P₁₀ et P₉₀, min, max). Données de surface extraites de Quadrige².



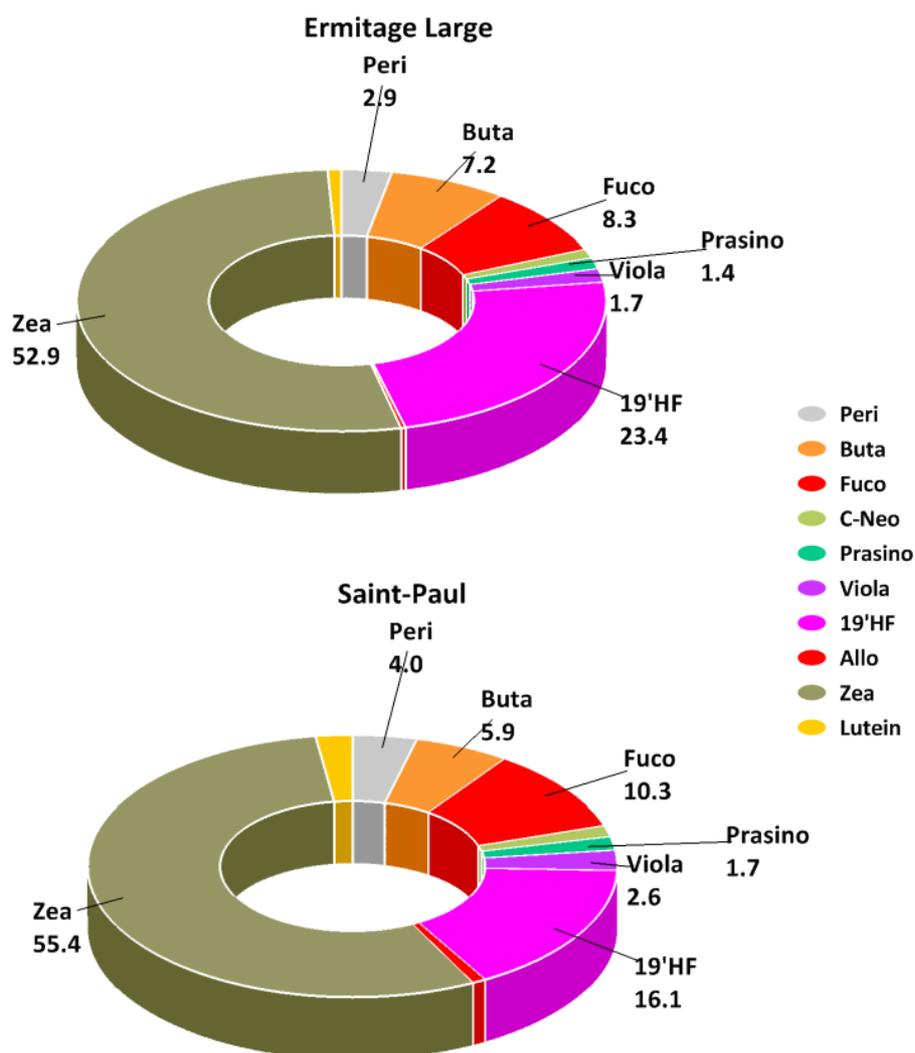
autotrophe totale à l'exception des prochlorophytes et des prochlorophytes. La chl *b* est présente chez les prasinophycées, les chlorophycées et les euglénophycées et la DV-chl *b* est un marqueur des prochlorophytes (Roy et al. 2012). Les concentrations moyennes annuelles sont très basses (Tchl *a* : 122 ± 66 ng L⁻¹, chl *a* : 81 ± 56 ng L⁻¹, DV-chl *a* : 41 ± 16 ng L⁻¹, Tchl *b* : 14 ± 15 ng L⁻¹).

En moyenne sur la période d'étude, la zéaxanthine (Zea), traceur des *Prochlorococcus* et des *Synechococcus*, est le pigment le plus abondant aux deux stations (51 ± 14 ng L⁻¹) (Figure 15). Elle représente >50% des pigments présents retenus pour leur intérêt taxonomique (Figure 16). Le second pigment le plus abondant est l'hexanoyloxyfucoxanthine (19'HF, traceur des prymnésiofycées, 18 ± 19 ng L⁻¹), suivi par la

fucoxanthine (Fuco, $9 \pm 7 \text{ ng L}^{-1}$) et la butanoyloxyfucoxanthine (Buta, $6 \pm 5 \text{ ng L}^{-1}$), traceurs des diatomées et des pélagophycées. La 19'HF, la fucoxanthine et la butanoyloxyfucoxanthine représentent respectivement 16-24 %, 8-10 % et 6-7% des pigments à intérêt taxonomique (Figure 16).

D'un point de vue statistique, il n'y a pas de différence significative les concentrations en chlorophylles et en caroténoïdes du point de référence et la station de Saint-Paul (test de Kruskal-Wallis, $\alpha = 0.05$).

Figure 16. Contribution relative (%) des caroténoïdes à intérêt taxonomique aux points Ermitage Large et Saint-Paul au cours de la période 2015 - 2020. Données de surface extraites de Quadrigé².



6. RELATIONS ENTRE LES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX ET LES VARIABLES PHYTOPLANCTONIQUES

Les relations entre les paramètres environnementaux et les variables phytoplanctoniques mesurées aux stations de Sainte-Marie, Petite-Ile, Ermitage Large et Saint-Paul entre 2015 et 2020 ont été étudiées afin d'identifier les groupes qui répondent le mieux aux variations des facteurs hydrologiques et des nutriments (Tableau 3). Les concentrations en NO_2 et en PO_4 à ces quatre stations sont uniformément très basses ou inférieures à la limite de détection ($0.04 \mu\text{M}$) des techniques de dosage utilisées (Figures 9 et 10). Elles ne sont pas considérées dans la recherche de corrélation.

Les principaux résultats montrent que :

1. Tous les groupes picophytoplanctoniques et les nanoeucaryotes sont corrélés positivement à la chl α mesurée par fluorimétrie (Tableau 3). Cette observation conforte le fait que, dans la zone d'étude, les variations de biomasse totale sont essentiellement dues aux changements de l'abondance du picophytoplancton et d'une partie du nanophytoplancton.
 2. L'abondance du picophytoplancton total, des *Prochlorococcus*, des pico- et des nano-eucaryotes et celle des prymnésiofycées microplanctoniques est corrélée négativement à la température, indiquant une préférence de ces groupes pour l'eau plus froide. A l'opposé, les dinoflagellés et les cyanobactéries microphytoplanctoniques sont corrélés positivement à la température.
 3. Le nanophytoplancton total, les cyanobactéries filamenteuses nanophytoplanctoniques et les *Synechococcus* sont corrélés négativement au pH.
 4. Le microphytoplancton total, les diatomées, les dinoflagellés et les cyanobactéries microphytoplanctoniques, sont corrélés positivement aux silicates. Il en est de même pour les nanoeucaryotes, le picophytoplancton total et au sein de celui-ci, les *Prochlorococcus* et les *Synechococcus*. A l'exception des cyanobactéries microphytoplanctoniques, tous les groupes qui répondent positivement aux silicates répondent aussi positivement à la turbidité.
1. Très peu de corrélations significatives sont mises en évidence entre les groupes phytoplanctoniques et les nutriments azotés : les seules corrélations positives concernent les diatomées et les picoeucaryotes qui répondent respectivement aux NO_3 et à l'azote inorganique dissous (DIN) (Tableau 3). Les *Synechococcus* répondent négativement à une augmentation de NH_4 , ce qui suggère une préférence pour d'autres formes d'azote.

L'analyse des corrélations positives entre les nutriments et les pigments phytoplanctoniques mesurés au point Ermitage Large et à Saint-Paul n'apporte que peu d'informations supplémentaires, essentiellement en raison de la faible amplitude des concentrations en nutriments et en pigments qui caractérisent les deux stations (Figures 9, 10, 15). Il apparaît néanmoins que :

- l'alloxanthine, traceur des cryptophycées, est corrélée aux NO_3 ($r = 0.40$, $p = 0.014$);
- la violaxanthine, traceur des prasinophycées, est corrélée à NH_4 ($r = 0.32$, $p = 0.021$);
- la cis-néoxanthine ($r = 0.30$, $p = 0.034$), la violaxanthine ($r = 0.32$, $p = 0.002$) et la lutéine ($r = 0.29$, $p = 0.05$) sont corrélées à l'azote inorganique dissous (DIN). La cis-néoxanthine et la violaxanthine sont des biomarqueurs des prasinophycées; la lutéine est présente chez certaines prasinophycées et chez les chlorophycées (voir Tableau 1 dans Goffart 2020 et références associées).

Tableau 3 (page suivante) : Corrélations entre les paramètres environnementaux et les principales variables phytoplanctoniques des stations Sainte-Marie, Petite-Ile, Ermitage Large et Saint-Paul (données de surface acquises entre 2015 et 2020). Coefficients de corrélation de Spearman pour $\alpha = 0.05$; - : non significatif. * p-value <0.001, ** p-value <0.01, * p-value <0.05.**

Chl α : fluorimétrie, 6 mesures par an; microphytoplancton : identifications floristiques, 3 mesures par an; nano- et pico-phytoplancton : cytométrie en flux, 3 x 3 mesures par an, moyenne des triplicats.

	Chl α fluo	Temp	Salinité	Turbidité	pH	Si(OH) ₄	NO ₃ +NO ₂	NO ₃	NH ₄	DIN
Microphytoplancton total	-	-	-	0.57 **	-	0.42 ***	-*	-	-	-
Diatomées	-	-	-	0.73 ***	-	0.52 ***	0.30 *	0.32 *	-	-
Dinoflagellés	-	0.30 *	-	0.57 ***	-	0.31 *	-	-	-	-
Prymnesiophycées	-	-0.65 ***	-	-	-	-	-	-	-	-
Cyanobactéries microphytoplanctoniques	-	0.49 ***	-	-	-	0.45 **	-	-	-	-
Nanophytoplancton total	-	-0.30 *	0.51 ***	-	-0.31 *	-	-	-	-	-
Cyanobactéries filamenteuses nanophytoplanctoniques	-	-	0.32 *	-0.44 **	-0.38 **	-	-	-	-	-
Nanoeucaryotes	0.37 **	-0.36 *	-	-	-	0.39 **	-	-	-	-
Picophytoplancton total	0.58 ***	-0.39 **	-	0.40 **	-	0.49 ***	-	-	-	-
<i>Prochlorococcus</i>	0.45 **	-0.32 *	-	0.48 ***	-	0.41 **	-	-	-	-
<i>Synechococcus</i>	0.36 *	-	-	0.43 **	-0.37 **	0.50 ***	-	-	-0.28 *	-
Picoeucaryotes	0.47 **	-0.28 *	-	-	-	-	-	-	-	0.36 **

7. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Les zones tropicales et intertropicales de l'Océan Indien sont relativement peu étudiées au regard des recherches menées en Europe, en Amérique du Nord ou en Antarctique.

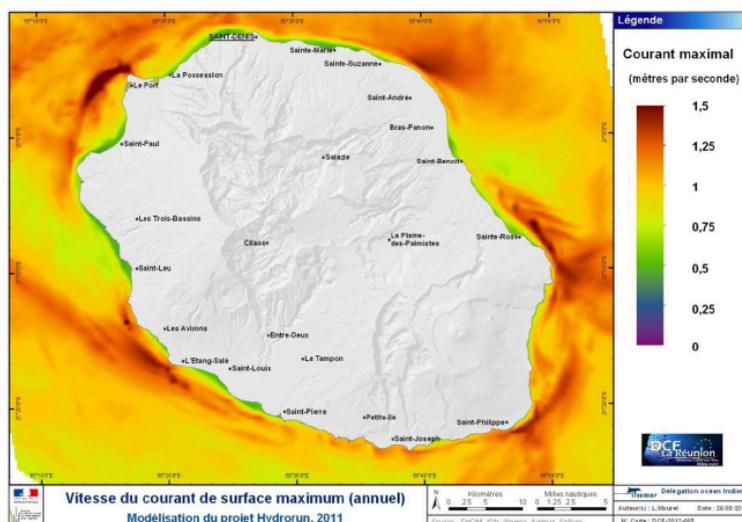
Dans la région intertropicale de l'Océan Indien, les conditions sont généralement oligotrophes (Tripathy et al. 2020) ou ultra-oligotrophes (Kletou & Hall-Spencer 2012). Le picophytoplancton y représente $\approx 90\%$ de la chl *a* totale en surface et au niveau du maximum profond de chlorophylle (DCM), qui atteint 120 m de profondeur (Kletou & Hall-Spencer 2012). Il est majoritairement composé de *Prochlorococcus*, de *Synechococcus* (Flombaum et al. 2013) et de picoeucaryotes (Not et al. 2008). La dominance des *Prochlorococcus* et des *Synechococcus* dans les environnements très pauvres en phosphore est en partie expliquée par leur capacité à former des membranes lipidiques qui requièrent moins de phosphore que celles de la plupart des autres organismes (Van Mooy et al., 2006, Dyrhman et al. 2009). Les picoeucaryotes représentent en moyenne 38 et 50% de la chl *a* totale en surface et au niveau du DCM (Not et al. 2008).

Pendant les épisodes de mousson, dans la zone équatoriale située au Nord de La Réunion, la chl *a* de surface reste basse ($0.17-0.26 \mu\text{g chl } a \text{ L}^{-1}$), mais la contribution de la fraction nanophytoplanctonique à la chl *a* totale s'accroît pour atteindre $\approx 50\%$ (Tripathy et al. 2020).

Dans les zones côtières, il est fréquent que la biomasse phytoplanctonique totale augmente (Sà et al. 2013, Limbu & Kyewalyanga 2015). L'augmentation de la biomasse s'accompagne souvent d'une augmentation de l'importance de la fraction microphytoplanctonique, et des diatomées en particulier (Sà et al. 2013, Kyewalyanga 2016). Des diatomées riches en acides gras des genres *Chaetoceros*, *Skeletonema*, *Thalassiosira* et *Navicula* sont alors fréquemment observées dans les échantillons (Shields and Lupatsch 2012, Sekadende et al. 2021). Aux Seychelles et à Zanzibar, des liens entre rejets de nutriments d'origine anthropique, eutrophisation et développement de blooms toxiques ou nuisibles ont été rapportés (Kyewalyanga 2016).

A La Réunion, les pressions qui s'exercent sur les eaux côtières sont nombreuses et intenses (voir Chapitre 3). Toutefois, en raison des courants permanents, relativement forts et globalement parallèles au littoral (Figure 17), le temps de résidence des eaux côtières est réduit et la dilution des apports est rapide. De plus, les stations d'échantillonnage ont été choisies pour être représentatives de l'état global de la masse d'eau et aucune station du réseau de surveillance ne se situe directement au droit d'une pression particulière (rejet en mer, embouchure de rivière, ...) (Etat des lieux 2019e). Il en résulte que les concentrations en nutriments sont très basses, à l'exception des concentrations en silicates. Néanmoins, l'analyse des paramètres environnementaux réalisée sur les 9 stations permet de distinguer le groupe des « stations au vent » (Sainte-Marie, Bras-Panon, Saint-Philippe, Petite Ile) et le groupe des stations « sous le vent » (L'Ermitage Large, Saint-Louis, L'Ermitage, Saint-Paul et La Possession). Les stations au vent, qui subissent de plein fouet les Alizés et des précipitations extrêmement abondantes (Figure 3), se distinguent des stations sous le vent par des températures de l'eau un peu moins élevées, une salinité plus faible, une eau généralement plus turbide et des concentrations en NO_3 , PO_4 , $\text{Si}(\text{OH})_4$ et chl *a* plus élevées.

Figure 17. Vitesse du courant de surface maximum à La Réunion au cours d'un cycle annuel (Ropert et al. 2012).



Cependant, lorsque l'on ne considère que les 4 stations pour lesquelles des données de cytométrie et de flore totale sont disponibles (Sainte-Marie, Petite Ile, L'Ermitage Large et Saint-Paul), les différences entre « stations au vent » et « stations sous le vent » s'atténuent ou disparaissent, le phytoplancton n'étant pas étudié au niveau des stations de Bras-Panon et de Saint-Philippe qui présentent souvent les conditions environnementales les plus contrastées. Les communautés, dominées par le picophytoplancton et les *Prochlorococcus* en particulier, y sont typiques des milieux ultra-oligotrophes de l'Océan Indien tropical et subtropical.

La corrélation négative entre l'abondance du nanophytoplancton total, des cyanobactéries filamenteuses nanophytoplanctoniques et des *Synechococcus* et le pH permet d'émettre l'hypothèse que ces groupes sont susceptibles de bénéficier de l'acidification des océans. Les études menées sur le sujet montrent des réponses potentiellement importantes des cyanobactéries à l'acidification allant dans le sens d'une augmentation du métabolisme sous certaines conditions lumineuses (Lomas et al. 2012, Bao et al. 2021) mais il est probable que beaucoup d'autres études ne montrant pas d'effet n'aient pas été publiées (Lomas et al. 2012).

Le microphytoplancton total, les diatomées, les dinoflagellés, les nanoeucaryotes, le picophytoplancton total et au sein de celui-ci, les *Prochlorococcus* et les *Synechococcus* sont corrélés positivement aux silicates et à la turbidité. Ces corrélations témoignent probablement des apports terrigènes, qui enrichissent le milieu en éléments nutritifs et favorisent la croissance phytoplanctonique. Les concentrations très élevées en silicates dans les eaux côtières peuvent être mises en relation avec les concentrations élevées en silicates des rivières de La Réunion. En moyenne, celles-ci sont ≈ 2 fois plus élevées que les concentrations en silicates du fleuve Congo et ≈ 4 fois plus élevées que celles de l'Amazonie (Louvât & Allègre 1997). Bien que les silicates ne soient pas considérés comme pression d'origine anthropique, ils peuvent limiter la croissance des diatomées et des silicoflagellés. Des travaux récents (Baines et al. 2012) ont aussi montré que certaines lignées de *Synechococcus* accumulent de la silice en milieu tropical et équatorial. Une turbidité plus élevée peut aussi aider certains groupes, dont les *Prochlorococcus*, à limiter le stress oxydatif lié à un éclairage intense (Mellas-Flores et al. 2012).

Seuls deux groupes, les diatomées et les picoeucaryotes, sont corrélés positivement mais faiblement aux nitrates et à l'azote inorganique dissous. L'analyse des relations entre la composition pigmentaire, étudiée uniquement aux stations Large Ermitage et Saint-Paul, montre que les pigments traceurs des cryptophycées,

des prasinophycées et des chlorophycées ont corrélés positivement à plusieurs formes d'azote. Si ces résultats ouvrent la voie à des recherches complémentaires, ils ne sont pas suffisants pour sélectionner les groupes qui répondent le mieux aux proxys de pression et donc avancer sur la mise au point d'un indice de composition phytoplanctonique adapté aux eaux côtières de La Réunion.

A La Réunion, il nous paraît dès lors utile :

- (i) d'acquérir des données complémentaires dans des zones caractérisées par un gradient croissant d'eutrophisation et/ou par une concentration des pressions (*e.g.* Baie de Saint-Paul), en mettant l'accent sur les mesures de cytométrie en flux et sur les analyses pigmentaires par HPLC;
- (ii) d'augmenter la fréquence des prélèvements pour mieux intégrer les variations temporelles des communautés et tendre vers un suivi bi-mensuel des communautés;
- (iii) de pérenniser ces suivis à moyenne fréquence pendant au moins la durée d'un plan de gestion afin de disposer d'assez de données pour définir des seuils et calculer des incertitudes.

La nouvelle feuille de route des suivis phytoplanctoniques devrait aussi envisager de développer un indice de composition élargi à l'Océan Indien tropical et subtropical, en cohérence avec la grille de chl *a* définie pour les territoires ultramarins de l'Océan Indien. L'intégration des données de Mayotte, où des concentrations en chl *a* et en PO₄ plus élevées qu'à la Réunion sont observées (*cf* visualisation de données via SURVAL), apporterait une partie des informations manquantes.

Sachant que dans les eaux côtières de Zanzibar, les concentrations en chl *a* sont corrélées positivement avec les concentrations en phosphates et en nitrates d'origine anthropique (Limbu & Kyewalyanga 2015) et qu'à l'île Maurice, l'abondance du microphytoplancton total, des diatomées et des cyanobactéries est corrélée positivement aux forts gradients de nutriments (NO₃ : 0.1 - 25 µM, PO₄ : 0.1 - 6 µM) (Sadally et al. 2014), il serait utile de développer des partenariats avec les scientifiques et les gestionnaires des îles voisines afin de mutualiser les données et d'améliorer notre connaissance de la réponse du phytoplancton tropical et subtropical aux pressions.

8. LISTE DES LEGENDES ET DES TABLEAUX

Figure 1. Représentation schématique des houles qui affectent La Réunion (source : Météo France).....	8
Figure 2. Géographie de la Réunion (source : Wikipédia)	9
Figure 3. Cumul des précipitations à La Réunion en 2019 (source : Météo France).....	10
Figure 4. Influence des brises de mer (<i>a</i>) et de terre (<i>b</i>) sur la direction du vent dominant à La Réunion (source : Météo France)	10
Figure 5. Vitesse et direction moyenne des courants de surface de La Réunion (modélisation du projet HYDRORUN, dans Ropert et al. 2012).	11
Figure 6. Répartition géographique des pressions sur les masses d'eau côtières de La Réunion. Pressions liées (a) à l'assainissement collectif (Etat des lieux 2019a), (b) au ruissellement urbain (Etat des lieux 2019c) et (c) au flux d'azote lixivié issu de la fertilisation des sols (Etat des lieux 2019d).	13
Figure 7. Position des stations et paramètres mesurés (voir GTs DCE La Réunion et Mayotte 2019 pour les détails). Carte de Renouvel (2021) modifiée.....	15

Figure 8. Boxplots (concentrations moyennes, P ₁₀ et P ₉₀ , min, max) des paramètres hydrologiques de surface (température, salinité, turbidité et pH) mesurés entre novembre 2015 et novembre 2020 dans les eaux côtières de La Réunion. Données extraites de Quadrige ² . Station de référence : L'Ermitage Large.....	16
Figure 9. Boxplots (concentrations moyennes, P ₁₀ et P ₉₀ , min, max) des concentrations en nutriments azotés mesurées en surface dans les eaux côtières de La Réunion entre novembre 2015 et novembre 2020. Données extraites de Quadrige ² . Station de référence : L'Ermitage Large.....	18
Figure 10. Boxplots (concentrations moyennes, P ₁₀ et P ₉₀ , min, max) des concentrations en phosphates, silicates et chl <i>a</i> mesurées en surface dans les eaux côtières de La Réunion entre novembre 2015 et novembre 2020. Chl <i>a</i> mesurée par fluorimétrie. Données extraites de Quadrige ² . Station de référence : L'Ermitage Large.....	19
Figure 11. Série temporelle de chl <i>a</i> de surface dans la zone Ermitage Large. Mesures satellitaires générées par SEADAS utilisant des données OCI, OC3 et/ou OC5 (version 4.2, résolution de 4 km), moyennes par périodes de 8 jours dans un polygone incluant le point Ermitage Large dans sa partie Est. Source des données : https://www.oceancolour.org/portal/ . <u>a</u> : Série temporelle 2010 - 2020; <u>b</u> : Zoom sur les années 2014 et 2015. D'après Goffart 2020.	20
Figure 12. Boxplots (concentrations moyennes, P ₁₀ et P ₉₀ , min, max) des abondances du picophytoplancton de surface dans les eaux côtières de La Réunion entre novembre 2015 et novembre 2020. Données issues de la cytométrie et extraites de Quadrige ²	21
Figure 13. Boxplots (concentrations moyennes, P ₁₀ et P ₉₀ , min, max) des abondances du nanophytoplancton de surface dans les eaux côtières de La Réunion entre novembre 2015 et novembre 2020. Données issues de la cytométrie en flux et extraites de Quadrige ²	22
Figure 14 . Boxplots des dénombrements de flore totale (micro- et « grand » nano-phytoplancton), de diatomées, de dinoflagellés, de prymnesiophycées et de cyanobactéries microplanctoniques dans les eaux côtières de La Réunion entre novembre 2015 et novembre 2020 (concentrations moyennes, P ₁₀ et P ₉₀ , min, max). Données de surface extraites de Quadrige ²	23
Figure 15. Boxplots des concentrations en chlorophylles et en caroténoïdes à intérêt taxonomique aux points Ermitage Large et Saint-Paul pour la période 2015 - 2020 (concentrations moyennes, P ₁₀ et P ₉₀ , min, max). Données de surface extraites de Quadrige ²	25
Figure 16. Contribution relative (%) des caroténoïdes à intérêt taxonomique aux points Ermitage Large et Saint-Paul au cours de la période 2015 - 2020. Données de surface extraites de Quadrige ²	26
Figure 17. Vitesse du courant de surface maximum à La Réunion au cours d'un cycle annuel (Ropert et al. 2012).....	30
Tableau 1. Flux annuels d'azote et de phosphore apportés dans les masses d'eau côtières de La Réunion par l'assainissement collectif (Etat des lieux 2019a).....	12
Tableau 2. Flux annuels d'azote apportés dans les masses d'eau côtières de La Réunion par l'azote lixivié issu de la fertilisation des sols (Etat des lieux 2019d).	14

Tableau 3 : Corrélations entre les paramètres environnementaux et les principales variables phytoplanctoniques des stations Sainte-Marie, Petite-Ile, Ermitage Large et Saint-Paul (données de surface acquises entre 2015 et 2020). Coefficients de corrélation de Spearman pour $\alpha = 0.05$; - : non significatif. *** p-value <0.001, ** p-value <0.01, * p-value <0.05. 27

9. REFERENCES

- Baines S.B., Twining B.S., Brzezinski M.A., Kraus, J.W., Vogt S., Assael D., McDaniel H. (2012). Significant silicon accumulation by marine picocyanobacteria. *Nature Geoscience* 5, 886-891.
- Bao N., Gao K. (2021). Interactive effects of elevated CO₂ concentration and light on the picophytoplankton *Synechococcus*. *Frontiers in Marine Science* 8, article 634189.
- Birk S., Bonne W., Borja A., Brucet S., Courrat A., Poikane S., Solimini A., van de Bund W., Zampoukas N., Hering D. (2012). Three hundred ways to assess Europe's surface waters : An almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive. *Ecological Indicators* 18, 31-41.
- Carletti A., Heiskanen A. Editors (2009). Water Framework Directive Intercalibration Technical Report - Part 3: Coastal and Transitional Waters. JRC European Commission, 244 pp.
- Cuet P., Turquet J., Chiffolleau J-F. (2006). Phase pilote d'extension du Réseau National Observation à la Réunion. Résultats des trois années de suivi (2002- 2005). Rapport Université de la Réunion - ARVAM - IFREMER pour le compte de la DIREN Réunion, 93 pp.
- Dyhrman S.T., Ammerman J.W., Van Mooy B.A.S. (2009). Microbes and the Marine Phosphorus Cycle. *Oceanography* 20 (2), 110-116.
- Etat des lieux (2019a). Evaluation des pressions et des impacts liés à l'assainissement collectif. Office de l'Eau et de la Biodiversité de La Réunion & Office de l'Eau Réunion, 51 pp.
- Etat des lieux (2019b). Evaluation des pressions et des impacts liés à l'assainissement non collectif. Office de l'Eau et de la Biodiversité de La Réunion & Office de l'Eau Réunion, 64 pp.
- Etat des lieux (2019c). Evaluation des pressions et des impacts liés au ruissellement urbain. Office de l'Eau et de la Biodiversité de La Réunion & Office de l'Eau Réunion, 42 pp.
- Etat des lieux (2019d). Evaluation des pressions et des impacts liés aux activités agricoles. Office de l'Eau et de la Biodiversité de La Réunion, Office de l'Eau Réunion et BRGM, 74 pp.
- Etat des lieux (2019e). Description et état des eaux littorales. Office de l'Eau et de la Biodiversité de La Réunion & Office de l'Eau Réunion, 64 pp.
- Flombaum P., Gallegosa J.L., Gordillo R.A., Rincón J., Zabala L.L., Jiao N., Karl D.M., Li W.K.W., Lomas M.W., Veneziano D., Vera C.S., Vrugt J.A., Martiny A.C. (2013). Present and future global distributions of the marine Cyanobacteria *Prochlorococcus* and *Synechococcus*. *PNAS* 110 (24), 9824-9829.
- Garmendia M., Borja Á., Franco J., Revilla M. (2013). Phytoplankton composition indicators for the assessment of eutrophication in marine waters : Present state and challenges within the European directives. *Marine Pollution Bulletin* 66, 7-16.
- Goffart A. (2019). Consolidation de l'indice composition IC Médit pour les eaux côtières de Méditerranée. Rapport final de l'action 1 du projet « Indicateur de composition phytoplanctonique ». Convention de subvention ONEMA - Université de Liège, 38 pp.
- Goffart A. (2020). Rapport intermédiaire du projet « Indices phytoplanctoniques pour les eaux côtières de La Réunion ». Convention de subvention ONEMA - Université de Liège, 27 pp.
- GTs DCE La Réunion et Mayotte « Physico-Chimie et Phytoplancton » (2019). Fascicule technique pour la mise en oeuvre des suivis « Paramètres Physico-Chimiques & Phytoplancton » des réseaux de contrôle de surveillance DCE dans l'océan Indien, 61 pp.
- Jamon A. (2002). Contribution à l'élaboration d'un plan de zonage de la réserve naturelle marine de La Réunion. Mémoire de DESS, Université de La Réunion, 88 pp.

- Kletou D., Hall-Spencer J.M. (2012). Threats to Ultraoligotrophic Marine Ecosystems. Marine Ecosystems, Dr. Antonio Cruzado Ed., InTech, 35 pp.
- Kyewalyanga M. (2016). Phytoplankton primary production. Chapter 6 in « Regional State of the Coast Report: Western Indian Ocean », ONU, New York, 20 pp.
- Lampert L. (2017). Calcul d'un indice de composition phytoplanctonique pigmentaire pour les eaux guyanaises (DCE). RST.DYNECO n° 2017-02, 48 pp.
- Lampert L. & Hernandez-Fariñas T. (2018). Détermination d'un indice de composition phytoplanctonique pigmentaire pour les eaux de la Manche et de l'Atlantique (DCE). Action n°24. Rapport final, 66 pp.
- Le Berre I., Louze J., 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. LETG-Brest Géomer / DEAL de La Réunion / IFREMER, 62 pp.
- Limbu S.M., Kyewalyanga 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, 646.
- Lomas M.W., Hopkinson B.M., Losh J.L., Ryan D.E., Shi D.L., Xu Y., Morel F.M.M. (2012). Effect of ocean acidification on cyanobacteria in the subtropical North Atlantic. Aquatic Microbial Ecology 66 211-222.
- Louvat P., Jean C., 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), 3645-3669.
- Lugoli F., Garmendia M., Lehtinen S., Kauppila P., Moncheva S., Revilla M., Roselli L., Slabakova N., Valencia V., Dromph K.M., Basset A. (2012). Application of a new multi-metric phytoplankton index to the assessment of ecological status in marine and transitional waters. Ecological Indicators 23, 338-355.
- Mella-Flores D., Six C., Ratin M., Partensky F., Boutte C., Le Corguillé G., Marie D., Blot N., Gourvil P., Kolowrat C., Garczarek L. (2012). *Prochlorococcus* and *Synechococcus* have evolved different adaptive mechanisms to cope with light and UV stress. Frontiers in Microbiology 3, article 285.
- Ní Longphuirt S., McDermott G., O'Boyle S., Wilkes R., Stengel D.B. (2019). Decoupling abundance and biomass of phytoplankton communities under different environmental controls: a new multi-metric index. Frontiers in Marine Science 6, article 312.
- Not F., Latasa M., Scharek R., Viprey M., Karleskind P., Balagué V., Ontoria-Oviedo I., Cumino A., Goetze E., Vaulot D., Massana R. (2008). Protistan assemblages across the Indian Ocean, with a specific emphasis on the picoeukaryotes. Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers 55, 1456-1473.
- Pachés M., Romero I., Hermosilla Z., Martínez-Guijarro R. (2012). PHYMED: An ecological classification system for the Water Framework Directive based on phytoplankton community composition. Ecological Indicators 19, 15-23.
- Renouvel Q. (2021). Impact de l'activité humaine sur les communautés phytoplanctoniques des eaux côtières de La Réunion. Mémoire de Master 2, Université de Liège (Belgique), 64 pp.
- Romero I., Pachés M., Martínez-Guijarro R., Ferrer J. (2013). GLOPHYMED : An index to establish the ecological status for the Water Framework Directive based on phytoplankton in coastal waters. Marine Pollution Bulletin 75, 218-223.
- Roport M., Duval M., Maurel L., Vermetot C., Mouquet P., Nicet J.B., Talec P., Le Goff R. (2012). Projet Bon Etat II : actualisation de l'état des lieux du SDAGE, volet eaux côtières réunionnaises. Rapport final Volume 1.RST-DOI/2012-4, 228 pp.
- Roy S., Llewellyn C.A., Egeland E.S., Johnsen G.E. (2012). Phytoplankton Pigments : Characterization, Chemotaxonomy and Applications in Oceanography. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 845 pp.
- Sá C., Leal M.C., Silva A., Nordez S., André E., Paula J., Brotas V. (2013). Variation of phytoplankton assemblages along the Mozambique coast as revealed by HPLC and microscopy. Journal of Sea Research 79, 1-11.

- Sadally S.B., Taleb-Hossenkhan N., Bhagooli R. (2014). Spatio-temporal variation in density of microphytoplankton genera in two tropical coral reefs of Mauritius. *African Journal of Marine Science* 36, 423-438.
- Sekadende B.C., Michael A., Painter S.C., Shayo S., Noyon M., Kyewalyanga M.S. (2021). Spatial variation in the phytoplankton community of the Pemba Channel, Tanzania, during the south-east monsoon. *Ocean & Coastal Management* 212, 105799.
- Shields R.J., Lupatsch I. (2012). Algae for aquaculture and animal feeds. *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis* 21 (1), 23-37.
- Soudant D., Belin C. (2010). Evaluation DCE janvier 2010. Elément de qualité phytoplancton. R.INT.DIR/DYNECO/VIGIES/10-03/DS, 19 pp + annexes.
- Spatharis S., Tsiertsis G. (2010). Ecological quality scales based on phytoplankton for the implementation of Water Framework Directive in the Eastern Mediterranean. *Ecological Indicators* 10, 840-847.
- Tripathy S.C., Sabu P., Patra S., Naik R.K., Sarkar A., Venkataramana V., Kerkar A.U., Sudarsanarao, P. (2020). Biophysical Control on Variability in Phytoplankton Production and Composition in the South-Western Tropical Indian Ocean During Monsoon 2014. *Frontiers in Marine Science* 7, article 515.
- UNEP/MAP (2017). 2017 Mediterranean Quality Status Report, 539 pp.
- Van Mooy B.A.S., Rocap G., Fredricks H.F., Evans C.T., Devol, A.H. (2006). Sulfolipids dramatically decrease phosphorus demand by picocyanobacteria in oligotrophic marine environments. *PNAS* 103 (23), 8607-8612.

10. REMERCIEMENTS

Nous remercions tous les personnels qui ont permis l'acquisition, l'analyse et la bancarisation des données utilisées dans ce rapport.

Avec le soutien financier de



OFB
OFFICE FRANÇAIS
DE LA BIODIVERSITÉ

www.ofb.gouv.fr



www.uliege.be