

**Luis Lampert**

**Francis Gohin**

**Philippe Bryère**

Février 2017 R.INT.DIR ODE/DYNECO/PELAGOS 2017-01

## **Mesures de turbidité satellitaire des eaux fortement chargées en MES**

### **Utilisation de l'algorithme OC5-HT en Guyane française**



*Photo Campagne OYANA 7 en Guyane française, juin 2011*



## Fiche documentaire

<p><b>Numéro d'identification du rapport :</b> RST.DYNECO n° 2017-01</p> <p><b>Diffusion :</b> libre <input checked="" type="checkbox"/> restreinte: <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/></p> <p><b>Validé par :</b> Adresse électronique : - chemin UNIX : - adresse WWW :</p>	<p><b>date de publication</b> février 2017</p> <p><b>nombre de pages : 24</b></p> <p><b>bibliographie : oui</b></p> <p><b>illustration(s) : oui</b></p> <p><b>langue du rapport : français</b></p>	
<p><b>Titre et sous-titre du rapport :</b> Mesures de turbidité satellitaire des eaux fortement chargées en MES – Utilisation de l'algorithme OC5-HT en Guyane française</p>		
<p>Contrat n° _____ Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input type="checkbox"/> N° _____</p>		
<p><b>Auteur(s) principal(aux) :</b> LAMPERT Luis GOHIN Francis BRYERE Philippe</p>	<p><b>Organisme / Direction / Service, laboratoire</b> IFREMER IFREMER/ODE/DYNECO-PELAGOS IFREMER IFREMER/ODE/DYNECO-PELAGOS ACRI-HE</p>	
<p>Collaborateur(s) :</p>		
<p>Cadre de la recherche :</p> <p>Programme : _____ Convention : _____ Projet : _____ Autres (préciser) : _____ Campagne océanographique :</p>		
<p><b>Résumé :</b> L'étude des paramètres suivis dans le cadre de la DCE en Guyane française nous a conduit à développer un algorithme pour la turbidité, mieux adapté aux eaux fortement chargées en matières en suspension des eaux très côtières. L'algorithme OC5-HT réponds à cette demande.</p>		
<p><b>Abstract :</b> The study of the monitored parameters for the WFD directive in French Guiana, enabled us to develop a turbidity algorithm for better characterize coastal waters with high suspended matters. The OC5-HT algorithm answer to this request.</p>		
<p><b>Mots-clés :</b> Guyane française, DCE, turbidité, télédétection</p>		
<p><b>Rédacteur</b> Nom : Lampert Luis  Date : 16 février 2017  Visa</p>	<p><b>Vérificateur</b> Anne-Laure Le Velly</p>	<p><b>Approbateur</b></p>



# SOMMAIRE

---

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>MATERIEL ET METHODES</b> .....	<b>2</b>
<b>Algorithme OC5</b> .....	<b>2</b>
<b>Algorithme Han et al. 2016</b> .....	<b>2</b>
<b>Algorithme OC5-HT</b> .....	<b>2</b>
<b>Calcul du percentile 90 (P90)</b> .....	<b>2</b>
Calcul du percentile 90 par 'pixel'.....	<b>2</b>
Calcul du percentile 90 'global'.....	<b>3</b>
<b>Zone d'étude</b> .....	<b>4</b>
<b>RESULTATS</b> .....	<b>8</b>
<b>Eaux du large du 28/12/2011</b> .....	<b>8</b>
<b>Eaux de la masse d'eau côtière (MEC)</b> .....	<b>10</b>
Calcul du percentile 90 par 'pixel' (2003-2009).....	<b>10</b>
Calcul du percentile 90 'global' (2007-2009).....	<b>12</b>
<b>Eaux de la masse d'eau de transition (MET)</b> .....	<b>14</b>
Calcul du percentile 90 par 'pixel' (2003-2009).....	<b>14</b>
Calcul du percentile 90 'global' (2003-2009).....	<b>16</b>
<b>Turbidité saisonnière en Guyane française</b> .....	<b>19</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>22</b>
<b>ANNEXE</b> .....	<b>23</b>



---

# Algorithme OC5-HT – Turbidité des eaux fortement chargées en MES

---

## INTRODUCTION

L'utilisation du satellite dans des eaux à très forte charge particulaire pose le problème de la représentation de la turbidité. Sur les eaux métropolitaines, l'algorithme OC5 (Gohin F., Druon J. N., et Lampert L. 2002 ; Francis Gohin et al. 2005) a donné satisfaction et répond aux besoins des suivis des réseaux (Francis Gohin, Saulquin, et Bryere 2010).

L'un des problèmes majeurs concernant les mesures satellite des zones côtières est l'accès aux pixels en bordure littorale. Les eaux guyanaises présentent un fort gradient côte-large ; elles sont également marquées par une forte hétérogénéité en raison des tourbillons de petite et moyenne échelle. Il devient alors nécessaire de récupérer un maximum de pixels à la côte pour que le bilan soit représentatif de la masse d'eau dans son intégralité.

Les corrections et masques utilisés dans les traitements des images diffèrent selon qu'il s'agisse de la NASA ou de l'ESA. Les images des capteurs mis en place par la NASA (MODIS, VIIRS, SeaWiFS,...) sont traités avec des masques divers (terre, nuages, spéculaires,...) plus pénalisantes pour les pixels côtiers que les images des capteurs de l'ESA (MERIS, OLCI). La conséquence est que les moyennes en turbidité issues des capteurs de la NASA n'intègrent pas les pixels plus côtier et donc, éliminant les plus fortes concentrations en MES et Chla qui servent à calculer la turbidité avec OC5.

Pour valider les résultats du satellite nous disposons actuellement d'une centaine de données de turbidité acquises en Guyane lors des plans de surveillance DCE des années 2013 à 2015. Ils intègrent des points du suivi des MEC et des MET, ce qui nous permettra d'avoir une première approche des avantages /désavantages des différents capteurs, et des méthodes de mesure et d'échantillonnage utilisés.

Nous allons comparer les résultats des capteurs MODIS et MERIS sur les eaux guyanaises et appréhender leur réponse en fonction des algorithmes et méthodes de calcul disponibles. Les algorithmes retenus sont OC5 (Gohin et al, 2001), Han et al (20116), et un nouvel algorithme que nous proposons, issue de OC5, mais adapté aux eaux hautement turbides (OC5-HT).

---

---

## MATERIEL ET METHODES

### Algorithme OC5

La turbidité (TURBI) est calculée par l'algorithme OC5 (F. Gohin 2011) 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 :  $\text{NTU} = \text{FNU}/1.3$ . Cette relation est valable dans les eaux atlantiques de métropole, mais reste à vérifier dans les eaux des DOM.

### Algorithme Han et al. (2016)

Un nouvel algorithme, destiné aux matières en suspension (MES) et à la turbidité des eaux à forte charge particulaire, a été développé par Han (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.

### Algorithme OC5-HT

Avec OC5, de nombreux pixels côtiers présentent des rapports de réflectance négatives, donc inutilisables. Ces rapports des réflectances ont été modifiés par F. Gohin afin de permettre de gagner davantage de pixels côtiers (voir annexe), puis les filtres passe-haut qui limitaient la turbidité à 100 NTU ont été supprimés, car lors des mesures de terrain, des valeurs de 100 à 1000 NTU ont été couramment observées dans la MEC et les MET entre 2013 et 2015.

### Calcul du percentile 90 (P90)

La DCE a adopté l'utilisation du percentile 90 (P90) pour la métrique de la chlorophylle<sub>a</sub> (CHLA) et de la turbidité (TURBI). Sur une série, il correspond au seuil où 90 % de valeurs de la série sont inférieures. 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. Nous avons réalisé des cartes du P90 CHLA et P90 TURBI pour chaque année, de 2003 à 2014 dans le 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).

#### Calcul du P90 'par pixel'

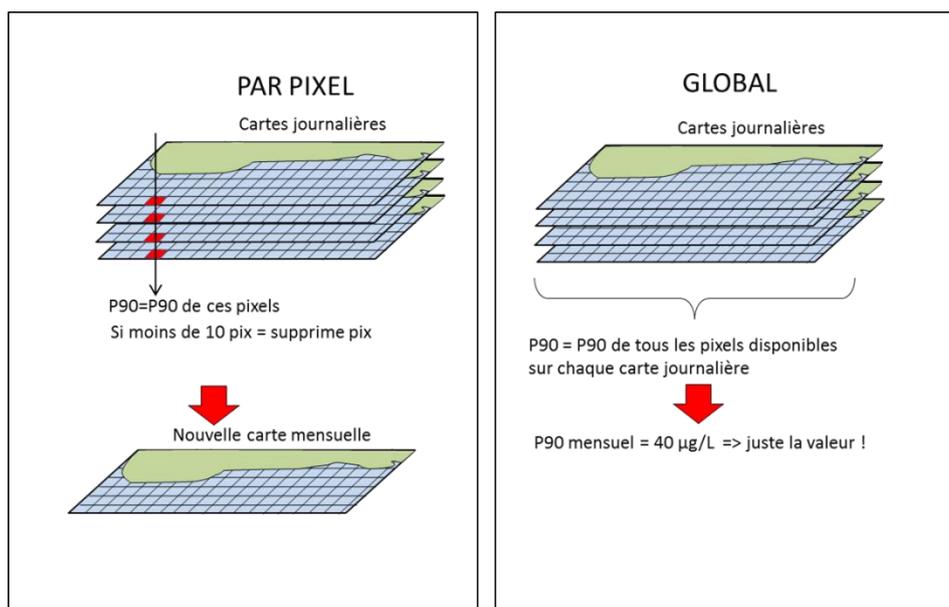
Les images utilisées, annuelles ou pluriannuelles du P90, sont réalisées pixel par pixel. C'est-à-dire que la valeur (turbidité ou chlorophylle) de l'image est le P90 de toutes les données sur ce

---

même pixel calculé à partir des images journalières disponibles (figure 1). 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. 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. Il est ainsi créé une image composite avec les valeurs du P90 sur une longue période (1 mois ou plus). Afin d'obtenir le P90 de tout un secteur (MEC Guyane par exemple), nous prenons la moyenne des valeurs P90 de la carte sur 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 son pixel voisin. On dispose alors de la distribution spatiale du P90 par pixel.

#### Calcul du P90 'global'

Nous procédons de la même façon qu'avec les données issues des analyses. 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 de 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 cartes de distribution spatiale du P90, mais d'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 peut se traduire par une seule couleur dans une échelle de concentrations ou d'une grille DCE de qualité des masses d'eau.

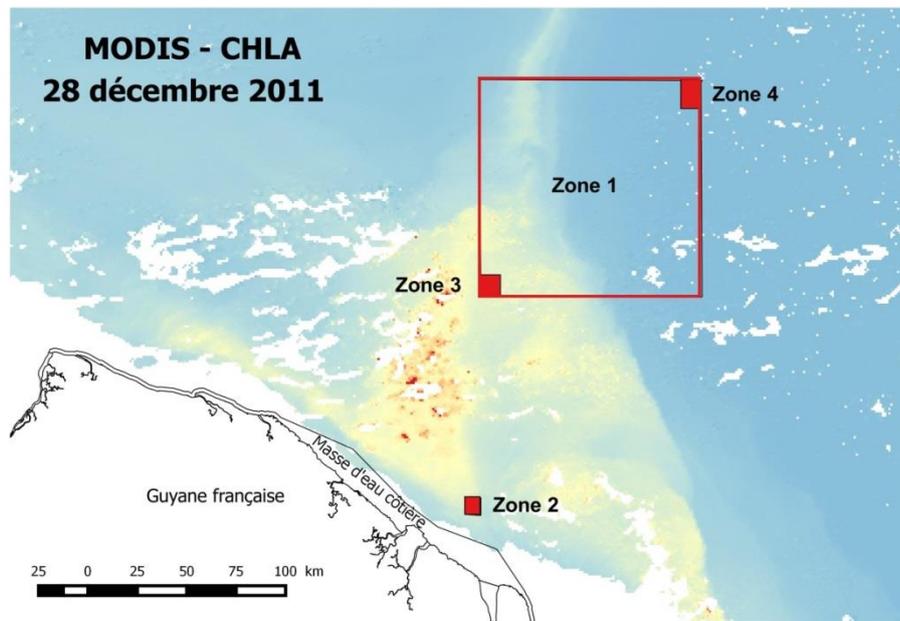


**Figure 1 : Méthode de calcul du P90, par pixel ou global**

## Zones d'étude

### Eaux du large du 28 décembre 2011

L'image du 28/12/2011 a été particulièrement claire et sera utilisée pour tester la réponse des différents algorithmes dans des eaux avec un fort gradient des matières en suspension (figure 2).



**Figure 2 : Image MODIS en CHLA du 28/12/2011 avec les quatre zones témoin**

### Eaux de la Masse d'Eau Côtière (MEC)

La MEC guyanaise présente la particularité de présenter une forte surface avec une extension vers le large d'environ 10 km à cause de la présence des îles et îlets (figure 3). La série d'images journalières entre 2003 et 2009 sera utilisée pour calculer les valeurs des moyennes et du P90turbi par mois et par année.

### Eaux des Masses d'Eau de Transition (MET)

Nous avons choisi les plus grands estuaires, jusqu'à une limite compatible avec la dimension du pixel. Dans ce domaine entre terre et mer, seules les images en haute résolution de MERIS (300 m) peuvent être utilisées. Nous avons retenu « le Maroni », « le Mahury », « l'Approuague » et « l'Oyapock ». La surface considérée est celle représentée en blanc dans la figure 4.

Le tableau 1 nous présente le nombre de pixels théoriques disponibles avec une résolution de 300 m sur les surfaces de la figure 4. Nous constatons que les plus grands fleuves de l'Est présentent le plus fort nombre de pixels ; puis le Mahury, avec 130 pixels, est le plus petit des MET retenus.



Figure 3 : Masse d'eau côtière (MEC) et masses d'eau de transition (MET) sur les eaux guyanaises

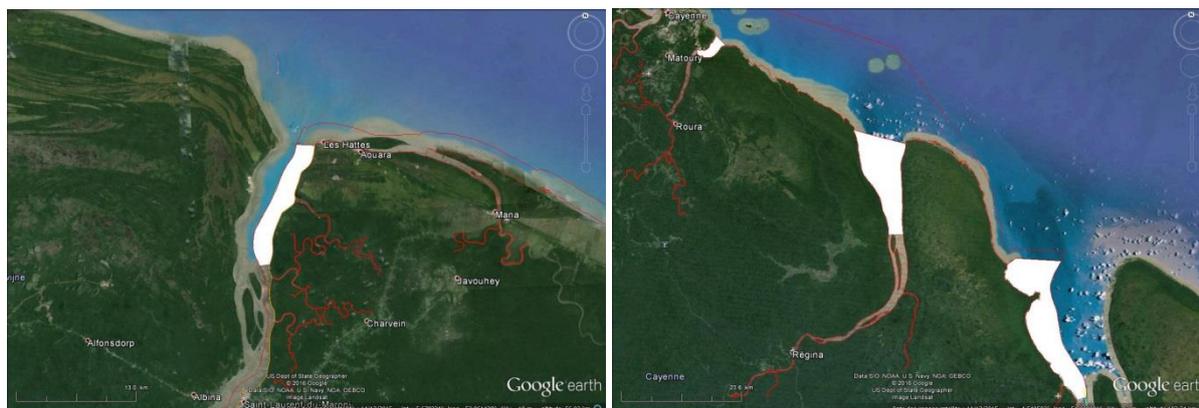


Figure 4 : Surfaces prises en compte pour les 4 MET considérés dans cette étude

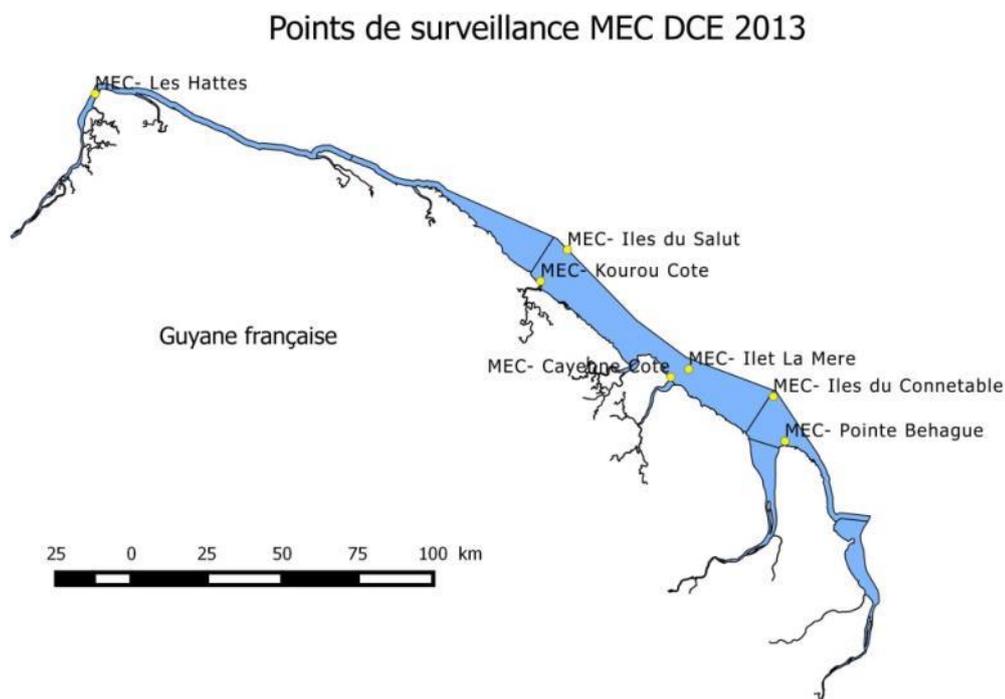
Tableau 1 : Nombre de pixels maximaux pour les 4 MET sélectionnés avec une résolution de 300 m par pixel

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

#### Données issues des analyses de terrain

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 retenus sont au nombre de 7 et se situent entre l'embouchure du Maroni et celle de l'Approuague (figure 5 et tableau 2).

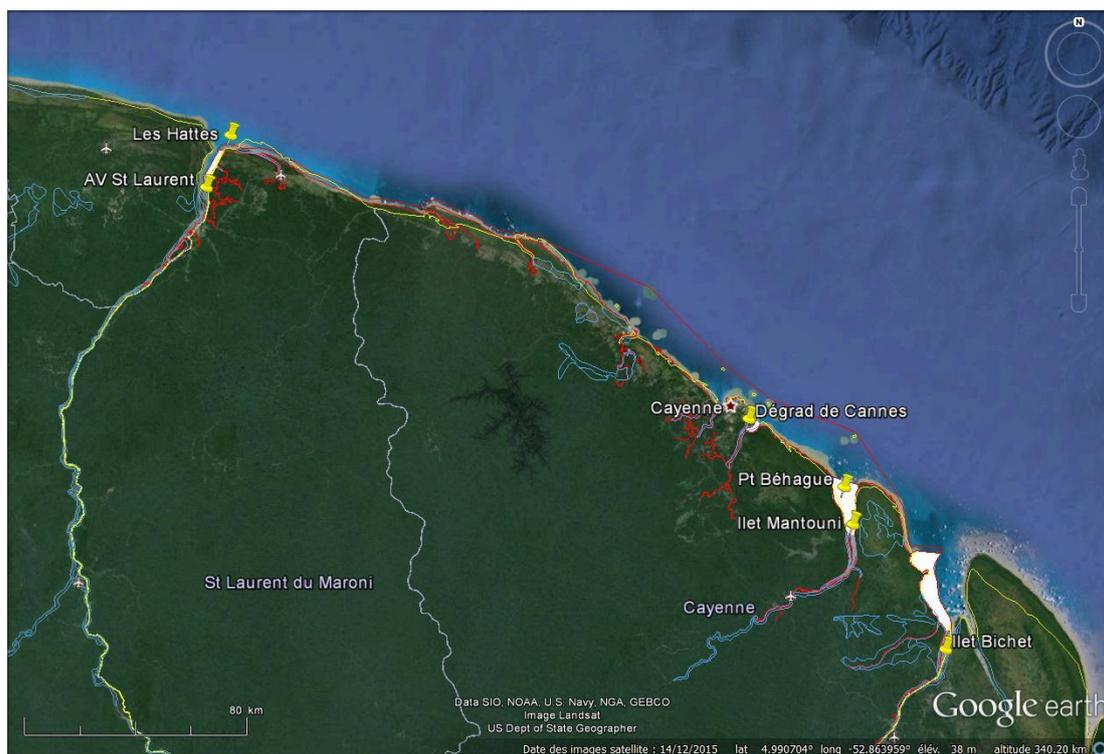


**Figure 5 : Points de surveillance 2013**

**Tableau 2 : Points de la MEC guyanaise qui ont été échantillonnés 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

Les résultats concernant les MET se situent sur les points proches ou dans les embouchures retenues (figure 6).



**Figure 6 : Points d'échantillonnage DCE utilisés en relation avec les 4 MET retenues**

## RESULTATS

### Eaux du large du 28 décembre 2011

Nous avons calculé, pour cette journée du 28/12/2011, les valeurs extrêmes (max et min), la moyenne et le P90turbidité par la méthode 'globale' sur chacune des quatre zones. La résolution de 1 km a été abordée par MODIS-OC5, puis MERIS 1km-OC5. Concernant la haute résolution nous avons comparé MERIS300-OC5, MERIS300-Han et MERIS300-OC5-HT (figures 7 et figure 8).

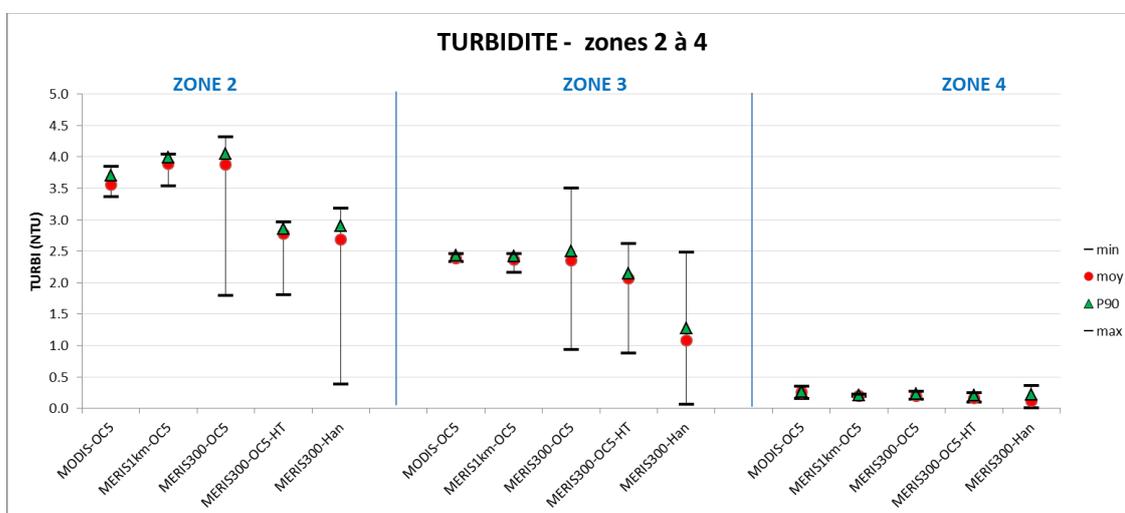


Figure 7 : Valeurs de turbidité maximale, minimale, moyenne et P90 sur les zones 2 à 4 avec les 5 couples capteur-algorithme

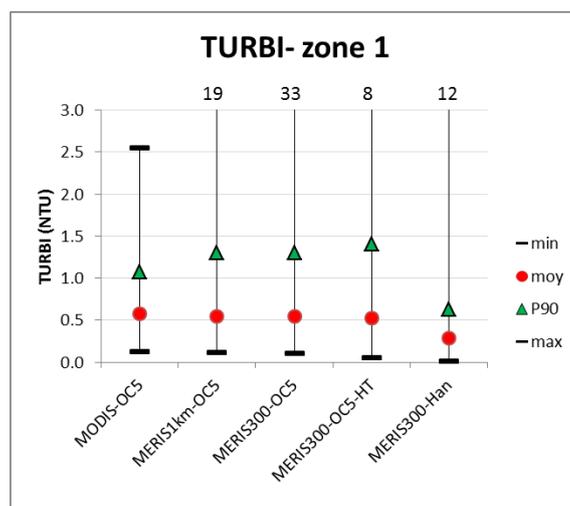


Figure 8 : Valeurs de turbidité maximale, minimale, moyenne et P90 sur la zone 1 avec les 5 couples capteur-algorithme

Les zones 2 à 4 se présentent dans un gradient côte-large qui permet d'évaluer la réponse des couples capteur-algorithme à l'augmentation de la turbidité.

La zone 4, située au large, présente des turbidités inférieures à 0.5 NTU et une très faible variabilité entre les capteurs. Les écarts entre les valeurs max et min sont également très réduits et aucune valeur extrême ne dépasse 0.5 NTU. Donc, avec des faibles valeurs de CHLA et MES, caractéristiques des eaux océaniques, les valeurs de turbidité obtenues par les 5 couples capteur-algorithme sont similaires.

Les résultats dans la zone 3, avec davantage de CHLA et MES, présentent des résultats plus contrastés ; où MODIS et MERIS 1 km montrent des valeurs similaires avec une faible dispersion de valeurs (2.2 à 2.5 NTU). Les résultats du capteur MERIS 300 m présentent une bien plus forte variabilité entre max et min à cause de leur résolution (plus proche de la variabilité maximale du paramètre avec 300m de résolution) ; mais également un gradient entre les moyennes qui va de 1.5 NTU pour l'algorithme de Han, 2 NTU pour OC5-HT et 2.4 NTU pour OC5.

Dans la zone 2, la plus côtière, nous observons des plus faibles valeurs de turbidité obtenus avec MODIS par rapport MERIS 1 km malgré l'utilisation du même algorithme (OC5). La moyenne et le P90 entre MERIS 1 km et MERIS 300 m reste la même, mais l'étendue entre valeurs max et min du capteur MERIS 300 m est plus de quatre fois supérieure à celle observée avec MERIS 1 km. Toutes les moyennes et les P90 calculés avec OC5 se situent entre 3.5 et 4 NTU, tandis qu'elles sont entre 2.5 et 3 NTU pour les valeurs obtenues avec MERIS 300 m et les algorithmes de Han et OC5-HT. Nous constatons une plus forte étendue des valeurs max et min avec l'algorithme de Han. Mais ceci ne peut pas s'expliquer par le plus grand nombre de pixels utilisables car sur 916 pixels disponibles, OC5-HT utilise la totalité et Han seulement 721.

La zone 1 située au large est plus étendue et intègre davantage de pixels. Pour les capteurs à 1 km c'est 10096 pixels disponibles et 161000 pour la résolution de 300 m (Tableau 3). Nous trouverons des pixels imputables aux nuages et à quelques erreurs selon les masques et corrections atmosphériques. Le pourcentage de pixels inutilisables le plus fort est observé pour MERIS 1 km-OC5 (37 %) et MERIS 300-Han (15 %). Le reste des capteurs présentent un taux de pixels inutilisés inférieurs à 5 % (Tableau 3).

**Tableau 3 : Bilan des pixels disponibles et utilisés pour la zone 1 selon les couples capteur-algorithme**

Capteur-Algo	Zone	n.pix TOT	n.pix.ok	NAs	%pix.vid
MODIS_OC5	zone1	10096	9979	117	1
MERIS1km_OC5	zone1	10096	6403	3693	37
MERIS300_OC5	zone1	161019	153963	7056	4
MERIS300_OC5-HT	zone1	161019	153965	7054	4
MERIS300_Han	zone1	161019	137300	23719	15

Sur les 4 zones retenues, nous observons des valeurs de turbidité avec des valeurs moyennes de 0.5 à 4 NTU, mais avec des valeurs maximales qui peuvent être supérieures à 30 NTU. Ces dernières peuvent être attribuées aux erreurs du capteur car peu nombreuses, comme le

montrent les valeurs proches de moyennes et P90. Dès que la turbidité augmente, nous observons deux groupes de capteurs-algorithmes avec des valeurs similaires : d'une part celles issues de OC5, puis OC5-HT et Han, avec des plus faibles valeurs. OC5-HT pouvant être tantôt plus près de Han ou se situer entre les deux groupes comme le montrent les zones 2 et 3 dans la figure 7. L'algorithme de Han (2016) semble retrouver des pixels avec les plus faibles valeurs observées.

## Eaux de la Masse d'Eau Côtière (MEC)

Nous allons maintenant nous rapprocher des côtes, où les concentrations en CHLA et MES sont plus fortes que celles présentées dans les zones de l'image du 28 décembre 2011. Cette zone correspond à la MEC guyanaise qui présente des zones avec un éloignement vers le large de 1 mille nautique (la règle DCE). Mais sur une bonne moitié de sa longueur, l'éloignement vers le large est d'environ 10 km à cause des îles et îlets.

### Méthode 'par pixel' (2003-2009)

Dans la figure 9 nous observons l'évolution du P90turbi entre 2003 et 2009, calculé sur la base des images des P90 annuels. Les plus faibles valeurs sont celles de MODIS et les plus fortes, ont été obtenues avec MERIS 300m-OC5. Comme pour les images du 28 décembre 2011, nous obtenons les mêmes résultats avec MERIS 1km-OC5 et MERIS 300m-OC5, raison pour laquelle nous n'avons pas porté sur la figure la courbe de MERIS 1km-OC5. **Les résultats issus de MERIS 300 m avec les algorithmes de Han et OC5-HT sont extrêmement proches et suivent la même tendance pluriannuelle, ce qui montre un accord inattendu entre les deux algorithmes, qui ne calculent pas la turbidité par le même procédé.**

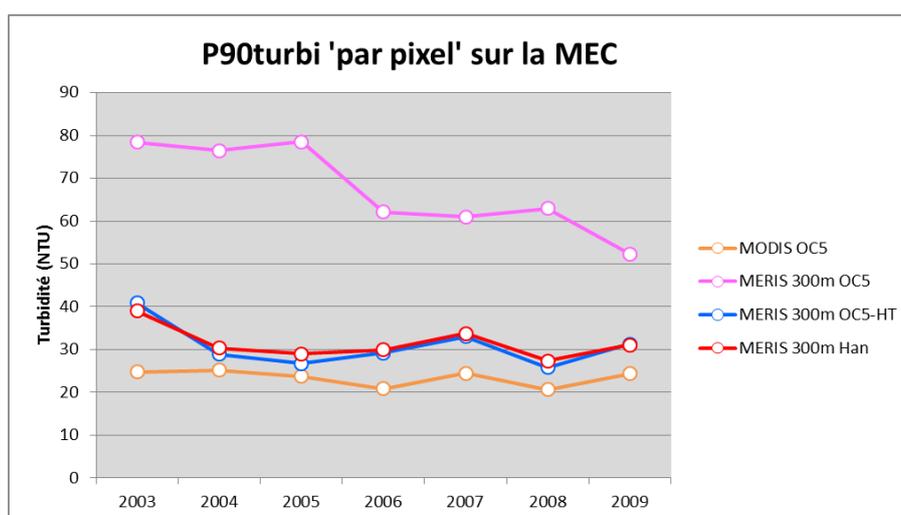


Figure 9 : Valeurs du P90turbi calculés 'par pixel' sur l'ensemble de la MEC entre 2003 et 2009

Les valeurs de MERIS 300m-OC5 peuvent paraître extrêmes, mais en comparaison avec les données issues des analyses, elles se trouvent plutôt bien placées (figure 10). Le P90turbi calculé avec toutes les mesures *in-situ* s'élève à 549 NTU, mais dans ces mesures figurent les points Béhague et Les Hattes, dont nous avons signalé leur manque de pertinence dans le rapport de 2015. L'ensemble de valeurs de turbidité moins ces deux points, mènent à un P90turbi de 116 NTU et si nous tenons compte seulement des points proposés dans ce même rapport (MEC 7, 9, 29 et 30), alors le P90turbi descend à 56 NTU.

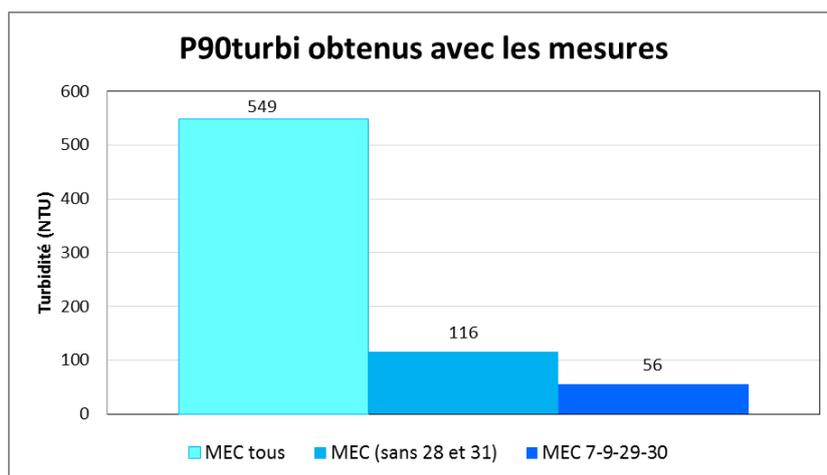


Figure 10 : Valeurs du P90turbi obtenus avec les mesures réalisées sur la MEC entre 2013 et 2015

Si la valeur plus réaliste du P90turbi (mesures de terrain) se situe entre 56 et 116 NTU, c'est l'approche satellitaire avec MERIS 300 m et l'algorithme OC5 qui se situe mieux placé, avec des valeurs entre 50 et 80 NTU.

Ces résultats il faut cependant les remettre dans le contexte des eaux marines et estuariennes guyanaises, où les prélèvements d'eau s'effectuent en général sur le premier mètre de la colonne d'eau. Cette pratique qui est validée en métropole, peut conduire à des résultats difficiles à interpréter en Guyane du fait du fort gradient vertical qui peut exister en turbidité (figure 11). Il faut rappeler que les images satellite n'exploitent dans ces eaux que les premiers millimètres de surface. Il serait prudent de conduire quelques mesures sur différents points de la MEC et des MET en saison sèche et humide pour valider les mesures. Si le gradient est incompatible avec la stabilité des calculs du P90turbi, il faudra revoir les procédures.

**Il se pose 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, et que l'existence d'un fort gradient vertical complique la caractérisation de la masse d'eau.**



Figure 11 : Echantillons d'eau de mer pris, de gauche à droite, à 0.5m, 1.5m et 2m de profondeur sur l'estuaire de l'Oyapock en juin 2011 (Campagne Oyana 7)

#### Méthode 'globale' (2007-2009)

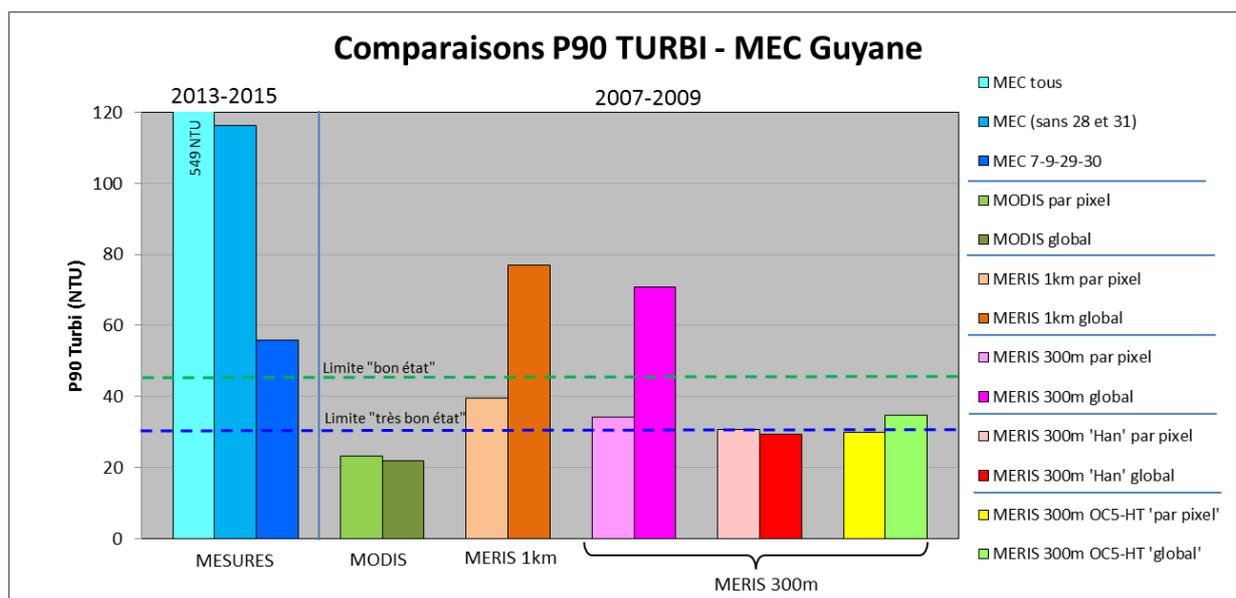
Il pourrait être critiqué à juste raison que les mesures de terrain dont nous disposons ont été obtenues entre 2013 et 2015 et que les mesures du satellite sont celles de 2003 à 2009. Pour la réalisation des mesures du P90turbi par la méthode 'globale', nous allons utiliser les mesures satellitaires des années 2007 à 2009, donc les plus proches de la série de mesures 2013-2015.

L'avantage de la méthode globale est que nous obtenons une mesure du P90turbi pour l'ensemble de la MEC en utilisant tous les pixels disponibles, ce qui n'est pas le cas pour la méthode 'par pixel'. L'inconvénient est que nous ne disposerons pas de cartes annuelles ou pluriannuelles avec une distribution géographique du P90turbi.

C'est avec la résolution de 1 km que nous retrouvons le minimum de pixels utilisables, cependant avec cette résolution, MERIS présente davantage de pixels que MODIS, essentiellement dû aux masques moins forts de l'ESA (tableau 4). Avec la résolution de 300 m, la méthode de Han exploite davantage les pixels des images, suivie d'OC5-HT et OC5.

Tableau 4 : Bilan des pixels disponibles pour le calcul du P90turbi dans la MEC entre 2003 et 2009

	OC5 MODIS	OC5 MERIS 1km	OC5 MERIS 300	Han MERIS 300	OC5-HT MERIS300
<b>2007</b>	37473	49546	186989	373924	<b>272214</b>
<b>2008</b>	59403	58522	363416	601029	<b>486783</b>
<b>2009</b>	37907	42794	180901	343092	<b>263371</b>
<b>TOT==&gt;</b>	<b>134783</b>	<b>150862</b>	<b>731306</b>	<b>1318045</b>	<b>1022368</b>



**Figure 12 : P90turbi obtenus par la méthode 'globale' sur la MEC guyanaise. Indication des limites des « bon état » et « très bon état » de l'écotype 3 de métropole**

C'est avec MODIS que nous trouvons les plus faibles résultats du P90turbi (figure 12). Ils se situent aux alentours de 20 NTU, avec peu de différence entre la méthode 'par pixel' et 'globale'. Ces résultats se trouveraient dans la zone « très bon état » si l'on devait appliquer la grille « ecotype 3 » de turbidité de métropole. Le capteur MERIS à 1 km de résolution couplé à l'algorithme OC5, montre des forts écarts si le P90turbi est calculé avec la méthode 'par pixel' (40 NTU) ou 'globale' (77 NTU). Les résultats obtenus avec MERIS 300 m sont très similaires et suggèrent que la taille du pixel dans le cas de la MEC n'est pas prépondérante. L'utilisation de MERIS 300 m avec les algorithmes de Han et OC5-HT présentent des faibles différences entre algorithmes, mais également selon la méthode utilisée, avec des valeurs qui oscillent autour de 30 NTU. Ces deux derniers se trouvent dans la limite de « très bonne » et « bonne » qualité des eaux selon la grille de l'écotype 3.

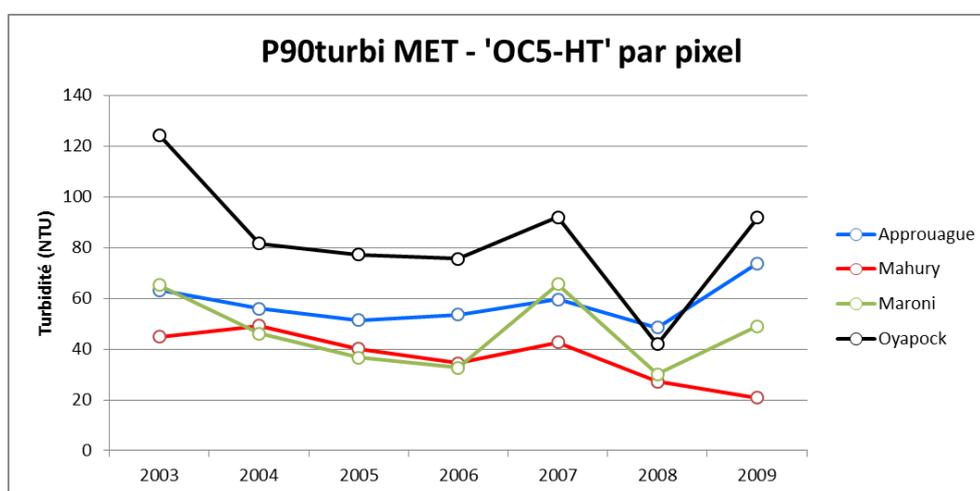
Les mesures in-situ réalisées entre 2013 et 2015 présentent des fortes valeurs de turbidité si l'on tient compte des points « Béhague » et « Les Hattes » (549 NTU). Sans ces points le P90turbi descend à 116 NTU et en tenant seulement compte des 4 points suggérés dans le rapport de 2015 (Kourou côte, Iles du Salut, Cayenne côte et Grand Connétable) nous avons un P90turbi de 56 NTU. Cette valeur se trouve au-dessus de tous les P90turbi calculés avec le satellite, sauf pour la méthode 'globale' des couples MERIS 1km-OC5 et MERIS 300m-OC5 qui présentent respectivement 77 NTU et 71 NTU.

## Eaux des Masses d'Eaux de Transition MET (2003-2009)

La résolution de 300 m des caméras couleur de l'eau permettent de s'approcher des côtes et mieux cerner les paramètres très côtiers de la DCE, mais nous pouvons envisager des rentrer dans les estuaires, quand leur taille est compatible avec celle du pixel. La taille minimale de la largeur d'un estuaire pour pouvoir y accéder avec les images satellite, est de 3 pixels minimum, donc avec la résolution de 300 m, il faut que l'estuaire présente au moins 1 km de large. Cette situation peut se rencontrer en Guyane sur les 4 estuaires retenus, Le Maroni, L'Oyapock, l'Approuague et le Mahury.

### Méthode 'par pixel' (2003-2009)

A partir des images annuelles du P90turbi de Guyane, nous avons extrait les valeurs moyennes par secteur (figure 13).



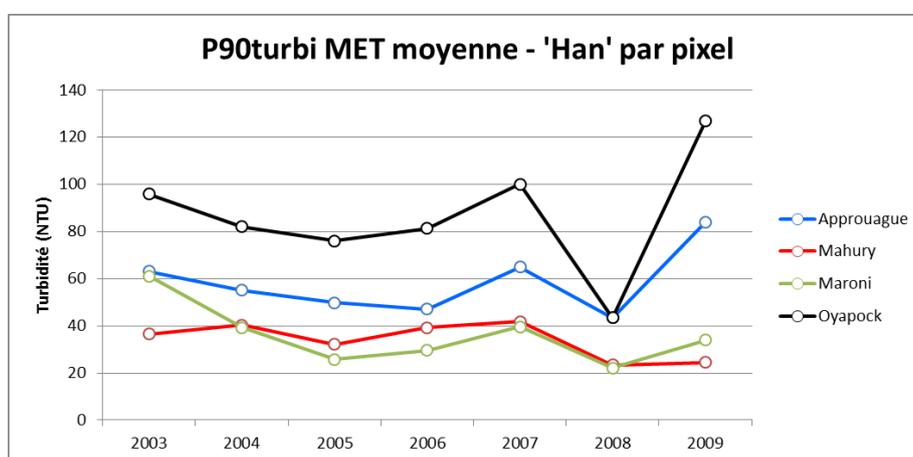
**Figure 13 : P90turbi annuels obtenus par la méthode 'par pixel' sur les 4 MET retenus entre 2003 et 2009 avec MERIS 300 m et OC5-HT**

La distribution des P90turbi annuelles par MET avec la méthode 'par pixel' et l'algorithme OC5-HT présente des valeurs de 20 NTU et jusqu'à plus de 120 NTU. Les plus fortes sont observées pour l'Oyapock, puis l'Approuague. Un gradient est-ouest semble se préciser concernant les turbidités des grands estuaires. Une diminution significative est observée pour l'année 2008, et plus particulièrement sur l'Oyapock. Ces P90turbi ont été calculés avec un nombre de pixels qui vont de 27 pour le Mahury en 2009 à 1468 pour l'Oyapock en 2008 (tableau 5).

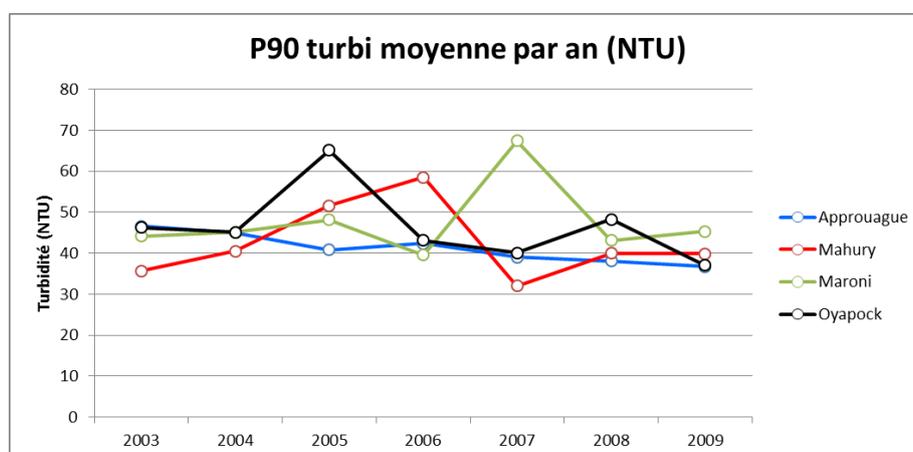
La distribution, les valeurs et les tendances observées avec l'algorithme OC5-HT sont similaires à celles mises en évidence avec Han et al. (2016) (figure 14). De plus fortes différences sont visibles en considérant l'algorithme de base, OC5 (figure 15). Cette différence est également visible dans le nombre de pixels utilisés (tableau 6), où pour le Mahury en 2009, un seul pixel a été disponible. Le nombre de pixels utilisés avec l'algorithme de Han est légèrement supérieur à celui d'OC5-HT (tableau 7).

**Tableau 5 : Bilan des pixels disponibles pour le calcul du P90turbi dans les 4 MET avec le couple MERIS 300m-OC5-HT entre 2003 et 2009**

Nombre pixels OK P90 turbi (méthode par pixel)				
	Approuague	Mahury	Maroni	Oyapock
<b>2003</b>	913	55	342	1418
<b>2004</b>	1009	63	349	1417
<b>2005</b>	1049	47	344	1451
<b>2006</b>	911	46	338	1339
<b>2007</b>	800	28	208	839
<b>2008</b>	1056	55	345	1468
<b>2009</b>	600	27	217	1031



**Figure 14 : MERIS 300m – P90turbi annuels obtenus par la méthode 'par pixel' sur les 4 MET retenus entre 2003 et 2009 avec MERIS 300 m et l'algorithme de Han et al. (2016)**



**Figure 15 : MERIS 300m – P90turbi annuels obtenus par la méthode 'par pixel' sur les 4 MET retenus entre 2003 et 2009 avec MERIS 300 m et OC5**

**Tableau 6 : Nombre de pixels réellement utilisés pour réaliser les calculs du P90turbi avec la méthode 'par pixel' et le couple MERIS 300m-OC5**

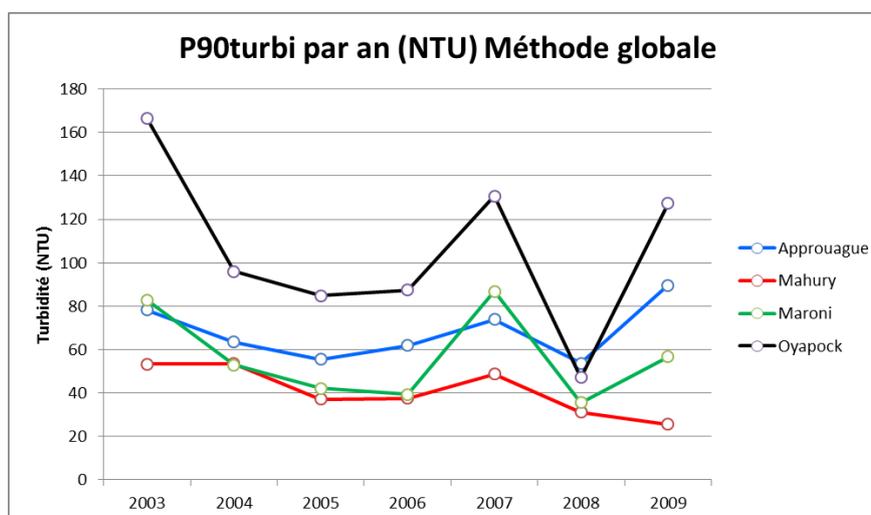
	Approuague	Mahury	Maroni	Oyapock
2003	354	12	68	55
2004	608	25	260	393
2005	621	19	156	124
2006	316	8	203	84
2007	282	12	7	12
2008	770	28	237	882
2009	104	1	10	27

**Tableau 7 : Nombre de pixels réellement utilisés pour réaliser les calculs du P90turbi avec la méthode 'par pixel' et le couple MERIS 300m-Han**

	Approuague	Mahury	Maroni	Oyapock
2003	1152	77	350	1678
2004	1153	86	350	1672
2005	1164	78	350	1644
2006	1145	81	350	1628
2007	1103	59	350	1512
2008	1153	80	350	1642
2009	1031	57	350	1555

### Méthode 'globale' (2003-2009)

Tout comme pour l'étude de la MEC, nous allons évaluer la réponse du P90turbi selon la méthode de calcul : soit 'par pixel', soit 'globale'. L'évolution des valeurs du P90turbi avec OC5-HT par la méthode 'globale' est très proche de celle observée avec la méthode 'par pixel' (figure 16). Les différences observées ne changent pas les interprétations possibles avec ces deux figures. Le nombre de pixels utilisés change cependant fondamentalement et augmente d'un facteur dix (tableau 8).

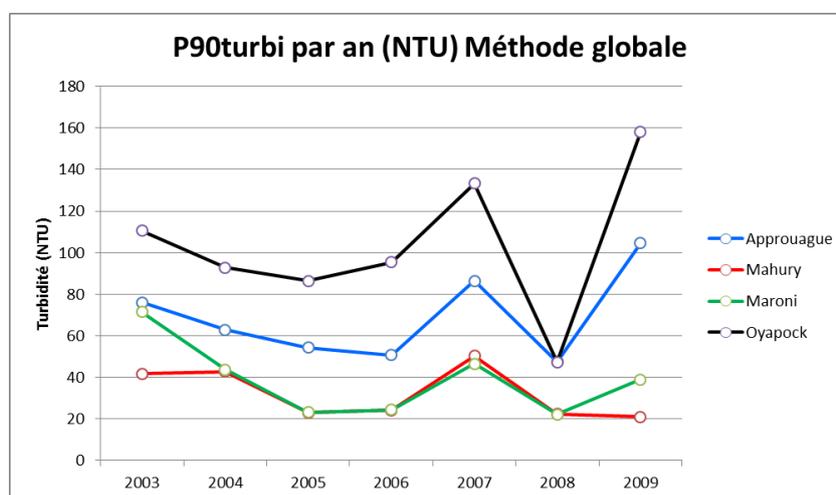


**Figure 16 : MERIS 300 m – P90turbi annuels obtenus par la méthode 'globale' sur les 4 MET retenus entre 2003 et 2009 avec MERIS 300 m et OC5-HT**

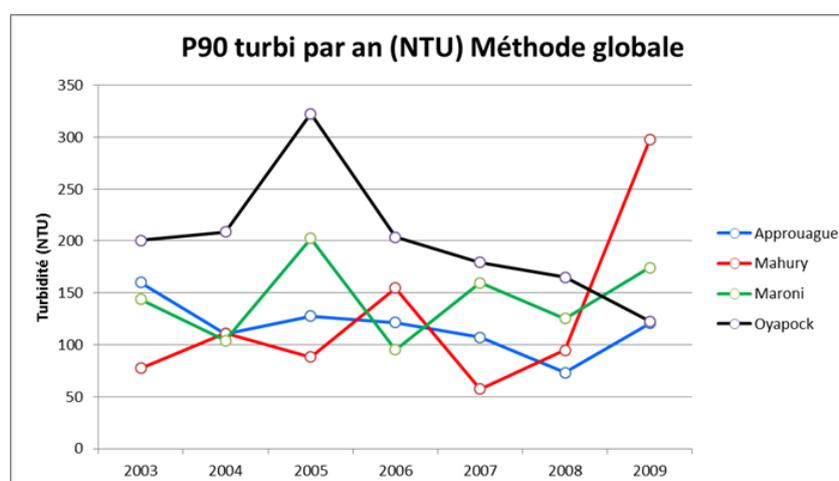
**Tableau 8 : Bilan des pixels disponibles pour le calcul du P90turbi dans les 4 MET avec le couple MERIS 300m-OC5-HT entre 2003 et 2009 avec la méthode 'globale'**

	Approuague	Mahury	Maroni	Oyapock
2003	11433	514	3704	17582
2004	12367	762	5081	19085
2005	14373	523	3669	18528
2006	9475	442	3448	13325
2007	7655	258	1755	7836
2008	13321	588	3740	18643
2009	6593	289	1928	9230

Comme pour l'étude de la MEC, la distribution, tendance et valeurs des P90turbi obtenues avec l'algorithme de Han ont été très proches de celle issues d'OC5-HT (figure 17) ; mais différentes de celles calculées avec l'algorithme OC5 (figure 18).



**Figure 17 : MERIS 300m – P90turbi moyenne annuelle des eaux des 4 MET étudiés (2003-2009) calculé avec la méthode 'globale' et l'algorithme de Han et al. (2016)**



**Figure 18 : MERIS 300m – P90turbi moyenne annuelle des eaux des 4 MET étudiés (2003-2009) calculé avec la méthode 'globale' et l'algorithme OC5**

Les P90turbi calculés avec OC5 et la méthode 'globale' ont présentées des valeurs supérieures à celles d'OC5-HT et Han et al. 2016. Un plus faible nombre de pixels disponibles est constaté également (tableau 9).

Dans la figure 19 sont présentés, a) les P90turbi obtenus avec les analyses *in-situ* disponibles sur la période 2013-2015, avec et sans les valeurs des points « Béhague » et « Les Hattes », b) les P90turbi moyens obtenus avec la caméra MERIS 300 m entre 2003 et 2009 selon l'algorithme OC5, c) l'algorithme de Han et al. (2016) et d) l'algorithme OC5-HT. Tous les P90turbi issus des images satellite ont été calculés avec la méthode 'globale'.

**Tableau 9 : Bilan des pixels disponibles pour le calcul du P90turbi dans les 4 MET avec MERIS 300 m et les algorithmes OC5, Han et al. (2016) et OC5**

<b>OC5</b>				
	Approuague	Mahury	Maroni	Oyapock
<b>2003</b>	4633	209	1255	3137
<b>2004</b>	6440	368	2558	5689
<b>2005</b>	7010	300	1890	3850
<b>2006</b>	4508	239	2025	3683
<b>2007</b>	3956	171	788	2447
<b>2008</b>	7809	344	2260	10314
<b>2009</b>	2774	163	803	2961

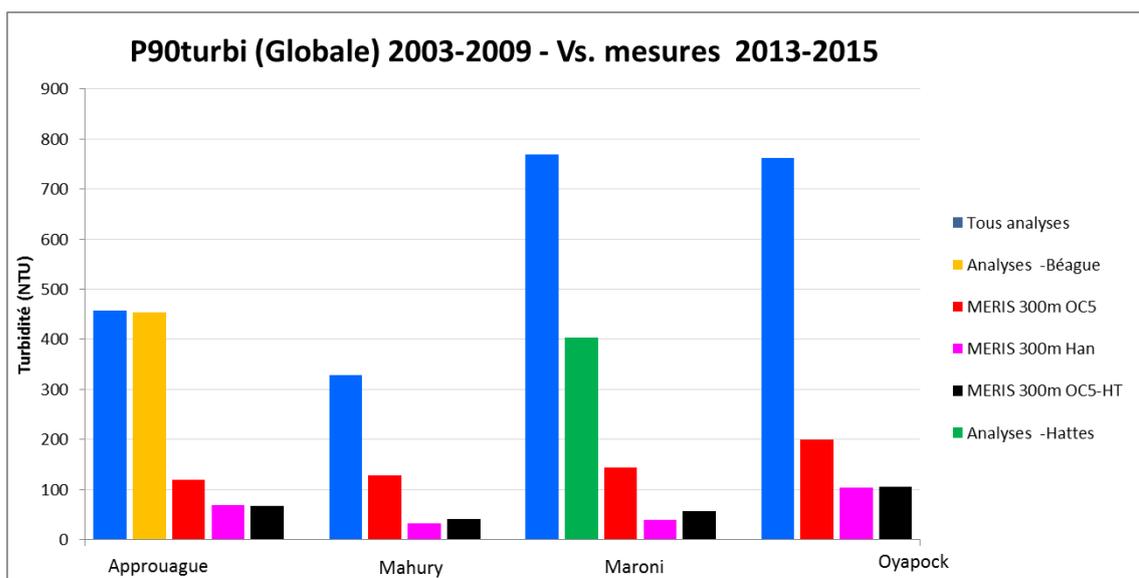
<b>Han et al (2016)</b>				
	Approuague	Mahury	Maroni	Oyapock
<b>2003</b>	22617	1201	8728	35972
<b>2004</b>	24717	1796	11592	38749
<b>2005</b>	26219	1414	10222	37139
<b>2006</b>	19574	1297	9400	28726
<b>2007</b>	12963	597	4987	14675
<b>2008</b>	25219	1293	9886	36114
<b>2009</b>	13530	622	5243	19160

<b>OC5-HT</b>				
	Approuague	Mahury	Maroni	Oyapock
<b>2003</b>	11433	514	3704	17582
<b>2004</b>	12367	762	5081	19085
<b>2005</b>	14373	523	3669	18528
<b>2006</b>	9475	442	3448	13325
<b>2007</b>	7655	258	1755	7836
<b>2008</b>	13321	588	3740	18643
<b>2009</b>	6593	289	1928	9230

Dans les eaux turbides des estuaires, les valeurs des P90turbi issus des mesures *in-situ* sont très supérieures à celles obtenues par imagerie satellite. Les plus faibles P90turbi sont celles obtenues avec les algorithmes de Han et OC5-HT. Avec OC5 on approche davantage des valeurs calculées avec les données *in-situ*, mais toujours très en dessous. Mais ce n'est pas parce que les P90turbi sont calculés avec des données *in-situ*, qu'ils représentent la « vérité » de l'état de la masse d'eau. Ces valeurs *in-situ* souffrent de quelques inconvénients :

- a) elles sont très restreintes dans l'espace et dans le temps, car le nombre d'échantillons est faible,
- b) elles sont calculées à partir de quelques décilitres d'eau, puis cette valeur est extrapolée sur toute la masse d'eau, qui s'étend sur plusieurs milliers de kilomètres carrés,
- c) nous ne sommes pas certains que le gradient vertical n'ait pas influencé la représentativité de la turbidité dans la masse d'eau. Il faut absolument vérifier ce point car le satellite n'intègre que les premiers centimètres d'eau.

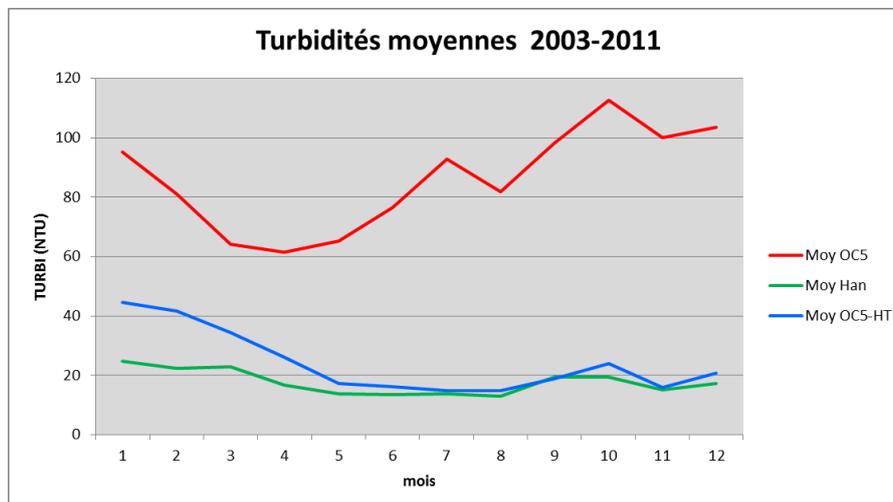


**Figure 19 : P90turbi sur les 4 MET obtenus avec les données *in-situ*, et les MERIS 300 m selon les algorithmes OC5, Han et al. (2016) et OC5-HT. Pour les P90turbi des analyses de l'Approuague, sont présentés les résultats avec et sans le point Béhague et pour l'estuaire du Maroni, avec et sans le point Les Hattes**

## DISCUSSION-CONCLUSION

Quand on aborde la validation des données satellite, le problème qui se pose, est celui de comment valider ces données avec celles issues du terrain, qui ne sont pas dans la même échelle spatio-temporelle. Un indice de leur représentativité peut être estimé sur leur capacité à reproduire un cycle saisonnier, déjà connu ou évident. En Guyane, lors de la saison des pluies (novembre à juin), le régime de vents s'intensifie, les pluies font monter le niveau des rivières et les eaux côtières deviennent plus turbides et agitées. En saison sèche la réflexion du courant du Brésil se met en place, éloignant les eaux côtières vers le large, les vents sont plus calmes, avec de rares pluies, ce qui favorise des eaux plus claires près des côtes. Cette saisonnalité n'était pas mise en évidence avec l'algorithme OC5 (Lampert 2015) (figure 20).

Nous observons même le contraire. Avec les algorithmes de Han et al. (2016) et OC5-HT, la courbe de saisonnalité de la turbidité est retrouvée, ce qui apporte un élément supplémentaire pour la validité de ces algorithmes.



**Figure 20 : Turbidités moyennes par mois sur la période 2003-2011 obtenues avec MERIS 300 m et les algorithmes OC5, Han et al. et OC5-HT**

Dans le présent travail, on pourrait nous critiquer à juste raison sur l'utilisation des séries de données satellite (2003-2009), qui ne correspondent pas à celles obtenues lors des campagnes DCE (2013-2015). Il est regrettable de ne pas pouvoir disposer de données *in-situ* plus anciennes. Cependant, en analysant les séries de données satellite, il est possible de dessiner les tendances et pointer les problèmes posés par l'utilisation des différents algorithmes, ainsi que les méthodes de calcul. Il est à souhaiter que ce travail puisse être réitéré avec une série de données homogènes et couvrant une période de gestion de 6 années pour conclure plus précisément.

La plus forte difficulté rencontrée pour travailler dans le domaine de la DCE avec les images satellite, est la proximité de la terre. Ce facteur est de première importance car les concentrations en Chla et turbidité présentent un fort gradient côte-large. Cette proximité sera gérée plus ou moins bien en fonction du capteur et de l'agence spatiale. La NASA a des très bons produits dès que l'on s'éloigne de la côte, mais leurs masques « terre » sont trop restrictifs en comparaison avec ceux de l'agence européenne ESA. De même, la méthode 'par pixel' peut être à l'origine d'un faible taux d'utilisation de pixels très côtiers. Ceci est la conséquence des rapports des réflectances dans la zone très côtière, qui s'ils deviennent négatifs, suppriment le pixel dans OC5 ; puis la méthode 'par pixel' effectue un nouveau tri en réduisant encore le nombre de pixels. Ce phénomène disparaît en utilisant les algorithmes de Han et al. et OC5-HT, qui ont été optimisés pour les eaux très côtières.

L'utilisation de l'algorithme OC5-HT semble bien s'adapter aux eaux extrêmement turbides de la Guyane et se place très près des résultats obtenus avec l'algorithme de Han et al (2016). Ce dernier a fait ses preuves dans des chantiers aussi variés que la Chine, Vietnam, le nord du

Canada et la Guyane française. L'utilisation d'OC5-HT présente alors un ensemble cohérent de produits : pour la chlorophylle, pour les MES et la turbidité, sur des eaux du Cas 1 et du Cas 2. De plus nombreuses données devront être acquises pour pouvoir valider cet algorithme qui *a priori* semble le mieux placé dans sa catégorie.

---

---

## BIBLIOGRAPHIE

- Gohin, F. 2011. « Annual cycles of chlorophyll-a, non-algal suspended particulate matter, and turbidity observed from space and in-situ in coastal waters ». *Ocean Sci.* 7 (5): 705-32. doi:10.5194/os-7-705-2011.
- Gohin F., Druon J. N., et Lampert L. 2002. « A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters ». *International Journal of Remote Sensing* 23 (8): 1639-61.
- Gohin, Francis, Sophie Loyer, Michel Lunven, Claire Labry, Jean-Marie Froidefond, Daniel Delmas, Martin Huret, et Alain Herbland. 2005. « Satellite-Derived Parameters for Biological Modelling in Coastal Waters: Illustration over the Eastern Continental Shelf of the Bay of Biscay ». *Remote Sensing of Environment* 95 (1): 29-46. doi:10.1016/j.rse.2004.11.007.
- Gohin, Francis, Bertrand Saulquin, et Philippe Bryere. 2010. « Atlas de la Température, de la concentration en Chlorophylle et de la Turbidité de surface du plateau continental français et de ses abords de l'Ouest européen », décembre. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00057/16840/14306.pdf>.
- 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 contaxe DCE ». Scientifique et technique RST.Dyneco 2015-02. Brest, France: IFREMER.
- Lampert, Luis, Bryère, et Francis Gohin. 2015. « Etude de la variation des paramètres température, biomasse et turbidité sur plus de 10 années dans les eaux marines guyanaises par imagerie satellite ». Expertise Onema. Brest, France: IFREMER.
-

# ANNEXE

## Changements des paramètres passant de OC5 à OC5-HT

```

; Changements effectués dans canal_mes_sat pour estimer les fortes
turbidités
;
=====

; Fonction modifiée : canal_mes_sat devient canal_mes_sat_test
; =====
; Object : Application of the Ifremer algorithm for SPM (or MES Matieres En
Suspension in french)
;     MODIS,SeaWiFS, MERIS and VIIRS
;     version of june 2016
; =====

; For the green channel
; -----
'MODIS'
const=0.02 ;Avant le 2016 06 14: 0.03
result0=0.0 ;Avant le 2016 06 14: 0.06

'MERIS'
const=0.02 ; Avant le 20160525 : 0.03
result0=0.05 ; Avant le 20160525 : 0.06
      END

; Calcul of SPM from canal l_green
; -----
bbsspm=0.019*0.25 ; Avant le 20160525 0.39 ;;Bowers et Binding 2006
estuarine ...

; Calcul of SPM from canal Canal nIR
; -----
bbsspm=0.02*0.25 ;Avant le 20160525 0.02*0.29
'MODIS'
const=0.030 ;Avant le 20160525 0.032
result0=0.020 ;Avant le 20160525 0.044 .

'MERIS'
const=0.030 ;Avant le 20160525 0.032
result0=0.020 ;Avant le 20160525 0.044

; Changements effectués dans canal_oc_meris pour conserver le max de pixels
;
=====

Mise en commentaire des lignes

```

```
; Test supplementaire Supprimé le 201605225 par PB et FG
; -----
;;;io_nua=WHERE((R_oc4 LT 0.2 AND val559 LT .2) or ind559 lt 0 or indil
lt 0, nbnuasup)
;;;IF (nbnuasup GT 0) THEN BEGIN
;;; chl(iok(io_nua))=-99 ;bertrand 012009
;;;ENDIF
```

---



