



UNIVERSITÉ DE NANTES



## Mémoire de stage

Représentations spatio-temporelles d'éléments  
phénologiques des dynamiques de la chlorophylle *a* et  
de la turbidité à partir des données satellites sur la  
zone des Antilles françaises

Stage de fin d'études - Master 2 Cartographie et gestion de  
l'environnement

**Août 2021**

SAVELLI Charlotte

Entreprise d'accueil : Ifremer Centre Atlantique (Nantes, 44)

Tuteur : HUGUET Antoine

Période : 01/02/21 – 31/07/21

Référence Ifremer : ODE/VIGIES/21-09 - Diffusion libre



# Remerciements

Je tiens à remercier Antoine Huguet, pour m'avoir encadrée tout au long de mon stage, pour m'avoir aidée et soutenu, et qui m'a permis de réaliser ce stage et ce rapport.

Je souhaite remercier Dominique Soudant, pour m'avoir accueillie dans son service et aidée lors de mon stage.

Je remercie aussi Emilie Gauthier, Emilie Duc, Sarah Bonnet, Amélie Regimbart et tous les membres de service VIGIES pour leur accueil, leur bonne humeur et leur soutien.

Je souhaite aussi remercier les personnes faisant partie du projet Oligotrophe et Tropical (OLITROP) telles que Jean-Pierre Allenou, Amélie Sechaud, Anne Daniel, Cathy Treguier et tous les autres pour leur aide et leur écoute.

Je tiens à remercier les professeurs de ma formation universitaire, en particulier Olivier Bourgeois, mon tuteur de stage universitaire, qui m'a transmis les connaissances nécessaires afin d'effectuer ce stage de manière sereine.

# Sommaire

Tables des illustrations.....	4
Table des tableaux.....	6
Présentation de la structure : IFREMER.....	7
I- Introduction.....	8
II- Matériels et méthodes.....	11
II.1- Recherches bibliographiques..... ;;	11
II.2- Les données.....	11
III.3- Méthodes.....	13
III- Résultats.....	17
III.1- Les facteurs désignés comme influençant la quantité de biomasse dans les eaux tropicales.....	17
III.2- Cartographies des médianes des concentrations en chlorophylle a.....	18
3.2.1- La Guadeloupe.....	18
3.2.1.1- Les cartographies.....	18
3.2.1.2- Les corrélations.....	21
3.2.2- La Martinique.....	23
3.2.2.1- Les cartographies.....	23
3.2.2.2- Les corrélations.....	24
3.2.3- Saint-Martin.....	26
3.2.3.1- Les cartographies.....	26
3.2.3.2- Les corrélations.....	27
III.3- Cartographies des sous-zones déterminées.....	28
3.3.1- Cartographies de la Guadeloupe.....	28
3.3.1.1- Le large.....	28
3.3.1.2- Le littoral.....	31
3.3.2- Cartographies de la Martinique.....	33
3.3.2.1- Le large.....	33
3.3.2.2- Le littoral.....	35
3.3.3- Cartographies de Saint-Martin.....	36

3.3.3.1- Le large.....	36
3.3.3.2- Le littoral.....	38
3.3.4- Tests de corrélation pour le large et le littoral.....	39
III.4- Les modèles linéaires dynamiques.....	40
3.4.1- Exemple d'un fichier DLM obtenu.....	40
3.4.2- Cartographies des séries temporelles pour la Guadeloupe.....	42
3.4.3- Cartographies des séries temporelles pour la Martinique.....	43
3.4.4- Cartographies des séries temporelles pour Saint-Martin.....	44
3.4.5- Les dates d'apparition du pic des concentrations en chlorophylle a.....	44
IV- Discussion.....	45
V-Conclusion.....	52
Références bibliographiques.....	54
Annexes.....	

# Table des Illustrations

<u>Figure 1</u> : Vue aérienne de l'Anse Meunier et de l'îlet Cabrits – Etang des Salines, Martinique.	
<u>Figure 2</u> : Représentation de la zone d'étude : les Antilles Françaises.....	8
<u>Figure 3</u> : Schéma récapitulatif de la méthode utilisée pour l'utilisation des données satellites jusqu'à la mise en place de DLM.....	16
<u>Figure 4</u> : Cartographie des médianes de concentrations en chlorophylle a, sur l'ensemble des années de l'étude (2003 à 2019), pour la Guadeloupe. ....	18
<u>Figure 5</u> : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a pour la Guadeloupe, pour l'année 2008.....	19
<u>Figure 6</u> : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a pour la Guadeloupe, pour l'année 2016.....	20
<u>Figure 7</u> : Diagramme en bâtons des fréquences d'apparition des médianes des concentrations en chlorophylle a pour la Guadeloupe. ....	21
<u>Figure 8</u> : Graphiques représentant la droite de régression linéaire et le coefficient de corrélation de Pearson par percentile, pour la Guadeloupe. Avec A) Percentiles 0-45, B) Percentiles 45-70, C) Percentiles 70-95 et D) Percentiles 95-100.....	22
<u>Figure 9</u> : Histogrammes représentant le nombre de pixels par percentiles selon les années, pour la Guadeloupe. Avec A) Percentiles 0-45, B) Percentiles 45-70, C) Percentiles 70-95 et D) Percentiles 95-100.....	23
<u>Figure 10</u> : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a sur l'ensemble des années de l'étude (2003-2019), pour la Martinique.....	24
<u>Figure 11</u> : Histogrammes représentant le nombre de pixels par percentiles selon les années, pour la Martinique. Avec A) Percentiles 0-50, B) Percentiles 50-70, C) Percentiles 70-95 et D) Percentiles 95-100.....	25
<u>Figure 12</u> : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a sur l'ensemble des années de l'étude (2003-2019), pour Saint-Martin.....	26
<u>Figure 13</u> : Histogrammes représentant le nombre de pixels par percentiles selon les années, pour Saint-Martin. Avec A) Percentiles 0-50, B) Percentiles 50-70, C) Percentiles 70-95 et D) Percentiles 95-100.....	27
<u>Figure 14</u> : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le large de la Guadeloupe, délimité à partir des trois milles nautiques, pour l'ensemble des années de l'étude (2003-2019).....	29
<u>Figure 15</u> : Cartographie représentant les médianes des concentrations en chlorophylle a pour le large de la Guadeloupe (à partir de trois milles marins), pour l'année 2008.....	30
<u>Figure 16</u> : Cartographie représentant les médianes des concentrations en chlorophylle a pour le large de la Guadeloupe (à partir de trois milles marins), pour l'année 2018.....	30
<u>Figure 17</u> : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le littoral de la Guadeloupe, délimité par les trois milles nautiques, pour l'ensemble des années de l'étude (2003-2019).....	31

<u>Figure 18</u> : Histogrammes représentant le nombre de pixels par années des différentes classes des concentrations en chlorophylle a, pour le littoral de la Guadeloupe (défini à trois milles marins). Avec A) Percentiles 0-50, B) Percentiles 50-70, C) Percentiles 70-85, D) Percentiles 85 à 95 et E) Percentiles 95-100.....	32
<u>Figure 19</u> : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le large de la Martinique, délimité à partir des trois milles nautiques, pour l'ensemble des années de l'étude (2003-2019).....	33
<u>Figure 20</u> : Cartographie représentant les médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le large de la Martinique (à partir de trois milles nautiques), pour l'année 2010.....	34
<u>Figure 21</u> : Cartographie représentant les médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le large de la Martinique (à partir de trois milles nautiques), pour l'année 2016.....	34
<u>Figure 22</u> : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le littoral de la Martinique, délimité à partir des trois milles nautiques, pour l'ensemble des années de l'étude (2003-2019).....	35
<u>Figure 23</u> : Histogrammes représentant le nombre de pixels par années des différentes classes des concentrations en chlorophylle a, pour le littoral de la Martinique (défini à trois milles marins). Avec A) Percentiles 0-50, B) Percentiles 50-70, C) Percentiles 70-85, D) Percentiles 85 à 95 et E) Percentiles 95-100.....	36
<u>Figure 24</u> : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le large de Saint-Martin, délimité à partir des trois milles nautiques, pour l'ensemble des années de l'étude (2003-2019).....	37
<u>Figure 25</u> : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le littoral de Saint-Martin, délimité à partir des trois milles nautiques, pour l'ensemble des années de l'étude (2003-2019).....	38
<u>Figure 26</u> : Histogrammes représentant le nombre de pixels par années des différentes classes des concentrations en chlorophylle a, pour le littoral de Saint-Martin (défini à trois milles marins). Avec A) Percentiles 0-50, B) Percentiles 50-80, C) Percentiles 80-95, D) Percentiles 95-100.....	39
<u>Figure 27</u> : Exemple d'un fichier DLM obtenu pour un point spécifique pour la Guadeloupe....	40
<u>Figure 28</u> : Graphique du niveau moyen de la distribution des données (en log).....	41
<u>Figure 29</u> : Graphique représentant la saisonnalité et la phénologie des concentrations en chlorophylle a.....	41
<u>Figure 30</u> : Cartographie du nombre de pics par lieux du littoral de la Guadeloupe, d'une distance de trois milles nautiques, pour l'année 2003.....	42
<u>Figure 31</u> : Cartographie du nombre de pic par lieu du littoral de la Martinique, d'une distance de trois milles nautiques, pour l'année 2003.....	43
<u>Figure 32</u> : Cartographie du nombre de pic par lieu du littoral de Saint-Martin, d'une distance de trois milles nautiques, pour l'année 2003.....	44

## Table des tableaux

<u>Tableau 1</u> : Récapitulatif des facteurs déterminés comme influant dans la production de biomasse dans la zone des Antilles françaises.....	17
--	----

## Présentation de la structure : IFREMER

L'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER) a été fondé en 1984. C'est un Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC), qui travaille pour les ministères de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI), de la Transition écologique (MTE), de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA). Il a pour missions de connaître, d'évaluer et de mettre en valeur les ressources des océans afin de permettre leur exploitation durable, d'améliorer les méthodes de surveillance et de permettre un développement socio-économique du monde maritime.

Ce stage s'est déroulé au sein du service Valorisation de l'Information pour la Gestion Intégrée Et la Surveillance (VIGIES), qui assure un soutien opérationnel et méthodologique aux unités en charge de l'observation et de la surveillance du littoral. Cela se traduit par la coordination de l'expertise scientifique apportée en appui aux politiques publiques de protection et de gestion du milieu marin côtier, pour la Directive Cadre sur l'Eau et la Directive Cadre Stratégie Milieu Marin par exemple et par la coordination de la surveillance des milieux et la coordination opérationnelle du Réseau d'Observation et de Surveillance du Phytoplancton et de l'Hydrologie (REPHY). De plus, ce service prend en charge la gestion des données du Système d'Information Quadrigé, qui est la banque nationale de données des réseaux littoraux et de la Directive Cadre sur l'Eau. Pour finir, le service VIGIES assure une partie de la valorisation des données de l'observation et de la surveillance via la mise en place de méthodologies de traitements de données, notamment sur les séries longues.

## I- Introduction

Les écosystèmes tropicaux sont de gigantesques réservoirs de biodiversité. Ce sont des milieux complexes, difficiles à gérer et à protéger. Les principales menaces qui pèsent sur eux sont extrêmement liées aux activités humaines (pollution, introduction d'espèces envahissantes, surexploitation...). Il s'ensuit que les services écosystémiques (alimentation, ressource en eau, médicaments...) sont affectés. Le bon fonctionnement et la protection de ces environnements peuvent être indispensables pour la survie de certaines populations locales. Une bonne connaissance de ces écosystèmes est nécessaire pour développer des stratégies de conservation et de préservation. (C. Nivet et al., 2010). Les études se multiplient mais plusieurs problématiques restent encore à aborder. Concernant ce stage, la zone d'étude a été délimitée sur les trois îles françaises situées dans l'archipel des Caraïbes : la Guadeloupe, la Martinique et Saint-Martin.

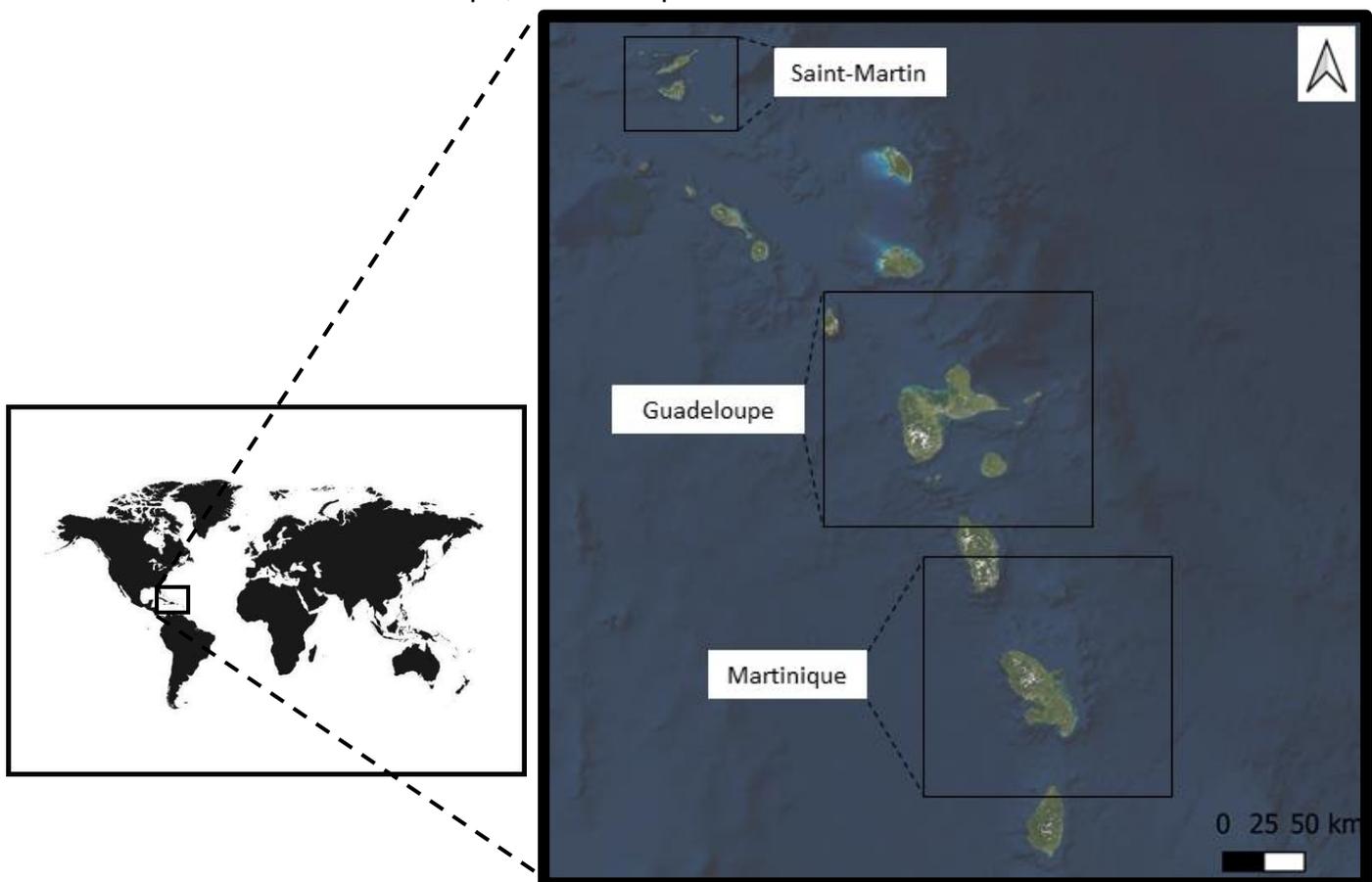


Figure 2 : Représentation de la zone d'étude : les Antilles françaises.

Source : Fond de carte : ESRI.

La Martinique est une île entièrement volcanique, de 110 km<sup>2</sup> de superficie, longue de 60 km du nord-ouest au sud-est et large en moyenne de 20 kilomètres. Elle est très riche écologiquement parlant, elle possède 55 km<sup>2</sup> de récifs coralliens, 50 km<sup>2</sup> d'herbiers et 20 km<sup>2</sup> de mangroves (P. Failler et al., 2014). C'est un département français et une "région ultrapériphérique" de l'Union Européenne. L'économie de cette île repose sur le tourisme, elle accueille près d'un million de visiteurs chaque année, et sur l'exportation de produits agricoles tels que les bananes, la canne à sucre et les ananas. La topographie de l'île est caractérisée par des montagnes abruptes, notamment sur la partie nord volcanique. La majorité de la population et des établissements sont situés le long de la côte (C. Schleupner, 2008).

La seconde île étudiée est la Guadeloupe. Cette île volcanique est composée de deux grandes îles, la Grande-Terre et la Basse-Terre, séparées par la Rivière Salée, entourées d'îlots appelés localement « les dépendances ». Elle est composée d'une chaîne de montagne dominée par un volcan actif, La Soufrière, au niveau de la Basse-Terre (G. Laere et al., 2016). L'économie est basée sur le tourisme et sur la culture de la canne à sucre. De même que la Martinique, cette île possède un littoral diversifié composé de mangrove, de récifs coralliens et d'herbiers.

La troisième île est Saint-Martin. La partie française représente 53 km<sup>2</sup> sur les 90 km<sup>2</sup> de l'île. Elle possède des mornes (petites montagnes) et des ravines, aucune rivière n'est permanente. La principale activité économique est le tourisme de masse et de luxe. C'est une île qui attire énormément, au même titre que la Guadeloupe et la Martinique (Outre-Mer.gouv, 2016).

Ces îles présentent des conditions environnementales et climatiques particulières comme la présence de volcan, des périodes de moussons ou encore des tempêtes tropicales, qui peuvent avoir des conséquences sur le fonctionnement de l'écosystème marin. De plus, ces îles sont bordées par la mer des Caraïbes à l'Ouest et l'océan Atlantique à l'Est, ce qui les rend très diversifiées d'un point de vue écologique. Le principal paramètre étudié dans ce rapport est la Chlorophylle *a*. C'est un pigment photosynthétique du règne végétal et le principal pigment présent dans le phytoplancton. Ce pigment permet la conversion d'énergie lumineuse issue du soleil en énergie chimique grâce à la photosynthèse, autrement dit la fixation de carbone organique sous forme de sucre. C'est un bio-indicateur permettant de révéler et de quantifier la biomasse de phytoplancton (F. Gohin, 2015).

Une étude a été menée au préalable de ce stage par Antoine Huguet (2020), étude utilisant les mêmes données. Ce rapport porte sur l'utilisation des données satellite pour la surveillance marine dans les Antilles. Les données sont en libre-service, sur le catalogue SEXTANT : [https://sextant.ifremer.fr/Donnees/Catalogue#/search?fast=index&content\\_type=json&from=1&to=20&sortBy=changeDate&groupPublished=DATARMOR\\_DATAREF&any=satellites%20trait%C3%A9es](https://sextant.ifremer.fr/Donnees/Catalogue#/search?fast=index&content_type=json&from=1&to=20&sortBy=changeDate&groupPublished=DATARMOR_DATAREF&any=satellites%20trait%C3%A9es). L'étude montre la pertinence de l'utilisation des images satellites dans les Antilles. En effet les données in situ donnent des séries temporelles courtes et les relevés se font toutes les deux semaines lorsque cela est possible. Cependant les séries temporelles constituées à partir de l'imagerie sont beaucoup plus longues et des données sont acquises tous les jours. Elles ont ainsi permis de constituer pour chaque lieu une série temporelle sur quinze années avec des données journalières. Ces données satellites sont donc très pratique car les données in situ sont rares aux Antilles. Cela a mis en évidence des cycles et des saisonnalités de façon beaucoup plus précise et marquée qu'avec les données in situ. Cependant la comparaison avec les données in situ est encore aujourd'hui difficile du fait des problèmes de qualité et de longueur des séries. De plus, des analyses visuelles ont été faites lors de cette étude préliminaire sur les concentrations en chlorophylle *a* sur le littoral. Des zones de « Hotspots » ont été observées. Ce sont des zones qui présentent de fortes concentrations en chlorophylle *a* par rapport au reste des emprises. Pour la Guadeloupe, cela se trouve dans la zone géographique comprise entre Basse Terre et Grande Terre (Annexe 1). Pour la Martinique, la zone se trouve au niveau de la baie de Fort-de-France et la côte Atlantique (Annexe 2). Ces zones ne montrent pas d'évolution significative de concentration en chlorophylle *a* sur la période, ni sur le reste du littoral. Cette étude préliminaire permet de contextualiser et d'apporter une introduction pour le travail qui a été effectué lors du présent stage.

La problématique abordée lors de ce stage est la représentation spatio-temporelle d'éléments phénologiques de la dynamique de la chlorophylle *a* sur une période de 17 années (2003 à 2019) sur la zone des Antilles françaises. La phénologie est l'étude des influences des variations climatiques saisonnières sur l'apparition d'événements annuels périodique pour les animaux et les végétaux (O. Planchon, 2019). Pour ce stage, ce sont donc ces éléments saisonniers climatiques qui vont entrer en jeu dans la dynamique annuelle de la chlorophylle *a* aux Antilles françaises.

## **Organisation du document**

Ce rapport est divisé en trois parties. La première partie définit les facteurs pouvant influencer la biomasse dans les eaux antillaises. Ces facteurs sont importants à définir car ils permettront une interprétation des dynamiques observées. La seconde partie représente les cartographies des concentrations en chlorophylle *a*. Une carte par année et une carte regroupant les 17 années d'étude pour chacune des îles ont été produites. Pour finir, la troisième partie de ce rapport se concentre sur la méthode des DLMs : Modèles Linéaires Dynamiques (D. Soudant, 2019), pour extraire des informations spécifiques en lien avec les séries temporelles des données satellites et les cartographier.

## **II- Matériels et méthodes**

### **II.1- Recherche bibliographique.**

Le premier point méthodologique de ce stage a été de la recherche bibliographique approfondie sur le fonctionnement des écosystèmes. En effet, il était nécessaire de contextualiser et de connaître au mieux l'écosystème étudié. Les recherches se sont basées principalement sur les facteurs pouvant influencer la production de biomasse et la saisonnalité au sein des écosystèmes tropicaux. Pour cela, différents articles ont été résumés. Ils portent sur le fonctionnement des écosystèmes tropicaux, sur l'eutrophisation, sur la dynamique spatiale et temporelle de plusieurs paramètres tels que la production de biomasse, la turbidité et sur les facteurs qui peuvent avoir un rôle significatif dans la production de biomasse et sa saisonnalité (courantologie, pluviométrie...).

### **II.2- Les données.**

La seconde partie du stage a commencé par le traitement des données brutes. Il existe différentes méthodes pour prélever la quantité de biomasse dans l'eau telles l'échantillonnage de l'eau de surface ou le filtrage puis la spectrophotométrie (A. DAMAR, 2003). La technique utilisée ici est la méthode par image satellite. Les données utilisées dans ce rapport proviennent du capteur MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Ce radiomètre imageur est embarqué à bord

de deux satellites Terra et Aqua. La résolution spatiale des données capturées par MODIS est de 1 km<sup>2</sup>. Ce capteur possède 36 canaux spectraux répartis du violet (405nm) à l'Infrarouge thermique (1438 nm). L'emprise des images est de 15000 km<sup>2</sup>. Un maillage a été fait sur les images obtenues puis les données sont passées par des chaînes de traitements et des algorithmes spécifiques. Celui utilisé ici est l'algorithme OC5 de l'Ifremer, mis en place par Francis Gohin (F. Gohin et al, 2002). Cet algorithme permet une estimation de la concentration en chlorophylle *a* significative à partir de 0.05 µg/L. Les fichiers obtenus sont des fichiers NetCDF (Network Common Data Form), comprenant un fichier par jour. Ils contiennent les concentrations en chlorophylle *a* pour chaque lieu, par jour, pour les dix-sept années de l'étude. Ils constituent les séries temporelles sur lesquelles tous les traitements effectués lors de ce stage ont été réalisés.

Concernant les données utilisées pour la détermination des facteurs pouvant avoir un lien avec la dynamique de la chlorophylle *a*, plusieurs sites ont été utilisés. Les données de débits ont été trouvées sur le site de la Banque Hydro de France (hydro.eaufrance.fr). Les stations hydrométriques sélectionnées ont été celles les plus en aval et celles qui possédaient le plus de données possibles sur les plus longues périodes temporelles possibles. L'île de Saint-Martin est exclue de ces études pour manque de données. Les positions des stations hydrologiques ne sont pas connues et donc il n'a pas été possible de trouver les valeurs des débits des fleuves en libre-service. Pour la Guadeloupe, nous avons sélectionné deux stations : la station Goyave à Lamentin et la station de la rivière Moustique à Petit-Bourg (Annexe 9). Pour la Martinique, trois stations ont donc été sélectionnées : la station La Gaschette à Robert, la station La Madame à Fort-de-France et la station Les Coulisses à Rivière-Salée (Annexe 7). Des données de débits mensuels de l'Amazone ont été utilisées lors de ce stage. Ces données proviennent du projet SO-HYBAM. C'est une étude en collaboration entre la France et le Brésil qui mène un travail sur le bassin amazonien. Pour cela, plusieurs stations hydrométriques sont présentes sur l'ensemble du bassin amazonien (Annexe 4). Ces stations relèvent plusieurs paramètres, tels que la température de l'eau, le débit, les paramètres physico-chimiques.... La station choisie est la station d'Óbidos, déterminée comme la station de référence pour les relevés de débits de l'Amazone (J. Callède et al. 2010). Les données de courants ont été prises sur le site de Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). Pour la

bathymétrie, les cartes ont été trouvés sur le site du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) et pour la pluviométrie des bulletins météorologique mensuels et annuels ont été fournis par Météo France.

## II.3- Méthodes.

Les données sont les concentrations en chlorophylle *a* journalières, pendant dix-sept ans. Or les cartographies souhaitées sont des cartes annuelles. Il est donc nécessaire de ramener ces nombreuses données à une observation par année, en utilisant pour cela un opérateur d'agrégation. L'opérateur choisi pour ce travail ici est la médiane, moins sujette aux variations que la moyenne et adaptée à la distribution du paramètre choisi. Les médianes annuelles des concentrations en chlorophylle *a* (en  $\mu\text{g/L}$ ) ont donc été calculées pour chaque pixel constituant notre image satellite. Pour classer ces concentrations et réaliser les légendes, les percentiles ont été calculés sur l'ensemble des séries temporelles de chaque île grâce au logiciel R, avec la formule « quantile ». Chaque légende est unique pour chaque île et pour chaque emprise. Les choix des percentiles pour les classes ont été fait de manière à choisir les percentiles qui délimitaient des changements de valeurs important dans la série temporelle entière. Les cartes annuelles de la même île ont les mêmes légendes, ce qui permet une comparaison interannuelle.

A l'issue de ces traitements, un test de corrélation de Pearson et une droite de régression linéaire ont été effectués, suite à la vérification de la normalité des données et à l'homogénéité des variances, grâce à la formule « cor.test » sur le logiciel R. Ces tests ont permis de savoir si une corrélation entre les années et les concentrations en chlorophylle *a* pouvait être observée. En complément de ces tests, des histogrammes ont été produits pour voir la distribution des données selon les percentiles et les années. Cela permet de visualiser plus clairement les années qui sortent du lot. Suite à ces cartographies, les traitements associés et les observations qui en ont été faites, la décision de diviser les emprises en deux sous-zones a été prise car la dynamique est plus forte sur les côtes. Le large et le littoral seront traités de manière distincte. Cela permettra de faire des observations plus précises et de différencier les distributions des valeurs.

La délimitation de la zone des eaux côtières s'est basée sur les masses d'eau définies par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). Une masse d'eau côtière est « une partie distincte et significative des eaux de surface situées entre la ligne de base servant pour la mesure de la largeur des eaux territoriales et une distance d'un mille marin » (Data.gouv.fr). Cependant pour la Guadeloupe, cela prenait en compte une grande zone d'eau entre les différentes îles (île de Marie-Galante, la Désirade...). En effet la limite des masses d'eau DCE est fixée à un mille de la "ligne de base", qui est le trait de côte élargi aux îles. Ceci explique que l'on ait de si grandes masses d'eau en Guadeloupe (Annexe 3). Un second découpage nous a paru pertinent : le découpage à un mille nautique est très cohérent vis à vis de la DCE mais le signal risque de ne pas être optimal sur cette bande côtière assez étroite, un découpage au niveau des trois milles nautiques a donc été décidé. Les cartes issues de ces traitements ont une légende basée de la même manière que les cartes sans découpage, basée sur le calcul des percentiles pluriannuels. Chaque calcul des percentiles se fait pour chaque série temporelle des différentes îles et des différents découpages. Chaque île et chaque type de découpage a sa propre légende car chaque zone a sa propre dynamique. Les cartes annuelles d'une même île et d'un même découpage ont les mêmes légendes, pour permettre une comparaison entre années.

Suite aux cartographies, l'étude d'un lien entre les observations du large et du littoral avec l'hydrographie a été menée. Pour cela, des tests de corrélation de Pearson ont été de nouveau effectués (formule cor.test sur le logiciel R). Pour le large, le test de corrélation a été effectué entre les débits de l'Amazone mensuels moyens puis maximums, provenant du projet SO-HYBAM comme dit précédemment, et les concentrations annuelles d'un point au large choisi pour la Martinique (Annexe 5) et la Guadeloupe (Annexe 6). Pour le littoral, le test a été effectué entre les débits mensuels moyens des stations hydrographiques choisies de fleuve débouchant sur la zone de hotspot pour la Martinique (Annexe 7) et la Guadeloupe (Annexe 9), présentées précédemment, et les médianes des concentrations de chlorophylle *a* annuelles pour un point choisi sur le littoral, au sein des hotspots de la Martinique (Annexe 8) et de la Guadeloupe (Annexe 10). L'étude des dynamiques des médianes des concentrations en chlorophylle *a* sur la zone littorale a été effectuée en collaboration avec un autre stage, dans le cadre du projet Oligotrophe et Tropical (OLITROP) en partenariat avec les stations IFREMER de Brest, de Martinique, de Guadeloupe, de la Réunion et de

Mayotte. C'est un projet financé par l'agence française de développement. Le stage a été effectué à Brest, par François Méric, sur les pressions anthropiques présente dans les îles françaises Antillaises et de l'Océan Indien. Il a identifié les différentes pressions présentes sur chaque île et il a cartographié les zones les plus exposées aux pressions anthropiques.

Pour finir, les Modèles Linéaire Dynamiques (DLM) ont été calculés grâce à des scripts R pour extraire les composantes tendancielle et saisonnières des séries temporelles à partir desquelles les éléments phénologiques vont être extraits, ce qui fait partir des objectifs de ce travail (Figure 3). Ifremer a développé des scripts de traitements de données de Modèle linéaire dynamique parallélisé, ce qui est pertinent dans le traitement de nos milliers de données. De plus, ces codes fournissent déjà des éléments de phénologie qui nous intéressent. Ils sont bien adaptés à l'analyse des séries temporelles environnementales marines (D. Soudant et al., 2019). Ces modèles peuvent contenir différents composants (e.g. une tendance, un terme saisonnier ou certaines variables indépendantes et leurs coefficients). Un DLM contient donc les données et une saisonnalité (factorielle ou trigonométrique). Choisir les paramètres du modèle, les variances d'observation et d'évolution (ici égales à 0), peut être fait par la méthode du maximum de vraisemblance afin d'obtenir les modèles les plus vraisemblables possible, d'un point de vue statistique mais également d'un point de vue biologique et écologique. De plus, ils permettent de traiter les séries temporelles comportant des données manquantes et peuvent prendre en compte les changements intervenant dans les séries via des « interventions ». Une intervention est une modification d'un paramètre du modèle afin de prendre en compte une information exogène telles que les données dites exceptionnelles. Ce sont des mesures avec des variances d'observation inhabituellement élevées, quelle que soit leur source. Il est important de les traiter car elles peuvent avoir un impact important sur les résultats d'un modèle. Dans le cadre des DLMs, on peut identifier les données présentant un caractère exceptionnel et on peut les traiter de manière appropriée. Cette possibilité a été mise en œuvre pour les modèles utilisés ici.

Cette méthode a été effectuée seulement sur les données du littoral car les données sont plus graduées au niveau des concentrations, la dynamique est plus marquée que sur le large. Nous avons gardé le découpage basé sur les trois milles nautiques, qui est plus cohérent géographiquement car il exclut les points entre les

îlots pour la Guadeloupe. De plus, les données utilisées sont les médianes des concentrations en chlorophylle *a* agrégées à la quinzaine, pour s'aligner sur les échantillonnages in situ (tous les quinze jours). Nous obtenons donc un fichier par pixel (lieu). Ils donnent pour chaque pixel l'évolution temporelle de la concentration sur les dix-sept années d'études. Ces fichiers sont regroupés pour obtenir un fichier par année et pour ensuite procéder à une cartographie des résultats. Deux types d'informations sont donc extraits :

- Le nombre de pic de concentration en chlorophylle *a* par année, soit un pic soit deux.
- La date d'apparition du maximum du pic en question. Le fichier nous donne le numéro de la quinzaine pour laquelle apparait le pic. Si deux pics sont présents, le plus grand est gardé.

Les cartographies seront faites seulement sur le nombre de pic par année, par manque de temps.

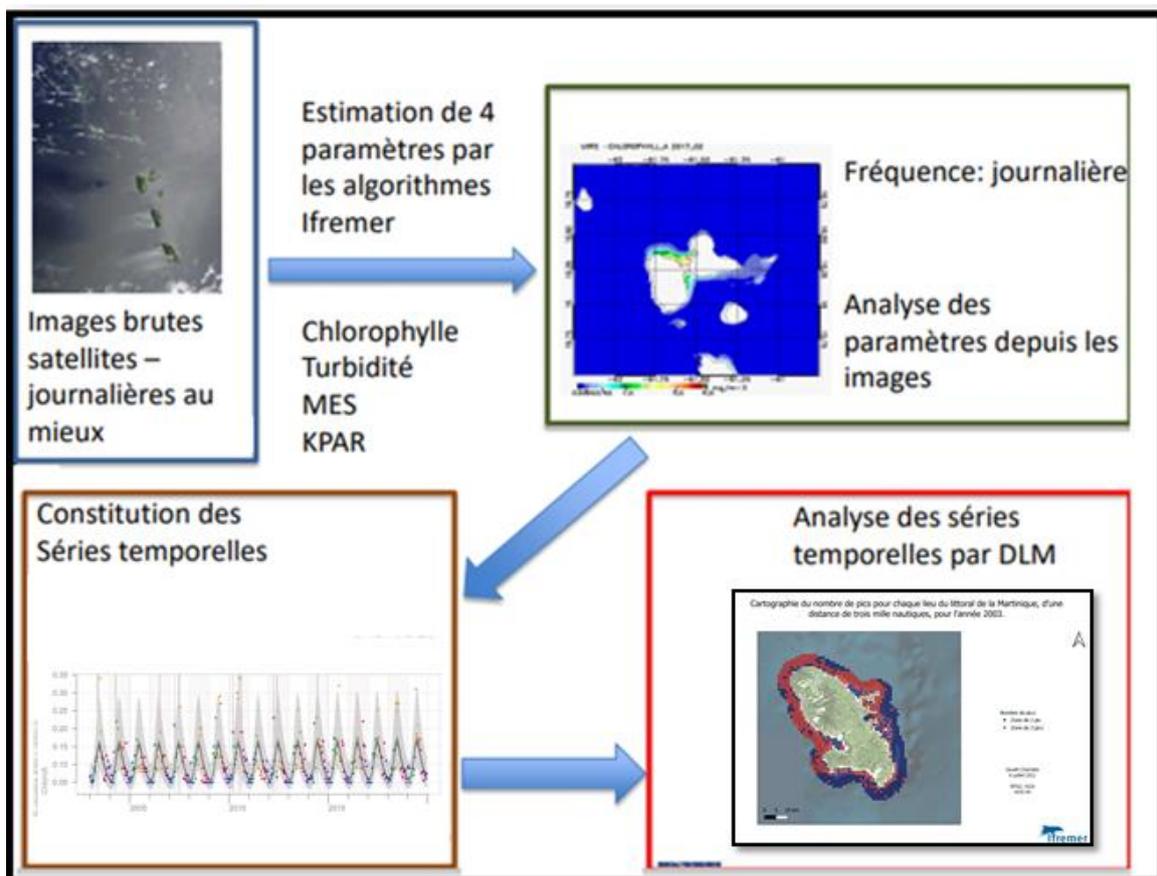


Figure 3 : Schéma récapitulatif de la méthode utilisée pour l'utilisation des données satellites jusqu'à la mise en place de DLM.

### III- Résultats

#### III.1- Détermination des facteurs influençant la production de biomasse dans les eaux tropicales.

Tableau 1 : Récapitulatif des facteurs déterminés comme influençant la production de biomasse dans la zone des Antilles françaises.

Paramètres	Influences	Concernant notre zone d'étude
La disponibilité en nutriment  (M.A. Burford, I.T. Webster et al.,2012, Ario DAMAR, 2003)	Augmente la production de biomasse, mais reste spécifique à chaque site.	Important à déterminer
La température  (Karydis. M., Kitsiou D., 2019)	Une augmentation de la température provoque une stimulation de la photosynthèse et une diminution la viscosité, qui facilite la diffusion des nutriments.	Important pour les espèces : pas le cas pour ce rapport
La turbidité  (M.A. Burford, I.T. Webster et al.,2012, A. Damar, 2003)	Cela diminue la disponibilité de la lumière donc provoque une diminution de la production de biomasse.	Important à déterminer : en lien avec la disponibilité en lumière
Le transport horizontal  (A. Damar, 2003)	Il provoque un temps de séjour de l'eau plus court et par conséquent un renouvellement et un apport de nutriments plus fréquent : cela contribue à l'augmentation de la production de biomasse.	Intéressant pour les courants et les mouvements hydrodynamiques

Le pâturage (A.Damar, 2003)	Il diminue la production de biomasse par consommation du phytoplancton.	Difficile à déterminer
--------------------------------	---	------------------------

Les recherches bibliographiques ont permis d'identifier certains facteurs pouvant influencer la dynamique de la chlorophylle a. Les facteurs pouvant concerner les Antilles françaises sont la disponibilité en nutriments, la turbidité et le transport horizontal.

## III.2- Cartographies des médianes des concentrations en chlorophylle a.

L'ensemble des cartes annuelles produites lors de ce stage se situent dans l'Atlas cartographique fournit avec ce rapport (partie I).

### 3.2.1- Cartographies de la Guadeloupe.

#### 3.2.1.1- Les cartographies

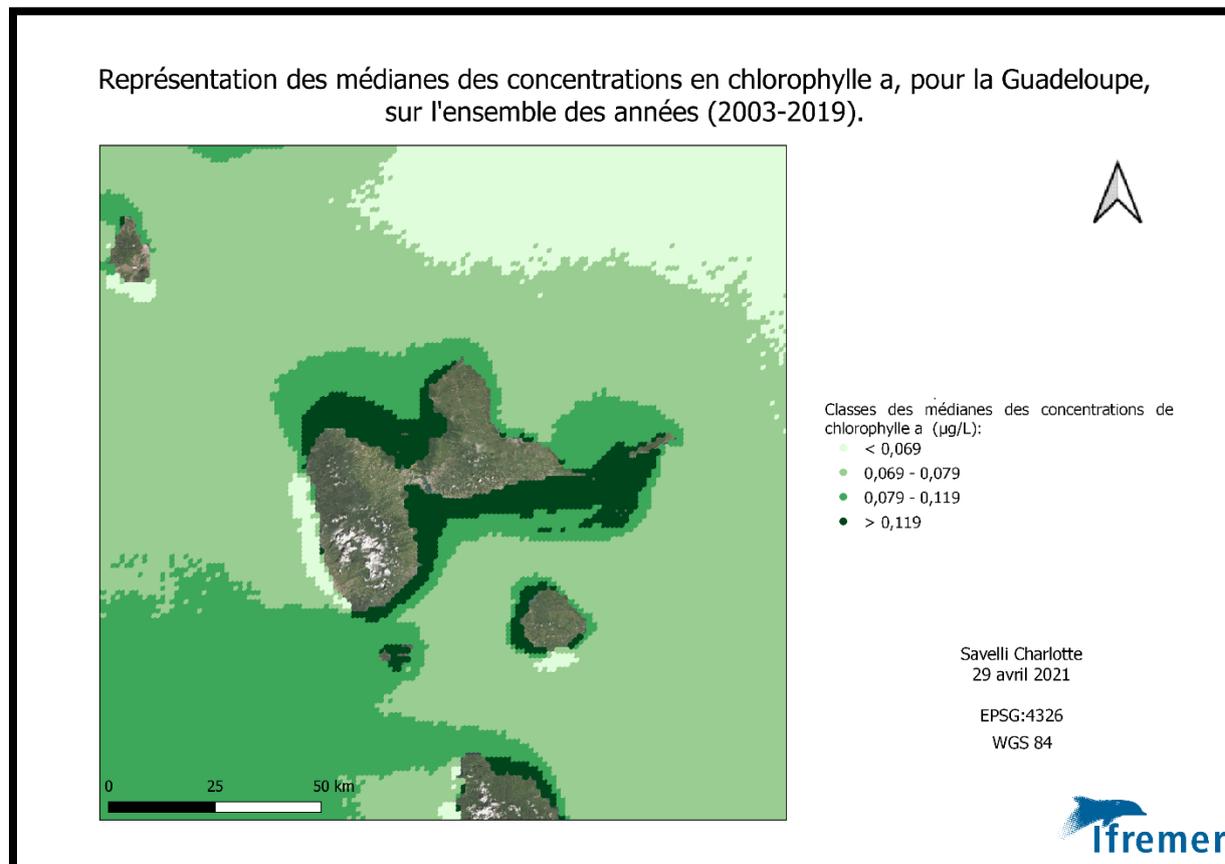


Figure 4 : Cartographie des médianes de concentrations en chlorophylle a, sur l'ensemble des années de l'étude (2003 à 2019), pour la Guadeloupe.

Source : IFREMER

La distribution a été divisée selon quatre parties à l'aide des percentiles P45, P70 et P95. Ce sont les percentiles qui divisent au mieux la distribution de manière la plus homogène possible.

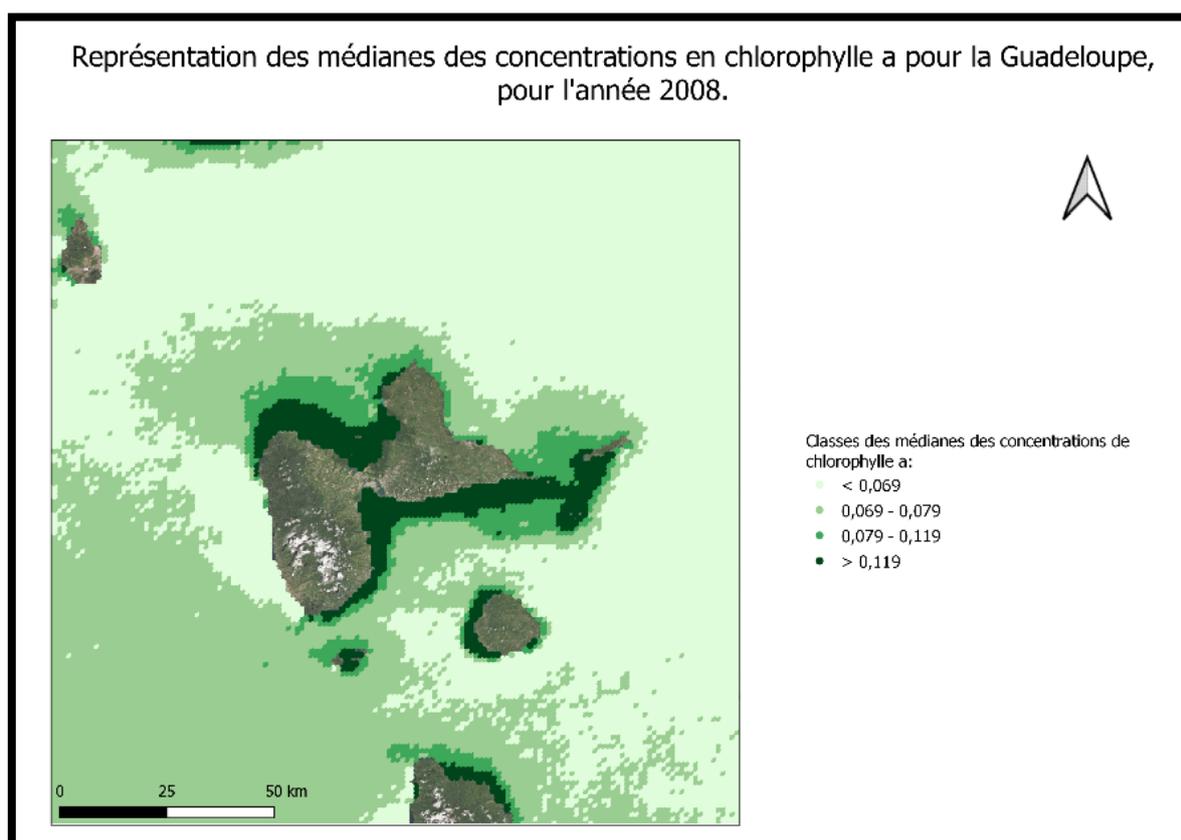
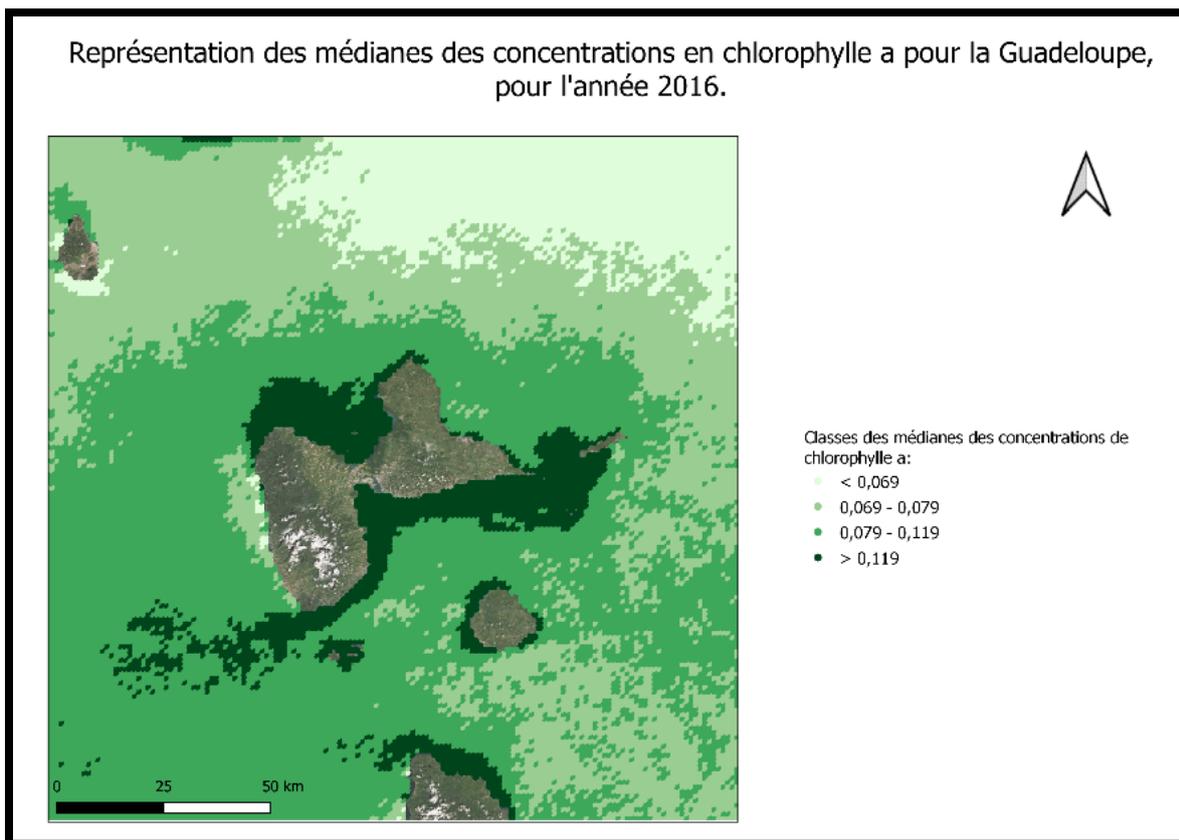


Figure 5 : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a pour la Guadeloupe, pour l'année 2008.

Source : IFREMER

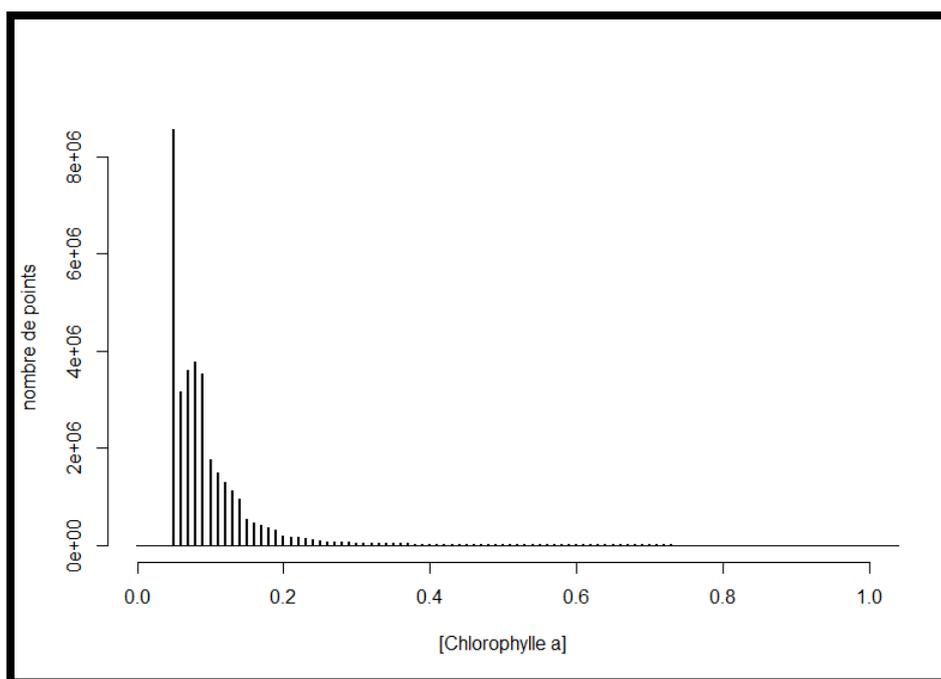


**Figure 6** : Cartographie représentant les médianes des concentrations en chlorophylle a pour la Guadeloupe, pour l'année 2016.

Source : IFREMER

La première information qui est visible sur ces cartes (Figure 4) sont les concentrations de chlorophylle a de la zone littorale qui possède les valeurs les plus hautes de la distribution (classe  $> 0.119 \mu\text{g/L}$ , P95). Une autre zone du littoral peut aussi être observée sur la côte Ouest qui comporte des concentrations très faibles, et cela sur toutes les années (Atlas).

De plus, les années 2008 (Figure 5) et 2012 sont des années avec des valeurs extrêmement faibles (inférieures au percentile 50) au large. A contrario, une zone au large apparaît sur certaines années avec des concentrations contenues dans une des classes les plus haute de la distribution. Cette zone est observée lors des années 2003, 2004, 2010, 2011, 2016 (Figure 6), 2017, 2018 et 2019 (Atlas).



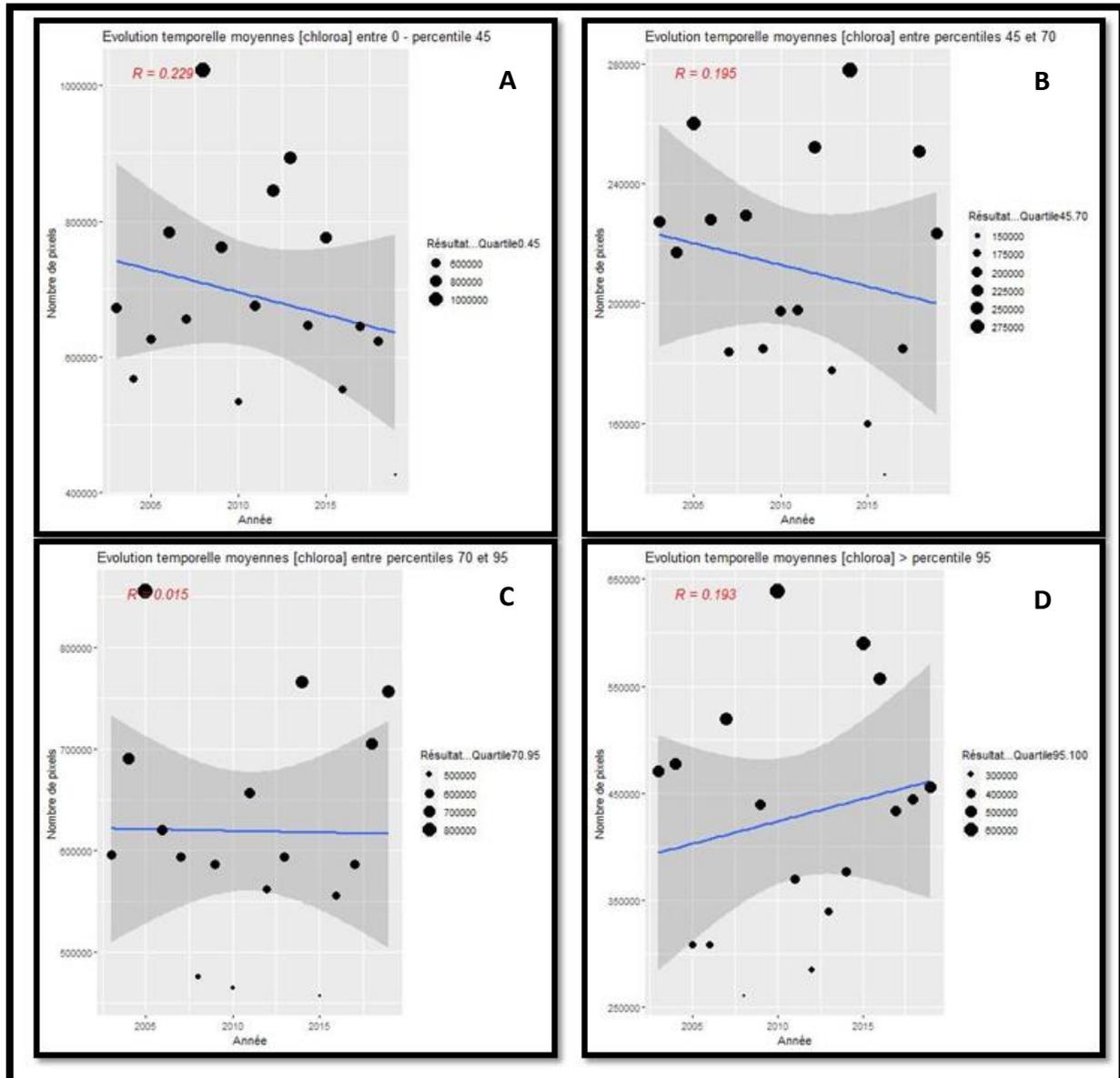
**Figure 7** : Diagramme en bâtons des fréquences d'apparition des médianes des concentrations en chlorophylle a pour la Guadeloupe.

La distribution des médianes est très asymétrique et la valeur la plus faible est la plus représentée (Figure 7). Cela correspond aux points du large qui possèdent des concentrations plus faibles que le littoral. Cela explique la distribution des données et donc les légendes.

### 3.2.1.2- Les corrélations

Des tests de corrélation de Pearson, suite à la vérification de la normalité des données et à l'homogénéité des variances, ont été produits. Les graphiques représentant la droite de régression linéaire et le coefficient de corrélation par percentile suite au test statistique ont été représentés pour permettre de visualiser les résultats (Figure 8). Chaque graphique représente la quantité de pixels par année présent par percentile. Par exemple, la figure 8A représente la quantité de pixels avec les faibles valeurs de la distribution (percentile 0 au percentile 45). L'année 2008 est l'année avec le plus de pixels de faibles concentrations. De la même manière, la figure 8D représente le nombre de pixels de fortes concentrations par année. L'année 2010

est celle qui possède le plus de pixels avec les concentrations élevées de la distribution.



**Figure 8 :** Graphiques représentant la droite de régression linéaire et le coefficient de corrélation de Pearson par percentile, pour la Guadeloupe. Avec A) Percentiles 0-45, B) Percentiles 45-70, C) Percentiles 70-95 et D) Percentiles 95-100.

Le coefficient de corrélation est de 0.229 pour les données contenues entre le percentile 0 et le percentile 45, de 0.195 pour les données contenues entre les percentiles 45 et 70, de 0.015 pour les données contenues entre les percentiles 70 et 95 et de 0.193 pour les données contenues au-dessus du percentile 95. Ces coefficients sont donc très proches de 0.

Les histogrammes représentant le nombre de pixels par percentile et par année ont été produits (Figure 9).

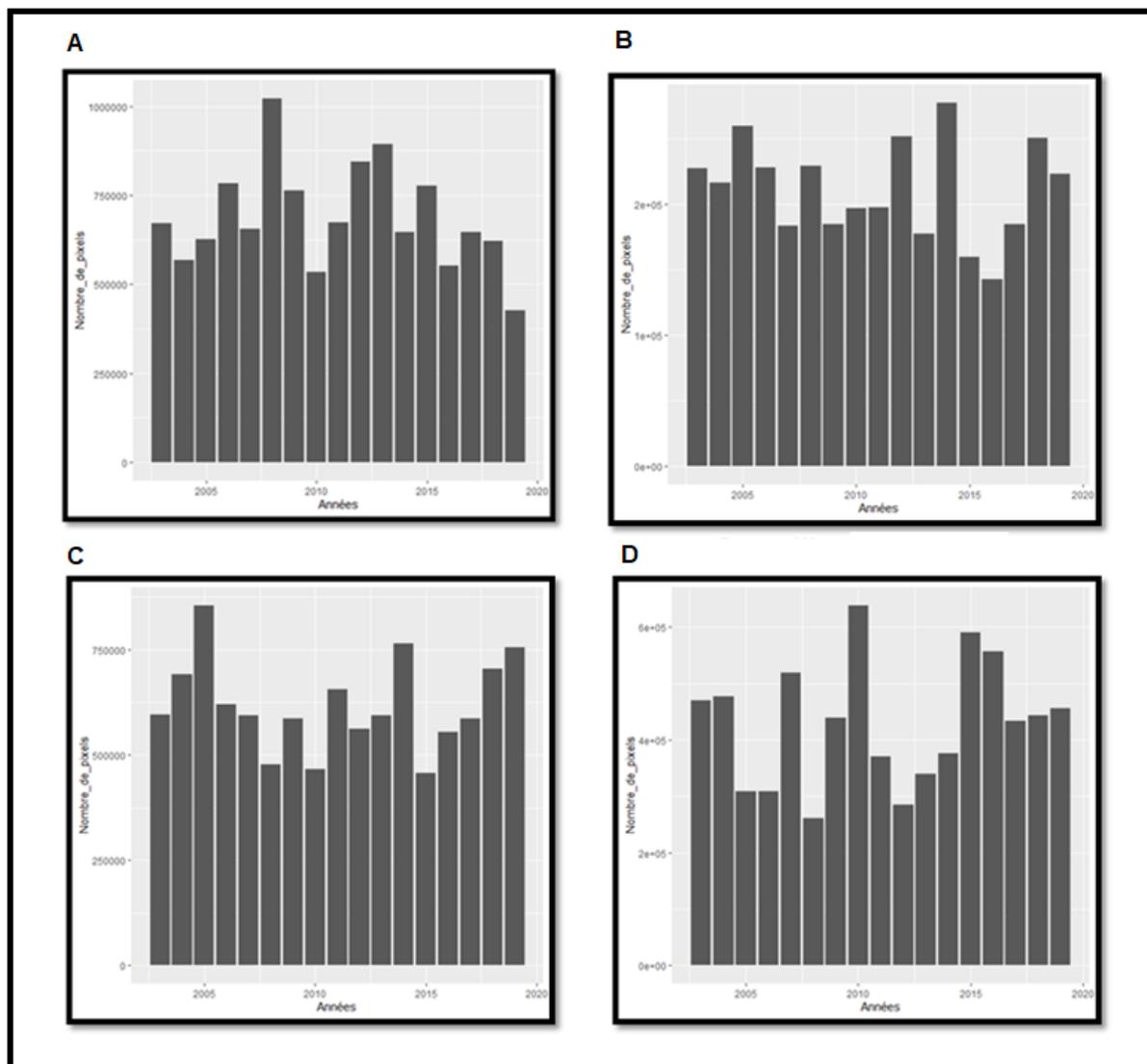
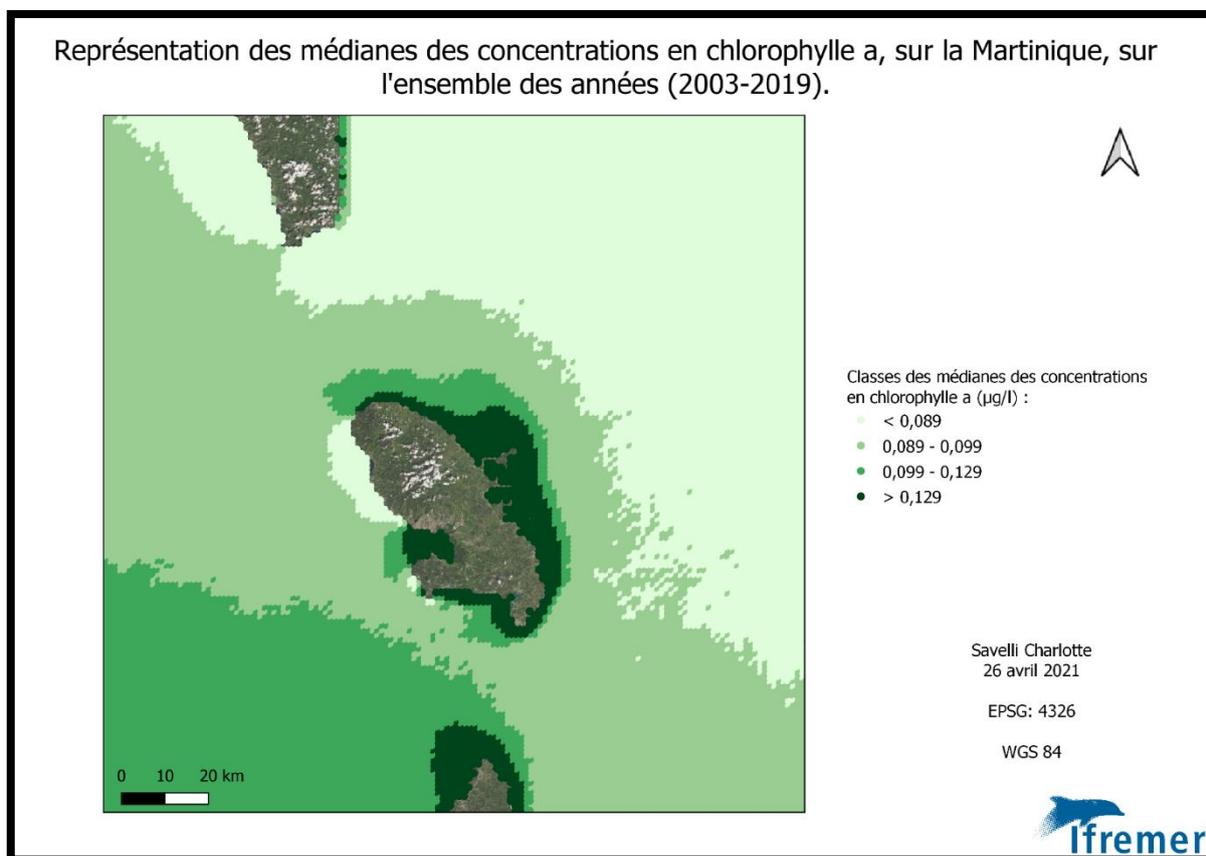


Figure 9 : Histogrammes représentant le nombre de pixels par percentiles selon les années, pour la Guadeloupe. Avec A) Percentiles 0-45, B) Percentiles 45-70, C) Percentiles 70-95 et D) Percentiles 95-100.

Les histogrammes montrent que les fortes concentrations qui se trouvent dans les percentiles 0 à 45 font partie des années 2008, 2012 et 2013. De plus, l’histogramme 9D donne le nombre de pixels qu’on retrouve dans le percentile 95 et plus, c’est-à-dire les médianes des concentrations les plus élevées de la distribution. Les années 2010, 2015 et 2016 ressortent. Les résultats obtenus avec ces histogrammes concordent avec les observations faites grâce aux cartes.

## 3.2.2- La Martinique

### 3.2.2.1- Les cartographies



**Figure 10** : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a sur l'ensemble des années de l'étude (2003-2019), pour la Martinique.

Les percentiles utilisés ici pour les quatre classes de la distribution sont P50, P70, P95. Ce ne sont pas les mêmes que ceux de la Guadeloupe car les valeurs sont différentes.

Pour la Martinique (Figure 10), les concentrations de chlorophylle a de la zone littorale sont les plus élevées de la distribution (classe  $> 0.129 \mu\text{g/l}$ , le percentile 95). Ce sont les années 2003, 2004, 2016, 2017 et 2019 qui sont particulières (Atlas). Elles montrent une zone de concentrations se trouvant dans le percentile 95 au large (Sud-ouest). De plus, les années 2010 et 2012 montrent de très faibles concentrations sur le large (inférieures au percentile 50).

### 3.2.2.1- Les corrélations

De même que pour la Guadeloupe, les coefficients de corrélation obtenus suite au test de corrélation de Pearson sont extrêmement bas, proche de 0.

Comme précédemment, les histogrammes représentant les fréquences d'apparitions des médianes des concentrations en chlorophylle *a* au fil des années ont été produits (Figure 11).

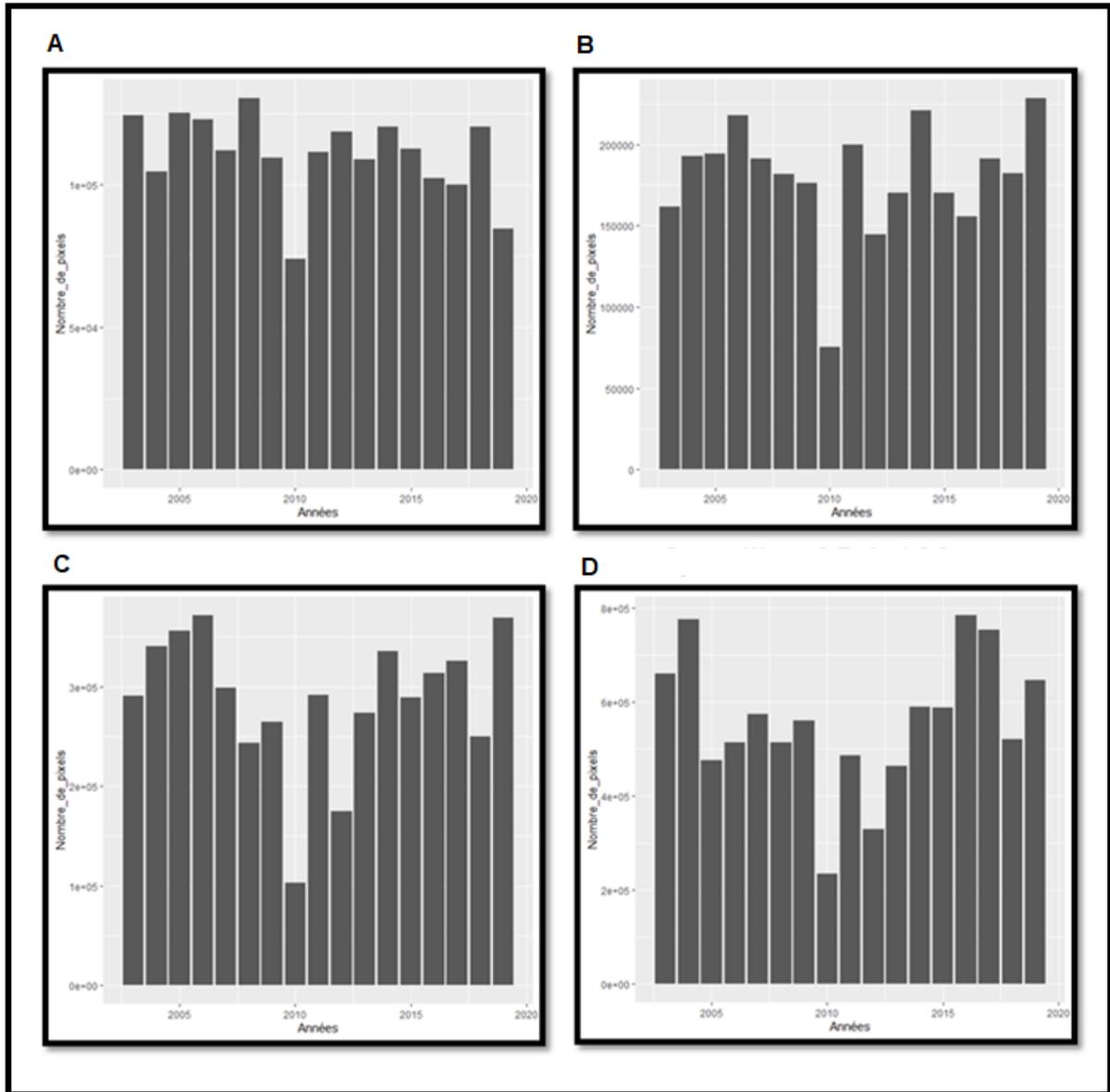
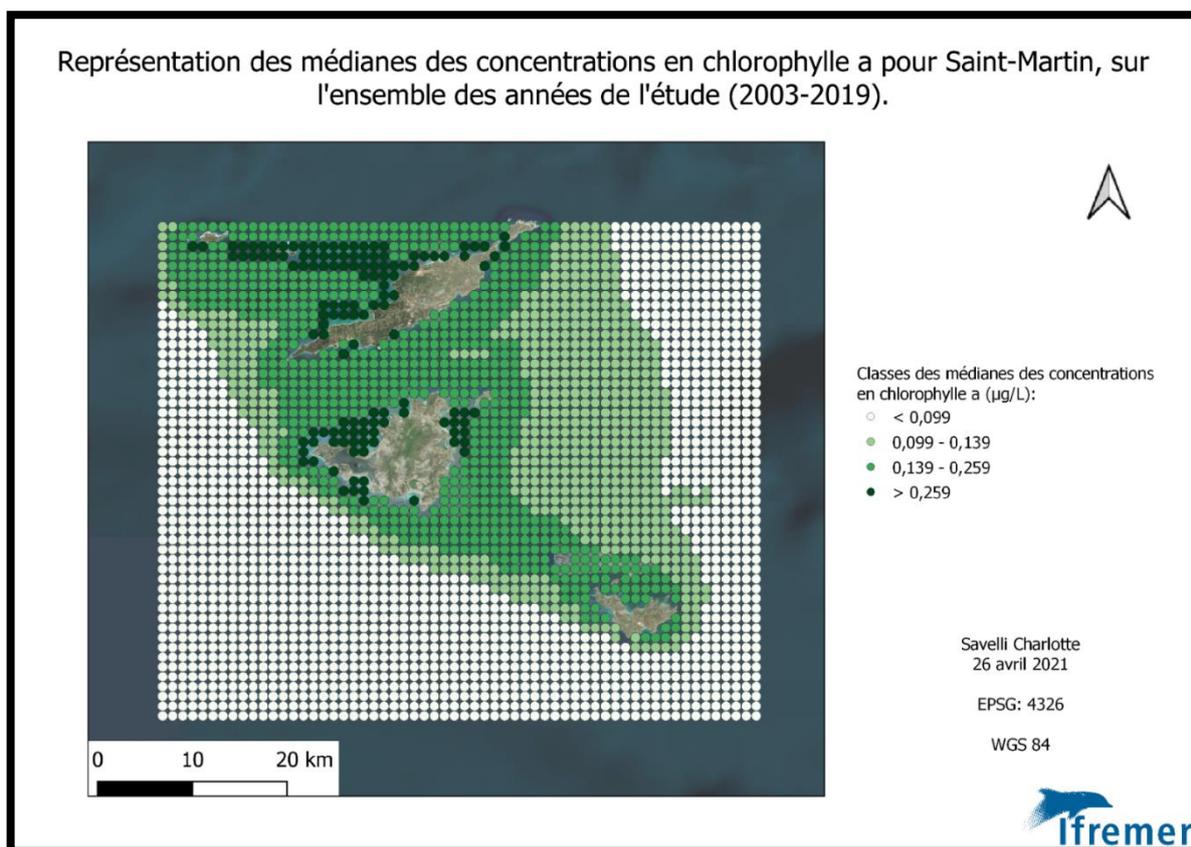


Figure 11 : Histogrammes représentant le nombre de pixels par percentiles selon les années, pour la Martinique. Avec A) Percentiles 0-50, B) Percentiles 50-70, C) Percentiles 70-95 et D) Percentiles 95-100.

Ces histogrammes montrent que pour les médianes inférieures au percentile 50, les années 2003, 2005, 2008 et 2018 ressortent. Ces années possèdent des valeurs de médiane des concentrations en chlorophylle a les plus basses de la distribution. Pour les médianes supérieures au percentile 95, les années 2003, 2004, 2016, 2017 et 2019 ressortent. Ce sont les années qui possèdent le plus de pixels avec les valeurs de médianes des concentrations en chlorophylle a les plus élevées de la distribution. Cela coïncide avec les observations faites grâce aux cartes. Cependant, l'année 2010 ne présentent que très peu de pixels pour les autres classes de médianes.

### 3.2.3- Saint-Martin

#### 3.2.3.1- Les cartographies



**Figure 12** : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a sur l'ensemble des années de l'étude (2003-2019), pour Saint-Martin.

Les cartographies annuelles ne donnent pas d'informations particulières, à l'exception de la zone littorale qui possède les concentrations les plus élevées de la distribution, de même que la Martinique et la Guadeloupe (Figure 12).

### 3.2.3.2- Les corrélations

De même que pour la Martinique et la Guadeloupe, les coefficients de corrélation obtenus suite aux tests de corrélation de Pearson effectués entre les médianes des concentrations en chlorophylle a et les années sont très proche de 0.

Les histogrammes représentant le nombre de pixels par percentile et par année ont donc été produits (Figure 13).

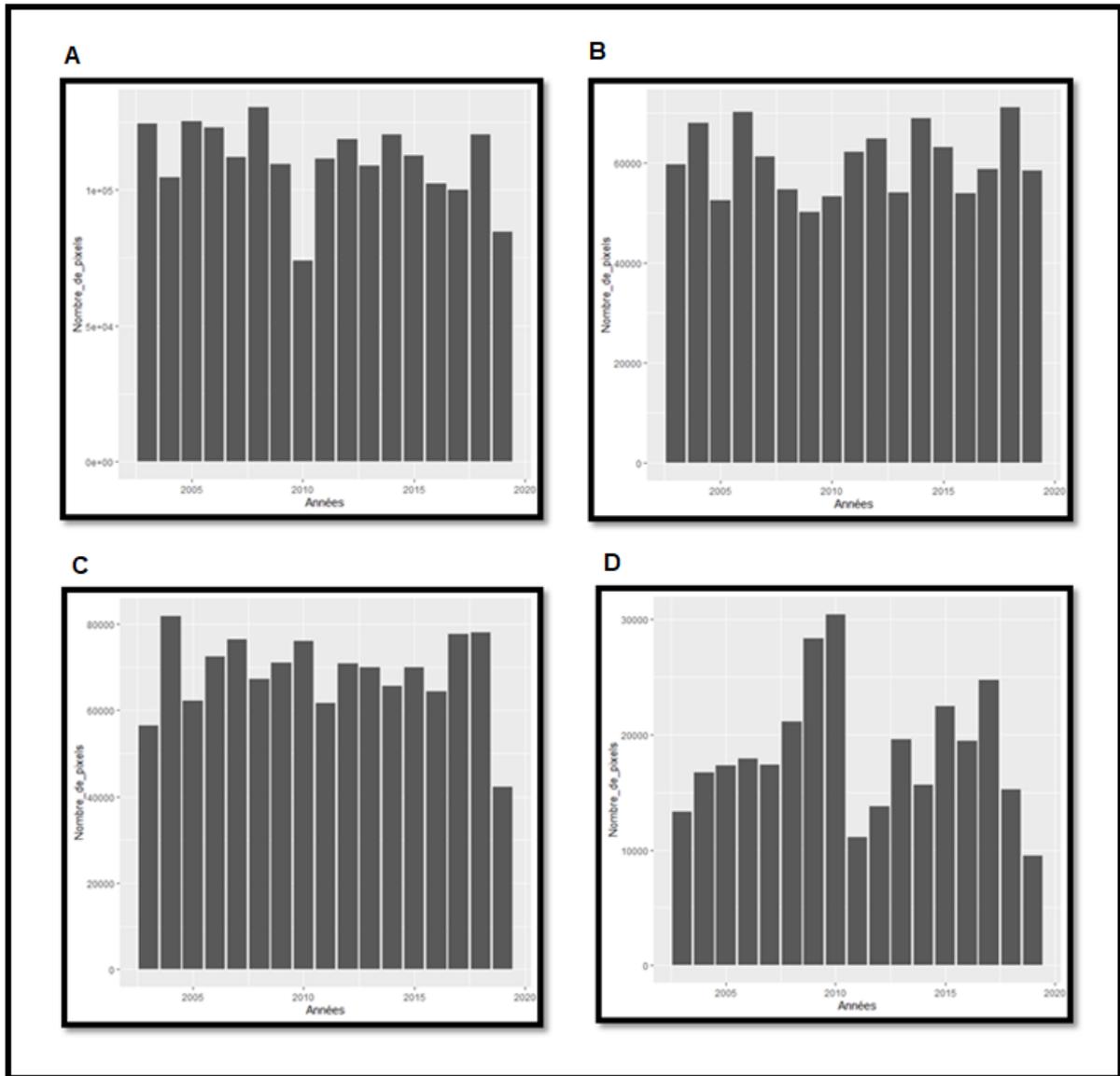


Figure 13 : Histogrammes représentant le nombre de pixels par percentiles selon les années, pour Saint-Martin. Avec A) Percentiles 0-50, B) Percentiles 50-70, C) Percentiles 70-95 et D) Percentiles 95-100.

Les fréquences d'apparitions les plus élevées pour les données qui se trouvent en dessous du percentile 50 se trouvent au sein des années 2003, 2005, 2006, 2008 et 2018. Concernant les données du percentile 95 et plus, les années 2009 et 2010 sont celles qui comportent le plus de pixels. Cela permet d'avoir des précisions car les cartes de l'île de Saint-Martin ne font pas ressortir ces informations.

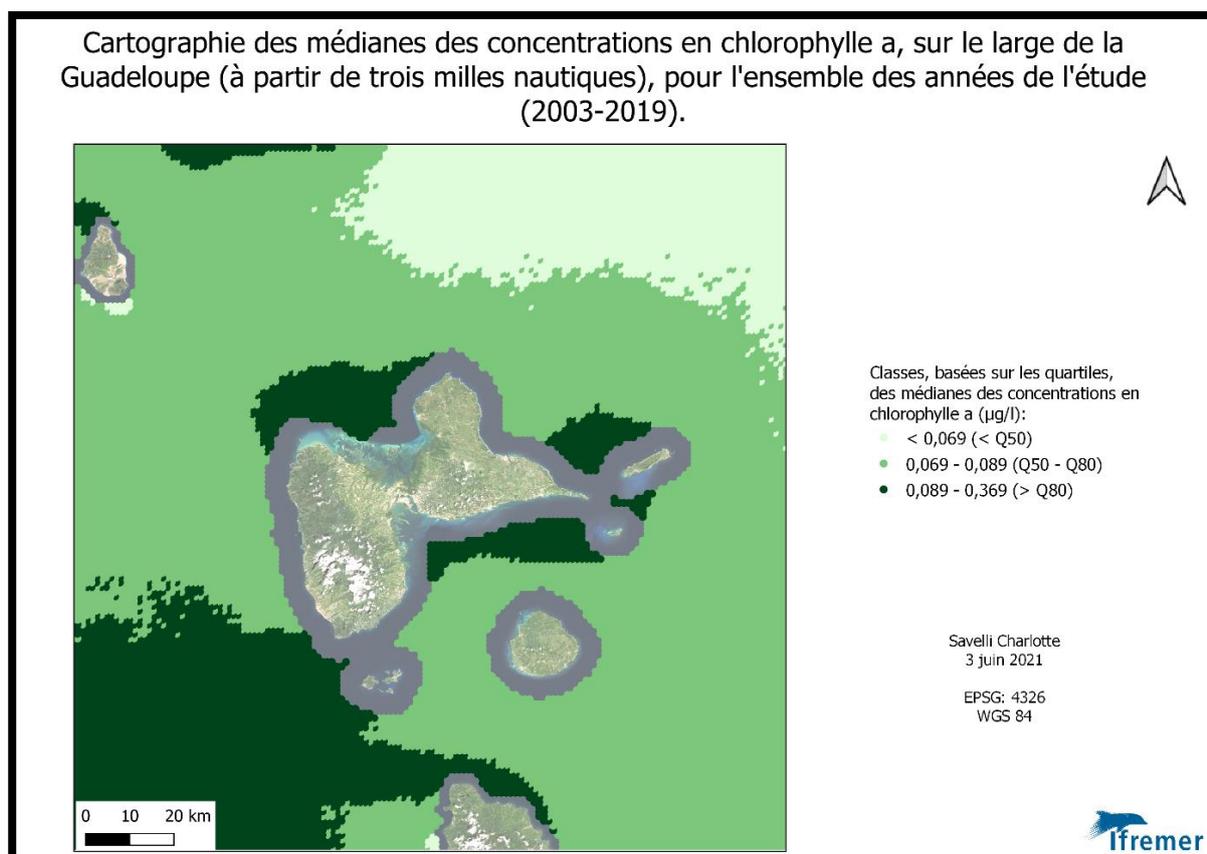
Pour récapituler, les cartes montrent certaines années qui sortent du lot. Certaines années possèdent des zones de concentrations supérieures à d'autres au niveau du large, les littoraux sont les zones les plus concentrées en chlorophylle a, à l'exception d'une zone sur la côte Ouest pour la Guadeloupe et la Martinique.

### **III.3- Cartographie des sous-zones déterminées.**

L'intégralité des cartes représentant le découpage défini par les masses d'eau DCE se trouve dans l'Atlas cartographique (Partie II). Pour le découpage fait à partir des trois milles nautiques, seulement les cartes récapitulatives sur les dix-sept années de l'étude sont présentées et l'ensemble des cartes annuelles du découpage sont au sein de l'Atlas cartographique.

#### **3.3.1- Cartographie de la Guadeloupe**

##### **3.3.1.1- Le large de la Guadeloupe, à partir des trois milles nautiques.**



**Figure 14** : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le large de la Guadeloupe, délimité à partir des trois milles nautiques, pour l'ensemble des années de l'étude (2003-2019).

La distribution a été divisée selon les percentiles P50 et P80. La carte représentant les concentrations en chlorophylle a sur les dix-sept années de l'étude montre que les zones possédant les concentrations les plus élevées de la distribution est la zone à proximité du littoral, à l'exception de la côte Ouest, et la zone au Sud-Ouest de l'île (Figure 14).

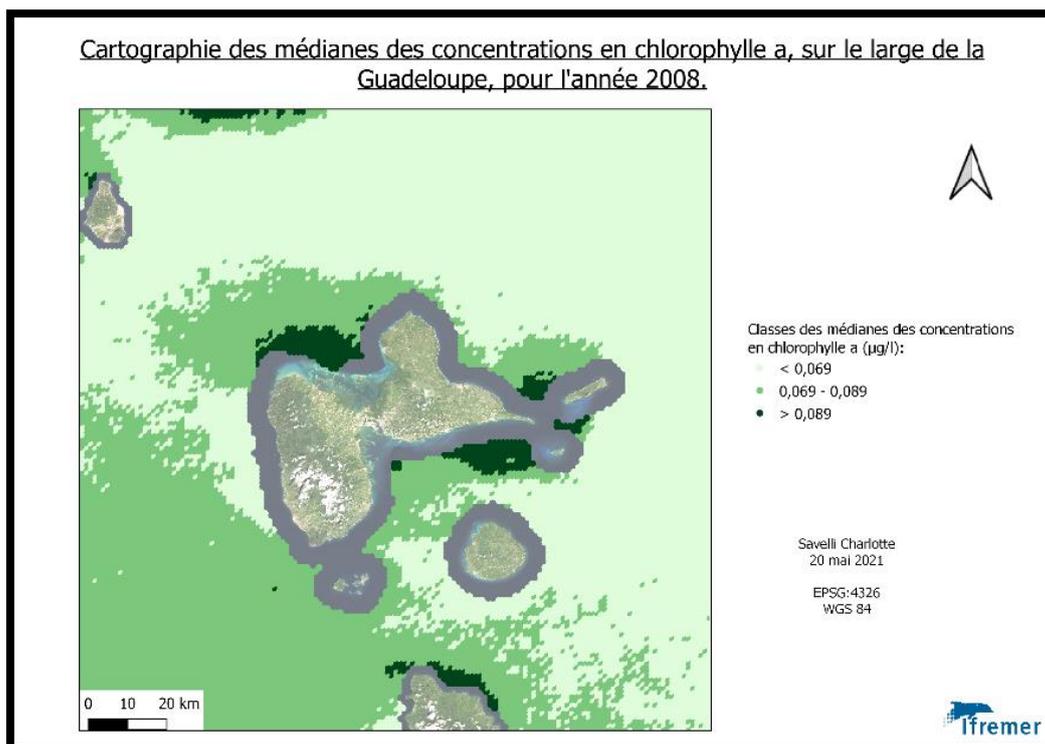


Figure 15 : Cartographie représentant les médianes des concentrations en chlorophylle a pour le large de la Guadeloupe (à partir de trois milles marins), pour l'année 2008.

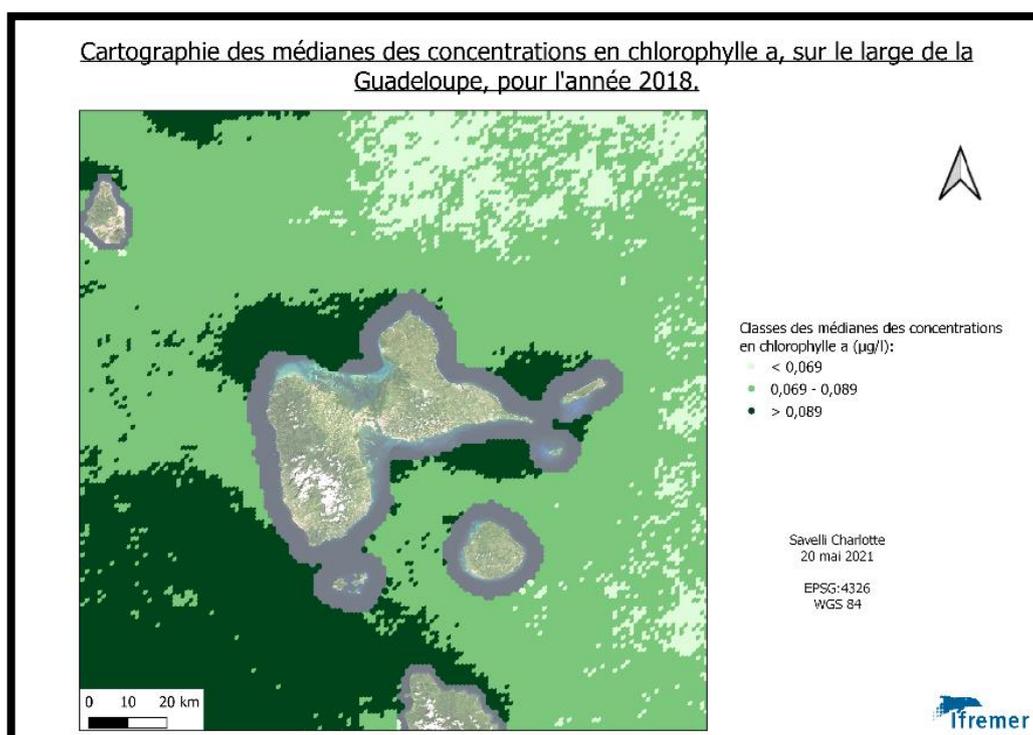
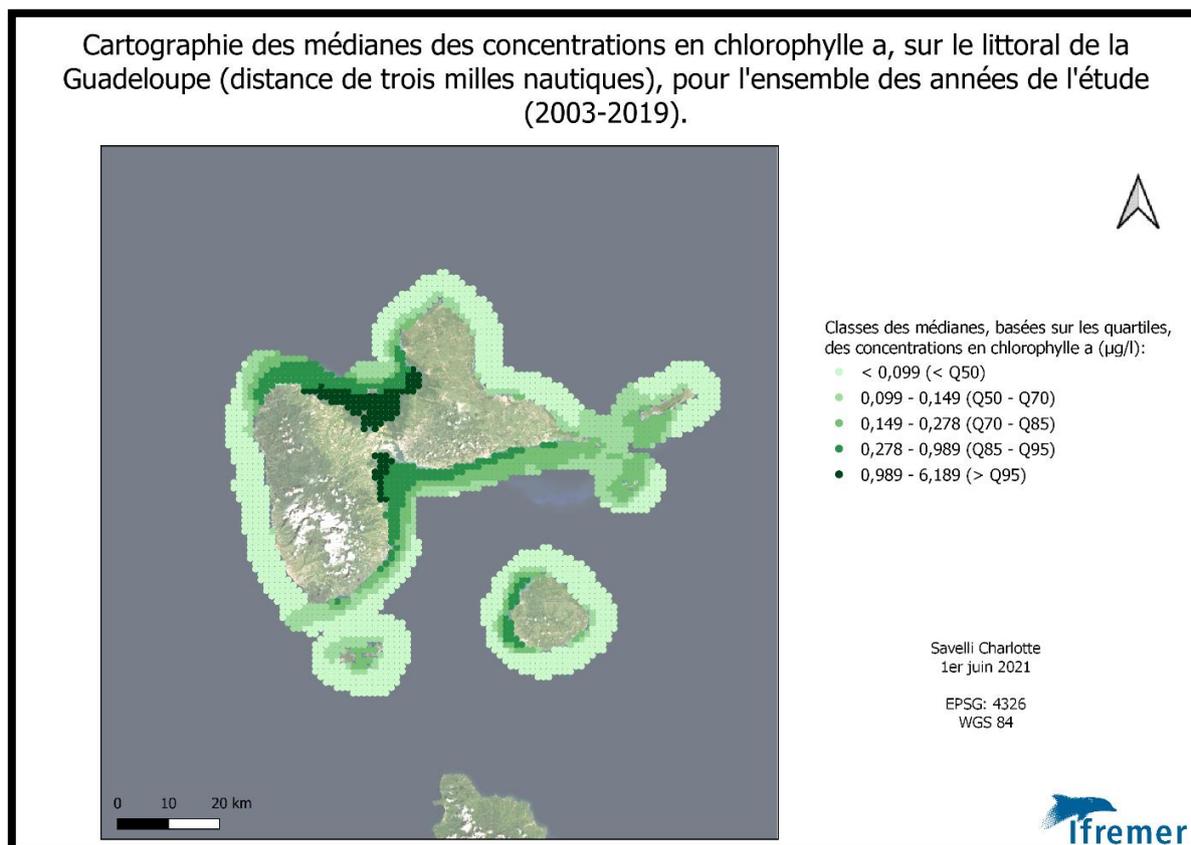


Figure 16 : Cartographie représentant les médianes des concentrations en chlorophylle a pour le large de la Guadeloupe (à partir de trois milles marins), pour l'année 2018.

Plus précisément, certaines années ont des concentrations très faibles au large. Ce sont les années 2008 (Figure 15) et 2012. De plus, des années ont des concentrations élevées au large. Ce sont les années 2003, 2004, 2007, 2010, 2011, 2016, 2017, 2018 (Figure 16) et 2019 (Atlas).

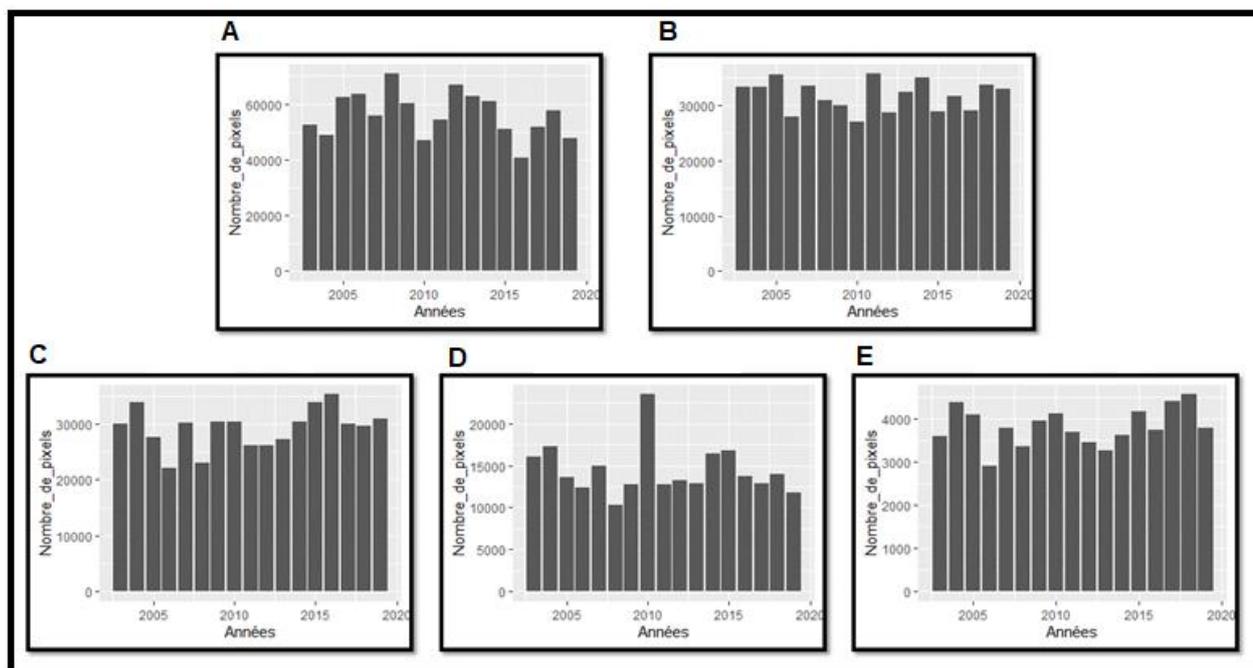
### 3.3.1.2- Le littoral



**Figure 17** : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le littoral de la Guadeloupe, délimité par les trois milles nautiques, pour l'ensemble des années de l'étude (2003-2019).

Le gradient des concentrations est plus grand que pour le large, ce qui explique la différence des légendes entre les cartes du large et les cartes du littoral. La carte qui regroupe les dix-sept années de l'étude (Figure 17) montre que plus les points sont loin du littoral, plus les concentrations sont faibles. La zone la plus concentrée en chlorophylle a est la zone de lien entre la Basse-Terre et la Grande-Terre. Ce sont les mêmes zones que les cartes de la Guadeloupe sans différenciation du large et du littoral et que les cartes avec le découpage basé sur les masses d'eau DCE (Atlas).

Pour avoir une vision plus précise des dynamiques des concentrations en chlorophylle *a* au fil du temps, les histogrammes du nombre de pixels par classes de percentiles selon les années (Figure 18) ont été effectués pour le littoral.



**Figure 18** : Histogrammes représentant le nombre de pixels par années des différentes classes des concentrations en chlorophylle *a*, pour le littoral de la Guadeloupe (défini à trois milles marins). Avec A) Percentiles 0-50, B) Percentiles 50-70, C) Percentiles 70-85, D) Percentiles 85 à 95 et E) Percentiles 95-100.

Pour les données faisant partie des percentiles 0 à 50, ce sont les années 2008 et 2012 qui ressortent. Ce qui concorde avec les observations des cartes. En effet ce sont les deux années qui ont des concentrations très faibles au large, contrairement au reste des années. De plus, les années qui possèdent le plus de pixels appartenant aux percentiles 95 et plus, sont les années 2004, 2005, 2015, 2017 et 2018. Ce sont des années pour lesquels la zone au large avec les concentrations les plus élevées de la distribution a été observée.

### 3.3.2- La Martinique

#### 3.3.2.1- Le large

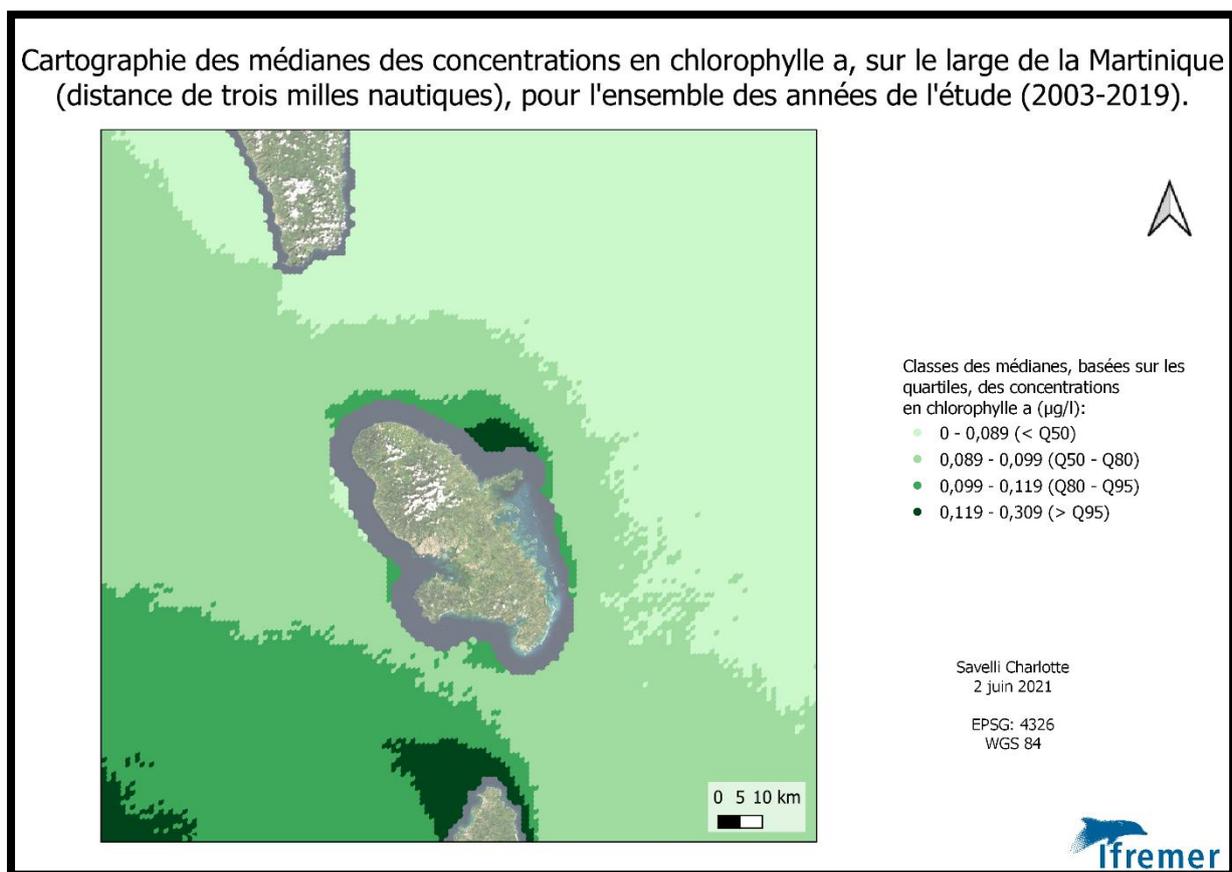


Figure 19 : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le large de la Martinique, délimité à partir des trois milles nautiques, pour l'ensemble des années de l'étude (2003-2019).

Le large de la Martinique (Figure 19), a été délimité par les percentiles P50, P80 et P95. Le gradient des concentrations est plus grand que pour l'île de la Guadeloupe.

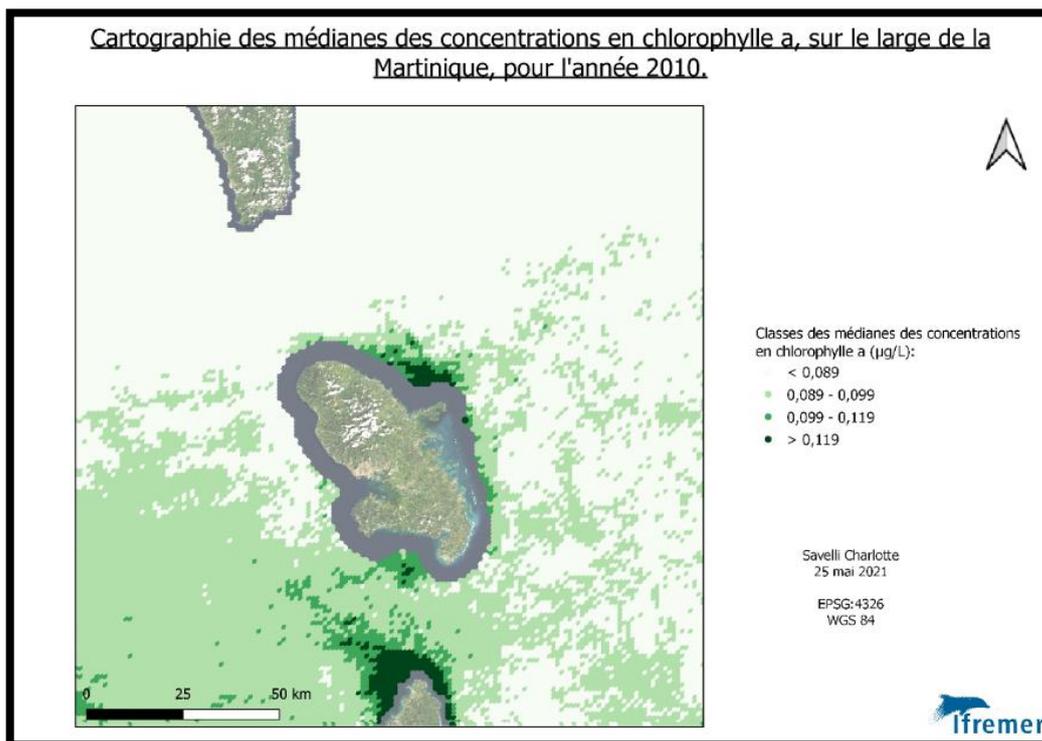


Figure 20 : Cartographie représentant les médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le large de la Martinique (à partir de trois milles nautiques), pour l'année 2010.

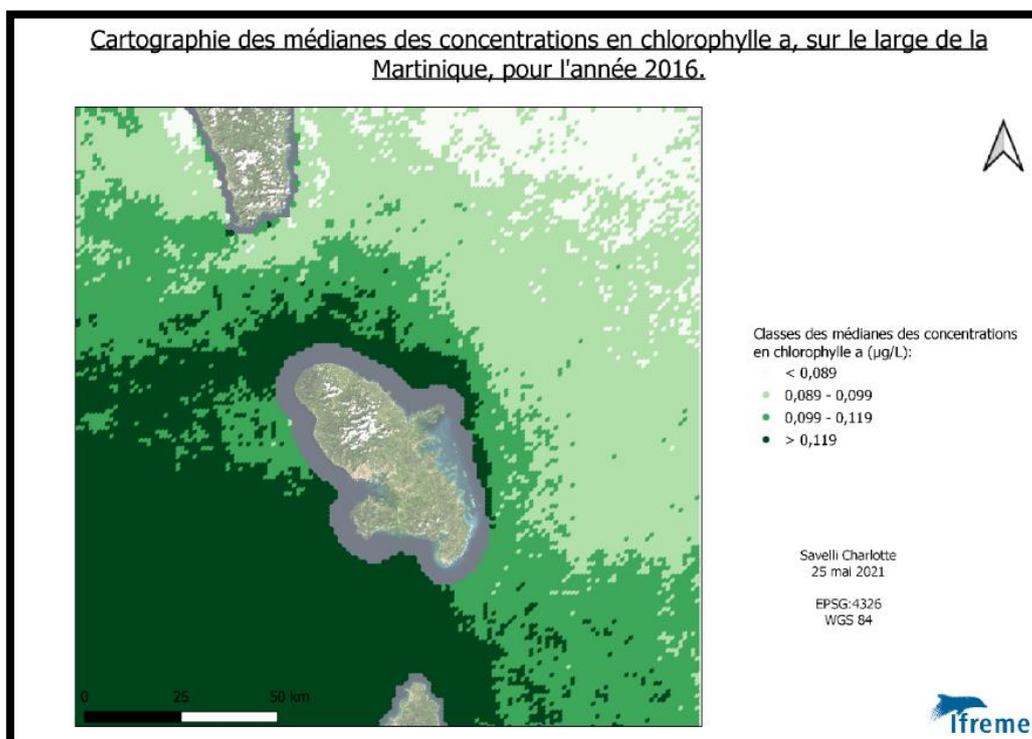
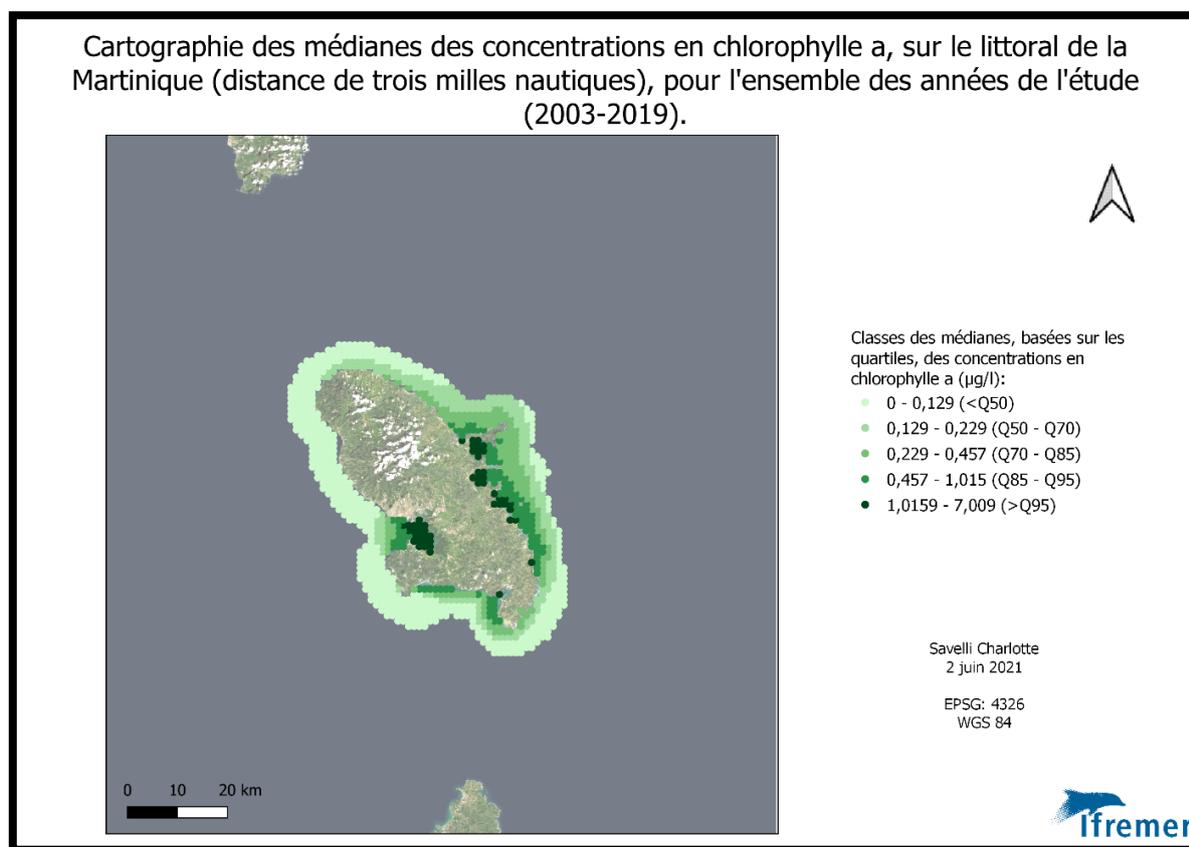


Figure 21 : Cartographie représentant les médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le large de la Martinique (à partir de trois milles nautiques), pour l'année 2016.

L'année 2010 (Figure 20), 2012 et 2018 montrent des concentrations très faibles au large. Les années qui montrent une zone au large avec des concentrations en chlorophylle a les plus élevées de la distribution sont les années 2003, 2004, 2007, 2016 (Figure 21), 2017 et 2019. Ce sont les mêmes observations qu'avec le découpage selon les masses d'eau DCE (Atlas).

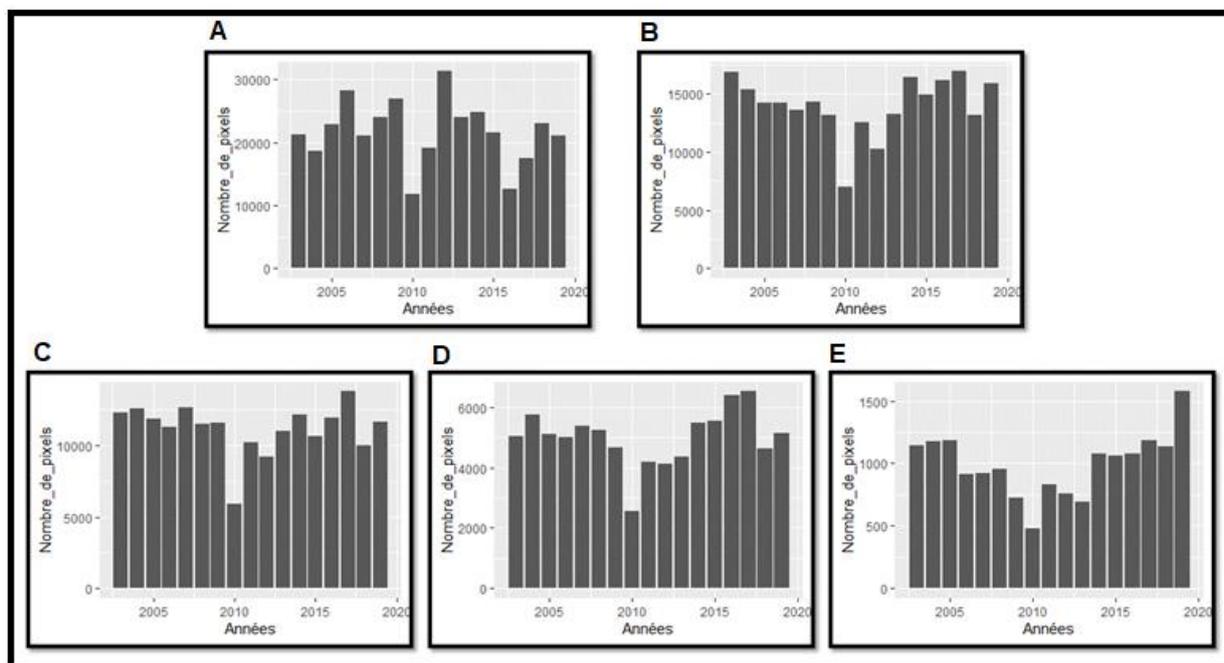
### 3.3.2.2- Le littoral



**Figure 22** : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le littoral de la Martinique, délimité à partir des trois milles nautiques, pour l'ensemble des années de l'étude (2003-2019).

Les zones les plus concentrées du littoral de la Martinique en chlorophylle a sont la zone de la Baie de Fort-de-France et sur la baie du Galion (Figure 22). Ce sont les mêmes hotspots observés que les cartes de la Martinique sans suppression des points au large et que les cartes définies par les masses d'eau DCE (Atlas). Les classes qui déterminent la légende sont plus nombreuses que celles pour le littoral car l'étendue des concentrations est plus grande que pour les données du large.

Pour avoir une idée plus précise de la dynamique des concentrations en chlorophylle a sur le littoral de la Martinique, les histogrammes du nombre de pixels des différentes classes, selon les années, ont été produits (Figure 23).



**Figure 23** : Histogrammes représentant le nombre de pixels par années des différentes classes des concentrations en chlorophylle a, pour le littoral de la Martinique (défini à trois milles marins). Avec A) Percentiles 0-50, B) Percentiles 50-70, C) Percentiles 70-85, D) Percentiles 85 à 95 et E) Percentiles 95-100.

Pour les données faisant partie des percentiles 0 à 50, ce sont les années 2006, 2009 et 2012 qui ressortent. De plus, les années qui possèdent le plus de pixels appartenant aux percentiles 95 et plus, sont les années 2004, 2005, 2017 et 2019. Cela permet d'apporter des précisions aux observations faites grâce aux cartes.

### 3.3.3- Saint-Martin

#### 3.3.3.1- Le large

Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le large de Saint-Martin (distance de trois milles nautiques), pour l'ensemble des années de l'étude (2003-2019).

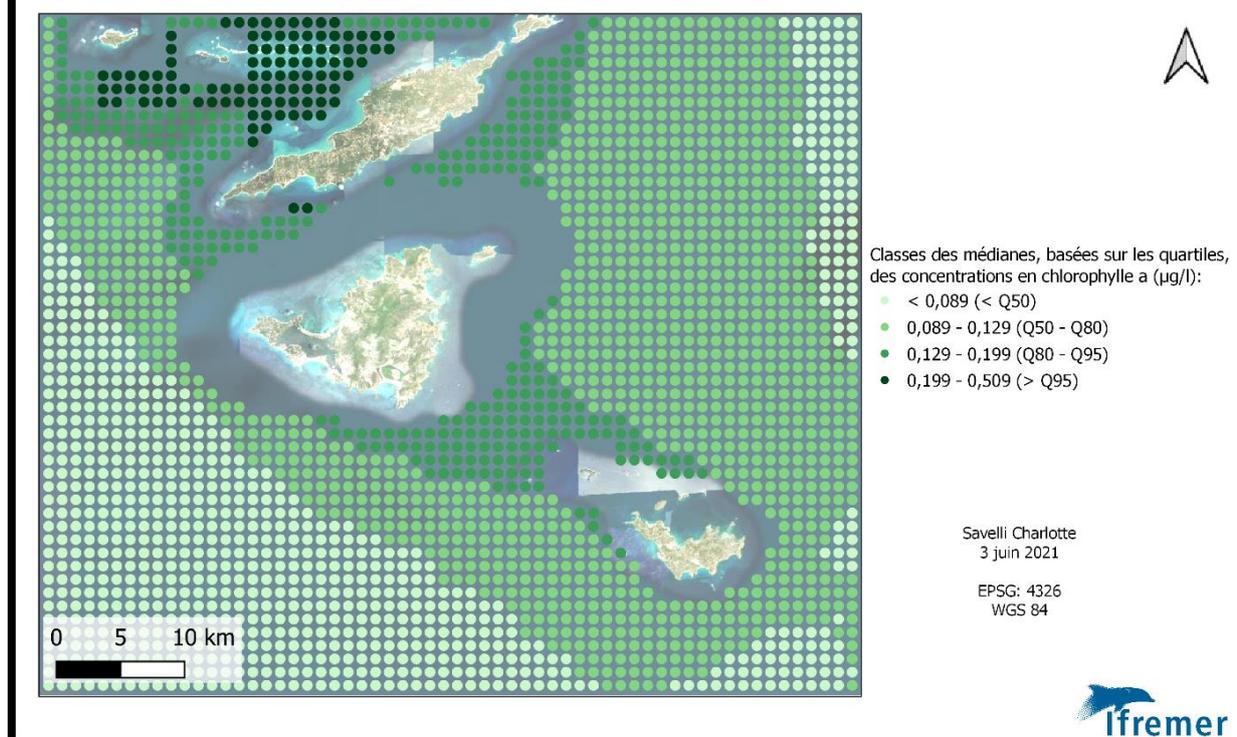


Figure 24 : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le large de Saint-Martin, délimité à partir des trois milles nautiques, pour l'ensemble des années de l'étude (2003-2019).

La cartographie regroupant les dix-sept années de l'étude pour le large de Saint-Martin (Figure 24) montre que les zones les plus concentrées sont celles proche du littoral. Concernant l'ensemble des années, les concentrations en chlorophylle a ne montrent pas de dynamique particulière. La légende est définie par les percentiles P50, P80 et P95.

### 3.3.3.2- Le littoral

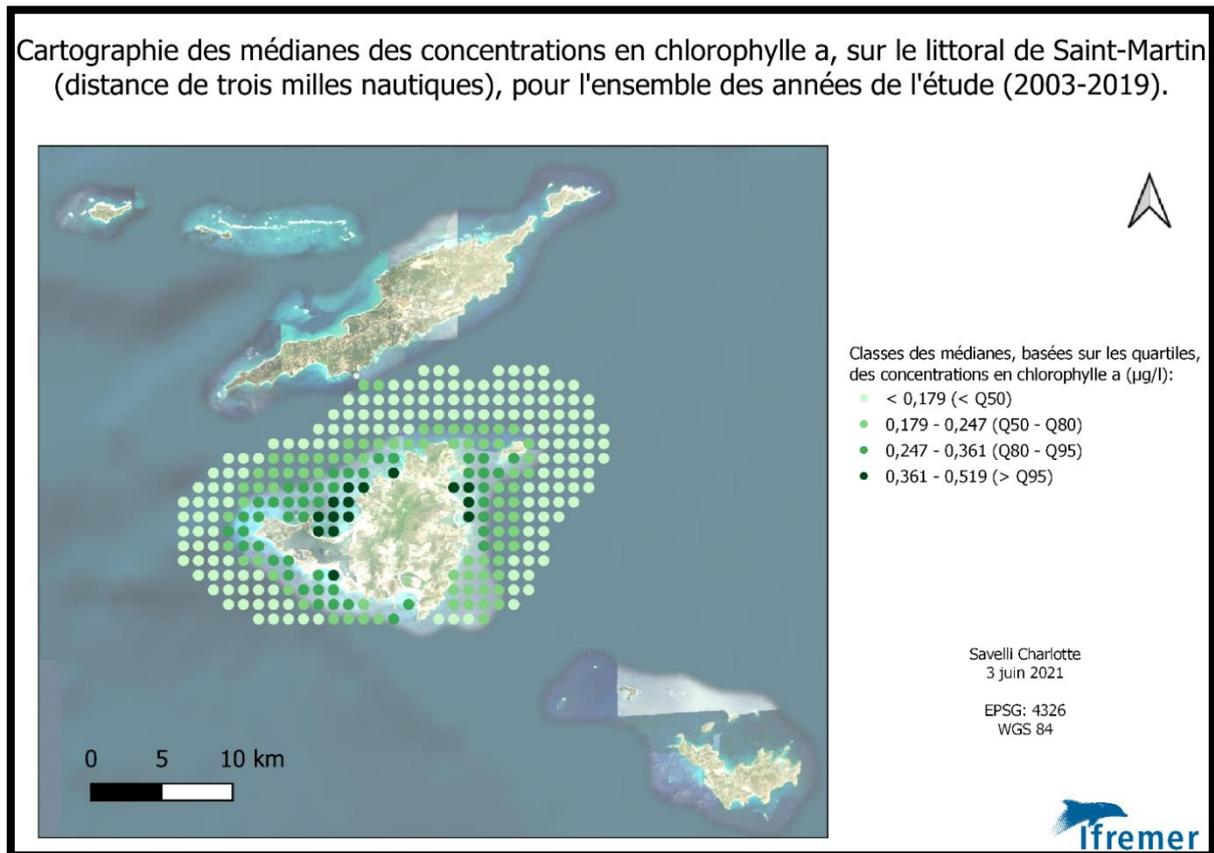


Figure 25 : Cartographie des médianes des concentrations en chlorophylle a, sur le littoral de Saint-Martin, délimité à partir des trois milles nautiques, pour l'ensemble des années de l'étude (2003-2019).

La cartographie du littoral de Saint-Martin, défini par les trois milles nautiques (Figure 25), montre des concentrations plus élevées que pour le large (légende différente). La zone côtière de Saint-Martin est la zone comportant les concentrations en chlorophylle a les plus hautes de la distribution.

Des histogrammes représentant le nombre de pixels des différentes classes, selon les années, ont été produits (Figure 26).

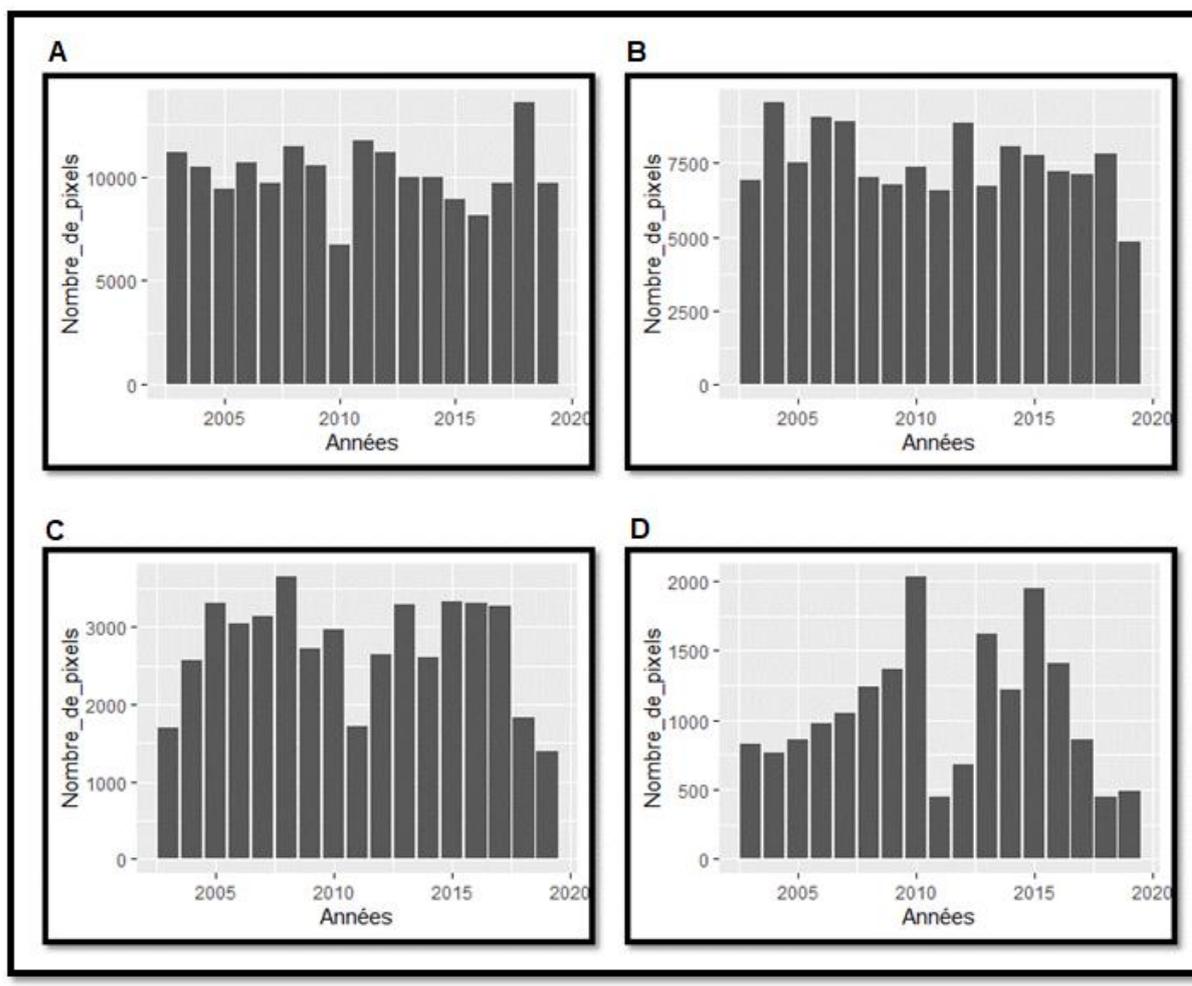


Figure 26 : Histogrammes représentant le nombre de pixels par années des différentes classes des concentrations en chlorophylle a, pour le littoral de Saint-Martin (défini à trois milles marins). Avec A) Percentiles 0-50, B) Percentiles 50-80, C) Percentiles 80-95, D) Percentiles 95-100.

Pour les données faisant partie des percentiles 0 à 50, ce sont les années 2008, 2011 et 2019 qui ressortent. De plus, les années qui possèdent le plus de pixels appartenant aux percentiles 95 et plus, sont les années 2010, 2013 et 2015. Cela permet d'apporter des précisions aux observations faites grâce aux cartes.

### 3.3.4- Tests de corrélation pour le large et le littoral.

Les tests de corrélation entre les médianes des points du large de chaque île et les débits moyens et maximums du fleuve Amazone n'ont pas été concluant. En effet, les p-values obtenues sont toujours supérieures à 0.05, donc les coefficients obtenus ne sont pas significativement différents de 0.

Concernant les tests de corrélation entre les médianes des points du littoral de chaque île et les débits des fleuves, les p-value des tests obtenues étaient toutes supérieures au seuil 0.05. Les coefficients de corrélation ne sont pas significativement différents de 0. Une corrélation entre les débits des fleuves et la présence des hotspots n'a pas pu être établie ici

### III.4- Les modèles linéaires dynamiques

#### 3.4.1- Exemple d'un fichier DLM obtenu.

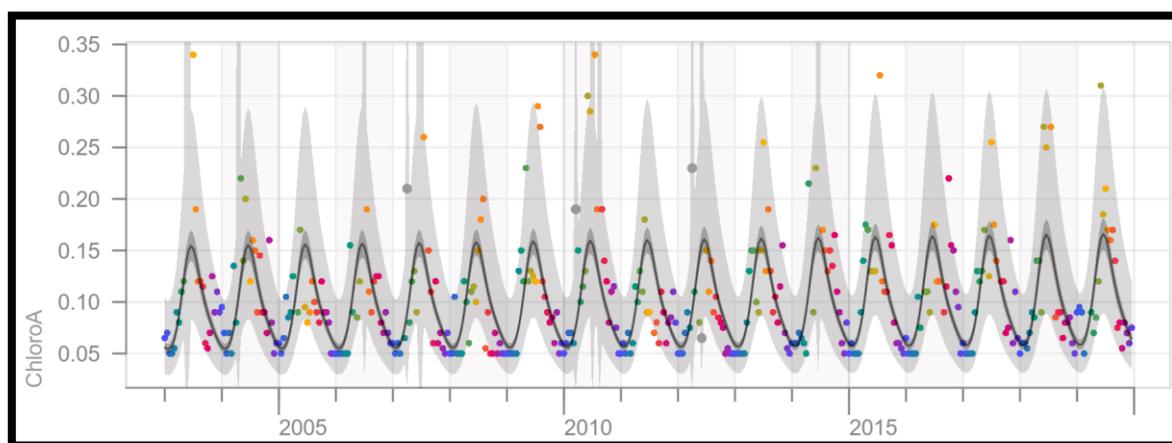
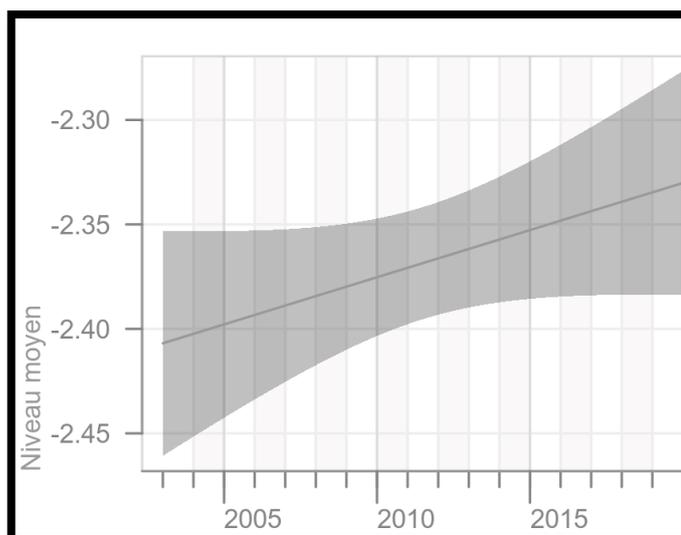


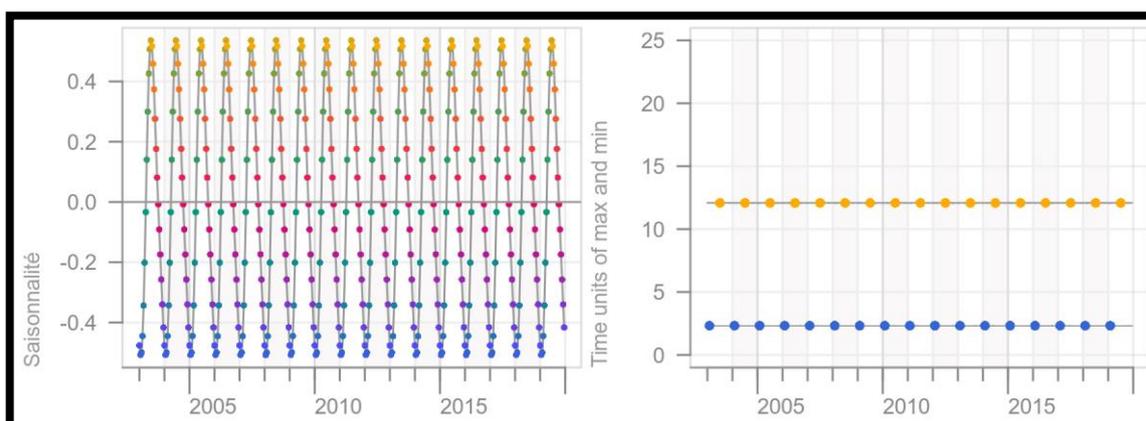
Figure 27 : Exemple d'un fichier DLM obtenu pour un point spécifique pour la Guadeloupe.

Le premier graphique qui compose les fichiers obtenus (Figure 27) représente les concentrations en chlorophylle a au fil du temps. C'est l'information qui va être cartographiée dans ce rapport (présence d'un pic ou de deux pics par année). Les disques représentent les observations. La couleur des disques est relative à la saison des prélèvements : les bleus correspondent à l'hiver, les verts au printemps, les jaunes à l'été et les rouges/violet à l'automne. Les disques gris sont les observations traitées comme exceptionnelles. La ligne continue représente la médiane des concentrations en chlorophylle a. La surface en gris foncé est l'enveloppe de confiance à 90 % du modèle. La surface gris clair est l'enveloppe à 90 % des observations. Ce graphique est le seul qui soit dans les unités initiales (médianes des concentrations en chlorophylle a), tous les autres sont dans les unités transformées (log).

Le second graphique représente le niveau moyen du log de la Chlorophylle *a*, c'est-à-dire la tendance corrigée des variations saisonnières. La surface grise représente l'intervalle de confiance à 90 % (Figure 28).



**Figure 28** : Graphique du niveau moyen de la distribution des données (en log).



**Figure 29** : Graphique représentant la saisonnalité et la phénologie des concentrations en chlorophylle *a*.

Le troisième graphique représente le paramètre structurel estimé de saisonnalité, en log de concentration de chlorophylle *a*. A droite le graphique représente les unités temporelles pour lesquelles la saisonnalité atteint un maximum ou un minimum (Figure 29).

L'ensemble des cartographies annuelles se trouvent dans l'Atlas cartographique fourni avec ce rapport (partie III).

### 3.4.2- Cartographies du nombre de pics pour chaque lieu pour la Guadeloupe.

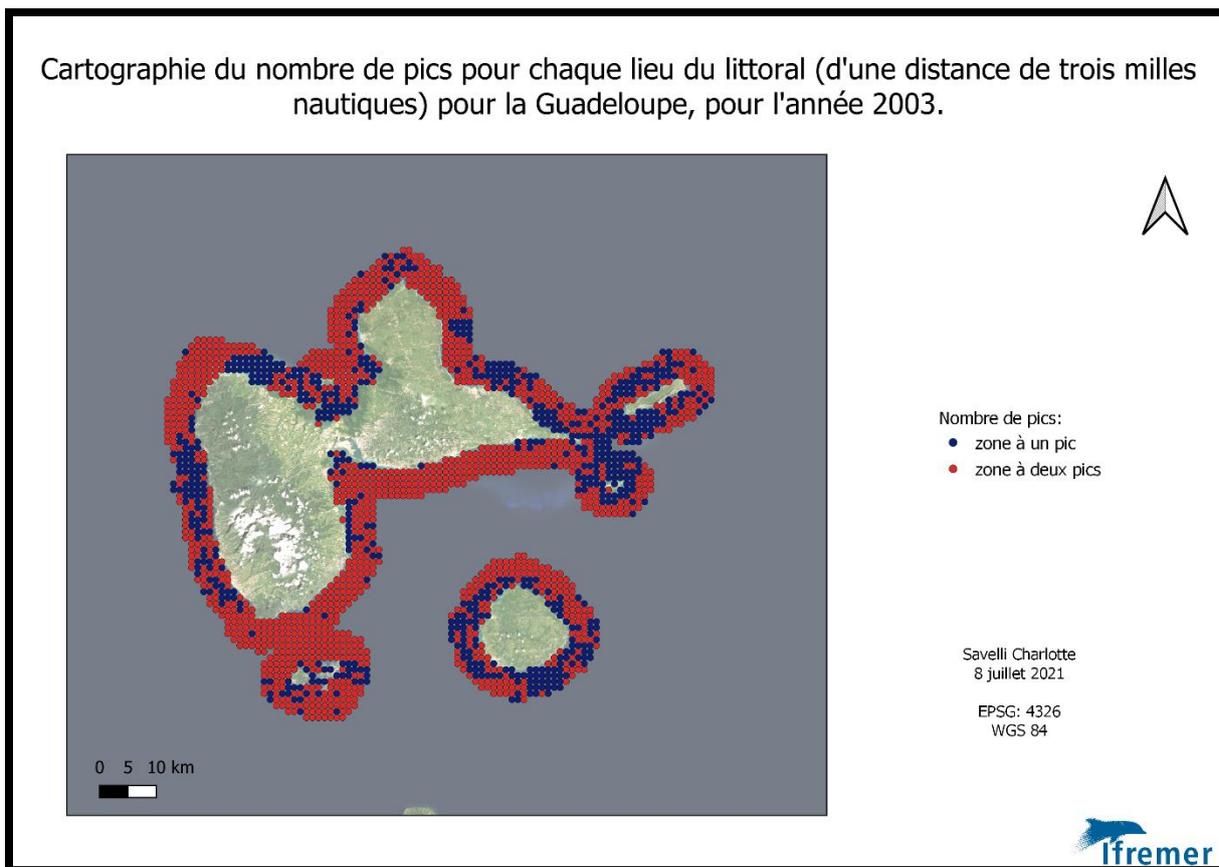


Figure 30 : Cartographie du nombre de pics par lieux du littoral de la Guadeloupe, d'une distance de trois milles nautiques, pour l'année 2003.

Pour la Guadeloupe, il est possible d'observer que la côte Ouest est caractérisée par un seul pic par année (Figure 30). De plus, cette zone comporte sur l'ensemble des années une zone de très faible concentration en chlorophylle *a*. Cependant, le reste du littoral de la zone Ouest (Basse-Terre) est majoritairement caractérisée par deux pics à l'année. De plus, pour les années 2007, 2008, 2009, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015 et 2017 (Atlas), le littoral de la Grande-Terre est caractérisée par un pic par année.

### 3.4.3- Cartographies du nombre de pics pour chaque lieu pour la Martinique.

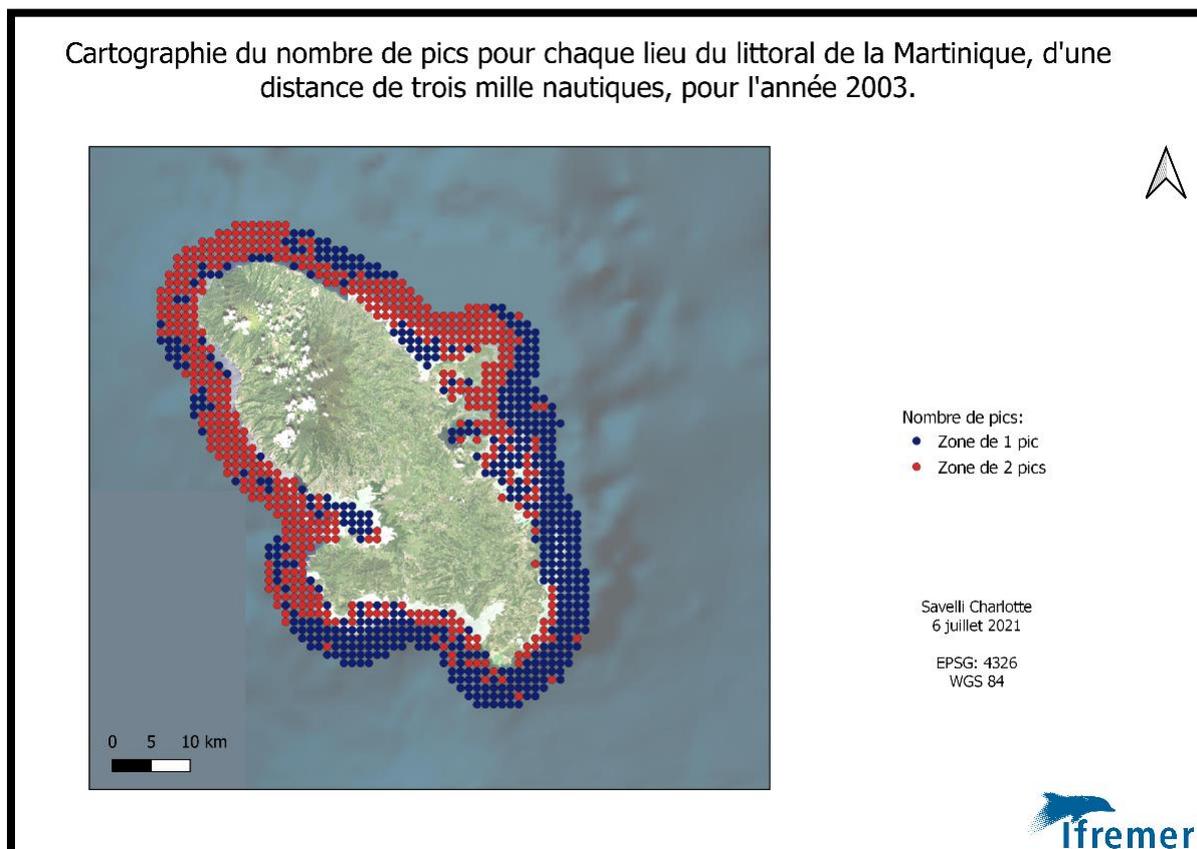


Figure 31 : Cartographie du nombre de pic par lieu du littoral de la Martinique, d'une distance de trois milles nautiques, pour l'année 2003.

L'ensemble des cartes montrent une séparation entre le Nord de l'île et le Sud. En effet, le Nord est caractérisé par deux pics par l'année, alors que le Sud est caractérisé par un seul pic par année (Figure 31).

### 3.4.4- Cartographies du nombre de pics pour chaque lieu pour Saint-Martin.

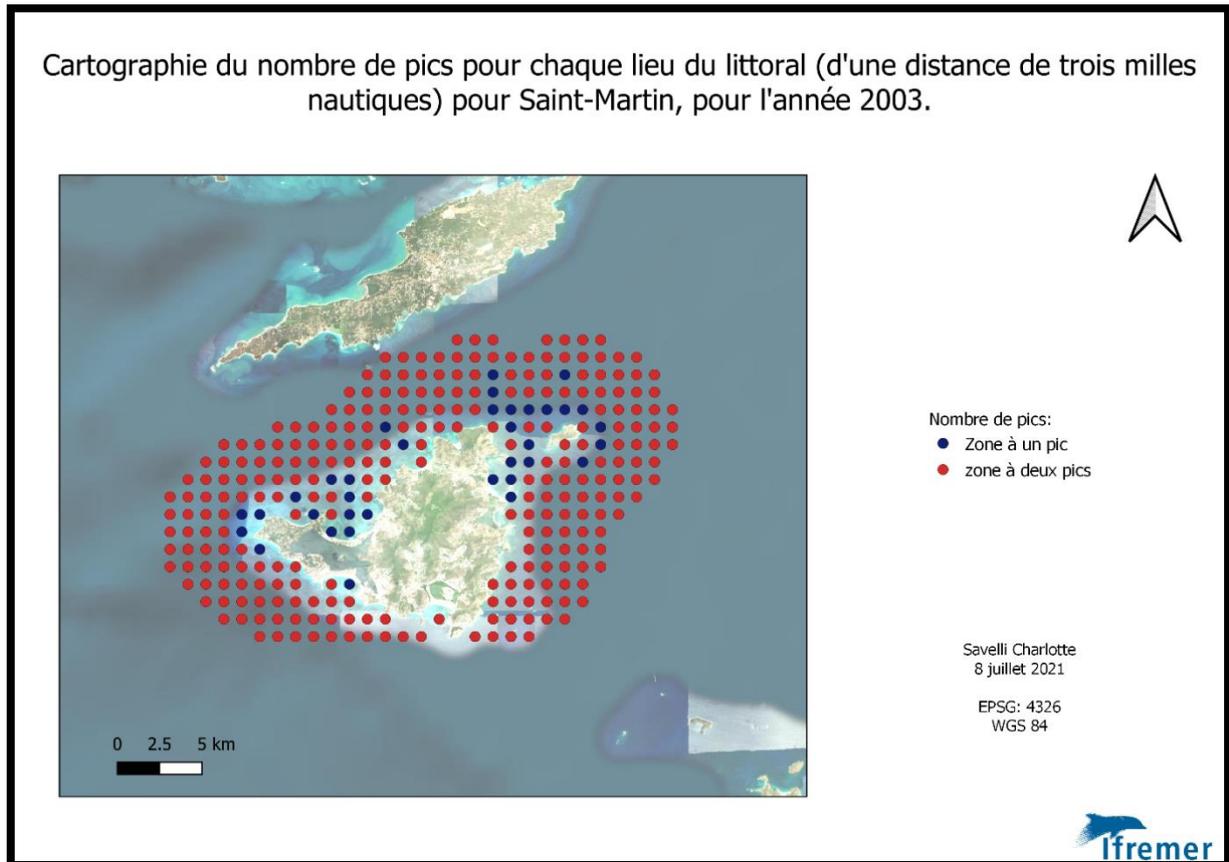


Figure 32 : Cartographie du nombre de pic par lieu du littoral de Saint-Martin, d'une distance de trois milles nautiques, pour l'année 2003.

Les cartes montrent une différenciation entre la zone côtière et les zones plus au large (Figure 32). Les points les plus proches du littoral sont caractérisés par un pic de concentrations en chlorophylle *a* par année, et les points les plus éloignés sont caractérisés par deux pics par année.

### 3.4.5- Les dates d'apparition du pic des concentrations en chlorophylle *a*.

Les fichiers donnent les dates d'apparition des pics par année. Pour la Martinique et la Guadeloupe, les zones à un pic ont une date d'apparition qui se trouve entre la 13<sup>ème</sup> et la 20<sup>ème</sup> quinzaine de manière générale. Pour les zones à deux pics, le maximum des pics apparaît à partir de la 22<sup>ème</sup> quinzaine.

## **IV- Discussion**

Les cartographies des concentrations en chlorophylle *a* ont montré en premier lieu une différence entre les concentrations en chlorophylle *a* au large par rapport à celles du littoral. En effet, le large présente des concentrations plus basses que les concentrations du littoral. Ces deux zones sont soumises à des conditions environnementales bien différentes. Par exemple, les propriétés optiques de ces deux masses d'eau diffèrent. La thèse menée par M.E. Dugenne, en 2017, étudie les facteurs pouvant influencer la biomasse du phytoplancton. Elle classe en deux types les masses d'eau selon leurs propriétés optiques. La première est l'océan ouvert, pauvre en matière dissoute. La profondeur moyenne de la couche euphotique, zone où parvient 1% de l'irradiance incidente et dans laquelle la photosynthèse est encore possible, est de 10 à 120 m de profondeur. Elle y observe des concentrations faibles en phytoplancton. La seconde est les eaux côtières, turbide car composée de sédiments remis en suspension, de particules détritiques, etc, et ceci en forte proportion. Cette eau aura une profondeur moyenne de la couche euphotique plus restreinte, entre 10 et 20 m. Elle sera plus riche en phytoplancton. Cependant, les écosystèmes tropicaux, dont les Antilles, sont des zones à ensoleillement constant (A. Damar, 2003), donc ce facteur n'est pas le seul à entrer en jeu. En effet, le large est une zone soumise à des courants et des vents parfois très forts, qui contribuent au déplacement des masses d'eau. Or Le phytoplancton se déplace grâce au courant océanique. Les forts courants peuvent donc exporter le phytoplancton hors de la zone euphotique, et donc empêcher la photosynthèse et le développement phytoplanctonique, d'où les concentrations en chlorophylle *a* basses. Ces mélanges auront moins d'impacts sur le littoral car les zones côtières ont d'autres sources de nutriments qui viennent du continent, ce qui pourrait expliquer les observations constantes de hotspots sur l'ensemble des années.

De plus, les cartes produites lors de ce stage montrent une seconde information, des eaux de la mer des Caraïbes, au sud, plus riches en chlorophylle *a* que les eaux de l'Océan Atlantique, au nord pour les années 2003, 2004, 2007, 2010, 2016, 2017, 2018 et 2019 pour la Guadeloupe et pour les années 2003, 2004, 2007, 2011, 2016, 2017, 2019 pour la Martinique, et ceci pour les deux types de découpage. Les tests de corrélation n'ont pas montré de corrélation significative entre les concentrations en

chlorophylle *a* et les années. C'est-à-dire que les concentrations en chlorophylle *a* n'évoluent pas de manière significative dans le temps. Cependant, une dynamique est observée, il y a donc des facteurs extérieurs qui rentrent en jeu. Des événements ponctuels (environnementaux ou autres) ont une grande influence sur la biomasse. L'hypothèse émise sur cette présence des plus fortes concentrations au large des îles certaines années serait le lien avec les débits de l'Amazone et les courants des eaux. En effet J.P Allenou et A. Huguet (2019) ont travaillé sur l'influence des grands fleuves, l'Amazone et l'Orénoque, et sur l'enrichissement des masses des eaux côtières de la Martinique et la Guadeloupe. Le premier facteur identifié est la courantologie des Antilles. Elle se caractérise par le mélange des eaux de l'Atlantique Nord et Sud : l'eau de l'Atlantique Sud traverse l'équateur portée par le courant côtier du nord Brésil. Cette eau est rétrofléchiée dans le contre-courant nord équatorial et alimente un tourbillon qui forme une zone de courant à forte vitesse. Cela crée des gyres (des anneaux) qui se séparent et se propagent vers la mer des Caraïbes portés par le courant de Guyane. Ces tourbillons sont caractérisés par une forte variabilité temporelle et saisonnière. Ils vont transporter une forte proportion d'eau provenant des panaches de l'Amazone. C'est pour cela qu'il est pertinent de s'intéresser à ce fleuve. L'Amazone, fleuve d'Amérique du sud qui prend sa source dans la cordillère des Andes, traverse le Pérou, la Colombie et le Brésil, et se jette dans l'océan Atlantique au niveau de l'équateur. C'est l'un des plus longs fleuves du monde. Les débits sont calculés dans cette étude sur une période de 69 années avec des pointes de débits pouvant dépasser les 500 000 m<sup>3</sup>/s, avec en mai 2000 une pointe de débit calculée de 630 000 m<sup>3</sup>/s. Ces débits sont calculés à la station d'Óbidos qui se situe à environ 800 km de l'océan Atlantique. C'est la station hydrométrique de référence la plus en aval pour la mesure des débits de l'Amazone (J. Callède et al., 2010). Cette remontée des eaux peut ponctuellement contribuer à modifier les propriétés physico-chimiques de l'eau de mer de la Martinique et de la Guadeloupe et contribuer à son enrichissement (chlorophylle *a*). En effet plusieurs études ont montré que l'Amazone était une source de phosphore et d'azote pour l'océan Atlantique (J. Jouanno et al., 2021). Or, un des facteurs identifiés comme important dans la production de biomasses aux Antilles est la disponibilité des nutriments (Tableau 1). Cela pousse à croire que les eaux douces de l'Amazone comportant ces nutriments pourraient avoir un rôle dans la production de biomasse dans les eaux des Caraïbes. Pour tester cette hypothèse, un test de corrélation de Pearson a été effectué entre les débits de l'Amazone mensuels moyens puis

maximums et les concentrations annuelles d'un point au large choisi pour la Martinique (Annexe 5) et la Guadeloupe (Annexe 6). Cependant les tests n'ont pas été concluants. Une corrélation entre les débits mensuels moyens et maximums de l'Amazone et la présence de la zone des fortes concentrations de la distribution au large des îles sur certaines années n'a pas pu être établie ici.

J.P. Allenou et A. Huguet (2019) ont aussi observé les différences de moyennes des concentrations en chlorophylle *a*, ici calculées sur la période de 2012 à 2017, entre les côtes et les eaux du large, qui restent pour ces dernières oligotrophes. Ces éléments tendent à montrer que des apports côtiers (activités anthropiques) locaux ont un impact continu sur la biomasse côtière. Les cartes montrent très clairement des zones de hotspot, qui contiennent les concentrations en chlorophylle *a* les plus élevées de la distribution. Ce travail d'interprétation a été mené en collaboration avec les collègues de l'Ifremer de la station de Brest, de Martinique et de Guadeloupe lors du projet OLITROP. Le travail effectué a été de déterminer les pressions anthropiques des îles et de cartographier les zones les plus exposées (rapport de stage de François MERIC, 2021). Les données utilisées sont issues des travaux engagés dans le cadre des SDAGE par les gestionnaires locaux de chaque île. Plusieurs types de pression ont été définis, tels que les pressions domestiques, dues aux rejets urbains provenant des habitations, riches en nutriments et en matière organique et sont traités par des stations non conformes à la réglementation et situées à proximité du littoral. Ces stations rejettent leurs eaux directement dans le milieu marin. La seconde pression sont les pressions industrielles, dues aux rejets provenant des industries agro-alimentaires telles que les industries de la canne à sucre, les distilleries et sucreries... Il y a aussi les pressions agricoles, liées aux rejets provenant des cultures et des élevages qui sont emmenés par les eaux de ruissellement pendant les épisodes de pluie, qui se chargent en nutriments et en matières organiques et sont entraînés vers le littoral. La dernière pression identifiée sont les pressions fluviales (les cours d'eau, les rivières, les ravines et les canaux). Ce rapport a identifié les zones les plus exposées à ces pressions anthropiques. Pour la Guadeloupe c'est la zone entre la Basse-Terre et la Haute-Terre qui y est la plus soumise, et pour la Martinique c'est la baie de Fort-de-France (Annexe 11). De plus, le test de corrélation de Pearson, produit entre les débits mensuels moyens d'une station hydrographique (Annexe 7 et Annexe 9) et les médianes des concentrations de chlorophylle *a* annuelles pour des points

choisis sur le littoral de chaque île (Annexe 8 et Annexe 10), n'ont pas fourni de résultats concluants donc l'influence des fleuves présents sur les îles sur la richesse des zones littorales n'est pas établie. Cependant la présence des hotspots sur l'ensemble des années de l'étude laisse à penser qu'un apport continu venant du continent provoque cet enrichissement.

En addition à ces facteurs, la Martinique est composée d'une zone de plateau à l'Est (Annexe 12). C'est une zone de hotspot, qui est l'une des zones les plus exposée aux pressions anthropiques. Si le lien avec le débit des fleuves n'a pu être établi dans notre étude, la bathymétrie de la zone pourrait jouer un rôle dans la concentration en chlorophylle *a* de cette zone. En effet nous pouvons observer que les zones de hotspot correspondent à des zones de faible profondeur. De plus, deux des zones de hotspot de la Martinique sont des baies : la baie de Fort-de-France et la baie du Galion. Il a été montré par plusieurs études (J.P Allenou, A.Huguet, 2019, F.Méric, 2021) que les baies étaient des typologies plus concentrées en chlorophylle *a* de par leurs caractéristiques particulières : faible profondeur et environnement fermé, ce qui provoque un faible renouvellement des eaux. Il y a donc une forte pénétration de la lumière, une accumulation de nutriments, une eau chaude ce qui donne un environnement très propice au développement phytoplanctonique. Pour la Guadeloupe, les zones de hotspots sont aussi des zones à faible profondeur comme la baie Mahault par exemple (Annexe 13). De plus pour la Martinique et la Guadeloupe, la zone proche du littoral avec des médianes de concentrations très faibles, sur la côte Ouest, sont des zones plus profondes. Il est donc possible d'imaginer qu'une bathymétrie faible est un des facteurs encourageant le développement du phytoplancton.

De plus certaines années sortent du lot car le large ne présentait que des valeurs très faibles de concentration en chlorophylle *a*, telles que les années 2010, 2012 et 2018 pour la Martinique et les années 2008 et 2012 pour la Guadeloupe. L'hypothèse qui peut être établie est le lien avec les conditions climatiques particulières. Sur le site de Météo France, des bulletins mensuels et annuels sont disponibles pour les Antilles françaises. Pour la Guadeloupe, lors de l'année 2008, des périodes de fortes précipitations supérieures à la normale sont à noter avec des vents violents associés à une profonde dépression. Ils ont généré un grand train de houle. L'événement marquant de cette année est l'ouragan Omar, qui est passée à moins de

100 km des côtes caraïbes. Il a provoqué de forts épisodes d'orages et de vent. Lors de l'année 2012 en Guadeloupe, deux évènements sont à noter. Un épisode orageux exceptionnel touche la région le 7 mai 2012. Cela provoque de très grosses précipitations, 254 mm en 24 heures à Petit-Bourg, sachant que la valeur mensuelle normale pour un mois de mai est de 171 mm. Au mois d'octobre, le cyclone tropical Rafaël traverse le département au stade de tempête tropicale. Les précipitations enregistrées sont exceptionnelles, 1242 mm en un mois et 358 mm en une journée (13 octobre 2012). Cette tempête a aussi généré des vents assez forts avec de fortes rafales. Pour la Martinique, l'année 2010 est caractérisée par de très fortes précipitations en fin d'année. La première raison est l'ouragan Thomas (30 octobre 2010) qui provoque des pluies abondantes sur le sud de l'île et un vent très fort. Puis, à partir du 24 décembre 2010, des pluies remarquables sont enregistrées et provoquent des inondations catastrophiques. Concernant l'année 2012, l'île subit trois tempêtes tropicales : Ernesto, qui engendre de forts vents sur la côte atlantique notamment, puis Isaac, qui arrive le 21 août 2012 au stade de tempête et arrose énormément l'île sans pour autant faire de dégât. Elle génère tout de même de la houle. La troisième est la tempête Rafael qui deviendra plus tard un ouragan (12 octobre 2012). Elle déverse beaucoup de pluie dans le sud de l'île. Pour finir, l'année 2018 a été une des années la plus ventée de toutes. Cela est dû principalement à de forts alizés observés en février et au passage du cyclone Kirk, en septembre. Ces cyclones peuvent donc être à l'origine d'un fort brassage des masses d'eau et par conséquent défavorisent le développement du phytoplancton.

Concernant la phénologie, les cartographies des pics ont permis de montrer une saisonnalité sur les années, illustrée par les pics de concentrations observés chaque année. L'île de Saint-Martin montre que les points à deux pics de concentrations en chlorophylle *a* par année sont les points les plus éloignés de la zone côtière. Ces zones sont exposées aux facteurs d'hydrodynamisme tels que les vents, les courants, qui provoquent des apports de nutriments ponctuels, ce qui peut laisser penser que ces zones sont plus propices à des enrichissements ponctuels durant l'année, d'où les deux pics par année. Les zones côtières sont soumises à de fortes pressions anthropiques, et moins aux conditions hydrodynamiques, qui sont plus élevées lors des pics touristiques, ce qui pourrait expliquer le pic annuel que l'on retrouve chaque année sur ces zones. En Martinique, une différence a été observée entre le Nord et le

Sud de l'île. En effet, le Nord est une zone à deux pics, et le Sud à un pic par année. Cela peut être mis en lien avec des conditions topographiques particulières de la Martinique. Le Nord de l'île est caractérisé par de forts reliefs, due à la présence du volcan, la montagne Pelée. Ces observations peuvent être mises en lien avec celles de la Guadeloupe. Pour la Guadeloupe, il est possible d'observer que la côte Ouest est caractérisée par un pic par année. Cette zone correspond à la zone où il a été observé sur l'ensemble des années une zone à très faibles concentrations en chlorophylle *a*. Cette zone est donc particulière par rapport au reste du littoral. En effet le reste du littoral de la zone Ouest (Basse-Terre) est caractérisée par deux pics à l'année, contrairement au littoral de la Grande-Terre qui est majoritairement caractérisé par un pic par année. Cette zone est, de même que pour la Martinique, une zone à relief, dû à la présence du volcan la Soufrière. Le point commun entre ces zones à deux pics par années est leur forte pluviométrie annuelle (Météo France). Le reste de l'île possède une pluviométrie élevée que pendant la saison des pluies. La forte pluviométrie de ces zones durant toute l'année peut provoquer un second apport en nutriments, provoqué par l'augmentation des débits des fleuves, ravines et rivières et donc augmenter la quantité des nutriments transportés, venant des cultures ou des populations. Cela provoque un enrichissement des eaux côtières en nutriments et par conséquence un développement de la biomasse et donc provoquer ce deuxième pic durant l'année qui n'est pas présent sur le reste du littoral des deux îles. Cela a été étudié par Ario Damar, en 2003. Il a étudié le lien entre les saisons climatiques et la concentration en nutriment présente dans l'eau, qui représente un facteur important dans le développement phytoplanctonique et donc la concentration en chlorophylle *a*. Son étude porte sur trois baies : la Baie de Lampung (mésotrophe), la Baie de Jakarta (eutrophe) et la Baie de Semangka (oligotrophe). Dans ces zones les nutriments vont avoir plusieurs sources, telles que les activités anthropiques, les cours d'eau ou les rivières environnantes... et plus particulièrement l'utilisation intensive d'engrais dans les cultures de rizières et le déversement d'eaux usées non traitées provenant des agglomérations urbaines. Il observe des valeurs élevées pendant la saison des pluies et des valeurs faibles pendant la saison sèche. En effet des précipitations plus importantes peuvent entraîner une augmentation des rejets dans les rivières et par conséquent une augmentation des charges en nutriments dans les rivières. Cela va provoquer des variations saisonnières de la biomasse phytoplanctonique. L.M.Hernandez-Terrones et al. (2015) ont eux aussi montré une saisonnalité dans le

rapport N :P (azote et phosphore), qui est un ratio de nutriment important pour l'assemblage des communautés de phytoplancton. Les auteurs ont travaillé sur la baie d'Akumal, aux Caraïbes, dans la péninsule du Yucatan (Mexique). Le climat se divise en deux saisons : la saison des pluies, qui se déroule pendant les mois de mai à octobre, caractérisée par des ouragans, des dépressions tropicales et des tempêtes tropicales, et la saison hivernale sèche. Ces saisons vont avoir des conséquences sur la proportion d'azote et de phosphore dans l'écosystème. Au niveau des lagunes, le Phosphore Réactif Soluble (PRS) et les concentrations d'azote inorganique dissous (DIN) sont élevées en saison sèche (janvier, février et mars) et faibles pendant la saison des pluies (septembre). Concernant les sites marins et les sources d'eau, les auteurs observent de fortes concentrations de SRP pendant la saison sèche et des concentrations en DIN plus élevées pendant la saison des pluies. Ils ont donc conclu que pendant la saison des pluies, il y avait un écoulement des eaux sous-marines, ce qui pousse le milieu côtier vers un système limité en phosphore. Puis pendant la saison sèche, les eaux réceptrices sont souvent limitées en azote. Il a donc montré une saisonnalité au sein du ratio des nutriments des eaux de surface, conditionnées par les pluies, ce qui peut avoir un impact sur la structure des espèces phytoplanctoniques.

De plus, cette hypothèse peut être mise en lien avec les dates d'apparitions des pics. Pour la Martinique et la Guadeloupe, les zones à un pic ont une date d'apparition qui se trouve plus tôt que pour les zones à deux pics. Les zones caractérisées par un pic à l'année ont le pic de concentration en chlorophylle *a* pendant la saison des pluies, qui s'étend du mois d'avril au mois de novembre pour les Antilles françaises. Cependant, pour les zones à deux pics par année de concentration en chlorophylle *a*, le plus élevé des deux pics arrive en fin d'année, pendant la saison sèche. Or il a été observé que les zones majoritaires avec deux pics par année sont des zones avec une pluviométrie annuelle bien supérieure au reste de l'île. Cela confirme donc que la pluviométrie peut jouer un rôle important dans l'enrichissement des eaux littorales et provoquer un second pic en fin d'année, ce qui ne sera pas le cas sur les autres zones de l'île qui ont une pluviométrie très basse pendant la saison sèche.

Toutes ces études amènent à penser que la productivité du phytoplancton ne dépend pas que d'un facteur, mais cela est bien le fruit d'une multitude de facteurs, ce qui est difficile à établir. Une saisonnalité est présente, mais cela est fluctuant selon les zones d'étude et les paramètres qui régissent ces zones.

## **Difficultés rencontrées**

Une des limites identifiées lors de ce stage a été l'accès aux données. En effet, beaucoup de données ne sont pas en libre-service, ou tout simplement inexistantes, surtout pour les territoires DOM-TOM comme les données des débits ou encore les données des pressions anthropiques. De plus, il a été difficile de trouver des données couvrant les dix-sept années d'études. Le temps de traitements des données a aussi été limitant. En effet les données sont journalières, sur une longue période temporelle, ce qui donne des centaines de milliers de données à traiter. Cela a mené à des choix de traitements pour que cela reste réalisable dans le temps imparti.

## **V- Conclusion et perspectives**

Les écosystèmes marins sont des milieux complexes, influencés par de nombreux phénomènes, qui interagissent entre eux (météorologie, hydrodynamisme, écologie, biologie et anthropisation). Etablir l'histoire d'un paramètre pour un lieu et une période donnée à partir de sa série temporelle est difficile. L'effet des gradients d'intensité lumineuse, de la teneur en nutriments et de l'hydrodynamisme sont des facteurs prédominants sur la croissance du phytoplancton. Cependant, les conditions climatiques peuvent jouer un rôle important, plus particulièrement au sein des écosystèmes tropicaux, qui possède des conditions climatiques particulières. La première observation faite, est la dynamique des concentrations en chlorophylle *a* bien différente entre les eaux côtières et les eaux du large aux Antilles françaises. Le large est une zone ayant de plus faibles concentrations en chlorophylle *a* que le littoral. De plus, il a été observé, sur certaines années, une zone de concentrations au large plus élevées que sur le reste des années. L'influence de l'Amazone est hypothétique, mais très probable. Néanmoins elle est dépendante de la variabilité temporelle et saisonnière du passage des gyres. Il est donc difficile de quantifier le rôle joué par les apports de ce fleuve sur la qualité des eaux côtières de la Martinique et de la Guadeloupe. La seconde observation a été la présence de hotspots sur les eaux littorales. L'augmentation des débits des fleuves dues aux fortes pluviométries, provoque l'augmentation des ruissellements qui peuvent transporter de forts taux de nutriments et enrichir les masses d'eau côtières. En addition à cela, les côtes sont

caractérisées par une faible bathymétrie, entraînant une forte pénétration de la lumière, ce qui participe au développement du phytoplancton. De plus, il a été établi que certaines zones sont soumises à de fortes pressions anthropiques, mais le détail et le fonctionnement est difficile à traiter. Pour finir, l'étude de la saisonnalité de l'apparition des pics de concentrations en chlorophylle *a* ont montrés que la pluviométrie jouait un rôle important dans l'apparition des pics. Elle va provoquer l'augmentation des débits des fleuves et par conséquent celui du transport des nutriments qui vont permettre le développement du phytoplancton sur le littoral. Etablir un lien direct entre la courantologie, l'intensité des pressions anthropiques terrestres, les conditions climatiques et la qualité des eaux côtières est un travail complexe : plusieurs facteurs entrent en jeu et c'est leur addition qui détermine la dynamique des concentrations en chlorophylle *a* dans les Antilles françaises.

En complément de cette étude, il serait intéressant d'aller plus loin dans la recherche de facteurs qui pourrait expliquer nos observations. L'évolution de la chlorophylle *a* pour les îles de l'étude n'est pas marquée par une évolution significative globale. Une hétérogénéité est bien présente, l'évolution de la chlorophylle *a* semble être marquée par des événements ponctuels liés probablement à la climatologie avec des années aux comportements significativement différents. De plus le manque de corrélation entre les fleuves et les zones de hotspots nous suggère que d'autres pressions anthropiques pourraient jouer un rôle dans la dynamique des concentrations en chlorophylle *a* sur les littoraux. L'analyse liée aux DLMs peut aussi être poursuivie. Les cartographies des dates d'apparition des maximums des pics pourraient apporter certaines informations. Il pourrait aussi être intéressant de se concentrer sur l'évolution des intensités des pics au fil des années et de classifier les séries temporelles selon leur nombre de pics. Pour finir, l'échelle d'agrégation pourrait être plus fine, par exemple une donnée par semaine au lieu des deux semaines choisies ici.

## VI- Références bibliographiques

Allenou J.P., Huguet A. (2019), *Influence des grands fleuves Amazone et Orénoque sur l'enrichissement des masses d'Eau Côtières de la Martinique et de la Guadeloupe*, Expertise n°10 : Influences grands fleuves, consulté le 22/06/2021.

Burford M.A., I.T. Webster et al. (10 November 2012), *Controls on phytoplankton productivity in a met-dry tropical estuary*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272771412002879?via%3Dihub>, Estuarine, Coastal and Shelf Science, volume 113, p.141-151, consulté le 05/02/2021.

Callède J. et al. (2010), *Les apports en eau de l'Amazone à l'océan atlantique*, consulté sur <https://www.erudit.org/en/journals/rseau/1900-v1-n1-rseau3946/044688ar.pdf>, consulté le 22/06/2021.

Damar A. (2003), *Effects of enrichment on nutrient dynamics, phytoplankton dynamics and productivity in Indonesian tropical waters: a comparison between Jakarta Bay, Lampung Bay and Semangka Bay*, [https://macau.uni-kiel.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dissertation\\_derivate\\_00000702/d702.pdf](https://macau.uni-kiel.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dissertation_derivate_00000702/d702.pdf), consulté le 04/02/2021.

Dugenne M.E. (2017), *Dynamique du phytoplancton en mer Méditerranée : approches par mesures à haute fréquence, modélisation et statistiques bayésiennes*, Thèse, université de Marseille, <https://www.theses.fr/2017AIXM0121>, consulté le 15/07/2021.

Failler P. et al. (2014), *Valuation of marine and coastal ecosystem services as a tool for conservation: The case of Martinique in the Caribbean*, consulté sur <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212041614001272>, volume 11, p.67-75, consulté le 10/06/2021.

Gohin F. et al. (2002), *A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters*, consulté sur International Journal Of Remote Sensing, 23(8), 1639-1661, consulté le 05/02/2021.

Gohin F. (2015), *Variation spatio-temporelle de la chlorophylle / SRM MMN*, [https://www.researchgate.net/publication/267246171\\_Variation\\_spatio-temporelle\\_de\\_la\\_chlorophylle\\_SRM\\_MMN](https://www.researchgate.net/publication/267246171_Variation_spatio-temporelle_de_la_chlorophylle_SRM_MMN), consulté le 05/06/2021.

Hernandez-Terrones L.M., A.Kimberly et al. (2015), *Water quality assessment in the Mexican Caribbean: Impacts on the coastal ecosystem*,

[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434315000965?casa\\_token=zu5MecyhHCsAAAAA:p7pDvfp2ILgHtOUZV8wqOaiFjS62em27\\_8VdtfWewYpDsFeXRspIMaPT6cSY1jkhRlpMZy03XSM](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434315000965?casa_token=zu5MecyhHCsAAAAA:p7pDvfp2ILgHtOUZV8wqOaiFjS62em27_8VdtfWewYpDsFeXRspIMaPT6cSY1jkhRlpMZy03XSM), Continental Shelf Research 102, p.62-72, consulté le 05/02/2021.

Huguet A. (2020), *Utilisation des données satellite pour la surveillance marine dans les Antilles*, rapport interne à Ifremer, consulté le 05/02/2021.

Jouanno J. et al. (2021), *Evolution of the riverine nutrient export to the Tropical Atlantic over the last 15 years: is there a link with Sargassum proliferation ?*, consulté sur : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abe11a>, Environmental Research Letters 16 034042, consulté le 24/06/2021.

Meric F. (2021), *Evaluation de la pertinence d'un indicateur d'eutrophisation dans les eaux côtières des DROM*, rapport de stage de master 2, consulté le 20/06/2021.

Morel A., Claustre H. et al. (2010), *The most oligotrophic subtropical zones of the global ocean: similarities and differences in terms of chlorophyll and yellow substance*, <https://bg.copernicus.org/articles/7/3139/2010/bg-7-3139-2010.pdf>, Biogeosciences, 7, p.3139–3151, consulté le 08/02/2021.

Nivet C. et al. (2010), *Connaissance et gestion des écosystèmes tropicaux*, <http://147.100.164.84/wordpress/wp-content/uploads/2017/06/Recueil-ET05-PageSimple.pdf>, Programme de recherche « Écosystèmes tropicaux » 2005-2010, page 7-13, consulté le 23/06/2021.

Planchon O., (2019), *Variabilité climatique printanière et phénologie végétale en Auxois : exemple d'Alise-Sainte-Reine (Côte-d'Or)*, Revue scientifique Bourgogne-Franche-Comté Nature, N°29, p.341-35, consulté le 05/02/2021.

Laere G. et al. (2016), *The Forest Ecosystems Observatory in Guadeloupe (FWI)*, Caribbean Naturalist, Eagle Hill Institute, 1, pp.108-115, hal-01978675, consulté sur <https://hal.univ-antilles.fr/hal-01978675/document>, le 15/06/2021.

Schleupner C. (2008), *Evaluation of coastal squeeze and its consequences for the Caribbean island Martinique*, consulté sur <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569108000112>, consulté le 15/06/2021.

Soudant D. et al. (2019), *Incertitudes des méthodes d'évaluation « eaux littorales » : utilisation de modèles linéaires dynamiques pour l'évaluation des incertitudes des*

*paramètres contaminants chimiques dans le biote*, Programme scientifique et technique, Rapport AQUAREF, consulté le 05/03/2021.

## Sitologie :

CMEMS (s.d.), MyOcean, consulté sur [https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com\\_csw&view=details&product\\_id=GLOBAL\\_REANALYSIS\\_WAV\\_001\\_032](https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_REANALYSIS_WAV_001_032), consulté le 15/03/2021.

Data.gouv.fr (s.d.), *Masses d'eau côtières - Métropole – version rapportage 2016*, consulté sur <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/masses-deau-cotieres-metropole-version-rapportage-2016/>, consulté le 05/03/2021.

Data.gouv.fr (s.d.), *Stations hydrométriques – Guadeloupe*, <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/stations-hydrometriques-guadeloupe/>, consulté le 26/06/2021.

Data.gouv.fr (s.d.), *Stations hydrométriques – Martinique*, <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/stations-hydrometriques-martinique/>, consulté le 26/06/2021.

IFREMER (s.d.), <https://wwz.ifremer.fr/L-institut>, consulté le 13/07/2021.

Météo France (s.d.), *Données Publiques de Météo-France - Bulletins climatiques de France métropolitaine et outre-mer*, consulté sur [https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id\\_produit=129&id\\_rubrique=52](https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=129&id_rubrique=52), consulté le 10/03/2021.

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, (2015), *Hydro – Accueil*, consulté sur <http://www.hydro.eaufrance.fr/indexd.php>, consulté le 15/03/2021.

Outre-Mer.gouv (2016), consulté sur <https://outre-mer.gouv.fr/saint-martin>, consulté le 25/06/2021.

SEXTANT (s.d.), [https://sextant.ifremer.fr/Donnees/Catalogue#/search?fast=index&content\\_type=json](https://sextant.ifremer.fr/Donnees/Catalogue#/search?fast=index&content_type=json)

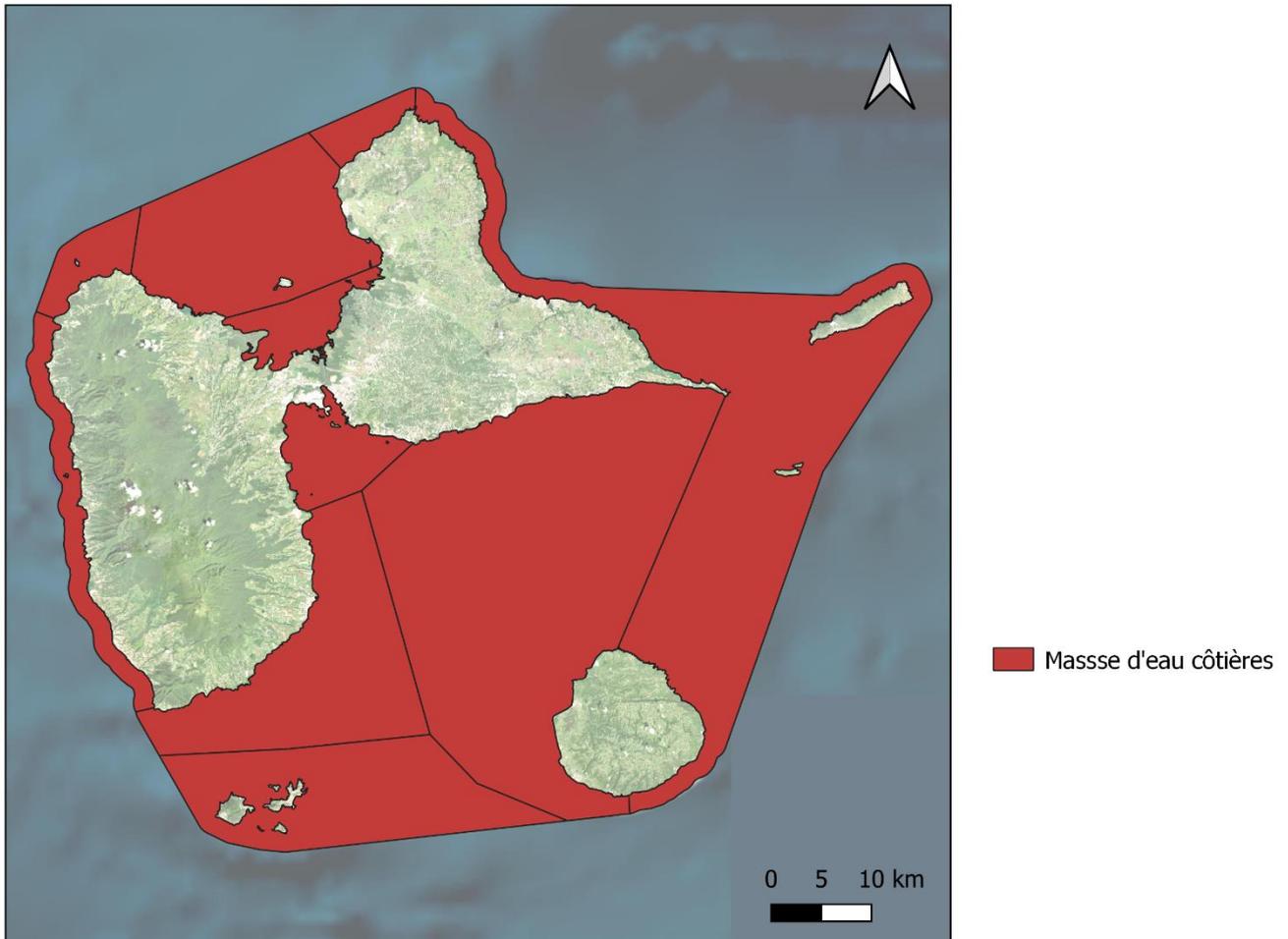
[n&from=1&to=20&sortBy=changeDate& groupPublished=DATARMOR DATAREF& any=satellites%20trait%C3%A9es.](#)

SHOM (s.d.), *MNT bathymétrique de façade de la Guadeloupe et de la Martinique (Projet Homonim)*, consulté sur [https://services.data.shom.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/metadata/MNT\\_ANT\\_S100m\\_HOMONIM\\_WGS84.xml](https://services.data.shom.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/metadata/MNT_ANT_S100m_HOMONIM_WGS84.xml), consulté le 10/03/2021.

SO-HYBAM (s.d.), consulté sur <https://hybam.obs-mip.fr/fr/website-under-development-2/>, consulté le 15/06/2021.

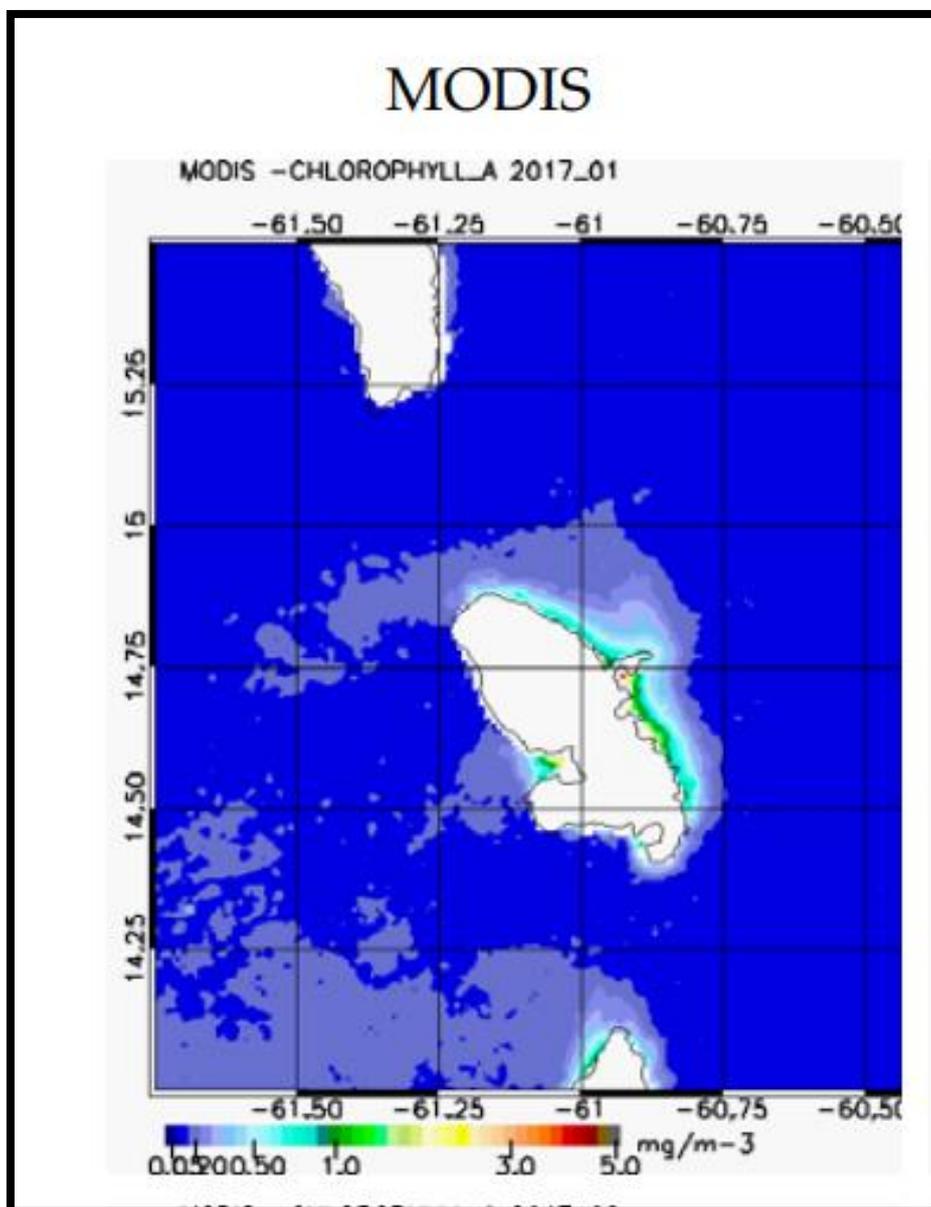
# Annexes

## Annexe 1 : Représentation des masses d'eau côtières DCE pour la Guadeloupe.



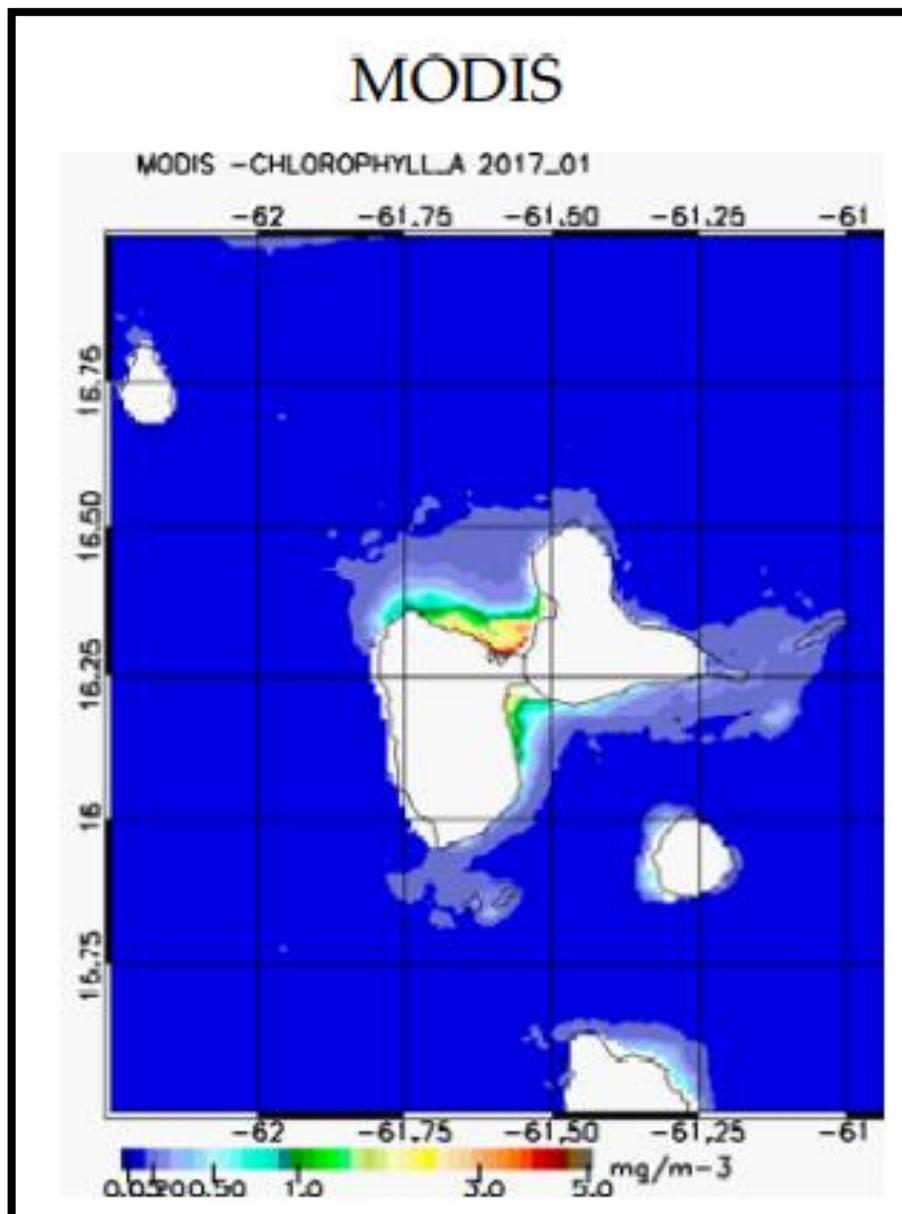
Annexe 2 : Observation de la concentration en chlorophylle a, en janvier 2017, pour la Martinique, par le satellite Modis.

Source : Huguet A. (2020).



Annexe 3 : Observation de la concentration en chlorophylle a, en janvier 2017, pour la Guadeloupe, par le satellite Modis.

Source : Huguet A. (2020).





## Annexe 5 : Points au large choisis pour la Martinique

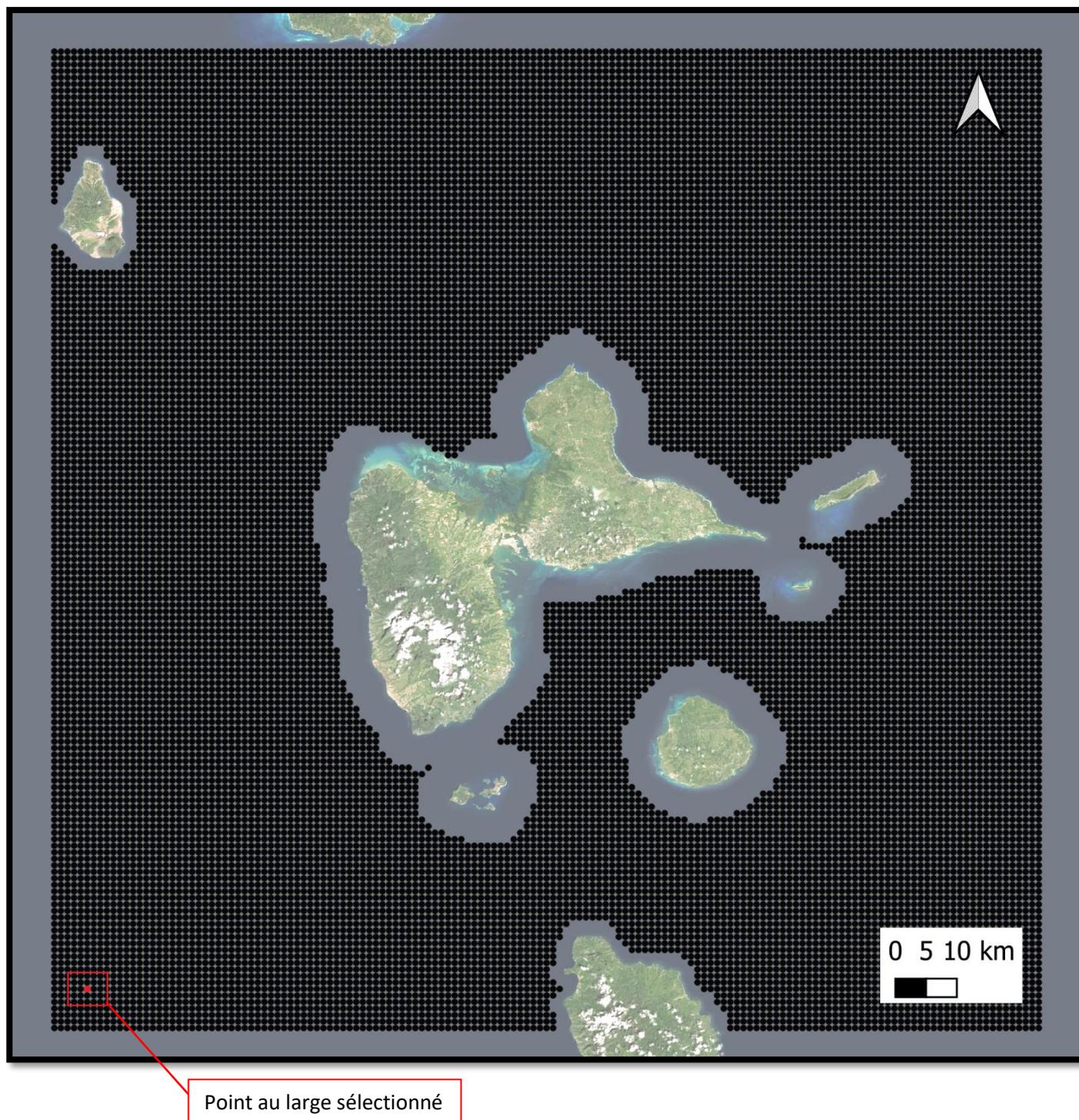
Source : IFREMER



Point au large sélectionné

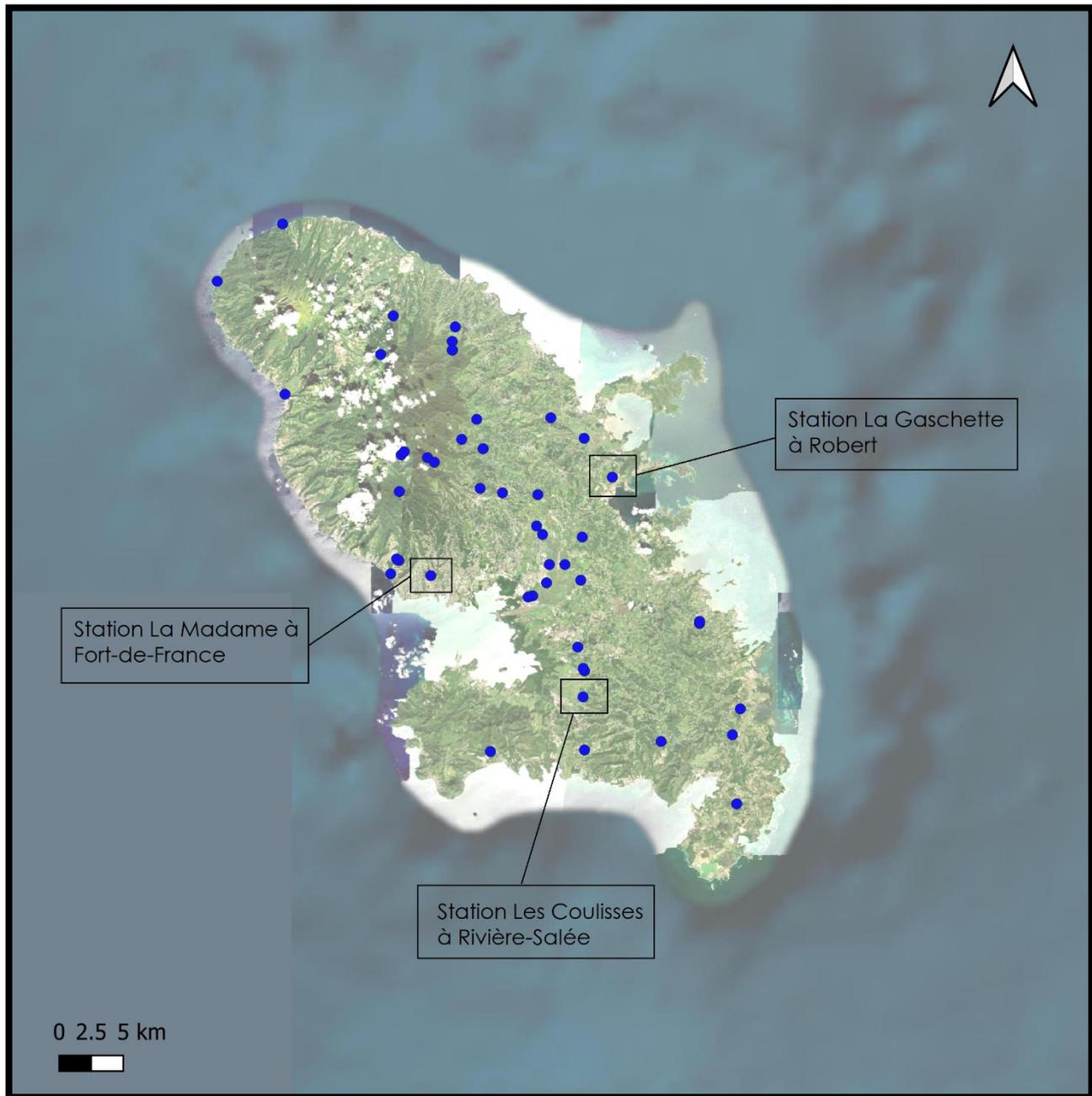
## Annexe 6 : Point au large choisi pour la Guadeloupe

Source : IFREMER



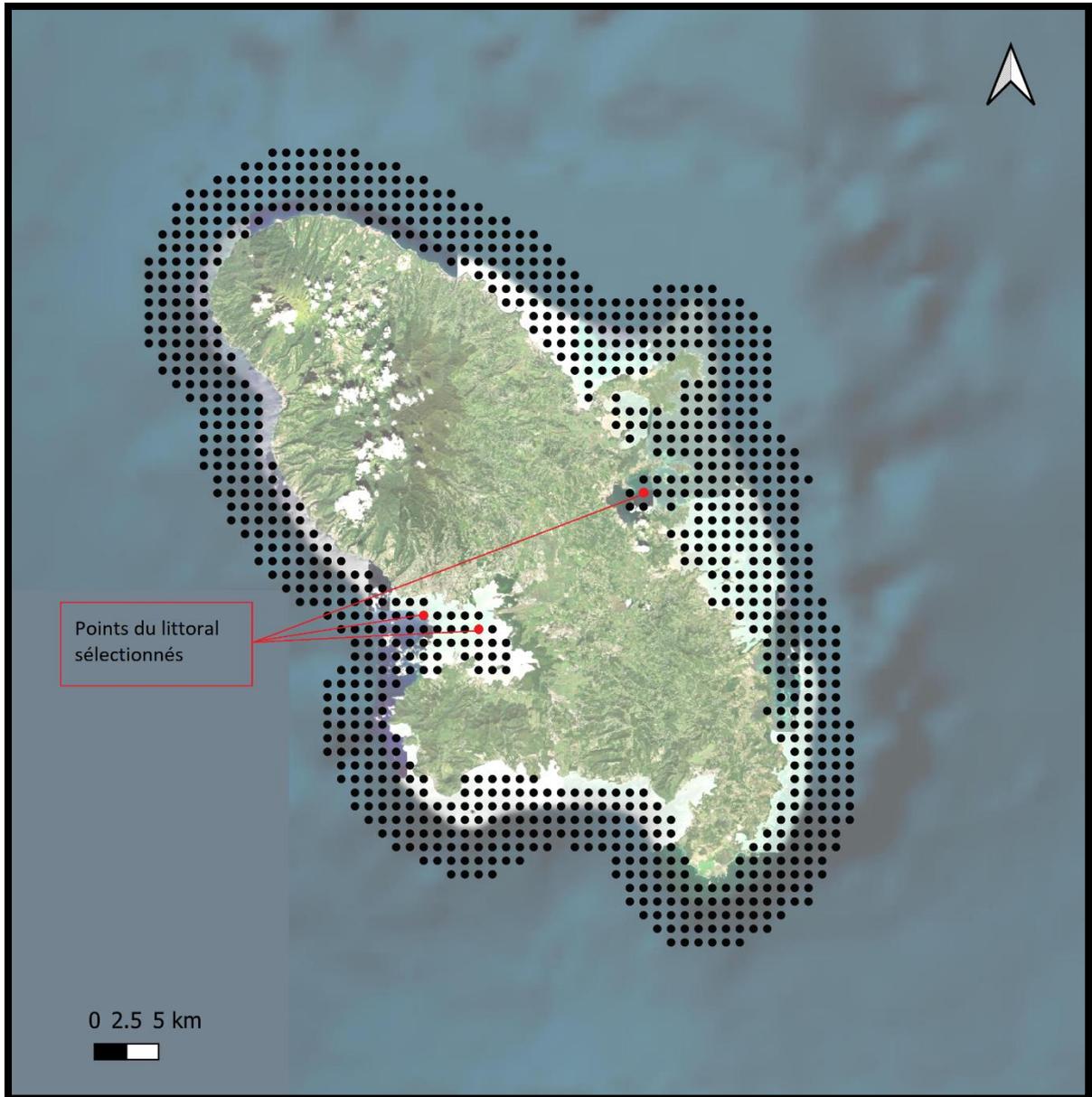
## Annexe 7 : Stations hydrométriques choisies des fleuves de la Martinique

Source : Data.gouv.fr



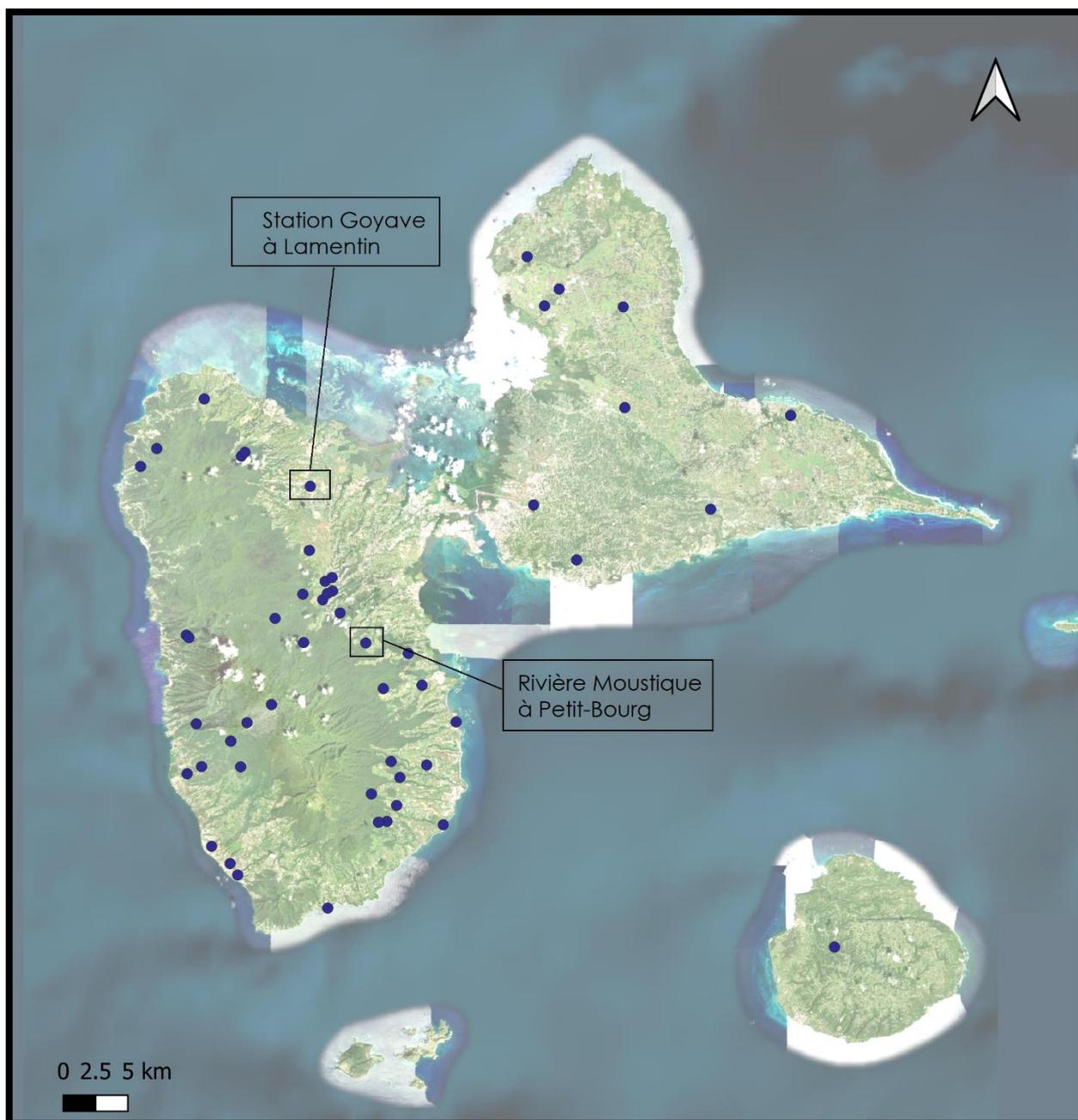
## Annexe 8 : Points littoraux choisis pour la Martinique

Source : IFREMER



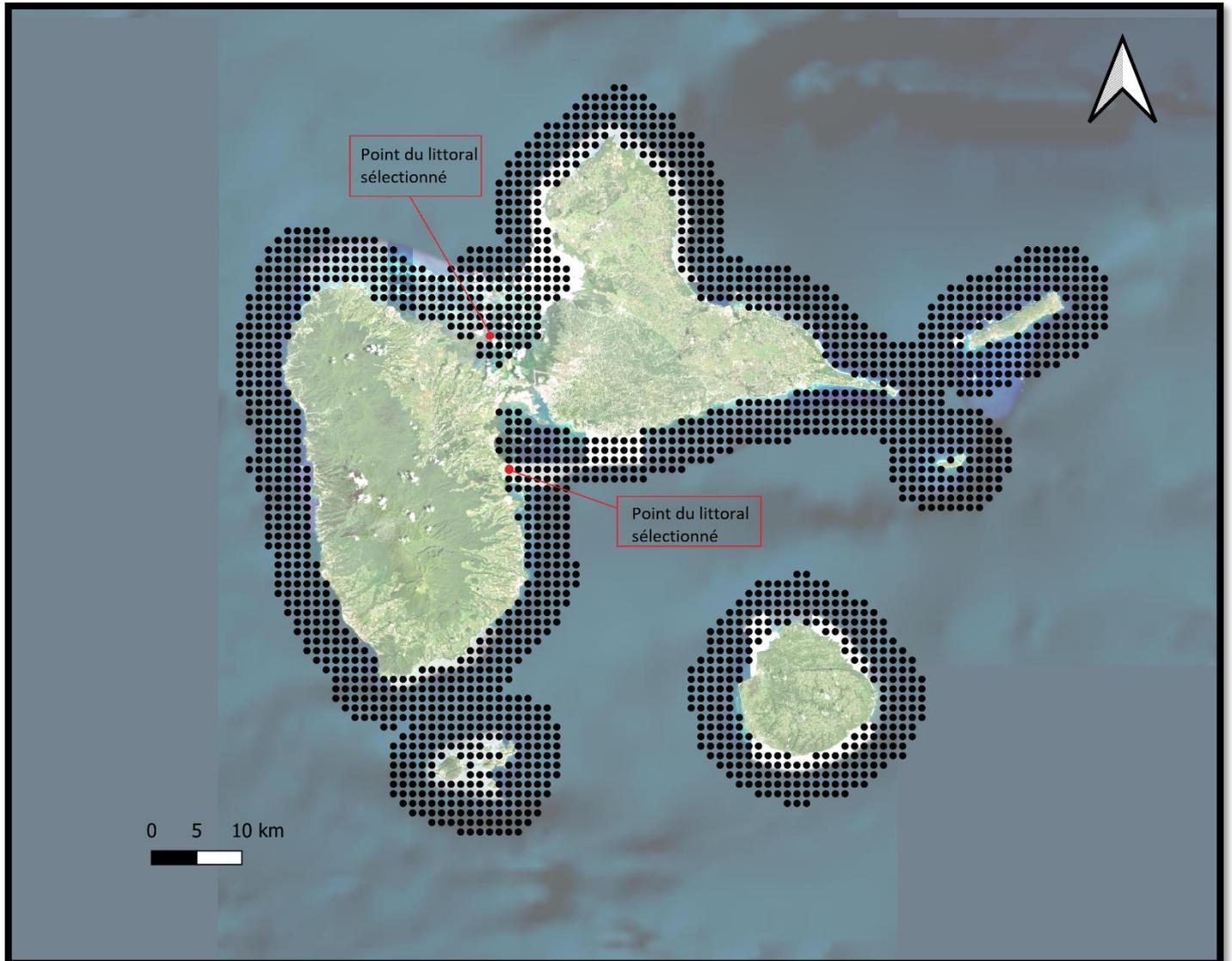
## Annexe 9 : Stations hydrométriques choisies pour la Guadeloupe

Source : Data.gouv.fr



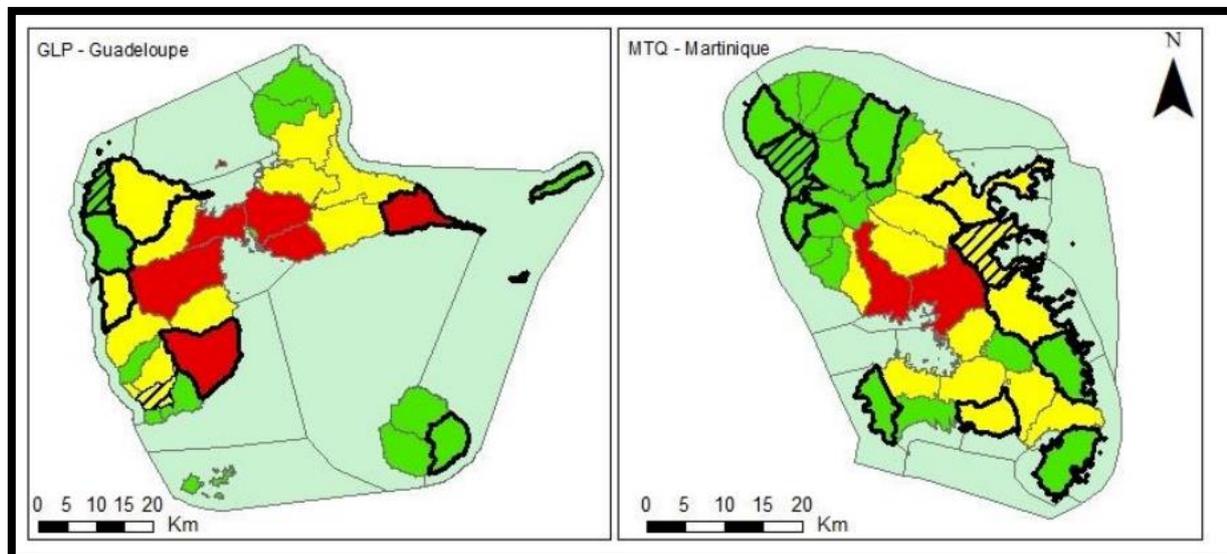
## Annexe 10 : Points sur le littoral choisis pour la Guadeloupe

Source : IFREMER

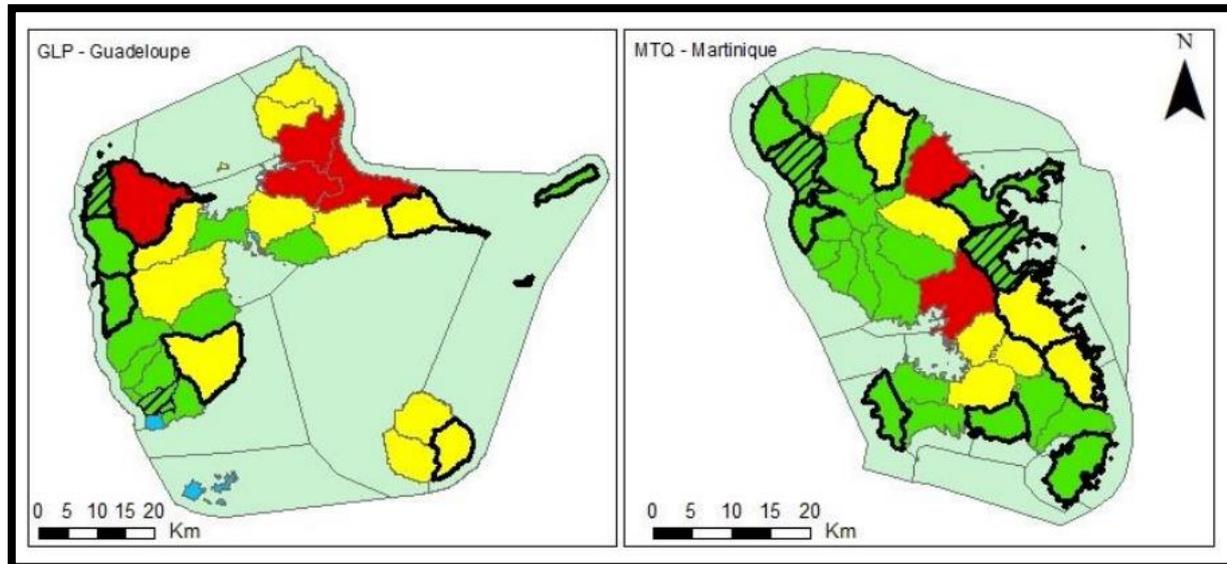


## Annexe 11 : Cartographies des zones les plus exposées aux pressions domestiques et agricoles identifiées

Source : Rapport de stage F. Meric, 2021, IFREMER.



Zones les plus exposées aux pressions domestiques pour la Guadeloupe et la Martinique.



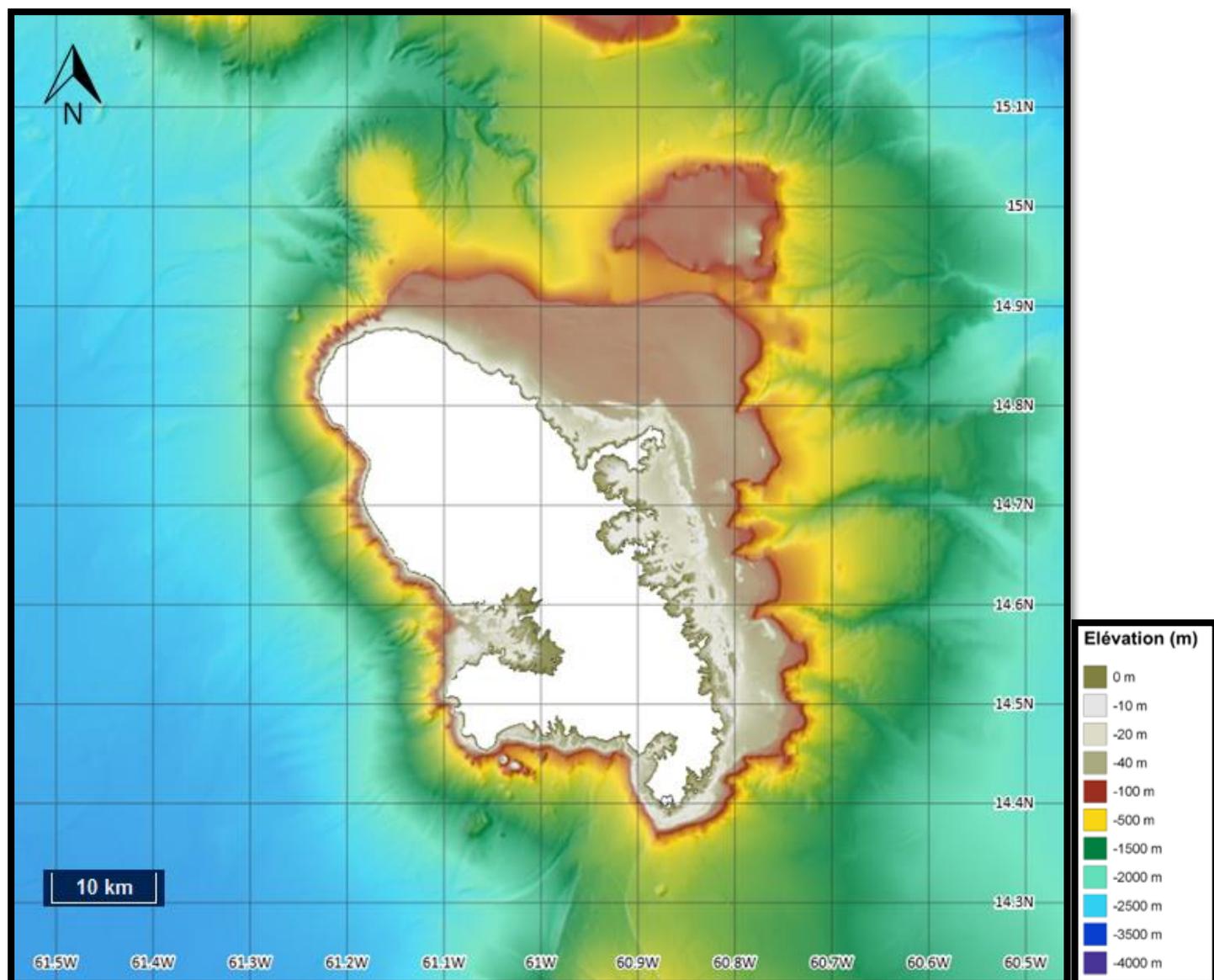
Zones les plus exposées aux pressions agricoles pour la Guadeloupe et la Martinique.

Tableau représentant la constitution de l'indice de niveau des pressions anthropiques pour la Martinique et la Guadeloupe.

Pression	Métrique	Nulle (0)	Faible (1)	Moyenne (2)	Forte (3)
Domestique	Population (en nb d'hab)	0	]0 - 10 000]	]10 000 - 40 000]	40 000 <
	Surface urbanisée (en ha)	0	]0 - 500]	]500 - 1 500]	1 500 <
	AC (en EH)	0	]0 - 10 000]	]10 000 - 20 000]	20 000 <
	<b>PRESSION</b>	<b>0</b>	<b>1 - 3</b>	<b>4 - 6</b>	<b>7 - 9</b>
Industrielle	Nb distilleries	0	-	1	2 - 3
	<b>PRESSION</b>	<b>0</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Agricole	Canne à sucre + bananeraie (en ha)	0	]0 - 500]	]500 - 2 500]	2 500 <
	Bovins (en têtes)	0	]0 - 1 000]	]1 000 - 2 000]	2 000 <
	Porcins (en têtes)	0	]0 - 500]	]500 - 2 000]	2 000 <
	Volailles (en têtes)	0	]0 - 10 000]	]10 000 - 100 000]	100 000 <
	<b>PRESSION</b>	<b>0</b>	<b>1 - 4</b>	<b>5 - 8</b>	<b>9 - 12</b>
Fluviale	Débits cours d'eau permanents (m <sup>3</sup> /s)	0	]0 - 2]	]2 - 5]	5 <
	<b>PRESSION</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>

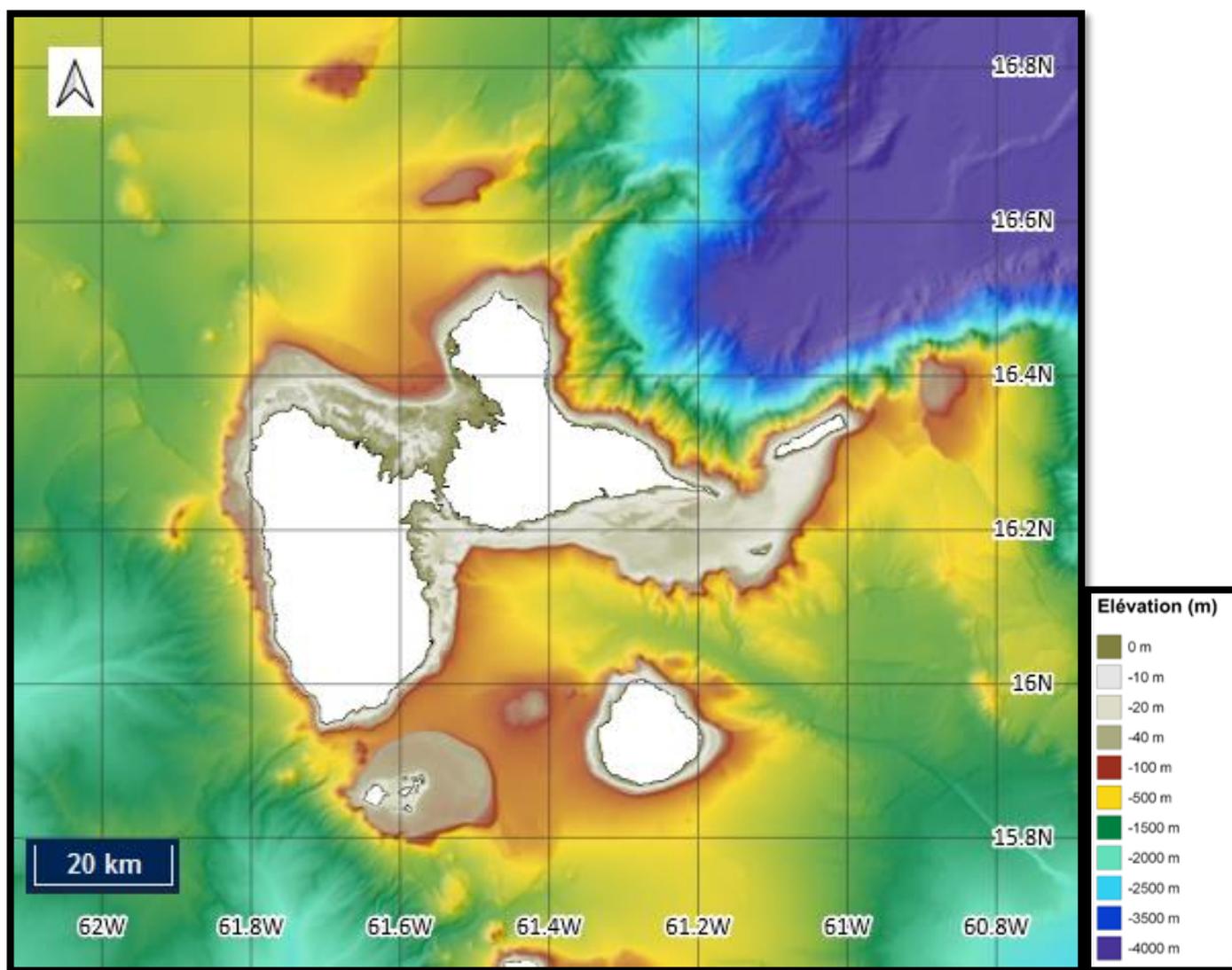
## Annexe 12 : Représentation de bathymétrie de la Martinique.

Source : SHOM



## Annexe 13 : Représentation de la bathymétrie de la Guadeloupe.

Source : SHOM



## Résumé

Ce rapport de stage, réalisé au sein de la structure IFREMER, présente l'évolution spatio-temporelle des concentrations en chlorophylle *a* sur une période de 17 ans (2003-2019) dans la zone des Antilles françaises (Martinique, Guadeloupe et Saint-Martin). Cela se base sur des images satellites dans le but de constituer des séries temporelles, pour les analyser et déterminer la phénologie de cette dynamique. Une cartographie de chaque île montre les concentrations de chlorophylle *a* par années et l'utilisation des Modèles Linéaires Dynamiques ont permis d'extraire l'évolution temporelle de ces données pour en faire des cartographies et déterminer les facteurs impactant les concentrations en chlorophylle *a*.

**Mots-clés:** Données satellites, chlorophylle *a*, cartographie, série temporelle, Modèle Linéaire Dynamique.

## Summary

This internship report, realized in IFREMER, present the spatial and temporal evolution of the concentration of chlorophyll *a* for the last 17 years (2003-2019), in the French West Indies (Martinique, Guadeloupe and Saint-Martin). It uses satellite images, in order to constitute time series, to analyze them and to determinate the phenology of this dynamic. A mapping of each island shows the concentration of chlorophyll *a* per year, and the use of dynamic linear model has extract the time evolution of those datas to make mapping and to determinate the factor, which have an impact on the concentration of chlorophyll *a*.

**Keywords:** Satellite data, chlorophyll *a*, mapping, time series, Dynamic Linear Model.