



HAL
open science

Suivi de la qualité des eaux littorales et côtières de Guyane par télédétection spatiale et mesures in situ à haute fréquence

Vincent Vantrepotte, Manh Duy Tran, Antoine Gardel

► **To cite this version:**

Vincent Vantrepotte, Manh Duy Tran, Antoine Gardel. Suivi de la qualité des eaux littorales et côtières de Guyane par télédétection spatiale et mesures in situ à haute fréquence. CNRS; OFB; Office de l'eau Guyane. 2023. hal-04399888

HAL Id: hal-04399888

<https://hal.science/hal-04399888>

Submitted on 17 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

« Suivi de la qualité des eaux littorales et côtières de Guyane par télédétection spatiale et mesures *in situ* à haute fréquence »

Rapport final juin 2023

Introduction

Les eaux côtières de la Guyane française présentent des écosystèmes et des habitats uniques et fragiles. Le cycle hydrologique et la disponibilité des nutriments dans la région sont généralement régulés par les oscillations saisonnières de la zone de convergence intertropicale (ZCIT), ce qui se traduit par des variations des précipitations, des vents et des courants océaniques pendant les saisons humides et sèches (Chevalier et al., 2008 ; Waliser & Gautier, 1993). En outre, les bancs de vase mobiles le long du littoral favorisent la croissance des mangroves, qui jouent un rôle important dans le stockage du "carbone bleu" (Taillardat et al., 2018) et les échanges en raison de leur contribution à la biomasse arborée aérienne (Fromard et al., 1998; Walcker et al., 2018) et aux taux de chute de la litière (Betoulle et al., 2001).

La rareté des données *in situ* dans l'écosystème marin de Guyane pose un défi dans l'évaluation de la variabilité biogéochimique, qui est également cruciale pour les stratégies de surveillance régionales. Bien qu'elle apparaisse comme un outil puissant pour surveiller la qualité des eaux côtières, l'application des techniques de télédétection aux eaux côtières de la Guyane française pourrait se heurter à plusieurs obstacles. La forte turbidité résultant d'un apport important de sédiments du fleuve Amazone (Eisma et al., 1991) augmente la complexité optique de la masse d'eau. Par conséquent, la détermination des paramètres biogéochimiques devient une tâche difficile en raison de la présence de divers constituants de l'eau, par exemple le phytoplancton, les matières en suspension (MES ou SPM en anglais) et la matière organique dissoute colorée (CDOM) qui affectent simultanément les signaux optiques (IOCCG, 2000 ; Mouw et al., 2015 ; Werdell et al., 2018). En outre, l'effet persistant des reflets du soleil dans la zone d'étude complique encore les observations de la dynamique biogéochimique depuis l'espace (Abascal-Zorrilla et al., 2019).

Jusqu'à présent, les efforts de recherche visant à suivre la variabilité biogéochimique dans les eaux côtières de Guyane se sont principalement concentrés sur les SPM et la chlorophylle ou Chl-a (Abascal-Zorrilla et al., 2020 ; Akopian & Lampert, 2018 ; Gardel & Gratiot, 2005 ; Lampert et al., 2015, 2016, 2017 ; Vantrepotte et al., 2013). Néanmoins, les algorithmes d'inversion bio-optique utilisés pour déterminer les concentrations de ces paramètres n'ont pas été suffisamment adaptés à la région. Ainsi, pour obtenir une compréhension plus approfondie de la qualité des eaux côtières, il est essentiel d'ajuster ces modèles d'inversion et d'incorporer des indicateurs biogéochimiques supplémentaires tels que le carbone organique particulaire (POC) et le carbone organique dissous (DOC). De plus, l'approche précédente de délimitation des masses d'eau utilisée pour la zone d'étude n'avait pas été construite à partir d'une méthode statistique suffisamment robuste.

Compte tenu du fait que les précédentes études satellitaires à l'échelle régionale n'ont pas pleinement exploité les capacités des observations de télédétection de la couleur de l'océan, ce travail vise à : 1) développer une collection de produits de couleur de l'océan (Chl-a, SPM, CDOM, POC, et DOC) pour surveiller la qualité des eaux côtières en Guyane française et offrir des séries temporelles complètes aux acteurs locaux, dans le cadre de la directive cadre européenne sur l'eau (DCE) ; 2) décrire la dynamique biogéochimique au niveau régional et évaluer les facteurs connexes conduisant à la variabilité des paramètres considérés ; 4) identifier les descripteurs biogéochimiques essentiels et examiner la présence de changements à long terme ; et 5) suggérer un système de classification complet pour partitionner les masses d'eau afin de faciliter l'établissement de politiques de surveillance locales et définir l'état de référence qui est bénéfique pour détecter les événements exceptionnels.

Ces objectifs fixés dans la convention avec l'OFB, l'OEG et la DGTM sont atteints. Ce rapport présente les résultats obtenus.

1. Acquisition de données satellite:

Afin de détecter les changements à long termes dans les eaux côtières et de transition de la Guyane française, les produits fusionnés des données GlobColour composées de différents capteurs tels que SeaWiFS (Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor), MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), et VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) et les données GlobCoast (MERIS) sont exploitées. Ces archives satellitaires offrent une couverture temporelle étendue. Même si les images du satellite MODIS offrent une série d'observations relativement longue, la bande rouge de ce capteur s'est avérée saturée en raison des défaillances atmosphériques dans la récupération de la réflectance à la longueur d'onde de 667 nm dans les environnements turbides. Ces produits satellitaires ne sont donc pas pris en compte dans cette étude.

La variabilité spatio-temporelle des paramètres biogéochimiques est examinée grâce à l'analyse des séries temporelles effectuée sur les données MERIS, car ce capteur fournit une période pertinente avec des détails spatiaux plus fins que les produits GlobColour. En outre, les données Sentinel-2/MSI (Instrument multispectral) et Sentinel-3/OLCI (Instrument de coloration des océans et des terres) sont également utilisées pour obtenir des informations supplémentaires afin de mieux comprendre la dynamique biogéochimique dans la région, en mettant l'accent sur les zones estuariennes.

Comme il est nécessaire de prendre en compte les informations les plus récentes et la couverture spatiale complète de l'ensemble du domaine côtier lors de la définition d'un état de référence, les archives de Sentinel-3 ont été utilisées pour établir un état standard des masses d'eau. Ce jeu de données, ainsi que les images Sentinel-2 et MERIS, sont adoptés pour différents schémas de classification en fonction de leur compatibilité avec les méthodes de partitionnement et de leur pertinence par rapport aux objectifs définis.

La prise en compte de l'effet de scintillement solaire permanent agissant de manière constante sur les eaux marines de la Guyane française est nécessaire. L'algorithme de correction atmosphérique (AC) POLYMER (POLYnomial-based algorithm applied to MERIS) a été appliqué aux données MERIS et Sentinel-2. Cet algorithme AC a été initialement développé pour le capteur MERIS avec l'avantage d'éliminer l'effet de reflet du soleil (Steinmetz et al., 2011) et sa performance a été largement validée pour les eaux ouvertes et côtières dans diverses études (Bui et al., 2022 ; Mograne et al., 2019 ; Pereira-Sandoval et al., 2019 ; Soppa et al., 2021 ; Warren et al., 2019).

L'assimilation des données de télédétection est décrite dans la **figure 1.1** en tenant compte des objectifs mentionnés précédemment. Une description générale de chaque capteur satellitaire est illustrée dans le **tableau 1.1**.

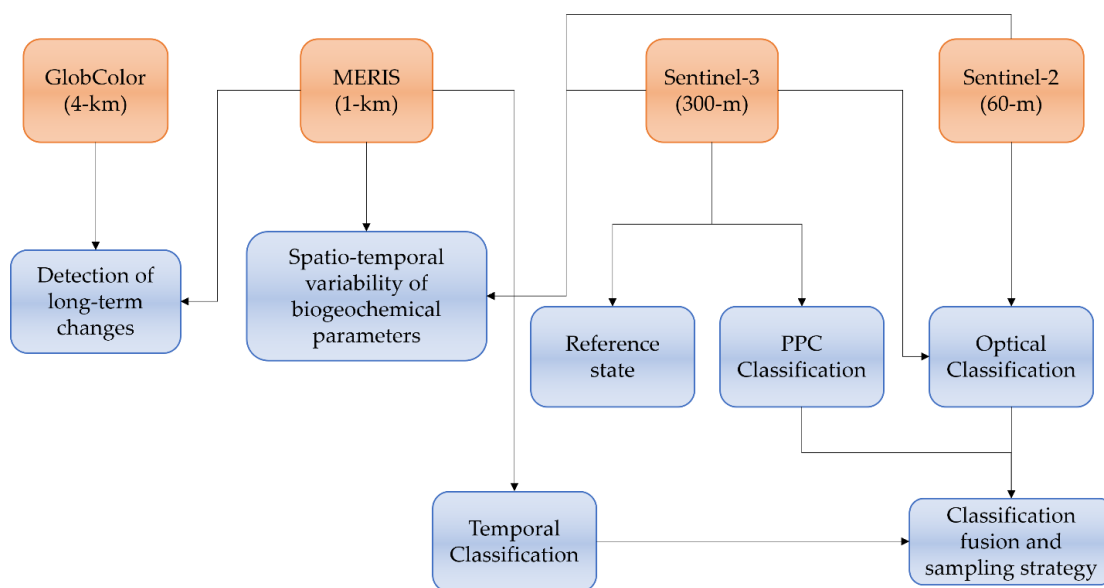


Figure 1.1. Organigramme de l'utilisation des archives satellitaires.

Table 1.1. Description de 4 produits satellitaires incluant Sentinel-2, Sentinel-3, MERIS (GlobCoast), et GlobColour (produit fusionné) utilisés pour le suivi de la variabilité des eaux côtières en Guyane française.

		Sentinel-2		MERIS (GlobCoast)		Sentinel-3	GlobColour (merged)
		2A	2B	8-day	monthly	monthly	monthly
Spatial Resolution	10 m	✓	✓				
	20 m	✓	✓				
	30 m						
	60 m	✓	✓				
	300 m	✓				✓	
	1 km			✓	✓		
	4 km						✓
Visible Wavelengths (nm)	412			✓	✓	✓	✓
	443	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	490	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	510			✓	✓	✓	✓
	560	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	665	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Revisit Time	10 days	10 days	Daily		Daily	Daily	
	5 days						
Sensor	MSI		MERIS		OLCI	Merged	
Coverage	13 tiles		French Guiana		French Guiana	French Guiana	
Number of images	2331	1705	458	121	80	283	
	4036						
Storage	3.48 TB		4.3 GB	1.14 GB	10.5 GB	413 MB	

1.1. Imagerie à moyenne résolution spatiale

Les images quotidiennes du satellite MERIS (04/2002 - 04/2012) à résolution spatiale réduite ($1 \times 1 \text{ km}^2$ au nadir) couvrant la zone côtière de la Guyane française ont été fusionnées et reprojctées pour générer des données composites mensuelles. Ces données de couleur de l'océan ont été corrigées atmosphériquement dans le cadre du projet GlobCoast (11/2012 - 11/2015), financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) avec différents paramètres de couleur de l'océan disponibles tels que SPM, Chlorophylle-a, CDOM, DOC, KD (coefficient d'atténuation diffuse) et la rétrodiffusion des particules (BBP). La description des données GlobCoast peut être consultée à l'adresse <https://archimer.ifremer.fr/doc/00357/46823/> (Loisel et al., 2017 ; M. D. Tran et al., 2023).

Le projet GlobColour a débuté en 2005 en tant que projet Élément Utilisateur de Données (DUE) de l'ESA afin de fournir un ensemble continu de données de produits L3 Ocean Colour fusionnés. Depuis mai 2015, ces produits contribuent également au Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). Les données GlobColour (<http://globcolour.info>) utilisées dans ce travail ont été développées, validées et distribuées par ACRI-ST, France. Ces archives satellitaires ont été consultées en format mensuel avec une résolution spatiale de 4 km pour la période allant de 09/1997 à 03/2021.

Les produits mensuels de réflectance Sentinel-3/OLCI ont été téléchargés à partir du stockage de données CMEMS (<https://marine.copernicus.eu/>). Des zooms sur les eaux côtières de la Guyane ont été extraites de ces données. Ces archives satellitaires ont été corrigées atmosphériquement par la chaîne de traitement d'EUMETSAT (Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques) qui met en œuvre les schémas de correction atmosphérique BAC (Baseline Atmospheric Correction) et C2RCC (Case-2 Regional CoastColour) pour les eaux claires (Cas-1) et les eaux optiquement complexes (Cas-2), respectivement.

1.2. Imagerie à haute résolution spatiale

L'instrument multispectral (MSI) à bord des satellites Sentinel-2 capture des images optiques à haute résolution dans une large gamme de bandes spectrales. Les satellites Sentinel-2 sont constitués de deux unités identiques, Sentinel-2A et Sentinel-2B, qui fonctionnent simultanément afin de garantir des temps de revisite fréquents et une couverture mondiale complète. Les images Sentinel-2/MSI de niveau 1C ont été collectées par la Plateforme d'Exploitation des Produits Sentinel (PEPS : <https://peps.cnes.fr/>), une plateforme développée par le CNES avec 13 tuiles couvrant principalement le domaine côtier de la Guyane.

2. Traitement des données de télédétection

2.1. Algorithmes d'inversion pour dériver la concentration des paramètres biogéochimiques

Une procédure de réglage a été appliquée aux algorithmes d'inversion pré-existants afin de déterminer les modèles les plus appropriés pour estimer la concentration des différents paramètres de qualité de l'eau à partir de l'espace. Pour les SPM, la majorité des algorithmes testés donnent généralement d'assez bons résultats. En comparaison avec les modèles Rouge-NIR et Vert-Rouge, les modèles qui ont été construits uniquement en utilisant le canal rouge semblent avoir une récupération plus précise des SPM. L'algorithme de BingHan16 (Han et al., 2016), qui est développé sur la base d'une approche de pondération, a été sélectionné car ce modèle donne l'estimation SPM la plus précise au niveau mondial. La sélection du modèle optimal pour le POC a été induite par l'évaluation de cinq algorithmes empiriques qui estiment la concentration de POC directement à partir de la réflectance $R_{rs}(\lambda)$. Bien que le modèle Le17 soit plus performant que les autres algorithmes, ce modèle n'a pas fourni une estimation satisfaisante du POC dans les images satellites au-dessus des eaux claires, ce qui implique l'inadéquation des mesures *in-situ* appartenant aux eaux au large. La solution pour traiter ce problème est d'effectuer une combinaison de deux modèles adaptés Le17 (Le et al, 2017, appliqué à l'OWT 3) et KienTran19 (Tran et al., 2019, appliqué aux OWTs 1 et 2) en utilisant les probabilités correspondant à chaque groupe de classes comme coefficients de mélange. Différentes approches pour prédire l'aCDOM sur les eaux de Guyane ont été examinées. L'analyse démontre que modèle proposé par Cao et al. (2018) qui a été construit sur la base d'une méthode de régression multivariée est le plus pertinent. Compte tenu des difficultés à estimer précisément la Chl-a pour les eaux de Guyane, une publication portant sur le développement de deux algorithmes d'inversion de la Chl-a (modèles basés sur MUBR et NDCI) a été soumise. Ce travail est également consacré à l'établissement d'un schéma de classification optique pour combiner ces deux modèles ainsi que pour identifier la distribution des OWTs correspondants à l'échelle globale. Les résultats obtenus ont mis en évidence les défis posés par l'estimation de la Chl-a dans les eaux ultra turbides et ont souligné l'intérêt d'utiliser des données hyperspectrales pour obtenir des informations sur la biomasse du phytoplancton dans des environnements aussi complexes sur le plan optique.

2.2. Validation du match-up

Le matchup a été réalisé en utilisant le jeu de données in situ mesuré dans les eaux côtières de la Guyane française afin de valider la précision des modèles bio-optiques adaptés à la région. L'algorithme d'inversion correspondant à chaque paramètre considéré a été appliqué au $Rrs(\lambda)$ extrait à différentes longueurs d'onde des capteurs Sentinel-3/OLCI et Sentinel-2/MSI. Dans cet exercice, la méthode de correction atmosphérique POLYMER proposée par Steinmetz et al. (2011) a été utilisée pour dériver les produits de niveau 2, car de tels algorithmes de corrections atmosphériques (AC) ont montré leur fiabilité pour récupérer les valeurs de réflectance pour les pixels soumis à la réflexion spéculaire (Steinmetz et al., 2011).

Les performances des algorithmes sélectionnés pour 5 indicateurs de qualité de l'eau correspondant à Sentinel-3/OLCI et Sentinel-2/MSI sont présentées dans les **Figures 2.1 et 2.2**, respectivement. Nous avons constaté que les résultats fournissent une estimation satisfaisante de SPM, comme le confirment un R^2 relativement bon de 0,67 et une excellente pente de 0,86 pour les correspondances OLCI. Ce résultat est cohérent avec l'exercice de comparaison $Rrs(\lambda)$ (non montré) puisque l'algorithme POLYMER est assez performant pour la recherche d'informations dans la bande rouge. Cependant, la sous-estimation de la récupération des particules fines pour le capteur OLCI reflète en fait des biais provenant de $Rrs(665)$ corrigés en fonction de l'atmosphère. Les concentrations des autres variables dérivées du satellite sont inférieures aux résultats concernant les SPM. Cela peut s'expliquer par le fait que les algorithmes d'inversion correspondant à ces paramètres prennent généralement en compte plusieurs bandes dans la région visible, en particulier les bandes bleues, ce qui génère potentiellement des prédictions plus imprécises. Par exemple, l'estimation du POC pour les deux capteurs considérés présente une performance médiocre, mise en évidence par une pente plus faible de 0,29 et 0,28, respectivement.

Cependant, la limitation du nombre de points de données inclus dans notre ensemble de données de comparaison pourrait être inadéquate pour conclure à la performance des modèles bio-optiques sélectionnés ainsi que des algorithmes de correction atmosphérique. En outre, les prédictions des données de télédétection n'ont pas conduit à une forte déviation par rapport à la ligne 1:1 comme on peut le constater dans les deux cas de Sentinel-2 et Sentinel-3, ce qui suggère une solution prometteuse pour combiner les modèles sélectionnés et l'algorithme POLYMER AC pour extraire les informations sur la qualité de l'eau dans le domaine côtier de la Guyane.

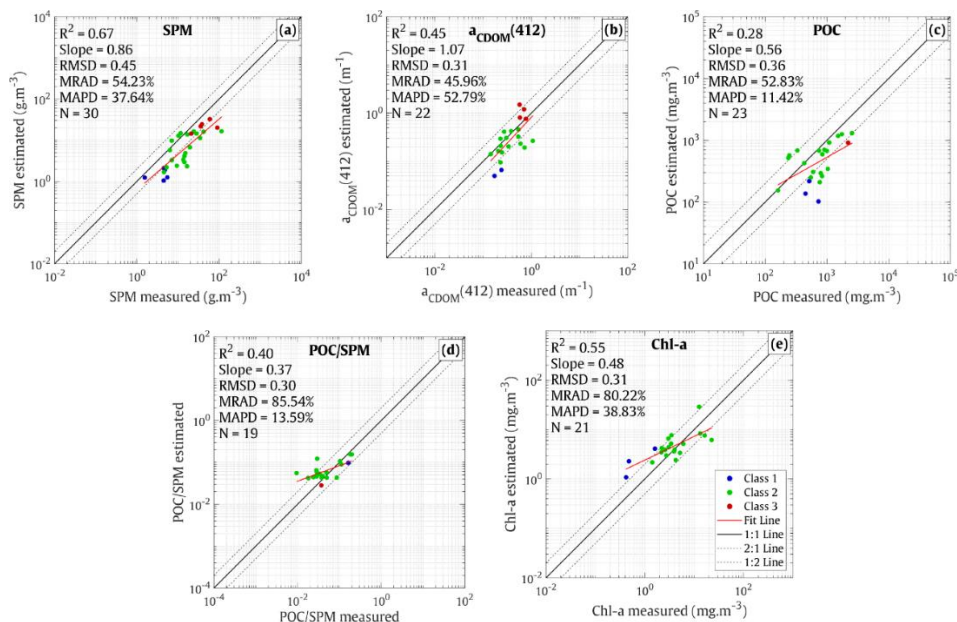


Figure 2.1. Sensibilité des algorithmes sélectionnés pour a) SPM, b) $a_{CDOM}(412)$, c) POC, d) POC/SPM, et Chl-a aux incertitudes dans $Rrs(\lambda)$ avec l'algorithme de correction atmosphérique POLYMER appliqué au capteur Sentinel-3/OLCI.

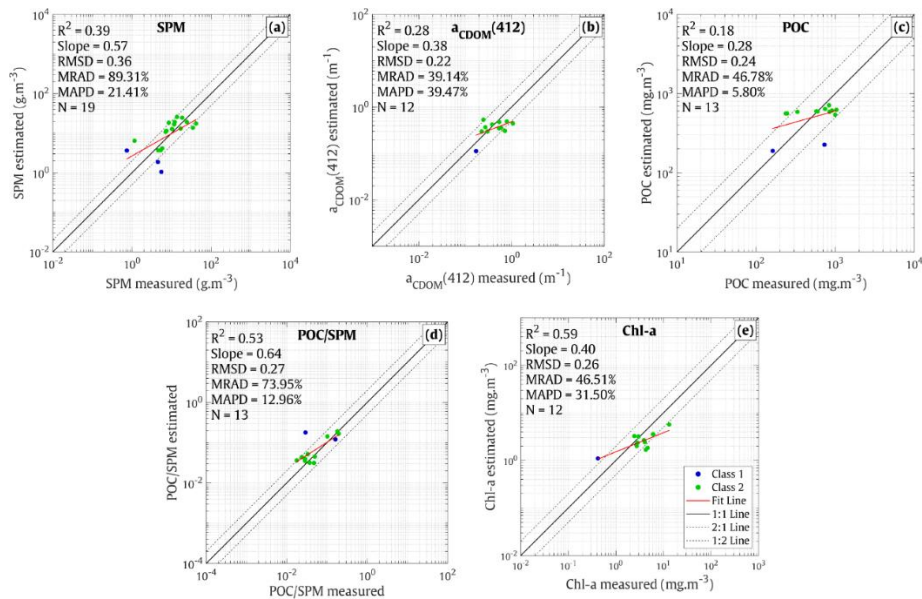


Figure 2.2. Sensibilité des algorithmes sélectionnés pour a) SPM, b) $a_{\text{CDOM}}(412)$, c) POC, d) POC/SPM, et Chl-a aux incertitudes dans $R_{rs}(\lambda)$ avec l'algorithme de correction atmosphérique POLYMER appliqué à Sentinel-2/MSI.

2.3. Description des principaux profils de variabilité spatio-temporelle des paramètres biogéochimiques clés dans le domaine marin de la Guyane française

2.3.1. Processus off-shore

2.3.1.1. Rétroflexion du courant nord-brésilien et extension vers l'ouest des variables biogéochimiques

La cohérence observée dans la variation saisonnière des cinq indicateurs optiques de la qualité de l'eau dans les zones orientales du domaine off-shore guyanais ($\text{Var-S} > 60\%$) souligne le fort impact du flux rétrofléchi par le CNB sur la dynamique biogéochimique des eaux marines de Guyane, transportant non seulement de la matière dissoute mais aussi de la matière particulaire provenant du panache amazonien (**Figure 2.3.a-d**, **Figure 2.4.a-d**). La présence d'une rétroflexion du CNB est mise en évidence par les pics de concentration observés pendant la saison sèche entre juillet et octobre au point A ($6^{\circ}03'25.2''\text{N}$, $51^{\circ}33'39.6''\text{W}$, voir **Figure 2.3**), qui coïncide avec la période et l'étendue maximale vers le nord de la rétroflexion du CNB telle que documentée dans diverses études (Baklouti et al., 2007 ; Hu et al., 2004, Salisbury et al., 2011, Medeiros et al., 2015, Fonseca et al., 2004 ; Garzoli et al., 2004 ; Johns et al., 1990).

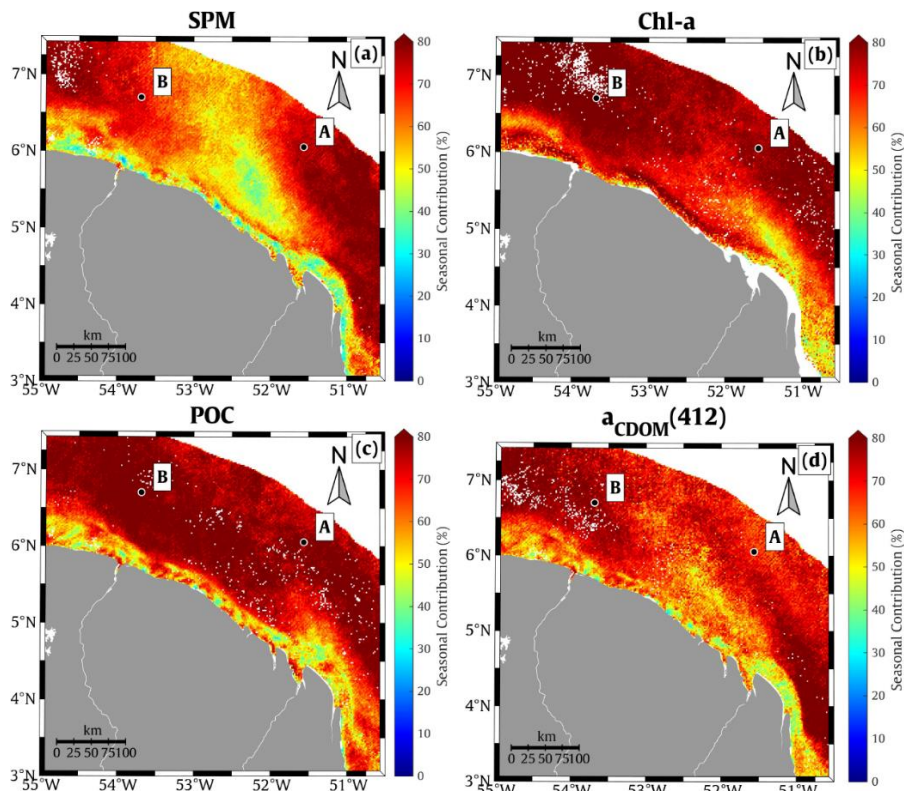


Figure 2.3. Localisation des deux points extraits A et B dans les zones est et ouest caractérisées par une forte fluctuation saisonnière de a) MES, b) Chlorophylle-a, c) POC, et d) $a_{CDOM}(412)$.

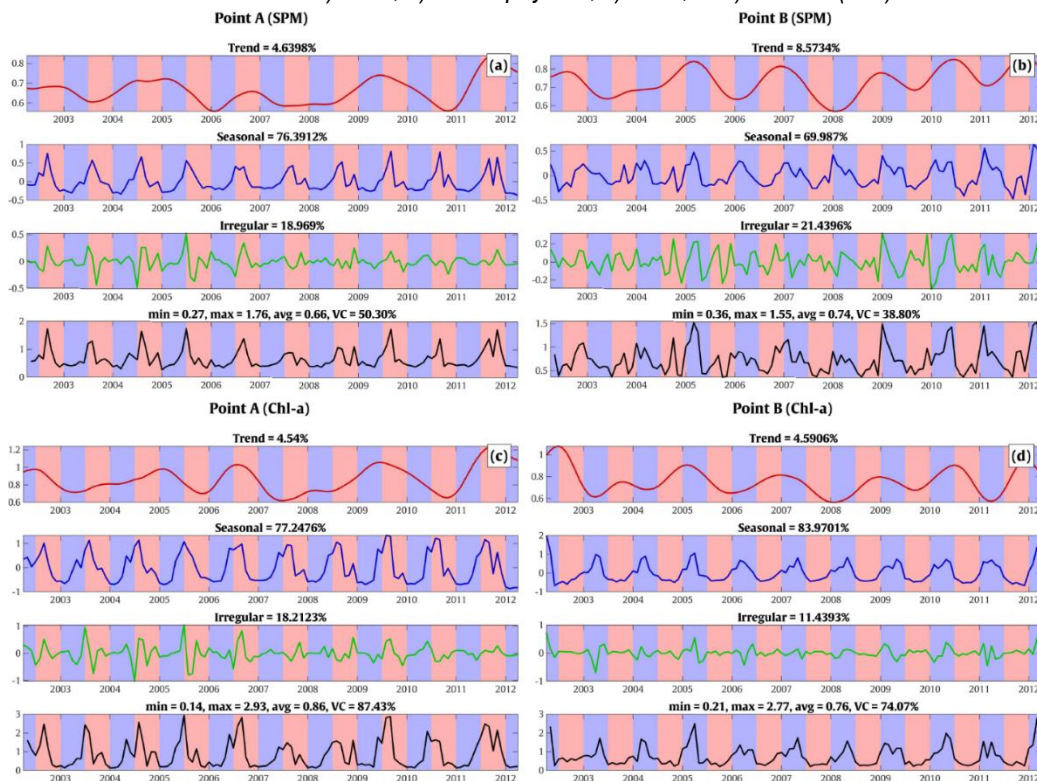


Figure 2.4. Statistiques du terme X-11 calculées pour a-b) MES, c-d) Chlorophylle-a pour les points A et B de la figure 2.3. Les lignes continues rouges, bleues et vertes correspondent aux termes Tendence, Saisonnier et Irrégulier. La ligne continue noire présente la série temporelle originale. Les zones roses et bleues indiquent respectivement les saisons humides et sèches.

Pendant la saison des vents et des pluies, en particulier entre mars et avril, une contribution saisonnière considérable dans la variabilité de tous les paramètres biogéochimiques considérés est observée dans les zones occidentales du domaine offshore de la Guyane française (point B (6°42'18.0 "N, 53°41'06.0 "W), voir la **figure 2.4.a,c**). Cette observation est cohérente avec les résultats obtenus à partir des données MODIS sur 11 ans (2003-2014) dans le cadre des travaux de Lampert et al. (2016) où une expansion de la Chl-a a été identifiée au cours de la même période. Cette caractéristique unique est désignée par la présente comme une "extension au large" des matières dissoutes et particulaires vers les régions occidentales de la zone d'étude. Les valeurs plus faibles du coefficient de variation des substances particulaires et dissoutes dans cette zone d'extension au large indiquent une situation plus stable que celle observée dans la zone de rétroflexion en termes d'amplitudes. En outre, la quantité de charges sédimentaires livrées à cette région semble être liée à des eaux plus froides avec une salinité plus élevée par rapport aux observations dans la zone orientale. Cela pourrait être attribué à l'effet combiné de la bathymétrie (extension au large du plateau continental, figure 1.1) et des changements saisonniers dans la direction des vents et des courants. Une analyse plus approfondie et des programmes de surveillance in situ consacrés aux altérations saisonnières de la masse d'eau et du régime des courants sont nécessaires pour mieux comprendre l'impact de cette caractéristique.

Les cartes de corrélation (**Figure 2.5**) décrivant la co-variation entre les paramètres biogéochimiques considérés et d'autres variables océaniques, y compris la SST et la SSS, permettent de mieux comprendre l'origine du flux rétrofléchi de la NBC. En particulier, la corrélation positive significative entre MES et SST et la corrélation négative entre SPM et SSS dans les régions orientales (latitudes 5°N - 7°N et longitudes 52.5°W - 51°W), implique que la rétroflexion NBC est liée à l'origine de l'eau douce caractérisée par un flux chaud et moins salé. Cette dernière caractéristique s'aligne bien avec les résultats obtenus à partir des stations d'amarrage menées par Baklouti et al. (2007).

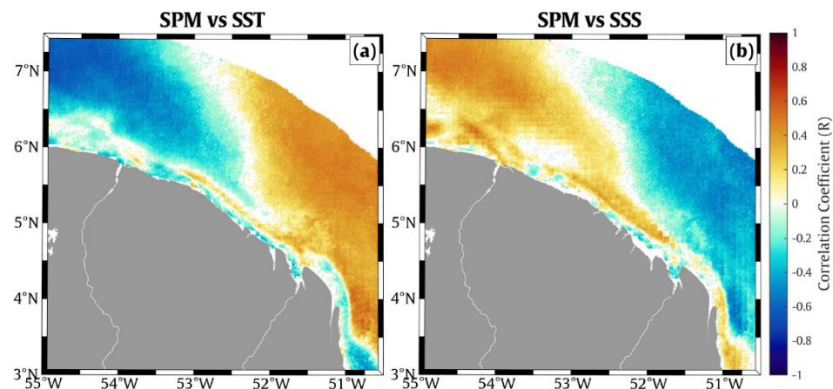


Figure 2.1. Corrélation temporelle entre SPM and **a)** SST and **b)** SSS

2.3.1.2. Anneaux du Courant Nord Brésilien

L'influence des anneaux du CNB sur la variabilité biogéochimique des eaux marines de Guyane peut être illustrée par une configuration irrégulière observée pour les SPM (Figure 2.6). Cette hypothèse est principalement due à la fréquence d'occurrence (intervalle de temps entre les formulations) de ces anneaux anticycloniques qui se détachent de la rétroflexion (i.e. 5 à 6 fois par an). Selon les résultats obtenus par la méthode X-11, les zones irrégulières impliquant la manifestation d'anneaux CNB sont typiquement situées au large, entre la zone de rétroflexion et l'extension occidentale. La présence d'anneaux CBN semble être plus visible avec la variabilité de SPM, et moins prononcée avec celle de Chl-a, POC, et aCDOM (412). Cette dernière caractéristique suggère que le pool organique dans cette région a tendance à être modulé par des facteurs biologiques supplémentaires conduisant à la dominance des modèles saisonniers (c'est-à-dire la floraison du phytoplancton) car une teneur organique et un Chl-a plus élevés ont été trouvés pendant la saison des pluies.

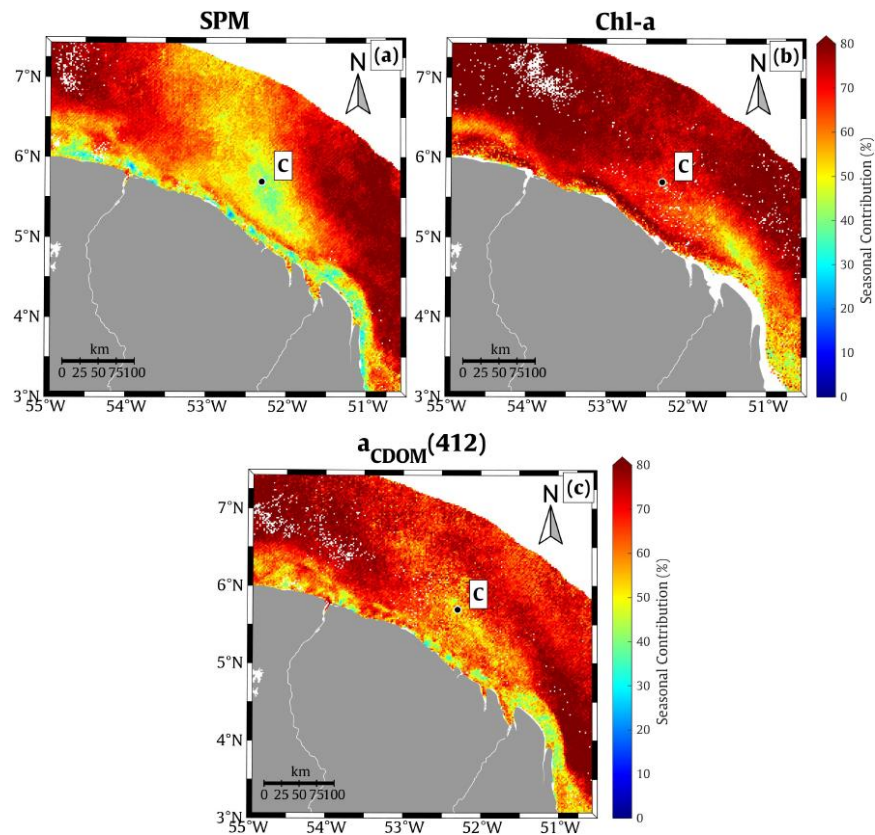


Figure 2.6. Localisation du point C extrait pour le terme saisonnier de a) SPM, b) Chlorophylle-a, et c) aCDOM(412).

2.3.2. Processus Côtiers

2.3.2.1 Influence des bancs de vase

La migration des bancs de vase du Cap Cassiporé au fleuve Orénoque le long de la côte, caractérise le domaine côtier de la Guyane française. Afin de découvrir la dynamique biogéochimique associée aux bancs de vase, les séries temporelles extraites pour le point D (5°16'58.8 "N, 52°41'42.0 "W, **Figure 2.7**) où la variabilité de SPM, POC, et aCDOM(412) est principalement caractérisée par la contribution de la variation interannuelle (tendance-cycle), sont montrées dans la **Figure 2.8**. Cette zone présente un environnement à forte dominance minérale, comme en témoignent les faibles valeurs POC/SPM, qui restent inférieures à 0,08 tout au long de la période d'étude. Les fluctuations saisonnières de la matière particulaire et dissoute ici présentent typiquement une augmentation de janvier à mai, soulignant la contribution significative du processus de remise en suspension en réponse aux vagues énergiques induites par le vent pendant la période venteuse (Eisma et al., 1991 ; Gratiot et al., 2007 ; Vantrepotte et al., 2013).

Les variations de POC et de SPM présentent une forte corrélation dans les zones de bancs de vase, ce qui peut être observé à la fois dans les données *in situ* et satellitaires. Cette dernière caractéristique souligne en outre que ces bancs de vase peuvent contenir un "stock" de matière organique en plus de la fraction inorganique. Cela peut s'expliquer par la présence de matière organique qui pourrait être liée aux exportations des forêts de mangrove qui ont été détruites et envasées pendant les processus de migration des bancs de vase (Aller & Blair, 2006 ; Berlamont et al., 1993 ; Gardel & Gratiot, 2005).

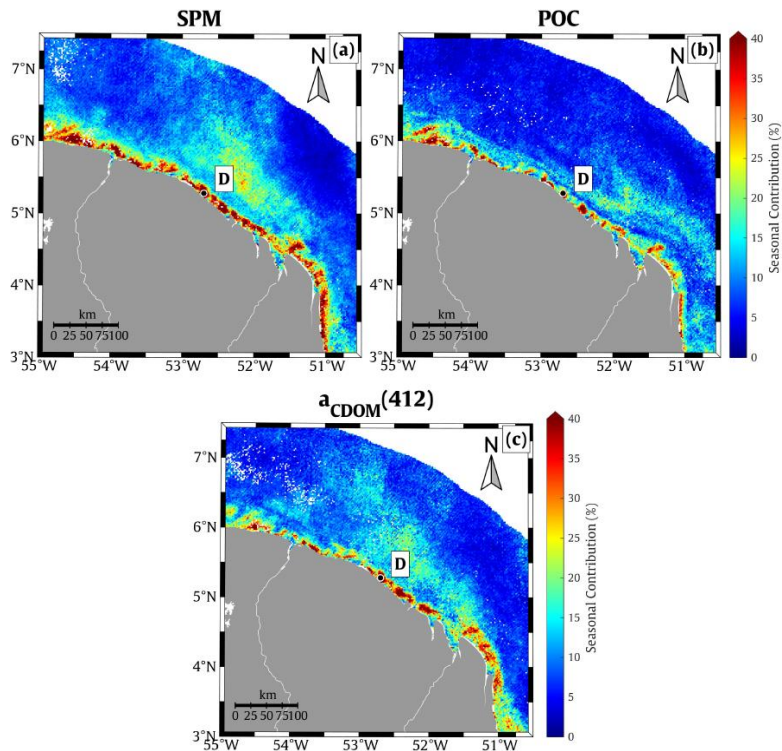


Figure 2.7. Localisation du point D extrait pour le terme de tendance de a) SPM, b) Chlorophylla-a, et c) aCDOM(412).

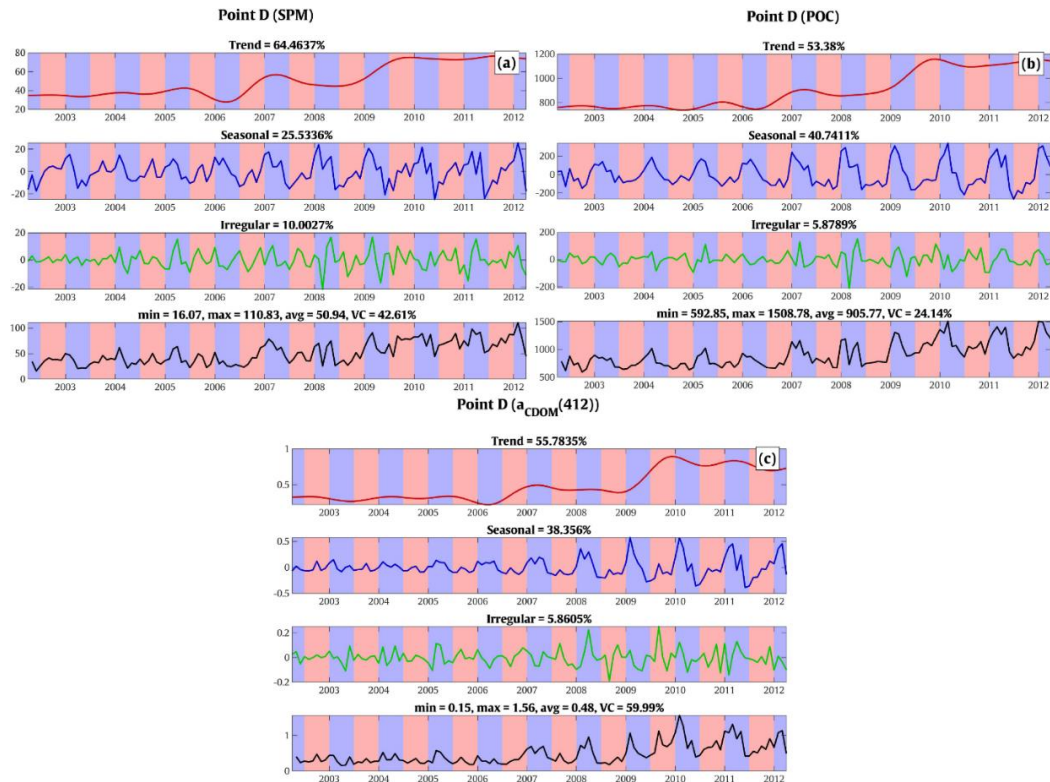


Figure 2.8. Statistiques du terme X-11 calculées pour a) SPM, b) POC, et c) aCDOM(412) pour le point D de la figure 2.7. Les lignes pleines rouges, bleues et vertes correspondent respectivement aux termes Tendance, Saisonnier et Irrégulier. La ligne continue noire présente la série temporelle originale. Les zones roses et bleues indiquent respectivement les saisons humides et sèches.

Une modulation saisonnière de l'excursion du NBC peut être observée au-delà des zones de bancs de vase en direction de la mer par une ceinture de SPM saisonnière passant par le point E (5°10'30.0 "N, 52°23'20.4 "W). Ce schéma saisonnier a montré que les charges sédimentaires transportées vers cette zone étaient plus élevées entre août et octobre, ce qui correspond à un délai d'environ 1 à 2 mois après la période de réflexion (Baklouti et al., 1998 ; Johns et al., 1998). Les concentrations en SPM les plus faibles ont été observées pendant la saison des pluies (en mars) et pouvaient être jusqu'à 8 fois plus élevées pendant la saison sèche (**figure 2.10**). Le facteur conduisant à cette variation annuelle des SPM peut être lié à deux processus possibles. Pendant la réflexion avec une intensité maximale du NBC, celle-ci s'est divisée en deux flux de directions différentes. Une partie du NBC a dévié vers le nord pour rejoindre le flux réfléchi entre les latitudes 5°N - 7°N. La partie restante du NBC continue à se diffuser sur le plateau intérieur, ce qui fournit une quantité importante de charges sédimentaires amazoniennes et implique également une excursion du NBC le long de la côte de la Guyane française avec un délai d'environ un mois (Baklouti et al., 2007 ; Didden & Schott, 1992 ; Fonseca et al., 2004). Une explication alternative est que l'augmentation des précipitations pendant la période humide pourrait conduire à un effet de dilution, entraînant une réduction des charges sédimentaires dans ces régions.

Contrairement aux observations obtenues dans la zone de réflexion, la variabilité temporelle de la biomasse phytoplanctonique à l'intérieur de la ceinture saisonnière mentionnée auparavant présentait un schéma opposé à la fluctuation des SPM. Une contribution significative de la composante saisonnière pour le Chl-a ($\approx 80\%$) présente des pics remarquables pendant la saison des pluies entre février et mars. Les précipitations annuelles et les débits fluviaux locaux pourraient être responsables de la croissance du phytoplancton dans cette zone (Cloern, 1996 ; Harding et al., 2016). D'autre part, un autre processus possible peut être lié au transport de sédiments depuis l'embouchure de l'Amazone, qui est potentiellement induit par des changements dans la direction du vent pendant la saison sèche. Cela pourrait augmenter l'atténuation de la lumière, ce qui entrave directement le développement de la productivité du phytoplancton (Cloern, 1987 ; Dokulil, 1994). Ce résultat est cohérent avec les observations de POC dans les eaux estuariennes locales (le fleuve Sinnamary) menées par Ray et al. (2018), car la source de POC est potentiellement liée au phytoplancton d'eau douce et pourrait être attribuée aux débits des fleuves en saison des pluies.

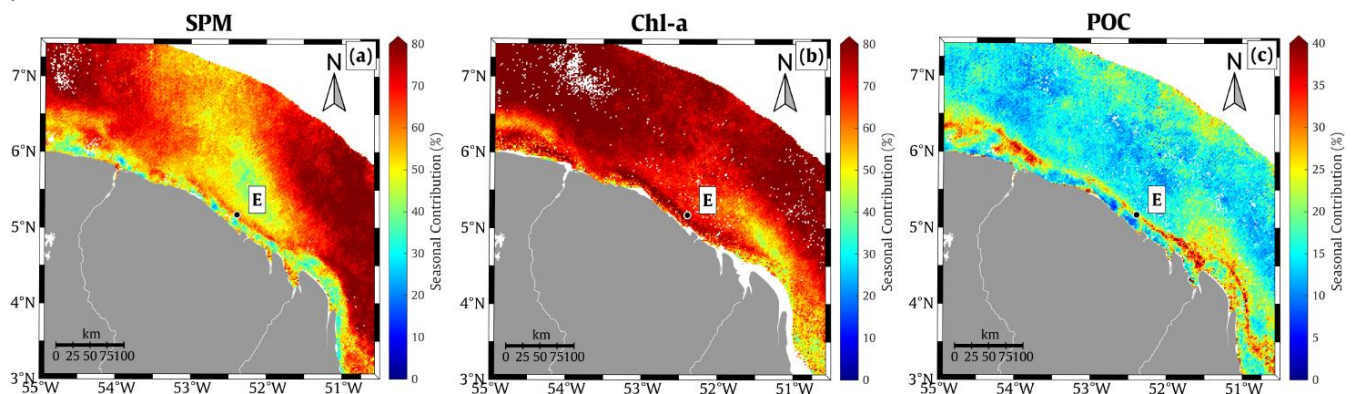


Figure 2.9. Localisation du point E extrait situé à environ 18 km de la côte pour a) la contribution saisonnière de SPM, b) la contribution saisonnière de Chl-a, et c) la contribution irrégulière de POC.

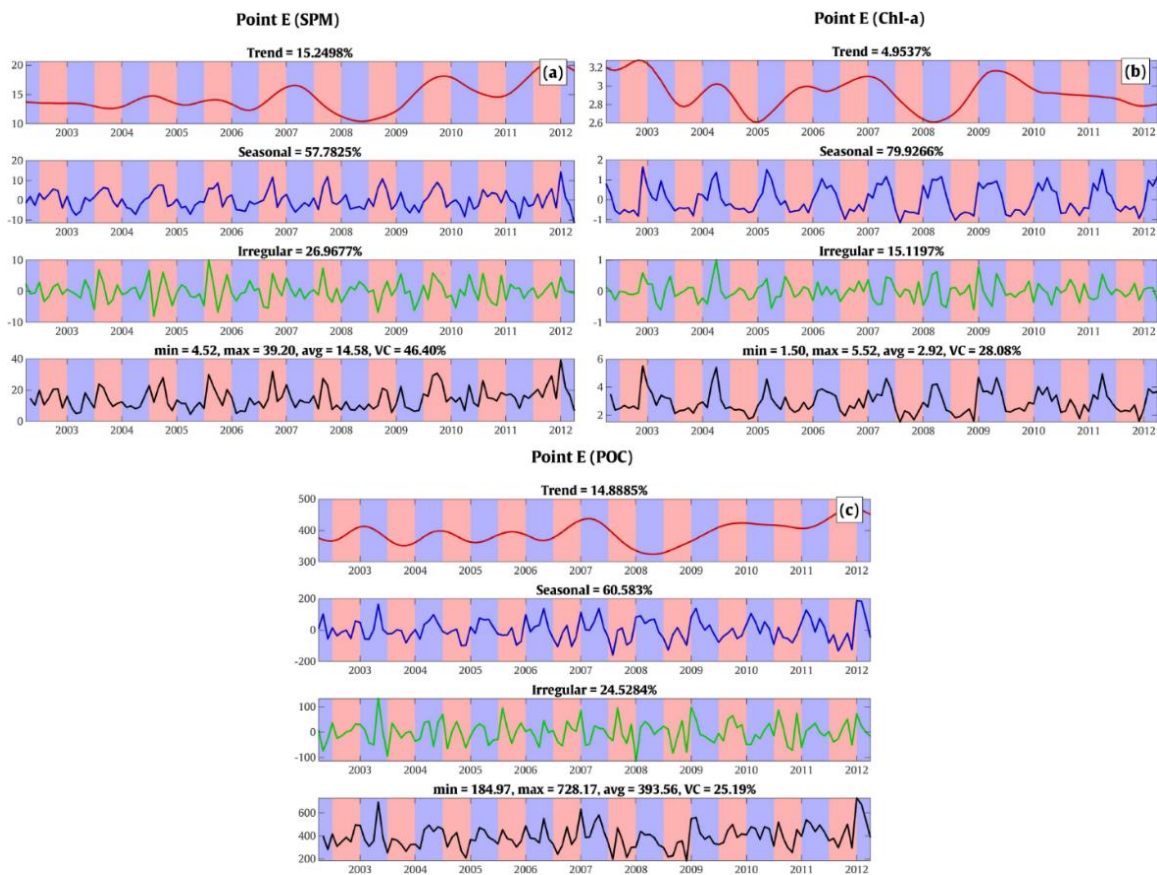


Figure 2.10. Statistiques du terme X-11 calculées pour a) SPM, b) Chl-a, et c) POC pour le point E montré dans la figure 2.9. Les lignes pleines rouges, bleues et vertes correspondent respectivement aux termes Tendence, Saisonnier et Irrégulier. La ligne continue noire présente la série temporelle originale. Les zones roses et bleues indiquent respectivement les saisons humides et sèches.

La dynamique temporelle du POC (**Figure 2.9.c** et **Figure 2.10.c**) est associée à des variations temporelles irrégulières importantes (la variance du signal irrégulier, Var-I, représentant 24 % de celle du signal total). Étant donné que le développement saisonnier du phytoplancton apparaît principalement pendant la saison humide, la présence persistante du POC ici est potentiellement liée à la contribution de sources non vivantes telles que les débris qui pourraient être transportés à partir du panache du fleuve Amazone entre août et octobre (Salisbury et al., 2011). De plus, la concentration organique la plus élevée apparaît généralement pendant la période de fort débit, soulignant l'importance du débit du fleuve et du ruissellement de surface qui introduisent potentiellement plus de matière organique issue de la mangrove (Ray et al., 2018). Les résultats obtenus suggèrent également un pool de POC comparable provenant du fleuve Amazone et des origines locales, ce qui pourrait conduire à la variation du volume de la matière organique. De plus, ceci pourrait également être dû à des processus à fine échelle (pompage tidal) montrés comme un moteur important des échanges de carbone organique dans l'estuaire du Sinnamary dominé par la mangrove (Ray et al., 2020) ainsi qu'à des modulations dans les exportations de POC vers l'océan ouvert en termes d'apports d'eaux douces ou des régimes de courants.

2.3.2.2. Fraction organique dans les estuaires locaux

Les archives Sentinel-3/OLCI ont été utilisées pour illustrer l'impact des fleuves locaux de Guyane française (dont l'Oyapock et le Maroni) car la plus grande résolution spatiale de ces capteurs satellitaires permet une vision plus approfondie des régions estuariennes. Ici, nous avons considéré les cartes moyennes de POC/SPM présentées

dans la **Figure 2.11** puisque ce ratio explique la fraction du pool organique par rapport au total des matières en suspension. Dans les régions offshore, les propriétés de l'eau sont principalement liées aux composants organiques avec des valeurs POC/SPM > 0,06 (Gardner et al., 2006 ; Loisel & Morel, 1998 ; Stramski et al., 2008 ; Woźniak et al., 2010). Une extension de la teneur en POC/SPM dans l'embouchure de ces deux fleuves et dans le domaine côtier observée pendant la saison sèche indique clairement une intrusion de matériaux organiques liés au panache de l'Amazonie **Figure 2.11.b,d**. Cela correspond bien aux travaux antérieurs de Gardel et al. (2021), car un apport externe périodique d'eaux salines et de vase a été enregistré d'août à décembre. En revanche, cette "limite inorganique" a tendance à être repoussée vers l'aval pendant la saison humide en raison de l'augmentation du débit de la rivière. Il est intéressant de noter que la valeur POC/SPM semble être plus importante pendant les périodes de fort débit dans les zones en amont des fleuves Maroni et Oiapoque, ce qui suggère une plus grande quantité de matériaux organiques rejetés par les fleuves locaux (**Figure 2.11.a,c**).

La résolution spatiale moyenne des archives Sentinel-3/OLCI a permis une analyse complète de l'impact des rivières locales en Guyane française sur les régions estuariennes, mettant en évidence les fluctuations des matériaux organiques et inorganiques dans ces zones. Les variations saisonnières des valeurs POC/SPM soulignent l'interaction complexe entre le débit des fleuves, l'intrusion du panache de l'Amazonie et la dynamique biogéochimique dans les régions estuariennes.

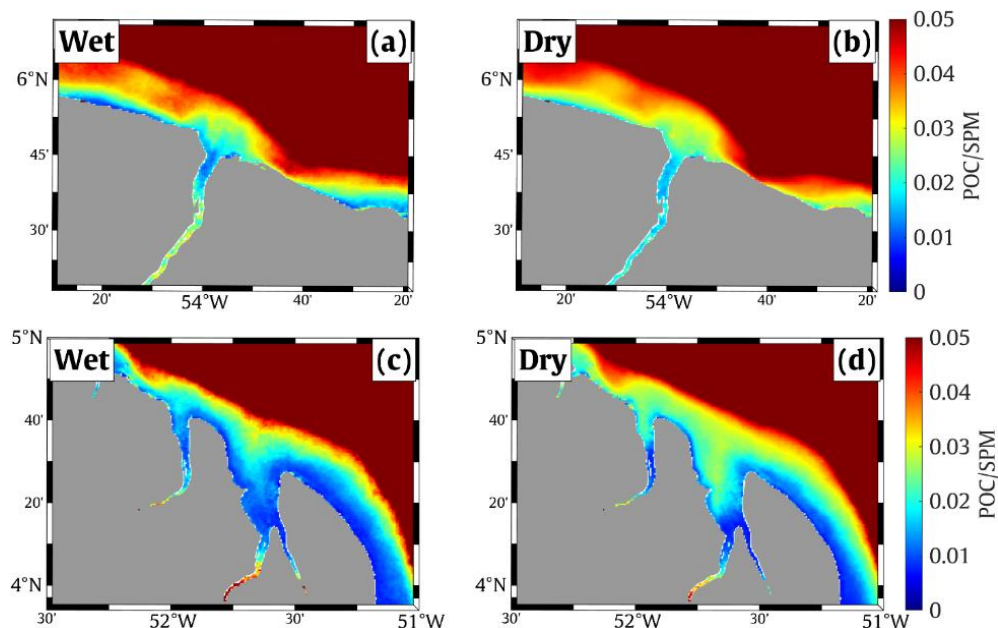


Figure 2.11. Rapport POC/SPM calculé à partir des données Sentinel-3/OLCI pendant les saisons humides et sèches pour a,b) l'estuaire du Maroni et c,d) l'estuaire de l'Oyapock.

2.4. Tendances à long terme

En plus de l'examen des patrons de variabilité spatio-temporelle des paramètres biogéochimiques, des analyses spécifiques ont été réalisées pour détecter la présence de changements significatifs à long terme (test saisonnier de Mann Kendall et estimateur de pente de Sen) dans la qualité biogéochimique des eaux marines de Guyane française. Ceci a été réalisé en pratique sur les archives GlobCoast MERIS (2002-2012) et GlobColour (1997-2021) (**Figure 2.12** et **Figure 2.13**, respectivement).

Les modèles croissants-décroissants sont trouvés pour tous les paramètres dans le domaine ultra-côtier jusqu'à environ 20 km de la côte. Cette caractéristique, soulignée dans des travaux antérieurs (Vantrepotte et al., 2011, 2013 ; Gensac et al., 2016), est associée à la migration des bancs de vase le long de la côte de la Guyane française, affectant les propriétés biogéochimiques de l'ensemble du domaine côtier. Le nombre de ces zones

d'accrétion-érosion adjacentes implique la présence de sept bancs de vase s'étendant sur le plateau de la Guyane française au cours de la période de 10 ans de MERIS. La migration des bancs de vase est illustrée par l'accumulation de matière dissoute et particulaire au cours du temps, par exemple au point D où la contribution du terme de tendance (Var-T) s'est avérée être significativement élevée, jusqu'à 64,5 % pour les SPM (Figure 2.7). Le taux de changement le plus élevé se trouve dans le banc de vase situé entre la rivière Sinnamary et la rivière Kourou avec un taux d'accumulation de vase en forte augmentation jusqu'à 17,97 %/an. Les tendances les plus fortes (> 5%/an en valeur absolue) sont clairement observées pour les SPM mais également pour les CDOM. Ces tendances sont moins prononcées pour le Chl-a et le POC (< 3 %/an en valeur absolue). Outre ces bancs de vase, qui sont liés à des changements interannuels, aucun schéma clair ne peut être mis en évidence sur l'ensemble de la période étudiée. Ce résultat confirme l'impact des bancs de vase comme moteur principal dans le domaine côtier ainsi que l'état vierge de la zone d'étude et les impacts faibles des forçages anthropiques sur les eaux côtières de Guyane française, ce qui est cohérent avec les observations MODIS menées par Gallay et al, (2018).

L'analyse sur 21 ans des données GlobColour (**figure 2.13**) offre une compréhension limitée des détails plus fins (résolution spatiale de 4 km) et est donc conçue pour évaluer les changements qui se produisent dans les eaux moyennement ou faiblement turbides. Lorsque l'on se concentre sur les eaux les plus au large, une tendance à la baisse, faible mais significative, apparaît pour la Chl-a (1 %/an ; **figure 2.13.a**) dans la zone fortement touchée par la rétroflexion du courant NBC. Inversement, une augmentation restreinte du CDOM est également visible dans une zone parcellaire correspondant à la zone de transition entre les eaux côtières et les eaux du large (**figure 2.13.b**).

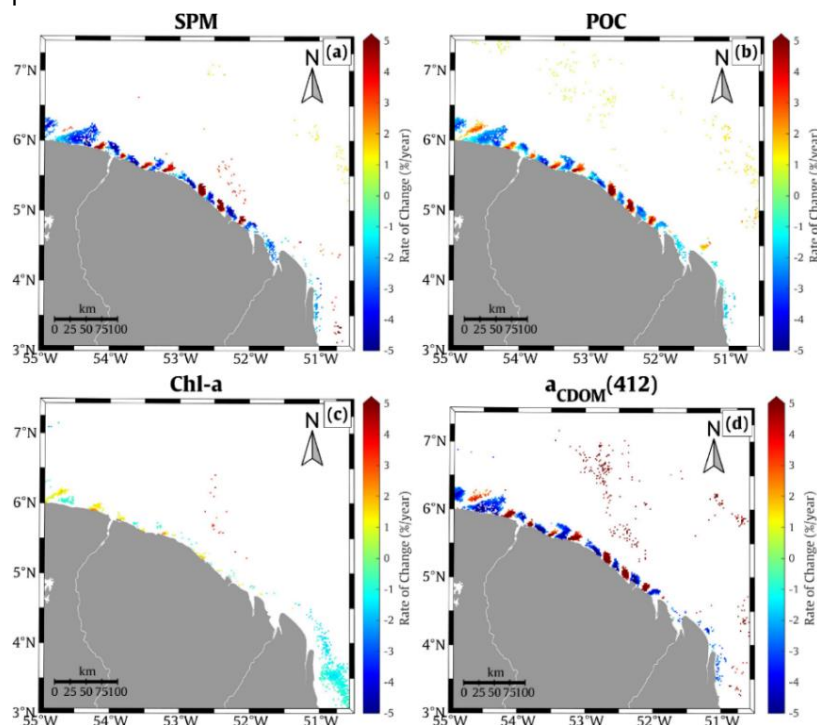


Figure 2.12. Tendence monotone significative en % par an (test saisonnier de Kendall, $p < 0,05$) pour a) SPM, b) POC, c) Chlorophylle-a, et d) $a_{CDOM}(412)$ calculée sur la période MERIS (2002 - 2012). Les zones non significatives sont présentées en blanc

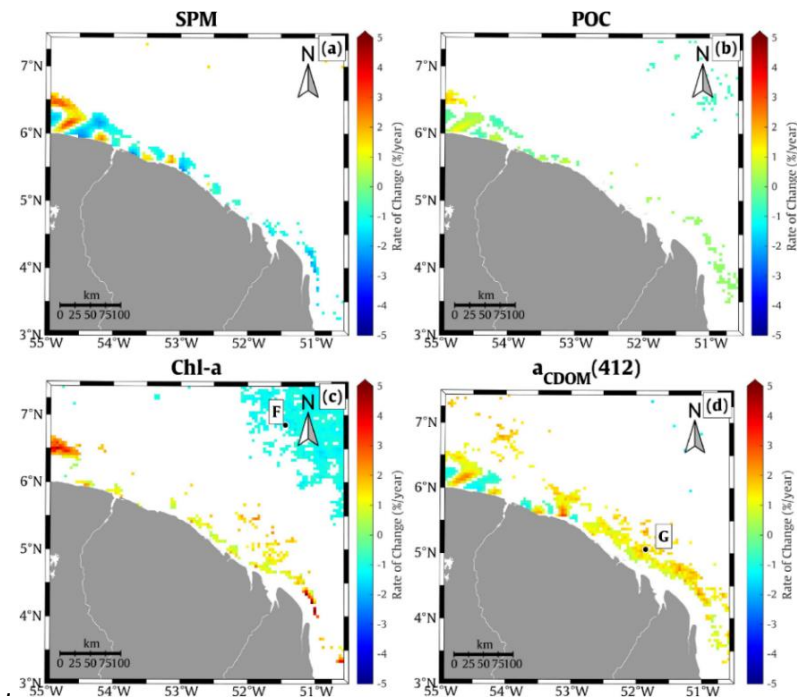


Figure 2.2. Mêmes figures que Figure 2.2 mais avec les données GlobColour (1997 - 2021)

2.5. Proxies pour le suivi des eaux marines de Guyane

Afin d'étudier la redondance entre les différentes variables biogéochimiques, des analyses de co-variation ont été menées en utilisant les archives de couleur de l'océan GlobCoast. Le paramètre SPM qui représente à la fois le contenu organique et inorganique de la masse d'eau est le paramètre sans doute le plus important en termes de contexte de qualité des eaux côtières. De plus, les corrélations dans la variation entre SPM et d'autres paramètres étaient assez différentes sur les 12 années de vie de MERIS **Figure 2.15.a,c**. Comme indiqué ci-dessus, même si elle est considérée comme un paramètre crucial pour la surveillance de la qualité de l'eau, l'estimation de la Chl-a dans la zone d'étude s'est avérée peu fiable car le signal optique de la Chl-a est généralement influencé par des constituants cooccurrents tels que les SPM et le CDOM dans des environnements ultra-turbides (OWT 5, voir la section 3.8). La **Figure 2.14** illustre clairement les limites de l'extraction de la Chl-a dans les environnements optiquement complexes où les pixels correspondant aux eaux ultra-turbides (c'est-à-dire les régions de bancs de vase) ont été masqués. Bien que les valeurs POC/SPM puissent fournir des informations utiles dans ces régions particulières.

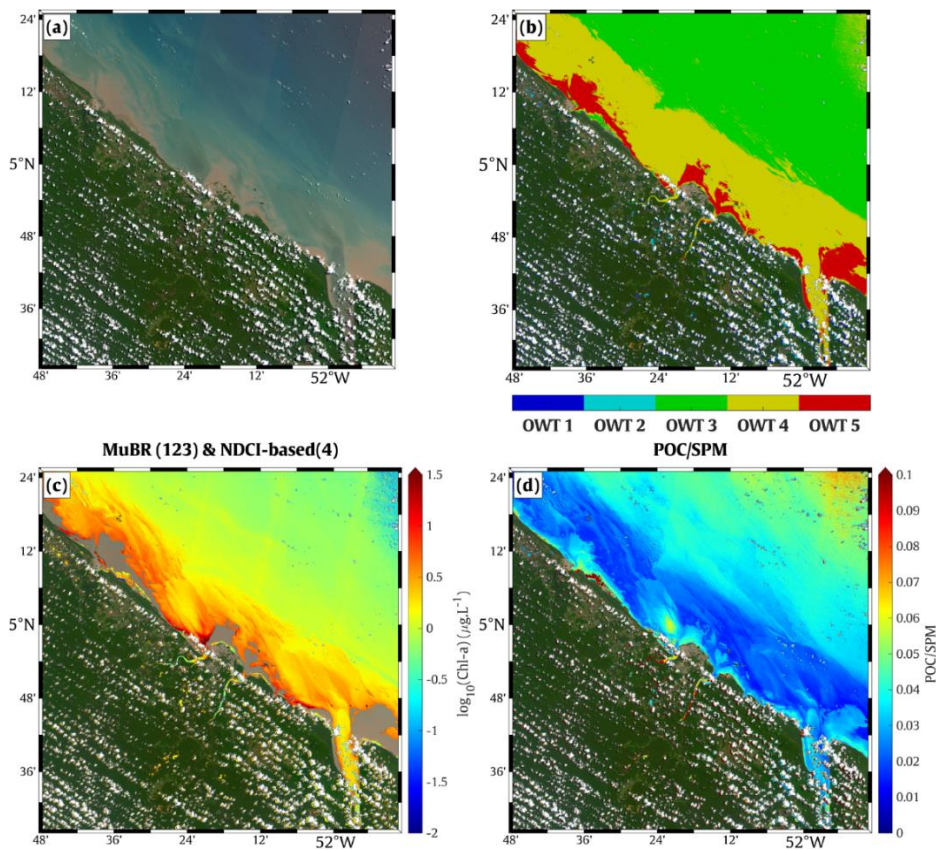


Figure 2.14. Illustration du potentiel du rapport POC/SPM comme indicateur de suivi de la qualité des eaux côtières en Guyane française. a) Image en couleur d'une scène Sentinel-2 sur la zone côtière de Cayenne le 14 août 2020, b) distribution spatiale des 5 OWTs (voir section 3.8) dans lesquels les eaux ultra-turbides (OWT 5) ont été masquées, c) Chlorophylle-a et d) rapport POC/SPM.

En outre, la variation de la biomasse du phytoplancton suit principalement un modèle similaire à celui observé pour le POC, présentant une valeur élevée du coefficient de corrélation de Pearson (R) de $> 0,8$ dans le domaine off-shore **Figure 2.15.b**. Cela peut s'expliquer par le fait que le phytoplancton contribue de manière significative au pool de POC par leur production de matière organique via la photosynthèse en haute mer (Legendre & Rassoulzadegan, 2012 ; Stramski et al., 2008). Par conséquent, la prise en compte simultanée de la Chl-a et du POC peut conduire à une redondance qui augmente potentiellement la complexité des analyses ultérieures. La covariation entre SPM et POC présente une corrélation non significative dans le domaine off-shore, en particulier là où la formulation des anneaux du NBC est présente, ce qui signifie l'importance de ces deux paramètres en termes de dynamique biogéochimique sur la région. Ces résultats reflètent également de manière appropriée la variabilité du POC et des SPM obtenue à partir de l'analyse X-11 (**Figure 2.15.a,d**). En outre, l'examen de covariation déployé sur aCDOM(412) démontre un lien étroit entre le contenu organique dissous et les charges sédimentaires transportées depuis l'embouchure de l'Amazonie. Ceci est marqué par la corrélation positive des variations des SPM et aCDOM(412) trouvées dans différentes régions. En outre, le proxy de la composition particulaire (PPC) a été identifié comme un indicateur approprié pour caractériser la nature de la matière particulaire en suspension (Loisel et al., 2023). Dans cette optique, les rapports POC/SPM ont fait l'objet d'un examen plus approfondi afin d'identifier la variable pertinente à suivre.

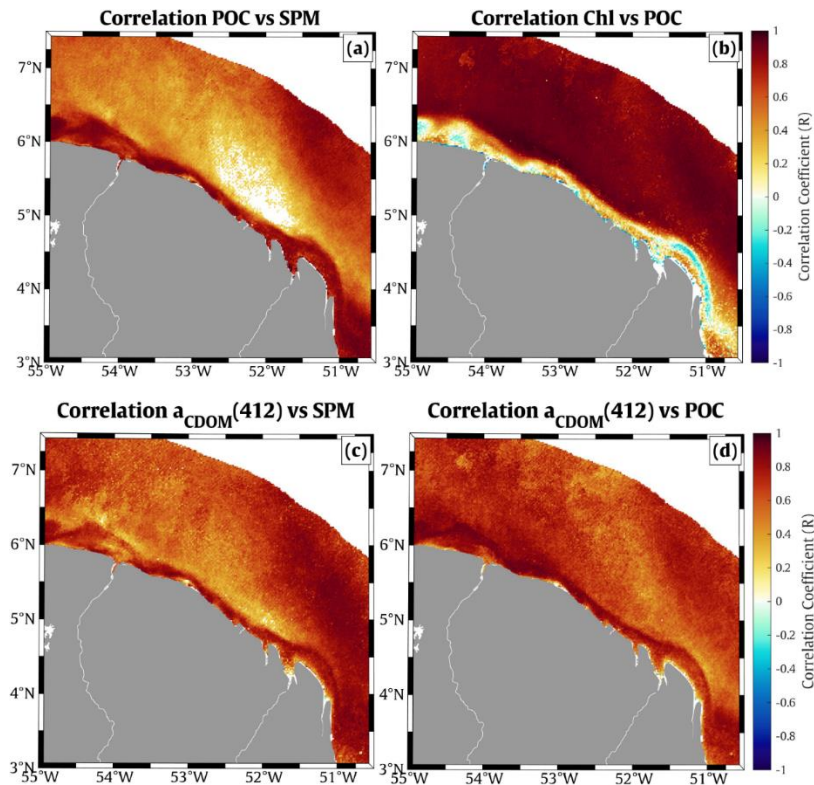


Figure 2.15. Corrélation de Pearson calculée entre a) POC et SPM, b) Chl-a et POC, c) $a_{CDOM}(412)$ et SPM, et d) $a_{CDOM}(412)$ et POC avec $p < 0,05$ pendant la durée de vie de MERIS.

2.6. Répartition des masses d'eau et éclairage sur le suivi de la qualité de l'eau en Guyane française

2.6.1. Classification optique

Les composants biogéochimiques d'une masse d'eau peuvent avoir des effets directs sur ses propriétés optiques, influençant ainsi la façon dont la réflectance de télédétection se comporte en termes de forme et d'ampleur. Par conséquent, les groupes optiques définis sont liés à une gamme de conditions biogéochimiques couvertes par l'ensemble des données actuel. Ces caractéristiques biogéochimiques associées à l'OWT correspondant peuvent être détaillées comme suit :

OWT 1 : L'analyse effectuée sur le présent ensemble de données montre que la réflectance moyenne normalisée de télédétection, $Rrs(\lambda)$, appartenant à OWT 1 est principalement caractérisée par un pic important dans la région bleu-vert, en particulier autour de 490 nm. Ce pic est suivi d'une baisse régulière vers 560 nm, avant une forte diminution dans la région rouge autour de 600 nm. En outre, les statistiques extraites de 16 points de données de cet OWT indiquent que l'OWT 1 présente une concentration de particules en suspension (SPM) relativement plus faible que l'OWT 2 et nettement plus faible que les OWT 3 et 4. En outre, la valeur la plus élevée du rapport POC/SPM (jusqu'à 0,1) enregistrée pour OWT 1 indique une contribution substantielle du contenu organique particulaire. La combinaison de ces caractéristiques associées aux eaux d'OWT-1 (c'est-à-dire la forme spectrale, la plus faible concentration de SPM) confirme que cet OWT est **représentatif des masses d'eau océaniques hauturières**.

OWT 2 : OWT 2, qui représente 43 points de données sur un total de 200 échantillons dans notre ensemble de données, présente une caractéristique unique dans sa forme de réflectance. En particulier, la réflectance moyenne normalisée de cette OWT présente un pic important dans la partie verte du spectre autour de la longueur d'onde de

560 nm. Contrairement aux eaux OWT-1, qui sont caractérisées par un pic remarquable dans la région bleu-vert, les eaux OWT-2 reflètent moins la lumière bleue et affichent une réflectance légèrement plus élevée dans le rouge (**Figure 3.1.a**). Ces différences dans les valeurs de réflectance peuvent être attribuées à des variations dans la composition biogéochimique de l'eau, telles que la présence de matières dissoutes/particulaires et de phytoplancton. Ceci est mis en évidence par une concentration plus élevée de matières particulaires et dissoutes par rapport à OWT 1. De plus, la valeur moyenne du ratio POC/SPM observée pour cet OWT (0,09) se situe entre 0,08 et 0,2 (Loisel et al., 2023), **ce qui indique une situation mixte**.

OWT 3 : Comme pour OWT 2, la valeur de réflectance d'OWT 3 présente également une amplitude significative dans la partie verte du spectre visible. Cependant, nous constatons que l'eau d'OWT-3 présente également des valeurs de réflectance plus élevées dans la partie rouge du spectre, ce qui est typiquement lié à la signature spectrale d'absorption du Chl-a dans les bandes de longueur d'ondes bleues et rouges (Gons et al., 2008). La plus forte concentration de Chl-a, avec un maximum de 48,32 mg.m⁻³ et une moyenne de 8,16 mg.m⁻³, est enregistrée dans l'OWT 3, ce qui souligne davantage le schéma spécifique lié à la contribution d'une biomasse phytoplanctonique relativement élevée dans cet OWT. Ceci peut également être indiqué par les valeurs les plus élevées observées dans les rapports Chl-a/POC et aph/ap (**Figure 3.2**). En outre, les valeurs plus élevées de la concentration de SPM et la valeur plus faible du rapport POC/SPM (0,05) par rapport à OWT 1 et OWT 2 impliquent une contribution relativement élevée de matériaux inorganiques dans la masse d'eau. Par conséquent, l'eau d'OWT-3 sert d'exemple illustratif de l'implication de différents composants biogéochimiques, correspondant à des **eaux dominées par les minéraux avec une dominance de la population de phytoplancton**.

OWT 4 : La forme moyenne de la réflectance de l'eau OWT-4 semble présenter des pics importants dans le domaine rouge, en particulier entre 590 nm et 665 nm. En revanche, l'amplitude de $R_{rs}(\lambda)$ normalisé est nettement moins prononcée dans la région bleue du spectre. Cette caractéristique implique que OWT 4 est un bon exemple des eaux très turbides du cas 2, qui est représentatif d'un environnement optiquement complexe. En effet, le niveau élevé de turbidité dans ce type d'eau est confirmé par la plus forte concentration de SPM in situ mesurée parmi les 4 OWTs dans une gamme de $155,88 \pm 278,42$ g.m⁻³. La faible valeur de la moyenne POC/SPM (0,03) indique une **proportion significative de particules minérales par rapport à la fraction organique** pour cet OWT.

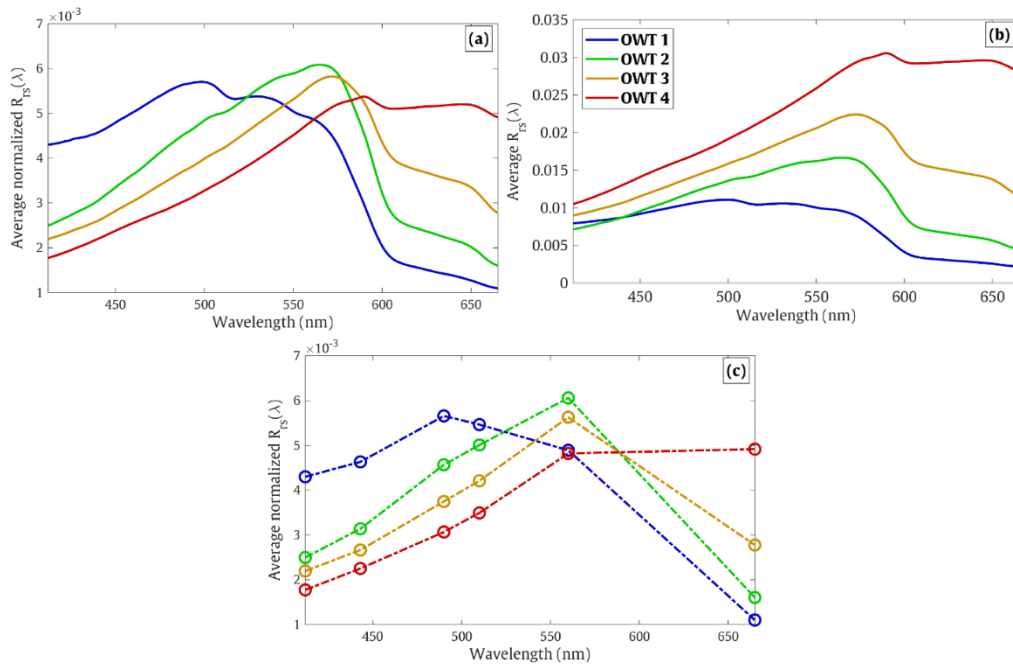


Figure 3.1. Spectres de réflectance moyens dérivés de la classification hiérarchique de Ward appliquée a) à la réflectance normalisée (OWTs 1, 2, 3 et 4) et b) à la réflectance brute $R_{rs}(\lambda)$. c) Spectres de réflectance normalisés moyens rééchantillonnés sur les bandes MERIS

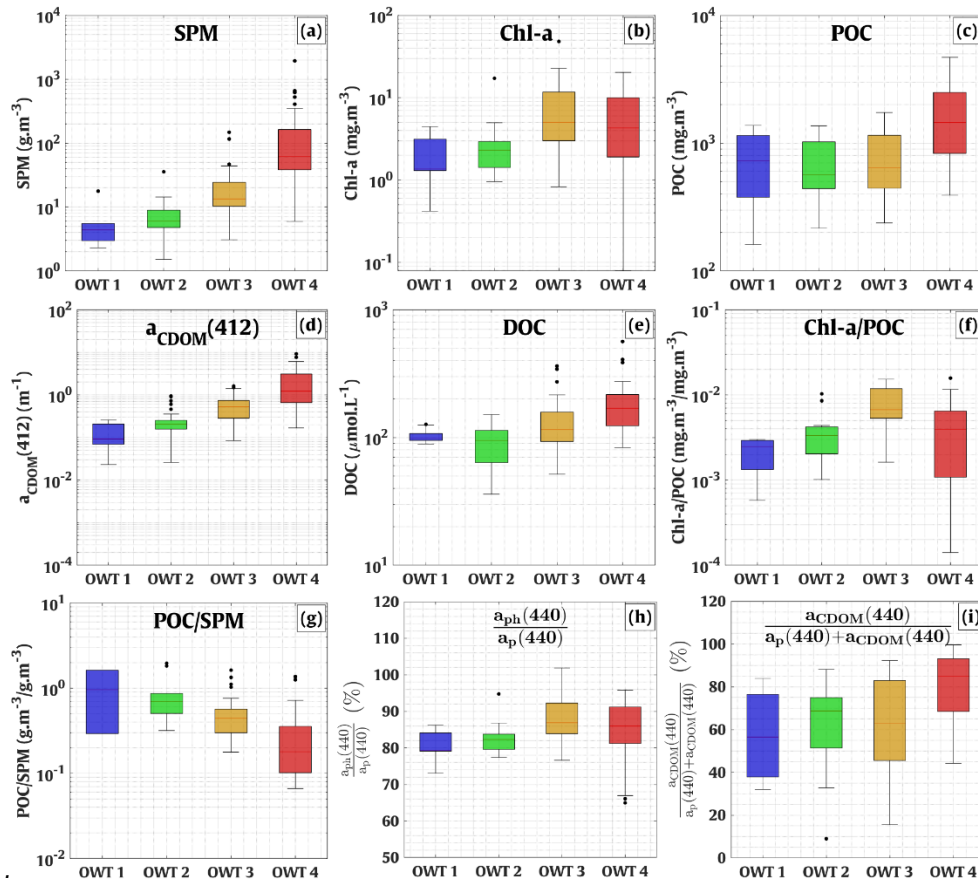


Figure 3.2. Diagrammes en boîte de a) SPM, b) Chl-a, c) POC, d) $a_{CDOM}(412)$, e) DOC, f) Chl-a/POC, g) POC/SPM, h) $\frac{a_{ph}(440)}{a_p(440)}$, et i) $\frac{a_{CDOM}(440)}{a_p(440) + a_{CDOM}(440)}$.

La Figure 3.3. décrit la distribution spatiale de l'OWT la plus fréquente calculée pour chaque pixel. Comme indiqué dans la section précédente, le niveau de turbidité d'une masse d'eau augmente de OWT 1 à OWT 4, ce qui explique les différents niveaux d'influence terrestre sur les masses d'eau. Par exemple, les eaux les plus turbides (OWT 4) ont été fréquemment détectées sur le plateau intérieur où la dynamique biogéochimique est dominée par la migration des bancs de vase. Par ailleurs, OWT 1, qui a été identifiée comme une illustration standard des eaux claires, est logiquement apparue plus loin dans les régions du large. Ces observations présentent une délimitation bien distincte des masses d'eau et sont en bon accord avec les résultats de classification optique réalisés par Mélin & Vantrepotte, (2015) ; Vantrepotte et al., (2012). Il est intéressant de noter que les environnements présentant un degré élevé de biomasse phytoplanctonique (OWT 3) avec un Chl-a pouvant atteindre $48,3 \text{ mg.m}^{-3}$ ont été trouvés adjacents aux zones proches des bancs de vase vers la direction du large. OWT 2, qui présente des eaux à dominante organique selon le seuil des valeurs POC/SPM ($> 0,02$) récemment proposé par Loisel et al. (2023), a été observée comme étant située entre OWT 1 et OWT 3. La dispersion spatiale des OWT sur les eaux côtières de Guyane fournit des indications précieuses sur les caractéristiques biogéochimiques des masses d'eau qui permettent de mieux comprendre les différents environnements aquatiques coexistant dans la région.

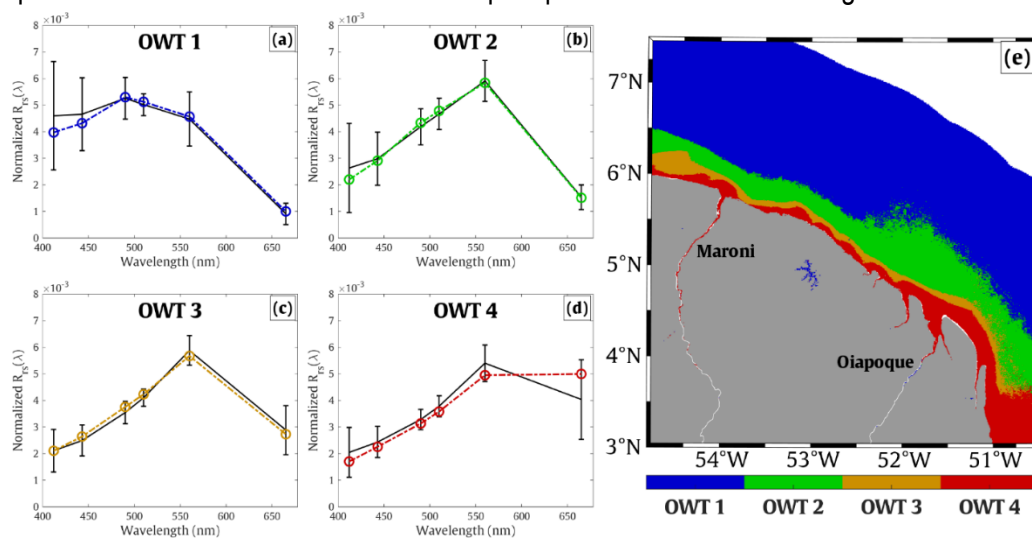


Figure 3.3. La moyenne des $R_{rs}(\lambda)$ normalisées pour a) OWT 1, b) OWT 2, c) OWT 3, et d) OWT 4 où la ligne continue représente les spectres moyens pendant la période Sentinel-3 (04/2016-11/2022) et la ligne en pointillé correspond aux spectres dégradés in-situ (voir Figure 3.1.d) ; e) distribution la plus fréquente des OWT (OWT dominante) sur les eaux côtières de Guyane française.

2.6.2. Classification POC/SPM

Compte tenu de l'importance du rapport POC/SPM dans l'évaluation de la variabilité biogéochimique dans la section 4.5, cette étude utilise les seuils proposés par Loisel et al., 2023 pour les eaux côtières. Ainsi, le rapport POC/SPM sert d'indicateur pour catégoriser les masses d'eau en eaux à dominance organique, mixte et minérale. En conséquence, les nouvelles valeurs seuils de 0,08 et 0,2 ont été appliquées aux moyennes mensuelles des produits de niveau 4 du capteur Sentinel-3/OLCI.

La variation mensuelle des valeurs de POC/SPM en se concentrant sur les 4 OWTs définis est présentée dans la **figure 3.4**. La plupart des eaux du large, OWT 1, présentent une faible amplitude dans les fluctuations POC/SPM, qui varient dans une gamme supérieure à 0,2, indiquant un environnement dominé par les matières organiques. En outre, l'altération des fractions organiques en suspension pour OWT 2 implique une situation mixte puisque la variation POC/SPM apparaît fréquemment entre 0,08 et 0,2. Cette constatation correspond aux caractéristiques biogéochimiques associées à l'OWT 2, comme indiqué dans la section 5.2. Une forte contribution

des matières minérales à l'assemblage particulaire a été trouvée pour les eaux OWT-3 et OWT-4, qui sont représentatives des eaux littorales. Globalement, l'évolution des composants particulaires de la dominance des particules minérales à la dominance des particules organiques dans les masses d'eau de l'écosystème marin de Guyane est relativement bien décrite par la classification optique.

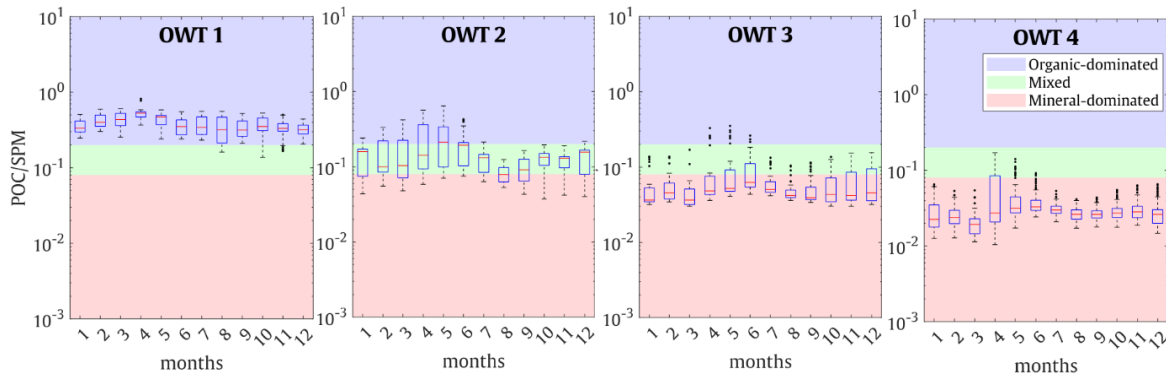


Figure 3.4. Variation annuelle moyenne du rapport POC/SPM en fonction des différents types d'eau optique.

2.6.3. Classification temporelle

Comme indiqué dans la section 2.5, le ratio POC/SPM s'est avéré être un paramètre pertinent pour le suivi de la qualité des eaux côtières en Guyane française puisque sa variabilité rend relativement bien compte des processus hydrodynamiques agissant sur l'écosystème côtier de la zone d'étude. L'importance de ce paramètre est également soulignée par le fait que les variations de POC et de SPM présentent des redondances spatiales moindres (**Figure 2.15**). Par conséquent, pour obtenir une partition temporelle complète des masses d'eau, les séries de cartes POC/SPM dérivées du capteur MERIS ont été classées en utilisant l'approche du réseau neuronal SOM. Ces données satellitaires ont été considérées comme l'entrée de cette méthode de regroupement temporel car elles offrent une couverture temporelle plus large que les données Sentinel-2 et Sentinel-3. En pratique, chaque série temporelle POC/SPM du pixel correspondant a d'abord été traitée en comblant les lacunes, puis normalisée selon la procédure décrite dans Suominen (2018).

Les résultats de ce système de classification sont illustrés à la **Figure 3.6**, où chaque série temporelle d'un pixel donné a été assignée à un groupe représentant un modèle temporel spécifique de valeurs POC/SPM au cours de la période MERIS. La variation POC/SPM pour ces 4 clusters est décrite plus en détail dans la **Figure 3.7** en tenant compte des seuils pour les eaux à dominante minérale, mixte et organique tels que définis dans Loisel et al. (2023). Les caractéristiques temporelles de chaque classe et les processus biogéochimiques associés sont décrits comme suit :

Classe 1 : Situées à proximité du rivage (**Figure 3.6**), les eaux de classe 1 semblent être une région cruciale qui est principalement soumise aux influences terrestres. Comme nous l'avons vu précédemment, cette zone est étroitement liée à la migration des bancs de vase. Cette interface entre les impacts océaniques et locaux présente une forte domination des particules minérales, comme le démontrent les faibles valeurs POC/SPM qui restent constamment inférieures à 0,08. La variabilité du POC/SPM pour cette classe semble être plus prononcée d'avril à juin, ce qui suggère potentiellement une contribution accrue des origines organiques pendant la saison humide. Cependant, la prévalence des substances inorganiques présentes dans la masse d'eau confirme le rôle significatif de la présence des bancs de vase pour ce type d'eau.

Classe 2 : Les pixels de classe 2 sont principalement situés dans la partie ouest du domaine offshore de la Guyane française. La variabilité temporelle de ce type d'eau présente de fortes fluctuations saisonnières dans lesquelles la proportion organique atteint généralement ses pics entre avril et juillet (**Figure 3.7**). Même si la distribution spatiale des eaux de classe 2 est vraisemblablement liée à une extension de la matière dissoute et particulaire

de janvier à juin comme mentionné dans la section 4.3.1.1. La variation des POC/SPM dans les régions de classe 2 tend à être plus stable que dans les autres régions, avec un CV de 26,23 %.

Classe 3 : la majorité des pixels de classe 1 sont situés dans le domaine offshore avec une variation irrégulière relativement élevée de 28,54 % de la variance totale, comme le montrent les augmentations anormales des valeurs POC/SPM. Cela pourrait être lié à la présence d'anneaux du NBC établis dans cette zone, ce qui est en accord avec les résultats obtenus puisque le cycle des anneaux du NBC est lié à des variations sur une période plus courte (c.-à-d. 5-6 fois/an). La variabilité POC/SPM correspondant à cette classe présente un coefficient de variation moyen assez élevé (31,21 %), ce qui implique une amplitude substantielle dans la fluctuation tout au long de la période examinée.

Classe 4 : Contrairement aux eaux de classe 2 dans lesquelles le rapport POC/SPM présente normalement les valeurs les plus élevées d'avril à juillet, les pixels de classe 4 affichent des fractions organiques en suspension constamment plus élevées pendant la saison humide, puis diminuent progressivement jusqu'en novembre. Ce changement temporel indique l'influence de l'Amazonie dans le transport des eaux douces vers cette région particulière à travers la rétroflexion du CNB. La modulation saisonnière du courant des Guyanes durant cette période est également visible et décrite par une extension des pixels de classe 4 parallèlement à la côte. De plus, la valeur moyenne de VC obtenue pour cette classe est plus élevée que pour les autres classes, soulignant une différence substantielle dans les valeurs minimales et maximales de POC/SPM.

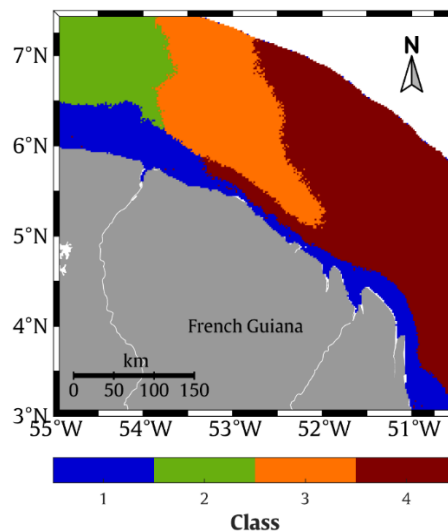


Figure 3.6. Distribution spatiale des 4 classes définies à l'aide du système de classification SOM appliqué aux données MERIS POC/SPM (2016-2022).

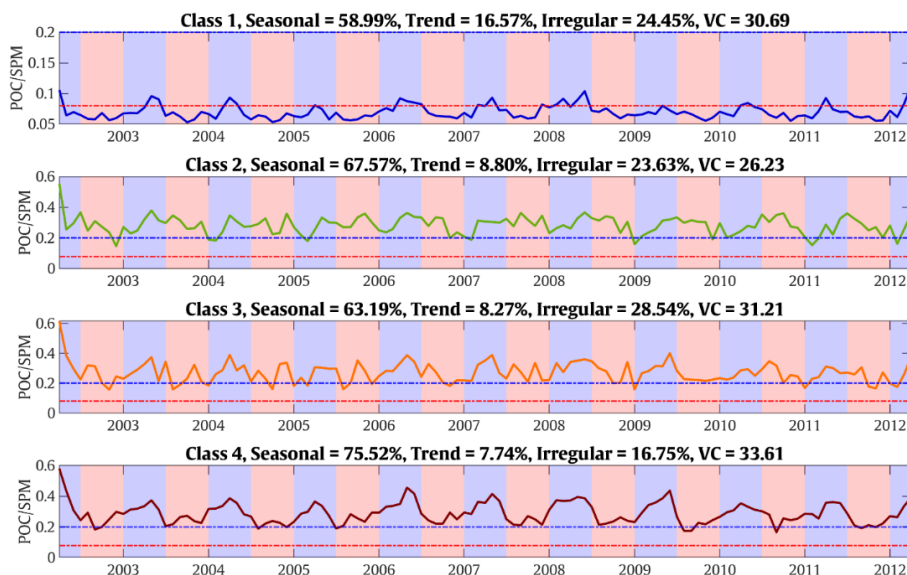


Figure 3.7. Variabilité temporelle du ratio POC/SPM en considérant 4 classes définies à partir de la classification SOM réalisée sur les données MERIS. Les lignes pointillées rouges et bleues représentent les deux seuils de 0,08 et 0,2 suggérés dans Loisel et al. (2023). Les valeurs de la contribution relative des termes de l'analyse Census X-11 sont fournies pour les 4 classes.

2.6.4. Synthèse de la classification et intérêt pour affiner la stratégie de surveillance régionale.

La relation entre les types d'eau définis par les approches de classification optique, temporelle et POC/SPM révèle une cohérence concernant les modèles spatio-temporels de la variabilité biogéochimique dans les eaux marines de Guyane française. En particulier, la gamme de variation climatologique des valeurs POC/SPM pour chaque OWT suggère que les OWT 3 et 4 sont caractérisés comme des environnements à dominance minérale, OWT 2 comme des environnements mixtes, et OWT 1 comme des environnements à dominance organique (**Figure 3.4**). En même temps, les classes 2, 3 et 4 résultant de la classification temporelle représentent principalement des eaux à dominance organique, puisque leurs variations POC/SPM ont été typiquement observées pour atteindre plus de 0,2 pendant la période de temps MERIS. En revanche, la classe 1 correspond à des environnements à dominante minérale, avec une variation POC/SPM généralement inférieure à 0,08 (**Figure 3.7**). **Les schémas de classification explorés dans cette étude démontrent une plus grande robustesse et fournissent des informations plus détaillées sur les attributs biogéochimiques des masses d'eau par rapport aux techniques de classification traditionnelles.**

Par conséquent, en considérant la classification POC/SPM comme un cadre, un résumé des résultats des systèmes de classification optique et temporelle a été proposé en vue de développer une stratégie de surveillance. Plus précisément, les classes 2, 3 et 4 obtenues à partir de la classification temporelle ont été sélectionnées comme descripteur principal dans les eaux du large (eaux à dominante organique), tandis que les OWT 2, 3 et 4 définies à partir de la classification optique ont été considérées comme la délimitation principale dans le domaine côtier (eaux mixtes et à dominante minérale). Cette combinaison de classification est présentée dans la **Figure 3.8** où les eaux marines de la Guyane française ont été divisées en six domaines. En conséquence, 12 stations situées sur différents environnements aquatiques des eaux marines de Guyane ont été proposées avec trois campagnes de terrain qui

peuvent être menées à partir des fleuves Cayenne, Sinnamary et Maroni (**Figure 3.8, Tableau 3.1**). Les stations 4, 8 et 12 sont stratégiquement placées pour suivre l'influence de l'Amazone sur les régions offshore, y compris la réflexion NBC, les anneaux du NBC et l'extension vers l'ouest des variables biogéochimiques. Dans les eaux côtières, les stations 3, 7 et 11, situées dans les régions OWT-2, sont conçues pour observer les changements dans les eaux marines caractérisées par des compositions minérales et organiques. Ceci est particulièrement pertinent à la station 11, où la présence d'eaux mixtes est très prononcée (figure 5.10). Les stations 2, 6 et 10, correspondant aux eaux de l'OWT-3, offrent des indications précieuses sur l'évolution de la biomasse phytoplanctonique dans la région côtière de la Guyane française. De plus, les stations situées dans les pixels OWT-2 et OWT-3 peuvent être utilisées pour suivre les altérations biogéochimiques induites par le courant de Guyane et/ou les rejets d'eau douce des fleuves locaux. Enfin, les stations 1, 5 et 9 peuvent être utiles pour étudier les phénomènes de bancs de vase et les processus hydro-sédimentaires qui leur sont associés. L'application synergique des systèmes de classification mentionnés et du plan d'échantillonnage sert de recommandation pour soutenir efficacement les stratégies et les politiques de gestion côtière en tenant compte des caractéristiques uniques et de la complexité de l'écosystème marin de la Guyane française.

En ce qui concerne le déploiement pratique, il est suggéré que la sector Cayenne (tableau 3.1), y compris les stations 1, 2 et 3, soit prioritaire pour effectuer des mesures in situ en raison de la disponibilité de moyens nautiques accessibles et de l'infrastructure nécessaire à la mise en œuvre des travaux d'échantillonnage. De plus, les altérations biogéochimiques à l'emplacement de ces stations peuvent fournir des informations précieuses sur la manifestation de processus côtiers importants tels que la migration des bancs de vase, l'influence fluviale locale (fleuve Mahury), la modulation marée/vent, l'oscillation de la biomasse phytoplanctonique, la présence d'eaux mixtes et le courant de Guyane.

Tableau 3.1. Informations sur la stratégie d'échantillonnage proposée pour les eaux côtières et les eaux du large, la localisation spatiale des stations étant indiquée à la figure 3.8.

Sector	Station	Location (longitude, latitude)	Description	Water Properties	Domain
Cayenne	1	-52.2425, 4.9307	Mudbanks and local river interface, tide/wind modulation	Mineral- dominated	Coastal
	2	-52.2091, 4.9974	Phytoplankton contribution, Guiana current	Mineral- dominated	Coastal
	3	-52.0869, 5.2696	Mixed water, Guiana current	Mineral- dominated	Coastal
	4	-51.9369, 5.6530	NBC Retroflexion	Organic- dominated	Offshore
Sinnamary	5	-53.0147, 5.4807	Mudbanks and local river interface, tide/wind modulation	Mineral- dominated	Coastal
	6	-52.9647, 5.5252	Phytoplankton contribution, Guiana current	Mineral- dominated	Coastal
	7	-52.9091, 5.6585	Mixed water, Guiana current	Mixed	Coastal
	8	-52.8091, 5.9141	NBC Rings	Organic- dominated	Offshore
Maroni	9	-53.9592, 5.8030	Mudbanks and local river interface, tide/wind modulation	Mineral- dominated	Coastal
	10	-53.9869, 5.9530	Phytoplankton contribution	Mineral- dominated	Coastal
	11	-54.0147, 6.0919	Concentrated mixed water	Mixed	Coastal
	12	-54.0703, 6.3919	Western extension of biogeochemical variables during wet season	Organic- dominated	Offshore

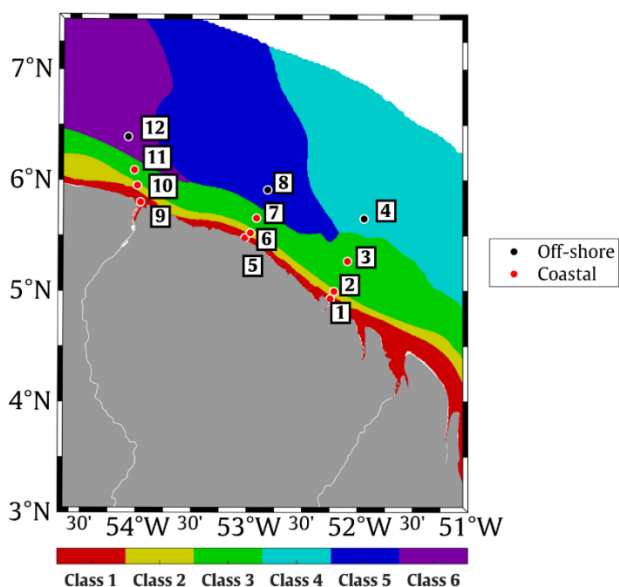


Figure 3.8. Résumé des schémas de classification optique et temporelle, avec les emplacements des stations d'échantillonnage proposés dans cette étude.

Afin de mieux comprendre la dynamique biogéochimique à l'emplacement de la station autonome établie près de l'île Saint-Joseph (Iles du Salut) en 2020, la série temporelle POC/SPM du pixel à cet emplacement a été extraite sur la période de temps des données Sentinel-3. Cependant, en raison de la limitation de la résolution spatiale qui conduit à un pixel masqué, l'emplacement considéré ici a été déplacé de 2 km à l'ouest de la station autonome à 5°16'46.6 "N, 52°36'00.0 "W et est présenté dans la **Figure 3.9.a**. Les propriétés de l'eau dans cette région varient principalement de conditions dominées par les minéraux à des conditions mixtes et présentent une forte oscillation saisonnière dans laquelle les proportions organiques semblent être plus prononcées au début de la période d'écoulement élevé. Ceci est cohérent avec l'analyse précédente indiquée dans la section 5.3 puisque l'OWT le plus fréquent présenté ici est l'OWT 3. Par conséquent, la mise en place de cette station peut fournir des informations utiles sur l'importance de la biomasse phytoplanctonique ainsi que sur les forçages environnementaux associés tels que le courant de Guyane, les échanges organiques provenant des mangroves. Les résultats de cette analyse confirment la pertinence de la mise en place de la station autonome même si sa disparition est due à des problèmes pratiques.

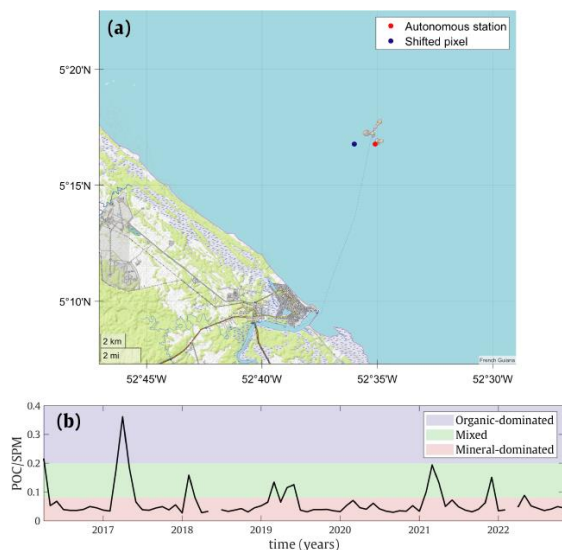


Figure 3.9. a) Emplacements de la station autonome et du pixel décalé et b) Variabilité du POC/SPM extrait pour le pixel décalé sur la période Sentinel-3.

2.7. Définition de l'état de référence et détection des événements exceptionnels

Pour établir un état de référence qui peut être utilisé pour soutenir les programmes de surveillance locaux ainsi que pour détecter les événements exceptionnels, les valeurs annuelles du percentile 90 (P90) ont été extraites statistiquement sur 7 ans (2016-2022) des archives de Sentinel-3 en se concentrant sur différents OWT. Les plages de concentration des paramètres biogéochimiques définies pour l'état de référence sont présentées dans le **tableau 5.2**. Pour mieux comprendre les écarts potentiels par rapport aux conditions normales, l'information d'un événement inhabituel où une pluie exceptionnelle enregistrée en septembre 2021 a été utilisée pour comparer avec la ligne de base définie à partir de la P90 des données Sentinel-3. Le mois de septembre est habituellement le mois le plus sec en Guyane française. Cependant, une pluviométrie excédentaire de 148% a été observée dans le département et la température a été supérieure à la normale de saison sèche (+0,6°C) durant cette période. Il est cependant important de noter que les fourchettes des valeurs de référence définies à partir des données satellitaires dans cet examen peuvent être plus élevées que celles observées avec les données *in situ*, en particulier les eaux OWT-1. Cela peut s'expliquer par le fait que nos mesures *in situ* sont très limitées à la côte, ce qui entraîne un petit nombre de points de données appartenant aux eaux claires (OWT 1). Une autre raison est que l'état de référence a été établi sur la base des valeurs P90 qui sont relativement proches de la limite supérieure de la concentration de chaque variable biogéochimique dérivée du satellite.

Table 2.1. Les valeurs de référence pour chaque OWT considérant différents paramètres définis par les valeurs P90 extraites des archives du satellite Sentinel-3 sur 7 ans (2016-2022).

	Parameters	min	max	mean	median	stdv
OWT 1	SPM (g.m ⁻³)	0.683	0.945	0.811	0.826	0.091
	POC (mg.m ⁻³)	134.860	170.051	153.673	151.903	12.165
	Chl-a (mg.m ⁻³)	0.709	1.269	1.030	1.061	0.209
	a _{CDOM} (412) (m ⁻¹)	0.078	0.179	0.117	0.109	0.034
	POC/SPM	0.474	0.558	0.522	0.523	0.025
OWT 2	SPM (g.m ⁻³)	4.232	5.114	4.716	4.678	0.321
	POC (mg.m ⁻³)	383.663	441.134	409.671	411.100	25.535
	Chl-a (mg.m ⁻³)	2.285	3.064	2.609	2.646	0.275
	a _{CDOM} (412) (m ⁻¹)	0.635	1.702	1.068	0.942	0.389
	POC/SPM	0.143	0.275	0.216	0.231	0.042
OWT 3	SPM (g.m ⁻³)	17.633	20.441	19.385	19.694	1.152
	POC (mg.m ⁻³)	647.551	693.339	673.498	672.933	19.797
	Chl-a (mg.m ⁻³)	4.580	5.362	4.944	4.914	0.297
	a _{CDOM} (412) (m ⁻¹)	0.841	1.210	0.998	0.940	0.144
	POC/SPM	0.056	0.135	0.095	0.090	0.025
OWT 4	SPM (g.m ⁻³)	90.299	207.992	144.327	138.717	48.663
	POC (mg.m ⁻³)	1267.050	1515.118	1388.479	1367.800	89.401
	Chl-a (mg.m ⁻³)	6.758	7.415	7.074	7.087	0.200
	a _{CDOM} (412) (m ⁻¹)	1.799	2.095	1.937	1.919	0.105
	POC/SPM	0.034	0.067	0.046	0.047	0.011

La concentration en SPM (en septembre 2021 dans les eaux très côtières (OWT 4) s'est avérée significativement inférieure à la valeur médiane généralement observée (138,7 g.m⁻³), s'établissant à 41,4 g.m⁻³, alors

que la gamme standard est comprise entre 90,3 et 208 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Ceci pourrait être attribué à la dilution causée par des précipitations excessives associées à de faibles charges sédimentaires apportées par les fleuves de Guyane française. La diminution des matières particulaires (POC et SPM) par rapport à la norme peut également s'expliquer par le fait que le processus de remise en suspension sous l'effet des alizés est moins prononcé en septembre. La pluviométrie plus élevée pourrait également conduire à une augmentation de la biomasse phytoplanctonique entraînée vers le voisinage estuarien, comme en témoigne une concentration plus élevée de Chl-a dans les eaux d'OWT-4 par rapport aux valeurs de référence (Ray et al., 2018). Cependant, les matières organiques dissoutes présentent un écart mineur par rapport aux plages P90, ce qui indique que leur réponse à l'événement a été relativement insignifiante. Il est intéressant de noter que les valeurs POC/SPM sur le plateau continental ont été enregistrées comme étant plus élevées que l'état normal en ce qui concerne tous les OWT.

Les changements de concentration des variables biogéochimiques en présence d'événements exceptionnels ne sont pas clairs, à l'exception d'une dilution de la SPM observée dans les eaux d'OWT-4. Par ailleurs, les valeurs POC/SPM démontrent une réponse substantielle aux précipitations extrêmes pour tous les OWT. Ce résultat confirme la fiabilité du rapport POC/SPM en tant que métrique pour la détection d'événements anormaux (i.e., forçages environnementaux ou anthropiques) ainsi que pour le suivi de la qualité des eaux côtières en Guyane française.

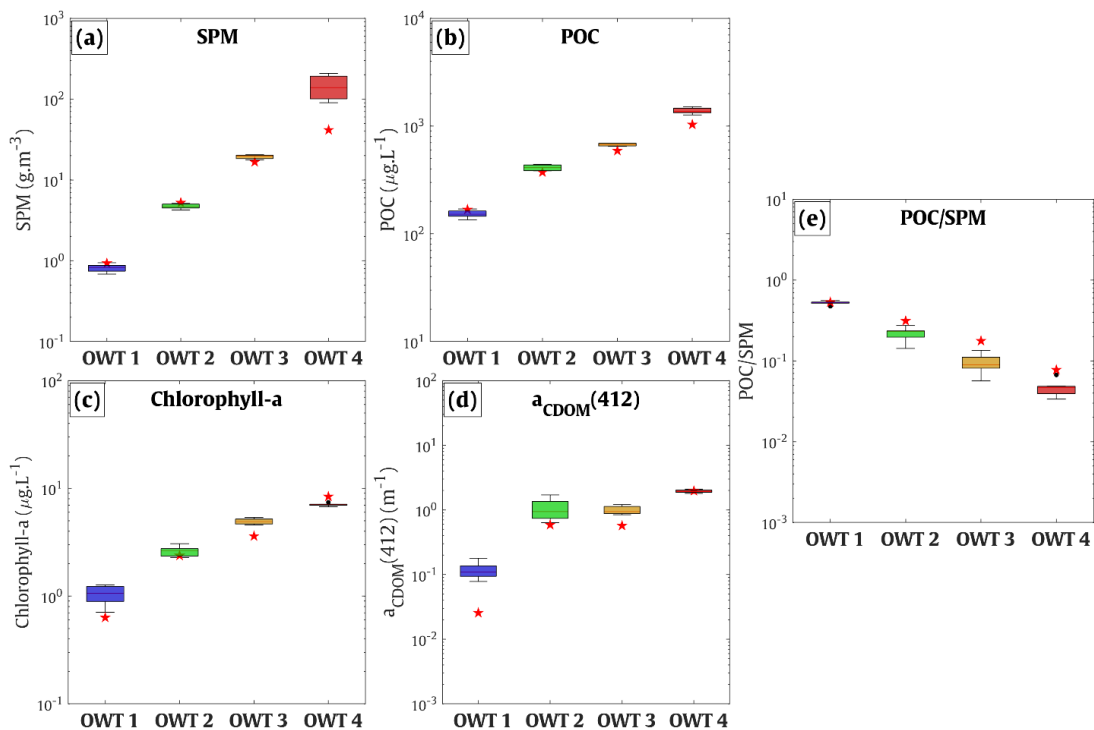


Figure 5.1. Plages de référence de a) SPM, b) POC, c) Chlorophylle-a, d) $a_{\text{CDOM}}(412)$, et e) POC/SPM en considérant 4 OWTs définis dans la section 5.2. Les étoiles rouges correspondent aux concentrations P90 des différents paramètres extraits pour la scène mensuelle de Sentinel-3 en septembre 2021.

REFERENCES

- Abascal-Zorrilla, N., Vantrepotte, V., Huybrechts, N., Ngoc, D. D., Anthony, E. J., & Gardel, A. (2020). Dynamics of the estuarine turbidity maximum zone from landsat-8 data: The case of the maroni river Estuary, French Guiana. *Remote Sensing*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/rs12132173>
- Abascal-Zorrilla, N., Vantrepotte, V., Ngoc, D. D., Huybrechts, N., & Gardel, A. (2019). Automated SWIR based empirical sun glint correction of Landsat 8-OLI data over coastal turbid water. *Optics Express*, 27(8), A294. <https://doi.org/10.1364/oe.27.00a294>
- Akopian, M., & Lampert, L. (2018). *Analysis of the relevance of the current delimitation of the coastal water body of Guyana*.
- Aller, R. C., & Blair, N. E. (2006). Carbon remineralization in the Amazon-Guianas tropical mobile mudbelt: A sedimentary incinerator. *Continental Shelf Research*, 26(17–18), 2241–2259. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.07.016>
- Baklouti, M., Devenon, J. L., Bourret, A., Froidefond, J. M., Ternon, J. F., & Fuda, J. L. (2007). New insights in the French Guiana continental shelf circulation and its relation to the North Brazil Current retroflexion. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(2), 1–18. <https://doi.org/10.1029/2006JC003520>
- Berlamont, J., Ockenden, M., Toorman, E., & Winterwerp, J. (1993). The characterisation of cohesive sediment properties. *Coastal Engineering*, 21(1–3), 105–128. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(93\)90047-C](https://doi.org/10.1016/0378-3839(93)90047-C)
- Betoulle, J. L., Fromard, F., Fabre, A., & Puig, H. (2001). Caractérisation des chutes de litière et des apports au sol en nutriments dans une mangrove de Guyane française. <https://doi.org/10.1139/B00-154>
- Bui, Q. T., Jamet, C., Vantrepotte, V., Mériaux, X., Cauvin, A., & Mognane, M. A. (2022). Evaluation of Sentinel-2/MSI Atmospheric Correction Algorithms over Two Contrasted French Coastal Waters. *Remote Sensing*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/rs14051099>
- Cao, F., Tzortziou, M., Hu, C., Mannino, A., Fichot, C. G., Del Vecchio, R., Najjar, R. G., & Novak, M. (2018). Remote sensing retrievals of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon dynamics in North American estuaries and their margins. *Remote Sensing of Environment*, 205(October 2017), 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.014>
- Chevalier, C., Froidefond, J. M., & Devenon, J. L. (2008). Numerical analysis of the combined action of littoral current, tide and waves on the suspended mud transport and on turbid plumes around French Guiana mudbanks. *Continental Shelf Research*, 28(4–5), 545–560. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.09.011>
- Cloern, J. E. (1987). Turbidity as a control on phytoplankton biomass and productivity in estuaries. *Continental Shelf Research*, 7(11–12). [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(87\)90042-2](https://doi.org/10.1016/0278-4343(87)90042-2)
- Cloern, J. E. (1996). Phytoplankton bloom dynamics in coastal ecosystems: A review with some general lessons from sustained investigation of San Francisco Bay, California. In *Reviews of Geophysics* (Vol. 34, Issue 2). <https://doi.org/10.1029/96RG00986>
- Didden, N., & Schott, F. (1992). Seasonal variations in the western tropical Atlantic: surface circulation from Geosat altimetry and WOCE model results. *Journal of Geophysical Research*, 97(C3), 3529–3541. <https://doi.org/10.1029/91JC02860>
- Dokulil, M. T. (1994). Environmental control of phytoplankton productivity in turbulent turbid systems. *Hydrobiologia*, 289(1–3). <https://doi.org/10.1007/BF00007409>
- Eisma, D., Augustinus, P. G. E. F., & Alexander, C. (1991). RECENT AND SUBRECENT CHANGES IN THE DISPERSAL OF AMAZON MUD. In *Netherlands Journal of Sea Research* (Vol. 28, Issue 3).

- Fonseca, C. A., Goni, G. J., Johns, W. E., & Campos, E. J. D. (2004). Investigation of the North Brazil Current retroflexion and North Equatorial Countercurrent variability. *Geophysical Research Letters*, 31(21). <https://doi.org/10.1029/2004GL020054>
- Fromard, F., Puig, H., Mougou, E., Marty, G., Betoulle, J. L., & Cadamuro, L. (1998). Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: New data from French Guiana. *Oecologia*, 115(1–2), 39–53. <https://doi.org/10.1007/S004420050489/METRICS>
- Gallay, M., Martinez, J. M., Allo, S., Mora, A., Cochonneau, G., Gardel, A., Doudou, J. C., Sarrazin, M., Chow-Toun, F., & Laraque, A. (2018). Impact of land degradation from mining activities on the sediment fluxes in two large rivers of French Guiana. *Land Degradation and Development*, 29(12), 4323–4336. <https://doi.org/10.1002/ldr.3150>
- Gardel, A., Anthony, E. J., F. dos Santos, V., Huybrechts, N., Lesourd, S., Sottolichio, A., Maury, T., & Jolivet, M. (2021). Fluvial sand, Amazon mud, and sediment accommodation in the tropical Maroni River estuary: Controls on the transition from estuary to delta and chenier plain. *Regional Studies in Marine Science*, 41(December 2020), 101548. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101548>
- Gardel, A., & Gratiot, N. (2005). A satellite image-based method for estimating rates of mud bank migration, French Guiana, South America. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 720–728. <https://doi.org/10.2112/03-0100.1>
- Garzoli, S. L., Field, A., Johns, W. E., & Yao, Q. (2004). North Brazil Current retroflexion and transports. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(1). <https://doi.org/10.1029/2003jc001775>
- Gons, H. J., Auer, M. T., & Effler, S. W. (2008). MERIS satellite chlorophyll mapping of oligotrophic and eutrophic waters in the Laurentian Great Lakes. *Remote Sensing of Environment*, 112(11), 4098–4106. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.029>
- Gratiot, N., Gardel, A., & Anthony, E. J. (2007). Trade-wind waves and mud dynamics on the French Guiana coast, South America: Input from ERA-40 wave data and field investigations. *Marine Geology*, 236(1–2), 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.09.013>
- Harding, L. W., Gallegos, C. L., Perry, E. S., Miller, W. D., Adolf, J. E., Mallonee, M. E., & Paerl, H. W. (2016). Long-Term Trends of Nutrients and Phytoplankton in Chesapeake Bay. *Estuaries and Coasts*, 39(3). <https://doi.org/10.1007/s12237-015-0023-7>
- IOCCG. (2000). Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex Waters. In *Reports and Monographs of the International Ocean Colour Coordinating Group* (Vol. 3). <http://www.vliz.be/imis/imis.php?module=ref&refid=134621&request=147862>
- Johns, W. E., Lee, T. N., Schott, F. A., Zantopp, R. J., & Evans, R. H. (1990). The North Brazil Current retroflexion: Seasonal structure and eddy variability. *Journal of Geophysical Research*, 95(C12), 22103. <https://doi.org/10.1029/jc095ic12p22103>
- Lampert, L., Bryere, P., & Gohin, F. (2015, November). *Etude de la variation des paramètres température, biomasse et turbidité sur plus de 10 années dans les eaux marines guyanaises par imagerie satellite.*
- Lampert, L., Bryere, P., & Gohin, F. (2016). *Etude de la variation des paramètres biomasse (Chla) et turbidité sur plus de 10 années dans les eaux marines guyanaises par imagerie satellite. - Phase 2 : utilisation de la résolution à 300 m.*
- Lampert, L., Bryere, P., & Gohin, F. (2017). *Mesures de turbidité satellitaire des eaux fortement chargées en MES – Utilisation de l'algorithme OC5-HT en Guyane française.*

- Legendre, L., & Rassoulzadegan, F. (2012). Plankton and nutrient dynamics in marine waters. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/00785236.1995.10422042*, 41(1), 153–172. <https://doi.org/10.1080/00785236.1995.10422042>
- Loisel, H., Duforêt-Gaurier, L., Tran, T. K., Jorge, D., Steinmetz, F., Mangin, A., Bretagnon, M., & Fanton d'Andon, O. (2023b). Characterization of the organic vs. inorganic fraction of suspended particulate matter in coastal waters based on ocean color radiometry remote sensing. *7th Edition of the Copernicus Marine Service Ocean State Report (OSR 7)*.
- Loisel, H., Mangin, A., Vantrepotte, V., Dessailly, D., Ngoc Dinh, D., Garnesson, P., Ouillon, S., Lefebvre, J. P., Mériaux, X., & Minh Phan, T. (2014). Variability of suspended particulate matter concentration in coastal waters under the Mekong's influence from ocean color (MERIS) remote sensing over the last decade. *Remote Sensing of Environment*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.05.006>
- Loisel, H., Vantrepotte, V., Ouillon, S., Ngoc, D. D., Herrmann, M., Tran, V., Mériaux, X., Dessailly, D., Jamet, C., Duhaut, T., Nguyen, H. H., & Van Nguyen, T. (2017). Assessment and analysis of the chlorophyll-a concentration variability over the Vietnamese coastal waters from the MERIS ocean color sensor (2002–2012). *Remote Sensing of Environment*, 190, 217–232. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2016.12.016>
- Mélin, F., & Vantrepotte, V. (2015). How optically diverse is the coastal ocean? *Remote Sensing of Environment*, 160, 235–251. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.023>
- Mograne, M. A., Jamet, C., Loisel, H., Vantrepotte, V., Mériaux, X., & Cauvin, A. (2019). Evaluation of five atmospheric correction algorithms over french optically-complex waters for the sentinel-3a olci ocean color sensor. *Remote Sensing*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/RS11060668>
- Mouw, C. B., Greb, S., Aurin, D., DiGiacomo, P. M., Lee, Z., Twardowski, M., Binding, C., Hu, C., Ma, R., Moore, T., Moses, W., & Craig, S. E. (2015). Aquatic color radiometry remote sensing of coastal and inland waters: Challenges and recommendations for future satellite missions. In *Remote Sensing of Environment* (Vol. 160). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.001>
- Pereira-Sandoval, M., Ruescas, A., Urrego, P., Ruiz-Verdú, A., Delegido, J., Tenjo, C., Soria-Perpinyà, X., Vicente, E., Soria, J., & Moreno, J. (2019). Evaluation of atmospheric correction algorithms over spanish inland waters for sentinel-2 multi spectral imagery data. *Remote Sensing*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/rs11121469>
- Ray, R., Michaud, E., Aller, R. C., Vantrepotte, V., Gleixner, G., Walcker, R., Devesa, J., Le Goff, M., Morvan, S., & Thouzeau, G. (2018). The sources and distribution of carbon (DOC, POC, DIC) in a mangrove dominated estuary (French Guiana, South America). *Biogeochemistry*, 138(3). <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0447-9>
- Ray, R., Thouzeau, G., Walcker, R., Vantrepotte, V., Gleixner, G., Morvan, S., Devesa, J., & Michaud, E. (2020). Mangrove-Derived Organic and Inorganic Carbon Exchanges Between the Sinnamary Estuarine System (French Guiana, South America) and Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125(8). <https://doi.org/10.1029/2020JG005739>
- Salisbury, J., Vandemark, D., Campbell, J., Hunt, C., Wisser, D., Reul, N., & Chapron, B. (2011). Spatial and temporal coherence between Amazon River discharge, salinity, and light absorption by colored organic carbon in western tropical Atlantic surface waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(7). <https://doi.org/10.1029/2011JC006989>
- Soppa, M. A., Silva, B., Steinmetz, F., Keith, D., Scheffler, D., Bohn, N., & Bracher, A. (2021). Assessment of polymer atmospheric correction algorithm for hyperspectral remote sensing imagery over coastal waters. *Sensors*, 21(12). <https://doi.org/10.3390/s21124125>
- Steinmetz, F., Deschamps, P.-Y., & Ramon, D. (2011b). Atmospheric correction in presence of sun glint: application to MERIS. *Optics Express*, 19(10), 9783. <https://doi.org/10.1364/oe.19.009783>

- Stramski, D., Reynolds, R. A., Babin, M., Kaczmarek, S., Lewis, M. R., Röttgers, R., Sciandra, A., Stramska, M., Twardowski, M. S., Franz, B. A., & Claustre, H. (2008). Relationships between the surface concentration of particulate organic carbon and optical properties in the eastern South Pacific and eastern Atlantic Oceans. *Biogeosciences*, 5(1), 171–201. <https://doi.org/10.5194/bg-5-171-2008>
- Suominen, T. (2018). Applying MERIS time series and dynamic time warping for delineating areas with similar temporal behaviour in the northern Baltic Sea. *Ecological Indicators*, 95(August), 794–804. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.023>
- Taillardat, P., Friess, D. A., & Lupascu, M. (2018). Mangrove blue carbon strategies for climate change mitigation are most effective at the national scale. *Biology Letters*, 14(10). <https://doi.org/10.1098/RSBL.2018.0251>
- Tran, M. D., Vantrepotte, V., Loisel, H., Oliveira, E. N., Tran, K. T., Jorge, D., Mériaux, X., & Paranhos, R. (2023). Band Ratios Combination for Estimating Chlorophyll-a from Sentinel-2 and Sentinel-3 in Coastal Waters. *Remote Sensing 2023, Vol. 15, Page 1653*, 15(6), 1653. <https://doi.org/10.3390/RS15061653>
- Vantrepotte, V., Gensac, E., Loisel, H., Gardel, A., Dessailly, D., & Mériaux, X. (2013). Satellite assessment of the coupling between in water suspended particulate matter and mud banks dynamics over the French Guiana coastal domain. *Journal of South American Earth Sciences*, 44(April 2020), 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.11.008>
- Vantrepotte, V., Loisel, H., Dessailly, D., & Mériaux, X. (2012). Optical classification of contrasted coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.004>
- Walcker, R., Gandois, L., Proisy, C., Corenblit, D., Mougin, É., Laplanche, C., Ray, R., & Fromard, F. (2018). Control of “blue carbon” storage by mangrove ageing: Evidence from a 66-year chronosequence in French Guiana. *Global Change Biology*, 24(6), 2325–2338. <https://doi.org/10.1111/GCB.14100>
- Waliser, D. E., & Gautier, C. (1993). A satellite-derived climatology of the ITCZ. *Journal of Climate*, 6(11). [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<2162:ASDCOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<2162:ASDCOT>2.0.CO;2)
- Warren, M. A., Simis, S. G. H., Martinez-Vicente, V., Poser, K., Bresciani, M., Alikas, K., Spyrakos, E., Giardino, C., & Ansper, A. (2019). Assessment of atmospheric correction algorithms for the Sentinel-2A MultiSpectral Imager over coastal and inland waters. *Remote Sensing of Environment*, 225, 267–289. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.018>
- Werdell, P. J., McKinna, L. I. W., Boss, E., Ackleson, S. G., Craig, S. E., Gregg, W. W., Lee, Z., Maritorena, S., Roesler, C. S., Rousseaux, C. S., Stramski, D., Sullivan, J. M., Twardowski, M. S., Tzortziou, M., & Zhang, X. (2018). An overview of approaches and challenges for retrieving marine inherent optical properties from ocean color remote sensing. In *Progress in Oceanography* (Vol. 160). <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.01.001>