

Etude de la dynamique hydro-sédimentaire de fleuves tropicaux par des mesures *in situ* et de télédétection :  
le cas du Maroni, de l'Oyapock et de l'Orénoque

Marjorie Gallay

Suivi des Milieux Aquatiques par Télédétection

1. Introduction
2. Objectif et questions de recherche
3. Questions
4. Discussions des méthodes et principaux résultats

# Introduction

- L'eau des fleuves : ce sont les matières qui en définissent la couleur.
- Elles peuvent être reliées à une longueur d'onde pour être estimées depuis l'espace.



Figure. Classification des eaux (Sioli, 1964).

Les concentrations sont influencées par les sols, la géologie, les précipitations et la végétation dans les bassins

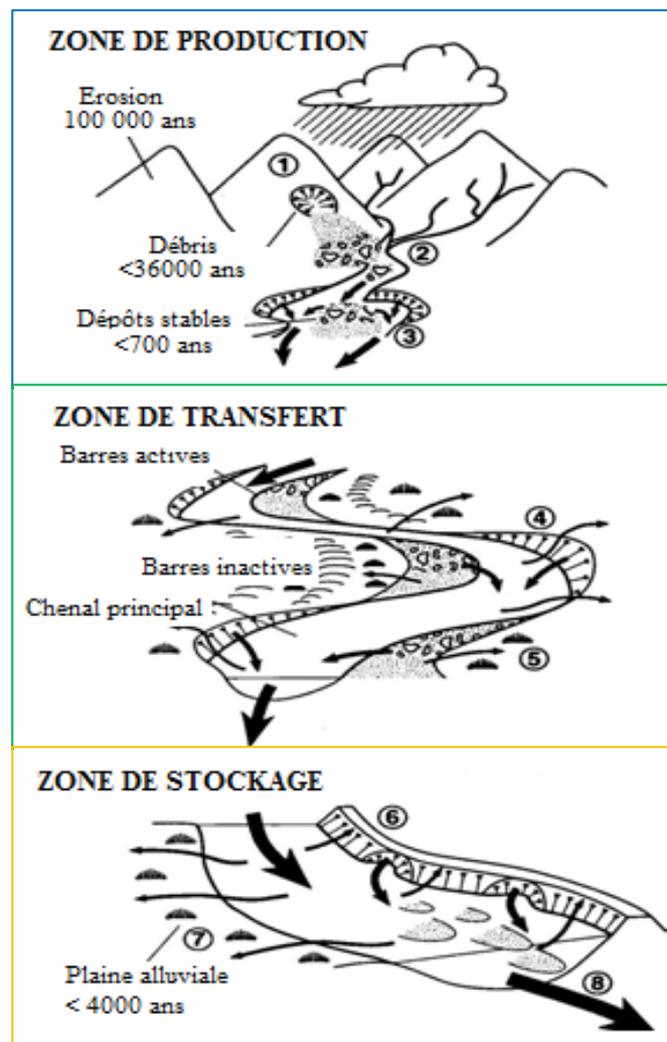


Figure. Schémas de l'hydrosystème fluvial (Brookes et Shields , 1996).

# Introduction

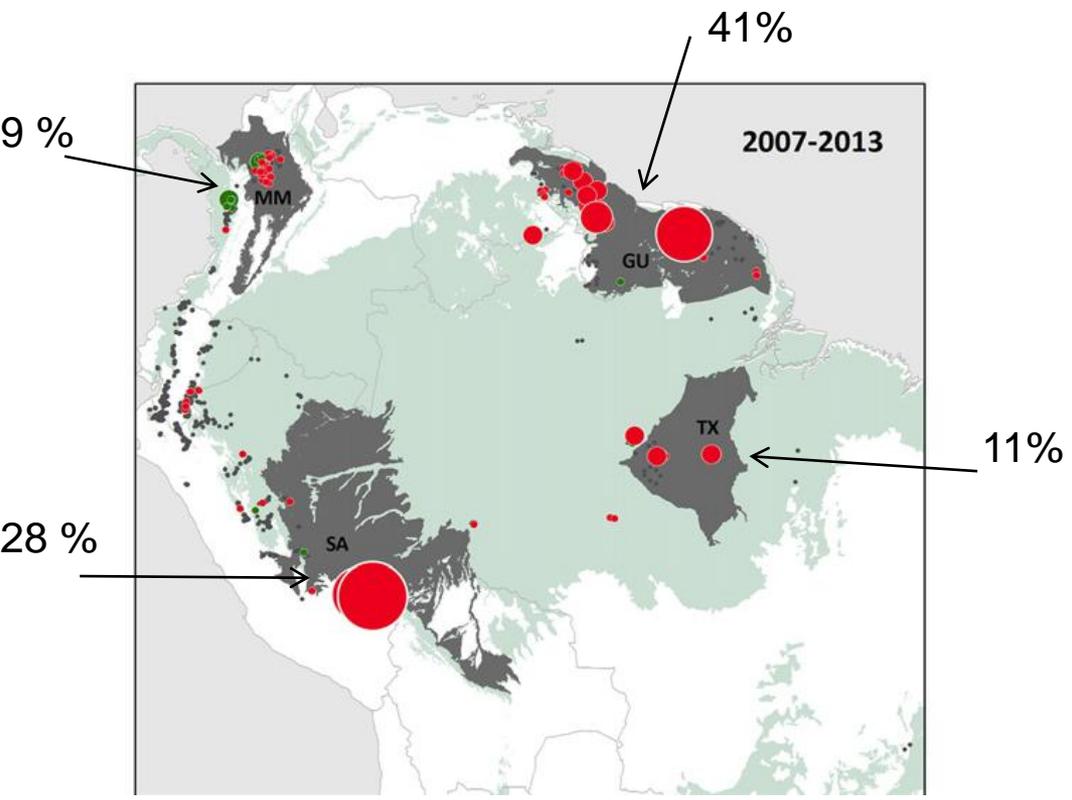
Le bouclier des Guyanes  
1500 000 km<sup>2</sup>  
S'étend de l'Amazonie à l'Orénoque

- Une source d'eau potable
- Un hotspot de biodiversité
- Une région riche en minerais ce qui en fait une région très convoitée



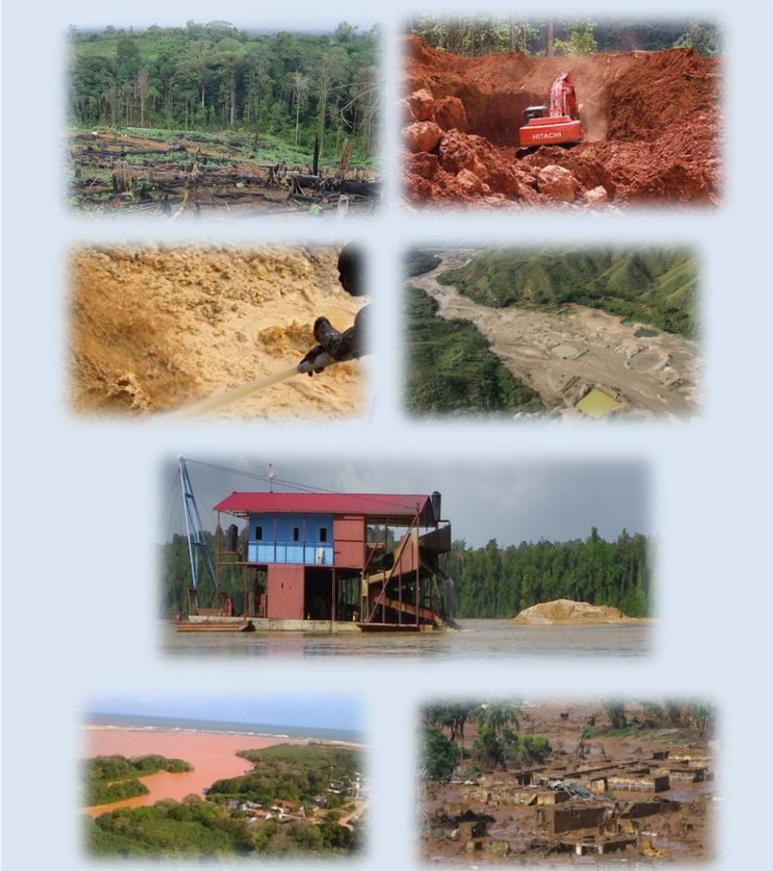
**Figure.** Mouvements de la ZCIT ou (ZIC) le long de l'équateur.  
Photo : terre de guyane.

- Parmi les activités en recrudescence : la déforestation pour l'orpaillage



**Figure.** Déforestation pour les mines (Alvarez-Berríos and Aide, 2015).

Hypothèse ➡ depuis 2000, ↗ de l'étendue des surfaces minières altère la qualité des eaux fluviales de ces régions



**Figure.** Exemples d'impacts des activités de déforestation et minières sur les sols et la ressource en eau.

---

CADRE SCIENTIFIQUE	SNO-HYBAM et projet ECOS-NORD
FINANCEMENT	CR, OEG, SHELL
COLLABORATIONS	Guyane : DEAL, OEG, PAG, LAMA, IRD, LEEISA, GET Venezuela : IMF/UCV, IVIC/COEA, CPDI, INAMEH, FONACIT
BANQUES DE DONNEES	ONF, Météo-France, SNO-HYBAM, OEG, PAG, Mora
ENJEUX	Gestion de l'environnement, suivi de la qualité de l'eau, gestion des hydrosystèmes, ...

---

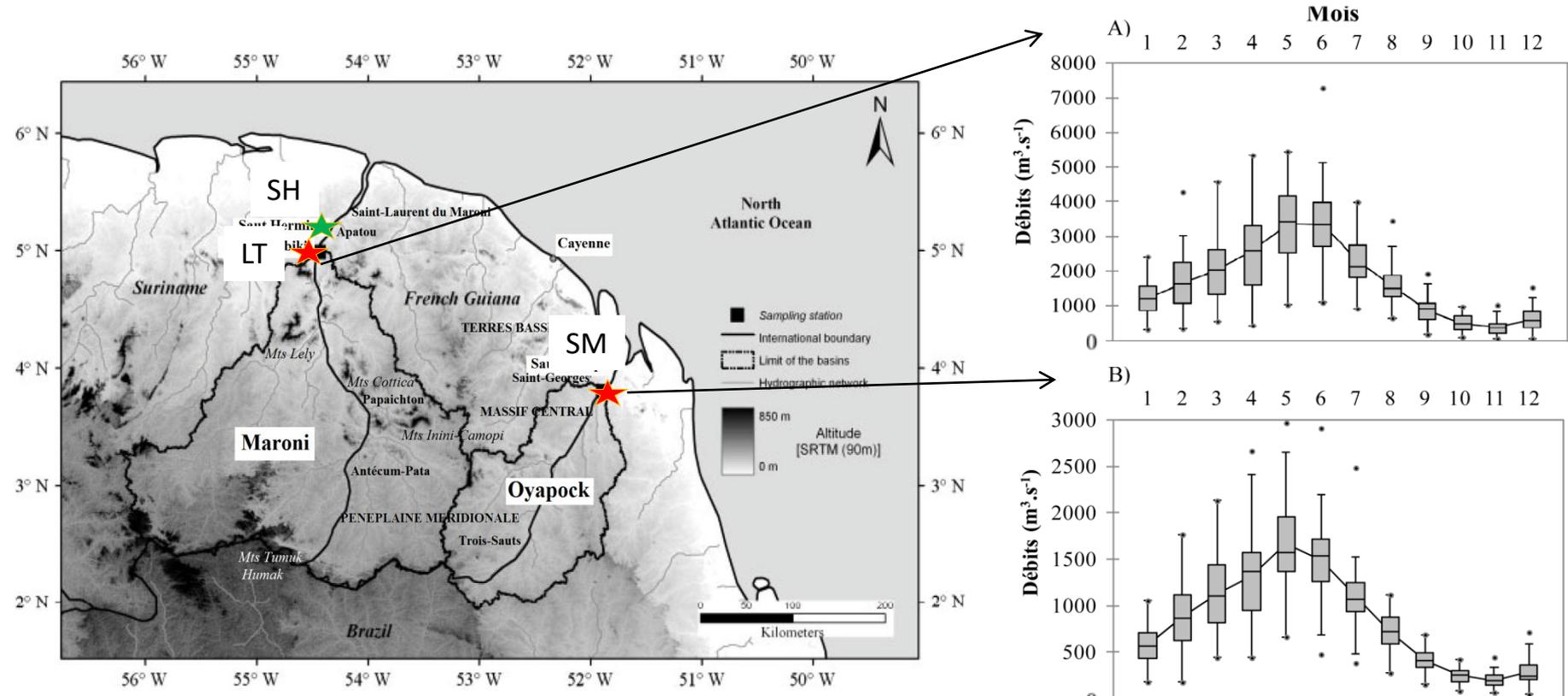


OBJECTIF : Suivre et quantifier les flux de matières à long terme de ces environnements amazoniens, dans un contexte d'augmentation des pressions humaines et de changement climatique

1. Existe-t-il des conséquences des activités de déforestation et d'orpaillage sur les fractions et les flux des matières organiques et minérales, dissoutes et particulaires des fleuves guyanais ?
2. Peut-on suivre et adapter l'algorithme de détection des Matières en Suspension (MES) développé dans les eaux de surface de l'Amazonie, via les images satellites des capteurs MODIS, au Maroni, à l'Oyapock et à l'Orénoque ?
3. Quelles sont les variations spatiales et temporelles ainsi que les tendances et les points de ruptures des concentrations et des flux de MES, en fonction des précipitations, de l'hydrologie et en lien avec les activités anthropiques ?

# Les sites d'études

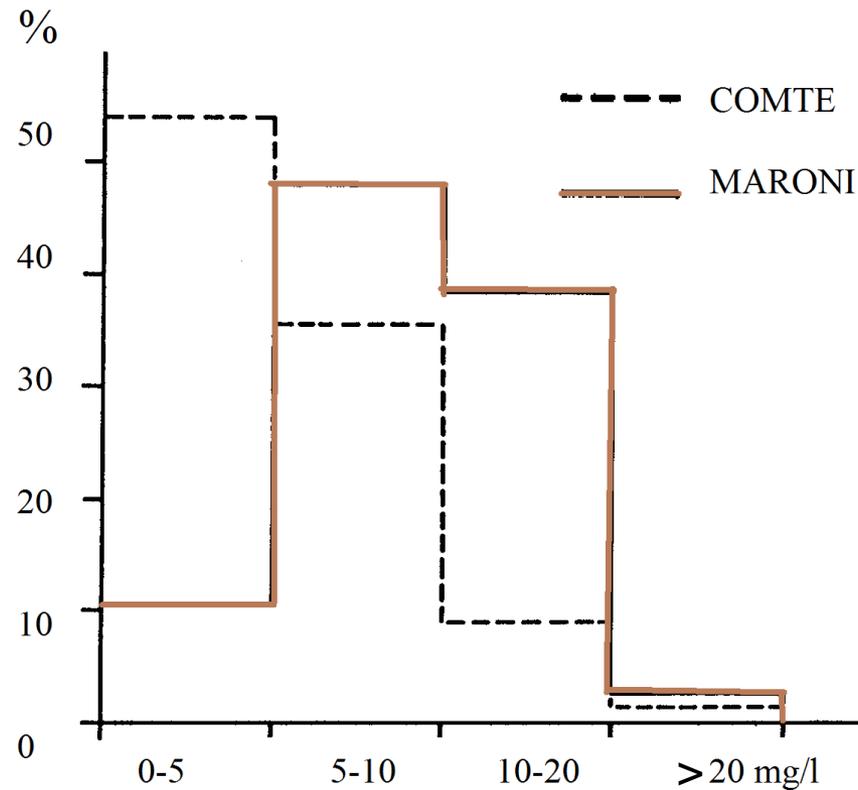
- BV Maroni : 57% au Surinam / Station LT : Langa Tabiki (91%), Station SH (en aval)
- BV Oyapock : 51% au Brésil / Station SM : Saut Maripa (74%)



**Figure.** Localisation des bassins versants du Maroni et de l'Oyapock. (Adaptée de Sondag *et al.*, 2010).

**Figure.** Débits interannuels mensuels à LT et SM.

- Charges sédimentaires dans les fleuves Guyanais en 1984 -1985



**Figure.** Fréquences de concentration de MES en 1984-1985 (Jouanneau et Pujos, 1988).

> 20 mg.l<sup>-1</sup> = souvent liées à l'anthropisation (Vigouroux *et al.*, 2005)

# Les sites d'études

- BV Orénoque : 30% en Colombie
- Station principale Ciudad Bolivar : CB (84%)

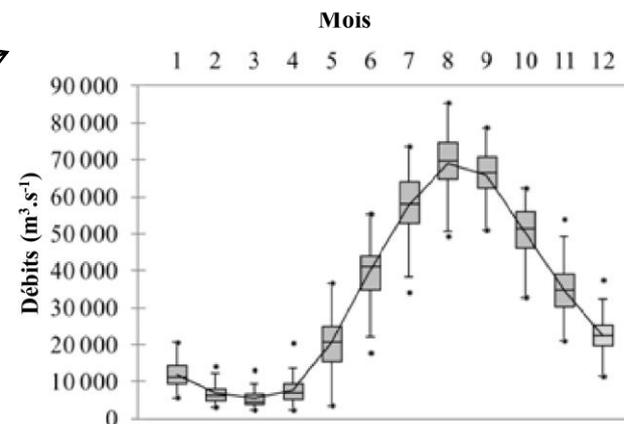
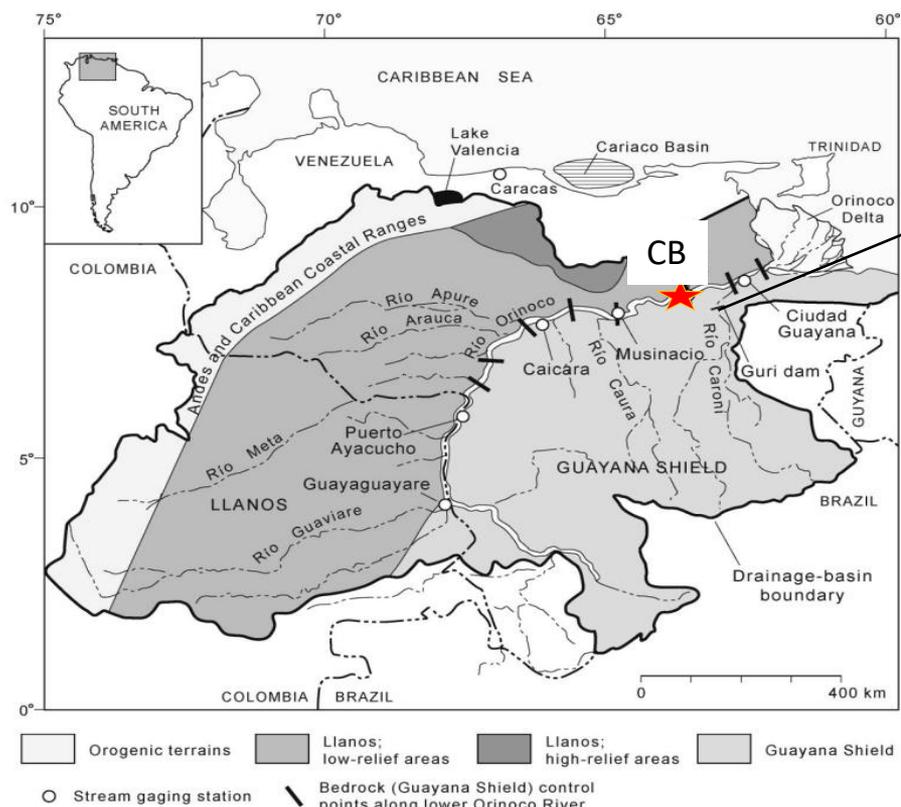


Figure. Débits interannuels à CB.

Figure. Physiographie du bassin versant de l'Orénoque (Warne *et al.*, 2002).

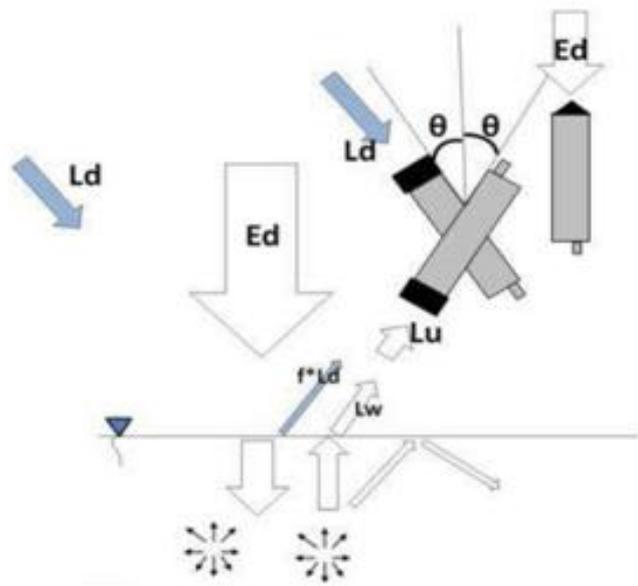
2. Peut-on suivre et adapter l'algorithme de détection de Matières en Suspension (MES) développé dans les eaux de surface de l'Amazonie, via les images satellites des capteurs MODIS, au Maroni, à l'Oyapock et à l'Orénoque ?

# Méthodes

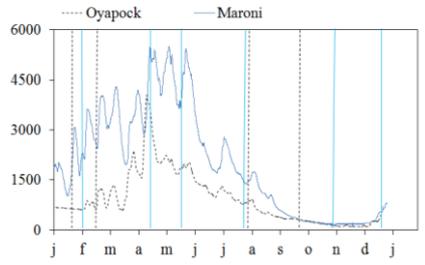
- Réflectance *in-situ* (intérêt):



54j Maroni,  
27j Oyapock

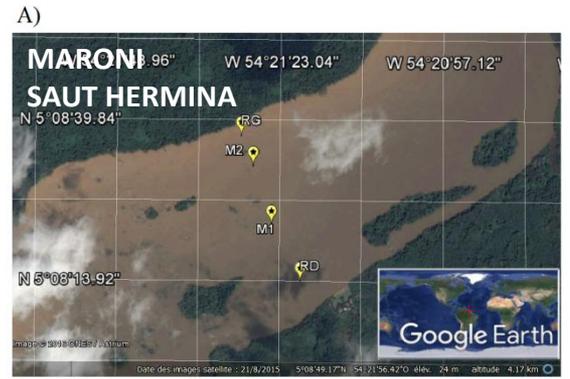


**Figure.** Mesure de la réflectance (R) à la surface de l'eau. Irradiance (Ed), radiance du ciel (Ld) et radiance de l'eau (Lu).  $\theta$  = angle de 35-40°.



Prélèvement de MES en simultanément avec la mesure de réflectance

**OBJECTIF:**  
Relations MES *in-situ* / Réflectance *in-situ*



**Figure.** Radiomètres RAMSES.

- Réflectance *in-situ* (20j de terrain et 4 mois au Venezuela)

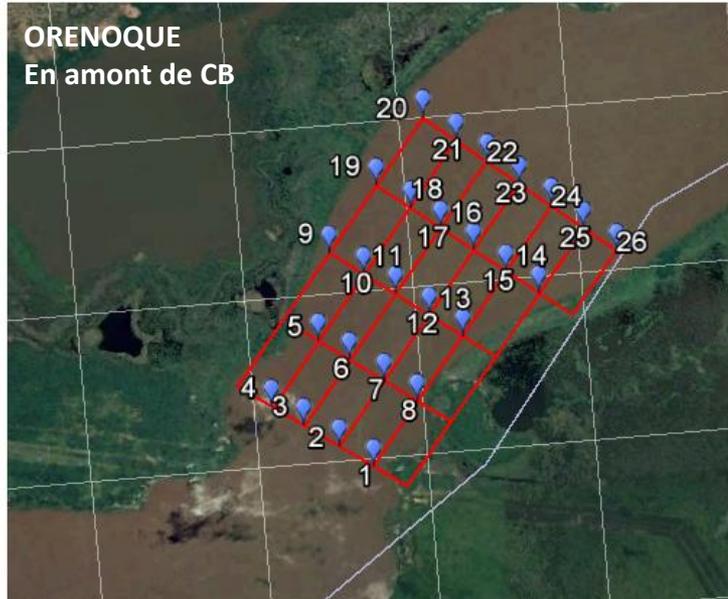


Figure. Grille MODIS à Ciudad Bolivar.



Prélèvement de MES en simultané avec la mesure de réflectance

OBJECTIF:

Relations MES *in-situ* / Réflectance *in-situ*

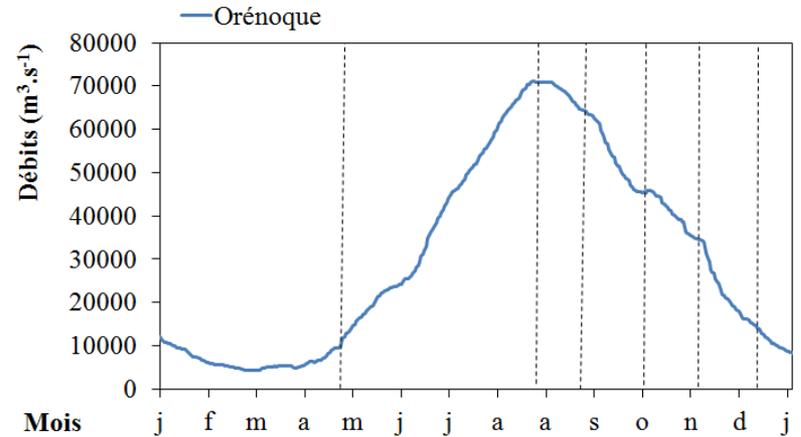


Figure. Campagnes de terrain sur l'Orénoque.



Figure. Mesure de la réflectance avec un Spectroradiomètre FieldSpec réalisées alternativement.

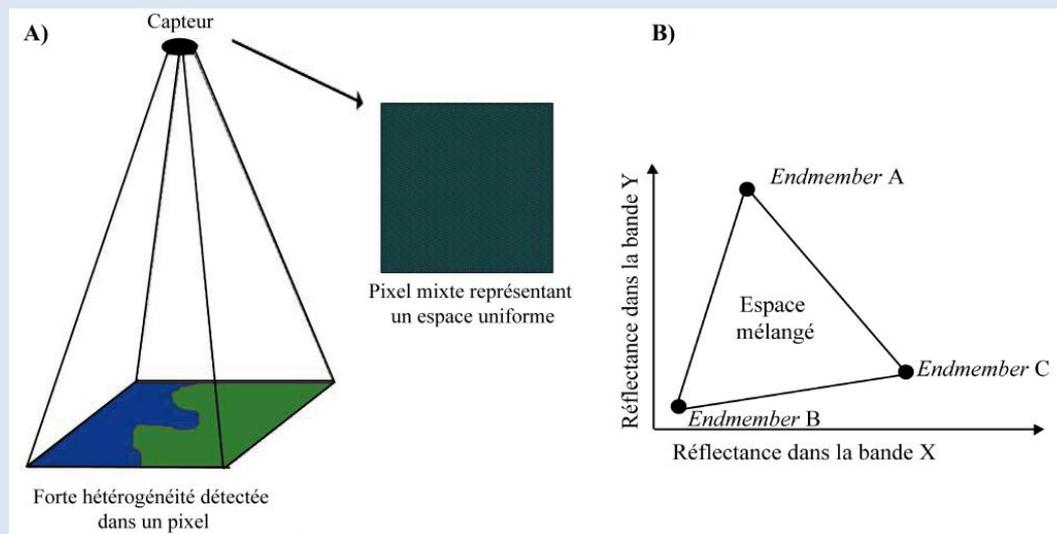
- Réflectance des images des capteurs  
**MODIS** (Moderate resolution imaging spectroradiometer)

## OBJECTIF:

Relations MES(HYBAM)/Réflectance MODIS  
Comparaison avec la relation *in-situ*

- Produits MODIS utilisés : Images MODIS MOD/MYD 09A et 09Q
- Intérêts : Terra disponible depuis 2000 et Aqua depuis 2002 ; algorithme robuste

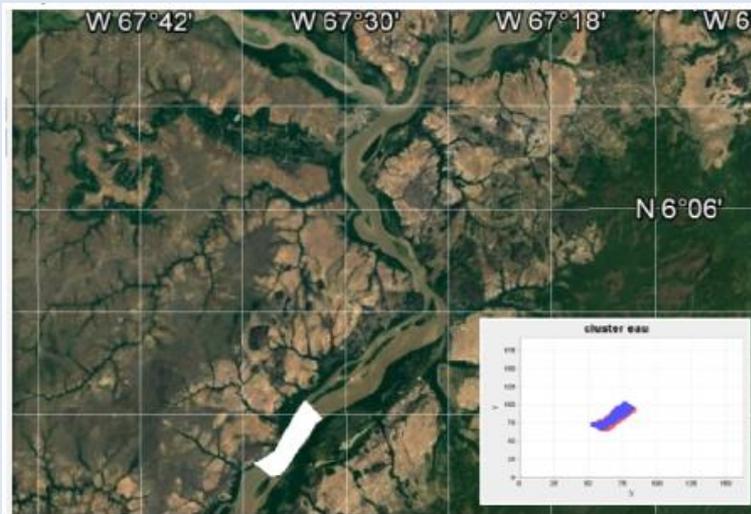
## Réflectance de l'eau des fleuves vue de l'espace :



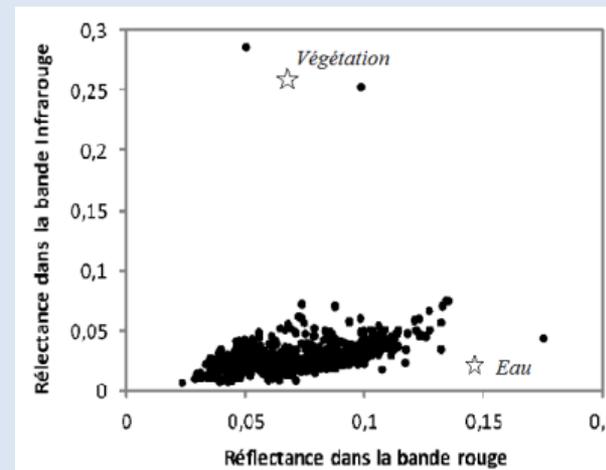
**Figure.** Représentation des limites et de la composition du pixel étudié.

- **Extraction de la réflectance MODIS** : algorithme *Modis River Reflectance Retrieval* ou MOD3R (Historique)
- **Principe** : Créer des « stations virtuelles » à partir de données de télédétection pour extraire la réflectance des pixels et mesurer les MES à partir des bandes Rouge (R) ou Infrarouge (IR) de MODIS (simple relation linéaire)
- **Méthode** : la méthode statistique des k-means génère des groupes de réflectance pour les dissocier jusqu'à avoir un groupe homogène de pixels d'eaux

Extraction du pixel d'eau avec MOD3R : →



Relation avec MES(Hybam)



**Figure.** Représentation des masques de sélection des pixels sur l'Orénoque en amont du Meta. Les diagrammes indiquent le ratio R/IR des pixels sélectionnés par le masque et les régions théoriques des *Endmembers* d'eau.

- Deux estimateurs d'erreurs ont été utilisés :
  - Le BIAIS : pour mesurer l'écart-moyen entre les relations MES/Réflectance MODIS avec MES/Réflectance *in-situ* (exprimé en %) :

$$BIAIS = \sum_1^n \frac{y_i - x_i}{y_i}$$

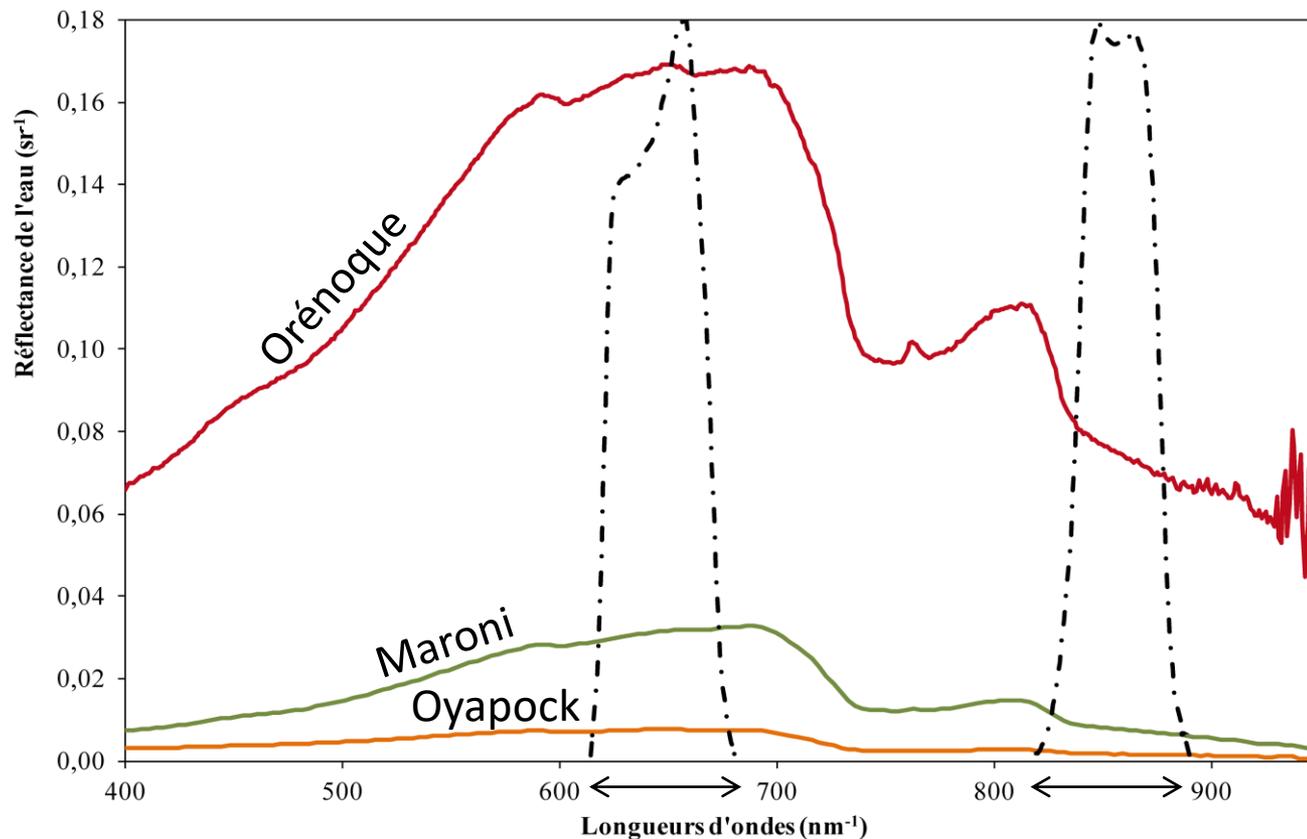
$y_i$  = valeur *in-situ*

$x_i$  = valeur estimée

- Le RMSE (erreur moyenne quadratique) : qui permet d'estimer la dispersion entre les concentrations *in-situ* et les concentrations MODIS (exprimé en %) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i \frac{y_i - x_i^2}{y_i}}$$

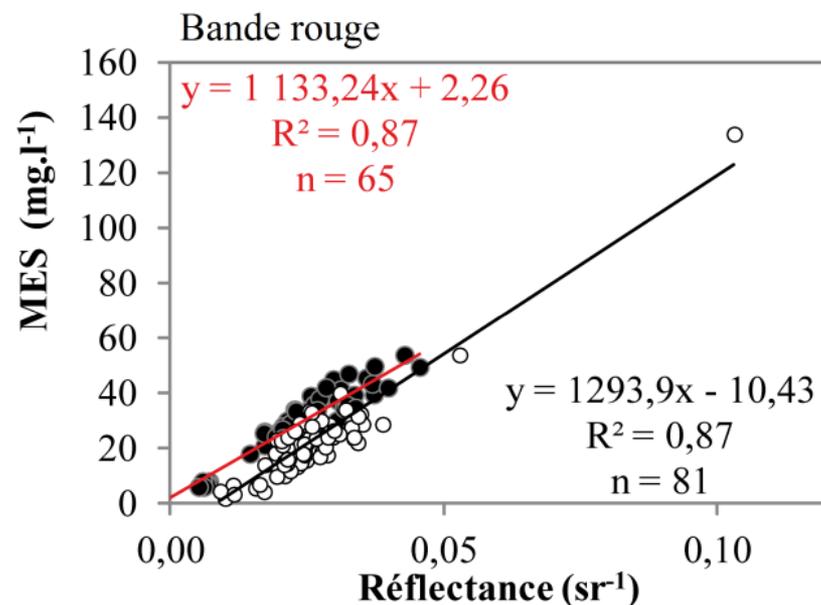
- Courbes spectrales des eaux de l'Orénoque (CB), du Maroni à (SH) et de l'Oyapock à (SM)



**Figure.** Réflectance *in-situ* des eaux à CB (Orénoque), SH (Maroni), SM (Oyapock) et localisation des bandes MODIS dans le rouge (620-670 nm) et le proche infrarouge (841-876 nm).

Oyapock : faible réflectance + largeur du fleuve + nuages = images MODIS pas adaptées

- Comparaison des relations MES-Réflectance *in-situ* et MES-réflectance MODIS en Guyane **le long du Maroni (données journalières)**

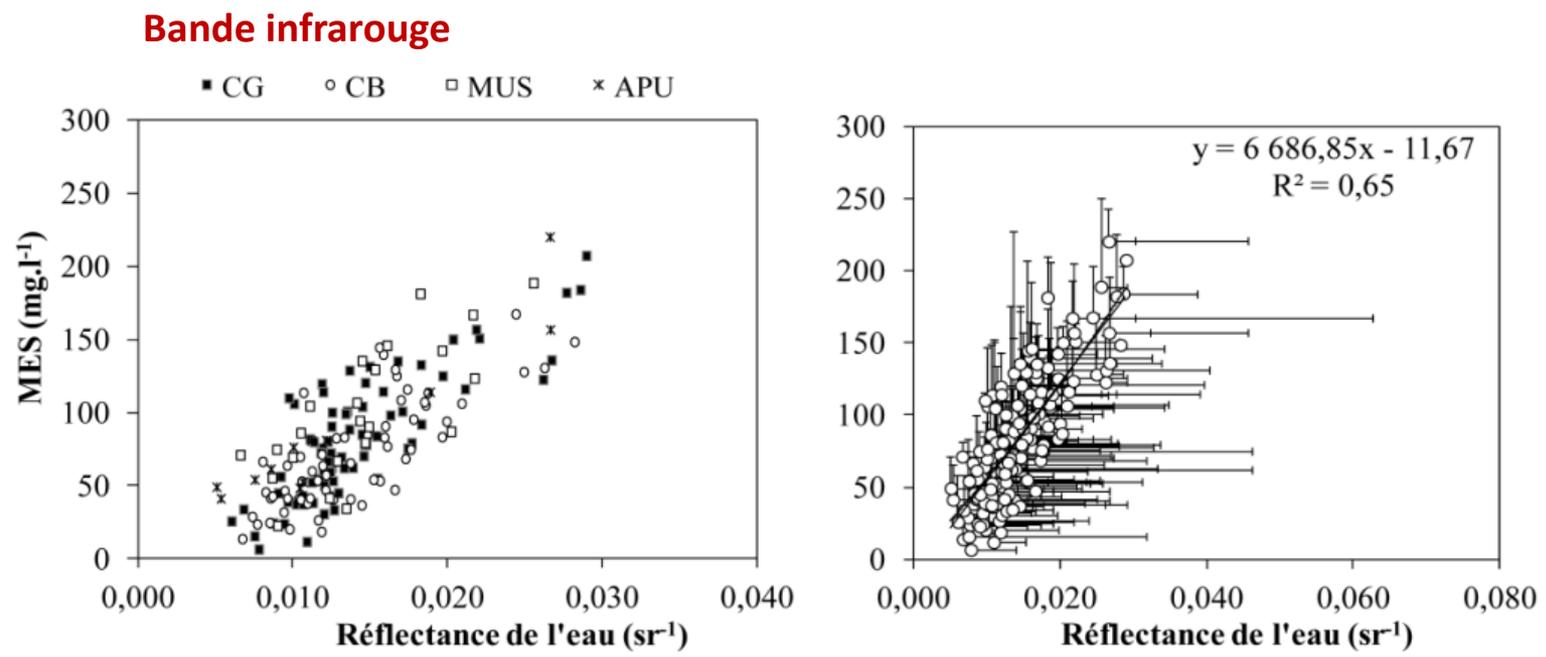


**Figure.** Corrélations **MES-Réflectance *in situ* (points noirs)** et **MES-Réflectance MODIS (points blancs)** sur le Maroni : A) dans la bande rouge et, B) dans la bande infrarouge.

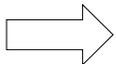
⇒ BIAIS : 8%

⇒ RMSE : 25 % (7 mg/L : 3-138 mg/L)

- Création d'une calibration MES-réflectance MODIS, avec **des valeurs de MES et de réflectance moyennées mensuellement** aux « stations virtuelles » et *in-situ* de l'Orénoque **CG, CB, MUS et APU** (Martinez *et al.*, 2009 et Mangiarotti *et al.*, 2013)



**Figure.** Corrélation **MES-Réflectance MODIS** dans la bande infrarouge et écarts moyens. Les MES de CG, CB et MUS sont issues du réseau HYBAM. Les valeurs de l'APU sont issues de Mora *et al.* (2014).



**RMSE : 32 % (21 mg/L : gamme de 3 à 240 mg/L)**

3. Quelles sont les variations spatiales et temporelles ainsi que les tendances et les points de ruptures des concentrations et des flux de MES, en fonction des précipitations, de l'hydrologie et en lien avec les activités anthropiques ?

**OBJECTIFS :** calculer, comparer les concentrations et les flux de MES (*in-situ* et estimés via MODIS) pour vérifier les tendances et les ruptures

- Calculer la valeur moyenne de MES dans la section pour corriger la valeur estimée en surface (via la réflectance MODIS ou *in-situ*)



SNO-HYBAM

SM (berge) ;  
SH - CB

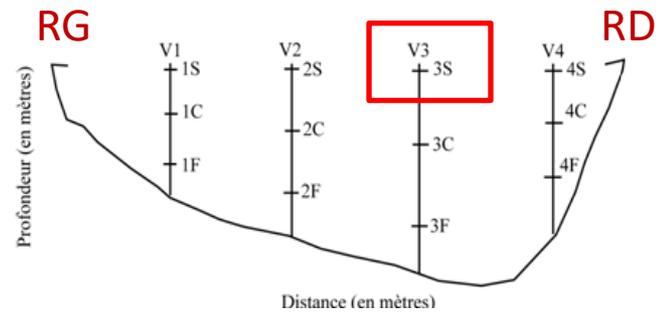


Figure. Prélèvement de l'eau.

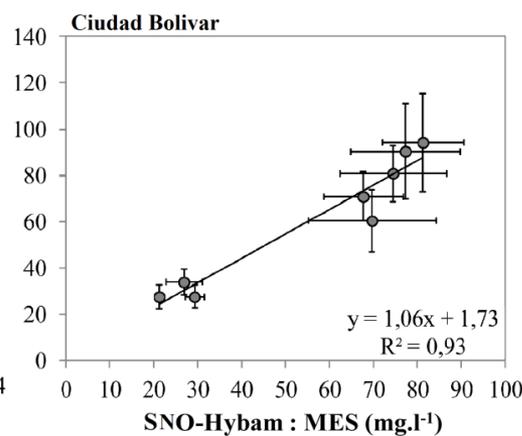
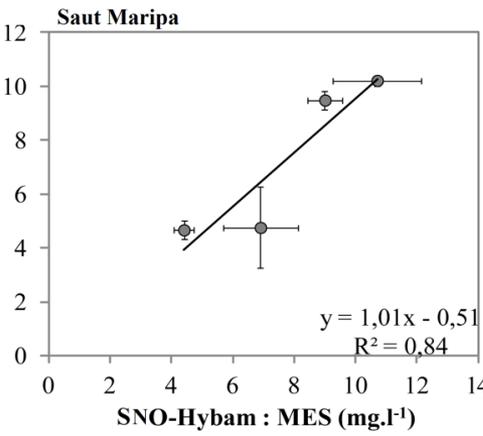
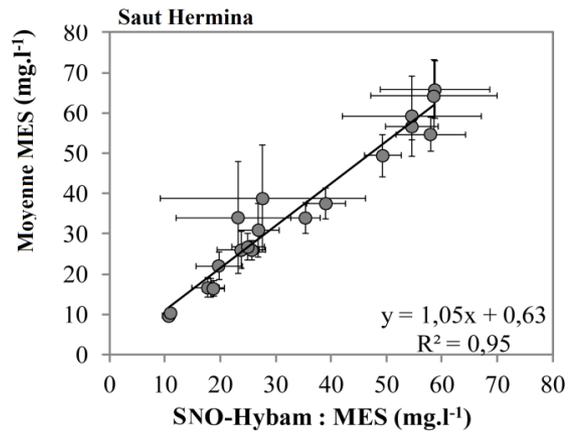


Figure. Répartition des MES dans la section de SH (Maroni), SM (Oyapock) et de CB (Orénoque).

- Calculer les flux annuels (en t.an<sup>-1</sup>) avec les MES corrigées : 
$$S_L = \left[ \sum_1^n \frac{(C_j * Q_j)}{Q_m} \right]$$

- Comparaison des fleuves entre eux via :
  - Erosion spécifique (SY) : flux de matières par unité de surface et par unité de temps
  - Ecoulement spécifique (R) : flux d'eau par unité de surface et par unité de temps
  - Tendances cumulées : ↘ ou ↗ = déséquilibre des flux
- Utilisation en Guyane des données produites par d'autres organismes et études :

Données	Période	Source
Surfaces agricoles	2005, 2008, 2011	ONF 2011, 2013 ; PAG (2012)
Surfaces urbaines	2005, 2008, 2011	ONF 2011, 2013 ; PAG (2012)
Surfaces minières	2000, 2008, 2014	Debarros & Joubert, 2010; Rahm <i>et al.</i> , 2015
Précipitations	Depuis 1978	Météo-France
Débits	Depuis 1953 (SM) Depuis 1954 (LT) Depuis 2000 (CB)	Stations ORSTOM puis DDE, DIREN, DEAL Courbe de tarage appliquée depuis 2001 INAMEH & UCV
Turbidité	2011-2014 (MPS) 2007-2013 (CM)	PAG

- Tests statistiques réalisés et couramment utilisés :
  - de Mann-Kendall (MKT) : **tendances**
  - de Pettitt's : **cassures** (changement brutal)
  - Matrice de corrélations de Spearman : **relations** entre les paramètres

- Au Venezuela à CB: 1 courbe de tarage

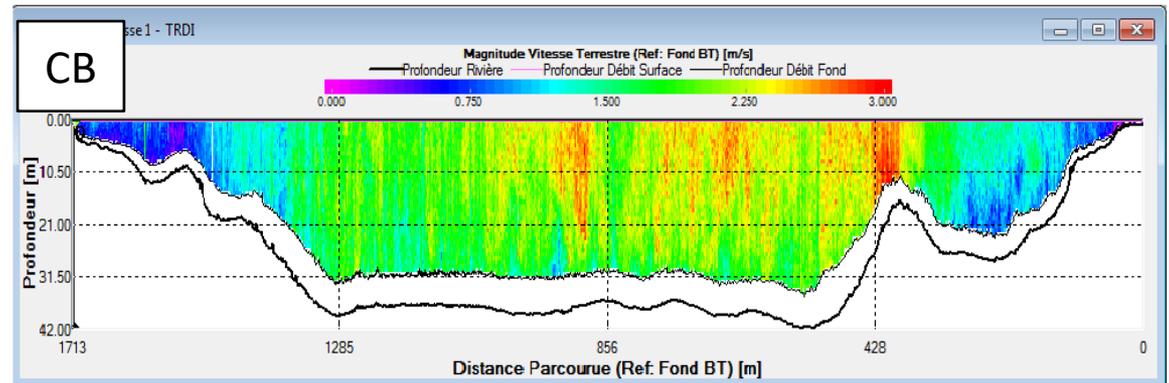


Figure. ADCP RiverRay 600 kHz -Teledyne RDI à effet doppler et jaugeage dans la section de CB.

- En Guyane à LT et SM : Hydraccess - courbes de tarages (dernière appliquée depuis 2001)

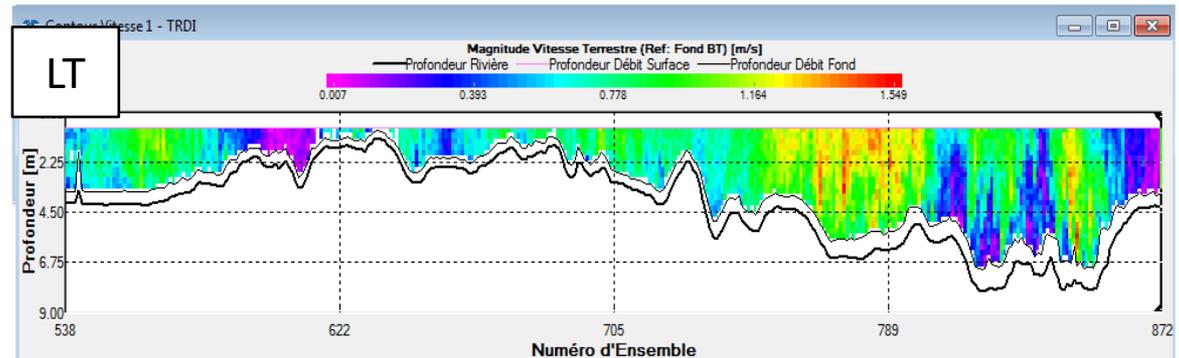


Figure. ADCP Rio Grande 1200 kHz de Teledyne RDI à effet doppler, Sonde ARGOS SC 40 AG, Jaugeage dans la section de LT.

- Bassin de l'Oyapock : charges, tendances et ruptures

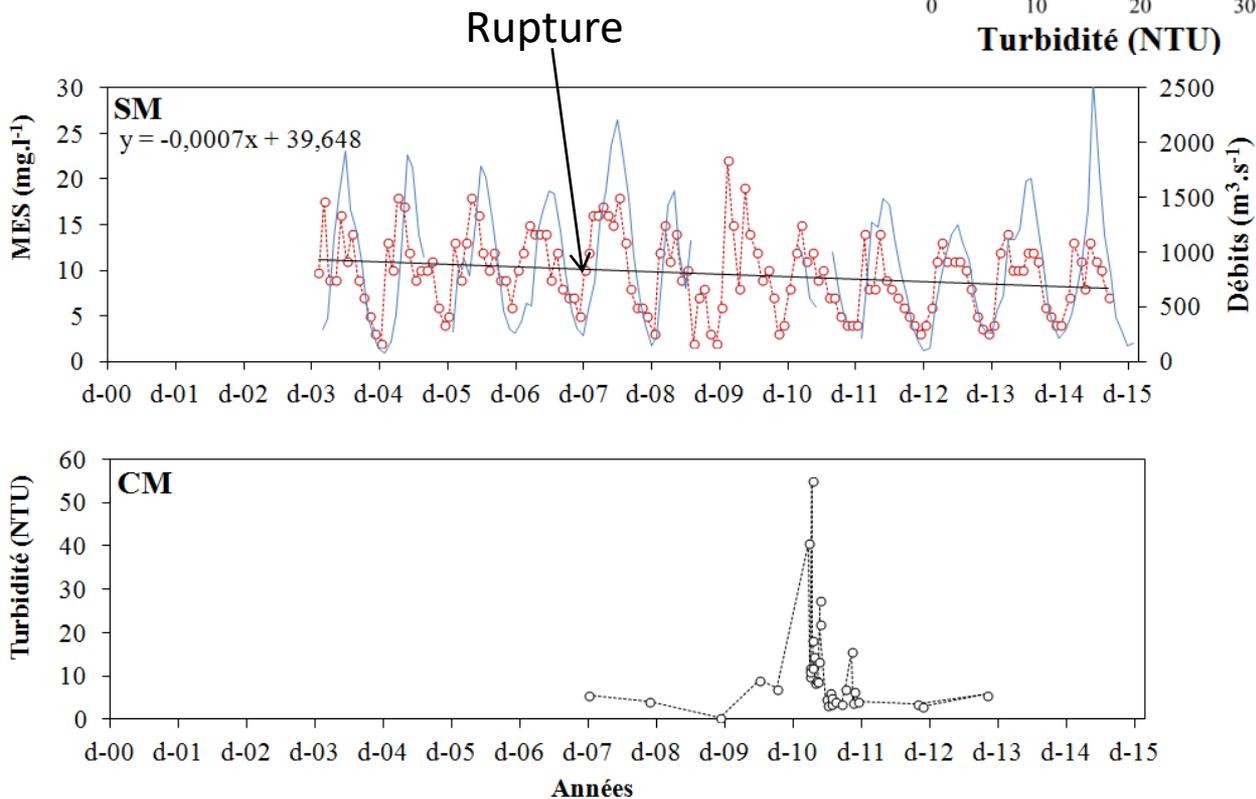
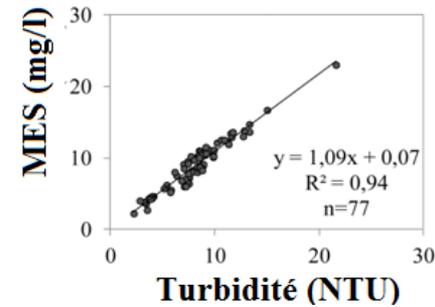
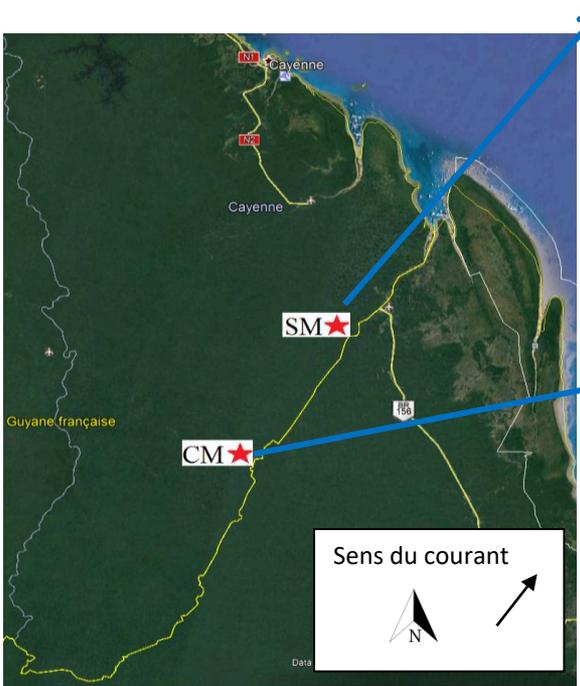


Figure. Comparaison des charges en **MES (in-situ)** à Saut Maripa (SM) et **de la turbidité** à Camopi (CM).

# Résultats

• Bassin du **Maroni** : charges, tendances et ruptures

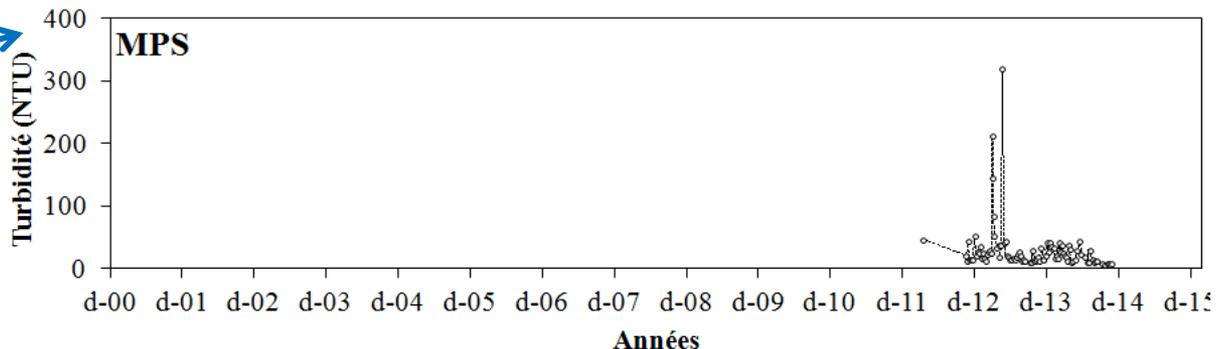
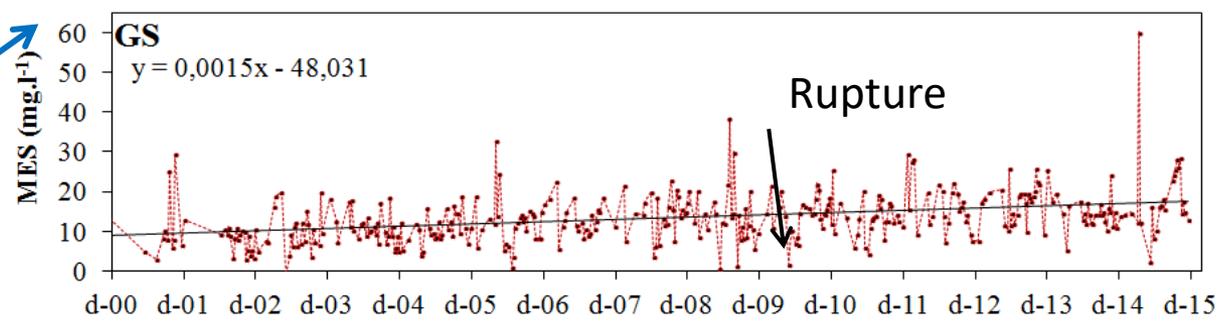
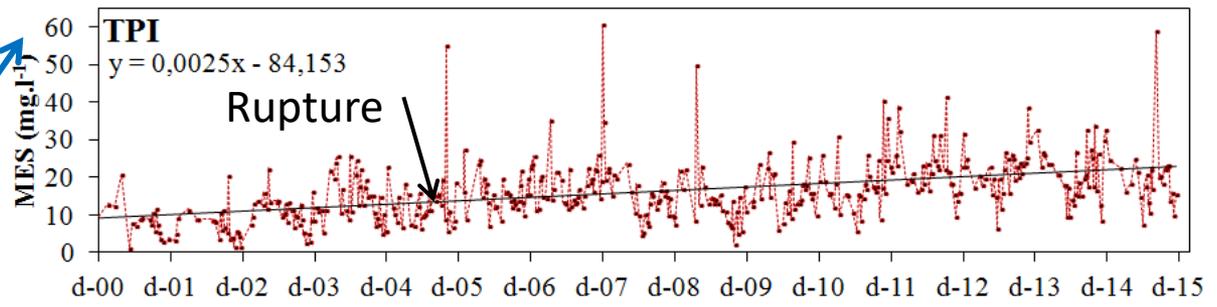
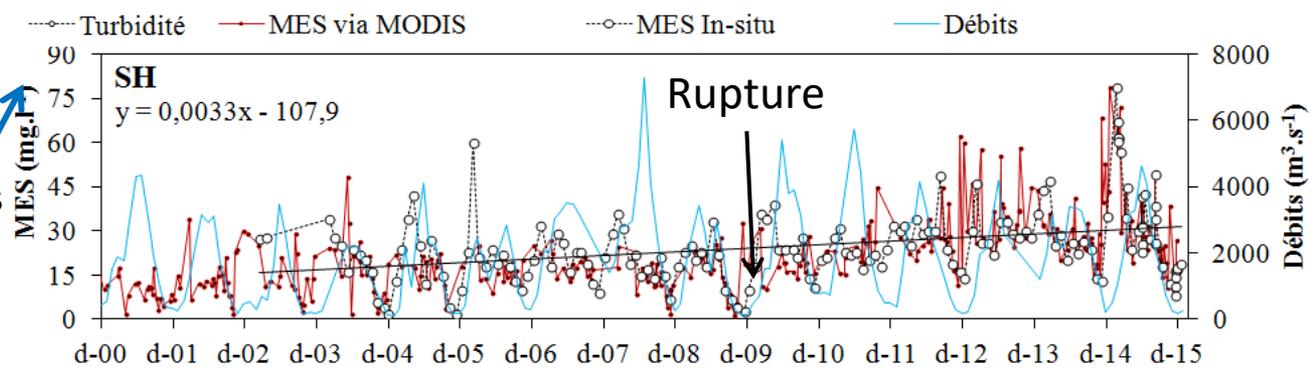
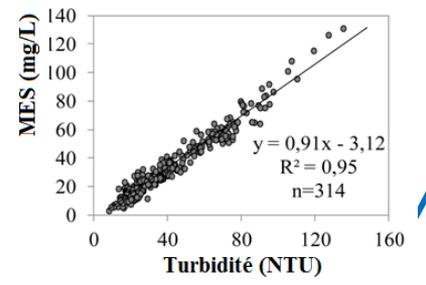
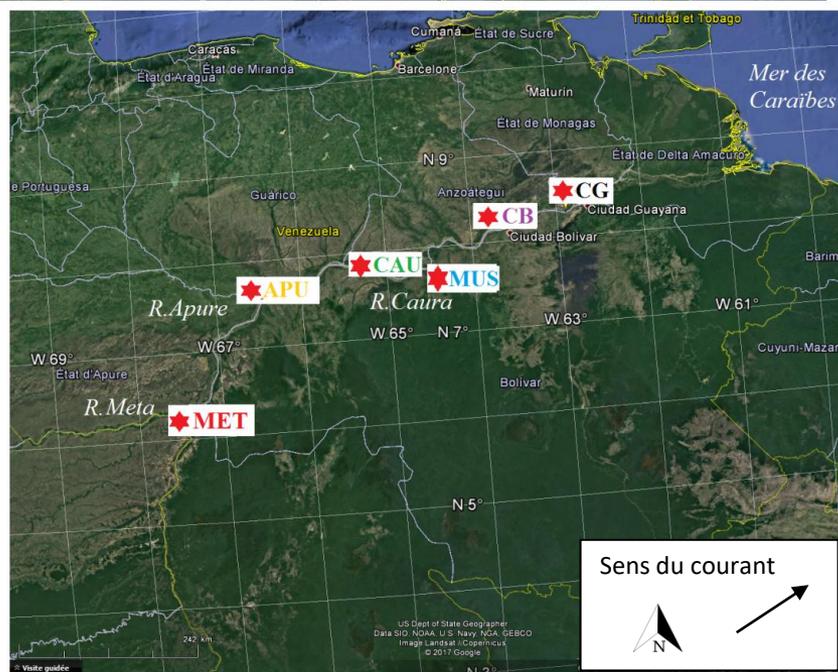
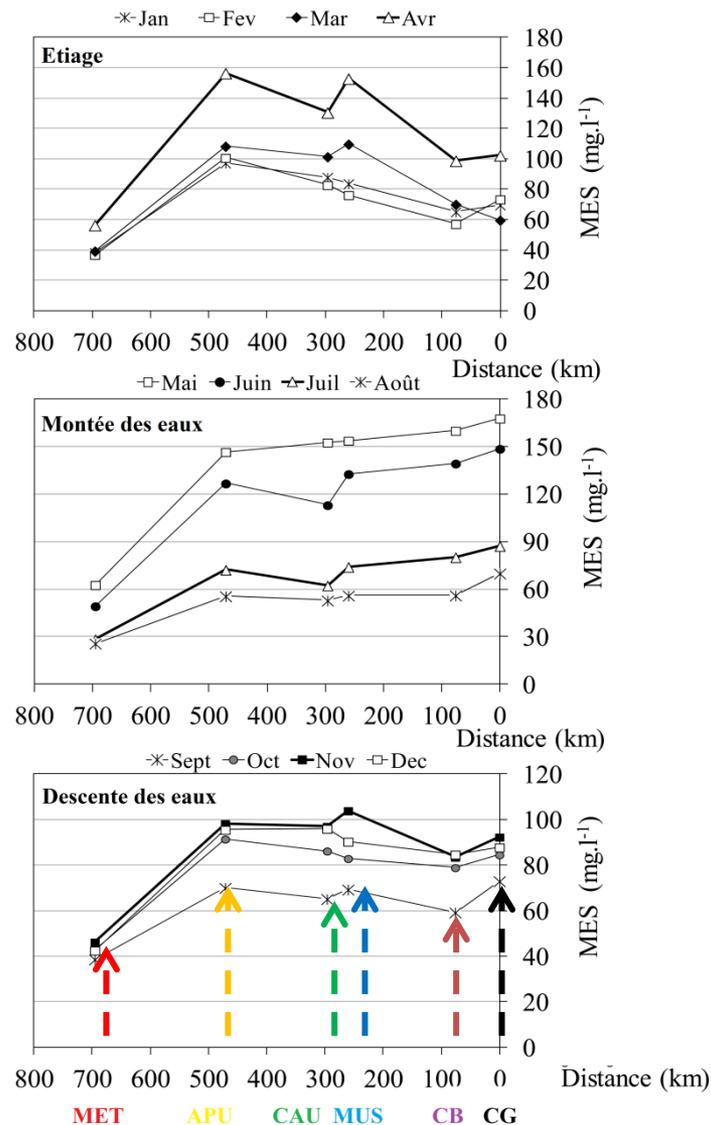


Figure. Stations de mesures de MES (*in-situ* et MODIS) et de turbidité sur le Maroni.

- Bassin de l'**Orénoque** : variations spatio-temporelles le long du continuum et apports des principaux tributaires



**Figure.** Localisation des stations virtuelles (étoiles rouges) élaborées pour le suivi des MES de l'Orénoque.



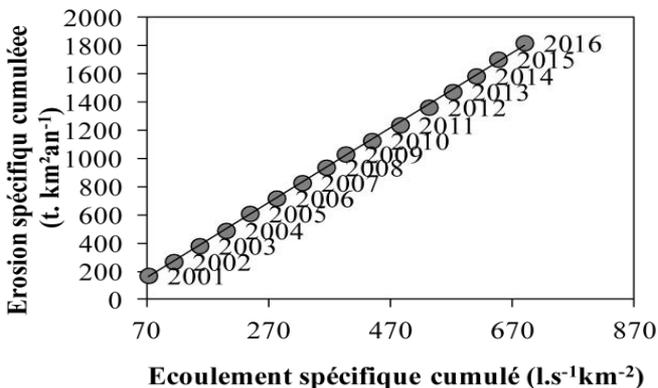
**Figure. Moyenne des MES MODIS** (période de 2000 à 2006) le long de 695 km sur le fleuve Orénoque depuis la station MET à la station CG (0 km).

- Tendances et comparaison **des courbes cumulées** pour les 3 fleuves (CB, SH, SM)

## CIUDAD BOLIVAR

**SY** = 95 - 125 t/km<sup>2</sup>/an

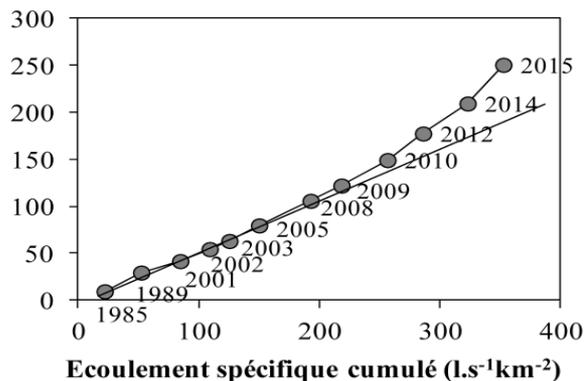
**R** = 31 - 47 l/s/km<sup>2</sup>



## LANGA TABIKI

**SY** = 9 - 41 t/km<sup>2</sup>/an

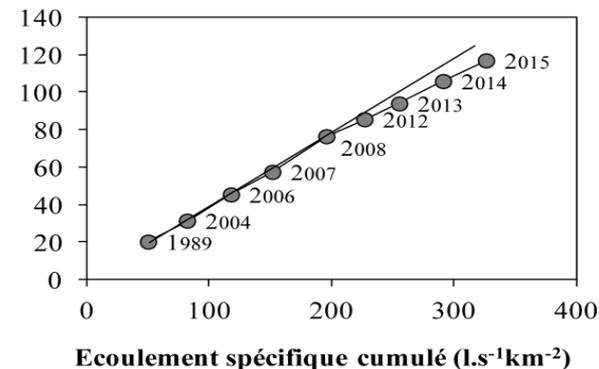
**R** = 16 - 43 l/s/km<sup>2</sup>



## SAUT MARIPA

**SY** = 8 - 19 t/km<sup>2</sup>/an

**R** = 22 - 44 l/s/km<sup>2</sup>



**Figure.** Doubles masses cumulatives relatives à chaque station : A) entre 2001 et 2014 à CB pour l'Orénoque, B) entre 1985 et 2015 à SH pour le Maroni, C) de 1989 et 2015 à SM pour l'Oyapock.

Equilibre

Déséquilibre

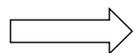
Déséquilibre

- Quelles sont les relations entre SY et MES avec les paramètres climatiques ?
  - Dans le bassin de l'Oyapock

Tableau. Matrice des corrélations de Spearman.

Variables	SY	MES <sub>SM</sub> (moy.)	MES <sub>SM</sub> (max)	MES <sub>SM</sub> (min)	Q <sub>max</sub>	Q <sub>min</sub>	Q <sub>pk</sub>	R	P <sub>SM</sub>	P <sub>CM</sub>
MES <sub>SM</sub> (moy.)	<b>0,88</b>									
MES <sub>SM</sub> (max)	<b>0,77</b>	<b>0,85</b>								
MES <sub>SM</sub> (min)	0,28	0,46	0,25							
Q <sub>max</sub>	0,46	0,22	0,27	-0,54						
Q <sub>min</sub>	0,06	0,33	0,10	<b>0,80</b>	-0,52					
Q <sub>pk</sub>	-0,28	-0,02	-0,16	<b>0,68</b>	<b>-0,94</b>	<b>0,72</b>				
R	<b>0,82</b>	<b>0,61</b>	<b>0,49</b>	0,03	<b>0,72</b>	-0,11	-0,53			
P <sub>SM</sub>	0,07	0,12	0,47	-0,32	0,24	-0,17	-0,17	-0,01		
P <sub>CM</sub>	0,47	0,37	0,20	0,18	0,40	0,11	-0,14	<b>0,66</b>	0,14	
P	0,19	0,27	0,48	-0,03	0,13	0,14	0,04	0,07	<b>0,90</b>	0,39

Significatif lorsque  $p < 0.05$  en gras. En couleur sont indiquées les valeurs qui nous intéressent.



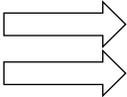
SY : expliquée à 82 % par l'écoulement spécifique

- Quelles sont les relations entre SY et MES avec les paramètres climatiques ?
  - Dans le bassin du Maroni

Tableau. Matrice des corrélations de Spearman.

Variables	SY	MES <sub>SM</sub> (moy.)	MES <sub>SM</sub> (max)	MES <sub>SM</sub> (min)	Q <sub>max</sub>	Q <sub>min</sub>	Q <sub>pk</sub>	R	P <sub>APT</sub>	P <sub>GS</sub>	P <sub>PPI</sub>	P <sub>MPS</sub>
MES <sub>SH</sub> (moy.)	<b>0,56</b>											
MES <sub>SH</sub> (max)	<b>0,68</b>	<b>0,84</b>										
MES <sub>SH</sub> (min)	<b>0,54</b>	<b>0,78</b>	<b>0,54</b>									
Q <sub>max</sub>	<b>0,50</b>	0,15	0,07	<b>0,52</b>								
Q <sub>min</sub>	0,16	0,19	0,02	<b>0,52</b>	<b>0,75</b>							
Q <sub>pk</sub>	0,23	-0,19	-0,02	-0,35	-0,07	-0,67						
R	0,41	0,07	0,00	0,39	<b>0,94</b>	<b>0,83</b>	<b>-0,17</b>					
P <sub>APT</sub>	0,15	0,23	0,16	0,23	0,40	0,42	-0,18	0,34				
P <sub>GS</sub>	-0,31	-0,06	-0,19	0,13	0,32	0,59	<b>-0,48</b>	0,39	0,58			
P <sub>PPI</sub>	<b>0,57</b>	0,24	0,26	0,39	<b>0,82</b>	<b>0,71</b>	<b>-0,12</b>	0,86	<b>0,35</b>	0,32		
P <sub>MPS</sub>	<b>0,61</b>	<b>0,53</b>	<b>0,52</b>	0,48	<b>0,60</b>	<b>0,54</b>	<b>-0,04</b>	0,67	<b>0,45</b>	0,33	0,82	
P	0,17	0,17	0,12	0,40	<b>0,68</b>	<b>0,68</b>	<b>-0,31</b>	0,63	<b>0,78</b>	<b>0,81</b>	<b>0,64</b>	<b>0,59</b>

Significatif lorsque  $p < 0.05$  en gras. En couleur sont indiquées les valeurs qui nous intéressent.



SY : expliquée à 61% et 57% par les précipitations  
 Absence de relation avec l'écoulement spécifique ou les débits comme pour l'Oyapock ce qui confirme le déséquilibre

- Quelles sont les variables explicatives et prédictives :

## Le CLIMAT ?

Précipitations ? pas de tendance de changement pour les moyennes, max, min (1978-2015).

Débits ? pas de tendance de changement pour les moyennes, max, min (1953-2015).

## L'OCCUPATION DES SOLS ?

Comparaison de l'érosion spécifique avec l'occupation des sols

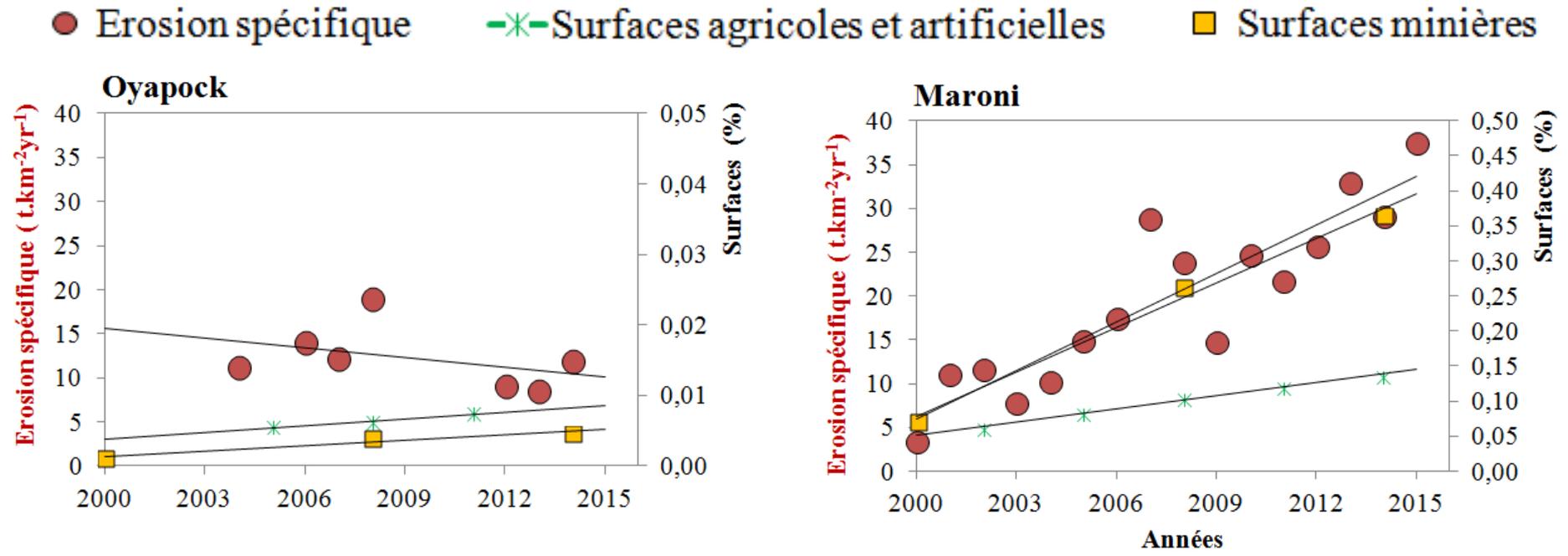
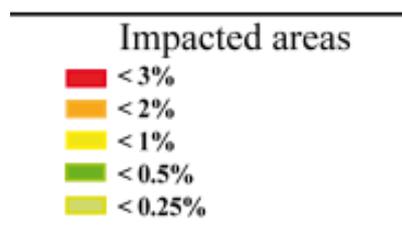


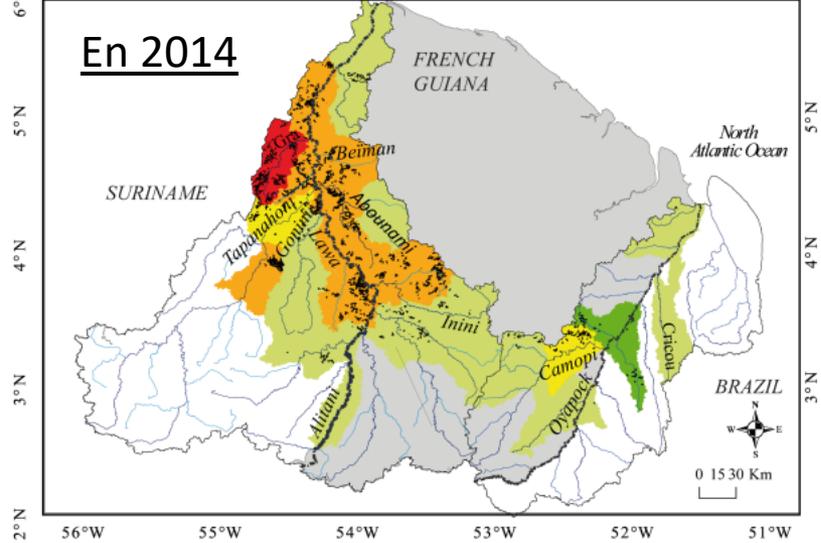
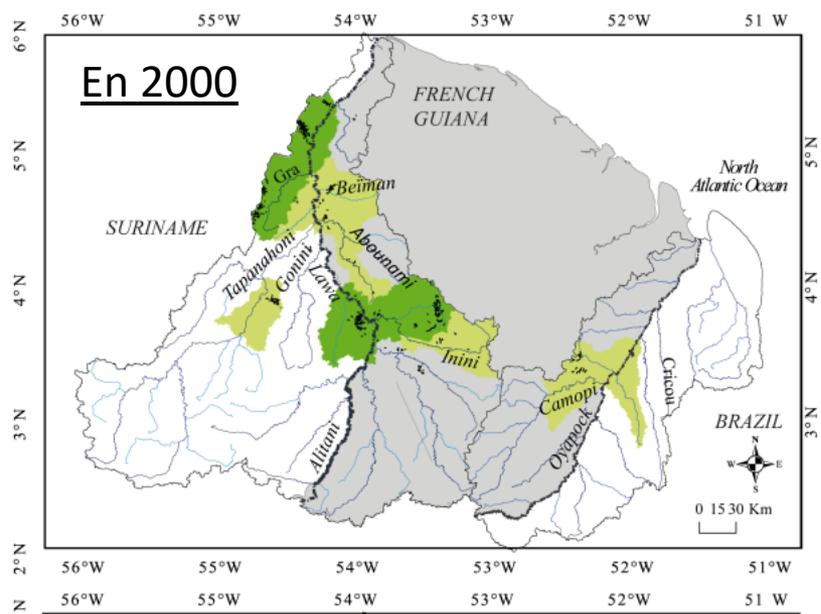
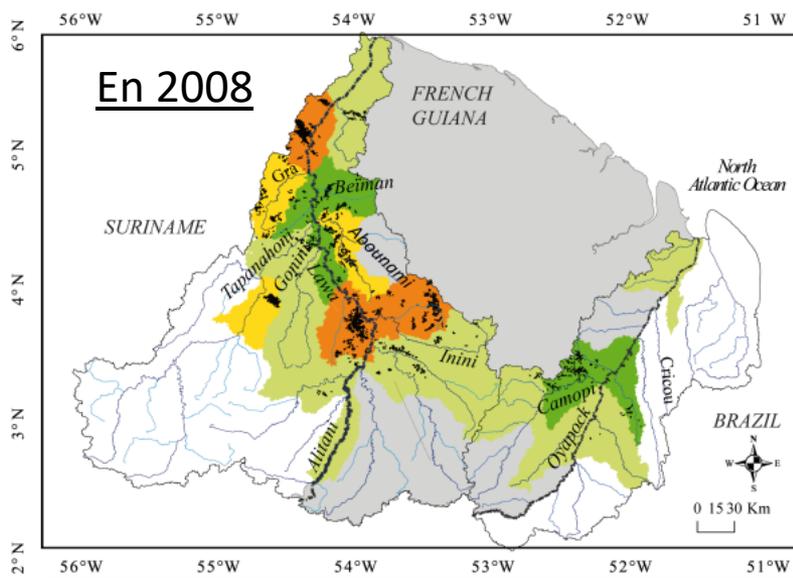
Figure. Comparaison de l'érosion spécifique avec les surfaces agricoles, artificielles et minières.

## L'OCCUPATION DES SOLS

**Figure.** Evolution des surfaces minières entre 2000 et 2014 par sous bassins versants et exprimée en %.



En 2014 sur le Maroni : sur 25 000 ha impactés, 17 000 sont au Surinam



- **Suivi des MES avec MOD3R**

Avantages	<ul style="list-style-type: none"><li>- <b>Méthode</b> : adaptée aux grands et moyens fleuves pour une large gamme de concentration en surface,</li><li>- <b>Images sur du long terme</b> : permet de compléter, substituer, corriger les MES de terrain,</li><li>- <b>Produit à 8 jours</b> : nécessite peu ou pas de corrections atmosphériques, et donne toutes les informations sur angle zénithal, nuages et aérosols,</li><li>- <b>Taille du pixel</b> : bien adaptée pour suivre la qualité de l'eau et fournir une banque de données à cet effet.</li></ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"><li>- <b>Méthode</b> : nécessité de continuer le suivi <i>in-situ</i> pour valider les données MODIS notamment en basses eaux et pour les BV avec faibles MES,</li><li>- <b>Taille du pixel</b> : estime une valeur moyenne et non sur un point précis. D'autres satellites comme ceux de Landsat 8+ et de Sentinel 2 sont plus adaptés à cet objectif ...</li><li>- <b>Pour le calcul de flux</b> : ne permet pas de mesurer la charge de fond alors que les activités minières en produisent en grande quantité.</li></ul>

## MARONI

- **≠ ont – aval stations MPS/GS :**  $\longrightarrow$  ?
  - dépôts ?, moins d'activités dans cette région ? répartition dans la section ? la « station virtuelle » ? cependant mêmes constats sur le Sinnamary (Richard, 1996 ; Hansen, 1996 ; Horeau, 2003). Les charges  $\searrow$  rapidement au bout de quelques km en aval
- **Ruptures :** 2005 (TPI), 2007 (GS) et surtout 2009 (SH, LT, GR, BE, KO, PPI)  $\longrightarrow$  Seuil ?
- **Fréquences des concentrations en % à SH :**  $\longrightarrow$  ?

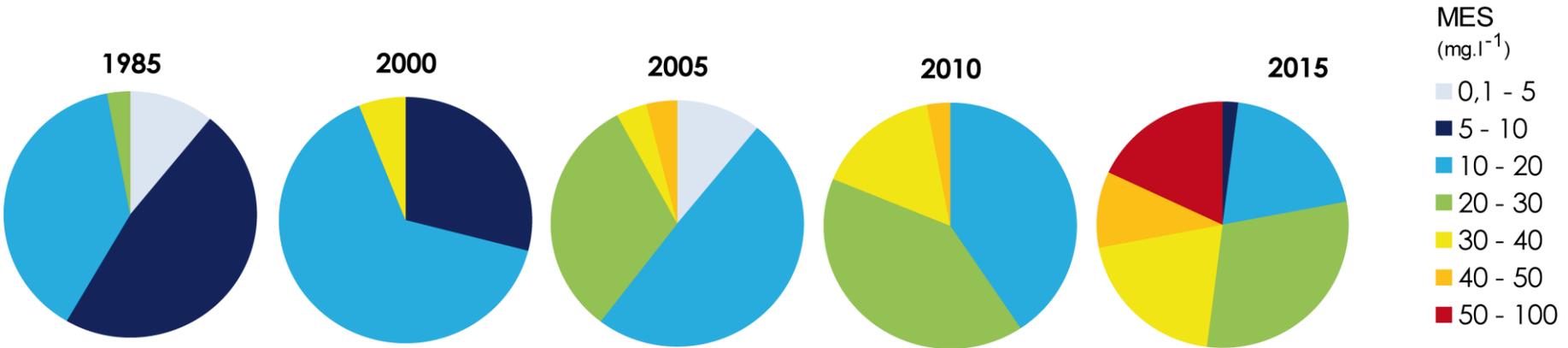


Figure. Evolution des fractions de concentrations de MES exprimées en %.

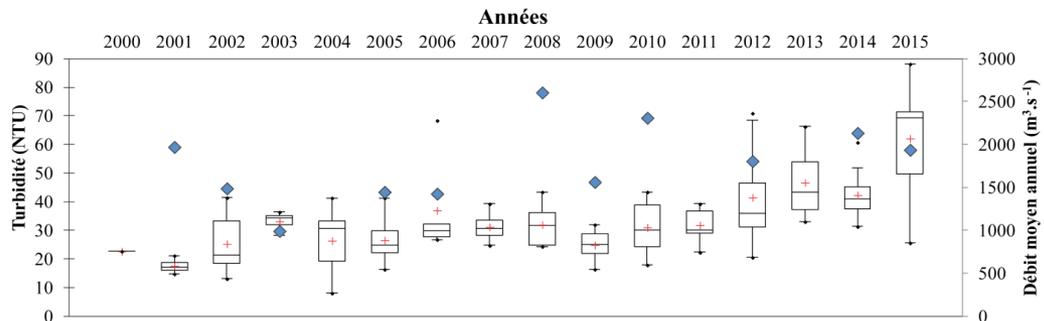
## MARONI

- **Flux** :  $1.3 \cdot 10^3 \text{ t.an}^{-1}$  (530 à  $2510 \cdot 10^3 \text{ t.an}^{-1}$ ) > Jouanneau et Pujos (1988)  $\implies$  Débit interannuel inférieur mais Lointier *et al.* 1993 ont montré qu'il n'y a pas de lien entre les débits et les MES
- **Flux totaux** : selon les valeurs d'érosion mesurées par Roche (1982)
  - Surface : 256 and  $2440 \cdot 10^3 \text{ t.an}^{-1}$   $\implies$  apparaît comme une valeur seuil
  - Charge de fond : 578 à  $2570 \cdot 10^3 \text{ t.an}^{-1}$
- **SY** : expliquée par les surfaces déforestées pour les mines et les précipitations
  - Prémices d'impacts de l'occupation de sols sur la qualité de l'eau ;
  - Entre 2008 et 2014 : 8 SBV de + impactés,

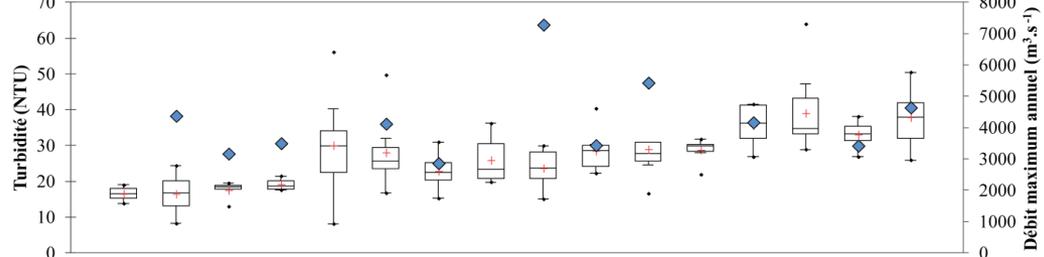
Quel avenir en 2020 ?

# Discussion

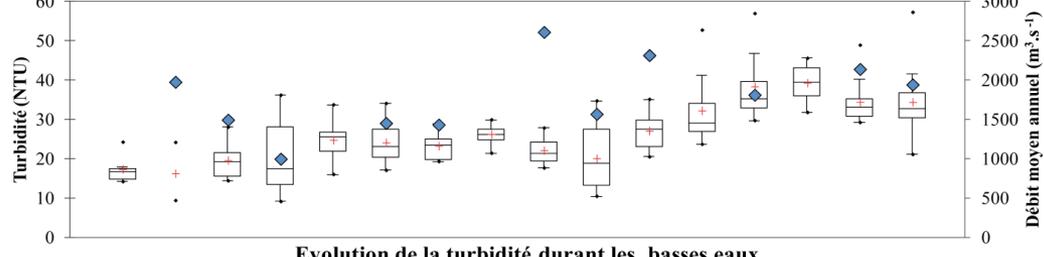
Evolution de la turbidité durant la montée des eaux



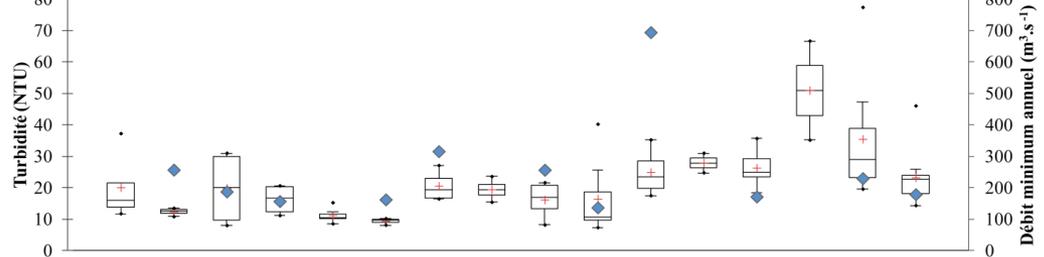
Evolution de la turbidité durant les hautes eaux



Evolution de la turbidité durant la descente des eaux



Evolution de la turbidité durant les basses eaux



	Montée eaux	Hautes eaux	Descente eaux	Basses eaux
Très-bon/Bon	9	8	8	5
Bon/Moyen	17	16	15	11
Moyen/Médiocre	26	24	23	16
Médiocre/Mauvais	31	28	27	19

Figure. Classes de turbidités

Figure. Evolution annuelle (2000-2015) et saisonnière de la turbidité mesurée à SH sur le Maroni.

## Elles sont très étendues dans des domaines très variés :

- **Téledétection** : adapter MODR au suivi des COP et du CDOM ? adapter l'outil MOD3R aux marais de Kaw et au lac de Petit Saut ?
  - Convention IRSTEA 2016-2018 Projet OBS2CO
  
- **Hydrologie** :
  
- **Sédimentologie** :
  
- **Hydrochimie** :

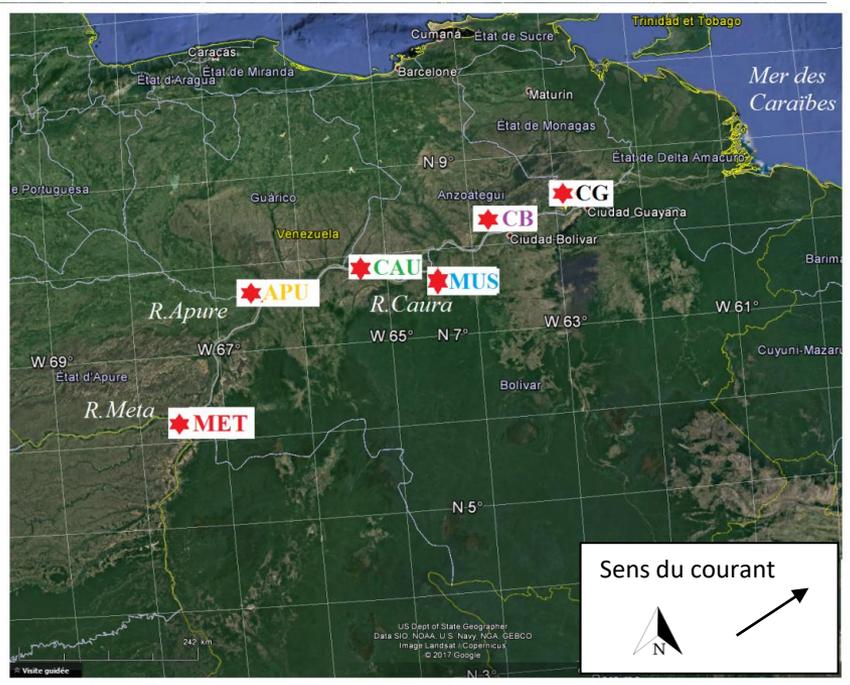
# REMERCIEMENTS

Cette recherche a été amorcée et soutenue par « l'Institut de Recherche pour le Développement » (IRD). Je suis reconnaissante au Président de la CTG, à « l'Office de l'Eau de la Guyane » (OEG), à « la Société SHELL », aux programmes ECOS-Nord et SNO-HYBAM, aux laboratoires LAMA et GET d'avoir financé le projet. Je remercie également la « Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement » (DEAL de Guyane), le laboratoire LEEISA ainsi que l'UCV, l'IVIC et le CPDI d'avoir bien voulu prêter leurs équipements durant les missions de terrain et pour avoir été présents lorsque j'en avais besoin.

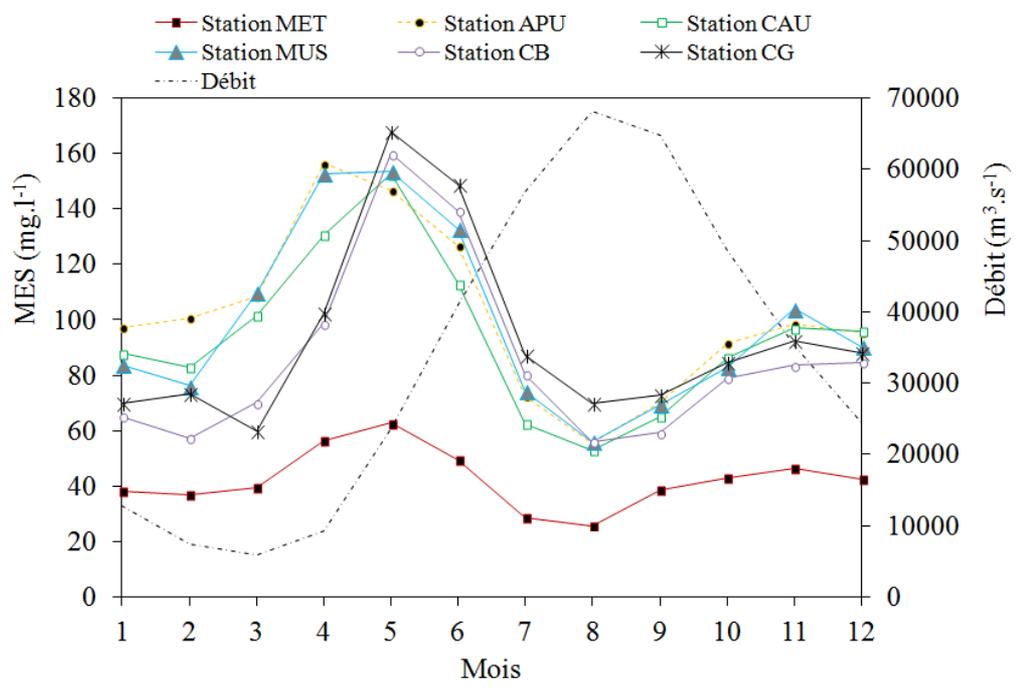
En outre, je remercie l'Organisation mondiale de protection de la nature (WWF) et les Services forestiers du Brésil (SBB), du Surinam (SEMA) et de la Guyane française (ONF et ONFI) pour avoir fourni les données des surfaces minières.



- Bassin de l'**Orénoque** : régime hydro-sédimentaire 2 maxima et 2 minima



**Figure.** Localisation des stations virtuelles (étoiles rouges) élaborées pour le suivi des MES de l'Orénoque.



**Figure.** Concentration moyenne de MES le long de l'Orénoque aux stations pour toute la période d'étude (2000-2016).

## OYAPOCK

- $\neq$  **Amont – Aval à CM et SM** : lien avec les surfaces minières dans la région de CM
- **Rupture** : lien possible avec la crue de 2008 ? distribution dans la section ?
- **Fréquences des concentrations** : 94% entre 5-10 mg/L et 1 valeur > 20 mg/L
- **Flux** :  $303 \cdot 10^3 \text{ t.an}^{-1}$  ( $211 - 477 \cdot 10^3 \text{ t.an}^{-1}$ ) < Lointier *et al.* (1993)  $\Longrightarrow$  crue centennale 1989
- **Flux totaux** : Nous avons estimé les flux de surface et de fond selon les valeurs d'érosion mesurées par Roche (1982) dans des petits BV du Sinnamary (non perturbés) : 4 à 38  $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$  9 à 40  $\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$  (bonne relation Surface/Fond)
  - Surface : 98 and 935  $10^3 \text{ t.an}^{-1}$   $\Longrightarrow$  nettement inférieures aux flux estimés
  - Charge de fond : 221 à 985  $10^3 \text{ t.an}^{-1}$
- **SY** : expliqué par l'écoulement spécifique (flux en équilibre)

- Comparaison des débits et des débits spécifiques entre quelques bassins versants emblématiques

**Tableau.** Comparaison des débits des principaux fleuves guyanais avec ceux de la France métropolitaine et des plus grands fleuves au monde.\*: valeurs estimées à partir des débits spécifiques issus de Delmas *et al.* (2012). \*\*valeurs estimées à partir des débits moyens.

Fleuve	Débit moyen (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Superficie du bassin versant (km <sup>2</sup> )	Débit spécifique (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> .km <sup>-2</sup> )	Sources des débits moyens
<b>Maroni</b>	1831	60 900**	948**	Cette étude (2001- 2015)
<b>Oyapock</b>	867	25 100**	1089**	Cette étude (2004- 2015)
Rhône	1328*	83 600	501	(Delmas <i>et al.</i> , 2012)
Loire	786*	110 200	225	(Delmas <i>et al.</i> , 2012)
Garonne	841*	71 300	372	(Delmas <i>et al.</i> , 2012)
Seine	526*	64 800	256	(Delmas <i>et al.</i> , 2012)
Amazone	173 000	4 800 000	1137**	(Martinez <i>et al.</i> , 2009)
Congo	41 600	3 700 000	355**	(Laraque <i>et al.</i> , 2013b)
Orénoque	33 320	820 000	1282**	Cette étude (2000-2014)

Ils déchargent spécifiquement autant que les grands fleuves au monde à surface de bassin versant équivalente

## • Comparaison des flux de MES entre quelques bassins versants emblématiques

**Tableau.** Comparaison des flux de MES et de l'érosion spécifique des principaux fleuves guyanais avec ceux de la France et des plus grands fleuves au monde. \*: valeurs estimées à partir de l'érosion spécifique issu de Delmas *et al.* (2012). \*\*valeurs estimées à partir des débits solides moyens.

Fleuve	Flux de MES moyen (10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> )	Superficie du bassin versant (km <sup>2</sup> )	Erosion spécifique (t.km <sup>2</sup> .an <sup>-1</sup> )	Sources des Flux de MES
<b>Maroni</b>	1,3	60 900**	22,1**	Cette étude (2001- 2015)
<b>Oyapock</b>	0,3	25 100**	12,1**	Cette étude (2004- 2015)
Rhône	9,6*	83 600	115	(Delmas <i>et al.</i> , 2012)
Loire	2,2*	110 200	20	(Delmas <i>et al.</i> , 2012)
Garonne	2,4*	71 300	35	(Delmas <i>et al.</i> , 2012)
Seine	0,8*	64 800	12,3	(Delmas <i>et al.</i> , 2012)
Amazonie	754	4 800 000	157**	(Martinez <i>et al.</i> , 2009)
Congo	33	3 700 000	9,4**	(Laraque <i>et al.</i> , 2013b)
Orénoque	89	820 000	97	Cette étude (2000-2014)

Ils ont naturellement une faible érosion spécifique puisqu'ils ont des berges peu érosives et qu'ils sont encore peu impactés par les activités humaines