

2016 - Domaine 227 RDI outre-mer



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

Phase 2 : utilisation de la résolution à 300 m

Action 16, Livrables 1 et 2

Rapport final - Novembre 2016

Lampert, Luis (Ifremer/Dyneco-EP)

Bryère, Philippe (ACRI-HE)

Gohin, Francis (Ifremer/Dyneco-EP)

- **AUTEURS**

Lampert, Luis (Ifremer/Dyneco-EP)

Bryère, Philippe (ACRI-HE)

Gohin Francis (Ifremer/Dyneco-EP)

- **CORRESPONDANTS**

Onema : **Olivier MONNIER**, olivier.monnier@onema.fr

Ifremer : **Luis Lampert**, luis.lampert@ifremer.fr

Bruno Andral, Bruno.Andral@ifremer.fr

- **AUTRES CONTRIBUTEURS**

- **RESUME**

Sur les eaux extrêmement turbides de Guyane, l'imagerie satellitaire à haute résolution (300 m) semble un très bon outil de suivi des masses d'eau côtières et même estuariennes. Il est possible d'ajuster les algorithmes et méthodes de calcul pour se trouver dans la gamme de valeurs suggérées par les mesures *in-situ* disponibles et ainsi disposer de longues séries de données, où les paramètres P90chl_a et P90turbi peuvent être calculés sur la MEC.

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

Guyane française ; images satellite ; turbidité ; chlorophylle ; P90 ; MEC ; MET ; DCE

- **TITLE**

Study of the variability of biomass (Chl_a) and turbidity parameters over 10 years in the French Guyane marine waters by satellite imagery. - Part 2: Use of 300 m resolution -

- **ABSTRACT**

On the extremely turbid waters of French Guyana, the high-resolution satellite imagery (300 m) seems a very good tool for monitoring coastal and estuarine waters. It is possible to adjust the algorithms and calculation methods to be in the range of values suggested by in-situ measurements and thus, have the long data series, where P90chla and P90turbi parameters can be calculated on the MEC.

- **KEY WORDS (THEMATIC AND GEOGRAPHICAL AREA)**

French Guiana; satellite imagery; turbidity; chlorophyll; P90; MEC; MET; DCE

SYNTHESE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE

Lors des rapports de 2015 (Lampert 2015 ; Lampert, Bryère, et Gohin 2015), nous avons écarté la température comme indicateur discriminant des eaux guyanaises, car trop stable. Nous avons également statué sur l'efficacité du suivi satellite des indices de biomasse (chlorophylle) et de turbidité, ainsi que sur la pertinence de la surveillance sur une seule masse d'eau côtière (MEC). Dans l'étude présente, nous avons ajouté des images satellite à haute résolution (300 m) issues du capteur européen MERIS (2003-2012). Nous avons utilisé deux algorithmes (OC5 et Han, 2016) ainsi que deux méthodes de calcul du P90 ('par pixel' et 'global'). Aux données *in-situ* disponibles en 2015 (échantillonnage 2013), nous avons ajouté les analyses prises lors des sorties en 2014 et 2015, portant ainsi le nombre d'analyses à n≈90 par paramètre. En plus de l'étude menée sur la MEC, nous avons abordé l'étude des masses d'eau de transition (MET) à partir des images satellite à 300 m de résolution afin d'évaluer la capacité du satellite à retrouver les concentrations en chlorophylle et turbidité sur ces zones restreintes.

CHLA : Indice de biomasse (Chlorophylle)

MODIS, toujours en activité, présente de bons résultats pour la chlorophylle, mais légèrement en-dessous de ceux obtenus avec les mesures *in-situ* (figure S.1). Cette caméra présente le désavantage d'utiliser les masques et traitements NASA, qui pénalisent les pixels côtiers dans les zones de surveillance DCE, où la variabilité est la plus forte. Les capteurs à haute résolution (300 m) de l'ESA (MERIS, OLCI) utilisent des masques et des traitements permettant de récupérer des pixels côtiers, et surtout, ils augmentent le taux d'échantillonnage de seize fois par rapport aux capteurs à 1 km de résolution. Ceci est particulièrement intéressant à l'ouest d'Iracoubo, où la zone DCE ne s'étend que sur 1 mille nautique des côtes vers le large.

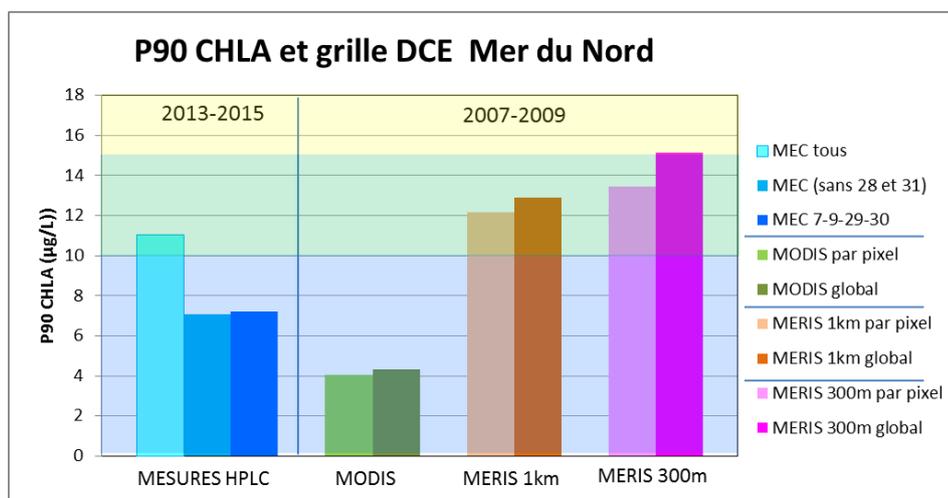


Figure S.1 : Valeurs de P90chla obtenues par analyses HPLC et par mesures satellitaires sur la MEC. Les couleurs du fond de la figure représentent la classification de la grille DCE Mer du Nord pour l'indice « chlorophylle » de l'indicateur « phytoplancton »

Avec les données obtenues par MODIS nous nous situons en dessous des valeurs *in-situ*, et avec MERIS au-dessus. Pour l'indice « chlorophylle », nous n'avons pas, au dire d'expert, des informations qui nous permettraient aujourd'hui de classer les eaux côtières guyanaises autrement qu'en « très bon » ou « bon » état du fait de l'activité humaine.

TURBI : Indice de turbidité néphélométrique (NTU)

Les valeurs de turbidité enregistrées entre 2013 et 2015 lors des sorties d'échantillonnage présentent des niveaux élevés pour des eaux côtières. Plus de 30 % des 91 échantillons analysés présentent des turbidités supérieures à 100 NTU.

Les calculs du P90turbi sont très sensibles au placement des points d'échantillonnage retenus. Des fortes variations sont observées si l'on prend les points Béhague et Les Hattes en considération (chapitre 3.4). En prenant la valeur de 56 NTU du P90turbi calculé avec les analyses des quatre points (Kourou côte, Iles du Salut, Cayenne côte et Grand Connétable) nous observons que presque tous les P90turbi issus des mesures satellite se trouvent en-dessous de cette valeur, et tout particulièrement ceux calculés avec MODIS-OC5 et MERIS300m-Han (figure S.2).

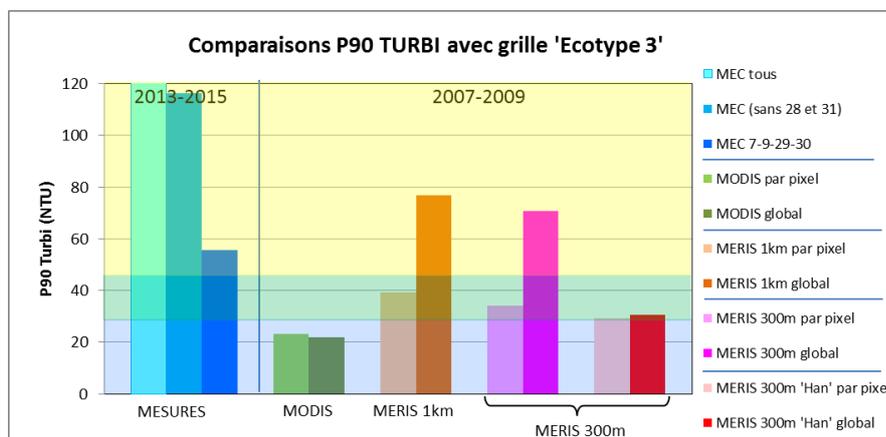


Figure S.2 : Valeurs de P90turbi obtenues par analyses et par mesures satellitaires sur la MEC. Les couleurs du fond de la figure représentent la classification de la grille DCE 'Ecotype 3' de l'indice « turbidité » de la DCE

Les résultats les plus proches sont observés pour le couple MERIS (1km et 300m)-OC5, avec des valeurs supérieures aux analyses s'il est calculé par la méthode 'globale' et inférieures si nous utilisons la méthode 'par pixel'. La plupart de ces P90turbi se situent dans la zone « bon état » ou « moyen » de la grille Ecotype 3 de la DCE (Tableau S.1).

Tableau S.1 : Grilles utilisées pour l'évaluation de l'indice « turbidité » (NTU) P90 TURBI en métropole

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

Pour la turbidité, le capteur MERIS a apporté une amélioration par rapport aux résultats obtenus avec MODIS, mais ce n'est pas la résolution de 300 m qui a fait la différence car nous obtenons des résultats similaires avec la résolution de 1 km. L'utilisation du nouvel algorithme de Han et al. (2016) place les résultats du P90turbi en-dessous de ceux des mesures et proches de celles de MODIS. Cet algorithme, utilisé avec MERIS 300 m est très robuste et bien adapté aux eaux turbides. Nous avons développé un nouvel algorithme OC5 pour les hautes turbidités (OC5-HT), avec lequel nous avons trouvé les mêmes résultats qu'avec l'algorithme de Han.

Alors, on peut se poser la question de la représentativité des mesures *in-situ*, avec un doute sur la robustesse du P90turbi issu des analyses du fait du faible nombre de valeurs encore

mesurées. Mais dans l'optique d'une surveillance à long terme, ce qui est le cas pour la DCE, la justesse des valeurs du P90turbi est secondaire face à sa tendance à long terme. C'est sur une période de 30 ans que l'on peut statuer sur l'évolution de ce paramètre. Tous les capteurs et méthodes satellite peuvent être utilisés, à condition de ne pas les changer ultérieurement.

Concernant les données *in-situ* en turbidité, nous suggérons de vérifier la représentativité des mesures en surface (premiers 50 cm) car le gradient vertical de turbidité peut être extrêmement fort (Lampert et Achoun 2011) (figure S.3). Cette seule précaution, peut faire descendre les valeurs de turbidité de façon significative. Réaliser quelques tests à différents points de surveillance sur les deux saisons permettra de mieux appréhender cette variabilité.

La grille pourrait également être adaptée en demandant à créer une nouvelle, plus en accord avec les eaux guyanaises. Mais l'on peut se poser la question de la pertinence du paramètre « turbidité » dans les eaux naturellement très turbides de Guyane, où l'activité humaine n'aura que peu, ou pas d'influence sur ce paramètre. Cette situation est différente en métropole, où la turbidité peut marquer très rapidement une activité portuaire, côtière ou industrielle. En Guyane ce type d'activité sera masqué par le haut niveau naturel de turbidité des eaux côtières.



Figure S.3 : Echantillons d'eau de mer pris, de gauche à droite, à 0.5 m, 1.5 m et 2 m de profondeur sur l'estuaire de l'Oyapock en juin 2011 (Campagne Oyana 7)

Images satellites dans les Masses d'eau de transition (MET)

L'utilisation des capteurs à 1 km de résolution ne permettait pas d'aborder les MET à cause de leur taille de pixel. Les capteurs à haute résolution, 300 m pour MERIS, augmentent de seize fois l'échantillonnage et il devient envisageable d'accéder aux MET, ou tout en partie. Nous avons retenu 4 MET pour cette étude, qui ont été redécoupées en fonction de leur géométrie (Maroni, Oyapock, Approuague et Mahury). Pour la plus petite de MET retenues, l'on dispose d'un potentiel de 130 pixels (Mahury).

Pour les concentrations moyennes en CHLA, le satellite semble bien retrouver les valeurs dont l'on dispose pour ces secteurs. Malheureusement nous ne disposons que d'un nombre restreint de données *in-situ* (n=12) et elles sont situées sur les points Béhague et Les Hattes.

Le cas de la turbidité dans les MET est plus complexe. Nous disposons de 64 mesures prises *in-situ* entre 2013 et 2015 sur 6 points de surveillance, dont les points Béhague et Les Hattes. Les P90turbi calculées pour chaque MET se situent entre 300 et 700 NTU, avec un nombre restreint

de valeurs par MET (12 à 20 mesures). Les valeurs des P90turbi calculés par satellite, toutes méthodes et algorithmes concernés, se situent très en-dessous (figure S.4).

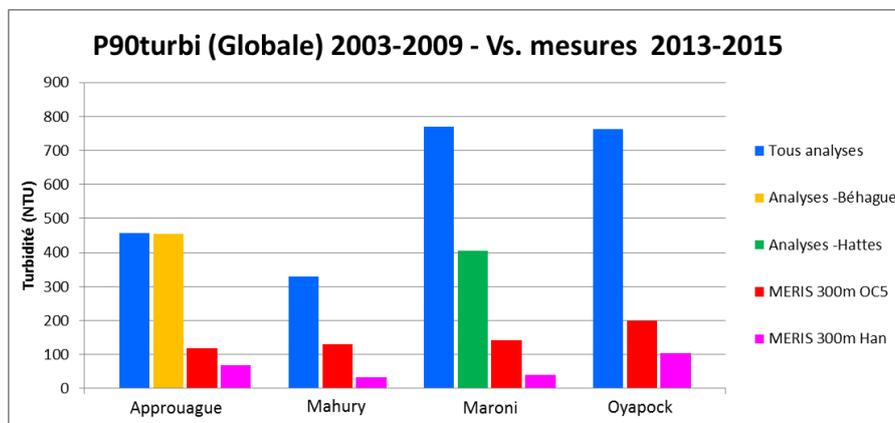


Figure S.4 : Comparaison des résultats du P90turbi pour les 4 MET étudiées, calculés à partir de tous les analyses *in-situ* (bleue), sans le point Béhague (jaune) et sans le point Les Hattes (vert); puis avec MERIS 300m-OC5, méthode globale (rouge) et avec MERIS 300 m-Han, méthode globale (mauve)

Bien qu'il ne s'agisse pas des échantillons et des images concernant les mêmes périodes, les différences ne peuvent pas être attribuées à ce facteur, mais à la capacité du satellite, et toute sa chaîne de traitements, à trouver les niveaux corrects de turbidité. Sur les méthodes et algorithmes utilisés, OC5 avec la méthode globale semble donner des meilleurs résultats, mais restent toujours en-dessous des mesures. Ce point pourrait être amélioré mais à condition de disposer de plus nombreuses données de turbidité *in-situ*.

Lors des échantillonnages des MET, il serait prudent également de prendre des mesures à différentes profondeurs pour les analyses de turbidité (0.5 m, 1 m et 2 m) afin de s'assurer que le gradient vertical n'ait pas une forte influence sur les résultats ; car le satellite n'intègre, dans des eaux turbides, que les premiers centimètres de surface.

Quel que soit le choix de la méthode, elle doit être capable de mesurer au mieux la tendance pluriannuelle. Et dans ce domaine, même si les valeurs issues du satellite ne s'accordent pas parfaitement aux mesures *in-situ*, le satellite présente des résultats plus robustes du fait du grand nombre de pixels utilisés.

Il serait envisageable d'ajuster les algorithmes utilisés aux eaux guyanaises dans la mesure où les données dont nous disposons seraient suffisantes et représentatives. Ceci pourrait être envisagé au terme d'un plan de surveillance de 6 ans par exemple.

En résumé, sur les eaux extrêmement turbides de Guyane, l'imagerie satellitaire à haute résolution (300m) semble être un très bon outil de suivi des masses d'eau côtières et même estuariennes. Il est possible d'ajuster les algorithmes et méthodes de calcul pour se trouver dans la gamme de valeurs suggérées par les mesures *in-situ* disponibles et ainsi disposer des longues séries de données, où les paramètres P90chl_a et P90turbi peuvent être calculés.

• SOMMAIRE

1. Introduction	1
2. Matériel et méthodes	2
2.1. Plateformes et caméras satellite utilisées	2
2.2. Algorithmes satellite	3
2.3. Calcul du percentile 90 (P90)	4
2.4. Données issues des analyses du programme de surveillance	5
2.5 Logiciels de traitement et visualisation	8
3. Comparaison du P90CHLA et du P90TURBI avec des résolutions de 1 km et 300 m	9
3.1. Comparaison du P90CHLA avec 1 km et 300 m de résolution	9
3.2. P90CHLA – Données in-situ Vs. données satellite	11
3.3. Comparaison du P90TURBI avec 1 km et 300 m de résolution	12
3.4. P90TURBI – Données in-situ Vs. données satellite	14
4. Approche satellitaire des MET	16
4.1. CHLA – Evolution des moyennes par MET	16
4.2. CHLA – Evolution du P90CHLA par MET	18
4.3. TURBI – Evolution des moyennes par MET	20
4.4. TURBI – Evolution du P90CHLA par MET	22
4.5. Amélioration du taux de pixels utilisables – Méthode ‘globale’	23
5. Nouvel algorithme pour la turbidité	26
5.1. P90TURBI – algorithme de Han et al. (2016) dans les eaux de la MEC	26
5.1. P90TURBI – algorithme de Han et al. (2016) sur les 4 MET	27
6. Surveillance satellite <i>via</i> Internet	29
6.1. Caractéristiques du démonstrateur	29
7. Discussion – Conclusion	32
7.1. Comparaison images satellite à 1 km et 300 m de résolution	32
7.2. Utilisation des images satellite à 300 m de résolution sur les MET	36
7.3. Conclusion	37

Bibliographie.....	38
Sigles & abréviations	39
Annexe 1 : P90CHLA obtenus avec MEIS300m et OC5 (méthode 'par pixel') entre 2003 et 2009.....	41
Annexe 2 : P90TURBI obtenus avec MEIS300m et OC5 (méthode 'par pixel') entre 2003 et 2009 ...	45
Annexe 3 : Effets côte-large pour les valeurs de CHLA avec MODIS et MERIS en présence d'un gradient de turbidité.....	49

1.- INTRODUCTION

La réalisation du rapport « Etude de la variation des paramètres température, biomasse et turbidité sur plus de 10 années dans les eaux marines guyanaises par imagerie satellite » (Lampert 2015 ; Lampert, Bryère, et Gohin 2015) nous a permis de créer une base de données sur les paramètres de température, chlorophylle et turbidité des eaux marines guyanaises sur plus de dix années. Ces données, manquantes en Guyane du fait du faible taux de réalisation de campagnes marines, nous a conduit à proposer des stratégies de surveillance dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) en adéquation à l'évolution spatio-temporelle de ces paramètres.

Dans cette deuxième phase du travail, nous ferons le point dans le chapitre 3 sur l'utilisation des images à plus haute résolution des capteurs couleur de l'eau (résolution du pixel = 300 m), ainsi que des avantages que cette résolution peut apporter par rapport aux images à 1 km. Les paramètres suivis sont ceux décrits et utilisés par la DCE sur les eaux côtières et susceptibles d'être calculés à partir des images satellite : le percentile 90 de la chlorophylle (P90chl_a) et le percentile 90 de la turbidité (P90turbi). Ces deux paramètres sont décrits dans les protocoles de la DCE pour calculer l'indicateur biologique « Phytoplancton ».

Le fait de disposer de pixels avec une résolution de 300 m nous permet de nous rapprocher davantage des côtes et envisager la possibilité de caractériser les eaux des principales masses d'eau de transition (MET). Dans le chapitre 4 nous aborderons cette approche pour la chlorophylle et la turbidité avec les images MERIS à 300 m.

Suite à une récente publication sur un nouvel algorithme « turbidité » concernant les eaux très chargées en particules (Han et al., 2016), nous avons traité les images de MERIS 300 m avec celui-ci afin de les comparer avec celles obtenues avec l'algorithme d'Ifremer OC5.

Nous aborderons également la possibilité d'un suivi opérationnel des paramètres « percentile 90 chlorophylle (P90chl_a) et percentile 90 turbidité (P90turbi) dans les eaux guyanaises à partir des images satellite. Un démonstrateur d'un site web dédié à cette tâche sera présenté dans le chapitre 6, avec un lien internet qui permettra d'apprécier ses fonctionnalités.

Finalement nous ferons un point sur la capacité des capteurs satellite et les algorithmes dont nous disposons à retrouver les valeurs en chlorophylle et turbidité obtenues lors des campagnes de surveillance réalisées entre 2013 et 2015 dans les eaux guyanaises.

2.- MATERIEL ET METHODES

Suite aux études précédentes (Lampert 2015 ; Lampert, Bryère, et Gohin 2015), nous allons nous consacrer à la description des paramètres P90chla et P90turbi sur l'ensemble de la masse d'eau côtière (MEC, figure 2.1). Celle-ci s'étend du Maroni jusqu'à l'Oyapock et depuis la côte et jusqu'à 10 km au large maximum près des îlets.



Figure 2.1 : Masse d'eau côtière (MEC) et masses d'eau de transition (MET) sur les eaux guyanaises.

2.1 Plateformes et caméras satellite

Les capteurs MODIS (NASA) et MERIS (ESA) ont été utilisés pour les images à 1 km de résolution, celles à haute résolution (300 m) correspondent à la caméra MERIS (ESA) (Tableau 2.1).

La surface de la MEC guyanaises, qui est d'environ 2000 km² (tableau 2.2), est couverte par environ 1600 pixels quand la résolution de la caméra satellite est de l'ordre de 1 km. Cette couverture spatiale passe à plus de 25 000 pixels quand nous faisons appel à une résolution de caméra de 300 m.

Tableau 2.1 : 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 - 2011	1 km / 300 m	Envisat/ESA	15 bandes dans visible + infrarouge

Tableau 2.2 : Couverture en pixels des caméras utilisées

	MEC
Surface (km ²) →	~2000 km ²
MODIS 1km, pixels max disponibles →	~1600
MERIS 1km, pixels max disponibles →	~1600
MERIS 300m, pixels max disponibles →	~25 500

Bien que pour la caméra MERIS nous disposions des images de 2003 à 2011, seules celles de 2003 à 2009 sont pleinement exploitables (tableau 2.3). En 2010 et 2011, une faible quantité d'images a été enregistrée par MERIS sur cette zone du globe (données ESA).

Tableau 2.3 : Nombre d'images MERIS (L2) par an disponible à l'ESA

Année	Nbre images
2003	100
2004	134
2005	141
2006	132
2007	94
2008	159
2009	85
2010	17
2011	20

2.2 Algorithmes satellite

Le rapatriement des 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 des formats différents :

- GeoTIF : format type raster géoréférencé. Il s'adapte bien aux traitements des données et 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 substances organiques dissoutes colorées et des matières en suspension (MES) par les canaux 412 nm et 555 nm. Ce paramètre est exprimé en mg chla/m³ ou en µg chla/L.

La **turbidité (TURBI)** est calculée par l'algorithme OC5 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.

La turbidité a été également calculée à partir de la procédure décrite par Han (Han et al. 2016). Cette procédure permet de calculer les matières en suspension des eaux marines à forte charge particulaire. Cet algorithme a été développé et validé pour des eaux chargées en matières en suspension dans différents chantiers dans le monde, dont celui des eaux guyanaises.

2.3 Calcul du Percentile 90 (P90)

La DCE a adopté l'utilisation du percentile 90 (P90) pour la métrique de la chlorophylle_a (CHLA) et de la turbidité (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. Les P90 ont vocation à être calculés sur la série de valeurs enregistrées sur un plan de gestion DCE de 6 ans.

Sur la base des images MODIS à 1 km, nous avons réalisé des cartes du P90 CHLA et P90 TURBI pour chaque année, de 2003 à 2014 « Etude de la variation des paramètres température,

biomasse et turbidité sur plus de 10 années dans les eaux marines guyanaises par imagerie satellite » (Lampert 2015 ; Lampert, Bryère, et Gohin 2015). Elles serviront de point de départ pour les comparaisons avec les produits à haute résolution à 300 m.

Calcul du P90 'par pixel'

Les images utilisées, annuelles ou pluriannuelles du P90, sont réalisées pixel par pixel. C'est-à-dire que la valeur (turbidité ou chlorophylle) de l'image est le P90 de toutes les données sur ce même pixel calculé à partir des images journalières disponibles. Il se peut donc qu'il y ait des jours sans données (nuages, erreurs, hors fauché du satellite) et nous n'aurons jamais 365 mesures par point sur un an. Dans la zone très côtière nous serons le plus souvent gênés par les nuages et masques divers ; alors quand nous disposons de moins de 10 valeurs pour un pixel, ce pixel est éliminé. Une image composite est ainsi créée avec les valeurs du P90 sur une longue période (1 an ou plus). Afin d'obtenir le P90 de tout un secteur (MEC Guyane par exemple), nous prenons la moyenne des P90 de ce secteur. Cette méthode produit un lissage des valeurs par rapport au calcul du P90 avec l'ensemble des valeurs disponibles (méthode globale). Avec la méthode 'par pixel' nous pouvons produire des cartes mensuelles, annuelles et pluriannuelles car chaque pixel aura une valeur différente de celle de son pixel voisin. On dispose alors de la distribution spatiale du P90 par pixel.

Calcul du P90 'global'

Nous appliquons ici la même procédure que celle utilisée lors du calcul du P90 à partir des données issues des analyses *in-situ*. C'est-à-dire que nous prenons toutes les valeurs disponibles sur un secteur et sur l'ensemble des images journalières disponibles pour calculer ensuite le P90. Cette façon de calculer génère parfois des fichiers avec plus de 500 000 données. Nous obtenons des valeurs comparables à celles obtenues avec la méthode du P90 par pixel quand les données sont homogènes (cas de la CHLA). Avec le calcul de la turbidité, ces différences deviennent significatives, surtout dans la zone très côtière (MET). Avec cette méthode nous n'avons pas de carte de distribution spatiale du P90, mais juste une valeur globale sur un secteur géographique, tout comme pour le calcul à partir des analyses de terrain. Donc pour la MEC il y aura une seule valeur, ce qui pourra se traduire par une seule couleur dans une échelle de concentrations ou d'une grille DCE de qualité des masses d'eau.

2.4 Données issues des analyses du programme de surveillance

Masse d'eau côtière (MEC)

Le programme de surveillance DCE mis en place en Guyane depuis 2013 a permis d'obtenir des valeurs en chlorophylle ($\mu\text{g/L}$) et en turbidité (NTU et NFU) sur l'ensemble de points de la MEC et des MET. Nous disposons des données qui couvrent la période 2013 à 2015, où le premier semestre 2014 n'a pas été échantillonné. Les points de surveillance dans la MEC sont au nombre de 7 et se situent entre l'embouchure du Maroni et celle de l'Approuague (tableau 2.4

et figure 2.2).

Tableau 2.4 : Points de la MEC guyanaise qui ont été échantillonnées entre 2013 et 2015

N° MEC	Nom
MEC28	Les Hattes
MEC29	Kourou cote
MEC30	Iles Salut
MEC31	pointe Béhague
MEC 7	Cayenne cote
MEC 8	Ilet la mère
MEC 9	Grand Connétable

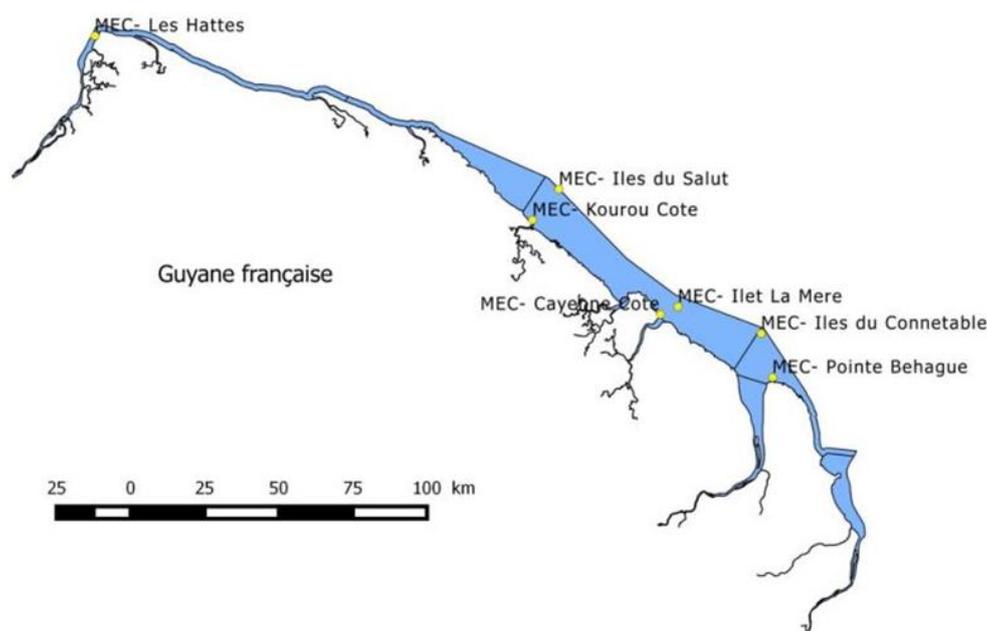


Figure 2.2 : Points de surveillance de la MEC

Masses d'eau de transition (MET)

Nous avons choisi les plus grands estuaires, jusqu'à une limite compatible avec la dimension du pixel. Nous avons retenu « le Maroni », « le Mahury », « l'Approuague » et « l'Oyapock ». La surface considérée est celle représentée en blanc dans la figure 2.3.

Le tableau 2.5 présente le nombre de pixels théoriquement disponible avec une résolution de 300 m sur les surfaces de la figure 2.3. Nous constatons que ce sont les plus grands fleuves de l'Est qui présentent le plus fort nombre de pixels, puis le Mahury avec 130 pixels reste le plus petit des MET retenus.

Comme la chlorophylle n'est pas un paramètre retenu pour le suivi des MET, c'est par les mesures des points 'Les Hattes' et 'Béhague' que nous pourrions comparer les niveaux de concentrations en Chla. La turbidité est par contre prise en compte par la DCE dans les MET et nous disposons de plusieurs points de mesures à l'intérieur des 4 MET ou proches d'elles (figure 2.4).



Figure 2.3 : Surfaces prises en compte des 4 MET considérées dans cet étude

Tableau 2.5 : Nombre pixels pour les 4 MET sélectionnées avec une résolution de 300 m par pixel

MET	Nombre maxi de pixels
Approuague	1478
Mahury	130
Maroni	350
Oyapock	2079

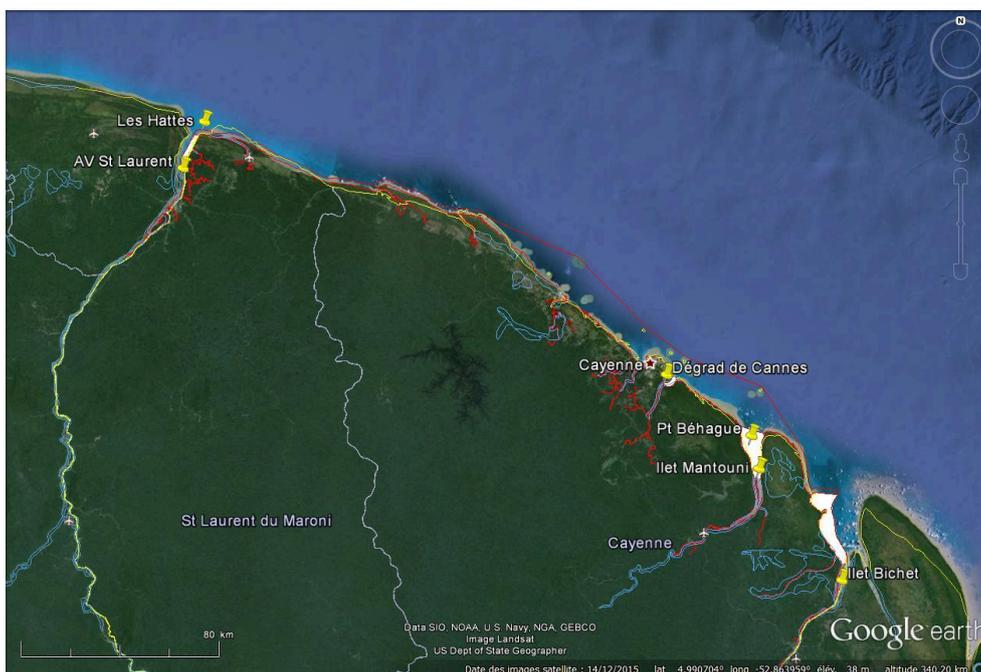


Figure 2.4 : Points d'échantillonnage de la turbidité sur les 4 MET retenues

2.5 Logiciels de traitement et visualisation

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

Pour les images au format GeoTIF, les packages « raster » et « shapefile » ont été utilisés pour l'extraction des valeurs des polygones DCE. 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.

3.- Comparaisons du P90_{CHLA} et P90_{TURBI} avec des résolutions de 1 km et 300 m

Dans le rapport ONEMA « Etude de la variation des paramètres température, biomasse et turbidité sur plus de 10 années dans les eaux marines guyanaises par imagerie satellite » (Lampert, Bryère, et Gohin 2015), nous avons abordé l'utilisation des images à haute résolution MERIS (300 m) dans le chapitre 7. Il en résultait que l'utilisation des images à 300 m par rapport à celles de 1 km augmente de 16 fois le taux d'échantillonnage permettant une meilleure couverture près de côtes, ainsi qu'une vision plus fine de structures marines (tableau 2.2). Cette résolution à 300 m reste un atout si l'on veut avoir un suivi des zones telles que les embouchures des grands fleuves guyanais ou la partie étroite de la MEC, qui n'a que 1.8 km de largeur à l'ouest de Sinnamary. Lors du dernier rapport, nous avons constaté avec les produits issus de la caméra MERIS (ESA), une meilleure utilisation des masques (masque terre, masque nuages et pixels douteux) par rapport à celles de MODIS (NASA) (tableau 3.1). Ceci permet d'accéder à davantage de données, surtout celles très côtières.

Tableau 3.1 : Comparaison du taux d'utilisation des pixels par MODIS et MERIS (1 km) lors du calcul de la chlorophylle moyenne annuelle (2003-2009) sur la MEC. (§ rapport 2015)

		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

3.1 Comparaison du P90_{CHLA} avec 1 km et 300 m de résolution

Comme il a déjà été constaté dans le dernier rapport de 2015, sur les 7 années étudiées (2003-2009), nous observons une différence significative entre les résultats obtenus avec les caméras MODIS et MERIS. Les valeurs du P90_{chl}a moyen sur la MEC varient entre 4 et 5 µg/L avec MODIS et entre 11 et 16 µg/L avec MERIS (figure 3.1). Une différence est également observée entre les résultats obtenus de MERIS avec ces deux résolutions (1 km et à 300 m), avec des moyennes de l'ordre de 5 à 10 % supérieures pour le capteur à 300 m.

Le taux d'utilisation des pixels est toujours favorable à MERIS, avec 10 à 15 % maximum des pixels non utilisables, contre 15 à 30 % pour MODIS. Pour les deux résolutions de MERIS, des différences d'environ 5 % peuvent être constatées entre les taux de pixels non utilisables.

Ces faibles taux de pixels inutilisables permettent des calculs du P90 robustes. Ainsi pour une résolution de 1 km nous aurons dans le pire des cas 1100 pixels disponibles avec MODIS sur la MEC et 1300 avec MERIS. Avec la résolution de 300 m nous disposerons tout de même de 21 700 pixels.

Les valeurs obtenues avec MERIS restent cependant supérieures d'un facteur 3 par rapport à celles de MODIS. La question qui se pose alors est : quelle est la valeur qui est la plus proche de la réalité, ou à défaut de connaître la réalité, par rapport au jeu des données *in-situ* ?

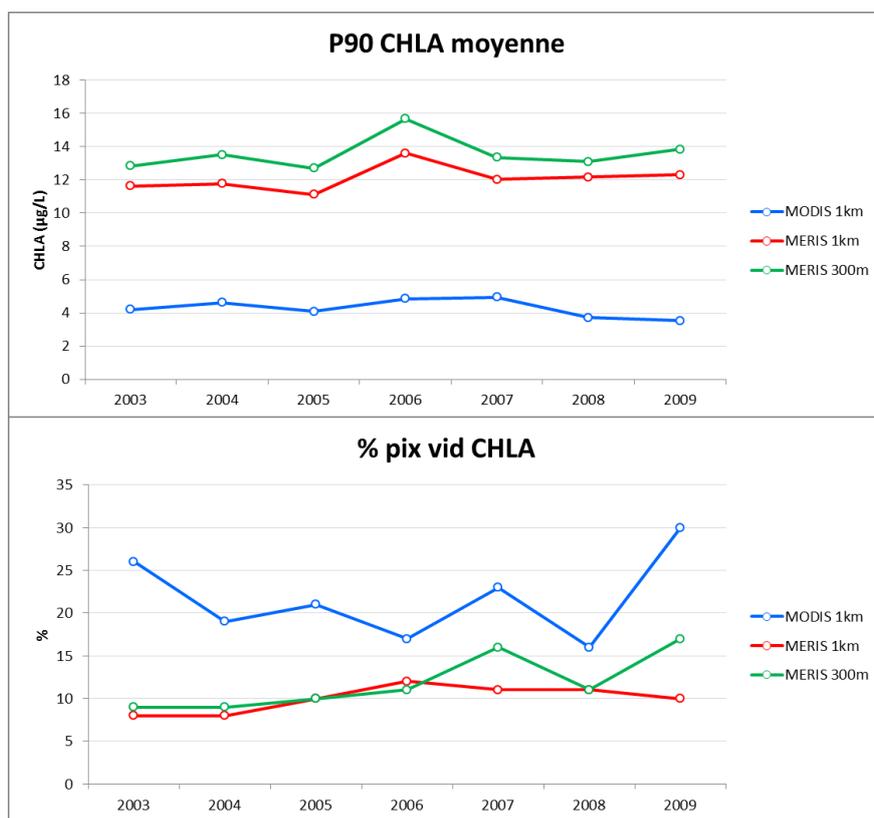


Figure 3.1 : P90chla moyen annuel sur la MEC (2003-2009) et pourcentage de pixels vides obtenus avec les caméras MERIS (300 m et 1 km) et MODIS (1 km) avec l'algorithme OC5

Aucune tendance significative n'est observée dans l'évolution du P90chla. Ni avec MODIS (n=7, $R^2_{ajust}=-0.04$, $pval=0.32$), MERIS 1 km (n=7, $R^2_{ajust}=-0.03$, $pval=0.41$) ou MERIS 300 m (n=7, $R^2_{ajust}=-0.15$, $pval=0.65$).

3.2 P90_{CHLA} - Données *in-situ* Vs. données satellite

Une première approche sur la validité des données satellite dans les eaux guyanaises a été abordée dans le chapitre 6 du rapport de 2015 (Lampert, Bryère, et Gohin 2015). Il s'agissait des données obtenues lors de l'échantillonnage de la MEC en 2013. Les données ainsi obtenues se trouvaient dans le nuage de points obtenus par la caméra MODIS. Nous disposons aujourd'hui des nouvelles données prises lors des campagnes de surveillance de 2014 et 2015 en chlorophylle et en turbidité. Le nombre de données par paramètre (CHLA et TURBI) dont nous disposons actuellement est d'environ 90 sur toute la période 2013-2015.

Les points de surveillance concernés sont : Le Hattes (MEC28), Kourou côte (MEC29), Iles du Salut (MEC30), Pointe Béhague (MEC 31), Cayenne côte (MEC7), Ilet La Mère (MEC8) et Grand Connétable (MEC9). Les 85 valeurs de chlorophylle utilisées sont issues des analyses par HPLC réalisés entre 2013 et 2015. Malheureusement nous ne disposons pas des données satellite à 300 m de résolution pour ces années. La caméra MERIS n'est restée active que de 2003 à 2011. Pour la comparaison de la chlorophylle nous prendrons donc les trois dernières années des images MERIS validées, c'est-à-dire, de 2007 à 2009 (§ chapitre 2.1).

Nous allons comparer le P90chl_a obtenu avec les analyses, aux résultats P90chl_a issus des images satellite. L'utilisation de ces deux séries temporelles différentes, 2013-2015 pour les analyses et 2007-2009 du satellite, se justifie du fait de la faible variabilité observée du P90chl_a (figure 3.1).

Le P90chl_a a été calculé avec OC5 pour les trois séries d'images disponibles : MODIS 1km, MERIS 1 km et MERIS 300 m. De plus, le calcul du P90 a été effectué par les deux méthodes mentionnées dans le paragraphe 2.3 ; à savoir, la méthode 'par pixel' et la méthode 'globale'.

Les P90chl_a obtenus à partir des analyses *in-situ* ont été séparés en trois groupes (figure 3.2). Une première valeur du P90chl_a tient compte de toutes les valeurs analysées pour les 7 points de surveillance (n=85), puis on a retranché les valeurs des points « Les Hattes » et « Pointe Béhague » (n=61) et finalement on n'a gardé que les points « Kourou côte », « Iles du Salut », « Ilet La Mère » et « Grand Connétable » (n=47). Dans le rapport de 2015 nous avons suggéré de ne plus échantillonner les points « Les Hattes » et « Pointe Béhague » car, se situant sur des vasières, ils n'étaient pas représentatifs de la MEC. Nous avons suggéré également que l'échantillonnage des quatre points « Kourou côte », « Iles du Salut », « Cayenne côte » et « Grand Connétable » représentait convenablement l'ensemble la MEC.

Nous constatons des faibles écarts du P90chl_a calculés par les méthodes par pixel et globale ; les plus fortes différences sont observées pour les résultats de MERIS 300 m, où l'écart est de l'ordre de 10 %. Le P90chl_a obtenu à partir des données des analyses *in-situ* présente une plus forte valeur quand les points « Les Hattes » et « Pointe Béhague » sont inclus. Les résultats obtenus avec MODIS sont un peu en dessous des résultats des analyses et trois à quatre fois en

dessous de ceux issus de MERIS (1 km et 300 m). On constate également des plus faibles P90chla obtenus avec MERIS 1 km par rapport à MERIS 300 m (entre 7 et 10 %).

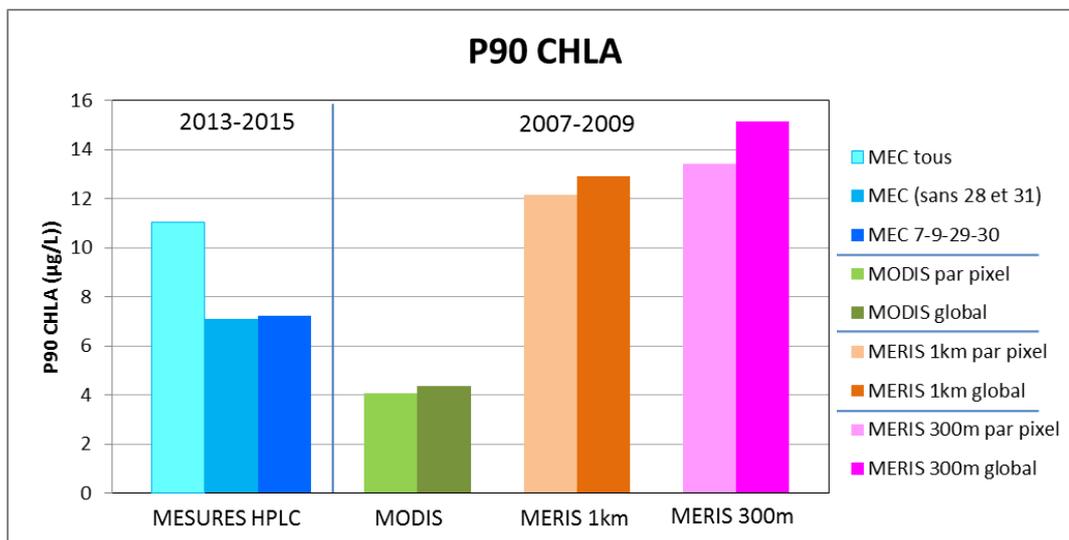


Figure 3.2 : Valeurs de P90chla obtenues par analyses HPLC et par mesures satellitaires (OC5) sur la MEC. Les points échantillonnés sont : Le Hattes (MEC28), Kourou côte (MEC29), Iles du Salut (MEC30), Pointe Béhague (MEC31), Cayenne côte (MEC7), Ilet La Mère (MEC8) et Grand Connétable (MEC9)

Les résultats issus de MODIS (env. 4µg/L) sont inférieurs d'environ un facteur x2 des valeurs des analyses par HPLC si l'on ne tient pas compte des points « Les Hattes » et « Béhague » (env. 7 µg/L) ; tandis que celles observées avec MERIS sont deux fois plus fortes que les valeurs HPLC (entre 12 et 15 µg/L selon la résolution et la méthode de calcul).

Les plus forts niveaux observés avec le capteur MERIS par rapport à MODIS s'expliquent également par le fait que MERIS utilise le rapport des canaux spectraux 510/555 pour accéder aux plus fortes concentrations en chlorophylle.

3.3 Comparaison du P90_{TURBI} avec 1 km et 300 m de résolution

L'évolution de la P90_{turbi} moyenne annuelle présente une faible variabilité lorsqu'elle est calculée à partir du capteur MODIS (figure 3.3) ; entre 2003 et 2009, les valeurs se situent entre 20 et 25 NTU. MERIS présente des valeurs de P90_{turbi} entre 32 et 45 NTU, donc supérieures de 50 et 100 % à celles obtenues avec MODIS. Contrairement à ce qui a été vu avec le P90chla, les valeurs du P90_{turbi} calculées avec MERIS 300 m sont en général légèrement inférieures à celles obtenues par MERIS 1 km. Seul en 2009, nous observons de plus fortes différences entre les P90_{turbi} issus des deux résolutions de MERIS.

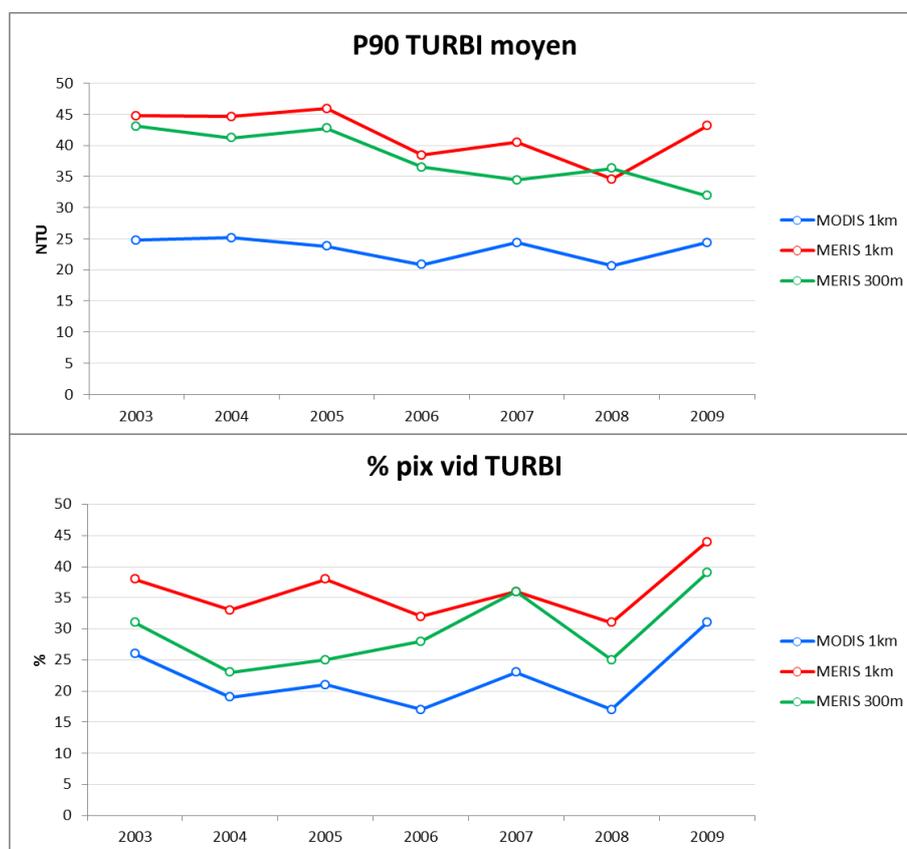


Figure 3.3 : P90-TURBI moyen sur la MEC (2003-2009) calculé avec OC5 et pourcentage de pixels vides obtenus avec les caméras MERIS (300 m et 1 km) et MODIS (1 km)

Avec le capteur MODIS, le nombre des pixels exploitables est identique pour la turbidité et la chlorophylle. Avec MERIS il y a des différences, car pour le P90chl nous avons observé un taux d'utilisation de 85-90 % de pixels, tandis que pour le cas du P90tubi ce taux descend à 55-85 %.

MERIS à 1 km présente un plus faible taux d'utilisation des pixels qu'avec sa résolution à 300 m.

Aucune tendance significative n'est observée dans l'évolution du P90turbi calculé avec MODIS ($n=7$, $R^2_{ajust}=-0.02$, $pval=0.39$) ni avec MERIS 1 km ($n=7$, $R^2_{ajust}=0.19$, $pval=0.18$). Une tendance décroissante est cependant observée avec MERIS 300 m ($n=7$, $R^2_{ajust}=0.81$, $pval=0.004$). Cette différence de tendance entre MERIS à 1 km et 300 m est essentiellement due aux valeurs P90turbi observées dans l'année 2009.

3.4 P90_{TURBI} - Données *in-situ* Vs. données satellite

Comme pour le P90_{chl_a}, les valeurs des mesures *in-situ* 2013 de turbidité se trouvaient dans le nuage des points générés par MODIS (rapport 2015, chapitre 6). Nous aborderons les comparaisons de la même façon que nous l'avons fait pour le P90_{chl_a} dans le paragraphe 3.2 de cette étude. Les indications concernant l'utilisation des données *in-situ* sont également applicables dans ce paragraphe.

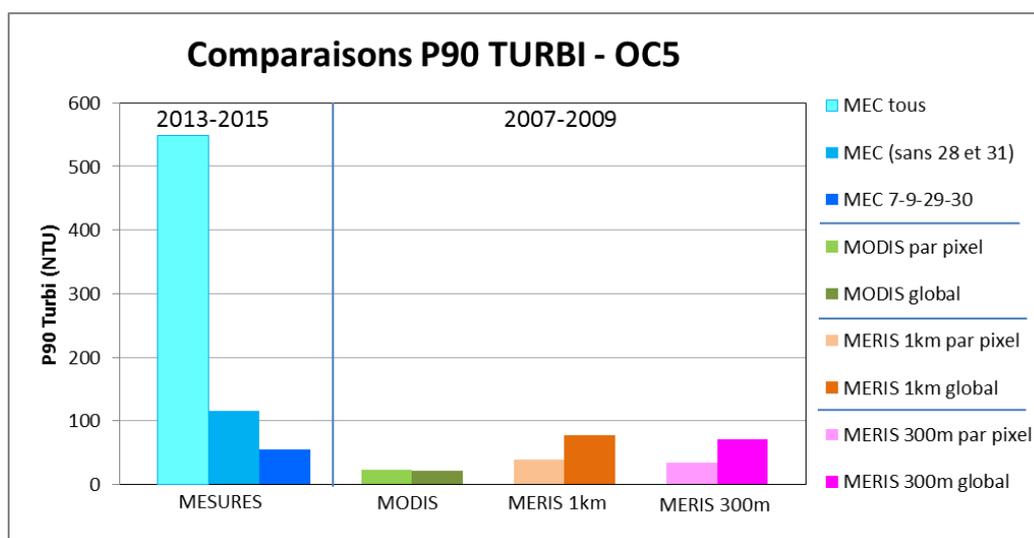


Figure 3.4 : Valeurs de P90_{turbi} obtenues par analyses et par mesures satellitaires (OC5) sur la MEC. Les points échantillonnés sont : Le Hattes (MEC28), Kourou côte (MEC29), Iles du Salut (MEC30), Pointe Béhague (MEC 31), Cayenne côte (MEC7), Ilet La Mère (MEC8) et Grand Connétable (MEC9)

Dans la figure 3.4 nous observons des écarts considérables dans la mesure du P90_{turbi} à partir des données des analyses (n=91) selon les points qui ont été retenus. Avec les très fortes valeurs mesurées dans les points « Les Hattes » et « Béhague » nous obtenons un P90_{turbi} de 549 NTU sur la période 2013-2015. Ces valeurs descendent à 116 NTU sans ces deux points et encore à 56 NTU si nous tenons compte uniquement des quatre points suggérés dans le rapport de 2015 (Kourou cote, Iles du Salut, Cayenne côte et Grand Connétable). Le paramètre turbidité est plus sensible à l'hétérogénéité côtière que la chlorophylle en raison des apports de l'Amazone et des bancs de vase côtiers qui font de cette région la plus dynamique au monde.

Les valeurs obtenues avec MERIS (300 m ou 1 km) sont plus proches de celles calculées avec les analyses (sans Béhague et Les Hattes) que le P90_{turbi} calculé avec MODIS, qui sont très en-dessous. La méthode de calcul du P90_{turbi} 'par pixel' ou 'globale' n'a pas d'influence sur le résultat avec MODIS. Nous obtenons 23 NTU avec la méthode par pixel et 22 NTU avec la méthode globale. Si nous nous intéressons aux résultats du P90_{turbi} calculé avec MERIS 1 km,

la différence entre ces deux méthodes présente un facteur x2, avec 39 NTU (méthode 'par pixel') et 77 NTU (méthode 'globale'). Avec MERIS 300 m nous obtenons des résultats assez proches de MERIS 1 km, avec 34 NTU pour la méthode 'par pixel' et 71 NTU pour la méthode 'globale'. Ceci souligne le fort lissage obtenu lorsque l'on utilise la méthode P90 par pixels avec MERIS en zone côtière.

Contrairement au P90chl_a, où les résultats avec MERIS 300 m étaient supérieures de 10 % à ceux de MERIS 1 km, ici c'est le contraire, et nous trouvons les P90turbi obtenus avec MERIS 300 m légèrement en dessous des P90turbi calculés avec MERIS 1 km.

En conclusion, les résultats issus de la méthode 'globale' avec MERIS sont plus proches des P90turbi obtenus avec les analyses, où le P90turbi (sans les points Les Hattes et Béhague) est de 116 NTU, et en prenant seulement les quatre points (Kourou côte, Iles du Salut, Cayenne côte et Grand Connétable), il descend à 56 NTU. Pour la turbidité, la méthode de calcul du P90 par satellite est très dépendante du capteur utilisé (MODIS ou MERIS).

4.- Approche satellitaire des MET

Les Masses d'Eau de Transition (MET) sont au nombre de 9 en Guyane (figure 2.1). Elles se situent dans les embouchures des principaux fleuves et peuvent s'étendre sur plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres. Le calcul de la chlorophylle et de la turbidité avec la caméra MODIS ou MERIS, avec une résolution de 1 km, ne permettait pas d'avoir des résultats pour les MET à cause de leur taille. De plus, les erreurs de navigation du satellite, de projection et celles liées aux phénomènes côtiers ajoutent des biais difficiles à considérer dans une étude.

L'arrivée des capteurs « couleur de l'eau » à plus haute résolution permet d'envisager l'approche de cette zone de transition. Il sera par contre impossible de tenir compte de toutes les MET, ni de couvrir l'ensemble de la surface des MET retenues, car en rentrant dans les terres, leur dimension devient incompatible avec la taille du pixel, qui ici sera celle de MERIS, avec une résolution de 300 m.

Le but de ce chapitre sera d'évaluer les concentrations en CHLA et TURBI sur ces MET, de décrire leur évolution temporelle entre 2003 et 2009 et de la comparer avec les mesures *in-situ* que l'on a pu obtenir lors des campagnes de surveillance DCE entre 2013 et 2015. Nous obtiendrons le même biais que celui déjà décrit pour la MEC concernant les dates des images satellite (2003-2009) et celle des mesures (2013-2015), mais cet exercice permettra de se faire une idée des possibilités offertes par la haute résolution afin d'envisager, si nécessaire, de nouvelles études à partir des images à haute résolution du capteur OLCI, lancé en février 2016.

4.1 CHLA - Evolution des moyennes par MET

La figure 4.1 présente l'évolution de la CHLA mensuelle moyenne obtenue avec l'algorithme OC5 de l'Ifremer entre 2003 et 2009. Les valeurs minimales sont inférieures à 1 µg chla/L et la valeur maximale atteint 37 µg chla/L. La moyenne générale se situe aux alentours de 8 µg chla/L. Les valeurs observées au Mahury présentent, en 2003 et en 2005, les plus fortes concentrations. Avec l'Approuague, ce sont les deux secteurs qui dépassent 15 µg chla/L sur la période d'études.

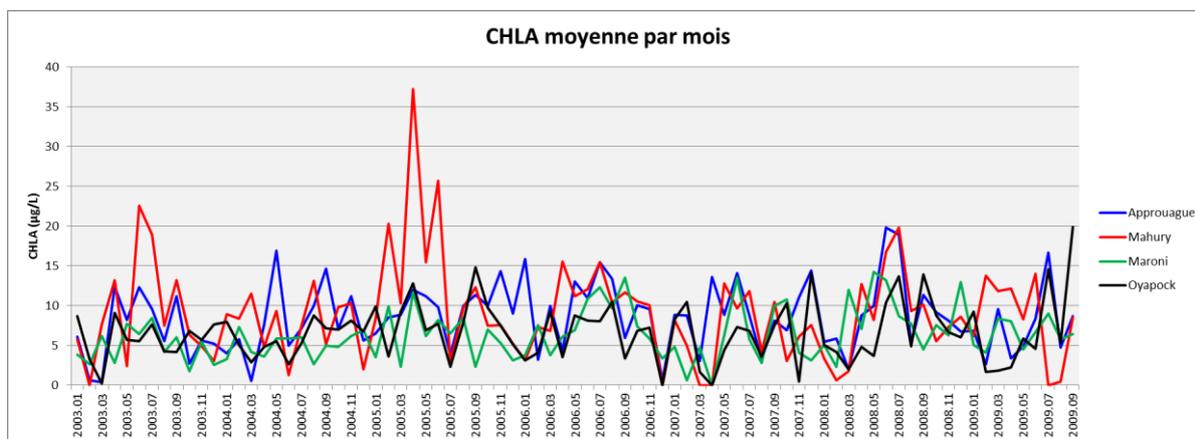


Figure 4.1 : MERIS 300m - CHLA moyenne par mois des eaux des 4 MET étudiées (2003-2009)

Le taux moyen de pixels non utilisables (%pix.vid) se situe entre 2 % et 100 % (figure 4.2). La médiane du taux de pixels inutilisables est plus faible pour le Maroni (43 %), suivi de l'Approuague (56 %) et de l'Oyapock (57 %) ; le plus fort taux est constaté pour le Mahury, avec 77 % de pixels inutilisables. Ces taux sont élevés, mais au regard du nombre de pixels disponibles (tableau 2.5), ils restent pleinement satisfaisants pour le calcul des moyennes mensuelles.

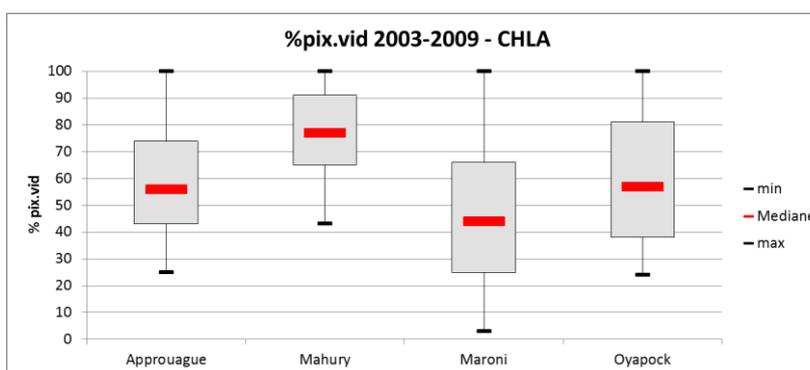


Figure 4.2 : MERIS 300 m – Taux de pixels inutilisables par MET lors du calcul de la CHLA

Ces pixels inutilisables (nuages, erreurs, saturation du capteur ou problèmes dans la chaîne de calcul) ne se distribuent pas régulièrement le long de l'année (figure 4.3). C'est lors de la saison humide que le plus fort taux est observé (53 à 80 %). En saison sèche il descend à des valeurs qui se situent entre 30 et 77 %. Ce phénomène saisonnier est la conséquence de la couverture nuageuse durant la saison humide.

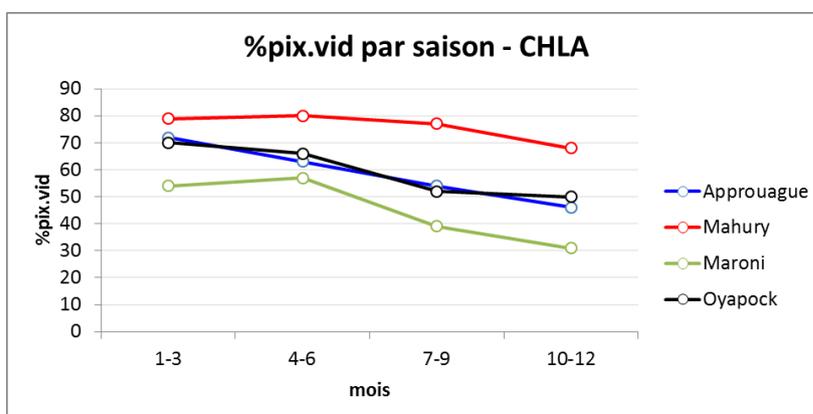


Figure 4.3 : MERIS 300 m – Taux de pixels inutilisables par MET lors du calcul de la CHLA par saison

Afin de comparer les résultats issus du satellite MERIS 300 m avec les analyses en chlorophylle par HPLC, nous utiliserons les points « Les Hattes » et « Béhague » (tableau 4.1). Les valeurs obtenues sont peu nombreuses (n=22 ; 2013 à 2015) et elles sont à prendre avec précaution, mais serviront pour comparer les ordres de grandeur en chlorophylle, moins sensibles sur les bancs de vase que la turbidité.

Tableau 4.1 : CHLA moyenne calculée à partir des mesures HPLC sur les points Les Hattes et Béhague, puis par satellite par MET, et sur les 4 MET ensemble. Valeurs en µg chla/L

Point	source	années	CHLAMoy
Les Hattes + Béhague	mesures	2013 et 2015	11.5
Approuague	MERIS 300	2003-2009	8.5
Mahury	MERIS 300	2003-2009	9.6
Maroni	MERIS 300	2003-2009	6.4
Oyapock	MERIS 300	2003-2009	6.8
4 MET	MERIS 300	2003-2009	7.8

L'ensemble reste assez cohérent, avec des valeurs qui se situent entre 6.4 µg chla/L et 9.6 µg chla/L. Il sera prudent de refaire ces calculs à la lumière des nouvelles mesures effectuées sur le terrain afin d'augmenter le nombre de données. Nous rappelons que le paramètre CHLA n'est pas retenu dans la stratégie de surveillance des MET en Guyane.

4.2 CHLA - Evolution du P90_{CHLA} par MET

La figure 4.4 présente les valeurs du P90_{chla} des 4 MET sur les 7 années considérées (2003-2009). Leur évolution ne présente pas de tendance évolutive sur cette période. Les valeurs du P90_{chla} se situent entre 12 µg/L et 22 µg/L, avec une valeur moyenne du P90_{chla} globale de 16.8 µg/L (tableau 4.2). Ces valeurs sont cependant inférieures d'un facteur x1.5 à celles que

nous avons obtenues avec les mesures HPLC des points Les Hattes et Béhague (tableau 4.2). Les mesures de ces deux points doivent être prises avec précaution du fait de leur position sur des bancs de vase et du faible nombre de données disponible (N=22, où un point extrême à 123.8 µg/L a été écarté).

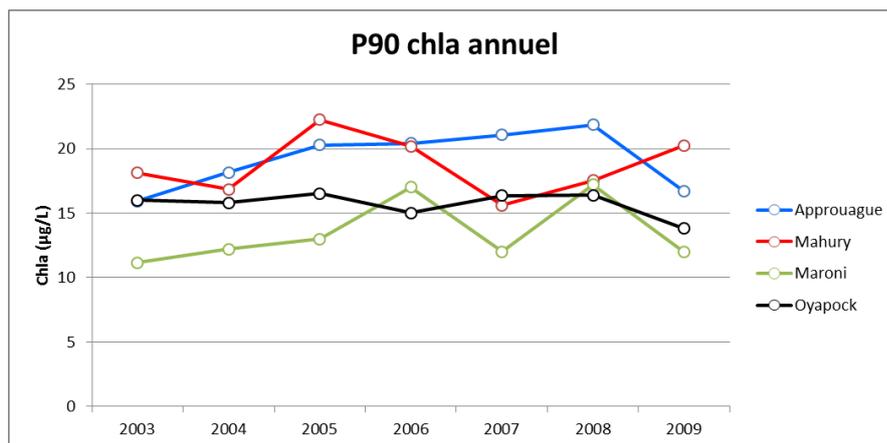


Figure 4.4 : MERIS 300 m – P90chla moyenne annuelle ‘par pixel’ des eaux des 4 MET étudiés (2003-2009)

Tableau 4.2 : P90chla moyen calculé à partir des mesures HPLC sur les points Les Hattes et Béhague, puis par satellite (méthode ‘par pixel’), par MET, et sur les 4 MET ensemble. Valeurs en µg chla/L

Point	source	années	P90chla
Les Hattes + Béhague	mesures	2013 et 2015	26.3
Approuague	MERIS 300	2003-2009	19.2
Mahury	MERIS 300	2003-2009	18.7
Maroni	MERIS 300	2003-2009	13.5
Oyapock	MERIS 300	2003-2009	15.7
4 MET	MERIS 300	2003-2009	16.8

Il faut souligner les fortes valeurs de CHLA obtenue par HPLC, de 57.7 µg chla/L au point « Les Hattes » le 13/08/2013 et de 123.8 µg/L à la Pointe Béhague le 15/10/2014. Il s’agit des valeurs qui poussent les moyennes et le P90chla vers des forts niveaux, en creusant davantage l’écart entre P90chla calculé par satellite et à partir des analyses. Cependant, des valeurs de cet ordre de grandeur et jusqu’à 65 µg chla/L ont été observées couramment avec le satellite. Cette valeur de 65 µg chla/L est la limite de l’algorithme OC5 avec les tables de calibrations actuelles (LUT), ce qui n’exclut pas l’existence de valeurs supérieures. La valeur de 123.8 µg/L a été écartée des calculs à cause de sa forte influence en fonction du faible nombre de données disponibles.

4.3 TURBI - Evolution des moyennes par MET

Les moyennes mensuelles de turbidité présentées dans la figure 4.5 reflètent la forte variabilité de ce paramètre dans les eaux de Guyane. Les calculs réalisés avec l’algorithme OC5 présentent des valeurs supérieures à 500 NTU, valeurs qui peuvent paraître excessives, mais qui ont été confirmées par les mesures *in-situ*.

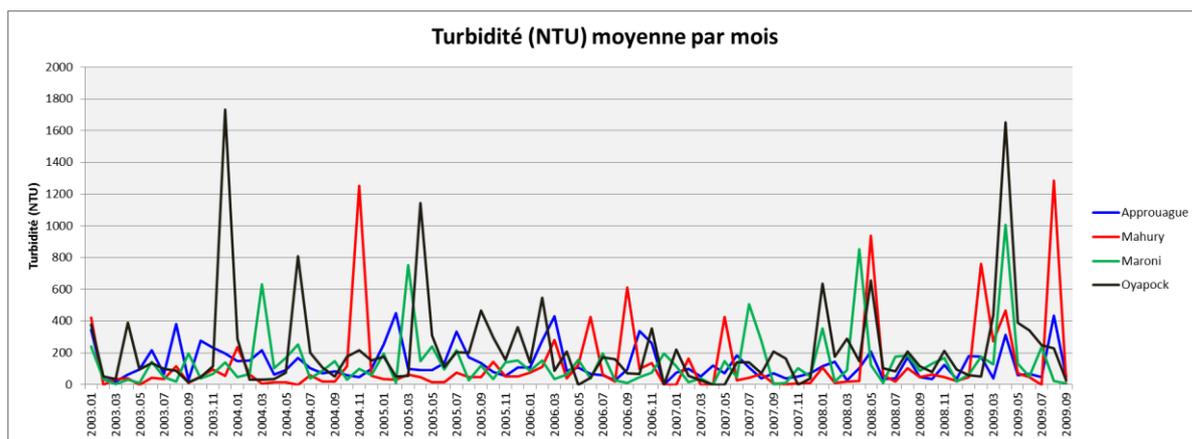


Figure 4.5 : MERIS 300 m - TURBI moyenne par mois des eaux des 4 MET étudiés (2003-2009)

Nous observons dans cette série, que 5 % de ces valeurs mensuelles dépassent les 500 NTU, et ceci pour tous les MET, sauf pour l’Approuague qui présente des moyennes mensuelles inférieures à 500 NTU sur les sept années.

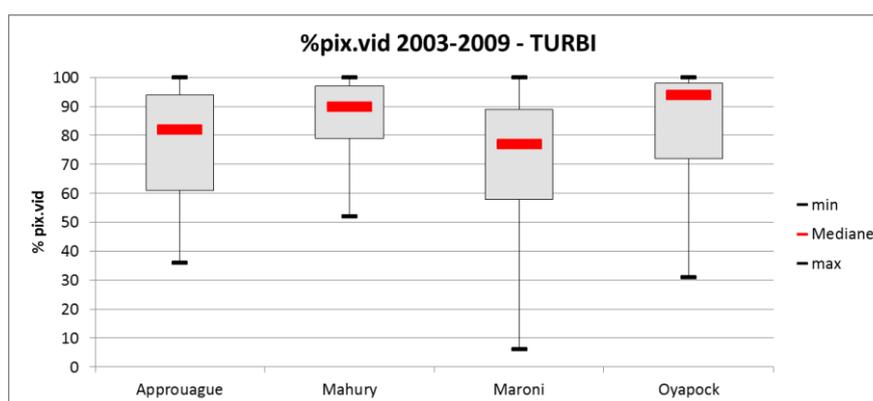


Figure 4.6 : MERIS 300 m – Taux de pixels inutilisables par MET lors du calcul de TURBI

Le taux de pixels inutilisables lors du calcul des moyennes mensuelles en TURBI est plus élevé que pour la CHLA (figure 4.6). Le plus fort taux est observé pour l’Oyapock (94 %), suivi du Mahury (90 %), l’Approuague (82 %) et le Maroni (77 %). On constate que l’algorithme OC5 opère une plus forte sélection de pixels avec la turbidité qu’avec la chlorophylle. Comme

c'était le cas pour la CHLA, ce taux de pixels inutilisables suit une tendance selon la saison (figure 4.7). Les plus forts taux de pixels inutilisables se situent dans le premier trimestre et s'en suit une décroissance régulière vers la fin de l'année. La MET qui présente le plus de pixels valides est le Maroni, tout à l'ouest de la région, où l'ensoleillement est le plus fort.

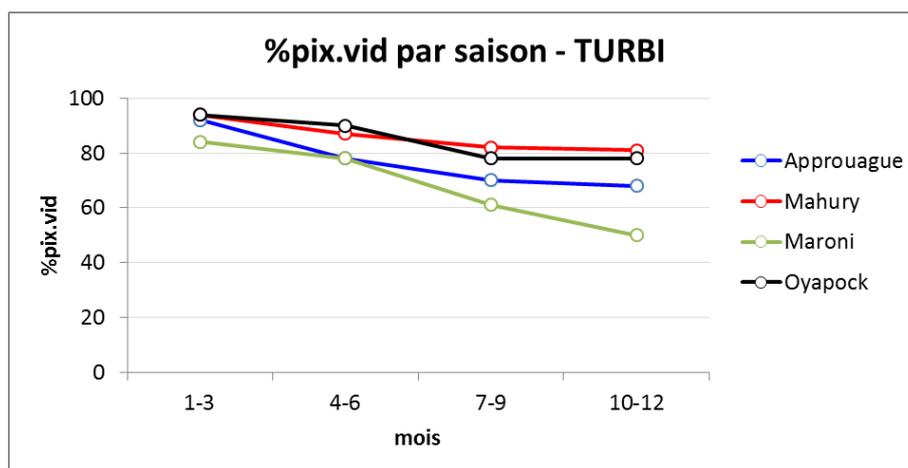


Figure 4.7 : MERIS 300 m – Taux de pixels inutilisables par MET lors du calcul de TURBI par saison

Pour réaliser une comparaison des résultats des moyennes issues du satellite avec celles des mesures *in-situ* (analyses ou sondes portables), nous prendrons l'ensemble de résultats obtenus sur les points de surveillance présentés dans la figure 2.4 (n=64).

Tableau 4.3 : TURBI moyenne calculé à partir des mesures sur les points proches des MET, puis par satellite et par MET, et sur les 4 MET ensemble. Valeurs en NTU

Point	source	années	TURBI moy
4 MET	mesures	2013 et 2015	240
Approuague	MERIS 300	2003-2009	132
Mahury	MERIS 300	2003-2009	145
Maroni	MERIS 300	2003-2009	142
Oyapock	MERIS 300	2003-2009	238
4 MET	MERIS 300	2003-2009	164

Nous observons des valeurs des turbidités moyennes (tableau 4.3) similaires pour l'Approuague (132 NTU), le Mahury (145 NTU) et le Maroni (142 NTU). Sur la MET de l'Oyapock la valeur est proche du double, avec 238 NTU. Le pool de ces 4 MET présente une valeur de TURBI moyenne de 164 NTU. Sauf pour le cas de l'Oyapock, ces valeurs sont en dessous de celles obtenues à partir des mesures, où la TURBI moyenne est de 240 NTU.

4.4 TURBI - Evolution du P90_{TURBI} par MET

Le P90turbi annuel se situe entre 30 et 70 NTU (figure 4.8) ; sans tendance évolutive observée, sauf pour la série de l'Approuague ($n=7$; $R^2_{ajust}=0.89$; $pval<0.001$). Le P90turbi moyen (2003-2009) par MET ne varie qu'entre 41 et 48 NTU (tableau 4.4). Le P90turbi moyen des 4 MET ensemble est de 44 NTU ; très loin de celui calculé à partir des données *in-situ*, qui s'élève à 722 NTU).

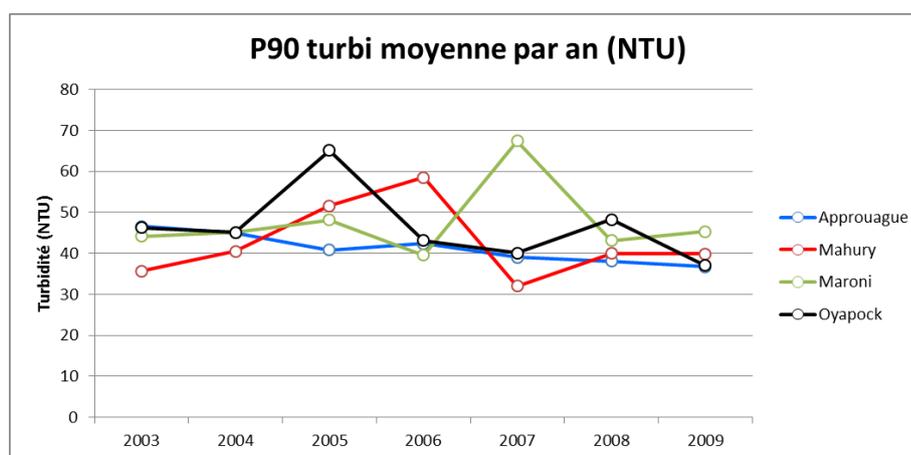


Figure 4.8 : MERIS 300 m – P90turbi moyenne annuelle des eaux des 4 MET étudiés (2003-2009) calculé avec la méthode 'par pixel'

Tableau 4.4 : P90turbi moyen calculé à partir des mesures sur les points proches des 4 MET, puis par satellite et par MET (méthode 'par pixel'), et sur les 4 MET ensemble. Valeurs en NTU

Point	source	années	P90turbi
4 MET	mesures	2013 et 2015	722
Approuague	MEIRS 300m	2003-2009	41
Mahury	MEIRS 300m	2003-2009	43
Maroni	MEIRS 300m	2003-2009	48
Oyapock	MEIRS 300m	2003-2009	46
4 MET	MEIRS 300m	2003-2009	44

Du fait du faible nombre de pixels utilisables pour le calcul de la turbidité, nous avons vérifié le nombre de pixels réellement utilisés lors des calculs pour chaque année (tableau 4.5).

Dans les années 2007 et 2009, et sauf l'Approuague, tous les autres MET ont présenté des faibles quantités de pixels utilisables ; de 1 pixel au Mahury en 2009, jusqu'à 27 pixels dans l'Oyapock pour la même année. Le Mahury présente les plus faibles quantités de pixels du fait de sa faible surface, où l'on ne dépasse pas 28 pixels pour la meilleure année (2008). Ceci

montre la limite de la surface que l'on peut traiter avec la méthode 'par pixel' quand il s'agit de la zone côtière.

Tableau 4.5 : Nombre de pixels réellement utilisés pour réaliser les calculs du P90turbi avec la méthode 'par pixel'

	Approuague	Mahury	Maroni	Oyapock
2003	354	12	68	55
2004	608	25	260	393
2005	621	19	156	124
2006	316	8	203	84
2007	282	12	7	12
2008	770	28	237	882
2009	104	1	10	27

4.5 Amélioration du taux de pixels utilisables – Méthode 'globale'

La faible quantité de pixels utilisés est la conséquence de l'effet de lissage produit par le calcul du P90turbi par la méthode 'par pixel'. Dans cette zone côtière, peu de pixels sont disponibles, et si nous n'avons pas un nombre suffisant pour le calcul du P90 (>10 pixels), le pixel est abandonné. Nous allons donc refaire ces calculs par la méthode 'globale' qui calcule le P90 avec le pool complet des pixels journaliers disponibles.

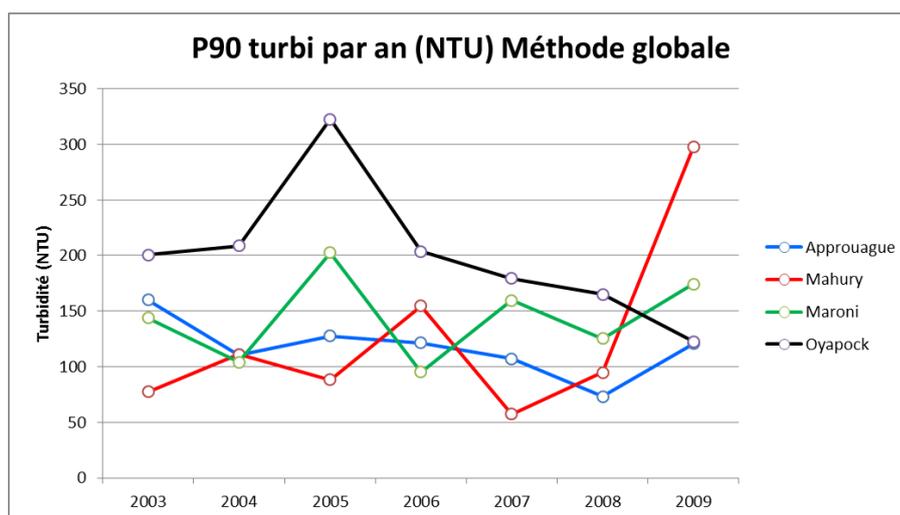


Figure 4.9 : MERIS 300 m – P90turbi moyenne annuelle des eaux des 4 MET étudiés (2003-2009) calculé avec la méthode 'globale'

Les P90turbi obtenus avec le calcul par la méthode 'globale' (figure 4.9) sont trois fois supérieurs à ceux obtenus avec la méthode par pixel (figure 4.8). L'étendue des valeurs se situe entre 50 NTU et 322 NTU, avec une moyenne générale aux alentours de 150 NTU. L'Oyapock présente ici les plus fortes valeurs de P90turbi, suivi du Maroni. Le nombre de pixels utilisés pour le calcul du P90turbi augmente fortement (tableau 4.6) comparé à celui de la méthode par pixel (tableau 4.5).

Tableau 4.6 : Nombre de pixels utilisés pour réaliser les calculs du P90turbi avec la méthode 'globale'

	Approuague	Mahury	Maroni	Oyapock
2003	4633	209	1255	3137
2004	6440	368	2558	5689
2005	7010	300	1890	3850
2006	4508	239	2025	3683
2007	3956	171	788	2447
2008	7809	344	2260	10314
2009	2774	163	803	2961

Comparaison avec les valeurs *in-situ*

Avec les résultats des analyses 2013-2015 obtenues sur les points de surveillance Pointe Béhague (n=12), Ilet Mantouni (n=8), Dégrad de Cannes (n=12), Les Hattes (n=12), Aval St Laurent (n=8) et îlet Bichet (n=12), nous avons calculé des P90turbi, en tenant compte (et en retranchant) les points Béhague et Les Hattes. Ces valeurs ont alors été comparées aux résultats obtenus par MERIS 300 m entre 2003 et 2009, calculés avec OC5 par la méthode 'globale' (figure 4.10).

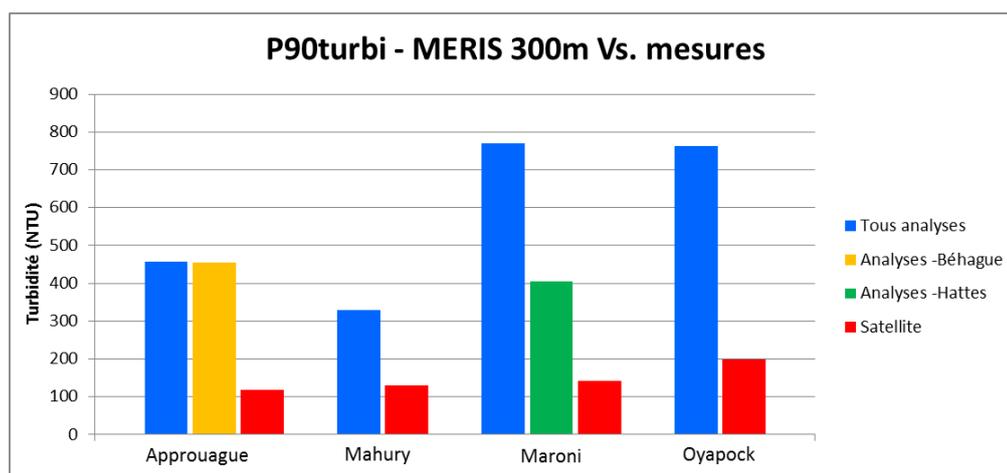


Figure 4.10 : P90turbi calculé à partir des analyses *in-situ* et par satellite (OC5, MERIS 300 m, méthode 'globale') pour les 4 MET étudiés pour la période 2003-2009

De cette figure 4.10 il en ressort que les valeurs obtenues à partir des analyses sont deux à cinq fois supérieures à celles issues du satellite par la méthode 'globale'. Pour la MET

Approuague, l'influence de la pointe Béhague n'a pas eu trop d'effet. A l'opposé, l'effet du point Les Hattes au Maroni est significatif, et en l'enlevant des mesures, le P90turbi diminue de moitié.

Les valeurs du P90turbi obtenues par la méthode 'globale' (figure 4.9) sont supérieures à celles calculées par la méthode 'par pixel' (figure 4.8), qui oscillaient autour d'une moyenne de 40 NTU. Le problème de la turbidité, déjà délicat dans la MEC, devient difficile dans les MET. Il peut s'agir du fait de la faible quantité de données disponibles par MET, ici un maximum de 12 valeurs par point de surveillance. Il ne sera pas possible de traiter cette question tant que de plus nombreuses mesures ne seront disponibles.

Pour résoudre ce problème il peut être envisageable de travailler davantage sur l'algorithme déjà utilisé (OC5), ou tester dans ces eaux un nouvel algorithme, comme celui proposé par Han (Han et al. 2016), plus adapté aux forts niveaux de turbidité, ou développer et/ou adapter un spécifique pour cette région.

Il serait prudent de vérifier également les valeurs de turbidité *in-situ* selon les niveaux d'échantillonnage, car il existe un très fort gradient vertical dans les eaux estuariennes.

5.- Nouvel algorithme pour la turbidité

Tout récemment, un nouvel algorithme destiné aux matières en suspension (MES) et à la turbidité des eaux à forte charge particulaire a été développé (Han et al. 2016). Il est basé sur l'utilisation de deux équations semi-analytiques, calibrées pour des eaux avec basse-moyenne et haute turbidité. Il a été testé sur les eaux des côtes européennes, du nord du Canada, du Vietnam, de la Chine et de la Guyane française. Nous avons refait nos calculs pour les eaux de la MEC et des 4 MET afin de comparer les résultats obtenus avec ceux dont nous disposions déjà avec OC5 et les mesures *in-situ*.

5.1 P90TURBI – algorithme de Han et al. (2016) dans les eaux de la MEC

Pour cette comparaison nous avons utilisé le P90turbi, calculé par OC5 et par la méthode de Han, puis selon le calcul du P90 fait par la méthode 'par pixel' et par la méthode 'globale'. Ces résultats sont mis en comparaison avec ceux issus des résultats des analyses *in-situ* (figure 5.1).

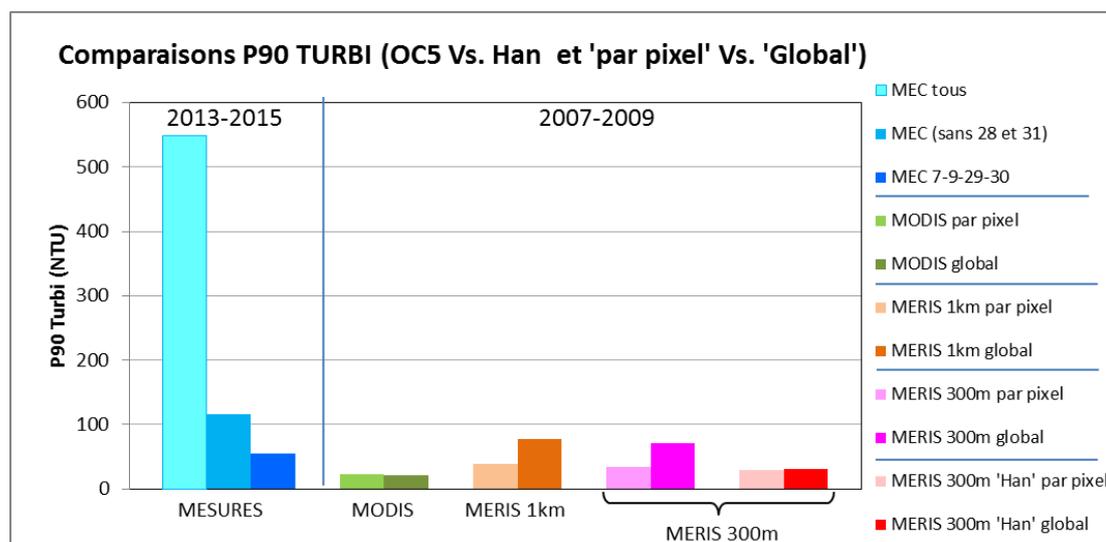


Figure 5.1 : Valeurs de P9turbi obtenues par analyses et par mesures satellitaires sur la MEC. Les algorithmes utilisés sont OC5 et celui de Han, puis les méthodes de calcul du P90 selon la méthode 'par pixel' et 'globale'

Dans la figure 5.1 nous retrouvons tous les résultats déjà obtenus, plus ceux issus de l'algorithme de Han. Concernant ce dernier, nous n'observons pas de différence significative entre les résultats obtenus avec la méthode 'par pixel' (31 NTU) ou 'globale' (29 NTU). Il est à remarquer la différence entre ces valeurs, autour de 30 NTU, avec ceux issus des mesures, où l'on descend au mieux à 56 NTU en utilisant les données des quatre points (Kourou côte, Iles du Salut, Cayenne côte et Grand Connétable). Les valeurs obtenues par OC5 avec MERIS 1 km

ou MERIS 300 m sont plus proches de cette valeur de 56 NTU, où nous obtenons 39 NTU avec la méthode 'par pixel' et 77 NTU avec la méthode 'globale'. Avec MERIS 300 m, nous avons respectivement 34 NTU (par pixel) et 71 NTU (globale).

5.2 P90TURBI – algorithme de Han et al. (2016) dans les eaux des 4 MET

Lorsqu'il s'agit du calcul du P90turbi avec l'algorithme de Han, les différences calculées avec les méthodes 'par pixel' et 'globale' sont faibles. Nous allons donc nous intéresser uniquement aux résultats obtenus avec la méthode 'globale'.

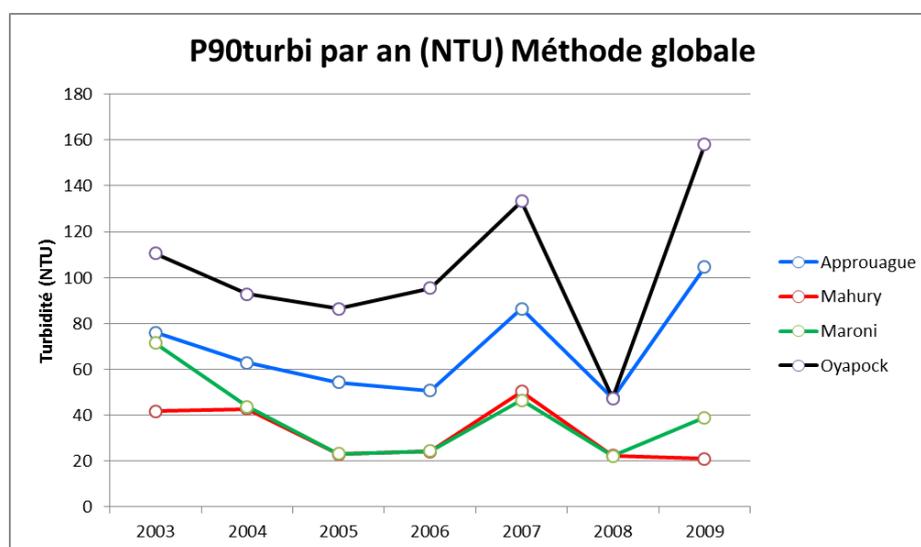


Figure 5.2 : MERIS 300 m – P90turbi moyenne annuelle des eaux des 4 MET étudiés (2003-2009) calculé avec la méthode 'globale' et l'algorithme de Han et al. (2016)

Dans la figure 5.2 sont représentés les résultats des P90turbi calculés par la méthode globale et l'algorithme de Han et al. (2016). Ils sont inférieurs à ceux obtenus avec l'algorithme OC5 (figure 4.9), ce qui est cohérent avec l'étude sur la MEC que nous venons de voir dans le chapitre 5.1.

Une différence intéressante à faire remarquer est le nombre de pixels utilisés avec l'algorithme de Han et al. (2016) (tableau 5.1), qui est en moyenne cinq fois supérieure par rapport à OC5 (tableau 4.6). Ce rapport peut monter jusqu'à 7 et plus sur l'estuaire de l'Oyapock. Ceci suggère une meilleure utilisation des pixels avec la méthode de Han et al.

La figure 5.3 présente les résultats obtenus avec l'algorithme de Han et al., ceux avec OC5 et les P90turbi issus des données *in-situ*. Il s'agit de la figure 4.10 actualisée des résultats de Han

et al. (2016). Nous constatons que les valeurs du P90turbi obtenues avec l’algorithme de Han et al. se situent encore plus bas que les résultats d’OC5.

Tableau 5.1 : Nombre de pixels réellement utilisés pour réaliser les calculs du P90turbi avec la méthode globale et l’algorithme de Han et al. (2016)

	Approuague	Mahury	Maroni	Oyapock
2003	22617	1201	8728	35972
2004	24717	1796	11592	38749
2005	26219	1414	10222	37139
2006	19574	1297	9400	28726
2007	12963	597	4987	14675
2008	25219	1293	9886	36114
2009	13530	622	5243	19160

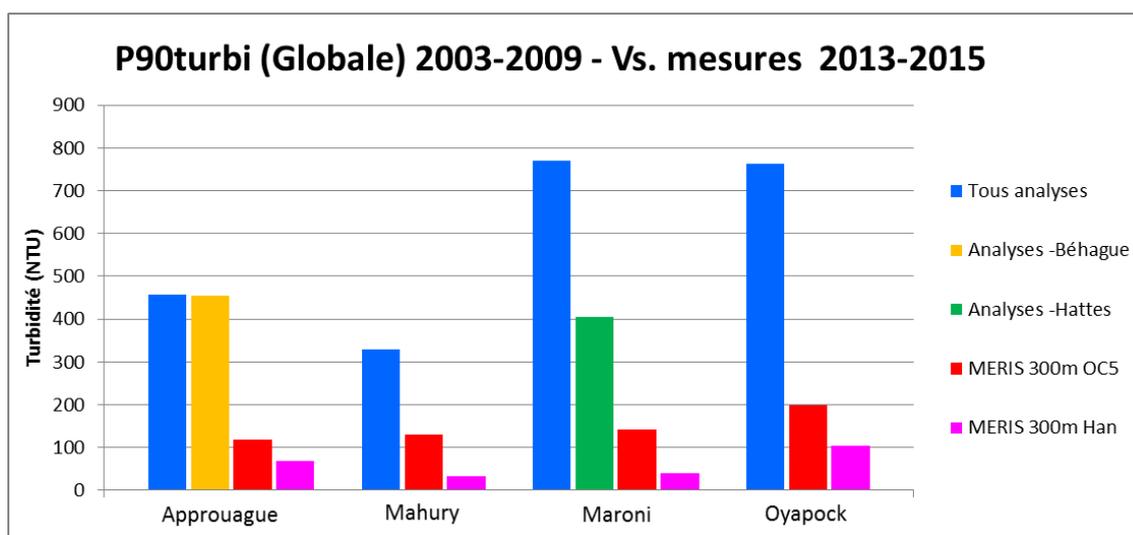


Figure 5.3 : Comparaison des résultats du P90turbi pour les 4 MET étudiées, calculées à partir des analyses *in-situ* ; avec MERIS 300 m-OC5, méthode globale et avec MERIS 300 m-Han, méthode globale

Ces différences pourraient être expliquées par des raisons diverses : 1) les algorithmes utilisés ne peuvent pas rendre compte de la turbidité dans ces eaux ; 2) les résultats des analyses ne sont pas conformes ; 3) les points d’échantillonnage ne sont pas représentatifs, 4) le nombre d’analyses n’est pas encore suffisant pour rendre compte d’une moyenne robuste. Il se peut que la cause soit un mélange de toutes ces raisons, mais il sera difficile d’aller plus loin sans avoir davantage de mesures de terrain.

6.- Surveillance satellite *via* Internet

Les avantages du satellite par rapport aux mesures *in-situ* sont nombreux, surtout dans des zones où l'accès aux points de surveillance est difficile. Le nombre de mesures que l'on peut obtenir avec échantillonnage est très inférieur au nombre de pixels disponibles dans une image satellite. Même si nous ne pouvons pas compter avec une couverture journalière de 100 % de la zone, la régularité de la prise des images par le satellite permet d'obtenir un bon tiers des images exploitables dans l'année (environ une centaine).

Il peut alors être envisageable de suivre l'évolution des paramètres choisis par des images satellite traitées et prêtes à leur interprétation. Ce type d'outil existe déjà et permet aux gestionnaires des programmes de surveillance d'avoir une idée rapide de l'état des masses d'eau par des produits qui peuvent être la moyenne, le P90 des images mensuelles, hebdomadaires ou annuelles, et des climatologies mensuelles ou des cartes d'anomalies. Au fur et à mesure que les images journalières sont stockées, des cartes hebdomadaire ou mensuelles sont créées automatiquement et mises à disposition sur un site internet avec contrôle d'accès.

Nous présenterons dans les pages qui suivent, un **démonstrateur** de ce qui pourrait être un site internet permettant d'aborder ainsi les images de la Guyane (<http://acri-he.fr/projects/guyane/>).

6.1 Caractéristiques du démonstrateur

Ce démonstrateur permet de visualiser les images de moyennes et de percentile 90 de chlorophylle-a et de turbidité réalisées dans le cadre de ce projet à partir des données MERIS avec une résolution de 300 m.

L'application démarre en cliquant sur l'image. Les produits disponibles sont sélectionnables dans une liste déroulante. Leur description s'affiche par survol du logo (i) à droite de la liste déroulante. Les produits disponibles sont les suivants :

CHLA mensuelle : chlorophylle-a mensuelle estimée par l'algorithme OC5 IFREMER (Gohin et al. 2002). Ces moyennes sont réalisées à partir des images journalières MERIS/ESA à 300 mètres de résolution.

TURBI mensuelle : turbidité mensuelle estimée par l'algorithme IFREMER (Gohin 2011) à partir des matières en suspension et de la chlorophylle-a. Ces moyennes sont réalisées à partir des images journalières MERIS/ESA à 300 mètres de résolution.

P90CHLA mensuel : cartes des Percentiles 90 mensuels de chlorophylle-a calculés sur la période 2003-2011 à partir des images journalières MERIS/ESA à 300 m de résolution. La chlorophylle-a est estimée par l'algorithme OC5 IFREMER (Gohin et al 2002).

P90TURBI mensuel : cartes des percentiles 90 mensuels de turbidité calculés sur la période 2003-2011 à partir des images journalières MERIS/ESA à 300 m de résolution. La turbidité est estimée par l'algorithme IFREMER (Gohin 2011).

P90CHLA annuel : cartes des percentiles 90 annuels de chlorophylle-a calculés pour les années 2003 à 2009 à partir des images journalières MERIS/ESA à 300 m de résolution. La chlorophylle-a est estimée par l'algorithme OC5 IFREMER (Gohin et al 2002).

P90TURBI annuel : cartes des percentiles 90 annuels de turbidité calculés pour les années 2003 à 2009 à partir des images journalières MERIS/ESA à 300 m de résolution. La turbidité est estimée par l'algorithme IFREMER (Gohin 2011).

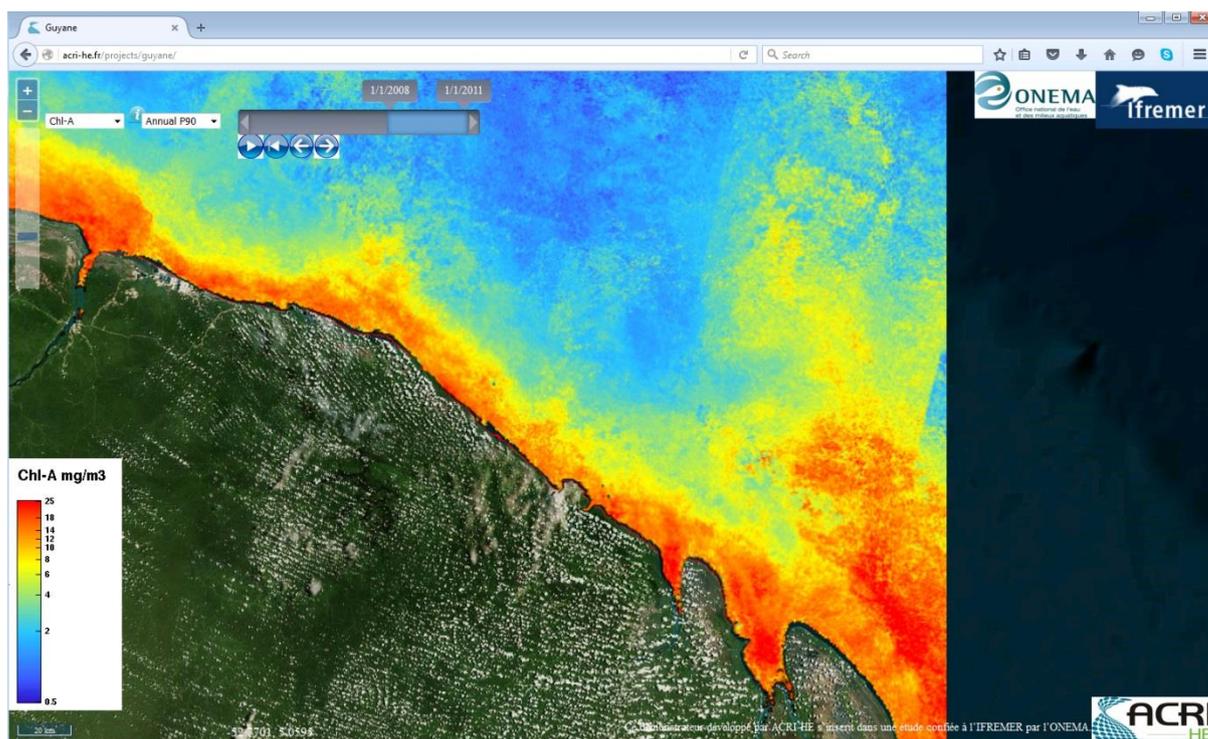


Figure 6.1 : Démonstrateur WEB présentant le P90chla des eaux guyanaises

P90CHLA sur 6 ans : carte du percentile 90 pluriannuel de chlorophylle-a calculé sur la période 2004-2009 à partir des images journalières MERIS/ESA à 300 m de résolution. La chlorophylle-a est estimée par l'algorithme OC5 IFREMER (Gohin et al 2002).

Un « slider » permet de naviguer dans les images par date. Un bouton « Télécharger » permettra de télécharger à minima les fichiers geotiff des produits.

7.- Discussion – Conclusion

7.1 Comparaison images satellite 1 Km Vs. 300 m

Le but principal de ce rapport est de comparer les résultats obtenus avec une résolution de 1 km avec ceux issus de la haute résolution. N'ayant pas de satellite en activité disponible avec la haute résolution (arrêt de MERIS 300 m en 2012 et lancement de la caméra OLCI en février 2016) nous avons procédé à une comparaison des résultats de MODIS (1 km) par rapport à MERIS avec ses résolutions de 1 km et de 300 m entre les années 2003 et 2009.

Suivi de la Chlorophylle

Les résultats obtenus avec le capteur MODIS se situent en-dessous des analyses HPLC, ce qui est attendu car MODIS n'est pas adapté aux forts niveaux en CHLA. Les résultats de MERIS avec 1 km ou 300 m de résolution, se situent au-dessus des analyses HPLC et suggèrent une surestimation de la concentration en chlorophylle moyenne. Le capteur MERIS à 300 m de résolution présente des valeurs supérieures de 10 % au même capteur avec sa résolution de 1 km, ce qui peut être le résultat des évolutions du 'reprocessing' des agences spatiales. C'est donc l'utilisation du capteur MERIS et sa chaîne de traitements, qui induit une augmentation des valeurs pour les moyennes et le P90chl_a. Le nombre d'analyses HPLC utilisées (2013-2015) est d'environ une centaine, et il faudra une bonne centaine de plus pour pouvoir statuer sur ce point, bien que les valeurs en chlorophylle semblent assez stables dans le temps.

Tableau 7.1 : Grilles utilisées pour l'évaluation de l'indice « biomasse » P90 CHLA dans la Mer du Nord et Manche-Atlantique (en µg chl_a/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

Lors du rapport de 2015, nous avons comparé les résultats de P90chl_a MODIS avec les grilles de l'indice « biomasse » P90chl_a de la Mer du Nord et de l'Atlantique (tableau 7.1). Nous savons que les P90chl_a (2007-2009) se situaient autour de 4 µg/L avec MODIS et entre 12 à 14 µg chl_a/L respectivement pour MERIS à 1 km et 300 m de résolution (chapitre 3.2). Ce même P90chl_a calculé sur la période 2013-2015 avec les analyses HPLC se situe aux alentours de 7 µg chl_a/L (11 µg/L si l'on tient compte de toutes les mesures). Avec la grille Mer du Nord, nous aurons donc une classification en « très bon » avec les mesures HPLC et MODIS, et en « bon » s'il s'agit des P90chl_a issus de MERIS (figure 7.1). Avec la grille Manche-Atlantique nous

aurons une classification plus pénalisante, avec « très bon » s’agissant des données issues de MODIS et allant jusqu’à moyen pour MERIS ou les données HPLC qui considèrent toutes les valeurs enregistrées.

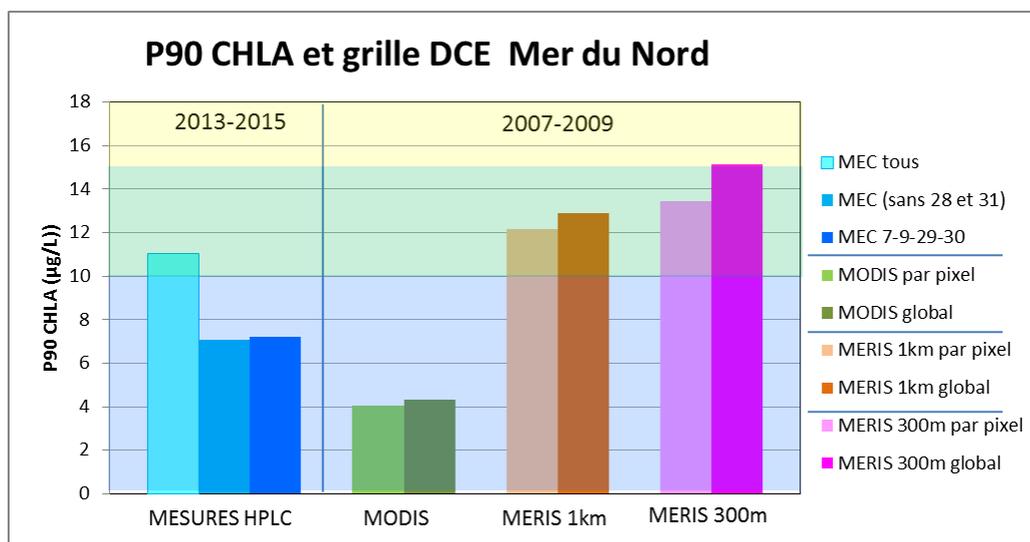


Figure 7.1 : Valeurs de P90chla obtenues par analyses HPLC et par mesures satellitaires sur la MEC. Les couleurs du fond de la figure représentent la classification de la grille DCE Mer du Nord pour l’indice « chlorophylle » de l’indicateur « phytoplancton »

Avec les données obtenues par MODIS nous nous situons en dessous des valeurs HPLC et avec celles de MERIS au-dessus. Cependant, avec MODIS nous n’avons pas accès à autant de pixels côtiers, ce qui a pour effet d’éliminer les pixels qui ont les plus fortes valeurs. De plus leur masque terre-nuages et la gestion de pixels douteux est plus drastique que pour les caméras de l’ESA (MERIS-OLCI). Mais n’oublions pas que nous comparons ici, des analyses par HPLC sur la période 2013-2015, aux résultats des images satellite de 2007-2009. Ces différences sont cependant à minimiser et elles ne dépassent pas 10 %, car le P90 ne présente pas de fortes variabilités interannuelles (voir rapport 2015).

Pour l’indice « chlorophylle », nous n’avons pas, au dire d’expert, d’informations qui nous permettraient aujourd’hui de classer les eaux côtières guyanaises autrement qu’en « très bon » ou « bon » état du fait de l’activité humaine.

Dans l’optique d’un suivi opérationnel de la CHLA par satellite, il serait également possible de ramener les niveaux de concentrations de CHLA issus du satellite, plus proche de ceux des analyses par HPLC. Soit par une correction régionale des résultats, valable pour les eaux guyanaises, ou par ajustement de l’algorithme et leurs tables (LUT).

Les différences observées entre les capteurs MODIS et MERIS en CHLA semblent liées aux capteurs eux-mêmes (sensibilité, longueurs d’onde utilisées, corrections atmosphériques). Quand nous prenons un secteur éloigné des côtes, les deux capteurs présentent la même

concentration en CHLA, et au fur et à mesure que nous nous rapprochons des côtes, les valeurs en CHLA de MERIS deviennent de plus en plus fortes en comparaison à celles de MODIS (voir annexe 3).

Suivi de la Turbidité

Les valeurs de turbidité enregistrées entre 2013 et 2015 lors des sorties d'échantillonnage présentent des valeurs élevées pour des eaux côtières. Plus de 30 % des 91 échantillons analysés présentent des turbidités supérieures à 100 NTU (tableau 7.2).

Tableau 7.2 : Nombre d'échantillons analysés par classes de turbidité (2013-2015)

CLASSES DE TURBIDITE (NTU)										N
(0,100]	(100,200]	(200,300]	(300,400]	(400,500]	(500,600]	(600,700]	(700,800]	(800,900]	(900,>1000]	
62	10	3	3	2	2	2	3	3	1	91

Les calculs du P90turbi sont très sensibles au placement des points d'échantillonnage retenus. Des fortes variations sont observées si l'on prend en considération les points Béhague et Les Hattes (chapitre 3.4). En prenant la valeur du P90turbi de 56 NTU, calculée avec les analyses des quatre points (Kourou côte, Iles du Salut, Cayenne côte et Grand Connétable) nous observons que presque tous les P90turbi issus des mesures satellite se trouvent en-dessous de cette valeur, et tout particulièrement ceux calculés avec MODIS-OC5 et MERIS300m-Han (figure 7.2).

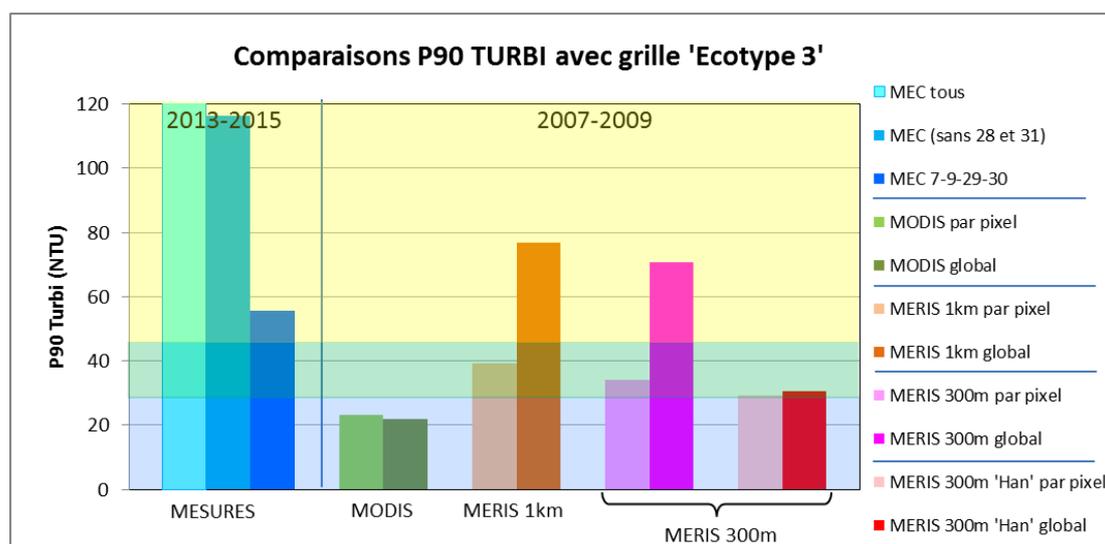


Figure 7.2 : Valeurs du P90turbi obtenues par analyses et par mesures satellitaires sur la MEC (voir figure 5.1). Les couleurs du fond de la figure représentent la classification de la grille DCE 'Ecotype 3' de l'indice « turbidité » de la DCE

Les résultats les plus proches des valeurs *in-situ* sont observés avec le couple MERIS (1 km et 300 m)-OC5, avec des valeurs supérieures aux analyses s'il est calculé par la méthode 'globale' et inférieures si nous utilisons la méthode 'par pixel'. La plupart de ces P90turbi se situent dans la zone « bon état » ou en « moyen » de la grille Ecotype 3 de la DCE (Tableau 7.3).

Tableau 7.3 : Grilles utilisées pour l'évaluation de l'indice « turbidité » (NTU) P90 TURBI en métropole

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

Pour la turbidité, le capteur MERIS a apporté une amélioration par rapport aux résultats obtenus avec MODIS, mais ce n'est pas la résolution de 300 m qui a fait la différence car nous obtenons des résultats similaires avec les résolutions de 1 km ou de 300 m de MERIS. L'utilisation du nouvel algorithme de Han et al. (2016) place les résultats du P90turbi en-dessous de ceux des mesures et proches de MODIS. Cet algorithme, utilisé avec MERIS 300 m est très robuste et bien adapté aux eaux turbides. Nous avons développé également un nouvel algorithme OC5 pour les hautes turbidités (OC5-HT), avec lequel nous avons trouvé presque les mêmes résultats qu'avec l'algorithme de Han.

Alors, on peut se poser la question de la représentativité des mesures *in-situ*, avec un doute sur la robustesse du P90turbi issu des analyses, à cause du faible nombre de valeurs encore mesurées. Mais dans l'optique d'une surveillance à long terme, ce qui est le cas pour la DCE, la justesse des valeurs du P90turbi est secondaire face à sa tendance à long terme. C'est sur une période de 30 ans que l'on peut statuer sur l'évolution de ce paramètre. Tous les capteurs et méthodes satellite peuvent être utilisés, à condition de ne pas les changer ultérieurement.

Concernant la prise d'échantillons, nous suggérons de vérifier la représentativité des mesures de turbidité en surface (premiers 50 cm) car le gradient vertical de turbidité peut être extrêmement fort (Lampert et Achoun 2011) (figure 7.3). Cette seule précaution, peut faire descendre les valeurs de turbidité de façon significative. Réaliser quelques tests à différents points de surveillance sur les deux saisons permettra de mieux appréhender cette variabilité.

La grille pourra également être adaptée en demandant d'en créer une nouvelle, plus en accord avec les eaux guyanaises. **Mais l'on peut se poser la question de la pertinence du paramètre « turbidité » dans les eaux naturellement très turbides de Guyane, où l'activité humaine n'aura que peu, ou pas, d'influence sur ce paramètre.** Cette situation est différente en métropole, où la turbidité peut marquer très rapidement une activité portuaire, côtière ou industrielle. En Guyane ce type d'activité sera masqué par le haut niveau naturel de turbidité des eaux côtières.



Figure 7.3 : Echantillons d'eau de mer pris, de gauche à droite, à 0.5 m, 1.5 m et 2 m de profondeur sur l'estuaire de l'Oyapock en juin 2011 (Campagne Oyana 7)

7.2 Utilisation des images satellite à 300 m de résolution sur les MET

L'utilisation des capteurs à 1 km de résolution ne permettait pas d'aborder les MET à cause de leur taille de pixel. Les capteurs à haute résolution, 300 m pour MERIS, augmentent de seize fois l'échantillonnage et il devient envisageable d'accéder aux MET, ou en partie. Nous avons retenu 4 MET pour cette étude, qui ont été redécoupées en fonction de leur géométrie (Maroni, Oyapock, Approuague et Mahury). Pour la plus petite des MET retenues, l'on dispose d'un potentiel de 130 pixels (Mahury).

Pour les concentrations moyennes en CHLA, le satellite semble bien retrouver les valeurs dont l'on dispose pour ces secteurs. Malheureusement il s'agit d'un nombre restreint de données disponibles (n=12) et ce sont sur les points Béhague et Les Hattes, dont nous avons déjà discuté de leur manque de pertinence dans le rapport de 2015 (Lampert, L., Bryère, et Francis Gohin, 2015).

Le cas de la turbidité est plus complexe. Nous disposons de 64 mesures prises *in-situ* entre 2013 et 2015 sur 6 points de surveillance, dont les points Béhague et Les Hattes. Les P90turbi calculés pour chaque MET se situent entre 300 et 700 NTU, avec un nombre restreint de valeurs par MET (12 à 20 mesures). Les valeurs des P90turbi calculés par satellite, toutes méthodes et algorithmes concernés, se situent très en-dessous (figure 5.3).

Bien qu'il ne s'agisse pas des échantillons et des images concernant les mêmes périodes, les différences ne peuvent pas être attribuées à ce facteur, mais à la capacité du satellite, et toute sa chaîne de traitements, à trouver les niveaux corrects de turbidité. Sur les méthodes et

algorithmes utilisés, OC5 avec la méthode globale semble donner des meilleurs résultats, mais restent toujours en-dessous des mesures. Ce point pourrait être amélioré mais à condition de disposer de plus nombreuses données de turbidité *in-situ*.

Lors des échantillonnages des MET, il serait prudent également de prendre des mesures à différentes profondeurs pour les analyses de turbidité (0.5 m, 1 m et 2 m) afin de s'assurer que le gradient vertical n'ait pas une forte influence sur les résultats ; car le satellite n'intègre, dans ce type d'eau, que les premiers centimètres de surface.

7.3 Conclusion

Lors du rapport de 2015, nous avons écarté la température comme indicateur discriminant des eaux guyanaises, car trop stable. Nous avons également statué sur l'efficacité du suivi par satellite des indices de biomasse (chlorophylle) et de turbidité, ainsi que sur la pertinence de la surveillance sur une seule masse d'eau côtière (MEC). Dans l'étude présente, nous avons ajouté des images satellite à haute résolution (300 m) issues du capteur européen MERIS (2003-2012). Nous avons utilisé deux algorithmes (OC5 et Han) ainsi que deux méthodes de calcul du P90 ('par pixel' et 'global'). Aux données *in-situ* disponibles en 2015 (échantillonnage 2013), nous avons ajouté les analyses prises lors des sorties en 2014 et 2015, portant ainsi le nombre d'analyses à $n \approx 90$ par paramètre. En plus de l'étude menée sur la MEC, nous avons abordé l'étude des masses d'eau de transition (MET) à partir des images satellite à 300 m de résolution afin d'évaluer la capacité du satellite à retrouver les concentrations en chlorophylle et turbidité sur ces zones restreintes.

Le suivi des paramètres CHLA et TURBI par satellite peut paraître complexe si l'on tente de caler ses résultats avec les données *in-situ* dont nous disposons. Cet exercice présente deux difficultés principales : le faible nombre de données encore acquises par échantillonnage et la forte hétérogénéité du milieu marin en Guyane, surtout pour la turbidité.

MODIS, toujours en activité, présente de bons résultats pour la chlorophylle, mais légèrement en-dessous de ceux obtenus avec les mesures de turbidité *in-situ*. Cette caméra présente le désavantage de l'utilisation des masques et traitements de la NASA, qui pénalisent l'incorporation des pixels côtiers des zones de surveillance DCE, là où la variabilité est la plus forte. Les capteurs à haute résolution (300 m) de l'ESA (MERIS, OLCI) utilisent des masques et des traitements permettant de récupérer des pixels côtiers, et surtout, ils augmentent le taux d'échantillonnage de seize fois par rapport aux capteurs à 1 km de résolution. Ceci est particulièrement intéressant à l'ouest d'Iracoubo, où la zone DCE ne s'étend que sur 1 mille nautique des côtes vers le large.

Bien que MERIS ne soit plus en activité depuis 2012, OLCI vient d'être lancé en début 2016 et devrait produire des images à partir de l'automne 2016. Sur la base des données MERIS 300m des années 2003 à 2009, nous obtenons des valeurs du P90chl_a plus élevées par rapport aux mesures, cependant pour la turbidité (P90turbi) cette différence est moindre et il est envisageable d'utiliser le satellite en adoptant la méthode du calcul du P90 'globale'. Ces résultats restent à valider avec les images du nouveau capteur OLCI. Il faudra également valider la représentativité des mesures de turbidité déjà acquises par échantillonnage selon le gradient de profondeur. Des nouvelles mesures *in-situ* devraient permettre d'éclaircir ce point.

Avec les images MODIS, nous pouvons utiliser les grilles DCE actuelles en CHLA et TURBI. Par contre, avec les P90 calculés à partir des données *in-situ* ou de MERIS (1 km ou 300 m de résolution), il faudra peut-être demander à modifier les grilles pour les eaux guyanaises.

Quel que soit le choix de la méthode, elle doit être capable de mesurer au mieux la tendance pluriannuelle. Et dans ce domaine, même si les valeurs issues du satellite ne s'accordent pas parfaitement aux mesures *in-situ*, le satellite présente des résultats plus robustes du fait du grand nombre de pixels utilisés.

Il serait envisageable d'ajuster les algorithmes utilisés aux eaux guyanaises dans la mesure où les données dont nous disposons seraient suffisantes et représentatives. Ceci pourrait être envisagé au terme d'un plan de surveillance de 6 ans par exemple.

L'étude des MET par satellite ne peut pas être mise en place sur les 9 identifiées en Guyane. En fonction des surfaces et des formes des MET, nous en avons retenues 4, avec réduction de leur extension vers les terres, où leur dimension devenait incompatible avec la taille du pixel. Les valeurs de turbidité retrouvées par satellite sont systématiquement en-dessous des P90 calculés avec les quelques données *in-situ* disponible. Mais ce point devra être revu suite à l'acquisition des nouvelles données et après réalisation des tests concernant le gradient vertical de turbidité sur les premiers 2 m de profondeur. Pour la chlorophylle, le satellite retrouve les valeurs des points Béhague et Les Hattes, mais encore, ceci devra être revu avec plus de données à l'appui. L'utilisation des nouveaux algorithmes pourrait permettre d'augmenter le nombre de MET suivis par satellite grâce à une meilleure utilisation des pixels (Han, 2016 ou OC5-HT).

En résumé, sur les eaux extrêmement turbides de Guyane, l'imagerie satellitaire à haute résolution (300 m) semble être un bon outil de suivi des masses d'eau côtières et même estuariennes. Il est possible d'ajuster les algorithmes et les méthodes de calcul pour se trouver dans la gamme de valeurs suggérées par les mesures *in-situ* disponibles et ainsi disposer des longues séries de données pour les paramètres P90chl_a et P90turbi sur la MEC et certaines MET.

Bibliographie

- 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.
- Han, Bing, Hubert Loisel, Vincent Vantrepotte, Xavier Mériaux, Philippe Bryère, Sylvain Ouillon, David Dessailly, Qianguo Xing, et Jianhua Zhu. 2016. « Development of a Semi-Analytical Algorithm for the Retrieval of Suspended Particulate Matter from Remote Sensing over Clear to Very Turbid Waters ». *Remote Sensing* 8 (3): 211. doi:10.3390/rs8030211.
- Lampert, Luis. 2015. « Etude sur la température de surface de la mer des eaux guyanaises dans le contaxte DCE ». Scientifique et technique RST.Dyneco 2015-02. Brest, France: IFREMER.
- Lampert, Luis, et Joseph Achoun. 2011. « Résultats de la campagne OYANA 7 Estuaire de l'Oyapock, 1er au 3 juin 2011 ». Scientifique et technique RBE/BIODIVHAL 2011-04. Cayenne: 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.

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 : MOferate 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

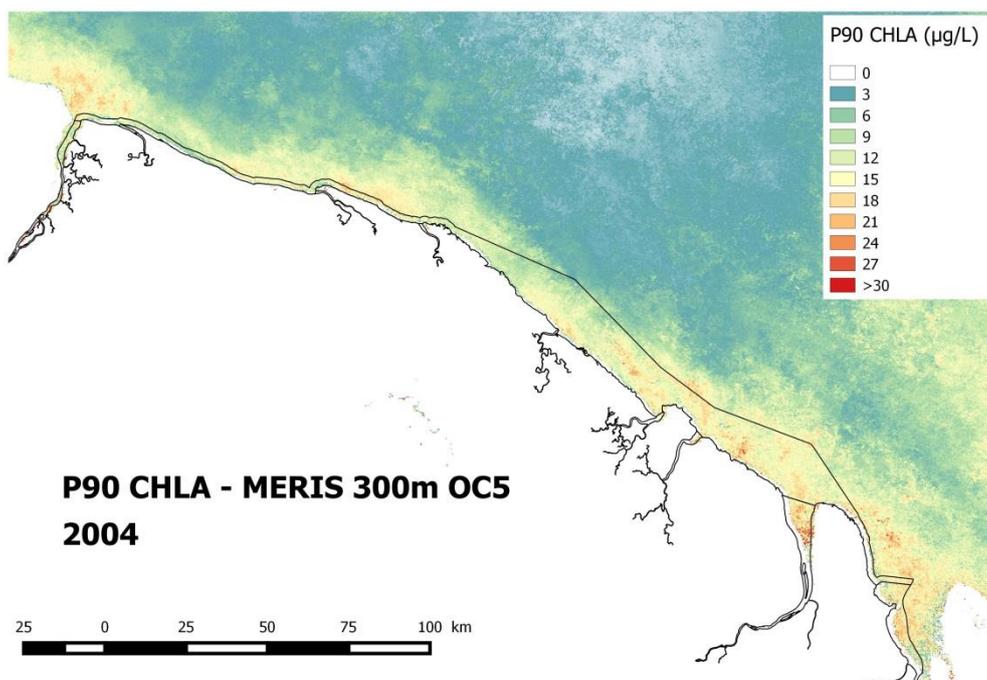
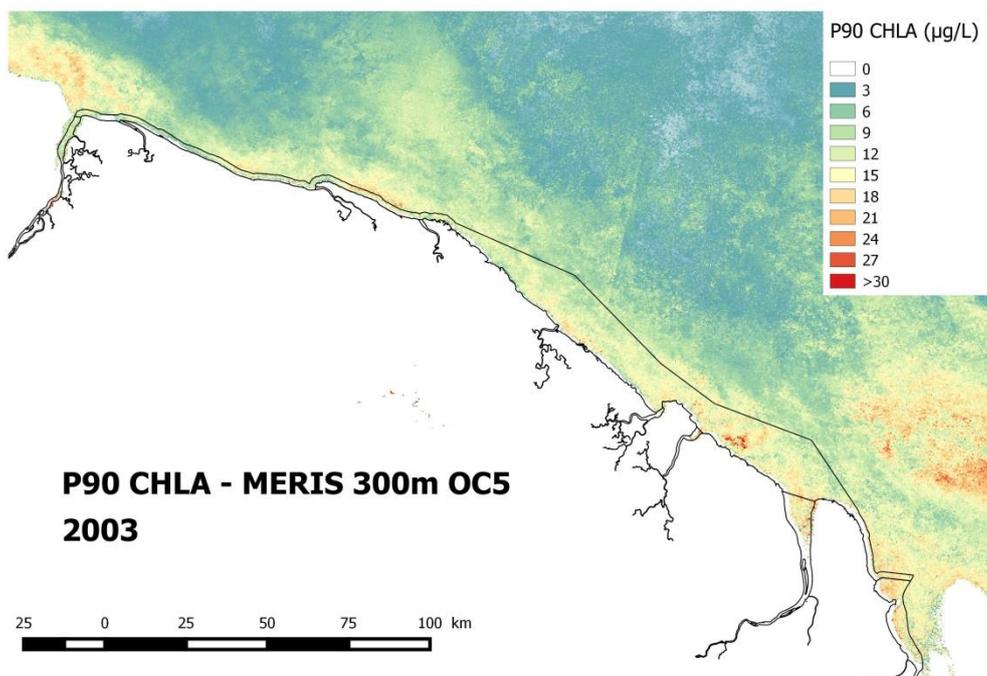
SeaWiFS : Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor

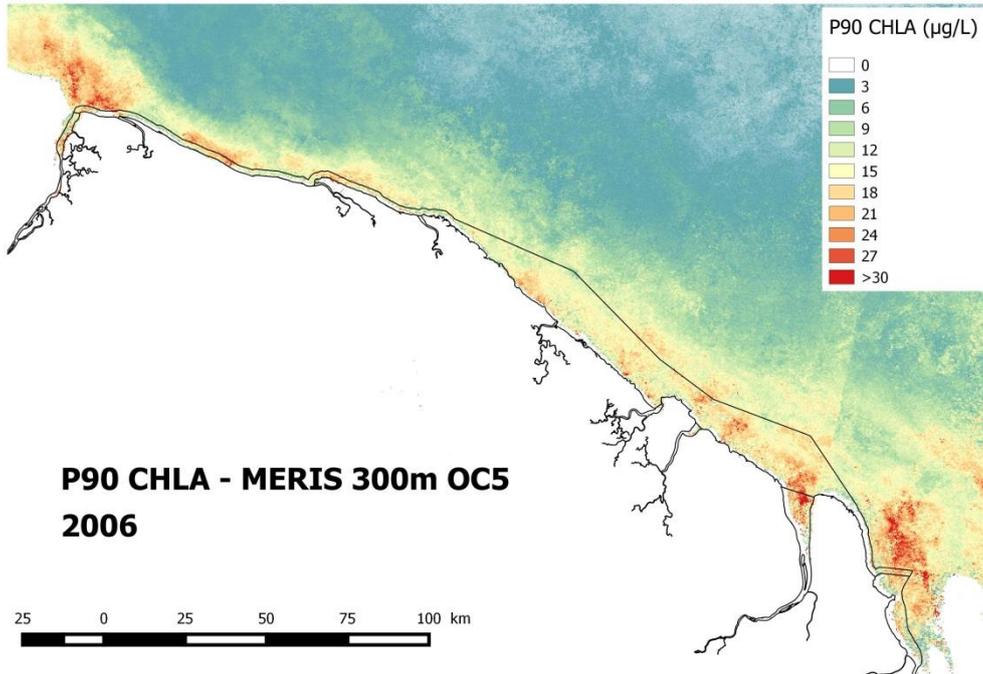
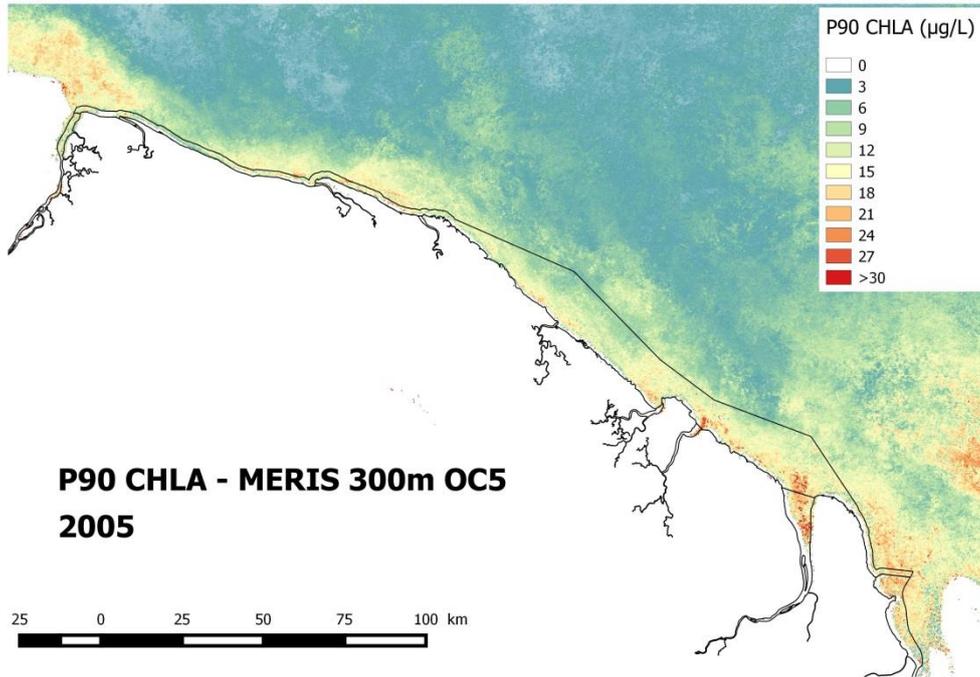
SST : Sea Surface Temperature (température de surface de la mer)

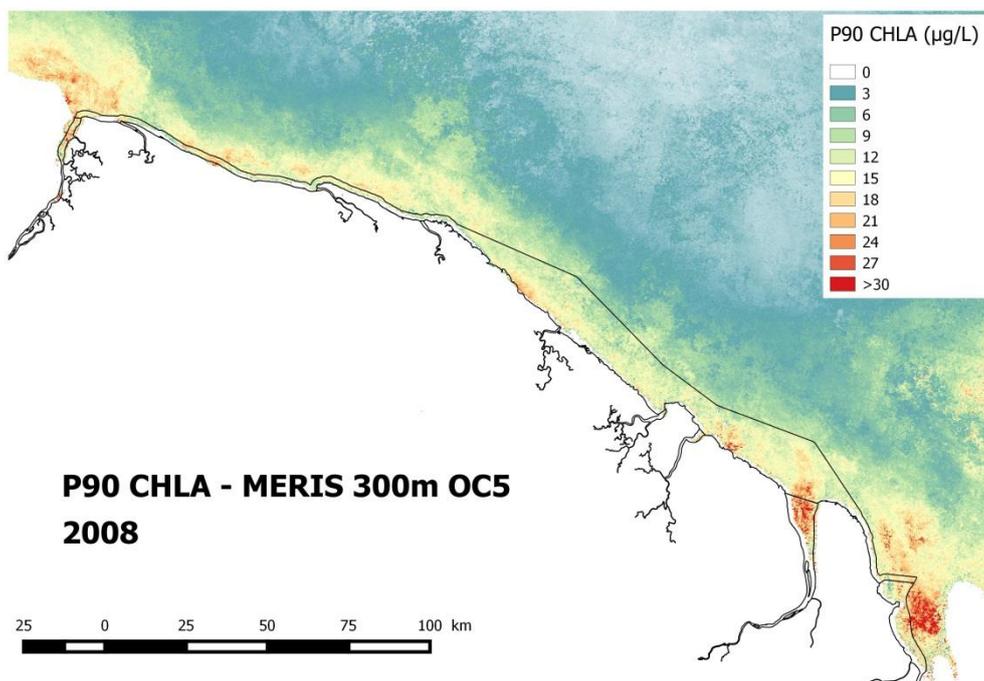
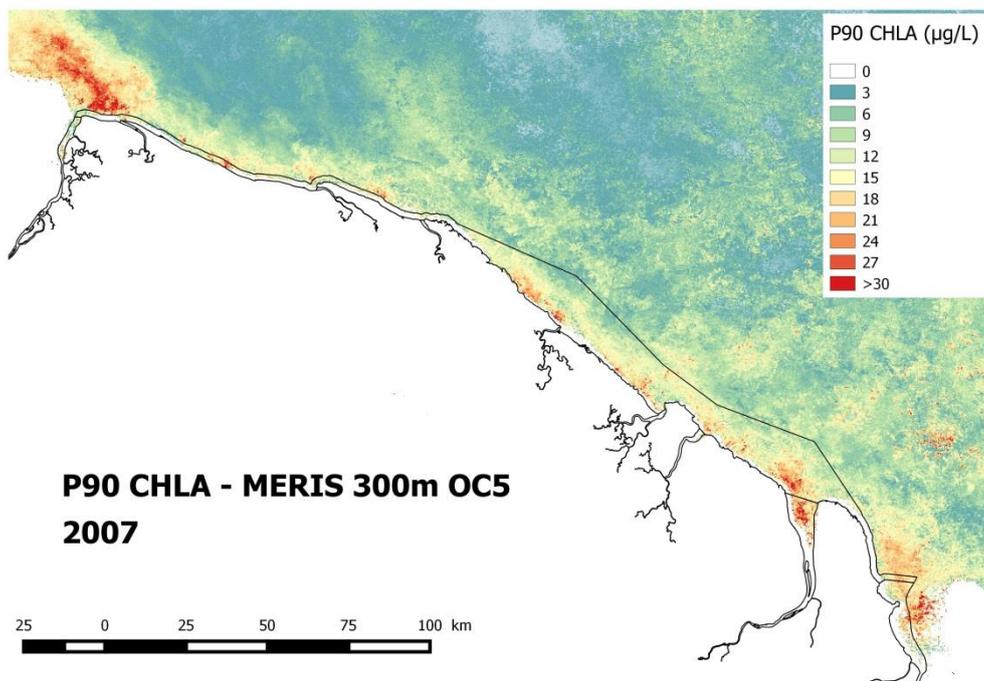
TURBI : turbidité

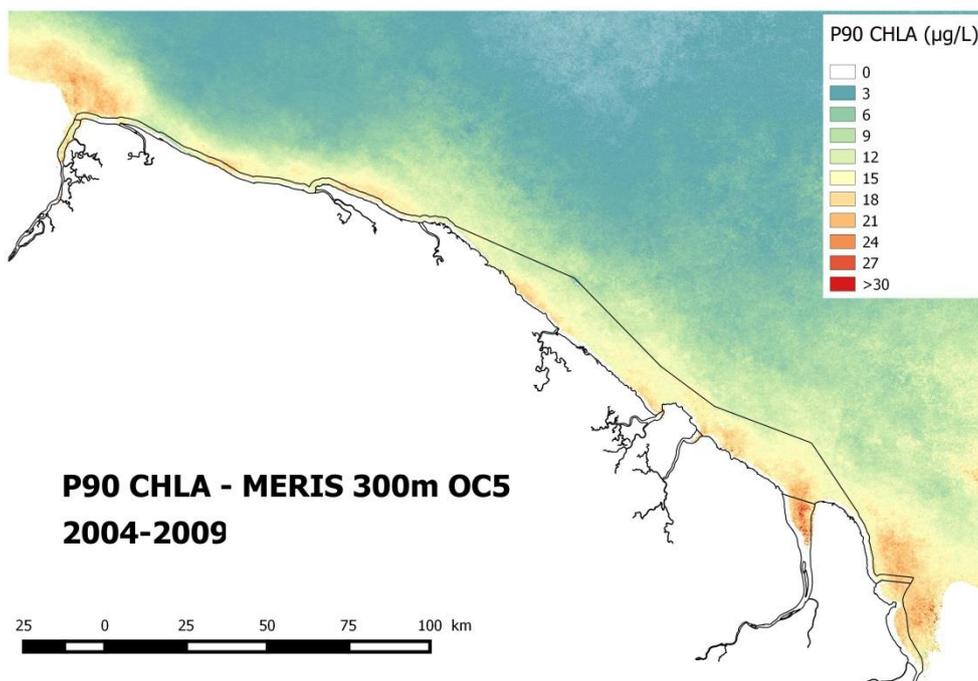
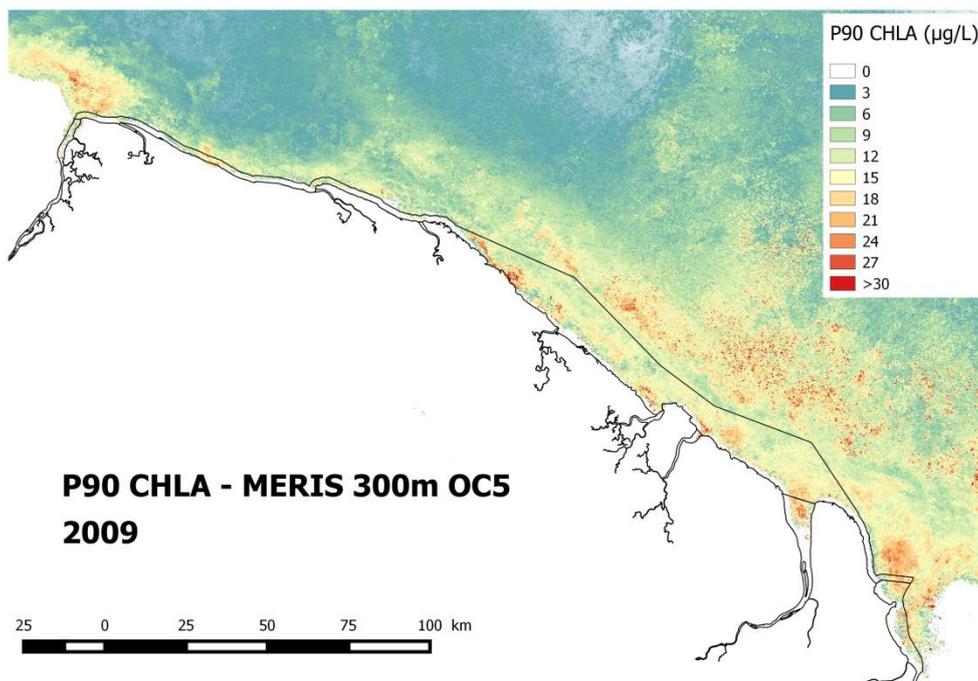
VIIRS : Visible Infrared Imager Suit

Annexe 1 : P90_{CHLA} obtenus avec MERIS 300 m et l'algorithme OC5 (méthode 'par pixel') entre 2003 et 2009

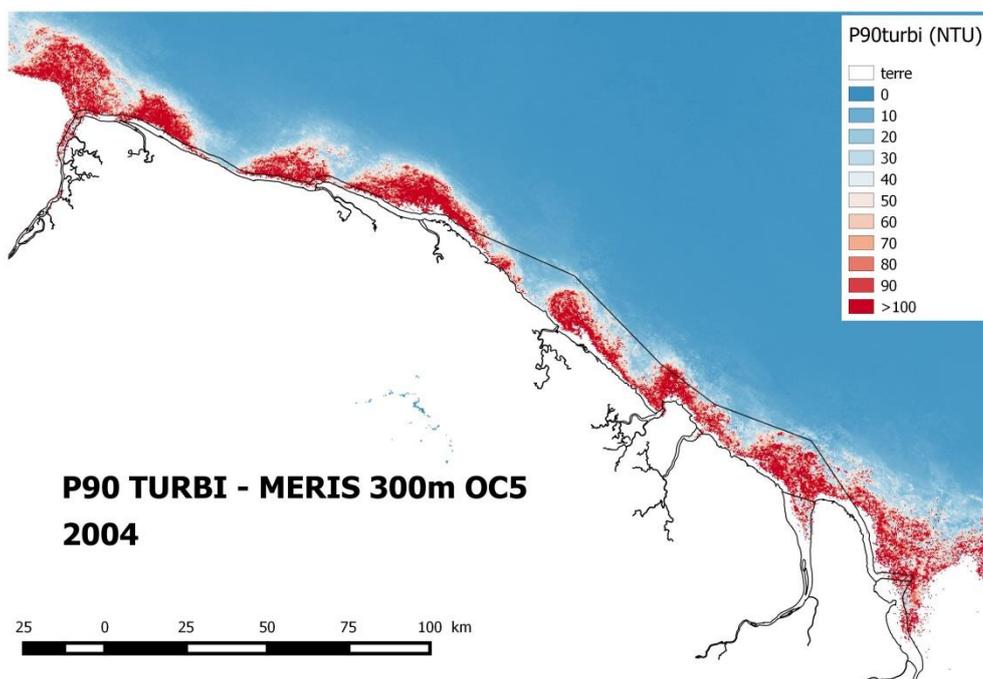
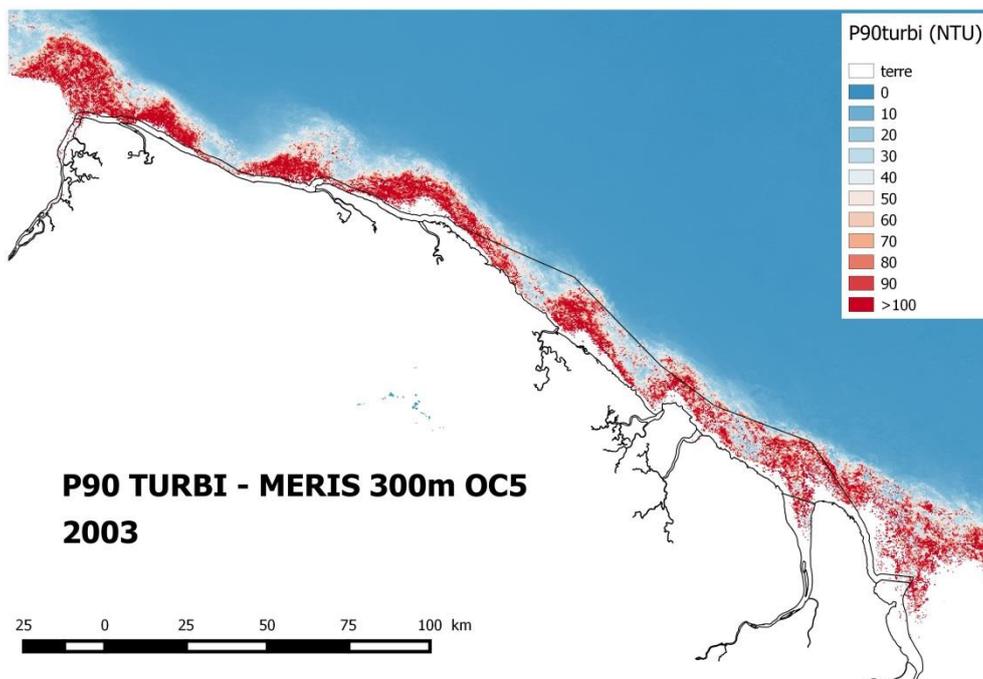


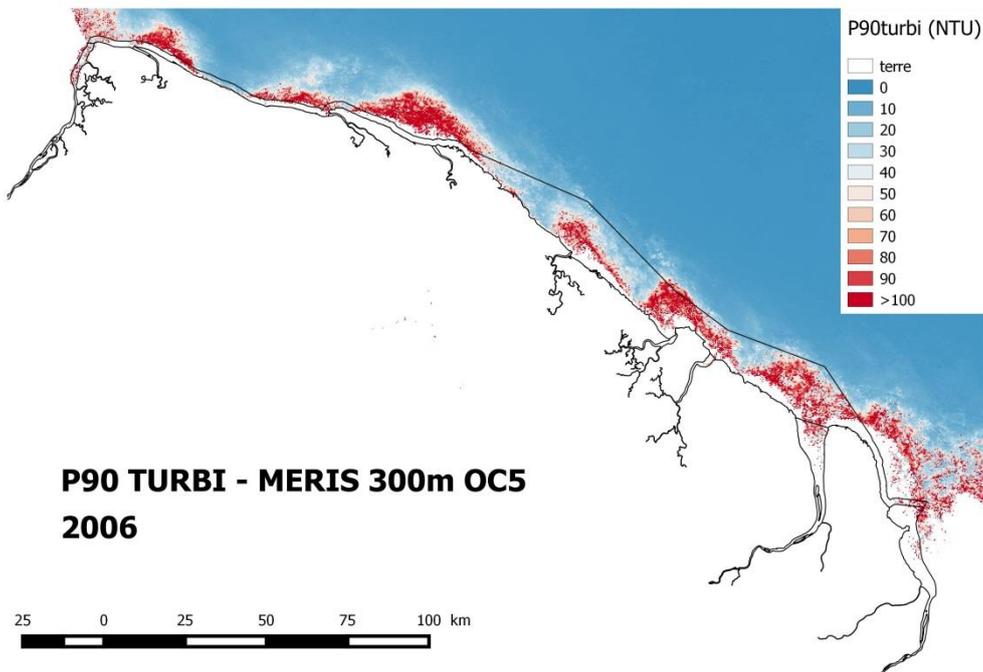
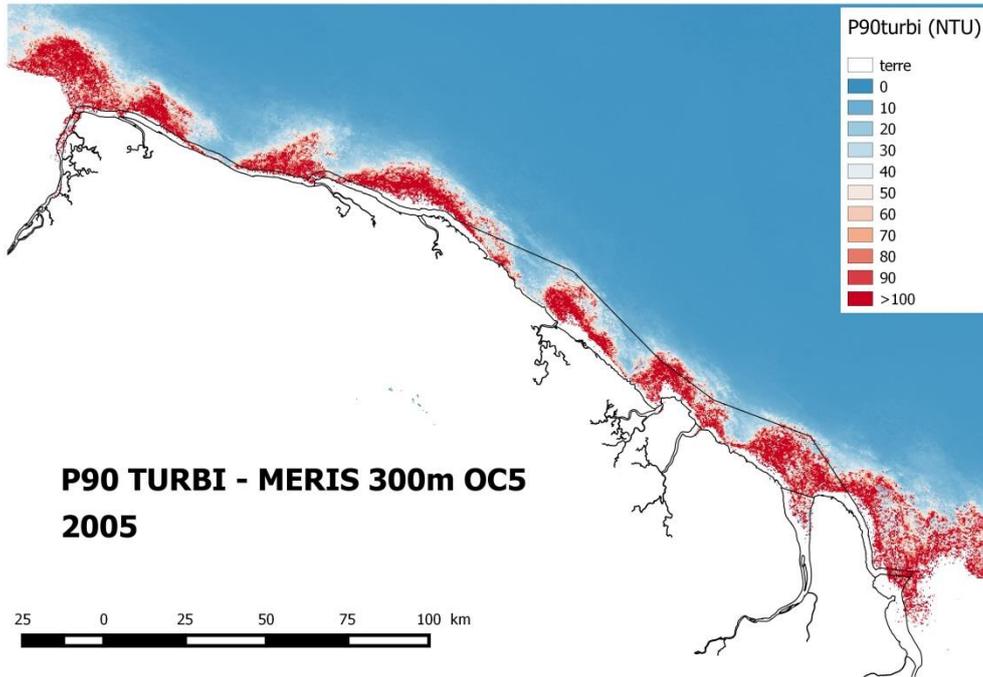


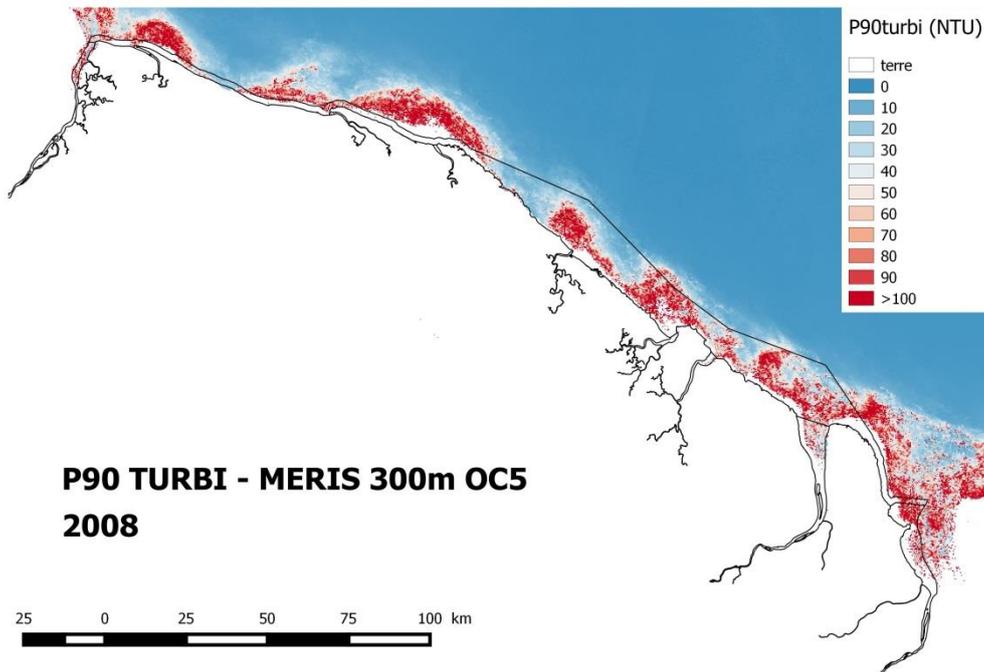
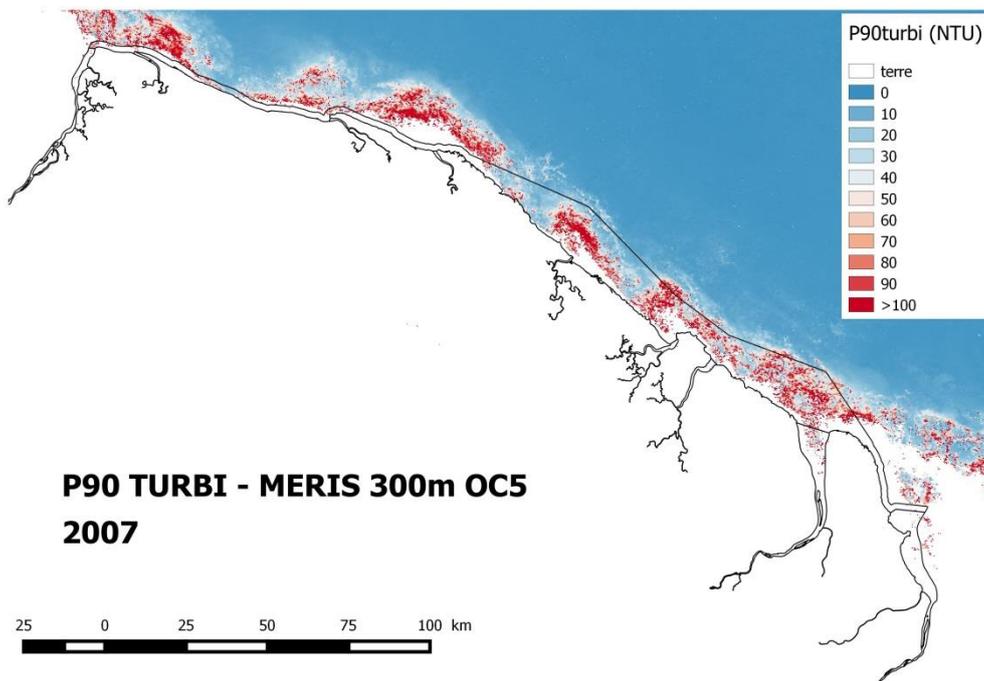


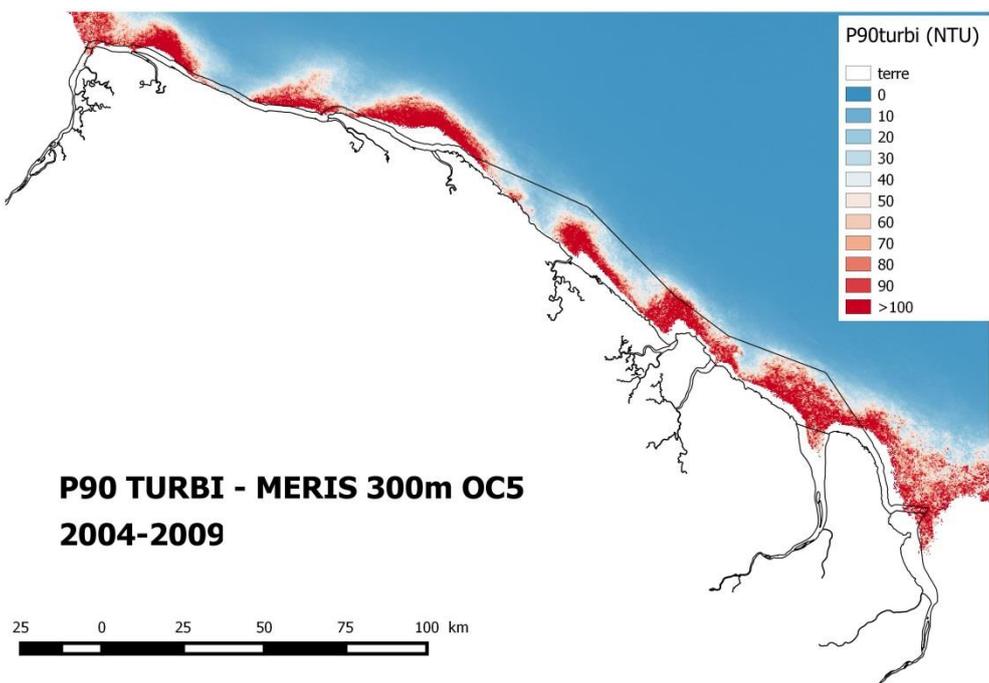
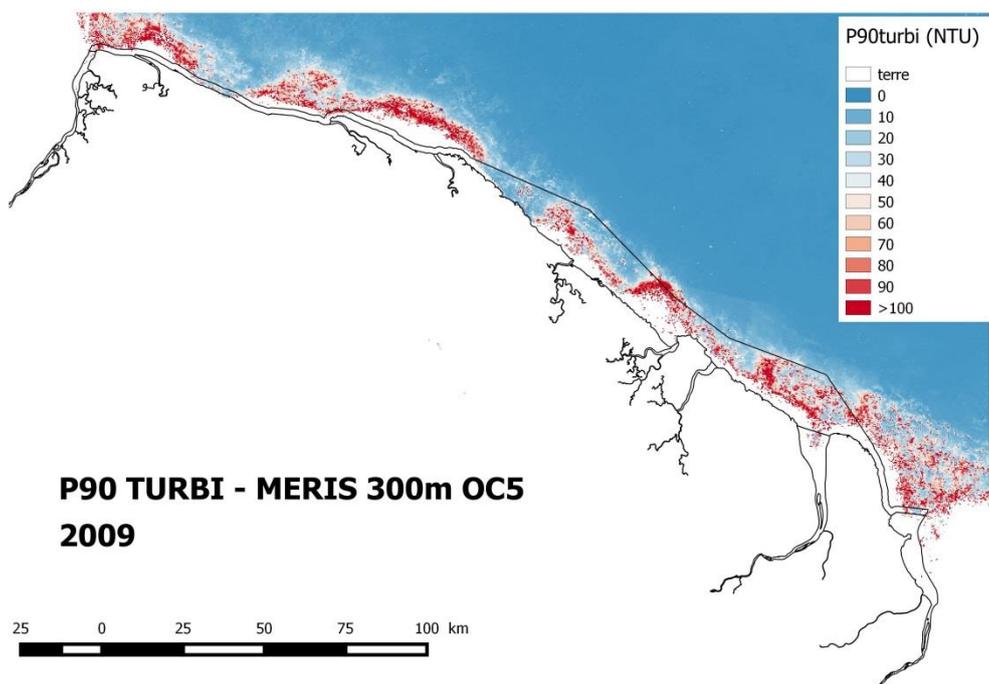


Annexe 2 : P90_{TURBI} obtenus avec MERIS 300 m et l'algorithme OC5 (méthode 'par pixel') entre 2003 et 2009









Annexe 3 : Effet côte-large pour les valeurs en CHLA de MODIS et MERIS en présence d'un gradient de turbidité

Les résultats observés en CHLA montrent des plus fortes concentrations dans la zone côtière avec le couple MERIS300m-OC5 par rapport à MODIS-OC5. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ces différences :

- 1.- La taille du pixel : plus on s'éloignera de la taille du pixel correspondant à la variabilité maximale du milieu, et plus nous aurons un lissage de valeurs extrêmes, conduisant à des écarts de plus en plus forts entre valeurs extrêmes. Le pixel de 1 km lisse les valeurs maximales qui peuvent exister dans les pixels à 300 m.
- 2.- Nous avons constaté avec les produits issus de la caméra MERIS (satellites de l'ESA en général), un masquage moins strict (masque terre, masque nuages et pixels douteux) par rapport aux images de la NASA. Ceci permet d'accéder à davantage de données, surtout celles très côtières. Il se peut alors, que les valeurs de MERIS, qui intègrent plus de pixels côtiers, soient plus fortes.
- 3.- C'est peut être la conséquence de l'algorithme lui-même car MODIS et MERIS n'utilisent pas les mêmes canaux ni traitements.

Nous avons choisi une image journalière avec un minimum de nuages (28/12/2011) pour comparer l'évolution des résultats en chlorophylle par MODIS et MERIS (figure A3.1). Une série de zones test a été placée sur un gradient côte-large afin d'évaluer la concentration en chlorophylle, allant des plus faibles concentrations aux plus fortes en présence d'un gradient de turbidité (figure A3.2).

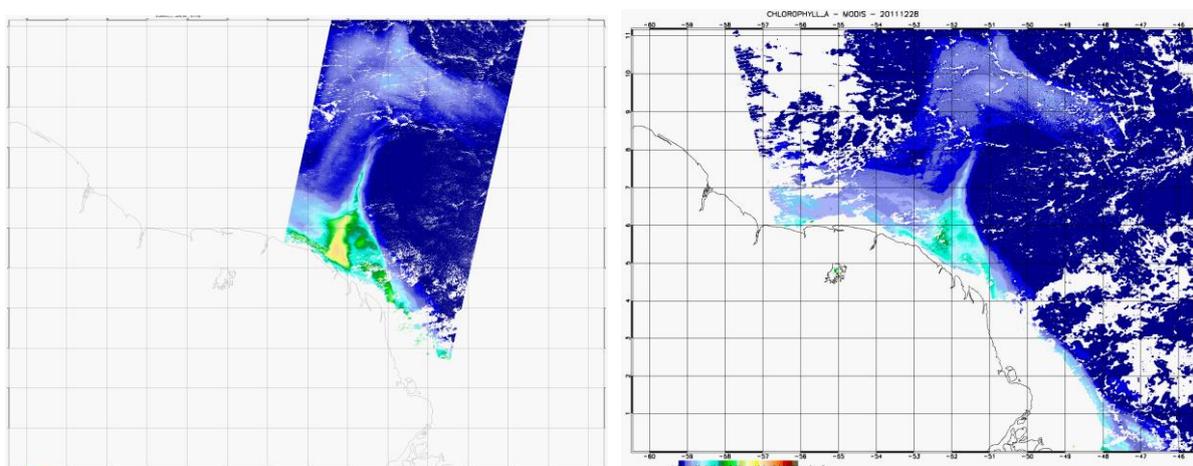


Figure A3.1 : Images des concentrations en chlorophylle obtenues avec l'algorithme OC5 pour le 28/12/2011 avec MERIS 300 m à gauche et MODIS 1 km à droite

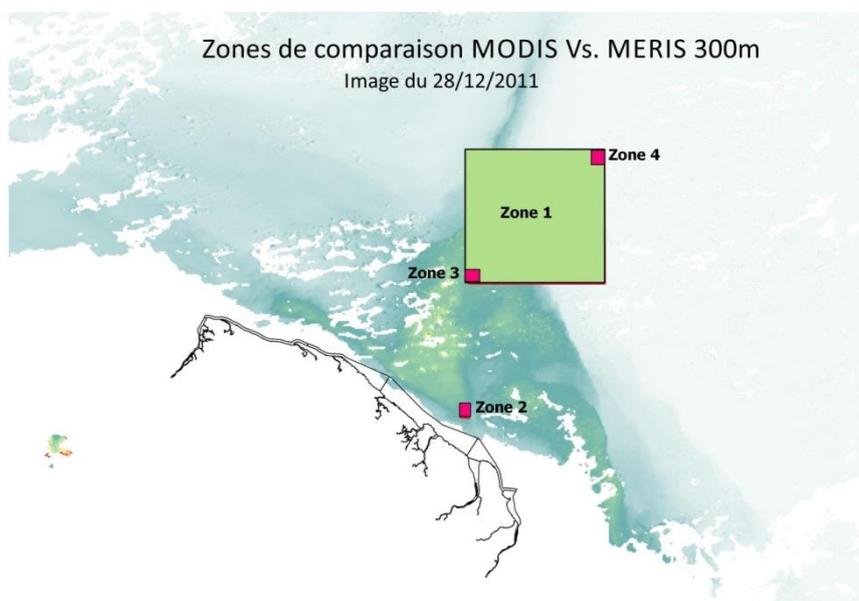


Figure A3.2 : 4 zones choisies dans l'image du 28/12/2011 pour la comparaison de la concentration en chlorophylle avec OC5 et les capteurs MODIS (1 km) et MERIS (300 m)

Tableau A3.1 : Résultats obtenus pour la concentration en chlorophylle des 4 zones avec l'algorithme OC5 pour les caméras MODIS (1 km) et MERIS (300 m)

satellite	zone	n°.pix.TOT	n°.pix.ok	NAs	%.pix.vid	moy	min	max
MERIS300m	zone1	161019	155232	5787	4	0.816	0.100	9.141
MODIS1Km	zone1	10096	9979	117	1	0.499	0.100	2.666
MERIS300m	zone2	859	857	2	0	4.585	2.732	8.317
MODIS1Km	zone2	56	56	0	0	1.341	1.113	1.561
MERIS300m	zone3	694	694	0	0	2.732	1.834	3.606
MODIS1Km	zone3	45	45	0	0	1.546	1.451	1.695
MERIS300m	zone4	916	916	0	0	0.100	0.100	0.130
MODIS1Km	zone4	52	52	0	0	0.104	0.100	0.200

La zone 1 (la plus étendue) présente une différence des pixels non utilisables (%.pix.vid) entre les deux caméras de 3 % (1 et 4 %, tableau A3.1). Ceci est essentiellement dû aux masques des nuages et des erreurs dans les pixels, différents dans les deux caméras, car les images ne sont pas prises à la même heure de la journée.

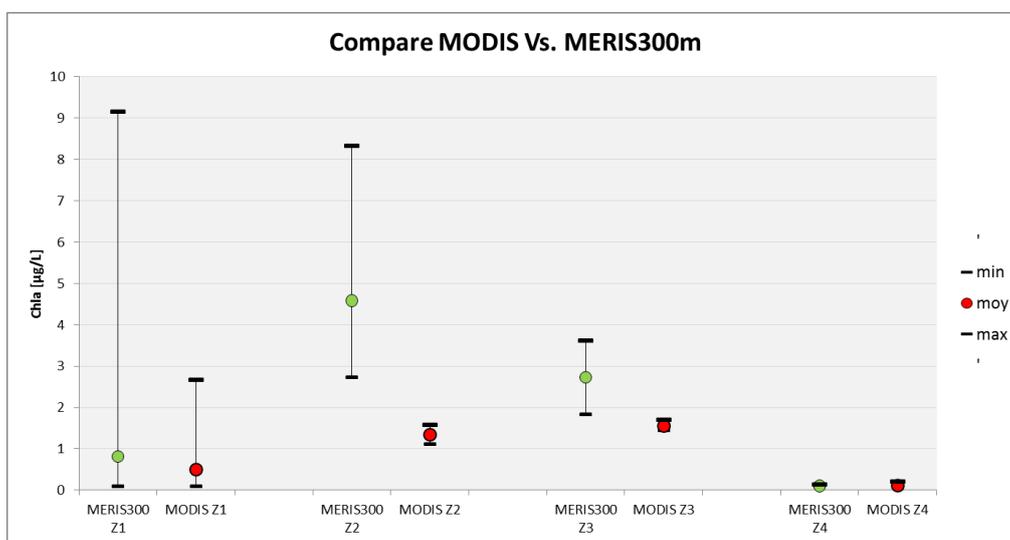


Figure A3.3 : Résultats des concentrations en chlorophylle obtenues avec les couples MODIS-OC5 et MERIS300m-OC5 sur les 4 zones de travail

Les résultats de la concentration moyenne en chlorophylle du tableau A3.1 ont été portés sur la figure A3.3 avec leur étendue. Sur le gradient côte-large, représenté par les zones 2 à 4, nous observons que la différence dans les moyennes des concentrations en CHLA entre les deux caméras est presque inexistante concernant la zone située plus au large, là où la turbidité est la plus faible (zone 4). Au fur et à mesure que nous nous rapprochons de la côte, la différence de moyennes entre MODIS et MERIS devient plus forte. Les écarts autour de la moyenne (minimum et maximum) augmentent en se rapprochant de la côte tout en restant plus faibles pour la caméra MODIS.

Pour les eaux oligotrophes de la zone 1, les valeurs des moyennes sont proches, mais présentent une plus forte variabilité que celles de la zone 4, qui est 38000 fois plus petite. Les concentrations obtenues avec MERIS présentent la plus forte variabilité, à cause du lissage opéré par MODIS à 1 km de résolution.

Ces résultats suggèrent que l'effet de masquage n'est pas la cause principale des différences entre les résultats obtenus avec MODIS et MERIS, mais l'effet de la turbidité, qui est de plus en plus fort au fur et à mesure que l'on s'approche de la côte. Les longueurs d'ondes utilisées pour le calcul de la chlorophylle dans OC5 sont sensibles aux matières en suspension et affectent directement les résultats (Gohin F., Druon J. N., et Lampert L. 2002).

