

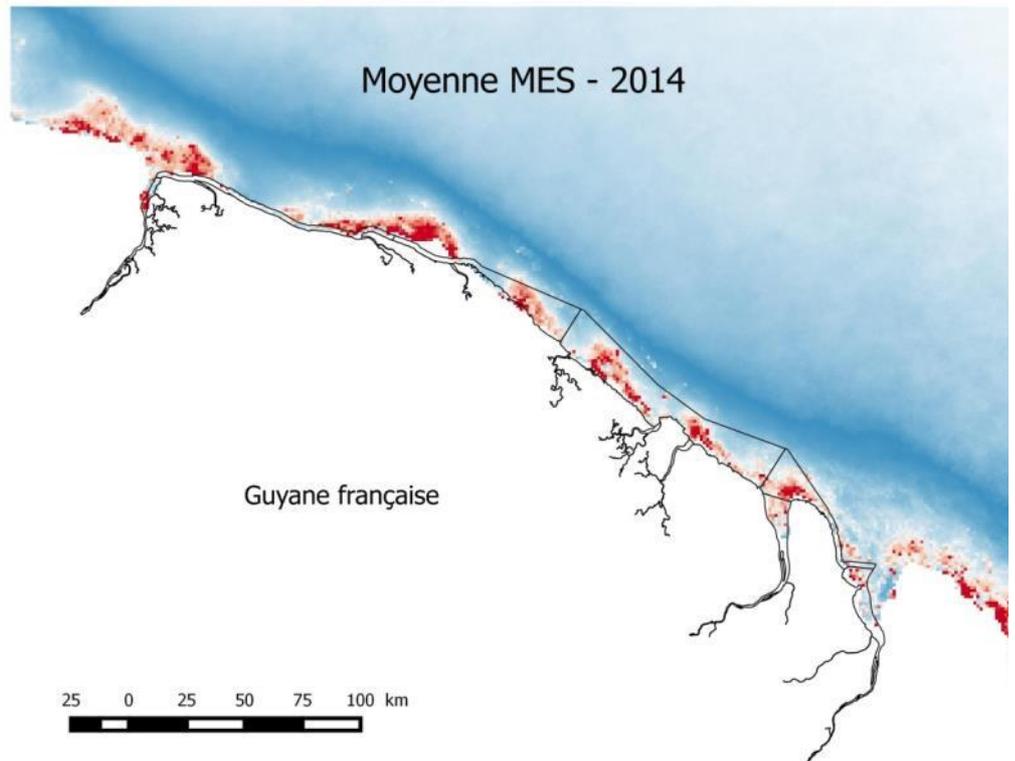
Luis LAMPERT

Philippe BRYERE (ACRI-HE)

Francis GOHIN

Novembre 2015 R.INT.DIR ODE/DYNECO/PELAGOS 2015-03

Etude de la variation des paramètres température, biomasse et turbidité sur plus de 10 années dans les eaux marines guyanaises par imagerie satellite



Moyenne MES 2014 - MODIS

Fiche documentaire

Numéro d'identification du rapport : RST.DYNECO n° 2015-03 Diffusion : libre <input checked="" type="checkbox"/> restreinte: <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/> Validé par : Adresse électronique : - chemin UNIX : - adresse WWW :		date de publication novembre 2015 nombre de pages : 85 bibliographie : oui illustration(s) : oui langue du rapport : français
Titre et sous-titre du rapport : <p style="text-align: center;">Etude de la variation des paramètres température, biomasse et turbidité sur plus de 10 années dans les eaux marines guyanaises par imagerie satellite</p>		
Rapport intermédiaire		Rapport définitif X
Convention ONEMA-IFREMER 2015		
Auteur(s) principal(aux) : Luis Lampert Philippe Bryère Francis Gohin	Organisme / Direction / Service, laboratoire IFREMER / ODE / Dyneco-pélagos ACRI-HE Brest IFREMER / ODE / Dyneco-pélagos	
Collaborateur(s) : nom, prénom	Organisme / Direction / Service, laboratoire	
Cadre de la recherche : Programme : Convention : Ifremer/Onema 2015 Projet : Autres (préciser) : Campagne océanographique :		
Résumé : Dans le cadre de la réalisation de la fiche Onema, intitulée « Etude de la variation des paramètres température, biomasse et turbidité sur plus de 10 années dans les eaux marines guyanaises par imagerie satellite » ce rapport final présente les résultats sur ces paramètres en relation aux questions posées dans cette fiche. L'utilisation des images à une résolution de 300m est abordée, ainsi qu'une proposition de stratégie de suivis des masses d'eau côtières basée sur les résultats obtenus		
Mots-clés : Guyane française ; images satellite ; SST ; turbidité ; MES ; chlorophylle ; DCE		
Rédacteur Nom : Lampert Luis Date : novembre 2015 Visa	Vérificateur Francis Gohin	Approbateur

- SOMMAIRE

1. Introduction.....	3
2. Matériel et méthodes.....	5
2.1. Plateformes et caméras satellite utilisées	5
température de surface de la mer (SST)	5
Couleur de l'eau (CHLA, TURBI, MES).....	5
2.2. Traitement des données	5
Zone d'étude	5
Radiales côte-large	7
Température de surface de la mer (SST).....	7
Couleur de l'eau (CHLA, TURBI, MES).....	7
Percentile 90 (P90)	8
Validation des données CHLA et TURBI avec données <i>in situ</i>	9
Logiciels de traitement et visualisation	9
3. Vision régionale des paramètres étudiés.....	11
3.1. Température de surface de la mer (SST)	11
Résultats par secteur.....	11
Résultats par radiale et saison	12
3.2. Chlorophylle <i>a</i> (CHLA)	14
Résultats par radiale.....	14
3.3. Turbidité (TURBI).....	18
Résultats par radiale.....	18
3.4. Matières en suspension (MES).....	21
4. Vision locale – Masse d'eau côtière DCE (MEC).....	22
4.1. Température de surface de la mer (SST)	22
Moyennes annuelles et pluriannuelles	22
4.2. Chlorophylle <i>a</i> (CHLA)	24
Moyennes annuelles et pluriannuelles	24
Moyennes mensuelles.....	25
4.3. Turbidité (TURBI).....	27
Moyennes annuelles et pluriannuelles	27
Moyennes mensuelles.....	28
4.4. Matières en suspension (MES).....	30
Moyennes annuelles et saisonnières	30
5. Percentile 90 (P90)	33
5.1. Percentile 90 CHLA (P90 CHLA).....	33
Moyennes annuelles et du P90 CHLA.....	33
Evolution du P90 CHLA	34
Comparaison du P90 CHLA avec les données <i>in situ</i>	35
5.1. Percentile 90 TURBI (P90 TURBI)	36

Moyennes annuelles et du P90 TURBI	36
Evolution du P90 TURBI.....	37
Comparaison du P90 TURBI avec les données <i>in situ</i>	37
6. Validation des données satellite	39
7. Evaluation des de l'utilisation des images à haute résolution (300 m)	44
8. Discussion générale	47
Amélioration de la connaissance des paramètres physico-chimiques	47
Représentativité de la MEC avec les images satellite	47
Utilisation des images à haute résolution (300 m).....	48
Sectorisation des masses d'eau côtières.....	49
Seuils et grilles DCE pour CHLA et TURBI	53
Saisonalité de la turbidité.....	55
9. Conclusion	58
10. Bibliographie.....	60
11. Sigles & abréviations	61
12. Annexe 1 : Température moyenne de surface mensuelle (SST) en 2011 (Odyssea).....	62
13. Annexe 2 : Anomalies de température de surface (SST) annuelles (2002-2012).....	64
14. Annexe 3 : P90 CHLA annuelle (2003 à 2014) et P90 CHLA sur un plan de 6 ans (2009-2014) ..	66
15. Annexe 4 : P90 TURBI annuelle (2003 à 2014) et P90 TURBI sur plan de 6 ans (2009-2014).....	73
16. Annexe 5 : Moyennes annuelles de MES (2003 à 2014)	80

1.- Introduction

La mise en place de la directive européenne « Directive cadre sur l'eau » (DCE) s'est heurtée rapidement au problème du manque de données permettant de sectoriser les eaux côtières de la Guyane. C'est ainsi que une seule masse d'eau côtière (MEC) a été définie entre les embouchures du Maroni et de l'Oyapock.

Il se pose alors, la question de la pertinence de ce découpage. Sans disposer des données environnementales des eaux côtières guyanaises la tâche devient impossible. L'une des façons de contourner ce problème est de faire appel aux données acquises par les satellites. Depuis plus de vingt années, des capteurs embarqués permettent d'obtenir la température, la concentration en chlorophylle ou la turbidité avec une définition croissante. C'est en créant une base de données à partir des images satellite que nous essaierons de conforter le découpage actuel ou d'en proposer un nouveau en fonction des résultats obtenus.

La proposition de cette fiche Onema, intitulée « Etude de la variation des paramètres température, biomasse et turbidité sur plus de 10 années dans les eaux marines guyanaises par imagerie satellite » a pour but de :

- Créer une base de données des images satellite des paramètres température (SST), chlorophylle (CHLA), Matières en suspension (MES) et turbidité (TURBI) à l'usage des gestionnaires de la DCE. Elle concerne, sur une période de plus de dix années, le calcul des moyennes annuelles, mensuelles, pluriannuelles et des percentiles 90 pour la chlorophylle et la turbidité,
- Statuer sur la pertinence du choix d'une unique masse d'eau côtière guyanaise (MEC), ou proposer une autre sectorisation,
- Evaluer l'utilisation des images satellite en CHLA et TURBI avec une résolution de 300 m sur les eaux guyanaises.

La mise en place de la stratégie DCE des eaux marines en Guyane est aujourd'hui basée sur le suivi d'une seule masse d'eau côtière (MEC) et une dizaine de masses d'eau de transition (MET). Dans cette étude nous aborderons uniquement la masse d'eau côtière (figure 1.1).



Figure 1.1 : Masse d'eau côtière (MEC) et masses d'eau de transition (MET) sur les eaux guyanaises.

2.- Matériel et méthodes

1.1. Plateformes et caméras satellite utilisées

Température de surface de la mer (SST) :

Pour réaliser cette étude nous avons également utilisé les images satellite générées lors des projets PENECLIM (Ifremer) et OSE GUYAMAPA (IRD). Pour ces deux projets il a fallu récupérer et traiter des images journalières, puis composer les moyennes mensuelles et annuelles (Lampert 2015). Les sources des images satellite et leur traitement ont été aussi diverses que possible (MODIS [Aqua, fait par CLS], Odyssea, GHRSSST, OSTIA,...) (tableau 2.1).

Tableau 2.1 : caractéristiques des caméras et plateformes utilisées pour les données SST

Données	Période	Résolution	Origine	Commentaires
OSTIA	2006 à nos jours	5km	MetOffice (GB)	Opérationnel. Intéressant pour la couverture et la bonne résolution mais série temporelle courte. Les données de 2006 sont disponibles à partir d'avril.
Pathfinder	1986-2012	4km	NOAA/NODC AVHRR	Intéressant pour la série temporelle et la résolution mais couverture faible.
Odyssea	2010-à nos jours	2km	Cersat/Ifremer Multi-capteur	Opérationnel. Intéressant pour la couverture et la résolution mais série temporelle courte. Les données de 2010 sont disponibles à partir de septembre.
GRHSST	1986 à nos jours	25km	Multi-capteurs	Opérationnel. Intéressant pour la couverture et la série temporelle, mais résolution faible.

Couleur de l'eau (CHLA, TURBI, MES) :

Les images à 1km de résolution ont été obtenues par la caméra MODIS (NASA), celles à haute résolution (300m) avec la caméra MERIS (ESA). Nous avons fait appel également aux images de VIIRS (2012-2014) pour compléter le pool de données disponibles au moment de la validation des données satellite avec les données *in situ* (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 : caractéristiques des caméras utilisées pour les données « couleur de l'eau »

Données	Période utilisée	Résolution	Origine	Commentaires
MODIS	2003 - 2014	1 km	EOS/NASA	Deux satellites : Terra et Aqua
MERIS	2003-2009	1 km / 300m	Envisat/ESA	15 bandes dans visible + infrarouge
VIIRS	2013	750m	NOAA/NASA	Visible + infrarouge

1.2. Traitement des données

Zones d'étude

Pour faciliter l'étude sur l'homogénéité de la masse d'eau côtière DCE (MEC), nous l'avons découpé en quatre secteurs. Nous avons choisi les découpages des secteurs historiques de la pêche guyanaise (figure 2.1) pour lesquels existent de nombreuses données liées à la pêche depuis les années 1980. Elles pourront alors être mises à profit dans de futures études halieutiques et environnementales.

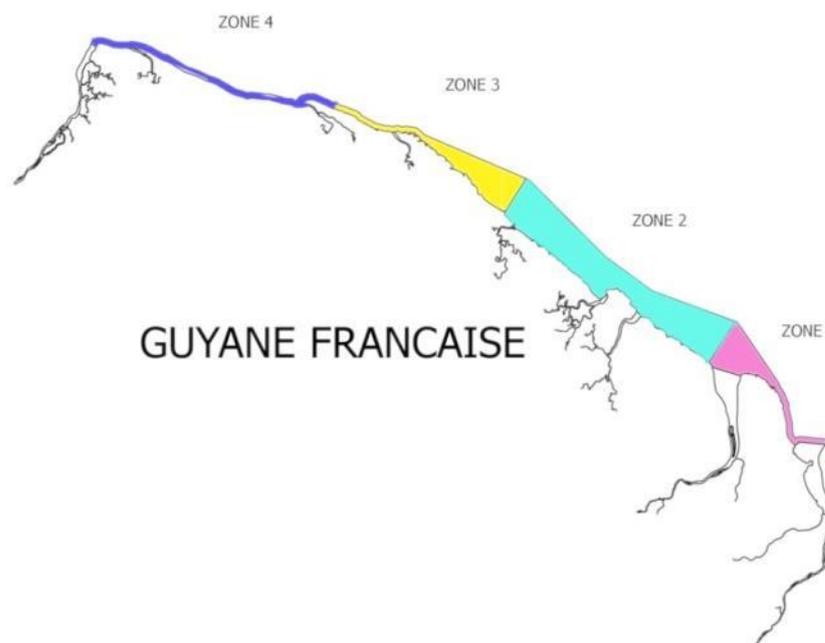


Figure 2.1 : Découpage de la masse d'eau côtière MEC en quatre zones

Les zones définies dans la figure 2.1 ne sont pas homogènes à cause de l'existence des îlets au large de Cayenne et de Kourou. Ainsi, la zone 4, au nord-ouest, est plus défavorisée à cause de sa plus faible surface et du nombre de pixels disponibles dans les images satellite (tableau 2.3).

Tableau 2.3 : Surfaces des secteurs de la MEC découpés en 4 zones

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
Surface (km ²) →	303	1121	383	177
Nbre pixels max dispo →	246	904	310	145

Radiales côte-large

Afin de disposer d'une vision « régionale » des paramètres étudiés, nous avons extrait les valeurs de chaque paramètre sur une radiale côte-large, longue d'une centaine de kilomètres et située au milieu de chaque zone d'étude (figure 2.2).

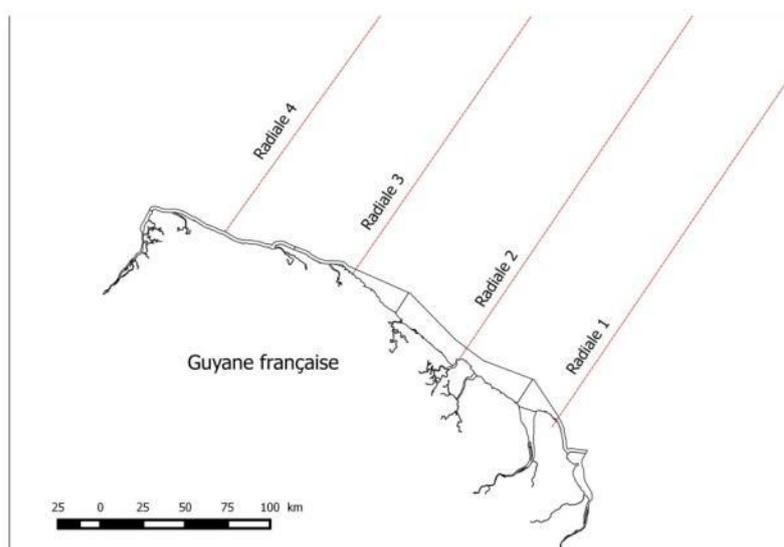


Figure 2.2 : Position des radiales régionales pour l'étude du gradient côte-large des paramètres « couleur de l'eau »

Température de surface de la mer (SST)

Les données SST des différentes plateformes sont des valeurs en degrés Celsius (°C), après corrections atmosphériques (niveau L3). Pour chaque plateforme utilisée, nous avons gardé leurs algorithmes et méthodes de traitement.

Couleur de l'eau (CHLA, TURBI, MES)

Pour les paramètres « couleur de l'eau » à 1 km de résolution nous avons fait appel à la caméra MODIS (NASA) qui enregistre de données depuis 2003. Nous avons traité les images jusqu'à décembre 2014, donc une série de 12 années.

Les images à haute résolution (300m) sont celles de la caméra européenne MERIS (ESA) sur la période 2003 à 2009.

Le rapatriement de images a été effectué *via* internet (FTP) et les images au niveau L2 (avec corrections atmosphériques) stockées ont été retraitées au niveau L3 (valeurs calibrées) avec

l'algorithme OC5 développé à l'Ifremer (Gohin F., Druon J. N., et Lampert L. 2002).

Les traitements ont été réalisés par la société ACRI-HE avec les chaînes de traitement développées à l'Ifremer. Ces dernières images traitées contiennent les paramètres avec les données physiques corrigées et géoréférencées. Elles se présentent sous trois formats différents :

- NetCDF : format binaire très compact et auto informé. Idéal pour des traitements de données,
- GeoTIF : format type raster géoréférencé. Il s'adapte bien aux traitements en SIG,
- JPG ou PNG : format type raster de faible taille qui permet une rapide visualisation des données. Idéal pour des pages web ou des présentations.

La chlorophylle_a (CHLA) a été calculée avec l'algorithme OC5. Il modifie l'algorithme de la NASA OC4 (Ocean Color 4 bands Algorithme) en corrigeant les effets des MES par les canaux 412 nm et 555 nm. Ce paramètre est exprimé en mg chl_a/m³ ou en µg chl_a/L.

Les matières en suspension (MES) représentent la partie inorganique des particules en suspension dans l'eau de mer. Elles sont calculées à partir des réflectances dans les canaux 550 nm et 670 nm (Gohin et al. 2005). L'unité utilisée pour ce paramètre est mg/L.

La turbidité (TURBI) est calculée à partir des estimations de la chlorophylle (CHLA) et des matières en suspension (MES) par la formule :

$$\text{TURBI (NTU)} = 0.54 * (\text{MES}_{\text{minérale}} + 0.234 * \text{chl}^{0.57})$$

Bien que l'unité de turbidité la plus utilisée aujourd'hui soit FNU (Formazine Nephelometric Unit), nous avons exprimé la turbidité en NTU (Nephelometric Turbidity Unit) par souci d'homogénéité avec les données déjà acquises et des appareils de terrain encore utilisés de nos jours. Une relation linéaire simple peut être utilisée pour passer d'une unité à une autre : NTU = FNU/1.3. Cette relation est valable dans les eaux atlantiques de métropole, mais reste à vérifier dans les eaux des DOM.

Percentile 90 (P90)

La DCE a adopté l'utilisation du percentile 90 (P90) pour la métrique de CHLA et TURBI. Sur une série de valeurs, il correspond à la valeur où 90% de la série sont inférieurs. Il élimine ainsi l'influence des données extrêmes qui peuvent avoir eu lieu lors de l'acquisition des données.

Le P90 CHLA a vocation à être calculé sur la série de valeurs enregistrées sur un plan de gestion DCE de 6 ans. Nous avons réalisé des cartes du P90 CHLA et P90 TURBI pour chaque année, de 2003 à 2014 car cette métrique offre une vision plus claire de la distribution et de l'évolution temporelle de ces deux paramètres, surtout dans un milieu très variable comme celui de la Guyane.

Les cartes du « P90 CHLA » et « P90 TURBI » se trouvent dans le répertoire des annexes.

Validation des données CHLA et TURBI satellite avec les données *in situ* 2013 disponibles

La calibration des résultats en chlorophylle et turbidité des images satellite a été réalisée avec

les données obtenues lors des prélèvements de la surveillance DCE 2013 et fournies par la DEAL de Guyane et l'Office de l'eau de guyanais.

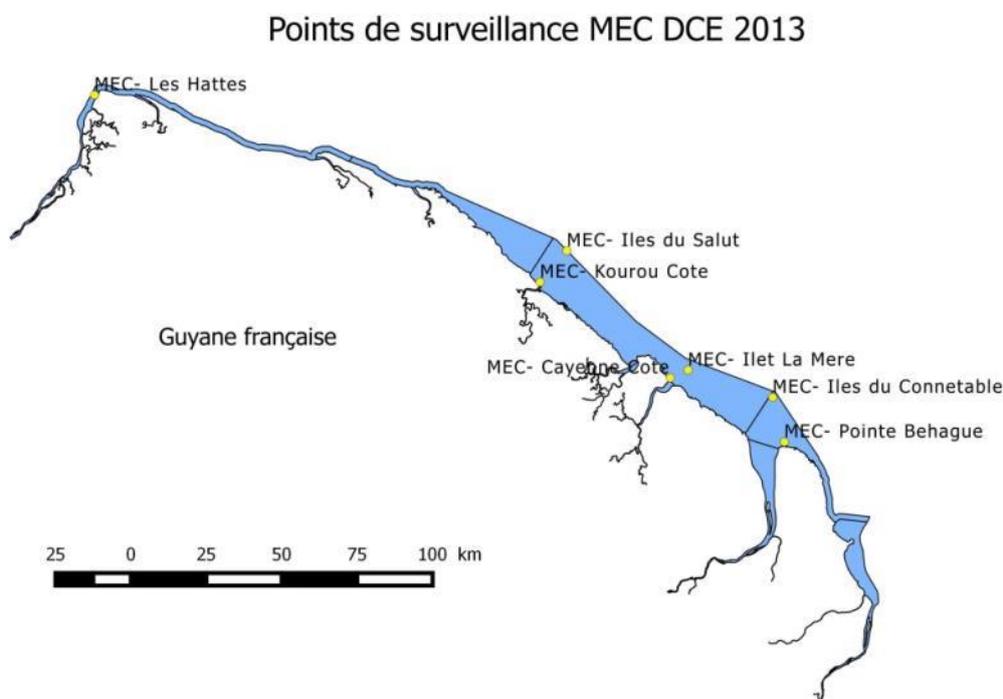


Figure 2.3 : Points de surveillance 2013

Chaque donnée *in situ* (2013), a été portée sur une figure contenant également les valeurs obtenues par les satellites sur le pixel le plus proche du point de prélèvement (figure 2.3). Bien qu'il existe une différence spatiale et temporelle entre ces deux mesures, cette approche permet de caler les données dans leur enveloppe et de vérifier l'existence de forts décalages.

Le décalage temporel entre les données *in situ* et satellite dépend de l'heure de passage du satellite au jour du prélèvement, mais également des possibles images inutilisables à cause de la couverture des nuages. Un décalage spatial dû au changement de la position du point d'échantillonnage à chaque prélèvement augmente également l'incertitude.

Logiciels de traitement et visualisation

Tous les traitements de données ont été réalisés avec les logiciels libres « R » et « QGIS ».

L'extraction et mise en forme de données des images au format NetCDF a été faite avec le package « ncdf » de R. Le package « shapefile » a permis l'utilisation des polygones des zones DCE préalablement chargés dans QGIS. Pour les images au format GeoTIF, le package « raster » a été utilisé. Nous avons travaillé avec la version R 3.0.1 et l'éditeur de texte Tinn-R, version 1.17.2.4.

La version du logiciel libre QGIS 2.8.1. a été utilisée pour la visualisation et traitement des masques des masses d'eau côtières, ainsi que pour la réalisation des figures concernant la DCE. Les valeurs des paramètres CHLA et TURBI dans les radiales régionales ont été obtenues avec le plugin « profil-tool ».

3.- Vision régionale des paramètres étudiés

Par vision régionale nous désignons le Plateau des Guyanes jusqu'à la rupture du plateau continental. Au niveau de la Guyane française cette distance peut aller au-delà de 100 km de la côte. C'est le lieu des processus de mélange et du passage des tourbillons de méso échelle de grande taille qui impactent la zone côtière (Ffield 2005 ; Fratantoni et Glickson 2002 ; Baklouti et al. 2007 ; Lampert 2012). Il est donc de première importance de connaître le fonctionnement de ce système avant de regarder de plus près la zone d'influence de la DCE. Cette zone DCE est en théorie limitée à 1 mille nautique (MN) des côtes, cependant avec la présence des îlets proches des côtes cette zone peut être plus large. En Guyane, la zone DCE s'étend sur plus de 10 km de large entre Kourou et l'Approuague (figure 1.1).

3.1. Température de surface de la mer (SST)

Une analyse plus complète de l'évolution de la SST en Guyane a été et présentée lors du rapport intermédiaire de juin 2015 (Lampert, Bryère, et Gohin 2015).

Résultats par secteur

L'évolution de la moyenne de chaque secteur (figure 2.1) sur une distance d'environ 100 km de côtes nous permettra d'apprécier les variations sur l'ensemble du plateau guyanais.

Les données obtenues par la plateforme GHRSSST, bien que disposant d'une plus faible définition du pixel que les autres séries de données (pixel d'environ 25x25 km), permettent d'obtenir une longue série qui commence en 1986 (figure 3.1).

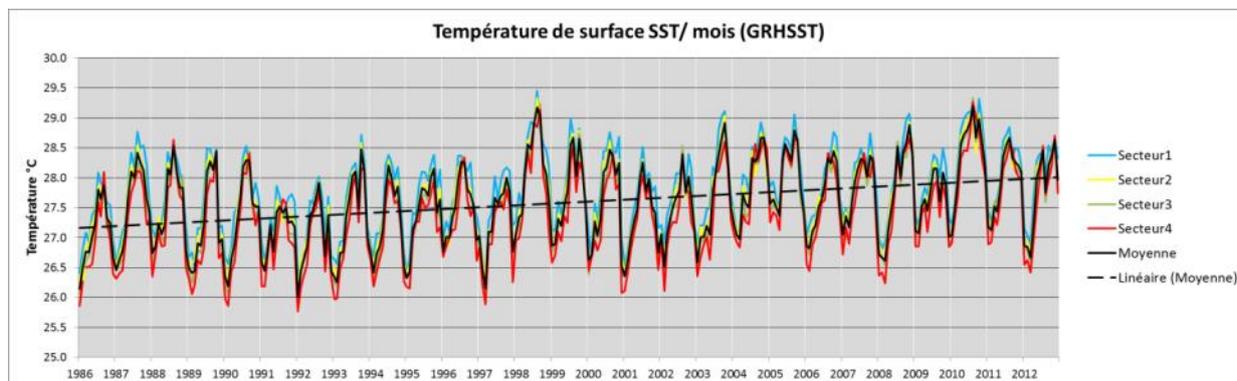


Figure 3.1 : Evolution mensuelle de la température par secteur entre 1986 et 2013

L'évolution de la température présente une tendance positive d'environ 0.8 °C sur 27 années, mettant en évidence le réchauffement des eaux de surface guyanaises. Il est intéressant de constater les deux plus fortes températures mensuelles enregistrées. Elles ont eu lieu en 1998 et en 2010. Le caractère atypique de l'année 2010, est mis en évidence dans les images des anomalies de température. Il s'agit des différences de température par rapport à la moyenne 2002-2012 (annexe 2). Nous constatons également dans la figure 3.1, l'existence de plus basses températures minimales plus fréquentes avant 2003. Cette évolution est plus clairement visible sur les moyennes annuelles (figure 3.2), où l'on remarque la régularité des différences de température entre chaque secteur.

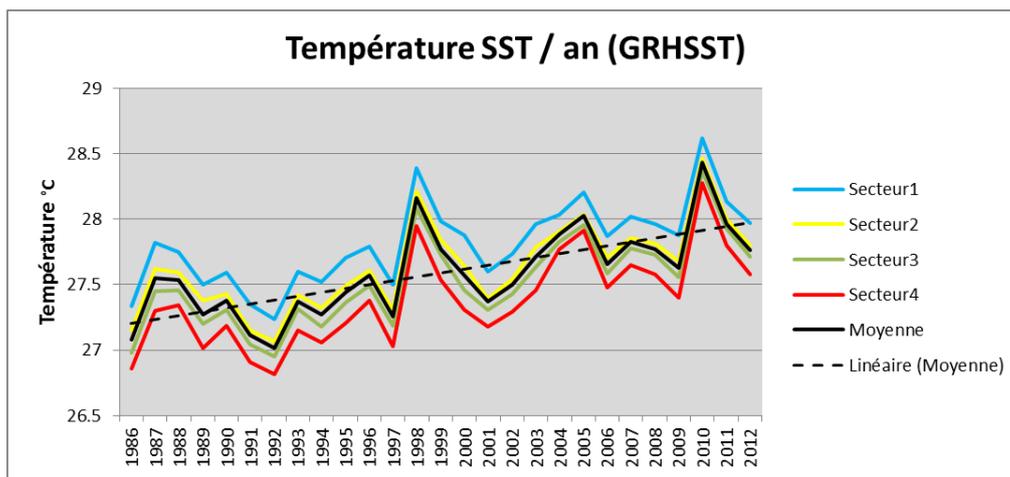


Figure 3.2 : Evolution annuelle de la température par secteur entre 1986 et 2012

Les températures moyennes par secteur diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'embouchure de l'Amazone. A cette échelle, la différence de température moyenne entre le secteur 1 et le secteur 4 oscille entre 0.3 à 0.5 °C.

La forme de la côte guyanaise joue également un rôle important dans la distribution des masses d'eau véhiculées par le courant du nord-Brézil (CNB) (Froidefond, Pujos et Andre 1988 ; Froidefond et al. 2004 ; Gardel 2011). Les images mensuelles obtenues avec la plateforme Odyssea montrent des eaux au large de la Guyane toujours plus froides probablement à cause de la convexité de la côte (annexe 1). Cette poche d'eau froide qui concerne toute la Guyane Française ainsi que le Surinam est présente en permanence sur les images de 2002 à 2012.

Résultats par radiale et par saison

Afin d'apprécier leur évolution spatiale, les valeurs des températures (2002-2012) ont été étudiées par radiale (figure 2.2) et par saison (figure 3.3). La saison humide s'étend de décembre à juin/juillet et la saison sèche entre juin/juillet et novembre. Dans les eaux du large en saison humide, l'évolution spatiale présente une phase de décroissance lente au-delà du talus continental. Les écarts de température entre les deux saisons se situent entre 0.5 et 1°C. Cet écart est plus fort au large, où il peut dépasser parfois 1°C. Dans la zone plus côtière, l'évolution des températures moyennes présente les mêmes tendances évolutives. Les différences de température entre les deux saisons sont plus restreintes qu'au large et dépassent rarement 0.5°C.

Sur les deux radiales situées aux extrémités (R1 et R4) la diminution de la température observée sur les premiers kilomètres est moins marquée, et pratiquement inexistante en saison humide.

En prenant uniquement les premiers points des radiales nous aurons une meilleure image de ce qui arrive dans la masse d'eau côtière concernant la DCE (figure 3.4). Sur les trois premières radiales (R1 à R3) nous observons de très faibles variations en saison sèche et pratiquement aucune en saison humide. Les différences entre les deux saisons oscillent entre 0.6 et 0.9°C avec une évolution des deux courbes de température très similaire. Sur la radiale R4 nous observons une chute de la température moyenne de plus de 0.5°C par rapport à la radiale R3.

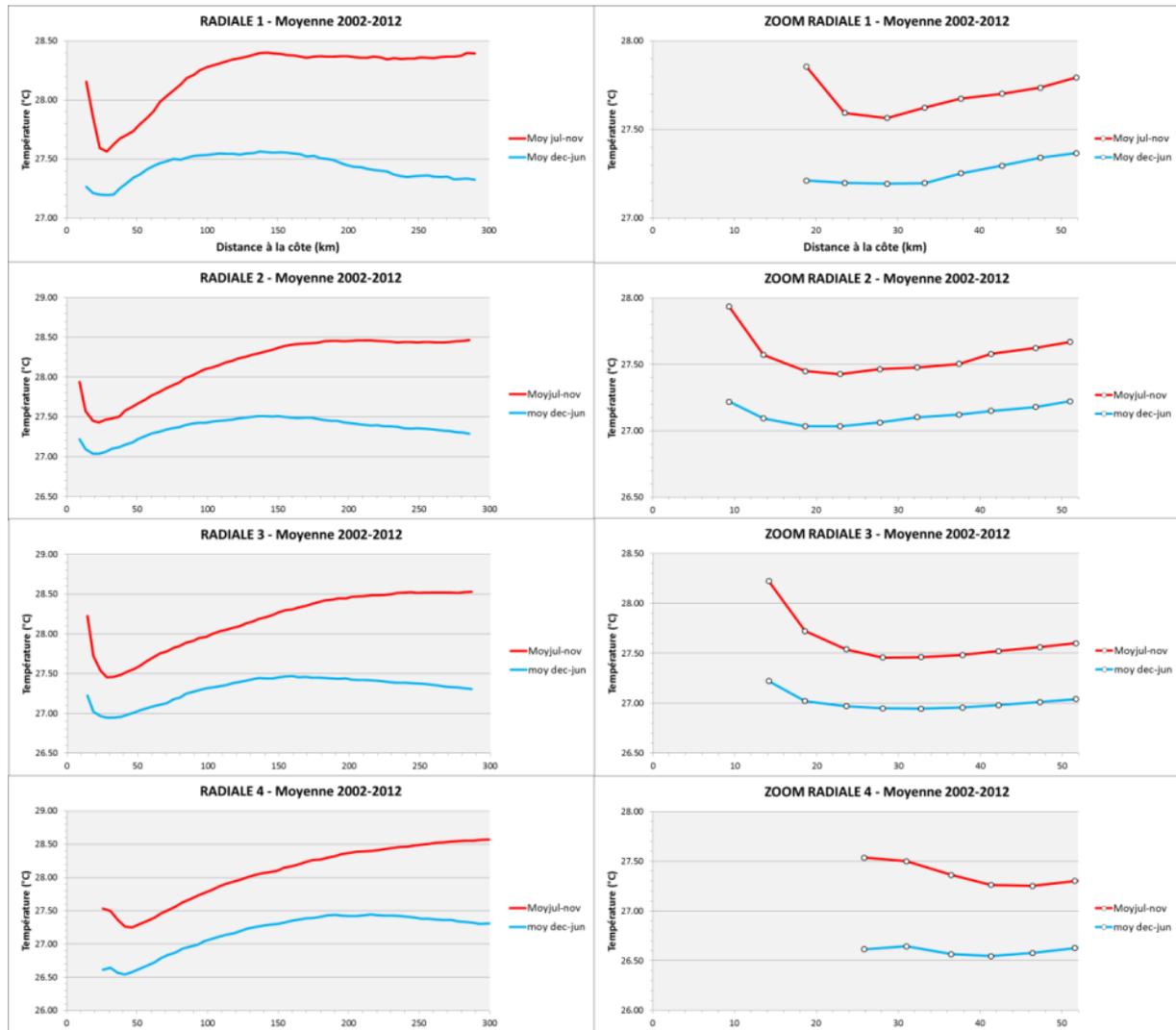


Figure 3.3 : Température moyenne pluriannuelle des radiales jusqu'au bout du plateau (colonne de gauche) et un zoom sur les premiers kilomètres (colonne de droite). Le point de départ (0 km) n'est pas le bord de mer

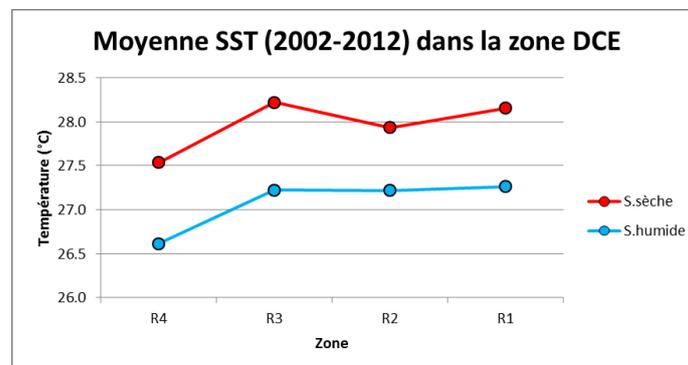


Figure 3.4 : Températures moyennes pluriannuelles (2002-2012) pour les premiers points des radiales (zone DCE – tableau 1) en saison humide et saison sèche

3.2. Chlorophylle_a (CHLA)

Résultats par radiale

De janvier à juin, sur la zone qui s'étend de la côte et jusqu'à environ 130 km vers le large, les concentrations moyennes en CHLA sur une radiale placée au milieu de chaque zone (figure 2.2), présentent les plus fortes valeurs sur les premiers 20 à 40 km. Puis ces valeurs diminuent régulièrement pour atteindre des concentrations proches de 1 μg chla/L sur le bord du plateau des Guyanes (figure 3.5).

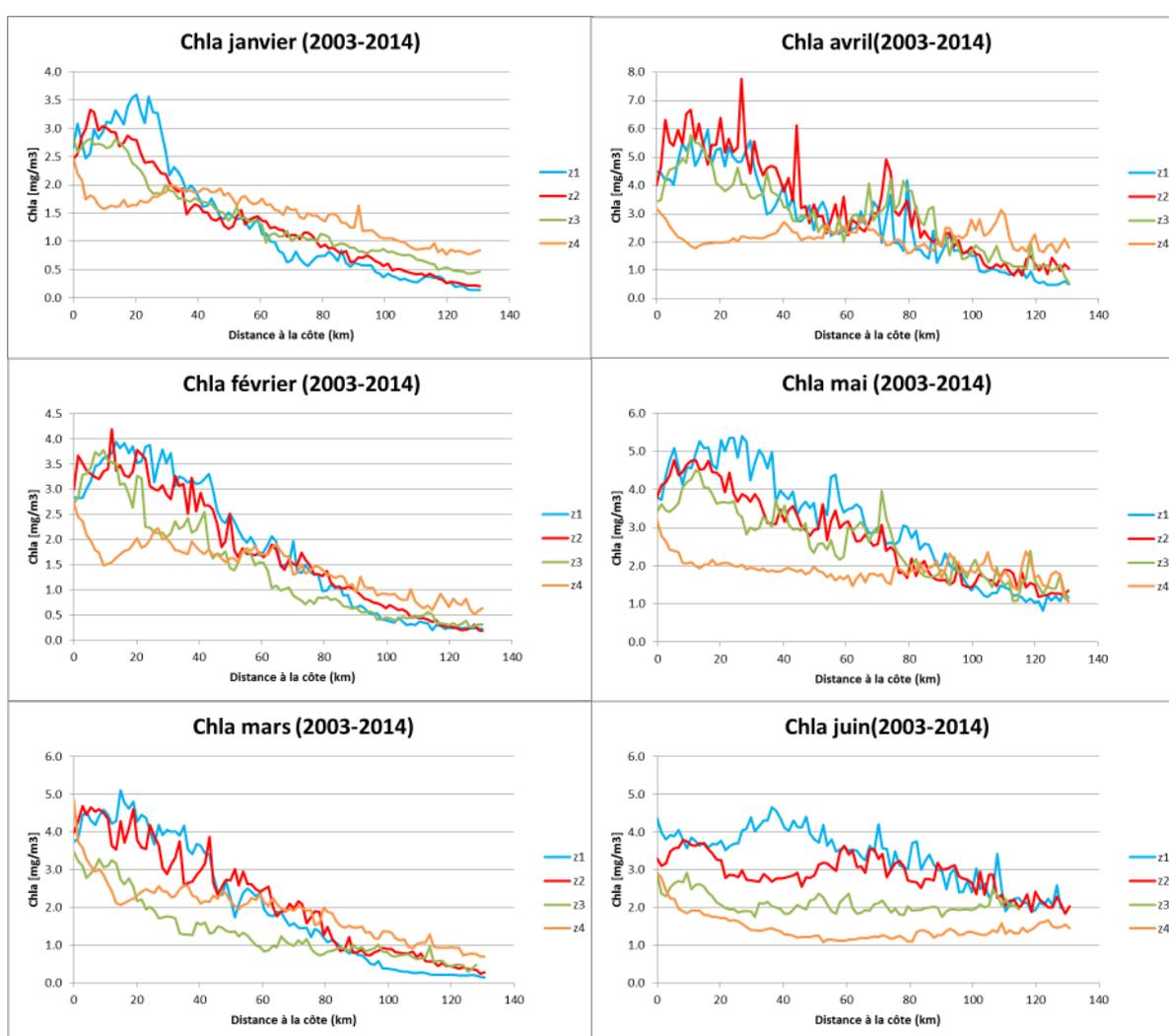


Figure 3.5 : Evolution spatiale des moyennes mensuelles en CHLA, de janvier à juin (sur la période 2003-2014), sur une radiale placée au centre de chaque zone

A partir du mois de juillet, les zones plus proches du fleuve Amazone (zone 1 et zone 2), sont affectées par l'éloignement de la masse d'eau amazonienne qui se sépare de la côte à cause de la réflexion, permettant ainsi l'arrivée d'eaux plus pauvres en CHLA du large par le nord-ouest (figure 3.6).

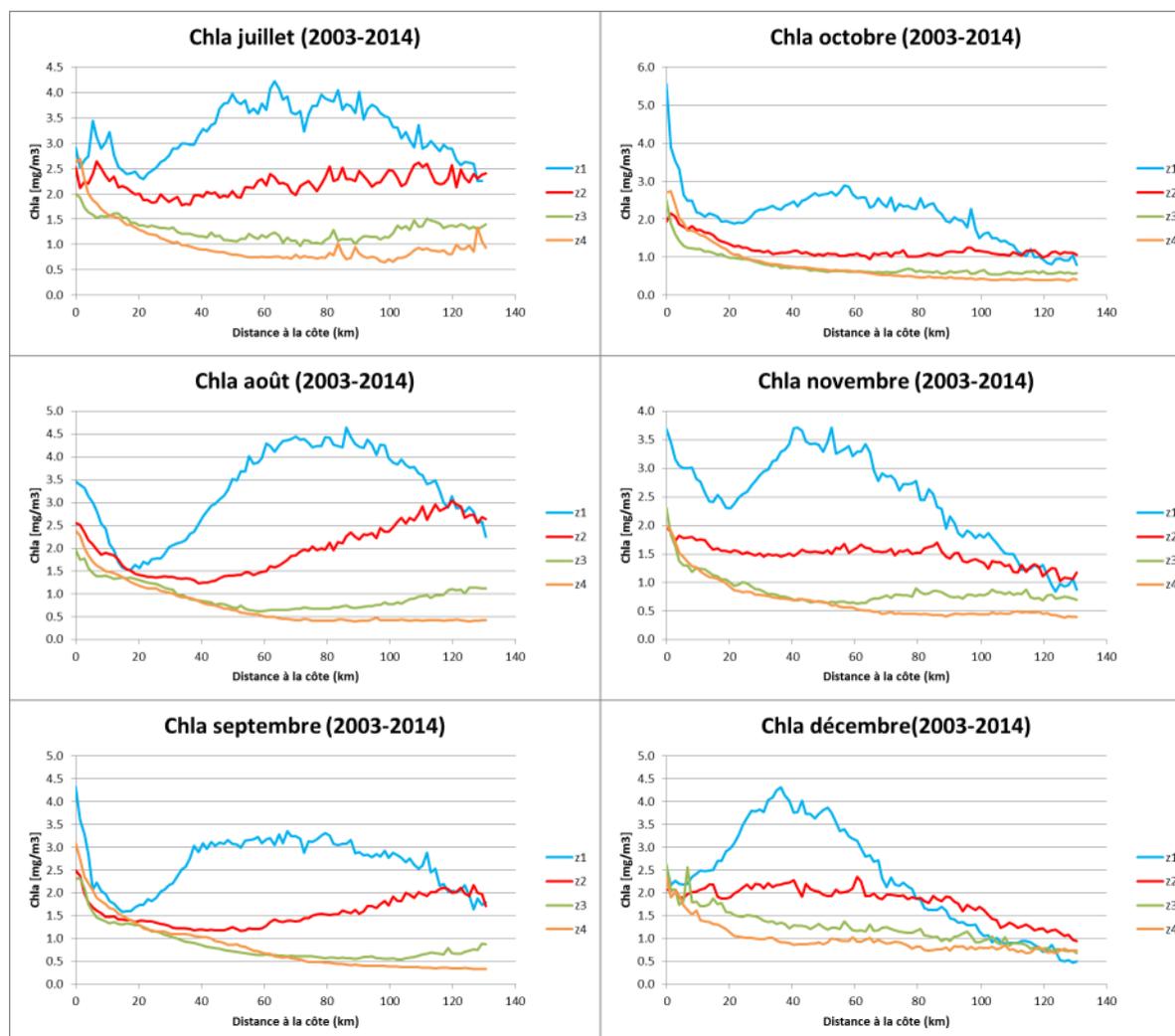


Figure 3.6 : Evolution spatiale des moyennes mensuelles en CHLA, de juillet à décembre (sur la période 2003-2014), sur une radiale placée au centre de chaque zone

Ce phénomène est visible dans les images satellite des moyennes mensuelles (sur la période 2003-2014), où l'évolution saisonnière de la masse d'eau est particulièrement mise en évidence (figures 3.7 et 3.8).

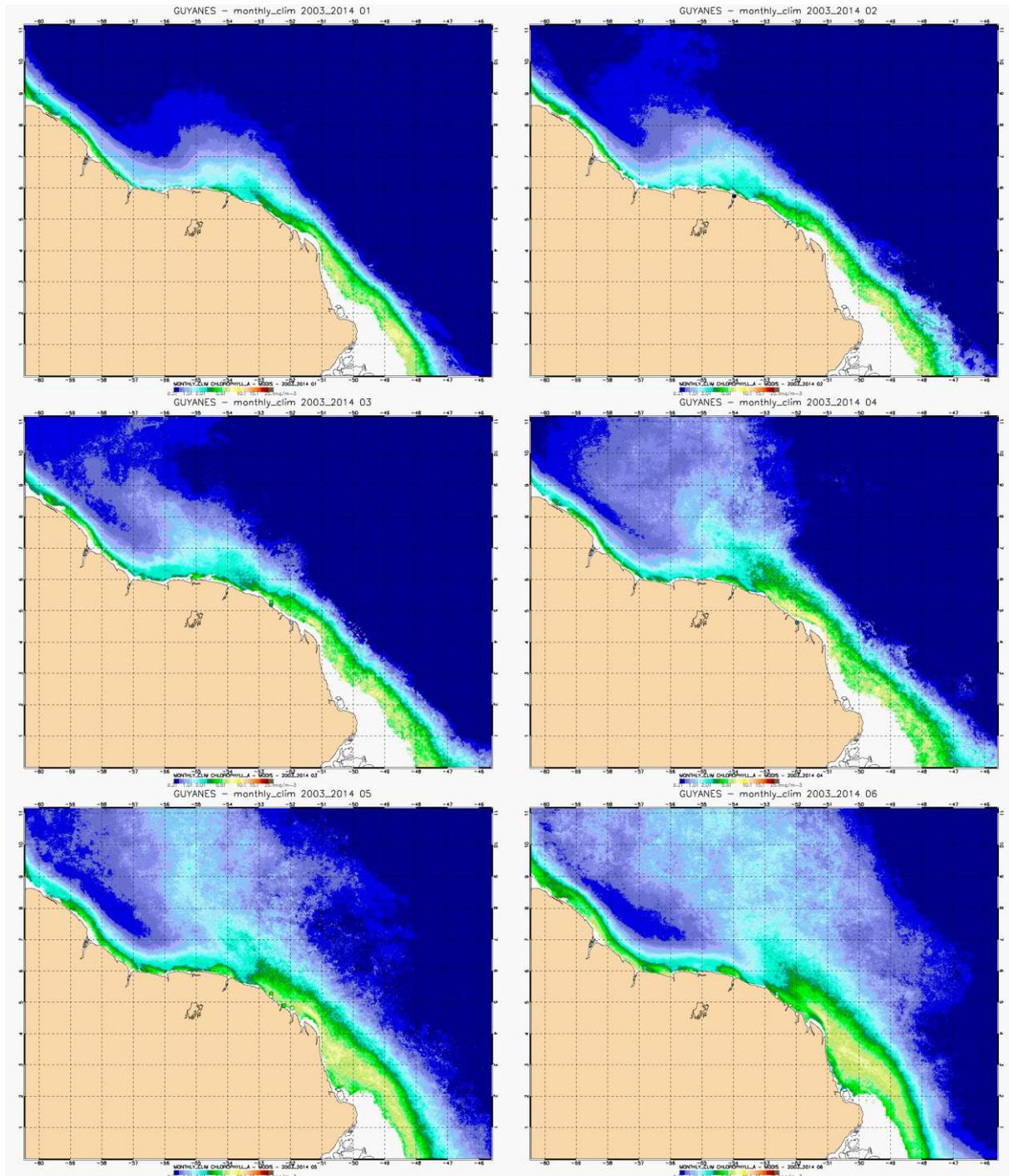


Figure 3.7 : Images satellite des moyennes en CHLA pour les mois de janvier à juin (sur la période 2003-2014)

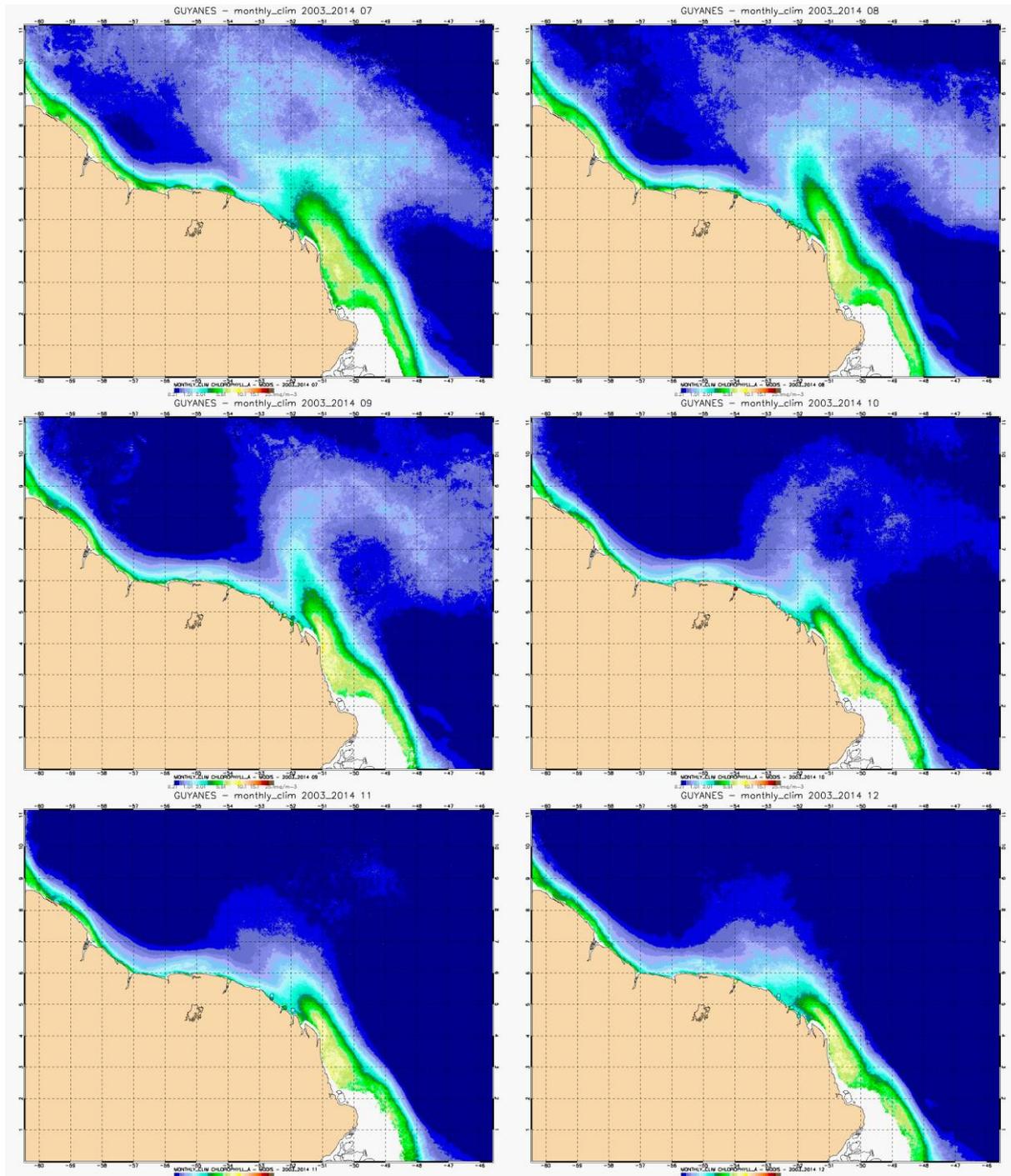


Figure 3.8 : Images satellite des moyennes en CHLA pour les mois de juillet à décembre (sur la période 2003-2014)

3.3. Turbidité (TURBI)

Résultats par radiale

Sur toute l'année, la turbidité présente un gradient décroissant côte-large avec des valeurs qui oscillent entre 5 et plus de 20 NTU près des côtes, puis diminuent rapidement de 2 à 5 NTU sur les premiers 10 à 20 km (figures 3.9 et 3.10). Ces valeurs diminuent plus lentement par la suite, pour se situer en dessous de 1 NTU sur le bord du plateau continental.

L'effet du masquage des images par les nuages et la saturation des pixels est un phénomène plus marqué en saison des pluies et tout particulièrement près des côtes (figures 3.11 et 3.12). Certaines valeurs ne sont donc pas enregistrées à la côte mais à quelques kilomètres (figure 3.3). Les images journalières sont davantage affectées par ce problème. Les moyennes mensuelles, annuelles et pluriannuelles, beaucoup moins et présentent davantage de pixels utilisables.

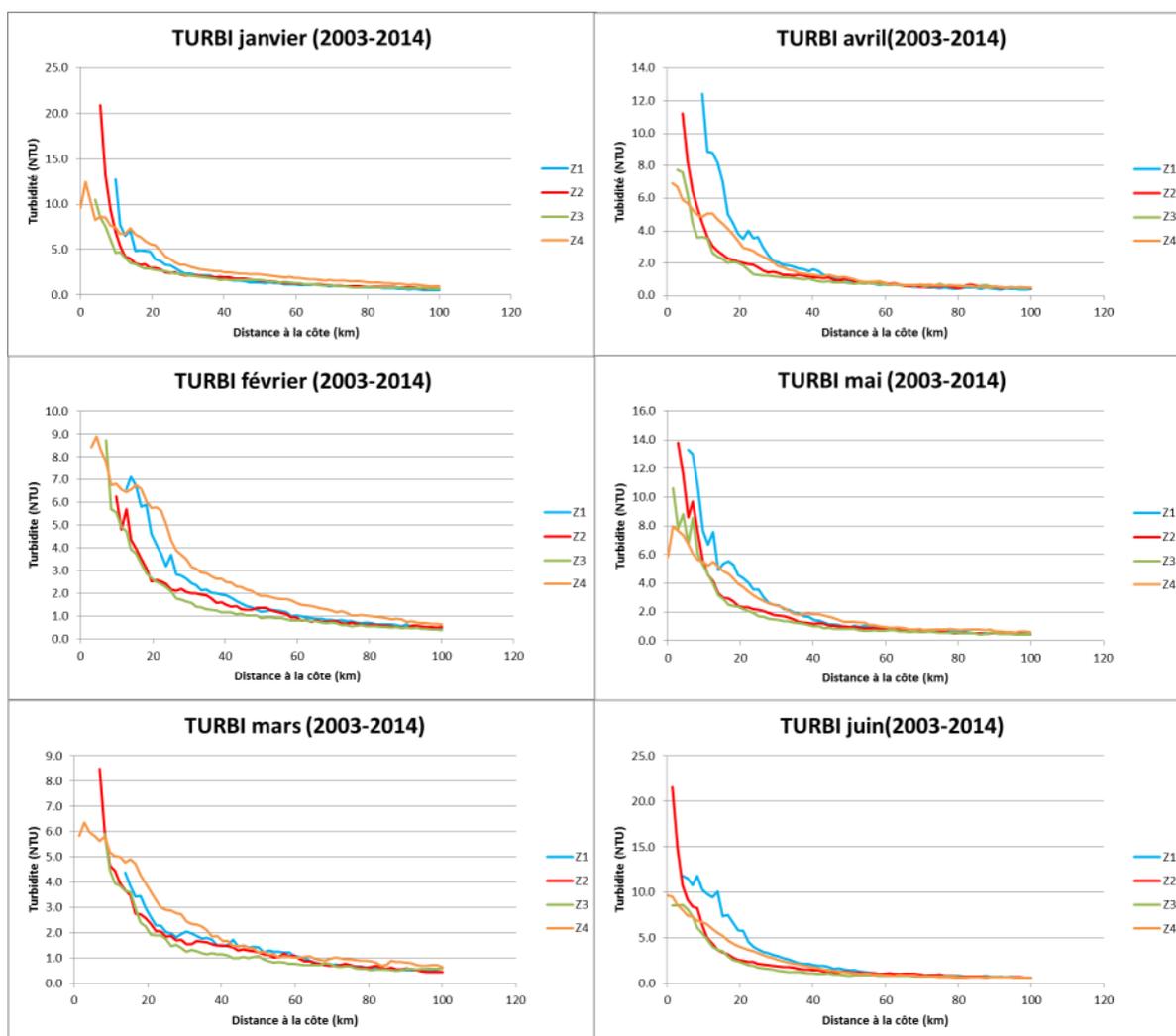


Figure 3.9 : Evolution spatiale des moyennes mensuelles de la turbidité, de janvier à juin (sur la période 2003-2014), sur une radiale placée au centre de chaque zone

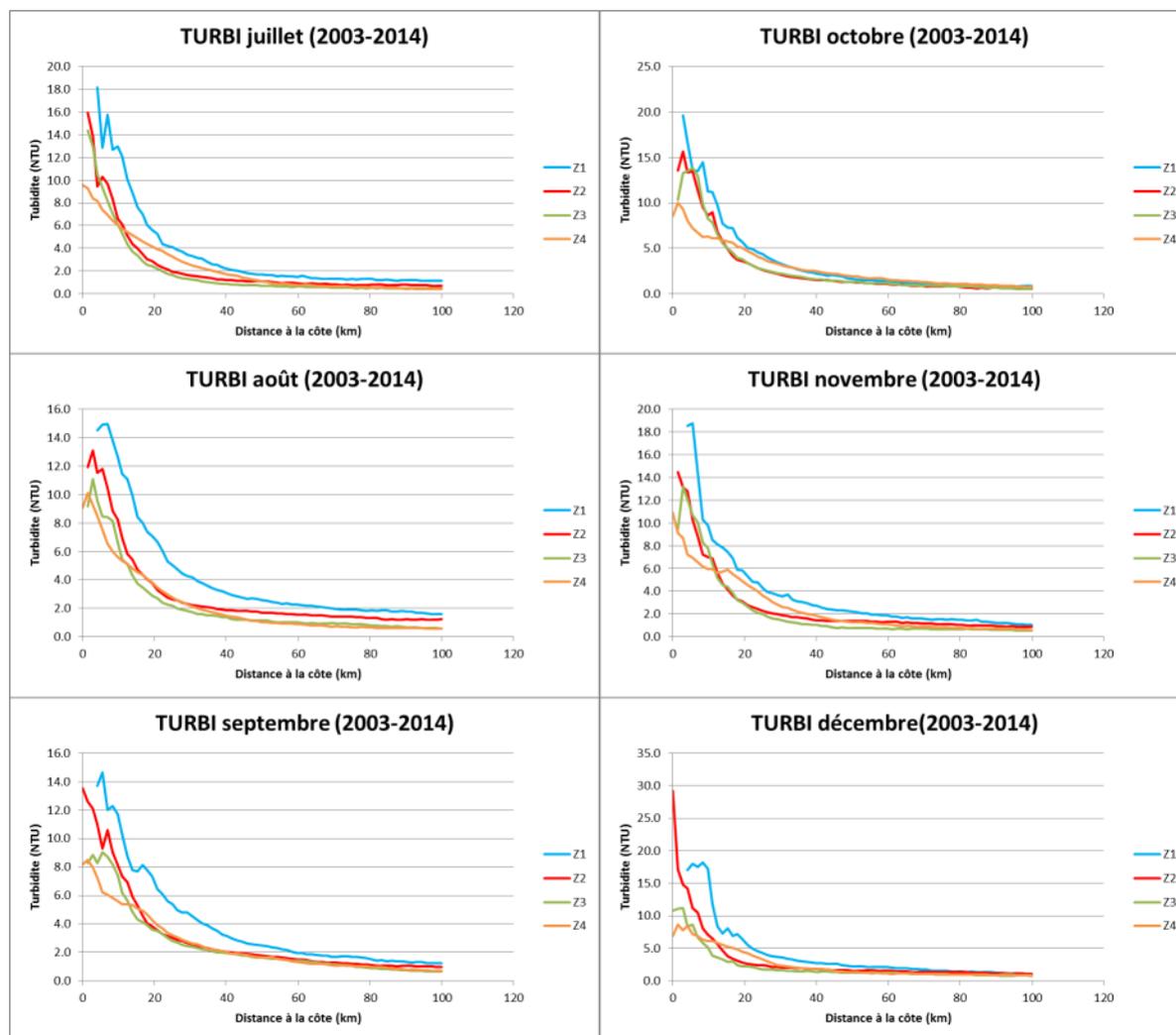


Figure 3.10 : Evolution spatiale des moyennes mensuelles de la turbidité, de juillet à décembre (sur la période 2003-2014), sur une radiale placée au centre de chaque zone

Sur la presque totalité des mois, la zone 1, proche de l'embouchure de l'Oyapock, présente les turbidités les plus fortes. Seul en février et mars, sont observées dans la zone 4 (proche du Maroni) les plus fortes turbidités. La rétroflexion est également visible à partir de sa turbidité aux mois de juillet, d'août et de septembre (figure 3.12).

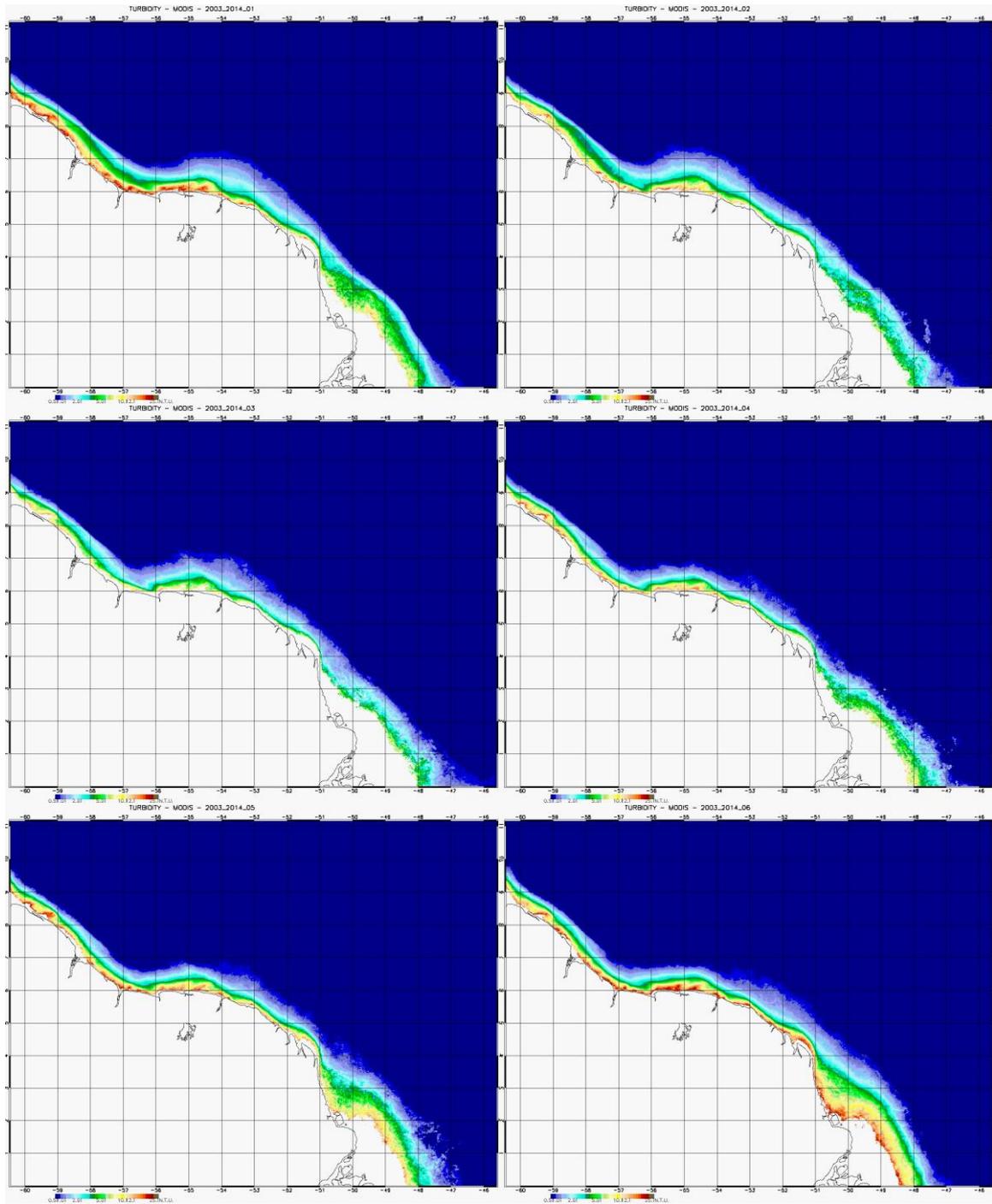


Figure 3.11 : Images satellite des moyennes en turbidité pour les mois de janvier à juin (sur la période 2003-2014)

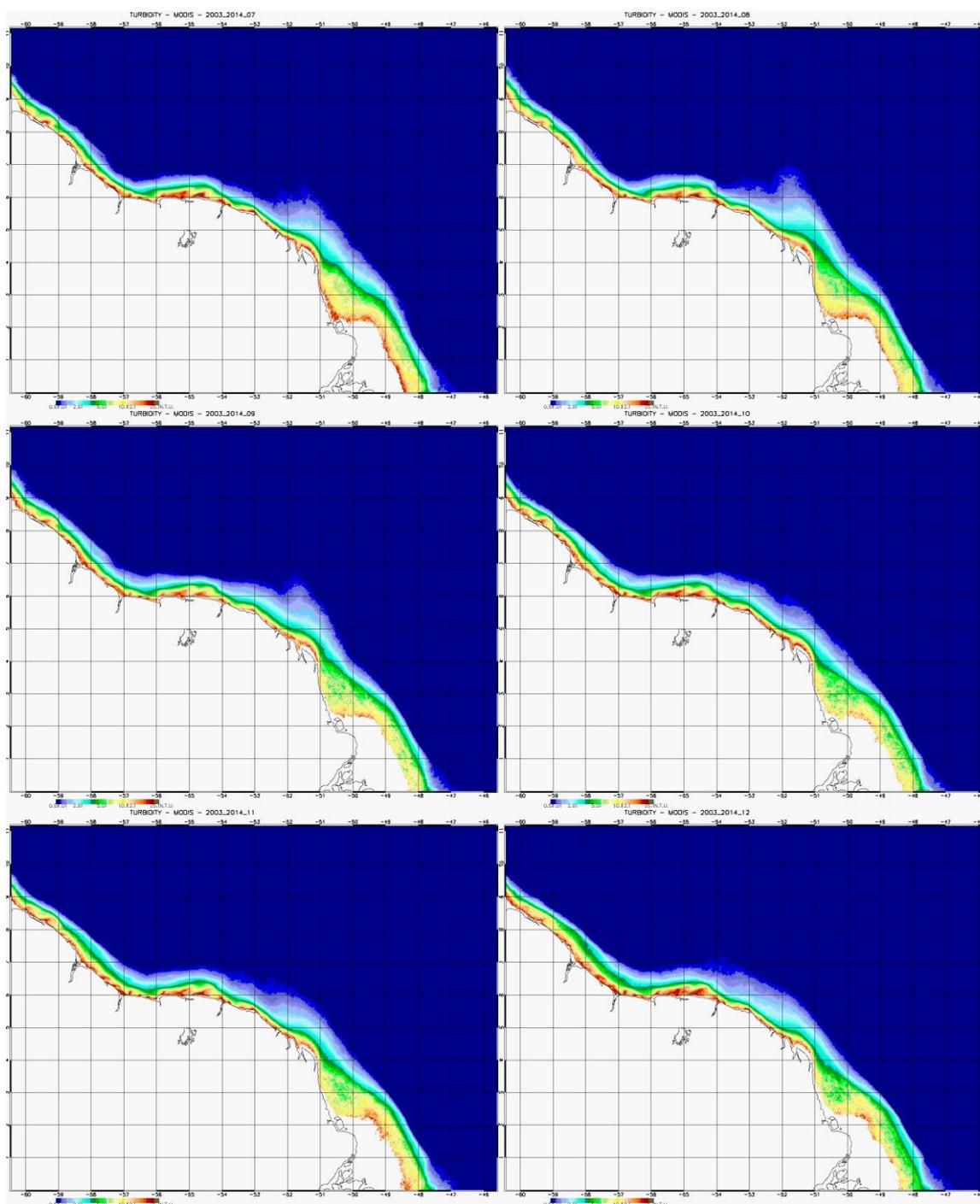


Figure 3.12 : Images satellite des moyennes en turbidité pour les mois de juillet à décembre (sur la période 2003-2014)

3.4. Matières en suspension (MES)

L'évolution régionale des MES présente la même variabilité que la turbidité et n'a pas été étudié dans le détail. Toutes les moyennes annuelles ont été cependant réalisées et sont visibles dans l'annexe 5.

4.- Vision locale – Masse d'eau côtière DCE (MEC)

Dans ce chapitre, seule la MEC découpée en 4 zones sera étudiée (figure 2.1). Nous exploiterons les données issues des images mensuelles, annuelles et pluriannuelles afin d'obtenir un maximum d'information sur la variabilité de chaque paramètre pour chacune des quatre zones DCE.

4.1 Température de surface de la mer (SST)

Moyennes annuelles et pluriannuelles

La figure 4.1-a présente les températures moyennes mensuelles de 2002 à 2012. En regardant en détail cette figure nous observons que la zone 4 est le plus souvent la plus froide en saison humide et la plus chaude en saison sèche. La température moyenne par zone sur la période 2002-2012 est très stable et varie entre 27.57° et 27.59°C (tableau 4.1). L'étendue des variations entre températures maximales et minimales est de 2.5° à 3°C.

Dans le tableau 4.1 et la figure 4.1-b nous observons la distribution du pourcentage moyen de pixels non valides dans le calcul des températures à partir des images satellite. Il existe une nette différence entre les zones 1 à 3 et la zone 4, où 75% des pixels ne sont pas valides. Ceci peut devenir un facteur limitant car la zone 4 est la plus étroite, avec une disponibilité maximale de 145 pixels de 1 km x 1 km. Dans les zones 1 à 3 le pourcentage de pixels non valide se situe aux alentours de 30%.

Tableau 4.1 : Valeurs moyennes obtenues par secteur à partir des images de température (SST) mensuelles, entre 2002 et 2012

zone	pixTOT	pixOK	pixVIDE	%pixVIDE	Tmoy	Tmin	Tmax
zone1	246	170	76	31	27.59	26.34	28.83
zone2	904	688	216	24	27.57	26.23	29.06
zone3	310	214	96	31	27.58	25.75	28.86
zone4	145	34	111	76	27.59	25.98	28.71

L'écart saisonnier observé sur les 4 zones n'excède pas les 2°C, avec un minimum autour de 26.5°C en janvier-février et un maximum de 28.5°C en août-septembre (figure 4.2). La différence de températures entre la zone 4 et les trois précédentes est plus marquée en janvier et en août.

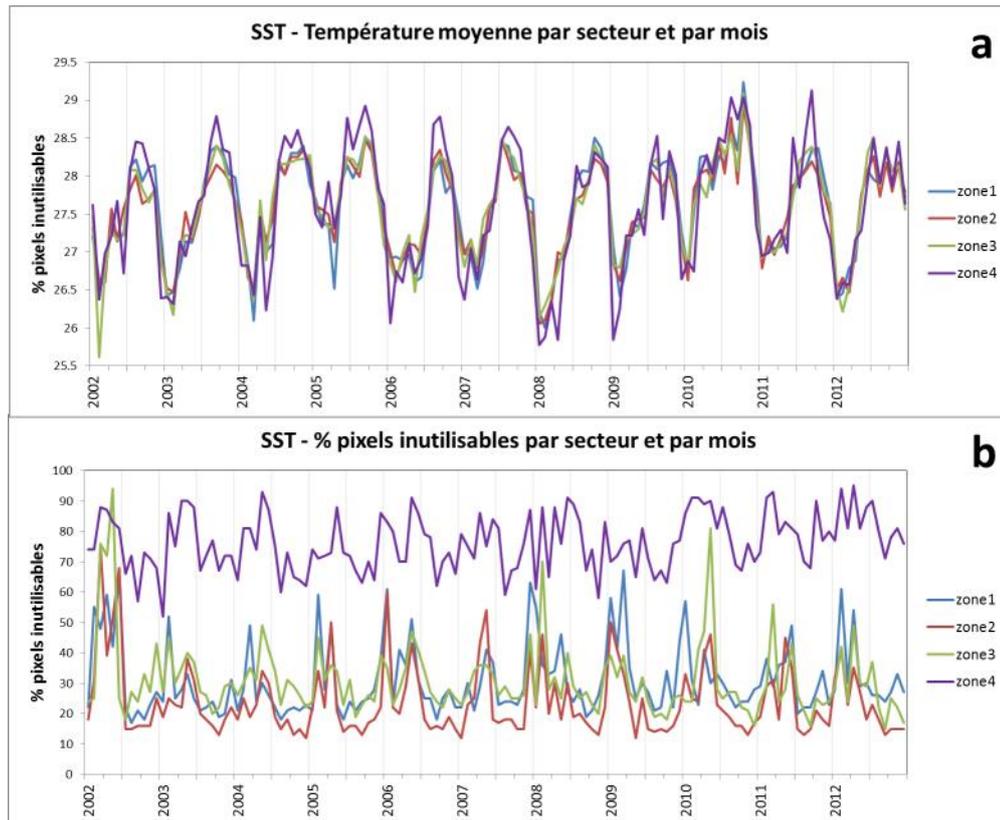


Figure 4.1 : Série temporelle des valeurs des moyennes mensuelles par zone DCE (a), et le pourcentage de pixels utilisés (b)

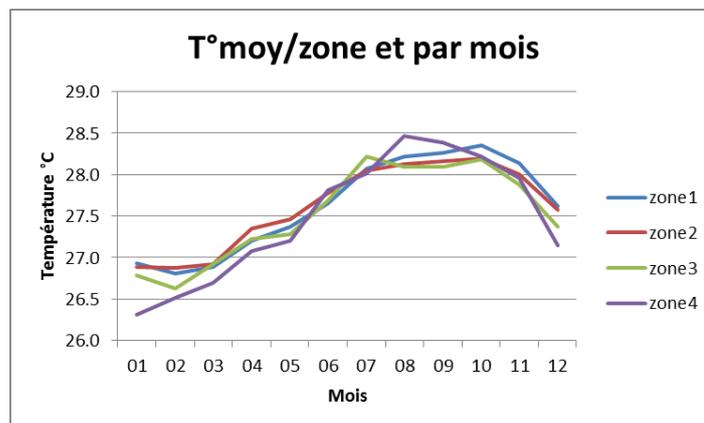


Figure 4.2 : Température moyenne par zone et par mois sur la période 2002-2012. Variation saisonnière

4.2. Chlorophylle_a (CHLA)

Moyennes annuelles et pluriannuelles

L'ensemble de valeurs moyennes en CHLA sur la période 2003-2014 se situe entre 1.5 et 4 µg/L. Les zones 1 à 3 présentent une tendance décroissante des concentrations en CHLA (figure 4.3). A l'opposé, la zone 4 montre une tendance croissante. Le pourcentage de pixels inutilisables pour le calcul des moyennes oscille entre 20% et 30% pour les zones 1 à 3 et entre 80% et 90% pour la zone 4 (figure 4.3).

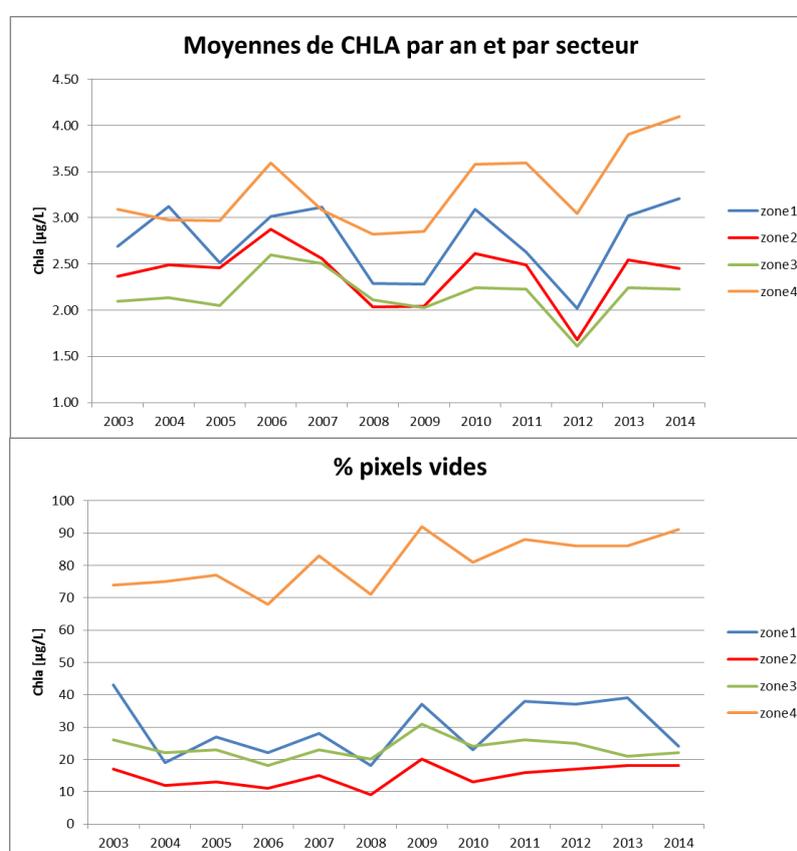


Figure 4.3 : Evolution des moyennes annuelles de CHLA par secteur et par année obtenues avec MODIS

Les valeurs pluriannuelles par zone sur la période 2003-2014 sont présentées sous la forme de « boîte à moustaches », où sont représentées les médianes et leur dispersion (figure 4.4). Nous observons une diminution des valeurs médianes de la zone 1 vers la zone 3 au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'embouchure de l'Amazone ; puis une augmentation, au-delà de celle de la zone 1, est observée pour la zone 4. Il faut cependant relativiser ces écarts car ils se situent dans une plage étroite de concentrations, où 50% de toutes les valeurs se situent entre 2.1 et 3.5 µg chla/L.

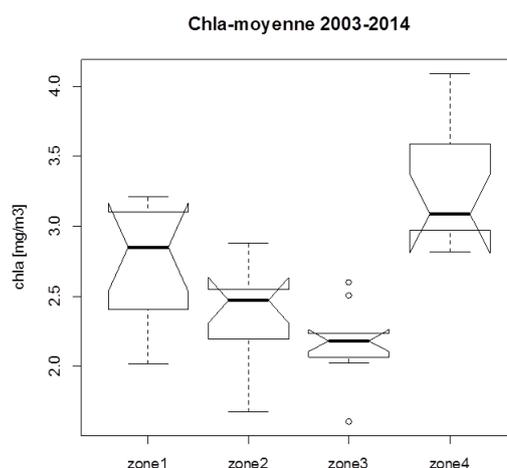


Figure 4.4 : Médianes pluriannuelles de CHLA par zone sur la période 2003-2014

Moyennes mensuelles

L'évolution des moyennes mensuelles par zone sur la période 2003-2014 (figure 4.5) met en évidence des valeurs minimales autour de 1.5 à 2 $\mu\text{g chla/L}$, et des maximales qui se situent entre 5 et 7 $\mu\text{g chla/L}$ selon les années.

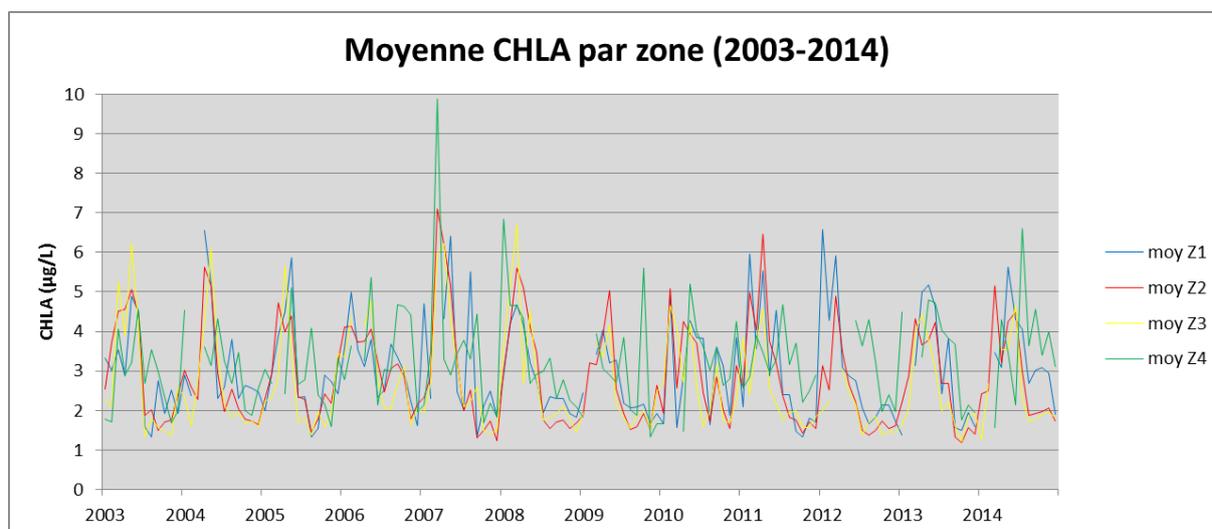


Figure 4.5 : Moyennes mensuelles de CHLA par zone sur la période 2003-2014

Les variations saisonnières de biomasse phytoplanctonique mises en évidence dans la figure 4.5 sont plus facilement observables dans la figure 4.6, où sont portées les moyennes mensuelles sur la période 2003-2014. De janvier à juin (saison humide) les valeurs moyennes de CHLA se situent au-dessus de 2.5 $\mu\text{g chla/L}$, et de juillet à décembre en dessous de cette valeur. Dans la zone 4 ce cycle saisonnier est moins marqué, probablement à cause du manque de pixels valides sur la bande côtière. Les pixels les plus visibles dans les images satellite de cette zone sont ceux qui se trouvent à l'embouchure du Maroni, là où les concentrations sont les plus fortes.

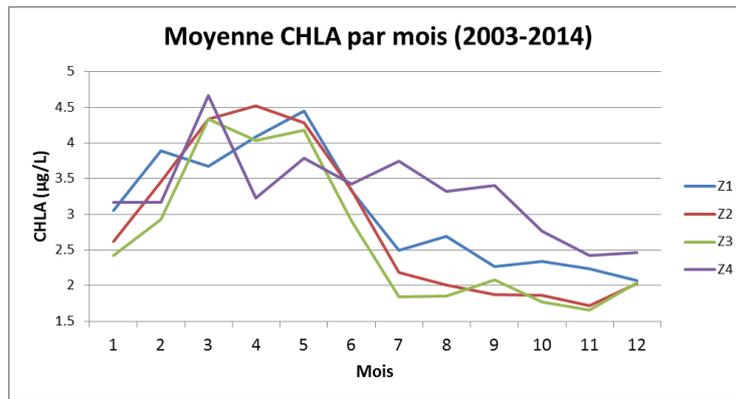


Figure 4.6 : Moyennes mensuelles en CHLA sur la période 2003-2014

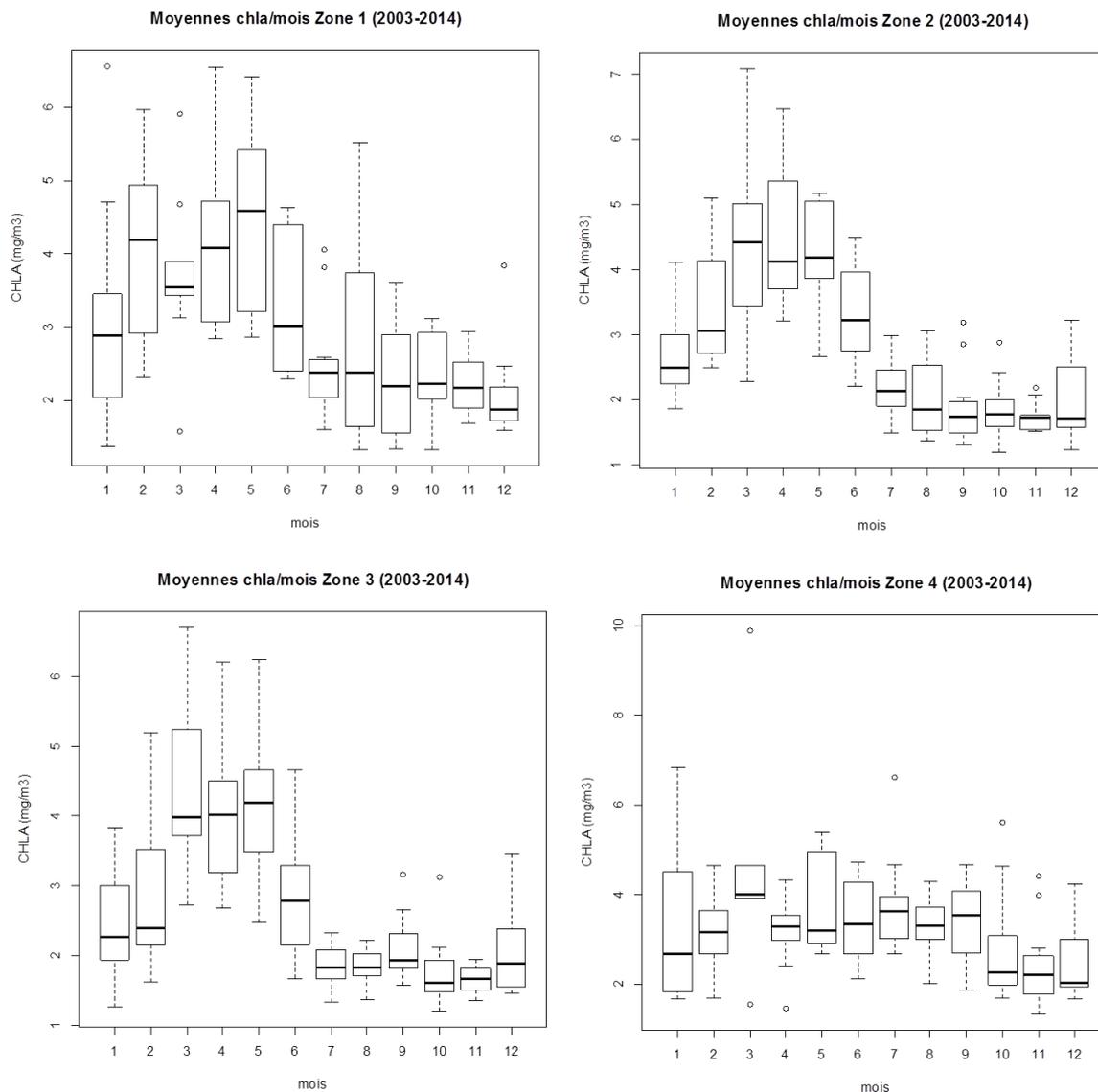


Figure 4.7 : Evolution des concentrations médianes de CHLA par mois sur chaque zone sur la période 2003-2014

Bien que dans la figure 4.6 nous observons l'évolution de la moyenne CHLA mois par mois sur la période 2003-2014, il n'est pas aisé de cerner la variabilité de ces mesures. La figure 4.7 présente les médianes de ces valeurs mensuelles avec la dispersion des valeurs mise en évidence par les boîtes à moustaches. Nous constatons alors une plus forte variabilité des valeurs lors de la saison humide.

4.3. Turbidité (TURBI)

Moyennes annuelles et pluriannuelles

A partir de 2010, les moyennes annuelles de turbidité présentent une faible variabilité avec une évolution similaire sur l'ensemble des zones (figure 4.8). Pendant cette période, les valeurs oscillent autour de 15 à 20 NTU. Entre 2003 et 2010 les écarts sont plus forts, avec un maximum de plus de 30 NTU dans la zone 1 et moins de 15 NTU pour la zone 3. En 2003, les plus fortes turbidités ont été observées dans la zone 4.

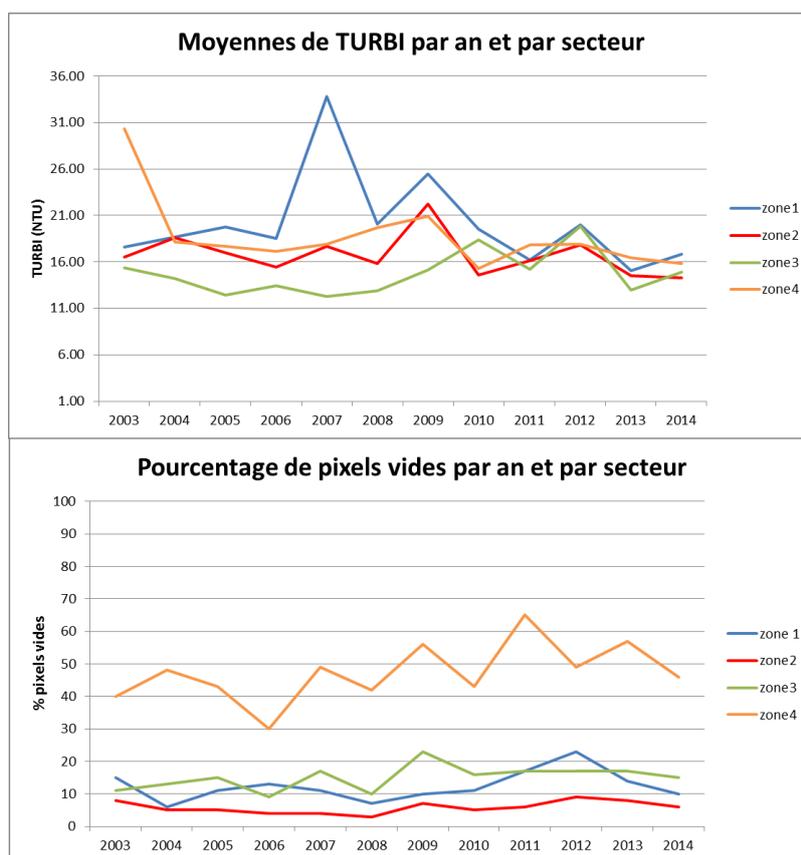


Figure 4.8 : Evolution des moyennes annuelles de turbidité par secteur et par année obtenues par satellite

Les valeurs pluriannuelles sur la période 2003-2014 sont présentées sous la forme de « boîtes à moustaches », où sont représentées les médianes et leur dispersion (figure 4.9). Nous observons une diminution des médianes au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'embouchure

de l'Amazone, puis on constate une augmentation de la médiane dans la zone 4. Ce même phénomène est observé pour la CHLA.

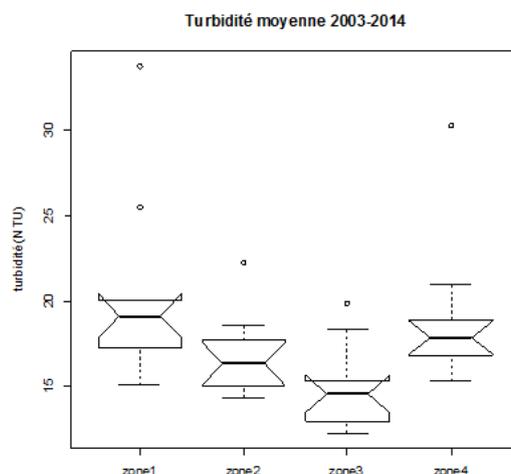


Figure 4.9 : Médiannes pluriannuelles de TURBI par zone sur la période 2003-2014

Le pourcentage de pixels non utilisables pour les zones 1 à 3 est de l'ordre de 10 à 20%, tandis que pour la zone 4 oscille entre 30 et 60%, avec une augmentation constante de ce pourcentage entre 2003 et 2014.

Moyennes mensuelles

L'évolution des moyennes mensuelles par zone sur la période 2003-2014 (figure 4.10) met en évidence des valeurs minimales autour de 2 NTU, et des pics maximaux qui se situent au-delà de 40 NTU. C'est le cas en 2007 et 2010 pour la zone 1 et en 2014 dans la zone 3.

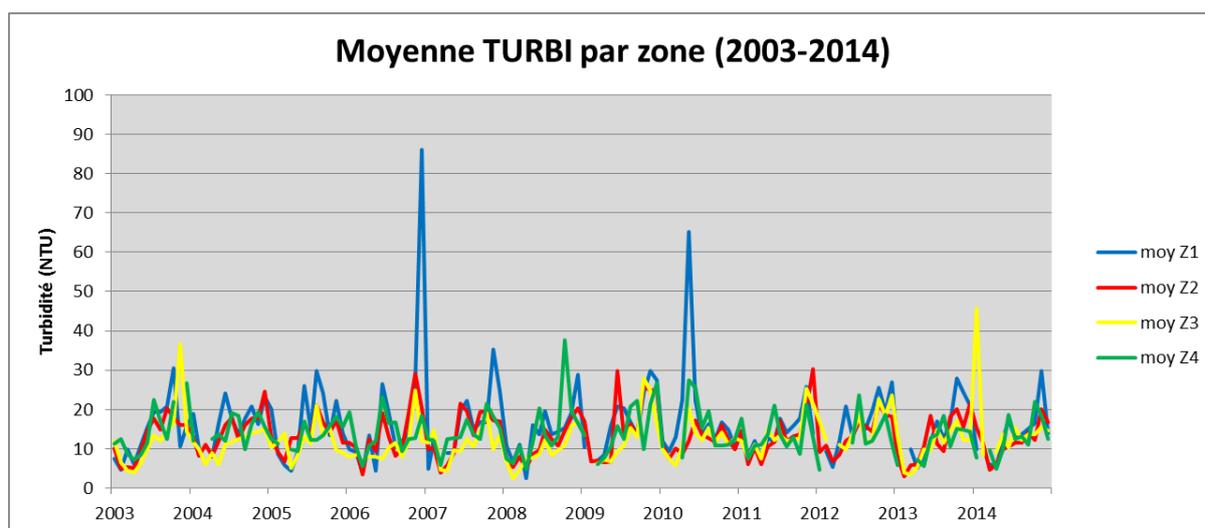


Figure 4.10 : Moyennes mensuelles de turbidité par zone sur la période 2003-2014

Les variations saisonnières de turbidité déjà mises en évidence dans la figure 4.10 sont plus facilement identifiables dans la figure 4.11, où sont portées les moyennes mensuelles sur la

période 2003-2014. En saison des pluies nous observons les plus faibles valeurs de turbidité pour toutes les zones, avec des valeurs oscillant autour de 5 à 7 NTU en mars. Puis les turbidités augmentent jusqu'au mois d'août, où les valeurs par zone varient entre 10 et 15 NTU en moyenne.

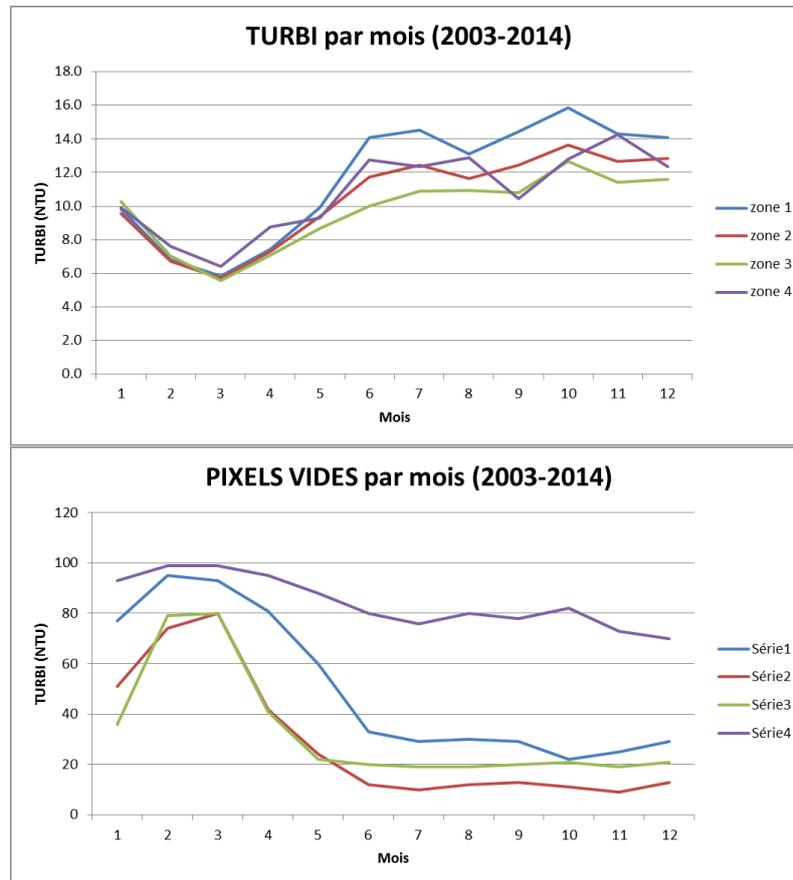


Figure 4.11 : Moyennes mensuelles de turbidité par zone sur la période 2003-2014

Bien que dans la figure 4.11 nous observons l'évolution mois par mois sur la période 2003-2014 des moyennes de la turbidité, il n'est pas aisé de cerner la variabilité de ces mesures. La figure 4.12 présente les médianes de ces valeurs mensuelles avec la dispersion des valeurs mise en évidence par les boîtes à moustaches. Nous constatons alors la plus forte variabilité de valeurs dans les zones 2 et 4.

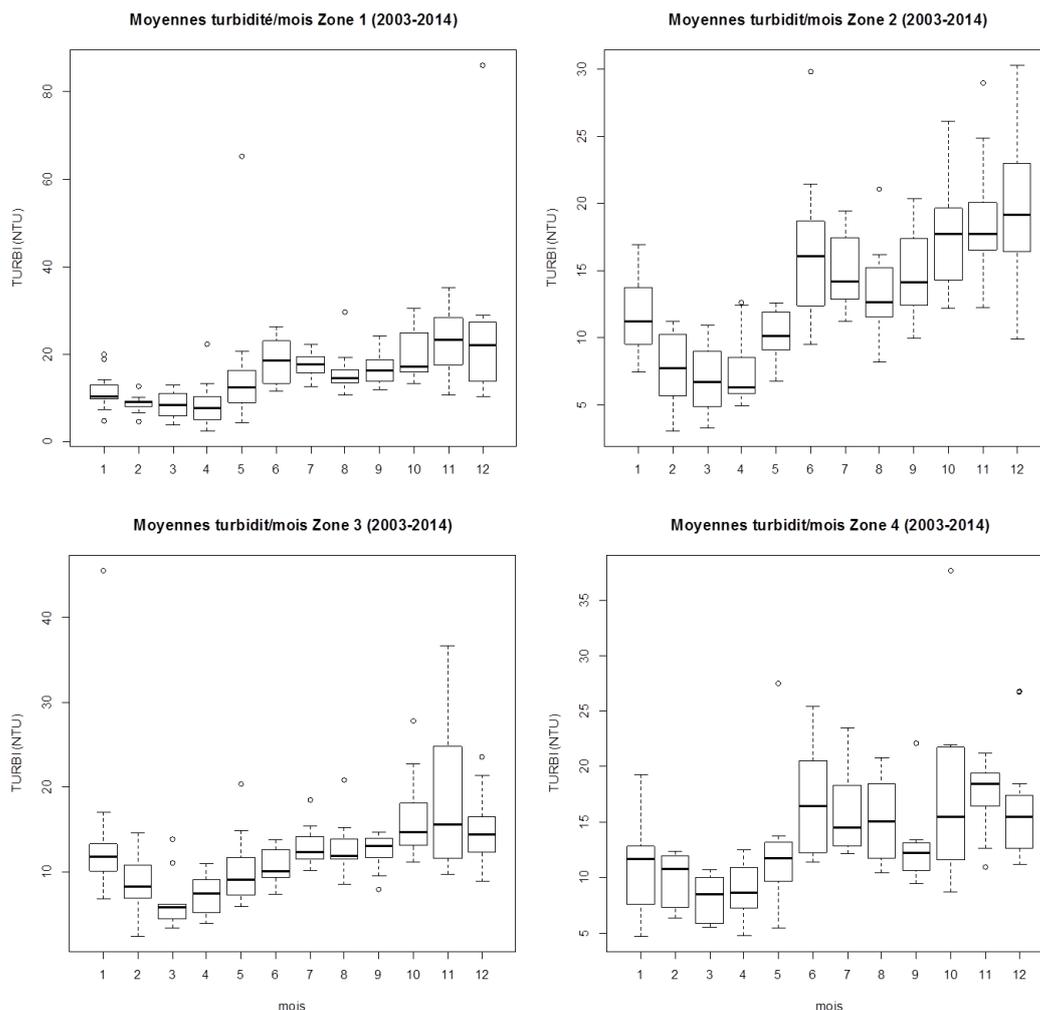


Figure 4.12 : Evolution des concentrations médianes de turbidité par mois sur chaque zone sur la période 2003-2014

4.4. Matières en suspension 'non algales' (MES)

Nous aborderons sommairement l'étude des matières en suspension minérales. Ce n'est pas un paramètre DCE et suit l'évolution de la turbidité, car celle-ci est peu influencée par les MES du phytoplancton. Ce paramètre est cependant nécessaire pour le calcul de la turbidité (chapitre 2.2.).

Moyennes annuelles et saisonnières

Sauf pour la zone 1, l'évolution des MES ressemble à celle observée pour la turbidité (figure 4.13). Un fort pic de 120 mg/L est constaté en 2005 dans la zone 1, puis un deuxième en 2010, d'environ 80 mg/L. L'exploitation des pixels de l'image reste égale à celle du paramètre TURBI, avec une zone 4 qui présente un pourcentage entre 40 et 60% de pixels vides, avec une augmentation de ce taux entre 2003 et 2014.

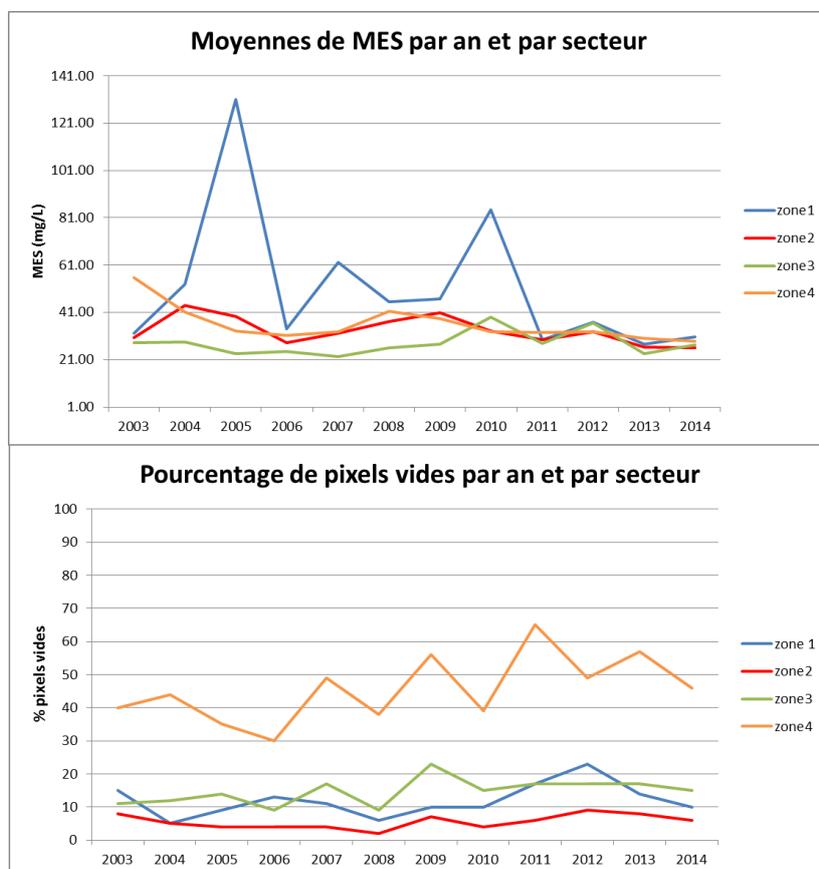


Figure 4.13 : Evolution des moyennes annuelles de MES et des pixels vides par secteur et par année obtenues par satellite

En saison de pluies nous observons les plus faibles valeurs de MES pour toutes les zones, avec au mois de mars des valeurs de 10 mg/L (figure 4.14). Puis, les MES augmentent jusqu'au mois d'août, où les valeurs par zone varient entre 20 et 25 mg/L.

Comme pour la turbidité, c'est en saison humide que sont observées les plus faibles valeurs de MES près des côtes. C'est également en saison humide que manquent les pixels les plus côtiers, comme le montre le pourcentage de pixels vides de la figure 4.14.

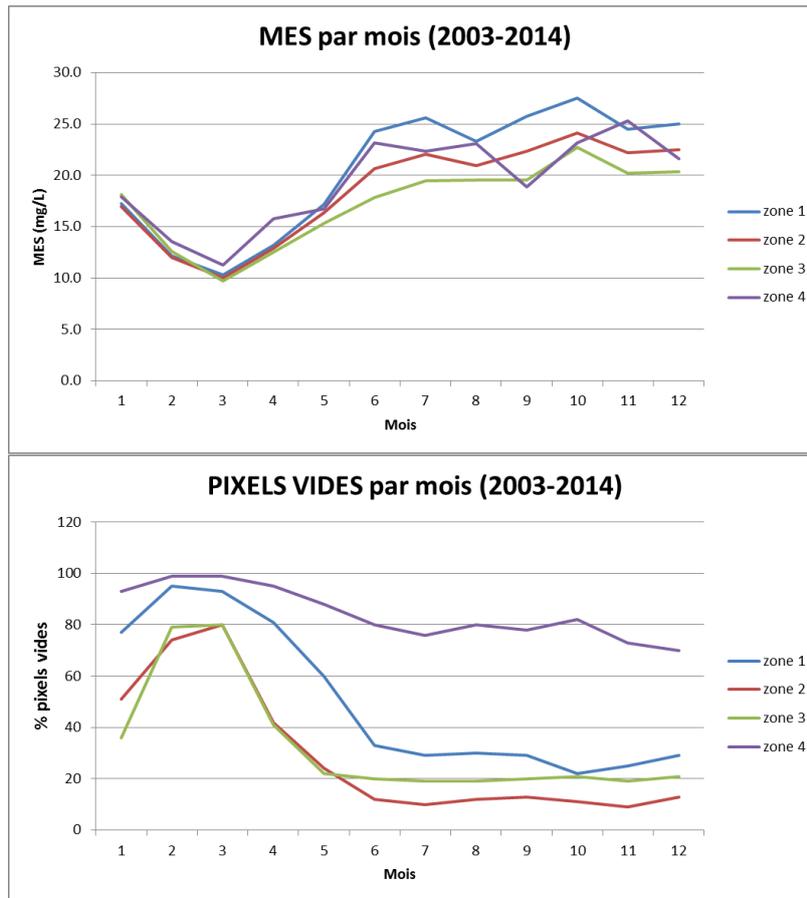


Figure 4.14 : Moyennes mensuelles en MES et le pourcentage des pixels vides sur la période 2003-2014

5.- Percentile 90 (P90)

Le percentile 90 est la métrique adoptée par la DCE pour la mesure de la chlorophylle et la turbidité. Il est calculé sur la durée d'un plan de gestion de 6 ans. Il se situe entre la moyenne et le maximum, mais l'avantage de cette mesure est d'écrêter les valeurs extrêmes (10% des valeurs), permettant ainsi une meilleure lisibilité sur l'évolution des cycles. Il devient alors intéressant d'étudier l'évolution de ce paramètre année par année, puis sur un plan de gestion comme prévu par la DCE. En Guyane, ceci est possible grâce au satellite, qui permet d'obtenir un grand nombre de valeurs. Avec les données issues des prélèvements annuels *in situ*, le nombre d'analyses devient insuffisant pour calculer cette métrique correctement sur un an.

Les cartes du P90 CHLA et le P90 TURBI annuelles, de 2003 à 2014, ainsi que celles du plan de 6 ans entre 2009 et 2014 sont visibles dans les annexes 3 et 4.

5.1. Percentile 90 CHLA (P90 CHLA)

Moyennes annuelles du P90 CHLA

Sur la période 2003-2014, le P90 CHLA suit de près l'évolution des concentrations moyennes en CHLA (figure 4.3) avec un décalage des valeurs vers le haut (figure 5.1).

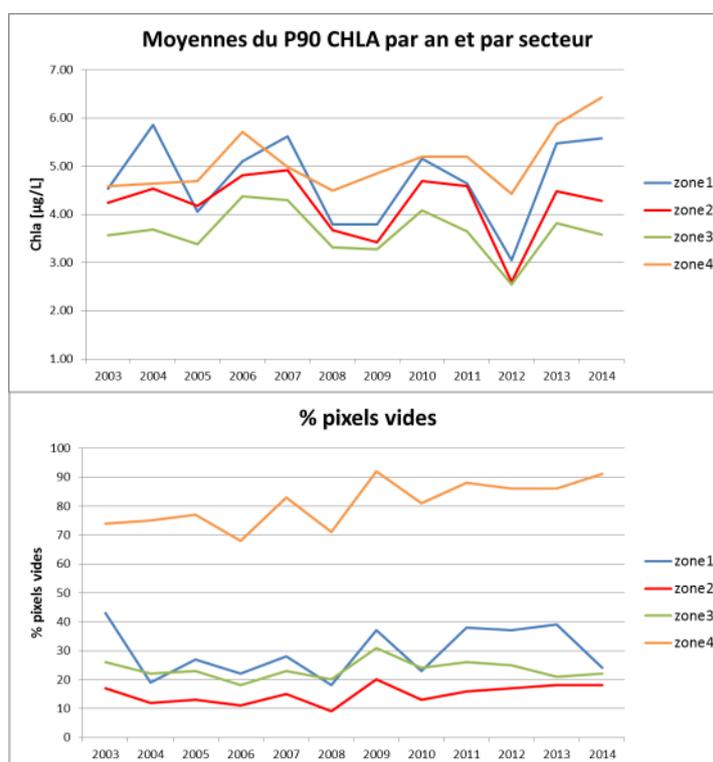


Figure 5.1 : Moyennes annuelles du P90 CHLA par zone et par an sur la période 2003-2014

Les mêmes réflexions émises pour les moyennes de CHLA (chapitre 4.2) concernant l'évolution des zones ainsi que le faible nombre de pixels disponibles pour la zone 4, sont également

valables pour le P90 CHLA. Les valeurs du P90 CHLA se situent entre 3 et 6 $\mu\text{g chla/L}$. Les médianes pluriannuelles du P90 CHLA par zone se situent entre 3.6 et 5 $\mu\text{g chla/L}$ (figure 5.2), avec 50% de valeurs situées entre 3.4 et 5.5 $\mu\text{g chla/L}$.

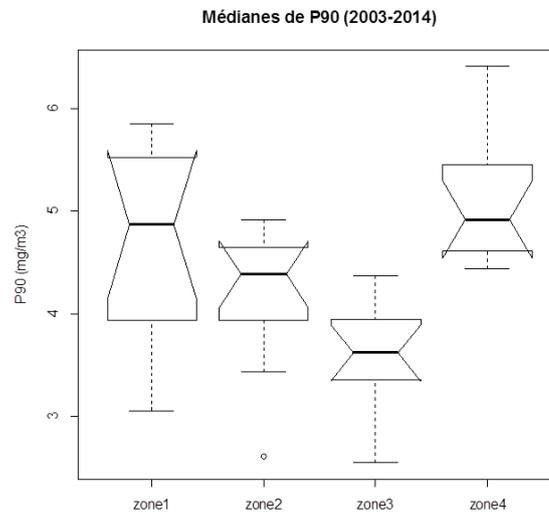


Figure 5.2 : Médianes pluriannuelles de P90 CHLA par zone sur la période 2003-2014

Evolution du P90 CHLA

Les biomasses chlorophylliennes des côtes guyanaises restent relativement élevées malgré les fortes turbidités. Les concentrations constatées sont du même ordre que celles que l'on trouve couramment dans les eaux côtières de la Manche et de l'Atlantique en métropole.

En prenant les valeurs des moyennes de CHLA obtenues par MODIS entre 2003 et 2014, nous pouvons calculer le P90 CHLA 'glissant' par zone sur sept tranches de 6 ans (figure 5.3).

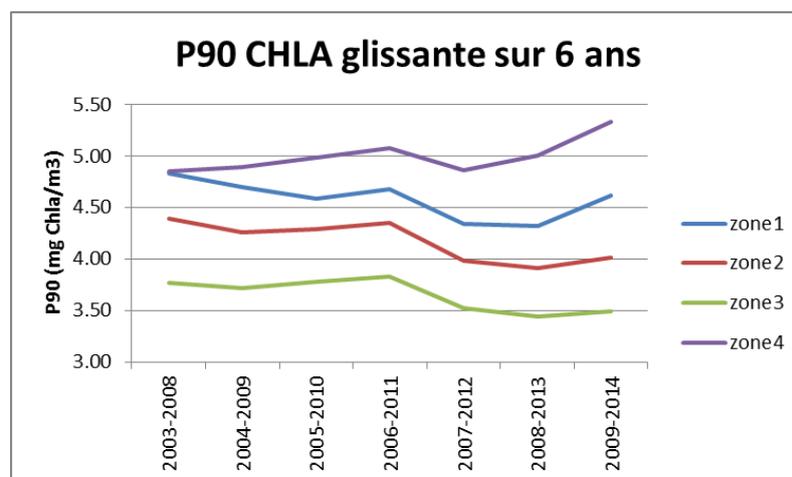


Figure 5.3 : P90 CHLA sur période glissante de 6 ans entre 2003 et 2014

L'évolution du P90 CHLA ainsi calculé suit celle des moyennes du P90 CHLA annuel (figure 5.1), avec une tendance décroissante des valeurs pour les zones 1 à 3 et une augmentation pour la zone 4.

Ces plus fortes valeurs de la zone 4 pourraient être expliquées par plusieurs facteurs :

- La plus faible largeur de la zone 4, qui ne compte que 1.85 km environ sur toute sa longueur. Les plus fortes concentrations sur l'embouchure du Maroni ne sont alors pas moyennées avec les plus faibles, situées plus au large comme c'est le cas dans les autres zones,
- La taille du pixel des capteurs couleur de l'eau, d'environ 1 km, laisse peu de marge pour un échantillonnage efficace de la zone très côtière. La largeur de la zone 4 est au mieux de 2 pixels,
- Le masque « terre » utilisé est fortement soumis aux aléas de l'évolution de la frange littorale et des pixels sont ainsi perdus,
- Le caractère très côtier rend plus sensible les images satellite aux aérosols et aux photons réfléchis sur la terre.

Comparaison du P90 CHLA avec les données *in situ*

Nous avons pu réaliser des comparaisons entre les valeurs calculées du P90 CHLA obtenues avec les données satellite et celles obtenues lors de l'échantillonnage des masses d'eau DCE en 2013 (figure 5.4). Ces valeurs concernent le calcul du P90 CHLA obtenues avec les analyses en CHLA réalisées par le laboratoire LAMA de l'IRD, des analyses réalisées par HPLC par le laboratoire DHI au Danemark, et celles du P90 CHLA en 2013 obtenues à partir des images MODIS (annexe 3).

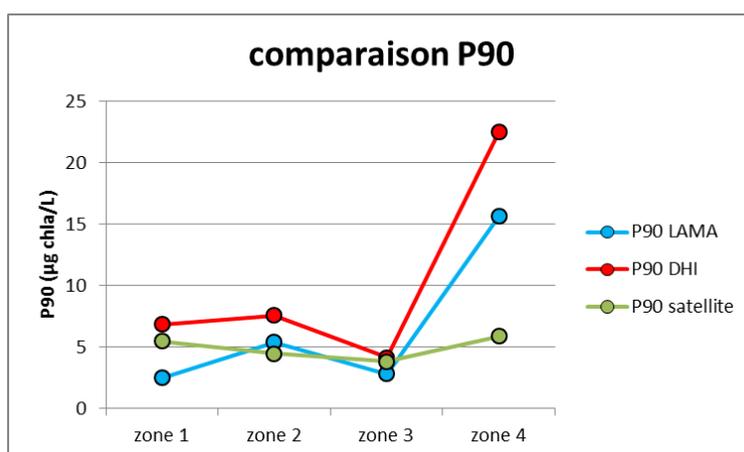


Figure 5.4 : Valeurs du P90 CHLA en 2013 calculées avec trois jeux de données. Deux issues des analyses des échantillons et un des données de la caméra MODIS

Les valeurs des zones 1 à 3 restent cohérentes avec ce que l'on a déjà vu dans les chapitres précédents concernant les moyennes de CHLA et du P90 CHLA. Elles se situent dans une plage restreinte de valeurs, entre 3 et 7 µg chla/L environ. La zone 4 présente de fortes valeurs issues des analyses, bien au-delà de celles que l'on a pu constater dans l'étude par satellite.

Ceci s'explique par le fait que cette zone 4 n'est échantillonnée qu'au point « Les Hattes », qui se situe dans l'embouchure du Maroni, là où les plus fortes valeurs sont constatées. Ces valeurs n'étant pas moyennées avec celles d'autres points situés plus au large dans cette masse d'eau (ce qui est le cas pour le satellite), elles restent très fortes et ne représentent pas la masse d'eau dans sa globalité. De plus, le calcul du P90 CHLA de 2013 *in situ*, compte trop peu de valeurs, ce qui le rend peu robuste.

5.2. Percentile 90 TURBI (P90 TURBI)

Moyennes annuelles du P90 TURBI

L'évolution annuelle du P90 TURBI des zones 1 et 2 sur la période 2003-2014 ne présente pas de tendance significative (figure 5.5). La zone 4 diminue légèrement entre 2003 et 2014 et la zone 3 présente une légère augmentation. Un gradient décroissant de turbidité de la zone 1 vers la zone 3 est bien mis en évidence avec le P90 TURBI. La zone 4 se situe en général entre les valeurs des zones 2 et 3.

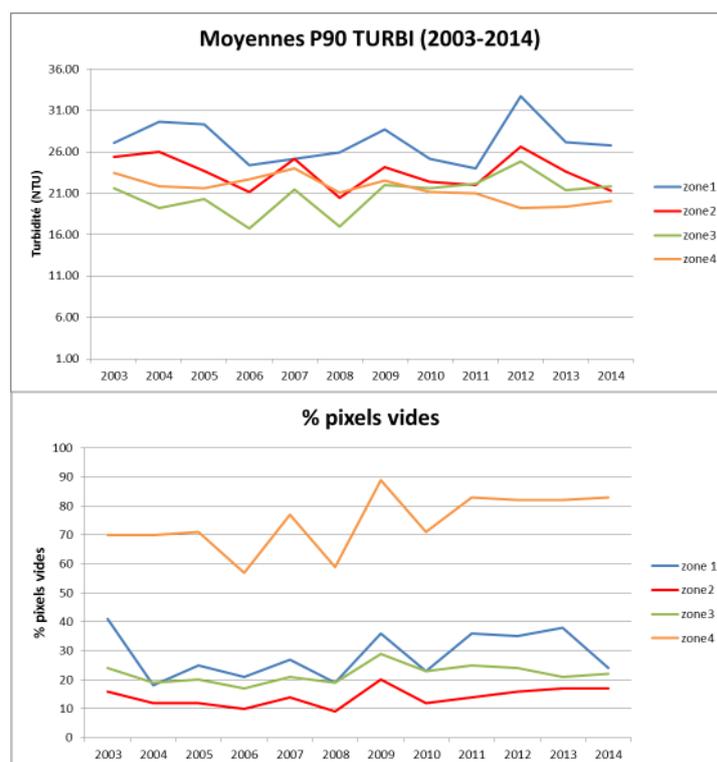


Figure 5.5 : Moyennes annuelles du P90 TURBI par zone et par an sur la période 2003-2014

Les mêmes réflexions émises pour le P90 CHLA, concernant le faible nombre de pixels disponibles pour la zone 4, sont valables pour le P90 TURBI. Le pourcentage de pixels vides se situe entre 60 et 90%, avec une tendance croissante entre 2003 et 2014 (davantage de nuages ?). Les valeurs du P90 TURBI se situent entre 16 et 32 NTU. Les médianes pluriannuelles

par zone, et leur dispersion sont présentées dans la figure 5.6. Dans cette figure le gradient sud-est vers nord-ouest est clairement présenté.

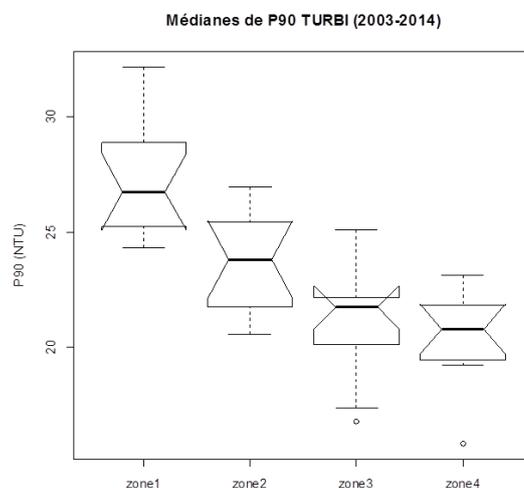


Figure 5.6 : Médianes pluriannuelles de P90 TURBI par zone sur la période 2003-2014

Evolution du P90 TURBI

Les valeurs de turbidité moyenne des côtes guyanaises sont du même ordre de grandeur que celles que l'on trouve couramment dans les estuaires de la façade Manche-Atlantique métropolitaine.

En prenant les valeurs des moyennes de TURBI obtenues par MODIS entre 2003 et 2014, nous pouvons calculer le P90 TURBI glissant sur sept tranches de 6 ans (figure 5.7). Nous observons dans cette figure, les mêmes tendances que dans les moyennes annuelles présentées dans la figure 5.5. Il est étonnant de constater le croisement des zones 3 et 4 au niveau de la période 2007-2012.

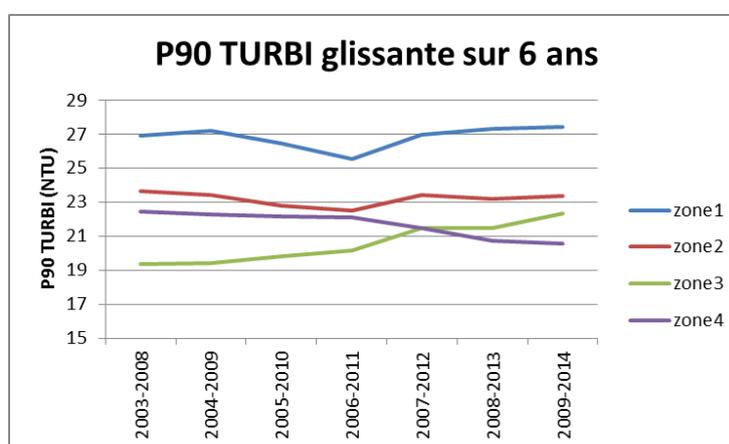


Figure 5.7 : P90 TURBI sur période glissante de 6 ans entre 2003 et 2014

Comparaison du P90 TURBI avec les données *in situ*

Sur la base des données acquises par le satellite et celles obtenues lors de l'échantillonnage des masses d'eau DCE en 2013, nous avons pu réaliser des comparaisons entre les valeurs calculées du P90 TURBI (tableau 5.1 et figure 5.8). Ces valeurs concernent le calcul du P90 TURBI effectué avec les analyses du laboratoire LAMA de l'IRD et celles enregistrées avec la sonde de terrain lors de la prise des échantillons.

Tableau 5.1 : Valeurs du P90 TURBI, calculées avec le satellite, et avec les résultats des analyses disponibles pour l'année 2013. « n » = nombre de valeurs servant au calcul du P90 TURBI

		zone 1	zone 2	zone 3	zone 4
LAMA	n	8	11	12	6
LAMA	P90 (NTU)	800	57	23	782
SATELLITE	n	151	751	244	25
SATELLITE	P90 (NTU)	27.15	23.62	21.41	19.37

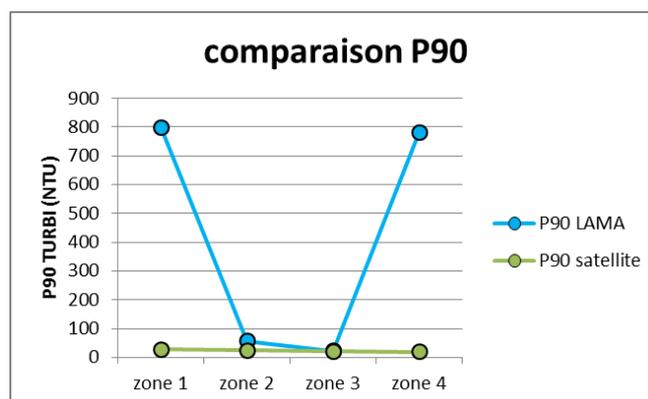


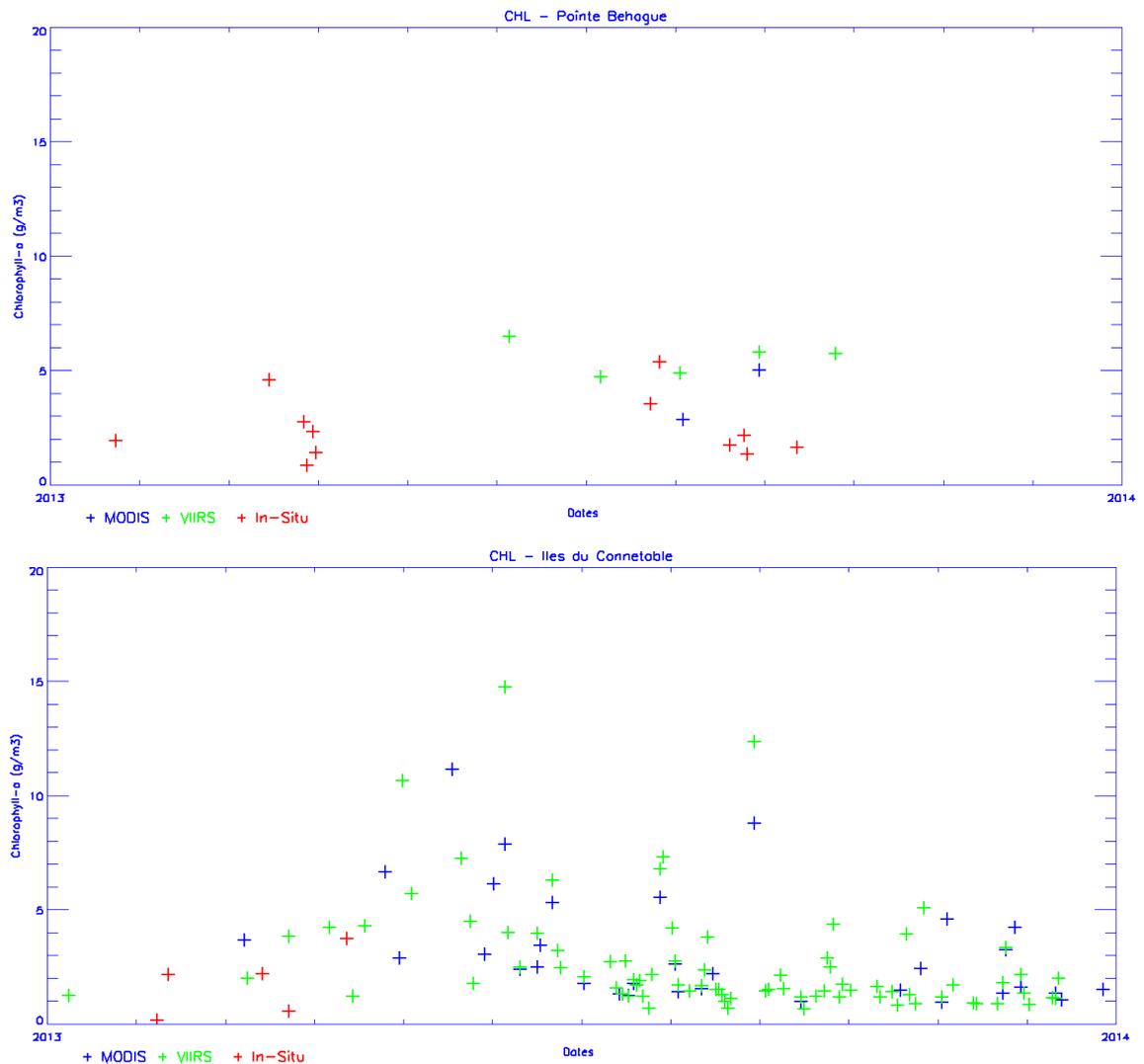
Figure 5.8 : Valeurs du P90 TURBI en 2013 calculées selon les analyses des échantillons et les données satellite

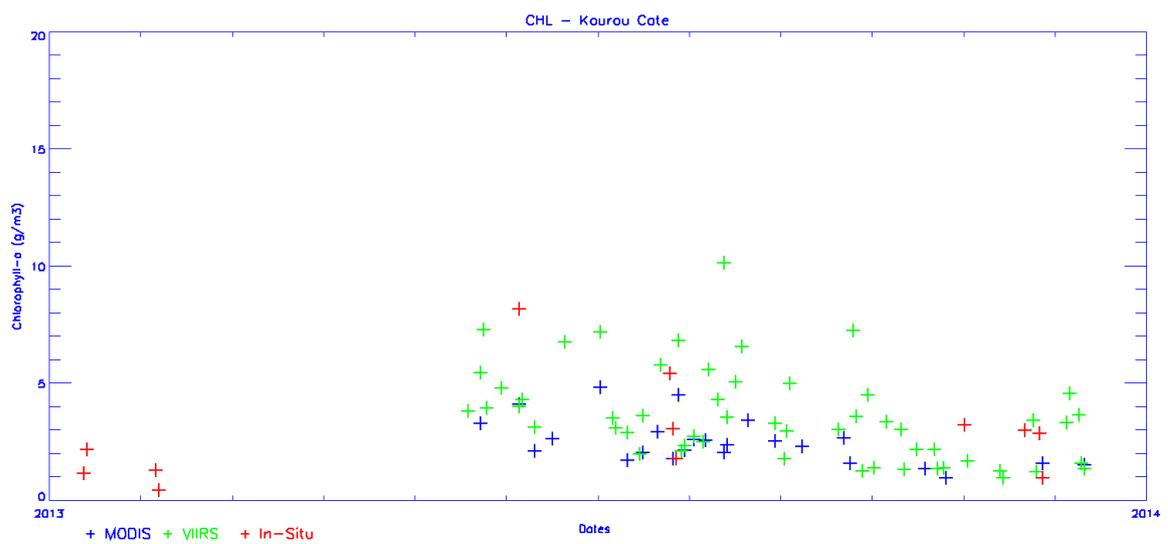
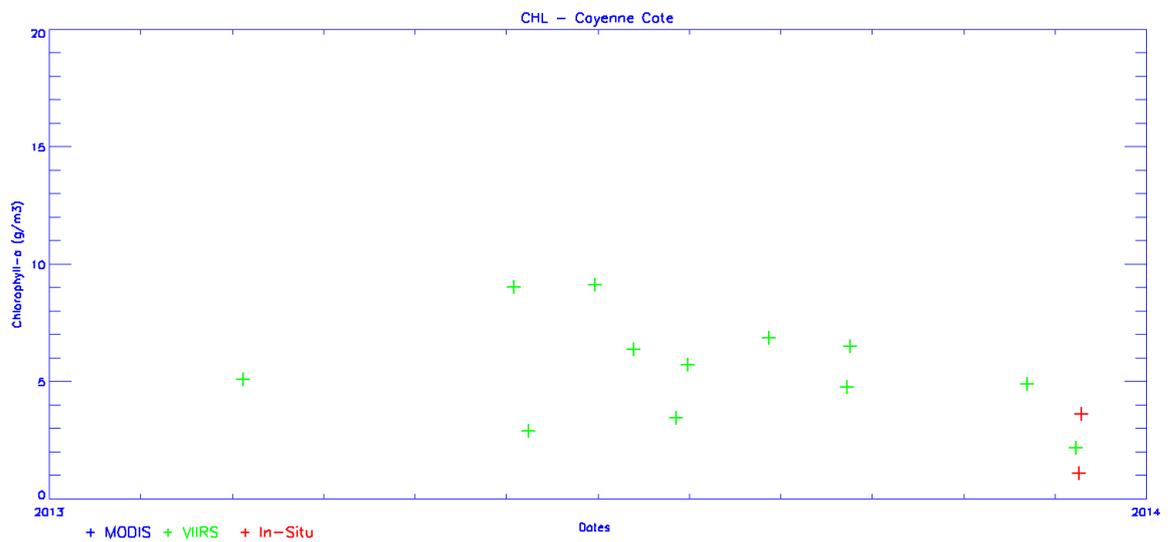
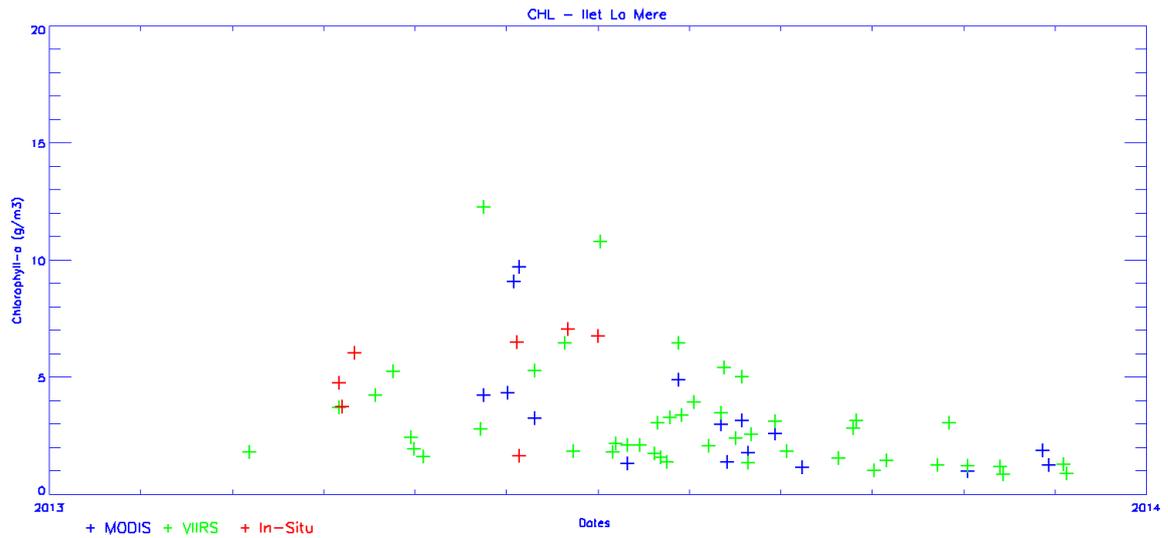
Nous pouvons observer, dans les zones 1 et 4 (figure 5.8), de forts écarts de valeurs selon la méthode utilisée. Sur ces deux zones nous ne disposons que de 8 et 6 valeurs, ce qui est insuffisant pour un calcul de P90. D'autre part, les points « Les Hattes » et « Béhague » ne sont pas représentatifs de la masse d'eau côtière ; le point « Béhague » étant situé sur un banc de vase fluide.

6.- Validation des données satellite

Pour valider l'utilisation des images satellite de cette étude, nous avons comparé les données de la surveillance DCE *in situ* de l'année 2013 fournies par l'OEG et la DEAL (figure 2.3) avec celles obtenues par le satellite (figures 6.1 et 6.2).

Etant donné la faible quantité de données *in situ* disponibles la seule comparaison possible avec les données satellite est une approche de vraisemblance visuelle à partir d'un graphique avec l'évolution temporelle en abscisses.





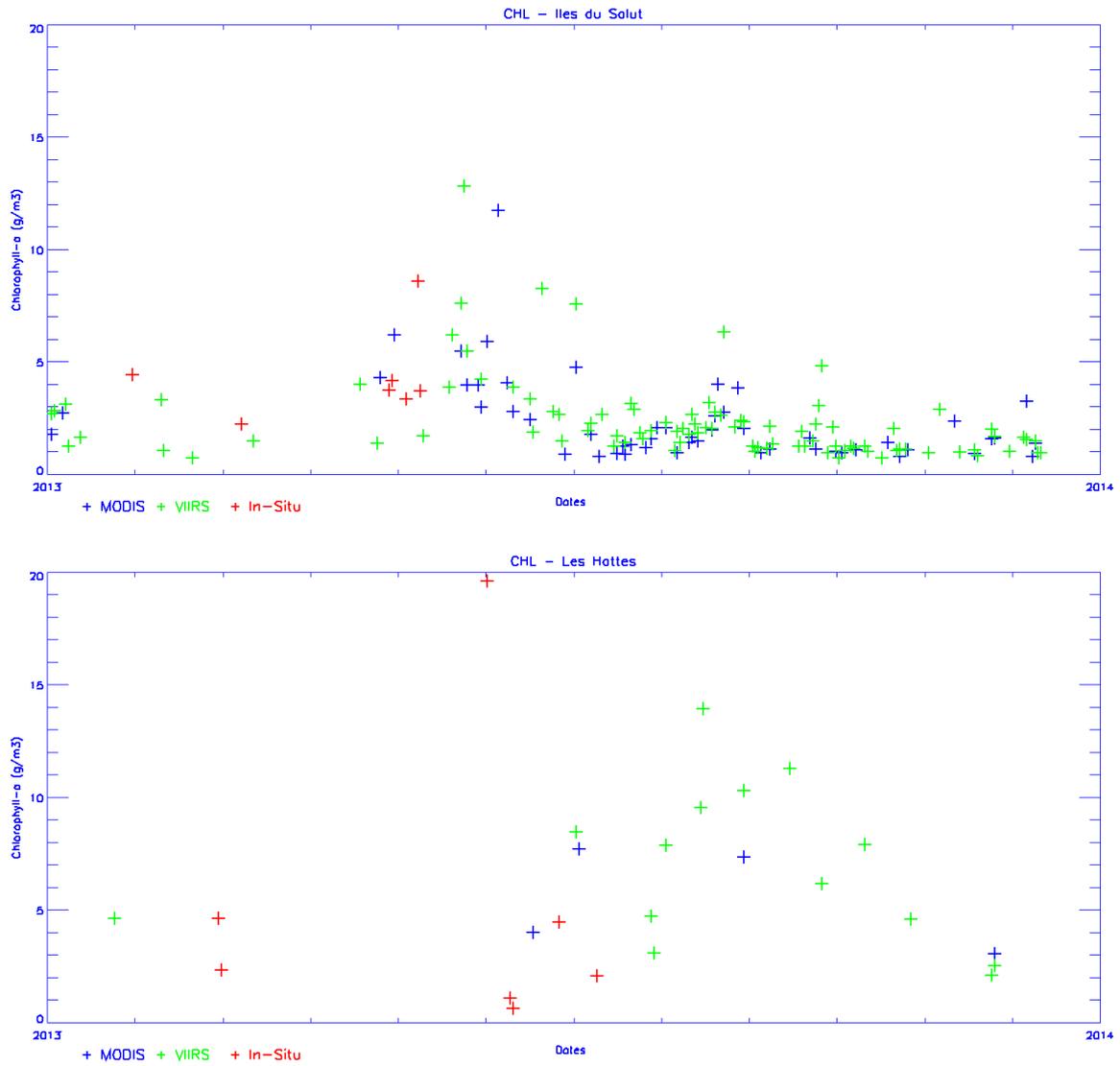
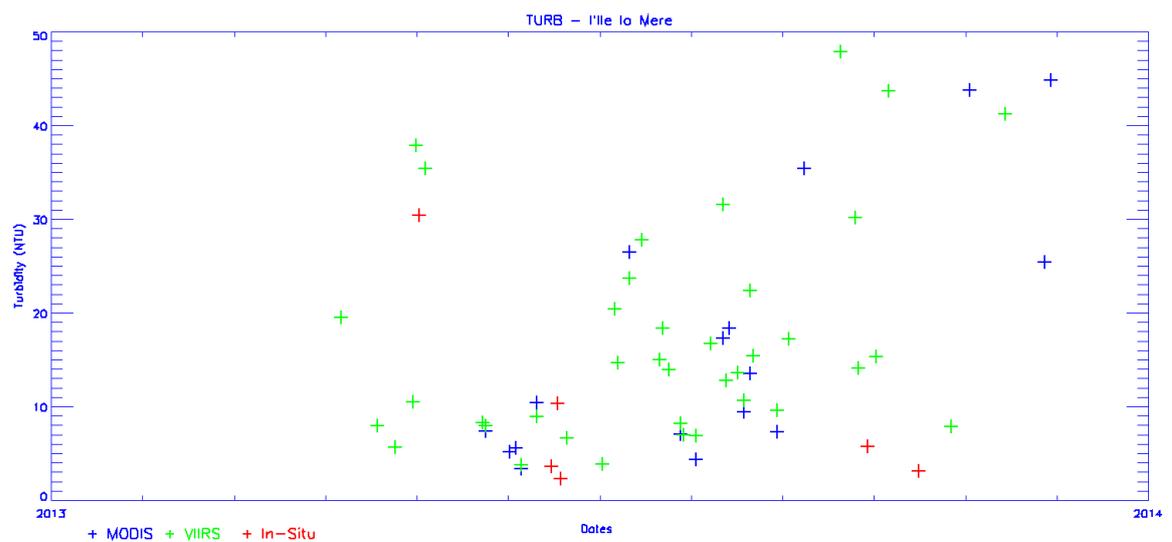
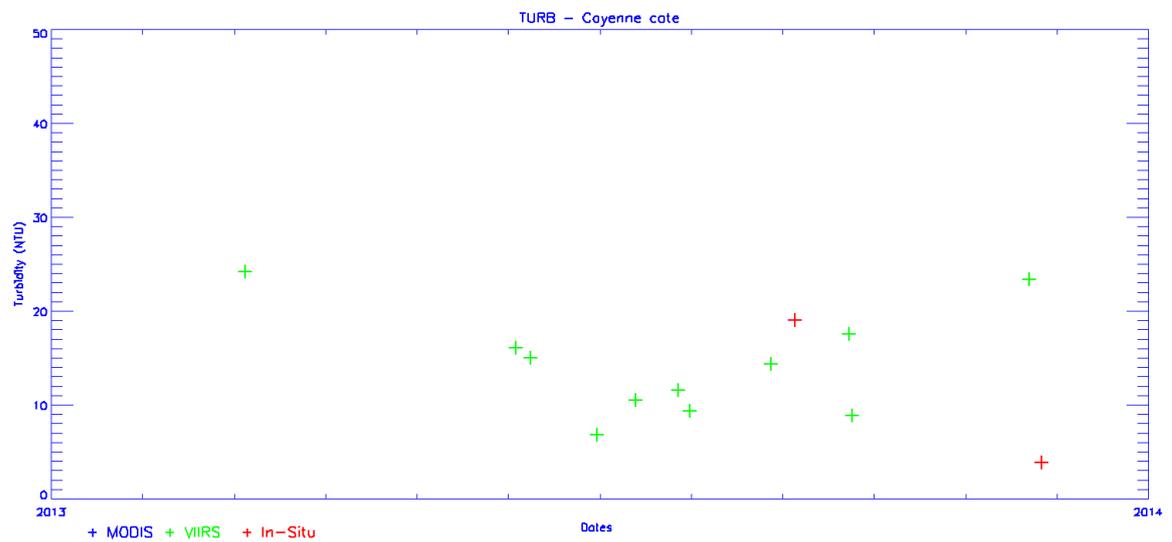
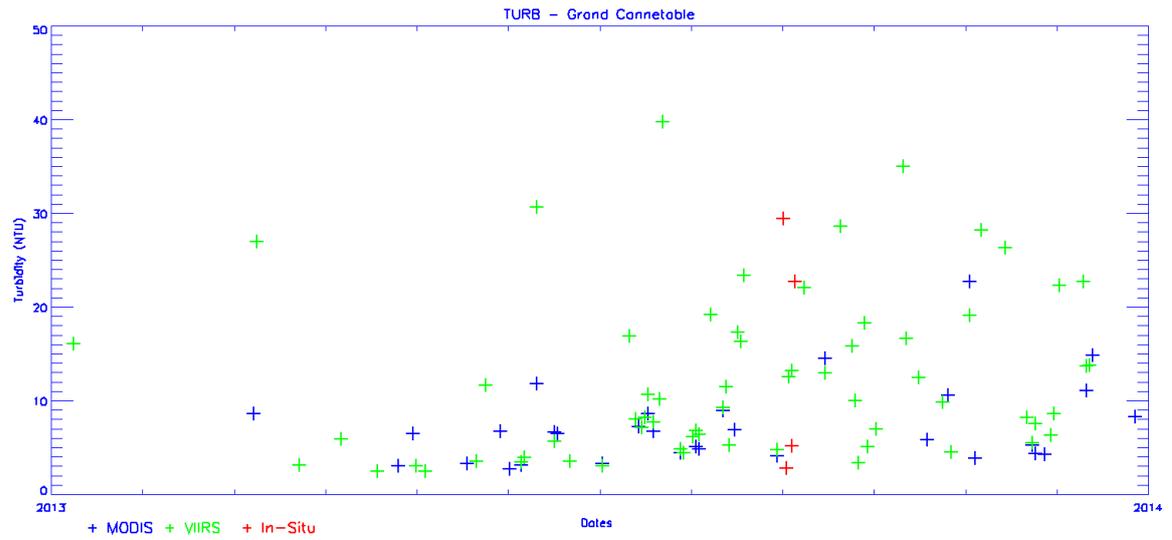


Figure 6.1 : Comparaison des données de CHLA in situ et satellite par point de surveillance en 2013



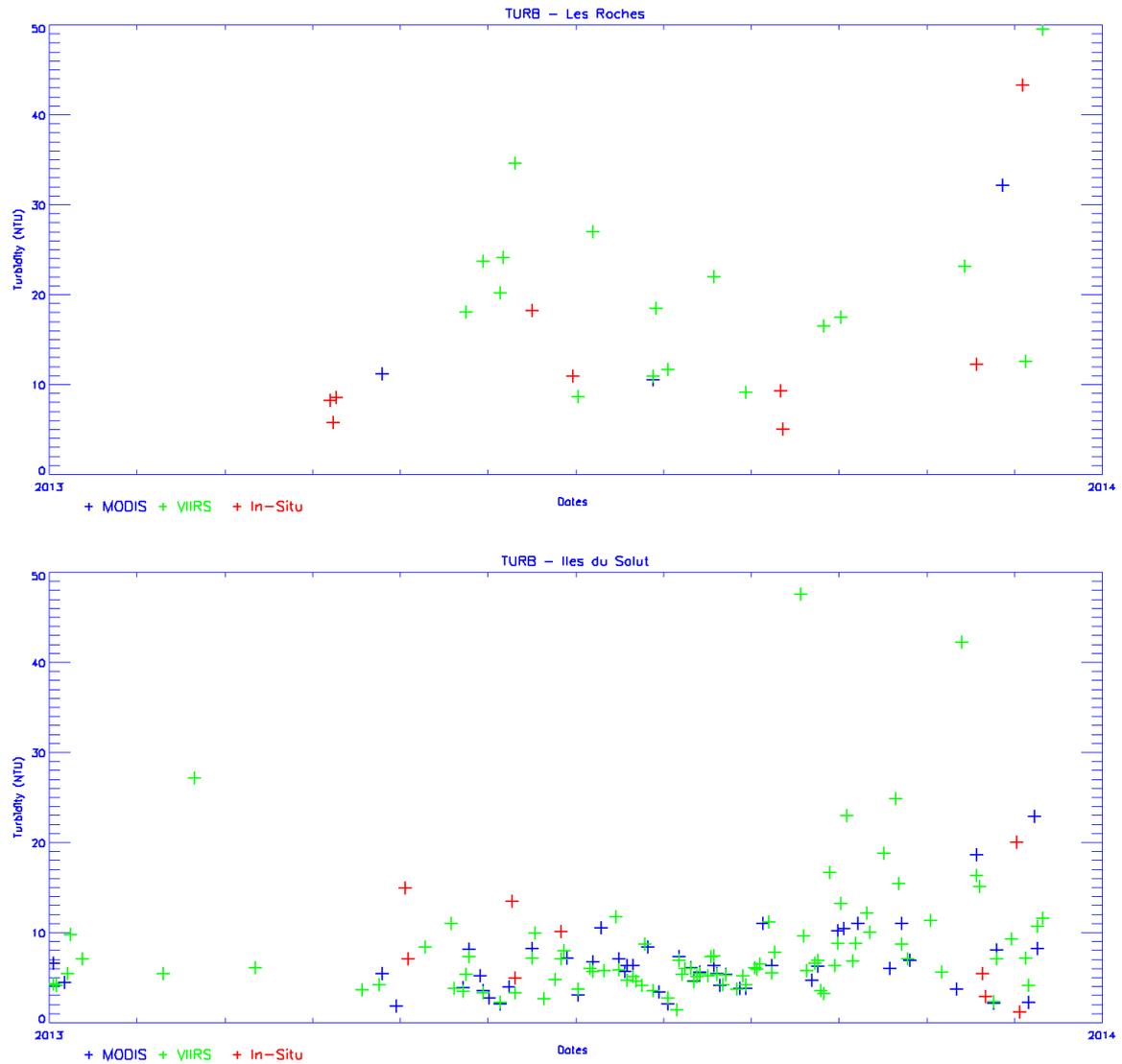


Figure 6.2 : Comparaison des données de TURBI *in situ* et satellite par point de surveillance en 2013

Les données VIIRS ont contribué à la couverture temporelle de l'année 2013. Nous constatons alors une bonne adéquation entre mesures *in situ* et données satellite, ce qui permet d'envisager l'utilisation de ces images dans les traitements et calculs.

7.- Evaluation de l'utilisation des images à haute résolution (300m)

C'est dans la zone très côtière que les images satellite présentent des difficultés. Aérosols, évolution rapide du trait de côtes et bancs de vase qui se déplacent, font que les premiers kilomètres peuvent manquer d'information. La résolution satellite de 1 km par pixel peut alors présenter des limites, car nous n'aurons que 2 pixels au mieux sur cette bande côtière de 1 mille nautique.

Les images avec une plus forte résolution pourraient améliorer la couverture des zones plus côtières. Dans ce chapitre nous utiliserons des images MERIS avec une résolution de 300m pour l'obtention des moyennes de chlorophylle et turbidité. Cette résolution pourrait également permettre d'aborder l'évolution des masses d'eau de transition (MET). Tout au moins pour les estuaires les plus larges (Maroni, Oyapock et Approuague).

Masquage de pixels côtiers avec MERIS

Le masquage de pixels côtiers par l'ESA dans les images MERIS (1 km et 300m) semble moins pénalisant que celui de la NASA avec MODIS. Il permet d'améliorer l'échantillonnage et d'obtenir davantage de pixels. Nous avons procédé au même traitement des images TIFF pour les moyennes annuelles de la CHLA à 1 km de résolution avec les deux caméras. Nous constatons alors, que le pourcentage de pixels vides dans les images MERIS est sensiblement inférieur à celui des images MODIS (tableau 7.1). Les images MERIS à 300m profitent de ce même masquage et donc d'une meilleure couverture spatiale.

Tableau 7.1 : Comparaison du taux d'utilisation des pixels par MODIS et MERIS (1km) lors du calcul de la chlorophylle moyenne annuelle (2003-2009)

		CHLA moyenne (2003-2009)	
		Pixels OK	% pixels vides
Zone 1	MODIS	178	28
	MERIS	235	3
Zone 2	MODIS	778	14
	MERIS	903	< 1
Zone 3	MODIS	238	23
	MERIS	304	1
Zone 4	MODIS	32	77
	MERIS	125	12

Moyennes annuelles de CHLA – MERIS 300m Vs. MODIS 1 km

Afin d'évaluer la pertinence des images à 300m dans le suivi des MEC DCE en Guyane, nous avons comparé les moyennes annuelles en CHLA obtenues avec MERIS (300m) à celles de MODIS (1 km). Avec les images MERIS le nombre de pixels utilisables augmente d'un facteur quinze, ce qui rend plus robustes les moyennes (tableau 7.2). La moyenne en CHLA de la zone 4, qui présentait des plus fortes concentrations avec les images MODIS, se situe avec MERIS dans le gradient décroissant est-ouest (figure 7.1). Le fait d'intégrer les pixels côtiers, moins productifs que ceux de l'embouchure du Maroni, a eu comme conséquence de diminuer la moyenne de la zone 4.

Tableau 7.2 : Nombre maximum de pixels disponibles avec la camera MODIS (1 km) et MERIS (300m)

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
MERIS 300m →	3895	14430	4955	2271
MODIS 1 km →	246	904	310	145

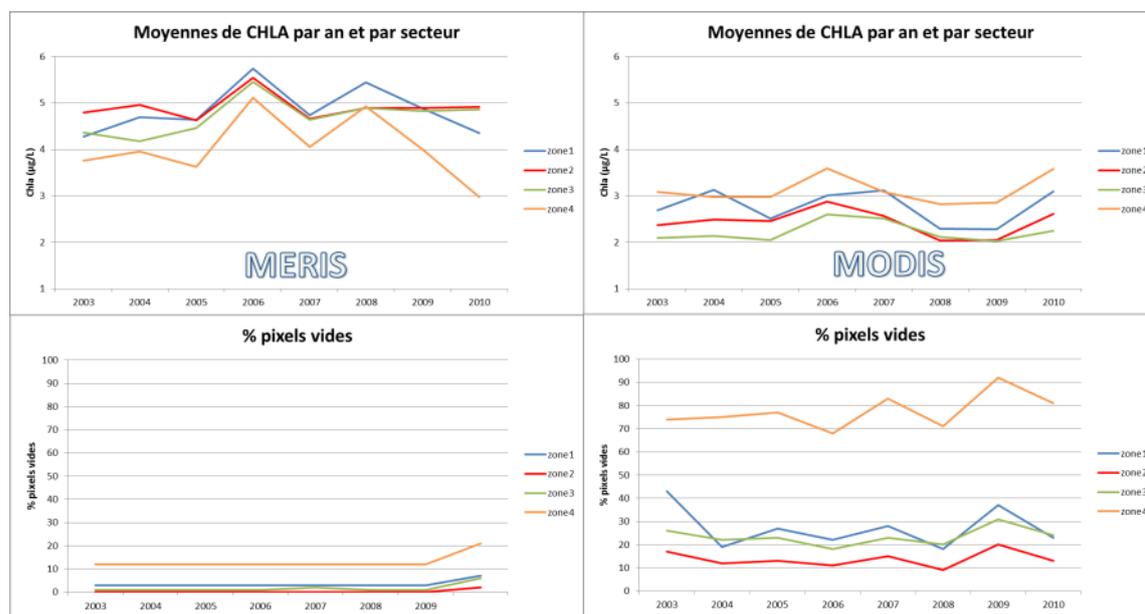


Figure 7.1 : Moyennes annuelles en CHLA (2003-2010) et pourcentage de pixels vides obtenus avec les caméras MERIS (300m) et MODIS

L'utilisation des images MERIS augmente le taux d'échantillonnage mensuel par rapport aux images MODIS par le fait d'une utilisation des pixels plus côtiers. Nous constatons cependant un décalage entre les résultats des moyennes CHLA MODIS et CHLA MERIS ainsi qu'un décalage géographique de quelques pixels dans les images MERIS à 300m (figure 7.2).

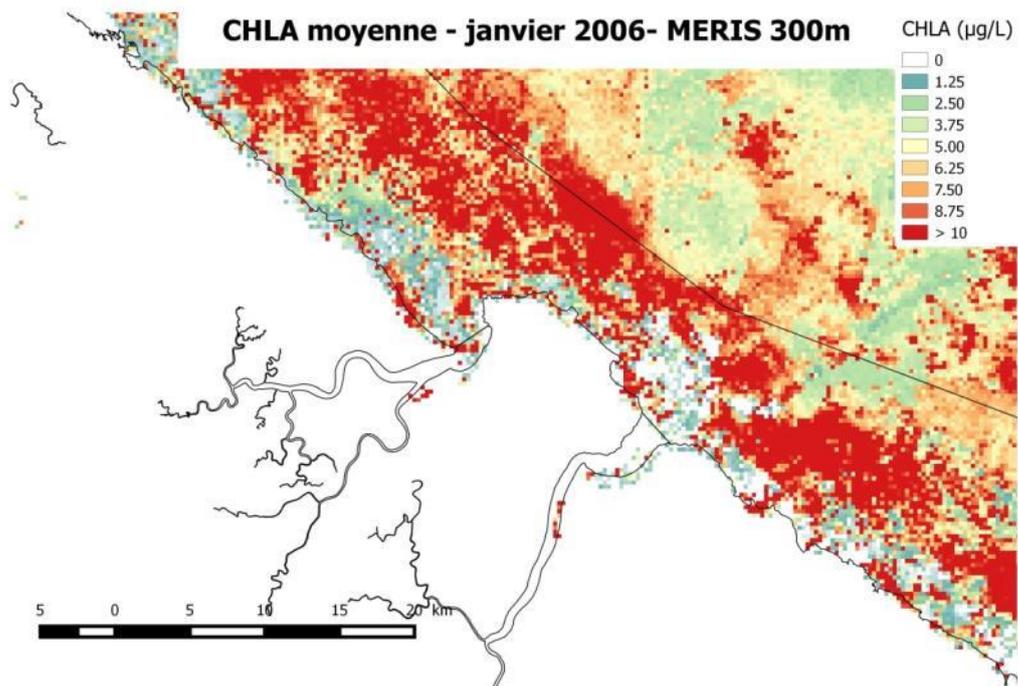


Figure 7.2 : Exemple du décalage des pixels observé avec les images MERIS 300m sur le fleuve Mahury et la rivière de Cayenne

8.- Discussion générale

Amélioration de la connaissance des paramètres physico-chimiques

L'une des difficultés dans la mise en place de la DCE en Guyane a été le manque de connaissances préalable sur le domaine maritime pour statuer sur le découpage des masses d'eau. Dans le chapitre 3 « vision régionale des paramètres étudiés » nous avons essayé de combler ce manque de données. Pour chaque paramètre, sont proposées ces figures avec l'évolution mensuelle sur 4 radiales qui vont de la côte à plus de 100 km au large sur plus de dix années. Les cartes de moyennes par mois complètent cette information et permettent de mieux appréhender les variations saisonnières.

Si la connaissance de ces variations donnent le cadre des phénomènes affectant la zone côtière, c'est essentiellement dans le chapitre 4 « Vision locale – Masse d'eau côtière DCE (MEC) » que sont exploitées les données satellite nécessaires à la DCE. Il est proposé, pour chaque paramètre, l'évolution mensuelle sur plusieurs années, ainsi que l'évolution saisonnière et annuelle. Ces figures seront de la plus grande importance pour la définition des grilles de niveau DCE, car elles présentent la variabilité mensuelle, annuelle et interannuelle par zone des paramètres CHLA et TURBI.

Quelques éléments marquants dans l'évolution des phénomènes océanographiques méritent d'être soulignés :

- Pour la température de surface de la mer, nous remarquons l'année chaude de 2010 et l'existence au large de la Guyane et du Surinam d'une poche d'eau permanente plus froide. L'effet du réchauffement climatique est également visible sur les eaux guyanaises, avec une augmentation moyenne de 0.8°C sur 27 ans.
- La chlorophylle présente une diminution des concentrations de la côte vers le large, mais en saison sèche, nous pouvons voir dans les radiales au large, que les concentrations augmentent au-delà de 20 km des côtes à cause de la plume amazonienne qui s'est séparée des côtes (rétroflexion saisonnière). L'évolution mensuelle de la chlorophylle reste stable sur les 12 années d'étude autour de 2 à 7 µg chl_a/L, avec les plus fortes concentrations en saison humide.
- La turbidité, ainsi que les MES évoluent par plaques. Les fortes turbidités observées avec MODIS correspondent à la présence des bancs de vase côtiers. Ces bancs de vase se déplacent en permanence du sud-est vers le nord-ouest, affectant ainsi successivement toutes les zones côtières. Les valeurs enregistrées avec le satellite montrent une variation de valeurs moyennes dans une plage d'environ 5 à 40 NTU, avec des pics dépassant les 50 NTU parfois.

Représentativité de la MEC avec les images satellite

Les 4 zones définies n'ont pas la même surface à cause des îlets, qui font étendre au-delà de 10 km la zone d'influence de la DCE. De ce fait, la zone 2 dispose de davantage de pixels pour réaliser une moyenne (tableau 2.3). La zone 4, d'une largeur régulière de 1 mille de large, dispose d'un faible nombre de pixels disponible, ce qui augmente l'incertitude de la moyenne calculée.

Dans la figure 8.1 nous pouvons apprécier les difficultés liées à l'utilisation des pixels dans la bande côtière de 1 mille avec MODIS (1 km), où les pixels blancs sont des pixels non utilisés. Les incertitudes du trait de côte limitent également la pleine exploitation des pixels disponibles. De plus, pour les capteurs « couleur de l'eau » cette proximité des côtes augmente l'influence des aérosols et des photons réfléchis sur la terre, affectant directement la qualité des données. La vitesse de changement de la morphologie des côtes guyanaises aggrave la situation, car des changements de la position du bord de mer de plus de 100 m est une situation couramment observée.

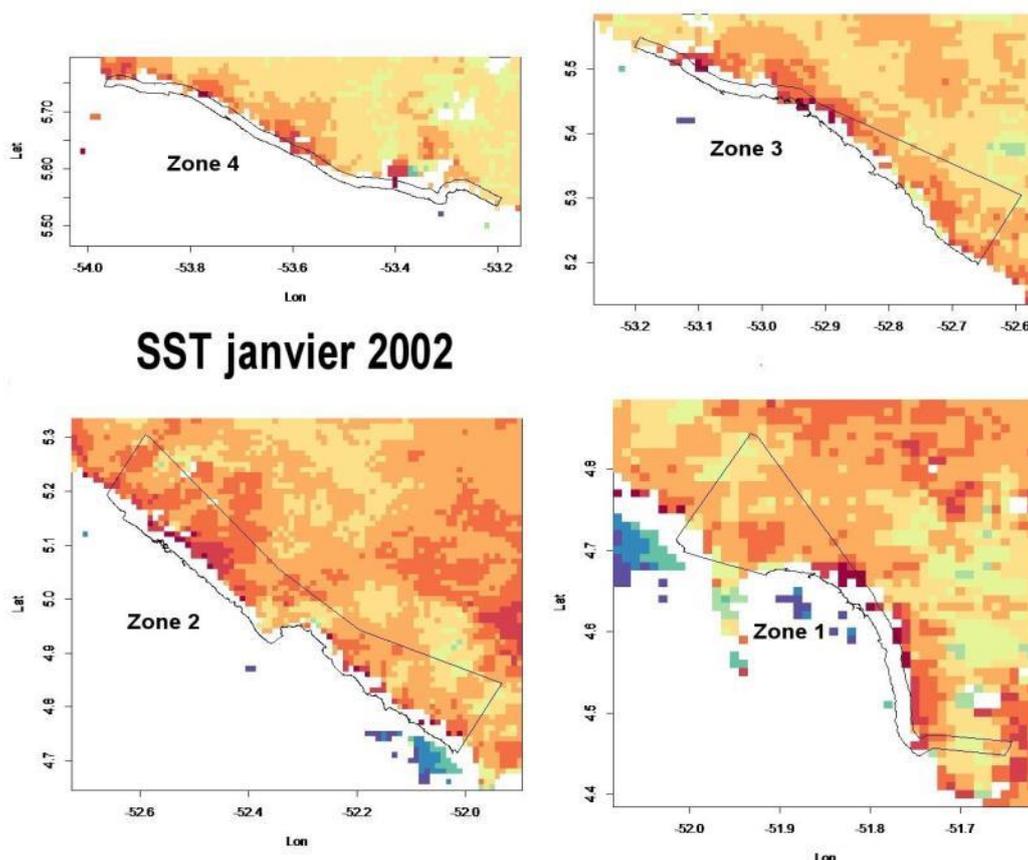


Figure 8.1 : Carte avec les valeurs de température (SST) par secteur où l'on apprécie la distribution des pixels utilisables (couleur) et inutilisables (blanc)

Utilisation des images à haute résolution (300 m)

En utilisant la caméra MODIS, avec une résolution de pixel de 1 km, les zones 1 à 3 ont une surface suffisante pour permettre des moyennes robustes malgré les incertitudes liées aux nuages, traits de côte ou erreurs de pixels. La zone 4 avec une largeur de moins de 2 km se trouve à la limite des possibilités de ce type d'images. L'utilisation de la caméra MERIS avec une résolution de 1 km, permet déjà d'améliorer ce problème de manque de pixels de MODIS par le fait une meilleure utilisation des pixels côtiers dans le traitement de base réalisé à l'ESA (pas de

masquage dû aux fortes réflectances). Le passage aux images de plus haute résolution telles que « MERIS 300 m » permet en plus d'augmenter l'échantillonnage (figure 8.2).

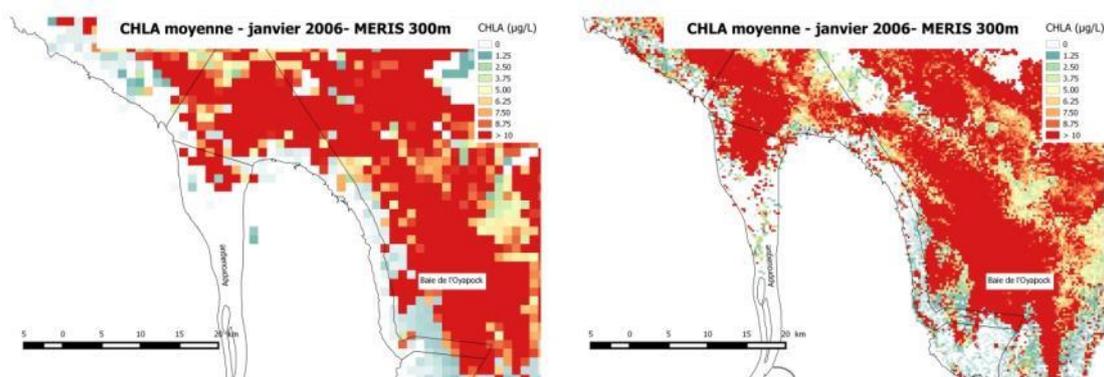


Figure 8.2 : CHLA moyenne du mois de janvier 2006 observé par la caméra MERIS à 1 km et à 300 m de résolution respectivement sur les embouchures de l'Approuague et de l'Oyapock

Pour les paramètres CHLA et TURBI, les résultats obtenus par MODIS et MERIS ne sont pas similaires. Une partie de ces différences pourrait être expliquée par le fait que les images MODIS masquent davantage de points côtiers que MERIS, car considérés comme « terre » par la NASA. Ceci affecte les calculs de moyennes en faisant disparaître les plus fortes valeurs. Ces différences devront être étudiées et calibrées.

Un décalage géographique de quelques pixels est également constaté avec les images MERIS 300 m (figure 7.2). Ce décalage pourrait provenir d'un problème de navigation du satellite. Il est possible de corriger ce type de décalages, mais restera toujours une incertitude d'au moins la taille du pixel. Pour cette raison, il semble improbable de suivre les MET dans les embouchures des petits fleuves.

Ces problèmes devront être abordés lors de la deuxième phase de cette étude qui sera réalisée en 2016. Elle concerne essentiellement la comparaison des paramètres CHLA et TURBI entre MODIS et MERIS 300 m, ainsi que la présentation d'un démonstrateur qui permettrait aux gestionnaires DCE de Guyane d'avoir en temps réel des images satellite et ses produits (moyennes mensuelles, annuelles et P90 annuel et pluriannuel).

Sectorisation des masses d'eau côtières

Pour évaluer une possible sectorisation de la MEC nous disposons des données de température, chlorophylle, turbidité et matières en suspension. La température a montré une très faible variabilité entre les zones proposées, donc elle ne pourra pas nous être utile comme paramètre discriminant. Les matières en suspension présentent la même évolution que la turbidité et ne seront pas abordées non plus. Nous étudierons l'homogénéité des zones avec la chlorophylle et la turbidité, qui d'ailleurs sont les seuls indices mis en place par la DCE.

Avec la chlorophylle (CHLA) :

Une sectorisation en deux parties de la MEC guyanaise pourrait être proposée. Une zone couvrant les zones 1 et 2, puis une autre plus au nord-ouest, avec les zones 3 et 4. Ceci semble difficile à mettre en place du fait de l'hétérogénéité des largeurs des zones et particulièrement celle de la zone 4. Si la zone 4 avait eu une dizaine de kilomètres comme les autres, les valeurs

de la moyenne P90 CHLA auraient été beaucoup plus faibles et en cohérence avec le gradient nord-sud, comme nous pouvons le constater dans la carte de P90 CHLA-2009-2014 (figure 8.3). Cette sectorisation pourrait être appliquée, mais à condition de redimensionner la zone 4 et l'étendre vers le large autant que les autres.

Il serait souhaitable également de changer la position du point d'échantillonnage « Les Hattes » et le déplacer sur la côte afin qu'il ne soit pas influencé par le panache du Maroni. De plus il serait pertinent d'étendre la zone des MET plus au large et éviter que les MEC se trouvent dans les zones d'influence des panaches du Maroni et de l'Oyapock.

Dans l'impossibilité de redimensionner la MEC, il est envisageable de garder une MEC unique afin que les valeurs extrêmes observées puissent être relativisées par l'ensemble de valeurs.

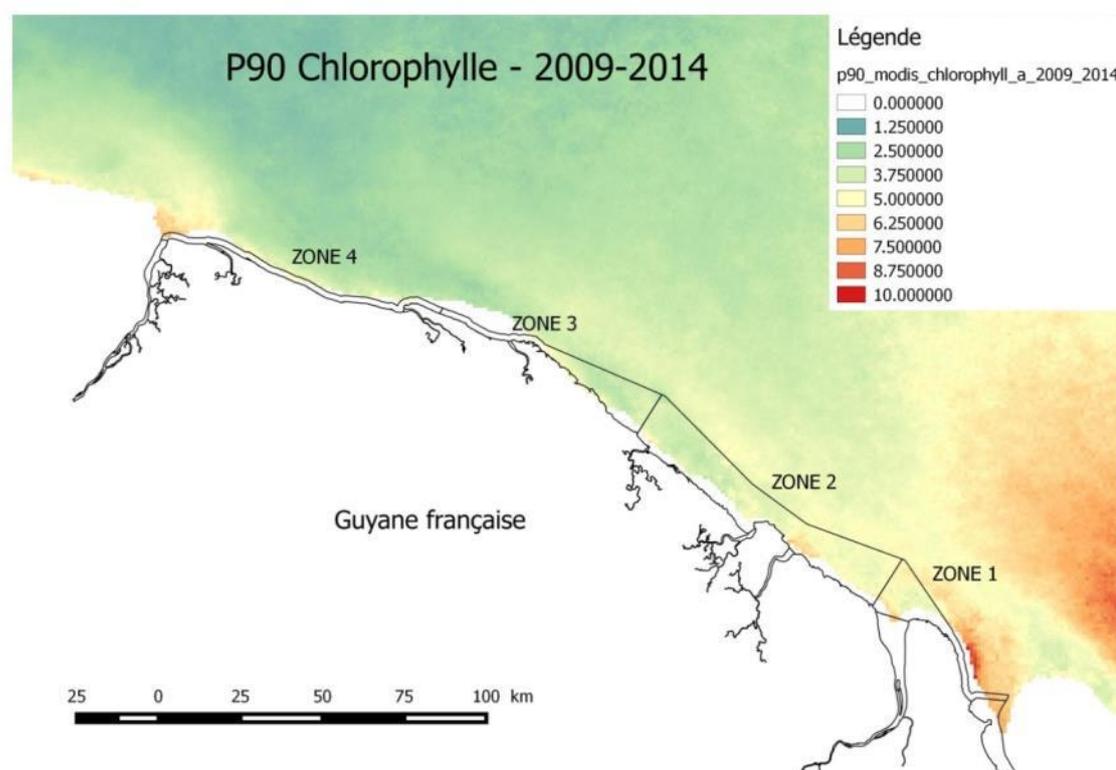


Figure 8.3 : Carte du P90 CHLA sur la période 2009-2014

Dans cette hypothèse de MEC unique nous avons recalculé le P90 CHLA issu des analyses 2013 (n=36) et les avons comparés avec les données satellite (figure 8.4). Les plus fortes valeurs ont été obtenues avec les données HPLC de DHI, suivies de celles du LAMA. Les plus faibles restent celles issues du satellite. Mais ces valeurs sont très influencées par les résultats du point « Les Hattes » qui incrémentent le P90 CHLA obtenu par les analyses.

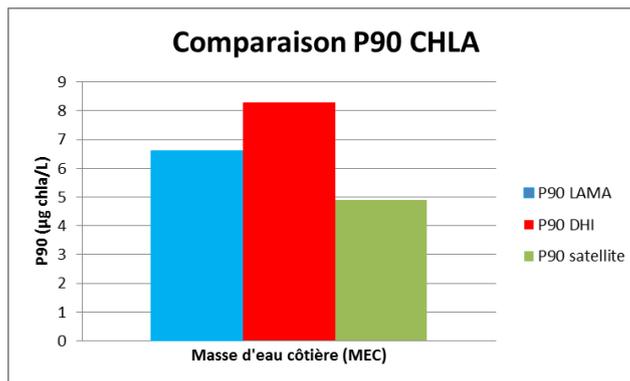


Figure 8.4 : Valeurs du P90 CHLA en considérant une seule masse d'eau côtière (MEC)

Le même calcul (n=31) ne tenant pas compte du point « Les Hattes » (MEC 28) présente une diminution du P90 CHLA issu des analyses du LAMA, mais celles obtenues avec les résultats HPLC de DHI ne diminuent que faiblement (figure 8.5).

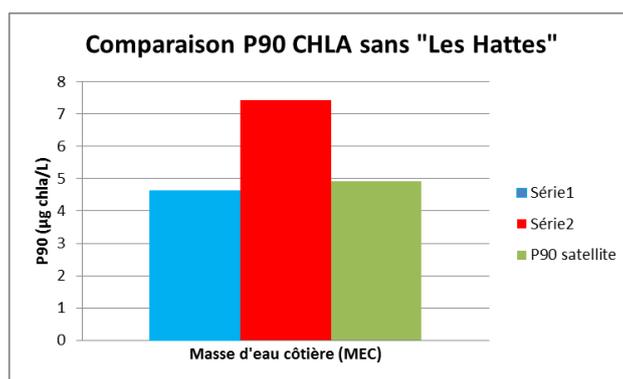


Figure 8.5 : Valeurs du P90 CHLA en considérant une seule masse d'eau côtière (MEC) et ne tenant pas compte du point « Les Hattes »

Avec la turbidité (TURBI) :

La turbidité des eaux guyanaises présente une forte hétérogénéité spatiale selon que l'on se trouve sous le courant d'une île, sur un banc de vase ou sous l'effet de la houle. Les fortes turbidités observées par satellite suivent l'évolution des bancs de vase, qui se déplacent de plusieurs centaines de mètres par an vers le nord-ouest (figure 8.6). Il est donc nécessaire d'obtenir un indice capable de moyenniser la turbidité sur tout le secteur et pas seulement sur un point. Les images satellite répondent parfaitement à ce besoin.

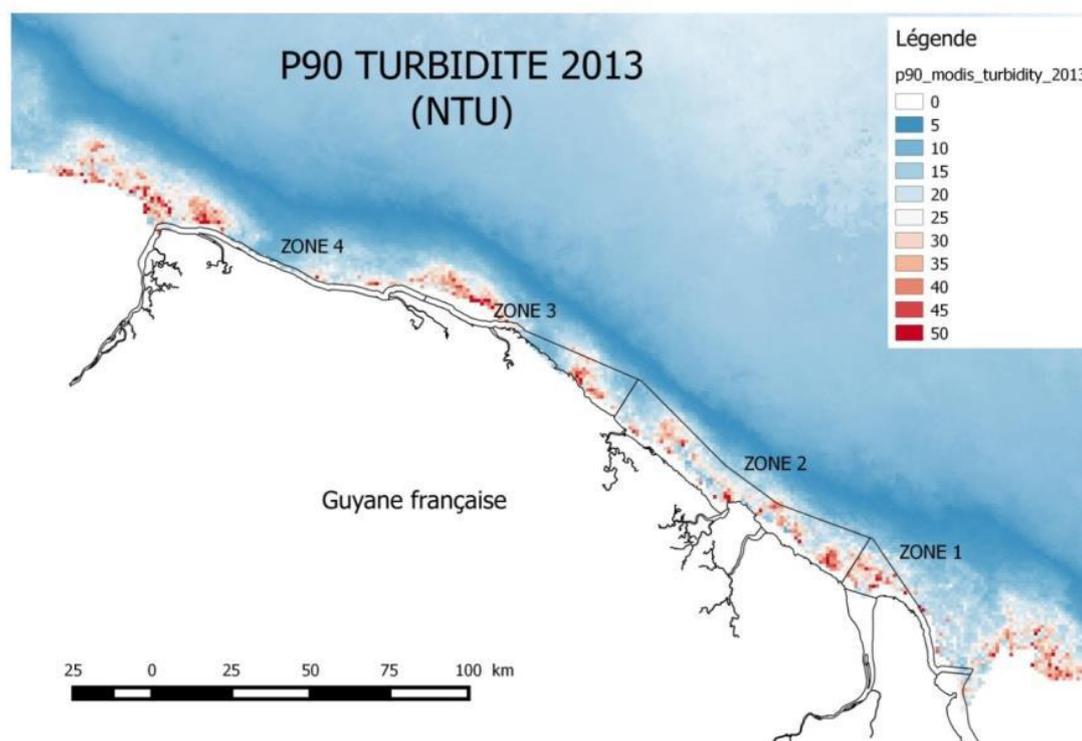


Figure 8.6 : Carte du P90 TURBI sur l'année 2013

Dans l'hypothèse de garder une MEC unique, nous avons recalculé le P90 TURBI (n=36) obtenues avec les données des analyses de 2013. Sur les 36 valeurs nous observons 8 valeurs de plus de 100 NTU (entre 131 et 900 NTU), dont 4 sur le point « Les Hattes » et 3 sur le point « Béhague ». Le P90 TURBI ainsi calculé est de 588 NTU. Par rapport à la valeur obtenue par satellite, égale à 23 NTU, nous sommes loin d'avoir des valeurs comparables (figure 8.7). Les plus faibles restent celles issues du satellite grâce un plus fort taux d'échantillonnage, ce qui a pour effet d'éliminer les valeurs extrêmes au moment du calcul du P90 (table TH4).

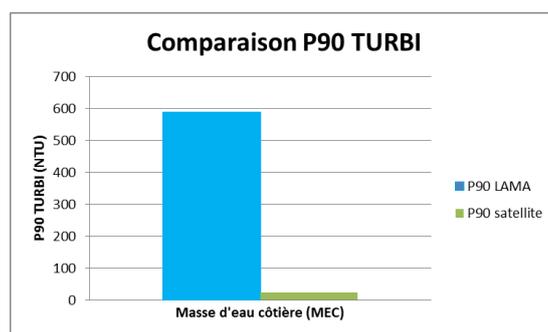


Figure 8.7 : Valeurs du P90 TURBI en considérant une seule masse d'eau côtière (MEC)

Dans la table 8.1 nous présentons à titre d'exemple, la distribution des valeurs moyennes du satellite pour le mois de juillet 2013. Les valeurs dépassant 100 NTU représentent moins de 1% de pixels utilisables par zone. Dans le cas des valeurs analytiques nous avons 22% de valeurs dépassant 100 NTU (8 sur 37). Ainsi la proportion des valeurs extrêmes dans une image satellite reste compatible avec le calcul non biaisé du P90.

Table 8.1 : Distribution de valeurs et pixels pour l'image satellite de la moyenne de turbidité du mois de juillet 2013

	mois de juillet 2013			
	zone 1	zone 2	zone 3	zone 4
n pix total	242	904	308	142
n pix OK	126	759	253	29
val min	3.8	4.2	5.1	4.9
val max	127	123	173	31.2
nbre val > 100	1	1	1	0
% val>100	0.8	0.8	0.6	0

Les valeurs de turbidité varieront alors en fonction de la quantité de bancs de vase présents sur la période considérée dans une zone. On observe cependant un gradient sud-est vers nord-ouest (figure 5.6) qui pourrait nous suggérer de couper la MEC en deux, avec les zones 1 et 2 d'une part et les zones 3 et 4 d'autre part. **Cependant, les écarts constatés de turbidité (< 5 NTU en moyenne) ne justifient peut être pas cette sectorisation. La distribution par plaques ou bancs, reste mieux représentée sur une grande surface.**

En résumé :

Suite aux résultats obtenus avec CHLA et TURBI, le maintien d'une seule MEC semble la solution la plus raisonnable. Cependant quelques points sur la stratégie DCE actuelle pourraient être améliorés :

- Extension de la limite des zones avec 1 mille marin vers le large pour que toutes les zones restent similaires,
- Eviter de réaliser des prélèvements dans des points qui ne représentent pas l'ensemble de la MEC. Le point « Béhague » et « Les Hattes » se trouvent dans des endroits trop particuliers,
- Une stratégie avec des points côtiers et au large semble un bon compromis pour moyenner les effets très côtiers,
- Un échantillonnage avec 4 points en tout, avec deux points au niveau de Cayenne et deux au niveau de Kourou, une fois par mois, pourrait être un bon compromis,
- Une utilisation des images satellite pour la mise en place et le suivi annuel des indices P90 CHLA et P90 TURBI pourrait constituer une autre alternative.

Il faudra garder à l'esprit que toute la masse d'eau côtière et jusqu'à plusieurs kilomètres des côtes vers le large se comporte en fait comme une zone estuarienne. Il faudra donc faire très attention dans le choix des points d'échantillonnage et ne pas les situer dans les panaches des fleuves, où les conditions sont très éloignées de celles des MEC.

Seuils et grilles DCE pour CHLA et TURBI

Il est intéressant de constater que les seuils des grilles utilisés pour l'évaluation de l'indice « biomasse » de l'indicateur « phytoplancton » dans la Mer du Nord pourraient très bien être appliquées aux eaux guyanaises (tableau 8.2 - Belin, Lamoureux, et Soudant 2014). Pour l'indice « turbidité » l'éco-type 3 correspond aux zones vaseuses/sableuses et les masses d'eau situées à l'embouchure des principaux fleuves (Daniel et Soudant 2011). Ces seuils pourraient également être appliqués aux eaux guyanaises (tableau 8.3).

Tableau 8.2 : Grilles utilisées pour l'évaluation de l'indice « biomasse » P90 CHLA dans la Mer du Nord et Manche-Atlantique (en µg chla/L)

	Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
MEC et MET Mer du Nord	[0 – 10]	] 10 – 15]	] 15 – 22.5 ]	] 22.5 – 45]	> 45
MEC et MET Manche-Atlantique	[0 – 5]	] 5 – 10]	] 10 – 20 ]	] 20 – 40]	> 40

Tableau 8.3 : Grilles utilisées pour l'évaluation de l'indice « turbidité » (NTU) P90 TURBI

	Très bon	Bon	Moyen
Ecotype 1 et 2	[0 – 5]	] 5 – 10]	> 10
Ecotype 3	[0 – 30]	] 30 – 45]	> 45

La figure 8.8 présente les valeurs guyanaises de P90 CHLA et P90 TURBI (glissantes sur 6 ans) obtenues avec MODIS, et projetées sur la grille P90 CHLA des MEC et MET Manche-Atlantique, et P90 TURBI sur la grille de l'écotype 3.

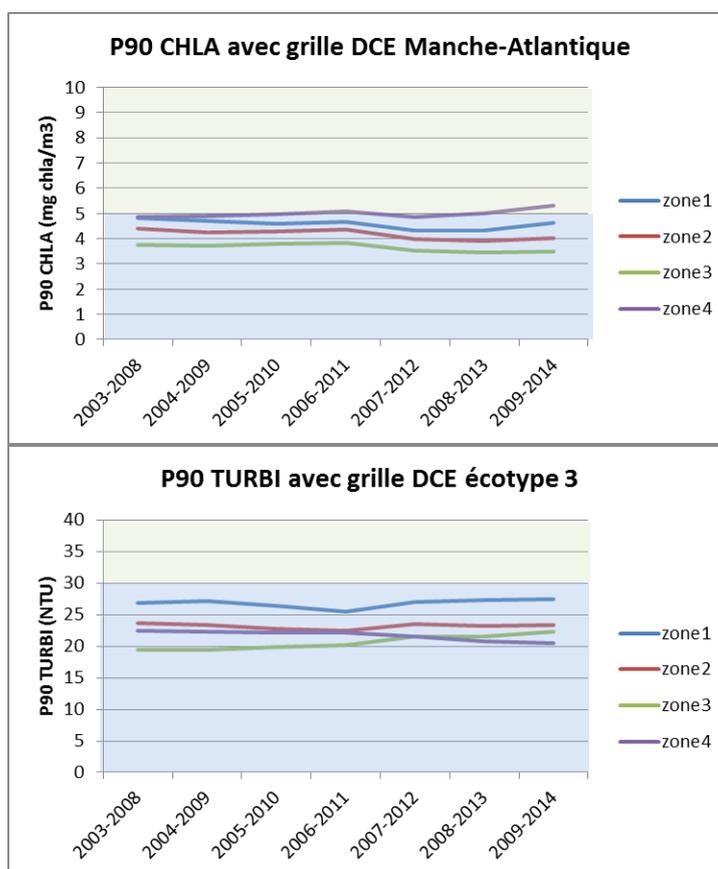


Figure 8.7 : P90 CHLA et P90 TURBI glissants (sur 6 ans) projetés sur les grilles métropolitaines

Saisonnalité de la turbidité

C'est en saison humide qu'étaient attendues les plus fortes turbidités près des côtes, pourtant la figure 4.11 montre le contraire (série MODIS 2003-2014). Il faut cependant relativiser ces valeurs, car c'est en saison humide que manquent les pixels les plus côtiers à cause de la couverture nuageuse, comme le montre le pourcentage de pixels vides de la figure 4.11. Les plus faibles turbidités coïncident avec le petit été de mars et le passage de la Zone Intertropicale de Convergence (ZIC) au-dessus de la Guyane.

Puisque le masque de MERIS est moins pénalisant que celui de MODIS, nous avons recalculé les valeurs moyennes de turbidité par mois sur la série d'images mensuelles de MERIS (1 km) entre 2003 et 2009 (figure 8.8). Les images montrent davantage de pixels vides près des côtes de décembre à mai, puis nous avons un taux d'utilisation de pixels optimum le reste de l'année. Malgré cette bonne couverture spatiale nous constatons toujours des plus fortes turbidités de juillet à octobre, confirmant ce qui avait été observé avec MODIS.

Les données des mesures *in situ* disponibles de l'année 2003, malgré qu'elles ne couvrent pas toute l'année, semblent confirmer cette dynamique (figure 8.9). Des campagnes de mesures toute l'année, et sur plusieurs années, pourront statuer sur cette évolution saisonnière qui contredit le sentiment général d'avoir une eau de mer plus claire en été.

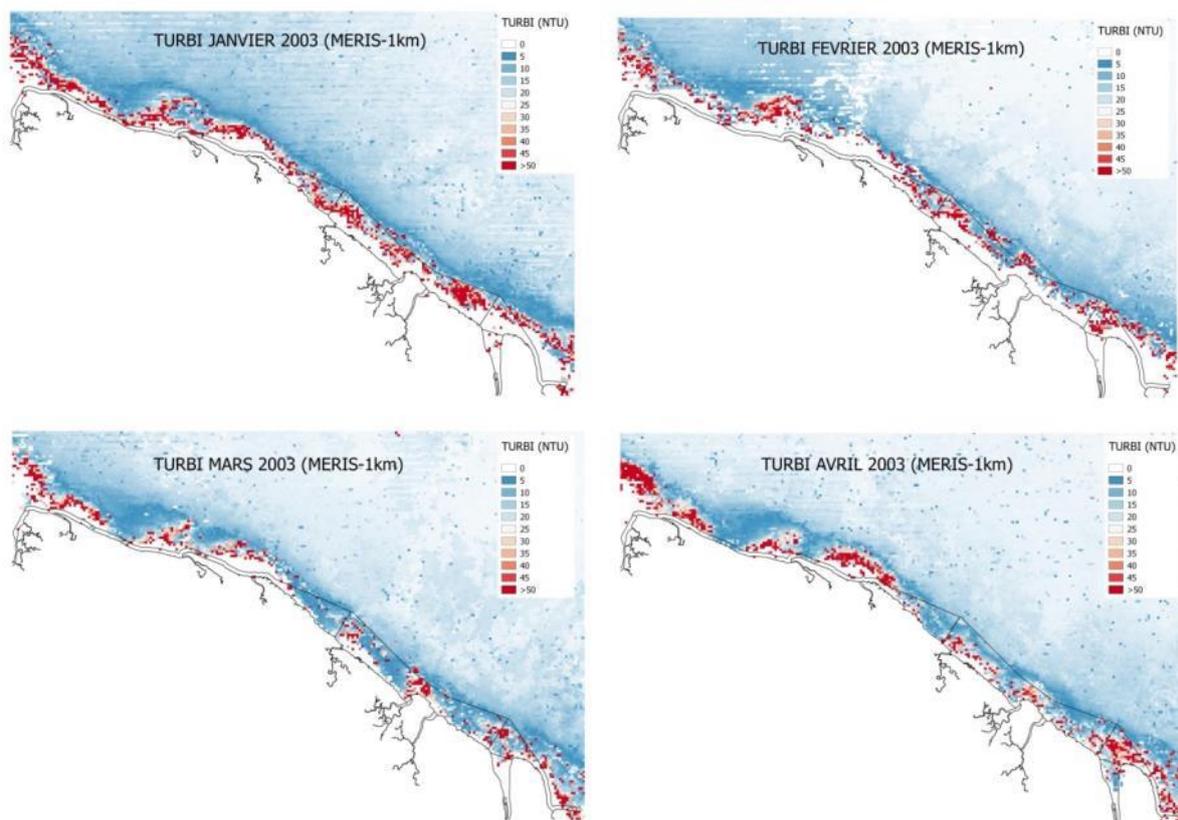


Figure 8.8 : Turbidité moyenne par mois sur la période 2003-2009 obtenue avec la caméra MERIS (1km)

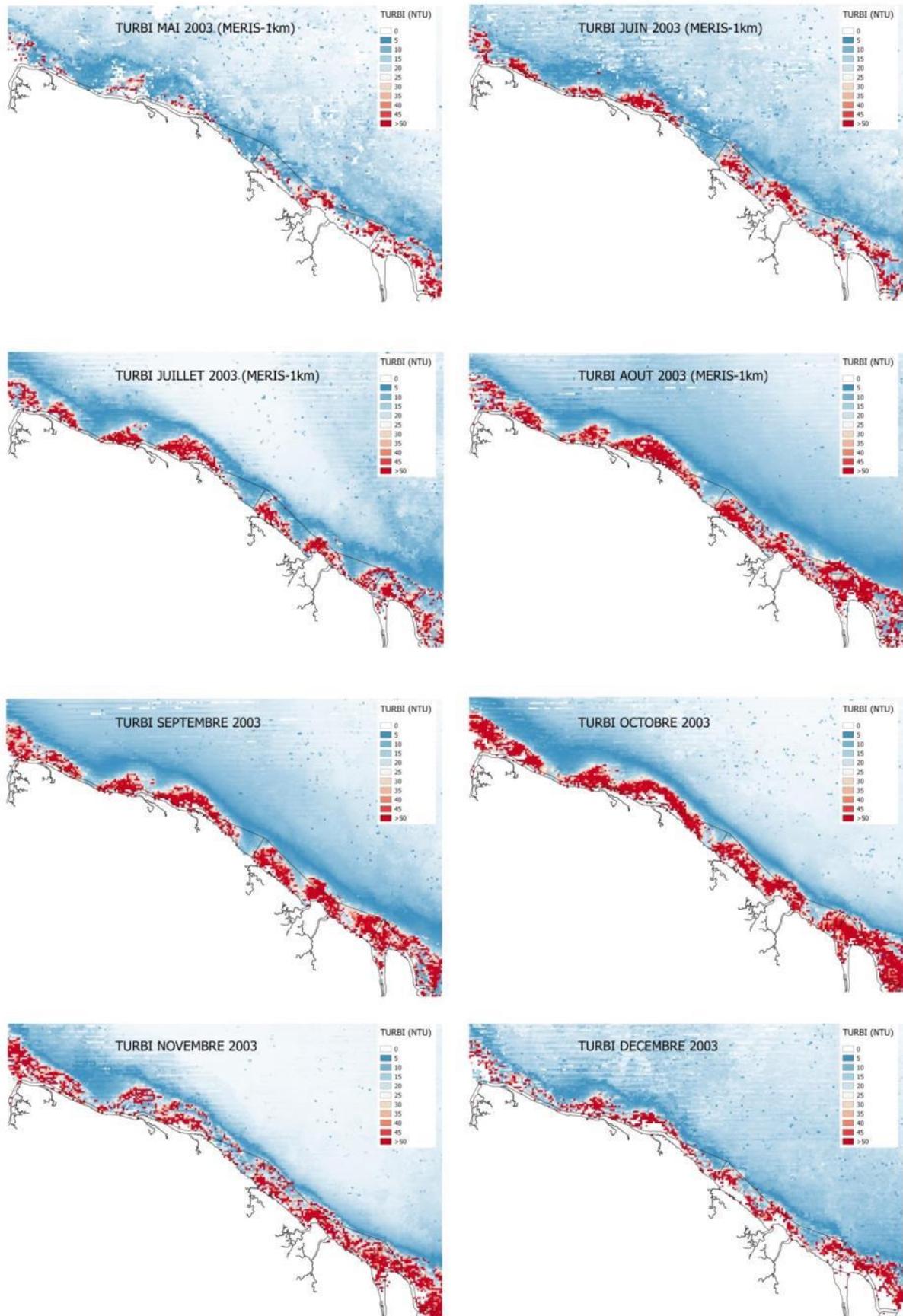


Figure 8.8 (suite) : Turbidité moyenne par mois sur la période 2003-2009 obtenue avec la caméra MERIS (1km)

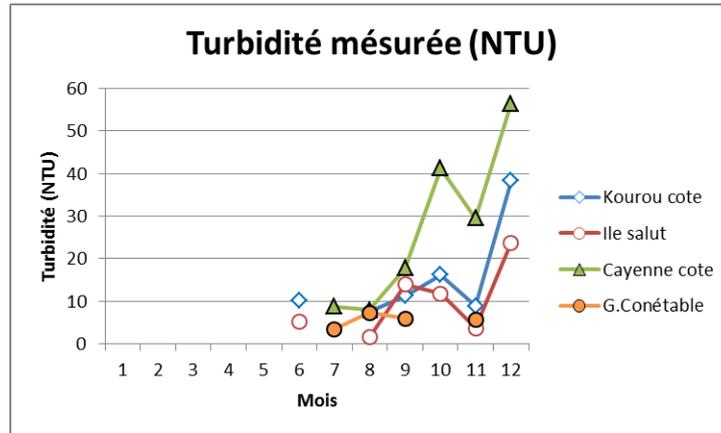


Figure 8.9 : Turbidité mesurées lors des échantillonnages DCE de 2003

9.- Conclusion

Le manque de données marines historiques en Guyane n'a pas permis de définir aisément les stratégies DCE des eaux côtières (MEC) tel qu'il a été fait en métropole. Avec un échantillonnage « *in situ* » tel que prévu dans les procédures DCE, il faudrait un ou deux plans de gestion de 6 ans pour pouvoir statuer sur la pertinence des stratégies mises en place et du découpage de la MEC. Une façon de contourner le problème est de créer une base de données issue des images satellite, avec des données qui peuvent remonter à plus de dix années. Cette démarche permet en outre, d'acquérir des connaissances sur l'évolution des masses d'eau du plateau continental guyanais, qui influence à son tour les paramètres côtiers, tels que la température, la turbidité et la concentration en chlorophylle *a*.

La faible quantité de données « *in situ* » disponibles (2013) n'a pas permis de réaliser des études statistiques pour la validation des données avec le satellite, mais permet déjà d'apprécier la cohérence de ces données, qui se trouvent dans la même gamme de valeurs.

L'étude pluriannuelle des données en température, CHLA et TURBI, nous renseigne sur l'apparition des années chaudes (2010) ou froides (2002) par rapport à la moyenne 2002-2012. L'influence des eaux chaudes en provenance de l'Amazone est prépondérante, mais reste toutefois éloignée des côtes de quelques dizaines de kilomètres. Les concentrations en CHLA, malgré la forte turbidité des eaux côtières, restent assez élevées grâce au fort ensoleillement, avec des moyennes mensuelles de 1.5 à 7 µg/L. La turbidité évolue par bancs, qui se déplacent en moyenne de 1 à 3 km par an vers le nord-ouest, grâce à la dérive littorale générée par l'Amazone. Les turbidités néphélométriques côtières observées avec MODIS oscillent entre 5 et 40 NTU, avec des pics de plus de 50 NTU exceptionnellement.

La faible largeur de la zone 4 (proche du Maroni) pose le problème de la représentativité des données satellite pour toute cette zone. La majorité des pixels utilisables de la camera MODIS (1 km) sont situés dans l'embouchure du Maroni, où les concentrations en CHLA et TURBI sont les plus fortes, donnant une moyenne générale un peu supérieure à la réalité. Ce problème n'est pas présent dans les autres zones car l'existence des îlets proches de la côte guyanaise, font que les limites des eaux DCE sont repoussées d'une dizaine de kilomètres au lieu de 1,85 km. Ce problème semble beaucoup moins pénalisant avec les images à 1 km de résolution de la caméra MERIS, qui dispose d'un masque côtier moins strict. Les images à haute résolution (300 m) de MERIS apportent un meilleur échantillonnage de la zone ouest avec une augmentation de 15 fois le nombre de pixels disponibles.

Ce dernier point pose le problème de la validation des images à haute résolution « couleur de l'eau » (300 m) pour le suivi des eaux côtières, voir des masses d'eau de transition (MET). Les images MERIS à 300 m semblent couvrir correctement la zone côtière, avec un masquage « terre » aussi performant que celui de MERIS à 1 km. Géographiquement les pixels sont pleinement utilisables avec peut être un faible décalage constaté de quelques pixels (problème de navigation du satellite probable). Il existe cependant un décalage plus important dans les valeurs de CHLA (x2) et TURBI (x5) par rapport à celles obtenues avec la camera MODIS (1 km). Ces décalages devront être abordés dans la deuxième phase de cette étude, prévue pour 2016 (fiche Onema). Ces premiers résultats dans l'utilisation des images à haute résolution sont prometteurs et permettent d'envisager des outils permettant de cibler des zones restreintes telles les principales embouchures des plus grands fleuves guyanais.

La sectorisation de la MEC en quatre zones avait pour but de statuer sur l'homogénéité ou hétérogénéité de cette MEC d'environ 300 km de long. Les températures obtenues par zone montrent une extrême similarité, écartant ainsi ce paramètre car peu discriminant. La chlorophylle et la turbidité présentent davantage de différences mais pas suffisamment marquées comme pour justifier une sectorisation. Le suivi d'une seule et unique MEC semble donc être un bon choix pour les paramètres CHLA et TURBI.

Les comparaisons réalisées entre les valeurs *in-situ* et satellite, avec les métriques DCE (P90), montrent une bonne adéquation des valeurs, sauf quand les échantillons ont été prélevés dans des points trop particuliers et non représentatifs de toute la masse d'eau. C'est le cas des points « Béhague » et « Les Hattes » qui sont dans des endroits où les concentrations représentent davantage les conditions d'une vase ou un estuaire plutôt que celles de la masse d'eau côtière (MEC). Les résultats obtenus dans cette étude permettent d'envisager une bonne représentativité de la couverture de la masse d'eau côtière MEC avec le suivi de 4 points *in-situ*. Deux points près de Cayenne, avec un côtier et un autre au large (île du Connétable par exemple), et deux points à Kourou, avec un côtier et un autre aux îles du Salut.

Ce n'était pas prévu dans cette étude, mais nous avons regardé les grilles de niveau utilisées pour CHLA et TURBI en métropole afin d'estimer la possible utilisation d'une d'entre elles sur la MEC guyanaise. Pour la CHLA, les grilles de la Mer du Nord ou même de Manche-Atlantique semblent bien s'adapter aux seuils et concentrations du P90 CHLA obtenus par le satellite. Le P90 TURBI guyanais est également bien représenté par l'écotype 3 métropolitain. Grâce aux données satellite remontant à plus de 10 années, le suivi d'une seule masse d'eau côtière (MEC) avec des grilles déjà existantes en métropole, et avec 4 points d'échantillonnage une fois par mois pourrait constituer un bon compromis dans une future stratégie DCE de Guyane.

10.- Bibliographie

- Baklouti, M., J.-L. Devenon, A. Bourret, J.-M. Froidefond, J.-F. Ternon, et J.-L. Fuda. 2007. « New insights in the French Guiana continental shelf circulation and its relation to the North Brazil Current retroflexion » 112 (C020023): 1-18.
- Belin, Catherine, Alice Lamoureux, et Dominique Soudant. 2014. « Evaluation de la qualité des eaux littorales de la France métropolitaine pour l'élément de qualité Phytoplancton dans le cadre de la DCE. Etat des lieux des règles d'évaluation, et résultats pour la période 2007-2012. Tome 1 - Etat des lieux, méthodes et synthèse des résultats ». Scientifique et technique Rapport DYNECO / VIGIES / 14-05 – Tome 1. Nantes: IFREMER.
<http://envlit.ifremer.fr/content/download/81901/580117/version/3/file/Evaluation+DCE+phytoplancton+2007-2012+-+Tome+1.pdf>.
- Daniel, Anne, et Dominique Soudant. 2011. « Evaluation DCE février 2011 Elément de qualité : transparence ». Convention Onema-Ifremer 2010 14780. Brest: IFREMER.
<https://w3.ifremer.fr/archimer/doc/00037/14780/12090.pdf>.
- Ffield, Amy. 2005. « North Brazil current rings viewed by TRMM Microwave Imager SST and the influence of the Amazon Plume ». *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 52 (1): 137-60. doi:10.1016/j.dsr.2004.05.013.
- Fratantoni, David M., et Deborah A. Glickson. 2002. « North Brazil Current Ring Generation and Evolution Observed with SeaWiFS* ». *Journal of Physical Oceanography* 32 (3): 1058-74.
- Froidefond, J.M, M Pujos, et X Andre. 1988. « Migration of mud banks and changing coastline in French Guiana ». *Marine Geology* 84 (1-2): 19-30. doi:10.1016/0025-3227(88)90122-3.
- Froidefond, J. M., F. Lahet, C. Hu, D. Doxaran, D. Guiral, M. T. Prost, et J. -F. Ternon. 2004. « Mudflats and mud suspension observed from satellite data in French Guiana ». *Marine Geology* 208 (2-4): 153-68. doi:10.1016/j.margeo.2004.04.025.
- Gardel, Antoine. 2011. « Géomorphologie et aménagement des littoraux à sédiments hétérogènes. Approche combinant télédétection et mesures in situ. Le cas du littoral de la Guyane française. Volume 2 – Annexes ». Mémoire présenté en vue de l'Habilitation à Diriger des Recherches. Wimereux: Université du Littoral Côte d'Opale.
- Gohin F., Druon J. N., et Lampert L. 2002. « A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters ». *International Journal of Remote Sensing* 23 (8): 1639-61.
- Gohin, Francis, Sophie Loyer, Michel Lunven, Claire Labry, Jean-Marie Froidefond, Daniel Delmas, Martin Huret, et Alain Herbland. 2005. « Satellite-Derived Parameters for Biological Modelling in Coastal Waters: Illustration over the Eastern Continental Shelf of the Bay of Biscay ». *Remote Sensing of Environment* 95 (1): 29-46. doi:10.1016/j.rse.2004.11.007.
- Lampert, Luis. 2012. « Actualisation de connaissances du domaine marin en Guyane Française ». Scientifique et technique RBE/BIODIVHAL 2012-4. Cayenne: IFREMER.
- . 2015. « Etude sur la température de surface de la mer des eaux guyanaises dans le contexte DCE ». Scientifique et technique RST.Dyneco 2015-02. Brest, France: IFREMER.
- Lampert, Luis, Bryère, et Francis Gohin. 2015. « Etude de la variation des paramètres température, biomasse et turbidité sur plus de 10 années dans les eaux marines guyanaises par imagerie satellite ». Expertise Onema. Brest, France: IFREMER.

11.- Sigles & Abréviations

AEG : Agence de l'Eau de Guyane

AVHRR : Advance Very High Resolution Radiometer

CHLA : chlorophylle a

CNES : Centre National d'Etudes Spatiales

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

ESA : European Space Agency

GMES : Global Monitoring for Environment and Security

INSU : Institut National des Sciences de l'Univers

MEC : Masse d'eau côtière

MET : Masse d'eau de transition

MERIS : MEdium Resolution Imaging Spectrometer

MES : Matières en suspension

MODIS : MOberate Resolution Imaging Spectroradiometer

NASA : National Aeronautics and Space Administration (USA)

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration (USA)

NTU : Nephelometric Turbidity Unit

OEG : Office de l'eau guyanais

OLCI : Ocean Land Color Instrument

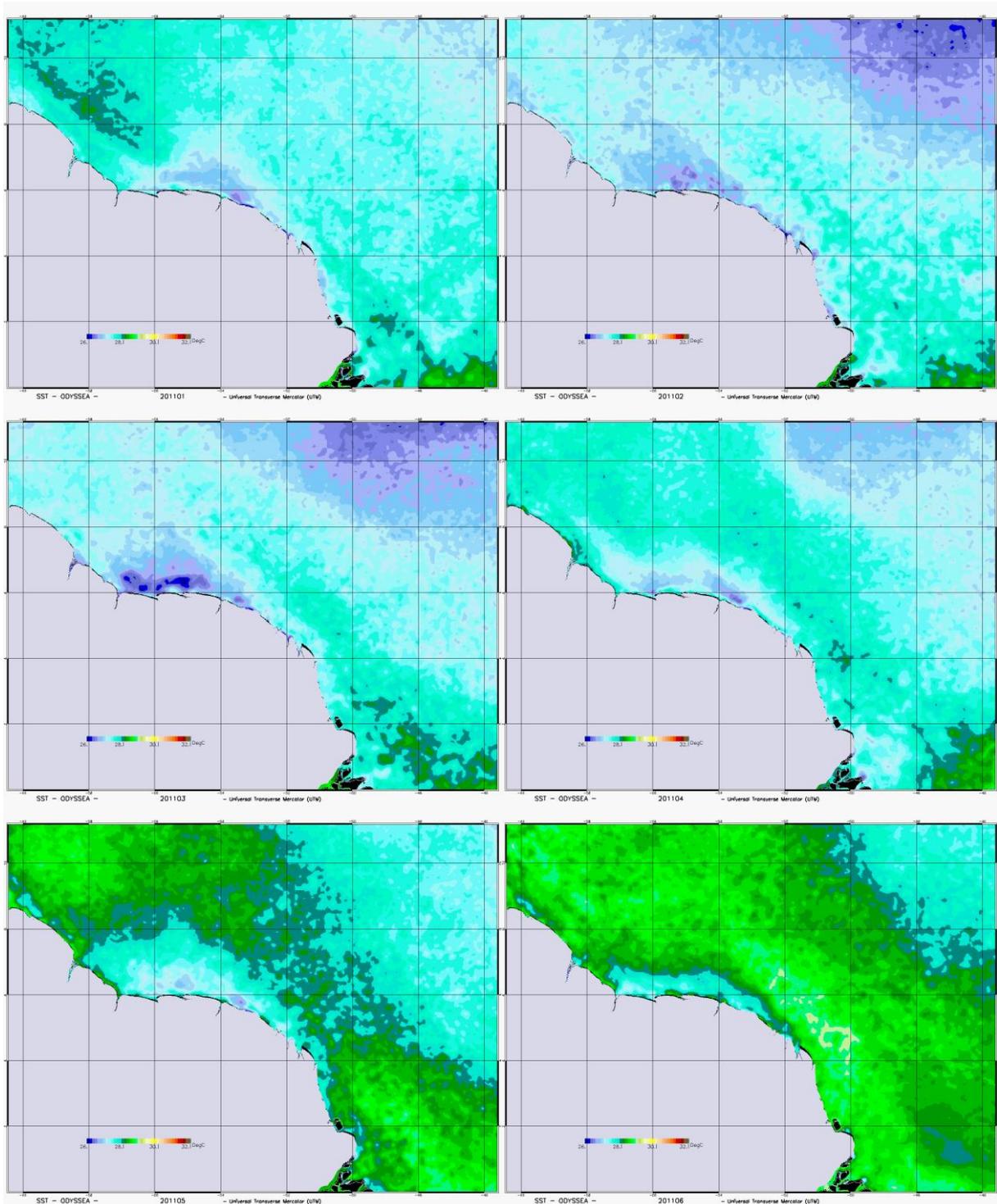
SeaWiFS : Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor

SST : Sea Surface Temperature (température de surface de la mer)

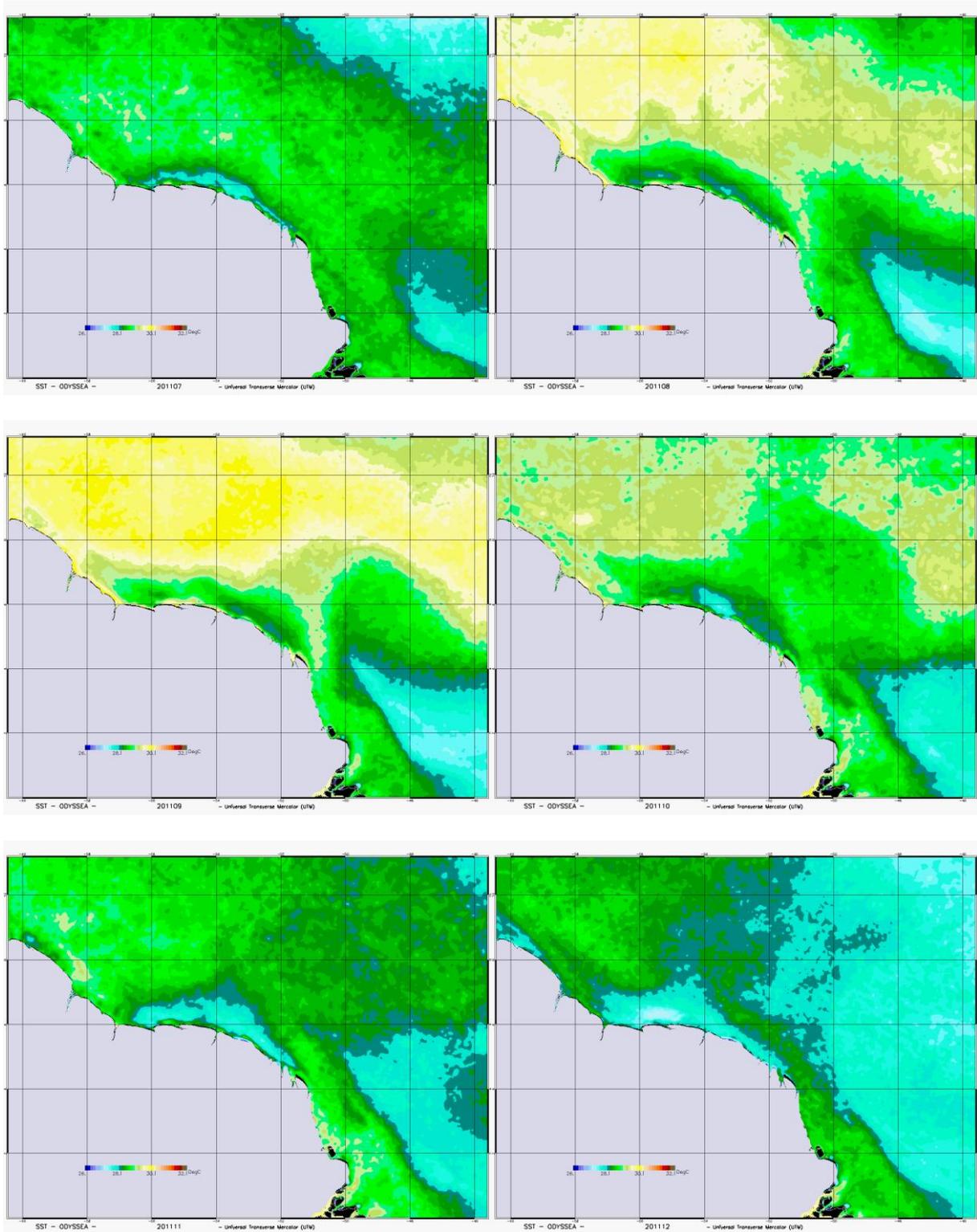
TURBI : turbidité

VIIRS : Visible Infrared Imager Suit

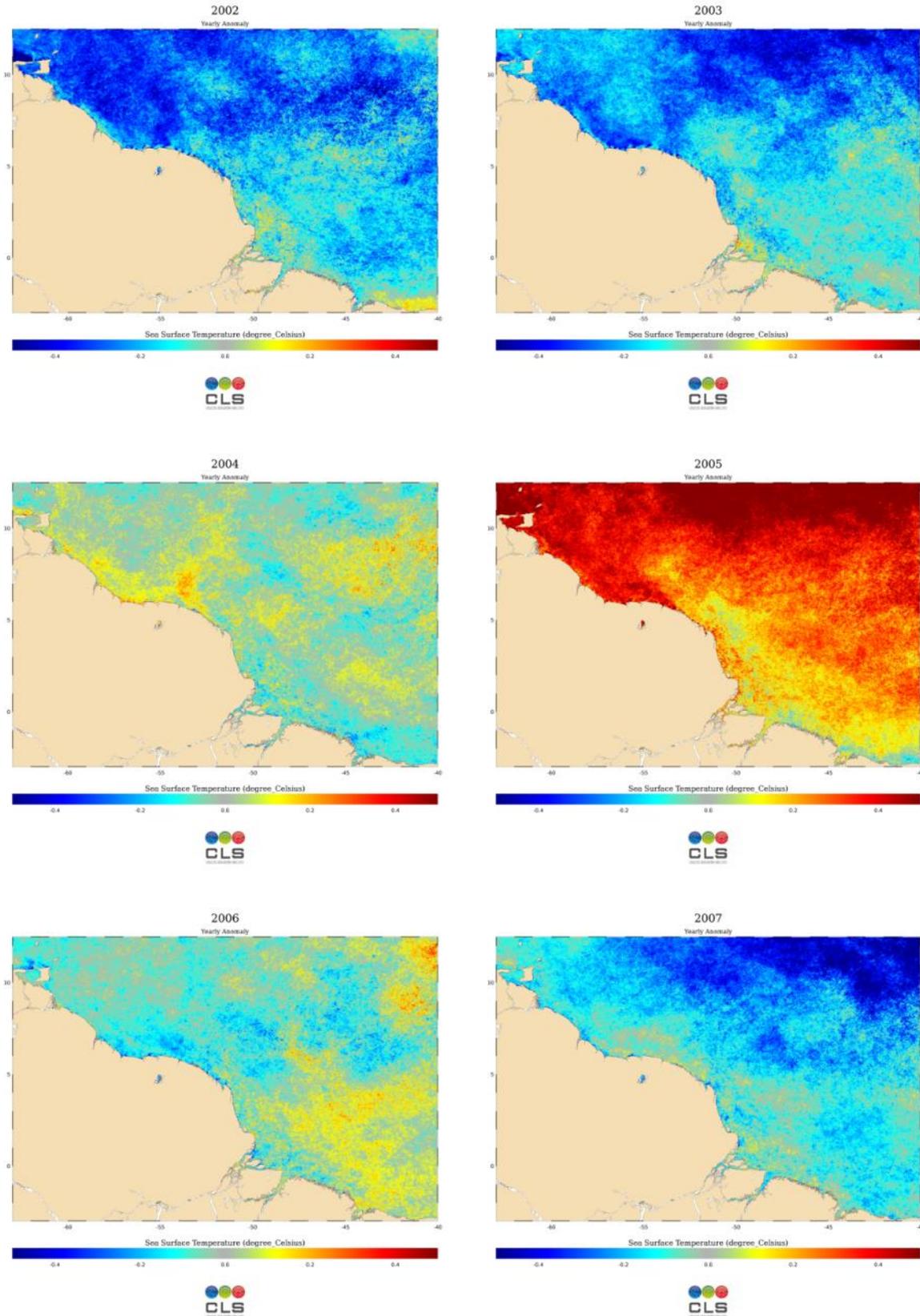
12.- Annexe 1 : Température moyenne de surface mensuelle (SST) en 2011 (Odyssea)



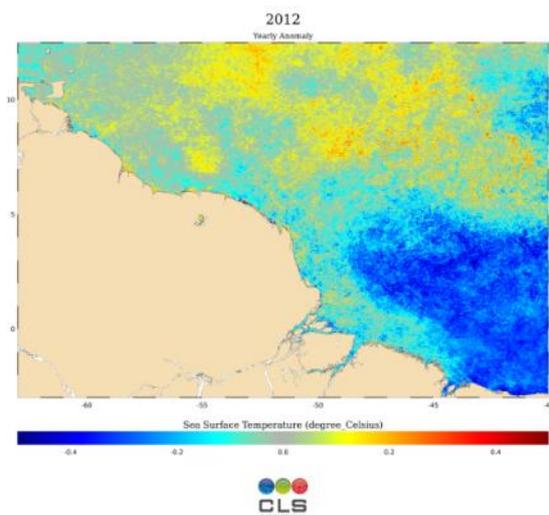
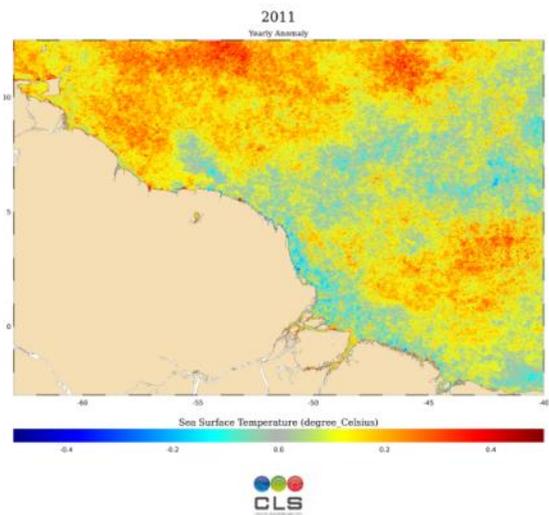
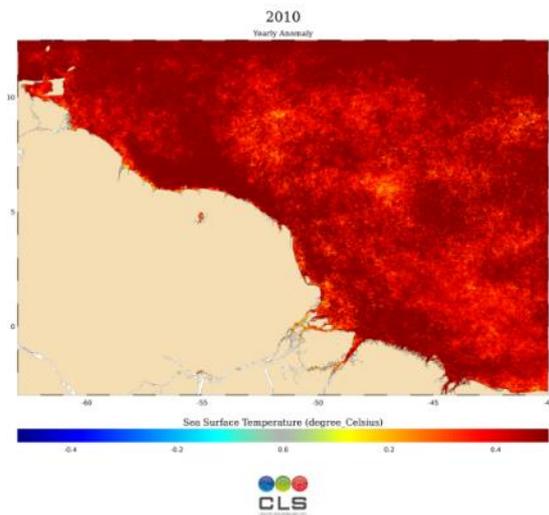
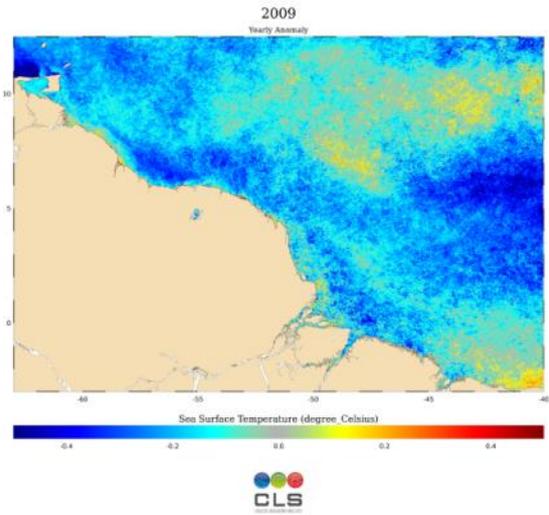
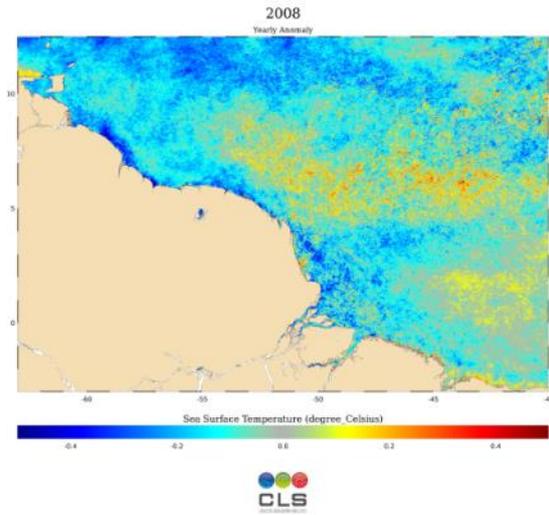
Etude de la variation des paramètres température, biomasse et turbidité sur plus de 10 années dans les eaux marines guyanaises par imagerie satellite



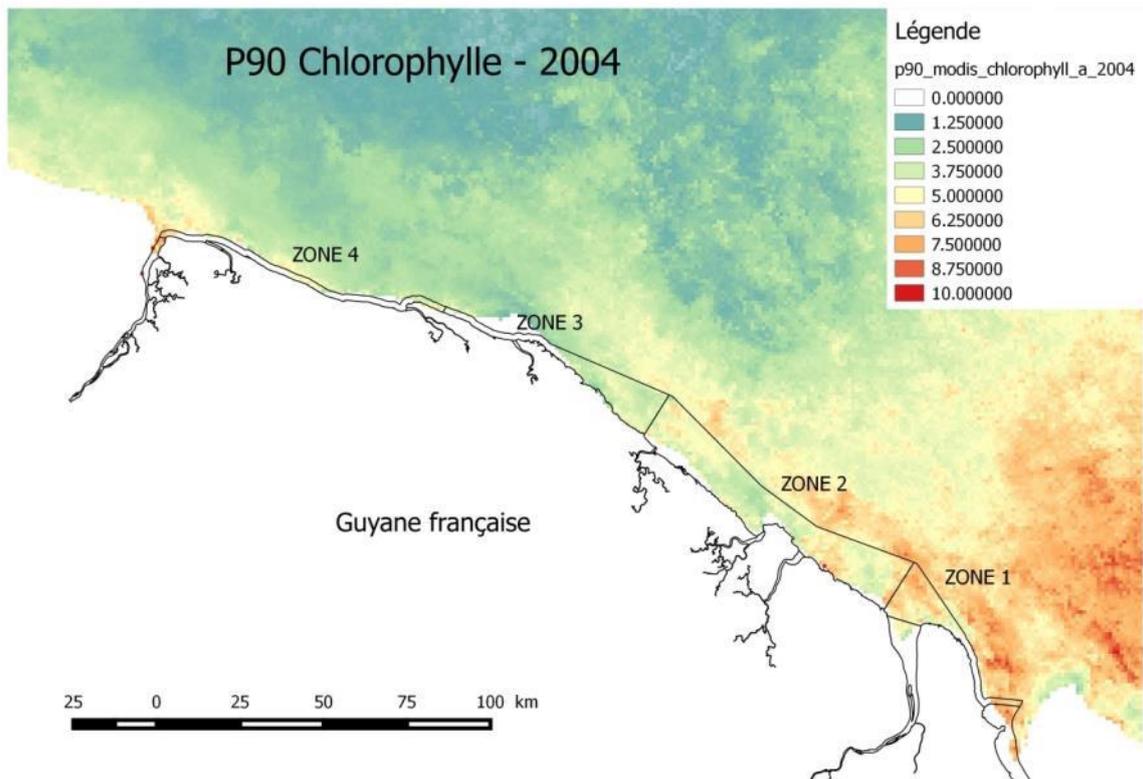
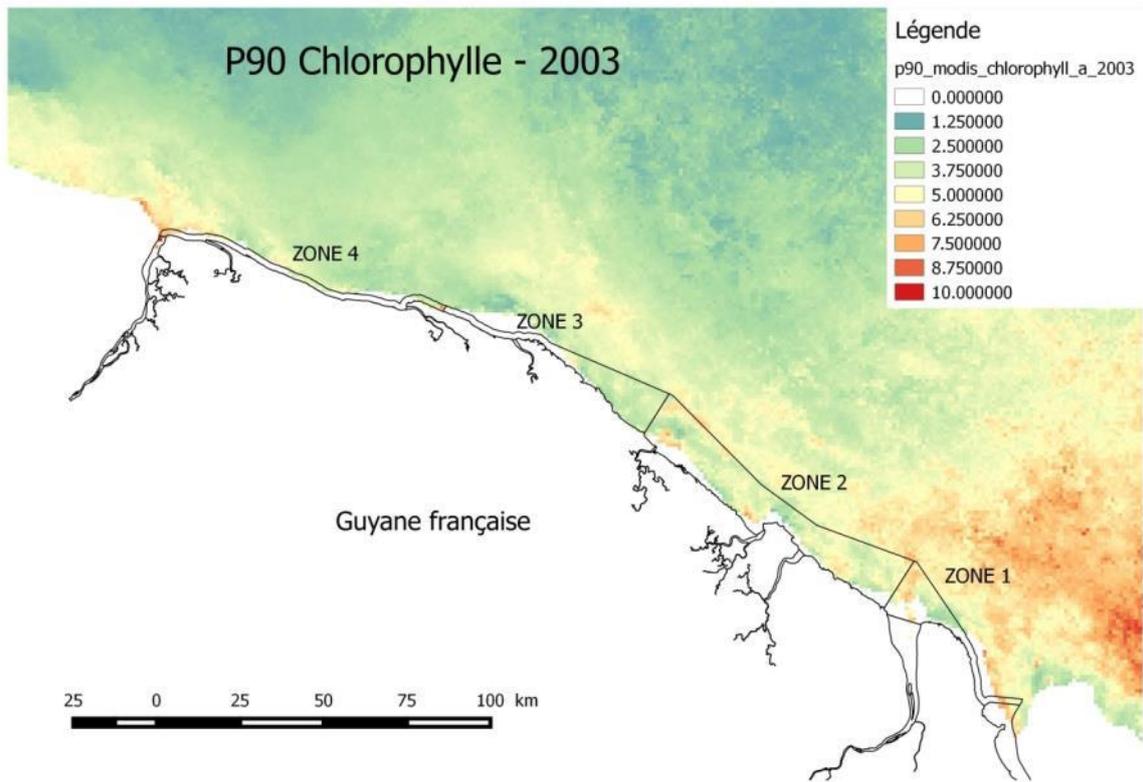
13.- Annexe 2 : Anomalies de température de surface (SST) annuelles (2002-2012)

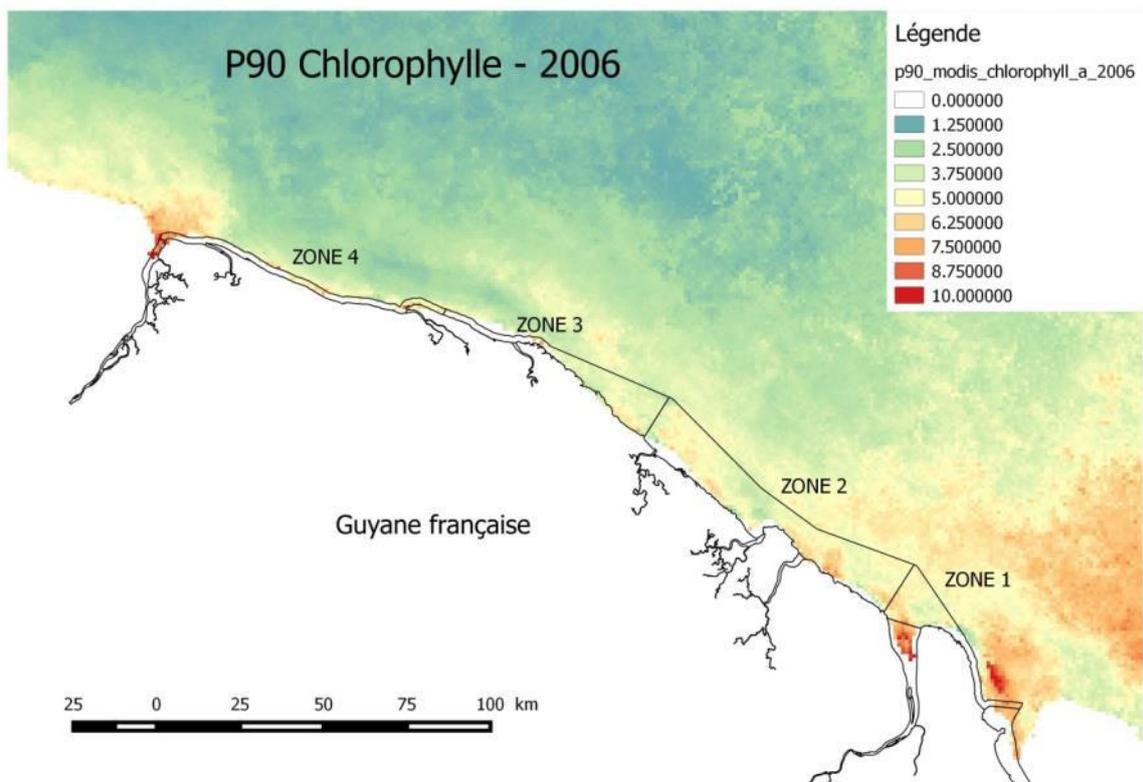
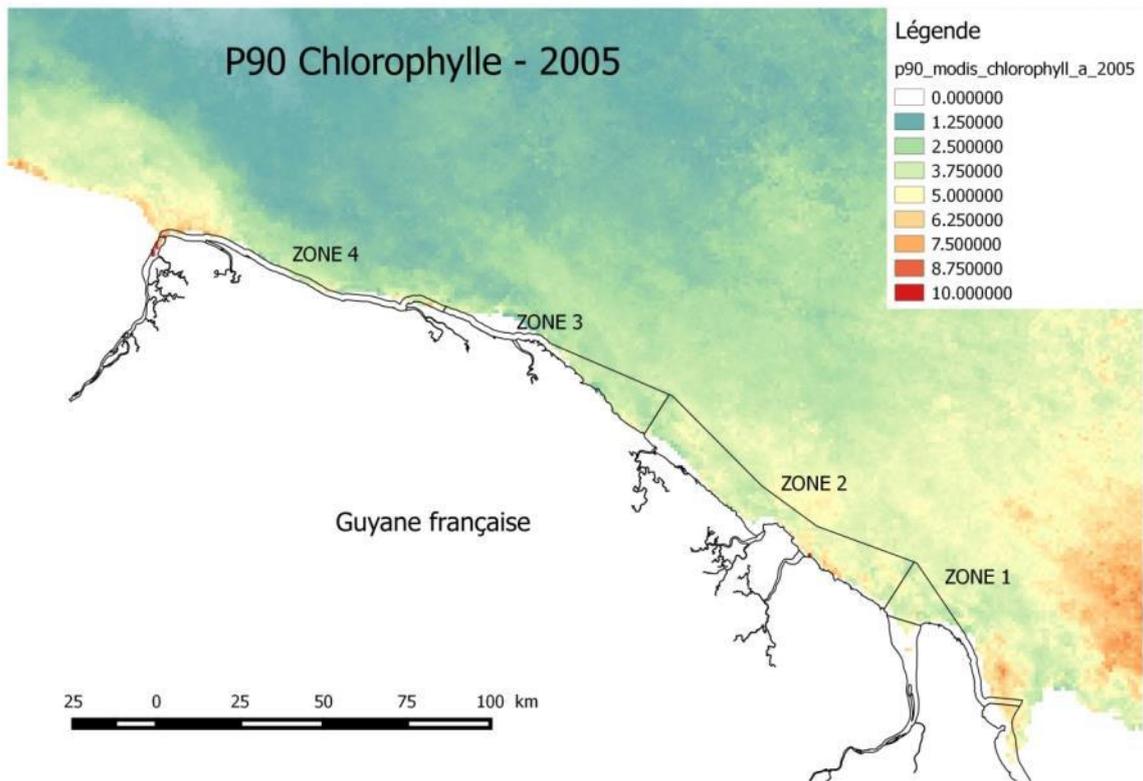


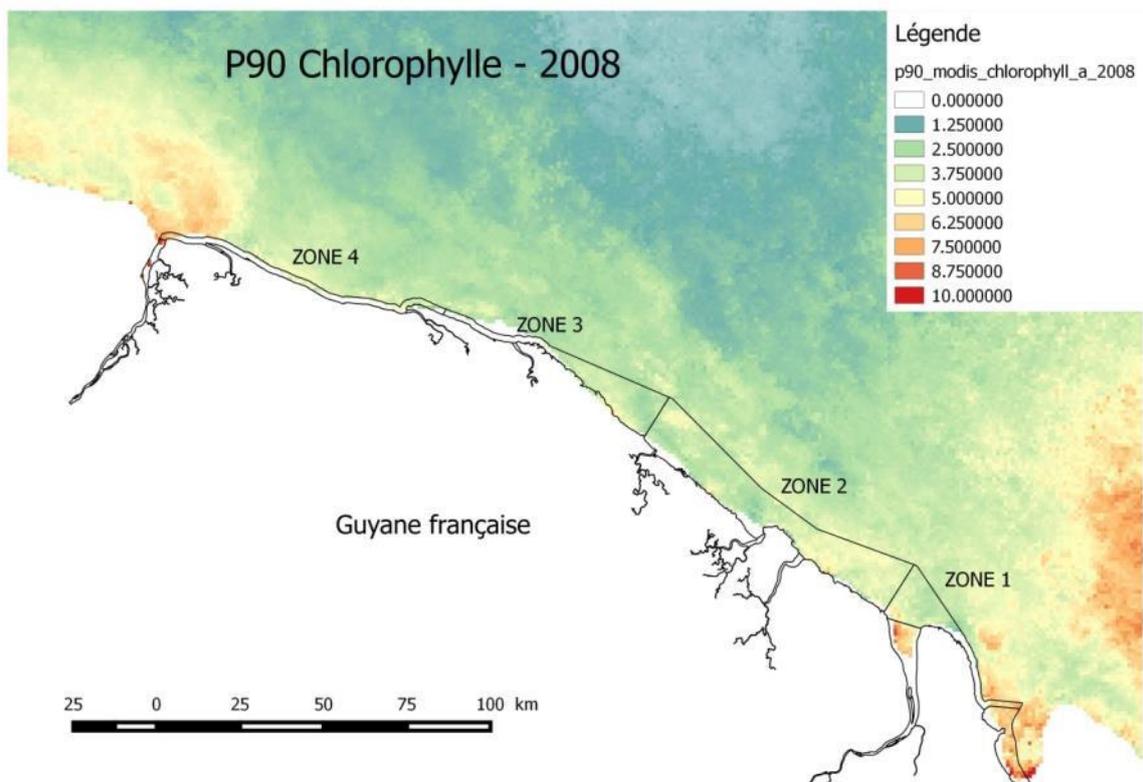
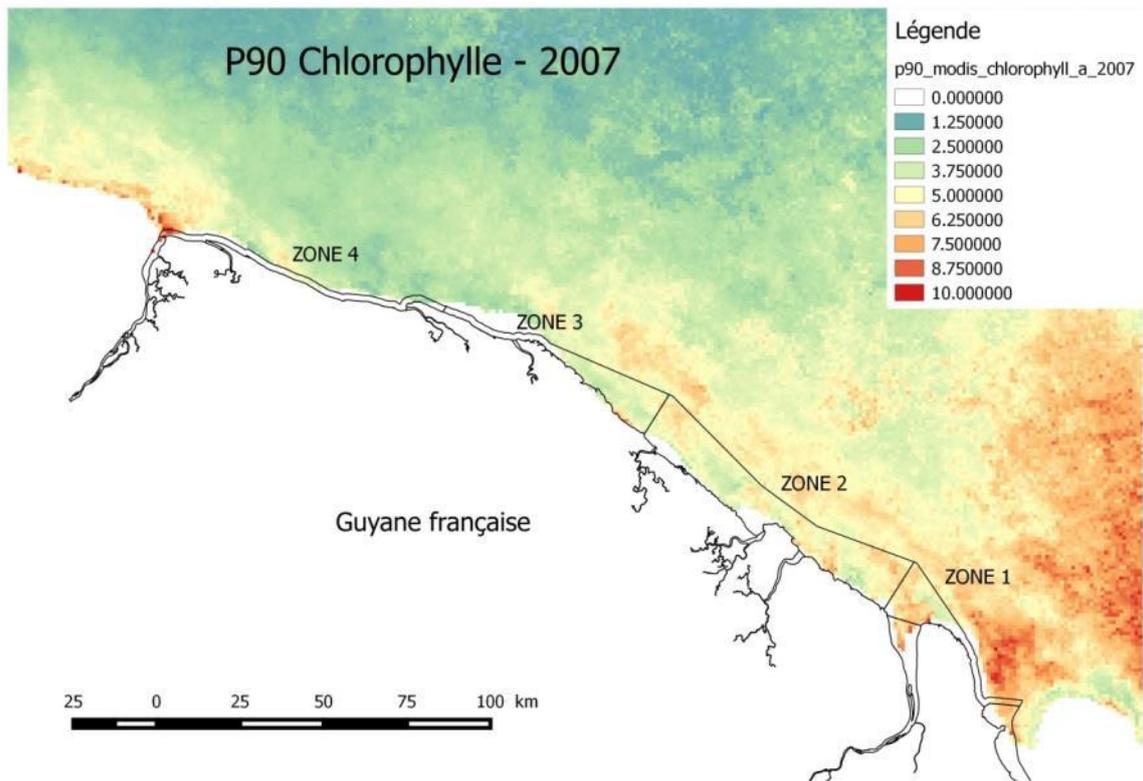
Etude de la variation des paramètres température, biomasse et turbidité sur plus de 10 années dans les eaux marines guyanaises par imagerie satellite

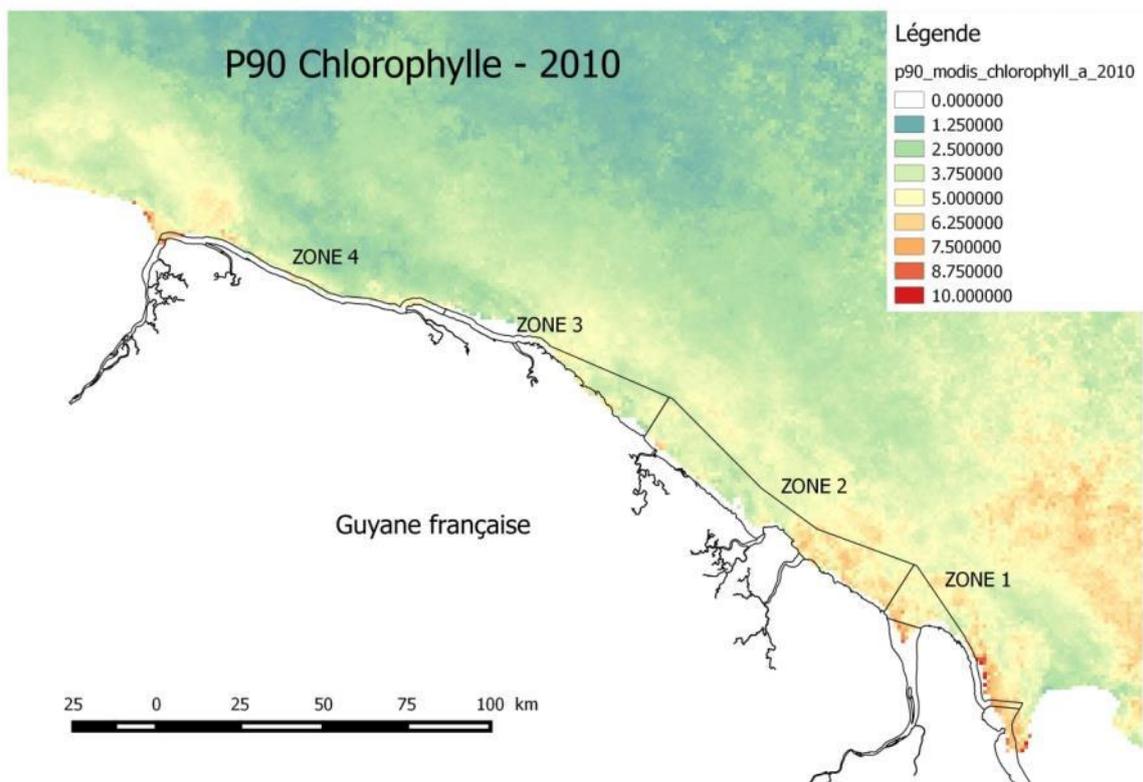
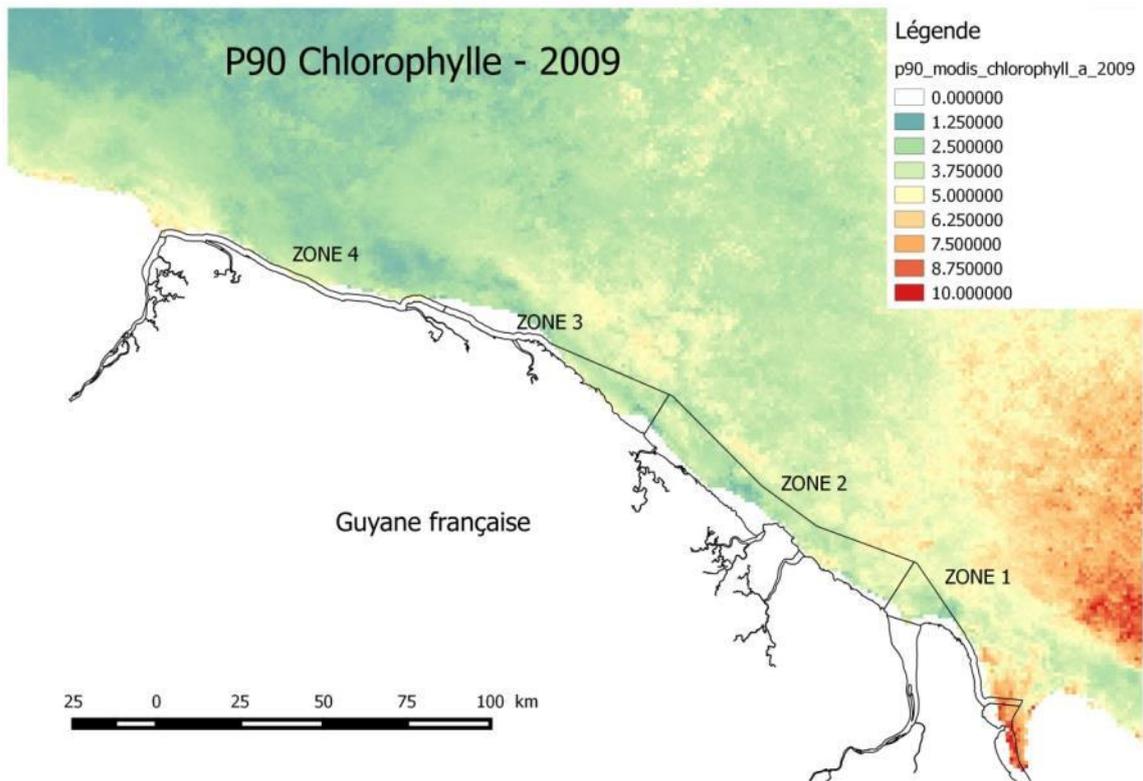


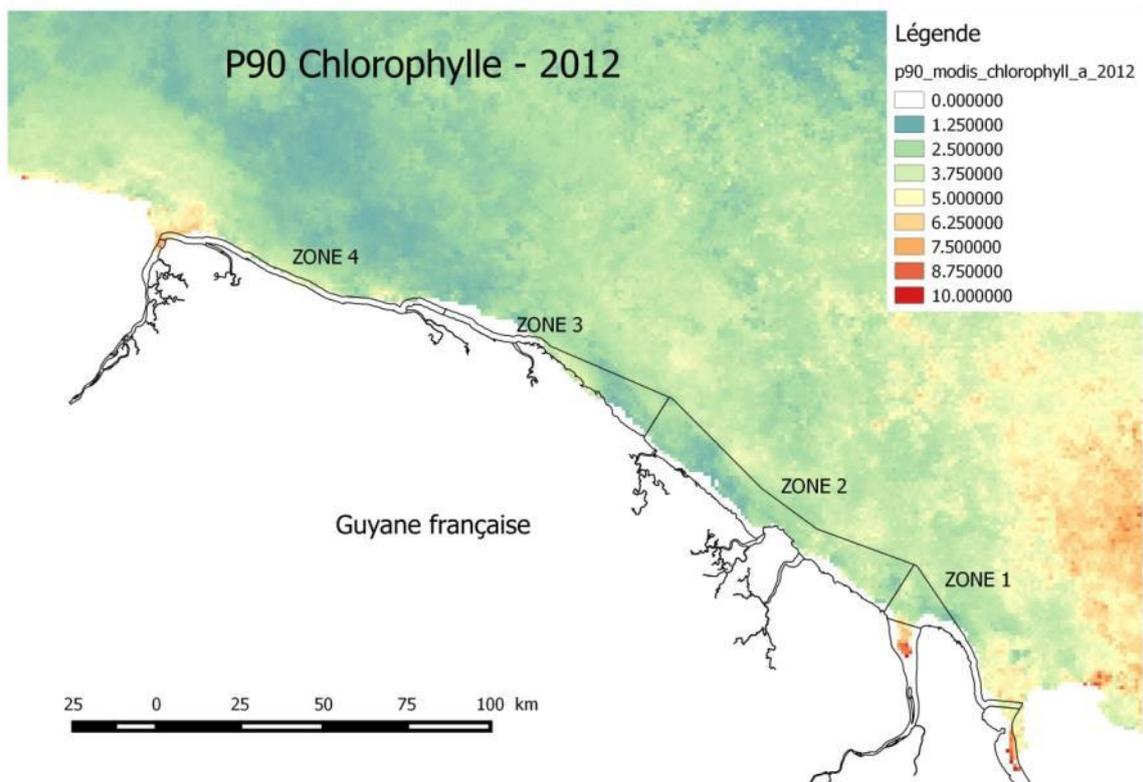
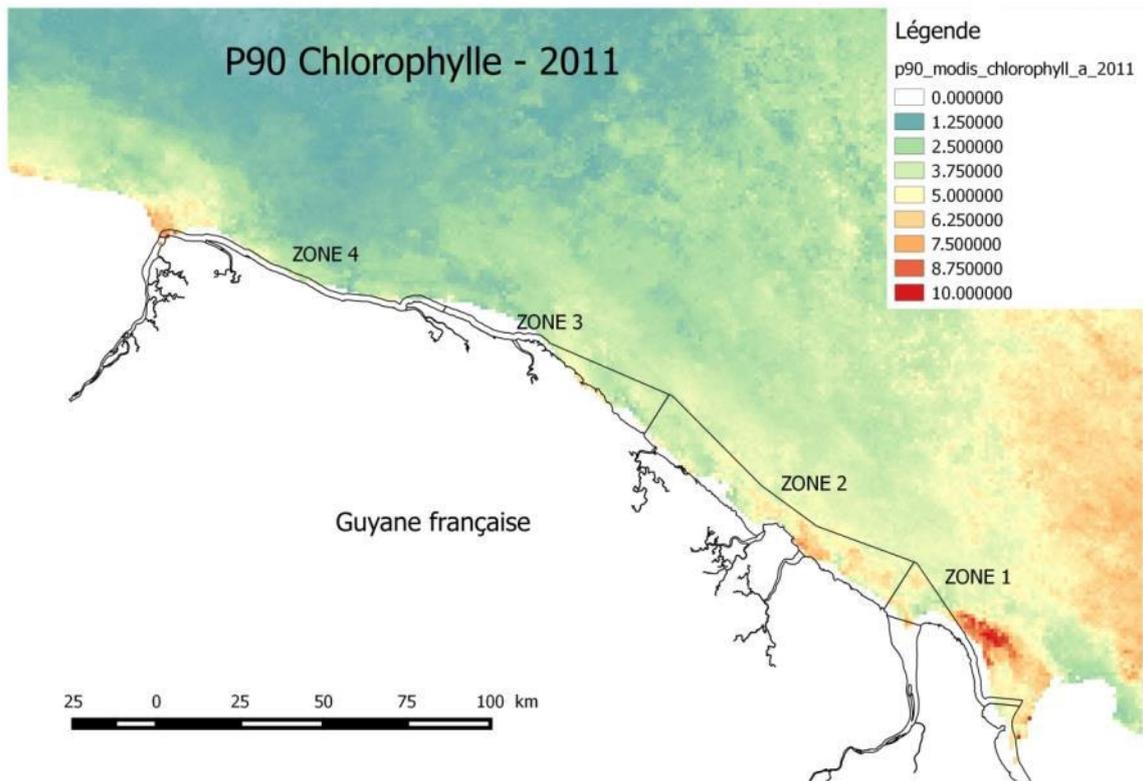
14.- Annexe 3 : P90 CHLA annuelle (2003 à 2014) et P90 CHLA sur un plan de 6 ans (2009-2014)

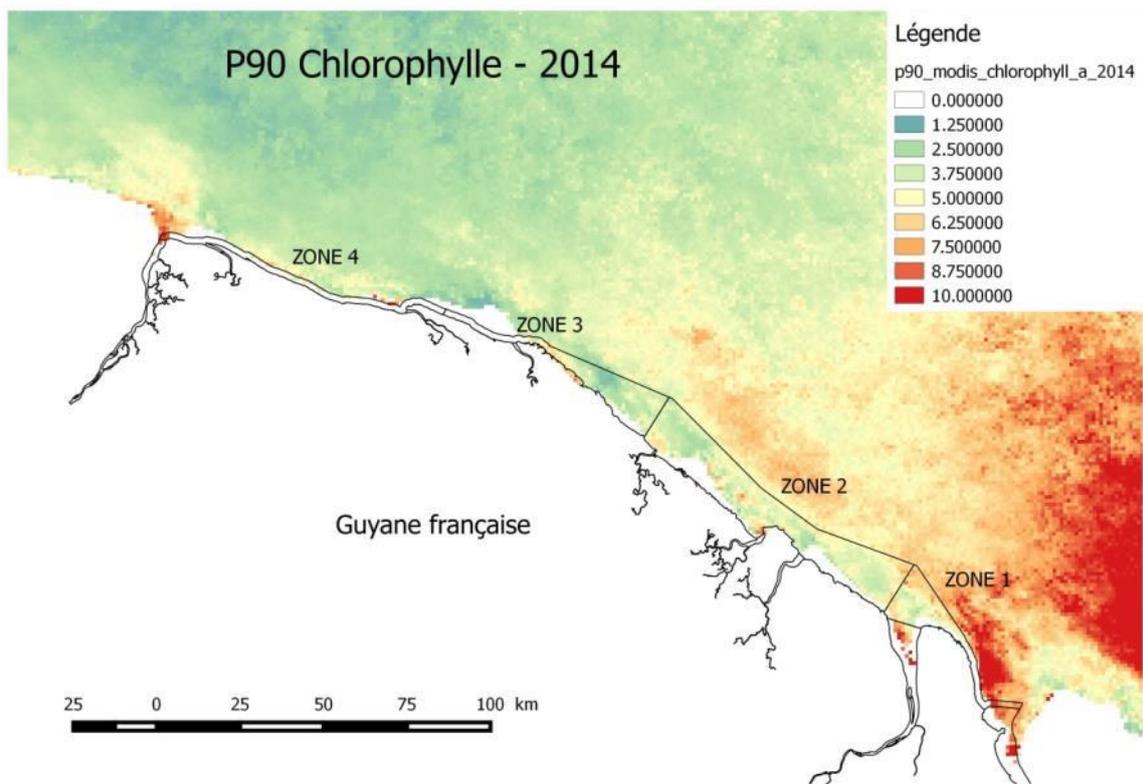
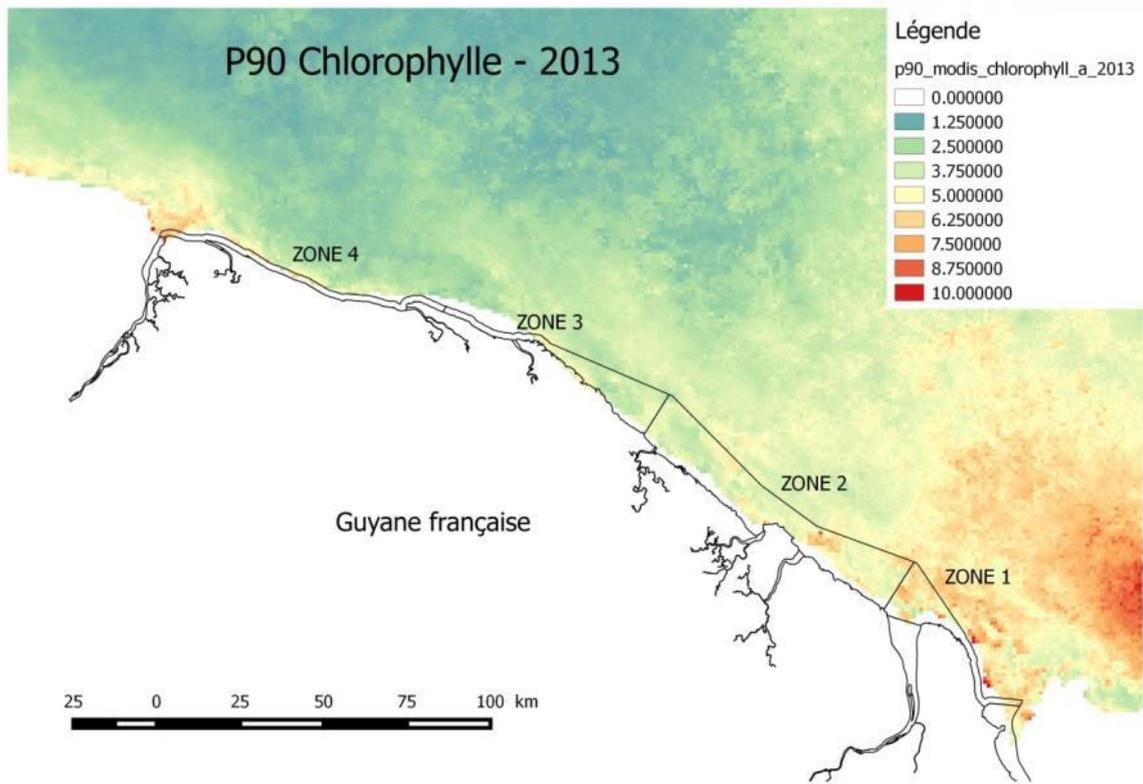


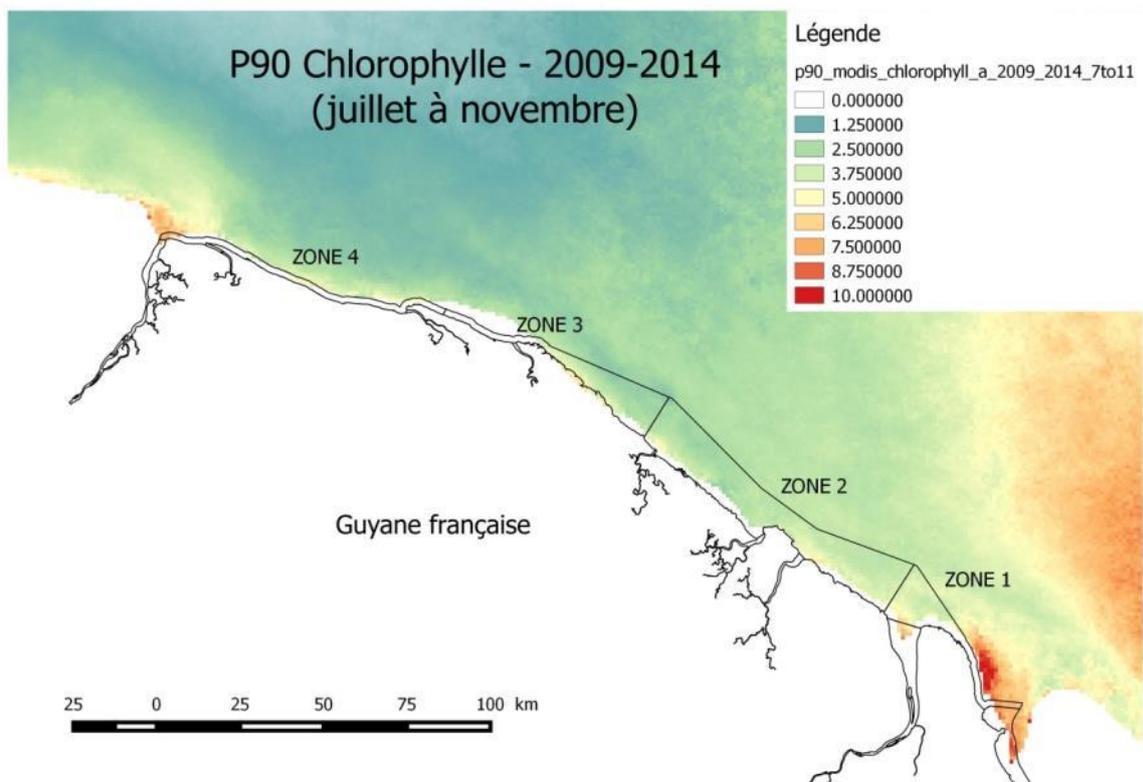
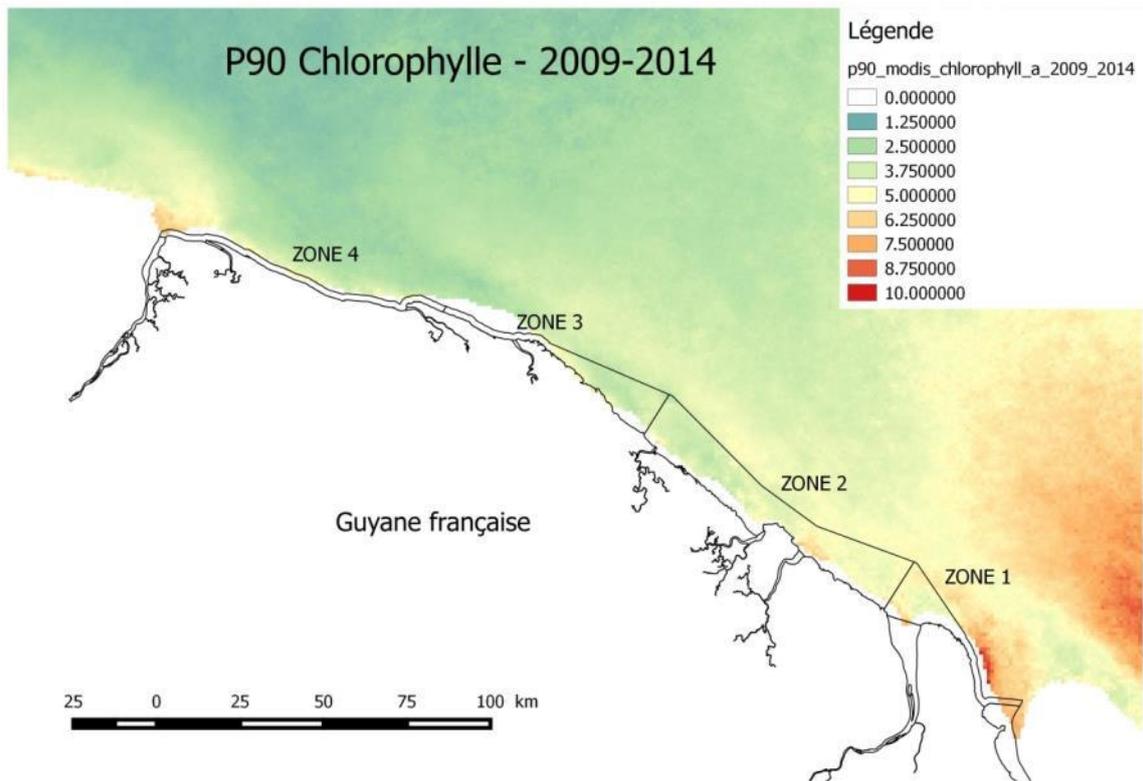




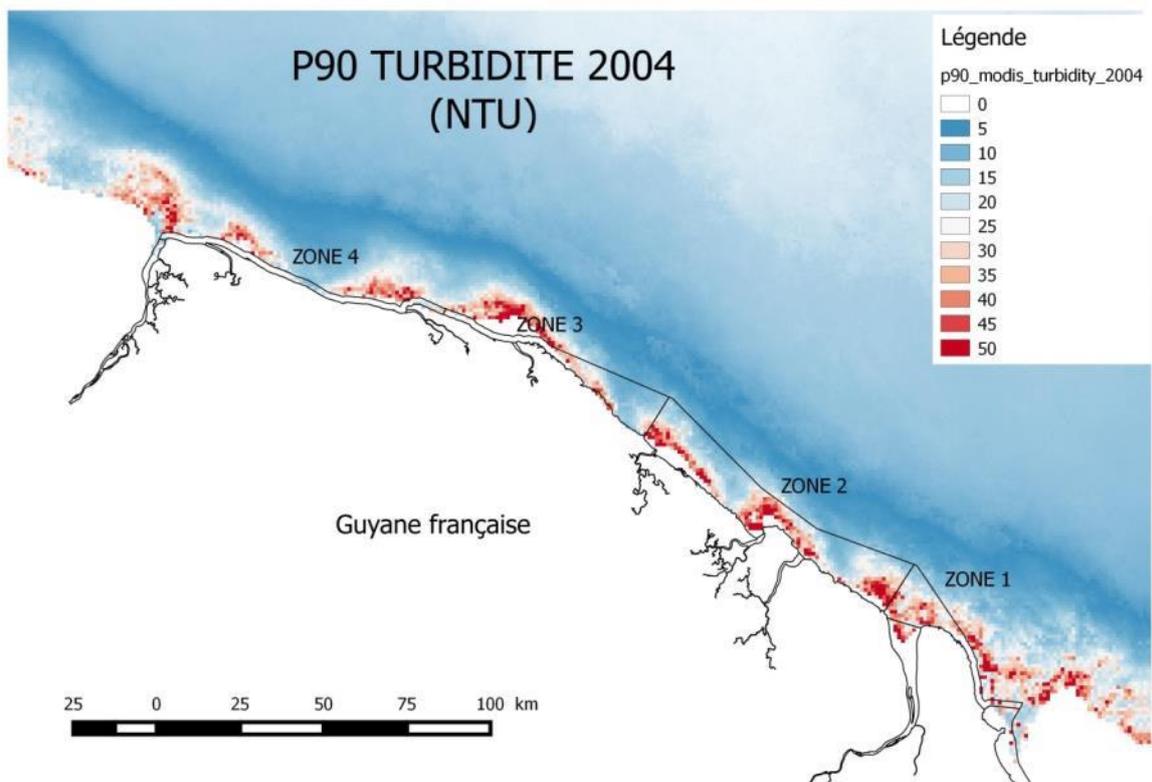
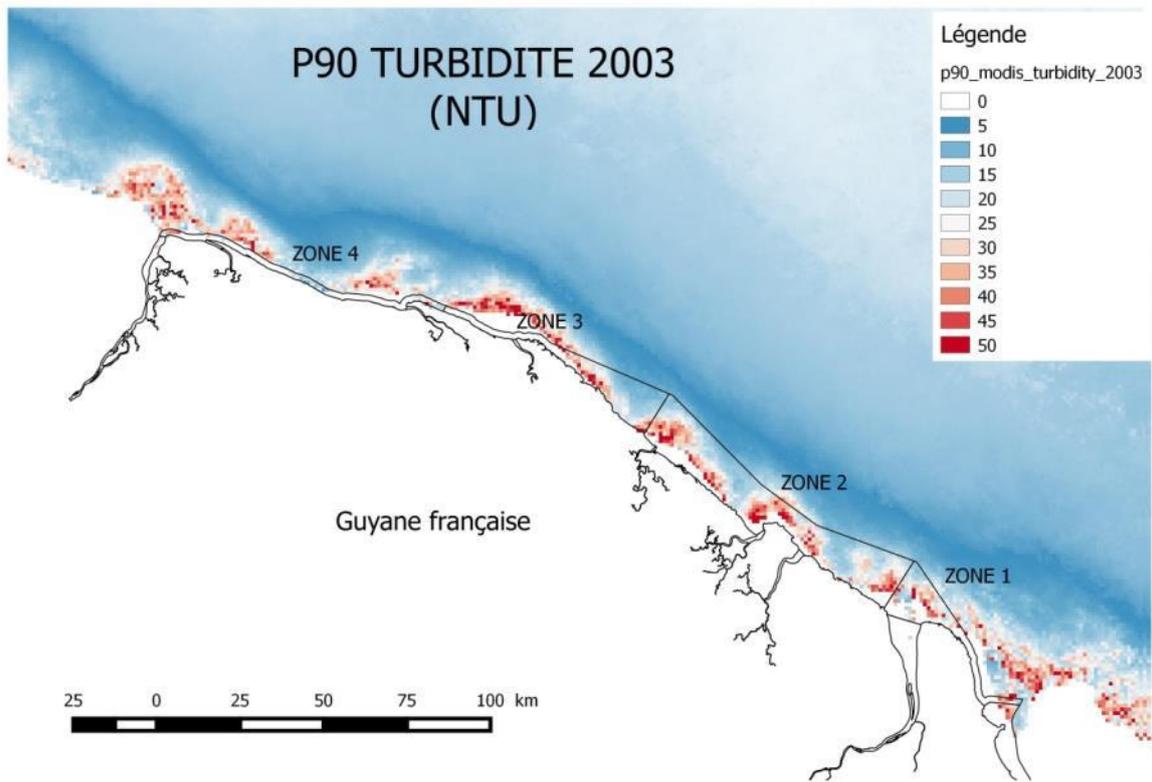


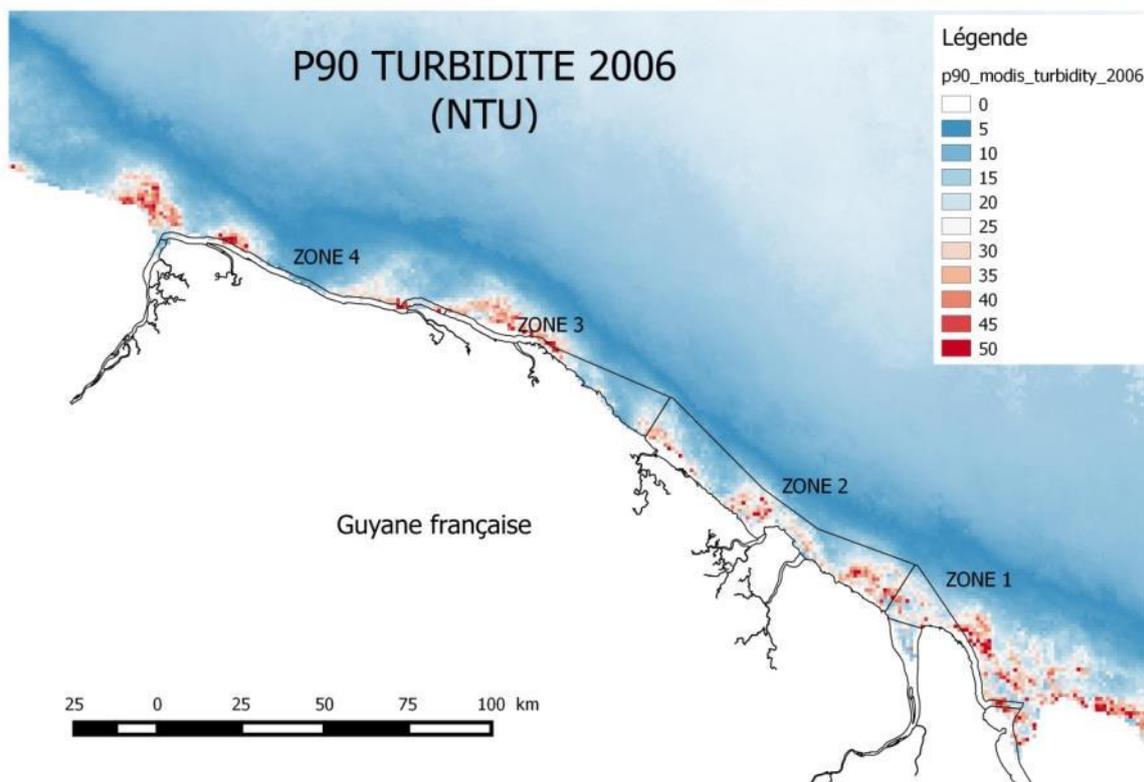
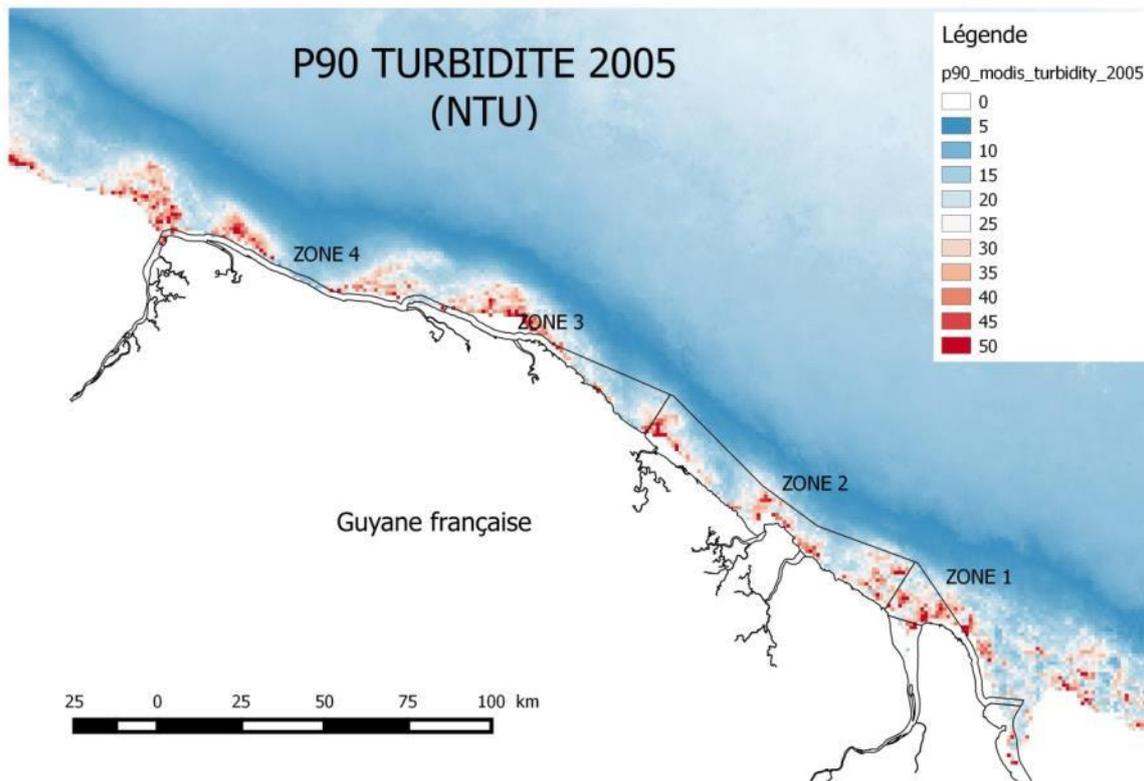


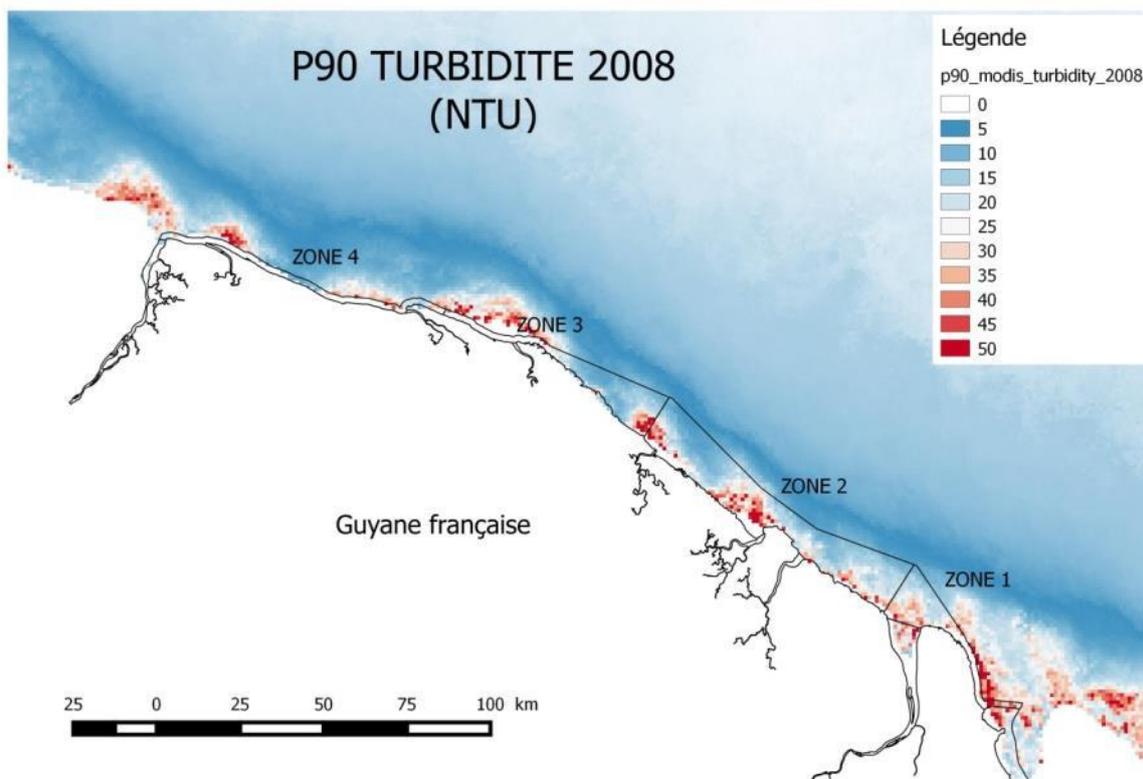
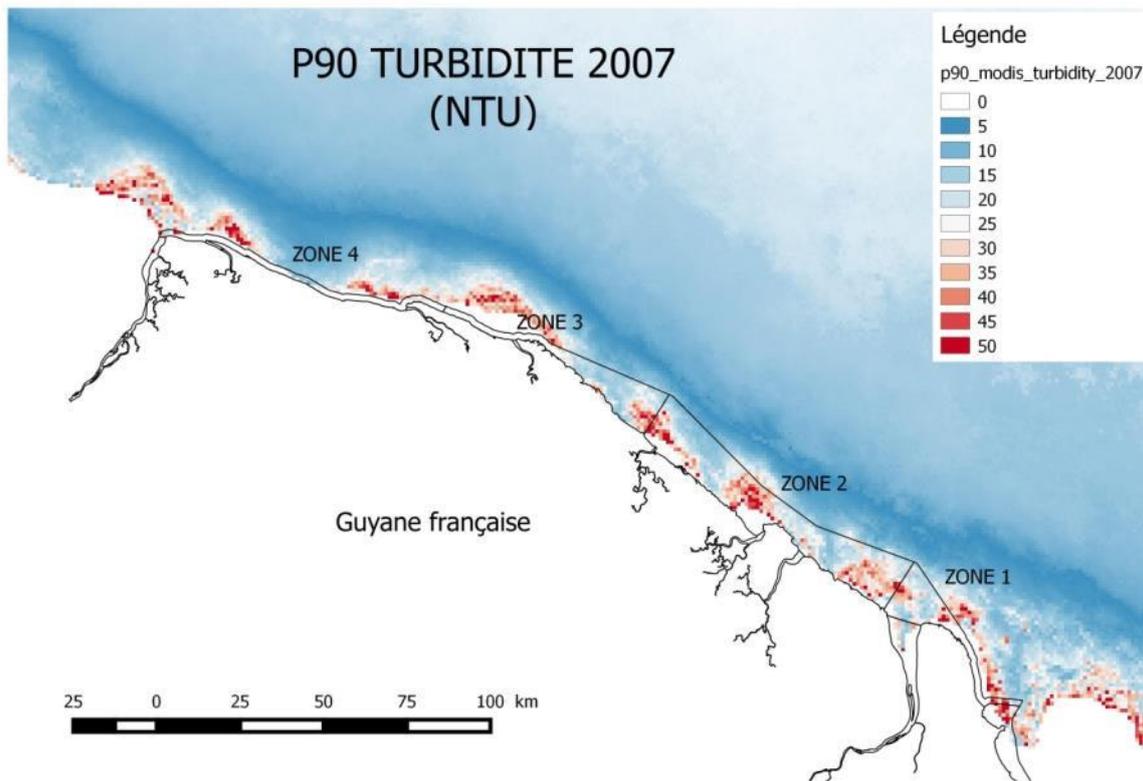


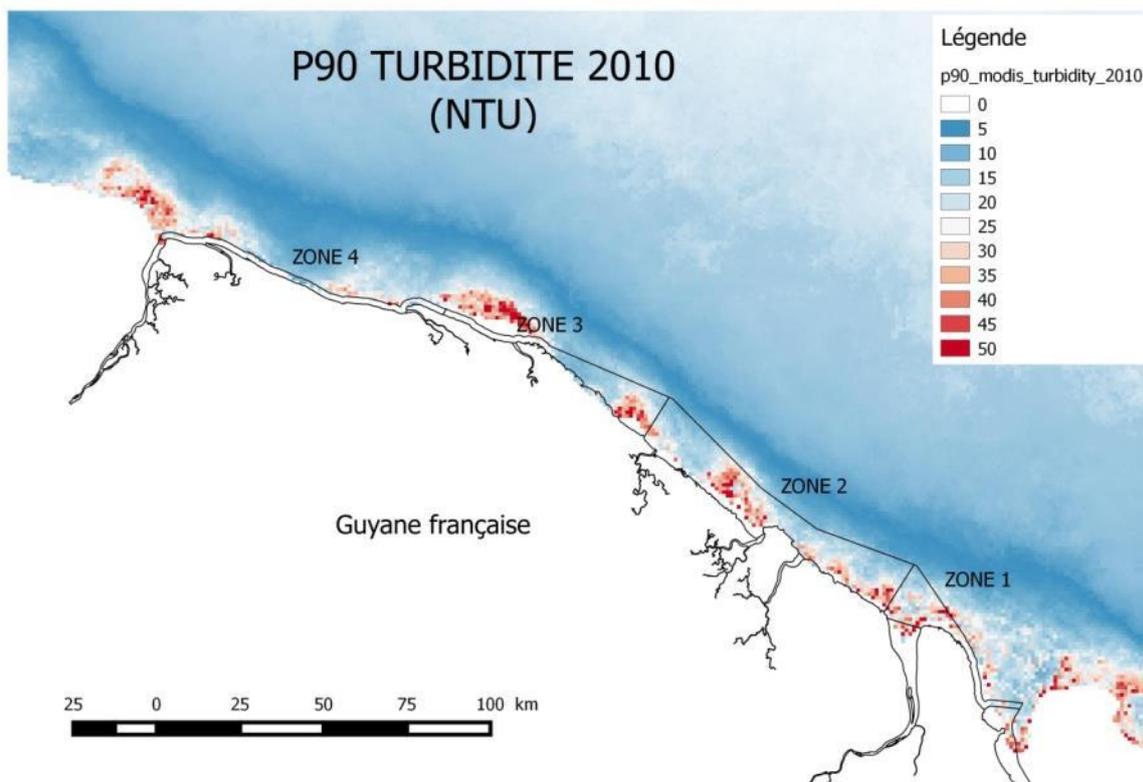
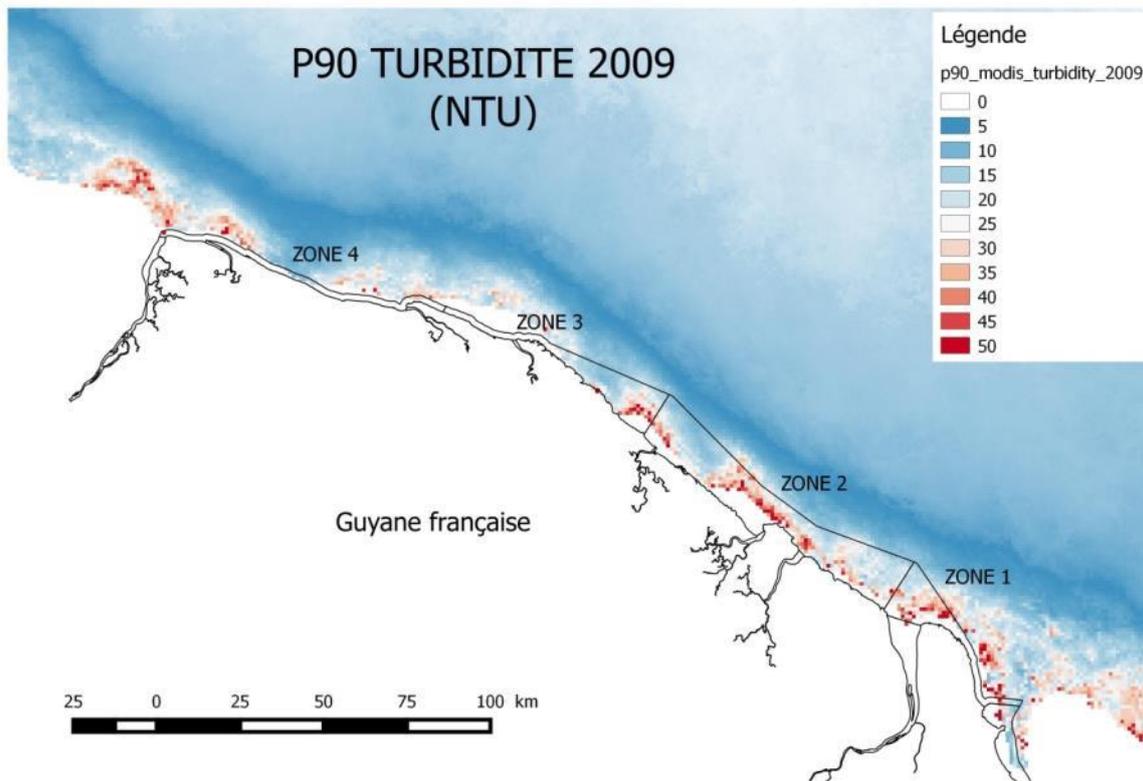


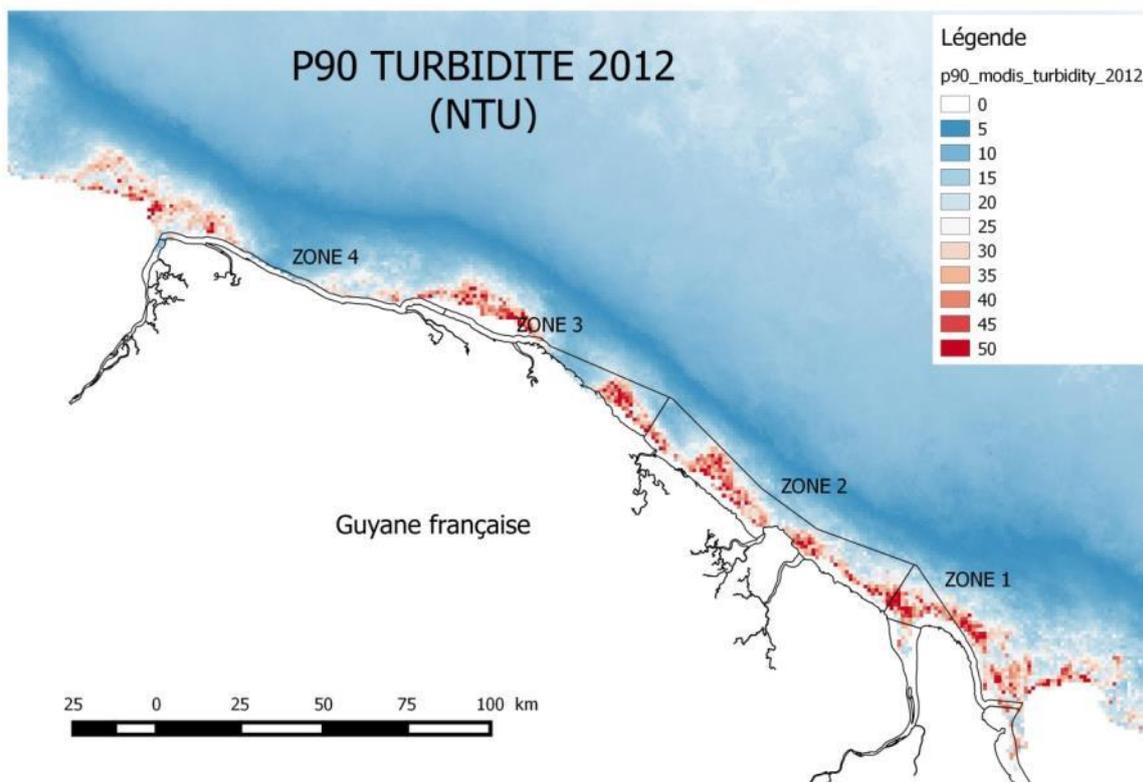
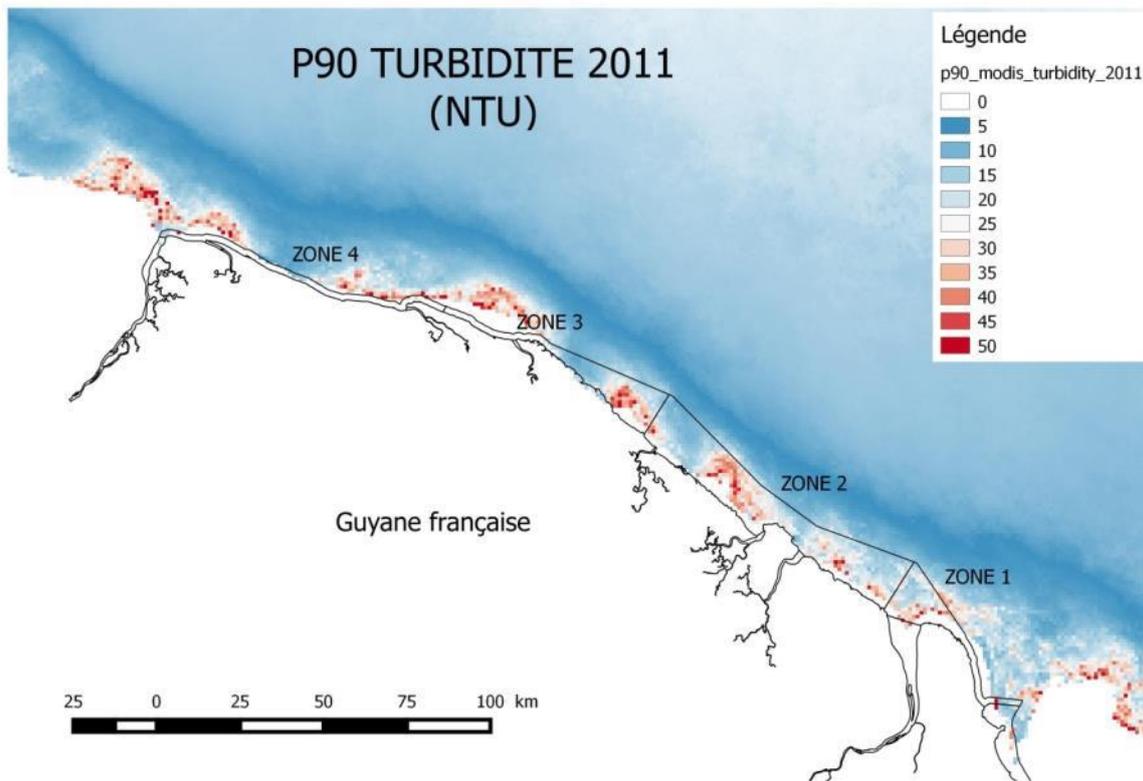
15.- Annexe 4 : P90 TURBI annuelle (2003 à 2014) et P90 TURBI sur un plan de 6 ans (2009-2014)

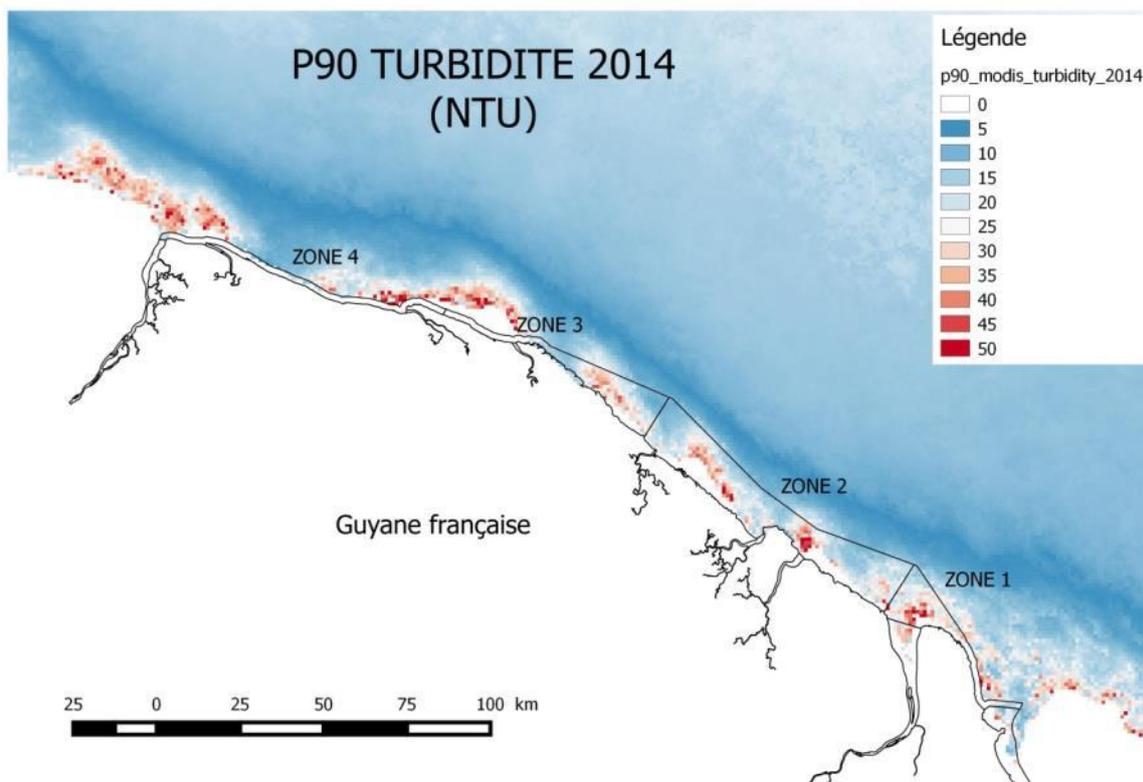
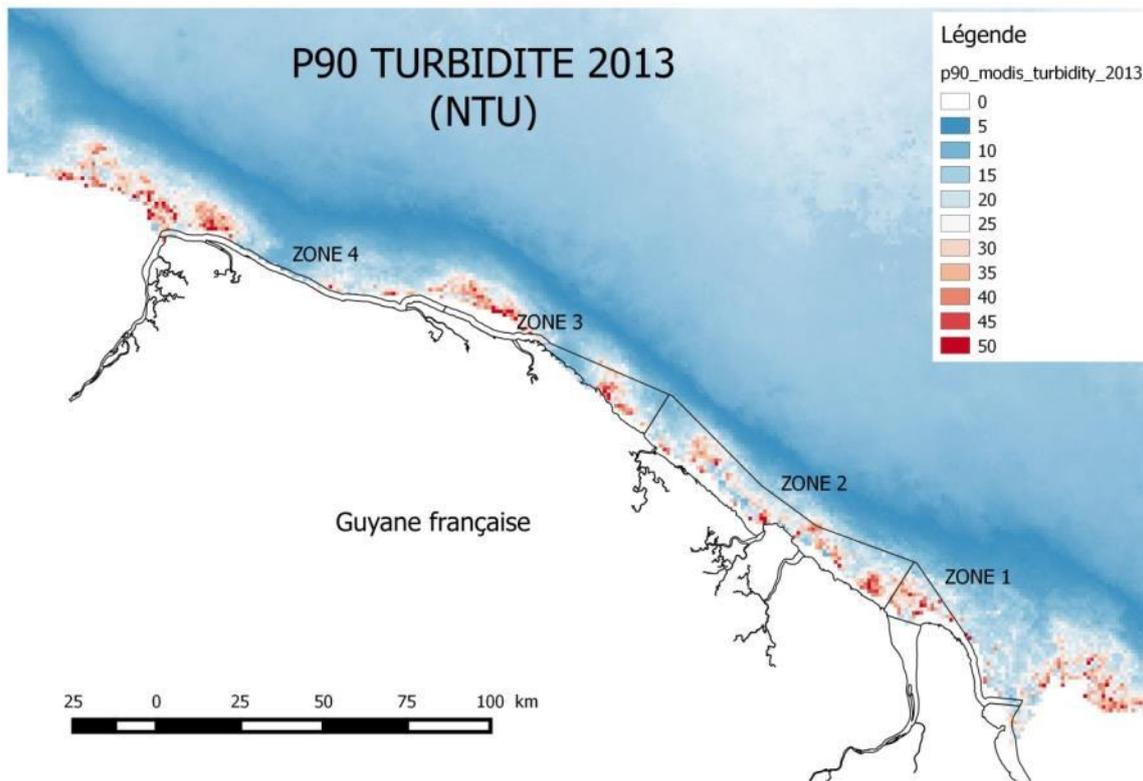


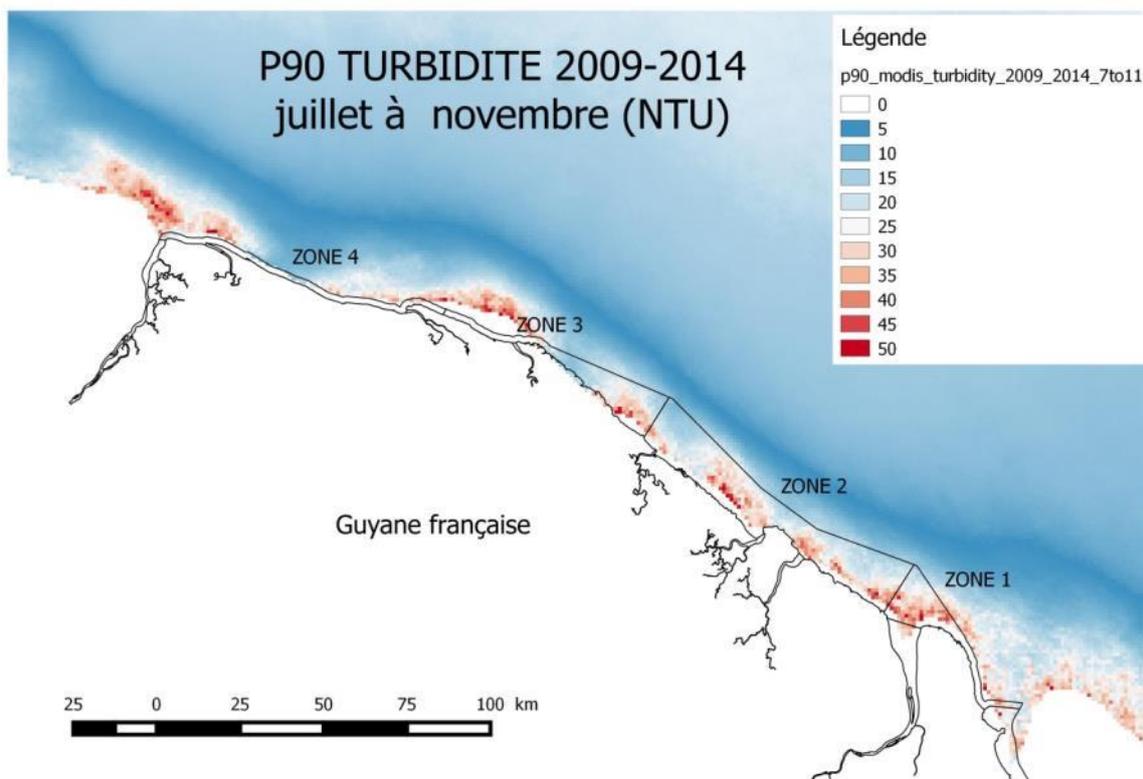
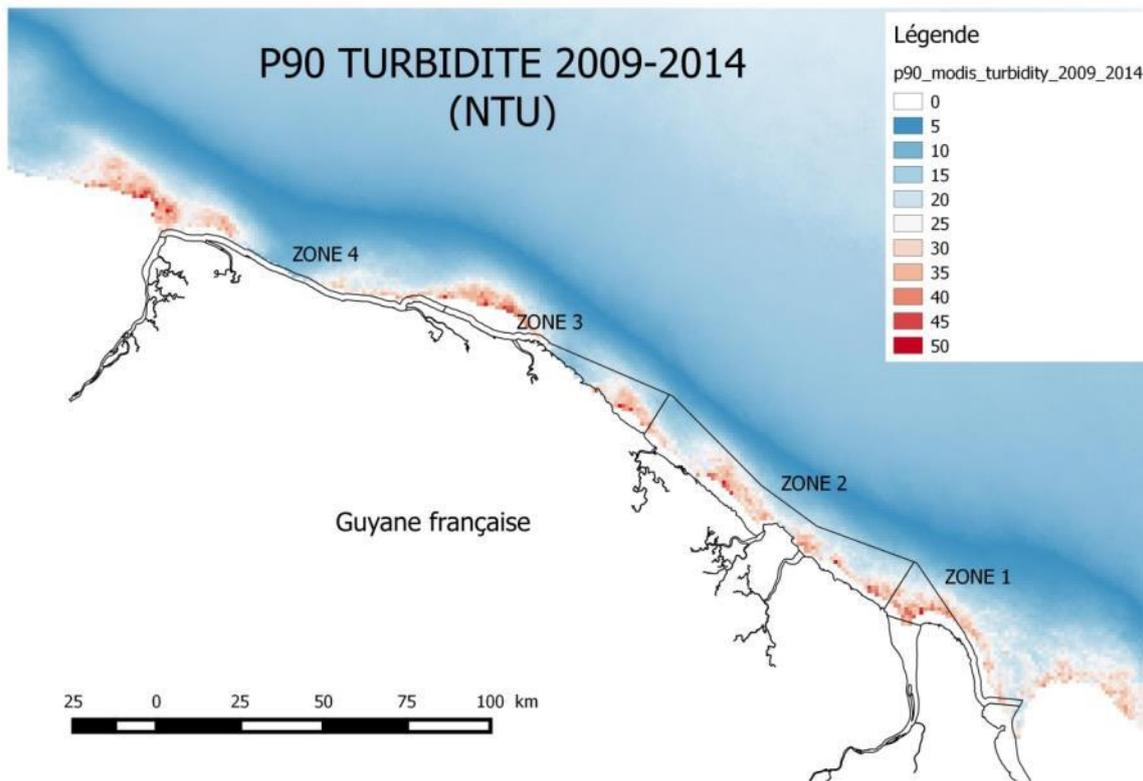












16.- Annexe 5 : Moyennes annuelles de MES (2003 à 2014)

