



HAL
open science

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

Marjorie Gallay

► **To cite this version:**

Marjorie Gallay. Etude de la dynamique hydro-sédimentaire de fleuves tropicaux par mesures in situ et de télédétection : le cas du Maroni, de l'Oyapock et de l'Orénoque. Sciences de la Terre. Université de Guyane, 2017. Français. NNT : 2017YANE0011 . tel-01831179

HAL Id: tel-01831179

<https://theses.hal.science/tel-01831179v1>

Submitted on 5 Jul 2018

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

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



Thèse

En vue de l'obtention du grade de

Docteur de l'Université de Guyane

Discipline : *Sciences et Technologies*

Spécialité : *Sciences de l'Environnement, Hydrologie, Chimie*

Sera présentée et soutenue publiquement le *17 octobre 2017* par :

MARJORIE GALLAY

Etude de la dynamique hydro-sédimentaire
de fleuves tropicaux

par mesures *in situ* et de télédétection :

le cas du Maroni, de l'Oyapock
et de l'Orénoque

JURY

BROSSARD Michel	DR, UMR EcoSols	Président de Jury
CHOW-TOUN Franck	Docteur à l'Office de l'Eau	Examineur
FILIZOLA Naziano	PU, Universidade Federal do Amazonas (UFAM)	Rapporteur
GARDEL Antoine	DR, USR LEEISA	Directeur de Thèse
LARAQUE Alain	DR, UMR GET	Co-Directeur de Thèse
MARTINEZ Jean-Michel	DR, UMR GET	Encadrant
POLIDORI Laurent	DR, DU UMR CESBIO	Rapporteur
REYNOUARD Cécile	Docteur à HYDRECO	Examineur
RINALDO Raphaëlle	Docteur au Parc Amazonien	Examineur

"Meurt lentement celui qui ne bouscule pas la table quand il est insatisfait de son travail, qui ne risque jamais de perdre le certain pour l'incertain afin de réaliser ce rêve qui le garde éveillé, qui ne se permet pas au moins une fois dans sa vie de fuir les conseils raisonnables et sensés.

Meurt lentement celui qui ne se laisse jamais aider.

Meurt lentement celui qui devient esclave de l'habitude, refaisant tous les jours les mêmes chemins, ne change jamais de repère, ne se risque jamais à changer la couleur de ses vêtements ou qui ne parle jamais à un inconnu.

Meurt lentement celui qui ne voyage pas, ne lit pas, n'écoute pas de musique ou ne voit pas la beauté en lui-même.

Meurt lentement celui qui ne prend pas de risques pour réaliser ses rêves.

Vis Maintenant et Risque toi aujourd'hui !"

-Martha Mereidos-

Remerciements

J'ai passé toute mon enfance dans les eaux guyanaises et me suis toujours interrogée sur les raisons de leur couleur et sur leur vie aquatique. C'est en 2010 lors d'un stage en Hydrobiologie à Clermont-Ferrand que j'ai réellement pris conscience de l'envie d'en faire mon métier.

Lors de ma rencontre avec mon directeur de thèse, le Dr Alain Laraque nous avons longuement discuté des raisons de la variabilité de la couleur des eaux fluviales et côtières et de la possibilité de réaliser une thèse doctorale en hydro-sédimentologie sur les fleuves d'Amérique du Sud.

Très vite, j'ai effectué avec lui mon premier voyage sur l'Orénoque au Venezuela pour m'initier aux techniques de terrain, puis par la suite d'autres missions fluviales sur ce fleuve et sur le fleuve Maroni en Guyane française. Très marquée par l'Orénoque, ce fleuve gigantesque, encore peu étudié, par sa complexité géologique, géomorphologique, sédimentaire et biochimique ainsi que par sa diversité paysagère l'envie de faire une thèse de doctorat s'est imposée et depuis je suis retournée sur l'Orénoque quatre fois.

Conquise à l'idée de travailler sur ce grand fleuve voisin du Maroni et de l'Oyapock, mais aussi de l'Amazone, je me suis appliquée dès mon retour en Guyane à rechercher des financements me permettant d'étudier la dynamique de la couleur de l'eau en lien avec les activités humaines et les processus naturels de nos régions.

Je voudrais adresser mes sincères remerciements à Mr Rodolphe Alexandre, Président de la **Collectivité Territoriale de Guyane** et ancien Président de la Région Guyane qui m'a accordé une "aide à la bourse de Doctorat" ce qui m'a permis de rechercher un financement complémentaire.

Quelques mois plus tard, j'ai obtenu le soutien d'organismes locaux pour la réalisation de ce travail. Je remercie le Dr. Franck Chow-Toun, Chargé d'études à l'**Office de l'Eau de Guyane**, qui a cru en mon projet de recherche ainsi que Mme la Directrice Clara Nicolas qui a validé le financement qui m'a été accordé.

Je remercie également la **Société SHELL** qui a financé la partie manquante de ma thèse et sans qui ce projet n'aurait pu aboutir ainsi que l'**Institut de Recherche pour le Développement** qui a formalisé mon contrat de travail.

Merci à tous pour la confiance que vous m'avez accordé et qui a été un grand stimulus durant toutes ces années.

Les conventions de coopérations scientifiques entre l'IRD en France et l'IVIC au Venezuela et entre l'UPS-Toulouse et l'UCV-Caracas ont marqué le premier pas dans l'avancement scientifique de ma thèse. Mes sincères remerciements au Dr Juan-Andres Alfonso, au Dr Abraham Mora, ainsi qu'à tous les membres du **Centre Océanologique des Etudes en Antarctique (COEA) et de l'Université de Caracas (UCV)** qui m'ont accueillie à bras ouverts de manière désintéressée montrant de l'intérêt dans l'évolution de mon travail. Merci également au Dr José Luis Lopez et à Bartolo Castellanos de l'**Instituto de Mecanica de Fluidos (IMF) de l'Université de Caracas (UCV)**. Leurs conseils durant les missions de terrain, lors des réunions et tout au long de ces années m'ont été d'une aide précieuse. Merci pour leur accueil chaleureux. Merci pour tout.

Ma rencontre avec le **Dr Jean-Michel Martínez** m'a permis d'orienter mon travail vers des techniques novatrices de télédétection pour le suivi des matières en suspension et de la turbidité à long terme. Merci pour cette connaissance technique et scientifique et pour le soutien que tu m'as apporté même de loin pour les mesures de terrain et la rédaction des articles.

Par ailleurs, je remercie le **Dr Antoine Gardel**, Maitre de conférence en délégation au **CNRS** au sein de l'équipe Ecosystèmes littoraux de l'USR 3456 qui a soutenu mon projet de recherche ainsi que le Dr Vincent Vantrepotte Chargé de recherches au CNRS pour m'avoir permis d'utiliser les équipements de terrain du laboratoire et formée à leur utilisation.

Mes remerciements également :

- Au Dr. Patrick Seyler, à Mme Cécile Fontana et à Stéphanie Neibecker pour avoir suivi et facilité les démarches administratives de mon dossier.
- Aux Dr. Michel Brossard et Rodolphe Gozan pour leurs soutiens scientifiques et leurs appuis au quotidien.
- Au Dr Laurence Maurice-Bourgoin pour m'avoir permis de pousser plus loin mon sujet de recherche.
- A tous mes collègues doctorants et post-doctorants du centre IRD qui m'ont été d'un grand soutien : Mourad, Youven, Tommy, Momo, Sylvain, Yann, Chistina, Camilla, Maha et Amandine. Merci d'avoir été là dans les moments de joie et de solitude.

Merci pour les pauses café ainsi que pour votre soutien et votre amitié qui ont été des éléments moteurs dans ma réussite.

- A Messieurs Jean-Claude Doudou et Lesly Baya, mes fidèles compagnons de terrain qui n'ont jamais abandonné devant la difficulté et qui m'ont soutenue dans les bons moments comme dans les pires.
- A mon collègue le Dr.Mourad Boutouchent pour son soutien lors de la mission longue durée sur le Maroni. Un vrai souvenir !!!
- A toute l'équipe de la DEAL qui m'a associée à ses missions de terrain et sans qui le suivi hydrologique des stations hydrométriques des fleuves guyanais n'aurait pas été possible. A Erwan Escloupier, à Jean-Philippe Pavy, à François Moussu et à Maxime Montfort.
- Au Parc Amazonien de Guyane pour avoir fourni les données de turbidité aux stations localisées à Maripasoula dans le bassin du Maroni et à Camopi dans le bassin de l'Oyapock.

Je remercie également chaleureusement la famille Muraine qui m'a accueillie à Saint-Laurent du Maroni pendant les semaines de prélèvements et sans qui les missions de terrain auraient été bien plus difficiles. Merci à tous leurs amis pour l'aide aux réparations de matériel de dernière minute, pour l'écoute des plaintes et pour les apéros...

Je tiens à remercier aussi particulièrement :

- Le laboratoire de Biogéochimie de Cayenne "**Centre LAMA**" et spécialement Max Sarrazin qui a conseillé et appuyé mes recherches tout au long de la thèse et qui a aimablement permis l'analyse des paramètres physico-chimiques ainsi que de nombreux échantillons de Carbone particulaire, de MES, de Chl-a. Merci pour le temps passé à discuter sur ce travail, merci pour tout le soutien. Merci également à Luc Finot, à Eric Beaucher et à Ginette Poitevin pour leur aide lors des analyses de laboratoire et pour les pauses "café".
- Le laboratoire de Biogéochimie du **GET à Toulouse** et particulièrement Christelle Lagane, pour m'avoir permis l'analyse d'échantillons de Carbone Dissous.

- Le collègue Doctorant Santiago Yépez pour la collaboration et les échanges scientifiques sur l'Orénoque.

S'il est une chose qui demeure après les épreuves passées, ce sont les marques d'amitié je voudrai consacrer le paragraphe suivant à tous ceux qui, sous une forme ou une autre m'ont aidée. Toute ma gratitude à Isabelle, à Magalie, à Alexia, à Aurélie, à Jennifer, à Christina, à Daphnée, à Marie, à Chloé, à Anne, à Béatrice et à toutes les copines que j'oublie, pour les innombrables paroles d'encouragement pendant ces années. Merci également à Olivia Cresson pour l'accompagnement ainsi qu'à toutes les filles du cercle. Je n'oublie pas ma fidèle amie Cécile et à son prince qui n'ont jamais manqué une occasion de me montrer leur affection et leur soutien. Merci pour ces vacances au bord de la mer, ça m'a fait un bien fou. Merci à tous d'avoir mis de la joie et de l'amour dans ma vie.

A toute ma famille, à mes parents qui m'ont transmis la passion du travail et le courage d'aller au bout de mes rêves et qui m'ont accompagnée tout au long de ces quatre ans. Merci pour leurs soutiens et leurs conseils. A mon père qui m'a donné du travail lorsque je cherchais un financement. A ma mère, qui ne manque pas un moment pour venir m'encourager, me conseiller et me consoler. A mes frères et sœur pour leur présence et leur soutien dans les moments de solitude. A Marinette pour sa passion des chevaux et son envie inébranlable de réaliser ses rêves. A mon Boubou pour ses câlins. A ma tante Sophie et à mes cousins Manon et Frédéric, un grand merci. A tous les animaux qui m'ont accompagnée et qui n'ont jamais été avares de câlins et de joie. Merci d'avoir été vous, réels et pleins de bienveillance à mon égard.

Merci à tous pour votre soutien.

Résumé

Mots clés : Transport solide spécifique, Flux de matières, Hydrologie, Télédétection, MODIS, Activités minières, Déforestation, MES, paramètres Physico-chimiques, Carbone, Azote particulaire, Chlorophylle *a*, Orénoque, Maroni, Oyapock.

L'eau des fleuves, des rivières, des lacs et des réservoirs ne représente que 0,26 % des 2,5 % (35 millions de km³) d'eau douce disponibles à l'état liquide sur Terre, or sa qualité et quantité ont fortement diminué ces dernières années. Sa dégradation a des conséquences sur l'agriculture, la santé, l'environnement et l'économie des territoires et est aujourd'hui au centre des préoccupations sociétales. Les objectifs de la présente thèse sont pour trois fleuves localisés dans le Bouclier des Guyanes, au nord de l'Amérique du Sud (le Maroni, l'Oyapock, l'Orénoque): (i) d'utiliser et d'adapter des outils novateurs de télédétection pour suivre et quantifier, sur du long terme, leurs charges sédimentaires en suspension, (ii) d'évaluer l'existence de tendances spatio-temporelles, ainsi que de ruptures dans les chroniques de données, (iii) de quantifier la part organique et minérale de ces charges, (iv) d'apprécier le rôle des facteurs naturels (débits et précipitations) et anthropiques (surfaces urbaines, agricoles et minières) sur les tendances observées et enfin, (v) de discuter de seuils de charges pour le suivi de la qualité de l'eau.

Les résultats ont montré qu'il est possible de suivre les concentrations de matières en suspension, pour les fleuves Orénoque et Maroni avec une erreur relative de 32 et 25% respectivement. Sur la période 2000-2016, des tendances spatio-temporelles régulières ont été observées pour l'Orénoque, alors qu'elles sont en augmentation pour le Maroni avec une rupture en 2009 et en diminution pour l'Oyapock depuis 2008 (données *in situ*). Un lien fort avec l'augmentation de la déforestation pour les surfaces minières et les précipitations est observé pour le Maroni alors que pour l'Oyapock les tendances sont liées aux débits.

Pour les deux années d'études (2014-2016), les charges minérales ont représenté la plus forte fraction des particules transportées dans les eaux du Maroni au Saut Hermina (en moyenne 93 %) et de l'Oyapock au Saut Maripa (en moyenne 82 %) avec une grande variabilité selon les mois de la teneur en carbone dans les matières transportées et pour les deux fleuves. Enfin, les rapports C/N et C/Chl-*a* ont dévoilé des matières organiques d'origine principalement endogène avec une forte biomasse chlorophyllienne surtout durant les basses eaux.

Resume

Keywords : Sediment Yields; Sediment Loads; Hydrology, Remote sensing, MODIS; Mining activities, Deforestation, MES, Physico-chemicals parameters, Carbon, Particulate Nitrogen, Chlorophyll *a*, Maroni, Oyapock, Orinoco.

The water of rivers, lakes and reservoirs represents only 0.26 % of the 2.5 % (35 million of km³) of fresh water available on the liquid state on Earth, but its quality and quantity strongly decreased these last years. Her degradation has consequences on the farming, the health, the environment and the economy of territories and is now in the center of the societal concerns. The objectives of the present thesis are for three rivers located in the Guiana Shield, in the North of South America (the Maroni, the Oyapock, the Orinoco): *i*) to use and to adapt innovative tools of remote detection to follow and quantify, on the long term, their sedimentary loads, *ii*) to estimate the existence of spatiotemporal trends, as well as breaks in the chronicles of data, *iii*) to quantify the organic and mineral part of these loads, *iv*) to appreciate the role of the natural (discharge and precipitation) and the anthropological factors (urban, agricultural and mining surfaces) on the observed trends and finally, *v*) to discuss thresholds of concentrations for the quality monitoring of the river water.

The results showed that it is possible to follow the concentrations of suspension materials, for rivers Maroni and Orinoco with a relative error of 25 and 32 % respectively. Over the period 2000-2016, regular spatiotemporal trends were observed for the Orinoco, while they are increasing for Maroni with a break in 2009 and in decrease for the Oyapock since 2008 (*in situ* data). A strong link with the increase of the deforestation for the mining surfaces and the precipitation is observed for the Maroni catchment while for the Oyapock the trend is explained by the specific water discharge.

For two years of studies (2014-2016), the mineral loads represented the strongest fraction of particles transported in the Maroni River at Saut Hermina (on average 93 %) and in the Oyapock River at Saut Maripa (on average 82 %) with a high variability according to the months of the content in carbon in the transported materials and for both rivers. Finally, report C/N and C/Chl-*a* revealed organic matters of mainly endogenous origin with a strong chlorophyll biomass and especially during the low water period.

Table des matières

Remerciements.....	3
Résumé	7
Resume	8
Table des matières	9
Table des figures.....	15
Liste des tableaux	23
Plan de la thèse	27
Chapitre 1 : Introduction générale	29
1.1 Contexte de l'étude	33
1.1.1 Le changement climatique	33
1.1.2 L'augmentation de la déforestation	35
1.1.3 L'augmentation des activités minières.....	36
1.1.4 Un besoin croissant en énergie et sédiments	39
1.1.5 Nécessité de contrôler et de suivre la qualité des eaux	41
1.2 Objectifs et questions de recherche	47
Chapitre 2 : Etat des connaissances	50
2.1 Une histoire géologique commune	51
2.2 Un régime de précipitations contrôlé par les mouvements de la ZCIT	56
2.3 Les spécificités des bassins versants du Maroni et de l'Oyapock.....	59
2.3.1 Relief	59
2.3.2 Sols et végétation ripicole	61
2.3.3 Hydrologie.....	64
2.3.4 Géomorphologie fluviale.....	66
2.3.5 Apports sédimentaires et qualité physico-chimique des eaux.....	67

2.3.6	Occupation des sols	70
2.4	Les spécificités du bassin versant de l'Orénoque.....	76
2.4.1	Relief	76
2.4.2	Végétation ripicole	77
2.4.3	Hydrologie.....	78
2.4.4	Géomorphologie fluviale.....	80
2.4.5	Apports sédimentaires et qualité physico-chimique des eaux.....	81
2.4.6	Occupation des sols	83
Chapitre 3 : Méthodes		87
3.1	Introduction	88
3.1.1	Le réseau de recherche	89
3.2	Sites d'études et stations de mesures.....	89
3.2.1	Stations de mesures <i>in situ</i> et campagnes de terrain	90
3.2.2	Stations de mesures "virtuelles"	93
3.3	Données et méthodes	96
3.3.1	Données de précipitations	96
3.3.2	Données de débits.....	97
3.3.3	Données d'occupation des sols	99
3.3.4	Mesures de terrain et analyses en laboratoire.....	101
3.3.5	Couleur de l'eau et mesures des MES par télédétection.....	108
3.3.6	Calculs et méthodes statistiques utilisées.....	121
Chapitre 4 : Résultats		125
4.1	Evolution de l'occupation des sols.....	126
4.2	Evolution de la pluie et des débits	129
4.3	Paramètres physico-chimiques	131
4.4	Concentrations de MES <i>in situ</i> versus turbidité	132

4.5	Calibrations MES-Réflectance <i>in situ</i> et MES-Réflectance MODIS	134
4.6	Comparaison des MES <i>in situ</i> avec MES estimées via MODIS	137
4.7	Tendance des MES et points de ruptures dans les chroniques	143
4.8	Phénomènes d'hystérésis	143
4.9	Flux de MES, transport solide et écoulement spécifiques.....	145
4.10	Variables explicatives ou prédictives des MES et du transport solide spécifique...	148
4.11	Concentrations en COD, COP, NOP et Chl-a	151
4.12	Flux de COD, COP, COT, NOP et Chl-a	152
4.13	Variables explicatives ou prédictives des COD, COP, NOP et Chl-a.....	154
4.14	Conclusion.....	154
Chapitre 5 : Discussion générale		156
5.1	Rappel des principaux résultats	157
5.2	Pertinence et efficacité des méthodes utilisées.....	159
5.2.1	Suivi des MES et des flux de matières par des mesures <i>in situ</i> et de télédétection	159
5.2.2	Relation entre le transport solide spécifique et l'occupation des sols	161
5.3	Comparaison des flux d'eau et de sédiments exportés à l'océan, entre quelques bassins versants emblématiques.....	162
5.3.1	Transports d'eau	162
5.3.2	Transports de sédiments	163
5.4	Propositions de seuils de qualité pour les masses d'eaux continentales	166
5.4.1	Turbidité versus MES.....	168
5.4.2	Carbone organique dissous.....	172
5.4.3	Carbone organique particulaire	174
5.4.4	Azote organique particulaire	175
5.4.5	Chlorophylle <i>a</i>	177
5.4.6	Rapport Carbone/Azote.....	179

5.4.7	pH.....	180
5.4.8	Conductivité	181
5.5	Conséquences d'un changement dans la dynamique hydro-sédimentaire pour la qualité des eaux, le développement économique du territoire, la santé et l'environnement	183
5.6	Conclusion générale	188
Liste des abréviations, des sigles et des acronymes.....		192
Références bibliographiques		197
Annexes.....		218
	Annexe 6-1. Distribution du pH et de la conductivité électrique en fonction du débit journalier de Langa Tabiki sur le Maroni et Saut Maripa sur l'Oyapock, aux points de prélèvement du SNO-HYBAM localisés A) au Saut Hermina et B) au Saut Maripa pour la période 2004-2016.	218
	Annexe 6-2. Distributions du pH dans la colonne d'eau à partir de la sonde EXO-2 A) pour l'Oyapock (à la station de police du Brésil), en rive droite (RD) et gauche (RG) respectivement à - 100 et - 300 m de la rive droite et, (B) pour le Maroni (au Saut Hermina) selon un transect allant de la rive droite vers la rive gauche respectivement à : - 250 m de la rive droite (RD) - 500 m (M1/point hybam) - 750 m (M2) - 900 m (RG).....	219
	Annexe 6-3. Distribution de la conductivité électrique (CE en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 25°C) dans la colonne d'eau à partir de la sonde EXO-2 : A) pour le Maroni (au Saut Hermina) selon un transect allant de la rive droite vers la rive gauche respectivement à : - 250 m de la rive droite (RD) - 500 m (M1/point hybam) - 750 m (M2) - 900 m (RG) ; B) pour l'Oyapock (à la station de police du Brésil), en rive droite (RD) et gauche (RG) respectivement à - 100 et - 300 m de la rive droite.	220
	Annexe 6-4. Saturation de l'oxygène dans la colonne d'eau, en pourcentage, à partir de la sonde EXO-2 : A) pour le Maroni (au Saut Hermina) selon un transect allant de la rive droite vers la rive gauche respectivement à : - 250 m de la rive droite (RD) - 500 m (M1/point hybam) - 750 m (M2) - 900 m (RG) ; B) pour l'Oyapock (à la station de police du Brésil), en rive droite (RD) et gauche (RG) respectivement à - 100 et - 300 m de la rive droite.	221

Annexe 6-5. Distribution de la température (T°C) dans la colonne d'eau à partir de la sonde EXO-2 : A) pour le Maroni (au Saut Hermina) selon un transect allant de la rive droite vers la rive gauche respectivement à : - 250 m de la rive droite (RD) - 500 m (M1/point hybam) - 750 m (M2) - 900 m (RG) ; B) pour l'Oyapock (à la station de police du Brésil), en rive droite (RD) et gauche (RG) respectivement à - 100 et - 300 m de la rive droite.

222

Annexe 6-6. Distribution des concentrations de MES dans la colonne d'eau à partir de prélèvements ponctuels réalisés avec une bouteille NISKIN en sub-surface et à des profondeurs équivalentes à 35 et 80 % de la hauteur d'eau totale : A) pour le Maroni (au Saut Hermina) selon un transect allant de la rive droite vers la rive gauche respectivement à : - 250 m de la rive droite (RD) - 500 m (M1/point hybam) - 750 m (M2) - 900 m (RG) ; B) pour l'Oyapock (à la station de police du Brésil), en rive droite (RD) et gauche (RG) respectivement à - 100 et - 300 m de la rive droite. 223

Annexe 6-7. Distribution de la turbidité dans la colonne d'eau à partir de la sonde EXO-2 : A) pour le Maroni (au Saut Hermina) selon un transect allant de la rive droite vers la rive gauche respectivement à : - 250 m de la rive droite (RD) - 500 m (M1/point hybam) - 750 m (M2) - 900 m (RG) ; B) pour l'Oyapock (à la station de police du Brésil), en rive droite (RD) et gauche (RG) respectivement à - 100 et - 300 m de la rive droite ; C) et cycles hydrologiques (2014-2015). 224

Annexe 6-8. Hystérésis entre les matières en suspension et le débit : A) sur l'Orénoque à Ciudad Bolivar, B) sur le Maroni au Saut Hermina et C) sur l'Oyapock au Saut Maripa.

225

Annexe 6-9. Photos des missions de terrain sur le Maroni en Guyane. Calibration des appareils de terrain et mesures en laboratoire, création d'un support pour les Trios Ramses, puis calibration des équipements, mesures physico-chimiques, mesures ADCP, station hydrométrique de Langa Tabiki, barge d'orpaillage, bords de berges, dégradés, pontons, quais et villages. 227

Annexe 6-10. Photos des missions de terrain sur l'Oyapock en Guyane. 230

Annexe 6-11. Photos des missions de terrain sur l'Orénoque au Venezuela. 231

ARTICLE A : Impact de la dégradation des sols due aux activités de déforestation et minières sur les flux sédimentaires du Maroni et l'Oyapock (Guyane française)..... 235

ARTICLE B : Dynamique et flux de Carbones, d'Azote particulaires et de la Chl-a dans deux bassins versants impactés par des activités de déforestation et minières en Guyane Française.....	266
ARTICLE C : 1 ^{ère} évaluation de la variabilité spatiale de MES par télédétection dans le bassin de l'Orénoque	292

Table des figures

Figure 1-1. Classification des tailles de matières dissoutes et particulaires, organiques ou minérales transportées par les cours d'eau (Verney, 2006).	30
Figure 1-2. Cartographie de l'érosion spécifique au niveau global et dans des conditions naturelles (Walling and B.W., 1996).....	31
Figure 1-3. Eau douce disponible à l'état liquide dans le monde.....	32
Figure 1-4. Déforestation impliquée par l'augmentation des sites miniers en Amazonie, pour la période 2001-2006 et 2007-2013. Les points verts et rouges représentent respectivement l'augmentation ou la diminution du couvert forestier. Les zones grises sont celles qui ont montré un changement de couverture du sol important (Alvarez-Berríos and Aide, 2015)	37
Figure 1-5. Impacts paysagers et hydriques des activités d'extraction d'or dans les cours d'eau de Colombie (Photo : Tercera División del Ejército)	37
Figure 1-6. Impact des activités d'orpaillage sur la couverture forestière dans le bouclier des Guyanes en 2014 (Rahm <i>et al.</i> , 2015).....	38
Figure 1-7. A) Impacts des barrages sur la morphologie des cours d'eau, B) Erosion régressive et progressive, C) Conséquences de l'enlèvement du tapis de sédiments du lit fluvial (Steiger and Corenblit, 2000).	41
Figure 2-1. Schémas géologiques simplifiés du bouclier des Guyanes tiré de Delor <i>et al.</i> (2003b) selon A : Gibbs and Barron (1983), B : Tassinari and Macambira (1999), C : Santos <i>et al.</i> (2000).	53
Figure 2-2. Evolution des limites des bassins versants en Guyane suivants les périodes climatiques (adaptée de : Allard (2014))......	54
Figure 2-3. A) Mouvements de la ZCIT ou (ZIC) le long de l'équateur (source : http://www.terresdeguyane.fr/).	56
Figure 2-4. Variation de la saison des pluies (en vert) et de la saison sèche (en jaune) au cours d'une année en Guyane Française et au Venezuela (adaptée de : Héritier (2011)) et B) histogrammes des précipitations (barres grises) et températures (lignes grises) enregistrées dans l'une des principales villes du bassin versant de l'Orénoque, du Guyana, du Suriname, des bassins versants du Maroni et de l'Oyapock en Guyane Française, et du nord du Brésil (source : https://fr.climate-data.org).....	58

Figure 2-5. A) Reliefs du Suriname, de la Guyane Française et de l'Amapá et localisation de la pénélaine méridionale, la partie basse et le trait de côte, des bassins versants du Maroni et de l'Oyapock et de leur principale station hydrométrique, respectivement de Langa Tabiki (LT) et de Saut Maripa (SM) (adaptée de : Sondag <i>et al.</i> , 2010).....	61
Figure 2-6. Profil latéritique type de des sols de Guyane : argile tachetée (AT), cuirasse (Cui), cuirasse pisolitique (CP), gibbsites (Gib), kaolinite (Kao), la roche mère (RM), quartz (Qtz), saprolite fine (SF) saprolite grossière (SG) d'après (Théveniaut and Freyssinet, 1999; Théveniaut and Freyssinet, 2002).	62
Figure 2-7. A) Zone de calme avec dépôts sableux le long de la rive et végétation arbustive et aceraceae surcîmant. B) Ripisylve en continuité avec la forêt ombrophile sempervirente. C) Roches en érosion avec déformation par le courant lors des crues des troncs de la végétation arbustive sur le Saut Hermina.	63
Figure 2-8. Diagramme des débits mensuels moyens (ligne noire), minima et maxima (points noirs), entre 1952 et 2016 à Saut Hermina (fleuve Maroni) à gauche et entre 1953 et 2016 à Saut Maripa (fleuve Oyapock) à droite.	66
Figure 2-9. Formes géomorphologiques fluviales en tresses (rectangles blancs) et méandriiformes (rectangles noirs) d'Antecume Pata à l'estuaire du Maroni.	67
Figure 2-10. A gauche, charges moyennes mensuelles en MES et à droite, histogrammes des fréquences de MES mesurées sur la rivière Comté et le fleuve Maroni sur la période 1984-1985 (Jouanneau and Pujos, 1988).....	68
Figure 2-11. Diagrammes de piper A) Ca, Mg, Na + K et B) Si, alcalinité et Cl + 2SO ₄ (Sondag <i>et al.</i> , 2010) au Saut Hermina (SH) sur le Maroni et au Saut Maripa (SM) sur l'Oyapock.....	69
Figure 2-12. Photos d'abattis © Parc Amazonien de Guyane.....	71
Figure 2-13. Erosion cumulée sur des parcelles de pâturages en fonction de l'érodibilité de la pluie (index de WISCHMEIER), des espèces de graminées cultivées, et en comparaison avec une parcelle sous forêt primaire (Fritsch and Sarrailh, 1986).....	72
Figure 2-14. Localisation des concessions d'exploitations au Suriname (Suriname, 1988).....	74
Figure 2-15. Localisation des zones aurifères potentielles en Guyane (SAR, 2014). ..	75

Figure 2-16. Relief et formations géologiques constitutives du bassin versant de l'Orénoque avec la localisation de ses principaux tributaires et seuils rocheux (Warne *et al.*, 2002)..... 77

Figure 2-17. Carte du réseau hydrographique dans le bassin versant de l'Orénoque (Lewis and Saunders 1989). De par la taille de son bassin versant et l'important régime de précipitations qui y opère, l'Orénoque à son exutoire est le troisième plus grand fleuve au monde tant par son débit moyen ($37\,600\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) (Cordoba, 1999) que par son débit spécifique ($37,6\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\text{ km}^{-2}$) (Laraque *et al.*, 2013b). 79

Figure 2-18. Diagramme des débits mensuels moyens (ligne noire), minima et maxima (points noirs), entre 1926 et 2015, à Ciudad Bolivar. 80

Figure 2-19. A) Plaine alluviale de Mamo dans la région du bas Orénoque en hautes eaux, B) Cours en tresses en aval de la rivière Apure avec bancs de sables et nombreuses îles en basses eaux, C) Méandres complets en aval de la rivière Caura durant la montée des eaux avec extension et rétraction du cours d'eau favorisant l'homogénéisation des particules (images : Landsat Sensor ETM + Pan Mosaics 1999-2003)..... 81

Figure 2-20. Carte des principaux contributeurs des apports sédimentaires à l'Orénoque (Warne *et al.*, 2002)..... 82

Figure 2-21. Diagrammes ternaires des éléments majeurs dissous (exprimés en en %) de l'Orénoque à Ciudad Bolivar pour la période 2005-2010 (Laraque *et al.*, 2013a)..... 83

Figure 2-22. A) Localisation des infrastructures de pétrole (bande rose) et de gaz (points), des zones d'aires protégées (en vert), ainsi que des zones de risques d'agressions (triangles) et de résistances (carrés) (<http://www.oilwatchesudamerica.org/mapas/2332-venezuela.html>). B) Localisation des ressources minérales métalliques et non métalliques ainsi que des territoires contestés (bandeaux verts) (<http://www.hungpetroleum.com.ve/minerales.php>). 86

Figure 3-1. Localisation des points de collecte d'eau : A) au Saut Hermina sur le Maroni, de la rive droite vers la rive gauche (à 166 m (RD), à 475 m (M1), à 772 m (M2) et à 940 m (RG)), et B) au Saut Maripa (SM) sur l'Oyapock ainsi qu' à 115 m (RD), à 292 m (M), et à 487 m (RG) de la rive droite au niveau du poste de police Brésilien (images : Google Earth). 91

Figure 3-2. : Localisation : A) du point de collecte d'eau SNO-HYBAM à Ciudad Bolivar (CB) et de la grille de collecte MODIS en aval, B) du point de collecte d'eau SNO-HYBAM à

Ciudad Guayana (CG), C) zoom sur le point de prélèvement à la station de CB (à gauche), sur la grille MODIS (au milieu) et à la station de CG (à droite)..... 93

Figure 3-3. Localisation des huit stations virtuelles élaborées pour le suivi des MES sur le Maroni : au Saut Hermina (SH), à Langa Tabiki (LT), en aval de la confluence de la crique Graan (GR) avec le Maroni, en aval de la confluence de la rivière Beïman (BE) avec le Maroni, en aval de la confluence de la rivière Tapanahoni (TPI) avec le Maroni, en amont de Grand-Santi (GS), dans les abattis Cottica (KO) et enfin en aval de Papaïchton (PPI) (image : Google Earth)..... 94

Figure 3-4. Localisation des stations virtuelles (étoiles rouges) élaborées pour le suivi des MES de l'Orénoque : en amont de la confluence Meta/Orénoque (Station MET) en amont de la confluence Apure/Orénoque (Station APU), en amont de la confluence Caura/Orénoque (Station CAU), à Musinacio (Station MUS), à Ciudad Bolivar (Station CB) et à Ciudad Guayana (Station CG) (image : Google Earth). 95

Figure 3-5. Séries des précipitations annuelles mesurées par les stations de Météo-France : A) sur le Maroni à Maripasoula (MPS), Grand-Santi (GS), Papaïchton (PPI) et Apatou (APT), B) sur l'Oyapock à Camopi (CM) et à Saint Georges de l'Oyapock (STG)..... 97

Figure 3-6. A) Sonde ARGOS SC 40 AG, B) Modèle ADCP Rio Grande 1200 kHz de Teledyne RDI (<http://www.rdinstruments.com/rio.aspx>), C) Echelle limnimétrique à Langa Tabiki sur le Maroni, D) Mesure des vitesses dans la section de Langa Tabiki avec l'ADCP (Avril 2013: $1\,757\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$). 98

Figure 3-7. A) ADCP RiverRay 600 kHz -Teledyne RDI, B) Jaugeage doppler dans la section de Ciudad Bolivar le 31 août 2015 ($Q = 63\,153\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) (Gallay *et al.*, 2015b). 99

Figure 3-8. A) Schéma d'une section verticale d'un fleuve et localisation des points de prélèvements d'eau sur quatre verticales (V1 à V4). Les échantillons sont prélevés en surface (S), au centre (C) et au fond (F) à 35 et 70% du lit du fleuve. B) Photographie des bouteilles de prélèvement utilisées en Guyane (à gauche) et au Venezuela (à droite) pour collecter de l'eau dans la section verticale..... 102

Figure 3-9. A) Sonde multi-paramètres YSI EXO2, B) mesures dans la colonne d'eau avec une corde graduée. 107

Figure 3-10. Interaction du rayon lumineux avec le milieu aquatique. Le rayon lumineux une fois en contact avec l'eau est : $\phi_a(\lambda)$ absorbé, $\phi_b(\lambda)$ réfléchi, $\phi_t\lambda$ transmis dans d'autres directions, sans varier sa direction (Espinoza Villar, 2013).....	111
Figure 3-11. Spectres d'absorption des principaux composants de l'eau (en m^{-1}) (Kirk, 1994).....	112
Figure 3-12. Radiomètres <i>in situ</i> A) TRiOS RAMSES-ARC : mesures de l'énergie radiante ; B) TRiOS RAMSES-ACC-VIS : mesures de l'énergie incidente (Espinoza Villar, 2013).....	114
Figure 3-13. A) Schéma de mesure de la réflectance (R_{0+}, θ, φ) de terrain et de l'interaction de la lumière avec la surface de l'eau. Irradiance (E_d), radiance du ciel (L_d) et radiance de l'eau (L_u). θ = angle de 35-40°. B) Installation du système de mesure sur la pirogue pour le Maroni et, C) sur un bateau en aluminium pour l'Oyapock avec préparation de la sonde multiparamétrique pour réaliser les mesures de turbidité et de MES en simultané.	114
Figure 3-14. Mesure de la réflectance <i>in situ</i> sur l'Orénoque avec un spectroradiomètre FieldSpec RS3 modèle 85703 : A) mesure de la radiance du ciel (L_d), B) mesure de la radiance de l'eau (L_u), C) mesure de l'irradiance (E_d) via un panneau portable blanc (Spectralon) en polytétrafluoroéthylène.	115
Figure 3-15. Représentation A) de la zone du pixel étudié et B) de la réponse des capteurs face à un pixel mixte (adaptées de : Espinoza Villar, 2013).....	117
Figure 3-16. Représentation : A) des masques de sélection des pixels sur l'Orénoque en amont du Meta et, B) sur le fleuve Maroni. Les diagrammes indiquent les pixels sélectionnés par le masque et les régions théoriques des <i>Endmembers</i> d'eau. Le cluster en bleu indique les pixels d'eau sélectionnés et le cluster en rouge montre les pixels de végétation automatiquement supprimés.	119
Figure 4-1. Evolution des surfaces minières : A) dans les bassins versants et sous-bassins versants du Maroni et de l'Oyapock. Les points noirs situent les principaux villages et les carrés blancs indiquent les stations de surveillance, B) en 2000, C) en 2008 et D) en 2014. Les couleurs représentent le pourcentage de surfaces impactées par les activités d'orpaillage et par sous-bassin versant.....	128
Figure 4-2. Hydrogramme et pluviogramme moyen mensuel estimés entre 1953 et aujourd'hui : aux stations hydrométriques principales de A) LT pour le Maroni et B) SM pour	

l'Oyapock ; aux stations pluviométriques de A) APT pour le Maroni et STG pour l'Oyapock.
..... 129

Figure 4-3. Débits journaliers pour la période 2000-2015 aux stations : A) de Langa Tabiki (LT : en gris) sur le Maroni et de Saut Maripa (SM : en noir) sur l'Oyapock et B) de Ciudad Bolivar sur l'Orénoque..... 131

Figure 4-4. Réflectances minima et maxima *in situ* des eaux et localisation des bandes MODIS (points bleus) dans le rouge (620-670 nm) et l'infrarouge (841-867 nm) mesurées entre MPS et APT sur le Maroni (courbe rouge), sur l'Oyapock à SM ainsi que sur la crique Baya sur le Maroni (courbe bleu) et sur l'Orénoque sur la grille MODIS de CB (courbe noire).... 134

Figure 4-5. Calibrations 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.
..... 135

Figure 4-6. Calibrations MES-réflectance *in situ* (points noirs) des données collectées de réflectance et de MES sur la grille MODIS de Ciudad Bolivar et, calibrations MES-réflectance MODIS (points blancs et ligne rouge) réalisées avec la série temporelle de MES du SNO-HYBAM à Ciudad Bolivar : A) dans la bande rouge et B) dans la bande infrarouge. Les équations correspondantes sont indiquées en dessous du graphique. 136

Figure 4-7. Corrélation MES-Réflectance MODIS dans la bande infrarouge, réalisée avec les séries temporelles de MES du SNO-HYBAM à Ciudad Guayana (Station CG), à Ciudad Bolivar (Station CB) et à Musinacio (Station MUS) et la série de MES de Mora *et al.* (2014) en amont de la confluence de la rivière Apure avec l'Orénoque (Station APU). Les barres représentent les écarts-types mensuels de MES et de réflectance..... 137

Figure 4-8. Comparaison des concentrations mensuelles de MES *in situ* (points blancs) avec celles obtenues via les satellites (lignes noires) : A) à SH sur le Maroni ainsi que, B) à SM sur l'Oyapock, pour la période 2000-2015. Les lignes en pointillés représentent les débits moyens mensuels aux stations principales de références..... 138

Figure 4-9. Evolution des MES (mg.l⁻¹) estimées via MODIS (lignes noires) aux sept stations virtuelles en amont de SH soit : A) LT, B) GR, C) BE, D) TPI, E) GS, F) KO, G) PPI pour la période 2000-2015. 139

Figure 4-10. Comparaison du débit moyen mensuel (tirets gris) à Ciudad Bolivar avec les concentrations mensuelles de MES (en mg.l⁻¹) *in situ* (points blancs) avec celles obtenues

via les satellites (points noirs) sur le cours de l'Orénoque : A) en amont de la confluence Meta/Orénoque (Station MET), B) en amont de la confluence Apure/Orénoque (Station APU), C) en amont de la confluence Caura/Orénoque (Station CAU), D) à Musinacio (Station MUS), D) à Ciudad Bolivar (Station CB) et E) à Ciudad Guayana (Station CG), pour la période 2001-2016..... 141

Figure 4-11. Hystérésis des charges sédimentaires avec les débits : A) sur le Maroni au SH en 2008, B) sur l'Oyapock au SM en 2007 et C) sur l'Orénoque à CB en 2010. 144

Figure 4-12. Corrélation entre les MES en surface mesurées au point SNO-HYBAM (en abscisses), avec la moyenne des valeurs mesurées dans la colonne d'eau (ASS en ordonnées) : A) sur le Maroni au SH entre 2014 et 2015, B) sur l'Oyapock au SM entre 2014 et 2015, C) sur l'Orénoque à CB entre 2009 et 2015. Les barres représentent les valeurs des écarts-types mesurés en surface et en profondeur. 145

Figure 4-13. Flux de MES mensuels moyens, minima et maxima (histogrammes) en fonction des débits (courbe noire) : A) du Maroni au SH, B) de l'Oyapock au SM, C) de l'Orénoque à CB. 146

Figure 4-14. A gauche : tendance du transport solide spécifique (carrés blancs) et de l'écoulement fluvial spécifique (barres grises), à droite : doubles masses cumulatives relatives à chaque station : A) entre 1985 et 2015 à SH pour le Maroni, B) de 1989 et 2015 à SM pour l'Oyapock, C) entre 2001 et 2014 à CB pour l'Orénoque..... 148

Figure 4-15. Comparaison de l'augmentation du transport solide spécifique annuel avec les surfaces minières, urbaines et agricoles des principaux villages du bassin versant du Maroni et de l'Oyapock. Les zones sont exprimées en pourcentage par rapport à la superficie totale du bassin versant. 150

Figure 4-16. Corrélations entre les concentrations COD, COP, NOP, Chl-a mesurées en surface au point de collecte d'eau du SNO-HYBAM (M1), avec les valeurs enregistrées en surface aux quatre points de mesures (respectivement de la rive droite vers la rive gauche à 166 m (RD), à 475 m (M1), à 772 m (M2) et à 940 m (RG). Les barres représentent les écarts-types en surface..... 153

Figure 5-1 : Estimation du transport solide spécifique (rapport entre les flux de matières transportées et la taille du bassin versant) et les flux de matières des fleuves français (Mt.an⁻¹). Le diamètre des cercles est proportionnel aux flux de matières (Delmas *et al.*, 2012)..... 165

Figure 5-2 : Evolution annuelle (2000-2015) et saisonnière de la turbidité mesurée à SH sur le Maroni. La montée des eaux correspond aux mois de décembre à mars ; les hautes eaux sont enregistrées d'avril à juin ; la descente des eaux à lieu en septembre et octobre ; les basses eaux correspondent aux mois d'octobre et de novembre. Le losange bleu correspond au débit moyen annuel. 171

Liste des tableaux

Tableau 3-1 : Nombre de données de MES et de turbidité collectées sur le Maroni, au Saut Hermina et sur l'Oyapock au Saut Maripa, en surface et dans la colonne d'eau durant cette étude (2014-2016), également en surface par le SNO-HYBAM (2004-2016) et par le PAG (2011-2014)..... 103

Tableau 3-2 : Nombre de données de MES collectées sur l'Orénoque aux stations de Ciudad Bolivar, Ciudad Guayana, Musinacio, Caura, Apure, Puerto Ayacucho et sur la grille MODIS, entre 2005 et 2016. 104

Tableau 3-3 : Nombre de données physico-chimiques collectées avec les sondes portatives WTW et la sonde EXO2, le long du Maroni et sur l'Oyapock au Saut Maripa, pendant les missions entre octobre 2014 et octobre 2016 ainsi que pendant la période 2004-2016 par le SNO-HYBAM..... 108

Tableau 4-1 : Surfaces urbaines et agricoles en hectares (ha) et en pourcentages (%) dans le bassin versant du Maroni sur les parts surinamaïse (SU) et française (FG)..... 126

Tableau 4-2 : Surfaces urbaines et agricoles en hectares (ha) et en pourcentages (%) dans le bassin versant de l'Oyapock sur les parts française (FG) et brésilienne (BR)..... 127

Tableau 4-3 : Surfaces minières en hectares (ha) et en pourcentages (%) dans le bassin versant de l'Oyapock et sur les parts française (FG) et brésilienne (BR)..... 127

Tableau 4-4 : Gammes de pH, CE, T°C et oxygène dissous (ODO en %) mesurées sur le Maroni à SH, sur l'Oyapock à SM et sur l'Orénoque à CB entre 2004 et 2016. 132

Tableau 4-5 : Gammes de MES et de turbidités journalières mesurées *in situ* sur le Maroni, sur l'Oyapock et sur l'Orénoque entre 2004 et 2016..... 133

Tableau 4-6 : Evolution des estimations des concentrations moyennes, minima et maxima de MES (mg.l⁻¹) collectées sur le Maroni aux 8 stations virtuelles MODIS d'amont vers l'aval et pour la période 2000-2015..... 140

Tableau 4-7 : Comparaison de l'évolution des estimations, des concentrations moyennes mensuelles de MES (mg.l⁻¹) *in situ* et MODIS, collectées sur l'Orénoque aux 6 stations virtuelles MODIS d'amont vers l'aval. 142

Tableau 4-8 : Matrice des corrélations de Spearman dans les bassins versants A) du Maroni et B) de l'Oyapock : transport solide spécifique (Sy), Matières en Suspension (MES)

moyenne, maxima et minima annuelles, débit maximum annuel (Q_{max}), débit minimum annuel (Q_{min}), débit moyen annuel divisé par le débit maximum annuel (Q_{pk}), écoulement spécifique annuel moyen (R), précipitations moyennes annuelles (P) pour toutes les stations (APT, GS, PPI, MPS dans le bassin du Maroni ; SM et CM dans le bassin de l'Oyapock). 149

Tableau 4-9 : Valeurs moyennes et extrêmes des concentrations en MES, COP, NOP, COD, COT, Chl-a pour les années 2014-2016 et mesurées au point de collecte d'eau du SNO-HYBAM (M1). Rapports C/Chl-a et C/N ainsi que COP et NOP exprimées en pourcentage de MES, à SH sur le Maroni et à SM sur l'Oyapock..... 152

Tableau 4-10 : Flux spécifiques de COD, COP, COT, NOP au Saut Hermina sur le Maroni et au Saut Maripa sur l'Oyapock..... 154

Tableau 5-1 : Comparaison des débits des principaux fleuves guyanais avec ceux de la France métropolitaine et des plus grands fleuves au monde en terme de débits.*: valeurs estimées à partir des débits spécifiques issus de Delmas *et al.* (2012). **valeurs estimées à partir des débits moyens..... 162

Tableau 5-2 : Comparaison des flux de MES et du transport solide spécifique des principaux fleuves guyanais avec ceux de la France et des plus grands fleuves au monde. *: valeurs estimées à partir du transport solide spécifique issu de Delmas *et al.* (2012). **valeurs estimées à partir des débits solides moyens. 164

Tableau 5-3 : Classes d'état et valeurs seuils des paramètres physico-chimiques soutenant la biologie au niveau national et décrites dans l'arrêté du 25 janvier 2010. Adaptation France (Ministère de l'Ecologie, 2016). * : pas de valeurs établies..... 167

Tableau 5-4 : Classes d'état et valeurs seuils des paramètres physico-chimiques soutenant la biologie, adaptation Guyane (DEAL Guyane, 2014)..... 167

Tableau 5-5 : Fréquences en pourcentages des concentrations de MES (en $mg.l^{-1}$) et de Turbidité (en NTU) sur l'Oyapock à Saut Maripa, collectées mensuellement sur la période 2004-2015. Les valeurs sont issues des données *in situ*. 169

Tableau 5-6 : Fréquences en pourcentage des concentrations de MES (en $mg.l^{-1}$) et de turbidité (en NTU) sur le Maroni à la station de Saut Hermina, sur la période 1985-2015. Les valeurs de 2000 à 2015 sont issues des données mesurées *in situ* et estimées par télédétection. Les valeurs de 1985 sont issues de Jouanneau et Pujos (1988). 170

Tableau 5-7 : Classes de seuils de turbidité (en NTU) selon les périodes du cycle hydrologique pour la période 2000-2005 sur le Maroni à SH. La montée des eaux correspond aux mois de décembre à mars ; les hautes eaux sont enregistrées des mois d'avril au mois de juin ; la descente des eaux a lieu en septembre et octobre ; les basses eaux correspondent aux mois d'octobre et de novembre.....	172
Tableau 5-8 : Statistiques des concentrations en COD (en mgC.l ⁻¹), mesurées entre 2004 et 2016, sur le Maroni (SH) et sur l'Oyapock (SM).	173
Tableau 5-9 : Fréquences annuelles et en pourcentage des concentrations de COD, mesurées sur la période 2004-2016, à SH sur le Maroni et à SM sur l'Oyapock.	173
Tableau 5-10 : Classes de seuils des concentrations de COD (en mgC.l ⁻¹) des données de 2004 à 2015 de l'Oyapock à SM: pour la montée de eaux (décembre à mars), les hautes eaux (de avril à juin), la descente des eaux (en septembre et octobre), et les basses eaux (de octobre et à novembre).....	174
Tableau 5-11 : Statistiques des concentrations des COP (en mgC.l ⁻¹), mesurées entre Octobre 2014 et Octobre 2016, sur le Maroni (SH) et sur l'Oyapock (SM) et classes de qualité proposées à partir des données de terrain.....	174
Tableau 5-12 : Statistique des concentrations en NOP (en mgN.l ⁻¹), mesurées entre Octobre 2014 et Octobre 2016, sur le Maroni (SH) et sur l'Oyapock (SM) et classes de qualité proposées à partir des données de terrain.....	176
Tableau 5-13 : Statistiques des concentrations en chlorophylle a (en µg.l ⁻¹), mesurées entre Octobre 2014 et Octobre 2016, sur le Maroni (SH) et sur l'Oyapock (SM) et classes de qualité proposées à partir des données de terrain.....	178
Tableau 5-14 : Statistiques du rapport C/N, mesuré entre Octobre 2014 et Octobre 2016, sur le Maroni (SH) et sur l'Oyapock (SM) et classes de qualité proposées à partir des données de terrain de carbone et d'azote particulaire.	179
Tableau 5-15 : Statistiques des valeurs de pH, mesurées entre 2004 et 2016 sur le Maroni (SH) et sur l'Oyapock (SM).....	181
Tableau 5-16 : Fréquences des données mensuelles de pH en pourcentages collectées sur le Maroni à SH et sur l'Oyapock à SM, sur la période 2004 2016.	181
Tableau 5-17 : Statistiques des données de conductivité de l'eau (µS.cm ⁻¹ à 25°C), mesurées entre 2004 et 2016 sur le Maroni (SH) et sur l'Oyapock (SM).	182

Tableau 5-18 : Fréquences en pourcentages des données mensuelles de conductivité électrique (en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) collectées sur le Maroni à SH et sur l'Oyapock à SM, sur la période 2004-2015.....	183
---	-----

Plan de la thèse

Cette thèse est organisée autour de 5 chapitres qui ont fait l'objet de 3 publications scientifiques présentées en annexes de ce document.

Le Chapitre 1 - situe le contexte au moment où cette étude a débuté. En ce sens, il décrit les vrais enjeux futurs pour s'adapter aux changements locaux (besoin croissant en énergie, augmentation de l'occupation des sols et des activités d'extraction d'or) et globaux (climat) ainsi que les moyens mis en œuvre par les pays pour lutter contre la pollution des eaux.

Le Chapitre 2 - dresse un état des connaissances de l'histoire géologique et des mécanismes climatiques communs des zones d'étude puis décrit les spécificités de chaque bassin versant étudié.

Le Chapitre 3 présente les différentes méthodes appliquées durant cette étude : sur le terrain (prélèvement d'eau, déploiement des sondes multi-paramètres), en laboratoire (paramètres physico-chimiques et chimiques) puis par télédétection pour la mesure des Matières En Suspension (propriétés optiques de l'eau, mesure de la réflectance *in situ* et MODIS, calibration des satellites). Il décrit ensuite les approches statistiques utilisées pour les calculs de flux, pour l'estimation des tendances à long terme (test non-paramétrique de Mann-Kendall), pour la détection de "changement" ou de "non changement" à un moment précis sur les données en continu (test non paramétrique de Pettitt) et enfin pour l'estimation des corrélations (Spearman) entre les variables qui pourraient être explicatives et/ou prédictives.

Le Chapitre 4 - présente les résultats de la variabilité spatiale et temporelle des Matières En Suspension (MES) et des flux de matières dans les bassins versants du Maroni et de l'Oyapock en Guyane Française, via des mesures *in situ* et des mesures de télédétection. Il met en évidence les tendances à long terme des charges de MES et leurs relations avec l'occupation des sols, les précipitations et les régimes hydrologiques.

Il traite dans les bassins du Maroni et de l'Oyapock en Guyane, de la variabilité des concentrations en Carbone Organique Dissous (COD), Carbone Organique Particulaire (COP) ainsi que de l'Azote Organique Particulaire (NOP) et de la Chlorophylle *a* (Chl-*a*). Il montre les

similarités entre ces deux fleuves ainsi que les différences en termes de charge minérale et organique, en relation avec l'occupation des sols.

Il traite également via des mesures *in situ* et de télédétection, de la variabilité spatiale et temporelle des MES, le long du cours principal de l'Orénoque au Venezuela et à proximité des grands tributaires ainsi qu'à quelques kilomètres de son grand delta. Il présente également les tendances des flux de matières à sa principale station de Ciudad Bolivar.

Le Chapitre 5 - est un exposé général qui rappelle tout d'abord les principaux résultats, puis traite de la pertinence et de l'efficacité d'utilisation des images satellites des capteurs MODIS pour le suivi des MES. Puis, sont comparés les flux d'eau et de matières des fleuves de Guyane Française avec ceux de la France métropolitaine et des principaux grands bassins versants tropicaux. Il propose ensuite une analyse des paramètres physico-chimiques et biochimiques ainsi qu'une proposition de seuils limite en lien avec la qualité des eaux. Enfin, les conséquences d'un changement de qualité de l'eau des fleuves pour l'économie, la santé et l'environnement sont rappelées.

L'ensemble de ces travaux est suivi d'une **conclusion générale** qui rappelle les principaux résultats, puis d'une **liste d'annexes**.

Chapitre 1 : Introduction générale

Cette thèse vise à démontrer l'importance d'une exploitation parallèle, des données collectées dans le milieu et des images satellitaires pour caractériser les masses d'eau. L'objectif scientifique est de quantifier, les flux de matières transportées par les hydrosystèmes fluviaux et leur évolution dans le temps et dans l'espace avec finalité sociétale de contribuer à leur protection et cela indépendamment du degré d'anthropisation de leur bassin versant.

Les hydrosystèmes fluviaux (système ouvert influencé par la dynamique fluviale) sont caractérisés par un ensemble d'interactions longitudinales (gradient amont-aval bien connu), transversales (diversité des écosystèmes notamment dans les plaines alluviales) et verticales (étagement des écosystèmes : eaux souterraines et de surface). Les écosystèmes (communauté de plantes et d'organismes) qui s'y développent entretiennent de nombreux échanges d'énergies et de matières et sont dépendants les uns des autres (Amoros and Petts, 1993). A l'échelle temporelle, les interrelations entre chaque écosystème unissent les mécanismes de la dynamique fluviale (débits liquides et solides, processus d'érosion, sédimentations ; formes des chenaux, ...) aux processus biologiques (stratégies d'adaptation, de prédation, compétition, production de biomasse, ...) ce qui explique la répartition de la flore et de la faune et leurs modifications au cours du temps le long du gradient amont-aval. L'eau apparaît donc parfois comme une ressource ou une contrainte (courant, profondeur, durée d'inondation) déterminante pour les divers peuplements et le fonctionnement écologique assurant ainsi la stabilité de l'hydrosystème par ce jeu d'équilibre dynamique. L'hydrosystème fluvial est donc par définition un système dynamique et en équilibre car il s'ajuste aux changements.

Les eaux fluviales sont composées d'une fraction dissoute ($< 0,2 \mu\text{m}$) et d'une fraction particulaire obtenue par filtration de l'échantillon d'eau et qui se subdivise en une fraction grossière assimilée aux sables ($> 50 \mu\text{m}$) et une fraction plus fine comprise entre $0,2$ et $50 \mu\text{m}$ (**Figure 1-1**). Ce matériel particulaire est le résultat de processus physiques et chimiques qui se déroulent au sein des bassins versants et auxquels se succèdent des phases d'érosion, de transport et de dépôt (Amoros and Petts, 1993; Malavoi *et al.*, 2003). Ces fractions sont dépendantes dans des conditions naturelles (sans modifications anthropiques) de la taille du bassin versant, du relief, de l'activité tectonique, de la couverture végétale, des moyennes de

précipitations annuelles, de la température de l'eau et des débits fluviaux (Walling and B.W., 1996).

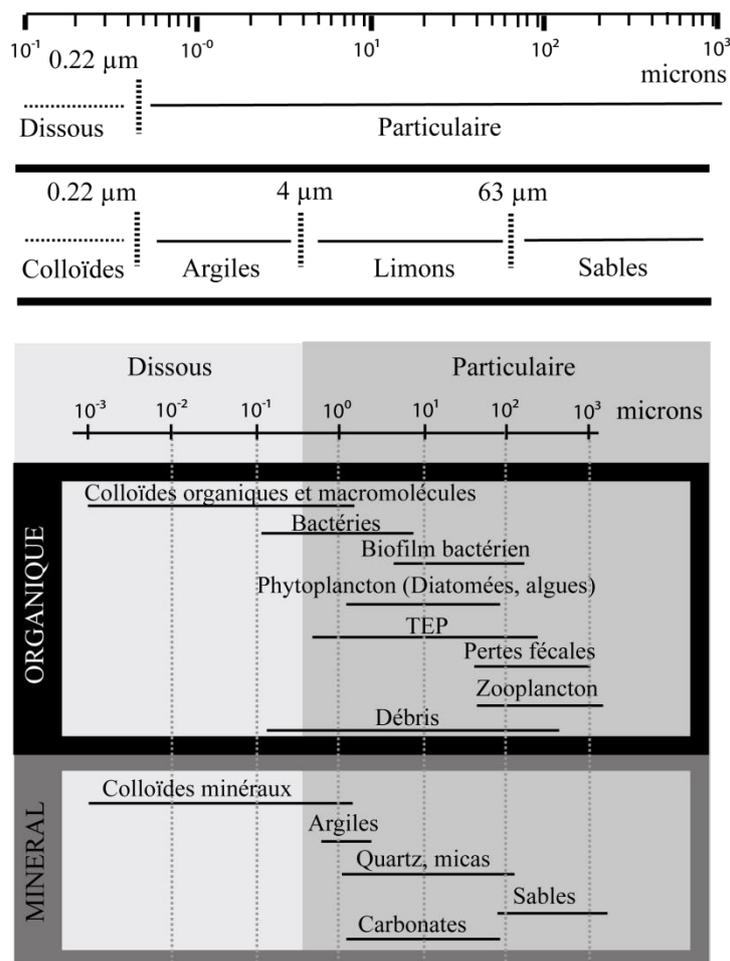


Figure 1-1. Classification des tailles de matières dissoutes et particulaires, organiques ou minérales transportées par les cours d'eau (Verney, 2006).

L'érosion solide spécifique (quantité de matières par unité de surface et unité de temps) est particulièrement importante quand elle est associée aux hautes montagnes des climats semi-arides et humides (Himalaya, Rocheuses, Cordillère des Andes, Chaîne du Pacifique, Massif Ethiopien), tandis que les valeurs basses sont souvent associées aux plaines, aux zones désertiques et aux régions glaciaires (**Figure 1-2**). Lors du transport des sédiments, des berges vers les cours d'eau et, de l'amont vers l'aval et jusqu'à l'océan, on parle de transport solide spécifique (flux de matières par unité de surface et unité de temps). Un tri se fait successivement en lien avec la pente du lit du fleuve, les vitesses d'eau et le débit (Amoros and Petts, 1993). En amont, les petits cours d'eau souvent en forte pente, d'un débit faible et d'un courant plus fort, transportent une charge plus grossière et souvent des blocs sur lesquels quelques mousses aquatiques peuvent adhérer, c'est la "zone de production". Dans la partie intermédiaire, des

graviers et des galets succèdent aux blocs dans les cours d'eau un peu plus large d'un débit un peu plus élevé et d'un courant plus lent. Au fur et à mesure, à l'aval, la granulométrie s'affine, la pente et les vitesses diminuent, le débit et la largeur du cours d'eau augmentent. Les dépôts sont formés de sables, de limons et d'argiles qui peuvent être remis en suspension dès les premières pluies. Les MES après transport peuvent également se déposer dans les zones de piedmont généralement des plaines alluviales qui sont des "zones de stockage". Dans les grands hydrosystèmes comme par exemple celui de l'Amazone elles peuvent s'y accumuler, sur quelques milliers d'années, avant d'être transférées à l'océan (Aalto *et al.*, 2003a; Aalto *et al.*, 2003b; Bourgoin *et al.*, 2007; Laraque *et al.*, 2009).

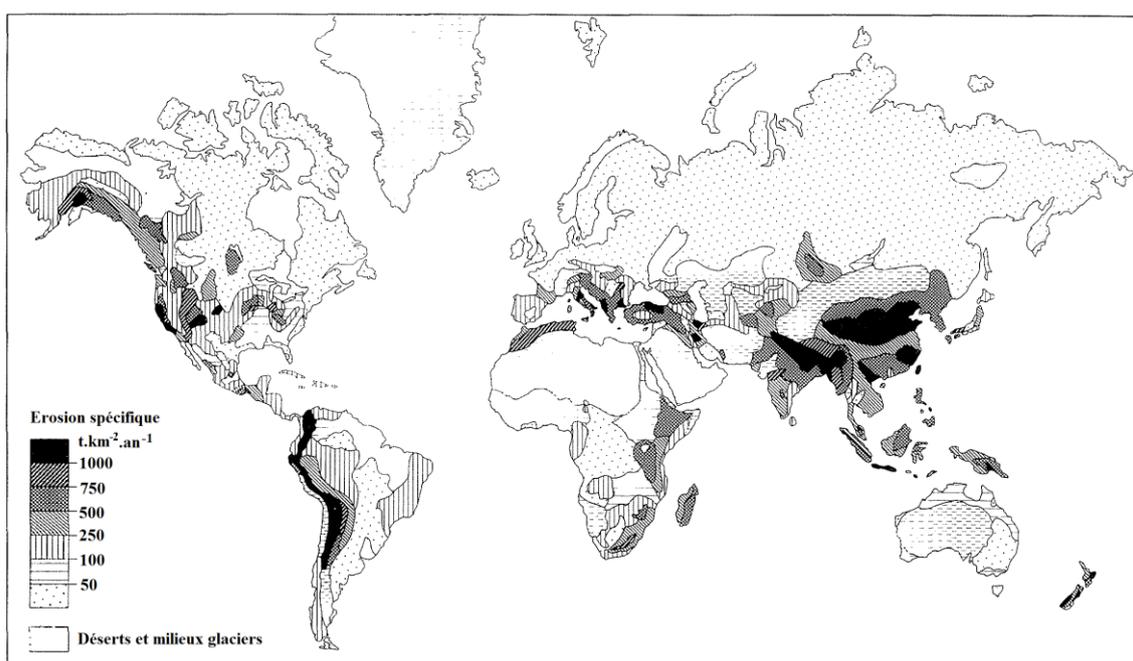


Figure 1-2. Cartographie de l'érosion spécifique au niveau global et dans des conditions naturelles (Walling and B.W., 1996)

Une analyse multi-échelle spatiale et temporelle permet alors d'observer et d'expliquer comment les interventions humaines peuvent produire des impacts (à court terme et parfois sur plus d'un siècle) sur ces écosystèmes, puis de déterminer leur résilience dans l'hydrosystème fluvial. Les interventions humaines peuvent modifier les concentrations de matières entraînant des effets sur les peuplements, l'écologie des milieux aquatiques et la qualité de l'eau. Or depuis toujours, l'homme dépend, pour sa vie et pour le développement de ses activités, de cette ressource (Mooney *et al.*, 2005). Ces dernières années, les ressources en eau sont devenues un problème régional mais aussi global. Ses quantités et qualités ont fortement diminué et elles sont souvent au centre de conflits géopolitiques majeurs vulgarisés et médiatisés sous l'expression de "la guerre de l'eau" (Poff *et al.*, 2003). En effet, seulement 2,5 % (35 millions

de km³) de l'eau disponible sur terre est douce et à l'état liquide (Shiklomanov, 1998) dont 0,26 % est présent au sein des fleuves et des rivières, des lacs et des réservoirs. Enfin, seulement 0,01 % est utilisable pour la consommation humaine (Restrepo, 2005). Or, l'augmentation de la population mondiale et les besoins humains en termes d'infrastructures (urbanisation, industries, agriculture ...) sont de plus en plus importants ; des activités qui sont des sources de menace pour les systèmes fluviaux et par voie de conséquence le bien-être de la population mondiale (FAO, 2015). Plus d'un milliard de personnes manque d'eau et plus de deux milliards n'ont pas accès à l'assainissement (Mooney *et al.*, 2005). Pour cette raison, la qualité de l'eau est au centre des préoccupations des gouvernements et des organisations telles que l'Organisation des Nations unies pour l'Education, la Science et la Culture (UNESCO), le programme des Nations Unies Pour l'Environnement (UNEP), l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (IAHS), entre autres.

En effet, il n'existe que très peu de rivières dans le monde qui n'ont pas été contaminées ou impactées par l'homme (Wohl and Merritts, 2007). De tous les sous-continents, l'Amérique du Sud est celui où la population dispose par habitant de la plus grande quantité d'eau (7,6 10⁶ m³/an/pers.), répartie principalement dans le nord (Shiklomanov, 1998). La Guyane occupe le troisième rang (800 000 m³/an/pers.) dans le monde après l'Alaska et le Groenland, suivi du Guyana (339 000 m³/an/pers.) et du Suriname (200 000 m³/an/pers.) (FAO, 2015). Comparativement aux autres pays moins favorisés ; aux Etats Unis d'Amérique 10 000 m³/an/pers. par personne sont disponibles contre seulement 4000 m³/an/pers. en France, 2000 m³/an/pers. en Inde, 1000 m³/an/pers. en Egypte et 0 m³/an/pers. en Israël et aux Emirats Arabes (Figure 1-3).

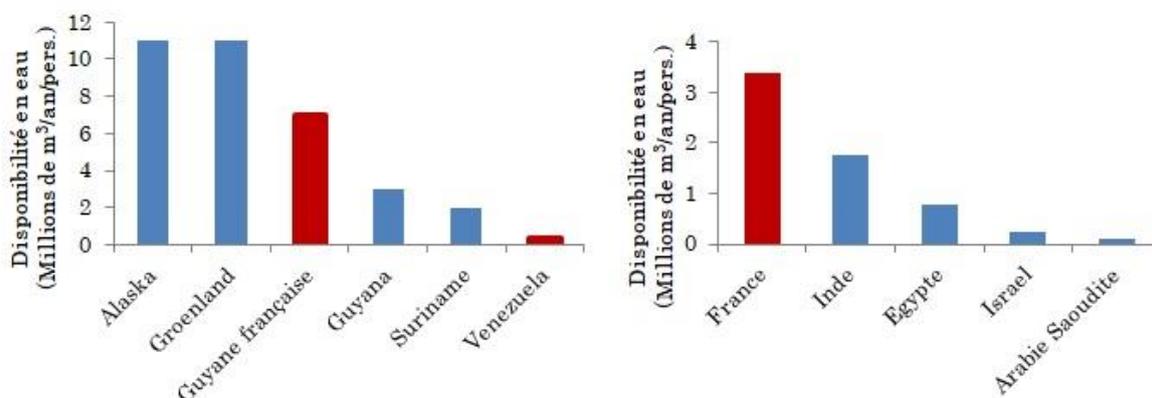


Figure 1-3. Eau douce disponible à l'état liquide dans le monde.

Pourtant, dans ces régions d'Amérique du Sud à priori favorisées, il existe de récents exemples d'impacts de l'homme sur la ressource en eau tel que l'événement de novembre 2015 relatif à la rupture de barrage dans le Minas Gerais au sud-ouest brésilien qui a entraîné le déversement d'un torrent de boue toxique résultant de l'exploitation minière dans les villages et sur les terres agricoles. De même, les fuites pétrolières récurrentes dans les fleuves du Chiriaco et Marañon au Pérou ont nécessité la déclaration d'un état d'urgence sanitaire. Enfin la construction d'une série de méga barrages dans le Bélo Monte est planifiée et entraînera des submersions locales et durables impliquant, des déplacements des populations amérindiennes y vivant, des zones de manque d'eau voire de sécheresse aux endroits les plus reculés, une importante réduction de biodiversité, la disparition d'espèces rares comme la rétention des sédiments dans les réservoirs. On peut également citer l'augmentation constante des activités minières dans la zone du bouclier des Guyanes et particulièrement au Guyana (Howard, 2010; Clifford, 2011; Howard *et al.*, 2011; Hennessy, 2015; Rahm *et al.*, 2015). Ces exploitations débutent par des déforestations suivies par des remaniements des sols conduisant à accroître la turbidité des eaux qui sont en outre souvent soumises, dans le cas d'exploitation d'or alluvial, à des rejets de mercure.

1.1 Contexte de l'étude

Les vrais enjeux futurs sont de s'adapter aux changements globaux et locaux et de mettre en place des moyens de contrôle et de surveillance efficaces pour lutter contre la pollution des eaux. Les sous-sections suivantes décrivent les principales menaces pour lesquelles il est nécessaire de prendre dans l'urgence des mesures correctives et/ou conservatoires.

1.1.1 Le changement climatique

Parmi les problèmes mondiaux d'intérêt local, le changement climatique préoccupe les scientifiques, les partenaires et acteurs politiques, les institutions gouvernementales et intergouvernementales (GIEC). En effet, les événements météorologiques conditionnent la genèse et la transmission des flux d'eau et de matières particulières dont dépendent l'industrie, l'agriculture et qui de ce fait peuvent avoir un impact majeur sur l'économie, la croissance, le bien être, la santé des pays et leurs populations. Plusieurs scénarios du changement climatique sont proposés. L'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone (CO²) dans l'atmosphère entrainerait : (i) des augmentations générales à l'échelle mondiale de la température (T°C) et de l'humidité de l'air et donc d'une intensification des effets de serre

s'accompagnant d'une évapotranspiration (ET) et de précipitations (P) plus intenses générant une augmentation des débits (Q) fluviaux moyens (Manabe *et al.*, 2004; Milly *et al.*, 2005), (ii) une intensification de T°C et un ralentissement de la circulation des masses d'eau atmosphérique renforçant les déséquilibres à l'échelle de la planète s'accompagnant d'une intensification et d'une grande récurrence des événements extrêmes sources de dérèglements des cycles hydrologiques (Planton *et al.*, 2005).

Des écoulements extrêmes sont observés partout dans le monde avec des incidences qualitatives et quantitatives sur les ressources en eau. Milliman *et al.* (2008) ont cartographié à l'échelle mondiale les changements de pluies et de débits de 137 rivières réparties dans le monde entre 1951 et 2000. Les débits cumulatifs de 97 d'entre elles ont montré des variations pour 48 supérieures à 30 % et 18 supérieures à 50 %. De plus, 40 % des 97 rivières qui ont vu leurs débits cumulatifs changer, reflètent les précipitations en première réponse du signal atmosphérique-océanique alors que 60 % sont dus à l'irrigation, la construction de barrages pour l'hydroélectricité ou la régulation des débits, les détournements de rivières, la construction de digues et la chenalisation ainsi que les citernes le long des cours d'eau.

S'adapter à ces changements nécessite d'observer les variations des écoulements d'eau. Les tendances évolutives des niveaux d'eau des rivières, des lacs et des nappes phréatiques sont alors mesurées et renseignées par les états pour suivre l'augmentation ou la diminution à long terme des débits annuels. Cependant, les moyens de surveillance de terrain (équipement et maintenance) sont chers, voire inabordables pour de nombreux pays. En outre la répartition géographique des stations de mesure est plus déterminée par des considérations de pragmatisme que de nature strictement cognitive.

Dans les régions du bouclier des Guyanes, peu d'études sur les relations pluies-débits et le changement climatique ont été réalisées pour les petits cours d'eau. A contrario, le climat en Amazonie fait l'objet de nombreuses recherches. Plusieurs observatoires essaient de comprendre les interrelations entre les températures de l'océan Pacifique, les phénomènes mondiaux El Nino et La Nina, le renforcement des cellules de Walker et Hadley avec les débits de l'Amazone et les changements de l'occupation des sols. C'est le cas par exemple, des observatoires SNO-HYBAM (Service d'Observation de la géodynamique, de l'HYdrologie et de la Biogéochimie dans les Bassins de l'AMazone, de l'Orénoque et du Congo) et LBA (Large-Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia). Ces recherches ont mené à de nombreuses publications (Ronchail *et al.*, 2002; Silva Dias *et al.*, 2002; Adler *et al.*, 2003; Labat *et al.*, 2004; Labat *et al.*, 2004; Betts *et al.*, 2005; Labat *et al.*, 2005; Ronchail *et al.*, 2005; Betts

et al., 2009; Espinoza Villar *et al.*, 2009; Labat *et al.*, 2012; Espinoza *et al.*, 2013; Frappart *et al.*, 2013; Jhan Carlo *et al.*, 2014).

1.1.2 L'augmentation de la déforestation

Le changement d'occupation des sols joue un rôle majeur sur les variations des débits moyens liquides et solides ainsi que sur l'écoulement des eaux au sein des bassins versants. En Amazonie, *Coe et al.* (2009) ont comparé les surfaces déforestées avec les hauteurs des précipitations et les débits des principaux fleuves du bassin amazonien. Leurs résultats ont montré que la moitié des augmentations des débits est expliquée par une hausse des précipitations et l'autre moitié par la déforestation et la diminution de l'évapotranspiration (*Costa et al.*, 2003; *Coe et al.*, 2009). Ainsi à une échelle locale, la déforestation entraîne une diminution de l'évapotranspiration des sols, une augmentation de l'écoulement d'eau lorsqu'il pleut sur les sols ainsi qu'une augmentation des débits. A une échelle plus large, la déforestation entraîne une diminution des précipitations s'accompagnant d'une réduction des écoulements d'eau sur les sols, et donc du débit des rivières et plus globalement des disponibilités en eau. Aussi, les bassins versants de l'Amazonie qui ont été soumis à une déforestation importante ont présenté une augmentation des débits des rivières les drainant. A l'inverse lorsque la couverture végétale a été à peu près conservée, les débits n'ont pas montré de variation significative. Le fleuve Tocantins dont la taille du bassin versant est de 370 000 km² et l'Araguaia, son principal affluent, ont présenté une augmentation de 25 % de leurs débits (1915-2000) à leurs stations principales hydrométriques alors que les volumes de précipitations reçues sont restés sensiblement constants. Ce bassin de l'Amazonie est le plus perturbé avec plus de 58 % de forêt disparues pour l'agriculture et une prévision de 98 % aux environs de 2050. Au contraire, les sols des bassins versants Xingu et Tapajos sont peu déforestés (< 25 % mais avec une prévision de 66 % aux environs de 2050) et n'ont pas eu de changement significatif. Ce constat met en évidence le rôle et l'intérêt des aires protégées qui s'avèrent être une stratégie efficace pour s'opposer ou tout au moins limiter les déforestations.

De plus, la déforestation entraîne des remaniements des sols qui modifient la géomorphologie fluviale et l'organisation des paysages. La réponse géomorphologique à la déforestation intense dans le bassin de l'Araguaia en Amazonie Brésilienne est un dépôt de 233 Mt de sédiments le long des 570 km du fleuve, avec une augmentation des flux totaux transportés (*Latrubesse et al.*, 2009). Dès les premières pluies les sols sont lessivés. Les particules sont transportées par gravité le long des pentes et s'accumulent dans les zones

humides de bas fond, les vallées où elles contribuent à l'augmentation de la turbidité des eaux de surface et à la diminution des niveaux d'eau.

Par ailleurs, la chute des arbres au sein des forêts ou le long des berges des cours d'eau entraîne des accumulations de carbone sur les sols qui constituent des sources de composés organiques à divers stades de décomposition/minéralisation. Ces matières organiques, en se décomposant apportent des substances hydrocarbonées (sucres, amidon, cellulose, lignine, résines), des matières azotées sous forme de protéines et des sels minéraux libres (calcium, magnésium, potassium, sodium, ...) aux sols. Aux premières pluies, ces éléments sont libérés et viennent enrichir en nutriments les eaux des fleuves entraînant des conséquences sur la transparence de l'eau, la qualité de l'eau, sur les quantités d'oxygène disponibles et sur le réseau trophique.

1.1.3 L'augmentation des activités minières

Parmi les activités humaines à fort impact sur les flux de matières des rivières, on peut citer l'exemple de la recrudescence des activités d'extraction d'or due à une forte progression des cours de l'or. La valeur est passée de moins de 250 USD / once en 2000 à près de 1300 USD en 2013, ce qui a permis une meilleure rentabilité des gisements de faible teneur, établissant ainsi l'extraction de l'or comme activité économique émergente dans les régions de production aurifère.

En Amérique du Sud (**Figure 1-4**), 90 % de la déforestation pour les zones minières s'organisent autour de quatre zones majeures : 41 % étant localisés dans le bouclier des Guyanes (soit 684 km² entre 2001-2013) et principalement au Guyana et au Suriname ; 28 % sont localisés dans le sud-ouest du bassin amazonien ; 11 % sur les rivières Tapajos-Xingu ; 9 % dans la rivière Magdalena en Colombie ([Alvarez-Berríos and Aide, 2015](#)).

L'exploitation minière contamine les sources d'eau potable avec une plus grande quantité de sédiments, les cours d'eaux sont détournés et génèrent des inondations et des changements de paysages. Les communautés qui sont exposées perdent parfois leurs récoltes, et sont affectées par des niveaux de contamination qui les empêchent de consommer l'eau des affluents.

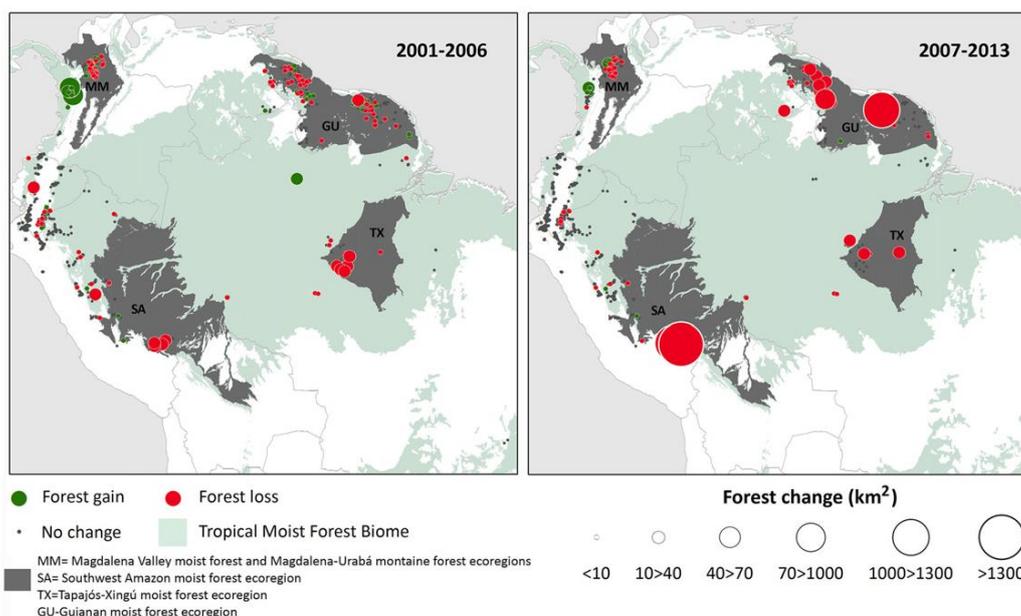


Figure 1-4. Déforestation impliquée par l'augmentation des sites miniers en Amazonie, pour la période 2001-2006 et 2007-2013. Les points verts et rouges représentent respectivement l'augmentation ou la diminution du couvert forestier. Les zones grises sont celles qui ont montré un changement de couverture du sol important (Alvarez-Berríos and Aide, 2015)

Au Brésil, il existe peu d'information sur les impacts des activités minières dans les rivières Tapajós-Xingú. Néanmoins, on sait que ces dernières n'ont pas vu de changement important sur leurs débits ces dernières années et sont considérées comme faiblement impactées par la déforestation (Costa *et al.*, 2003; Coe *et al.*, 2009). Au contraire en Colombie (**Figure 1-5**), cinq fleuves sont concernés par les activités minières (Rio Rancheria, Rio Sambingo, Rio Caqueta, Rio Muna, Rio San Jorge)¹.



Figure 1-5. Impacts paysagers et hydriques des activités d'extraction d'or dans les cours d'eau de Colombie (Photo : Tercera División del Ejército)

¹ <http://www.contagioradio.com/5-rios-colombia-gravemente-afectados-la-mineria-articulo-35378/>

En Guyane Française, la montée croissante de l'extraction de l'or dans l'intérieur des terres depuis les années 1990 inquiète les populations locales et les autorités françaises en charge de la gestion de la forêt, de l'écologie et de l'environnement. En 2012 et 2014, deux rapports alarmants (Debarros and Joubert, 2010; Rahm *et al.*, 2015) dénoncent leur évolution entre 2000 et 2014 (**Figure 1-6**). En 2014, 160 909 ha sont déforestés sur les quatre principaux territoires du bouclier des Guyanes : le Guyana (80 770 ha), le Suriname (53 668 ha), la Guyane Française (24 282 ha) et la région de l'Amapa au Brésil (2189 ha). Plusieurs milliers de chercheurs d'or, les "garimpeiros", exploitent le sol et le sous-sol dans des conditions souvent précaires, parfois non autorisées et saccagent l'une des plus intactes forêts équatoriales du monde avec une haute biodiversité terrestre (Mittermeier *et al.*, 1998) et aquatique.

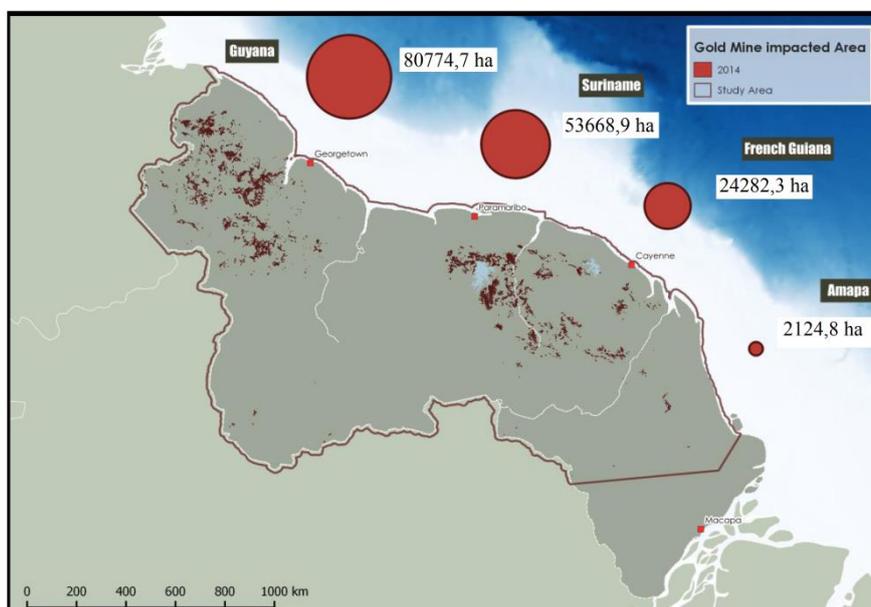


Figure 1-6. Impact des activités d'orpaillage sur la couverture forestière dans le bouclier des Guyanes en 2014 (Rahm *et al.*, 2015)

De très nombreux partenaires locaux et nationaux (Office National des Forêts (ONF), World Wildlife Fund (WWF), Parc amazonien de Guyane (PAG), Police au frontière (PAF), Préfecture de Guyane, Office de l'Eau de Guyane (OEG), Police de l'Eau de Guyane, Région Guyane (CTG), sont mobilisés avec comme objectif d'éradiquer l'orpaillage illégal : une activité qui présente en outre de la déforestation et de la contamination des eaux, des incidences sociétales (violence, insécurité, prostitution,...) et sanitaires très préoccupantes. Le territoire du PAG d'une superficie de 20 300 km² créé en 2006 n'est pas épargné par ces activités illégales, malgré un engagement croissant des moyens de l'état dont l'augmentation de la surveillance hélicoptérée (1680 heures en 2009, 1750 heures en 2011, 1890 heures en 2013) et des missions

"coup de poing" "Anaconda" (113 heures en 2007) et "Harpie" (186 heures en 2009, 180 heures en 2011, 241 heures en 2013) (ONF, 2013c).

Les différences de politiques entre le Brésil, le Suriname et la Guyane empêchent une lutte efficace contre cette activité. En effet, une diminution des surfaces déforestées pour l'orpaillage en Guyane et au Brésil en Amapá a été observée entre 2008 et 2014 et au contraire on constate une importante hausse au Suriname durant cette période due à une légalisation massive de cette activité en 2011. Les politiques différentes et donc l'absence de concertation de ces pays contribuent probablement à la déforestation et à la contamination des milieux aquatiques. La surveillance de l'orpaillage et de la déforestation par télédétection revêt alors tout son intérêt et s'organise peu à peu (Gond and Brognoli, 2005; Coppel *et al.*, 2008; Joubert *et al.*, 2008; Debarros and Joubert, 2010; World Wildlife Fund, 2013; Rahm *et al.*, 2015). Enfin, le suivi des risques et des contaminations de l'eau, liées aux activités de déforestation et minières, est alors indispensable afin de les anticiper et de les prendre en charge.

1.1.4 Un besoin croissant en énergie et sédiments

Les changements climatiques n'expliquent pas toujours à eux seuls les diminutions ou les augmentations des débits moyens des fleuves et de leurs charges sédimentaires associées, ni les évolutions de leur régime de variations saisonnières. L'augmentation du nombre des barrages et la chenalisation des cours d'eau ont aussi des conséquences sur ces deux paramètres de contrôle majeur (débit, charge) de la dynamique fluviale. Le nombre de barrages dans le monde augmente depuis 1960, de 1 % par an (Downing *et al.*, 2006) et la régulation du débit affecte tous les processus qui opèrent au sein des hydrosystèmes fluviaux. En effet, toute modification de la structure d'un cours d'eau entraîne un ajustement de ses caractéristiques physiques, géomorphologiques, chimiques et par conséquent biologiques (López-Tarazón *et al.*, 2016).

Les régimes hydrologiques des rivières ont été regroupés en trois classes par Milliman *et al.* (2008) : normal, en déficit ou en excès. Le terme "normal" s'applique aux rivières dont le débit reflète toujours le régime pluvial. Cependant, certains fleuves très régulés peuvent également avoir des barrages (plus de 50 000 barrages dans les bassins versants du Yangtze et du Mississippi) et des systèmes d'irrigation. Les termes "en déficit" ou "en excès" sont utilisés pour les rivières dont le débit n'est pas en adéquation avec le régime pluvial. Souvent, les rivières très régulées par des aménagements hydrauliques sont "en déficit" à l'aval. Au contraire, les rivières en "excès" sont plus difficiles à expliquer, et sont souvent en relation avec

l'occupation des sols (Milliman *et al.*, 2008) comme par exemple une baisse importante des surfaces forestières. Le plus bel exemple d'effets de barrage sur les débits, les charges sédimentaires et les populations est celui du Nil. En effet, historiquement le Nil était un des principaux pourvoyeurs de sédiments de la mer Méditerranée avec $134 \times 10^6 \text{ t.an}^{-1}$ de matières pour un débit moyen de $3400 \times 10^6 \text{ m}^3.\text{an}^{-1}$ (Sharaf El Din, 1977). La construction du très gros barrage d'Assouan d'une capacité de $162\,000 \times 10^6 \text{ m}^3$ en 1964, a transformé le Nil, qui avait un régime hydrologique saisonnier important, en une région sèche avec un régime hydrologique très contrôlé. La baisse des débits et des sédiments, piégés en amont du barrage, a induit une érosion accélérée du delta puis de la côte (Hurst, 1944; Brunnee and Toope, 2002) aujourd'hui sujets aux submersions marines (Stanley and Clemente, 2017). La diminution des débits et des vitesses d'eau a aussi entraîné une salinisation plus importante des sols des terres basses et de son delta, historiquement très actif, ainsi qu'une baisse des apports en nutriments et des interactions biologiques entre les milieux, diminuant fortement les possibilités d'exploitation agricole. Enfin, dans les prochaines années, la construction d'un grand barrage en Ethiopie exacerbera certainement les tensions autour de l'eau dans ces régions arides. En effet, l'apport d'eau du Nil à l'Egypte est inégal, 72 % proviennent des sources éthiopiennes (Nil bleu, rivière Atbara) et 28 % viennent de ses frontières avec le Soudan (Stanley and Clemente, 2017).

Le deuxième bon exemple est celui de la France, où la construction d'une dizaine de barrages hydroélectriques en amont de Toulouse (années 60 - 70) sur la Garonne s'est soldé en amont du barrage par une rétention des sédiments et une érosion régressive des berges, avec comme conséquence un déficit des apports de sédiments à l'aval et une érosion progressive des berges et du lit du chenal (**Figure 1-7 A et B**). Puis, l'extraction des granulats principalement autour des années 1980 a augmenté l'incision du fleuve (**C**) en favorisant des vitesses de crues plus importantes et des étiages plus sévères (Steiger *et al.*, 1998; Steiger and Corenblit, 2000; Steiger and Gurnell, 2003).

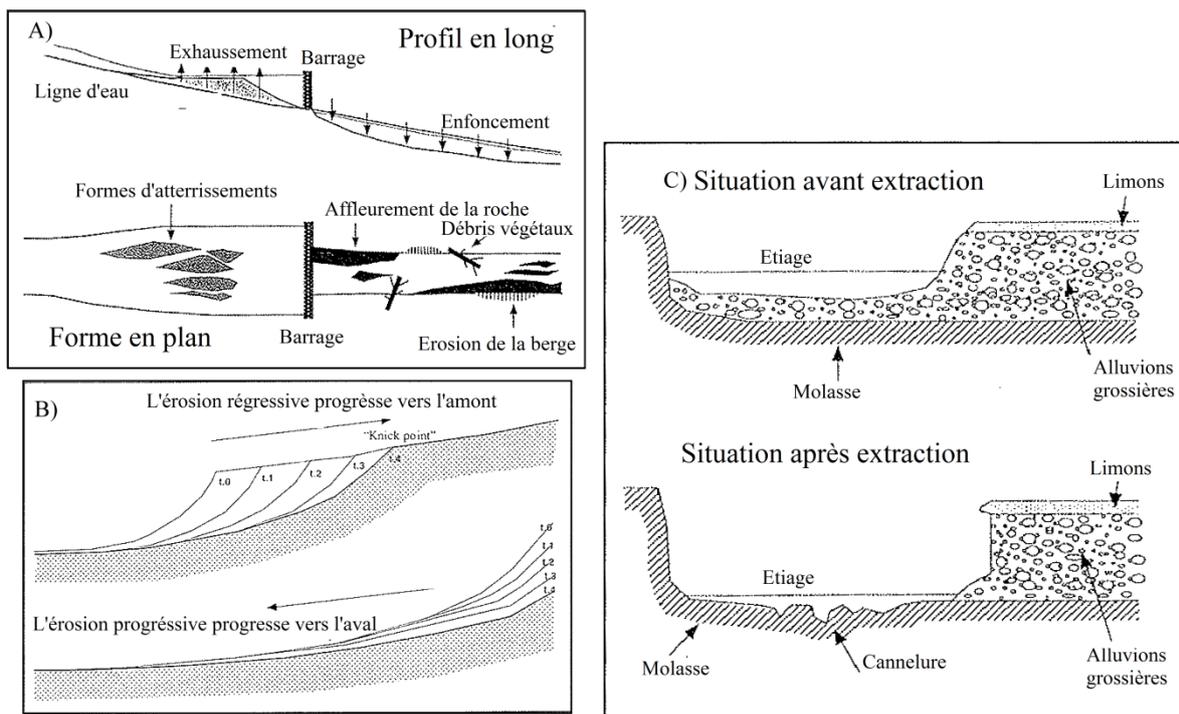


Figure 1-7. A) Impacts des barrages sur la morphologie des cours d'eau, B) Erosion régressive et progressive, C) Conséquences de l'enlèvement du tapis de sédiments du lit fluvial (Steiger and Corenblit, 2000).

1.1.5 Nécessité de contrôler et de suivre la qualité des eaux

Les sous-sections suivantes mettent en évidence les notions divergentes de qualité d'eau pour chacun des pays et territoires traversés par les fleuves étudiés (Maroni, Oyapock et Orénoque). Ils sont localisés à l'extrême est et ouest du bouclier des Guyanes, au nord de l'Amérique du Sud. Les fleuves Maroni et Oyapock, dépendent en partie de la législation européenne et française mais également de la législation surinamaise pour le Maroni et brésilienne pour l'Oyapock. Les eaux des tributaires des affluents de l'Orénoque ont leurs sources localisées au Venezuela et en Colombie.

1.1.5.1 La gestion des milieux aquatiques en Guyane Française

Depuis 1975, plus de 30 directives européennes ou décisions ont été adoptées dans les domaines de la pollution de l'eau douce et de l'eau de mer. Au fil des textes, l'Europe a procédé à une double approche : une approche générale de lutte contre le déversement de substances dangereuses ou polluantes dans l'environnement aquatique et une approche plus spécifique définissant des normes de qualité des zones particulières ou pour des usages particuliers. Le 23 octobre 2000, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) est adoptée par le Parlement et le Conseil

Européens et transposée en droit français par la loi du 21 avril 2004. La DCE vise alors à harmoniser les textes et les directives déjà créées (pour les lacs, rivières, pompages) dont l'objectif est de protéger, surveiller et répondre aux besoins en eau d'un point de vue qualitatif et quantitatif. Elle repose sur le concept que « *l'eau n'est pas un bien marchand comme les autres, mais un patrimoine qu'il faut protéger, défendre et traiter comme tel* ». Cette directive fixe comme objectif général l'atteinte du "bon état" de l'ensemble des masses d'eau en 2015 et maintenant d'ici 2021.

La France a décidé d'appliquer cet engagement aux Départements et Régions d'Outre-Mer (DROM) dont la Guyane Française fait partie, exceptée pour la mise en œuvre de la Directive-Cadre 2008/56/CE « Stratégie pour le Milieu Marin » (DCSMM). Aujourd'hui pour la France et les DROM, l'Office de l'Eau (établissement à caractère administratif créé en 2005) est l'organisme chargé de l'étude et du suivi des ressources en eau, de l'ensemble des milieux aquatiques (eaux douces de surface, eaux souterraines, eaux de transition et côtières) et de leurs usages. Pour que la France respecte ses engagements vis à vis de l'Europe, des réseaux de stations se sont mis en place pour la surveillance. En Guyane, le principal a été mis progressivement en place depuis 2007 (**Figure 1-8 A**). En 2013, il comportait 36 stations de suivi localisées sur 26 fleuves qui en 2014 a été étendu à 41 stations localisées sur 29 fleuves (OEG, 2016). Le deuxième réseau de surveillance à vocation plus régionale est celui du programme de recherche SNO-HYBAM qui depuis 2004 vise à caractériser, suivre et quantifier les flux hydrologiques et biogéochimiques qui résultent de l'érosion et de l'altération des matières transportées par l'Amazonie, le Congo, l'Orénoque et les principaux fleuves de la Guyane (pour plus d'information : <http://www.ore-hybam.org/>).

Les évaluations de la qualité de l'eau reposent sur la prise en compte de l'état écologique et chimique de ces divers types de masse d'eau. Différents indices biotiques ont vu le jour ou sont en cours d'élaboration/validation. Ces indices visent à donner un aperçu global du fonctionnement des écosystèmes et des impacts que pourraient générer une modification des contraintes hydrogéochimiques (comme par exemple une augmentation de la turbidité ou des concentrations en contaminants) sur les plantes et les organismes aquatiques. Il s'agit (i) du SMEG (Score Moyen des Ephéméroptères Guyanais) créé en 2001, basé sur l'absence/présence des genres éphéméroptères plus ou moins sensibles à l'importance des pressions anthropiques, (ii) de l'Indice Polluosensibilité (IPS) fondé sur la pondération "abondance-sensibilité spécifique" des diatomées, (iii) de l'Indice Poisson de Guyane (IPG) et plus spécifiquement de son adaptation aux petites masses d'eaux (IPGG) des têtes de bassins hydrographiques. D'autres

éléments de qualité environnementale (hydro-morphologique, chimique et physico-chimique) sont considérés en tant que paramètres de nature à soutenir la qualité biologique des eaux de surface. Il s'agit pour la physicochimie de la température, du pH, de la conductivité électrique, des concentrations en oxygène dissous et en nutriments, de la turbidité et des charges en MES. En outre des paramètres estimateurs globaux de la richesse biologique des milieux sont pris en compte comme les biomasses phytoplanctoniques estimées par le dosage des concentrations en chlorophylle *a* et phéopigments.

Dans le cadre de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992, les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) constituent le principal instrument de planification de la gestion de la ressource en eau à l'échelle de chaque bassin ou groupement de bassins hydrographiques. Ces documents après une synthèse la plus exhaustive et actualisée de la situation des hydrosystèmes planifient les grandes orientations en vue d'une gestion équilibrée de la ressource en eau (SDAGE, 2016). Ils définissent en outre les objectifs de qualité et de quantité des eaux à atteindre. Les grandes orientations du SDAGE pour la Guyane sont décrites dans le programme de mesures 2016-2021 et présentées par ordre de priorité : OF1) Garantir une eau potable à tous, OF2) Gestion des eaux usées et déchets, OF3) Limiter les impacts de l'industrie et des mines, OF4) Limiter les impacts des autres activités économiques, OF5) Connaissance et gestion des milieux aquatiques. En outre, on recense en Guyane pour la production d'eau potable, 25 captages d'eau de surface et 77 forages pour exploiter des eaux souterraines localisées majoritairement dans le bassin du Maroni.

1.1.5.2 La gestion des milieux aquatiques au Suriname et au Brésil

Les eaux du bassin versant du Maroni sont partagées avec le Suriname. La protection de l'environnement au Suriname n'est absolument pas considérée comme une priorité. Les projets de protection et de gestion des eaux sont majoritairement dédiés à la production et à l'approvisionnement en eau potable des zones urbaines et rurales et gérés par le principal système d'information (SWRIS²). Dans l'état de nos connaissances, il n'y a ni loi, ni réglementation spécifique sur la protection des eaux de surface ou souterraines au Suriname (Everett and Mwangamilo, 2014). Néanmoins, un projet de protection a été réalisé en 2007 mais n'a pas encore abouti. Cependant, de très nombreux acteurs se partagent la gestion de l'approvisionnement en eau et des milieux aquatiques du territoire dont plusieurs ministères³

²<http://www.owmcp.org/swris.html>

³http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/SUR/

(Everett and Mwangamilo, 2014). Le Ministère des Ressources Naturelles est chargé du développement, de la gestion et de l'ingénierie de toutes les ressources naturelles, y compris de l'eau. La Direction de la Recherche Hydraulique du Ministère favorise l'utilisation, la gestion et la protection optimale des ressources en eau. C'est la principale agence dans le pays qui collecte, publie des données et des informations hydrologiques, hydrauliques et de qualité de l'eau et mène des recherches. Le Service météorologique du Suriname (MDS) du Ministère maintient une banque nationale de données climatiques. Les autres ministères ayant des responsabilités liées aux ressources en eau sont : le Ministère de la Santé Publique, le Ministère du Travail, du Développement Technologique et de l'Environnement, le Ministère des Transports de la Communication et du Tourisme et le Ministère du Développement Régional, le Ministère des Travaux Publics ; le Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et des Pêches. L'Institut National pour l'Environnement et le Développement au Suriname (NIMOS⁴), créé en 1998, est chargé d'initier un cadre national, juridique et institutionnel pour la politique et la gestion de l'environnement dans l'intérêt du développement durable au Suriname. L'Université Anton de Kom du Suriname est chargée de l'éducation et de la recherche dans les départements de l'Infrastructure (IS), des Sciences de l'Environnement (MW), de la Collection Zoologique Nationale - CMO (NZCS) et du Laboratoire Hydraulique (WBL).

Les eaux du bassin versant de l'Oyapock sont partagées avec le Brésil. La gestion des ressources en eau au Brésil a changé dans le temps en raison de sa décentralisation, de la promulgation de la Constitution Fédérale et de la loi sur l'eau brésilienne. Après avoir négocié pendant des années, le gouvernement fédéral a approuvé la loi sur l'eau de 1997. La loi établit la politique nationale sur les ressources en eau et affirme que l'eau est un bien public et une ressource naturelle limitée avec une valeur économique. Elle introduit le système national de gestion des ressources en eau (SINGREH) un système moderne qui ne repose pas sur la prise en compte de l'état écologique et chimique de ces divers types de masse d'eau. L'objectif principal est d'assurer la disponibilité de l'eau dans la qualité et la quantité nécessaires au développement durable. Les États et le District fédéral élaborent leurs politiques, créent leurs conseils et développent des comités de bassin. Le Conseil National des Ressources en Eau (CNRH) est l'organisme le plus élevé chargé de promouvoir la coordination de la planification des ressources en eau. Il attribue à l'Agence Nationale de l'Eau (ANA) par le moyen de la Résolution n°58/2006, la responsabilité de l'élaboration du rapport de conjoncture des

⁴<http://www.nimos.org/>

ressources hydriques dans le pays⁵ et la mise en œuvre de la loi nationale sur l'eau. Le bassin hydrographique est l'unité territoriale pour la gestion de l'eau qui devient décentralisée et participative. Au cours des dix dernières années, dans les régions du sud, du sud-est et du nord-est, les comités de bassin se sont développés dans presque tous les états (au total 149 dans le pays). Il y en a cependant peu dans le nord-est, le centre-ouest et presque toute la région nord. Ils sont surtout concentrés dans les états de Sao Paulo, Rio Grande do Sul, Ceará et Minas Gérais.

1.1.5.3 La gestion des milieux aquatiques au Venezuela et en Colombie

L'Orénoque est constitué d'eaux aux sources localisées à la fois au Venezuela et en Colombie. Au Venezuela, la loi 35,95 de l'Assemblée Nationale de la République Bolivarienne, du 2 Janvier 2007 établit les dispositions applicables par l'Etat, pour la gestion des eaux comme "*un élément indispensable pour la vie, le bien-être humain et le développement durable du pays*" ([Ley Orgánica del Ambiente, 2006](#)). Les eaux du territoire vénézuélien, qu'elles soient continentales, marines, insulaires, superficielles ou souterraines, sont publiques, c'est un bien de la nation. Néanmoins, hormis les normes pour les eaux de source, il n'y a pas de normes strictes appliquées sur la qualité de l'eau des régions et bassins hydrographiques au Venezuela et les services fournis aux populations sont basiques. Il n'y a pas de réseau urbain d'alimentation en eau, le traitement est minimal et les pollutions sont très nombreuses. Pour les eaux des bassins versants, la loi prévoit la conservation des zones hydrographiques pour assurer l'interdépendance entre les "*composantes biotiques, abiotiques, sociales, économiques et culturelles qui s'y développent*". Selon l'article 21 de cette loi, la gestion des eaux fait intervenir 10 intervenants (Ministère National de l'Eau, le Conseil National des Eaux, les conseillers des régions hydrographiques et des bassins hydrographiques, les utilisateurs institutionnels, les conseillers communaux, les institutions nationales du peuple indigène, le Ministère de la Défense, les conseillers de planification et de coordination de politiques publiques et enfin les conseillers de planification publique). Le ministère fixe entre autres les politiques et stratégies à adopter pour la protection et la gestion des eaux. Les plans de gestion intégrée des eaux fixent les objectifs des régions hydrographiques et des bassins hydrographiques. Les objectifs et stratégies suivis par le gouvernement sont au nombre de sept : (i) protéger les sources d'approvisionnement en eau, (ii) favoriser l'utilisation rationnelle et durable de l'eau, (iii)

⁵<http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>

couvrir les besoins de la population en eaux, (iv) produire et fournir des informations et des connaissances des ressources en eau, (v) impulser le développement de la production d'eau, (vi) former le personnel technique pour répondre aux exigences, (vii) mettre en œuvre des conseils de région hydrographique.

Concernant la Colombie la politique de gestion des ressources hydrique est établie par la loi 99 de 1993 et le décret-loi 216 de 2003, réalisés par le Ministère de l'Environnement, du Logement et du Développement Territorial (MAVDT) (MAVDT, 2010). Sur le territoire colombien, 33 autorités différentes s'occupent de la gestion des ressources naturelles dont quatre ministères (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural qui coordonne et évalue les politiques et stratégies correspondantes au secteur agricole, Ministère de la Protection Sociale qui s'occupe de l'eau pour la consommation humaine, Ministère de l'Education Nationale qui coordonne l'éducation à l'environnement, Ministère des Mines et de l'Energie pour l'exploitation des mines, des hydrocarbures, et l'exploration des eaux souterraines) en plus du MAVDT, et une Superintendance de Service Public Domiciliaire. Les normes, les plans de planifications et les stratégies ne sont pas toujours structurés ni cohérents. Entre 2002 et 2006, un projet de "Loi sur l'eau" a été présenté au congrès mais n'a toujours pas été validé. Historiquement de très nombreuses lois et politiques en relation avec les ressources hydriques ont été établies concernant les zones humides, les zones côtières et océaniques, la biodiversité, les aires protégées, le changement climatique, la gestion de l'environnement dans les zones urbaines, la santé de l'environnement, les plans départementaux de l'eau et sanitaires, ... Néanmoins, il existe en Colombie de très nombreux conflits concernant la gestion de l'eau.

1.2 Objectifs et questions de recherche

Localisés au nord-est de l'Amérique du Sud, dans la continuité du bassin amazonien, les bassins versants du Maroni, de l'Oyapock et de l'Orénoque, présentent de fortes similarités. Ils sont principalement recouverts de forêt équatoriale et ont une très faible occupation des sols et densité de population. Leurs cours d'eau sont alimentés en totalité ou en partie par le bouclier des Guyanes et sont caractérisés par différents types d'eau douce (eaux blanches, claires et noires) décrites par [Sioli \(1987\)](#) et qui dépendent des sols drainés et de la végétation dans le bassin versant.

Cette thèse met en évidence l'importance d'une coopération régionale entre les pays du bouclier des Guyanes car ces territoires subissent les mêmes problématiques climatiques, de déforestation, d'augmentation des activités d'extraction d'or, de bauxite et de diamants et par conséquent les mêmes conséquences de pollution des eaux avec les mêmes problématiques économiques et sanitaires qui en découlent. Une synergie régionale s'est mise en place autour du "château d'eau" constitué par le bouclier des Guyanes avec le développement d'une coopération triangulaire à la fois interinstitutionnelle et internationale entre la Guyane (UG, IRD, CNRS, DEAL, OEG), le Venezuela (UCV, UNEG, INAMEH, IVIC) et le Brésil (IRD).

Le premier objectif de cette étude est de suivre de manière inédite, sur les fleuves Maroni, Oyapock et Orénoque, l'évolution spatiale et temporelle des MES via des techniques de télédétection, afin d'estimer leurs tendances et cela en relation avec les processus hydrologiques et climatiques ainsi que les facteurs de développement anthropiques (densité population, activités agricoles, déforestation ou extraction d'or). A ce jour, très peu d'études en lien avec les transports de MES ont été réalisées sur les petits et moyens cours d'eau du bouclier des Guyanes, les études étant centrées principalement sur les affluents de l'Amazone. Depuis 2003, le réseau SNO-HYBAM dispose de deux stations en Guyane Française sur le Maroni et l'Oyapock et au Venezuela sur l'Orénoque. La faible quantité de données sur les autres fleuves et rivières du bouclier des Guyanes ne permet pas de réaliser une comparaison exhaustive pour le suivi de la qualité et des quantités d'eaux. Ce manque de données réside très probablement dans la difficile accessibilité de ces fleuves et le manque d'intérêt des pays concernés, de ce fait, la réalisation de quantifications *in situ* régulières et répétitives au cours du temps et simultanément en diverses localisations le long du continuum amont aval de l'hydrosystème nécessite des coûts élevés. Dans cette étude, les mesures de MES réalisées via la télédétection révèlent alors tout leur intérêt. L'approche originale de cette thèse se base sur l'utilisation de données spatiales

afin de densifier, dans le temps et l'espace, les estimations de MES provenant de réseaux conventionnels de mesure. La méthode utilisée a été développée sur l'Amazone (Martinez *et al.*, 2007; Martinez *et al.*, 2009). Elle utilise les images des capteurs MODIS MOD09 et MYD09 des satellites TERRA et AQUA disponibles depuis 2000 et 2002 et dont les pixels ont une résolution spatiale de 500 m ou 250 m, contenant la meilleure observation journalière mesurée sur une durée de 8 jours.

Le deuxième objectif de ce travail est d'évaluer la qualité de l'eau des fleuves Maroni et Oyapock via des analyses physico-chimiques. Ces fleuves sont enclins à de fortes perturbations liées aux activités d'extraction d'or et de déforestation dans leurs bassins versants et sont soumis aux législations françaises et européennes mais également brésiliennes et surinamaises. Les normes et réglementations les plus avancées sont celles de la France avec la mise en place de la Directive Cadre sur l'Eau qui vise à protéger, surveiller et répondre aux besoins en eau d'un point de vue qualitatif et quantitatif. Cette directive repose sur le concept que « *l'eau n'est pas un bien marchand comme les autres, mais un patrimoine qu'il faut protéger, défendre et traiter comme tel* ». A ce jour, les normes européennes appliquées à la Guyane Française ne sont pas toujours cohérentes, il faut donc les adapter. Les paramètres physico-chimiques suivis dans cette étude sont le pH, la conductivité électrique, la turbidité, la température de l'eau et l'oxygène dissous. Quelques paramètres de chimie comme les charges de carbone organique dissous, de la chlorophylle *a* ainsi que du carbone et de l'azote organiques particuliers ont été étudiés. Ces paramètres ont été choisis car ils peuvent être des indicateurs de contamination liés aux activités agricoles, de déforestation ou d'extraction minière. La finalité étant de discuter et de proposer des seuils de qualité qui pourront être transposables dans les pays du bouclier des Guyanes.

La première question de recherche de cette thèse est tout d'abord d'ordre méthodologique : **Peut-on suivre et adapter l'algorithme de détection de MES développé dans les eaux de surface de l'Amazone, via les images satellites des capteurs MODIS, au Maroni, à l'Oyapock et à l'Orénoque ?**

La deuxième question de recherche qui s'est imposée est : **Quelles sont les variations spatiales et temporelles ainsi que les tendances et points de ruptures des concentrations et flux de MES en fonction des précipitations, de l'hydrologie et en lien avec des activités humaines de déforestation, agricoles et urbaines et d'extractions aurifères ?**

Ce qui amène directement à la dernière question : **Existe-t-il des conséquences des activités humaines de déforestation, agricoles, urbaines et d'extractions aurifères, sur les fractions organiques et minérales, dissoutes et particulières des fleuves guyanais ?**

Ces travaux constituent des avancées majeures via :

(i) des améliorations des technologies de mesure locales et satellitaires qui pourront ainsi servir d'outils communs de surveillance et de gestion de ces environnements amazoniens (au sens générique),

(ii) l'étude de la qualité de l'eau via des bilans de flux de matières qui permettent de mesurer l'impact des activités humaines sur une longue période et en différents points dans les bassins versants,

(iii) la constitution de banques de métadonnées à vocation multi usages, pour la navigation fluviale, la construction d'ouvrages d'art, le tourisme aquatique, l'hydroélectricité, l'appui aux divers usagers de l'eau, la protection de l'environnement, la santé mais aussi pour les services miniers et forestiers

Chapitre 2 : Etat des connaissances



Pirogues au "degrad" sur le Maroni, en Guyane française. La pirogue est le principal moyen de communication et d'échanges entre les villages du fleuve



Usages de l'eau du fleuve par les femmes Bushinengués sur le Maroni, en Guyane française

2.1 Une histoire géologique commune

L'histoire géologique des bassins versants du Maroni et de l'Oyapock est entièrement héritée de celle du bouclier des Guyanes alors que celle du bassin versant de l'Orénoque n'y est qu'en partie liée. Le bouclier des Guyanes s'est construit en plusieurs phases dont les limites temporelles font encore l'objet de discussions au sein de la communauté scientifique ([Tassinari and Macambira, 1999](#); [Santos *et al.*, 2000](#); [Delor *et al.*, 2003](#); [Delor *et al.*, 2003b](#)). Il couvre une superficie d'environ 1 500 000 km² et est délimité par le fleuve Amazone à l'est, la rivière Negro au sud-est, la rivière Guaviare au sud-ouest (Sierra de Chiribiquere), le fleuve Orénoque à l'ouest et l'Océan Atlantique au nord. Localisé au nord du bassin amazonien il correspond à la partie ouest du Gondwana, un supercontinent datant du Précambrien (~5,40 à 4,55 Ga) qui suite à des mouvements tectoniques s'est morcelé au Mésozoïque (vers 100 Ma) pour former aujourd'hui les continents que nous connaissons. Le bouclier des Guyanes a donc ainsi la même origine géodynamique que celle du craton d'Afrique de l'ouest.

Le modèle d'évolution du bouclier des Guyanes le plus abouti ([Figure 2-1](#)) est celui de [Delor *et al.* \(2003b\)](#) qui regroupe les descriptions de [Gibbs and Barron \(1983\)](#), ([Tassinari and Macambira \(1999\)](#)) et de [Santos *et al.* \(2000\)](#). La première phase tectonique et magmatique (~2,18 et 2,14 Ga), débute avec la destruction de la croûte juvénile océanique. Cette fracturation entraîne la scission progressive nord-sud des continents africain et américain. Elle s'accompagne par le développement de diverses formations de roches volcano-sédimentaires connues sous le terme de ceintures de roches vertes. Les ceintures de roches vertes sont les formations lithologiques dominantes des bassins versants du Maroni et de l'Oyapock ([Théveniaut and Delor, 2004](#)). Elles sont également présentes au Venezuela au niveau du bassin du Caura. Elles se caractérisent lorsque leur origine est volcanique par des laves (formation du Paramaca) allant des basaltes jusqu'aux rhyolithes et pyroclastites associées à des formations sédimentaires comprenant des dolomies, des schistes et des quartzites. Au-dessus de la formation essentiellement volcanique du Paramaca on observe une deuxième série de roches vertes de nature sédimentaire correspondant probablement au remplissage d'un bassin post-volcanique (formation d'Armina) ([Théveniaut and Delor, 2004](#)). Elles correspondent à des grès de fins à grossiers, et à des perlites (argilites et/ou siltites) parfois très abondantes qui ont évolué en schistes. Ces schistes et grès de la formation d'Armina présentent des intercalations variées en particulier des lentilles de fer (hématite et goethite) ou d'oxydes de manganèse riches en

matières organiques. Ces formations de Paramaca et d'Armina sont ainsi composées essentiellement de fer, de silice et d'alumine et mais aussi d'or et de diamants (Goodwin, 1981).

Entre 2,11 et 2,08 Ga, les deux continents Amérique et Afrique coulisent progressivement l'un par rapport à l'autre. Ces deux migrations s'accompagnent, de processus magmatiques et métamorphiques. Puis les directions de déplacement se modifient pour devenir nord-est/sud-ouest car formées dans un contexte de décrochement sénestre⁶ entre l'Afrique et le sous-continent sud-américain. Les roches granitiques et les bassins versants du Maroni et de l'Oyapock sont associés à ce stade de déformation. La deuxième phase tectonique et magmatique intense a lieu entre 2,08 et 2,06 Ga. Les grands ensembles plutoniques, volcaniques et sédimentaires sont mis en place sur les bordures de ce qui deviendra l'océan Atlantique. Des filons de roches magmatiques infiltrés (dykes) recourent tous ces ensembles volcano-sédimentaires plus ou moins fracturés (Delor *et al.*, 2003; Théveniaut and Delor, 2004; Nontanovanh and Roig, 2010).

Au Cénozoïque (~65 Ma), les terres basses, moyennes et hautes des pays du bouclier des Guyanes commencent alors à se dessiner. Elles se construisent lors d'une succession de grandes phases d'érosion continentale et de dépôts sédimentaires. Au cours du temps, l'évolution de la montée des mers a engendré la connexion ou déconnexion des bassins (de Mérona *et al.*, 2012). Le trait de côte prend progressivement sa forme en fonction des variations des niveaux marins, des apports sédimentaires véhiculés par les fleuves des Guyanes et surtout des charges particulières considérables expulsées par le delta de l'Amazone dans l'océan Atlantique au niveau de l'Equateur pour le sous-continent sud-américain. En raison de cette localisation le transit des apports sédimentaires est peu affecté par la force de Coriolis et est essentiellement contrôlé par les grands courants océaniques, en l'occurrence le courant équatorial nord et son prolongement le courant de la Guyane.

⁶*Faille souvent verticale, le long de laquelle deux compartiments rocheux coulisent horizontalement, l'un par rapport à l'autre*

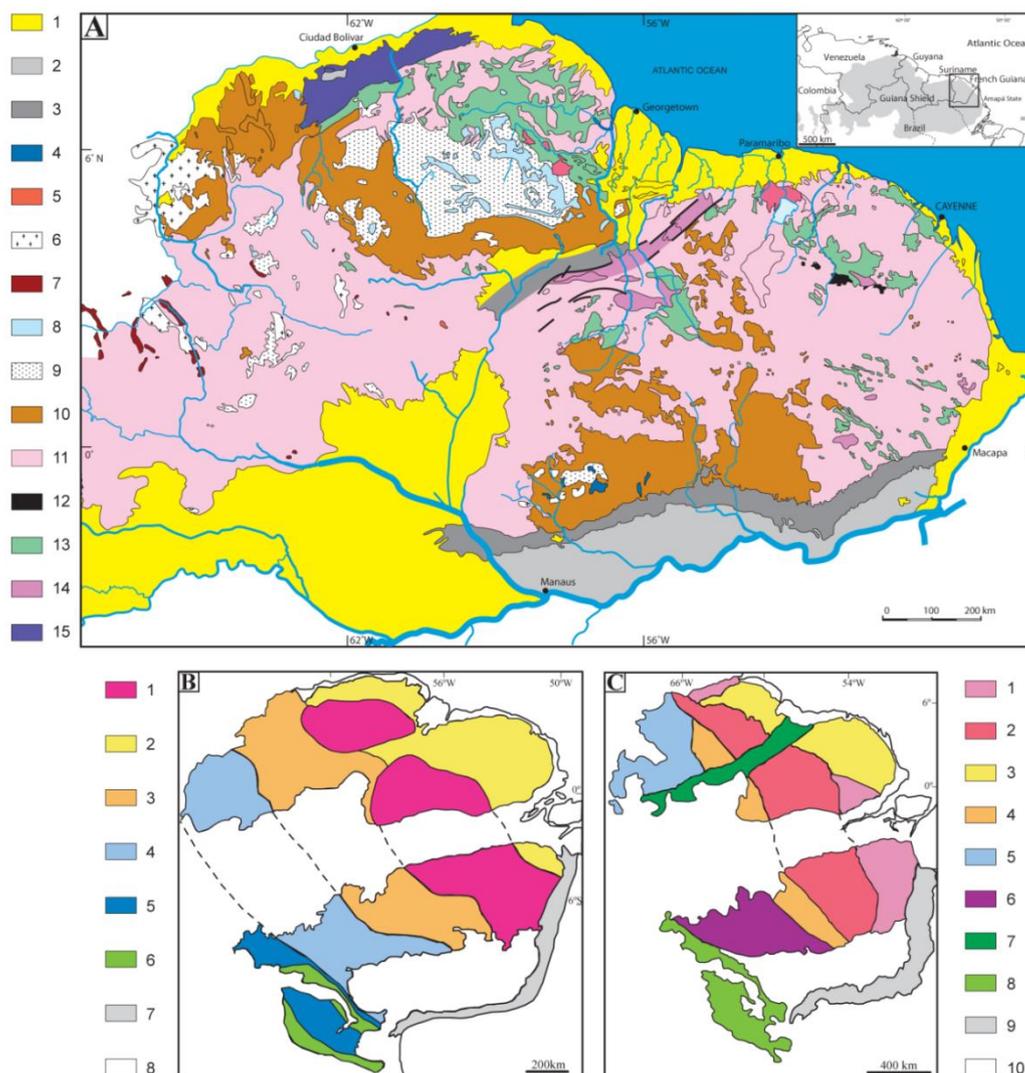


Figure 2-1. Schémas géologiques simplifiés du bouclier des Guyanes tiré de [Delor et al.\(2003b\)](#) selon A : [Gibbs and Barron \(1983\)](#), B : [Tassinari and Macambira \(1999\)](#), C : [Santos et al. \(2000\)](#).

A) CENOZOÏQUE : 1 couverture alluvionnaire ; MESOZOÏQUE : 2 - dolérite et sédiments ; PALEOZOÏQUE : 3 - sédiments de la marge amazonienne ; NEOPROTEROZOÏQUE : 4 - basalte alcalin, 5 - plutonisme alcalin; MESOPROTEROZOÏQUE : 6 - granites, 7 - sédiments, 8 - dyke basique, 9 - sédiments (Roraima group), 10 - plutono-volcanisme acide; épisode thermo tectonique TRANSAMAZONIEN : 11 - granitoïde, 12, pluton ultrabasique, 13 - ceinture de roche verte, 14 - granulite; ARCHEEN : 15 - granulite et migmatique. B) 1 - Amazonie centrale (> 2,3 Ga), 2 - Maroni-Itacaiunas (2,2 - 1,95 Ga), 3 - Ventuari-Tapajos (1,85 - 1,88 Ga), 4 - Rio Negro -Juruena (1,88 - 1,55 Ga), 5 - Rondonian-San Ignacio (1,55 - 1,3 Ga), 6 - Sunsas (1,25 - 1,0 Ga), 7 - zone mobile néoproterozoïque, 8 - couverture phanérozoïque. C) 1- Carajas -Imataca (3,10 - 2,53 Ga), 2 - Amazonie centrale (1,88 - 1,70

Ga), 3 - Transamazonien (2,25 - 2,00 Ga), 4 - Tapajós-Parima (2,10 - 1,87 Ga), 5 Rio Negro (1,86 - 1,52 Ga), 6- Rondona-Juruena (1,80 - 1,50 Ga), 7 - K'Mudku (1,33 - 1,10 Ga), 8- Sunsas (1,33 - 0,99 Ga), 9 - zone néoprotérozoïque, 10 - couverture phanérozoïque.

En Guyane, au quaternaire (-100 000 à -10 000 ans), plusieurs périodes glaciaires se sont succédées. Pendant la dernière période interglaciaire (Riss-Würm : -180 000 à -120 000 ans), le climat est chaud et humide avec une faune homogène (Boujard and de Morais, 1990). La transgression marine a pu atteindre + 15 m durant cette période (Pujos and Odin, 1986; Boujard and de Morais, 1990). L'ensemble des bassins versants actuels étaient connectés et les échanges d'eau douce et d'eau de mer plus ou moins chargés de sédiments étaient importants (**Figure 2-2**). Puis lors de la dernière période glaciaire (le Würm : -120 000 à -10 000 ans), le climat était plus sec et plus frais, la régression marine traduite par un retrait de la mer pourrait avoir atteint -100 m (Pujos and Odin, 1986; Boujard and de Morais, 1990). Deux grands bassins se sont formés, l'un à l'est et l'autre à l'ouest de la Guyane et la dispersion des espèces s'est ralentie. Peu à peu le réseau hydrique se forme, certains petits fleuves ont pu être amenés à disparaître ou à se construire. Les grands fleuves Mana-Maroni et Oyapock-Approuague avaient certainement des embouchures communes à plus de 200 km de leur emplacement actuel. Aujourd'hui, sept bassins versants principaux et quelques petits bassins versants côtiers se dissocient.

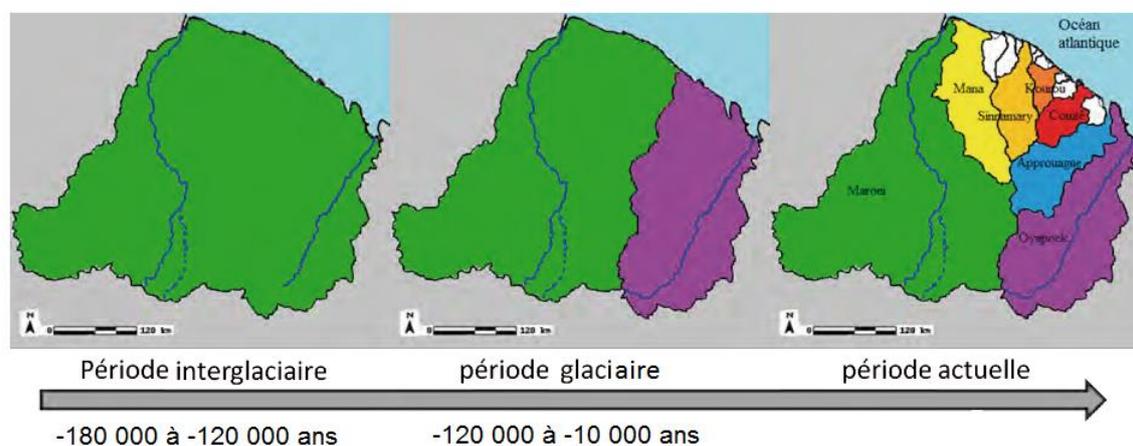


Figure 2-2. Evolution des limites des bassins versants en Guyane suivant les périodes climatiques (adaptée de : Allard (2014)).

L'histoire géologique du bassin versant de l'Orénoque est plus complexe. Elle est liée (i) comme précédemment à l'activation des processus d'ouverture de l'océan Atlantique et de la séparation de l'Amérique du Sud avec l'Amérique du Nord (~ 2,0 Ga) mais aussi (ii) à l'orogénèse des Andes du nord et de l'ouest et (iii) à des dynamiques volcano-sédimentaires

internes entre les terres du bouclier des Guyanes et les montagnes andines (Potter, 1997; Gregory-Wodzicki, 2000).

Au Jurassique au cours du Mésozoïque, il y a 2,0 Ga, commence une grande période d'érosion et d'orogénèse qui résulte du mouvement des plaques tectoniques de Nazca et de l'Amérique du Sud. Elle concerne la branche la plus septentrionale de la Cordillère des Andes "la Sierra de Perijà" au nord-ouest et les Andes de Mérida, ainsi que la Cordillère Côtière de la Caraïbe (Hoorn *et al.*, 1995; Baby *et al.*, 2009). Au même moment les deux continents de l'Amérique du Sud et du Nord se séparent. Il se forme alors un grand bassin central, qui deviendra celui de l'Orénoque. Il sera ensuite submergé par l'océan jusqu'à son point le plus septentrional entre le bouclier des Guyanes, les Andes et la Cordillère Côtière. Pendant cette période dans le futur bassin de l'Orénoque une part importante des matières organiques continentales et marines élaborées au cours du Crétacé (~ 1,45 Ga) co-sédimentent. Ces matériaux formeront postérieurement des hydrocarbures, exploités aujourd'hui dans ce que l'on désigne comme la « frange pétrolière » de l'Orénoque.

Au Cénozoïque (~ 66 Ma), la mer se retire et les bassins intérieurs de l'Orénoque sont construits. Néanmoins, la formation des sous-bassins tels qu'on les connaît aujourd'hui est assez récente et date de la fin du Tertiaire et du début du Quaternaire (~ 2 Ma). Après plusieurs phases d'intrusion marine les sous-bassins sud fortement influencés par la tectonique se soulèvent, induisant une déviation progressive du lit fluvial de l'Orénoque qui finit par s'accoler au bouclier des Guyanes (Potter, 1997; de Almeida *et al.*, 2000). Une intense période d'érosion affecte alors les reliefs des Andes conduisant au remplissage des sous-bassins en rive gauche de l'Orénoque et à la formation de grandes plaines alluviales. L'estuaire du fleuve évolue alors vers la création d'un delta.

2.2 Un régime de précipitations contrôlé par les mouvements de la ZCIT

La variation des précipitations en Guyane Française et au Venezuela résulte de la lente migration de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) du sud au nord, le long de l'Equateur, et dont la vitesse de déplacement est comprise entre 10 et 20 km.h⁻¹. En effet, elle suit la position apparente du soleil avec un retard de 10 à 12 semaines (Héritier, 2011). Elle est régie par la position et l'intensité relative des anticyclones des Açores dans l'hémisphère nord, et de Sainte-Hélène dans l'hémisphère sud, résultant de l'obliquité (l'angle formé entre l'axe de rotation et la perpendiculaire à son plan orbital) de la Terre (Figure 2-3) et qui convergent et se rencontrent à proximité de l'Equateur, sur une zone de basse pression d'une centaine de kilomètres environ. La ZCIT correspond à cette zone ascendante maximale.



Figure 2-3. A) Mouvements de la ZCIT ou (ZIC) le long de l'équateur (source : <http://www.terresdeguyane.fr/>).

Les anticyclones des Açores et de Sainte-Hélène sont l'un des acteurs majeurs de la circulation atmosphérique au-dessus de l'Atlantique. Ils déterminent en particulier les directions des alizés qui au cours de l'année varient et soufflent respectivement du nord-est (anticyclone des Açores dominant) au sud-est (anticyclone de Sainte-Hélène dominant). De plus, la sphéricité de la Terre et son orbite font que le bilan radiatif du système Terre atmosphère est excédentaire entre les tropiques et déficitaire ailleurs. Ce déficit entraîne des mouvements de

vents ascendants près de l'équateur et descendants près des tropiques formant la circulation de Hadley, composée de cellules symétriques dans chaque hémisphère.

De mi-novembre à mi-février, la ZCIT migre lentement vers l'Equateur c'est la saison des pluies en Guyane Française et la saison sèche au Venezuela. En février-mars, la ZCIT est située aux abords de l'Equateur ce qui correspond à sa localisation la plus méridionale. On assiste alors à une petite accalmie au cours de la saison des pluies en Guyane Française (**Figure 2-4**). Elle remonte ensuite vers le nord où à partir d'avril-mai elle est située au-dessus du Venezuela. C'est alors pour la Guyane Française et ses pays limitrophes le début de la saison sèche et le début de la saison des pluies pour le Venezuela (Bovolo *et al.*, 2012). Le Venezuela jouit sur la majeure partie de son territoire d'un climat tropical. La saison des pluies dure de la fin du mois d'avril jusqu'en décembre, avec une interruption au cours des mois d'octobre et de novembre (petite saison sèche). La principale saison sèche est réduite aux mois de janvier, février et mars.

Cependant, en plus de la ZCIT contrôlée par les anticyclones des Açores et de Sainte-Hélène et la circulation de Hadley, d'autres phénomènes mondiaux viennent influencer le climat et donc les débits fluviaux. Ces phénomènes mondiaux atmosphériques et océaniques sont nommés *La Niña/Southern Oscillation* et *El Niño/Southern Oscillation* (ENSO). Les conséquences d'*El Niño* sont globalement inverses de celles de *La Niña*. Ils sont une conséquence régionale d'une perturbation dans la circulation atmosphérique générale entre les pôles et l'Equateur. *La Niña* résulte de températures anormalement basses des eaux de surface océaniques équatoriales et de l'Océan Pacifique. Au contraire, *El Niño* est un courant océanique saisonnier chaud, avec parfois des températures anormalement élevées, au large du Pérou et de l'Equateur (SST). Il entraîne une quasi-disparition des alizés. A l'inverse le phénomène climatique nommé *La Niña* s'accompagne de son renforcement.

Les régimes de précipitations influencent les régimes hydrologiques. Depuis 1960, à plusieurs reprises des phénomènes *El Niño* et *La Niña* ont été recensés. Globalement, toutes les années avec des débits élevés de l'Amazonie coïncident avec des phénomènes *La Niña* (1963, 1968 1971, 1976, 1979, 1989, 1990, 2000, 2008, 2014). A l'inverse les années avec des débits faibles sont concomitantes à des phénomènes *El Niño* (1959, 1961, 1964, 1965, 1983, 1986, 1987, 1992, 1998, 2005, 2015) (Gaucherel, 2004; Marengo, 2005; Zeng *et al.*, 2008; Espinoza Villar *et al.*, 2009; Labat *et al.*, 2012; Jhan Carlo *et al.*, 2014). En Guyane, une très importante crue est mise en évidence en 2008 sur le Maroni et provoque d'importantes inondations. En 2006, une crue importante est observée sur le haut Maroni ainsi que des étiages sévères en 2004,

2009 et 2015. Sur l'Oyapock, deux importantes crues ont lieu, en 2008 sur le bas Oyapock et en 2015 dans la région de Camopi.

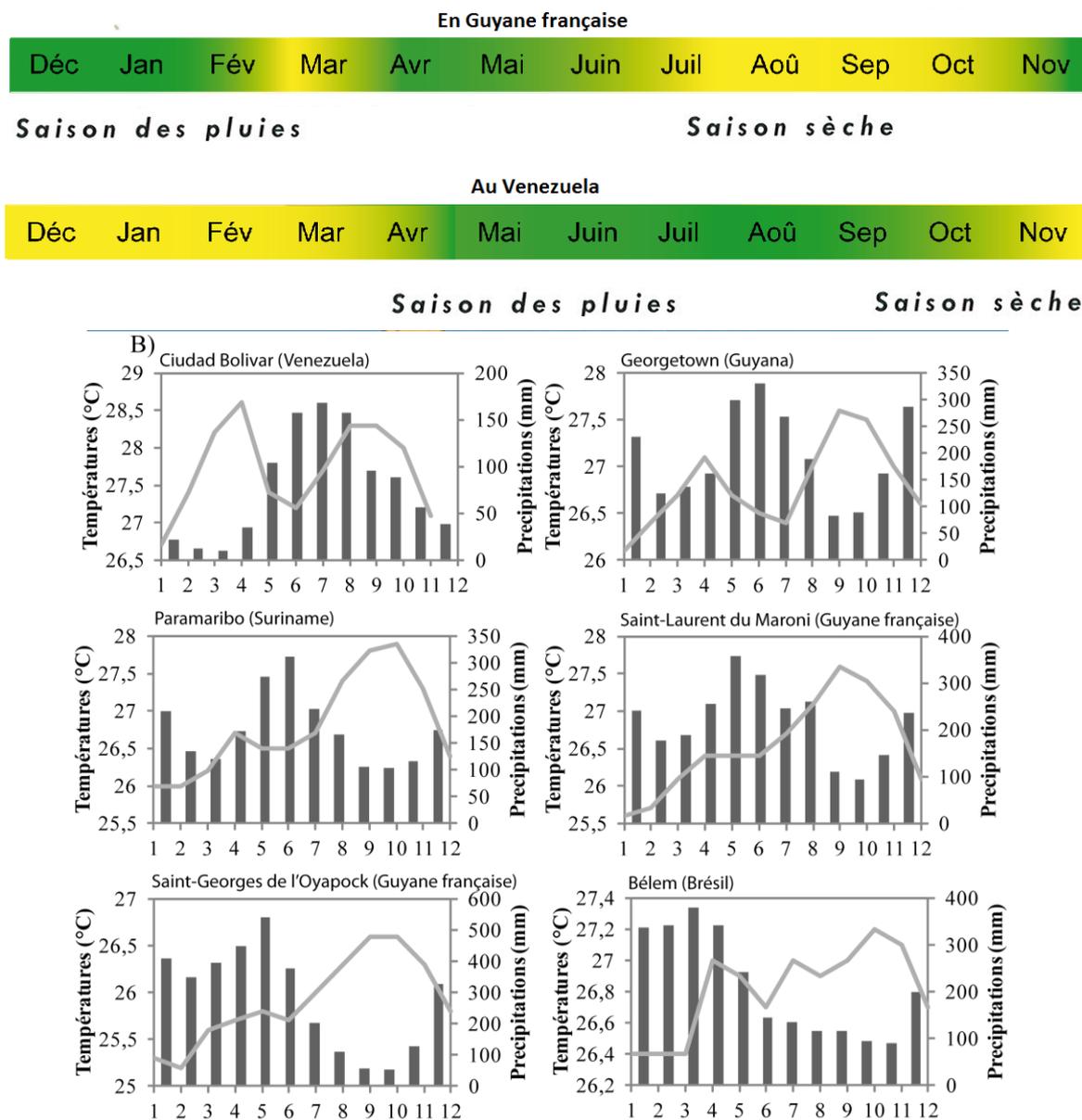


Figure 2-4. Variation de la saison des pluies (en vert) et de la saison sèche (en jaune) au cours d'une année en Guyane Française et au Venezuela (adaptée de : Héritier (2011)) et B) histogrammes des précipitations (barres grises) et températures (lignes grises) enregistrées dans l'une des principales villes du bassin versant de l'Orénoque, du Guyana, du Suriname, des bassins versants du Maroni et de l'Oyapock en Guyane Française, et du nord du Brésil (source : <https://fr.climate-data.org>).

2.3 Les spécificités des bassins versants du Maroni et de l'Oyapock

Les bassins du Maroni et de l'Oyapock sont localisés en Guyane Française ainsi que sur les territoires du Suriname et du Brésil, à l'extrême est du bouclier des Guyanes. Le bassin du Maroni (entre les longitudes 54 et 55°O et les latitudes 2et 6°N) s'étend sur la plus importante des Communautés de Communes (la Communauté de Communes de l'Ouest Guyanais : 40 956 km² pour 80 800 hab. en 2012 / 2 hab./km²) de la Guyane Française, mais la deuxième en terme de population après la Communauté de Communes du Centre Littoral. Au Suriname, le bassin du Maroni s'étend sur la plus grande région administrative de Sipaliwini (130 000 km² pour 34 136 hab. en 2004 / 0,26 hab./km) ainsi que sur la cinquième plus grande région Marowijne (4 627 km² pour 16 642 hab. en 2004 / 3,5 hab./km) dont la principale ville est Albina, localisée en rive gauche du fleuve et en face de Saint-Laurent du Maroni en Guyane Française.

Le bassin versant de l'Oyapock (entre les longitudes 51-53°O et les latitudes 2 et 5°N) s'étend sur la deuxième plus importante Communauté de Communes de la Guyane et la dernière en terme de population (la Communauté de Communes de l'Est Guyanais : 25 560 km² pour 6 578 hab. en 2012 / 0,26 hab./km²). Au Brésil, le bassin de l'Oyapock s'étend à l'extrême nord du pays dans l'état de l'Amapa. L'Amapa est un des 26 Etats fédérés du Brésil, il est localisé dans l'extrême nord du pays (142 816 km² pour 789 078 hab. en 2004 / 5,5 hab./km) et sa principale ville et capitale est Macapa.

2.3.1 Relief

Les bassins de l'Oyapock et du Maroni sont caractérisés par un relief structuré selon une orientation générale sud-nord (**Figure 2-5**). Trois types de reliefs sont identifiables en Guyane Française ([Barret et al., 2001](#))

- ✚ La partie sud ou la "pénéplaine méridionale" a l'apparence d'un moutonnement monotone de collines convexes dont les hauteurs sont inférieures à 250 mètres et qui présentent des versants assez raides. On observe aussi quelques reliefs insolites (inselbergs) nombreux à l'ouest du territoire dans le bassin du Maroni.
- ✚ La partie centrale ou le "massif central" correspond à une bande d'une centaine de kilomètres s'étendant de la "plaine méridionale" jusqu'aux montagnes de la Trinité et du Haut Sinnamary aux "terres basses". Le paysage essentiellement tabulaire a subi tous les

cycles orogéniques⁷. Les montagnes hautes Inini-Camopi, dont une partie est située dans le bassin du Maroni et l'autre partie dans le bassin de l'Oyapock, constituent la seule véritable chaîne dont la hauteur dépasse parfois 800 mètres (Montagne Bellevue de l'Inini 851 mètres).

- ✚ La "partie basse" ou la zone littorale a un relief très uniforme et plat d'une hauteur moyenne de quelques mètres à quelques dizaines de centimètres en-dessous des plus hautes marées de vive eau. Ainsi la mangrove qui colonise cet espace est inondée par l'eau de mer lors des fortes marées (Lévêque *et al.*, 1962). Elle correspond à des "terres basses" entrecoupées de côtes rocheuses escarpées très anciennes d'origine volcanique et plus ou moins métamorphisées (Ile de Cayenne, Kourou). Les sols sont constitués de sédiments jeunes déposés au cours du quaternaire où peu d'accidents en dehors des estuaires viennent rompre leur platitude. Deux grandes unités morphologiques constituent ces terres basses : (i) la plaine récente holocène formée par les sédiments marins (5 à 0 m d'altitude) et fluvio-marins de la formation DEMERARA⁸. C'est une zone de marais et de marécages sillonnée par des cordons sableux étroits et allongés et (ii) la plaine côtière ancienne pléistocène (15 m à 5 m d'altitude) avec un paysage de savanes parsemé d'îlots de forêts, ces terrains appartiennent à la formation de COSWINE (Prost, 1990).

Au Suriname, trois types de reliefs sont également identifiés (Augustinus, 1978; Suriname, 1988; Ouboter *et al.*, 1993) :

- ✚ La "région montagneuse" du sud va jusqu'à 1 230 m au dessus du niveau de la mer. C'est la zone du bouclier des Guyanes formée au Précambrien dont le plus beau massif est le Mont Tafelberg (1 026 m) localisé au centre du pays et les plus beaux plateaux sont les montagnes Lely (649 m), de Nassau (564 m), le Brownsberg (514 m), Wintiwai (480 m) et les montagnes Goliathberg (358 m).
- ✚ Le "paysage de Cover" est constitué de zones moyennes allant de 10 à 100 m au dessus du niveau de la mer. Il est également appelé la "ceinture de savanes" car il contient de grandes zones (40 %) de savanes (généralement sur du sable blanc) et un moutonnement de collines.
- ✚ La "partie basse" est constituée comme pour la Guyane par : (i) le trait de côte" formé de systèmes de vasières entrecoupés de zones de sables. Le littoral est caractérisé par la

⁷ On appelle cycle orogénique le laps de temps pendant lequel se prépare, se développe, s'achève, s'érode une chaîne de montagnes.

⁸ Comprenant 3 phases de sédimentation fine : MARA, la plus ancienne; MOLSON et COMOWINE (cette dernière la plus récente).

présence de vastes bancs de vase d'origine amazonienne qui migrent vers l'ouest le long de la côte sous l'action de la houle et des courants côtiers. (ii) la "jeune plaine côtière" qui varie entre 0 et 4 m au dessus du niveau de la mer. Il y a environ -6 000 ans le niveau des eaux a augmenté pour atteindre son état actuel. Durant cette période, les cuvettes, les cours d'eau se remplissent de sédiments jusqu'à ce que la plaine soit lisse donnant naissance aux paysages de Kwatta, de Nickerie, des rivières et de Polder. (iii) La "vieille plaine côtière" correspond aux zones qui s'étendent de 1 à 12 m au dessus du niveau de la mer. Elle a été formée pendant les périodes interglaciaires du Pléistocène, lorsque la mer a déposé des sédiments à un niveau plus élevé que l'actuel. Trois paysages distincts ont été formés par ce processus : le paysage de Lelydorp, le paysage de Para, le paysage de Mara.

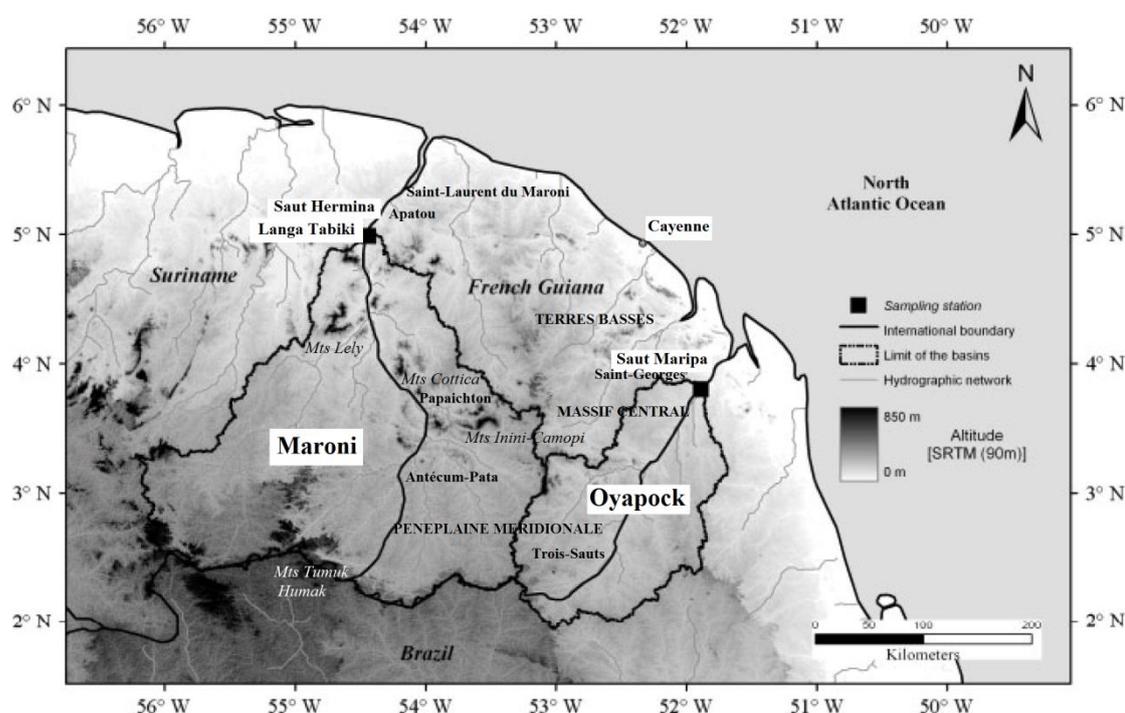


Figure 2-5. A) Reliefs du Suriname, de la Guyane Française et de l'Amapá et localisation de la pénélaine méridionale, la partie basse et le trait de côte, des bassins versants du Maroni et de l'Oyapock et de leur principale station hydrométrique, respectivement de Langa Tabiki (LT) et de Saut Maripa (SM) (adaptée de : Sondag *et al.*, 2010).

2.3.2 Sols et végétation ripicole

La couverture pédologique que l'on retrouve le plus couramment au sein du bouclier des Guyanes résulte de l'altération, sur une très longue période, de roches initialement très riches en oxydes de fer et d'alumines colloïdaux. Ces sols sous couvert forestier fortement hydrolysant et en climat équatorial sont altérés lentement dans un premier temps (saprolite à dominante

argileuse kaolinique) puis sous une forme plus indurée (fer, aluminium). Certaines roches s'altèrent plus que d'autres et permettent la formation de la cuirasse, ainsi les granites se transforment en sables car ils sont riches en quartz peu altérables, par contre, les roches d'origine volcanique se transforment plus rapidement en cuirasses latéritiques (Théveniaut and Delor, 2004). Ils sont extrêmement fragiles et peuvent très rapidement être stériles car ils sont pauvres en matières organiques et en cations.

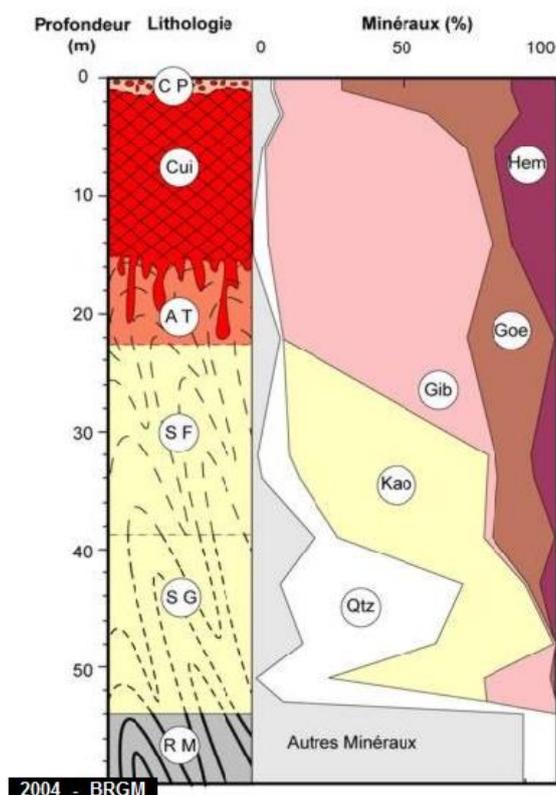


Figure 2-6. Profil latéritique type de des sols de Guyane : argile tachetée (AT), cuirasse (Cui), cuirasse pisolitique (CP), gibbsites (Gib), kaolinite (Kao), la roche mère (RM), quartz (Qtz), saprolite fine (SF) saprolite grossière (SG) d'après (Théveniaut and Freyssinet, 1999; Théveniaut and Freyssinet, 2002).

Le profil latéritique type des sols en Guyane (**Figure 2-6**) est décrit par Théveniaut et Freyssinet (2002) : la roche mère (RM) est en général fissurée et c'est à partir de ces fissures que l'altération va être initiée. On distingue ensuite une saprolite grossière (SG) plus riche en quartz (Qtz) et une saprolite fine (SF) plus argileuse vers le sommet. Son épaisseur varie de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Ensuite, on observe l'apparition de kaolinite (Kao) puis d'oxydes de fer comme les gibbsites (Gib) et la goéthite (Goe). L'argile tachetée (AT) se forme alors aux dépens de la saprolite. Les textures primaires ne sont plus visibles et des marbrures d'oxydes de fer apparaissent. Il y a prédominance de gibbsites et de goéthites.

Puis, une cuirasse (Cui) se développe par accumulation des oxy-hydroxydes de fer (goethite et hématite) aux dépens de la kaolinite (Kao). Lorsque le quartz primaire est dissous, la matrice ferrugineuse forme une cuirasse de type bauxitique. Au sommet de cette cuirasse, la matrice se désagrège progressivement, et on se retrouve en présence d'une cuirasse pisolitique (CP). L'épaisseur de la cuirasse est de 1 à plus de 10 mètres. Enfin, au-dessus de la cuirasse on retrouve souvent la latérite qui correspond à l'extrême désagrégation de la cuirasse.

Sur les terres hautes, la couverture végétale des bassins du Maroni et de l'Oyapock est presque exclusivement forestière, en continuité avec l'immense ensemble amazonien (de Granville, 1990). Le long des rives concaves des méandres, il n'y a pratiquement pas de transition entre la forêt et la rivière (**Figure 2-7**).

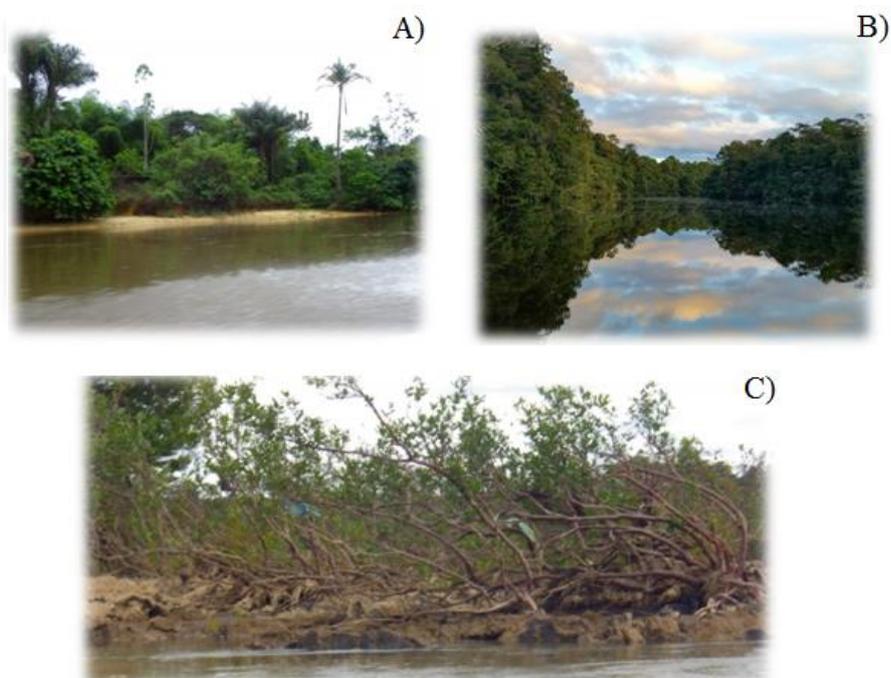


Figure 2-7. A) Zone de calme avec dépôts sableux le long de la rive et végétation arbustive et aceraceae surcîmant. B) Ripisylve en continuité avec la forêt ombrophile sempervirente. C) Roches en érosion avec déformation par le courant lors des crues des troncs de la végétation arbustive sur le Saut Hermina.

Ces berges impénétrables sont colonisées par une végétation dense, héliophile, composée d'arbustes et d'arbres entremêlés de lianes (de Granville, 1990). Elles sont les plus exposées à l'érosion fluviale et l'affouillement des berges déséquilibre les arbres qui finissent par tomber dans le lit du cours d'eau. Les rives convexes sont, à l'opposé des précédentes, des

zones d'eaux calmes et de sédimentation où la terre gagne sur le fleuve. Ces espaces sont colonisés par une végétation marécageuse basse et dense (dénommée localement "pri-pri") comportant quelques arbres isolés. Cette végétation ripicole peut aussi être composée de palmiers.

2.3.3 Hydrologie

Le réseau hydrographique de la Guyane Française mesure dans son intégralité environ 111 000 km de linéaire (BD CarTHAgE®). Il est ainsi l'un des plus denses de la zone équatoriale. Il peut être subdivisé en 5 grandes régions hydrographiques : deux sont transfrontalières et drainées par les fleuves Maroni et Oyapock, une est côtière et drainée par les fleuves Sinnamary, Kourou et Mahury et deux autres sont des bassins intermédiaires centraux drainés par les fleuves Approuague et Mana. L'organisation de ces fleuves, pilotée en amont par l'importance des précipitations est déterminée par le relief et la géomorphologie tous deux essentiellement structurés par la géologie et son histoire depuis près de -18 000 ans. Dans le cadre de cette étude seuls les bassins du Maroni et de l'Oyapock ont été étudiés.

La particularité du fleuve Maroni est de suivre une orientation nord-est depuis sa source jusqu'à Maripasoula, puis à ce niveau elle s'oriente vers le nord-ouest et c'est en aval du Tapanahoni qu'il reprend une direction nord-est avant de se jeter dans l'océan Atlantique. Sa principale station hydrométrique Langa Tabiki (LT) localisée en amont de son estuaire à 102 km est représentative de la plus importante surface (60 930 km² : Banque Hydro) de son bassin versant (66 814 km² : 57% au Suriname et 43% en Guyane Française). Le haut Maroni prend sa source dans les monts Tumuc-Humac au Suriname à 730 m d'altitude. Son cours principal est dénommé Alitani jusqu'en amont de Maripasoula. Le moyen Maroni, s'étend de Maripasoula à Grand-Santi où prend le nom de Lawa. Enfin, c'est à l'aval de cette commune que le bas Maroni prend le nom de Maroni. Sa longueur totale est d'environ 610 km. L'Alitani, le Lawa et le Maroni totalisent une longueur d'environ 310, 122 et 178 km.

De nombreux et importants tributaires se jettent dans le cours principal du Maroni. En rive gauche se succèdent principalement d'amont en aval les rivières Oelemary (haut Maroni), Gonini (moyen Maroni) et Tapanahoni ainsi que les criques Djoeka et Graan (bas Maroni). En rive droite, se succèdent les rivières Marouini, Inini (haut Maroni), Abounami (moyen Maroni) ainsi que les criques Beïman et Sparouine (bas Maroni). Le moyen Maroni possède des chutes d'eau ou cascades (dénommées « sauts » en Guyane) qui résultent de l'interruption du flot du cours d'eau par un brutal dénivelé. Les sauts peuvent être étroits ou larges et de longueur

variable pouvant aller de quelques mètres à plusieurs kilomètres. Ils présentent souvent une succession de plusieurs marches rocheuses dont l'organisation est souvent chaotique. Les plus importants sont situés dans la région des abattis Cottica à 225 km à partir de la source (**Figure 2-5**). Une succession de rapides s'échelonne sur 17 km pour un dénivelé total de 30 m. A la confluence avec le Tapanahoni - principal tributaire de 300 km de long venant du Suriname - débute une autre série de sauts très importants dont le dénivelé est de 10 m en période de hautes eaux. Il s'agit des sauts Poligoudou, Mambari, Mankaba et Krété. Le bas Maroni dont le lit mineur est plus large est lui aussi entrecoupé de sauts de plus petite taille et d'importance secondaire. Le dernier saut (le Saut Hermina ou SH) est localisé à 102 km environ de l'estuaire et correspond à la limite amont de l'influence des marées océaniques.

Le bassin de l'Oyapock est le deuxième plus grand bassin versant de la Guyane Française. Sa superficie est de 33 614 km² entre les latitudes 2-4°N et 52-53°W de longitudes. 51 % du bassin versant est localisé au Brésil. Le bassin versant en amont de la station hydrométrique de Saut Maripa (SM) couvre une superficie de 25 120 km² (BD Hydro). La longueur de l'Oyapock est de 404 km. Il porte le même nom tout au long de son cours. Il prend sa source dans la chaîne Inini-Camopi et ne reçoit que de petits tributaires. En rive gauche les rivières Yaroupi, Camopi puis les criques Sikini, Nouciri et Armontabo. En rive droite, se succèdent les rivières Matura, Lavé, Marupi et Anotaié. Comme le Maroni, l'Oyapock présente une succession de plus d'une centaine de petits sauts et de rapides. La navigation peut y être très difficile notamment dans les cours d'eau supérieurs. C'est en aval du Saut Maripa (8 m de hauteur) distant de 60 km de l'estuaire que s'arrête l'influence de la marée océanique.

Les débits des fleuves guyanais sont déterminés par le régime des précipitations contrôlé par le déplacement de la ZITC (**voir paragraphe 2.2**). Le régime hydrologique est de type unimodal. Il se caractérise par une augmentation des débits entre décembre et janvier, souvent entrecoupés d'une stagnation voire d'une baisse au cours du petit été de mars, correspondant à un arrêt plus ou moins marqué des précipitations, puis par une nette diminution entre juillet et novembre, durant la saison sèche. Les débits d'étiage moyen (**Figure 2-8**) du Maroni à LT sont de 361 m³.s⁻¹ pour la période 1952-2016 et de 200 m³.s⁻¹ pour l'Oyapock au Saut Maripa (période 1953-2016), à la fin de la grande saison sèche ou vers la fin novembre. Les mois de mai et de juin enregistrent les débits maximums moyens de crues de 3 400 m³.s⁻¹ à LT et de 1 700 m³.s⁻¹ à SM. Le débit maximum journalier connu est de 8 790 m³.s⁻¹ pour LT et 4 919 m³.s⁻¹ à SM. Les minima enregistrés sont de 41 m³.s⁻¹ à LT et de 57 m³.s⁻¹ à SM. Le rapport entre le débit maximum et minimum est estimé à 212 pour le Maroni et à 85 pour l'Oyapock.

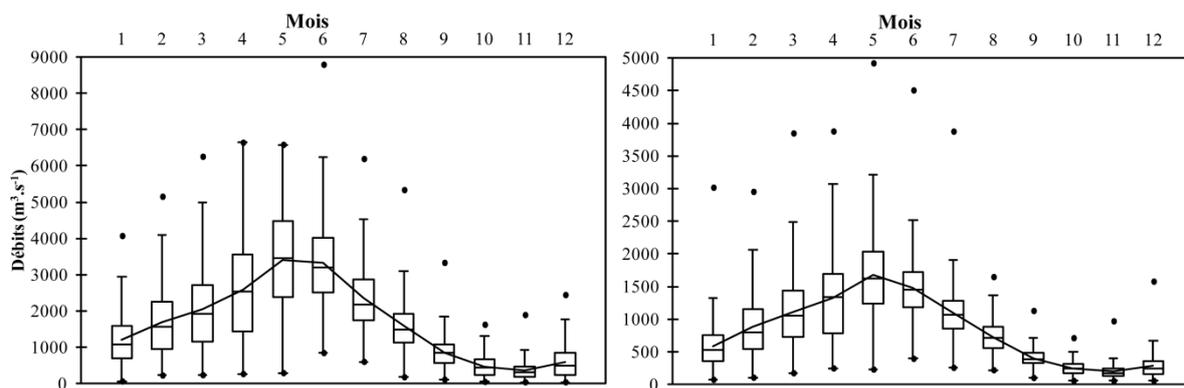


Figure 2-8. Diagramme des débits mensuels moyens (ligne noire), minima et maxima (points noirs), entre 1952 et 2016 à Saut Hermina (fleuve Maroni) à gauche et entre 1953 et 2016 à Saut Maripa (fleuve Oyapock) à droite.

2.3.4 Géomorphologie fluviale

Les grands fleuves guyanais ont un lit majoritairement méandriforme (Classe C de la classification de Rosgen, (1996) : avec une forte amplitude longueur/largeur, un faible ratio largeur/profondeur et une pente du lit fluvial $< 2\%$). Les plus belles formes de méandres sont observées à Maripasoula, à Papaïchton et en aval du Tapanahoni (**Figure 2-9**).

Ils possèdent également de nombreux passages en tresses (Classe DA de la classification de Rosgen, (1996) qui correspond à de multiples chenaux étroits et parfois profonds, avec des berges peu érosives bien végétalisées et principalement encombrés de petites îles). Les zones de tressages (ou en anastomoses), les plus importantes sont localisées autour du village amérindien d'Antecume Pata, dans la région des abattis Cottica en aval de Grand-Santi et en aval du Tapanahony.

A l'aval d'Apatou, le chenal est plus large et profond, plus linéaire avec des méandres dont le rapport largeur/profondeur est plus élevé (Classe F de la classification de Rosgen, (1996). C'est une zone de dépôts et de transferts, les débits plus y sont plus importants et le chenal est ancré dans la vallée avec un rapport largeur/profondeur élevé.

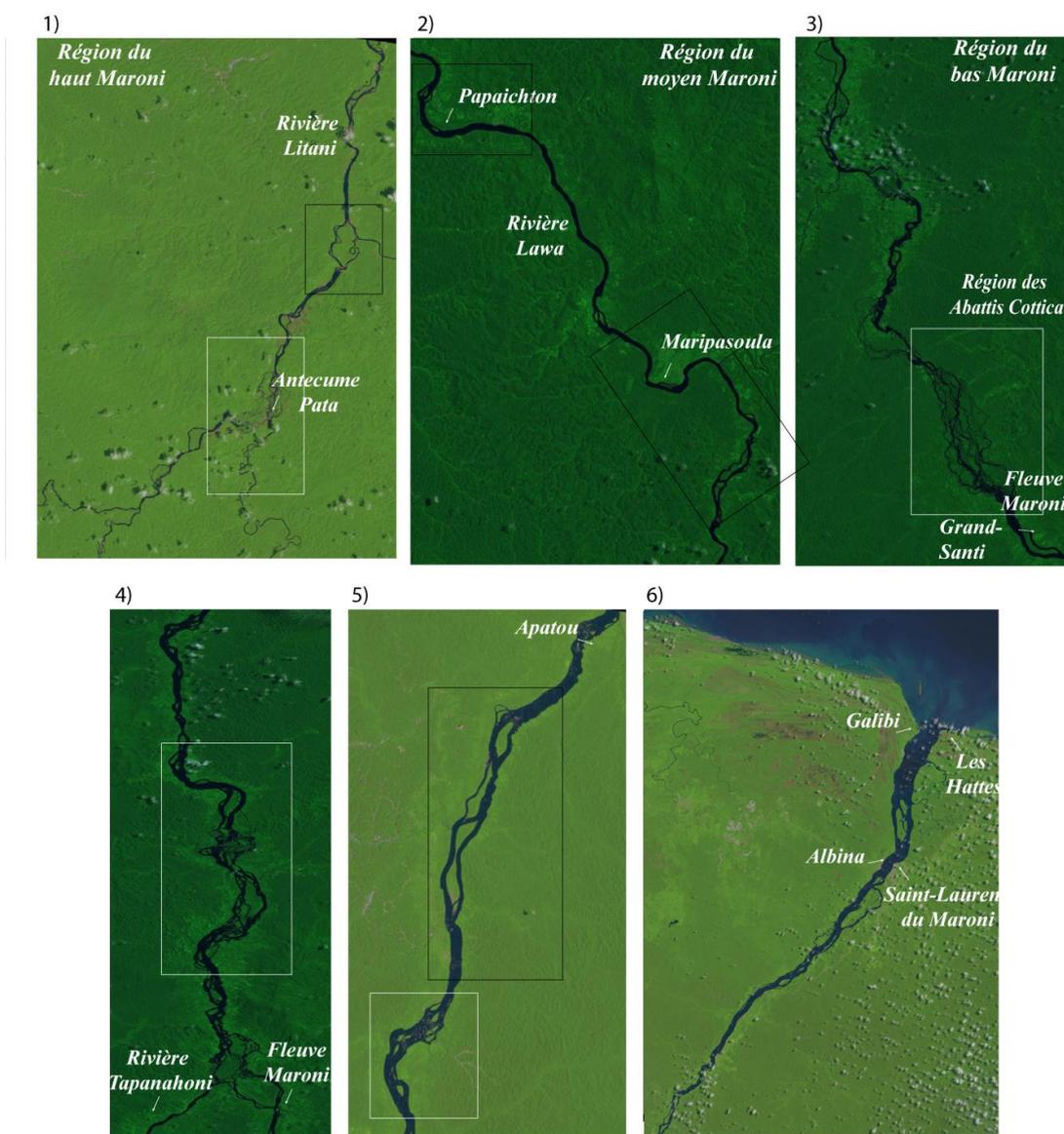


Figure 2-9. Formes géomorphologiques fluviales en tresses (rectangles blancs) et méandriformes (rectangles noirs) d'Antecume Pata à l'estuaire du Maroni.

2.3.5 Apports sédimentaires et qualité physico-chimique des eaux

Les eaux de l'ensemble des bassins versants guyanais sont homogènes, chaudes, avec un pH acide tendant vers le basique ($\sim 4,04 - 7,6$ unité pH), très faiblement conductrices ($\sim 12 - 35 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et riches en oxygène dissous ($6 - 9 \text{ mgO}_2\cdot\text{l}^{-1}$) (OEG, 2016). Ce sont des eaux oligotrophes qui répondent à la définition des eaux claires et noires dans la classification de Sioli (1984) applicable aux eaux amazoniennes et également aux eaux de l'Orénoque. Les éléments les plus représentés sont les matières organiques dissoutes et particulières liées au couvert forestier qui apporte des matières organiques composées d'acides humiques et fulviques

peu dégradables qui leur donnent une couleur de "thé" ainsi que le fer et la silice issus de l'érosion et de la dégradation des sols.

Très peu d'études existent sur la nature et l'origine des MES véhiculées par les fleuves Maroni et Oyapock. On sait néanmoins que, les taux d'érosion sur le bouclier des Guyanes font partie des plus faibles au monde (Guyot, 1993; Meade, 1994) : Dans des petits bassins versants naturels (d'une superficie de 400 m² à 1,5 ha) couverts par de la végétation forestière, Roche (1982) et Fritsch & Sarrailh (1986) ont étudié l'érosion des sols. Pour Roche (1982) l'érosion naturelle variait entre 20 et 80 t.an⁻¹km⁻² alors que pour Fritsch & Sarrailh (1986) les estimations étaient nettement inférieures de 5 et 7 t.an⁻¹km⁻² dont la moitié résulterait de processus d'érosions chimiques. Par ailleurs, en 1964, Hiez et Dubreuil indiquent que la présence d'estuaires peu ensablés suggère des apports solides limités par les fleuves guyanais.

L'étude la plus conséquente de l'époque sur les MES a été réalisée par Jouanneau et Pujos (1988) entre juin 1984 et mai 1985 sur les fleuves Maroni et la Comté, mais pour des débits inférieurs aux moyennes interannuelles (**Figure 2-10**). Les MES ont été recueillies à partir de prélèvements tous les trois jours, réalisés en surface et en bordure des berges. Les plus faibles concentrations obtenues variaient entre 0,1 et 10 mg l⁻¹ et les plus fortes étaient inférieures à 30 mg.l⁻¹. Au cours de l'année seulement 2 - 3 % de MES étaient supérieures à 20 mg.l⁻¹, 39 % étaient entre 10 et 20 mg.l⁻¹, 50 % variaient entre 5 et 10 mg.l⁻¹ et 10 % entre 0.1 et 5 mg.l⁻¹. Les concentrations de MES au-delà de 20 mg.l⁻¹ sont donc souvent liées à une anthropisation des bassins versants (Vigouroux *et al.*, 2005).

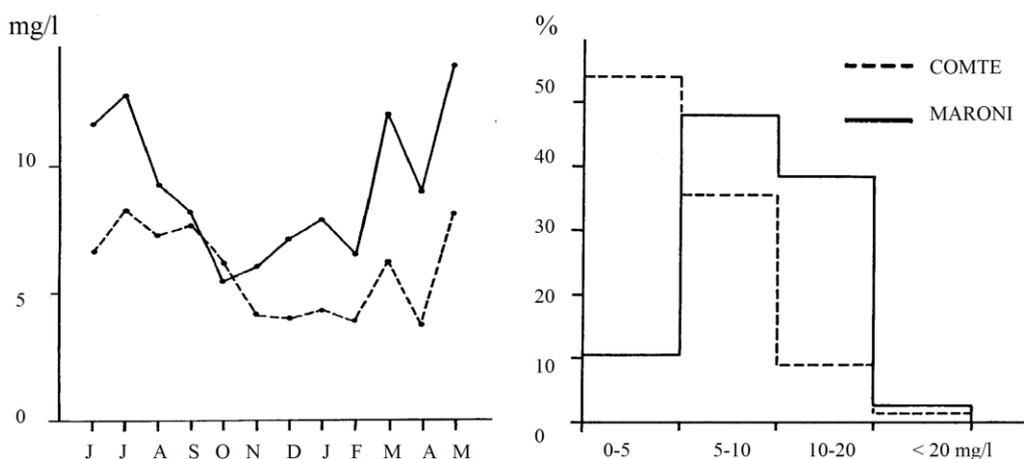


Figure 2-10. A gauche, charges moyennes mensuelles en MES et à droite, histogrammes des fréquences de MES mesurées sur la rivière Comté et le fleuve Maroni sur la période 1984-1985 (Jouanneau and Pujos, 1988).

Peu d'informations sont disponibles sur les différents horizons et profils pédologiques au niveau des berges et sur leur potentiel à s'éroder. On sait par les travaux de [Lasserre \(2006\)](#) et [Marteau *et al.* \(2011\)](#) qu'en général les berges correspondent à des talus argileux abrupts, subverticaux ou à forte pente, d'une hauteur de 2 à 6 m par rapport au niveau des cours d'eau en période d'étiage. Lorsque ces talus ne sont pas soumis à des perturbations anthropiques leur érosion est faible. Les berges correspondent alors soit à des zones de forêt à flanc de colline, ou à des roches affleurant, ou à de petits bancs de sable. Au contraire, autour des bourgs et des villages, les talus sont souvent fortement dégradés par l'occupation et les activités anthropiques. Les berges sont en partie urbanisées et, déboisées avec très souvent la réalisation de débarcadères (dégrad) mal aménagés. En outre le trafic intense des pirogues génère des remous dont le battement des vagues contre les rives est à l'origine d'un processus d'érosion par batillage. Les berges sont soumises à une érosion continue. Ce phénomène est accentué par le ruissellement des eaux pluviales ou d'eaux usées peu ou mal maîtrisé.

Dans le Maroni, [Négre and Lachassagne, \(2000\)](#) ont classé les charges en ions par ordre d'importance $\text{Na} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$ et $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{NO}_3$ sur l'Oyapock et ont montré une dominance des apports par les précipitations. Par ailleurs, [Sondag *et al.*, \(2010\)](#) ont mesuré une faible charge en Ca et Mg avec un placement des échantillons vers l'extrémité $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, pour les eaux du Maroni à Saut Hermina et de l'Oyapock à Saut Maripa, (**Figure 2-11**). Les eaux à la station du SNO-HYBAM au Saut Hermina (SH) sont donc plus alcalines qu'à la station du Saut Maripa (SM) sur l'Oyapock (moyenne : SM= 64,3 $\mu\text{mol l}^{-1}$, SH= 51,9 $\mu\text{mol l}^{-1}$) en raison de sa proximité avec l'océan qui influence les vents et les apports de précipitations plus chargées.

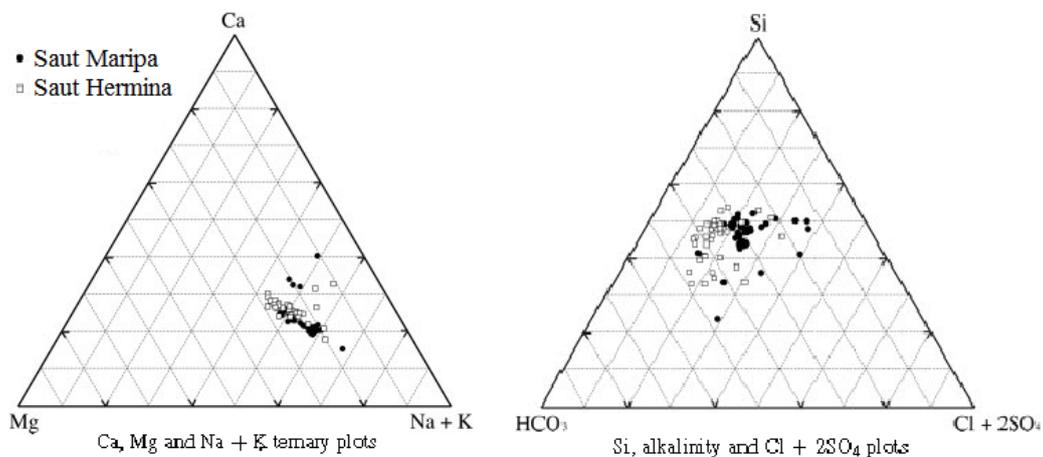


Figure 2-11. Diagrammes de piper A) Ca, Mg, Na + K et B) Si, alcalinité et Cl + 2SO₄ ([Sondag *et al.*, 2010](#)) au Saut Hermina (SH) sur le Maroni et au Saut Maripa (SM) sur l'Oyapock.

2.3.6 Occupation des sols

L'histoire du peuplement de la Guyane et des bassins du Maroni et de l'Oyapock est directement liée à celle des amérindiens et remonterait à -6 000 ans (Zonzon and Prost, 1996). Les français s'installeront définitivement en Guyane en 1664 principalement, sur l'île de Cayenne. Peu à peu la population amérindienne se replie alors vers l'intérieur des terres et en partie le long du Maroni et de l'Oyapock. Avec la guerre civile au Suriname de 1986 à 1992, les Bushinengués (population de "noirs-marrons" descendants d'anciens esclaves de la traite négrière au Suriname en rébellion et qui avaient décidé de retourner vivre, comme leurs ancêtres, dans la forêt) se sont également repliés le long du Maroni. Aujourd'hui, plusieurs types de communautés cohabitent le long du Maroni et de l'Oyapock des populations amérindiennes et bushinenguées et également des populations d'origines européennes (essentiellement française), sud-américaines (brésilienne mais aussi péruvienne et colombienne) et caribéennes.

Du côté français le long du Maroni se succèdent Maripasoula (9 373 habitants en 2013), Papaïchton (5 176 habitants en 2013), Grand-Santi (5 183 habitants en 2013), Apatou (7 868 habitants en 2013) et Saint-Laurent-du-Maroni (41 515 habitants en 2013) (ONF, 2013a; Blaizeau, 2016). Du côté surinamais : Benzdorp (600 habitants en 2013) en face de Maripasoula, Dri tabiki (population non connue) le long du Tapanahoni, Langa tabiki (population non connue), Bigiston (population non connue) et enfin Albina (5 247 en 2012) en face de Saint-Laurent-du-Maroni.

Le long de l'Oyapock, les principaux villages du côté français sont Trois-Sauts et Camopi (1 707 habitants en 2013) au sud ainsi que Saint-Georges (3 907 habitants en 2013) localisé à une cinquantaine de km de l'estuaire (Blaizeau, 2016). Du côté brésilien, on trouve Oiapoque en face de Saint-Georges qui comptabilise 20 960 habitants en 2008 ainsi que Vila Brazil (population non connue) en face de Camopi.

A la population dénombrée par l'Insee, il faut ajouter une population clandestine non négligeable, provenant des pays frontaliers à la Guyane (Brésil, Suriname). En décembre 2010, le nombre de clandestins en Guyane était estimé entre 30 000 et 60 000. Les fleuves sont ainsi de plus en plus soumis aux incidences des pressions démographiques (urbanisation et création d'infrastructures), à la déforestation et donc à l'érosion des sols, avec des impacts non négligeables sur la qualité des eaux. Les moyens de transports vers l'intérieur des terres se font essentiellement par voie fluviale en pirogue et contribuent à la dégradation chimique et physique de l'eau respectivement via les rejets d'hydrocarbures (transbordement et transport de

carburant en fûts métalliques et résidus de combustion des moteurs hors-bords) et par le batillage le long des berges souvent mal aménagées et fragilisées par une intensification du trafic fluvial.

Il existe plusieurs types d'activités agricoles dans les bassins du Maroni et de l'Oyapock. Il s'agit principalement de territoires dédiés à l'agriculture avec conservation de la végétation naturelle. Ce mode de culture correspond à des abattis soit itinérants, exploités durant une période puis déplacés, soit fixes et résultant d'héritages culturels et parcellaires complexes (Montabo, 2004). L'abattis-brûlis est une stratégie d'exploitation agricole d'origine amérindienne encore très appliquée et cela sans grands changements depuis 200 ans. Il correspond à une alternance de cycles de plantations et de jachères (**Figure 2-12**). Après l'abattage de quelques grands arbres, le défrichage est rendu plus aisé. Les palmiers sources de fruits comestibles comme l'awara, le comou ou le pinot sont épargnés. La végétation basse est ensuite brûlée en fin de saison sèche après une mise à feu par le déversement d'essence. La plantation se fait essentiellement par bouturage exécuté collectivement. Il s'agit donc d'un mode d'exploitation familiale, voire villageoise, qui dépasse rarement plus de trois hectares. Elle ne nécessite que très peu le recours à des outils et à la mécanisation. Il en est de même pour les apports d'engrais afin de fertiliser les sols.



Figure 2-12. Photos d'abattis © Parc Amazonien de Guyane

A l'échelle mondiale, l'impact des activités agricoles sur la qualité de l'eau de surface est relativement bien connu. Par le lessivage des sols tous les produits utilisés en agriculture peuvent se retrouver dans les milieux aquatiques. A partir de données recueillies pour 3 années, dans deux bassins témoins et trois parcelles expérimentales en forêt naturelle guyanaise, les concentrations de MES après défrichage étaient 20 à 30 fois plus importantes qu'en milieu

naturel et, les charges de lit de fond étaient 50 à 100 fois plus élevées. Sur les parcelles de pâturages, et sans prendre en considération une activité d'élevage, elles seraient entre 2,4 et 3,2 fois supérieures à ce que l'on aurait observé sous forêt (**Figure 2-13**). L'érosion des sols des pâturages est donc faible, si on la compare avec celle de l'année du défrichement (Fritsch and Sarrailh, 1986).

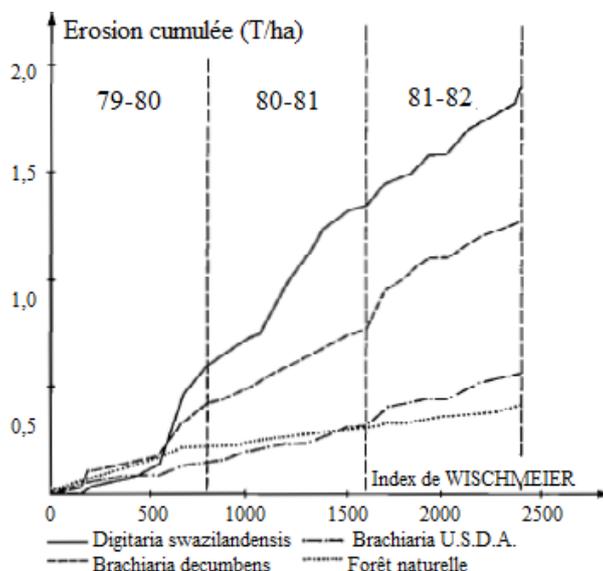


Figure 2-13. Erosion cumulée sur des parcelles de pâturages en fonction de l'érodibilité de la pluie (index de WISCHMEIER), des espèces de graminées cultivées, et en comparaison avec une parcelle sous forêt primaire (Fritsch and Sarrailh, 1986)

En Guyane, la forêt appartient principalement au domaine de l'Etat. Les exploitations forestières sont gérées par l'Office National des Forêts (ONF). Pour des raisons essentiellement économiques et logistiques, les parcelles d'exploitation sont principalement localisées à moins de 70 km de la côte. Depuis 2009, l'activité doit intégrer "la charte d'exploitation à faible impact" qui implique des normes à respecter pour l'exploitant (ONF, 2016). Parmi ces normes il est possible de citer : 1) le respect d'une distance minimale de 100 m du cours d'eau pour l'exploitation du bois, 2) l'extraction des arbres en période sèche pour éviter les chablis et par voie de conséquence la mise en suspension de particules des sols, pouvant atteindre les cours d'eau et en accroître la turbidité. La déforestation est essentiellement illégale pour permettre l'implantation d'activité minière ou pour le développement de l'agriculture et fait l'objet de nombreux conflits sur ce territoire.

Les exploitations forestières au Suriname et au Brésil sont moins soumises aux contrôles qu'en Guyane. Souvent dans ces deux pays la régularisation foncière passe par une étape de déforestation, en tant que preuve d'une occupation, puis l'utilisation et la valorisation des terres

justifient alors une demande d'appropriation (Fearnside, 2008). En Amazonie brésilienne, la conversion de la forêt est autorisée par la législation dans la limite de 20 % de la superficie totale de chaque propriété (Brasil, 2001). La déforestation est donc sans nul doute l'un des principaux moteurs du commerce de bois brésilien (Lentini *et al.*, 2003). Néanmoins, les aménagements forestiers sont contrôlés depuis 1995 par le gouvernement, dans un souci de stimuler et de promouvoir la gestion des forêts (ITTO, 2005; de Freitas, 2010). En Amazonie surinamaïse, la forêt n'appartient à personne, même si les Amérindiens et les Bushinengués en réclament la propriété. En outre il n'existe pas de critères nationaux formulés pour la gestion durable des forêts. En 1993, le Suriname invitait les investisseurs étrangers à venir exploiter des concessions dans le pays. Depuis 2003, 67 concessions ont été allouées exploitant 1,74 millions d'hectares et correspondant en 2000 à 2,5 % du Produit Intérieur Brut (ITTO, 2005).

Les activités minières du bouclier des Guyanes sont centrées dans la ceinture de roches vertes riches en bauxite, fer, manganèse, or et diamant (Fong-Sam, 2003; Daoust *et al.*, 2011; Théveniaut *et al.*, 2011; Rahm *et al.*, 2015). Au Suriname, l'industrie des mines porte également sur la bauxite (**Figure 2-14**) (Fong-Sam, 2003). En Guyane Française, l'or est le principal minéral exploité (**Figure 2-15**). Au Brésil dans l'état d'Amapa, l'exploitation s'organise surtout autour de l'or. L'histoire de l'or en Guyane peut se subdiviser en deux périodes. Le premier cycle a commencé avec la découverte officielle d'or en Guyane en 1855 - dans la crique de Aïcoupaïe dans le bassin de l'Approuague (à l'est de Cayenne)- il a duré jusqu'à la seconde guerre mondiale. Le deuxième cycle, de l'après-guerre à nos jours, (Suriname, 1988; Montabo, 2004) est marqué par une croissance incontrôlée depuis 1980. La réglementation des petites exploitations minières au Brésil a provoqué à cette date le déplacement des mineurs brésiliens à faibles revenus (garimpeiros) vers les Guyanes où les contrôles administratifs sont moins contraignants (WWF Guianas, 2012; Cremers *et al.*, 2013). Avec la mécanisation (dragues à godets, concasseurs ...), l'activité s'est rapidement répandue. En outre bénéficiant de l'augmentation du prix de l'or sur les places financières internationales et confrontée à l'absence d'autres activités économiques, l'exploitation de l'or a généré des bénéfices importants qui ont considérablement accru son attractivité (Hammond *et al.*, 2007).

Les extractions se font souvent à petite échelle via des techniques de lavage à l'aide de jets d'eau afin de récupérer l'or contenu dans les sédiments des terrasses alluviales ou du lit des rivières (Cremers *et al.*, 2013; Heemskerk *et al.*, 2015). Si en Guyane Française en 1990, les activités minières ne concernaient que 212 ha elles occupaient respectivement 4 028 ha, 12 011 ha (Coppel *et al.*, 2008) et 21 000 ha (Debarros and Joubert, 2010) en 2000, 2005 et 2008. Enfin

en 2015, [Rahm et al. \(2015\)](#) ont estimé à près de 24 000 ha les surfaces utilisées par les activités d'orpaillage dont la plus grande part pratiquées illégalement. Les statistiques sur l'évolution de l'orpaillage au Suriname indiquent une augmentation de 8 300 ha en 2001, à plus de 27 000 en 2008 et enfin près de 54 000 ha en 2014 ([Rahm et al., 2015](#)) soit une croissance de 650 % en 15 ans. A l'opposé, dans la région de l'Amapa les surfaces occupées par les activités minières sont restées beaucoup plus stables avec même une très légère baisse entre 2001 (2 147 ha) et 2014 (2 124 ha).

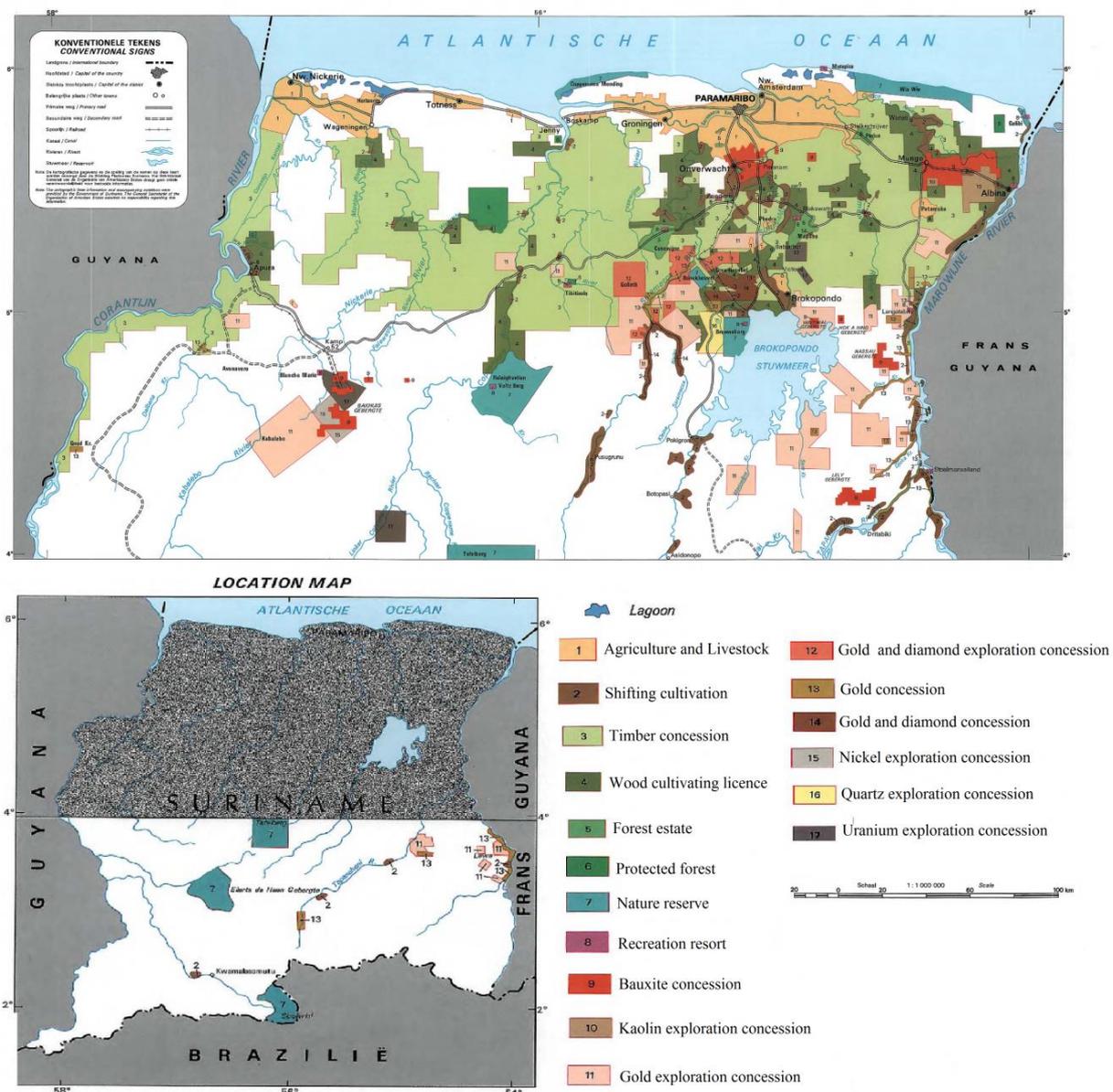


Figure 2-14. Localisation des concessions d'exploitations au Suriname ([Suriname, 1988](#)).

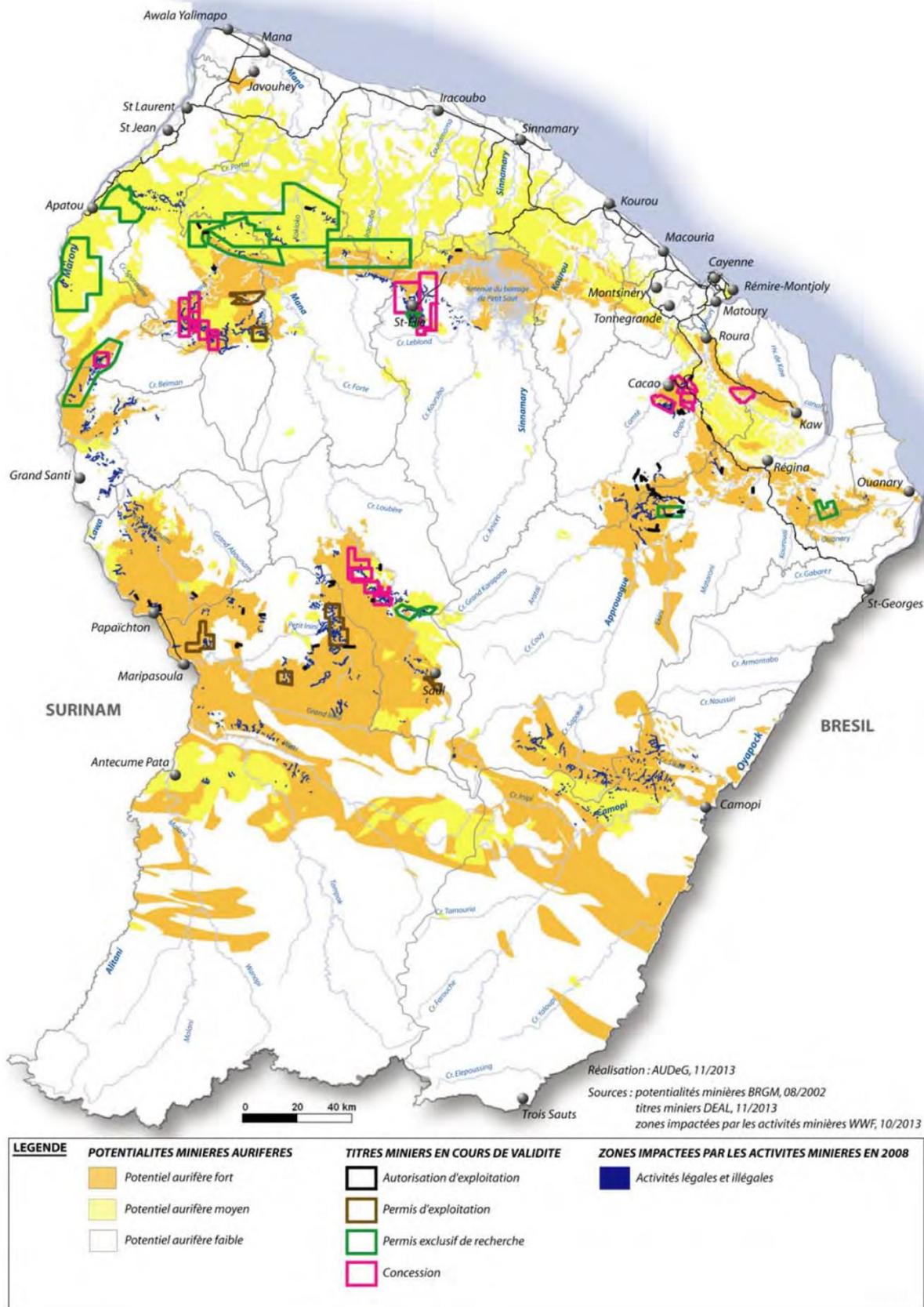


Figure 2-15. Localisation des zones aurifères potentielles en Guyane (SAR, 2014).

2.4 Les spécificités du bassin versant de l'Orénoque

Le bassin de l'Orénoque d'une superficie de 819 252 km² à Ciudad Bolivar (Yepez *et al.* 2017) est localisé dans la partie nord de l'Amérique du Sud, au Venezuela ainsi qu'en Colombie, à l'extrême ouest du bouclier des Guyanes, entre 2 et 10° de latitude nord et entre 62 et 75° de longitude ouest au sein des zones équatoriale et tropicale de l'hémisphère nord. Il constitue le principal hydrosystème du Venezuela (70 % du bassin) et de la Colombie (30 %) (Lewis and Saunders, 1989). Il s'étend sur 7 des 23 régions administratives du Venezuela (Apure, Guarico, Anzoategui, Monagas, Delta Amacuro, Bolivar et Amazonas) et sur 5 des 32 départements de la Colombie (Arauca, Vichada, Guainia, Guaviare, Meta). L'Orénoque prend sa source à 1 047 m dans la montagne de Parima au mont Delgado Chalbaud (Carbonell, 1998).

2.4.1 Relief

Le versant du bouclier des Guyanes en rive droite de l'Orénoque est caractérisé par des altitudes moyennes (~ 500 mètres) ainsi que de hauts reliefs tabulaires résiduels à contours particulièrement abrupts, les tépuys dont l'altitude s'échelonne entre 1 200 m et plus de 3 000 m. Compte tenu de cette topographie, les zones basses pouvant constituer des plaines d'inondation y sont peu développées.

A l'opposé, le pourtour du bassin versant gauche de l'Orénoque, correspond à des zones très élevées (Cordillère des Andes et Cordillère de la Caraïbes) atteignant 4 000 mètres. Leurs piémonts permettent l'extension de vastes zones basses inondables formant des plaines alluviales connues sous la dénomination de "Llanos" (**Figure 2-16**).

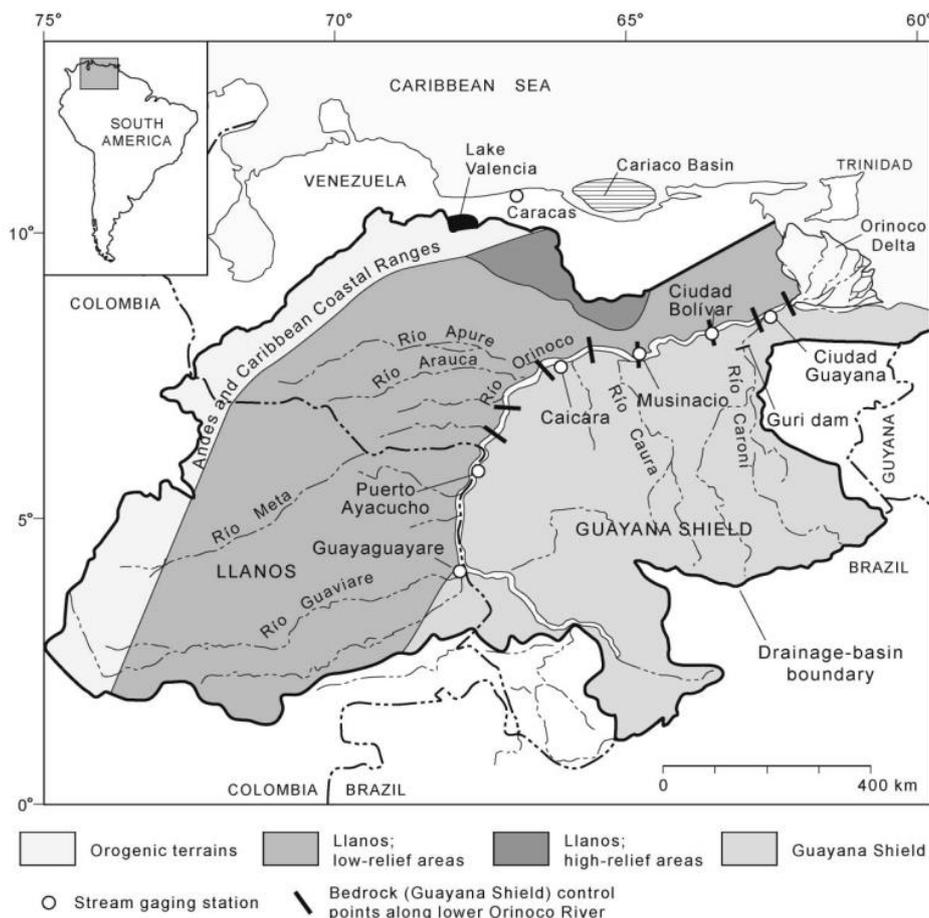


Figure 2-16. Relief et formations géologiques constitutives du bassin versant de l'Orénoque avec la localisation de ses principaux tributaires et seuils rocheux (Warne *et al.*, 2002).

2.4.2 Végétation ripicole

La végétation du bas cours de l'Orénoque est constituée d'herbacées et d'arbustes (d'une hauteur d'environ 3 m) adaptés à des sols hydromorphes temporairement inondés (Diaz and Rosales, 2006). Dans le chenal sur les bancs de sables, on rencontre des arbustes (d'une hauteur d'environ 5 m). En marge du chenal sur les dépôts sédimentaires argilo-vaseux, on observe une couverture arbustive plus dense. Dans les cuvettes et les dépressions se sont principalement des prairies de macrophytes aquatiques et des bosquets. 82 familles dont 212 genres sont recensées. Les principales familles avec plus de 10 espèces sont les *Fabaceae*, les *Mimosaceae*, les *Myrtaceae*, les *Euphorbiaceae*, les *Rubiaceae* et les *Poaceae*.

La végétation du moyen Orénoque est essentiellement constituée de savanes non inondables et inondables, sur sol argilo-limoneux hydromorphe, composées essentiellement d'arbres ligneux et des palmiers coroba (*Attalea butyracea*), et macanilla (*Astrocaryum jauari*), de bosquets (d'une hauteur d'environ 3 m), de forêts inondables et de prairies de macrophytes

aquatiques (Díaz, 2009). Les barres sableuses sont principalement constituées d'arbustes inondables (d'une hauteur d'environ 5 m). Des cultures et de la végétation secondaire sont également observables. Les familles les plus représentées sont les *Poaceae*, les *Fabaceae*, les *Euphorbiaceae* et les *Cyperaceae*.

2.4.3 Hydrologie

L'Orénoque s'étend sur une longueur de 2 140 km depuis le mont Delgado Chalbaud jusqu'à son delta (Silva-Léon, 2005). Il est lié à l'Amazone par le canal du Casiquiare qui déverse environ 30 % des eaux du haut Orénoque à l'Amazone au point nommé "Tama-Tama" (Georgescu-Pipera and Georgescu-Pipera, 1993; Laraque *et al.*, 2006). Son bassin versant se divise en quatre zones distinctes (**Figure 2-17**) :

- ✚ Le haut Orénoque s'étend du mont Delgado Chalbaud dans la montagne Parima (63°21'W et 2°19'N) à San Fernando de Atapabo (67°40'W et 4°05'N) (Mora, 2011). Il est long d'environ 690 km pour un bassin versant de 101 000 km² (Silva-Léon, 2005). Ses principaux affluents sont le Mavaca, l'Ocamo, le Padamo, le Cunucunuma, le Yagua et le Ventuari. Tous prennent leur source en rive droite excepté le Mavaca. Le Ventuari est celui qui contribue le plus aux débits de l'Orénoque (15 %) (Warne *et al.*, 2002).
- ✚ Le moyen Orénoque est délimité par sa confluence avec les rivières Atabapo et Guaviare jusqu'à l'Apure (66°25'O et 7°38'N) (Mora, 2011). D'une longueur d'environ 525 km son bassin versant occupe une surface de 98 000 km² (Silva-Léon, 2005). En rive gauche se déversent les rivières Atabapo, Guaviare, Vichada, Tuparro, Tomo, Vita et Meta qui prennent leur source en Colombie. En rive droite s'écoulent les rivières Cinaruco, Capanaparo, Arauca. Les plus grands tributaires sont le Guaviare, le Meta et l'Apure et ils contribuent respectivement à 18 % et 15 % des apports en eau de l'Orénoque (Warne *et al.*, 2002).
- ✚ Le bas Orénoque débute après la confluence avec l'Apure et finit au niveau du delta. Son bassin couvre une superficie de 301 000 km² (Silva-Léon, 2005). Ses principaux tributaires sont Manapire, Cuchivero, Zuata, Caura, Aro et Caroni. Les apports des rivières Caura, Cuchivero et Caroni en rive droite représentent 20 % des eaux de l'Orénoque (Warne *et al.*, 2002).

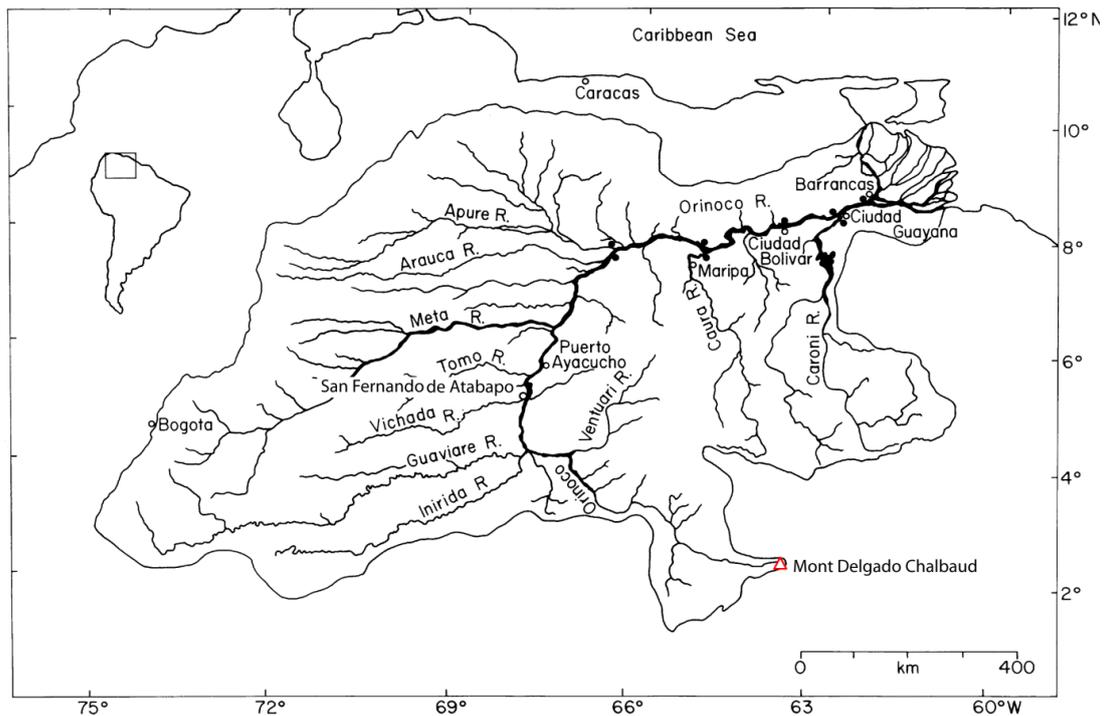


Figure 2-17. Carte du réseau hydrographique dans le bassin versant de l'Orénoque (Lewis and Saunders 1989). De par la taille de son bassin versant et l'important régime de précipitations qui y opère, l'Orénoque à son exutoire est le troisième plus grand fleuve au monde tant par son débit moyen ($37\,600\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) (Cordoba, 1999) que par son débit spécifique ($37,6\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\text{ km}^{-2}$) (Laraque *et al.*, 2013b).

La plaine d'inondation (ou plaine alluviale) de l'Orénoque est composée de nombreux lacs et chenaux. Elle s'étend sur une surface de 6,4 à 9,3 km² (Hamilton and Lewis, 1990; Lewis *et al.*, 1995), principalement en rive gauche entre la rivière Capanaparo et Ciudad Guayana. Elle contribue à environ 50 % des apports d'eaux à l'Orénoque (Warne *et al.*, 2002).

Contrairement au fleuve Amazone, la variation des niveaux d'eaux entre la saison sèche et la saison des pluies est bien marquée. Au cours de ce régime de type unimodal il est possible d'identifier quatre périodes (**Figure 2-18**). Les niveaux minima de basses eaux sont observés entre février et avril alors que les mois d'août et septembre correspondent à la période des plus forts débits. Ces périodes sont en outre encadrées par des phases d'augmentation et de réduction respectivement entre mai et juillet et entre novembre et janvier. Selon les années, les variations des hauteurs d'eau à Ciudad Bolívar peuvent être de 16 m (Laraque *et al.*, 2013b).

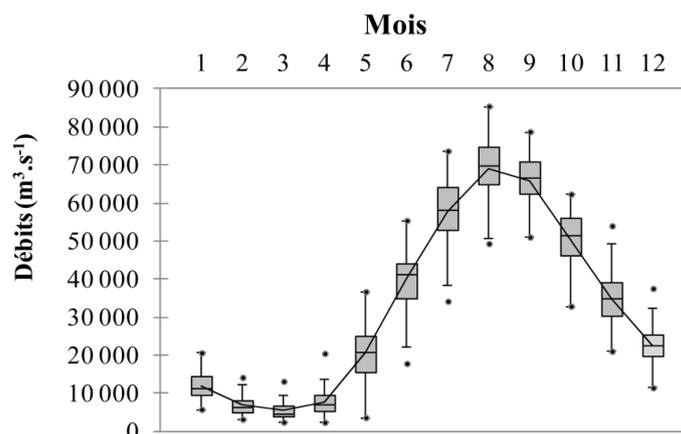


Figure 2-18. Diagramme des débits mensuels moyens (ligne noire), minima et maxima (points noirs), entre 1926 et 2015, à Ciudad Bolivar.

2.4.4 Géomorphologie fluviale

Le cours de l'Orénoque est sinueux présentant de nombreux chenaux instables (cours d'eau en anastomose), caractérisés par de nombreuses bandes de sable et petites îles (López and Perez-Hernandez, 1999). (**Figure 2-19 A et B**).

Le long de son cours se succèdent des sections larges de plusieurs kilomètres (maximum 8 km) et des sections plus étroites (quelques centaines de mètres) ainsi que d'intenses seuils rocheux dont les plus réputés sont au niveau de la "Boca del Infierno" (**Figure 2-19 C**). En effet, 8 seuils géologiques (**Figure 2-16**) se succèdent entre Puerto Ayacucho et le delta (Warne *et al.*, 2002).

Sa plaine d'inondation, composée de lacs et chenaux, s'étend principalement en rive gauche entre la rivière Capanaparo et Ciudad Guayana. Certains de ses affluents comme ceux de l'Apure ou du Caura ont également des plaines internes d'inondation.

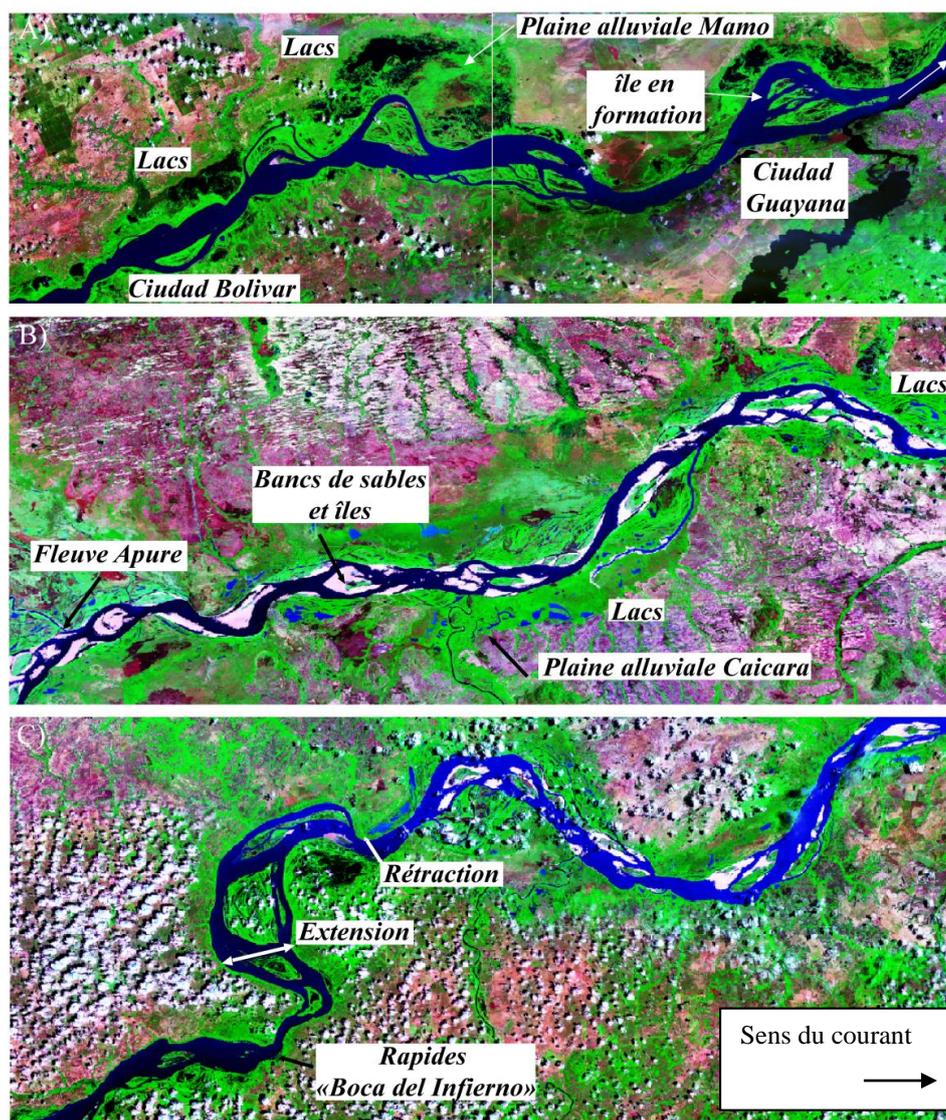


Figure 2-19. A) Plaine alluviale de Mamo dans la région du bas Orénoque en hautes eaux, B) Cours en tresses en aval de la rivière Apure avec bancs de sables et nombreuses îles en basses eaux, C) Méandres complets en aval de la rivière Caura durant la montée des eaux avec extension et rétraction du cours d'eau favorisant l'homogénéisation des particules (images : Landsat Sensor ETM + Pan Mosaics 1999-2003).

2.4.5 Apports sédimentaires et qualité physico-chimique des eaux

Les eaux des fleuves sud-américains et principalement celles de l'Amazonie ont été classées pour la première fois par [Sioli \(1984\)](#) en trois groupes en fonction de leur couleur : les eaux blanches, claires et noires. Les eaux blanches provenant des Andes sont très turbides, de couleur ocre, avec une très faible transparence comprise entre 0,10 et 0,50 m et des valeurs de pH basiques (entre 6,2 et 7,2). Les eaux claires ont une transparence assez élevée (entre 1,10 et

4,30 m) et leurs pH sont nettement plus acides (compris entre 4,5 et 7,8). Enfin, les eaux noires ont une coloration de "thé" ou de "café", avec une transparence moyenne (1,30 et 2,90 m) et des pH encore plus acides (compris entre 4,5 et 6,0) (Mora *et al.*, 2011). Certains affluents traversant les plaines de l'Orénoque ne s'inscrivent pas totalement dans la classification établie par Sioli (Mora *et al.*, 2008). Cependant la majorité d'entre eux présente des caractéristiques similaires à celles des eaux de l'Amazonie.

Les rivières provenant des Andes colombiennes et vénézuéliennes ont des eaux blanches (Stallard *et al.*, 1991) en raison de processus érosifs, plus intenses dans les Andes que dans le bouclier des Guyanes, et dont la variabilité temporelle dépend des saisons comme pour la rivière Apure (Mora *et al.*, 2010b). Ces affluents (essentiellement le Guaviare, le Meta et l'Apure) apportent de 85 à 90 % des MES transportées par l'Orénoque (Meade *et al.*, 1990) (**Figure 2-20**). Par ailleurs, leurs eaux sont caractérisées par une forte conductivité électrique (CE) liée à des concentrations élevées en cations (Ca, K, Na et Mg) résultant des altérations atmosphériques et/ou climatiques (météorisation) des silicates, et des roches carbonates, riches en évaporites (Lewis and Saunders, 1989; Edmond *et al.*, 1996; Gaillardet *et al.*, 1999).

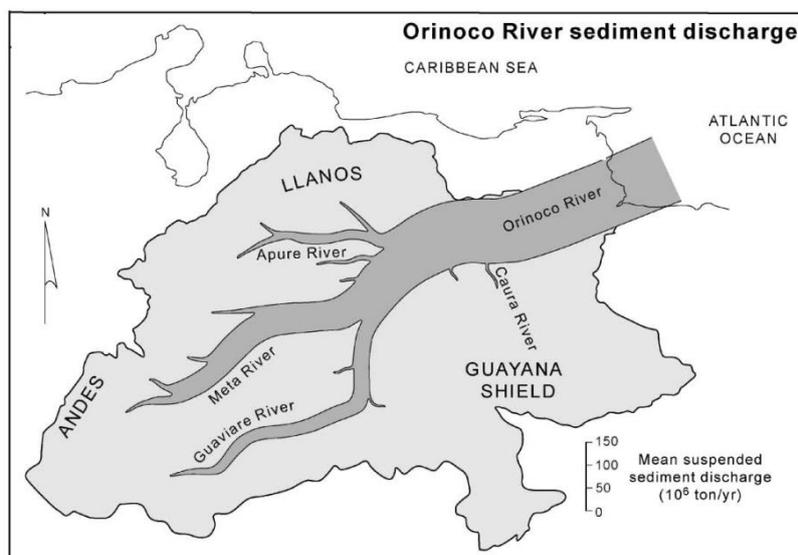


Figure 2-20. Carte des principaux contributeurs des apports sédimentaires à l'Orénoque (Warne *et al.*, 2002).

Au contraire, les affluents provenant du bouclier des Guyanes possèdent une charge sédimentaire variable qui ne contribue qu'à 5 % de la charge particulaire totale de l'Orénoque (Meade *et al.*, 1990) avec comme contributeurs majeurs les rivières Caroni, Caura et Caicara (**Figure 2-20**). Cette participation est la conséquence de faibles taux d'érosion du bouclier : un mètre tous les millions d'années sur les zones de Tépuis comme le Roraima et l'Auyan (Brown

et al., 1992), 10 m tous les millions d'années dans les régions hautes du Venezuela et 5 mètres dans les zones basses comme dans la région du Caura (*Lewis et al.*, 1987; *Edmond et al.*, 1995). Leurs eaux fluviales sont caractérisées par des concentrations importantes en COD essentiellement sous la forme de composés humiques plus ou moins solubles (de fulvique à humique) qui leur donnent leur coloration de "thé". Elles sont pauvres en ions majeurs mais riches en éléments chimiques considérés comme peu solubles tel le fer, l'aluminium et la silice (*Lewis et al.*, 1987) dus au contexte pédogénétique de leur bassin versant essentiellement podzoliques et peu affectées par les processus d'altération physique et de transport érosif.

La conséquence de ce fort contraste hydro-chimique entre les eaux des affluents en rive gauche et en rive droite est qu'il existe une forte hétérogénéité des eaux le long du gradient amont-aval de l'Orénoque et de la rive gauche vers la rive droite et ce jusqu'en aval des grands seuils rocheux de la "Boca del Infierno". Enfin, au niveau de Ciudad Bolivar, la géochimie des eaux pour les cations est dominée par le Ca (53 %), dont la charge est le double de Mg (21 %) et de Na + K (25 %) (**Figure 2-21**). Pour les anions, ce sont les bicarbonates (HCO_3^-) qui dominent avec une distribution le long de $\text{SO}_4 - \text{HCO}_3^-$ et une basse fraction de Cl (env. 10 %). Les charges de $\text{HCO}_3^- - \text{SiO}_2$ et $\text{Cl} + \text{SO}_4$ sont alignées sur un axe alcalin-Si (*Laraque et al.*, 2013a).

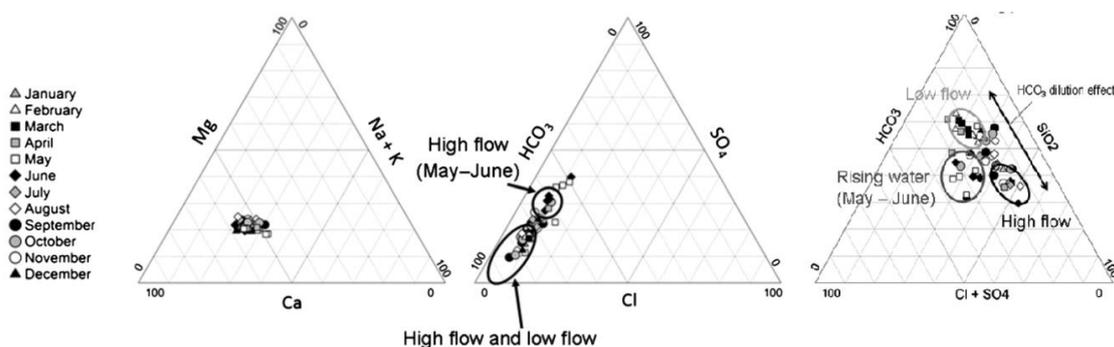


Figure 2-21. Diagrammes ternaires des éléments majeurs dissous (exprimés en en %) de l'Orénoque à Ciudad Bolivar pour la période 2005-2010 (*Laraque et al.*, 2013a).

2.4.6 Occupation des sols

Les densités de la population dans le bassin de l'Orénoque sont faibles en comparaison de la surface du bassin versant. Le long du cours principal de l'Orénoque se succèdent les principales villes et villages de Puerto Ayacucho (41 000 habitants en 2008), Puerto Páez (5 321 habitants), Caicara del Orinoco (66 315 habitants en 2011), Cabruta (5 500 habitants), Ciudad Bolivar (355 800 habitants en 2009), los Barrancos (28 900 habitants en 2011) et la plus

importante Ciudad Guayana (1 347 547 habitants en 2015) formée de Puerto Ordaz et San Felix. Dans les Andes vénézuéliennes, la population se concentre principalement dans les villes de San Cristobal et de Mérida qui comptent respectivement près de 350 000 et 250 000 habitants. Dans les Andes colombiennes, la ville de Puerto Lopez localisée dans le bassin versant du Meta compte seulement 25 000 habitants. Les plaines alluviales et les territoires du bouclier des Guyanes sont majoritairement peuplés par des communautés autochtones amérindiennes essentiellement rurales. Dans le bouclier des Guyanes, des descendants d'immigrants de l'île de Trinidad et du Guyana (autre pays du bouclier des Guyanes en zone limitrophe avec le Venezuela) sont venus pour exploiter les ressources minières et principalement d'or.

Le taux moyen des surfaces forestières sur l'ensemble du territoire du Venezuela est de 53% soit une surface comprise entre 49 à 55 millions d'ha (ITTO, 2005; FAO, 2015). 70 % sont localisées sur le bouclier des Guyanes et dans une petite partie au sud et sud-ouest du lac de Maracaibo. 90 % sont la propriété de l'état (ITTO, 2005) et trois grands types de forêts y sont identifiés : (i) Les forêts humides couvrent une large zone de 13 millions d'ha principalement dans la zone du bouclier des Guyanes, en amont de lac de Guri dans la région de Canaima et également sur le haut Orénoque ; (ii) Les forêts décidues sèches tropicales et subtropicales (trophiles) submontagnardes qui couvrent plus de 11 millions d'ha dans la région centrale ; (iii) Les forêts de xérophytes adaptées à des sécheresses importantes et en contexte de fort éclaircissement qui couvrent les pentes des Andes sur près de 1,5 million d'ha.

Pour l'ensemble du Venezuela la vitesse moyenne annuelle de déforestation entre 1982 et 2000 a été estimée à 0,6 %. Les "Llanos" ont été les premiers affectés pour le développement de l'agriculture. L'état du Bolivar est le plus touché avec environ 36 000 ha déforestés par an (ITTO, 2005). Néanmoins, l'exploitation forestière au Venezuela est encore très faible. Ce pays a une longue tradition de gestion forestière. En particulier il participe au projet Tarapoto correspondant à une organisation mise en place en 1978 pour promouvoir un développement et une gestion harmonieuse de la forêt et pour favoriser l'écotourisme ainsi que la gestion d'aires protégées. L'organisation regroupe 8 pays et des institutions internationales comme le FAO, l'Organisation Internationale des Bois Tropicaux (ITTO), le "World Resources Institute" (Elías, 2004). En Amazonie colombienne, la déforestation concerne surtout le bassin du Guaviare autour du village de Calamar⁹.

⁹<http://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/pavimentando-el-amazonas-articulo>

Depuis les années 1940, avec le développement à grande échelle de l'activité industrielle pétrolière les productions agricoles n'occupent plus qu'une place restreinte dans l'économie vénézuélienne (ITTO, 2005). Ainsi le pays pour satisfaire les besoins alimentaires et sanitaires de sa population importe l'essentiel de sa consommation. Dans les années 1980, l'agriculture représentait 7 % du PIB, puis plus que 3,9 % respectivement en 2004-2005-2006, avant de repartir à la hausse (maximum de 6,1 %) jusqu'en 2009 et à la diminution (maximum 5,3) en 2013¹⁰. La production de céréales - dont en particulier la culture de diverses variétés de maïs et de riz - correspond à la principale activité agricole.

Le Venezuela est un pays doté de riches ressources minérales et fossiles. Au Précambrien, le bouclier des Guyanes s'est enrichi de fer, d'aluminium, de manganèse, d'or et de diamants. Durant l'orogénèse de la Cordillère de la Caraïbe et des Andes, les sols se sont enrichis en nickel, plomb et cuivre. Par érosion ces divers minéraux se retrouvent actuellement dans le bassin de l'Orénoque. En outre on note aussi la présence dans le sous-sol d'hydrocarbures, de charbon, de sables et d'argiles blanches. Les hydrocarbures et le gaz naturel sont les principales matières premières exploitées. La Frange Pétrolière de l'Orénoque (FPO) est l'un des principaux réservoirs de pétrole dans le monde (**Figure 2-22**). Elle s'étend sur plus de 55 000 km² sur les états de Monagas, Anzoátegui et Guárico. Elle se subdivise en quatre grands secteurs d'ouest en est : Boyacá, Junin, Ayacucho et Carabobo. L'exploitation est réalisée par cinq entreprises mixtes dont le principal actionnaire (60 %) est la compagnie nationale "Petróleos de Venezuela SA" (PDVSA). La production journalière est estimée à environ 838 000 barils¹¹. D'autres territoires sont également exploités pour leurs ressources pétrolières et gazifères dans le bassin de l'Orénoque. Il s'agit des territoires autour du Meta en Colombie¹² principalement occupés par les populations amérindiennes U'wa qui habitent la Sierra Nevada del Cocuy sur la cordillère orientale des Andes. Depuis près d'un siècle elles luttent pour la protection de leur environnement et pour une meilleure prise en compte de leurs droits ancestraux¹³.

¹⁰<http://www.datos.bancomundial.org>

¹¹<http://www.pdvsa.com>

¹²<http://www.colombiainforma.info>

¹³<http://www.colombiaplural.com/los-115-conflictos-olvido-posconflicto/>

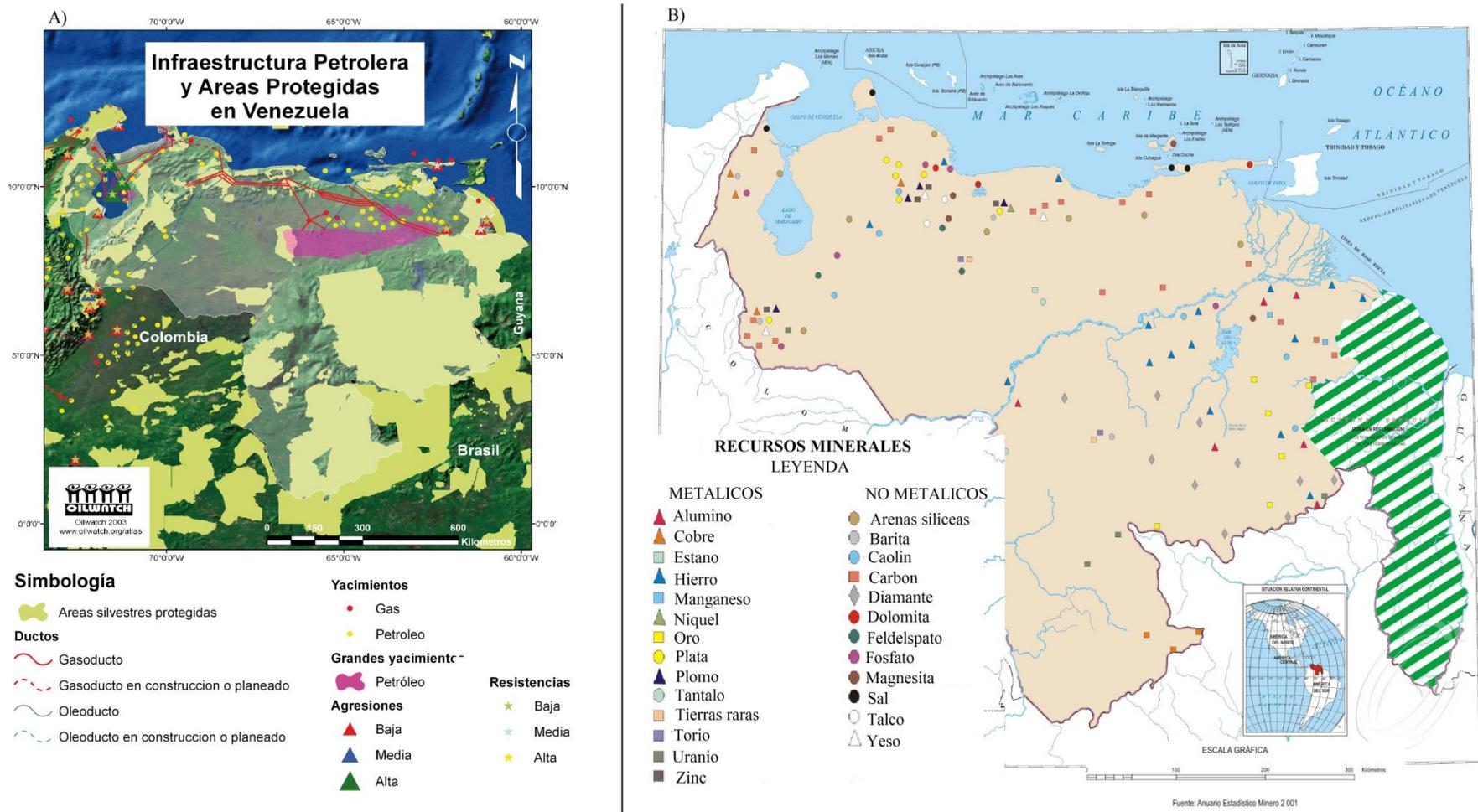


Figure 2-22. A) Localisation des infrastructures de pétrole (bande rose) et de gaz (points), des zones d'aires protégées (en vert), ainsi que des zones de risques d'agressions (triangles) et de résistances (carrés) (<http://www.oilwatchesudamerica.org/mapas/2332-venezuela.html>). B) Localisation des ressources minérales métalliques et non métalliques ainsi que des territoires contestés (bandeaux verts) (<http://www.hungpetroleum.com.ve/minerales.php>).

Chapitre 3 : Méthodes



Cimetière de pirogues après le grand saut de Lessé Dédé, sur le Maroni en Guyane et en mars 2015



Mesures optiques sur le Maroni en Guyane en basses eaux réalisées en novembre 2015

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons dressé d'abord un état des connaissances des similarités géologiques, climatiques, de faible occupation des sols et de densité de populations des bassins versants du Maroni, de l'Oyapock et de l'Orénoque. Les spécificités de chaque bassin versant en termes de relief, de réseau hydrographique ont été décrites.

Ce chapitre résume les méthodes et approches développées pour le suivi des MES *in situ* et par télédétection ainsi que pour le suivi de la qualité de l'eau via des mesures physico-chimiques, des carbonés, de l'azote particulaire et de la chlorophylle. Il correspond à un chapitre méthodologique qui n'a pas pour objectif de se substituer aux parties méthodologiques des Articles A, B et C présentés en **annexes**. Il décrit tout d'abord les sites d'études avec les stations de mesures *in situ* et "virtuelles" (**paragraphe 3.2**) puis les données et les méthodes utilisées (**paragraphe 3.3**) pour répondre aux questions de recherche posées. Il présente toutes les étapes de cette étude et les méthodes adoptées.

Pour rappel l'objectif principal de cette étude était de calibrer la réflectance des pixels d'eau des capteurs MODIS des satellites Terra et Aqua avec les Matières en Suspension (MES) *in situ* afin d'étudier sur une plus grande période (2000 à 2016) et avec un plus large nombre de données, la variation spatiale et temporelle des MES et d'en connaître les flux aux principales stations du réseau hydrométrique. Pour répondre à cet objectif deux calibrations ont été réalisées et comparées : MES *in situ* /Réflectance *in situ* ainsi que MES (SNO-HYBAM) /Réflectance MODIS. La mesure de la réflectance *in situ* permet de confirmer la réflectance mesurée par les capteurs MODIS.

Le deuxième objectif qui découle du premier était d'analyser les tendances et les ruptures des concentrations et des flux de matières sur une longue période (2000-2016) et de les expliquer soit par les paramètres climatiques (précipitations, débits) et/ou par les changements d'occupation des sols.

Le troisième et dernier objectif de ce travail était de comparer les charges et les flux de carbonés et d'azote particuliers, de chlorophylle-a des fleuves Maroni et Oyapock aux principales stations hydrométriques ainsi que leurs fractions en pourcentage de MES afin d'apprécier les différences et d'estimer les impacts des activités humaines sur la ressource en eau de ces deux bassins versants.

3.1.1 Le réseau de recherche

Afin de répondre à ces objectifs, cette étude s'appuie en partie sur les données *in situ* de physico-chimie (MES, COD, pH, CE), du réseau de mesures SNO-HYBAM, collectées en Guyane française mais également au Venezuela entre 2004 et 2016. L'observatoire HYBAM est un observatoire de recherche qui opère depuis 2003 en Amazonie brésilienne, depuis 2004 sur les deux principaux fleuves de la Guyane Française et depuis 2005 au Venezuela. Il répond à une demande du Ministère français de la Recherche et du Développement, de fournir à la communauté scientifique internationale des données physico-chimiques de qualité sur une période suffisamment longue, pour caractériser et comprendre les fonctionnements de ces environnements à long terme, dans un contexte d'augmentation des pressions humaines et de changement climatique.

Cet observatoire est géré par des agents IRD du GET avec des partenaires des pays concernés. Au Venezuela, les mesures du SNO-HYBAM sont effectuées en collaboration avec des Instituts de Recherche suivants : le COEA (*Centro de Oceanologia y Estudios Antarticos*) de l'IVIC (*Instituto Venezolano de Investigaciones Cientificas*), l'IMF (*Instituto de Mecánica de Fluido*) de l'UCV (*Universidad Central de Venezuela*), et le CPDI (*Centro de Procesamiento Digital de Imagenes*) du FII (*Fundación Instituto de Ingeniería*). Ce suivi sert de base au projet de recherche bilatérale France – Venezuela: ECOS-Nord/V14U01 (*Estudio hidrosedimentario, morfodinamico y geoquimico del curso inferior del rio Orinoco en el tramo de desarrollo de su faja petrolifera : impactos sobre la navegacion fluvial y comparacion con los rios guyaneses (Maroni y Oyapock)*). En Guyane Française, les mesures SNO-HYBAM sont gérées par le Centre IRD de Cayenne en collaboration avec le laboratoire LAMA.

3.2 Sites d'études et stations de mesures

Deux types de stations de mesures ont été utilisés dans les bassins du Maroni et de l'Oyapock en Guyane Française, et de l'Orénoque au Venezuela. Il s'agit :

- ✚ De stations *in situ* dont les prélèvements d'eau, pour l'étude des paramètres physico-chimiques et chimiques, ont été réalisés dans le cours d'eau en surface et en profondeur et de façon périodique,
- ✚ De stations "virtuelles" de surveillance des MES, créées à partir de données de télédétection et exploitées avec les images satellites des capteurs MODIS. Ces

dernières permettent de compléter, de s'appuyer ou de se substituer aux prélèvements réalisés *in situ*. Le principe de base repose sur la calibration de la réflectance des pixels d'eau avec des données *in situ* de MES pour pouvoir ensuite estimer les concentrations de matières en suspension depuis les pixels d'eau de MODIS.

3.2.1 Stations de mesures *in situ* et campagnes de terrain

En Guyane française sur le Maroni et l'Oyapock, plusieurs jeux de données ont été utilisés. Les données proviennent :

✚ Des stations de mesures du SNO-HYBAM (MES, pH, CE, COD), au niveau du dernier saut avant l'estuaire (environ 100 km pour le Saut Hermina (SH) sur le Maroni et 60 km pour le Saut Maripa (SM) sur l'Oyapock). Ce choix permet de limiter les coûts des missions et d'éviter l'influence de la marée qui se fait ressentir plusieurs kilomètres en amont de la confluence. Les données ont été collectées mensuellement depuis 2004.

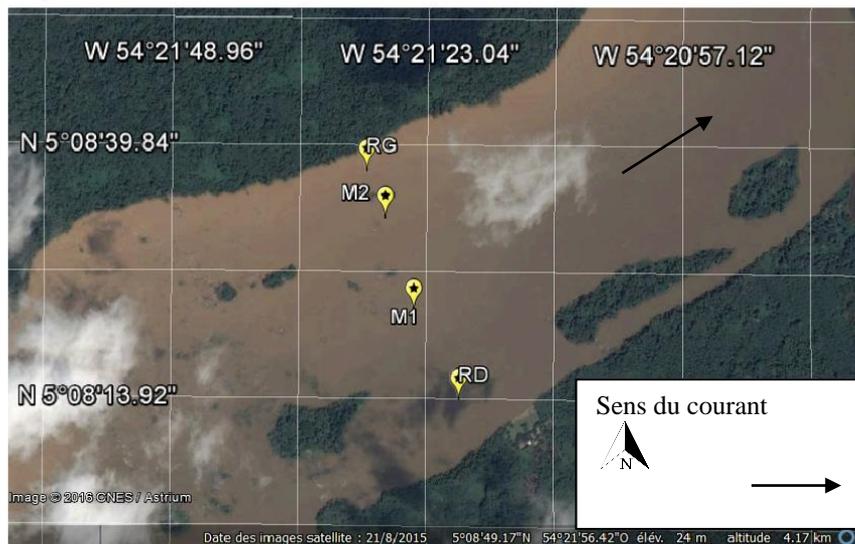
- à SH sur le Maroni (5°8'22"N - 54°21'24"O) la station est localisée en aval du dernier saut, avant l'embouchure du fleuve à environ 500 m de la rive droite pour une largeur totale du fleuve d'environ 1 km à cet endroit.
- à SM sur l'Oyapock (3°47'22"N - 51°54'20"O) la station est localisée en bord de berge.

✚ Des mesures complémentaires (MES, Turbidité, COP, NOP, COD, Chl-a, pH, CE, ODO, T°C) réalisées dans cette étude mensuellement et parfois durant plusieurs jours de suite, entre octobre 2014 à octobre 2016 :

- sur le Maroni : (i) à SH 4 prélèvements de surface ont été systématiquement collectés en surface (**Figure 3-1**) respectivement de la rive droite vers la rive gauche à 166 m (RD : 5°8'13"N - 54°21'19"O), à 475 m (M1 ou point HYBAM: 5°8'22"N - 54°21'24"O), à 772 m (M2 : 5°8'32"N - 54°21'27"O) et à 940 m (RG : 5°8'37"N - 54°21'29"O). Pour les MES et en complément des échantillons de surface, des collectes d'eau ont été effectuées dans la section transversale, durant les campagnes de prélèvements d'eau intensives, effectuées durant cinq jours consécutifs aux périodes importantes du cycle hydrologique (janvier, avril, juin et novembre 2015). (ii) une campagne de six jours a été réalisée entre Apatou et Maripasoula en mars 2015, durant la montée des eaux, pour mesurer simultanément la réflectance *in situ* et les paramètres physico-chimiques.

- sur l'Oyapock : en plus du prélèvement du SNO-HYBAM en surface au niveau du Saut Maripa (RG : 3°48'6"N - 51°53'5"O), 3 prélèvements de surface et en profondeur ont été effectués en aval du Saut Maripa, au niveau du poste de police brésilien et durant 4 missions (en octobre 2014, mars, juin et août 2015). Les prélèvements ont été réalisés depuis la rive droite vers la rive gauche à 115 m (RD : 3°48'44"N - 51°52'1"O), à 292 m (M : 3°48'47"N - 51°52'65"O), et à 487 m (RG : 3°48'49"N - 51°52'12"O).

A)



B)

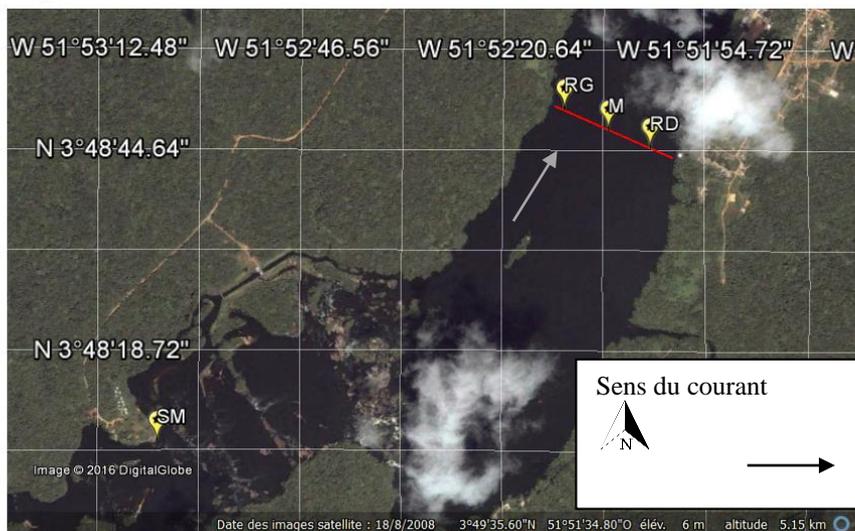


Figure 3-1. Localisation des points de collecte d'eau : A) au Saut Hermina sur le Maroni, de la rive droite vers la rive gauche (à 166 m (RD), à 475 m (M1), à 772 m (M2) et à 940 m (RG)), et B) au Saut Maripa (SM) sur l'Oyapock ainsi qu' à 115 m (RD), à 292 m (M), et à 487 m (RG) de la rive droite au niveau du poste de police Brésilien (images : Google Earth).

Au Venezuela sur l'Orénoque, 3 jeux de données de MES *in situ* ont été utilisés ainsi que des données de pH, CE et T°C. Les données proviennent :

✚ Des 3 stations de mesures du réseau SNO-HYBAM (**Figure 3-2 A et B**) sur le bas Orénoque :

- en bord de berges (rive gauche) au niveau des grandes villes de Musinacio entre 2006 et 2008 (MUS : 7°43.9'N - 64°42.70'O),
- en amont de Ciudad Bolivar depuis 2005 (CB : 8°9'1"N - 63°32'6"O) et en aval d'un seuil géologique causant des turbulences et des tourbillons qui homogénéisent les MES au sein du cours d'eau (Laraque *et al.*, 2013a),
- en aval de Ciudad Guayana depuis 2005 jusqu'en 2013 (CG : 8°16'24"N ; 62°53'44"O) et effectuées en aval du pont "Puente Orinokia".

✚ Des 2 stations de mesures créées par Mora *et al.* (2014) sur le moyen Orénoque :

- en amont de la confluence Caura/Orénoque en rive gauche (7°40'13"N - 64°54'29"W) et en rive droite (7°38'47"N - 64°55'03"W),
- en amont de la confluence Apure/Orénoque en rive gauche (7°34'53"N - 66°25'16"W) et en rive droite (7°35'52"N - 66°25'16"W). Les prélèvements ont été effectués entre septembre 2007 et août 2008.

✚ D'une grille "MODIS" préétablie en aval de CB et de CG : les prélèvements d'eau et les mesures concomitantes de réflectance ont été réalisées aux 26 points pour CB et 25 points pour CG, en mai (Laraque *et al.*, 2014), novembre et décembre 2014 (Gallay and Laraque, 2014) ainsi qu'en septembre (Gallay *et al.*, 2015b) et octobre 2015 (Gallay *et al.*, 2015a). Dans cette grille, chaque section transversale au fleuve est séparée de la suivante d'une distance de 500 m et chaque point de collecte sur la même section entre les rives gauche et droite respecte un espacement de 250 m.

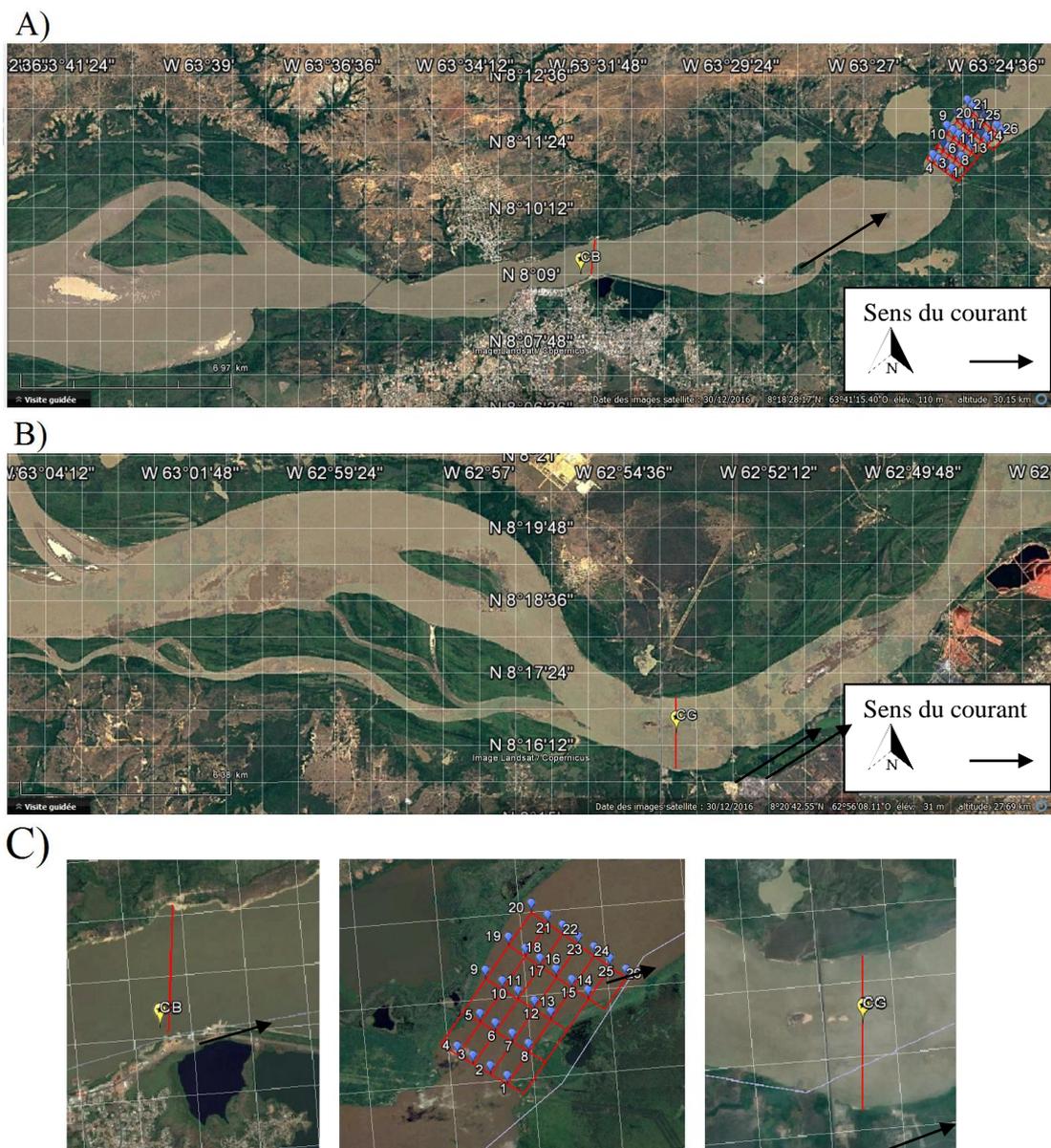


Figure 3-2. : Localisation : A) du point de collecte d'eau SNO-HYBAM à Ciudad Bolivar (CB) et de la grille de collecte MODIS en aval, B) du point de collecte d'eau SNO-HYBAM à Ciudad Guayana (CG), C) zoom sur le point de prélèvement à la station de CB (à gauche), sur la grille MODIS (au milieu) et à la station de CG (à droite).

3.2.2 Stations de mesures "virtuelles"

Les stations de mesures "virtuelles" de surveillance des MES sont créées avec les images des capteurs MODIS des satellites Terra et Aqua dans l'objectif de suivre les MES sur une plus longue période (à partir de 2000) et de compléter le jeu de données *in situ* de l'observatoire HYBAM. La réflectance des pixels est extraite des images MODIS et reliée à une concentration de matières via une relation linéaire.

Sur le Maroni, 8 stations "virtuelles" (**Figure 3-3**) ont été créées à : 4 km en amont de la section du Saut Hermina (SH), quelques centaines de mètres en amont du saut de la station hydrométrique Langa Tabiki (LT), à 3 km en aval de la rivière Graan (GR), à 4,5 km en aval de la rivière Beïman (BE), à 3,5 km en aval du Tapanahoni (TPI), à 6 km en amont de Grand-Santi (GS), à 3,5 km de Abouna Sounga dans les abattis Cottica (KO) et enfin à 10 km en aval de Papaïchton (PPI). Les largeurs du fleuve au niveau de ces stations sont : 880 m à SH, 700 m à LT, 850 m à GR, 1 000 m à BE, 900 m à TPI, 870 m à GS, 680 m à KO et 800 m à PPI. Une largeur compatible également avec une utilisation des images des capteurs optiques MODIS.

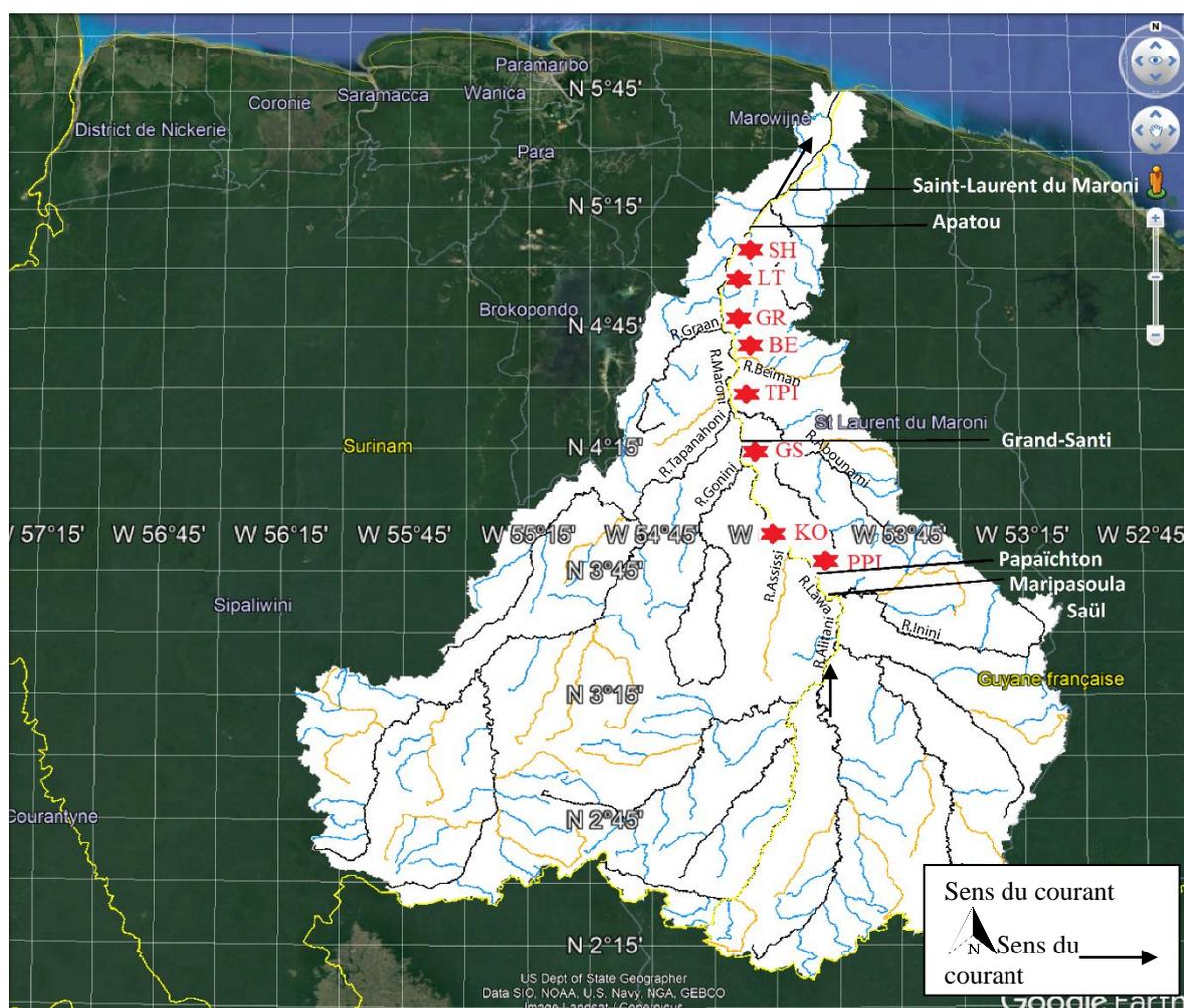


Figure 3-3. Localisation des huit stations virtuelles élaborées pour le suivi des MES sur le Maroni : au Saut Hermina (SH), à Langa Tabiki (LT), en aval de la confluence de la crique Graan (GR) avec le Maroni, en aval de la confluence de la rivière Beïman (BE) avec le Maroni, en aval de la confluence de la rivière Tapanahoni (TPI) avec le Maroni, en amont de Grand-Santi (GS), dans les abattis Cottica (KO) et enfin en aval de Papaïchton (PPI) (image : Google Earth).

Au total 6 stations "virtuelles" ont été définies le long du bas et moyen Orénoque: en amont de la confluence Meta/Orénoque (Station MET) en amont de la confluence Apure/Orénoque (Station APU), en amont de la confluence Caura/Orénoque (Station CAU), à Musinacio (Station MUS), à Ciudad Bolivar (Station CB) et à Ciudad Guayana (Station CG) (**Figure 3-4**).

Les largeurs du fleuve y sont d'environ : 1 900 m (Station MET), 3 900 m (Station APU), 3 700 m (Station CAU), 1 600 m (Station MUS), 1 700 m (Station CB) et 2 100 m (Station CG). Une largeur compatible avec une utilisation des images des capteurs optiques MODIS pour le suivi des MES (**paragraphe 3.3.6**).

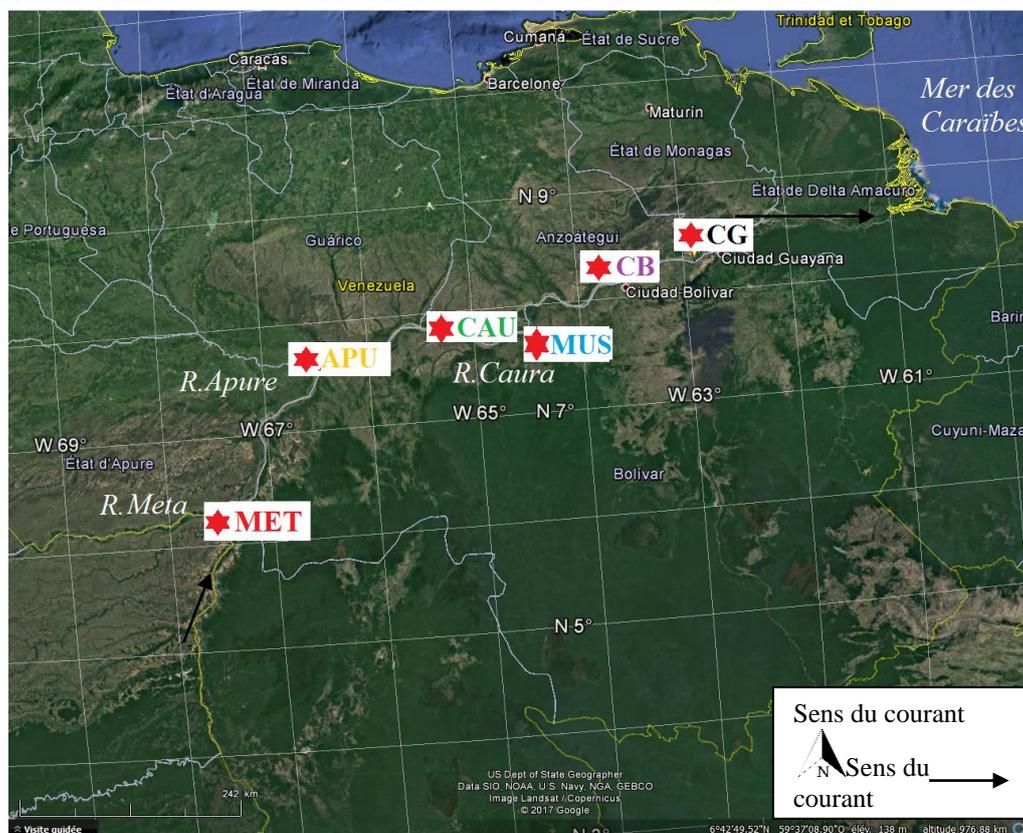


Figure 3-4. Localisation des stations virtuelles (étoiles rouges) élaborées pour le suivi des MES de l'Orénoque : en amont de la confluence Meta/Orénoque (Station MET) en amont de la confluence Apure/Orénoque (Station APU), en amont de la confluence Caura/Orénoque (Station CAU), à Musinacio (Station MUS), à Ciudad Bolivar (Station CB) et à Ciudad Guayana (Station CG) (image : Google Earth).

3.3 Données et méthodes

Ce paragraphe expose les données et les méthodes appliquées dans cette étude : de précipitations aux stations de Météo-France, de débits aux stations hydrométriques, d'occupation des sols dans les bassins versants guyanais (**paragraphe 3.3.1 à 3.3.3**), puis des mesures réalisées *in situ* et traitées en laboratoire (**paragraphe 3.3.4**). La méthode utilisée pour le suivi des MES par télédétection est présentée dans le **paragraphe 3.3.5** puis sont exposés les calculs des débits solides et spécifiques, ceux de la mesure du biais et de l'erreur relative, entre les estimations de MES par satellite et les estimations de MES *in situ* (**paragraphe 3.3.6**). Enfin, dans ce paragraphe sont également présentées les analyses statistiques utilisées sur les chroniques de données (tendances des données à long terme, points de ruptures et les corrélations entre les variables).

3.3.1 Données de précipitations

L'objectif était d'étudier les tendances de précipitations aux stations pluviométriques et d'observer leur rôles et influences sur la variabilité spatiale et temporelle des concentrations et les flux de matières.

Dans le bassin du Maroni ont été utilisés des produits de précipitations journalières sur la période 1978 à 2015 (**Figure 3-5**) pour les stations de Maripasoula (MPS), de Papaïchton (PPI), de Grand-Santi (GS) et d'Apatou (APT). Ceux de l'Oyapock correspondent aux stations de Camopi (CM) et de Saint-Georges (STG) sur la même période.

Ces produits sont issus des stations de Météo-France. Les stations de MPS et de STG sont automatiques et enregistrent en temps réel les données qu'elles diffusent immédiatement sur le site de Météo France. Les stations de PPI, GS, APT et CM sont relevées localement et transmises de façon quotidienne au service climatologie de Météo-France ([Héritier, 2011](#)).

Nous n'avons pas pu disposer d'un jeu de données de précipitations, pour étudier leurs tendances temporelles, dans le bassin de l'Orénoque.

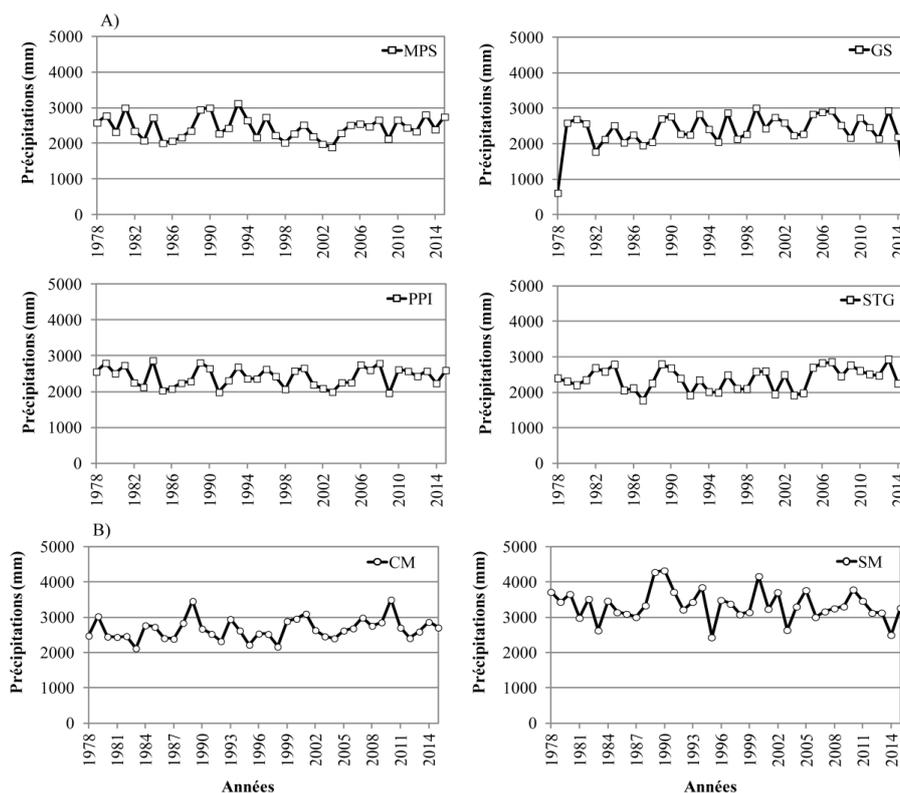


Figure 3-5. Séries des précipitations annuelles mesurées par les stations de Météo-France : A) sur le Maroni à Maripasoula (MPS), Grand-Santi (GS), Papaïchton (PPI) et Apatou (APT), B) sur l'Oyapock à Camopi (CM) et à Saint Georges de l'Oyapock (STG).

3.3.2 Données de débits

L'objectif était d'étudier les tendances de débits aux stations limnimétriques et d'observer leurs rôles et influences sur la variabilité spatiale et temporelle des concentrations et des flux de matières (**paragraphe 3.3.6**).

Dans les bassins guyanais, toutes les échelles limnimétriques et stations hydrologiques ont été installées en 1951-1953 et ont été gérées par l'IRD (ex-ORSTOM) jusqu'en 2003. Entre 2003 et 2007, la DIREN (Direction régionale de l'Environnement) s'occupe du réseau en collaboration avec l'IRD. Entre 2007 et 2011, la DDE (Direction Départementale de l'Équipement) devient l'administrateur et depuis 2011 la DEAL (Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) s'occupe du réseau. Le nombre de stations en Guyane a largement diminué sur la période 2000-2011 et est passé d'une quarantaine de stations à moins d'une dizaine pendant la période d'étude. Cependant depuis 2014, une dizaine de stations hydrologiques sont en fonction. Dans cette étude, les deux principales stations hydrométriques qui ont été retenues sont Langa Tabiki (LT) sur le bas Maroni et Saut Maripa (SM) sur le bas

Oyapock. Depuis 1953, 7 courbes de tarages sont appliquées à SM contre 2 à LT. Les dernières courbes sont appliquées depuis le 01/01/2000 et comprennent 123 binômes de débits /hauteurs d'eau à LT ainsi que 25 binômes à SM. Elles ont été développées conjointement par les différents partenaires. Les débits ont été calculés directement par le logiciel HYDRACCESS spécialement développé pour la surveillance spatiale et temporelle des données hydrologiques, climatiques et également physico-chimiques d'une station (Vauchel, 2004). Les équations de tarage utilisées sont :

pour le Maroni à LT : $Q = 0,01 * H^2 + 2,53 * H + 95,84$ avec H en cm

pour l'Oyapock à SM : $Q = 0,00 * H^3 - 0,00 * H^2 + 0,02 * H + 31,53$ avec H en cm

Au début, les mesures des vitesses de l'eau des rivières en Guyane étaient réalisées avec un moulinet et les échelles limnimétriques étaient lues deux fois par jour par un observateur. Dans les années 1980, des enregistreurs de niveaux d'eau (limnigraphes) ont été installés. Ce sont des enregistreurs graphiques à flotteur et contrepoids et bande déroulante avec moteur de remontage électrique, du type OTT R20. Depuis 2000, les mesures de vitesses se font avec un ADCP Rio Grande 1200 kHz (*Acoustic Doppler Current Profiler*) (Figure 3-6) et depuis 2007 des capteurs de type ARGOS SC 40 AG enregistrent les niveaux toutes les demi-heures et sont retransmis en direct sur le site du service Environnement de la DEAL (<http://www.guyane.developpement-durable.gouv.fr>).

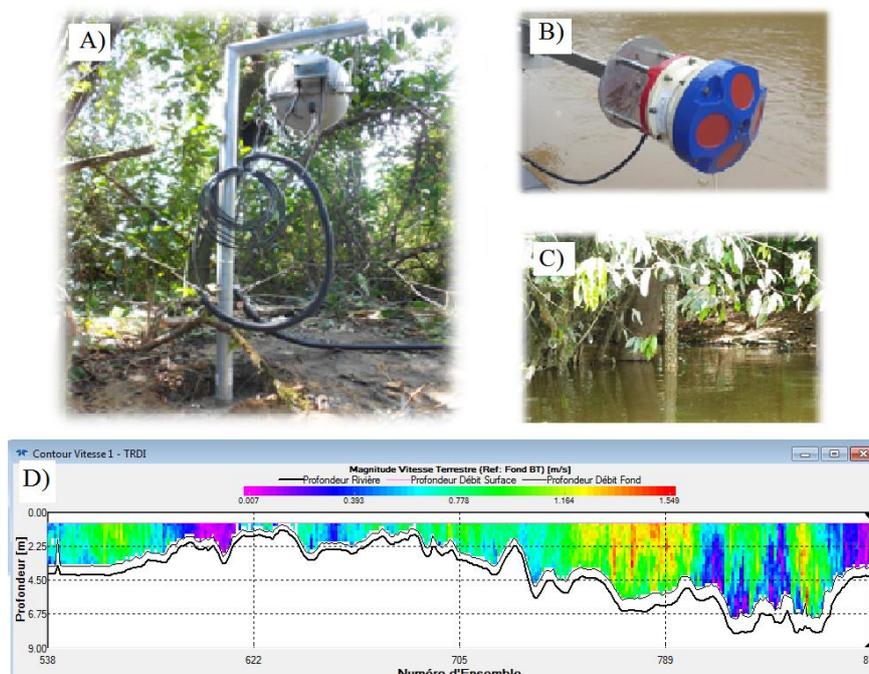


Figure 3-6. A) Sonde ARGOS SC 40 AG, B) Modèle ADCP Rio Grande 1200 kHz de Teledyne RDI (<http://www.rdinstruments.com/rio.aspx>), C) Echelle limnimétrique à Langa

Tabiki sur le Maroni, D) Mesure des vitesses dans la section de Langa Tabiki avec l'ADCP
(Avril 2013: $1\,757\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$).

Dans le bassin de l'Orénoque les stations limnimétriques sont suivies par l'INAMEH (pour plus d'information : <http://www.inameh.gob.ve/web/>). Dans les années 1980, le Venezuela possédait un très grand nombre d'échelles limnimétriques et stations hydrologiques dans le bassin versant. La principale station de référence est celle de Ciudad Bolivar dont la courbe de tarage utilisée a été élaborée par l'INAMEH et par l'UCV (Laraque *et al.*, 2013a). En 2010, le SNO-HYBAM s'est doté d'un ADCP RiverRay 600 kHz de Teledyne RDI (**Figure 3-7**) ce qui a permis de réaliser une dizaine de jaugeages dans la section de Ciudad Bolivar en collaboration avec les organismes locaux et de compléter la courbe de tarage utilisée. Les données de débits journaliers depuis 2005 sont disponibles sur le site de l'observatoire SNO-HYBAM (<http://www.ore-hybam.org>).

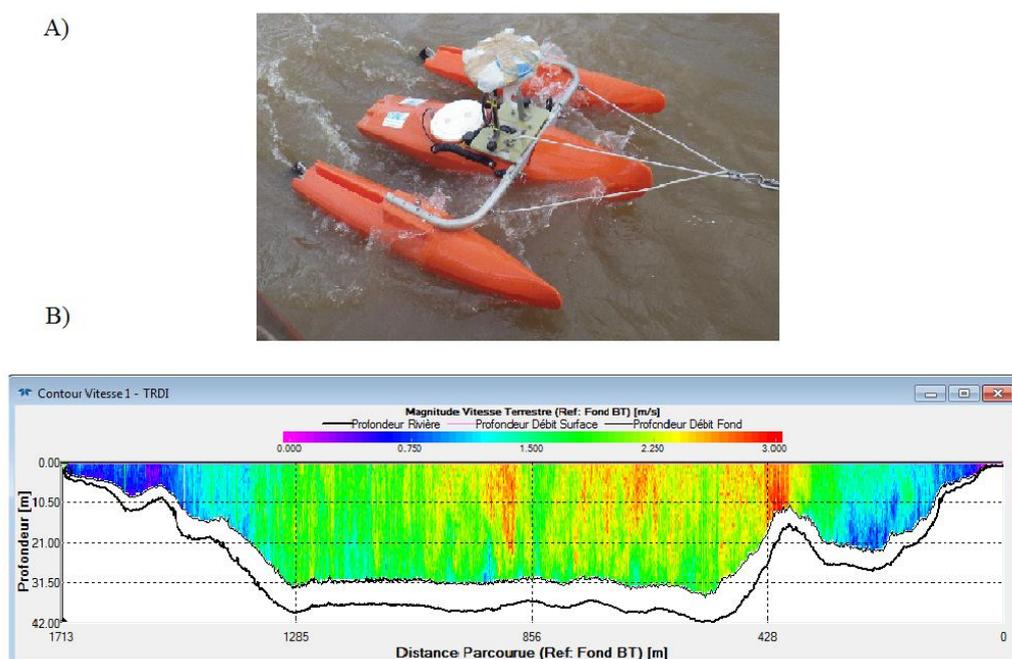


Figure 3-7. A) ADCP RiverRay 600 kHz -Teledyne RDI, B) Jaugeage doppler dans la section de Ciudad Bolivar le 31 août 2015 ($Q = 63\,153\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) (Gallay *et al.*, 2015b).

3.3.3 Données d'occupation des sols

L'objectif était d'étudier la relation entre le transport solide spécifique et les flux des matières avec les changements d'utilisation des terres.

En Guyane française nous avons utilisé 2 jeux de données issus des travaux de l'Office National des Forêts (ONF) et de son Service Forestier International français (ONFI) (Debarros and Joubert, 2010; ONF, 2011; Rahm *et al.*, 2015) :

- ✚ Les données de l'inventaire des superficies artificialisées et agricoles produites en 2005, 2008 et 2011 par l'ONF (ONF, 2011; 2013), basées sur l'exploitation de photographies aériennes régionales de la BD ORTHO@IGN (<http://www.geoguyane.fr>) ainsi que sur des images des satellites SPOT 4 et 5 (résolution spatiale < 20 m). Dans cette étude, les territoires artificialisés regroupent les zones urbanisées et industrielles ainsi que les espaces verts aménagés. Pour comparer ces surfaces avec le transport solide spécifique (**paragraphe 3.3.6.2**), une extrapolation a été réalisée : dans le bassin du Maroni en supposant une croissance régulière de l'urbanisation pour les années de 2002 à 2014 ; dans le bassin de l'Oyapock en supposant une stabilité des surfaces agricoles et urbaines entre 2005 et 2011.
- ✚ Les données des surfaces d'exploitations minières aurifères identifiées dans le bouclier des Guyanes en 2000, 2008 par l'ONF et en 2014 en collaboration avec l'ONFI, avec le "World Wide Fund For Nature" (WWF), la "Foundation for Forest Management and Production Control" (CFF) du Suriname et le "Secretaria do Estado de Meio Ambiente do Amapá" (SEMA) du Brésil (Debarros and Joubert, 2010; Rahm *et al.*, 2015). La méthode utilisée dans ces études est décomposée en cinq étapes de traitement : (1) Archivage d'images satellitaires et sélection des meilleures images (images SPOT, images Landsat et RapidEye) sur la base d'une couverture nuageuse minimale (couverture maximale de 60%) ; (2) Pré-traitement de l'image incluant (a) le géoréférencement, (b) le masquage des nuages basé sur une compilation d'images multi-temporelles, (c) le filtrage des images de meilleure qualité pour la détection et la délimitation du sol nu ; (3) Détection et cartographie des surfaces minières réalisées de façon manuelle et par des méthodes semi-classifiées (Gond and Brognoli, 2005) ; (4) Contrôle de la qualité de l'information : les résultats de chaque service forestier ont été compilés et vérifiés par les différents producteurs de données ; (5) Evaluation de la précision de la mesure, à l'aide d'une densité élevée de points de contrôle au sol (1 500 en Guyane Française, 2 500 au Suriname et 500 dans l'Amapá).

Dans le bassin versant de l'Orénoque, nous n'avons pas utilisé de données d'occupation des sols car les tendances des flux de matières étaient stables et régulières ne montrant pas de tendance à long terme.

3.3.4 Mesures de terrain et analyses en laboratoire

Plusieurs types de mesures de terrain ou *in situ* ont été effectuées durant toutes les périodes du cycle hydrologique puis analysées ensuite en laboratoire. En Guyane Française, les analyses ont été réalisées principalement au département chimique du Laboratoire des Moyens Analytiques (LAMA) du Centre IRD de Cayenne mais également au laboratoire Géosciences Environnement de Toulouse (GET). Il s'agit :

(i) des MES qui désignent l'ensemble des matières solides (mg.l^{-1}) présentes dans un liquide ainsi que de la turbidité (NTU) qui est la mesure optique des concentrations en MES ; (ii) de la Chl-a ($\mu\text{g.l}^{-1}$) considérée comme indicateur de l'abondance des algues ; (iii) des COP (mg.l^{-1}) et NOP (mg.l^{-1}) qui quantifient le carbone et l'azote dans la matière organique particulaire, qui identifient leur origine (terrestre ou aquatique) et leur état de dégradation via les rapports COP/NOP et COP/Chl-a ; (iv) du COD (mg.l^{-1}) qui renseigne sur la quantité de carbone dissous ($< 0,22 \mu\text{m}$) dans l'eau ; (v) du COT (mg.l^{-1}) qui représente la part dissoute et particulaire du carbone.

Sur l'Orénoque, les mesures réalisées concernent uniquement les MES et ont été réalisées par différents laboratoires depuis 2005 (**paragraphe 3.2.1. et 3.3.4.2**).

Les prélèvements d'eau ont été effectués : (i) en surface, dans la colonne d'eau et en plusieurs points de la section, afin de déterminer la représentativité spatio-temporelle des MES ; (ii) en surface et en plusieurs points de la section pour les COD, COP, NOP et Chl-a ; (iii) en surface, dans la colonne d'eau et en plusieurs points de la section, autour les principaux paramètres physico-chimiques (pH, CE, T°C, Turbidité) (**paragraphe 3.3.4.7**).

3.3.4.1 Prélèvements dans la colonne d'eau

Des jaugeages solides ont été réalisés dans le but de mieux comprendre et connaître la répartition des MES dans la section ainsi que la représentativité du prélèvement du réseau SNO-HYBAM aux stations de mesures. Le principe est de collecter de l'eau en surface durant les différentes périodes du cycle hydrologique, avec une bouteille au préalable rincée avec l'eau du fleuve, et également en profondeur (à 35 et 70 %). Pour ces dernières, une bouteille NISKIN fixée par une corde graduée est déployée dans la colonne d'eau aux profondeurs voulues (**Figure 3-8**).

Durant cette étude 25 jaugeages solides ont été réalisés au Saut Hermina en janvier, mai, juin, août et novembre 2015 (221 données dont 79 données en surface). Au Saut Maripa 4

jaugeages solides ont été réalisés en mars et octobre 2014 ainsi qu'en juin et août 2015 (44 données dont 16 en surface).

9 jaugeages solides ont été effectués dans le cadre des programmes ECOS-NORD à Ciudad Bolivar pour un total de 72 prélèvements dont 24 en surface en mars 2009, octobre 2010, janvier, février, avril, juillet 2011, juin 2013, septembre, décembre 2015).

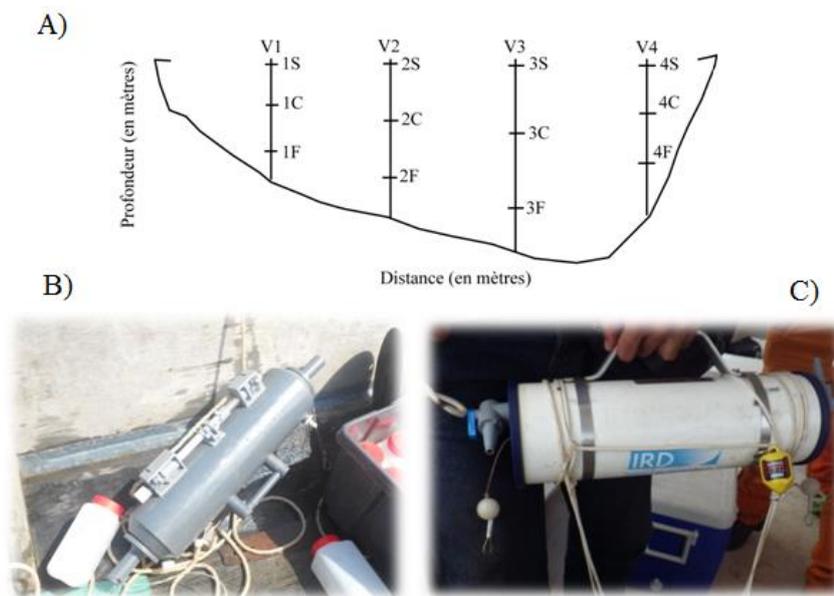


Figure 3-8. A) Schéma d'une section verticale d'un fleuve et localisation des points de prélèvements d'eau sur quatre verticales (V1 à V4). Les échantillons sont prélevés en surface (S), au centre (C) et au fond (F) à 35 et 70% du lit du fleuve. B) Photographie des bouteilles de prélèvement utilisées en Guyane (à gauche) et au Venezuela (à droite) pour collecter de l'eau dans la section verticale.

3.3.4.2 MES et turbidité

Les eaux fluviales contiennent des Matières en Suspension (MES en mg.l^{-1}) de toutes tailles et de toutes formes, minérales ou organiques, vivantes ou détritiques, de nature soit biogénique (bactéries, phytoplancton, zooplancton, poissons), soit terrigène (apports fluviaux, produits de l'érosion des côtes, débris déversés par l'homme), soit éolienne (particules transportées par les courants atmosphériques et tombant dans la mer), soit enfin météorique. Elles se distinguent des substances dissoutes par le moyen utilisé pour les séparer (Ivanoff, 1972). La séparation de ces deux classes est généralement effectuée par filtration.

La méthode d'analyse est classique, de l'eau est prélevée manuellement dans la colonne d'eau, à l'aide d'un récipient de 500 ml, au préalable lavé avec de l'acide chlorhydrique à 10 %. Au laboratoire, des filtres d'une porosité de $0,45 \mu\text{m}$, de type GFC sont pré-pesés. Après

filtration de l'eau, les filtres sont séchés dans une étuve à 50°C pendant au minimum quatre heures. Puis, la différence de poids avant et après la filtration rapportée à 1 litre, donne la concentration des matières transportées au moment du prélèvement. La deuxième méthode consiste à calculer les MES via la relation : $MES = f(\text{turbidité})$. En effet, la turbidité de l'eau est un indicateur de son opacité et est en relation avec la concentration de MES. La mesure en NTU avec le turbidimètre a été réalisée au minimum deux fois après avoir mélangé l'échantillon d'eau vigoureusement.

En Guyane Française, les données ont été collectées mensuellement depuis 2004 au Saut Hermina sur le Maroni et au Saut Maripa sur l'Oyapock lors des tournées SNO-HYBAM ainsi que plus intensément durant cette étude entre octobre 2014 et octobre 2016 (**Tableau 3-1**). Un jeu de données de turbidité supplémentaire a été collecté ponctuellement aux stations de Maripasoula (MPS) et de Camopi (CM) par le PAG entre 2011 et 2014 (<http://www.parc-amazonien-guyane.fr/>).

Tableau 3-1 : Nombre de données de MES et de turbidité collectées sur le Maroni, au Saut Hermina et sur l'Oyapock au Saut Maripa, en surface et dans la colonne d'eau durant cette étude (2014-2016), également en surface par le SNO-HYBAM (2004-2016) et par le PAG (2011-2014).

Code stations	Stations	Paramètres mesurés	Cette étude (en surface)	Cette étude (colonne d'eau)	SNO-HYBAM	PAG
	Autre Maroni	MES	93			
SH	Saut Hermina	MES	314	146	154	
		Turbidité	407	146		
SM	Saut Maripa	MES	77	37	154	
		Turbidité	77	37		
MPS	Maripasoula	Turbidité				91
CM	Camopi	Turbidité				36

Les équations calculées pour effectuer la conversion entre les MES (mg.l^{-1}) et la turbidité (NTU) sur les fleuves Maroni et Oyapock sont les suivantes :

$$MES_{\text{MARONI}} = 0,91_{\text{TURBIDITE}} - 3,12 \quad R^2 = 0,95 \quad n = 314 \quad (1)$$

$$Turbidité_{\text{MARONI}} = 1,03_{\text{MES}} + 5,99 \quad R^2 = 0,95 \quad (2)$$

$$MES_{\text{OYAPOCK}} = 1,09_{\text{TURBIDITE}} + 0,07 \quad R^2 = 0,94 \quad n = 77 \quad (3)$$

$$Turbidité_{\text{OYAPOCK}} = 0,86_{\text{MES}} + 0,46 \quad R^2 = 0,94 \quad (4)$$

Les données de MES (**Tableau 3-2**) sur l'Orénoque proviennent des différentes stations et réseaux de mesures cités précédemment (**paragraphe 3.2.1**). Elles ont été collectées mensuellement puis tous les 10 jours à CB et à CG, tout d'abord par l'UNEG durant la période 2007-2012 et mensuellement depuis 2014 jusqu'en 2015 par un observateur local. Les prélèvements d'eau à la station MUS ont été réalisés par un observateur local entre 2006 et 2008. Les mesures sur la grille MODIS ont été effectuées durant cette étude en Novembre et Décembre 2014 ainsi qu'en Août et Septembre 2015 simultanément aux mesures de réflectance *in situ*. Par ailleurs, entre Septembre 2007 et Août 2008, deux échantillons mensuels en amont des confluences des rivières Caura et Apure avec l'Orénoque ont été prélevés par [Mora et al. \(2014\)](#). Sur la rivière Meta en amont de sa confluence avec l'Orénoque, une valeur de MES *in situ* (50,8 mg.l⁻¹) a été déterminée en Septembre 2012 ([Laraque et al., 2012](#)). Tous les rapports des missions de terrain ainsi que les données sont disponibles sur le site de l'observatoire SNO-HYBAM (<http://www.ore-hybam.org/>).

Tableau 3-2 : Nombre de données de MES collectées sur l'Orénoque aux stations de Ciudad Bolivar, Ciudad Guayana, Musinacio, Caura, Apure, Puerto Ayacucho et sur la grille MODIS, entre 2005 et 2016.

Code stations	Stations	MES (Nombre)	Date
CB	Ciudad Bolivar (Orénoque)	292	2005-2017
CG	Ciudad Guayana (Orénoque)	280	2007-2012
MUS	Musinacio (Orénoque)	79	2006-2008
CAU	Caura (Orénoque)	24	2007-2008
APU	Apure (Orénoque)	24	2007-2008
MET	Puerto Ayacucho (Orénoque)	1	Septembre 2012
	Grille MODIS en aval de CB	186	2014 -2015

3.3.4.3 Chlorophylle *a*

La Chlorophylle *a* (Chl-*a*) est le principal pigment photosynthétique des plantes. En convertissant l'énergie lumineuse en énergie chimique, elle permet la photosynthèse, c'est à dire la fixation de carbone induite par la lumière (la production primaire). Pour cette raison la Chl-*a* (en µg.l⁻¹) est mesurée en tant qu'indicateur de la biomasse des micro-algues, organismes qui sont à la base de la chaîne alimentaire ([Wright et al., 2005](#)). La Chl-*a* est probablement le paramètre biochimique le plus fréquemment mesuré en océanographie et de plus en plus dans les eaux fluviales et les lacs. Une forte charge de Chl-*a* peut-être en lien avec les variations de concentrations de phytoplancton et les variations de plusieurs paramètres (O², nutriments, pH, carbone organique particulaire) d'origines naturelles ou anthropiques.

La Chl-a est un paramètre "particulaire" qui, pour une mesure en laboratoire nécessite la récolte de MES par filtration. Pour son analyse, l'échantillon d'eau a été décanté à l'aide d'un filtre GFF de 25 mm de diamètre et d'une taille de pore de 0,7 μm (Millipore). Puis le filtre a été congelé à -18°C jusqu'à la mesure. Les pigments ont été extraits au méthanol puis mesurés par fluorimétrie avec un Fluoromètre TD 700 TURNER-DESIGNS (année 1995) selon les équations de [Lorenzen \(1967\)](#).

En Guyane, 109 données de Chl-a ont été collectées à SH sur le Maroni et 32 à SM sur l'Oyapock. Pour le Maroni à SH, les prélèvements ont été réalisés aux quatre points de collecte en surface (RD, M1, M2, RG) pour connaître la représentativité du point SNO-HYBAM et calculer les flux.

3.3.4.4 Particules organiques de carbone et d'azote

La Matière Organique (MO) est intimement liée aux activités biologiques soit comme résultat de la synthèse de la biomasse, soit comme source d'énergie et de nutriments pour les micro-organismes (bactéries, protozoaires, phytoplancton). Elle se retrouve sous forme dissoute et particulaire. Le Carbone (COP), l'Azote (NOP) avec le Phosphore (POP) particuliers (en mg.l^{-1}) sont des éléments biogéniques essentiels qui servent à caractériser la matière organique particulaire (MOP). En période d'étiage, lorsque le débit et la turbidité diminuent, le MOP peut provenir de fortes poussées de phytoplancton (biomasse aquatique). Lorsque le débit augmente, les apports terrigènes augmentent (essentiellement composés de particules fines minérales mais aussi de feuilles d'arbres, de détritiques de plantes et de molécules organiques) et la turbidité ralentit la croissance du phytoplancton ([Aminot and Kérouel, 2004](#)).

Une forte charge en C et N peut être associée à une perturbation d'origine anthropique. Afin de dissocier les apports d'origines terrestres ou aquatiques, les rapports C/N et C/Chl-a ont été mesurés. De faibles valeurs C/N (< 8) indiquent un apport principalement d'origine endogène (dans le milieu) alors que de fortes valeurs (> 8) sont dues à des apports d'origines exogènes (terrestres). Des rapports C/Chl-a élevés indiquent une charge importante de Chl-a dans la part du carbone.

Le COP et le NOP sont des paramètres "particulaires" qui, pour une mesure en laboratoire nécessitent la récolte de MES par filtration. La méthode d'analyse a consisté à filtrer un échantillon d'eau à l'aide d'un filtre GFF de 25 mm de diamètre, d'une taille de pore de 0,7 μm (Millipore) et précalciné pendant 4 heures à 450°C . Après filtration le filtre a été séché à 50°C et analysé en laboratoire au moyen d'un analyseur élémentaire (C/H/N/S

THERMOQUEST NA-2100). Le principe de la mesure est une combustion de la matière organique dans l'oxygène suivie d'un dosage du carbone et de l'azote simultanément avec un détecteur à conductivité thermique (Dumas, 1831; Liebig, 1841).

En Guyane, 130 données de COP ont été collectées au Saut Hermina et 38 au Saut Maripa contre 107 et 38 de NOP. Pour le Maroni à SH, les prélèvements ont été réalisés aux quatre points de collecte en surface (RD, M1, M2, RG) pour connaître la représentativité du point SNO-HYBAM et calculer le flux de COP et de NOP.

3.3.4.5 Carbone organique dissous

Le carbone organique dissous (COD) caractérise la part du carbone dans la matière organique (MO) dégradée ($< 0,22 \mu\text{m}$). Une teneur élevée en COD (en mg.l^{-1}) peut dénoter une détérioration de la qualité de l'eau car il interfère directement et indirectement avec le goût et la sécurité sanitaire de l'eau et c'est l'une des raisons pour laquelle il est un indicateur de qualité de l'eau de la Directive Cadre sur l'Eau européenne.

L'analyse a été réalisée au laboratoire GET à Toulouse. Le COD a tout d'abord été séparé de l'échantillon d'eau en utilisant un filtre GFF de 47 mm de diamètre et d'une taille de pore de $0,22 \mu\text{m}$ (Millipore). Les flacons opaques utilisés sont préalablement calcinés dans un four à 450°C pendant 2 h (Sondag *et al.*, 2010). Lorsque les flacons ne sont pas en verre teinté, ils sont enveloppés dans de l'aluminium pour garder l'échantillon à l'abri de la lumière. Puis, après filtration de l'échantillon, celui-ci est acidifié avec du H_3PO_4 ultra pur puis maintenu dans des conditions fraîches et sombres jusqu'à la mesure. La méthode d'oxydation catalytique à haute température (HTCO) est appliquée en utilisant un instrument Shimadzu TOC-5000.

Depuis 2004, l'observatoire SNO-HYBAM collecte des données de COD sur le Maroni à SH et sur l'Oyapock à SM. Au total, 146 données ont été collectées à SH et le même nombre à SM. Par ailleurs durant cette étude, 58 échantillons supplémentaires ont été collectés à SH, aux quatre points de collectes en surface (RD, M1, M2, RG) pour connaître la représentativité du point SNO-HYBAM et calculer le flux de COD.

3.3.4.6 Carbone organique total

Le Carbone Organique Total (COT en mg.l^{-1}) est la somme des fractions dissoutes et particulaires instantanées de carbone dans l'eau. Un total de 72 valeurs a été calculé entre 2014 et 2016.

3.3.4.7 Paramètres physico-chimiques étudiés

Dans les bassins guyanais, trois sondes calibrées préalablement ont mesuré la turbidité de l'eau (un turbidimètre mobile WTW 430 - année 2013), la conductivité électrique (un conductivimètre INOLAB WTW -année 1999) et le pH (un pH-mètre INOLAB WTW - année 1999) durant toutes les périodes du cycle hydrologique entre 2004 et 2016 et plus intensément entre octobre 2014 et octobre 2016.

En complément aux sondes WTW, une sonde multiparamétrique (YSI EXO 2) calibrée préalablement en laboratoire a été déployée dans la colonne d'eau (**Figure 3-9**) entre octobre 2014 et octobre 2016. Elle était équipée de cinq capteurs qui mesurent la turbidité, le pH, la conductivité (CE), la température (T°C) et l'oxygène dissous (ODO %).

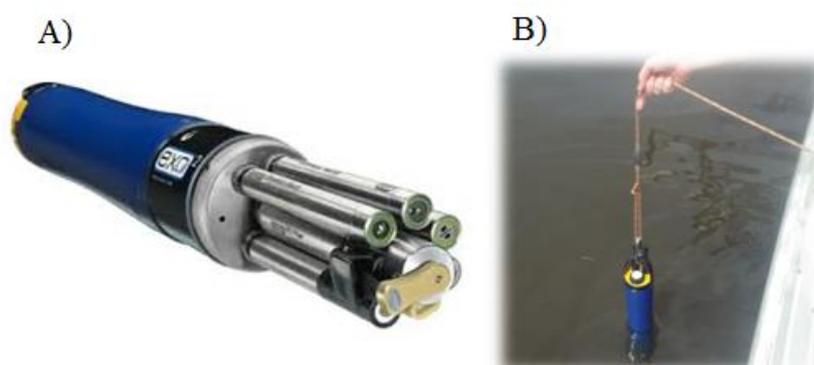


Figure 3-9. A) Sonde multi-paramètres YSI EXO2, B) mesures dans la colonne d'eau avec une corde graduée.

Le logiciel KOR a permis de traiter ces données. Le nombre total de données collectées par l'observatoire HYBAM et durant cette étude avec les différentes sondes est présenté dans le **tableau 3-3**.

Sur l'Orénoque des données de pH et de conductivité électrique (CE) ont été mesurées avec un pH-mètre THERMO SCIENTIFIQUE ORION (précision de +/- 0.01) et un conductivimètre WTW LF 318 (précision de +/- 0.1 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 25 °C). Au total, un ensemble de 52 données de pH, de CE et de températures (T°C) ont été collectées en août, septembre et octobre 2015.

Tableau 3-3 : Nombre de données physico-chimiques collectées avec les sondes portatives WTW et la sonde EXO2, le long du Maroni et sur l'Oyapock au Saut Maripa, pendant les missions entre octobre 2014 et octobre 2016 ainsi que pendant la période 2004-2016 par le SNO-HYBAM.

Sites	Paramètres Physico-chimiques	Cette étude Sonde WTW (2014-2016)	Cette étude Sonde EXO2 (2014-2016)	SNO-HYBAM Sonde WTW (2004-2016)
Saut Hermina (Maroni)	pH	217	51	154
	CE	183	86	154
	ODO		75	
	T°C,		75	
Saut Maripa (Oyapock)	Turbidité	521	86	
	pH	35	8	154
	CE	82	8	154
	ODO		8	
	T°C,		8	
	Turbidité	77	8	

3.3.5 Couleur de l'eau et mesures des MES par télédétection

Avant de présenter la méthode qui a permis de suivre les MES par télédétection via les images des capteurs MODIS, une présentation générale de l'évolution des images satellites et des propriétés optiques de l'eau est proposée.

La couleur de l'eau se réfère essentiellement à la lumière qui est absorbée ou réfléchiée par les particules en suspension (algues, particules sédimentaires, ..) et les molécules présentes. Dans les milieux à l'état naturel, l'eau "pure" n'existe pas, elle contient toujours des minéraux et des organismes qui altèrent sa couleur. Ses propriétés optiques sont donc des indicateurs sensibles aux changements qui ont lieu dans les milieux terrestres et/ou aquatiques et qui renseignent sur les changements de la qualité de l'eau (IOCCG, 2008).

Le régime de lumière en surface et dans la colonne d'eau a un effet majeur sur la structure et les fonctions écologiques des milieux aquatiques. En effet, la lumière est la principale source d'énergie à la base des écosystèmes aquatiques, et la distribution spectrale verticale du rayonnement solaire dans la colonne d'eau exerce une influence fondamentale sur la répartition et l'ampleur de la production primaire (Kirk, 1994). Pour ces raisons, les propriétés optiques de l'eau ont des implications importantes dans les pratiques de gestion des ressources hydriques.

3.3.5.1 Historique de la surveillance de la couleur de l'eau par télédétection et intérêts des capteurs MODIS

Ces dernières années l'avènement des satellites et de la télédétection a apporté une nouvelle approche de la surveillance de la couleur de l'eau. La télédétection de la couleur de l'eau a débuté en 1978 avec es capteurs CZCS ("*Coastal Zone Colour Scanner*"), sur le satellite américain Nimbus 7, prévus pour le suivi de la chlorophylle dans les océans (Antoine, 1998 ; Rhea and Davis, 1997; McClain *et al.*, 2002). Depuis, de nombreux satellites ont été équipés de capteurs optiques permettant de mesurer la réflectance (paragraphe 3.3.5.2) des milieux océaniques, à partir de radiomètres¹⁴ à distance. Se sont enchaînés les capteurs POLDER ("*POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances*"), SeaWiFS ("*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*"), MOS ("*Marine Observation Satellite*"), AVHRR ("*Advanced very-high-resolution radiometer*"), MERIS ("*MEdium Resolution Imaging Spectrometer*"), les programmes LANDSAT ("*Program of Earth-observing satellites*"), depuis 2002 les capteurs MODIS ("*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*") et depuis 2015 la dernière génération de capteurs RSO ("*Rapid Scan Operation*"), très prometteuse, sur les satellites Sentinel 1A, 1B et 2.

Ces images permettent aujourd'hui, depuis l'espace, l'accès à de nombreuses mesures de type "géophysiques" (vent, température, hauteur d'eaux, houles, marées, paramètres atmosphériques, bilans radiatifs), et aussi "biochimiques" comme les concentrations : en Chl-a (Le *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2011; Vantrepotte and Mélin, 2011) qui reflètent la production primaire et les processus physiques tels que la turbidité, la température, la salinité et le vent ; en COP (Dunne *et al.*, 2007; Stramski *et al.*, 2008) qui reflètent des processus biogéochimiques de dégradation de la matière organique (Carder *et al.*, 1989) ; en MES (ou via la turbidité de l'eau) qui reflètent le couple apports terrestres/apports aquatiques.

La fréquence élevée des observations spatiales en font un élément indispensable aujourd'hui pour une compréhension globale du fonctionnement des milieux aquatiques et plus globalement de la planète. Tout d'abord utilisés par les océanographes, les instruments et les techniques d'analyses des propriétés optiques des écosystèmes aquatiques ont rapidement progressé et sont aujourd'hui devenus plus accessibles sur des plans d'eau plus petits tels que

¹⁴ Instruments qui permettent de mesurer l'intensité de lumière dans les différentes longueurs d'ondes du spectre électromagnétique

les lacs et les rivières (Martinez *et al.*, 2009; Espinoza Villar *et al.*, 2012b; Mangiarotti *et al.*, 2013; Martinez *et al.*, 2015; Robert *et al.*, 2016).

Contrairement aux autres capteurs d'observation de la terre comme Landsat 1 à 8 ou Sentinel 1A, 1B et 2 qui ont une résolution spatiale fine (~ 10 m à 250 km) mais une résolution temporelle légèrement plus longue (2 à 10 jours), les capteurs MODIS ont une résolution temporelle courte (journalière) et une résolution spatiale moyenne à grossière (250 m à 1 km/pixel). La résolution spatiale est un paramètre déterminant pour la mesure des MES des fleuves souvent étroits. La réflectance de la végétation, des berges et des bancs de sables peut affecter la réflectance de l'eau, il est alors nécessaire de créer un algorithme pour les dissocier. Or, dans les régions tropicales, la revisitabilité journalière des images satellites est nécessaire car elle facilite la surveillance en éliminant le risque de présence de nuages et d'aérosols. L'important jeu d'images des capteurs MODIS depuis 2000 pour TERRA et 2002 pour AQUA met alors à disposition une longue série temporelle d'images exploitables.

3.3.5.2 Propriétés optiques de l'eau

L'hydrologie optique se résume au comportement de la lumière une fois au contact de l'eau. Les longueurs d'ondes de la lumière dans les eaux "pures" varient dans un intervalle entre 400 et 700 nm et en fonction des éléments qui la composent et peuvent interagir dans d'autres longueurs d'ondes (λ) allant jusqu'au proche infrarouge. En effet, les eaux fluviales sont un mélange d'eau "pure" et de matières particulaires et dissoutes qui altèrent de façon significative dans le temps et dans l'espace ses propriétés optiques.

Ces propriétés peuvent être classées en deux grands groupes : les Propriétés Optiques Inhérentes (POI) et les Propriétés Optiques Apparentes (POA). Les POI dépendent uniquement des caractéristiques biophysiques du corps d'eau dont les plus importantes sont les coefficients d'absorption $a(\lambda)$ et de diffusion $\beta(\lambda, \theta)$ ainsi que les coefficients d'atténuation et de rétrodiffusion. Les POA en revanche sont la radiance (luminance) $L(\theta, \varphi, \lambda)$, l'irradiance $[Ed(0^+)]$ et la réflectance (R) qui sont des unités radiométriques suffisamment stables pour être estimées à partir d'un capteur depuis les satellites. Elles dépendent de l'angle zénithal (θ), de l'angle azimuthal (φ) et du lieu de la mesure (0^+ : éclaircissement au-dessus de la surface de l'eau. Elles sont difficiles à mesurer, faciles à décrire et à mettre en relation avec les paramètres biogéochimiques de l'eau (MES, pigments de chlorophylle, particules de carbones, ou couleur de la matière organique dissoute).

Propriétés Optiques Inhérentes

Le rayonnement lumineux pénètre dans l'atmosphère et une fois au contact de l'eau peut être absorbé, réfléchi ou transmis. Selon les caractéristiques de l'eau et selon la longueur d'onde du rayonnement incident $\phi_0(\lambda)$, l'un des trois phénomènes peut être prépondérant (**Figure 3-10**). Le rayonnement incident peut être alors décrit comme la somme de l'énergie résiduelle, en $W \text{ nm}^{-1}$ pour une longueur d'onde (λ) donnée :

$$\phi_0(\lambda) = \phi_a(\lambda) + \phi_b(\lambda) + \phi_t(\lambda) \quad (5)$$

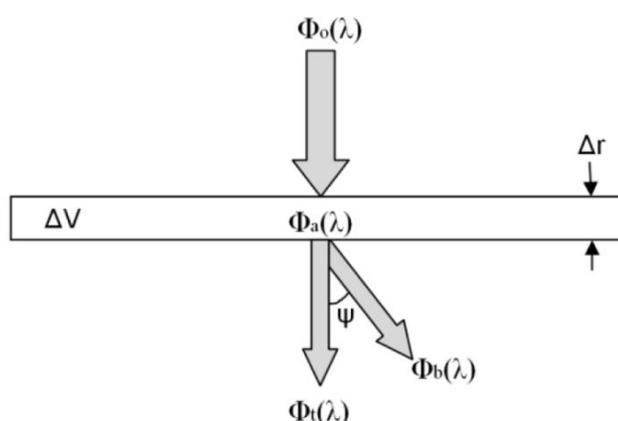


Figure 3-10. Interaction du rayon lumineux avec le milieu aquatique. Le rayon lumineux une fois en contact avec l'eau est : $\phi_a(\lambda)$ absorbé, $\phi_b(\lambda)$ réfléchi, $\phi_t(\lambda)$ transmis dans d'autres directions, sans varier sa direction (Espinoza Villar, 2013).

Lorsque la lumière est au contact des particules pour une longueur d'onde donnée, son orientation correspond au coefficient angulaire de diffusion $\beta(\lambda, \theta, \varphi)$ en m^{-1} et dépend de la taille et de la forme géométrique des particules rencontrées. La somme des coefficients angulaires de diffusion permet alors de connaître le coefficient total de diffusion de la lumière $b(\lambda)$ en m^{-1} :

$$b(\lambda) = 2\pi \int_0^\pi \beta(\lambda, \theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta \quad (6)$$

et θ l'angle de diffusion compris entre 0 et π et φ l'angle azimutal compris entre 0 et 2π .

Le coefficient de rétrodiffusion $b_b(\lambda)$ en m^{-1} (partie inverse du faisceau incident) est obtenu en intégrant $\pi/2$. Ce coefficient est primordial car il s'agit de la part incidente diffusée et détectable par un radiomètre.

Pour exprimer la quantité de lumière absorbée, le coefficient d'absorption correspond à l'énergie absorbée par l'eau par une quantité de matières en $\text{W}\cdot\text{nm}^{-1}$, d'une longueur d'onde (λ). Chaque constituant dans le milieu contribue à l'absorption (**Figure 3-11**) :

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{CDOM}(\lambda) + a_{NAP}(\lambda) + a_\phi(\lambda) \quad (7)$$

avec : $a_w(\lambda)$: coefficient d'absorption de l'eau pure en m^{-1}
 $a_{CDOM}(\lambda)$: coefficient d'absorption du CDOM ou substance jaune (< 0,22 μm) en m^{-1}
 $a_{NAP}(\lambda)$: coefficient d'absorption des particules non algales en m^{-1}
 $a_\phi(\lambda)$: coefficient d'absorption du phytoplancton en m^{-1}

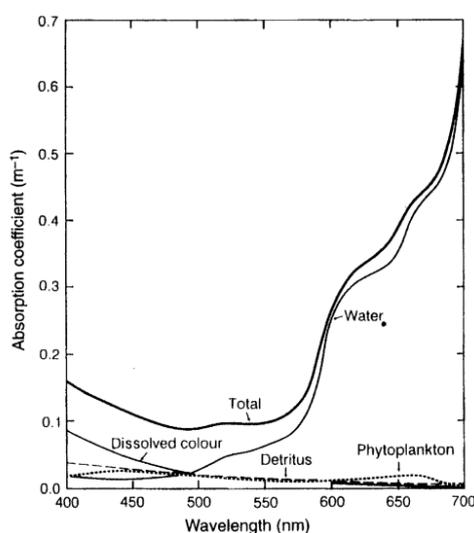


Figure 3-11. Spectres d'absorption des principaux composants de l'eau (en m^{-1}) (Kirk, 1994).

Propriétés Optiques Apparentes

Dans cette étude les POA ont été mesurées. Elles dépendent aussi bien du milieu mais également de la quantité de lumière incidente. Il s'agit principalement de la mesure de la réflectance qui dépend de deux grandeurs radiométriques : la radiance et l'irradiance.

La radiance ou la luminance (L) est définie comme l'éclairement solaire ($\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$) descendant (L_d) et ascendant (L_u) à une profondeur donnée qui est réfléchi et émerge de l'eau avec un angle zénithal (θ) et azimuthal (φ).

L'irradiance représente la somme des mesures de radiance descendantes (E_d en $\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$) et ascendantes (E_u en $\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$), dans toutes les directions, à un point et pour une surface donnés.

La réflectance (R) peut être déterminée de plusieurs façons. C'est le rapport entre la l'irradiance ascendante (E_u) et descendante (E_d) à une profondeur nulle (-0) (Morel and

Gentili, 1996; Antoine, 1998). C'est également, une part de lumière estimée en fonction des coefficients de rétrodiffusion (b_b) et d'absorption $a(\lambda)$ (Morel and Prieur, 1977) mais aussi une fraction de l'irradiance (E_d^{-0}/E_u^{-0}), qui dépend de la radiance (L_d^{-0}/L_u^{-0}), pour une profondeur donnée 0^- et selon les caractéristiques des POIs.

3.3.5.3 Mesure de la réflectance *in situ*

Dans le but d'estimer la relation empirique MES-Réflectance *in situ* et de la comparer avec la relation empirique MES-Réflectance MODIS, des mesures de radiances et d'irradiances ont été effectuées de façon simultanée avec des radiomètres sur les fleuves Maroni (le long du continuum entre Apatou et Maripasoula) et Oyapock (au Saut Maripa), pour calculer la réflectance de l'eau et de façon successive via un spectroradiomètre sur l'Orénoque à Ciudad Bolivar (grille MODIS).

Le principe de la mesure de réflectance de l'eau *in situ* est de mesurer le rapport entre l'énergie qui atteint la surface de l'eau (l'irradiance : mesurée par le capteur E_d), avec l'énergie diffusée ou réfléchi vers l'atmosphère (Radiance du ciel : L_d) : mesurée avec un capteur en direction du ciel) et l'énergie absorbée par l'eau (Radiance de l'eau : L_u) : mesurée par un capteur en direction de l'eau) :

$$R(0^+, \theta, \varphi) = \frac{L_u - p * L_d}{E_d} \quad (8)$$

avec p un facteur interne de Fresnel qui dépend de la rugosité de l'eau, pour un angle zénithal et azimuthal et une couverture de nuage, et dont la valeur utilisée est de 0,028 comme l'ont démontré les simulations de Mobley (1999).

Ces mesures ont été effectuées à différentes époques du cycle hydrologique, pour une large gamme de concentrations dans le but de simuler la réflectance de l'eau dans les bandes rouge et infrarouge qui réagissent bien avec les MES. Deux équipements différents ont été utilisés :

- ✚ Trois radiomètres de type TRiOS-RAMSES (**Figure 3-12**) sur les fleuves guyanais. Ces radiomètres sont performants pour mesurer les longueurs d'ondes entre 320 et 950 nm et peuvent être utilisés pour la mesure de la Radiance ou de l'Irradiance simultanément. Les capteurs sont composés de 256 photodiodes en silice et ont une capacité de mesure de 3.3 nm/pixel avec une occurrence spectrale de 0.3 nm.

Les trois appareils (deux de radiance et un d'irradiance) ont été disposés en bord de

pirogue et à proximité de l'eau avec une géométrie spécifique (**Figure 3-13**). Le premier capteur mesure avec un angle de nadir (*point le plus bas de la sphère céleste représentatif de la direction verticale descendante. C'est la position du soleil à minuit.*) de 35-40° la radiance de l'eau (L_u), le deuxième capteur mesure la radiance du ciel avec le même angle au zénith (L_d) et enfin le troisième capteur est installé verticalement et mesure l'irradiance (E_d).

81 mesures ont été effectuées le long du cours du Maroni (en mars, juin, août et novembre 2015), quatre dans la crique Baya (en aval du Saut Hermina) et quatre sur l'Oyapock en aval du Saut Maripa (en juin, en août et en septembre 2015).

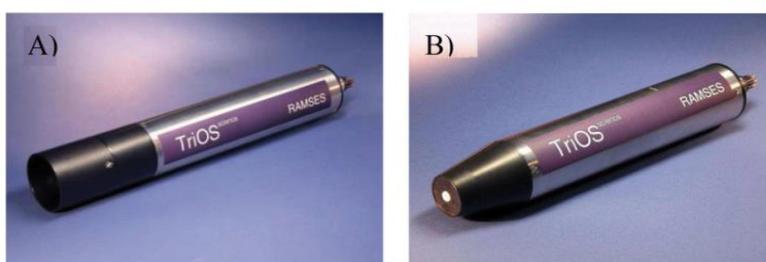


Figure 3-12. Radiomètres *in situ* A) TRiOS RAMSES-ARC : mesures de l'énergie radiante ; B) TRiOS RAMSES-ACC-VIS : mesures de l'énergie incidente (Espinoza Villar, 2013).

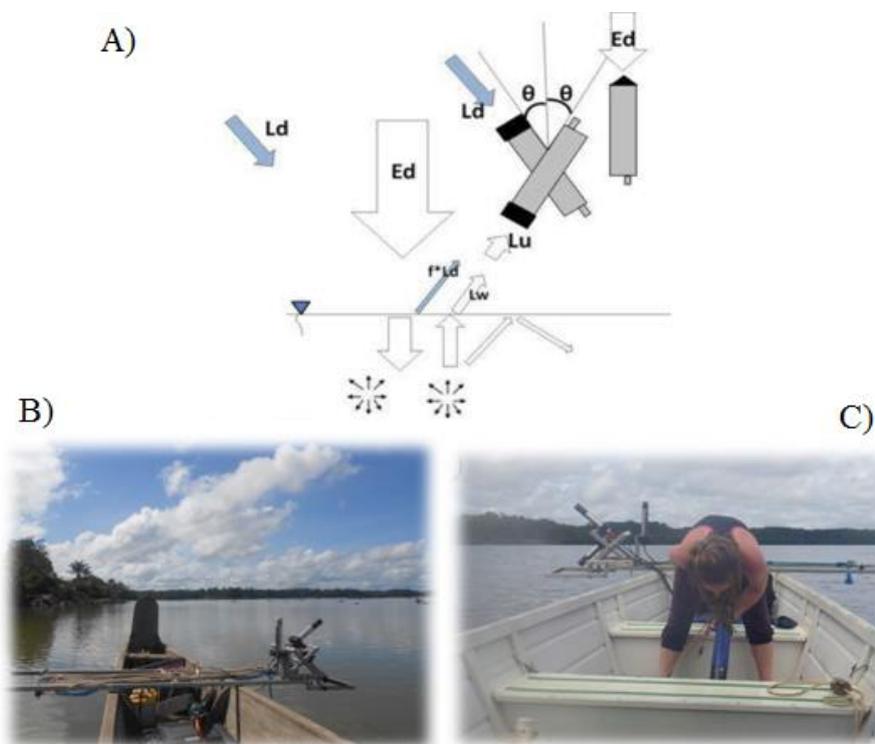


Figure 3-13. A) Schéma de mesure de la réflectance ($R(\theta^+, \theta, \varphi)$) de terrain et de l'interaction de la lumière avec la surface de l'eau. Irradiance (E_d), radiance du ciel (L_d) et radiance de l'eau (L_u). θ = angle de 35-40°. B) Installation du système de mesure sur la pirogue pour le

Maroni et, C) sur un bateau en aluminium pour l'Oyapock avec préparation de la sonde multiparamétrique pour réaliser les mesures de turbidité et de MES en simultané.

✚ Un spectroradiomètre FieldSpec RS3 modèle 85703 couvrant les longueurs d'ondes entre 350 et 2500 nm sur l'Orénoque. L'équipement complet se compose : d'un sac à dos pour le déplacement du spectroradiomètre, d'un pistolet pour la mesure radiométrique, d'un spectralon (panneau portable blanc en polytétrafluoroéthylène), d'un trépied et d'un ordinateur portable (**Figure 3-14**). Les mesures de radiance ont été réalisées via un angle de 35-40° et la mesure de l'irradiance via un angle de 90° sur le spectralon. Le spectralon est caractérisé par une réflexion et dispersion de la lumière de 100 %, uniformément dans toutes les directions. Chaque signature spectrale a été répétée 10 fois successivement dans le même secteur et à été prise en DN (Digital Number).

Les missions ont été effectuées en novembre et décembre 2014 ainsi qu'en août/septembre et en octobre 2015 pour un total de 77 mesures.



Figure 3-14. Mesure de la réflectance in situ sur l'Orénoque avec un spectroradiomètre FieldSpec RS3 modèle 85703 : A) mesure de la radiance du ciel (L_d), B) mesure de la radiance de l'eau (L_u), C) mesure de l'irradiance (E_d) via un panneau portable blanc (Spectralon) en polytétrafluoroéthylène.

3.3.5.4 Extraction de la réflectance des images des capteurs MODIS

L'algorithme "*MODIS River Reflectance Retrieval*" ou MOD3R utilisé dans cet étude, pour extraire la réflectance de l'eau et créer la relation empirique MES-Réflectance MODIS, a été développé sur l'Amazonie et successivement appliqué dans de nombreuses études sur l'Amazonie et au Burkina-Faso (Martinez *et al.*, 2009; Espinoza Villar *et al.*, 2012b; Mangiarotti *et al.*, 2013; Martinez *et al.*, 2015; Robert *et al.*, 2016).

Il utilise les images des capteurs MODIS MOD09 et MYD09 des satellites TERRA et AQUA qui sont de deux types : A1 et Q1 de résolution spatiale de 500 m ou 250 m, et permet de traiter des séries temporelles depuis 2000, ce qui signifie près de 700 images pour le satellite TERRA et 600 images pour le satellite AQUA :

- ✚ MODIS/TERRA Surface Reflectance 8-Day L3 Global MOD09A1 (500 m)
- ✚ MODIS/TERRA Surface Reflectance 8-Day L3 Global MOD09Q1 (250 m)
- ✚ MODIS/TERRA Surface Reflectance 8-Day L3 Global MYD09A1 (500 m)
- ✚ MODIS/TERRA Surface Reflectance 8-Day L3 Global MYD09Q1 (250 m)

Le niveau de traitement de ces images est de type 3 : c'est à dire que les produits ayant une résolution spatiale de 250 m fournissent une estimation de la réflectance dans les bandes 1 et 2 (bandes rouge et infrarouge) et une estimation de la qualité générale de l'image (aérosols et nuages) ; les produits ayant une résolution spatiale de 500 m fournissent la réflectance pour trois bandes dans le visible du spectre électromagnétique ainsi que pour l'infrarouge proche et moyen. Ils fournissent également une estimation de la qualité de l'image comme l'angle zénithal, l'angle azimutal, la présence de nuages, d'ombres et d'aérosols :

✚	Bande 1 : Rouge	620 - 670 nanomètres (nm)
✚	Bande 2 : Infrarouge proche	841 - 876 nm
✚	Bande 3 : Bleu	459 - 479 nm
✚	Bande 4 : Vert	545 - 565 nm
✚	Bande 5 : Infrarouge moyen 1	1230 - 1250 nm
✚	Bande 6 : Infrarouge moyen 2	1628 - 1652 nm
✚	Bande 7 : Infrarouge moyen 3	2105 - 2155 nm

Chaque pixel de ces produits contient la meilleure observation journalière mesurée sur une durée de 8 jours ce qui limite les images avec des pixels de mauvaise qualité. Les images sont disponibles gratuitement sur internet (<http://www.reverb.echo.nasa.gov/reverb/>) et ont subi un traitement préalable indiqué dans le document "*Algorithmal Theoretical Basis Document*" (ATBD) qui compile toutes les informations sur les algorithmes utilisés sur les images MODIS. Le produit ATBD correspondant aux images MOD08 est "*Atmospheric Correction Algorithm Spectral Reflectances*" (http://www.modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod08.pdf).

La faible résolution spatiale des pixels des images des satellites TERRA et AQUA favorise la probabilité que plus d'une cible soit représentée dans ce même pixel, contribuant à la réflexion totale de l'eau et résultant d'une radiométrie mixte (**Figure 3-15 A**). Dans l'espace, ce sont les limites du pixel qui définissent sa composition. Les sommets de cet espace spectral sont appelés *endmembers* (**Figure 3-15 B**).

Les pixels d'eau peuvent être soit composés uniquement d'eau appelés "pixels purs", soit composés de réflectances autres que celle de l'eau soit des "pixels mixtes" (ou mixels). La composition des pixels d'eau des rivières varie en fonction de trois facteurs :

- ✚ L'hydrologie du fleuve : en fonction du niveau d'eau la largeur du fleuve diminue et des bancs de sables peuvent apparaître,
- ✚ La résolution du capteur : qui peut être dégradée en fonction de l'angle de vue au zénith,
- ✚ La présence de résidus atmosphériques : comme les aérosols, les nuages ou la présence d'ombres.

L'obtention de la réflectance des eaux fluviales à partir des images satellites peut donc être difficile car elle dépend de la largeur et de l'angle de prise d'acquisition. En d'autres termes, il est difficile d'identifier des pixels d'eau "pure" basés uniquement sur un masque de sélection. Il est nécessaire d'élaborer un processus spécifique d'automatisation pour sélectionner uniquement l'eau des fleuves.

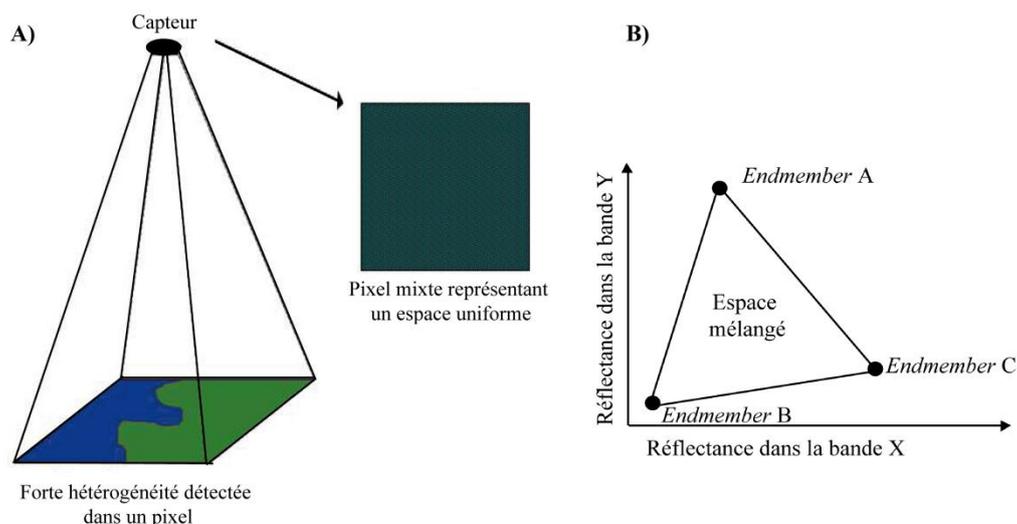


Figure 3-15. Représentation A) de la zone du pixel étudié et B) de la réponse des capteurs face à un pixel mixte (adaptées de : Espinoza Villar, 2013).

L'algorithme MOD3R permet de sélectionner automatiquement les pixels dans une image à l'aide d'un masque et de créer des classes de pixels pour ne sélectionner que les pixels d'eau. La méthode consiste à :

- ✚ Indiquer une série d'images de la zone d'intérêt ainsi qu'un masque de sélection des pixels,
- ✚ Extraire les pixels à l'aide de ce masque,
- ✚ Estimer les valeurs de réflectance obtenues et à les classer en groupes homogènes.

L'algorithme utilise la méthode statistique des *K-means* qui classe les groupes de pixels selon leur valeur médiane. La végétation est ainsi séparée des bancs de sables et des pixels d'eau. Les groupes de valeurs sont ensuite testés puis le plus grand groupe de pixels et le plus homogène est sélectionné. Cette méthode statistique est de type non-supervisée ce qui permet de former des groupes représentés par K-pixels et K-valeurs. La valeur de chaque pixel est estimée (K_1) puis classée selon sa distance par rapport à la valeur médiane de l'ensemble des données. Les pixels trop éloignés sont automatiquement supprimés alors que toutes les valeurs conformes à la valeur médiane sont conservées. L'étape est répétée jusqu'à une valeur finale de convergence (Espinoza Villar, 2013). Aussi pour obtenir une valeur finale de réflectance représentative du pixel d'eau, dans les bandes(λ) sélectionnées, avec ε_j comme erreur résiduelle, les réflectances des pixels d'eau (R_{eau}) et de végétation ($R_{végétation}$) sont testées (α_j), et séparées (β_j) des groupes (j) :

$$R_{j,\lambda} = \alpha_j * R_{\lambda, eau} + \beta_j * R_{\lambda, végétation} + \varepsilon_j \quad (9)$$

La **Figure 3-16** montre le masque créé pour sélectionner des pixels avec MOD3R (**A**) pour le Maroni à la station en aval du grand tributaire du Tapanahoni et (**B**) à la station localisée en amont de la confluence Meta/Orénoque. Les valeurs des pixels pour les bandes rouges et infrarouges sont affichées en dessous. Lorsque le cours d'eau est plus étroit (**A**), l'algorithme sélectionne alors automatiquement plus de pixels de végétation créant une plus grande dispersion dans le ratio réflectance bande rouge/bande infrarouge. Pour ce motif, des masques d'une grande taille favorisent la sélection d'un plus grand nombre de pixels d'eaux.

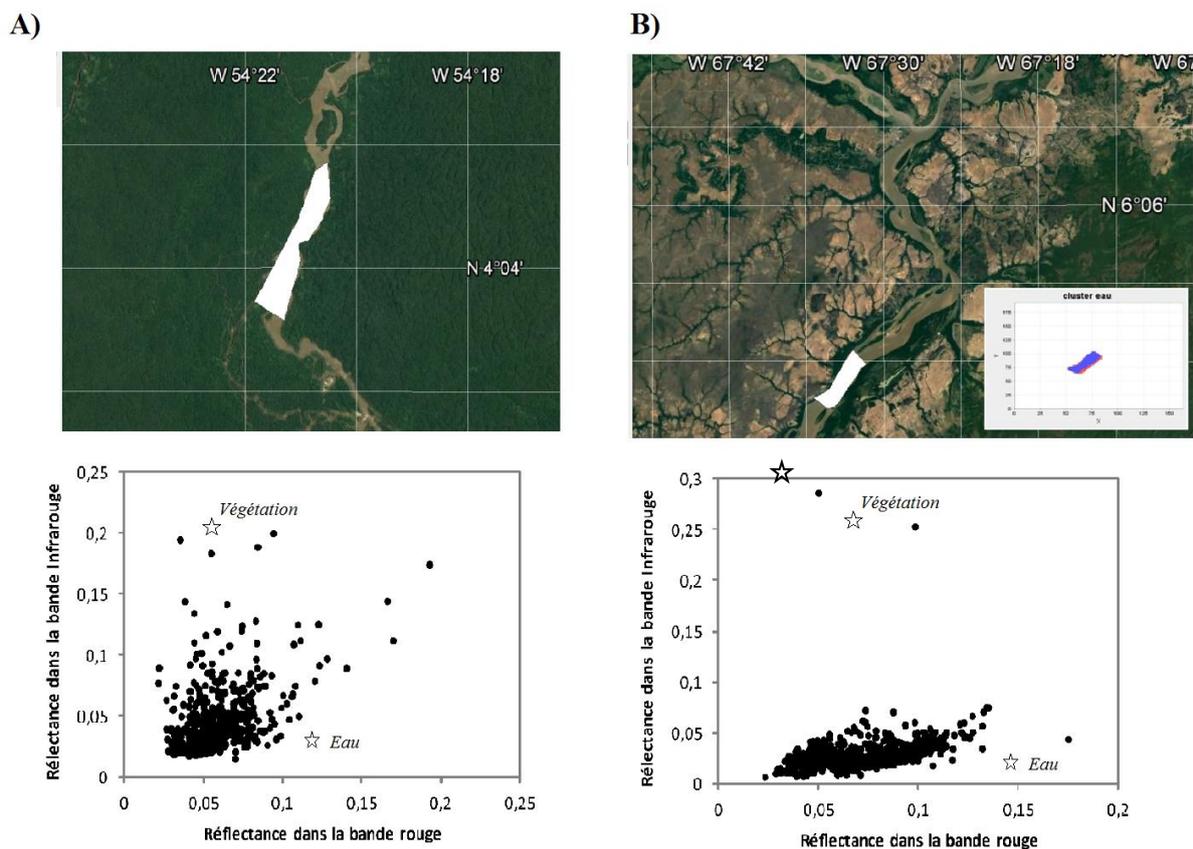


Figure 3-16. Représentation : A) des masques de sélection des pixels sur l'Orénoque en amont du Meta et, B) sur le fleuve Maroni. Les diagrammes indiquent les pixels sélectionnés par le masque et les régions théoriques des *Endmembers* d'eau. Le cluster en bleu indique les pixels d'eau sélectionnés et le cluster en rouge montre les pixels de végétation automatiquement supprimés.

3.3.5.5 Calibrations MES-Réflectance *in situ* et MES-Réflectance satellite

Dans cette étude deux types de calibrations empiriques (relation directe entre la réflectance et les paramètres composantes de l'eau) ont été réalisées : (1) MES-Réflectance *in situ* et (2) MES-Réflectance satellite. Elles peuvent être établies à partir d'un ratio, ou bien directement à partir d'une longueur d'onde spécifique. Les calibrations MES-Réflectance *in situ* ont été effectuées avec des données de MES de surface prélevées simultanément avec les données des radiomètres de terrain pour calculer la réflectance. Au contraire, les calibrations MES-Réflectance satellite ont été faites avec les jeux de données de MES *in situ* de l'observatoire HYBAM et la réflectance des capteurs MODIS.

Pour le Maroni, la calibration MES-Réflectance *in situ* a été réalisée avec les données de MES et de réflectance collectées simultanément (n = 81) durant les campagnes réalisées en mars, juin, août et novembre 2015. La calibration MES-Réflectance MODIS au Saut Hermina

a été effectuée via le jeu de MES collecté par le SNO-HYBAM depuis 2004 et directement via une relation linéaire. En considérant que les caractéristiques optiques et biogéochimiques du Maroni sont similaires de l'amont vers l'aval il a été possible d'appliquer la calibration MES/Réflectance MODIS pour les diverses stations "virtuelles" dans le bassin versant.

Le suivi des MES sur l'Oyapock est basé uniquement sur des données de terrain car le fleuve ne répond pas aux critères minima nécessaires pour réaliser une estimation avec les images des capteurs MODIS. Les critères minima estimés pour le suivi des MES avec MODIS sont :

- ✚ une largeur de cours d'eau d'au moins 350 mètres car la taille minimale des pixels de MODIS est de 250 mètres,
- ✚ la station doit être dans une zone dépourvue d'îles, de roches affleurantes et de bancs de sables pour limiter le nombre de pixels qui ne sont pas des pixels d'eau et enfin
- ✚ les concentrations de matières en suspension doivent être suffisamment élevées pour être détectables (minimum 3 à 5 mg.l⁻¹ ce qui correspond à l'erreur absolue entre les mesures reproductibles).

Concernant l'Orénoque, la calibration MES-Réflectance *in situ* a été réalisée avec les données de MES et de réflectance mesurées simultanément lors des missions en novembre et décembre 2014 ainsi qu'en août et octobre 2015, sur la grille MODIS à Ciudad Bolivar (n = 77) et avec le spectroradiomètre FieldSpec RS3 modèle 85703 (Gallay and Laraque, 2014; Gallay *et al.*, 2015a; Gallay *et al.*, 2015b).

Les premières calibrations réalisées avec des données de MES et de réflectances *in situ* n'ont pas donné de résultats satisfaisants (biais important entre les données du terrain et du satellite). Par conséquent, nous avons effectué puis utilisé une calibration MES-Réflectance MODIS à partir de moyennes mensuelles des valeurs de MES et de réflectance (n = 183) aux stations Musinacio (MUS), Ciudad Bolivar (CB), Ciudad Guayana (CG) et Apure (APU) et ce, comme pour l'Amazone (Mangiarotti *et al.*, 2013; Martinez *et al.*, 2015).

3.3.6 Calculs et méthodes statistiques utilisées

3.3.6.1 Flux de matières

Des calculs de flux (F_m) ont été effectués pour les données de concentrations de MES sur une longue période (2000-2016) et pour les données de concentrations de carbone, d'azote et de chlorophylle a sur une plus courte période (Octobre 2014 à Octobre 2016). Ce calcul se base sur deux types de données : les débits (Q) et les concentrations, au moyen de plusieurs méthodes :

- ✚ La méthode la plus simple est basée sur la relation entre les concentrations et le débit. Il s'agit de multiplier les valeurs de concentration journalière (C_j) estimées linéairement par le débit journalier (Q_j).

$$F_m = C_j * Q_j. \quad (10)$$

Le logiciel HYDRACCESS, librement distribué sur le site du SNO-HYBAM (www.ore-hybam.org), permet de calculer le flux de matières en fonction de cette interpolation (Vauchel, 2004).

- ✚ La méthode la plus utilisée pour s'affranchir de l'hétérogénéité spatiale des MES dans une section est de réaliser des jaugeages solides pour estimer la moyenne de la section et corriger la mesure en surface (Filizola and Guyot, 2009). Les jaugeages doivent être réalisés à différentes époques du cycle hydrologique :

$$Concentration_{section} = f[concentration]_{surface} \quad (11)$$

Après avoir appliqué la correction sur les concentrations de MES en surface, on multiplie la valeur par le débit pour avoir le flux du moment. Puis, cette valeur est multipliée par le nombre de jour et de mois pour avoir le flux équivalent. Le flux annuel représente alors la somme des flux mensuels.

(i) Flux mensuel :

$$F_m(mois) = \frac{1}{k} * \Sigma C_j * Q_j \quad (12)$$

avec k = nombre de données journalières (j) dans le mois.

(ii) Flux annuel :

$$F_m = \frac{1}{n} * \Sigma Q_m \quad (13)$$

avec n : nombre d'années, avec F_m (*mois*)

- ✚ Lorsque la série de concentrations journalières est inférieure à celle des débits (situation la plus fréquemment rencontrée), il s'agit comme dans la méthode précédente d'appliquer une correction des concentrations de matières sur le jeu de données, en créant une relation entre les données à la surface et les moyennes dans la section de jaugeage, puis après avoir calculé la moyenne des flux journaliers, celle-ci est pondérée par les débits mensuels (Laraque *et al.*, 1995). Le flux annuel représente alors la somme des flux mensuels :

$$F_m = \left[\frac{\sum_1^n (C_j * Q_j)}{\sum_1^n Q_j} \right] * Q_m \quad (14)$$

avec C_j la concentration journalière, Q_j le débit journalier et Q_m le débit mensuel

Dans cette étude, les flux journaliers ont été pondérés par le débit moyen mensuel pour les concentrations de MES car la série de C_j est inférieure à la série de Q_j et que des mesures ont été réalisées dans toute la colonne d'eau.

La méthode la plus simple $F_m = f(Q)$ a été utilisée pour les séries de COD, COP, COT, et NOP puisque nous ne disposons pas de données dans toute la colonne d'eau.

3.3.6.2 Flux spécifiques

Les flux spécifiques sont utilisés pour comparer les bassins versants entre eux à surface équivalente. Le transport solide spécifique représente le flux de matières par unité de surface et par unité de temps il est exprimé en $t.km^2.an^{-1}$. L'écoulement spécifique représente les débits par unité de surface et par unité de temps, il est couramment exprimé en $l.s^{-1}.km^2$ mais on le retrouve également exprimé en $m^3.km^{-2}.an^{-1}$.

3.3.6.3 Estimateurs d'erreurs

Le BIAIS (MBE : *mean bias error*) a été utilisé pour estimer la distance entre les MES calculées avec la relation MES/Réfectance *in situ* et ceux calculés avec la relation MES/Réfectance MODIS. Le résultat est exprimé en pourcentage :

$$BIAIS = \sum_1^n \frac{y_i - x_i}{n} \quad (15)$$

avec : $y_i = \text{MES } in \text{ situ}$; $x_i = \text{MES MODIS}$ et $n = \text{nombre de données}$

Pour estimer la dispersion moyenne entre les concentrations estimées via la relation MES/Réflectance *in situ* et les concentrations estimées via la relation MES/Réflectance MODIS, l'erreur moyenne quadratique (RMSE : *root mean square error*) a été utilisée. Le résultat est exprimé en pourcentage :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i \frac{y_i - x_i^2}{y_i}} \quad (16)$$

avec : $y_i = \text{MES } in \text{ situ}$ et $x_i = \text{MES MODIS}$

Pour estimer la dispersion spécifique, la différence relative a été calculée. Le résultat est exprimé en pourcentage :

$$RD = \frac{y_i - x_i}{y_i} \quad (17)$$

avec : $y_i = \text{MES } in \text{ situ}$ et $x_i = \text{MES MODIS}$

3.3.6.4 Tendances à long terme : Mann-Kendall test

Pour déterminer si les séries temporelles ont subi des changements ces dernières années, des analyses de tendances ont été réalisées avec le test non-paramétrique de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975). Il a l'avantage de ne pas dépendre de l'ampleur de la répartition des données (par exemple la loi normal) et il a la même force que les tests paramétriques (Wang *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2008). Il est largement utilisé en hydro-climatologie (Buendia *et al.*, 2016; Shi *et al.*, 2016; Shi & Wang, 2015) et moins souvent en hydro-géochimie (Vantrepotte and Mélin, 2011). Il est par ailleurs recommandé par l'OMM pour vérifier la présence de changements de valeur des paramètres étudiés sur le long terme (Zhang *et al.*, 2008; Wang, 2011). Trois paramètres sont calculés : la pente S, le Tau Kendall (τ) et le niveau de signification ou la p-value ($p \leq 0,05$). Une valeur positive de S indique une tendance positive tandis qu'une valeur négative est indicative d'une tendance négative. L'ampleur de la pente est estimée à l'aide de la méthode développée par Sen (1968) et Hirsch *et al.* (1982). Le Tau de Kendall mesure la corrélation entre deux variables et la valeur-p indique la significativité du test et vérifie si l'hypothèse nulle est vraie. Ce test a été réalisé avec le logiciel XLSTAT-Premium.

Les données analysées concernent celles des bassins versants du Maroni et de l'Oyapock. Il s'agit : (i) des précipitations journalières et mensuelles totales, moyennes, maxima et minima pour la période 1978-2015, (ii) des débits mensuels moyens, maxima et minima entre 1952 et

2015 et enfin, (iii) des concentrations de MES journalières et mensuelles pour chaque station pour la période 2000 à 2015.

Aucune étude statistique n'a été réalisée sur les données de l'Orénoque car les courbes de tendance des débits et des MES n'ont montré aucune évolution.

3.3.6.5 Ruptures et changements dans les chroniques de données

Le test de Pettitt (Pettitt, 1979) a été utilisé pour détecter s'il existe des ruptures dans la série temporelle de MES des fleuves Maroni et Oyapock. C'est également une technique non-paramétrique largement employée pour détecter un "changement" à un moment donné sur des observations continues en hydro-climatologie (Buendia *et al.*, 2016 Shi *et al.* 2016; Shi & Wang, 2015) et moins souvent en hydro-géochimie. Ce test permet de repérer pour un paramètre donné, des périodes homogènes séparées par des ruptures au sein d'une chronique temporelle suffisamment longue. Il compare deux séquences consécutives à un test t de la valeur moyenne de chacune des deux périodes et précise le moment auquel le changement s'est produit. Le point de changement de la série situé à T (date) est significatif pour une p -value $\leq 0,05$. Ce test a été réalisé avec le logiciel XLSTAT-Premium.

3.3.6.6 Coefficient de corrélations de Spearman

Des matrices de corrélations de Spearman ont été réalisées pour connaître les variables explicatives ou prédictives des MES ainsi que des COP, NOP, COT et Chl-a. Le coefficient de corrélation de Spearman est un test non-paramétrique, communément utilisé en statistique pour estimer les relations entre les données (Mora *et al.*, 2010; Mora *et al.*, 2010b). Il est basé non sur les valeurs mais sur les rangs et est recommandé lorsque les variables utilisées ne suivent pas la loi normale. La relation r est significative pour une p -value $\leq 0,05$. Les statistiques ont été réalisées avec le logiciel Statistica 10.

Chapitre 4 : Résultats



Ville de Ciudad Bolivar le long de l'Orénoque au Venezuela en période de hautes eaux



Seuil rocheux homogénéisant les matières en suspension en amont de la station de Ciudad Bolivar sur l'Orénoque au Venezuela en période de hautes eaux

Dans le chapitre précédent une petite introduction décrit le réseau de recherche puis les sites d'études, les stations de mesures *in situ* et satellites. Enfin les données et méthodes pour chaque bassin versant en termes de précipitations, débits, occupation des sols, mesures et analyses labos, mesures et analyses des MES par satellites ainsi que calculs et méthodes statistiques utilisées ont été décrits. Ce chapitre présente les principaux résultats obtenus pour répondre aux objectifs et questions de recherche des **paragraphes 1.2 et 3.1**.

4.1 Evolution de l'occupation des sols

Dans le bassin versant du Maroni (**Figure 3-3**), les principaux villages sont Maripasoula (MPS), Papaïchton (PPI), Grand-Santi (GS), Apatou (APT), Saint-Laurent du Maroni (STL) et Saül (SA). Les surfaces des villages s'étendent sur un total de 11 053 ha en 2005, 13 746 ha en 2008 et 15 848 ha en 2011 (**Tableau 4-1**). En amont de la station SH, les zones artificielles et agricoles représentaient 3 913 ha en 2005, 5 036 ha en 2008 et 5 959 ha en 2011 soit 0,10 % du bassin versant.

Tableau 4-1 : Surfaces urbaines et agricoles en hectares (ha) et en pourcentages (%) dans le bassin versant du Maroni sur les parts surinamaïse (SU) et française (FG).

	Surfaces des principaux villages						Surfaces totales			
	SA (ha)	MPS (ha)	PPI (ha)	GS (ha)	APT (ha)	STL (ha)	Bassin versant (ha)	Amont de SH (%)	(ha)	(%)
En 2005										
Surfaces artificielles	95	596	119	275	402	2 810	4 297	0,06	1 085	0,02
Surfaces agricoles	9	748	305	1 766	1 234	2 694	6 756	0,10	2 828	0,05
Total	104	1 344	424	2 041	1 636	5 504	11 053	0,17	3 913	0,06
En 2008										
Surfaces artificielles	164	710	162	333	492	3 115	4 976	0,07	1 369	0,02
Surfaces agricoles	9	953	510	2 195	1 473	3 630	8 770	0,13	3 667	0,06
Total	173	1 663	672	2 528	1 965	6 745	13 746	0,21	5 036	0,08
En 2011										
Surfaces artificielles	168	737	170	395	570	3 351	5 391	0,08	1 470	0,02
Surfaces agricoles	43	1 321	561	2 563	1 530	4 438	10 456	0,16	4 488	0,07
Total	211	2 058	731	2 959	2 100	7 789	15 848	0,24	5 959	0,10

Dans le bassin versant de l'Oyapock, les principaux villages en amont de la station SM sont Camopi (CM) situé à 100 km et Trois-sauts (TS) à 235 km (**Figure 3-3**). En 2011, 2 479 ha sont utilisés pour les zones de villages et d'agriculture à STG, CM et TS. En amont de la station SM, les territoires urbains et agricoles représentent 328 ha (170 ha pour TS et 158 ha pour CM soit 0,01 % de la superficie totale du bassin versant : **Tableau 4-2**).

Tableau 4-2 : Surfaces urbaines et agricoles en hectares (ha) et en pourcentages (%) dans le bassin versant de l'Oyapock sur les parts française (FG) et brésilienne (BR).

	Surfaces des principaux villages			Surfaces totales		Surfaces totales	
	STG (ha)	CM (ha)	TS (ha)	Bassin versant (ha)	(%)	Amont de SM (ha)	(%)
En 2005							
Surfaces artificielles	553	140	18				
Surfaces agricoles	956	18	152				
Total	1 509	158	170				
En 2008							
Surfaces artificielles	624	140	18				
Surfaces agricoles	1 156	18	152				
Total	1 780	158	170				
En 2011							
Surfaces artificielles	703	140	18	862	0,03	159	0,006
Surfaces agricoles	1 448	18	152	1 617	0,06	170	0,007
Total	2 151	158	170	2 479	0,10	328	0,013

La déforestation induite par les activités minières (**Tableau 4-3**) dans le bassin du Maroni concerne une superficie de 4 821 ha en 2000 (0,07 % du bassin versant total), de 17 609 ha en 2008 (0,26 %) et de 24 463 ha en 2014 (0,37 %). En 2014, la fraction surinamaïse (SU) était la plus exposée (16 680 ha) par rapport à la fraction guyanaïse (8 060 ha). En comparaison, dans le bassin de l'Oyapock les activités minières couvrait une superficie de 387 ha en 2000 (0,01 %), 1 542 ha en 2008 (0,05 %) et 1 874 ha (0,06 %) en 2014 principalement en Guyane (1 547 ha) dans la région de Camopi. Entre 2000 et 2014 une augmentation de 384 % est observée.

Tableau 4-3 : Surfaces minières en hectares (ha) et en pourcentages (%) dans le bassin versant de l'Oyapock et sur les parts française (FG) et brésilienne (BR).

Bassin versant	Surfaces minières (ha)			Surfaces minières (%)		
	FG	SU	total	FG	SU	total
Maroni						
En 2000	2 032	2 789	4 821	0,03	0,04	0,07
En 2008	7 796	9 813	17 609	0,12	0,15	0,26
En 2014	8 058	16 682	24 463	0,12	0,25	0,37
Augmentation en % (2000-2014)	297	498	407			
Augmentation en % (2000-2008)	284	252	265			
Augmentation en % (2008-2014)	3	70	39			
Oyapock						
En 2000	337	50	387	0,01	0,00	0,01
En 2008	1 325	217	1 542	0,04	0,01	0,05
En 2014	1 547	327	1 874	0,05	0,01	0,06
Augmentation en % (2000-2014)	359	550	384			
Augmentation en % (2000-2008)	293	332	298			
Augmentation en % (2008-2014)	17	51	22			

Entre 2000 et 2014, une augmentation de 407% est estimée dans le bassin du Maroni (0.37% du bassin versant à partir de la station SH). Aussi, sur un total de 34 sous-bassins versants, 18 étaient perturbés en 2014 par les activités des mines, tandis que seulement 10 en 2000 et 17 en 2008 (**Figure 4-1**). Les plus touchés en 2000 étaient les 521, 522, 504, 503, 502 et 501 avec respectivement 1 171 ha, 902 ha, 870 ha, 573 ha, 480 ha et 202 ha. En 2008, l'augmentation a été spectaculaire dans les sous-bassins 522 (+ 3 886 ha), 521 (+ 3 165 ha), 504 (+ 2 823 ha), 501 (+ 1 399 ha), 503 (+1 396 ha), 502 (+ 1 170 ha) et 512 (+ 1 158 ha). Enfin en 2014, elles ont augmenté dans les sous-bassins 503 (+ 4 190 ha), 502 (+ 4 122 ha), 501 (+ 1 998 ha), 512 (+ 1 700 ha), 524 (+ 1 176 ha), 514 (+ 858 ha) et diminué pour les 522 (- 3 520 ha), 521 (- 3 044 ha) et 504 (- 2 253 ha).

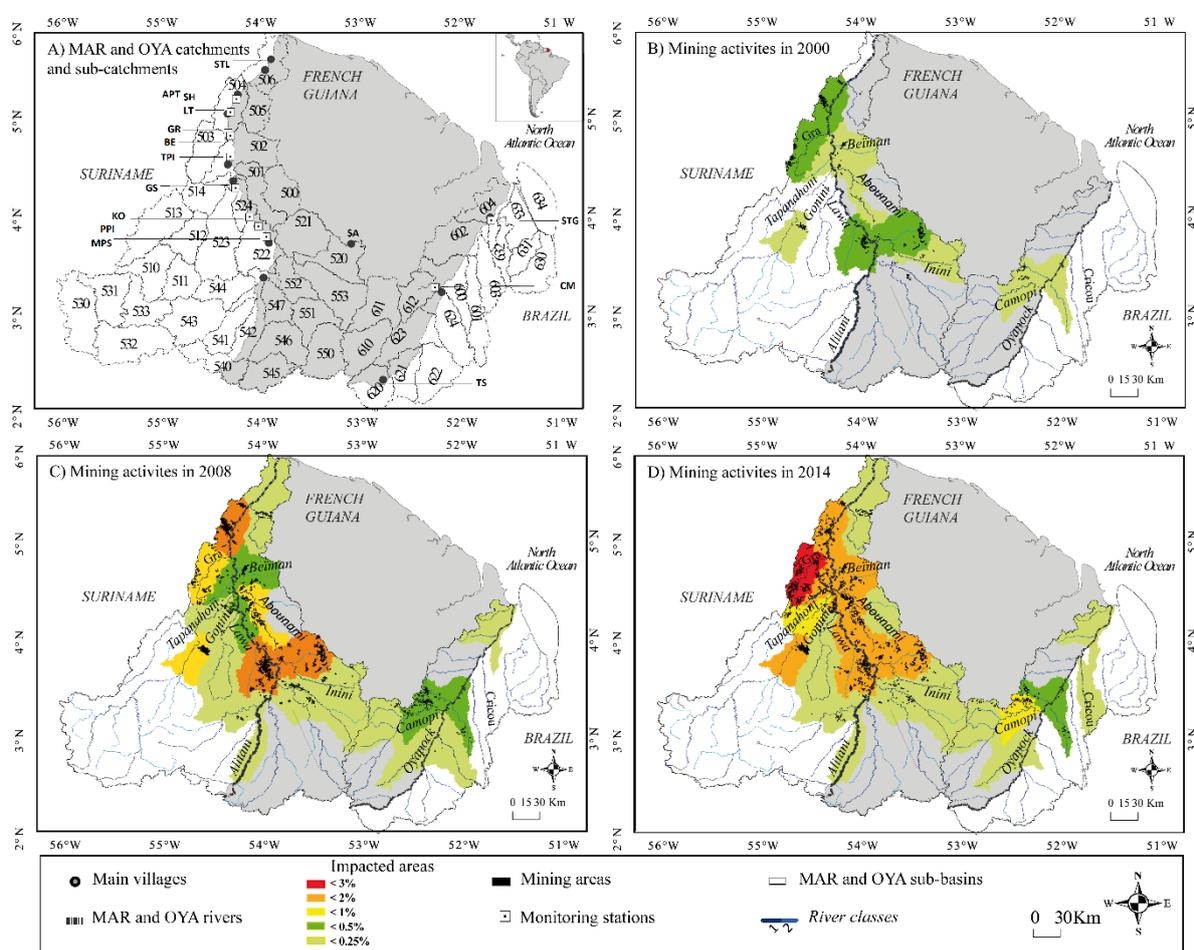


Figure 4-1. Evolution des surfaces minières : A) dans les bassins versants et sous-bassins versants du Maroni et de l'Oyapock. Les points noirs situent les principaux villages et les carrés blancs indiquent les stations de surveillance, B) en 2000, C) en 2008 et D) en 2014. Les couleurs représentent le pourcentage de surfaces impactées par les activités d'orpaillage et par sous-bassin versant.

Dans le bassin de l'Oyapock, sur un total de 18 sous-bassins, deux étaient perturbés en 2000 contre six en 2008 et 2014 (**Figure 4-1**). Les principaux sous-bassins impactés par les activités minières concernaient celui référencé en 612 autour de la rivière Camopi (CM), avec 747 et 785 ha déforestés en 2008 et 2014 (soit 0,5 % et < 1 %) et le sous-bassin 600 avec 674 et 903 ha en 2008 et 2014. Les surfaces déboisées dans ces deux sous-bassins versants représentaient 70 % de la zone minière totale du bassin versant de l'Oyapock.

Aucune donnée concernant l'occupation des sols n'a été analysée dans le bassin versant de l'Orénoque puisque nous n'avons pas trouvé de tendance pour le transport solide spécifique et dans les écoulements spécifiques.

4.2 Evolution de la pluie et des débits

Les précipitations moyennes interannuelles mesurées à APT (**Figure 4-2 A**) sont de 196 mm pour la période 1978-2015 et de 283 mm pour la période 1953 et 2015 à STG (**B**). La montée des eaux à LT et à SM a lieu de janvier à mai respectivement en même temps que l'augmentation des précipitations. Pour la période 1953-2016, le débit moyen interannuel à LT est de $1\,700\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ et le débit moyen maximum interannuel est de $3\,400\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Pour la période 1952-2016, le débit moyen interannuel à SM est estimé à $900\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ et le débit moyen maximum interannuel est de $1\,700\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

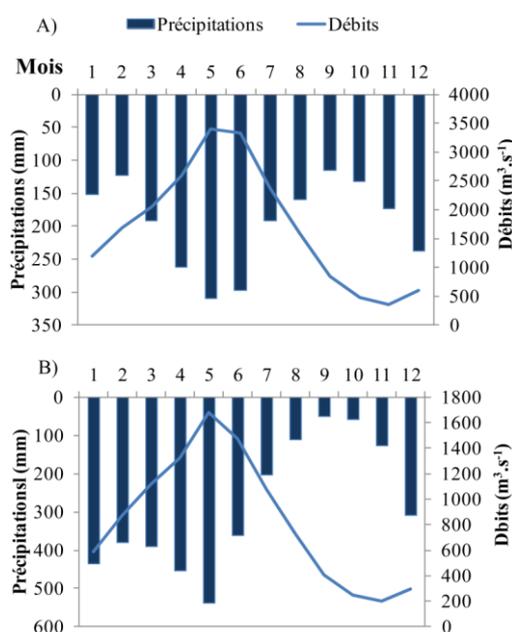


Figure 4-2. Hydrogramme et pluviogramme moyen mensuel estimés entre 1953 et aujourd'hui : aux stations hydrométriques principales de A) LT pour le Maroni et B) SM pour l'Oyapock ; aux stations pluviométriques de A) APT pour le Maroni et STG pour l'Oyapock.

Aucune tendance significative ($p \leq 0,05$) par le test de Mann-Kendall pour les chroniques de précipitations journalières, mensuelles et annuelles, moyennes et maxima ainsi que pour les débits journaliers, mensuels et annuels n'a été observée aux quatre stations de mesures pluviométriques (MPS, PPI, GS, APT : 1978-2015) et à la principale station hydrométrique LT du Maroni (1951-2015) ainsi qu'aux deux stations pluviométriques (CM et STG : 1978-2015) et à la principale station hydrométrique SM de l'Oyapock (1953-2015). Une tendance positive a été cependant observée pour les valeurs minima des stations pluviométriques de GS, PPI, CM and SM.

Dans le bassin du Maroni, les précipitations mensuelles maximales, sur la période 2000-2015, se sont produites en mars 2015 (1 758 mm : 473 à MPS, 528 à PPI, 293 à GS et 464 à LT), en mars 2011 (1 666 mm : 418 à MPS, 452 à PPI, 390 à GS et 405 à LT) et en mai 2015 (1 346 mm : 448 à MPS, 482 à PPI, 504 à GS et 220 à LT), alors que les précipitations mensuelles minimales se sont produites en septembre et octobre 2015 (64 et 67 mm). Les moyennes des précipitations annuelles (pour toutes les stations) varient entre 1486 et 2776 mm en 2015 et 2013 respectivement. À sa principale station hydrologique Langa Tabiki (LT) pour la période 2000-2015, le débit journalier maximum de $8\,790\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ a eu lieu en juin 2008 (ce qui correspond à un événement d'inondation d'une occurrence de 100 ans). Le débit le plus faible a été enregistré en décembre 2004 ($84\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) et le débit moyen pour la même période (2000-2015) était de $1\,831\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (**Figure 4-3 A**).

Dans le bassin de l'Oyapock, les précipitations mensuelles maximales, sur la période 2000-2015, sont intervenues en mai 2000 (1 359 mm : 852 mm à SM et 507 à CM), en avril 2005 (1 499 mm : 952 à SM et 547 à CM) et en janvier 2009 (1 346 mm : 865 à SM et 480 à CM), tandis que les précipitations mensuelles minimales ont été observées en octobre et novembre 2008 (26 et 24 mm) ainsi qu'en octobre 2002 et en septembre 2012 (34 mm). Les moyennes des précipitations annuelles (pour les deux stations) ont varié entre 2 685 et 3 645 mm, en 2014 et 2010 respectivement. À sa principale station hydrologique Saut Maripa (SM), le débit annuel moyen enregistré, sur la période 2000-2015, était de $867\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, et le débit journalier maximal était de $4\,033\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (mai 2015). Les minima pour cette période étaient de $64\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en novembre 2009, $71\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en décembre 2004 et $72\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en décembre 2012 (**A**).

Le débit annuel moyen de l'Orénoque à la station hydrologique de CB (**B**) pour la période 2000-2016 est d'environ $33\,320\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Les valeurs maximales journalières étaient de $77\,909\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en août 2012 et de $77\,908\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en août 2006 alors que les valeurs minimales étaient de $3\,067\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (février 2010) et de $3\,287\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (mars 2003).

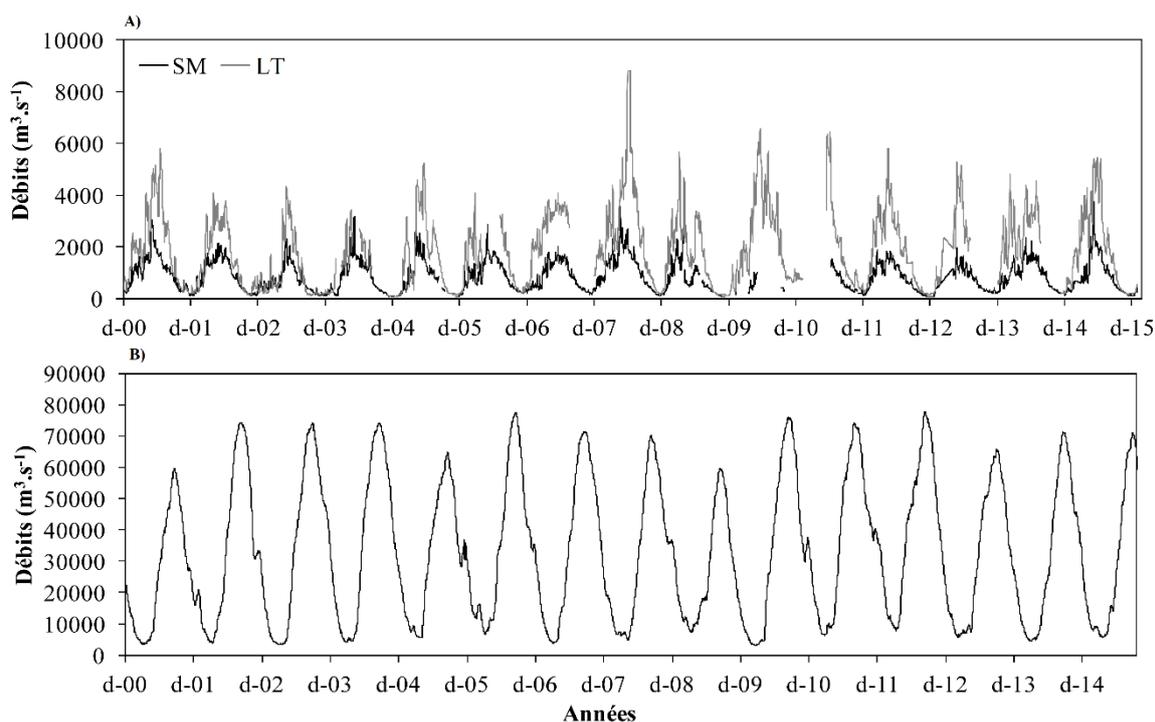


Figure 4-3. Débits journaliers pour la période 2000-2015 aux stations : A) de Langa Tabiki (LT : en gris) sur le Maroni et de Saut Maripa (SM : en noir) sur l'Oyapock et B) de Ciudad Bolivar sur l'Orénoque.

4.3 Paramètres physico-chimiques

Les données des paramètres physico-chimiques sont résumées dans le **Tableau 4-4**. Sur la période 2004-2016 les données de surface du SNO-HYBAM en Guyane et analysées via des sondes portatives WTW, ont varié : à SH sur le Maroni entre 5,07 et 7,49 pour le pH et entre 17 et 46 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour CE ; à SM sur l'Oyapock, entre 5,48 et 7,09 pour le pH et entre 16 et 42 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour CE. Pour les deux stations et pour les deux paramètres, les valeurs les plus élevées ont été relevées au début de la montée des eaux (novembre - décembre) alors que les valeurs les plus basses étaient durant les hautes eaux (mai - juin) (**Annexe 6-1**).

Les mesures réalisées avec la sonde EXO2, entre octobre 2014 et 2016, et dans la colonne d'eau, ont montré une faible variation entre les valeurs en surface et en profondeur ainsi qu'une différence parfois significative entre les quatre verticales à SH sur le Maroni (**Annexes 6-2, 6-3, 6-4 et 6-5**). Le pH à SH a varié entre 6,01 et 7,33 pour une CE entre 14 à 36 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, une température entre 25 et 30°C et un taux de saturation en oxygène allant de 81 à 99 %. Des valeurs similaires ont été mesurées dans la colonne d'eau entre octobre 2014 et 2016 à la station de SM sur l'Oyapock.

Sur l'Orénoque aux points de collecte de la grille MODIS la température de l'eau a varié entre 29 et 31°C pour les missions d'août/septembre et octobre 2015. Le pH a évolué entre 4,70 et 6,98 (moyenne : 5,64). Les plus basses et les plus fortes valeurs ont été enregistrées au mois d'octobre. La conductivité électrique mesurée a varié entre 23 et 31 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ (moyenne : 26 $\mu\text{S.cm}^{-1}$).

Tableau 4-4 : Gammes de pH, CE, T°C et oxygène dissous (ODO en %) mesurées sur le Maroni à SH, sur l'Oyapock à SM et sur l'Orénoque à CB entre 2004 et 2016.

Station	Gamme (2004-2016)			Sonde EXO (2014-2016)			
	pH	CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	T°C	pH	CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	T°C	ODO (%)
SH (Maroni)	5,07 - 7,22	18 - 39		6,01 - 7,33	14 - 36	25 - 30	81 - 99
SM (Oyapock)	5,48 - 7,09	16 - 42		6,12 - 6,70	16 - 36	26 - 29	88 - 98
grille MODIS à CB (Orénoque)	4,70 - 6,98	23 - 31	29 - 31				

4.4 Concentrations de MES *in situ* versus turbidité

Dans le bassin du Maroni à la station SH entre 2004 et 2016 (moyenne de MES : 22 mg.l^{-1}), les plus faibles valeurs de MES collectées *in situ* étaient de 2 mg.l^{-1} (décembre et novembre 2004, 2005 et 2015) et les plus fortes étaient de 79 et 138 mg.l^{-1} (en janvier 2015 et avril 2016). La turbidité équivalente aux plus basses et hautes valeurs est de 8 (2 mg.l^{-1}) et 148 NTU (**Tableau 4-5**).

Dans la colonne d'eau de la section SH, des valeurs de turbidité entre 8 et 300 NTU ont été mesurées avec la sonde EXO2 (**Annexe 6-7**). Une forte fluctuation en surface (aux quatre points entre la rive gauche et la rive droite), et de la surface vers la profondeur a été observée. Les valeurs les plus élevées étaient systématiquement mesurées en rive gauche en lien avec une influence anthropique à 50 km en amont, sur la fraction du bassin versant surinamaïse.

Enfin, à la station MPS en amont du bassin versant, des valeurs de turbidité en surface entre 7 et 320 NTU (n = 91) ont été observées par le PAG (moyenne : 30 NTU) correspondant pour les valeurs les plus élevées aux mois de février 2013, mai et juin 2014.

Dans le bassin de l'Oyapock à la station SM (moyenne : 9 mg.l^{-1}), les plus faibles valeurs de MES collectées étaient de 2 mg.l^{-1} (en décembre 2004, juillet et novembre 2009) et les

valeurs les plus élevées étaient de 22 mg.l⁻¹ (en novembre 2010) et 24 mg.l⁻¹ (en octobre et novembre 2016). Les turbidités correspondantes sont 3 et 26 NTU pour les valeurs les plus basses et les plus élevées. Par ailleurs, dans la colonne d'eau de la section SM, des valeurs de turbidité entre 6 et 20 NTU ont été mesurées avec la sonde EXO2 avec une tendance relativement homogène de la surface vers la profondeur (**Annexe 6-7**).

À la station CM en amont du bassin versant de l'Oyapock, des données de turbidité d'une plus grande portée (0,53 à 55 NTU : moyenne 11 NTU) que celles mesurées en aval à SM ont été collectées par le PAG (n = 36) entre octobre 2010 et 2012 au début de la montée des eaux.

Dans le bassin de l'Orénoque (**Tableau 4-5**), les MES collectées *in situ* ont varié à la station APU entre 54 mg.l⁻¹ en mars 2008 et 252 mg.l⁻¹ en juin 2008 (moyenne : 102 mg.l⁻¹), puis entre 49 mg.l⁻¹ en septembre 2007 et 291 mg.l⁻¹ en mai de la même année à la station CAU (moyenne : 101 mg.l⁻¹). A la station MUS les charges en suspension évoluaient entre 6 mg.l⁻¹ en avril 2008 et 365 mg.l⁻¹ en mai 2006 (moyenne : 107 mg.l⁻¹). A la station CB les MES ont varié entre 7 mg.l⁻¹ en février 2010 et 277 mg.l⁻¹ en mai 2016 (moyenne : 78 mg.l⁻¹). Les concentrations à la station CG étaient entre 2 en mars 2010 et 281 mg.l⁻¹ en mai 2006 (moyenne : 87 mg.l⁻¹). Enfin, sur la grille MODIS, les charges en suspension évoluaient entre 13 mg.l⁻¹ en août 2015 et 190 mg.l⁻¹ en mai 2014 (moyenne : 78 mg.l⁻¹). Pour toutes les stations, les valeurs les plus élevées ont été mesurées systématiquement durant la montée des eaux (mars-avril) ainsi que durant les hautes eaux (octobre-novembre). Les plus basses valeurs ont été relevées durant les hautes eaux (août-septembre) et les basses eaux (mars-avril).

Tableau 4-5 : Gammes de MES et de turbidités journalières mesurées *in situ* sur le Maroni, sur l'Oyapock et sur l'Orénoque entre 2004 et 2016.

Fleuve	Station	MES (mg.l ⁻¹) journalières	Turbidité (NTU) journalière	
		Gamme en surface	Gamme en surface	Dans la colonne d'eau
Période : 2004-2016				
Maroni	SH	2 - 138	8 - 148	8 - 300
	MPS		7 - 320	
Oyapock	SM	2 - 24	3 - 26	6 - 20
	CM		0,53 - 55	
Orénoque	MET	57		
	APU	54 - 252		
	CAU	49 - 291		
	MUS	6 - 365		
	CB	7 - 277		
	CG	2 - 281		
	Grille MODIS à CB	13 - 190		

4.5 Calibrations MES-Réflectance *in situ* et MES-Réflectance MODIS

Lorsque l'on considère la réflectance de l'eau de surface on se réfère essentiellement à la lumière réfléchiée par les charges particulaires et dissoutes en suspension et les molécules d'eau qui lui confèrent ainsi sa coloration. Nous avons vu que les eaux fluviales de l'Orénoque ont une gamme de MES plus élevée que celle du fleuve Maroni (gamme entre 2 et 365 mg.l⁻¹ contre 2 et 138 mg.l⁻¹) avec comme conséquence différentes signatures spectrales de l'eau fluviale. La **Figure 4-4** présente les courbes spectrales pour les fleuves Maroni, Oyapock et Orénoque pour une gamme de concentration variant entre 6 et 138 mg.l⁻¹ pour le Maroni, entre 4 et 9 mg.l⁻¹ pour l'Oyapock et enfin entre 36 et 136 mg.l⁻¹ pour l'Orénoque. Les mesures ont été réalisées avec deux appareils différents : TRiOS RAMSES pour le Maroni et l'Oyapock et FieldSpec RS3 pour l'Orénoque.

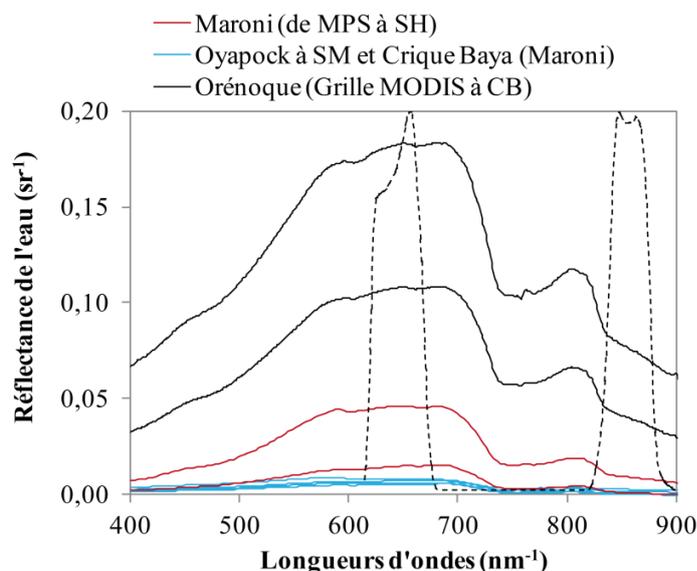


Figure 4-4. Réflectances minima et maxima *in situ* des eaux et localisation des bandes MODIS (points bleus) dans le rouge (620-670 nm) et l'infrarouge (841-867 nm) mesurées entre MPS et APT sur le Maroni (courbe rouge), sur l'Oyapock à SM ainsi que sur la crique Baya sur le Maroni (courbe bleu) et sur l'Orénoque sur la grille MODIS de CB (courbe noire).

Ainsi, sur le Maroni à la station SH, les valeurs de réflectance mesurées via les TRiOS-RAMSES ont été estimées entre 0.012 et 0.045 sr⁻¹ dans la bande rouge et entre 0.001 et 0.01 sr⁻¹ dans la bande infrarouge. Sur la crique Baya en aval de la station SH, les valeurs de réflectance étaient similaires à celles mesurées à SM sur l'Oyapock entre 0.006 et 0.008 sr⁻¹ respectivement dans la bande rouge et entre 0.001 et 0.003 sr⁻¹ respectivement dans la bande infrarouge. Sur la grille MODIS de l'Orénoque, en aval de la station CB, les valeurs de

réflectance mesurées via le FieldSpec ont varié entre 0.10 et 0.19 sr⁻¹ dans la bande rouge et entre 0.02 et 0.09 sr⁻¹ dans la bande infrarouge. Il existe donc un ratio de 5 entre la réflectance de l'eau à SH et celles mesurées dans les eaux à SM. Le même ratio est observé entre CB et SH pour des concentrations de matières similaires mettant ainsi en évidence soit des différences au niveau des appareils de mesures soit au niveau des charges et tailles des matières en suspension particulières et dissoutes de ces fleuves.

Les calibrations MES-Réflectance *in situ* et MES-Réflectance MODIS ont été réalisées pour les bandes rouge et infrarouge. Pour le Maroni, la calibration MES-Réflectance *in situ* a été réalisée avec les données de MES et de réflectance mesurées simultanément (**Figures 4-5**). La calibration MES-Réflectance MODIS a été réalisée avec les MES collectées par le SNO-HYBAM et la réflectance MODIS.

La **Figure 4-5** montre que pour le Maroni les calibrations MES-Réflectance *in situ* et MES-Réflectance MODIS sont linéaires pour les deux bandes ce qui confirme la donnée MODIS. Un biais de 8 % est estimé entre les deux calibrations dans la bande rouge et un biais supérieur est observé dans la bande infrarouge. Pour étendre la calibration à tout le cours du fleuve, nous avons choisi de conserver les valeurs dans la bande rouge de MES-Réflectance MODIS. L'erreur estimée entre les données MODIS et les données *in situ* est de 25 %.

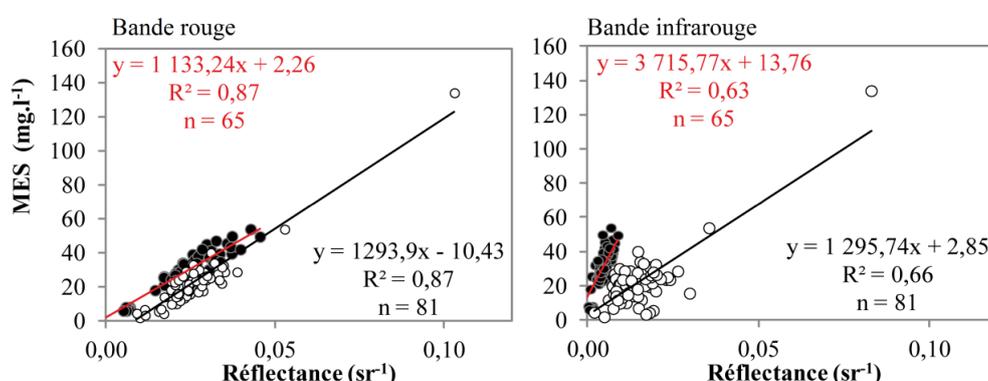


Figure 4-5. Calibrations MES-Réflectance *in situ* (points noirs) et MES-Réflectance MODIS (points blancs) sur le Maroni A) dans la bande rouge et, B) dans la bande infrarouge.

Pour l'Orénoque, la calibration MES-Réflectance *in situ* a été réalisée avec les données de MES et de réflectance mesurées sur la grille MODIS (**Figures 4-6 et 4-7**). Les calibrations MES-Réflectance MODIS ont été réalisées entre les MES collectées par le SNO-HYBAM et Mora *et al.* (2014) et avec la réflectance MODIS. Les eaux du Maroni qui ont une proportion plus faible de MES ont mieux réagi dans la bande rouge. Au contraire pour l'Orénoque, la

meilleure corrélation a été obtenue dans la bande infrarouge car les fortes charges en suspension saturent la bande rouge.

Les calibrations MES-Réflectance *in situ* sont linéaires pour les deux bandes, alors que les calibrations MES-Réflectance MODIS montrent une saturation autour de 0.15 sr⁻¹ dans la bande rouge qui n'existe pas dans la bande infrarouge (**Figure 4-6**). Par ailleurs, on observe un biais élevé entre les deux calibrations (*in situ* et MODIS) pour les deux bandes, mettant en évidence l'impossibilité d'utiliser la calibration MES-Réflectance *in situ* pour calculer les MES avec les images des capteurs MODIS. Nous avons donc choisi d'estimer les MES avec la calibration MES-Réflectance MODIS dans les infrarouges. Cette dernière ayant déjà démontré son efficacité dans d'autres études sur les eaux très chargées de l'Amazone (Espinoza Villar *et al.*, 2012a; Espinoza Villar *et al.*, 2012b. Mangiarroti *et al.*, 2013).

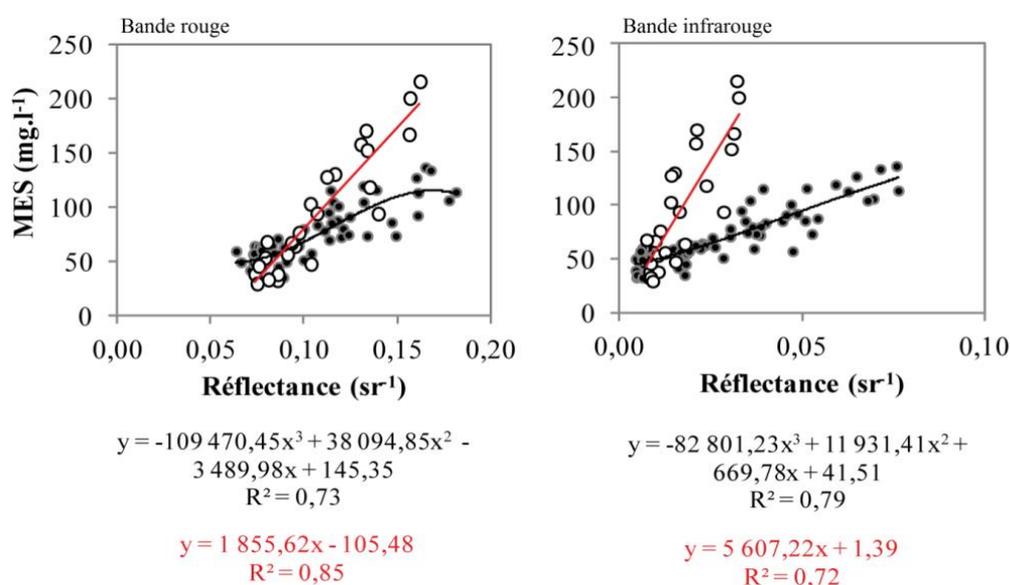


Figure 4-6. Calibrations MES-réflectance *in situ* (points noirs) des données collectées de réflectance et de MES sur la grille MODIS de Ciudad Bolivar et, calibrations MES-réflectance MODIS (points blancs et ligne rouge) réalisées avec la série temporelle de MES du SNO-HYBAM à Ciudad Bolivar : A) dans la bande rouge et B) dans la bande infrarouge.

Les équations correspondantes sont indiquées en dessous du graphique.

Comme pour le Maroni et l'Amazone, et afin d'étendre la calibration à tout le cours du fleuve entre la confluence de l'affluent du Meta avec l'Orénoque (Station MET) et la ville de Ciudad Guayana (Station CG) localisée à quelques kilomètres de l'estuaire, la calibration MES-Réflectance MODIS a été réalisée avec les données de MES collectées aux stations APU, CAU, MUS, CB et CG ainsi que la réflectance des pixels des capteurs MODIS (**Figure 4-7**) estimée selon la méthode de Martinez and Le Toan (2007) et Martinez *et al.* (2009). Comme sur

l'Amazone, pour diminuer le biais entre les MES *in situ* et les valeurs estimées, les données de MES et de réflectance ont été moyennées mensuellement (n = 183). L'erreur relative (RMSE) entre les moyennes mensuelles de MES *in situ* et estimées via MODIS est de 32% équivalente à 21 mg.l⁻¹.

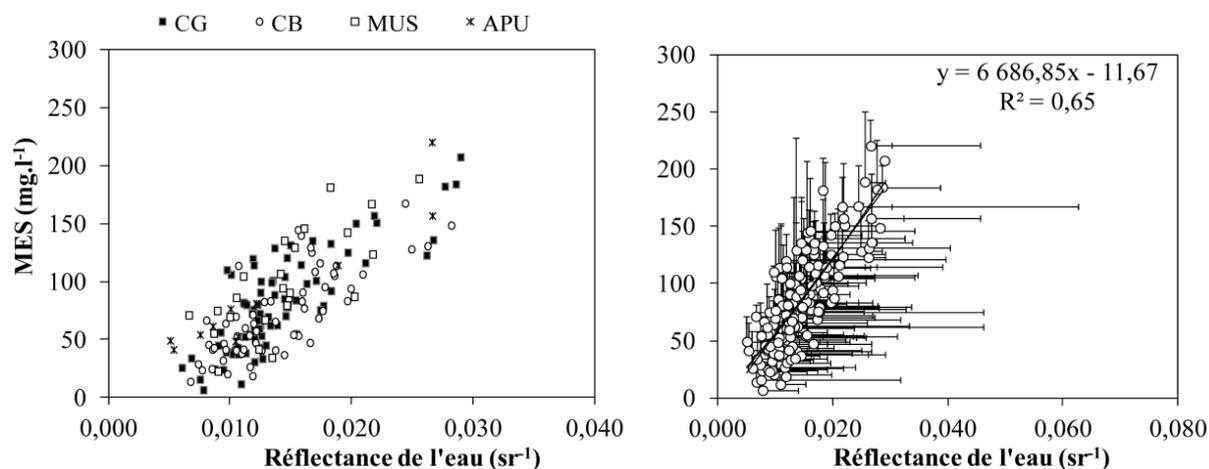


Figure 4-7. Corrélation MES-Réflectance MODIS dans la bande infrarouge, réalisée avec les séries temporelles de MES du SNO-HYBAM à Ciudad Guayana (Station CG), à Ciudad Bolivar (Station CB) et à Musinacio (Station MUS) et la série de MES de [Mora et al. \(2014\)](#) en amont de la confluence de la rivière Apure avec l'Orénoque (Station APU). Les barres représentent les écarts-types mensuels de MES et de réflectance.

4.6 Comparaison des MES *in situ* avec MES estimées via MODIS

Il existe une bonne similarité entre les valeurs de MES *in situ* et les valeurs de MES estimées via MODIS, et ce pour le Maroni et pour l'Orénoque (**Figure 4-8 et 4-9**). La **Figure 4-8** compare l'évolution des MES des fleuves Maroni à la station SH (**A**) et Oyapock à la station SM (**B**). Les tendances des débits correspondants sont également montrées pour les deux graphiques. A la station SH, la Figure compare les concentrations des MES journalières *in situ* avec celles obtenues via les images satellites. Au contraire, à la station SM, les données concernent des mesures de terrain.

Pour le Maroni à la station SH, la dispersion entre le jeu de données *in situ* et le jeu de données MODIS est de 25 %. Ce résultat valide une combinaison entre les deux jeux de données pour suivre l'évolution des concentrations et des flux dans la section.

Entre 2004 et 2015, les concentrations journalières *in situ* variaient entre 2 et 79 mg.l⁻¹ (moyenne : 25 mg.l⁻¹) pour une concentration avec MODIS entre 2000 et 2015 entre 3 et 84 mg

l^{-1} (moyenne : 22 mg.l^{-1}). Les valeurs maximales avec MODIS pour la période 2000-2015 étaient estimées en début de crue et durant la montée des eaux, en janvier ($84 \text{ et } 73 \text{ mg.l}^{-1}$) et février 2015 (76 mg.l^{-1}). Les plus basses valeurs ont été mesurées en octobre 2002 ($2,6 \text{ mg.l}^{-1}$) et 2009 ($1,9 \text{ mg.l}^{-1}$), novembre et décembre 2004 ($2,7 \text{ mg.l}^{-1}$) et novembre 2005 ($2,7 \text{ mg.l}^{-1}$).

Pour l'Oyapock à la station SM, la valeur maximale *in situ* de MES enregistrée était de 22 mg.l^{-1} (janvier 2010) tandis que la valeur minimale était de 2 mg.l^{-1} (décembre 2004 et 2009) pour une valeur moyenne de $9,4 \text{ mg.l}^{-1}$.

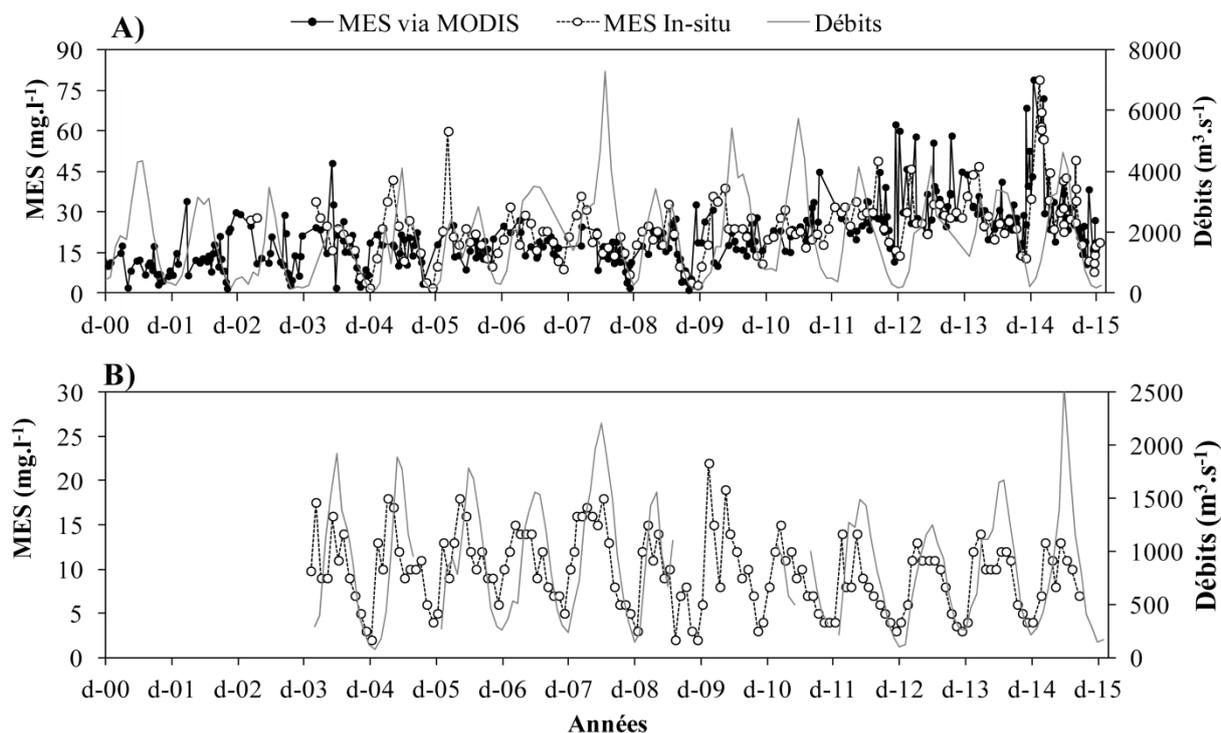


Figure 4-8. Comparaison des concentrations mensuelles de MES *in situ* (points blancs) avec celles obtenues via les satellites (lignes noires) : A) à SH sur le Maroni ainsi que, B) à SM sur l'Oyapock, pour la période 2000-2015. Les lignes en pointillés représentent les débits moyens mensuels aux stations principales de références.

Pour réduire l'erreur entre les données de MES *in situ* et les valeurs estimées via MODIS à la station SH ainsi que pour augmenter le nombre de données, les jeux de données ont été combinés. Une augmentation des MES s'est fait ressentir sur les valeurs moyennes, maxima et minima du Maroni pour la période 2000 à 2015 (**Figure 4-9**). Le **Tableau 4-6** résume l'évolution des concentrations moyennes, minima et maxima de MES estimées via les images des capteurs MODIS à l'échelle des 8 stations virtuelles réparties dans le bassin versant du Maroni et pour toute la période 2000-2015. Ce tableau ne prend pas en compte l'année 2016, qui a vu sa charge sédimentaire passer à 138 mg.l^{-1} en avril au SH.

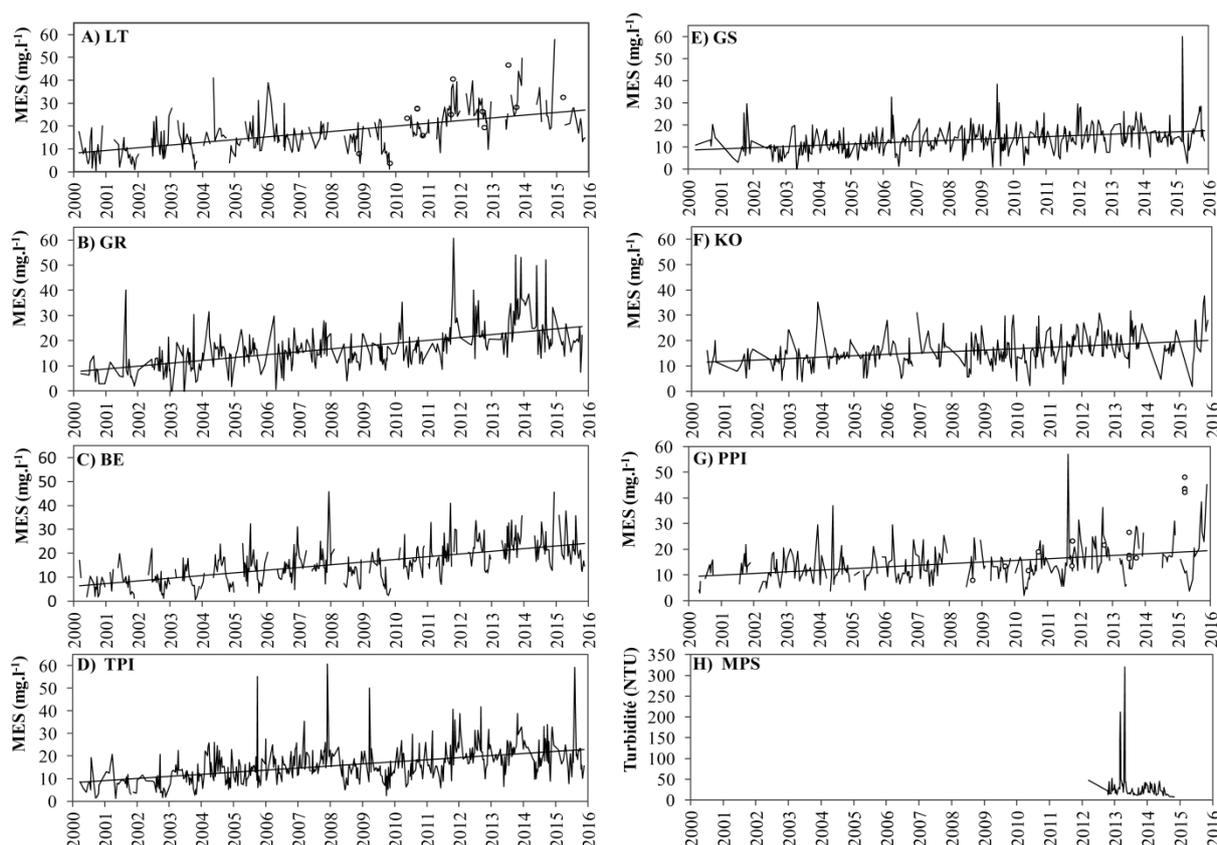


Figure 4-9. Evolution des MES (mg.l⁻¹) estimées via MODIS (lignes noires) aux sept stations virtuelles en amont de SH soit : A) LT, B) GR, C) BE, D) TPI, E) GS, F) KO, G) PPI pour la période 2000-2015.

Le bas Maroni est celui qui a vu le plus ses charges en suspensions augmenter : la moyenne annuelle a augmenté de 227 % entre la valeur estimée en 2001 et celle de 2015 à la station KO, contre + 343 % à la station LT entre 2001 et 2013, + 314 % à la station GR entre 2000 et 2013, + 229 % à la station TPI entre 2000 et 2012.

Les valeurs maximales annuelles ont augmenté de + 124 % de 2001 à 2015 à la station KO, contre + 445 % à GS de 2002 à 2015 et + 336 % à la station GR entre 2000 et 2011.

Les charges minimales annuelles ont augmenté d'environ + 408 % à TPI de 2001 à 2013, contre + 341 % à PPI entre 2000 et 2014.

A la station SH, les valeurs moyennes annuelles de MES entre 2000 et 2009 variaient de 11 à 21 mg.l⁻¹. Par la suite, elles ont augmenté de 23 à 36 mg.l⁻¹ soit + 227 % entre 2001 et 2013. La valeur de MES annuelle maximale a enregistré une forte augmentation de 64 mg.l⁻¹ (+ 335 %) de 2001 à 2015. La valeur minimale de MES a montré une forte altération avec une augmentation de 22 mg.l⁻¹ (+ 1147 %) de 2009 à 2013.

Enfin, comme observé dans le **paragraphe 4.4.** des valeurs *in situ* de 320 NTU ont été mesurées à MPS mettant en évidence une diminution de la charge sédimentaire en suspension d'amont en aval.

Tableau 4-6 : Evolution des estimations des concentrations moyennes, minima et maxima de MES (mg.l⁻¹) collectées sur le Maroni aux 8 stations virtuelles MODIS d'amont vers l'aval et pour la période 2000-2015.

Stations	Moyenne (mg.l ⁻¹)	Maxima (mg.l ⁻¹)	Minima (mg.l ⁻¹)	Moyenne du nombre de données par an
PPI	10 (2000)	16 (2000)	2,9 (2000)	18
	23 (2015)	57 (2011)	12,8 (2014)	
KO	12 (2001)	17 (2001)	2,3 (2010)	19
	22 (2015)	38 (2015)	13,7 (2012)	
GS	8 (2002)	11 (2002)	2,0 (2001)	23
	19 (2015)	60 (2015)	9,0 (2013)	
TPI	7 (2000)	19 (2000)	2,3 (2009)	30
	23 (2012)	61 (2007)	11,7 (2007)	
BE	7 (2000)	17 (2000)	2,4 (2009)	23
	26 (2013)	46 (2014)	16,0 (2013)	
GR	7 (2000)	14 (2000)	3,0 (2000)	23
	29 (2013)	61 (2011)	13,0 (2013)	
LT	7 (2001)	15 (2001)	3,0 (2003)	17
	31 (2013)	60 (2014)	19,0 (2014)	
SH	11 (2001)	19 (2001)	1,95 (2009)	30
	36 (2013)	84 (2015)	23,73 (2013)	

Sur l'Oyapock à la station SM de 2004 à 2015, une baisse de -17 % (1,6 mg.l⁻¹) pour les valeurs de MES moyennes annuelles a été enregistrée, de -26 % (4,6 mg.l⁻¹) pour les valeurs maximales et sans différence pour le minimum. De 2008 à 2015, une diminution de - 33% (3,9 mg.l⁻¹), -28 % (5,0 mg.l⁻¹) et -33 % (1,0 mg.l⁻¹) a été calculée pour la moyenne, le maximum et les valeurs minimales. Par ailleurs, comme observé dans le **paragraphe 4.4.** des valeurs *in situ* de 55 NTU ont été mesurées à CM mettant en évidence une diminution de la charge sédimentaire en suspension d'amont en aval de ce fleuve.

Pour l'Orénoque, de l'amont à l'aval (**Figure 4-10 et Tableau 4-7**) la dispersion moyenne entre le jeu de données *in situ* et le jeu de données MODIS est de 32 %. Contrairement aux données journalières du Maroni et de l'Oyapock, la **figure 4-10** compare l'évolution mensuelle des MES mesurées *in situ* et par télédétection avec MODIS et ce depuis 2000. Le **Tableau 4-7** résume l'évolution des concentrations moyennes, minima et maxima de MES

estimées via les images des capteurs MODIS à l'échelle des 6 stations virtuelles réparties dans le bassin versant de l'Orénoque et pour toute la période 2000-2015.

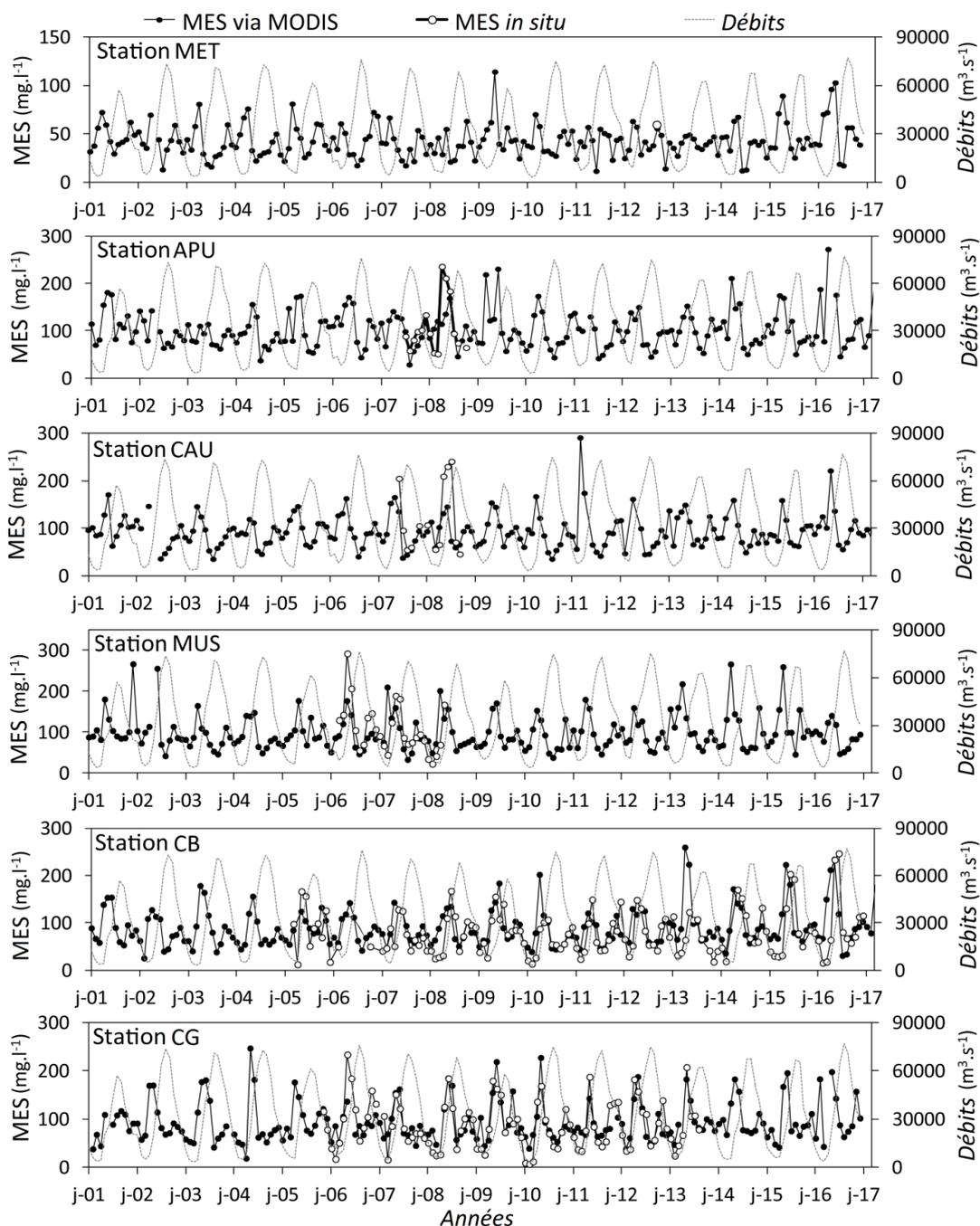


Figure 4-10. Comparaison du débit moyen mensuel (tirets gris) à Ciudad Bolivar avec les concentrations mensuelles de MES (en mg.l^{-1}) *in situ* (points blancs) avec celles obtenues via les satellites (points noirs) sur le cours de l'Orénoque : A) en amont de la confluence Meta/Orénoque (Station MET), B) en amont de la confluence Apure/Orénoque (Station APU), C) en amont de la confluence Caura/Orénoque (Station CAU), D) à Musinacio (Station MUS), D) à Ciudad Bolivar (Station CB) et E) à Ciudad Guayana (Station CG), pour la période 2001-2016.

A la station MET en amont de la rivière Meta les concentrations moyennes mensuelles ont varié de 11 à 114 mg.l⁻¹ (moyenne : 42 mg.l⁻¹). Une concentration journalière similaire à la moyenne mensuelle (57 et 60 mg.l⁻¹) est estimée sur le terrain en 2012.

A la station APU en aval de la rivière Meta, les concentrations moyennes mensuelles ont évolué entre 28 et 272 mg.l⁻¹ (moyenne : 101 mg.l⁻¹) pour l'ensemble des données MODIS et de 52 à 236 mg.l⁻¹ (moyenne : 103 mg.l⁻¹) pour l'ensemble de données collectées sur le terrain (RSD moyen de 11 %).

A la station CAU en aval de la rivière Apure, les concentrations moyennes mensuelles MODIS se situaient entre 35 et 290 mg.l⁻¹ (moyenne : 94 mg.l⁻¹) contre 46 à 251 mg.l⁻¹ (moyenne : 101 mg.l⁻¹) sur l'ensemble des données in situ (RSD moyen de 1%).

A la station MUS en aval de la rivière Caura, les concentrations moyennes mensuelles étaient comprises entre 32 et 269 mg.l⁻¹ (moyenne : 99 mg.l⁻¹) avec les données MODIS et entre 23 et 292 mg.l⁻¹ (moyenne de 108 mg.l⁻¹) pour les données in situ (RSD moyen de 15%).

184 km en aval de la station de CAU à la station CB, les concentrations moyennes mensuelles variaient entre 25 et 259 mg.l⁻¹ (moyenne : 90 mg.l⁻¹) pour les données in situ et entre 13 et 247 mg.l⁻¹ (moyenne : 79 mg.l⁻¹) avec les données MODIS (RSD de 46% pour toutes les données et de 27% sans les données 2015 et 2016).

Enfin, à la station CG, les données sur le terrain (7 à 234 mg.l⁻¹, moyenne : 88 mg.l⁻¹) étaient semblables à celles de l'estimation MODIS (18 à 246 mg.l⁻¹, moyenne : 92 mg.l⁻¹) RSD moyen de 22 %.

Tableau 4-7 : Comparaison de l'évolution des estimations, des concentrations moyennes mensuelles de MES (mg.l⁻¹) *in situ* et MODIS, collectées sur l'Orénoque aux 6 stations virtuelles MODIS d'amont vers l'aval.

Stations	MES <i>in situ</i> mensuelles	Moyenne (mg.l ⁻¹)	MES MODIS mensuelles	Moyenne (mg.l ⁻¹)
MET			11 - 114	42
APU	52 - 236	103	28 - 272	101
CAU	46 - 251	101	35 - 290	94
MUS	23 - 292	108	32 - 269	99
CB	25 - 259	90	13 - 247	79
CG	7 - 234	88	18 - 246	92

4.7 Tendances des MES et points de ruptures dans les chroniques

Aux 8 stations virtuelles créées sur le Maroni une tendance significative ($p \leq 0,05$) croissante des concentrations de matières en suspension a été observée pour la période 2000-2015 avec le test statistique de Mann-Kendall, largement utilisé pour évaluer les tendances à long terme. Le changement le plus élevé dans le bassin versant, a été mesuré sur le bas Maroni aux stations BE ($\tau = 0,46$), LT ($\tau = 0,44$), GR ($\tau = 0,43$), SH ($\tau = 0,40$) et TPI ($\tau = 0,39$). Sur le moyen Maroni, la tendance générale à l'augmentation τ était plus petite aux stations KO (0,29), GS (0,29) et PPI (0,25).

La détection de ruptures a montré une cassure très significative entre novembre 2009 et août 2010 pour toutes les banques de données, à l'exception des stations TPI et GS qui ont présenté un changement significatif en novembre 2005 et août 2007 respectivement.

Au Saut Maripa sur l'Oyapock une tendance τ significative ($p \leq 0,05$) générale à la baisse ($\tau = - 0,18$) a été observée avec un point de cassure en juillet 2008.

4.8 Phénomènes d'hystérésis

Pour les trois fleuves, la forme de l'hystérésis MES-Q traduit des variations de concentrations dans le sens horaire avec différentes dynamiques au cours de l'année et au cours des crues.

A SH sur le Maroni, la forte variabilité des charges de MES pour les années complètes de débits et de MES mesurées entre 2001 et 2015 via les données *in situ* et MODIS implique des formes différentes de l'hystérésis en fonction des années (**Annexe 6-8 A**). Par exemple pour l'année 2008 (crue centenaire), les concentrations de MES augmentent en début de crue (février - mars), diminuent avec les hautes eaux (mars à mai), restent relativement homogènes jusqu'en octobre (**Figure 4-11 A**) et enfin diminuent à nouveau avec l'étiage (novembre - décembre). En 2015, les charges sédimentaires sont très élevées (environ 84 mg.l^{-1}) en début de crue (février-mars) et diminuent tout au long de l'année jusqu'en décembre et cela sans relation avec les débits. Ce phénomène met en évidence qu'aux premières pluies et jusqu'en mars les particules fines déposées sur les bords de berges et dans le lit du fleuve sont transportées massivement. Durant les hautes eaux, les précipitations diminuent, les particules disponibles sur les bords de berges ont déjà été remobilisées et sont moins nombreuses. Lors

de la baisse des eaux, les précipitations sont très faibles et le fleuve n'a pas suffisamment d'énergie pour remobiliser les sédiments.

A SM sur l'Oyapock, les phénomènes d'hystérésis observés pour les années complètes de débits et de MES entre 2004 et 2015 désignent des formes semblables de looping (**Annexe 6-8 B**). Les concentrations de MES sont plus élevées durant la montée des eaux avec cependant des concentrations similaires (février à mai) puis diminuent légèrement jusque durant les basses eaux en octobre -novembre (**Figure 4-11 B**). Aucun changement dans les formes d'hystérésis n'est observé pour ce fleuve entre 2004 et 2015. Les particules en suspension augmentent avec les précipitations et les débits puis diminuent lorsque les eaux sont hautes pour rester stables avec des valeurs très faibles jusqu'en étiage.

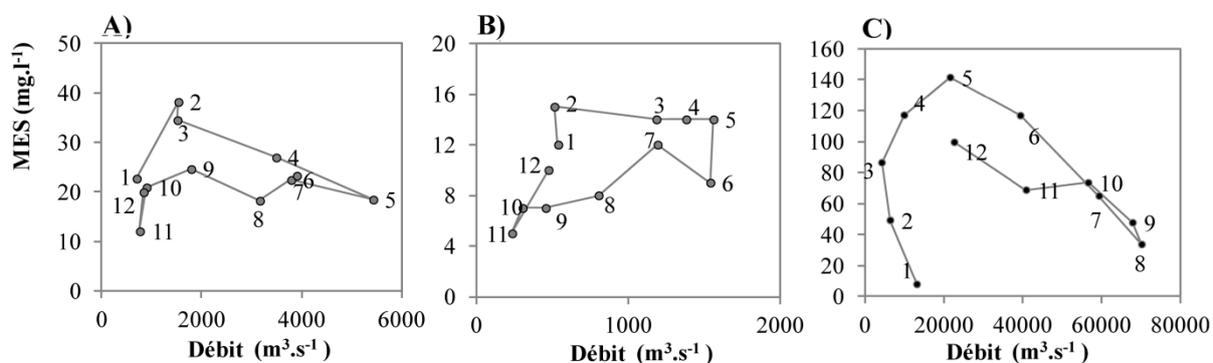


Figure 4-11. Hystérésis des charges sédimentaires avec les débits : A) sur le Maroni au SH en 2008, B) sur l'Oyapock au SM en 2007 et C) sur l'Orénoque à CB en 2010.

Le phénomène d'hystérésis de l'Orénoque à CB est bien distinct de ceux du Maroni et de l'Oyapock. Pour toutes les années étudiées avec les données *in situ* et MODIS, il a la forme d'une cloche (**Annexe 6-8 C et Figure 4-11 C**). Le régime hydro-sédimentaire de l'Orénoque a deux maxima de MES annuels durant la montée (mai - juin) et la descente des eaux (octobre - novembre), ainsi que deux minima de concentrations de MES annuels durant les hautes (août - septembre) et les basses eaux (janvier - février). Ce phénomène forme un looping et dénonce l'absence de relation entre les débits et les charges sédimentaires. En avril-mai durant la montée des eaux, les berges s'érodent et les tributaires Andins se déchargent dans l'Orénoque plus faiblement chargée, c'est le premier pic sédimentaire. Durant les hautes eaux, les sédiments sont piégés et dispersés dans les plaines alluviales, les concentrations de MES dans l'Orénoque sont plus faibles. A la descente des eaux le deuxième pic sédimentaire a lieu. Le fleuve Orénoque baisse entre 8 et 16 m selon les sections et les berges des tributaires Andins sont instables et s'érodent. Les sédiments des plaines alluviales sont également remobilisés. Enfin, durant l'étiage la baisse de particules en suspension est liée à une baisse des concentrations sur

les berges et le lit fluvial ainsi qu'à une diminution de l'énergie du fleuve pour transporter les sédiments.

4.9 Flux de MES, transport solide et écoulement spécifiques

La **Figure 4-12** montre la représentativité du point de collecte de l'observatoire SNO-HYBAM aux sections SH sur le Maroni, SM sur l'Oyapock et CB sur l'Orénoque. On observe que les points de l'observatoire sont représentatifs de la moyenne mesurée aux 16 points de collectes du jaugeage solide de la section SH ($R^2 = 0,95$; $n = 25$), aux 9 points de collectes du jaugeage solide de la section SM ($R^2 = 0,84$; $n = 4$) et aux 9 points de collectes du jaugeage solide de la section CB ($R^2 = 0,93$; $n = 9$).

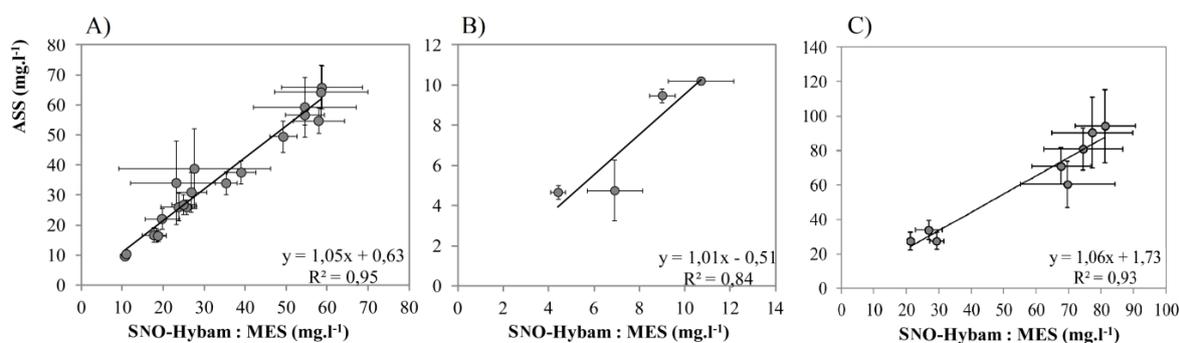


Figure 4-12. Corrélation entre les MES en surface mesurées au point SNO-HYBAM (en abscisses), avec la moyenne des valeurs mesurées dans la colonne d'eau (ASS en ordonnées) : A) sur le Maroni au SH entre 2014 et 2015, B) sur l'Oyapock au SM entre 2014 et 2015, C) sur l'Orénoque à CB entre 2009 et 2015. Les barres représentent les valeurs des écarts-types mesurés en surface et en profondeur.

Aussi, après une correction des concentrations des jeux de données combinés MES-MODIS et MES-*in situ* des stations SH sur le Maroni (période complète de débits et de MES : 2000-2015) et SM sur l'Oyapock (période complète de débits et de MES : 2004-2015) ainsi que sur le jeu de données MES-*in situ* de la station CB sur l'Orénoque (période complète de débits et de MES : 2000-2016) nous avons obtenu les flux de MES suivants (**Figure 4-13**) :

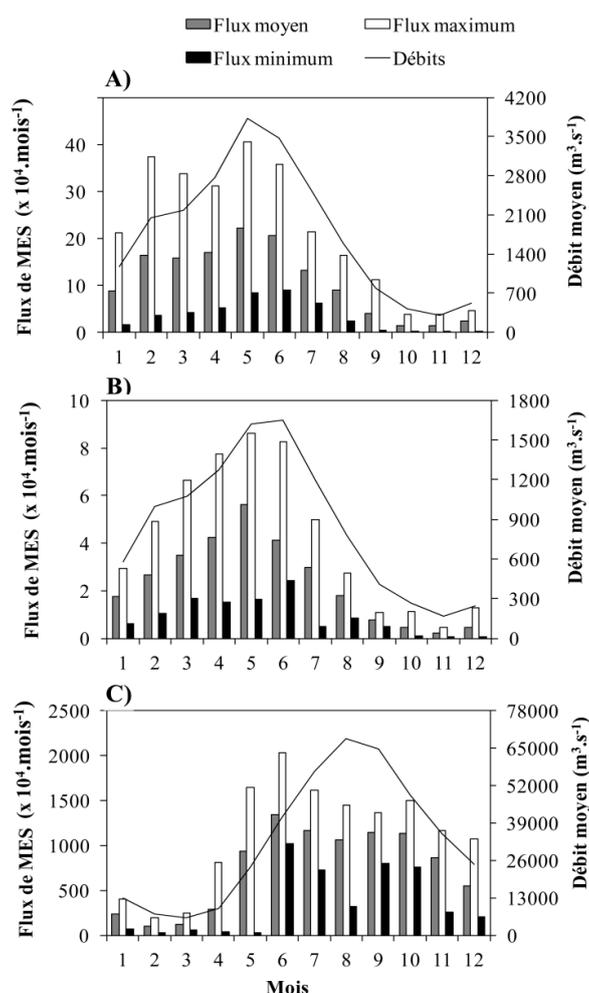


Figure 4-13. Flux de MES mensuels moyens, minima et maxima (histogrammes) en fonction des débits (courbe noire) : A) du Maroni au SH, B) de l'Oyapock au SM, C) de l'Orénoque à CB.

A la station SH (**A**) : le flux moyen de MES est plus élevé durant les hautes eaux (mai à septembre) sur le Maroni (54 %) puis diminue fortement durant les basses eaux (2 %) et augmente à nouveau durant la montée des eaux de décembre à avril (44 %). Deux pics de flux moyens mensuels sont observés, le premier au début de la montée des eaux ($16 \times 10^4 \text{ t.mois}^{-1}$) et le second au pic de crue ($22 \times 10^4 \text{ t.mois}^{-1}$). Le flux minimum mensuel mesuré est de $1 \times 10^4 \text{ t.mois}^{-1}$ durant l'étiage en octobre-novembre, pour un flux maximum mensuel de $41 \times 10^4 \text{ t.mois}^{-1}$ durant les hautes eaux. Le flux moyen annuel est estimé à $1\,300 \times 10^3 \text{ t.an}^{-1}$.

A la station SM (**B**) : les flux de MES suivent le débit avec une fréquence de 2 % durant les basses eaux (octobre-novembre), 46 % durant la montée des eaux (décembre à avril) et de 52 % lors des hautes eaux (mai à septembre). Le flux moyen mensuel est de $24 \times 10^3 \text{ t.mois}^{-1}$ pour un flux annuel moyen de $286 \times 10^3 \text{ t.mois}^{-1}$ et maximum de $508 \times 10^3 \text{ t.mois}^{-1}$. Le flux

mensuel minimum mesuré était de $0,6 \times 10^3 \text{ t.mois}^{-1}$ durant les basses eaux en novembre-décembre. La valeur maximum était de $87 \times 10^3 \text{ t.mois}^{-1}$ lors des hautes eaux en mai-juin.

A la station CB (**C**) : 56 % du flux de MES moyen de l'Orénoque est transporté durant les hautes eaux (avril à août), 40 % durant la baisse des eaux (septembre à décembre) et 4 % durant les basses eaux de janvier à mars. Le flux moyen mensuel était de $745 \times 10^4 \text{ t.mois}^{-1}$ pour une valeur maximale moyenne de $1\,345 \times 10^4 \text{ t.mois}^{-1}$ en juin durant la montée des eaux. Les flux moyens annuels varient entre 95 et $1345 \times 10^4 \text{ t.an}^{-1}$. Un flux minimum mensuel ($288 \times 10^4 \text{ t.mois}^{-1}$) a été enregistré durant les basses eaux en février et une valeur maximale de $2032 \times 10^4 \text{ t.mois}^{-1}$ a eu lieu en juin durant la montée des eaux.

Les flux annuels varient entre 211 et $477 \times 10^3 \text{ t.an}^{-1}$ au Saut Maripa, entre 530 et $2\,509 \times 10^3 \text{ t.an}^{-1}$ et 103 Mt.an^{-1} à Ciudad Bolivar. Ils ont ensuite été rapportés à la taille du bassin versant. Les flux spécifiques et spécifiques cumulés ont montré les tendances suivantes (**Figure 4-14**) :

A la station SH (**A**) : le transport solide spécifique estimé était entre 9 et $41 \text{ t.km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (moyenne : $22 \text{ t.km}^{-2} \text{ an}^{-1}$) pour un écoulement spécifique de 16 à $43 \text{ l.s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ (moyenne : $31 \text{ l.s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Le graphique des doubles masses cumulatives a mis en évidence un début d'augmentation des charges après 2003 et une intensification de la tendance après 2009.

A la station SM (**B**) : le transport solide spécifique a évolué entre 8 et $19 \text{ t.km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (moyenne : $12 \text{ t.km}^{-2} \text{ an}^{-1}$) pour un écoulement spécifique entre 28 et $44 \text{ l.s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ (moyenne : $35 \text{ l.s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Le graphique des doubles masses cumulatives montre une tendance à la baisse après 2008.

A la station CB (**C**) : le transport solide spécifique a varié entre 91 à $125 \text{ t.km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (moyenne : $109 \text{ t.km}^{-2} \text{ an}^{-1}$) et pour un écoulement spécifique allant de 31 à $47 \text{ l.s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Le graphique des doubles masses cumulatives a fourni des preuves évidentes que les tendances d'érosion et d'écoulement ont été similaires depuis 2001.

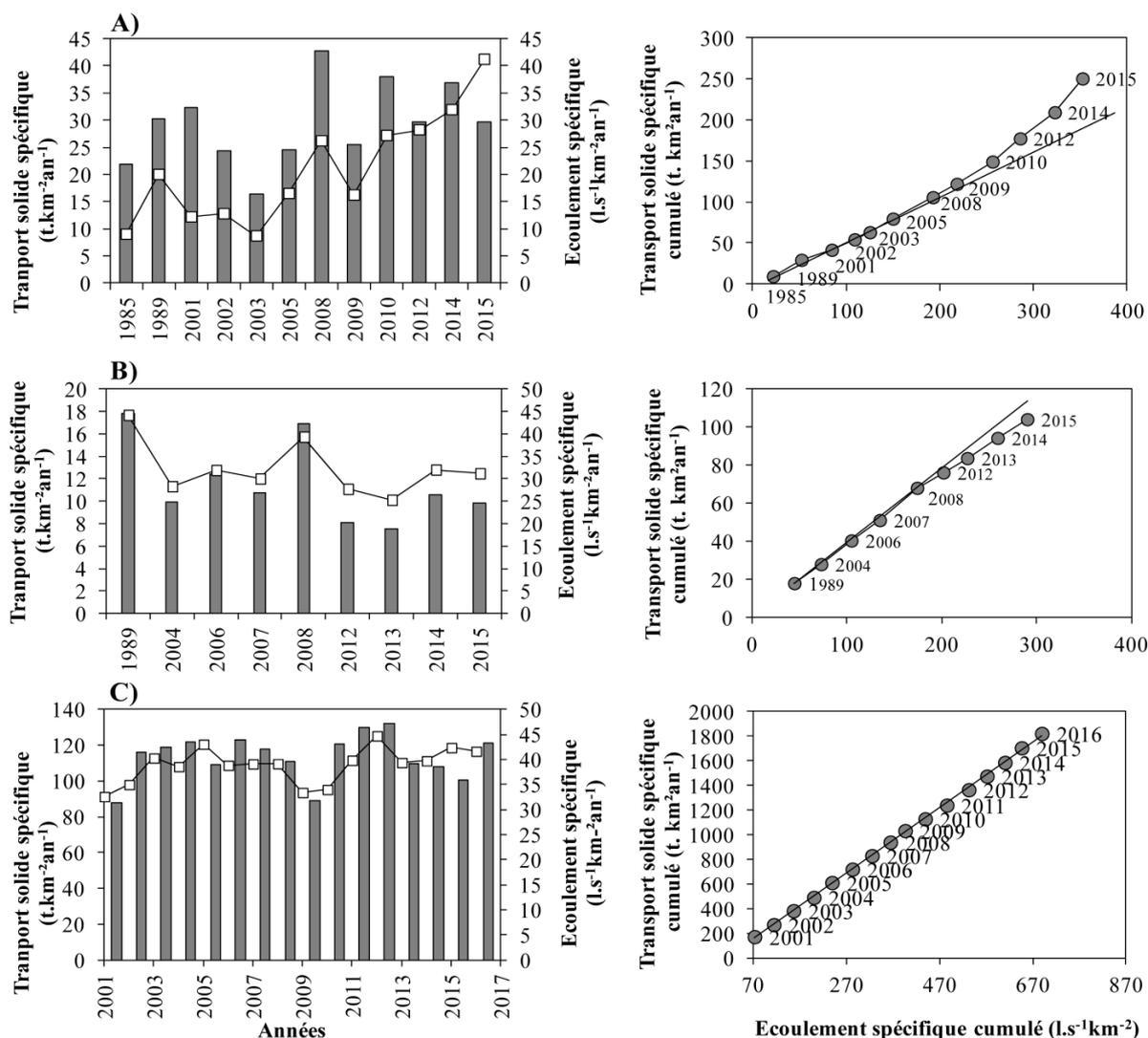


Figure 4-14. A gauche : tendance du transport solide spécifique (carrés blancs) et de l'écoulement fluvial spécifique (barres grises), à droite : doubles masses cumulatives relatives à chaque station : A) entre 1985 et 2015 à SH pour le Maroni, B) de 1989 et 2015 à SM pour l'Oyapock, C) entre 2001 et 2014 à CB pour l'Orénoque.

4.10 Variables explicatives ou prédictives des MES et du transport solide spécifique

Nous avons obtenu une corrélation significative ($p \leq 0,05$) entre le transport solide spécifique (S_y) à SH sur le Maroni et les précipitations annuelles à MPS ($r = 0,61$) et à PPI ($r = 0,57$) (**Tableau 4-8**). Une plus faible relation a été trouvée avec les débits maxima annuels ($r = 0,50$). Au contraire à SM sur l'Oyapock, moins impacté par les activités humaines, le transport solide spécifique annuel était en parfaite liaison avec l'écoulement fluvial spécifique annuel ($r = 0,82$).

Concernant les concentrations de MES moyennes et maximales, la meilleure relation a également été établie avec les précipitations dans le bassin du Maroni (respectivement $r = 0,53$ avec MPS et $r = 0,52$ avec PPI) et les valeurs minimales étaient significativement corrélées avec les débits minima ($r = 0,52$). Contrairement au Maroni, les concentrations moyennes et maximales de MES à SM sur l'Oyapock ont montré une corrélation significative avec l'écoulement annuel spécifique ($r = 0,61$ et $r = 0,49$ respectivement). Les valeurs minimales étaient bien expliquées par le débit minimum ($r = 0,80$) et le ratio débit maximum/débit minimum ($r = 0,68$).

Tableau 4-8 : Matrice des corrélations de Spearman dans les bassins versants A) du Maroni et B) de l'Oyapock : transport solide spécifique (Sy), Matières en Suspension (MES) moyenne, maxima et minima annuelles, débit maximum annuel (Q_{max}), débit minimum annuel (Q_{min}), débit moyen annuel divisé par le débit maximum annuel (Q_{pk}), écoulement spécifique annuel moyen (R), précipitations moyennes annuelles (P) pour toutes les stations (APT, GS, PPI, MPS dans le bassin du Maroni ; SM et CM dans le bassin de l'Oyapock).

A) Maroni

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

B) Oyapock

Variables	S_y	MES _{SM} (moyenne)	MES _{SM} (max)	MES _{SM} (min)	Q_{max}	Q_{min}	Q_{pk}	R	P _{SM}	P _{CM}
MES _{SM} (mean)	0,88									
MES _{SM} (max)	0,77	0,85								
MES _{SM} (min)	0,28	0,46	0,25							
Q_{max}	0,46	0,22	0,27	-0,54						
Q_{min}	0,06	0,33	0,10	0,80	-0,52					
Q_{pk}	-0,28	-0,02	-0,16	0,68	-0,94	0,72				
R	0,82	0,61	0,49	0,03	0,72	-0,11	-0,53			
P _{SM}	0,07	0,12	0,47	-0,32	0,24	-0,17	-0,17	-0,01		
P _{CM}	0,47	0,37	0,20	0,18	0,40	0,11	-0,14	0,66	0,14	
P	0,19	0,27	0,48	-0,03	0,13	0,14	0,04	0,07	0,90	0,39

Dans le bassin versant du Maroni, la comparaison entre l'évolution annuelle du transport solide spécifique et l'évolution annuelle des surfaces exploitées par les zones minières présente une relation très significative ($R^2 = 0,97$; $p < 0,0001$), en comparaison à celle de l'utilisation des terres par les zones urbaines et agricoles (**Figure 4-15**). Elle témoigne de l'impact que peut avoir un changement d'occupation des sols, plus spécifiquement par des activités d'extraction d'or. En 2014, l'occupation totale des terres (surfaces minières, agricoles et urbaines) représentait 0,52 % minières de la surface totale du bassin versant dont 0,37 % concernent les surfaces minières. Les surfaces minières et le transport solide spécifique ont augmenté ainsi depuis 2000 de 400 %.

Au contraire, dans le bassin versant de l'Oyapock, la comparaison entre l'évolution annuelle du transport solide spécifique avec l'évolution des surfaces utilisées par les mines ou utilisées par l'agriculture ou l'urbanisation n'a pas montré de tendances similaires. Il n'y a donc pas de lien entre la diminution du transport solide spécifique et les activités humaines dans ce bassin versant. En 2014, l'occupation totale des terres (surfaces minières, agricoles et urbaines) représentait 0,06 % de la surface totale du bassin versant.

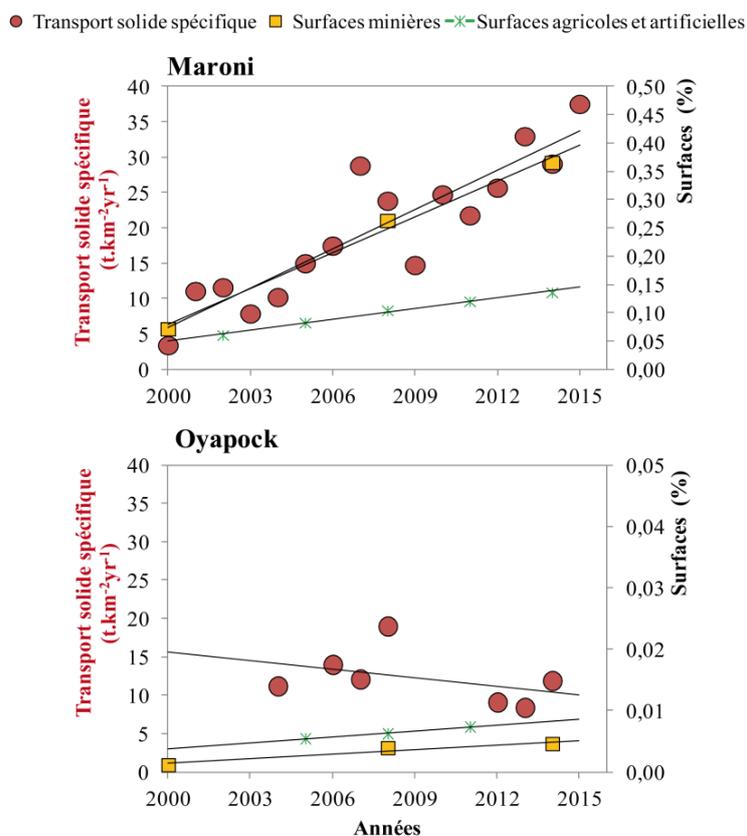


Figure 4-15. Comparaison de l'augmentation du transport solide spécifique annuel avec les surfaces minières, urbaines et agricoles des principaux villages du bassin versant du Maroni et

de l'Oyapock. Les zones sont exprimées en pourcentage par rapport à la superficie totale du bassin versant.

4.11 Concentrations en COD, COP, NOP et Chl-a

Les charges de COD, COP, NOP et Chl-a ont été estimées sur le Maroni à SH et sur l'Oyapock à SM, pour détecter de potentielles pollutions en lien avec le développement des mines et la déforestation, et pour deux années consécutives entre octobre 2014 et octobre 2016.

Les concentrations COD et de COP à SH, pour les quatre points collectés en surface (RD, M1, M2, RG) ont varié de 2,12 à 14,40 mgC.l⁻¹ (2,2 à 11,34 mgC.l⁻¹ pour le point de SNO-HYBAM) et entre 0,45 et 5,50 mgC.l⁻¹ (0,45 à 4,56 mgC.l⁻¹ pour le point de SNO-HYBAM) respectivement. A SM sur l'Oyapock, les concentrations de COD et de COP étaient légèrement plus basses respectivement entre 2,69 et 8,88 mgC.l⁻¹ et entre 0,68 et 3,16 mgC.l⁻¹. Les fortes valeurs ont été mesurées durant les hautes eaux pour les deux fleuves. D'autre part, les valeurs de carbone totales évoluaient entre 1,97 à 17,96 mg.l⁻¹ à SH (3,66 à 13,10 mgC.l⁻¹ pour le point de SNO-HYBAM) et entre de 3,38 à 12,03 mg.l⁻¹ à SM. 75 % du COT dans le fleuve Maroni était dissous, pour environ 80 % dans l'Oyapock. Enfin, sur l'ensemble des données, le pourcentage de teneur en COP dans les MES avait une plus grande variabilité pour l'Oyapock (8,5 à 30,5 %) que pour le Maroni (1,96 à 19,29 %) car la charge totale de MES sur l'Oyapock est plus faible.

La concentration de NOP à SM sur l'Oyapock était entre 0,12 et 0,36 mgN.l⁻¹ et entre 0,09 et 0,76 mgN.l⁻¹ (0,10 à 0,73 mgN.l⁻¹ pour le point de SNO-HYBAM) à SH sur le Maroni. Tout comme pour le COD et le COP, les concentrations de NOP étaient plus élevées durant la montée et les hautes eaux.

Enfin, la concentration de Chl-a dans les eaux était entre 0,07 et 7,39 µg.l⁻¹ pour les quatre points collectés en surface (RD, M1, M2, RG) à SH sur le Maroni (0,15 à 4,99 µg.l⁻¹ pour le point de SNO-HYBAM) et entre 0,07 et 3,51 µg.l⁻¹ à SM sur l'Oyapock. En supposant que la Chl-a constitue environ 1,5 % du poids sec de la matière organique totale (Keeley, 1990), le poids sec attendu de la biomasse d'algues serait d'environ 67 fois la quantité de Chl-a durant les eaux basses (soit entre 0,107 et 0,23 mg.l⁻¹), ce qui représente entre 13 % à 33 % du COP pour le fleuve Maroni à SH et entre 12 % à 34 % pour l'Oyapock à SM. Les valeurs au point de collecte du SNO-HYBAM sont résumées dans le **Tableau 4-9**.

Les rapports C/N ont été évalués entre 3,70 et 11,64 à SH sur le Maroni (moyenne : 6,50) et entre 2,88 et 11,46 à SM sur l'Oyapock (moyenne : 6,42), alors que les rapports C/Chl-a étaient entre 198 et 13 051 pour le Maroni et entre 200 et 17 971 pour l'Oyapock. Les valeurs les plus fortes de C/Chl-a et C/N ont été trouvées durant la montée et la descente des eaux. Les valeurs les plus basses de C/Chl-a et C/N étaient durant les basses eaux. Les valeurs minima des rapports C/N (entre 5 et 8) et C/Chl-a pendant les périodes de basses eaux ont indiqué que le carbone organique d'origine endogène représentait une part considérable dans la teneur en COP, dans les MES. Les valeurs entre 8 et 12 ont au contraire une origine allochtone. Ces fortes valeurs ont été relevées durant la montée des eaux en avril 2015 et en mars 2016 sur le Maroni. Pour le fleuve Oyapock, les ratios les plus élevés étaient pendant la montée et la descente des eaux. Enfin, les valeurs de C/Chl-a étaient plus élevées que celles de l'Amazone indiquant une forte biomasse aquatique pour les fleuves avec une charge en MES faible.

Tableau 4-9 : Valeurs moyennes et extrêmes des concentrations en MES, COP, NOP, COD, COT, Chl-a pour les années 2014-2016 et mesurées au point de collecte d'eau du SNO-HYBAM (M1). Rapports C/Chl-a et C/N ainsi que COP et NOP exprimées en pourcentage de MES, à SH sur le Maroni et à SM sur l'Oyapock.

Variables	Saut Maripa		Saut Hermina	
	Moyenne	Gamme	Moyenne	Gamme
MES (mg.l ⁻¹)	8,23	2,46 – 23,19	31,50	9,35 - 138
COP (mg.l ⁻¹)	1,31	0,64 – 3,16	1,83	0,45 – 4,56
NOP (mg.l ⁻¹)	0,20	0,12 – 0,36	0,28	0,10 – 0,73
COD (mg.l ⁻¹)	5,47	2,69 – 8,88	5,81	2,12 – 11,34
COT (mg.l ⁻¹)	6,78	3,38 – 12,03	7,64	3,66 – 13,10
Chl-a (µg.l ⁻¹)	1,09	0,07 – 3,51	1,98	0,15 – 4,99
C/Chl-a	5490	200 – 17971	2850	198 - 13051
C/N	6,42	2,88 – 11,46	6,5	3,70 – 11,64
COP/MES (%)	17,81	8,49 – 30,54	7,26	1,96 – 19,29
NOP/MES (%)	3,14	1,55 – 10,59	1,21	0,26 – 2,51

4.12 Flux de COD, COP, COT, NOP et Chl-a

Nous avons dans cette étude, utilisé les valeurs mesurées au point SNO-HYBAM pour les calculs des flux car des jaugeages solides n'ont pas été réalisés dans toute la section.

Néanmoins, la **Figure 4-16** indique qu'en surface il y a une bonne représentativité du point de collecte de l'observatoire SNO-HYBAM à la section SH sur le Maroni.

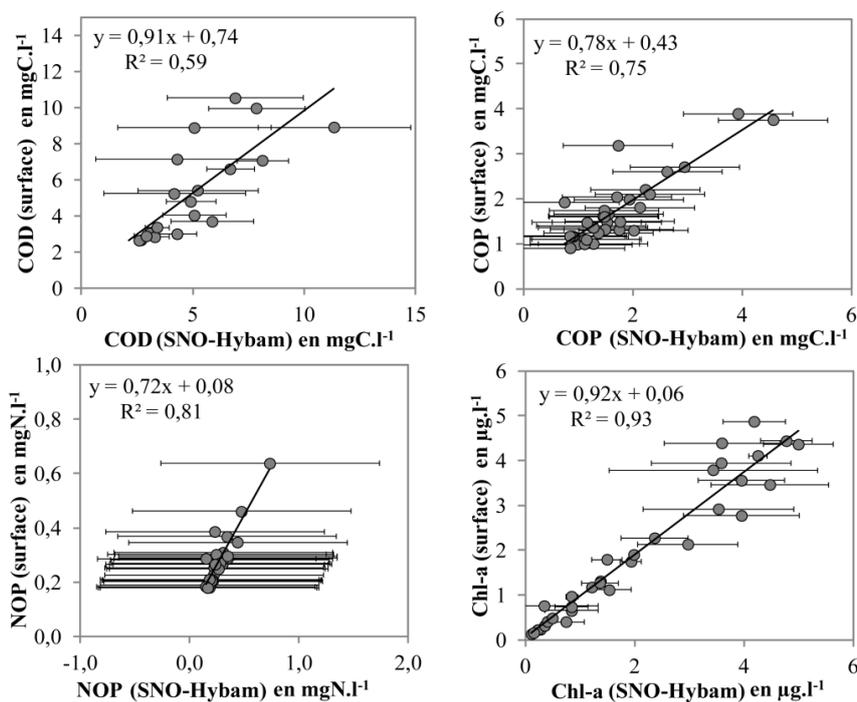


Figure 4-16. Corrélations entre les concentrations COD, COP, NOP, Chl-a mesurées en surface au point de collecte d'eau du SNO-HYBAM (M1), avec les valeurs enregistrées en surface aux quatre points de mesures (respectivement de la rive droite vers la rive gauche à 166 m (RD), à 475 m (M1), à 772 m (M2) et à 940 m (RG). Les barres représentent les écarts-types en surface.

Les flux de COD, COP, COT et NOP mesurés sur le Maroni à SH étaient entre 3 et 4 fois plus élevés que ceux de l'Oyapock à SM car le débit du Maroni est plus élevé (**Tableau 4-10**). Les flux annuels moyens de COT calculés à SH et à SM pour les deux années étudiées (2014-2015 et 2015-2016) étaient respectivement de $4,56 \times 10^5$ tC.an⁻¹ et $1,84 \times 10^5$ tonC.an⁻¹. Les flux de NOP moyens estimés sont de 17,74 et $5,42 \times 10^5$ tN.an⁻¹ à SH et à SM et les flux de COP moyens sont de 1,13 et $0,37 \times 10^5$ tonC.an⁻¹ à SH et à SM. Enfin les flux de COD sont estimés en moyenne de $3,42$ et $1,47 \times 10^5$ tonC.an⁻¹ à SH et à SM

Enfin, les flux spécifiques pour les deux fleuves étaient similaires pour le COD, le COP, le COT et plus élevés pour le NOP sur le Maroni.

Tableau 4-10 : Flux spécifiques de COD, COP, COT, NOP au Saut Hermina sur le Maroni et au Saut Maripa sur l'Oyapock.

Paramètres	Flux	Maroni			Oyapock		
		2014-2015	2015-2016	Moyenne	2014-2015	2015-2016	Moyenne
COD	tC.an ⁻¹	4,06x10 ⁵	2,78x10 ⁵	3,42x10 ⁵	1,61x10 ⁵	1,33x10 ⁵	1,47x10 ⁵
	t.km ⁻² .an ⁻¹	6,67	4,56	5,61	6,42	5,30	5,87
COP	tC.an ⁻¹	1,28x10 ⁵	0,98x10 ⁵	1,13x10 ⁵	0,35x10 ⁵	0,38x10 ⁵	0,37x10 ⁵
	t.km ⁻² .an ⁻¹	2,11	1,61	1,86	1,40	1,51	1,46
COT	tC.an ⁻¹	5,35x10 ⁵	3,76x10 ⁵	4,56x10 ⁵	1,97x10 ⁵	1,71x10 ⁵	1,84x10 ⁵
	t.km ⁻² .an ⁻¹	8,77	6,17	7,48	7,83	6,82	7,33
NOP	tN.an ⁻¹	22,56x10 ³	12,92x10 ³	17,74x10 ³	6,01x10 ³	4,82x10 ³	5,42x10 ³
	kg.km ⁻² .an ⁻¹	370,2	212,0	291,1	239,8	192,0	215,6

4.13 Variables explicatives ou prédictives des COD, COP, NOP et Chl-a

Des relations positives très significatives ($p \leq 0,05$) ont été mesurées entre les concentrations de COP et de NOP avec les MES ($r = 0,64$; $r = 0,45$) à SH sur le Maroni et à SM sur l'Oyapock ($r = 0,89$; $r = 0,61$). Une relation inverse a également été trouvée entre les COP et les NOP avec les MES.

De même, les concentrations de NOP ont été significativement corrélées avec le COP au Saut Maripa ($r = 0,51$) et au Saut Hermina ($r = 0,69$).

Enfin, des corrélations significatives ont été estimées entre les rapports C/N et les MES ($r = 0,49$ à SH et $r = 0,54$ à SM) ainsi qu'entre les rapports C/Chl-a et les MES ($r = 0,44$ à SH et $r = 0,75$ à SM).

4.14 Conclusion

Pour conclure, dans cette étude nous avons adapté une méthode de suivi des MES par télédétection via les images satellites des capteurs MODIS pour les fleuves Maroni et Orénoque. Cette méthode a permis de compléter sur une plus longue période (2000-2016), les jeux de données de MES *in situ* mesurés à partir de 2004 sur l'Orénoque et sur le Maroni. Pour l'Oyapock, des mesures *in situ* ont été utilisées car ce fleuve ne répond pas aux critères de MODIS.

Ce travail a mis en évidence l'évolution des concentrations de matières, des flux et du transport solide spécifique, l'augmentation dans le bassin versant du Maroni et la diminution dans le bassin versant de l'Oyapock. Au contraire, pour l'Orénoque, les données ont montré une certaine stabilité. Une importante corrélation entre l'augmentation du transport solide spécifique avec les surfaces de déforestation pour l'exploitation minière a été trouvée dans le bassin du Maroni alors que pour le bassin de l'Oyapock la variable explicative de la tendance à la diminution est l'écoulement spécifique.

Nous avons ensuite mesuré les principaux paramètres physico-chimiques et chimiques pour le suivi de la qualité de l'eau puis estimé les flux et les flux spécifiques de carbone dissous et particulaire ainsi que d'azote particulaire et de Chlorophylle *a*. Nous avons constaté que les flux spécifiques de ces paramètres étaient similaires (excepté pour les NOP) dans les deux bassins versants. Cependant, quelques rapports C/N élevés durant la montée des eaux en lien avec une origine exogène du carbone ont été mesurés notamment dans le bassin du Maroni. De fortes valeurs de C/Chl-*a* ont été également mesurées principalement durant l'été et pour l'Oyapock.

Les résultats ont fait l'objet de trois articles scientifiques soumis dans des revues internationales et présentés en **Annexes (Articles A, B et C)**. Les figures sont intégrées dans le document principal ainsi que les tables. Les documents supplémentaires (tables, figures et discussions) nommés dans le document principal (par exemple Figure S1), se trouvent à la fin du chapitre correspondant en "*Supplementary Documents*".

Chapitre 5 : Discussion générale



Le Maroni dans les abattis Cottica en hautes eaux, en mars 2015



L'Oyapock, en aval du pont, durant la montée des eaux, en mars 2015



Le Maroni au Saut Hermina en étiage, en octobre 2015

Ce travail de thèse s'est concentré sur les fleuves des petits bassins versants du bouclier des Guyanes encore peu connus et étudiés, soumis à une forte pression anthropique. Il a également abordé la complexité des grands bassins versants comme celui de l'Orénoque alimenté également en partie par le Bouclier des Guyanes.

Dans les chapitres précédents, ont été présentés les contextes globaux et locaux de cette étude avec les spécificités de chaque bassin versant. Les méthodes appliquées, pour répondre aux objectifs et questions de recherches, ainsi que les principaux résultats obtenus ont été décrits et soumis dans des publications scientifiques placées en annexes.

Dans ce chapitre les résultats majeurs sont rappelés et les méthodes discutées. Les flux sédimentaires et hydrologiques des fleuves guyanais sont comparés à ceux de la France hexagonale et des grands bassins mondiaux. Une proposition de seuils de contamination est effectuée sur les principaux paramètres physico-chimiques en lien avec la Directive Européenne Cadre sur l'Eau. Les conséquences que peuvent avoir un changement des flux sédimentaires et hydrologiques sur l'économie, la santé et l'environnement sont discutées.

5.1 Rappel des principaux résultats

Dans le **quatrième chapitre et en annexe (Article A)**, nous avons découvert grâce aux données collectées sur le terrain et à l'outil satellitaire que les concentrations et les flux de MES ainsi que le transport solide spécifique ont augmenté entre 2000 et 2015, dans tout le bassin du Maroni, principalement depuis 2009, en lien avec les précipitations qui lessivent les sols fortement remaniés par les activités humaines principalement de déforestation minière. Nous n'avons pas pu mettre en évidence de relation entre l'augmentation des charges en suspension avec les débits à la station principale du Saut Hermina. En opposition, nous avons montré que les charges, les flux de MES et le transport solide spécifique ont diminué dans le bassin de l'Oyapock, à sa station principale au Saut Maripa, depuis la crue centenaire de 2008 et en lien avec les débits. Parallèlement, sur le haut Oyapock, au niveau de la rivière Camopi, nous avons montré que les charges sédimentaires sont plus élevées en relation avec la déforestation pour les activités minières.

Dans le **quatrième chapitre et en annexe (Article B)**, nous avons comparé la nature des matières transportées, grâce à des données collectées entre 2014 et 2016 dans les bassins versants du Maroni et de l'Oyapock respectivement au Saut Hermina et au Saut Maripa. Nous avons observé un lien naturel entre les carbones, l'azote particulaire et la chlorophylle *a* avec

les MES. Nous n'avons pas pu mettre en évidence de différence entre les flux spécifiques des carbones particuliers, dissous et totaux dans ces deux bassins versants, ni de lien clair avec la déforestation. Nous avons cependant constaté des flux d'azote particulaire plus élevés dans le bassin du Maroni et certainement en lien avec des éléments nutritifs plus importants dans ce bassin peut être liés à des activités minières ou agricoles. De plus, les rapports C/N et C/Chl-a indiquent tout d'abord que les carbones particuliers transportés sont principalement attribués à la biomasse du phytoplancton. Néanmoins, quelques valeurs C/N (> 8) ont montré qu'il y a également, ponctuellement, des apports extérieurs de carbone certainement en lien avec les activités de déforestation. Finalement, nous avons constaté que le pourcentage de matières organiques dans les MES est plus élevé pour l'Oyapock que pour le Maroni (rapport de 2) suggérant l'importance des apports terrigènes dans ce dernier.

Dans le **quatrième chapitre et en annexe (Article C)**, nous avons confirmé grâce aux données collectées sur le terrain et à l'outil satellitaire, que les grands tributaires andins le Méta et l'Apure localisés en rive gauche sont les principaux pourvoyeurs de sédiments de l'Orénoque, pour la période 2001-2016. Les charges en suspension mesurées étaient plus faibles sur le haut Orénoque, en amont de ces grands tributaires et en lien avec les apports d'eaux des tributaires localisés en rive droite beaucoup plus faiblement chargés en MES. Le régime sédimentaire de l'Orénoque se distingue de celui du Maroni, de l'Oyapock mais aussi de l'Amazone, il comprend deux valeurs maximales de MES (durant la montée des eaux et la descente des eaux) et deux valeurs minimales (durant les hautes et les basses eaux) alors que le régime hydrologique est de type unimodal. Par conséquent, le phénomène d'hystérésis est singulier car, contrairement à l'Amazone à la station Óbidos, les débits n'expliquent pas les concentrations de MES. Les flux de MES mesurés depuis 2001 à la principale station de l'Orénoque, Ciudad Bolivar, ont montré une exceptionnelle stabilité des charges (autour d'une moyenne de 89 Mt.an^{-1}), avec un volume faible par rapport à d'autres rivières tropicales telles que l'Amazone (1000 Mt.an^{-1}), le Brahmapoutre (520 Mt.an^{-1}), le Gange (524 Mt.an^{-1}) et l'Irrawady (260 Mt.an^{-1}) ([Latrubesse et al., 2005](#)) mais nettement plus élevé que ceux du Maroni ($1,3 \text{ Mt.an}^{-1}$) et de l'Oyapock ($0,3 \text{ Mt.an}^{-1}$).

5.2 Pertinence et efficacité des méthodes utilisées

5.2.1 Suivi des MES et des flux de matières par des mesures *in situ* et de télédétection

Dans cette étude, les calibrations *in situ* de MES-Réflectance avec les radiomètres en Guyane et le spectroradiomètre au Venezuela n'ont pas pu être valorisées car des biais avec la calibration MES-Réflectance MODIS ont été observés. Dans la bande rouge pour le Maroni, ce biais peut être expliqué par une légère différence entre la réflectance des capteurs MODIS et celle des TRiOS-RAMSES. Il peut aussi être également en lien avec les concentrations qui sont plus élevées en rive gauche qu'en rive droite de la section de mesure. Dans la bande infrarouge pour l'Orénoque, il est certainement en lien avec l'équipement FieldSpec plus généralement utilisé sur des surfaces planes à faible rugosité comme par exemple la neige, des zones désertiques, des zones urbanisées ou encore la canopée (Painter *et al.*, 2003; Clevers and Kooistra, 2011; Roskin *et al.*, 2012).

Les calibrations MES-Réflectance MODIS utilisées dans cette étude ont montré que la méthode pour le suivi des MES développée dans l'Amazonie à Óbidos (Martinez *et al.*, 2009) et successivement appliquée sur le Madeira (Espinoza Villar *et al.*, 2012b), en amont des fleuves Marañón, sur la rivière Ucayali (Espinoza Villar *et al.*, 2012a) et dans un réservoir du Burkina Faso (Robert *et al.*, 2016), peut être également étendue sur le Maroni et sur l'Orénoque. Il a donc été possible de suivre à long terme (2001-2016) les MES avec les images de moyenne résolution des satellites Terra et Aqua dans le fleuve moyennement étroit du Maroni (de 250 à 1 km de large) mais aussi le fleuve plus large de l'Orénoque (allant jusqu'à 6 km) et pour une grande variabilité de concentrations. En effet, les gammes des concentrations ont varié entre 292 mg.l⁻¹ sur l'Orénoque et 3 mg.l⁻¹ sur le Maroni, pour des erreurs relatives de 32 et 25 % respectivement avec les mesures collectées sur le terrain. Ces valeurs de RMSE, bien que élevées, sont similaires (18 à 36 %) à celles mesurées sur l'Amazonie près des confluent des rivières Marañón et Ucayali dans le bassin de l'Amazonie (Espinoza Villar *et al.*, 2012a).

Les mesures de terrain peuvent donc être facilitées par de nouvelles techniques de télédétection, particulièrement dans ces bassins versants tropicaux peu peuplés et difficilement accessibles. Avec MODIS, nous avons pu retracer l'évolution des MES du Maroni sur 8 stations depuis Papaïchton jusqu'au Saut Hermina et sur 6 stations entre l'amont de la confluence du

Meta avec l'Orénoque et Ciudad Guayana localisée à environ 55 kilomètres de son delta. La résolution temporelle des images MODIS est journalière et les capteurs ont été mis en orbite en 2000 pour Terra et en 2002 pour Aqua. Dans un contexte global où seuls quelques fleuves sont peu contaminés par les activités humaines, les produits MODIS à 8 jours fournissent des images avec de faibles niveaux de nuages et d'aérosols durant toute l'année nécessitant peu ou pas de corrections atmosphériques. Aussi, plus de 1 300 images ont pu être exploitées depuis 2001. Cependant, même si les séries temporelles MODIS facilitent l'intégration à long terme des données dans un réseau fluvial conventionnel, les mesures de MES *in situ* notamment durant les basses eaux restent néanmoins essentielles surtout pour les bassins versants qui peuvent avoir de très faibles concentrations de matières parfois à la limite de détection des capteurs. Par ailleurs, plus le nombre de concentrations journalières estimées via des mesures *in situ* ou via les satellites sera important, plus l'erreur sur les calculs de flux de matières sera diminuée. Il est donc préférable de diminuer l'espacement entre les collectes d'eaux. La dispersion des concentrations dans la colonne d'eau peut également être facteur d'erreur. Des jaugeages solides à différentes époques du cycle hydrologique sont nécessaires pour connaître cette dispersion, corriger les valeurs moyennes des charges dans la colonne d'eau et calculer les flux de matières.

Bien que cette méthode soit novatrice et propose de nombreux avantages, son principal inconvénient est tout d'abord que la taille des pixels de MODIS ne permet pas de mesurer spécifiquement les concentrations en un point donné et, également, que la valeur de réflectance MODIS estimée avec MOD3R correspond à une moyenne sur un masque de plusieurs kilomètres. La précision de la mesure des concentrations de MES par satellite montre également un tout autre intérêt que celui de suivre les flux de MES, par exemple la pollution locale. En effet, dans le bassin du Maroni, les forces de l'ordre s'organisent pour détecter ces pollutions qui sont synonymes d'activités souvent illégales. D'autres satellites comme ceux de Landsat 8+ et de Sentinel 2A et 2B ont l'avantage de proposer des images multi spectrales couvrant 13 bandes spectrales, allant du visible à l'infrarouge, avec une largeur du pixel faible (minimum 10 m) et maintenant avec une revisitabilité régulière (5 jours et 2 jours sur de nombreux sites en combinant les deux satellites), facilitant ainsi le suivi sur des rivières plus étroites à fort couvert forestier.

Enfin, les activités minières aurifères et de déforestation produisent une grande proportion de sédiments qui se déposent dans le lit du fleuve (graviers, sables) et qui sont non visibles par les capteurs MODIS. Dans des petits bassins versants du Sinnamary (1 à 1,5 ha), couverts par la forêt primaire [Roche \(1982\)](#) a évalué le transport solide spécifique en milieu

forestier non perturbé (sans activité humaine) entre 20 et 80 t.an⁻¹km⁻² avec 4 à 38 t.an⁻¹km⁻² de MES et entre 9 et 40 t.an⁻¹km⁻² de charges de fond. En utilisant ces valeurs, nous avons calculé que le fleuve Oyapock devrait transporter entre 98 et 935 x 10³ t.an⁻¹ de MES et entre 221 et 985 x 10³ t.an⁻¹ de charges de fond. Dans le fleuve Maroni, les flux de MES et les charges de fond transportées à l'océan pourraient varier entre 256 et 2440 x 10³ t.an⁻¹ et entre 578 et 2570 x 10³ t.an⁻¹, respectivement. Il est intéressant de noter que l'estimation supérieure du flux sédimentaire non perturbé par des activités humaines est proche de la valeur calculée en 2015 pour le fleuve Maroni. Pour le fleuve Oyapock, l'estimation est deux fois supérieure à celle des flux maxima que nous avons calculés, ce qui indique que pour ce bassin versant, les flux sédimentaires restent principalement largement non affectés par les activités anthropiques. En revanche, le fleuve Maroni montre des perturbations au cours des 15 dernières années. Une approche de télédétection complémentaire comme celle du Lidar qui est un outil de télémétrie utilisé dans de nombreux domaines permettrait d'observer les conséquences des barges et du dragage du lit fluvial par les activités minières, sur la géomorphologie et la bathymétrie du fleuve. Une autre approche complémentaire serait par exemple d'utiliser des outils de sismique pour estimer les charges de fond et aussi de photogrammétrie pour connaître les charges en surfaces des bancs de sables non visibles par la sismique.

5.2.2 Relation entre le transport solide spécifique et l'occupation des sols

L'approche originale de cette étude est d'avoir pu relier le transport solide spécifique dans le bassin du Maroni avec l'évolution des surfaces anthropisées (zones urbaines, agricoles et minières) et ce depuis 2000. Une augmentation de l'ordre de 400 % a été observée pour ces deux paramètres pour le transport solide spécifique et les surfaces minières avec une liaison à 97 %. Aucune meilleure relation n'a été obtenue avec les autres variables explicatives ou prédictives. Activités minières et concentrations, flux de MES et transport spécifique suivent la même tendance.

Force est de constater que l'occupation des terres dans un bassin versant est un paramètre fondamental pour la compréhension des processus qui y opèrent et la planification régionale. Cependant, les surfaces d'occupation de sols utilisées pour les zones urbaines et agricoles sont celles des principales villes et villages localisés en Guyane Française et ne tiennent pas compte du développement côté surinamais. Même si mineure, il faudrait pouvoir ajouter l'évolution des surfaces urbanisées et agricoles sur les portions surinamaises pour les comparer à celles de la Guyane.

5.3 Comparaison des flux d'eau et de sédiments exportés à l'océan, entre quelques bassins versants emblématiques

5.3.1 Transports d'eau

Les débits font parties des facteurs environnementaux fondamentaux pour la compréhension des processus qui opèrent dans un bassin versant. Dans nos travaux, nous avons montré que le débit moyen à la station de Langa Tabiki pour la période 2001- 2015 est de $1\,831\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ avec un rapport de 2,6 selon les années. Sur l'Oyapock à la station du Saut Maripa le débit moyen est de $867\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ avec un rapport annuel de 1,5. A titre comparatif, en France, les débits moyens des fleuves Rhône, Garonne, Loire et Seine sont respectivement de 1 328, 841, 786, 526 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Delmas *et al.*, 2012). Par conséquent, le Maroni apporte en moyenne à l'océan plus que le Rhône et 3,5 fois plus que la Seine alors que l'Oyapock est équivalent à la Garonne. Si l'on compare les fleuves français avec les trois plus grands fleuves au monde en terme de surface et de débits : l'Amazone, le Congo et l'Orénoque ont un débit moyen de 205 000 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Callède *et al.*, 2010), 41 600 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ et 33 320 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (Laraque *et al.*, 2013b) respectivement et entretiennent un rapport de 112, 18 et 23 avec le Maroni (**Tableau 5-1**).

Tableau 5-1 : Comparaison des débits des principaux fleuves guyanais avec ceux de la France métropolitaine et des plus grands fleuves au monde en terme de débits.*: valeurs estimées à partir des débits spécifiques issus de Delmas *et al.* (2012). **:valeurs estimées à partir des débits moyens.

Fleuve	Débit moyen ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)	Bassin versant (km^2)	Débit spécifique		Périodes	X (WGS 1984)	Y (WGS 1984)
			$10^3\text{ m}^3.\text{km}^{-2}.\text{an}^{-1}$	$\text{l}.\text{s}^{-1}.\text{km}^{-2}$			
Maroni	1831	60 900**	948**	30,07	2001 - 2015	4,98	-54,44
Oyapock	867	25 100**	1089**	34,54	2004 - 2015	3,80	-51,88
Rhône	1328*	83 600	501	5,89	1980 - 2009	4,62	43,67
Loire	786*	110 200	225	7,13	1994 - 2006	-1,62	47,19
Garonne	841*	71 300	372	1,80	1989 - 2007	0,22	44,41
Seine	526*	64 800	256	8,12	1991 - 2003	1,23	49,30
Amazone	205 000	4 800 000	1137**	42,71	1972 - 2003	-1,56	-55,30
Congo	41 600	3 700 000	355**	11,24	1902 - 2012	4,26	15,31
Orénoque	33 320	820 000	1282**	40,65	2000 - 2014	8,14	-63,60

Le débit spécifique moyen annuel¹⁵ est de $948 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ pour le Maroni et de $1089 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ pour l'Oyapock. Ce résultat montre l'influence des précipitations qui sont plus conséquentes dans le bassin de l'Oyapock car il pleut plus à l'est qu'à l'ouest de la Guyane. A titre comparatif, en France, les débits spécifiques moyens des fleuves Rhône, Garonne, Loire et Seine sont de 501, 372, 225 et $256 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ d'eau (Delmas *et al.*, 2012). Et, si l'on compare les fleuves de la France avec les trois plus grands fleuves au monde l'Orénoque a un débit spécifique de $1\,282 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$, contre $1\,347 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ pour l'Amazone et $355 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ pour le fleuve Congo. Donc avec son débit spécifique moyen l'Oyapock se classe au premier rang français, suivi du Maroni et sont tous deux dans les mêmes ordres de grandeurs que l'Orénoque et l'Amazone. Le Congo étant équivalent aux fleuves de France métropolitaine.

Le rapport entre les débits maxima et minima annuels joue également un rôle dans la dynamique des matières transportées vers l'océan. Il est estimé à 104 pour le Maroni, 63 pour l'Oyapock, 14 pour l'Orénoque, 4 pour l'Amazone (valeur : $173\,000/70\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et 3 pour le Congo (valeur : $75\,500/23\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). En comparaison, le rapport débit maximum/débit minimum en 2014 du plus grand fleuve français le Rhône est de 7 (valeur : $11\,500/1\,700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) au Pont-Saint-Esprit (source : BD Hydro).

5.3.2 Transports de sédiments

Les fleuves Maroni et Oyapock couvrent une surface correspondant à $100\,428 \text{ km}^2$ répartis sur les territoires de la Guyane Française à 45 %, du Suriname à 37 % et du Brésil à 17 %. Le flux de MES moyen du Maroni, évalué sur la période 2001-2015 est de $1,3 \text{ Mt} \cdot \text{an}^{-1}$. Pour l'Oyapock, sur la période de 2004-2015, le flux moyen de MES est évalué à $0,30 \text{ Mt} \cdot \text{an}^{-1}$. Ce résultat montre l'importance de l'érosion dans le bassin du Maroni par rapport à l'Oyapock.

En comparaison, les fleuves français transportent au total $16,2 \text{ Mt} \cdot \text{an}^{-1}$ pour une aire de $438\,500 \text{ km}^2$ avec 75 % de ces exports à l'océan par les principaux fleuves français Rhône ($9,63 \text{ Mt} \cdot \text{an}^{-1}$), Garonne ($1,86 \text{ Mt} \cdot \text{an}^{-1}$), Loire ($0,86 \text{ Mt} \cdot \text{an}^{-1}$) et Seine ($0,79 \text{ Mt} \cdot \text{an}^{-1}$) pour un total de $13,2 \text{ Mt} \cdot \text{an}^{-1}$ et couvrant 81,3% de l'aire totale (**Tableau 5-2**). Les plus faibles valeurs sont

¹⁵ Le débit spécifique décrit dans ce paragraphe correspond au débit moyen annuel multiplié par le nombre de secondes dans une année et rapporté à la taille du bassin versant. Cette unité est moins couramment employée mais elle est favorisée ici afin de comparer les résultats de nos travaux avec ceux de Delmas M, Cerdan O, Cheviron B, Mouchel J-M, Eyrolle F. 2012. Sediment export from French rivers to the sea. *Earth Surf. Process. Landf.*, **37**: 754-762. DOI: 10.1002/esp.3219..

mesurées pour les fleuves La Vilaine (0,07 Mt.an⁻¹), du Nord (0,12 Mt.an⁻¹) et de Normandie (0,14 Mt.an⁻¹) (Delmas *et al.*, 2012). Parmi les valeurs intermédiaires, les fleuves d'Aquitaine et des Pyrénées transportent respectivement 0,35 et 0,38 Mt.an⁻¹ (Figure 5-1). Le Maroni transporte donc moins de matières que le Rhône qui est un fleuve de montagnes avec plus de barrages et des pentes très prononcées, plus que la Loire et la Seine, et autant que la Garonne alors que ces derniers ont des débits moyens plus faibles et que les sols du Bouclier des Guyanes sont considérés comme les moins érosifs au monde avec seulement 1 mètre tous les millions d'années. L'Oyapock quant à lui, transporte plus de matières que La Vilaine, La Meuse et autant que les fleuves d'Aquitaine et des Pyrénées (Figure 5-1) qui ont également des débits moyens bien inférieurs. En comparaison, les flux de matières des trois plus grands fleuves au monde : l'Amazone, l'Orénoque et le Congo ont un débit solide moyen de 754 Mt.an⁻¹ à Óbidos (Martinez *et al.*, 2009), 89 Mt.an⁻¹ à Ciudad Bolivar et 33 Mt.an⁻¹ à Brazzaville (Laraque *et al.*, 2013b) respectivement. Les flux de matières des fleuves français sont donc très nettement inférieurs à ceux des grands fleuves mondiaux.

Tableau 5-2 : Comparaison des flux de MES et du transport solide spécifique des principaux fleuves guyanais avec ceux de la France et des plus grands fleuves au monde. *: valeurs estimées à partir du transport solide spécifique issu de Delmas *et al.* (2012). **:valeurs estimées à partir des débits solides moyens.

Fleuve	Flux de MES moyen (10 ⁶ t.an ⁻¹)	Bassin versant (10 ³ km ²)	Transport solide spécifique	Périodes	X (WGS 1984)	Y (WGS 1984)
Maroni	1,3	60,9	22,1**	2001 - 2015	4,98	-54,44
Oyapock	0,3	25, 1	12,1**	2004 - 2015	3,80	-51,88
Rhône	9,6*	83,6	115	1980 - 2009	4,62	43,67
Loire	2,2*	110,2	20	1994 - 2006	-1,62	47,19
Garonne	2,4*	71,3	35	1989 - 2007	0,22	44,41
Seine	0,8*	64,8	12,3	1991 - 2003	1,23	49,30
Amazone	754	4 800	157**	1972 - 2003	-1,56	-55,30
Congo	33	3 700	9,4**	1902 - 2012	4,26	15,31
Orénoque	89	820	97	2001 - 2016	8,14	-63,60

Le transport solide spécifique moyen annuel est de 12 t.km².an⁻¹ pour l'Oyapock et de 22 t.km².an⁻¹ pour le Maroni. En France, le transport solide spécifique des principaux fleuves varie entre 5 et 115 t.km².an⁻¹ (Delmas *et al.*, 2012). La valeur maximale concerne le Rhône, suivi de l'Adour + Gaves (77 t.km².an⁻¹), de la Garonne (35 t.km².an⁻¹), de l'Aquitaine (13,5 t.km².an⁻¹) et de la Seine (12,3 t.km².an⁻¹) (Tableau 5-2). Le taux d'érosion du bassin versant du Maroni est plus faible que celui du Rhône et de la Garonne mais plus élevé que celui de

l'Aquitaine et de la Seine. Il faut néanmoins garder en considération que les fleuves français sont domptés et chenalisés contrairement aux fleuves guyanais. Pour l'Oyapock, il correspond à ceux de l'Aquitaine et de la Seine, qui ont pourtant des débits légèrement inférieurs. Si on compare le transport solide spécifique des fleuves français avec ceux des trois plus grands fleuves au monde : l'Amazone, l'Orénoque et le Congo ont un transport solide spécifique d'environ 157, 96 et 9,4 t.km⁻².an⁻¹. On remarque que le transport solide spécifique du Congo est équivalent à celui de l'Oyapock avec qui il a historiquement une histoire géologique précambrienne commune.

Les fleuves Maroni et Oyapock peuvent donc être considérés comme d'importants pourvoyeurs d'eau douce. Ils déchargent spécifiquement autant que les grands fleuves au monde à surface de bassin versant équivalente. De plus, ils ont naturellement un très faible taux de concentration de matières puisqu'ils ont des berges peu érosives et qu'ils sont encore peu impactés par les activités humaines.

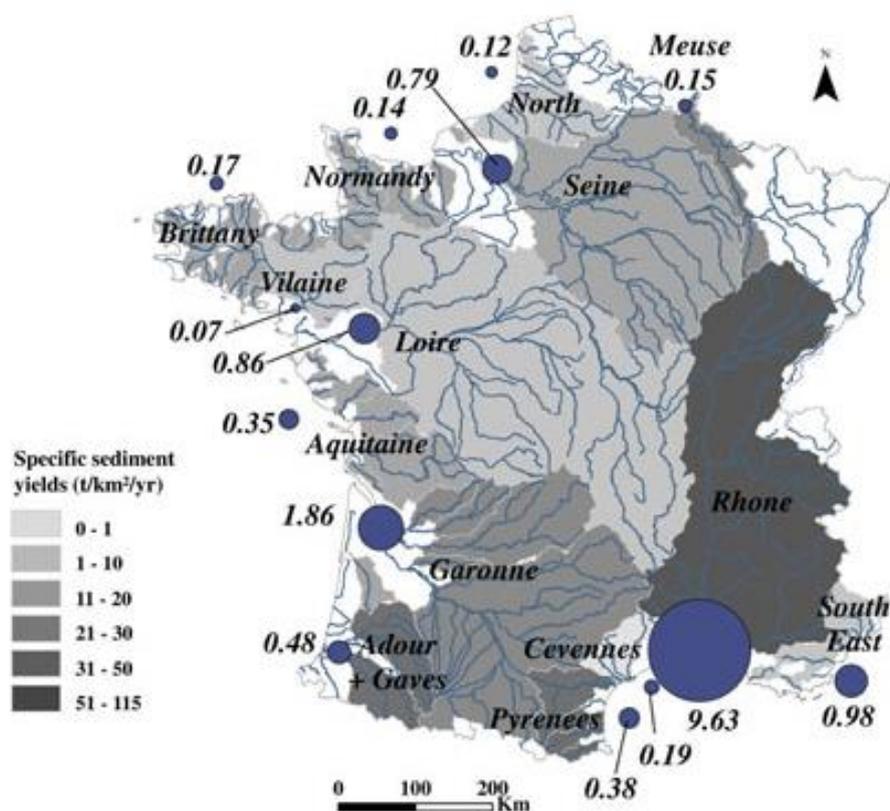


Figure 5-1 : Estimation du transport solide spécifique (rapport entre les flux de matières transportées et la taille du bassin versant) et les flux de matières des fleuves français (Mt.an⁻¹).

Le diamètre des cercles est proportionnel aux flux de matières (Delmas *et al.*, 2012).

5.4 Propositions de seuils de qualité pour les masses d'eaux continentales

Dans l'ensemble nous avons collecté de nombreuses banques de données physico-chimiques qui soutiennent les indices biologiques et de pollution, créés dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) qui visent à atteindre le bon état écologique des masses d'eau d'ici 2021. Ces indices donnent un aperçu global sur le fonctionnement d'un écosystème et de l'impact que peut avoir une modification du milieu (par exemple augmentation de la turbidité ou de contaminants) sur les populations d'organismes. Les seuils de qualité appliqués pour les paramètres physico-chimiques au niveau national sont présentés dans le **Tableau 5-3**. L'arrêté du 25 janvier 2010, précise les modalités à suivre pour établir des classes et des valeurs seuils pour l'état écologique, chimique et le potentiel écologique des eaux de surface au niveau régional ([Ministère de l'Ecologie, 2016](#)).

La première proposition de valeurs seuils pour la Guyane a été effectuée en 2013 (**Tableau 5-4**) et se base sur les seuils proposés au niveau national ([DEAL Guyane, 2014](#)). L'arrêté du 25 janvier 2010, n'impose pas d'exigences particulières pour la turbidité de l'eau et les mesures de MES en France Métropolitaine ([Ministère de l'Ecologie, 2012](#); [Ministère de l'Ecologie, 2016](#)) alors que ces paramètres sont considérés comme particulièrement importants en Guyane car ils traduisent une augmentation significative de la pollution lors de pression du type orpaillage et déforestation ([DEAL Guyane, 2014](#); [OEG, 2016](#)). Actuellement, les seuils de turbidité et de MES sont basés sur les valeurs des anciennes grilles d'évaluation SEQ-eau V2 ([Ministère de l'Ecologie and Agences de l'eau, 2003](#)). Néanmoins, une proposition de seuil de turbidité a été faite par le PAG en 2015 ([DEAL Guyane, 2015](#)). Aucune proposition de classes pour le binôme MES/Turbidité n'a cependant été faite. Les classes de seuils pour l'Oxygène dissous ont été calculées alors que celles de la conductivité, de la température et du pH ne l'ont pas été par manque de données. Les données utilisées pour créer ces classes et valeurs seuils sont issues du réseau de surveillance de la DCE, dont le nombre de valeurs est relativement faible, avec un seul suivi ponctuel par an et pour des stations très hétérogènes localisées sur toute la Guyane.

Pour les valeurs de carbone organique dissous et de chlorophylle *a*, les seuils de la France métropolitaine ont également été conservés pour la Guyane Française et sont basés sur les anciennes valeurs des grilles d'évaluation SEQ-eau V2 ([Ministère de l'Ecologie and](#)

Agences de l'eau, 2003). La pertinence des éléments de qualité comme le carbone et l'azote organique particulaire n'a pas encore été établie à ce jour, il en est de même pour le rapport Carbone/Azote ou C/N.

Tableau 5-3 : Classes d'état et valeurs seuils des paramètres physico-chimiques soutenant la biologie au niveau national et décrites dans l'arrêté du 25 janvier 2010. Adaptation France (Ministère de l'Ecologie, 2016). * : pas de valeurs établies.

Paramètres par élément de qualité	Limites des classes d'état				
	très bon	bon	moyen	médiocre	mauvais
Bilan de l'oxygène					
oxygène dissous (mg O ₂ .l ⁻¹)	8	6	4	3	
taux de saturation en O ₂ dissous (%)	90	70	50	30	
DBO ₅ (mg O ₂ .l ⁻¹)	3	6	10	25	
carbone organique dissous(mg C.l ⁻¹)	5	7	10	15	
Température					
eaux salmonicoles	20	21.5	25	28	
eaux cyprinicoles	24	25.5	27	28	
Nutriments					
PO ₄ ³⁻ (mg PO ₄ ³⁻ .l ⁻¹)	0.1	0.5	1	2	
phosphore total (mg P.l ⁻¹)	0.05	0.2	0.5	1	
NH ₄ ⁺ (mg NH ₄ ⁺ .l ⁻¹)	0.1	0.5	2	5	
NO ₂ ⁻ (mg NO ₂ ⁻ . l ⁻¹)	0.1	0.3	0.5	1	
NO ₃ ⁻ (mg NO ₃ ⁻ . l ⁻¹)	10	50	*	*	
Acidification					
pH minimum	6.5	6	5.5	4.5	
pH maximum	8.2	9	9.5	10	
Salinité					
conductivité	*	*	*	*	
chlorures	*	*	*	*	
sulfates	*	*	*	*	

Tableau 5-4 : Classes d'état et valeurs seuils des paramètres physico-chimiques soutenant la biologie, adaptation Guyane (DEAL Guyane, 2014).

Paramètres par élément de qualité	Limites de classes d'état				
	Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
Bilan de l'oxygène					
Oxygène dissous (mg O ₂ /l)	5,6	4,2	2,8	1,4	
Taux de saturation en O ₂ dissous (%)	70	52,5	35	17,5	
DBO ₅ (mg O ₂ /l)	3	6	10	25	
Carbone organique dissous (mg C/l)	5	7	10	15	
Nutriments					
PO ₄ ³⁻ (mg PO ₄ ³⁻ /l)	0,1	0,5	1	2	
Phosphore total (mg P/l)	0,05	0,2	0,5	1	
NH ₄ ⁺ (mg NH ₄ ⁺ /l)	0,1	0,5	2	5	
NO ₂ ⁻ (mg NO ₂ ⁻ /l)	0,1	0,3	0,5	1	
NO ₃ ⁻ (mg NO ₃ ⁻ /l)	10	50			
Particules en suspension					
MES (mg/l)	25	50	100	150	
Turbidité (NTU)	15	35	70	100	

Dans les sous-parties suivantes, les valeurs des eaux continentales sont comparées à celles des masses d'eaux de transitions et des masses d'eaux côtières, et ce dans l'objectif

d'établir des classes de valeurs pour chaque masse d'eau. Les masses d'eaux de transition correspondent à : *"une partie distincte et significative des eaux de surface située à proximité des embouchures de rivières ou de fleuves, qui sont partiellement salines en raison de leur proximité des eaux côtières mais qui restent fondamentalement influencées par des courants d'eau douce, constituant le découpage élémentaire des milieux aquatiques destiné à être l'unité d'évaluation de la DCE"* (<http://www.sandre.eaufrance.fr/>). Les masses d'eaux côtières sont : *"une partie distincte et significative des eaux de surface située entre la ligne de base servant pour la mesure de la largeur des eaux territoriales et une distance d'un mille marin"* (<http://www.sandre.eaufrance.fr/>).

5.4.1 Turbidité versus MES

Dans cette étude, nous avons mesuré simultanément la turbidité (NTU) et les MES ce qui facilite le suivi de la qualité. Les équations associées sont présentées dans le **paragraphe 3.3.4.2**. Selon, les seuils nationaux de MES, les eaux du Maroni au Saut Hermina peuvent être classées pour la période 1985 à 2011 de "Bon" car aucune valeur \geq à 50 mg.l⁻¹ n'a été enregistrée (**Tableau 5-5**). A partir de 2011, des concentrations entre 50 et 100 mg.l⁻¹ sont mesurées avec un maximum de 138 mg.l⁻¹ en avril 2016 ce qui les classe en "Moyen" et "Médiocre". Pour les eaux du Saut Maripa sur l'Oyapock et entre 2004 et 2015, aucune valeur n'est observée au-dessus de 20 mg.l⁻¹ ce qui les classe en "Très Bon" (\geq 25).

En 1984-1985, [Jouanneau et Pujos \(1988\)](#) ont classé les fréquences de MES avec plus de 114 échantillons dans le bassin de la Comté et sur le Maroni (prélèvement de surface à proximité de la berge d'Apatou). Les seuils de concentrations qu'ils ont choisis sont : 0,1 - 5,5 - 10 mg.l⁻¹, 10 - 20 mg.l⁻¹ et plus de 20 mg.l⁻¹. Les fréquences de pourcentages pour ces seuils étaient de 10 %, 48 %, 39 % et 3 %, respectivement.

On observe au Saut Maripa sur l'Oyapock que les valeurs de 2004 à 2015 sont semblables à celles mesurées en 1984-1985 par [Jouanneau et Pujos \(1988\)](#) sur le Maroni ce qui confirme l'absence de changement important au niveau du bassin versant de l'Oyapock (**Tableau 5-5 A**). Au contraire sur le Maroni au Saut Hermina (**Tableau 5-6**), les concentrations de MES de 20 - 30 mg.l⁻¹ représentaient 12 % en 2002 alors qu'elles étaient de 3 % en 1985. En 2010, les charges entre 30 et 40 mg.l⁻¹ représentent 16 % alors qu'elles étaient inexistantes en 1985. En 2015, les données supérieures à 40 mg.l⁻¹ représentent 28 % alors qu'elles étaient inexistantes en 1985. Les petites valeurs inférieures à 10 mg.l⁻¹ se raréfient à

partir de 2005. Les charges en suspension annuelles dans le bassin du Maroni ont donc subies un changement profond au cours de ces quinze dernières années.

Tableau 5-5 : Fréquences en pourcentages des concentrations de MES (en mg.l⁻¹) et de Turbidité (en NTU) sur l'Oyapock à Saut Maripa, collectées mensuellement sur la période 2004-2015. Les valeurs sont issues des données *in situ*.

MES (en mg.l ⁻¹)	2004 (%)	2005 (%)	2006 (%)	2007 (%)	2008 (%)	2009 (%)	2010 (%)	2011 (%)	2012 (%)	2013 (%)	2014 (%)	2015 (%)
0,1 - 5	17				9	25	8		8	27		25
5 - 10	50	33	33	42	33	33	42	58	75	33	33	33
10 - 20	33	67	67	58	58	42	42	42	17	50	67	42
20 - 30							8					
30 - 40												
> 40												
Turbidité (en NTU)												
0,1 - 5	25	17		8	15	25	16	33	33	33	25	44
5 - 10	50	50	50	42	23	50	42	42	50	58	42	50
10 - 20	25	33	50	50	62	25	42	25	17	9	33	17
20 - 30												
30 - 40												
> 40												

Localement le PAG classe la turbidité selon les seuils suivants : "Naturel, pas d'impact" jusqu'à 20 NTU, "Naturel ou impact résiduel" jusqu'à 35 NTU, "Impact orpaillage suspecté" jusqu'à 50 NTU et "Impact orpaillage avéré" au-delà de 50 NTU. En considérant, ces dernières classes de valeurs l'Oyapock au Saut Maripa est classé en "Naturel pas d'impact". Pour le Maroni on obtient : durant la montée des eaux : "Naturel, pas d'impact" jusqu'en 2003, "Naturel ou impact résiduel" à partir de 2012, "Impact orpaillage suspecté" jusqu'en 2014 et "Impact orpaillage avéré" en 2015 ; durant les hautes eaux : "Naturel, pas d'impact" jusqu'en 2003, "Naturel ou impact résiduel" jusqu'en 2012, "Impact orpaillage suspecté" jusqu'en 2015 ; durant la descente des eaux : "Naturel, pas d'impact" jusqu'en 2003, "Naturel ou impact résiduel" jusqu'en 2012 ainsi qu'en 2013 et 2015, "Impact orpaillage suspecté" en 2014 ; durant les basses eaux : "Naturel, pas d'impact" jusqu'en 2009, "Naturel ou impact résiduel" jusqu'en 2012 ainsi qu'en 2014 et 2015 et "Impact orpaillage avéré" en 2013.

Tableau 5-6 : Fréquences en pourcentage des concentrations de MES (en mg.l⁻¹) et de turbidité (en NTU) sur le Maroni à la station de Saut Hermina, sur la période 1985-2015. Les valeurs de 2000 à 2015 sont issues des données mesurées *in situ* et estimées par télédétection. Les valeurs de 1985 sont issues de [Jouanneau et Pujos \(1988\)](#).

MES (en mg.l ⁻¹)	1985 (%)	2000 (%)	2001 (%)	2002 (%)	2003 (%)	2004 (%)	2005 (%)	2006 (%)	2007 (%)	2008 (%)	2009 (%)	2010 (%)	2011 (%)	2012 (%)	2013 (%)	2014 (%)	2015 (%)
0,1 - 5	11		10	4	5	14	11			6	9						
5 - 10	48	29	40	24	19	14		3		9	21						2
10 - 20	39	65	50	52	28	22	50	59	46	58	29	41	13	11	29	8	20
20 - 30	3			12	24	36	32	34	46	21	35	41	65	42	50	43	30
30 - 40		6		8	14	11	4		7	6	6	16	19	33	11	32	20
40 - 50							4					3	3	6	11	11	10
50 - 100						3		3						8	5	5	18
> 100																	
Turbidité (en NTU)																	
0,1 - 5																	
5 - 10			10	4	5	8	7			3	6						
10 - 20		71	75	56	43	23	21	24	11	30	35	10		3		3	8
20 - 30		24	15	28	29	43	54	66	71	58	41	55	53	20	7	14	24
30 - 40		6		8	24	17	11	7	18	6	12	26	40	54	46	57	32
40 - 50				4		6	7			3	6	10	3	11	32	16	14
50 - 100						3		3					3	11	14	11	22
> 100																	

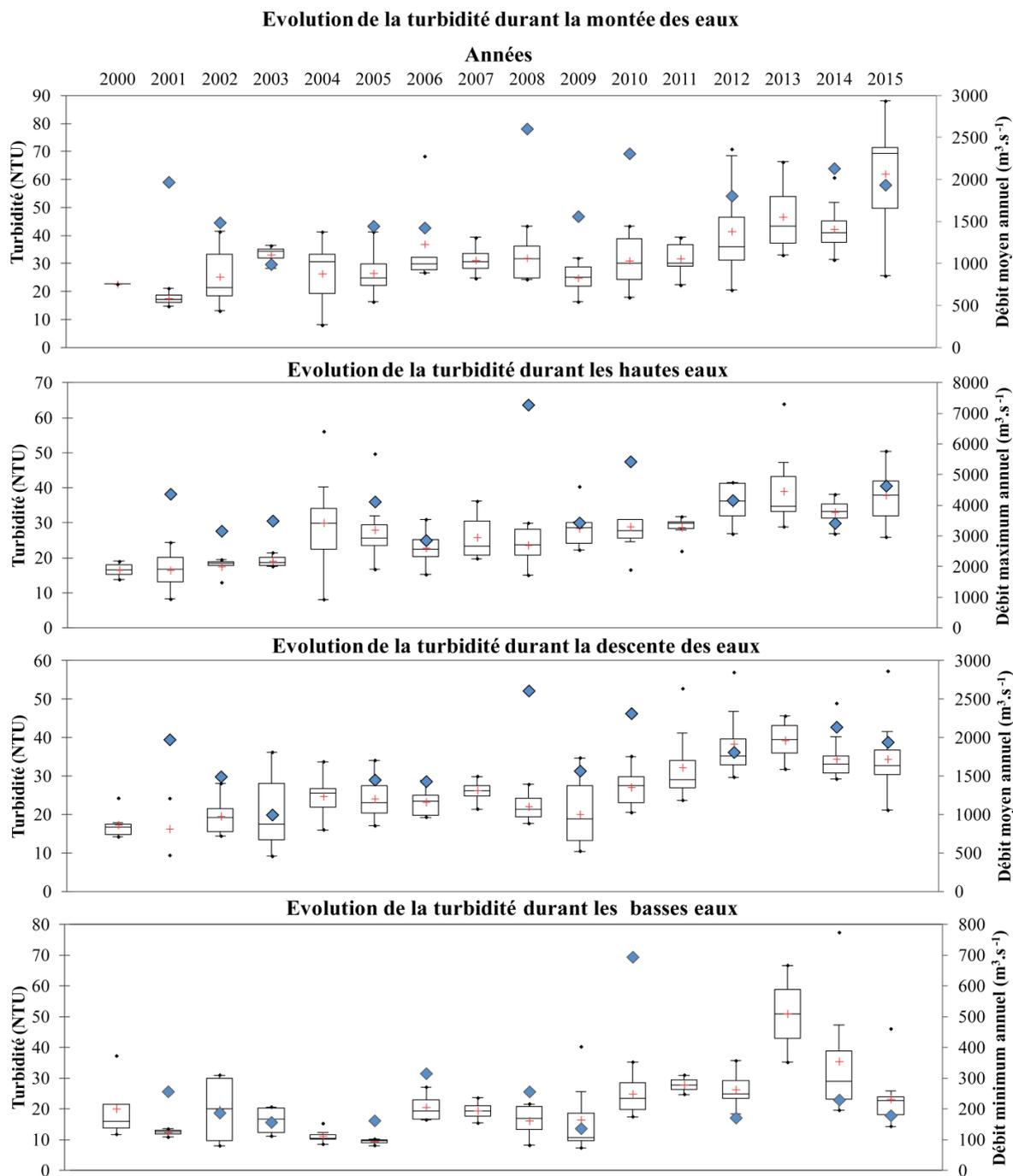


Figure 5-2 : Evolution annuelle (2000-2015) et saisonnière de la turbidité mesurée à SH sur le Maroni. La montée des eaux correspond aux mois de décembre à mars ; les hautes eaux sont enregistrées d'avril à juin ; la descente des eaux à lieu en septembre et octobre ; les basses eaux correspondent aux mois d'octobre et de novembre. Le losange bleu correspond au débit moyen annuel.

Néanmoins, les seuils de pollution doivent prendre en considération les valeurs maxima et minima de chaque période du cycle hydrologique enregistrées durant des périodes non perturbées. En utilisant les données pour la période 2000 - 2005 (moins impactées par les

activités aurifères), en fonction des cycles hydrologiques et des percentiles (90 % pour la limite "Médiocre - Mauvais", 75 % pour la limite "Moyen - Médiocre", 50 % pour la limite "Bon - Moyen", 25 % pour la limite "Très bon- Bon) sur les valeurs maxima moyennes annuelles, les classes suivantes sont déclinées (**Tableau 5-7**). On observe qu'elles diffèrent peu entre elles et sont inférieures à celles proposées par le PAG.

Tableau 5-7 : Classes de seuils de turbidité (en NTU) selon les périodes du cycle hydrologique pour la période 2000-2005 sur le Maroni à SH. La montée des eaux correspond aux mois de décembre à mars ; les hautes eaux sont enregistrées des mois d'avril au mois de juin ; la descente des eaux a lieu en septembre et octobre ; les basses eaux correspondent aux mois d'octobre et de novembre.

	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

5.4.2 Carbone organique dissous

La teneur en COD est un paramètre important en relation avec la qualité de l'eau, notamment pour les eaux potables. Elle correspond à la quantité de matières organiques dégradées. Les seuils proposés en France ont été conservés pour la Guyane ("Très Bon" jusqu'à 5 mgC l⁻¹, "Bon" jusqu'à 7 mgC l⁻¹, "Moyen" à partir de 10 mgC l⁻¹ et "Médiocre" à partir de 15 mgC l⁻¹) ([DEAL Guyane, 2014](#)).

Pour les données collectées mensuellement entre 2004 et 2016 (**Tableau 5-8**) à SH et en bord de berge au Saut Maripa, la médiane et le 3^{ème} quartile sont légèrement plus élevés pour le Maroni que pour l'Oyapock (5,05 contre 4,68 mgC l⁻¹ - 6,92 et 6,26 mgC l⁻¹) et correspondent aux classes "Très bon" et "Bon" (**Tableau 5-9**). Le maximum est cependant deux fois plus élevé pour l'Oyapock que pour le Maroni et a été mesuré en 2005 et 2010, équivalent au seuil "Médiocre".

Des valeurs similaires (entre 3,2 et 10,8 mgC.l⁻¹) ont été mesurées pour les eaux des fleuves Maroni à Maripasoula, sur l'Inini et à Langa tabiki, Oyapock à Camopi et à Saut Maripa, Sinnamary dans le Courcibo Lucifer, à Takari Tanté et à Kerenroch ainsi que dans la Malmanoury et le Karouabo pour les années 1998-1999 ([Richard and Cerdan, 2000](#)). Il n'est à noter aucun changement entre cette période et 2016.

Tableau 5-8 : Statistiques des concentrations en COD (en mgC.l⁻¹), mesurées entre 2004 et 2016, sur le Maroni (SH) et sur l'Oyapock (SM).

Statistique	SH	SM
Minimum	2,04	1,93
Maximum	21,91	50,43
1er Quartile	3,48	3,48
Médiane	5,05	4,68
3ème Quartile	6,92	6,26
Somme	1117	948
Moyenne	5,82	6,12
Ecart-type (n)	3,19	6,21
Nombre	204	204

En comparaison, les gammes relevées de COD dans les eaux noires de la rivière Caura variaient entre 2,08 et 4,93 mgC l⁻¹ (Mora *et al.*, 2014) alors qu'elles étaient de 2 à 18 mgC l⁻¹ dans la rivière Negro, entre 2 et 12 mgC l⁻¹ dans les eaux claires de la rivière Trombetas (Moreira-Turcq *et al.*, 2003). Aucune valeur aussi élevée de 22 et 51 mgC l⁻¹ n'a été mesurée sur l'Amazone et l'Orénoque.

Tableau 5-9 : Fréquences annuelles et en pourcentage des concentrations de COD, mesurées sur la période 2004-2016, à SH sur le Maroni et à SM sur l'Oyapock.

COD (SH) (en mgC.l ⁻¹)	2004 (%)	2005 (%)	2006 (%)	2007 (%)	2008 (%)	2009 (%)	2010 (%)	2011 (%)	2012 (%)	2013 (%)	2014 (%)	2015 (%)
0,1 - 5	50	9	58	80	67	56	25	42	50	63	67	25
5 - 7	30	188	25	20	33	33	17	42	33	38	22	42
7 - 10	20	27	17			11	17	8	8		11	25
10 - 15		45					17	8	8			8
15 - 20												
> 20												
COD (SM) (en mgC.l ⁻¹)												
0,1 - 5	90	8	73	80	92	80	27	42	42	50	89	44
5 - 7		42	18	20	8		36	33	25	13	11	44
7 - 10	10	8				10	18	25	25	28		11
10 - 15		25	9			10						
15 - 20							9					
> 20		17					9		8			

En utilisant la méthode des percentiles (voir paragraphe 5.4.1) on obtient les seuils présentés dans le **Tableau 5-10**. Une légère différence de classes entre les basses eaux et les hautes eaux est observée.

Tableau 5-10 : Classes de seuils des concentrations de COD (en mgC.l⁻¹) des données de 2004 à 2015 de l'Oyapock à SM: pour la montée de eaux (décembre à mars), les hautes eaux (de avril à juin), la descente des eaux (en septembre et octobre), et les basses eaux (de octobre et à novembre).

	Montée eaux	Hautes eaux	Descente eaux	Basses eaux
Très-bon/Bon	2	3	2	2
Bon/Moyen	5	6	4	3
Moyen/Médiocre	7	9	7	5
Médiocre/Mauvais	8	11	8	6

5.4.3 Carbone organique particulaire

Les concentrations de COP ont été mesurées entre Octobre 2014 et Octobre 2016 au Saut Hermina sur le Maroni sur quatre points en surface et au Saut Maripa sur l'Oyapock au niveau de la berge en rive gauche. Le maximum 5,50 mgC.l⁻¹ pour le Maroni correspond à 1,7 fois celui de l'Oyapock (3,16 mgC.l⁻¹). Les valeurs minima sont quantitativement similaires (0,45 mgC.l⁻¹ ; 0,68 mgC.l⁻¹). Les 1^{er} et 3^{ème} quartiles sont plus élevés pour le Maroni (1,09 mgC.l⁻¹ ; 1,95 mgC.l⁻¹ : **Tableau 5-11**).

En utilisant la méthode des percentiles (**paragraphe 5.4.1**) on obtient les classes suivantes : 1 mgC.l⁻¹ pour la limite "Très bon- Bon" ; 3 mgC.l⁻¹ pour la limite "Bon -Moyen" ; 4 mgC.l⁻¹ pour la limite "Moyen - Médiocre" ; 5 mgC.l⁻¹ pour la limite "Médiocre - Mauvais". Des valeurs "Mauvaises -Médiocres" de COP ont été relevées durant la montée et la descente des eaux sur le Maroni alors que pour les mêmes périodes sur l'Oyapock elles sont classées dans le "Bon - Moyen".

Tableau 5-11 : Statistiques des concentrations des COP (en mgC.l⁻¹), mesurées entre Octobre 2014 et Octobre 2016, sur le Maroni (SH) et sur l'Oyapock (SM) et classes de qualité proposées à partir des données de terrain.

Statistique	SH	SM	COP	
Minimum	0,45	0,68	Très-bon/Bon	1
Maximum	5,50	3,16	Bon/Moyen	3
1er Quartile	1,09	0,88	Moyen/Médiocre	4
Médiane	1,52	1,26	Médiocre/Mauvais	5
3ème Quartile	1,95	1,70		
Somme	220	50		
Moyenne	1,69	1,32		
Ecart-type (n)	0,91	0,54		
Nombre	130	38		

Des valeurs similaires (entre 0,7 et 3,2 mgC.l⁻¹) de COP ont été mesurées en 1998-1999 pour les eaux des fleuves Maroni à Maripasoula, sur l'Inini et à Langa tabiki, Oyapock à Camopi et à Saut Maripa, Sinnamary dans le Courcibo Lucifer, à Takari Tanté et à Kerenroch ainsi que dans la Malmanoury et le Karouabo (Richard and Cerdan, 2000). La valeur maximale correspond à une mesure réalisée sur la rivière Petit Inini très impactée par les activités aurifères et la valeur minimale est une valeur collectée sur la Comté.

Dans les eaux de transition, les charges de COP ont varié de 2,50 à 9,20 mgC.l⁻¹ durant la saison sèche et de 3,13 et 18,75 durant la saison des pluies (Guiral, 2009) et étaient plus élevées que dans les eaux continentales.

Dans les masses d'eaux littorales, les concentrations en COP ont varié entre 0,49 et 1,61 mgC.l⁻¹ durant la saison sèche avec des valeurs plus élevées à mi-côte entre l'îlet la Mère et les îles du Salut certainement en lien avec la biomasse phytoplanctonique. Durant la saison des pluies, un gradient d'est en ouest avec des valeurs allant de 0,48 et 2,10 mgC.l⁻¹ a été observé pour ces mêmes stations (Guiral, 2009). Les charges en COP sont donc plus élevées dans les masses d'eaux de transition que dans les masses d'eaux côtières.

Les concentrations de POC trouvées dans le Maroni et l'Oyapock sont plus élevées que celles rapportées par Mora *et al.* (2014) pour les rivières Caura (de 0,17 à 1,89 mgC l⁻¹), Apure (0,33 - 2,40 mgC l⁻¹) et Orénoque (0,24 - 2,29 mg C l⁻¹) et plus élevées que les valeurs de POC rapportées pour les fleuves Négro (0,26 - 1,09 mgC l⁻¹), Trombetas (0,34 - 0,82 mgC l⁻¹) et d'autres rivières aux eaux claires du bassin amazonien (Moreira-Turcq *et al.*, 2003). Cependant, des valeurs similaires de POC ont été trouvées par Moreira-Turcq *et al.*, (2003) dans les rivières Abuna et Madère (de 3,95 à 7,36 mgC l⁻¹), qui sont des tributaires aux eaux claires du fleuve Amazone.

5.4.4 Azote organique particulaire

Comme pour les concentrations de COP, les charges en NOP ont été mesurées entre Octobre 2014 et Octobre 2016 au Saut Hermina sur le Maroni sur quatre points en surface et au Saut Maripa sur l'Oyapock au niveau de la berge. Au niveau du Saut Hermina la valeur maximum de NOP mesurée est de 0,76 mgN.l⁻¹ soit 2,1 fois celle de l'Oyapock au Saut Maripa (0,36 mgN.l⁻¹) alors que les valeurs minima sont quantitativement similaires (~ 0,1 mgN.l⁻¹). Tout comme pour les COP, les 1^{er} et 3^{ème} quartiles sont plus élevés pour le Maroni (0,21 mgN.l⁻¹ et 0,31 mgN.l⁻¹ : **Tableau 5-12**).

En utilisant la méthode des percentiles (**paragraphe 5.4.1**) on obtient les classes suivantes : 0,19 mgC.l⁻¹ pour la limite "Très bon- Bon" ; 0,38 mgC.l⁻¹ pour la limite "Bon - Moyen" ; 0,57 mgC.l⁻¹ pour la limite "Moyen - Médiocre" ; 0,68 mgC.l⁻¹ pour la limite "Médiocre - Mauvais". Une seule valeur mesurée durant la montée des eaux est classée dans les seuils "Mauvais -Médiocre". Les autres valeurs sont classées dans le "Bon-Moyen" et peu de valeurs sont dans le "Très-Bon - Bon".

Des valeurs entre 0,06 et 0,31 mgN.l⁻¹ de NOP ont été mesurées en 1998-1999 dans les eaux des fleuves Maroni (Maripasoula, Inini et Langa Tabiki), Oyapock (Camopi et Saut Maripa), Sinnamary (Courcibo Lucifer, Takari Tanté et Kerenroch) ainsi que dans la Comté, la Malmanoury et le Karouabo ([Richard and Cerdan, 2000](#)). Comme pour le COP, la valeur maximale est mesurée sur la rivière Petit Inini et la valeur minimale provient de la Comté. Ces concentrations sont similaires à celles obtenues sur l'Oyapock. Au contraire les valeurs mesurées sur le Maroni durant cette étude sont deux fois plus élevées.

Tableau 5-12 : Statistique des concentrations en NOP (en mgN.l⁻¹), mesurées entre Octobre 2014 et Octobre 2016, sur le Maroni (SH) et sur l'Oyapock (SM) et classes de qualité proposées à partir des données de terrain.

Statistique	SH	SM	
Minimum	0,09	0,12	NOP
Maximum	0,76	0,36	Très-bon/Bon 0,19
1er Quartile	0,21	0,16	Bon/Moyen 0,38
Médiane	0,25	0,19	Moyen/Médiocre 0,57
3ème Quartile	0,31	0,23	Médiocre/Mauvais 0,68
Somme	30	8	
Moyenne	0,28	0,20	
Ecart-type (n)	0,12	0,05	
Nombre	107	38	

Dans les eaux de transitions des fleuves Mahury, Cayenne, Kourou et Mana, [Guiral \(2009\)](#) a mesuré durant la saison sèche de 2009 des concentrations allant de 0,11 à 1,19 mgN.l⁻¹ et des valeurs plus élevées durant la saison des pluies (0,16 à 1,86 mgN.l⁻¹). Les valeurs maxima et minima durant la saison des pluies sont observées dans l'estuaire de la Rivière de Cayenne alors qu'elles sont observées dans l'estuaire du fleuve Mana durant la saison sèche, en lien avec les hautes et basses eaux.

Pour les masses d'eaux littorales, les concentrations en NOP ont varié entre 0,07 et 0,33 mgN.l⁻¹ durant la saison des pluies et de 0,07 à 0,16 mgN.l⁻¹ durant la saison sèche avec un gradient d'est en ouest et des valeurs deux fois plus élevées à mi-côte en face de Cayenne ([Guiral, 2009](#)). Tout comme observé pour les valeurs de COP, les charges en NOP sont plus

importantes dans les masses d'eaux de transition et équivalentes pour les eaux continentales et littorales. Cela peut s'expliquer par différents apports, autochtones et allochtones.

Bien que la gamme des concentrations de NOP soit plus élevée dans le Maroni que dans l'Oyapock, les deux rivières présentent de très faibles concentrations de NOP par rapport à la gamme (0,2 à 29,7 mgN.l⁻¹) observée dans les rivières de l'Asie du Sud et du Sud-Est (Ziegler *et al.*, 2016) et qui reflètent des taux d'érosion exceptionnellement élevés favorisés par des processus naturels (événements tectoniques et climatiques) et les activités anthropiques (changement d'affectation des terres) dans les régions d'Asie. Elles sont cependant semblables à celles observées dans la rivière Negro (0,15 mgN.l⁻¹) (Pourriot and Meybeck, 1997 10144) et proches de la valeur médiane globale des eaux de surface (0,25 mgN.l⁻¹) à l'exclusion de l'Europe (Heathwaite *et al.*, 1996 1884) qui a une concentration moyenne de 4,5 mgN.l⁻¹) attribuée à la forte charge anthropique d'azote (Heathwaite *et al.*, 1996 1884).

5.4.5 Chlorophylle *a*

Les pigments chlorophylliens permettent d'évaluer la biomasse phytoplanctonique et le potentiel écologique d'une masse d'eau. Ils se développent lorsque la lumière y pénètre et leur développement dépend de la quantité de sels minéraux qui y sont présents. Une trop importante concentration est indicatrice d'un problème d'eutrophisation. Les classes de seuils de chlorophylle *a* établies pour la Métropole n'ont pas été définies comme pertinentes pour la Guyane (DEAL Guyane, 2014) et encore peu de valeurs sur les fleuves permettaient d'évaluer la pertinence de ce paramètre.

Dans cette étude, nous avons suivi les concentrations de chlorophylle *a* entre Octobre 2014 et Octobre 2016 au Saut Hermina sur quatre points en surface et au Saut Maripa au niveau de la berge. La médiane est plus élevée pour le Maroni que pour l'Oyapock (1,38 contre 0,45 µg.l⁻¹) ainsi que les 1^{er} et 3^{ème} quartiles (1,49 contre 3,74 µg.l⁻¹ : **Tableau 5-13**). Ces concentrations mesurées sont très basses en comparaison aux seuils proposés par l'ancienne grille SEQ-eau V2 pour la France ("Très bon" jusqu'à 10 µg.l⁻¹, "Bon" jusqu'à 60 µg.l⁻¹, "Moyen" à partir de 120 µg.l⁻¹ et "Médiocre" à partir de 240 µg.l⁻¹) (Ministère de l'Ecologie and Agences de l'eau, 2003). Selon ces valeurs, les concentrations chlorophylliennes pour les eaux douces de surface des fleuves Maroni et Oyapock peuvent donc être considérées comme "Très bon" avec un impact très faible et ponctuel des activités humaines.

En utilisant la méthode des percentiles (**paragraphe 5.4.1**) on obtient : 1,85 $\mu\text{g.l}^{-1}$ pour la limite "Très bon- Bon" 3,7 $\mu\text{g.l}^{-1}$ pour la limite "Bon -Moyen" ; 5,54 $\mu\text{g.l}^{-1}$ pour la limite "Moyen - Médiocre" ; 6,65 $\mu\text{g.l}^{-1}$ pour la limite "Médiocre - Mauvais". Les valeurs supérieures à 1 $\mu\text{g.l}^{-1}$ ont été relevées durant l'étiage pour les deux fleuves lorsque les eaux sont basses et la turbidité aussi.

Tableau 5-13 : Statistiques des concentrations en chlorophylle a (en $\mu\text{g.l}^{-1}$), mesurées entre Octobre 2014 et Octobre 2016, sur le Maroni (SH) et sur l'Oyapock (SM) et classes de qualité proposées à partir des données de terrain.

Statistique	SH	SM		
Minimum	0,07	0,01		
Maximum	7,39	3,51		
1er Quartile	0,49	0,15		
Médiane	1,38	0,45		
3ème Quartile	3,74	1,46		
Somme	232	28		
Moyenne	2,13	0,88		
Ecart-type (n)	1,81	1,00		
Nombre	109	32		

Chl-a	
Très-bon/Bon	2
Bon/Moyen	4
Moyen/Médiocre	6
Médiocre/Mauvais	7

A titre de comparaison, entre 2013 et 2014 et dans les masses d'eaux de surface continentales des fleuves guyanais, des taux moyens de 3,3 $\mu\text{g.l}^{-1}$ en 2013 et de 2 $\mu\text{g.l}^{-1}$ en 2014 ont été mesurés aux stations de la DCE (OEG, 2016) avec un maximum de 9 $\mu\text{g.l}^{-1}$ sur l'Approuague au Saut Grand Machicou. D'autres valeurs similaires à celles mesurées dans cette étude sont proposées pour diverses stations sur le Maroni, l'Oyapock le Sinnamary, la Malmanoury et le Karouabo (Richard and Cerdan, 2000).

Dans les masses d'eaux littorales Guiral (2009) a montré qu'il existe un gradient côtier d'est en ouest pour les concentrations en chlorophylle *a* avec des valeurs qui évoluent entre 1 et 25 $\mu\text{g.l}^{-1}$ durant la saison sèche 2009 et entre 2,5 et 7,5 $\mu\text{g.l}^{-1}$ durant la saison des pluies. Les valeurs les plus élevées étant celles relevées à mi-côte en face de Cayenne alors que les plus faibles sont relevées aux îles du Salut. La biomasse phytoplanctonique des eaux côtières est donc relativement plus élevée que celle des eaux continentales avec des valeurs faibles durant la saison des pluies.

Les concentrations de Chl-a relevées dans le Maroni et dans l'Oyapock, sont supérieures aux valeurs rapportées par Lewis (1988) pour les rivières Apure, Caura et le fleuve Orénoque (moyenne : 0,36 $\mu\text{g.l}^{-1}$, entre 0,01 et 0,04 $\mu\text{g.l}^{-1}$ et entre 0,11 et 0,19 $\mu\text{g.l}^{-1}$, respectivement), inférieures à celles trouvées dans le courant dominant du fleuve Amazone (moyenne : 5 $\mu\text{g.l}^{-1}$)

et beaucoup plus basses que les valeurs relevées dans les lacs très productifs des plaines alluviales de l'Amazonie (30 à 50 $\mu\text{g.l}^{-1}$) (Moreira-Turcq *et al.*, 2013).

5.4.6 Rapport Carbone/Azote

Le rapport C/N est un indicateur qui renseigne sur l'origine de la matière organique transportée. En général, les valeurs normales de la matière organique terrestre ont une large gamme (environ 12-400), tandis que les rapports C/N du phytoplancton sont moins variables (environ 6 - 8) (Hedges *et al.*, 1986; Hedges *et al.*, 1997; Onstad *et al.*, 2000). En général, ce rapport est très constant dans les rivières et principalement entre 8 et 10, similaire aux valeurs trouvées dans les couches superficielles du sol (Meybeck, 1982; Thurman, 1985).

Nous l'avons mesuré avec les données de COP et de NOP collectées entre Octobre 2014 et Octobre 2016, au Saut Hermina et au Saut Maripa. Les valeurs varient entre 3,5 et 12,31 pour le Maroni et entre 2,88 et 11,46 pour l'Oyapock (**Tableau 5-14**). Les valeurs médianes sont de l'ordre de 6,23 pour l'Oyapock et 5,29 pour le Maroni ce qui témoigne d'une origine majoritairement locale (biomasse phytoplanctonique).

En utilisant la méthode des percentiles (**paragraphe 5.4.1**) on obtient les limites proposées dans le **Tableau 5-14**. Quelques valeurs ponctuelles > 9 sont enregistrées durant la montée des eaux les classant en "Mauvaises -Médiocres". Quelques valeurs sont classées dans les seuils "Moyen -Médiocres" également durant la montée des eaux. Les basses eaux sont plutôt classées dans les Bon -Moyens et "Très Bon - Moyen" avec des seuils inférieurs à 3.

Tableau 5-14 : Statistiques du rapport C/N, mesuré entre Octobre 2014 et Octobre 2016, sur le Maroni (SH) et sur l'Oyapock (SM) et classes de qualité proposées à partir des données de terrain de carbone et d'azote particulaire.

Statistique	SH	SM	C/N	
Minimum	3,50	2,88		
Maximum	12,31	11,46		
1er Quartile	4,87	5,17	Très-bon/Bon	3
Médiane	5,29	6,23	Bon/Moyen	6
3ème Quartile	7,55	8,32	Moyen/Médiocre	9
Somme	670	245	Médiocre/Mauvais	11
Moyenne	6,26	6,80		
Ecart-type (n)	2,08	2,22		
Nombre	107	36		

Dans les eaux de transition des fleuves Mahury, Cayenne, Kourou et Mana un rapport C/N allant de 7 à 16 avec une valeur minimum pour le fleuve Kourou et maximum pour le

fleuve Mana a été mesuré durant la saison sèche (Guiral, 2009). Ces valeurs indiquent que d'un point de vue qualitatif le fleuve Mana a une proportion plus importante de composés en cours de minéralisation d'une origine terrigène. Le fleuve Mana étant largement impacté par les activités aurifères. Les valeurs basses indiquent au contraire, une production locale plus importante.

Pour les eaux littorales guyanaises, les stations à mi-distance de la côte présentent des concentrations en C et N particulières plus importantes que les stations du large (Guiral, 2009). Le rapport C/N varie entre 7 et 14 durant la saison sèche avec une origine certainement variée d'apports. Durant la saison des pluies il évolue entre 10 et 13 traduisant un apport terrigène légèrement supérieur.

Ces gammes mesurées sur les fleuves Maroni et Oyapock diffèrent de celles trouvées dans le courant dominant du fleuve Amazone (Moreira-Turcq *et al.*, 2013), qui ont montré une plus grande variabilité (de 6 à 18). Enfin, des valeurs similaires ont été mesurées dans les rivières Solimões (8,6), Mackenzie (7,9) et dans le fleuve Mississippi (8,1) (Meybeck, 1982).

5.4.7 pH

Le pH est un indicateur de l'acidité de l'eau. Les valeurs basses (< 5) sont associées aux eaux noires alors que les valeurs élevées (> 8) sont mesurées dans les eaux blanches. Au contraire les valeurs intermédiaires (6 - 7) sont associées à des eaux claires (Sioli, 1984). La valeur la plus élevée mesurée pour tous les échantillons collectés entre 2004 et aujourd'hui, est de 7,49 en 2016 sur le Maroni au Saut Hermina et de 7,09 pour l'Oyapock en 2015 au Saut Maripa. Les valeurs les plus basses sont de 5,07 en 2006 pour le Maroni et 5,48 en 2005 pour l'Oyapock (**Tableau 5-15**). Bien que leurs valeurs extrêmes soient différentes ils présentent des médianes similaires dans les neutres.

Dans les eaux de transition en fin de saison des pluies ainsi que durant les hautes eaux et les basses eaux dans l'estuaire de l'Iracoubo, de la Mana, du Kourou, du Mahury, les valeurs mesurées étaient semblables. Elles étaient cependant légèrement plus élevées dans l'estuaire du fleuve Cayenne avec une influence de la marée. Dans les eaux littorales, les pH sont plus basiques entre 8,13 à 8,29 (Guiral, 2009).

On note alors un gradient des pH allant des eaux de surface continentales vers les eaux de transition puis les eaux littorales avec un phénomène de marée sur les pH dans les eaux de transition.

Tableau 5-15 : Statistiques des valeurs de pH, mesurées entre 2004 et 2016 sur le Maroni (SH) et sur l'Oyapock (SM).

Statistique	SH	SM
Minimum	5,07	5,48
Maximum	7,49	7,09
1 ^{er} Quartile	6,38	6,33
Médiane	6,72	6,48
3 ^{ème} Quartile	7,05	6,72
Somme	1710	1134
Moyenne	6,71	6,48
Ecart-type (n)	0,44	0,32
Nombre	255	175

En 2013-2014, le rapport de l'Office de l'Eau sur l'évaluation de l'état des masses d'eau guyanaises (OEG, 2016) propose une gamme de valeurs de pH pour les fleuves guyanais entre 4,9 et 7,1 ce qui correspond aux gammes mesurées dans cette étude (**Tableau 5-16**).

Les seuils de pH proposés qui semblent bien adaptés aux fleuves locaux sont "Très bon-Bon" entre 7,5 et 7; "Bon -Moyen" entre 7 et 6,5, "Moyen - Médiocre" entre 6,5 et 5,5 et "Médiocre - Mauvais" à partir 5.

Tableau 5-16 : Fréquences des données mensuelles de pH en pourcentages collectées sur le Maroni à SH et sur l'Oyapock à SM, sur la période 2004 2016.

pH (SH)	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
7,5 - 8												
6,5 - 7,5	20	25	42	40	17	90	50	42	67	63	73	92
6 - 6,5	70	25	50	60	50	10	50	5	33	38	27	8
5,5 - 6	10	50			33							
5 - 5,5			8									
pH (SM)												
7,5 - 8												
6,5 - 7,5	20	11	25	20	33	80	58	33	50	13	55	92
6 - 6,5	70	11	75	80	42	20	33	67	50	88	45	8
5,5 - 6	10	67			25		8					
5 - 5,5		11										

5.4.8 Conductivité

La conductivité fournit une indication sur la quantité de matières dissoutes dans l'eau. Les valeurs de conductivité mesurées entre 2004 et 2016 varient entre 17 et 46 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ au Saut

Hermina et entre 16 et 42 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ au Saut Maripa pour des moyennes respectives de 26 et 22 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ (**Tableau 5-17**). Ces valeurs indiquent des eaux très faiblement minéralisées dues aux sols peu chargés en éléments nutritifs. Les tableaux des fréquences confirment des valeurs basses majoritairement comprises entre 15 et 25 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ au Saut Maripa et entre 20 et 30 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ au Saut Hermina (**Tableau 5-18**).

Tableau 5-17 : Statistiques des données de conductivité de l'eau ($\mu\text{S.cm}^{-1}$ à 25°C), mesurées entre 2004 et 2016 sur le Maroni (SH) et sur l'Oyapock (SM).

Statistique	SH	SM
Minimum	17,30	16,00
Maximum	45,80	42,00
1er Quartile	23,00	19,00
Médiane	25,20	21,35
3ème Quartile	29,10	23,50
Somme	8669	3912
Moyenne	26,35	21,98
Ecart-type (n)	4,47	3,52
Nombre	337	178

Les seuils de pH proposés et qui semblent bien adaptés aux fleuves locaux sont "Très bon- Bon" jusqu'à 25 $\mu\text{S.cm}^{-1}$; "Bon -Moyen" entre 25 et 35 $\mu\text{S.cm}^{-1}$; "Moyen - Médiocre" entre 25 et 30 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ et "Médiocre - Mauvais" à partir 30.

En comparaison, l'Office de l'Eau évalue la conductivité électrique des masses d'eau continentales guyanaises entre 15 et 78 $\mu\text{S.cm}^{-1}$, mesurées respectivement à la station de la rivière Armontabo dans le bassin de l'Oyapock et dans la crique à l'est sur la Mana ([OEG, 2016](#)).

Des valeurs de 37 800 et 25 200 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ ont été mesurées dans les eaux de transition en 2009, en fin de saison des pluies, en haute mer et basse mer dans l'estuaire du fleuve de Cayenne, contre 9620 - 358 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ pour l'estuaire du fleuve Mahury, entre 4 320 et 90 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ pour l'estuaire du Kourou et, entre 50 et 44 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ pour l'estuaire de la Mana ([Guiral, 2009](#)). Durant la saison sèche des valeurs entre 51 600 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ à la mi-côte de Cayenne et 53 300 $\mu\text{S/cm}^{-1}$ aux îles du Salut contre 30 167 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ à mi-côte et 42 233 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ aux îles du Salut durant la saison des pluies ont été estimées ([Guiral, 2009](#)).

Tableau 5-18 : Fréquences en pourcentages des données mensuelles de conductivité électrique (en $\mu\text{S.cm}^{-1}$) collectées sur le Maroni à SH et sur l'Oyapock à SM, sur la période 2004 2015.

CE (SH) ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	2004 (%)	2005 (%)	2006 (%)	2007 (%)	2008 (%)	2009 (%)	2010 (%)	2011 (%)	2012 (%)	2013 (%)	2014 (%)	2015 (%)
15 -20	20	33	8	60	42	30	42	50	42	50	64	25
20 - 25	60	44	75	40	50	30	50	50	42	25	46	17
25 -30	10	22	8		8	40	8		17	25		50
30 -35												8
> 35	10		8									
15 -20	20	33	8	60	42	30	42	50	42	50	64	25
CE (SM) ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)												
15 -20								8				25
20 - 25	40	33	55	50	50	50	58	50	67	75	55	7
25 -30	20	50	45	50	33	40	42	42	17	25	45	50
30 -35	30	17							117			8
> 35	10											
15 -20								8				25

5.5 Conséquences d'un changement dans la dynamique hydro-sédimentaire pour la qualité des eaux, le développement économique du territoire, la santé et l'environnement

Le défi est de contrôler le développement des activités minières parce que les régions amazoniennes et du bouclier des Guyanes sont les poumons de la Terre, les points chauds de la biodiversité et les principales réserves d'eau douce du monde. En effet, il n'existe que très peu de rivières dans le monde qui n'ont pas été contaminées et impactées par l'homme (Wohl and Merritts, 2007). De tous les sous-continent, l'Amérique du Sud est celui où la population dispose par habitant de la plus grande quantité d'eau ($7,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}/\text{pers.}$), répartie principalement dans le nord (Shiklomanov, 1998) dont $339\,000 \text{ m}^3/\text{an}/\text{pers.}$ au Guyana et $200\,000 \text{ m}^3/\text{an}/\text{pers.}$ au Suriname (FAO, 2015). La Guyane disposant de la plus grosse quantité d'eau par habitant ($800\,000 \text{ m}^3/\text{an}/\text{pers.}$).

Une coopération interdisciplinaire entre les régions frontalières et transfrontalières est nécessaire pour définir d'un seuil de déforestation à ne pas atteindre pour éviter l'augmentation des inondations et la perte importante des services écosystémiques rendus aux populations. Par ailleurs, une surveillance accrue des activités minières et de leurs pollutions tant en termes de rejets de matières en suspension que d'hydrocarbures, de mercure ou encore de cyanure, doit être réalisée et des seuils à ne pas dépasser doivent être décidés communément et imposés aux orpailleurs. A ce jour, les normes imposées par la DCE sont les plus avancées de tous les pays d'Amérique du Sud, en termes de gestion et de protection de la qualité de l'eau et peuvent servir de base à ce travail.

Les études réalisées en Guyane Française et au Brésil ont apporté une meilleure connaissance de ces milieux aquatiques et nous pouvons proposer une gestion commune de ces territoires. Ainsi, les institutions gouvernementales françaises doivent surveiller et gérer ces activités en collaboration avec les institutions du Suriname et du Brésil car tout indique que dans le futur, les activités de déforestations et minières augmenteront et entraîneront une irréversibilité supplémentaire. L'augmentation des mines en termes de nombre et de surface peut avoir des conséquences très graves pour l'économie des territoires, la santé des habitants et l'environnement.

En premier lieu à une échelle locale, la déforestation et la modification des couvertures végétales dans les régions tropicales et équatoriales entraîne une augmentation du ruissellement de l'eau sur les sols, ainsi qu'une augmentation des débits des fleuves et plus globalement une modification du bilan hydrique (Fritsch, 1992; Coe *et al.*, 2009; Costa *et al.*, 2013). Dans le bassin du Tocantins (370 000 km²) au Brésil, pour une déforestation > 30 %, le débit a augmenté de 25 % en lien d'une part avec la déforestation et d'autre part avec l'augmentation des précipitations (Coe *et al.*, 2009). Dans un deuxième temps et à une échelle plus large, la déforestation dans le bassin amazonien a entraîné une diminution des précipitations (diminution de l'évapotranspiration) s'accompagnant d'une réduction des écoulements et donc du débit des rivières et plus globalement des disponibilités en eau (Espinoza Villar *et al.*, 2009). Quels seront donc les impacts de l'augmentation de la déforestation dans les bassins versants de l'Amapa et du Suriname, sur les débits des bassins guyanais ?

En Guyane Française, Fritsch *et al.* (1992) ont démontré que la réaction hydrologique de chaque petit bassin versant (400 m² à 1,5 ha) dépend de sa couverture de sol et de sa capacité à drainer les précipitations et le ruissellement. Au cours de la saison des pluies, ils ont calculé une augmentation de 60 à 130 % du ruissellement juste après la déforestation et de 66 à 199 %

quelques mois après. Ils ont également montré que les activités agricoles telles que les exploitations bovines ont accéléré l'imperméabilité des sols et augmenté le ruissellement. Actuellement, les bassins versants du Maroni et de l'Oyapock sont encore peu impactés en termes de surfaces et d'activités humaines (< 2 %). Notre analyse sur les tendances des minima, des moyennes et des maxima annuels des débits de 1953 à aujourd'hui aux principales stations de Langa Tabiki et du Saut Maripa n'a montré aucun changement significatif. La surveillance est cependant essentielle dans les années à venir car de nombreux projets de barrages hydroélectriques et d'aménagements de berges sont programmés. Des données constantes et à long terme des surfaces déboisées, urbanisées et des précipitations sont nécessaires pour surveiller la régularité des débits de ces fleuves. Une augmentation des débits des fleuves Maroni et Oyapock pourrait avoir des conséquences catastrophiques pour les villages aménagés le long de ces cours d'eau qui pourraient subir alors des submersions temporelles régulières.

En deuxième lieu et compte tenu du fait que les MES sont fortement corrélées avec les sédiments de fonds du lit fluvial, leur augmentation, causée par les activités humaines telles que les barges d'orpaillage, avec destruction du sol par les lances à eaux, peut affecter la navigation à long terme (Hettler *et al.*, 1997; Dodds *et al.*, 2013; Niane *et al.*, 2014). En effet, le lit du fleuve Maroni a une pente douce (moins de 1 %) et une profondeur maximale estimée à 8 mètres en aval du Tapanahoni, avec une valeur moyenne d'environ 3 à 4 mètres durant les hautes eaux, de sorte que les MES des activités minières se déposent rapidement dans le lit du fleuve en raison de leur taille élevée (Guedron *et al.*, 2009; Dedieu *et al.*, 2014). Lors des différentes campagnes de terrain entre 2014 et 2016, plusieurs grandes barres de sables et de graviers ont été détectées notamment dans la partie inférieure du Maroni, du Tapanahoni au Saut Hermina et entre Papaïchton et les abattis Cottica, la région entre les abattis Cottica et de Grand-Santi étant une zone de transit de cascades et de rapides. Des apports supplémentaires de matières dans le cours des fleuves peuvent être préjudiciables au déplacement des pirogues avec également des conséquences sur la sécurité des personnes.

Une étude récente réalisée en Guyane Française (Marteau *et al.*, 2011) a proposé d'extraire les sédiments accumulés par les activités minières dans les lits des fleuves et rivières pour les utiliser dans la construction alors que l'extraction en lit mineur a été interdite en France puisqu'elle peut avoir des conséquences sur la morphologie des cours d'eau et les populations aquatiques. Par exemple, la diminution des sédiments dans le lit du fleuve Garonne, résultant à la fois de la construction des barrages qui ont retenu les sédiments en amont et également de l'extraction industrielle du gravier dans les zones de stockage, a entraîné une érosion accélérée

des chenaux et des berges (Steiger *et al.*, 1998). Par conséquent, une étude d'impact sur les conséquences directes et indirectes des dépôts liés aux activités minières et de leurs extractions sur les processus hydro-géomorphologiques et les cycles géochimiques sont indispensables avant toute opération. Une deuxième perturbation du milieu peut remettre en suspension des particules nocives pour la santé et entraîner de nouveau, une perte de biodiversité, d'habitats, de diversité d'espèces, de diversité génétique et détruire le potentiel d'autoépuration et les services écologiques rendus par ces systèmes. Par ailleurs, les extractions peuvent entraîner des phénomènes d'érosion des berges. Des travaux de stabilisation de berges liés à des conséquences d'érosion, pourraient avoir un coût considérable pour les habitants et le gouvernement français.

Les changements de flux de matières transportés en suspension, charriés ou déposés ont montré qu'ils entraînent également des changements morphologiques dans les régions estuariennes, deltas et côtières (Brunnee and Toope, 2002; Blum and Roberts, 2009; Xu *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2011). Les barres de sables et de graviers déposées dans les cours sont ensuite transportées dans les estuaires, elles se déposent dans les deltas et parfois sont transférées à l'océan. En Guyane Française, les dépôts de matières dans le fleuve Maroni suggèrent également un apport important pour les plages côtières et les cheniers du Suriname. Dans un contexte où la côte guyanaise est fortement influencée par les bancs de vase qui longent les côtes amazoniennes jusqu'au delta de l'Orénoque, la surveillance des apports de sédiments et de leur granulométrie par les fleuves guyanais est importante afin de mieux comprendre leur rôle dans ce processus global.

En troisième lieu, les mines d'or ont des répercussions sur la vie aquatique des fleuves, des rivières et des ruisseaux car elles provoquent une augmentation de la turbidité de l'eau. Or, une concentration de MES dépassant les 30 mg.l⁻¹ peut entraîner des changements considérables sur la diversité des invertébrés aquatiques et des populations de poissons (Vigouroux *et al.*, 2005). Dans cette étude nous avons mesuré qu'en 2015, 67 % des valeurs étaient > à 20 mg.l⁻¹ et 45 % étaient > à 30 mg.l⁻¹ indiquant de possibles changements dans la dynamique des espèces aquatiques. Plus récemment, une comparaison de l'assemblage d'invertébrés dans des sites formellement touchés par l'extraction de l'or et sur des sites de référence (non impactés) en Guyane Française a été testée (Dedieu *et al.*, 2015). Les mesures ont été effectuées sur 19 cours d'eau en saison sèche où l'activité a cessé 2 ans auparavant. Les résultats ont montré que couramment dans les cours d'eau, les activités d'extraction de l'or changent les comportements des invertébrés aquatiques : leur acquisition de nourriture, leur respiration, leur locomotion (déplacements), mais aussi leur composition taxonomique et les caractéristiques des

communautés par rapport à la taille des sédiments qui changent. Ainsi, le problème pour l'écosystème aquatique n'est pas caractérisé uniquement par la contamination ponctuelle des mines, mais aussi par le temps de la contamination avec une résilience du milieu qui peut durer plusieurs dizaines voire centaines d'années. Enfin, une perte de la biodiversité aquatique peut avoir à long terme des conséquences sur la pêche et sur l'économie des villages car les poissons dépendent du zooplancton et du phytoplancton qui s'y développent et qui dépendent de la qualité du milieu.

En dernier lieu, une augmentation des flux de sédiments et du transport solide spécifique, causée par la remobilisation des sols en raison du changement de leur utilisation peut être un indicateur d'une aggravation de la santé des personnes via :

- ✚ La contamination au mercure (Hg) de toute la chaîne alimentaire aquatique (Fréry *et al.*, 2001; Mol *et al.*, 2001). En effet, en Guyane Française, Guedron *et al.* (2009) ont révélé qu'il existe une forte relation entre la concentration de Hg et la taille des particules fines (de 30 à 100 μm). Il faut donc s'attendre avec une augmentation des flux de matières à une progression des flux de mercure avec un possible lien avec les constats d'augmentation des taux de mercure dans les cheveux des habitants du Maroni et les poissons (comm.pers) ;
- ✚ La prolifération d'autres maladies en lien avec les eaux stagnantes des barranques d'orpaillage comme le paludisme et la dengue,
- ✚ La prolifération de bactéries et l'accumulation de contaminants, apportés par les sols et les activités humaines dans les eaux de surface et souterraines, avec des conséquences possibles sur le prix de l'eau potable. En effet, la majeure partie de la population à l'intérieur des terres utilise les eaux de surface pour les lessives, l'hygiène corporelle, la nourriture et les boissons avec un risque potentiel de contamination.

5.6 Conclusion générale

Cette thèse apporte de nouveaux éléments de réflexion sur les fonctionnements hydrologiques et sédimentaires dans trois fleuves (le Maroni, l'Oyapock et l'Orénoque) du bouclier des Guyanes. Elle constitue le premier travail de recherche du suivi des MES avec des mesures *in situ* et par télédétection et pour des classes d'eaux très différentes (eaux noires aux eaux blanches). C'est également le premier travail sur le suivi des paramètres physico-chimiques (Turbidité, pH, conductivité) et chimiques (COP, COD, Chl-a, NOP, MES) et ce en lien avec les processus naturels (précipitations, débits) et les activités anthropiques (zones urbaines, agricoles et minières). Les méthodes et les analyses des résultats ont montré les conclusions suivantes :

a) **Surfaces minières, agricoles et urbaines** : l'analyse des surfaces minières légales ou illégales a montré que dans le bassin du Maroni et sur un total de 34 sous-bassins versants, un nombre total de 18 ont été perturbés en 2014 (surface de 24 463 ha) par ces activités. La plupart des zones minières aurifères étaient situées dans la région frontalière du Suriname, certainement en lien avec la légalisation de cette activité en 2011. En comparaison, les zones artificielles et agricoles dans ce bassin en amont de la station SH représentaient 5 959 ha en 2011. Pour le bassin de l'Oyapock, les sous bassins versants impactés sont au nombre de 6 en 2014 (surface 1 874 ha) principalement localisés en Guyane Française. En comparaison, les zones artificielles et agricoles en 2011 en amont de la station SM représentaient 328 ha.

b) **Suivi des MES par télédétection** : les produits MOD/MYD09 à 8 jours de TERRA et AQUA apportent un considérable avantage pour le suivi à long terme des moyens et grands fleuves tropicaux. Le niveau de traitement de ces images fournit pour chaque pixel la meilleure observation à 8 jours limitant la présence d'ombres, de nuages et d'aérosols. Par ailleurs, l'exceptionnel jeu de données acquis par le réseau SNO-HYBAM depuis 2004 a permis de calibrer les images MODIS avec les MES *in situ* et de retracer l'historique des tendances de MES depuis 2001. Une différence relative de 25 % (erreur absolue de 7 mg.l⁻¹) pour le Maroni et de 32 % (erreur absolue de 21 mg.l⁻¹) sur l'Orénoque a été mesurée en adéquation avec les mesures réalisées sur l'Amazone et pour une large gamme de concentrations de matières.

c) **Débits fluviaux et écoulement spécifique fluvial** : aucun changement à long terme n'est observé sur les séries chronologiques des débits, avec le Test de Mann-Kendall, pour les fleuves Maroni (1951-2015), Oyapock (1953-2015) ainsi que pour les produits de précipitations (1978-2015). Aucun changement n'a non plus été détecté pour l'Orénoque. Le débit moyen

annuel spécifique mesuré est de $1\,282\,10^3\text{ m}^3.\text{km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur l'Orénoque, de $948\,10^3\text{ m}^3.\text{km}^{-2}$ pour le Maroni et de $1\,089\,10^3\text{ m}^3.\text{km}^{-2}$ pour l'Oyapock. A titre comparatif, en France métropolitaine, les débits spécifiques moyens des fleuves Rhône, Garonne, Loire et Seine sont de 501, 372, 225 et $256\,10^3\text{ m}^3.\text{km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ d'eau (Delmas *et al.*, 2012). Donc avec son débit spécifique moyen l'Oyapock se classe au premier rang français, suivi du Maroni et sont tous deux dans les mêmes ordres de grandeurs que les grands fleuves au monde.

d) **Variations spatiales et temporelles des MES** : dans les eaux des fleuves Maroni et Oyapock, des moyennes interannuelles de 22 mg.l^{-1} et respectivement de 9 mg.l^{-1} ont été mesurées. Selon les années, les charges sédimentaires moyennes en suspension du Maroni sont de 2 à 5 fois supérieures à celles de l'Oyapock, de 2 à 6 fois pour les valeurs maxima et de 1 à 8 fois pour les valeurs minima. Une tendance significative ($p \leq 0,05$) à l'augmentation des charges moyennes (+ 227 % entre 2001 et 2015), maxima (+ 342 % entre 2001 et 2015) et minima (+ 1 116% entre 2009 et 2013) a été observée principalement depuis 2009, sur les neuf stations virtuelles du Maroni, plus fortement pour celles localisées en aval du Tapanahoni. Aucune relation avec les débits n'a été détectée dans le bassin du Maroni. Pour l'Oyapock au Saut Maripa, une tendance à la diminution des charges moyennes (- 33 %), maxima (- 28 %), minima (- 33 %) a été observée depuis 2008. Des valeurs plus élevées ont cependant été relevées sur le Haut Oyapock en aval de la rivière Camopi entre 2011 et 2013. Les charges sédimentaires de l'Oyapock, contrairement au Maroni, sont principalement expliquées par les débits.

Les MES moyennes interannuelles ont été estimées avec MODIS entre 42 mg.l^{-1} en amont du principal tributaire de l'Orénoque, le Méta et 101 mg.l^{-1} en aval du deuxième plus grand tributaire de l'Orénoque, l'Apure. Des valeurs similaires ont été calculées en amont du fleuve Caura (94 mg.l^{-1}) et de la station de Musinacio (99 mg.l^{-1}), légèrement plus basses en aval de Ciudad Bolivar (79 mg.l^{-1}) et légèrement plus élevées à Ciudad Bolivar (92 mg.l^{-1}). Les valeurs les plus basses sont mesurées sur le haut Orénoque car les eaux proviennent des affluents en rive droite, faiblement chargés en sédiments. Au contraire, les valeurs les plus élevées sont mesurées en aval des grands tributaires andins dont les berges sont fortement érosives. Plus en aval, la concentration en sédiments diminue. Ils sont déposés, transférés à l'océan Atlantique ou en transit dans l'immense plaine alluviale située principalement en rive gauche de l'Orénoque. Aucune tendance à la baisse ou à l'augmentation des MES n'a été détectée pour ce bassin.

e) **Flux moyens de sédiments et transport solides spécifiques** : les flux moyens de sédiments étaient de $303\,10^3\text{ t.an}^{-1}$ à la station du Saut Maripa sur l'Oyapock, de $1\,350\,10^3\text{ t.an}^{-1}$

¹ à la station du Saut Hermina sur le Maroni et de 75 000 à 103 000 10^3 t.an^{-1} à la station de Ciudad Bolivar sur l'Orénoque. Les flux de MES ont montré une tendance régulière pour l'Orénoque, une tendance significative à l'augmentation à partir de 2009-2010 pour le Maroni, et une légère diminution pour ces mêmes charges sur l'Oyapock, principalement à partir de 2008. Sur la période 2004-2015, le transport solide spécifique moyen est $12 \text{ t.km}^{-2}\text{an}^{-1}$ pour l'Oyapock et de $22 \text{ t.km}^{-2}\text{an}^{-1}$ pour le Maroni. Ces taux d'érosion correspondent à des valeurs intermédiaires pour le Maroni et faible pour l'Oyapock en comparaison à ceux des principaux fleuves français. Ils sont cependant très faibles en comparaison des taux d'érosion des grands bassins versants comme l'Orénoque ($125 \text{ t.km}^{-2}\text{yr}^{-1}$) ou l'Amazone ($157 \text{ t.km}^{-2}\text{yr}^{-1}$).

La meilleure variable explicative du transport solide spécifique sur le Maroni est l'augmentation des surfaces d'activités minières ($R^2 = 0,97$), témoignant de l'incidence de l'utilisation des sols sur les rejets de sédiments fluviaux. La deuxième meilleure relation est obtenue avec les précipitations à Maripasoula ($r = 0,53$) et à Papaïchton ($r = 0,52$) qui lessivent les sols aux premières pluies. Aucune relation n'est obtenue avec l'écoulement fluvial spécifique. Au contraire pour l'Oyapock, le transport solide spécifique est en parfaite adéquation avec l'écoulement fluvial spécifique ($r = 0,82$).

f) Variations spatiales et temporelles des charges en carbones, azotes particuliers et Chl-a : sur les séries de données des deux ans d'étude (2014-2015-2016) de COD, de COP et de NOP sur les fleuves guyanais, les concentrations les plus élevées se produisent durant la montée des eaux, en raison des apports de matières organiques et d'azote accumulés dans les sols, qui sont transportés aux rivières pendant les pluies, alors que les charges les plus faibles ont lieu durant les basses eaux. Au contraire, les concentrations de Chl-a sont maximales en étiage, favorisées par des températures de l'eau plus élevées et une faible turbidité. Les faibles rapports C/N ont mis en évidence un apport de carbone majoritairement endogène. Les forts ratios C/Chl-a ont montré la présence d'une forte biomasse phytoplanctonique dans le COP surtout durant l'étiage. Enfin, le pourcentage de teneur en carbone dans les MES est plus élevé au Saut Maripa (8,5 et 30,5 %) en comparaison au Saut Hermina (1,96 et 19,29 %) en parfaite relation avec les MES ($r = 0,64$ et $r = 0,61$). Les NOP tout comme les rapports C/N et C/Chl-a sont également bien expliqués par le MES pour les deux bassins versant.

g) Flux annuels moyens et flux spécifiques de COT, COP et NOP : sur les séries de données des deux ans d'étude (2014-2015-2016) sur les fleuves guyanais, les flux annuels moyens de COT calculés à SH et à SM étaient respectivement de $4,56 \times 10^5 \text{ tC.an}^{-1}$ et $1,84 \times 10^5 \text{ tC.an}^{-1}$. Les flux de NOP moyens estimés étaient de 17,74 et $5,42 \times 10^5 \text{ tN.an}^{-1}$ à SH et à SM

alors que les flux de COP moyens étaient de 1,13 et $0,37 \times 10^5$ tC.an⁻¹ à SH et à SM. Enfin les flux de COD étaient en moyenne de 3,42 et $1,47 \times 10^5$ tC.an⁻¹ à SH et à SM. Bien que les flux de COT, COD et NOP soient plus élevés sur le Maroni que sur l'Oyapock, certainement dus aux débits plus élevés, les flux spécifiques de COD, COP et COT des deux bassins sont presque les mêmes indiquant une production similaire. Cependant, le flux spécifique de NOP du fleuve Maroni était deux fois plus élevé que celui de l'Oyapock.

Les fleuves Maroni et Oyapock peuvent donc être considérés pour la France comme d'importants pourvoyeurs d'eau douce. Ils déchargent spécifiquement autant que les grands fleuves du monde en termes de débits à surface de bassin versant équivalente. De plus, ils ont naturellement un très faible taux de concentration de matières puisqu'ils ont des berges peu érosives et qu'ils sont encore peu impactés par les activités humaines. Néanmoins, les résultats de cette thèse montrent les premières conséquences de l'anthropisation et de l'érosion des sols sur les flux de matières. Une plus grande quantité de matières peut avoir des conséquences sur la circulation des pirogues via des dépôts plus importants dans le lit du fleuve, mais aussi sur les deltas et les zones côtières sous influence des grands fleuves. Au niveau local, régional et global les contaminations induites par ces activités comme le mercure ou les hydrocarbures se diffusent tout d'abord par les tributaires vers les principaux pourvoyeurs et jusqu'aux océans côtiers.

Aujourd'hui, certains soutiennent qu'une activité minière et de développement économique général, avec de grandes infrastructures est nécessaire pour le développement de la Guyane et qu'il vaudrait mieux la régulariser plutôt que de la combattre sans fin. Dans ce contexte, le suivi scientifique du transport sédimentaire, de la qualité et de la quantité des eaux des fleuves doit être maintenu et les conclusions diffusées, pour donner des arguments visant à la préservation de l'environnement et à la santé des habitants qu'il ne faut pas sacrifier pour une économie à court terme. La mise en place d'un seuil de contamination et de déforestation, en partenariat avec les pays frontaliers semble incontournable car les conséquences sur la santé et la nature sont déjà très importantes.

Liste des abréviations, des sigles et des acronymes

ABRAE	:	Zones d'aires protégées en Amérique Latine
ADCP	:	Acoustic Doppler Current Profiler
ANA	:	Agência Nacional de Águas
APT	:	Apatou (peut être employé soit pour désigner un village une station pluviométrique ou une station virtuelle)
APU	:	Apure (peut être employé soit pour désigner un tributaire en rive gauche de l'Orénoque, soit une station virtuelle)
ATB	:	Algoritmal Theorical Basis Document
AVHRR	:	Advanced very-high-resolution radiometer
BD CarTHAgE ®	:	Base de Données sur la CARTographie THématique des AGences de l'eau et du ministère chargé de l'environnement
BE	:	Beiman (peut être employé soit pour désigner une crique ou une station virtuelle)
BR	:	Brésil
CAU	:	Caura (peut être utilisé pour désigner un tributaire en rive droite de l'Orénoque, ou une station de collecte d'eaux ou une station virtuelle)
CB	:	Ciudad Bolivar (peut être employé pour désigner, une ville, une station de mesure hydrologiques, de collecte d'eaux ou une station virtuelle)
CE	:	Conductivité Electrique
CG	:	Ciudad Guayana (peut être employé pour désigner, une ville, une station de collecte d'eaux)
Chl-a	:	Chlorophylle <i>a</i>
CFF	:	Foundation for Forest Management and Production Control
COD	:	Carbone Organique Dissous
COEA	:	Centro de Oceanologia y Estudios Antarticos
CPDI	:	Centro de Procesamiento Digital de Imagenes
CTG	:	Collectivité Territoriale de Guyane
CNRH	:	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CNRS	:	Centre National de la Recherche Scientifique français
COP	:	Carbone Organique Particulaire
COT	:	Carbone Organique Total
CZCS	:	Coastal Zone Colour Scanner
DCE	:	Directive Cadre sur l'Eau
DCSMM	:	Directive-Cadre «stratégie pour le milieu marin

Liste des abréviations, des sigles et des acronymes

DEAL	:	Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de la <i>Guyane</i>
DROM	:	Département et Région d'Outre-Mer
ECOS-Nord	:	Evaluation-orientation de la Coopération Scientifique-Nord
ENSO	:	El Niño et Southern Oscillation
FAO	:	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
FPO	:	Faja Petrolífera del Orinoco
GIEC	:	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GF	:	Guyane Française
GR	:	Graan (peut être employé soit pour désigner une crique ou une station virtuelle)
GS	:	Grand-Santi (peut être employé soit pour désigner un village une station pluviométrique ou une station virtuelle)
HCO ₃	:	Bicarbonate
IAHS	:	International Hydrological Association Hydrological Sciences
IPG	:	Indice Poisson de Guyane
IPGG	:	Indice Poisson de Guyane des petites masses d'eau
IPS	:	Indice Polluosensibilité
IRD	:	Institut de Recherche pour le Développement
IS	:	Département de l'Infrastructure de l'Université de Anton de Kom au Suriname
IMF	:	Instituto de Mecánica de Fluido
INAMEH	:	Instituto Nacional de Meteorología y de Hidrología de Venezuela
ITTO	:	The International Tropical Timber Organization
IVIC	:	Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas
LBA	:	Large-Scale Biosphere Atmosphere Experiment
LANDSAT	:	Program of Earth-observing satellites
LT	:	Langa Tabiki (peut être employé soit pour désigner une station hydrométrique soit pour une station virtuelle)
M1	:	Point de collecte d'eau du SNO-HYBAM au Saut Hermina sur le Maroni à 500 m de la rive droite
M2	:	Point de collecte d'eau au Saut Hermina sur le Maroni à 750 m de la rive droite
MAVDT	:	Ministerio de Ambiente, Vivienda y. Desarrollo Territorial
MDS	:	Meteorologische Dienst <i>Suriname</i>
MERIS	:	MEdium Resolution Imaging Spectrometer

Liste des abréviations, des sigles et des acronymes

MES	:	Matières En Suspension
MET	:	Meta (peut être employé pour désigner, un tributaire de l'Orénoque en rive gauche ou une station virtuelle)
MODIS	:	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
MOD3R	:	MODIS River Reflectance Retrieval
MOP	:	Matière Organique Particulaire
MUS	:	Musinacio (peut être employé pour désigner, une ville, une station de collecte d'eaux)
MW	:	Département Sciences de l'Environnement de l'Université de Anton de Kom au Suriname
NIMOS	:	Nationaal Instituut voor Milieu en Ontwikkeling <i>Suriname</i>
NZCS	:	Collection Zoologique de l'Université de Anton de Kom au Surinam
ODO	:	Oxygène Dissous
OEG	:	Office de l'Eau de Guyane
OMM	:	Organisation Météorologique Mondiale
ONF	:	Office National des Forêts
ONFI	:	Service Forestier International français
ORSTOM	:	Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
OTT	:	Société d'Instrumentation pour des applications en océanographie ou hydrologie
PAF	:	Police au frontière
PAG	:	Parc Amazonien de Guyane Française
PDVSA	:	Petróleos de Venezuela SA
PIB	:	Produit Intérieur Brut
POA	:	Propriétés Optiques Apparentes
POI	:	Propriétés Optiques Inhérentes
POLDER	:	POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances
POP	:	Phosphore Organique Particulaire
NOP	:	Azote Organique Particulaire
NTU	:	Nephelometric Turbidity Unit (unité de la turbidité)
PPI	:	Papaïchton (peut être employé soit pour désigner un village une station pluviométrique ou une station virtuelle)
Q	:	Débit liquide
Qs	:	Débit solide
Rapport C/N	:	Rapport Carbone/Azote

Liste des abréviations, des sigles et des acronymes

RD	:	Point de collecte d'eau au Saut Hermina sur le Maroni à 250 m de la rive droite
RDI	:	Société d'Instrumentation pour des applications en océanographie ou hydrologie
RG	:	Point de collecte d'eau au Saut Hermina sur le Maroni à 900 m de la rive droite
SA	:	Saül (peut être employé soit pour désigner un village une station pluviométrique ou une station virtuelle)
SDAGE	:	Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SeaWiFS	:	Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
SEQ-eau	:	Système d'Evaluation de la Qualité de l'eau des cours d'eau
SH	:	Saut Hermina sur le Maroni en Guyane Française
SIO2	:	Dioxyde de silicium
SINGREH	:	National Water Resources Management System
SM	:	Saut Maripa sur l'Oyapock en Guyane Française. (peut être employé soit pour désigner une station pluviométrique ou une station virtuelle)
SMEG	:	Score Moyen des Ephéméroptères des cours d'eaux de Guyane Française
SNO-HYBAM	:	Service National d'Observation de la géodynamique, de l'HYdrologie et de la biogéochimie dans les Bassins de l'AMazone, de l'Orénoque et du Congo
SPOT	:	Images satellites SPOT
SSPD	:	Superintendance de Services Publics Domiciliaires de la Colombie
SST	:	Température des océans en surface
STL	:	Saint-Laurent du Maroni (peut être employé soit pour désigner une ville ou une station pluviométrique)
SU	:	Suriname
SWRIS	:	Système d'information sur la ressource en eau du Suriname
TPI	:	Tapanahoni (peut être employé pour désigner le principal tributaire du Maroni ou pour une station virtuelle)
UCV	:	Universidad Central de Venezuela
UG	:	Université de Guyane
UNESCO	:	Organisation des Nations unies pour l'Education, la Science et la Culture
UNEG	:	Université Experimental de Guayana en Venezuela
UNEP	:	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
USD	:	Dollar des Etats-Unis

Liste des abréviations, des sigles et des acronymes

WBL	:	Laboratoire hydraulique de l'Université de Anton de Kom au Suriname
WWF	:	World Wildlife Fund
ZCIT	:	Zone de Convergence Intertropicale

Références bibliographiques

- Aalto R, Bourgoïn LM, Dunne T, Montgomery DR, Nittrouer CA, Guyot J-L. 2003a. Episodic sediment accumulation on Amazonian flood plains influenced by El Niño/Souther Oscillation. *Nature*, **425**: 493-497.
- Aalto R, Maurice-Bourgoïn L, Dunne T, Montgomery DR, Nittrouer CA, Guyot J-L. 2003b. ENSO-orchestrated sediment accumulation on Amazonian floodplains.
- Adler RF, Huffman GJ, Chang A, Ferraro R, Xie P-P, Janowiak J, Rudolf B, Schneider U, Curtis S, Bolvin D. 2003. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). *J. Hydrometeorol.*, **4**: 1147-1167.
- Alabaster JS, Lloyd RS. 2013. *Water quality criteria for freshwater fish*. Elsevier.
- Alcamo J, Henrichs T, Rösch T., 2017. *World water in 2025: Global modeling and scenario analysis for the world commission on water for the 21st century*.
- Allard L. 2014. *Elaboration d'un indice de qualité des eaux basé sur la structure taxonomique et fonctionnelle des assemblages de poissons des petits cours d'eau de Guyane*. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- Almeida de FFM, Brito Neves de BB, Carneiro CDR. 2000. The origin and evolution of the South American Platform. *Earth-Sci. Rev.*, **50**: 77-111.
- Aminot A, Kérouel R. 2004. *Hydrologie des écosystèmes marins: paramètres et analyses*. Editions Quae.
- Alvarez-Berríos NL, Aide TM. 2015. Global demand for gold is another threat for tropical forests. *Environ. Res. Lett.*, **10**: 014006.
- Amoros C, Petts GE. 1993. *Hydrosystèmes fluviaux*. Masson, pp: 300.
- Antoine D. 1998. Apports de la télédétection spatiale de la "couleur de l'océan" à l'océanographie. *Océanis*, **24**: 81-150.
- Augustinus PGEF. 1978. *The changing shoreline of Suriname (South America)*. Utrecht University.
- Baby P, Guyot JL, Hérail G. 2009. Tectonic control of erosion and sedimentation in the Amazon Basin of Bolivia. *Hydrological Processes*, **23**: 3225-3229.
- Barret J, Blancaneaux P, Caillé O, Charron C, Gaucherel C, Granville J-Jd, Grenand P, Guiral D, Lointier M, Mérona Bd. 2001. *Atlas illustré de la Guyane*.
- Betts AK, Ball JH, Viterbo P, Dai A, Marengo J. 2005. Hydrometeorology of the Amazon in ERA-40. *J. Hydrometeorol.*, **6**: 764-774.
- Betts AK, Köhler M, Zhang Y. 2009. Comparison of river basin hydrometeorology in ERA-Interim and ERA-40 reanalyses with observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **114**.
- Blaizeau D. 2016. Recensement de la population en Guyane. *Guyane ISrd (Eds.)*, pp: 2.
- Blum MD, Roberts HH. 2009. Drowning of the Mississippi Delta due to insufficient sediment supply and global sea-level rise. *Nat. Geosci.*, **2**: 488-491.

- Bouchez J, Beyssac O, Galy V, Gaillardet J, France-Lanord C, Maurice L, Moreira-Turcq P. 2010. Oxidation of petrogenic organic carbon in the Amazon floodplain as a source of atmospheric CO₂. *Geology*, **38**: 255-258.
- Bouchez J, Gaillardet J, France-Lanord C, Maurice L, Dutra-Maia P. 2011. Grain size control of river suspended sediment geochemistry: Clues from Amazon River depth profiles. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **12**: Q03008.
- Boujard T, de Morais LT. 1990. Biogéographie des poissons d'eau douce de Guyane française. PENDANT LE QUATERNAIRE: 17.
- Bourgoin LM, Bonnet M-P, Martinez J-M, Kosuth P, Cochonneau G, Moreira-Turcq P, Guyot J-L, Vauchel P, Filizola N, Seyler P. 2007. Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuai floodplain and the Amazon River, Brazil. *J. Hydrol.*, **335**: 140-156.
- Bovolo CI, Pereira R, Parkin G, Kilsby C, Wagner T. 2012. Fine- scale regional climate patterns in the Guianas, tropical South America, based on observations and reanalysis data. *Int. J. Climatol.*, **32**: 1665-1689.
- Buendia C, Batalla RJ, Sabater S, Palau A, Marcé R., 2016. Runoff Trends Driven by Climate and Afforestation in a Pyrenean Basin. *Land Degradation & Development*, **27**: 823-838.
- Boyd CE. 2015. Particulate Matter, Color, Turbidity, and Light. In: *Water Quality: An Introduction*, Springer International Publishing, pp: 101-112.
- Brasil. 2001. Medida Provisória n° 2166-67, du 24 août 2001. Altera os arts. 1o, 4o, 14, 16 e 44, e acresce dispositivos à Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965, que institui o Código Florestal, bem como altera o art. 10 da Lei no 9.393, de 19 de dezembro de 1996, que dispõe sobre o Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural - ITR, e dá outras providências., pp: 19.
- Brown E, Stallard R, Raisbeck G, Yiou F. 1992. Determination of the denudation rate of Mount Roraima, Venezuela using cosmogenic ¹⁰Be and ²⁶Al. *Eos Trans. AGU*, **73**: 170.
- Brunnee J, Toope SJ. 2002. The changing Nile basin regime: Does law matter. *Harv. Int'l LJ*, **43**: 105.
- Buendia C, Batalla RJ, Sabater S, Palau A, Marcé R. 2016. Runoff Trends Driven by Climate and Afforestation in a Pyrenean Basin. *Land Degradation & Development*, **27**: 823-838. DOI: 10.1002/ldr.2384.
- Callède J, Cochonneau G, Alves FV, Guyot J-L, Guimarães VS, De Oliveira E. 2010. Les apports en eau de l'Amazonie à l'Océan Atlantique. *Revue des sciences de l'eau*, **23**: 247-273.
- Carbonell LM. 1998. Expedición 51: Descubrimiento de las fuentes del Orinoco. El Rio Orinoco. Aprovechamiento Sustentable. Instituto de Mecanica de Fluidos. Facultad de Ingenieria. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela: 2-11.
- Carder KL, Steward RG, Harvey GR, Ortner PB. 1989. Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll. *Limnology and Oceanography*, **34**: 68-81. DOI: 10.4319/lo.1989.34.1.0068.
- Chakrapani GJ. 2005. Factors controlling variations in river sediment loads. *Review Articles*, **88**: 569-575.
- Chowdhury M, Safiullah S, Iqbal Ali S, Mofizuddin M, Enamul Kabir S. 1982. Carbon transport in the Ganges and the Brahmaputra: preliminary results. *Transport of Carbon*

- and Minerals in Major World Rivers, Mitt. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Hamburg, SCOPE/UNEP Sonderbd: 457-468.
- Clevers JG, Kooistra L. 2011. Using hyperspectral remote sensing data for retrieving total canopy chlorophyll and nitrogen content. In: *Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)*, 2011 3rd Workshop on, IEEE: 1-4.
- Clifford MJ. 2011. Pork knocking in the land of many waters: Artisanal and small-scale mining (ASM) in Guyana. *Resources Policy*, **36**: 354-362. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2011.09.004>.
- Coe MT, Costa MH, Soares-Filho BS. 2009. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River – Land surface processes and atmospheric feedbacks. *J. Hydrol.*, **369**: 165-174. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.043>.
- Coppel A, Gond V, Allo S. 2008. Bilan de l'orpaillage en Guyane : une étude fondamentale. Forêt OND (ed.) *RenDez-Vous techniques*: 3-10.
- Costa MH, Botta A, Cardille JA. 2003. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *J. Hydrol.*, **283**: 206-217. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00267-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00267-1).
- Costa MH, Coe MT, Guyot JL. 2013. Effects of Climatic Variability and Deforestation on Surface Water Regimes. In: *Amazonia and Global Change*, American Geophysical Union: 543-553.
- Cremers L, Kolen J, de Theije M, Latinoamericanos CdEyD. 2013. *Small-scale Gold Mining in the Amazon: The Cases of Bolivia, Brazil, Colombia, Peru and Suriname*. Centre for Latin American Studies and Documentation.
- Daoust C, Voicu G, Brisson H, Gauthier M. 2011. Geological setting of the Paleoproterozoic Rosebel gold district, Guiana Shield, Suriname. *J. South Am. Earth Sci.*, **32**: 222-245. DOI: [10.1016/j.jsames.2011.07.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2011.07.001).
- de Freitas LM. 2010. Durabilité écologique et économique de l'exploitation forestière pour la production de bois d'œuvre et pour le stockage du carbone en Amazonie. AgroParisTech.
- de Granville J-J. 1990. *Les formations végétales primaires de la zone intérieure de Guyane*. ORSTOM.
- de Mérona B, Tejerina-Garro FL, Vigouroux R, de Figueiredo Silva S, Camargo M, Estupiñán R, de Souza L, Armbruster J, Werneke D, Mol J. 2012. Fish-habitat relationships in French Guiana rivers: a review. *Mana*, **430**: 311.
- de Mérona B, Tererina-Garro F, Hugueny B, Barral M, Soulard F, Vigouroux R. 2000. Elaboration d'un indice biotique de qualité des milieux aquatiques continentaux de Guyane basé sur les poissons. IRD/DIREN (Eds.): 1-28.
- de Theije M., 2015. Small-scale gold mining and trans-frontier Commerce on the Lawa River. In *and out of Suriname: Language, Mobility and Identity*, 58-77.
- DEAL Guyane. 2014. Evaluation de l'état des masses d'eau. In: *Mise à jour de l'état des lieux 2013*, Direction de l'Environnement d'AedLdlGSMn, Biodiversité, Sites et Paysages. Pôle Eau et Milieux aquatiques. (Eds.) HYDRECO et KALITEOENVIRONNEMENT: 129p.

- DEAL Guyane. 2015. Mise à jour du réseau des acteurs mesurant la turbidité : Animation et compilation des données: 16p.
- Debarros G, Joubert P. 2010. Impact de l'activité aurifère sur le plateau des Guyanes. Rapport final. Réalisation ONF/DR Guyane. WWF-Guianas (ed.) Office National des Forêts Guyane et Centre de coopération International pour la Recherche Agronomique et de Développement Guyane. Programme Guianas Sustainable Natural Resources Management (GSNRM): 32p.
- Dedieu N, Allard L, Vigouroux R, Brosse S, Céréghino R. 2014. Physical habitat and water chemistry changes induced by logging and gold mining in French Guiana streams. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*: 02.
- Dedieu N, Rhone M, Vigouroux R, Céréghino R. 2015. Assessing the impact of gold mining in headwater streams of Eastern Amazonia using Ephemeroptera assemblages and biological traits. *Ecological Indicators*, **52**: 332-340. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.012>.
- Dedieu N, Vigouroux R, Cerdan P, Céréghino R. 2015. Invertebrate communities delineate hydro-ecoregions and respond to anthropogenic disturbance in East-Amazonian streams. *Hydrobiologia*, **742**: 95-105.
- Delmas M, Cerdan O, Cheviron B, Mouchel J-M, Eyrolle F. 2012. Sediment export from French rivers to the sea. *Earth Surf. Process. Landf.*, **37**: 754-762. DOI: 10.1002/esp.3219.
- Delor C, Lahondère D, Egal E, Lafon JM, Cocherie A, Guerrot C, Rossi P, Truffert C, Théveniaut H, Phillips D, de Avelar VG. 2003. Transamazonian crustal growth and reworking as revealed by the 1:500,000-scale geological map of French Guiana (2nd edition). *Géologie de la France*, **2-3-4**: 5-57.
- Delor C, Roever de EWF, Lafon J-M, Lahondère D, Rossi P, Cocherie A, Guerrot C, Potrel A. 2003b. The Bakhuis ultrahigh-temperature granulite belt (Suriname): II. implications for late Transamazonian crustal stretching in a revised. *Géologie de la France*: 207-230.
- Dezécache C, Faure E, Gond V, Salles J-M, Vieilledent G, Hérault B. 2017. Gold-rush in a forested El Dorado: deforestation leakages and the need for regional cooperation. *Environ. Res. Lett.*, **12**: 034013.
- Díaz W. 2009. Composición florística de las comunidades vegetales aledañas al tercer puente sobre el río Orinoco, Venezuela. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, **43**.
- Diaz W, Rosales J. 2006. Analisis Floristico y Descripcion de la Vegetacion Inundable de Varzeas Orinoquenses e el Bajo Rio Orinoco, Venezuela. *Acta Bot.Venez*, **29**: 39-68.
- Dodds WK, Perkin JS, Gerken JE. 2013. Human Impact on Freshwater Ecosystem Services: A Global Perspective. *Environmental Science & Technology*, **47**: 9061-9068. DOI: 10.1021/es4021052.
- Downing J, Prairie Y, Cole J, Duarte C, Tranvik L, Striegl R, McDowell W, Kortelainen P, Caraco N, Melack J. 2006. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography*, **51**: 2388-2397.
- Dumas JBA. 1831. Procèdes de l'analyse organique. *Ann. Chim. Phys.*, **247**: 198–213.
- Dunne JP, Sarmiento JL, Gnanadesikan A. 2007. A synthesis of global particle export from the surface ocean and cycling through the ocean interior and on the seafloor. *Glob. Biogeochem. Cycle*, **21**: 16. DOI: 10.1029/2006gb002907.

- Edmond JM, Palmer MR, Measures CI, Brown ET, Huh Y. 1996. Fluvial geochemistry of the eastern slope of the northeastern Andes and its foredeep in the drainage of the Orinoco in Colombia and Venezuela. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**: 2949-2974. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00142-1](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(96)00142-1).
- Edmond JM, Palmer MR, Measures CI, Grant B, Stallard RF. 1995. The fluvial geochemistry and denudation rate of the Guayana Shield in Venezuela, Colombia, and Brazil. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **59**: 3301-3325. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00128-M](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(95)00128-M).
- Eisma D, Van der Marel H. 1971. Marine muds along the Guyana coast and their origin from the Amazon Basin. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **31**: 321-334.
- Elías E. 2004. The Tarapoto Process: establishing criteria and indicators for the sustainable management of Amazon forests.
- Espinoza JC, Ronchail J, Frappart F, Lavado W, Santini W, Guyot JL. 2013. The Major Floods in the Amazonas River and Tributaries (Western Amazon Basin) during the 1970-2012 Period: A Focus on the 2012 Flood. *J. Hydrometeorol.*, **14**: 1000-1008. DOI: 10.1175/jhm-d-12-0100.1.
- Espinoza Villar JC, Guyot JL, Ronchail J, Cochonneau G, Filizola N, Fraizy P, Labat D, de Oliveira E, Ordoñez JJ, Vauchel P. 2009. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974–2004). *J. Hydrol.*, **375**: 297-311. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.004>.
- Espinoza Villar R. 2013. Suivi de la dynamique spatiale et temporelle des flux sédimentaires dans le bassin de l'Amazone à partir d'image satellite. In: UMR Géosciences ENvironnement Toulouse (GET), Université de Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) - Universidade de Brasilia (UnB), pp: 266.
- Espinoza Villar R, Martinez J-M, Guyot J-L, Fraizy P, Armijos E, Crave A, Bazán H, Vauchel P, Lavado W. 2012a. The integration of field measurements and satellite observations to determine river solid loads in poorly monitored basins. *J. Hydrol.*: 221-228. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.024>.
- Espinoza Villar R, Martinez J-M, Le Texier M, Guyot J-L, Fraizy P, Meneses PR, Oliveira Ed. 2012b. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. *J. South Am. Earth Sci.*, **44**: 45-54. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2012.11.006>.
- Everett R, Mwangamilo J. 2014. ENVIRONMENTAL AND SOCIAL ASSESSMENT (ESA) and ENVIRONMENTAL AND SOCIAL MANAGEMENT FRAMEWORK.
- FAO. 2003. Review of World Water Ressources by countries. In: Water Reports, Food and Agriculture Organisation of the United Nations.
- FAO. 2015. Global Forest Resources Assessment 2015. Desk reference.
- FAO. 2015. Statistical Pocketbook World food and agriculture. FAO, Retrieved am from <http://www.fao.org/economic/ess/ess-publications/ess-yearbook/en/#.V3pYleB4jIU> Acceso.
- Fearnside P. 2008. The roles and movements of actors in the deforestation of Brazilian Amazonia. *Ecology and society*, **13**.
- Filizola N, Guyot JL. 2009. Suspended sediments yield in the Amazon Basin : an assessment using the Brazilian national data set. *Hydrol. Process.*, **23**: 3207-3215.

- Filizola N, Seyler F, Mourão MH, Arruda W, Spínola N, Guyot JL. 2009. Study of the variability in suspended sediment discharge at Manacapuru, Amazon River, Brazil. *Latino America Journal of Sedimentology*, **16**: 93-99.
- Fong-Sam Y. 2003. The Mineral Industries of French Guiana, Guyana, and Suriname. *Geological Survey Mineral Yearbook (2006)*: 10.11-10.17.
- Frappart F, Ramillien G, Ronchail J. 2013. Changes in terrestrial water storage versus rainfall and discharges in the Amazon basin. *Int. J. Climatol.*, **33**: 3029-3046. DOI: 10.1002/joc.3647.
- Fréry N, Maury-Brachet R, Maillot E, Deheeger M, De Merona B, Boudou A. 2001. Gold-mining activities and mercury contamination of native amerindian communities in French Guiana: key role of fish in dietary uptake. *Environmental Health Perspectives*, **109**: 449p.
- Fritsch JM. 1992. Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants : opération ECEREX en Guyane française. *Montpellier 2*: 392p.
- Fritsch JM, Sarrailh JM. 1986. Les transports solides dans l'écosystème forestier tropical humide guyanais : effets du défrichement et de l'aménagement de pâturages. *Spécial Erosion*, **22** 209-222.
- Gadel F, Serve L, Blazi JL. 1997. Traceurs organiques dans les suspensions et dans la matière organique dissoute du fleuve Sinnamary-barrage de Petit-Saut (Guyane française) : sources et conditions de milieu. *Hydroécol.*, **9**: 115-137.
- Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, Allegre C. 1999. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chem. Geol.*, **159**: 3-30.
- Gallay M, Handt H, Mora A, Primeira M, Laraque A. 2015b. VE26- 26a Campaña de aforos, muestreos de agua y sedimentos en el bajo curso del río Orinoc: 50p.
- Gallay M, J-M C, Handt H, A. M. 2015a. VE27- 27a Campaña de aforos, muestreos de agua y sedimentos en el bajo curso del río Orinoco: 27p.
- Gallay M, Laraque A. 2014. VE23 et VE24- 2ème et 3ème Campagne de terrain sur l'Orénoque à Ciudad Bolivar et à Puerto Ordaz dans le cadre du programme ECOS- Nord: 47p.
- Gallay M, Martinez J-M, Laraque A, Gardel A, Vantrepotte V, Doudou JC, Cochonneau G, Chow-Toun F, Sarrazin M. 2017. Land degradation from mining activities drives Suspended Sediments long term change in tropical regions. *Land Degradation & Development*.
- Gaucherel C. 2004. A study of the possible extended influence of the ENSO phenomenon. *C. R. Geosci.*, **336**: 175-185. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2003.10.025>.
- Geeraert N, Omengo FO, Borges AV, Govers G, Bouillon S. 2017. Shifts in the carbon dynamics in a tropical lowland river system (Tana River, Kenya) during flooded and non-flooded conditions. *Biogeochemistry*, **132**: 141-163.
- Geeraert N, Omengo FO, Tamooch F, Paron P, Bouillon S, Govers G. 2015. Sediment yield of the lower Tana River, Kenya, is insensitive to dam construction: sediment mobilization processes in a semi-arid tropical river system. *Earth Surf. Process. Landf.*, **40**: 1827-1838. DOI: 10.1002/esp.3763.

- Georgescu-Pipera P, Georgescu-Pipera C. 1993. Integracion fluvial Suramericana e South American river integration. Banco Interamericano de Desarrollo, Universidad Simon Bolivar, Fundacion Oriampla, Caracas, Venezuela.
- Gibbs RJ, Barron CN. 1983. The Guiana Shield Reviewed. EPISODES (Eds.) : 7-14.
- Gond V, Brognoli C. 2005. Télédétection et aménagement du territoire : localisation et identification des sites d'orpaillage en Guyane française. Bois et Forêts des tropiques., **286**: 1-9.
- Goodwin AM. 1981. Archaean plates and greenstone belts. Developments in Precambrian Geology, **4**: 105-135.
- Gregory-Wodzicki KM. 2000. Uplift history of the Central and Northern Andes: a review. Geol. Soc. Am. Bull., **112**: 1091-1105.
- Guedron S, Grangeon S, Lanson B, Grimaldi M. 2009. Mercury speciation in a tropical soil association; Consequence of gold mining on Hg distribution in French Guiana. Geoderma, **153**: 331-346.
- Guiral D. 2009. Campagne de fin de saison des pluies 2009. In: Pour la définition et la mise en oeuvre de la DCE en vue de l'évaluation de la qualité écologique et chimique des eaux littorales de Guyane, IRD (Eds.).
- Guiral D. 2009. Rapport 3. Données Complémentaires relatives à la campagne de fin de saison des pluies et premières données relatives à la campagne de fin de saison sèche 2009. - IRD (Eds.).
- Guyot J-L. 1993. Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. In: Bordeaux 1, ORSTOM: 261p.
- Hamilton SK, Lewis WM. 1990. Physical characteristics of the fringing floodplain of the Orinoco River, Venezuela. In: Interciencia 15, **6**: 491-500.
- Hammond DS, Gond V, Thoisy Bd, Forget P-M, DeDijn BPE. 2007. Causes and Consequences of a Tropical Forest Gold Rush in the Guiana Shield, South America. AMBIO: A Journal of the Human Environment, **36**: 661-670. DOI: 10.1579/0044-7447(2007)36[661:cacoat]2.0.co;2.
- Hansen MC, Potapov PV, Moore R, Hancher M, Turubanova SA, Tyukavina A, Thau D, Stehman SV, Goetz SJ, Loveland TR, Kommareddy A, Egorov A, Chini L, Justice CO, Townshend JRG. 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Science, **342**: 850-853. DOI: 10.1126/science.1244693.
- Heathwaite AL, Johnes PJ, Peters NE. 1996. Trends in nutrients. Hydrol. Process.: 263-293.
- Hedges JJ, Clark WA, Quay PD, Richey JE, Devol AH, Santos UdM. 1986. Compositions and fluxes of particulate organic material in the Amazon River. Limnology and Oceanography, **31**: 717-738.
- Hedges JJ, Keil RG, Benner R. 1997. What happens to terrestrial organic matter in the ocean? Organic Geochemistry, **27**: 195-212. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0146-6380\(97\)00066-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0146-6380(97)00066-1).
- Heemskerk M. 2011. Small-scale gold mining in the transboundary areas of Brazil, Suriname and French Guiana. Social and environmental issues. Report. Paramaribo, Suriname: United Nations Development Programme.

- Heemskerk M, Duijves C, Pinas M. 2015. Interpersonal and institutional distrust as disabling factors in natural resources management: small-scale gold miners and the government in Suriname. *Society & Natural Resources*, **28**: 133-148.
- Henley WF, Patterson MA, Neves RJ, Lemly AD. 2000. Effects of Sedimentation and Turbidity on Lotic Food Webs: A Concise Review for Natural Resource Managers. *Reviews in Fisheries Science*, **8**: 125-139. DOI: 10.1080/10641260091129198.
- Hennessy L. 2015. Where There Is No Company: Indigenous Peoples, Sustainability, and the Challenges of Mid-Stream Mining Reforms in Guyana's Small-Scale Gold Sector. *New Political Economy*, **20**: 126-153. DOI: 10.1080/13563467.2014.914158.
- Héritier P. 2011. Le climat guyanais. Petit atlas climatique de la Guyane française. Météo France D2C/IMP.
- Hettler J, Irion G, Lehmann B. 1997. Environmental impact of mining waste disposal on a tropical lowland river system: a case study on the Ok Tedi Mine, Papua New Guinea. *Mineralium Deposita*, **32**: 280-291. DOI: 10.1007/s001260050093.
- Hiez G, Dubreuil P. 1964. Les régimes hydrologiques en Guyane française. *Outre-Mer OdlRSeT* (Eds.).
- Higgins A, Restrepo JC, Ortiz JC, Pierini J, Otero L., 2016. Suspended sediment transport in the Magdalena River (Colombia, South America): Hydrologic regime, rating parameters and effective discharge variability. *International Journal of Sediment Research* **3**, 25-35.
- Hoorn C, Guerrero J, Sarmiento GA, Lorente MA. 1995. Andean tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene northern South America. *Geology*, **23**: 237-240.
- Hope D, Billett M, Cresser M. 1994. A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes. *Environmental pollution*, **84**: 301-324.
- Horeau V., Richard, S., Cerdan, P., 2003. Etude de la qualité physico-chimique et biologique des eaux du bassin versant de la crique Grand Leblond. *Hydréco* (Eds.).
- Houghton R, Goodale C. 2004. Effects of Land- Use Change on the Carbon Balance of Terrestrial Ecosystems. *Ecosystems and land use change*: 85-98.
- Howard J. 2010. Mercury in the environment: Field studies from Tampa, Bolivia, and Guyana.
- Howard J, Trotz MA, Thomas K, Omisca E, Chiu HT, Halfhide T, Akiwumi F, Michael R, Stuart AL. 2011. Total mercury loadings in sediment from gold mining and conservation areas in Guyana. *Environ. Monit. Assess.*: **179**: 555-573.
- Hurst HE. 1944. A short account of the Nile Basin. US Government Printing Office.
- IOCCG. 2008. Why Ocean Colour?: The Societal Benefits of Ocean-colour Technology. International Ocean-Colour Coordinating Group Dartmouth, NS.
- ITTO. 2005. The Brazil country profile. Status of Tropical forest management: 208-216.
- ITTO. 2005. The Suriname country profile. Status of Tropical forest management: 274-279.
- ITTO. 2005. The Venezuela profile country. Status of Tropical forest management: 285-292.
- Ivanoff A. 1972. Introduction à l'océanographie: propriétés physiques et chimiques des eaux de mer. Vuibert.
- Jennerjahn T, Soman K, Ittekkot V, Nordhaus I, Sooraj S, Priya R, Lahajnar N. 2008. Effect of land use on the biogeochemistry of dissolved nutrients and suspended and sedimentary

- organic matter in the tropical Kallada River and Ashtamudi estuary, Kerala, India. *Biogeochemistry*, **90**: 29-47.
- Jhan Carlo E, José Antonio M, Josyane R, Jorge Molina C, Luís Noriega F, Jean Loup G. 2014. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. *Environ. Res. Lett.*, **9**: 124007.
- Jouanneau JM, Pujos M. 1988. Variations annuelles des concentrations en matières en suspension et estimations des débits solides des fleuves Maroni et Mahury (Guyane Française). *Géologie de la France*, **2-3**: 163-169.
- Joubert P, Linares S, Gond V. 2008. Face à la ruée vers l'or en Guyane : un observatoire de l'activité minière. ONF (ed.) *Rendez-vous techniques*: 10-15.
- Kao SJ, Liu KK. 1996. Particulate organic carbon export from a subtropical mountainous river (Lanyang Hsi) in Taiwan. *Limnology and Oceanography*, **41**: 1749-1757.
- Keeley JE. 1990. Photosynthetic pathways in freshwater aquatic plants. *Trends in ecology & evolution*, **5**: 330-333.
- Keenan RJ, Reams GA, Achard F, de Freitas JV, Grainger A, Lindquist E. 2015. Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *For. Ecol. Manage.*, **352**: 9-20. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.014>.
- Kendall M. 1975. Rank correlation measures. Charles Griffin : London.
- Kirk JTO. 1994. Concepts of hydrologic optics. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press.
- Labat D, Espinoza JC, Ronchail J, Cochonneau G, De Oliveira E, Doudou JC, Guyot JL. 2012. Fluctuations in the monthly discharge of Guyana Shield rivers, related to Pacific and Atlantic climate variability. *Hydrological Sciences Journal- Journal des Sciences Hydrologiques*: 1-12.
- Labat D, Godderis Y, Probst JL, Guyot JL. 2004. Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources*, **27**: 631-642.
- Labat D, Ronchail J, Calde J, Guyot JL, De Oliveira E, Guimaraes W. 2004. Wavelet analysis of Amazon hydrological regime variability. *Geophys. Res. Lett.*, **31**.
- Labat D, Ronchail J, Guyot JL, De Oliveira E, Guimaraes W. 2005. Recent climate variability over the Guyana shield.
- Laperche V, Hellal J, Maury-Brachet R, Joseph B, Laporte P, Breeze D, Blanchard F. 2014. Regional distribution of mercury in sediments of the main rivers of French Guiana (Amazonian basin). *SpringerPlus*, **3**: 322.
- Laraque A, Georgescu-Pipera P, Pérez Hernández D. 2006. El canal del Casiquiare: Una singularidad hidrológica única en el mundo. In: XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 9e12 Octubre 2006, Ciudad Guayana, Venezuela.
- Laraque A, Bernal C, Bourrel L, Darrozes J, Christophoul F, Armijos E, Fraizy P, Pombosa R, Guyot JL. 2009. Sediment budget of the Napo River, Amazon basin, Ecuador and Peru. *Hydrol. Process.*, **23**: 3509-3524. DOI: [10.1002/hyp.7463](https://doi.org/10.1002/hyp.7463).
- Laraque A, Castellanos B, Mora A. 2014. VE22-Campaña de aforos, muestreos de agua y sedimentos en la cuenca del río Orinoco. Institut de Recherche pour le Développement, Instituto de Mecanica de Fluidos.

- Laraque A, Castellanos B, Steiger J, Lòpez JL, Pandi A, Rodriguez M, Rosales J, Adèle G, Perez J, Lagane C. 2013b. A comparison of the suspended and dissolved matter dynamics of two large inter-tropical rivers draining into the Atlantic Ocean: the Congo and the Orinoco. *Hydrol. Process.* DOI: 10.1002/hyp.9776.
- Laraque A, Chabert L, Tapiou M. 1995. SYSEAU (Systématique des Eaux): logiciel de gestion et d'exploitation de données hydrogéochimiques: manuel d'utilisation et de référence.
- Laraque A, Filizola N, Guyot JL. 2005. The spatial and temporal variability of sediment transport in the Brazilian Amazon basin, based on a regular 10-day sampling programme. In: *Sediment Budgets 1*, Walling DE, Horowitz AJ (Eds.): 250-258.
- Laraque A, Guyot JL, Filizola N., 2009. Mixing processes in the Amazon River at the confluences of the Negro and Solimoes Rivers, Encontro das Aguas, Manaus, Brazil. *Hydrological Processes* **23**: 3131-3140.
- Laraque A, Mahé G, Orange D, Marieu B. 2001. Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the XXth century. *J. Hydrol.*, **245**: 104-117.
- Laraque A, Moquet J-S, Alkattan R, Steiger J, Mora A, Adèle G, Castellanos B, Lagane C, Lopez JL, Perez J, Rodriguez M, Rosales J. 2013a. Seasonal variability of total dissolved fluxes and origin of major dissolved elements within a large tropical river: The Orinoco, Venezuela. *J. South Am. Earth Sci.*, **44**: 4-17. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2012.12.011>.
- Laraque A, Vega A, Castellanos B, Guzman E, Guevara I, Rosales J. 2012. VE18-Informe de la campaña fluvial de aforos, muestreo de agua y sedimentos, en el río Orinoco entre Puerto Ayacucho y Puerto Ordaz, del 30 de agosto al 10 de septiembre de 2012. "Ríos de América" "Nuestros Ríos son navegables": 36p.
- Lasserre J-L. 2006. Expertise sur l'érosion des berges sur le fleuve Maroni à Loka - Commune de Papaïchton (Guyane). Rapport BRGM/RP-54923-FR: 23p.
- Latrubesse EM, Amsler ML, de Morais RP, Aquino S. 2009. The geomorphologic response of a large pristine alluvial river to tremendous deforestation in the South American tropics: The case of the Araguaia River. *Geomorphology*, **113**: 239-252. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.03.014.
- Latrubesse EM, Stevaux JC, Sinha R. 2005. Tropical rivers. *Geomorphology*, **70**: 187-206. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.02.005.
- Le C, Li Y, Zha Y, Sun D, Huang C, Zhang H. 2011. Remote estimation of chlorophyll a in optically complex waters based on optical classification. *Remote Sens. Environ.*, **115**: 725-737. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.014>.
- Le TPQ, Dao VN, Rochelle- Newall E, Garnier J, Lu X, Billen G, Duong TT, Ho CT, Etcheber H, Nguyen TMH. 2017. Total organic carbon fluxes of the Red River system (Vietnam). *Earth Surf. Process. Landf.*
- Lee Z, Lance VP, Shang S, Vaillancourt R, Freeman S, Lubac B, Hargreaves BR, Del Castillo C, Miller R, Twardowski M, Wei G. 2011. An assessment of optical properties and primary production derived from remote sensing in the Southern Ocean (SO GasEx). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **116**: C00F03. DOI: 10.1029/2010jc006747.
- Lentini M, Veríssimo A, Sobral L. 2003. Fatos florestais da Amazônia 2003. Imazon, Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia.
- Lévêque A, Colmet-Daage F, Sieffermann G, Dauteloup J, Mevel L. 1962. Mémoire explicatif de la carte des sols de terres basses de Guyane Française.

- Lewis WM, F.H. W, Sauders JF, Hamilton SK. 1990. The Orinoco River as an Ecological System. *Interciencia*, **15**: 346-357.
- Lewis WM, Hamilton SK, Jones SL, Runnels DD. 1987. Major Element Chemistry, Weathering and Element Yields for the Caura River Drainage, Venezuela. *Biogeochemistry*, **4**: 159-181. DOI: 10.1007/bf02180153.
- Lewis WM, Weibezahn F. 1981. The chemistry and phytoplankton of the Orinoco and Caroni rivers. *Arch. Hydrobiol*, **91**: 521-528.
- Lewis WMJ. 1988. Primary production in the Orinoco River. *Ecology*: 679-692.
- Lewis WMJ, Hamilton SK, Saunders III JF. 1995. Rivers of Northern South America. In: C.E. Cushings, K.W. Cummins & G.W. Minshall (eds.). *River and Stream Ecosystems*. Elsevier, Amsterdam: 219-256.
- Lewis WMJ, Saunders III JF. 1984. Cross-sectional variation in the chemistry and suspended sediment load of the Orinoco River at Ciudad Bolivar. *Acta Cientifica Venezolana*: 382-385.
- Lewis WMJ, Saunders IJF. 1989. Concentration and transport of dissolved and suspended substances in the Orinoco River. *Biogeochemistry*: 203-240.
- Ley Orgánica del Ambiente. 2006. Gaceta Oficial de la República bolivariana de Venezuela. N°, **5**: 22.
- Liebig J. 1841. *Traité de chimie organique*. libr. polytechnique.
- Lointier M. 1993. Variations saisonnières et flux de quelques éléments majeurs dans trois rivières de Guyane française. *Grands Bassins Fluviaux*: 391-410.
- López-Tarazón JA, López P, Lobera G, Batalla RJ. 2016. Suspended sediment, carbon and nitrogen transport in a regulated Pyrenean river. *Science of The Total Environment*, **540**: 133-143.
- López J, Perez-Hernandez D. 1999. Some Morphological Aspects of the Orinoco River. In: *IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*. Genova. Italy. September: 6-10.
- Lorenzen CJ. 1967. DETERMINATION OF CHLOROPHYLL AND PHEO-PIGMENTS: SPECTROPHOTOMETRIC EQUATIONS¹. *Limnology and Oceanography*, **12**: 343-346. DOI: 10.4319/lo.1967.12.2.0343.
- Lu X, Li S, He M, Zhou Y, Li L, Ziegler AD. 2012. Organic carbon fluxes from the upper Yangtze basin: an example of the Longchuanjiang River, China. *Hydrol. Process.*, **26**: 1604-1616.
- Maia SM, Ogle SM, Cerri CE, Cerri CC. 2010. Soil organic carbon stock change due to land use activity along the agricultural frontier of the southwestern Amazon, Brazil, between 1970 and 2002. *Glob. Change Biol.*, **16**: 2775-2788.
- Malavoi J-R, Gautier J-N, Bravard J-P. 2003. L'espace de liberté des cours d'eau : un concept géodynamique pour une gestion durable des cours d'eau. *Les études Ligériennes*, **6**: 5-11.
- Malcolm RL, Durum WH. 1976. Organic carbon and nitrogen concentrations and annual organic carbon load of six selected rivers of the United States. for sale by the Supt. of Docs., US Govt. Print. Off.

- Manabe S, Wetherald RT, Milly P, Delworth TL, Stouffer RJ. 2004. Century-scale change in water availability: CO₂-quadrupling experiment. *Climatic Change*, **64**: 59-76.
- Mangiarotti S, Martinez JM, Bonnet MP, Buarque DC, Filizola N, Mazzega P. 2013. Discharge and suspended sediment flux estimated along the mainstream of the Amazon and the Madeira Rivers (from in situ and MODIS Satellite Data). *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, **21**: 341-355. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.015>.
- Mann HB. 1945. Non-parametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*: 245-259.
- Marengo J. 2005. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget. *Clim Dyn*, **24**: 11-22. DOI: [10.1007/s00382-004-0461-6](https://doi.org/10.1007/s00382-004-0461-6).
- Marteau P, Bourbon P, Brivois O, François B, Joseph B. 2011. Flux sédimentaires et activités extractives dans les lits mineurs du Lawa à Grand-Santi, de l'Oyapock et de la Camopi à Camopi (Guyane) - Bilan, impacts et prospective. In: Rapport final, BRGM (Eds.).
- Martinez J-M, Espinoza-Villar R, Armijos E, Silva Moreira L. 2015. The optical properties of river and floodplain waters in the Amazon River Basin: Implications for satellite-based measurements of suspended particulate matter. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **120**: 1274-1287. DOI: [10.1002/2014jf003404](https://doi.org/10.1002/2014jf003404).
- Martinez J-M, Le Toan T. 2007. Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data. *Remote Sens. Environ.*, **108**: 209-223. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.012>.
- Martinez JM, Guyot JL, Cochonneau G, Seyler F. 2007. Surface water quality monitoring in large rivers with MODIS data application to the amazon basin. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International*, pp: 4566-4569.
- Martinez JM, Guyot JL, Filizola N, Sondag F. 2009. Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. *Catena*, **79**: 257-264.
- Martins O. 1982. Geochemistry of the Niger river. In: *Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers*, Pt, Mitt. Geol. Inst. Univ. Hamburg 52 H, Germany (ed.), pp: 397-418.
- MAVDT. 2010. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. .
- Mayorga E, Aufdenkampe AK, Masiello CA, Krusche AV, Hedges JI, Quay PD, Richey JE, Brown TA. 2005. Young organic matter as a source of carbon dioxide outgassing from Amazonian rivers. *Nature*, **436**: 538-541.
- McClain CR, Christian JR, Signorini SR, Lewis MR, Asanuma I, Turk D, Dupouy-Douchement C. 2002. Satellite ocean-color observations of the tropical Pacific Ocean. *Deep-Sea Res. Part II-Top. Stud. Oceanogr.*, **49**: 2533-2560. DOI: [10.1016/s0967-0645\(02\)00047-4](https://doi.org/10.1016/s0967-0645(02)00047-4).
- Meade RH. 1994. Suspended sediments of the modern Amazon and Orinoco rivers. *Quat. Int.*, **21**: 29-39.
- Meade RH. 2007. Transcontinental moving and storage: the Orinoco and Amazon Rivers transfer the Andes to the Atlantic. In: *Large Rivers: Geomorphology and Management*, Gupta A (Eds.) J. Wiley & Sons, Ltd: 45-63.
- Meade RH, Nordin CF, Pérez-Hernández D, Mejía A, Paredes Godoy JH. 1983. Sediment and water discharge in Río Orinoco, Venezuela and Colombia. In: *Proceedings of the*

- Second International Symposium on River Sedimentation, Press WRaEP (Eds.): 1134-1144.
- Meade RH, Weibezahn FH, Lewis WM, Pérez-Hernandez D. 1990. Suspended-sediment budget for the Orinoco River. In: *El Rio Orinoco como Ecosistema. The Orinoco River as an Ecosystem*, Weibezahn F.H. AHLJWMIR, Caracas, Venezuela (Eds.): 55-79.
- Meybeck M. 1982. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers. *Am. J. Science*, **282**: 401-450.
- Meybeck M. 1993. C, N, P and S in rivers: from sources to global inputs. In: *Interactions of C, N, P and S Biogeochemical cycles and global change*, Springer: 163-193.
- Millan SA, Lopez JL. 2001. Sediment loads delivered to the Orinoco Delta. In: *Lacaflum. Latin American and Caribbean Congress on Fluid Mechanics*: 1-6.
- Milliman JD. 2001. Delivery and fate of fluvial water and sediment to the sea: a marine geologist's view of European rivers. *Scientia Marina*, **65**: 121-132.
- Milliman JD, Farnsworth KL, Jones PD, Xu KH, Smith LC. 2008. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951–2000. *Glob. Planet. Change*, **62**: 187-194. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.03.001>.
- Milly PC, Dunne KA, Vecchia AV. 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, **438**: 347-350.
- Ministère de l'Écologie dlé, du développement durable et de l'aménagement du territoire,. 2012. Circulaire du 23 octobre 2012, relative à l'application de l'arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines. NOR : DEVL1227826C.
- Ministère de l'Écologie dlé, du développement durable et de l'aménagement du territoire,. 2016. Guide relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plan d'eau): 83p.
- Ministère de l'Écologie dlé, du développement durable et de l'aménagement du territoire,, Agences de l'eau. 2003. Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau. Grilles d'évaluation SEQ-Eau (Version 2): 40p.
- Mittermeier RA, Myers N, Thomsen JB, Da Fonseca GA, Olivieri S. 1998. Biodiversity hotspots and major tropical wilderness areas: approaches to setting conservation priorities. *Conservation biology*, **12**: 516-520.
- Moffat AS. 1998. Global nitrogen overload problem grows critical. *Science*, **279**: 988-989.
- Mol JH, Ramlal JS, Lietar C, Verloo M. 2001. Mercury contamination in freshwater, estuarine, and marine fishes in relation to small-scale gold mining in Suriname, South America. *Environmental Research*, **86**: 183-197.
- Montabo B. 2004. *L'Histoire de la Guyane : Tome 2, De 1848 à nos jours* Le grand livre Edn.
- Mooney H, Cropper A, Reid W. 2005. Confronting the human dilemma. *Nature*, **434**: 561-562.
- Moore TR. 1989. Dynamics of dissolved organic carbon in forested and disturbed catchments, Westland, New Zealand: 1. Maimai. *Water Resour. Res.*, **25**: 1321-1330. DOI: 10.1029/WR025i006p01321.
- Moquet J-S, Guyot J-L, Crave A, Viers J, Filizola N, Martinez J-M, Oliveira TC, Sánchez LSH, Lagane C, Casimiro WSL. 2016. Amazon River dissolved load: temporal dynamics and

- annual budget from the Andes to the ocean. *Environmental Science and Pollution Research*, **23**: 11405-11429.
- Mora A. 2011. Variacion Temporal y Espacial de la Concentracion de Cationes Mayoritarios y Elementos Traza Disueltos en el Sistema Rio Orinoco, Venezuela. In: Departamento de Invenieria Mecanica y Fabricacion, Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Industriales.
- Mora A, Alfonso JA, Baquero JC, Balza L, Pisapia D. 2010. Caura River basin: Weathering rates, CO₂ consumption, and chemistry of major and trace elements in an Orinoco River tributary coming from the Precambrian Guayana Shield, Venezuela. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **11**. DOI: Q11005 10.1029/2010gc003209.
- Mora A, Baquero JC, Alfonso JA, Pisapia D, Balza L. 2010b. The Apure River: geochemistry of major and selected trace elements in an Orinoco River tributary coming from the Andes, Venezuela. *Hydrol. Process.*, **24**: 3798-3810.
- Mora A, Calderon LS, Mac-Quhae Romero C, Visaez Salazar F, Calzadilla M. 2008. Geoquimica de los Rios Morichales de los Llanos Orientales Venezolanos. *Interciencia*, **33**: 717- 724.
- Mora A, Laraque A, Moreira-Turcq P, Alfonso JA. 2014. Temporal variation and fluxes of dissolved and particulate organic carbon in the Apure, Caura and Orinoco rivers, Venezuela. *J. South Am. Earth Sci.*, **54**: 47-56. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2014.04.010>.
- Moreira-Turcq P, Bonnet M-P, Amorim M, Bernardes M, Lagane C, Maurice L, Perez M, Seyler P. 2013. Seasonal variability in concentration, composition, age, and fluxes of particulate organic carbon exchanged between the floodplain and Amazon River. *Glob. Biogeochem. Cycle*, **27**: 119-130. DOI: 10.1002/gbc.20022.
- Moreira-Turcq P, Seyler P, Guyot JL, Etcheber H. 2003. Exportation of organic carbon from the Amazon River and its main tributaries. *Hydrol. Process.*, **17**: 1329-1344.
- Morel A, Gentili B. 1996. Diffuse reflectance of oceanic waters. III. Implication of bidirectionality for the remote-sensing problem. *Appl. Optics*, **35**: 4850-4862.
- Morel A, Prieur L. 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and oceanography*, **22**: 709-722.
- Mueller JL, Bidigare RR, Trees C, Balch WM, Dore J, Drapeau DT, Karl D, Van Heukelem L, Perl J. 2003. Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume IV:Inherent Optical Properties: Instruments, Characterization, Field Measurements and Data Analysis Protocols. In: *Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor*, Mueller JL, Fargion GS, McClain CR (Eds.).
- Négrel P, Lachassagne P. 2000. Geochemistry of the Maroni River (French Guiana) during the low water stage: implications for water–rock interaction and groundwater characteristics. *J. Hydrol.*, **237**: 212-233. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00308-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00308-5).
- Niane B, Moritz R, Guédron S, Ngom PM, Pfeifer HR, Mall I, Poté J. 2014. Effect of recent artisanal small-scale gold mining on the contamination of surface river sediment: Case of Gambia River, Kedougou region, southeastern Senegal. *Journal of Geochemical Exploration*, **144**, Part C: 517-527. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.028>.

- Nontanovanh M, Roig JY. 2010. Inventaire du patrimoine géologique de la Guyane-Partie 1. Rapport BRGM/RP-59178-FR: 35p.
- Nordin CF, Meade R, Curtis C. 1983. Data from sediment studies of the Rio Orinoco, Venezuela, August 15-25, 1982. US Geological Survey.
- Nordin CF, Pérez-Hernández D. 1989. Sand waves, bars, and windblown sands of the Rio Orinoco, Venezuela and Colombia. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, **2326-A**: 1-74.
- O'Callaghan T, Graetz G. 2017. Mining in the Asia-Pacific: Risks, Challenges and Opportunities. Springer.
- OEG. 2016. Qualité des milieux aquatiques de Guyane (2013-2014). Office de l'Eau de la Guyane, aquatiques Ondeedm (Eds.).
- Olivry J-C, Bricquet J-P, Thiébaux J-P. 1989. Bilan annuel et variations saisonnières des flux particuliers du Congo à Brazzaville et de l'Oubangui à Bangui. La Houille Blanche: 311-316.
- ONF. 2013. Expertise littorale 2011 - Projet "Expertise littoral 2011". Occupation du sol et sa dynamique sur la bande côtière de la Guyane de 2005 à 2011(Eds.): 78p.
- ONF. 2013a. Expertise foncière 2011. Territoires isolés de Guyane "Apatou Grand Santi, Papaïchton, Maripasoula, Saül"(Eds.): 49p.
- ONF. 2013c. La lutte contre l'orpaillage illégal en Guyane. Préfecture de Guyane, 32p.
- ONF. 2016. Charte de l'exploitation forestière à faible impact en Guyane. Direction Régionale de l'ONF Guyane (Eds.): 97p.
- Onstad GD, Canfield DE, Quay PD, Hedges JI. 2000. Sources of particulate organic matter in rivers from the continental USA: lignin phenol and stable carbon isotope compositions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**: 3539-3546.
- Ouboter PE, Noordam D, Amatali. M, Teunissen PA, Werkhoven MC, Peeters GM, Mol JH, Wasscher M, Leentvaar P, Oostburg BF, Mohadin K. 1993. The Freshwater Ecosystems of Suriname.
- Painter TH, Dozier J, Roberts DA, Davis RE, Green RO. 2003. Retrieval of subpixel snow-covered area and grain size from imaging spectrometer data. *Remote Sens. Environ.*, **85**: 64-77.
- Palvadeau E. 1998. Géodynamique quaternaire de la Guyane française. Doctoral tesis. University of Brest. France
- Paolini JE. 1990. Particulate Organic Matter in the Orinoco River. *Natur wissenschaften*, **77**: 80-81.
- Paolini JE. 1995. Particulate Organic Carbon and Nitrogen in the Orinoco River (Venezuela). *Biogeochemistry*, **29**: 59- 70.
- Paolini JE, Hieva R, Herrera R. 1987. Transport of Carbon and Minerals in the Orinoco and Caroni Rivers During the Years 1983-1984. pp: 325-338.
- Park E, Latrubesse EM. 2014. Modeling suspended sediment distribution patterns of the Amazon River using MODIS data. *Remote Sens. Environ.*, **147**: 232-242. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.013>.
- Pekel J-F, Cottam A, Gorelick N, Belward AS. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* **540**: 418-422.

- Pérez Hernández D, López J. 1998. El Río Orinoco. Aprovechamiento Sustentable. Algunos aspectos relevantes de la hidrología del Río Orinoco. Memorias de las primeras jornadas venezolanas de investigación sobre el Río Orinoco.
- Pettitt A. 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied statistics*: 126-135.
- Pisapia D, Mora A, Farina O, Lasso CA, Jaffé R, Briceño H. 2009. Geoquímica de los ecosistemas acuáticos de la cuenca alta del río Cuyuní, Estado Bolívar, Venezuela: RAP Alto Cuyuní 2008. In: *Evaluación Rápida de la Biodiversidad de los Ecosistemas Acuáticos de la Cuenca Alta del Río Cuyuní, Guayana Venezolana*, Lasso CA, Señaris, J.C., Rial, A., Flores, A.N (Eds.) Conservación Internacional, Arlington VA, USA, pp: 60-73.
- Planton S, Déqué M, Douville H, Spagnoli B. 2005. Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique. *C. R. Geosci.*, **337**: 193-202. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2004.10.003>.
- Poff NL, Allan JD, Palmer MA, Hart DD, Richter BD, Arthington AH, Rogers KH, Meyer JL, Stanford JA. 2003. River flows and water wars: emerging science for environmental decision making. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **1**: 298-306.
- Pongruktham O, Ochs C. 2015. The rise and fall of the Lower Mississippi: effects of hydrologic connection on floodplain backwaters. *Hydrobiologia*, **742**: 169-183.
- Potter PE. 1997. The Mesozoic and Cenozoic paleodrainage of South America: a natural history. *J. South Am. Earth Sci.*, **10**: 331-344.
- Pourabadehei M, Mulligan CN. 2016. Effect of the resuspension technique on distribution of the heavy metals in sediment and suspended particulate matter. *Chemosphere*, **153**: 58-67. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.03.026>.
- Pourriot R, Meybeck M. 1997. *Limnologie générale*.
- Probst J-L, Mortatti J, Tardy Y. 1994. Carbon river fluxes and weathering CO² consumption in the Congo and Amazon river basins. *Appl. Geochem.*, **9**: 1-13.
- Prost M. 1990. Les côtes de Guyane. Programme environnement côtier, géomorphologie-sédimentologie. Cayenne: ORSTOM: 41-45.
- Pujos M, Odin G. 1986. La sédimentation au Quaternaire terminal sur la plate-forme continentale de la Guyane Française. *Oceanol. Acta*, **9**: 363-382.
- Rahm M, Jullian B, Lauger A, de Carvalho R, Vale L, Totaram J, Cort KA, Djojodikromo M, Hardjoprajitno M, Neri S, Vieira R, Watanabe E, do Carmo Brito M, Miranda P, Paloeng C, Moe Soe Let V, Crabbe S, Calmel M. 2015. Monitoring the Impact of Gold Mining on the Forest Cover and Freshwater in the Guiana Shield. Reference year 2014. *Guianas RftGSPaW* (Eds.): 60p.
- Ran L, Lu X, Sun H, Han J, Li R, Zhang J. 2013. Spatial and seasonal variability of organic carbon transport in the Yellow River, China. *J. Hydrol.*, **498**: 76-88.
- Renoux F, Fleury M, Reinette Y, Grenand P, Grenand F. 2003. L'agriculture itinérante sur brûlis dans les bassins du Maroni et de l'Oyapock: Dynamique et adaptation aux contraintes spatiales. *Revue forestière française* 55: 236-259.
- Restrepo JD. 2005. Los sedimentos del río Magdalena : reflejo de la crisis ambiental. Universidad EAFIT.

- Restrepo JD, Kjerfve B. 2000. Magdalena river: interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *J. Hydrol.*, **235**: 137-149. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00269-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00269-9).
- Restrepo JD, Lopez SA. 2008. Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. *J. South Am. Earth Sci.*, **25**: 1-21. DOI: 10.1016/j.jsames.2007.09.002.
- Restrepo JD, Zapata P, Díaz JM, Garzón-Ferreira J, García CB. 2006b. Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: The Magdalena River, Colombia. *Glob. Planet. Change*, **50**: 33-49. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2005.09.002>.
- Rhea WJ, Davis CO. 1997. A comparison of the SeaWiFS chlorophyll and CZCS pigment algorithms using optical data from the 1992 JGOFS Equatorial Pacific Time Series. *Deep-Sea Res. Part II-Top. Stud. Oceanogr.*, **44**: 1907-1925.
- Richard S, Cerdan P. 2000. Essai d'évaluation de la qualité des eaux des rivières de Guyane à l'aide d'indicateurs chimiques. HYDRECO.
- Richey J, E e, Hedges JI, Devol AH, Quay PD, Victoria R, Martinelli L, Forsberg BR. 1990. Biogeochemistry of carbon in the Amazon River. *Limnol. Oceanogr.*, **35**: 352-371.
- Richey JE, Melack JM, Aufdenkampe AK, Ballester VM, Hess LL. 2002. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. *Nature*, **416**: 617-619.
- Robert E, Grippa M, Kergoat L, Pinet S, Gal L, Cochonneau G, Martinez J-M. 2016. Monitoring water turbidity and surface suspended sediment concentration of the Bagre Reservoir (Burkina Faso) using MODIS and field reflectance data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, **52**: 243-251.
- Roche MA. 1982. Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème forestier amazonien à Ecérex, en Guyane. *Cahier de l'ORSTOM, Série Hydrologie*, **19**: 81-114.
- Ronchail J, Bourrel L, Cochonneau G, Vauchel P, Phillips L, Castro A, Guyot JL, de Oliveira E. 2005. Inundations in the Mamore basin (south-western Amazon-Bolivia) and sea-surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. *J. Hydrol.*, **302**: 223-238.
- Ronchail J, Cochonneau G, Molinier M, Guyot JL, Chaves AGD, Guimaraes V, de Oliveira E. 2002. Interannual rainfall variability in the Amazon basin and sea-surface temperatures in the equatorial Pacific and the tropical Atlantic Oceans. *Int. J. Climatol.*, **22**: 1663-1686.
- Rosales J, Blanco-Belmonte L, Bradley C. 2008. Hydrogeomorphological and ecological interactions in tropical floodplains: The significance of confluence zones in the Orinoco Basin, Venezuela. *Hydroecology and Ecohydrology: Past, Present and Future*: 295-316.
- Rosales J, Rodríguez M, Narayán A. 2007. El Corredor Ribereño del bajo río Orinoco, basamento hidrogeomorfológico y sedimentológico funcional. *Copérnico*, **7**: 46-58.
- Rosgen DL. 1996. *Applied River Morphology*. Wildland Hydrology.
- Rossi J-P, Celini L, Mora P, Mathieu J, Lapied E, Nahmani J, Ponge J-F, Lavelle P. 2010. Decreasing fallow duration in tropical slash-and-burn agriculture alters soil macroinvertebrate diversity: a case study in southern French Guiana. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **135**, 148-154.

- Roskin J, Blumberg DG, Porat N, Tsoar H, Rozenstein O. 2012. Do dune sands redden with age? The case of the northwestern Negev dunefield, Israel. *Aeolian Research*, **5**: 63-75.
- Salimon C, Sousa ED, Alin SR, Krusche AV, Ballester MV. 2013. Seasonal variation in dissolved carbon concentrations and fluxes in the upper Purus River, southwestern Amazon. *Biogeochemistry*, **114**: 245-254. DOI: 10.1007/s10533-012-9806-0.
- Santos JOS, Hartmann LA, Gaudette HE, Groves DI, McNaughton NJ, Fletcher IR. 2000. A New Understanding of the Provinces of the Amazon Craton Based on Integration of Field Mapping and U-Pb and Sm-Nd Geochronology. *Gondwana Res.*, **3**: 453-488. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70755-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70755-3).
- SAR. 2014. Schéma d'Aménagement Régional de la Guyane. Projet de SAR arrêté le 15 janvier 2014. pp: 454.
- Saunders D, Kalff J. 2001. Nitrogen retention in wetlands, lakes and rivers. *Hydrobiologia*, **443**: 205-212.
- SDAGE. 2016. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (2016-2021). Validé par arrêté préfectoral le 24 novembre 2015. Bassin Guyane. Guyane CdBd, Office de l'Eau de la Guyane, Office national de l'eau et des milieux aquatiques, DEAL Guyane (Eds.): 144p.
- Sen, P.K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association* **63**, 1379-1389.
- Sharaf El Din S. 1977. Effect of the Aswan High Dam on the Nile flood and on the estuarine and coastal circulation pattern along the Mediterranean Egyptian coast. *Limnology and Oceanography*, **22**: 194-207.
- Shi H, Li T, Wang K, Zhang A, Wang G, Fu X. 2016. Physically based simulation of the streamflow decrease caused by sediment- trapping dams in the middle Yellow River. *Hydrological Processes* **30**, 783-794.
- Shi H, Wang G. 2015. Impacts of climate change and hydraulic structures on runoff and sediment discharge in the middle Yellow River. *Hydrological Processes* **29**, 3236-3246.
- Shiklomanov IA. 1998. World water resources. A new appraisal and assessment for the 21st century.
- Shiklomanov IA, Rodda JC. 2004. World water resources at the beginning of the twenty-first century. Cambridge University Press.
- Silva-Léon G. 2005. La Cuenca del Rio Orinoco: Vision Hidrografica y Balance Hidrico. *Revista Geografica Venezolana*, **46**: 75-108.
- Silva Dias Md, Rutledge S, Kabat P, Silva Dias Pd, Nobre C, Fisch G, Dolman A, Zipser E, Garstang M, Manzi A. 2002. Cloud and rain processes in a biosphere- atmosphere interaction context in the Amazon region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **107**.
- Sioli H. 1984. The Amazon and its main affluents: hydrography, morphology of the river courses, and river types. In: *The Amazon*, Springer: 127-165.
- Sondag F, Guyot JL, Moquet JS, Laraque A, Adele G, Cochonneau G, Doudou JC, Lagane C, Vauchel P. 2010. Suspended sediment and dissolved load budgets of two Amazonian rivers from the Guiana Shield: Maroni River at Langa Tabiki and Oyapock River at Saut Maripa (French Guiana). *Hydrol. Process.*, **24**: 1433-1445. DOI: 10.1002/hyp.7603.

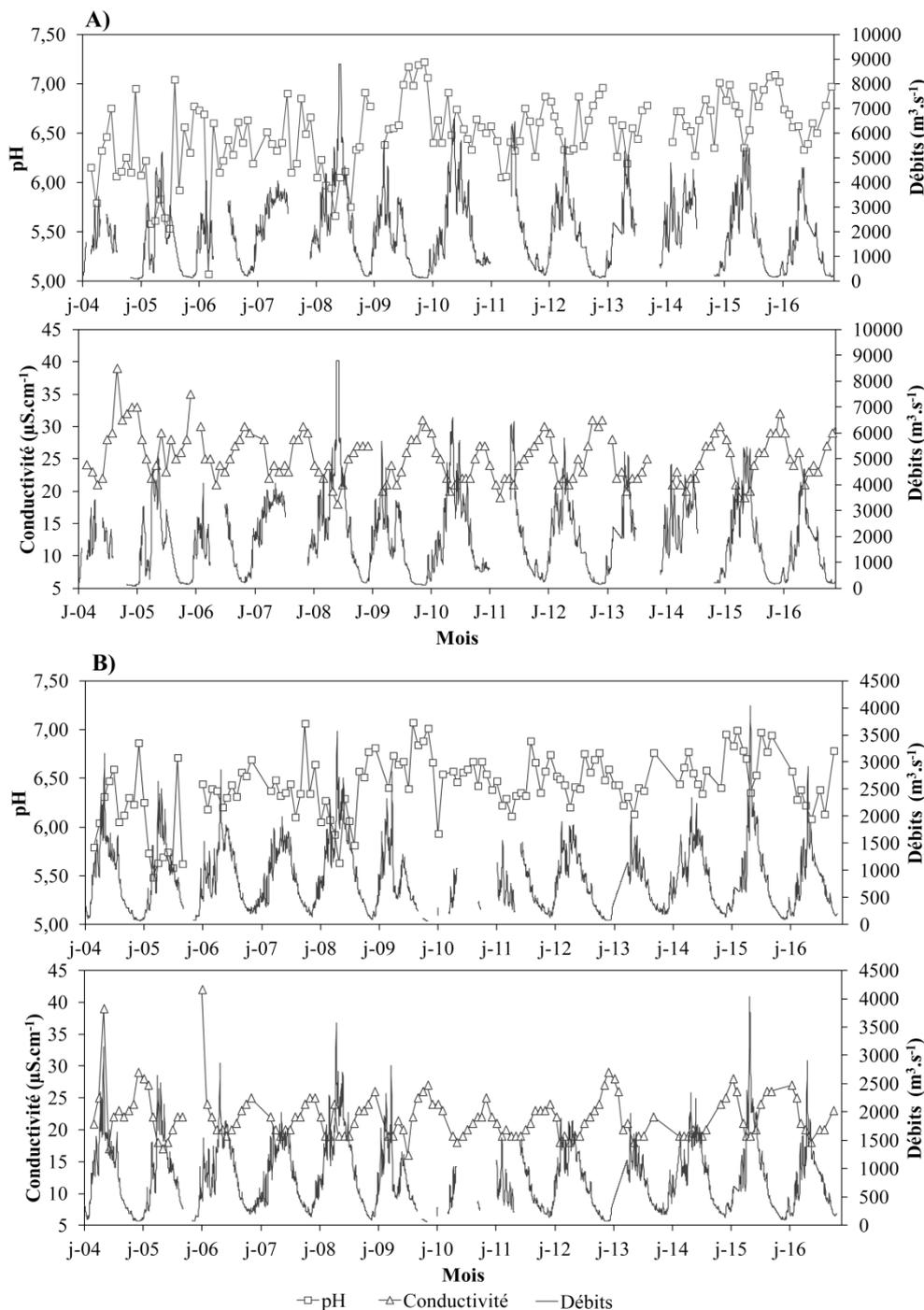
- Song C, Wang G, Sun X, Chang R, Mao T. 2016. Control factors and scale analysis of annual river water, sediments and carbon transport in China. *Scientific reports*, **6**.
- Spencer RG, Hernes PJ, Dinga B, Wabakanghanzi JN, Drake TW, Six J. 2016. Origins, seasonality, and fluxes of organic matter in the Congo River. *Glob. Biogeochem. Cycle*, **30**: 1105-1121.
- Stallard R. 1987. Cross-channel mixing and its effect on sedimentation in the Orinoco River. *Water Resour. Res.*, **23**: 1977-1986.
- Stallard R, Koehnken L, Johnsson MJ. 1991. Weathering processes and the composition of inorganic material transported through the Orinoco River system, Venezuela and Colombia. *Geoderma*, **51**: 133-165.
- Stallard RF. 1985. River Chemistry, Geology, Geomorphology, and Soils in the Amazon and Orinoco Basins. In: *The Chemistry of Weathering*, Drever JI (Eds.): 293- 316.
- Stanley J-D, Clemente PL. 2017. Increased Land Subsidence and Sea-Level Rise are Submerging Egypt's Nile Delta Coastal Margin. *GSA Today*, **27**.
- Steiger J, Corenblit D. 2000. Dynamique fluviale de la Garonne Toulousaine. Base de données bibliographiques sur l'hydrogéomorphologie de la Garonne. Les Etudes de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne.
- Steiger J, Corenblit D. 2000. Dynamique fluviale de la Garonne Toulousaine. Synthèse des connaissances géomorphologiques. Les Etudes de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne: 260.
- Steiger J, Gurnell AM. 2003. Spatial hydrogeomorphological influences on sediment and nutrient deposition in riparian zones: Observations from the Garonne River, France. *Geomorphology*, **49**: 1-23.
- Steiger J, James M, Gazelle F. 1998. Channelization and consequences on floodplain system functioning on the Garonne River, SW France. *Regulated Rivers: Research & Management*, **14**: 13-23. DOI: 10.1002/(sici)1099-1646(199801/02)14:1<13::aid-rrr473>3.0.co;2-b.
- Stramski D, Reynolds RA, Babin M, Kaczmarek S, Lewis MR, Rottgers R, Sciandra A, Stramska M, Twardowski MS, Franz BA, Claustre H. 2008. Relationships between the surface concentration of particulate organic carbon and optical properties in the eastern South Pacific and eastern Atlantic Oceans. *Biogeosciences*, **5**: 171-201.
- Suriname SPo. 1988. Suriname planatlas: 57 pp.
- Syvitski JPM, Saito Y. 2007. Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Glob. Planet. Change*, **57**: 261-282. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.12.001>.
- Tassinari CCG, Macambira MJB. 1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, **22**: 174-182.
- Théveniaut H, Billa M, Cassard D, Delor C, Maldan F. 2011. Le plateau des Guyanes et son potentiel minier. *Géosciences*: 60-67.
- Théveniaut H, Delor C. 2004. Connaissance géologique de la Guyane. Livret de l'Enseignant. BRGM, Cayenne.
- Théveniaut H, Freyssinet P. 1999. Paleomagnetism applied to lateritic profiles to assess saprolite and duricrust formation processes: the example of Mont Baduel profile (French Guiana). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **148**: 209-231.

- Théveniaut H, Freyssinet P. 2002. Timing of lateritization on the Guiana Shield: synthesis of paleomagnetic results from French Guiana and Suriname. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **178**: 91-117.
- Thurman EM. 1985. Organic geochemistry of natural waters. Martinus Nijhoff/Dr W. Junk
- Tranvik LJ, Downing JA, Cotner JB, Loiselle SA, Striegl RG, Ballatore TJ, Dillon P, Finlay K, Fortino K, Knoll LB. 2009. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, **54**: 2298-2314.
- Valentin C, Agus F, Alamban R, Boosaner A, Bricquet J-P, Chaplot V, De Guzman T, De Rouw A, Janeau J-L, Orange D. 2008. Runoff and sediment losses from 27 upland catchments in Southeast Asia: Impact of rapid land use changes and conservation practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **128**: 225-238.
- Van Oost K, Quine T, Govers G, De Gryze S, Six J, Harden J, Ritchie J, McCarty G, Heckrath G, Kosmas C. 2007. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle. *Science*, **318**: 626-629.
- Vantrepotte V, Mélin F. 2011. Inter-annual variations in the SeaWiFS global chlorophyll a concentration (1997–2007). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **58**: 429-441. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2011.02.003>.
- Vauchel P. 2004. HYDRACCESS, gestion et traitement de données hydrologiques sous Office 2000. HyBAm.
- Verney R. 2006. Processus de contrôle de la dynamique des sédiments cohésifs: Mesures in situ, mesures expérimentales et modélisation: Application à l'estuaire de Seine. Rouen.
- Vigouroux R, Guillemet L, Cerdan P. 2005. Etude de l'impact de l'orpaillage alluvionnaire sur la qualité des milieux aquatiques et la vie piscicole. Report H-D (Eds.): 1-15.
- Walling DE. 2006. Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology*, **79**: 192-216. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.019>.
- Walling DE, B.W. W. 1996. Erosion and sediment yield a global overview. In: *Proceedings of the Exeter Symposium, Perspectives EaSYGaR IAHS Publisher (Eds.)*.
- Wang G. 2011. Assessing the potential hydrological impacts of hydraulic redistribution in Amazonia using a numerical modeling approach. *Water Resour. Res.*, **47**: W02528.
- Wang S, Zhang Z, McVicar TR, Guo J, Tang Y, Yao A. 2013. Isolating the impacts of climate change and land use change on decadal streamflow variation: Assessing three complementary approaches. *J. Hydrol.*, **507**: 63-74.
- Warne AG, Meade RH, White WA, Guevara EH, Gibeaut J, Smyth RC, Aslan A, Tremblay T. 2002. Regional controls on geomorphology, hydrology, and ecosystem integrity in the Orinoco Delta, Venezuela. *Geomorphology*, **44**: 273-307. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00179-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00179-9).
- Wohl E, Merritts DJ. 2007. What Is a Natural River ? , **1**: 871-900.
- World Wildlife Fund. 2013. Estimation de l'emprise de l'activité aurifère illégale en Guyane-année 2008. WWF (Eds.): 11p.
- Wright S, Jeffrey S, Mantoura R. 2005. Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods. Unesco Pub.

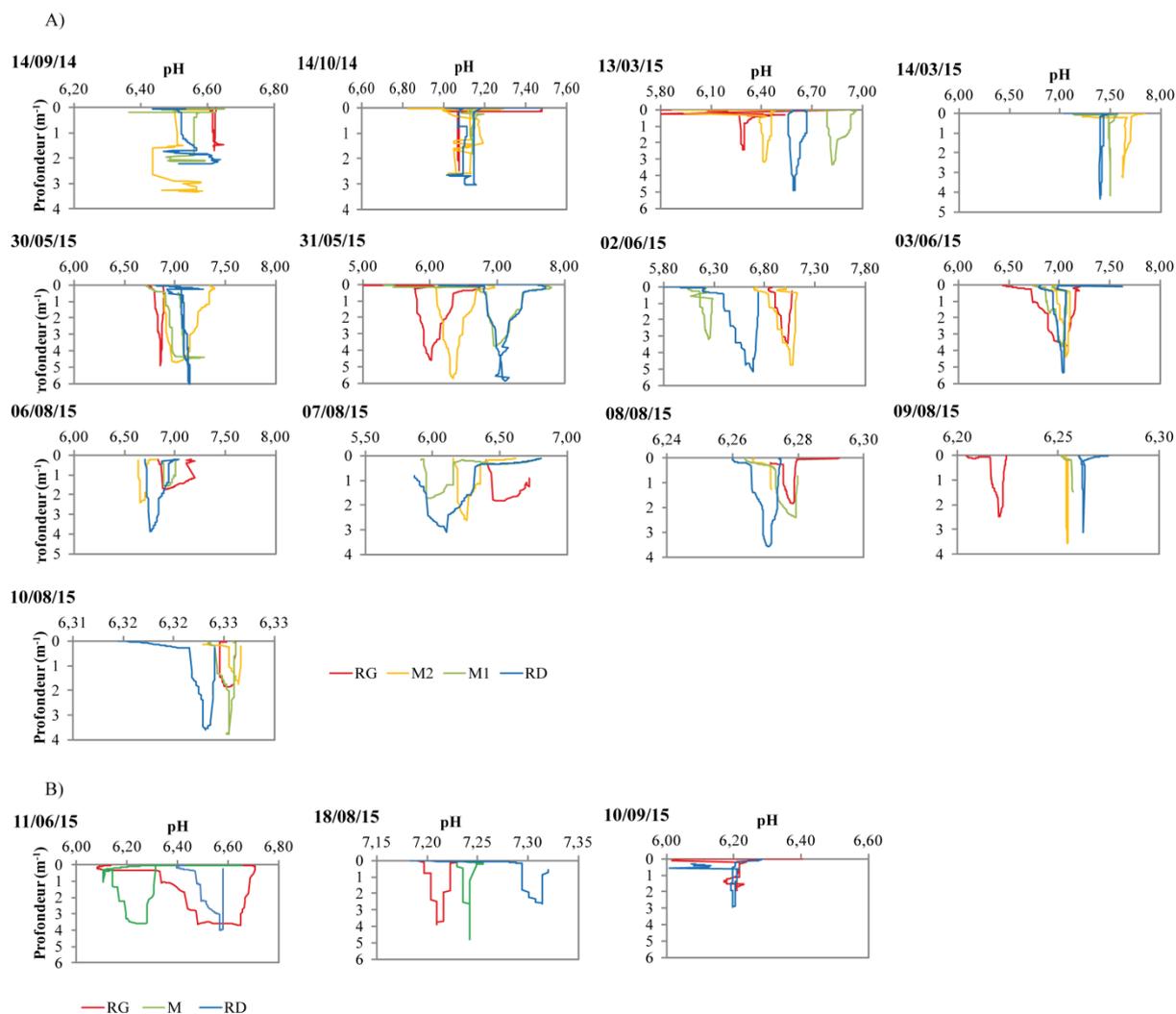
- Wu Sa, Ge Ja, Miao Wa, Cheng La, Ran Ga, Cao Ha. 2013. Spatio-temporal distribution of epilithic algal chlorophyll a in relation to the physico-chemical factors of Gufu River in Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, **33**: 7023-7034.
- WWDR. 2015. The United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world. UNESCO Publishing.
- WWF Guianas. 2012. Living Guianas Report 2012. State of te Guianas. Drivers and pressures. Toard green economies. WWF in collaboration with Universiteit Utrecht, Paramaribo, Suriname (Eds.): 43p.
- Xu Z, Zhao F, Li J. 2009. Response of streamflow to climate change in the headwater catchment of the Yellow River basin. *Quat. Int.*, **208**: 62-75.
- Yang SL, Milliman JD, Li P, Xu K. 2011. 50,000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta. *Glob. Planet. Change*, **75**: 14-20. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.09.006>.
- Yépez S, Laraque A, Martinez J-M, De Sá J, Carrera J-M, Castellanos B, Gallay M, Lopez J-L. 2017. Retrieval of Suspended Sediment Concentrations using Landsat-8 satellite images in the Orinoco River (Venezuela). *Comptes Rendus Géosciences*: 1-10.
- Zeng N, Yoon J-H, Marengo JA, Subramaniam A, Nobre AD, Mariotti A, Neelin JD. 2008. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. *Environ. Res. Lett.*, **3**: 014002.
- Zhang X, Zhang L, Zhao J, Rustomji P, Hairsine P. 2008. Responses of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China. *Water Resour. Res.*, **44**.
- Zhao G, Kondolf GM, Mu X, Han M, He Z, Rubin Z, Wang F, Gao P, Sun W. 2017. Sediment yield reduction associated with land use changes and check dams in a catchment of the Loess Plateau, China. *CATENA* **148**, 126-137.
- Ziegler AD, Benner SG, Kunkel ML, Phang VXH, Lupascu M, Tantasirin C. 2016. Particulate carbon and nitrogen dynamics in a headwater catchment in Northern Thailand: hysteresis, high yields, and hot spots. *Hydrol. Process.*, **30**: 3339-3360. DOI: [10.1002/hyp.10840](https://doi.org/10.1002/hyp.10840).
- Zonzon J, Prost G. 1996. Histoire de la Guyane. Maisonneuve & Larose: Servedit.

Annexes

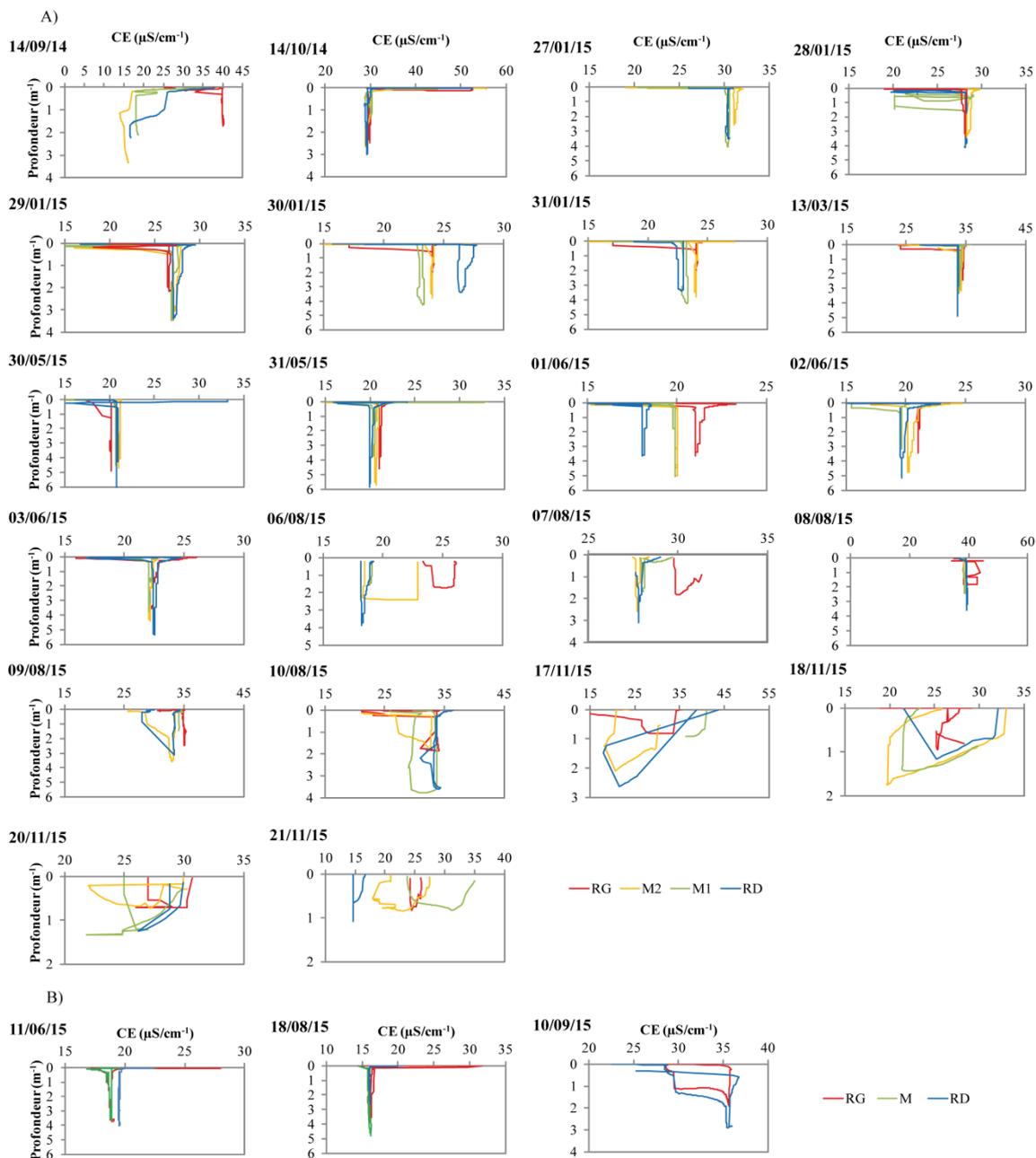
Annexe 6-1. Distribution du pH et de la conductivité électrique en fonction du débit journalier de Langa Tabiki sur le Maroni et Saut Maripa sur l'Oyapock, aux points de prélèvement du SNO-HYBAM localisés A) au Saut Hermina et B) au Saut Maripa pour la période 2004-2016.



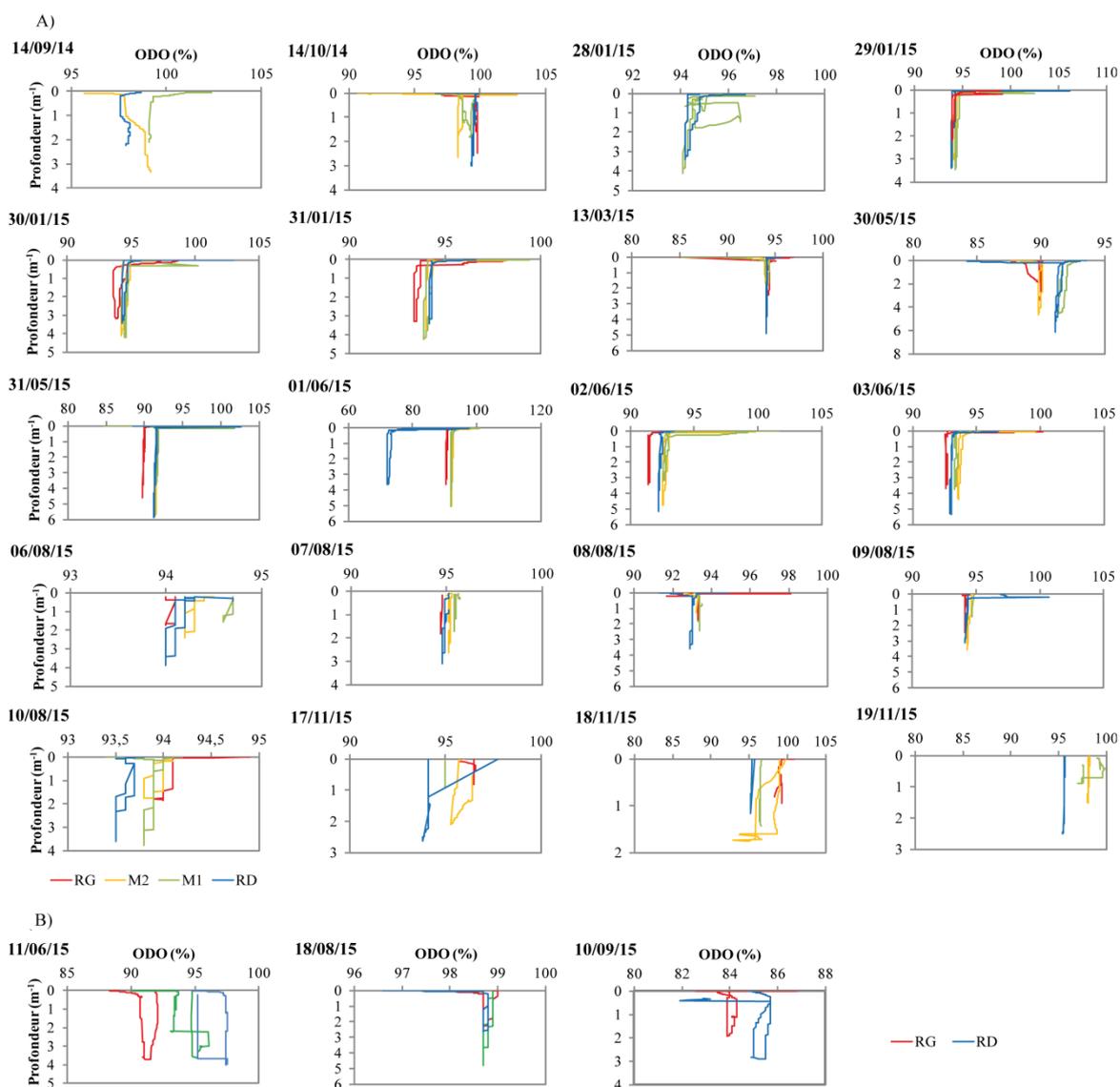
Annexe 6-2. Distributions du pH dans la colonne d'eau à partir de la sonde EXO-2 A) pour l'Oyapock (à la station de police du Brésil), en rive droite (RD) et gauche (RG) respectivement à - 100 et - 300 m de la rive droite et, (B) pour le Maroni (au Saut Hermina) selon un transect allant de la rive droite vers la rive gauche respectivement à : - 250 m de la rive droite (RD) - 500 m (M1/point hybam) - 750 m (M2) - 900 m (RG).



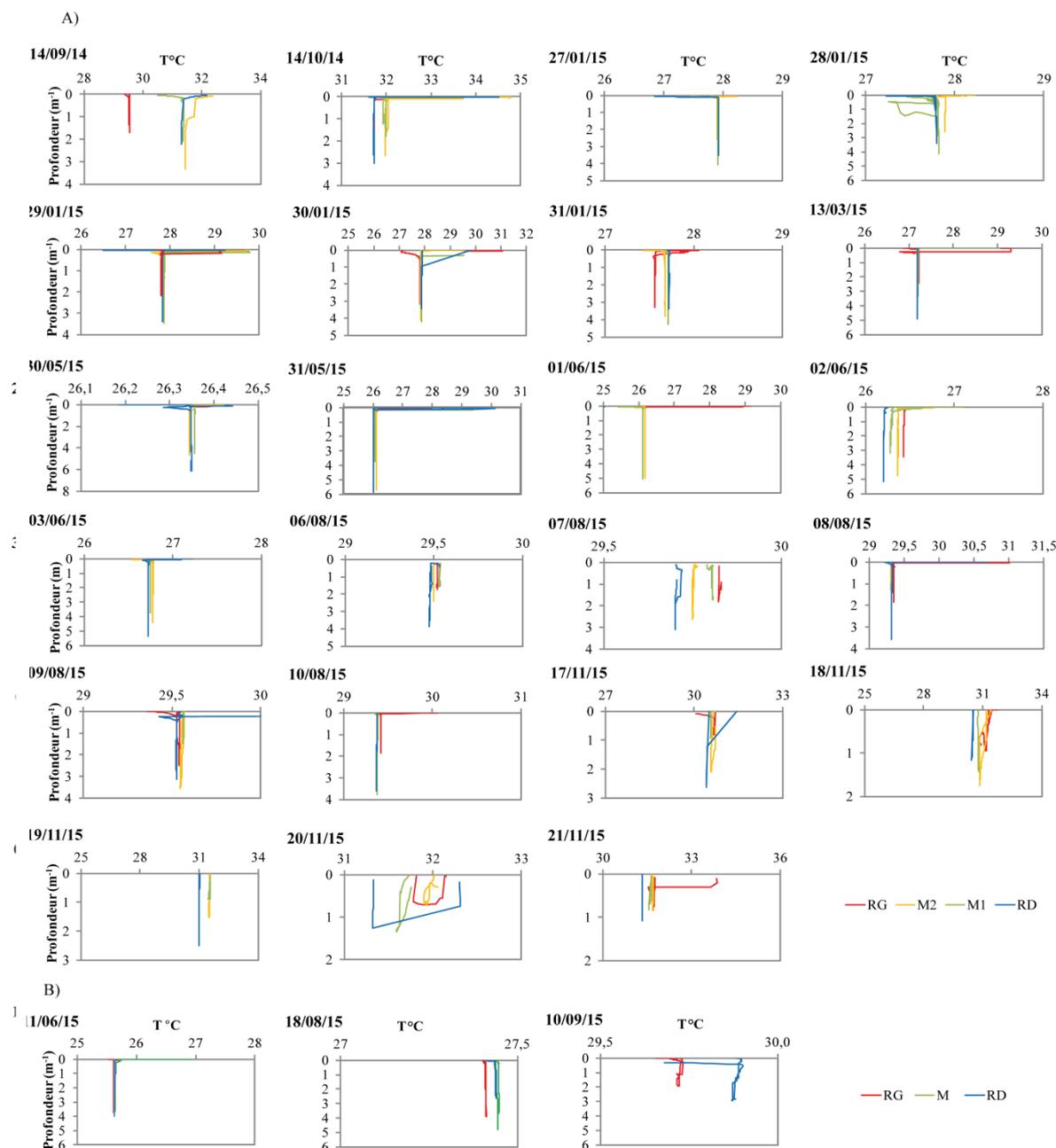
Annexe 6-3. Distribution de la conductivité électrique (CE en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 25°C) dans la colonne d'eau à partir de la sonde EXO-2 : A) pour le Maroni (au Saut Hermina) selon un transect allant de la rive droite vers la rive gauche respectivement à : - 250 m de la rive droite (RD) - 500 m (M1/point hybam) - 750 m (M2) - 900 m (RG) ; B) pour l'Oyapock (à la station de police du Brésil), en rive droite (RD) et gauche (RG) respectivement à - 100 et - 300 m de la rive droite.



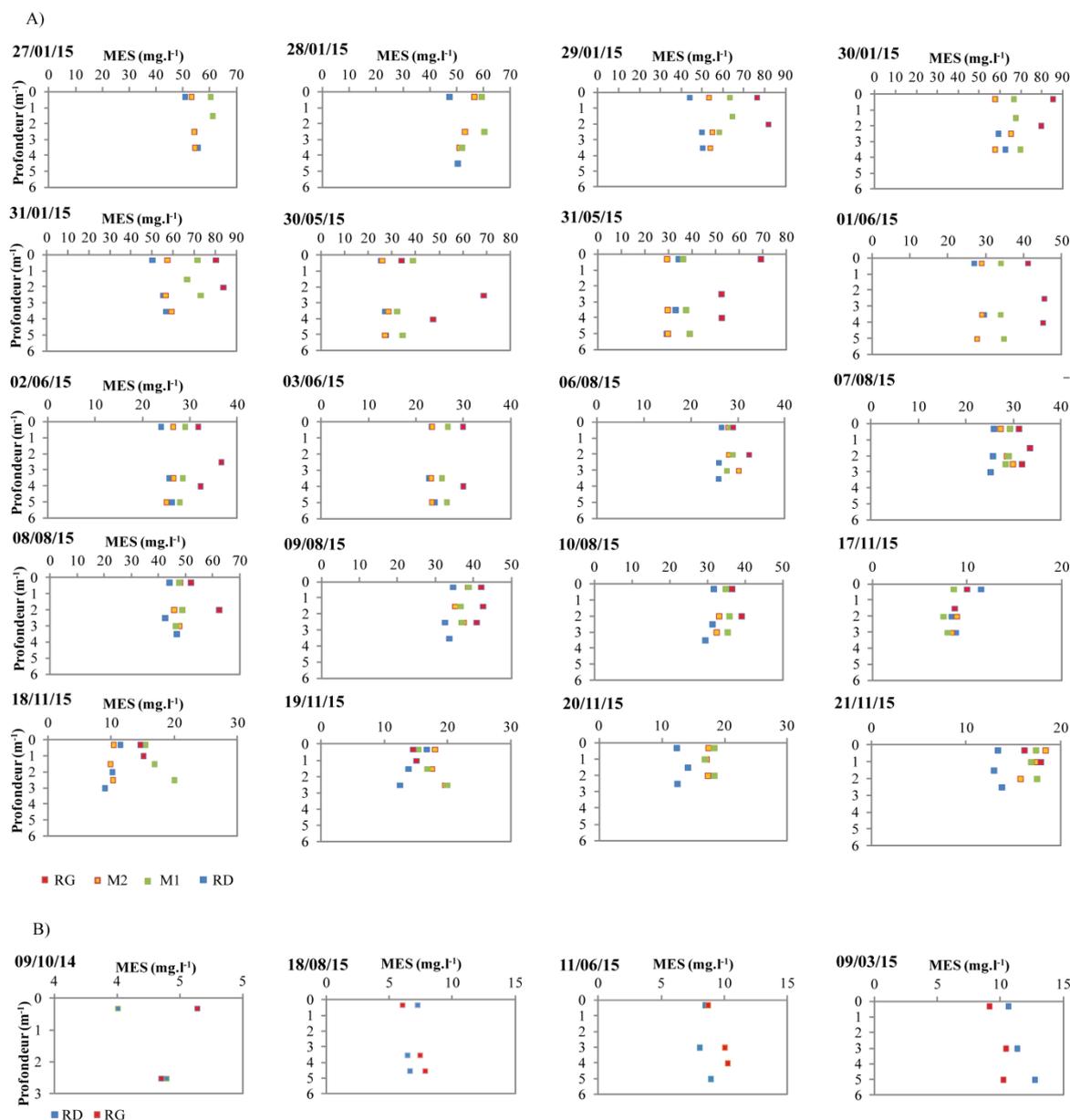
Annexe 6-4. Saturation de l'oxygène dans la colonne d'eau, en pourcentage, à partir de la sonde EXO-2 : A) pour le Maroni (au Saut Hermina) selon un transect allant de la rive droite vers la rive gauche respectivement à : - 250 m de la rive droite (RD) - 500 m (M1/point hybam) - 750 m (M2) - 900 m (RG) ; B) pour l'Oyapock (à la station de police du Brésil), en rive droite (RD) et gauche (RG) respectivement à - 100 et - 300 m de la rive droite.



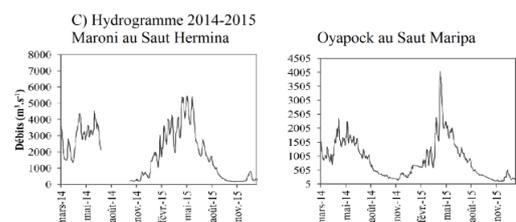
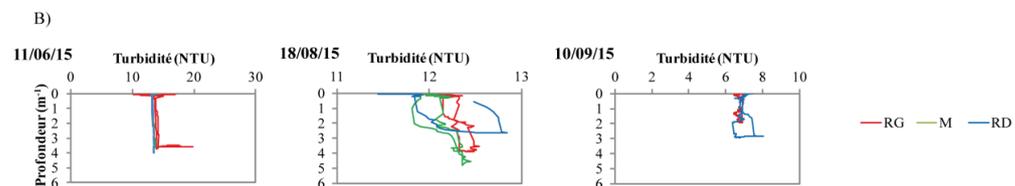
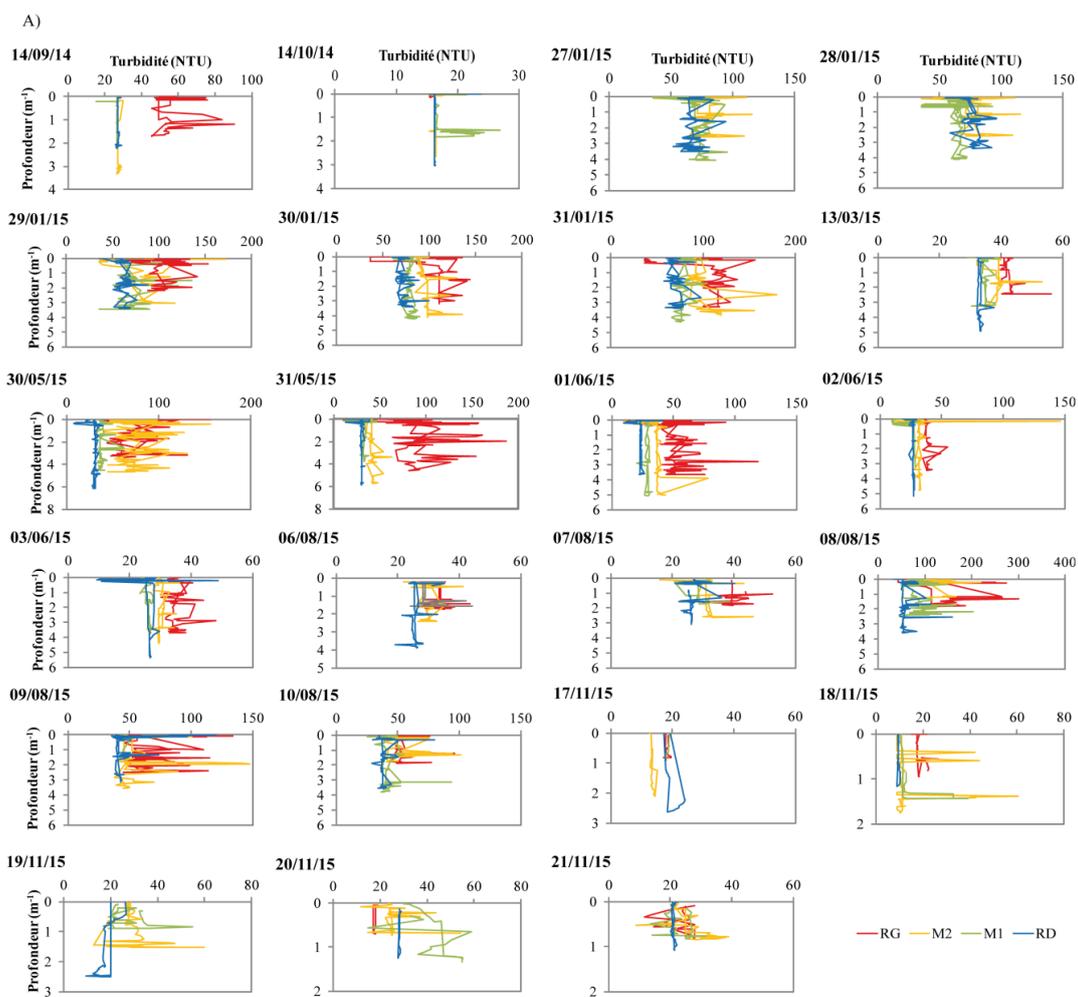
Annexe 6-5. Distribution de la température (T°C) dans la colonne d'eau à partir de la sonde EXO-2 : A) pour le Maroni (au Saut Hermina) selon un transect allant de la rive droite vers la rive gauche respectivement à : - 250 m de la rive droite (RD) - 500 m (M1/point hybam) - 750 m (M2) - 900 m (RG) ; B) pour l'Oyapock (à la station de police du Brésil), en rive droite (RD) et gauche (RG) respectivement à - 100 et - 300 m de la rive droite.



Annexe 6-6. Distribution des concentrations de MES dans la colonne d'eau à partir de prélèvements ponctuels réalisés avec une bouteille NISKIN en sub-surface et à des profondeurs équivalentes à 35 et 80 % de la hauteur d'eau totale : A) pour le Maroni (au Saut Hermina) selon un transect allant de la rive droite vers la rive gauche respectivement à : - 250 m de la rive droite (RD) - 500 m (M1/point hybam) - 750 m (M2) - 900 m (RG) ; B) pour l'Oyapock (à la station de police du Brésil), en rive droite (RD) et gauche (RG) respectivement à - 100 et - 300 m de la rive droite.

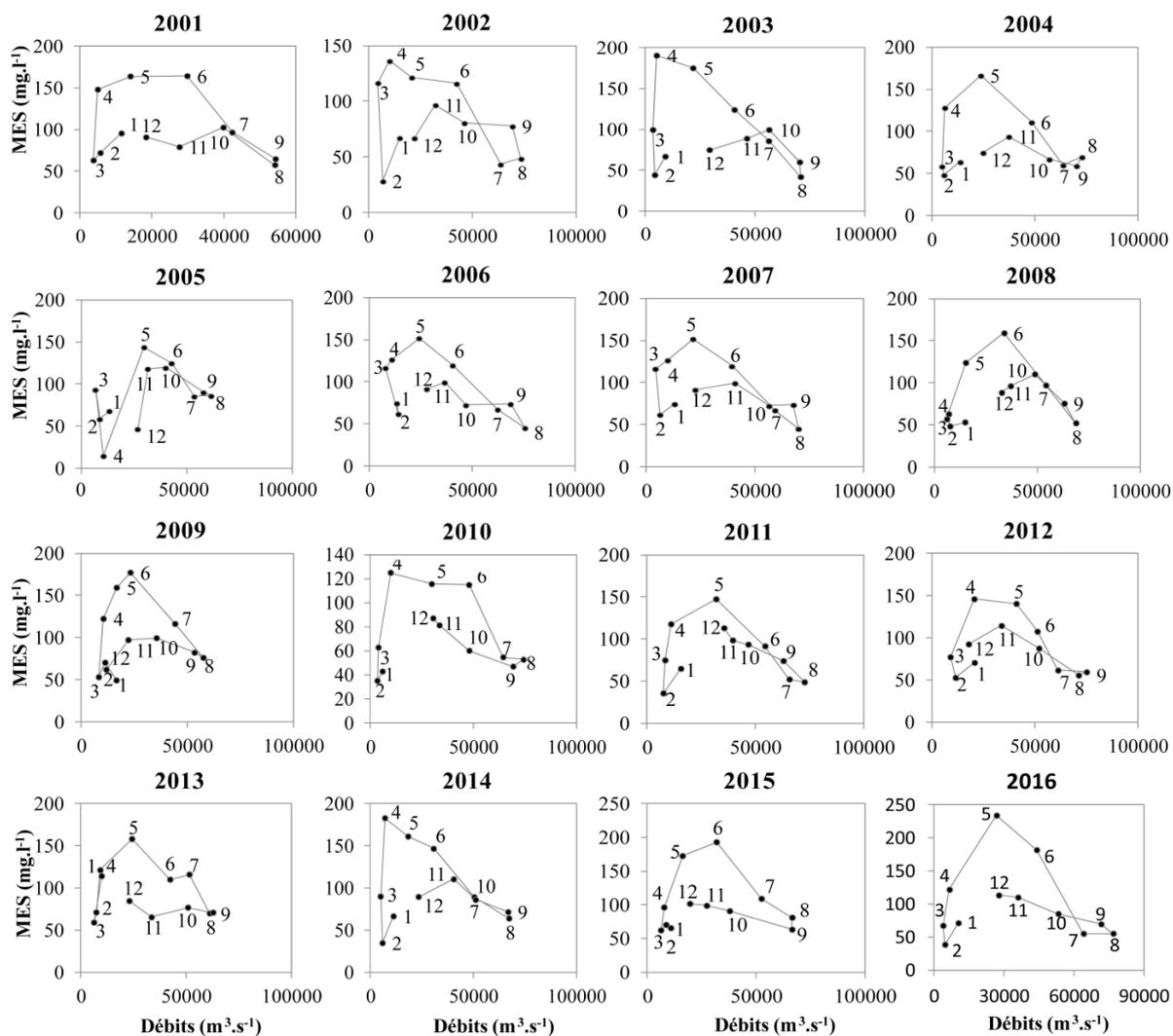


Annexe 6-7. Distribution de la turbidité dans la colonne d'eau à partir de la sonde EXO-2 : A) pour le Maroni (au Saut Hermina) selon un transect allant de la rive droite vers la rive gauche respectivement à : - 250 m de la rive droite (RD) - 500 m (M1/point hybam) - 750 m (M2) - 900 m (RG) ; B) pour l'Oyapock (à la station de police du Brésil), en rive droite (RD) et gauche (RG) respectivement à - 100 et - 300 m de la rive droite ; C) et cycles hydrologiques (2014-2015).

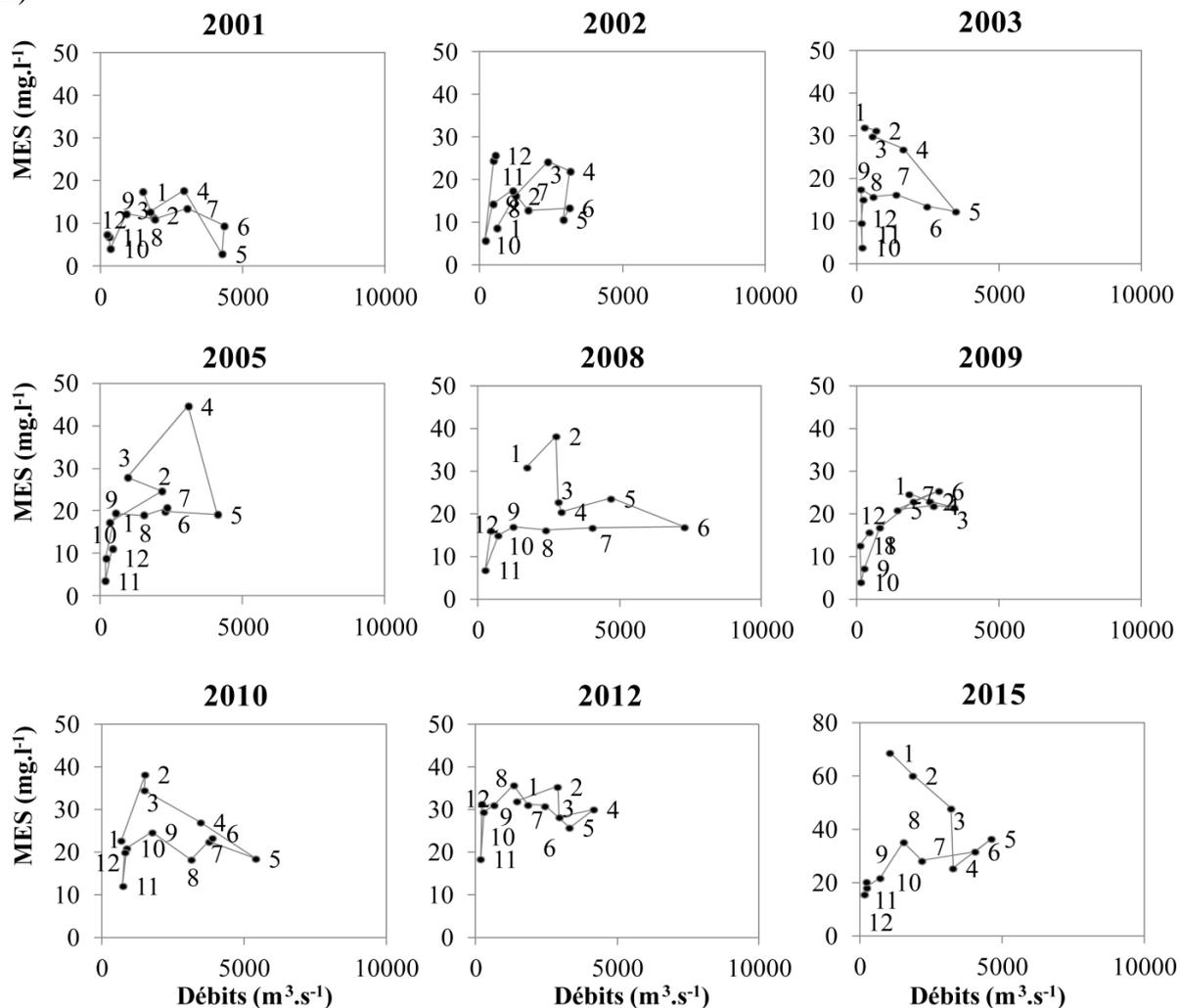


Annexe 6-8. Hystérésis entre les matières en suspension et le débit : A) sur l'Orénoque à Ciudad Bolivar, B) sur le Maroni au Saut Hermina et C) sur l'Oyapock au Saut Maripa.

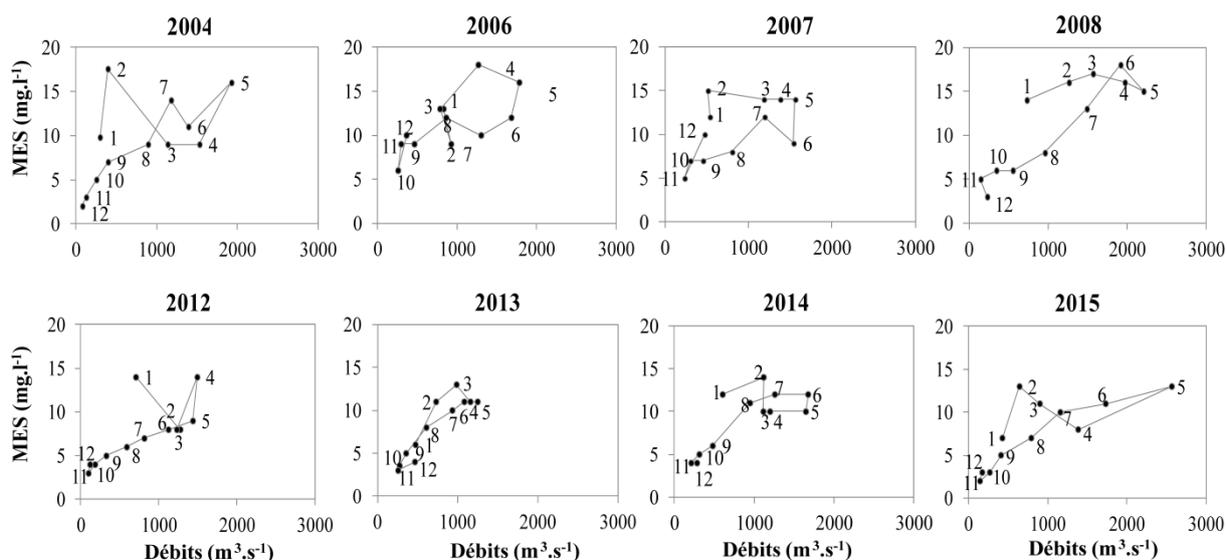
A)



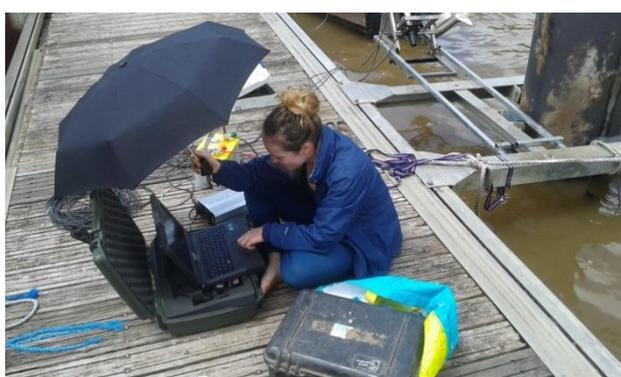
B)



C)



Annexe 6-9. Photos des missions de terrain sur le Maroni en Guyane. Calibration des appareils de terrain et mesures en laboratoire, création d'un support pour les Trios Ramses, puis calibration des équipements, mesures physico-chimiques, mesures ADCP, station hydrométrique de Langa Tabiki, barge d'orpillage, bords de berges, dégradés, pontons, quais et villages.

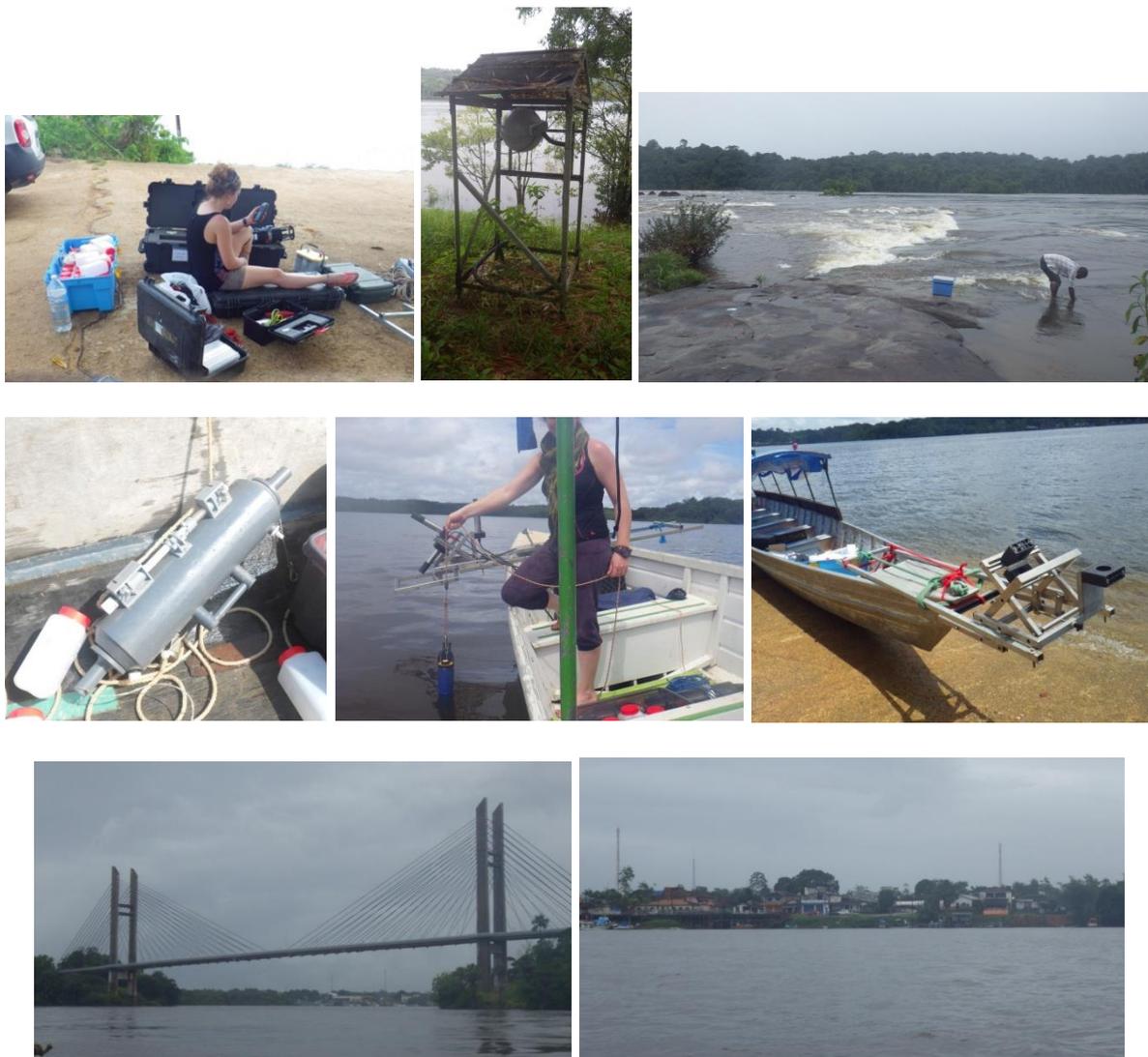






Annexe 6-10. Photos des missions de terrain sur l'Oyapock en Guyane.

Station limnimétrique du Saut Maripa, prélèvement d'eau du SNO-HYBAM, prélèvement d'eau dans la colonne d'eau, mesures des paramètres physico-chimiques avec la sonde EXO2 et mesure de la réflectance de l'eau, pont de l'Oyapock et village Oiapoqué au Brésil.

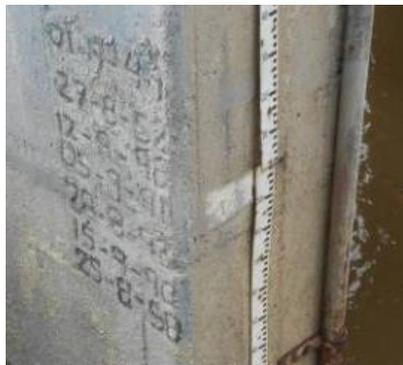


Annexe 6-11. Photos des missions de terrain sur l'Orénoque au Venezuela.

Mission Novembre/Décembre 2014 : mesures de la réflectance de l'eau, mise en route de l'ADCP Riveray pour la mesure des débits, suivi des paramètres physico-chimiques et prélèvement d'eau dans la colonne d'eau.



Mission août/septembre 2015 : station limnimétrique de Ciudad Bolivar, crues exceptionnelles marquées dans la pierre, bouée de prélèvement d'eau du SNO-HYBAM, bateaux mis à disposition par la Marine fluviale du Venezuela, prélèvement d'eau, suivi des paramètres physico chimiques, mesures de la réflectance de l'eau, mise en route de l'ADCP Riveray pour la mesure des débits, équipe de travail lors de la mission.





Mission octobre 2015 : mesure des paramètres physico chimiques, mesures de la réflectance de l'eau, mise en route de l'ADCP Riveray pour la mesure des débits.



ARTICLE A : Impact de la dégradation des sols due aux activités de déforestation et minières sur les flux sédimentaires du Maroni et l'Oyapock (Guyane française)



Barge d'orpaillage en fonction à Langa Tabiki sur le Maroni en mars 2015



Eaux troubles (60 NTU) du Maroni en mars 2015

Impact of land degradation from mining activities on the sediment fluxes in two large rivers in French Guiana

LAND DEGRADATION & DEVELOPMENT

Soumis

Gallay M.^{1,2}, Martinez J-M.³, Allo S.⁴, Mora A.⁵, Cochonneau G.³, Gardel A.⁶,
Doudou J.C.⁷, Sarrazin M.⁸, Chow-Toun F.⁹, Laraque A.¹⁰

*Corresponding author tel.: +33 594 694 137 170

marjorie.gallay@gmail.com or, marjorie.gallay@ird.fr

1 GET- UMR CNRS/IRD/UPS–UMR 5563, UR 234, Cayenne, Guyane Française

2 Université de la Guyane, Cayenne, Guyane française

3 GET-UMR CNRS/IRD/UPS–UMR 5563, UR 234, Brasilia, Brazil

4 ONF en Guyane, Cayenne, Guyane française

5 Centro del agua para América Latina y el Caribe. Tecnológico de Monterrey, Monterrey, México

6 IMAGO, US 191, Cayenne, Guyane française

7 OBHI, BP 165, Cayenne, Guyane française, France

8 LEEISA, USR mixte CNRS/UG/IFREMER – USR 3456, Cayenne, Guyane française

9 Office de l'Eau de Guyane, UMR-PRODIG 8586, Université Paris 7, Cayenne, Guyane française

10 GET-UMR CNRS/IRD/UPS–UMR 5563, UR 234, Montpellier, France

5.7 Abstract

We analyzed two contrasting catchments located along the world's largest unspoiled tropical rainforests located in the northeastern coast of South America and impacted by mining activities. We used: (i) the surfaces of mining, agricultural and urbanized areas to compare the land use evolution with suspended sediments and sediment yields (ii) field monthly suspended sediment in the 2 catchments (2004-2015: n=154), (ii) MODIS remote sensing water color technique in the Maroni basin to complete (n=387) and extend field suspended sediment water sampling from 2000-2015, (iii) statistical analysis on hydro, climatic and sediment concentrations to identify the long term trends, the abrupt changes in time series and to analyze if a significant component of the regional variation of sediment yields can be explained by a combination of several controls.

No significant long-term changes were observed in precipitation or water discharge with the Mann-Kendall test. However, the mean suspended sediment concentration has increased significantly (239%) in the Maroni River with a breakpoint in 2009 and decreased 33% in the Oyapock River (breakpoint in 2008). These differences are explained by the larger percentage of deforestation from mining activities in the Maroni (0.37%) than in the Oyapock (0.06%) catchments. In the Maroni River, the increasing sediment yield trend (2000-2015) coincide significantly ($R^2=0.97$; $p<0.0001$) with the increase of 400% of mining areas, whereas no significant relationship with the runoff were found. In the Oyapock River, the runoff explains the sediment yield ($R^2=0.82$; $p<0.0001$) decreasing trend and no relationship with the land use change were found.

Keywords: Sediment Loads; Sediment Yields; Runoff; MODIS; Mining,

5.8 Introduction

At a global scale, there are only few rivers that have not undergone alterations in their hydrological and morphological processes or in their water quality because of a change in land use, hydrological or climatic conditions in their catchments (Milliman *et al.*, 2008; WWDR, 2015; Pekel *et al.*, 2016). As reported by Pékel (2016) and Syvitsky *et al.* (2007), water discharge and global sediment loads to the ocean are decreasing, mainly due to the increasing number of dams worldwide and the global water demand (WWAP, 2015). At the same time, erosion processes are increasing within catchments due to the increasing rates of land-use conversion. Consequently, sediments are accumulated in dams, which may create costly

problems in their operational conditions and alter the dynamics of water and sediment discharge in river basins (Shi *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2017). For example, in the Yellow River, sediments-trapping dams are used to prevent sediments from entering in the main stem and drying tributaries (Shi *et al.*, 2015, 2016).

Nowadays, few studies have dealt with the short- and long-term consequences of deforestation and mining activities on soil erosion and water discharge in tropical regions. Over the past decade, the tropical region was the only climate domain from 2000 to 2012 to exhibit a significant decrease trend of forest loss, with 2101 km² per year (Hansen *et al.*, 2013). Demographic, economic and social changes impose considerable pressure on forest cover (Valentin *et al.*, 2008), water resources and leaving conditions, in spite of they are hotspot of biodiversity (Mittermeier *et al.*, 1998) and freshwater ecoregions (Abell *et al.*, 2008). Several examples of how deforestation and land use changes can alter the natural dynamic of water sources in the tropic can be found in the Amazon region, specifically in the Tocantins and Araguaia rivers, where Coe *et al.* (2009) have shown that deforestation changes in the eastern part of the basin increase the water discharge. Similarly, Restrepo *et al.* (2006) and Higgins *et al.* (2016) have shown that the land-use change led to severe soil erosion affecting the sediment yields in the Magdalena River, Colombia. In Papua (New Guinea), Hettler *et al.* (1997) concluded that mining has increased the sediment loads by approximately 5-10 times over the natural background, with very high deposition rates in the creeks, channels and floodplains.

On the other hand, it is well known that a change in the balance of sediment fluxes have direct implications for water quality and freshwater habitats. A change of turbidity affect the amount of light that can penetrate through the water column, with consequences on the photosynthetic processes and the production of dissolved oxygen (Boyd, 2015). The change of visibility and clogging affect aquatic organisms in terms of their most basic needs, such as hunting for food, reproduction and the development of eggs and larvae (Alabaster and Lloyd, 2013; Dedieu *et al.*, 2015). Also, the flux of sediments is a suitable indicator of the concentration of bacteria, nutrients and pollutants in waters (Pourabadehei & Mulligan, 2016). For example, in several French Guiana rivers and streams, the concentration of Mercury (Hg) in bottom sediments as been well correlated with fine size particle (30 to 100 μ m) (Guedron *et al.*, 2009).

The Maroni (MAR) and Oyapock (OYA) river basins are located in the northeastern Guiana Shield, French Guiana. Despite this area has the world's largest forest cover (more than 98%), both basin have been strongly impacted by small-scale gold mining activities in the last

20 years. In addition to the contamination of bottom sediments of rivers and streams with mercury (Hg), the impact of small-scale gold mining also includes deforestation, removal of soil layers, the increase in the concentration of suspended material in rivers, changes in the regimen and the geomorphology of rivers due to sedimentation, flow modifications, changes in landforms, and a total land degradation (Fong-Sam, 2009; Laperche *et al.* 2014). However, although the changes in the riverine regimes seem to be an obvious consequence of gold mining, there are no scientific studies that relate the increase in the suspended material in rivers with the land use changes due to small-scale gold mining. Therefore, the aim of this study is to monitor, using field and satellite data, the evolution of the suspended sediment fluxes in the MAR and OYA rivers located in the Guiana Shield and assess if the change in the sedimentary loads and yields are associated with the deforestation and the remove of soil layers caused by an increase in the mining activities in both basins. These rivers represent an excellent case of study because they are affected by deforestation and legal and illegal gold mining activities (Alvarez-Berriós & Aide, 2015; Rahm *et al.*, 2015). This region is considered to make up part of the largest unspoiled tropical rainforests in the world with 97% of their areas being classified as "primary forest" (Renoux *et al.*, 2003) with substantial freshwater reserves not influenced by dams (FAO, 2003; 2015). It also has one of the world's lowest erosion rates with 2 meter eroded per million years (Théveniaut & Delor, 2004).

5.9 Material and methods

5.9.1 Study area

The MAR and OYA Rivers are located in the extreme northeastern portion of the Guiana Shield in South America (**Figure 1**). The MAR catchment covers a total area of 66814 km² between longitudes 54 and 55°W and between latitudes 2 and 6°N, and it lies partly in Surinam (57% of the total catchment area) and partly in French Guiana (43%) (Hiez & Dubreuil, 1964). The MAR River is 612 km long, and its headwaters are located in the Mount Tumuk-Humak Mountains. The OYA catchment covers 33614 km² between longitudes 52 and 53°W and between latitudes 2 and 4°N, and it lies partly in Brazil (51%) and in French Guiana (49%). The OYA River is 404 km long and its sources are located in the Inini-Camopi mountain chain.

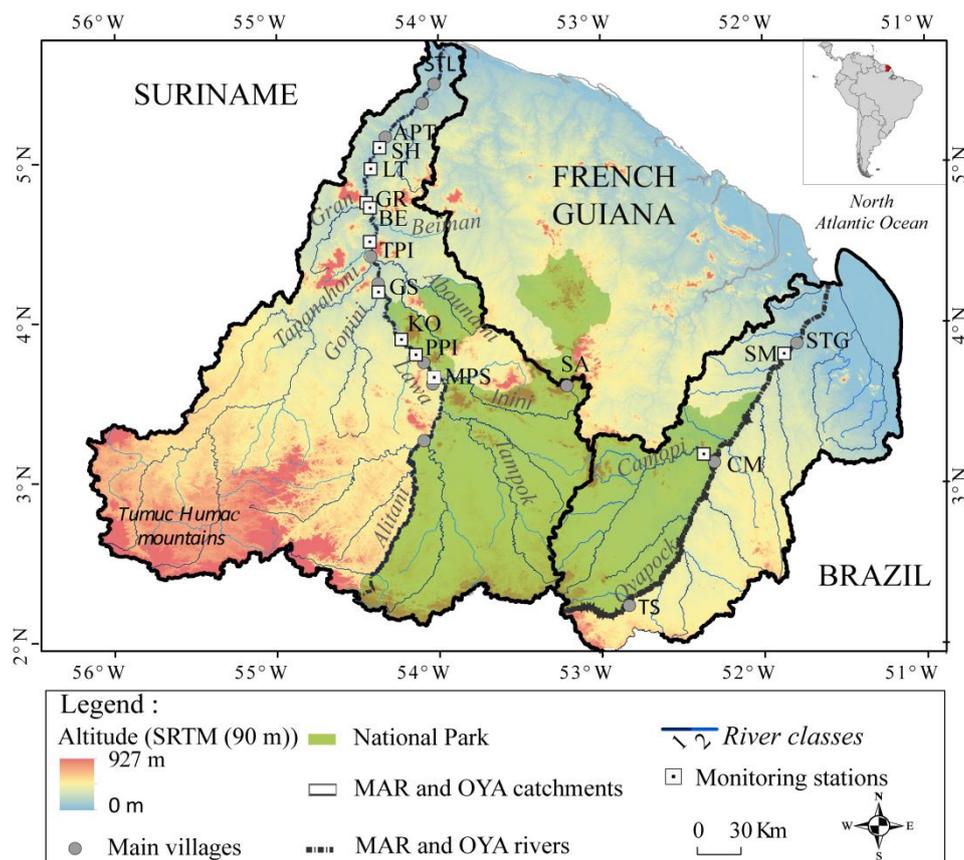


Figure 1. Maps of the MAR and OYA catchments showing topography, main cities location (grey circle), water gauge stations (LT and SM), sampling (SM, SH, CM, MPS) and virtual stations (SH, LT, GR, BE, TPI, GS, KO and PPI).

Small fluctuations in altitude (<700 m) are observed along the MAR and OYA rivers resulting in a gentle slope (<1%) (Palvadeau, 1998). Both rivers have a succession of about 100 rapids. In the MAR, there is a succession of rapids over 17 km for one made uneven total of 30 m (the region of abattis Cottica between PPI and GS) and the last rapid is at Saut Hermina. In the OYA River the Saut Maripa is the most important rapid, with a length of 4 km and a slope of 8 m (Hiez & Dubreuil, 1964).

The climate of the zone is equatorial (average of 2970 mm), with a strong rainfall gradient from the Atlantic Ocean westward that is controlled by the movement of the Inter-Tropical Convergence Zone (ITCZ). Therefore, the climate comprises two rainy seasons (December-February and April-July) and a dry season (August-November) (Héritier, 2011). The historical one hundred year flood with the law of Gumbel at SH was in 2008 ($8790 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) whereas at SM it was in 1989 ($4919 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) (BD Hydro: <http://hydro.eaufrance.fr/>).

Both basins are composed of three rock complexes: the Imataca Archean gneiss (3.4–2.7 Ga), the Lower Proterozoic volcano-sedimentary terrains and granite-gneiss rocks (2.3–1.9 Ga), and the Middle Proterozoic continental deposits and magmatic rocks (1.9–1.5 Ga) (Négre and Lachassagne, 2000).

The climatic and geodynamic conditions over the Guayana Shield since the Cretaceous have induced an extensive development of 50–100-m-thick laterite (red clays compact little permeable) masking the substratum with generally slow vertical drainage (Théveniaut and Delor, 2004). During the important rainy events, the latosol (2 m) allows the infiltration of the water in the ground. When this horizon is destroyed, the vertical infiltration of the rainwater is limited and allow the saturation of the superior horizons, which can then generate side flows.

5.9.2 *Land use changes*

To identify the changes in land use in both catchments, two data sets were used:

1) The artificial and agricultural areas inventory produced by the National Forest Service of French Guiana in 2005, 2008 and 2011 (ONF, 2011; 2013) and the National Park of French Guiana (data of CM and TS villages in 2011), which are based on photo interpretation of regional aerial photographs taken by the BD ORTHO[®]IGN (www.geoguyane.fr), SPOT, Pleiades, Landsat and Sentinel 2 satellite images.

The term “artificial areas” combines urbanized, industrial and green areas. The term “agricultural areas” concerns all the areas around main villages. On the opposite to an undisturbed area, the term disturbed area can be defined as an area with anthropic activities (agricultural, artificial or mining activities), that is, it is not a natural rainforest. For comparison with the evolution of S_y during the study period, a linear interpolation and extrapolation of the surface was assessed for the years 2002 and 2014 in the MAR basin, assuming a regularly increasing trend in urbanization. In the OYA basin, we used the same land use surface in 2005, 2008 and 2011 for the TS and CM Amerindian villages assuming an absence of important change during the last decade.

2) Forest areas impacted by mining were identified in the Guiana Shield (Guayana, Surinam, French Guiana and the North of Brazil) in 2000, 2008 and 2014 by the ONF and ONFI (International French Forest Service), the SBB (Foundation for Forest Management and Production Control) in Suriname and the SEMA (Secretaria do Estado de Meio Ambiente do Amapá) in Brazil, in collaboration with the World Wildlife Fund (WWF) (Debarros & Joubert,

2010; Rahm *et al.*, 2015) using high resolution satellite images (SPOT, Landsat and RapidEye images, see supplementary document). The mining surfaces of each sub-catchment are issues from an extraction of the complete shape file.

Mining areas can correspond to primary gold mining (hard rock mining) or alluvial gold mining (extracting gold from the creeks, rivers and streams). The gold mining site is composed by vegetation and abiotic land cover elements, such as bare soil, water (pits), vegetation, regrow fath and in specific cases degraded forest. Infrastructures (human settlements, runaway, roads, etc.) and agriculture in the vicinity of gold mining sites are not considered.

5.9.3 Field data

Water discharge and rainfall data

The principal gauging station of the MAR catchment is Langa Tabiki (LT), which drains 91% of the basin (60930 km²). For the OYA catchment, the main gauging station is Saut Maripa (SM) draining 74% of the basin (25120 km²). The OYA and MAR Rivers show similar annual cycles, including a period of high water lasting from May to July and a low water period lasting from October to December.

Data on water discharge (Q) were calculated with the Hydraccess software (Vauchel, 2004) using discharge rating curves from mechanical current meter coupled with an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP 1200 kHz from RD Instruments). Since 2001, river level measurements were collected automatically every half hour using satellite telemetry (limnometric 'Cloe' type sensors until 2001 and 'Argos' type sensors since 2004). All the gauging stations in French Guiana were installed in 1952-1953 by IRD (ex-ORSTOM) (Sondag *et al.*, 2010) and the rating curve used were created by the ORSTOM and completed with the actual DEAL in charge of the stations since 2004.

All precipitation (P) data were provided by Meteo France services, including rain gauge data from 1978 to 2015 at the Maripasoula (MPS), Papaïchton (PPI), Grand-Santi (GS), and Apatou (APT) stations within the MAR catchment, and the Saint-Georges de l'Oyapock (STG) and Camopi (CM) stations during the same period within the OYA catchment.

Suspended Sediment Concentration data

In this study, we used 3 data sets of suspended sediments and 2 data sets of turbidity values. The first data set (1) comprises Surface Suspended Sediment Concentrations (SSSC) measured and processed monthly since 2004 within the framework of the SNO-HYBAM

observation service program in the OYA and MAR basins: 154 water samples were collected along the border of rapids at the Saut Maripa (SM) station in the OYA basin and 154 samples were collected with a little boat at 475 m from the right riverbank at the Saut Hermina (SH) station in the MAR basin. The sampling points of the SNO-HYBAM in the OYA River at SM and in the MAR River at SH is explained by the fact that: (i) they are the last station before the ocean and control 91% for the MAR Basin and 74% for the OYA Basin, (ii) there is no influence of the sea tide, SNO HYBAM sampling site.

The second data set (2) includes 81 SSSC measurements performed during consecutive campaigns in 2015 along the MAR River at the location of virtual stations. As it will be discussed later, during the collection of these data, the water surface reflectance was also taken.

The third data set (3) comprises Suspended Sediment Concentration (SSC) performed at surface and within the water column (depths of 40% and 80%) to estimate the Average Suspended Sediment Concentrations (ASSC). These measurements were carried out from 2014 to 2015 during all the hydrological cycle (**Figure S1**): 323 water samples were collected in 2L Niskin bottles at SH station (MAR River) across the river (166, 475, 772 and 940 m from the right riverbank to the left bank during 33 sampling campaigns) and 36 water samples were collected in the same bottles at SM (OYA River) across the river (115, 292 and 487 from the right riverbank to the left bank during 4 sampling campaigns). Turbidity data were also measured at the same time in order to establish the relationship with the SSSC (**Figure S2**).

The fourth data set (4) includes turbidity values measured punctually by the French Guiana National Amazonian Park (PAG) at MPS (n=91; 2012-2015) in the MAR basin and CM in the OYA basin (n=36 from 2007 to 2012) with a Turbidimeter WTW 600 and in the Middle of the cross section.

Data sets (1) and (2) were used to calibrate and validate field and satellite-derived SSSC estimates, the data set (3) was used to calculate the river sediment discharge and the data set (4) was chosen in order to compare this turbidity data with SSSC data because of their good relationship. All concentrations of suspended sediments (SSSC and SSC) were determined by drying and weighing the sediment caught on sieves and membrane filters using Millipore 0.45- μm pore-sized cellulose filters according to the method of [Laraque *et al.* \(2013b\)](#).

Estimation of Suspended Sediment Loads (S_L)

To assess the Suspended Sediment loads (SL), we computed the ASSC from the sampling trips allowing to relate HYBAM water surface samples to samples collected in the water column. A very good linear relationship was found between ASSC and SSSC in both rivers, allowing to compute ASSC from surface samples using the following equations (**Figure S3**).

The S_L values were then calculated multiplying the ASSC by the daily water discharge (Q_j) and then dividing by the corresponding monthly discharge (Q_m), providing an estimate of the daily suspended material concentration (Laraque *et al.*, 2009; Laraque *et al.*, 2013b). Monthly and annual concentrations were then calculated (in $t.month^{-1}$ and in $t.yr^{-1}$) multiplying by the number of days.

Determination of Sediment Yield and Runoff

To compare study sites with other catchments, we calculated the sediment yield (S_y) and the water runoff (R), which are the sediment load (S_L) and the water discharge (Q), respectively, normalized by the drainage area at the hydrological main station. The cumulative double mass plots display the relationship between R and S_y . If S_L and Q present a similar trend, then the slope of the curve will not change, but if S_L increases or decreases, then the erosion/transport/deposition processes are changing (Walling, 2006).

5.9.4 Monitoring SSSC with MODIS

Field surface reflectance/SSSC retrieval model

We developed a reflectance/SSSC retrieval model based on sampling and we compared it with a model directly calculated from matched MODIS reflectance/SSSC sample data. We realized spectral radiometric measurements with TriOS-RAMSES spectroradiometers (**Figure S4**) at the river surface and at the same time in the water samples collected (n=81 for the MAR and n=10 for the OYA). The radiometers were mounted on one side of a small boat with the acquisition geometry recommended by Mobley (1999) and Remote sensing surface reflectance $R_{rs}(\lambda)$ values were then calculated using the protocol described by Mueller *et al.* (2003). In the OYA River and in contrast to the MAR River, the low spectral normalized reflectance values, the width of the river and the high annual cloud level, did not allow to develop a MODIS reflectance/SSSC sample model.

MODIS remote sensing images

In this study, we have used the MODIS products MOD/MYD09A1 and MOD/MYD09Q1 derived from data collected by the Terra and Aqua satellites. These products represent 8-day composites delivered at spatial resolutions of 250 m (for the Q1 product) and 500 m (for the A1 product). We determine the mean reflectance value at a virtual station with the MOD3R software according to the method described in [Martinez *et al.* \(2009\)](#), which has been successfully applied in a series of studies over rivers and lakes in the tropics ([Espinoza Villar *et al.*, 2012a](#); [Espinoza Villar *et al.*, 2012b](#); [Robert *et al.*, 2016](#)).

The matched MODIS surface reflectance/SSSC sample data were obtained by directly comparing MODIS 8-day composite reflectance in the red channel (640-680 nm) and daily water samples collected by HYBAM since 2004. Satellite images were used to create height virtual monitoring stations along the MAR River but four are detailed below: Saut Hermina (SH), Gran Creek (GR), Tapanahoni (TPI), and Abattis Kotika (KO). MODIS images could not be used over the OYA River because it presents too small section, not to mention that it is a very cloudy region. The minimum required for MODIS detection is a section wide of 300 m with no islands or sand banks.

5.9.5 Statistical analysis

SSSC retrieval model accuracy assessment

To compare the field-based and satellite-derived SSSC estimates, we used the BIAS statistical method and the Root Mean Square Error (RMSE) metrics, which are calculated as follow:

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

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

where y_i and x_i are the field-based and satellite-derived estimates of SSSC, respectively, given as percentages and n is the number of data.

Finally, the relative difference is calculated as the difference between the maximum and the minimum annual value expressed in percentage.

Water discharge, precipitation and SSSC trends

Trends in precipitation (P: period 1978-2015) and water discharge (Q: period 1953-2015) were analyzed in terms of the mean, maximum and minimum values at daily, monthly and annual scales using the Mann-Kendall test (Kendall, 1975; Mann, 1945) and the SSSC were analyzed at daily scale (period 2000-2015). The Mann-Kendall test (MKT) is a non-parametric test that is recommended by the World Meteorological Organization (Wang *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2008). The MKT is applied to check for the presence of long-term monotonic changes, to determine if the time series reflect increasing or decreasing trends (Buendia *et al.*, 2016, Shi *et al.*, 2016; Shi & Wang, 2015). This test does not depend on the magnitude and statistical distribution of the data and yield three parameters: the S statistic, Kendall's tau (τ) correlation and the significance level ($p \leq 0.05$). A positive value of S indicates a positive trend, whereas a negative value is indicative of a negative trend.

Furthermore, in order to detect potential breakpoints in the long-term daily time series of SSSC, we applied Pettitt's change point test methods (Pettitt, 1979), which is a non-parametric technique widely used to detect "change" or "no change" at a given point in time for continuous observations (Shi *et al.* 2016; Shi & Wang, 2015).

5.10 Results

5.10.1 Land use changes

In the OYA catchment, the deforestation induced by artisanal and small scale gold mining activities covered an area of 387 ha in 2000, 1542 ha in 2008 and 1874 ha in 2014 (0.06% of the catchment) and increase of 384% between 2000 and 2014 (**Table I**). The Camopi area (CM) in the catchment is the most exposed (sub-catchments 600 and 612: 1547 ha in 2014) (**Figure 2**).

In comparison, artificial and agricultural areas represented 2479 ha in 2011 (STG, CM and TS villages). Ignoring areas downstream SM station, artificial and agricultural areas represented 328 ha.

In the MAR catchment, the deforestation induced by mining activities covered 4821 ha in 2000, 17609 ha in 2008 and 24463 ha in 2014 (0.37% of the catchment), including the 200 ha downstream the SH station and showing an increase of 407% between 2000 and 2014 (**Figure 2**). A total of 34 sub-catchments were disturbed for a total number of 18 in 2014, most

of the gold mining areas were located in the Surinam border region. Small-scale gold mining activities were occurring in 10 sub-catchments in 2000 and 17 in 2008. The most impacted sub-catchments in 2000 were sub-catchments 521, 522, 504 and 503. Between 2000 and 2008, substantial increase of small-scale mining activities occurred (from 244 to 694%) in sub-catchments 501, 502, 503, 504, 512, 521, and 522. Finally, between 2008 and 2014, mining activities had increased (from 143 to 352%) in sub-catchments 501, 502, 503, 512, 514 and 524 and decreased from (80 to 96%) in sub-catchments 504, 522, 521.

In comparison, artificial and agricultural areas represented 15848 ha in 2011 (STL, GS, APT, PPI, MPS, SA villages). Ignoring areas located downstream SH station, artificial and agricultural areas represented 3913 ha in 2005 and 5959 ha in 2011.

Table I: Agricultural and artificial territories of main villages (2005, 2008, 2011) and deforestation from mining activities (2000, 2008, 2014) in the a) OYA and b) MAR catchments.

Oyapock Catchment	Mining areas (ha)	Mining areas (%)	Artificial areas (ha)	Agricultural areas (ha)	total (ha)
In 2000	387	0.01			
In 2008	1 542	0.05			
In 2011			862	1 617	2 479
In 2014	1 874	0.06			
Increase (2000-2014) in %	384				
Increase (2000-2008) in %	298				
Increase (2008-2014) in %	22				
Maroni Catchment	Mining areas (ha)	Mining areas (%)	Artificial areas (ha)	Agricultural areas (ha)	total (ha)
In 2000	4 821	0.07			
In 2005			4 297	6 756	11 053
In 2008	17 609	0.26	4 976	8 770	13 746
In 2011			5 391	10 456	15 848
In 2014	24 463	0.37			
Increase (2000-2014) in %	407				
Increase (2000-2008) in %	265				
Increase (2008-2014) in %	39				
Increase (2005-2011) in %			20	35	30

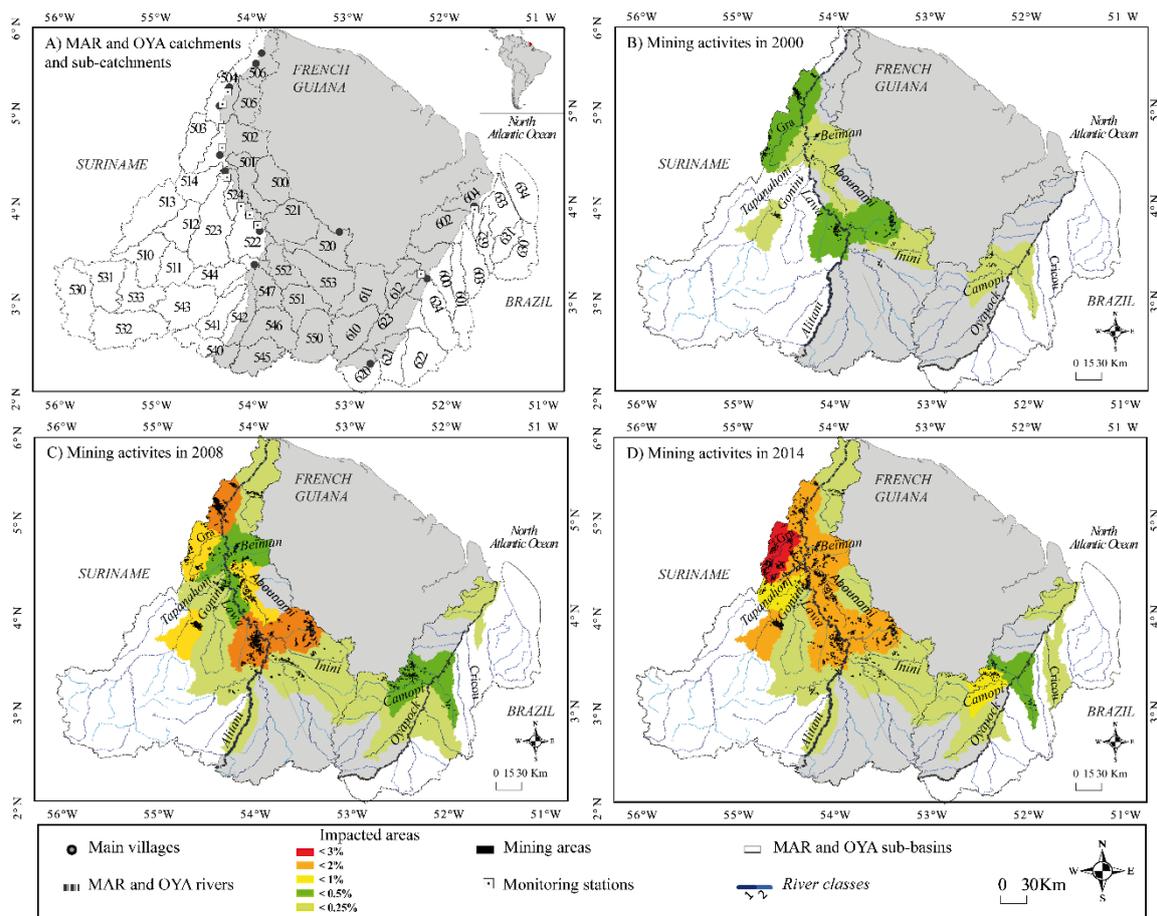


Figure 2. Evolution of mining deforestation surfaces A) per sub-catchments in B) 2000, C) 2008, D) 2014 in percentage per sub-catchment, in the MAR and the OYA catchments.

5.11 River discharge and rainfall

At the SM gauging station, the mean annual river discharge was $867 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ from 2000 to 2015, and the minimum and maximum daily discharges were 64 and $4033 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ in November 2009 and May 2015, respectively (**Table IIa**). The mean annual precipitation recorded by all rain gauges in the catchment varied from 2685 mm to 3645 mm in 2014 and 2010, respectively.

At the LT gauging station, the lowest river discharge was $84 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ in December 2004 and the highest river discharge was of $8790 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ in June 2008 (100-year flood event). For the 2000-2015 period, the average discharge was $1831 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. The mean annual precipitation recorded by all the rain gauging stations in the MAR catchment vary from 1486 mm to 2776 mm in 2015 and 2013, respectively (**Table IIb**).

No significant changes ($p \leq 0.05$) were found from the MKT, for the maximum and mean data, in the daily, monthly, annual precipitation (1978-2015), at the 4 raining stations in the

MAR basin (MPS, PPI, GS, APT) and at the 2 raining stations in the OYA basin (CM and SM). A positive trend in the minimum precipitation of monthly data were observed at the GS ($P_{GS} : \tau=0.14, p<0.0001$) and PPI stations ($P_{PPI} : \tau=0.08, p=0.02$) as at the stations SM ($P_{SM} : \tau=0.10, p=0.000$) and CM ($P_{CM} : \tau=0.28, p<0.0001$). Also, no significant change in the monthly and annual discharge were found for both catchments at the 2 main gauging stations LT and SM.

Table II: Discharge (Q), Runoff (R), Precipitation (P) at a) CM, SM in the OYA Catchment and b) MPS, PPI, GS, APT in the MAR Catchment.

a) Oyapock Years	QJ ($m^3.s^{-1}$) at SM				R ($l.s^{-1} km^{-2} yr^{-1}$)	P _{CM} (mm)	P _{SM} (mm)	P _{mean} (mm)
	Median	Mean	Max	Min				
2004	584	800	3 159	71	32	2 405	3 305	2 855
2005						2 624	3 771	3 198
2006	808	901	2 863	198	36	2 688	3 009	2 848
2007	765	850	1 987	147	34	2 990	3 167	3 079
2008	1 050	1 110	3 569	95	44	2 762	3 254	3 008
2009				64		2 859	3 306	3 083
2010						3 503	3 788	3 645
2011						2 708	3 466	3 087
2012	787	780	1 897	72	31	2 411	3 126	2 769
2013	711	714	1 975	189	28	2 597	3 131	2 864
2014	913	902	2 346	134	36	2 867	2 503	2 685
2015	652	882	4 033	96	35	2 708	3 265	2 987
mean	784	867	2 729	118	35	2 760	3 258	3 009
max	1 050	1 110	4 033	198	44	3 503	3 788	3 645
min	584	714	1 897	64	28	2 405	2 503	2 685

b) Maroni Years	QJ ($m^3.s^{-1}$) at LT				R ($l.s^{-1} km^{-2} yr^{-1}$)	P _{MPS} (mm)	P _{PPI} (mm)	P _{GS} (mm)	P _{APT} (mm)	P _{mean} (mm)
	Median	Mean	Max	Min						
2000						2 526	2 659	2 432	2 591	2 539
2001	1 790	1 971	5 781	180	32	2 202	2 193	2 749	1 941	1 794
2002	1 173	1 489	4 068	170	24	1 987	2 094	2 594	2 489	1 675
2003	449	995	4 313	130	16	1 896	1 994	2 236	1 911	1 536
2004				84		2 296	2 258	2 277	1 970	2 277
2005	1 067	1 500	5 228	87	25	2 520	2 254	2 838	2 692	1 909
2006						2 555	2 754	2 890	2 822	2 733
2007						2 476	2 602	2 934	2 851	2 671
2008	2 195	2 603	8 790	199	43	2 666	2 793	2 527	2 450	2 007
2009	1 419	1 557	5 683	119	26	2 134	1 960	2 168	2 759	1 572
2010	1 786	2 317	6 584	268	38	2 667	2 617	2 729	2 604	2 013
2011						2 446	2 574	2 466	2 505	2 495
2012	1 654	1 802	5 794	138	30	2 340	2 430	2 142	2 465	1 736
2013						2 813	2 577	2 938	2 929	2 776
2014	1 918	2 136	4 799	199	37	2 395	2 234	2 190	2 244	1 714
2015	1 714	1 939	5 444	161	35	2 753	2 598	557	2 127	1 486
mean	1 516	1 831	5 648	158	31	2 417	2 412	2 417	2 459	2 058
max	2 195	2 603	8 790	268	43	2 813	2 793	2 938	2 929	2 776
min	449	995	4 068	84	16	1 896	1 960	557	1 911	1 486

5.11.1 Surface Suspended Sediment Dynamic

Oyapock River catchment

In the upper OYA River, the station (CM) presented a mean turbidity of 11 NTU with a range between 0.53 and 55 NTU (**Figure 3**) for the period 2007-2012. In the lower OYA River at SM, the minimum value of SSC for the period 2004-2015 was 2 mg.l⁻¹ (December 2004 and November 2009) and the maximum SSC value recorded was 22 mg.l⁻¹ (January 2010). The mean value was 9.5 mg.l⁻¹ (**Table S1**). The SSC presented a hysteretic behavior with a concentration peak preceding the flood peak, which occurred in May-June, by one to two months.

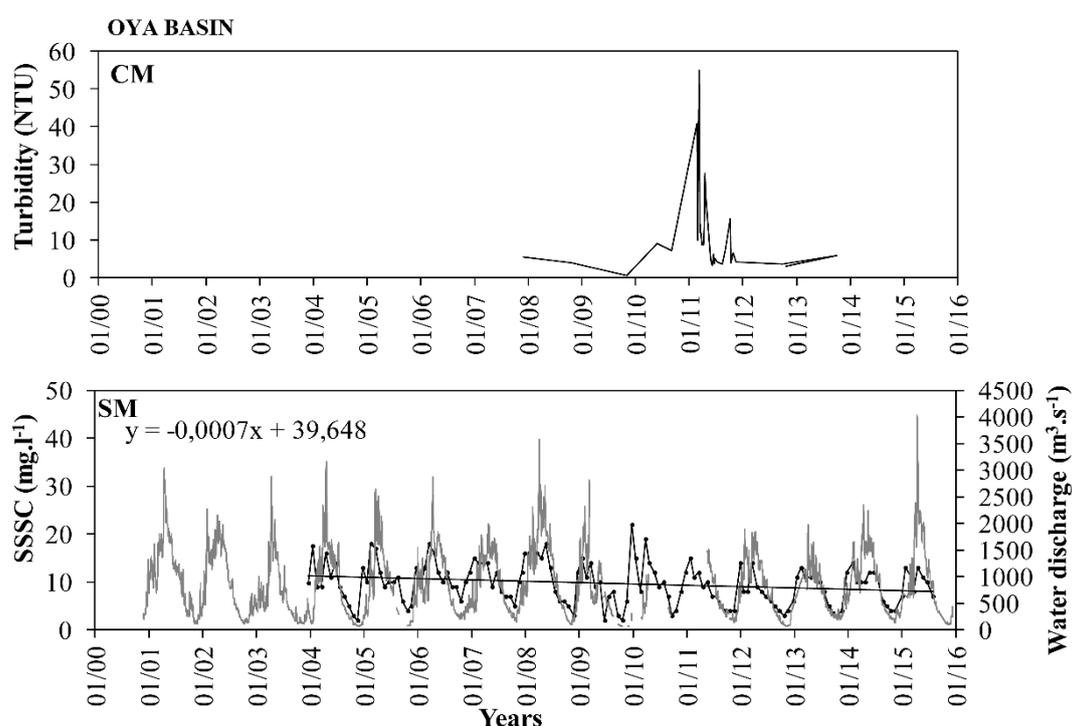


Figure 3. Comparison of river monthly SSSC in upper OYA River at CM and in the lower OYA River at SM. The grey line at SM correspond to the daily water discharge. All data came from SNO-HYBAM estimation excepted for turbidity data of CM station corresponding to field data of the French Guiana turbidity network.

The results of applying the MKT (**Table III**) to the daily SSSC show a general decreasing trend (-0.18 ; $p < 0.0001$) for absolute difference of 1 to 5 mg.l⁻¹ and a significant breakpoint in January 2008. The relative difference from 2004 and 2015 was -17% for the annual mean SSSC values, -26% for the maximum values, whereas no difference was found for the minimum values. From 2008 to 2015, the relative differences were of -33% , -28% and -33% for the mean, maximum and minimum values, respectively.

Table III : Mann-Kendall test and Pettit's test used to determine the daily SSSC long term trend and the breakpoint in the OYA basin at SM and in the MAR basin at SH, LT, GR, BE, TPI, KO, GS, and PPI stations.

Stations	Mann-Kendall test			Pettitt's test		
	S	Kendall Tau	p-value	K	t	p-value
SSSC _{SM}	-1840	-0.18	0.001	1849	10/07/2008	0.002
SSSC _{SH}	46812	0.40	< 0.0001	39397	14/01/2010	< 0.0001
SSSC _{LT}	16348	0.44	< 0.0001	12339	03/12/2009	< 0.0001
SSSC _{GR}	27895	0.43	< 0.0001	20457	01/01/2010	< 0.0001
SSSC _{BE}	31961	0.46	< 0.0001	24063	09/11/2009	< 0.0001
SSSC _{TPI}	43787	0.39	< 0.0001	30719	09/11/2005	< 0.0001
SSSC _{KO}	20423	0.29	< 0.0001	10608	05/08/2010	< 0.0001
SSSC _{GS}	13109	0.28	< 0.0001	16202	21/08/2007	< 0.0001
SSSC _{PPI}	10308	0.25	< 0.0001	8733	29/08/2010	< 0.0001

Maroni River catchment

Satellite data were used in order to extend and complete the SSSC field observations over the Maroni River. **Figure 4** compares two retrieval models that are based on two independent reflectance/SSSC datasets: 1) The field-based surface reflectance/SSSC matches estimates collected during the sampling trips, and 2) the MODIS surface reflectance/SSSC SNO-HYBAM matches monthly estimates from 2004 to 2015.

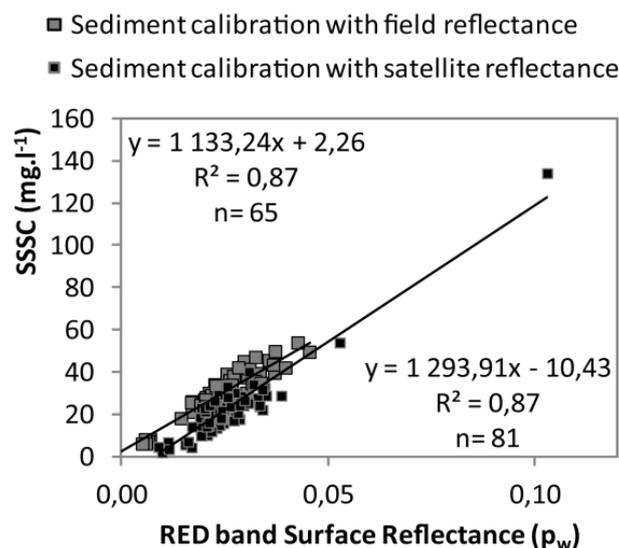


Figure 4. Relationship between field spectral reflectance (grey squares) and MODIS spectral reflectance (black squares), for the MAR Catchment in the RED band.

Both reflectance/SSSC datasets show significant ($p < 0.0001$) relationship ($R^2 = 0.87$ for $n = 81$ and RMSE of 25% for MODIS; $R^2 = 0.85$ $n = 65$ RMSE of 30% for field reflectance), confirming the ability of satellite data to robustly assess SSSC values along the MAR River on

a long-term basis. A slight BIAS of 8% ($p=0.006$) was found using both retrieval models which is likely caused by the largest SSSC range covered by the satellite datasets and the lower accuracy associated with the determination of satellite/SSSC matchups.

In the MAR catchment all stations have presented a significant increasing trend ($p<0.0001$) in the SSSC, as assessed using the MKT (**Table III**). The eight stations created with the exception of GS (August 2007) and TPI (November 2005) showed a significant break with the Pettitt's test ($p<0.0001$) between November 2009 and August 2010. In the upper reaches, the general increasing trends, as revealed by τ , were smallest at the PPI station (0.25). The largest long-term changes were observed in the downstream reaches at the GR (0.43), SH (0.40) and TPI stations (0.39). The maximum SSSC values were generally found at the beginning of the rising water stage. The lowest values were recorded during the low-water stage. Indeed, this fact reflects the formation of a hysteresis loop between river discharge and SSSC.

To infer the SSSC interannual and seasonal variability (**Figure 5**), only two stations in the upper MAR (MPS and GS) and three in the lower MAR (TPI, GR and SH) are showed. At the last field station in the MAR basin at MPS, the turbidity varied from 7 NTU to 320 NTU ($n=91$; 2012-2015), with a mean of 30 NTU.

From MODIS estimates and downstream GS station, the range of mean annual SSSC value from 2000 to 2015 was 8-19 mg.l^{-1} , showing an increase of 145% between 2002 and 2015. The increase in the maximum annual SSSC was about 440% for the same years (range of 11-60 mg.l^{-1}).

At TPI station, downstream of the most important tributary of the basin, the range of mean annual concentration was 6-22 mg.l^{-1} , showing an increase of 247% between 2000 and 2012. The increase of the maximum annual SSSC was about 214% comparing the year 2000 versus the years 2007 and 2015 (range of 19-61 mg.l^{-1}).

At GR station, the range of mean annual concentration was 7-29 mg.l^{-1} , presenting an increase of 305% between 2000 and 2013. The increase of the maximum annual SSSC was 337% between 2000 and 2011 (range of 14-61 mg.l^{-1}).

At the lower station of SH (with MODIS and by field samples, **Table S1**), the mean annual SSSC values between 2000 and 2009 ranged from 11 to 21 mg.l^{-1} and subsequently increased to 17-36 mg.l^{-1} showing an increase of 230% between 2001 and 2013. From 2001 to 2015, the annual maximum SSSC increased to 19-84 mg.l^{-1} (+336%). Between 2002 and 2013,

the annual minimum SSSC reached a range of 3-24 mg.l⁻¹, which suggest an increase of about 807%.

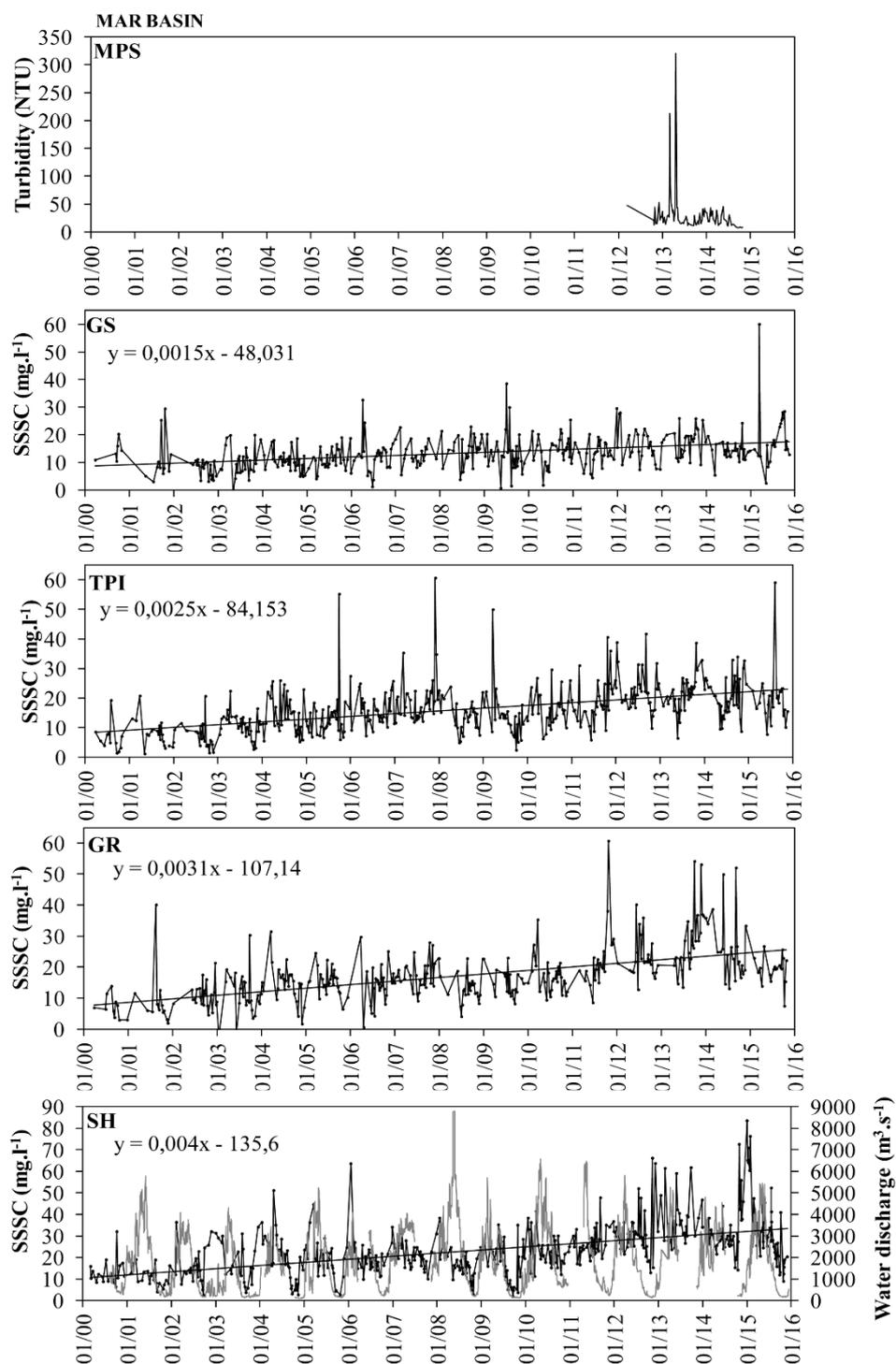


Figure 5. Recent trends of Sediments Yields (black line), Annual Runoff (grey bar) and cumulative double mass plot of the OYA (SM) and MAR Rivers (SH).

5.11.2 Suspended sediment loads, sediment yields and runoff trends

For the OYA River at the most downstream station of SM, the range of monthly S_L values was 0.59×10^3 – 86×10^3 $t \cdot month^{-1}$ with a mean of 24×10^3 $t \cdot month^{-1}$. The maximum values of S_L occur in May–June during the high water stage, and the lowest values occur in October–November during the low water stage (**Figure S5**). Annual S_L varied from 212×10^3 to 478×10^3 $t \cdot yr^{-1}$ (**Table S1**), with a mean of 304×10^3 $t \cdot month^{-1}$. Sediment yield (S_y) ranged from 8 to 19 $t \cdot km^{-2} \cdot yr^{-1}$, whereas annual runoff varied between 28 and 44 $l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2} \cdot yr^{-1}$. Inspection of the cumulative double mass plot indicates a decreasing trend at SM after 2008 (**Figure 6**).

For the MAR catchment at the most downstream SH station, the range of monthly S_L values was 1×10^3 – 406×10^3 $t \cdot months^{-1}$) while the annual S_L values ranged from 530×10^3 to 2510×10^3 $t \cdot yr^{-1}$ (**Table S1**). A first peak in S_L generally occurred in January–February at the beginning of the rising water stage, and a second peak usually appeared in May during the high water stage. S_y ranged from 9 to 41 $t \cdot km^{-2} \cdot yr^{-1}$) and the annual runoff varied from 16 to 43 $l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2} \cdot yr^{-1}$. At SH, the cumulative double mass plot shows that S_y started increasing after 2003 with a strong acceleration after 2009 (**Figure 6**).

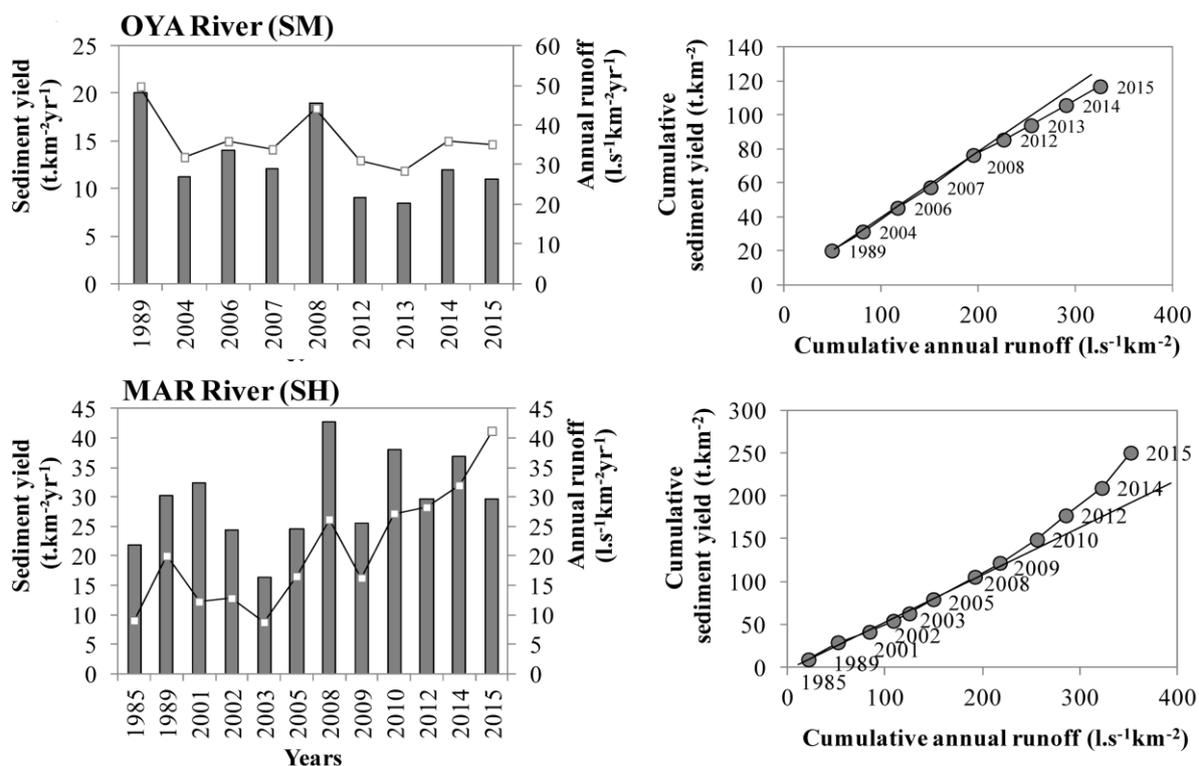


Figure 6. Recent trends of Sediments Yields (black line), Annual Runoff (grey bar) and cumulative double mass plot of the OYA (SM) and MAR Rivers (SH).

5.11.3 Relationship among the data

The annual SSSC were further analyzed in order to infer the dependence of sediment fluxes on the water discharge and precipitation-related variables, using the Spearman correlation matrix.

In the OYA River at SM, we observe that S_y was significantly ($p \leq 0.05$) correlated with runoff ($r=0.82$) (**Table IVa**). Similarly, the mean and maximum SSSC were also well correlated with runoff ($r=0.61$ and 0.49 respectively). However, the highest correlation coefficients were obtained correlating the minimum SSSC with Q_{\min} ($r=0.80$) and with the ratio $Q_{\text{mean}}/Q_{\text{max}}$ ($r=0.68$).

In the MAR River at SH, we observed that S_y was significantly correlated ($p \leq 0.05$) with precipitation at MPS ($r=0.61$) and PPI ($r=0.57$) and with maximum water discharge ($r=0.50$). The mean, maximum and minimum SSSC were correlated with P at MPS (correlation coefficients of 0.53 and 0.52 , respectively) (**Table IVb**). The minimum SSSC showed a correlation with Q_{\min} ($r=0.52$). Similarly, unlike for the OYA River, no relationships were found between runoff and mean and maximum SSSC values.

Table IV : Spearman correlation matrix of the 393 a) OYA and b) MAR catchments properties: Mean annual runoff (R), maximum annual water discharge (Q_{max}), minimum annual water discharge (Q_{min}), mean annual water discharge divided by the maximum water discharge (Q_{pk}), total annual precipitation (P) for each station (APT-GS-PPI-MPS in the MAR and SM-CM in the OYA catchments), average daily suspended sediments concentration in a year (SSSC_{mean}), maximum daily suspended sediments concentration (SSSC_{max}), daily minimum suspended sediments concentration (SSSC_{min}), annual sediment load (SL) and Sediment Yield (SY) for the stations SH and SM.

a) Oyapock Catchment

Variables	S_y	SSSC _{SM} (mean)	SSSC _{SM} (max)	SSSC _{SM} (min)	Q_{max}	Q_{min}	Q_{pk}	R	P _{SM}	P _{CM}
SSSC _{SM} (mean)	0,88									
SSSC _{SM} (max)	0,77	0,85								
SSSC _{SM} (min)	0,28	0,46	0,25							
Q_{max}	0,46	0,22	0,27	-0,54						
Q_{min}	0,06	0,33	0,10	0,80	-0,52					
Q_{pk}	-0,28	-0,02	-0,16	0,68	-0,94	0,72				
R	0,82	0,61	0,49	0,03	0,72	-0,11	-0,53			
P _{SM}	0,07	0,12	0,47	-0,32	0,24	-0,17	-0,17	-0,01		
P _{CM}	0,47	0,37	0,20	0,18	0,40	0,11	-0,14	0,66	0,14	
P	0,19	0,27	0,48	-0,03	0,13	0,14	0,04	0,07	0,90	0,39

b) MAR Catchment

Variables	S _y	SSSC _{SH} (mean)	SSSC _S H (max)	SSSC SH (min)	Q _{max}	Q _{min}	Q _{pk}	R	P _{APT}	P _{GS}	P _{PPI}	P _{MPS}
SSSC _{SH} (mean)	0,56											
SSSC _{SH} (max)	0,68	0,84										
SSSC _{SH} (min)	0,54	0,78	0,54									
Q _{max}	0,50	0,15	0,07	0,52								
Q _{min}	0,16	0,19	0,02	0,52	0,75							
Q _{pk}	0,23	-0,19	-0,02	-0,35	-0,07	-0,67						
R	0,41	0,07	0,00	0,39	0,94	0,83	-0,17					
P _{APT}	0,15	0,23	0,16	0,23	0,40	0,42	-0,18	0,34				
P _{GS}	-0,31	-0,06	-0,19	0,13	0,32	0,59	-0,48	0,39	0,58			
P _{PPI}	0,57	0,24	0,26	0,39	0,82	0,71	-0,12	0,86	0,35	0,32		
P _{MPS}	0,61	0,53	0,52	0,48	0,60	0,54	-0,04	0,67	0,45	0,33	0,82	
P	0,17	0,17	0,12	0,40	0,68	0,68	-0,31	0,63	0,78	0,81	0,64	0,59

5.12 Discussion

5.12.1 Land use changes and disturbances on sediment yields

In this study, we did not observed significant long-term changes in precipitation or water discharge in the MAR and OYA rivers. These results suggest an absence of relationship between the changes in SSSC with climatic and hydrological data in both basins. We compared the S_y trends with the mining, agricultural and urbanized areas since 2000. **Figure 7a** shows the absence of relationship between the decrease of S_y with the land use areas in the OYA catchment. Conversely, in the MAR catchment, **Figure 7b** provides a strong evidence of relationship between the S_y with the land use degradation, especially with gold mining surfaces ($R^2=0.97$; $p<0.0001$). Indeed, S_y and mining surfaces increased by 400% from 2000 to 2015.

In both catchments, urbanized and agricultural areas consist of a very weakly part of the total area with no industrial companies or farming (<1%). According to the [FAO \(2015\)](#), Suriname and French Guiana represent an important preserved area with the world's highest reported forest cover of any country; 95% of their forests are "primary rainforest". Land degradation, as represented by artificial and agricultural areas was significantly lower in the OYA catchment than in the MAR catchment in 2011 (2479 ha and 15848 ha). Agricultural areas concern mainly to traditional slash-and-burn systems (shifting cultivation), which no machines ([Renoux et al., 2003](#); [Rossi et al., 2010](#)). Indeed, this is a familiar agriculture consisting of cutting the forest, burning the trees and after a long fallow period follow the cropping period and the regeneration of the vegetation.

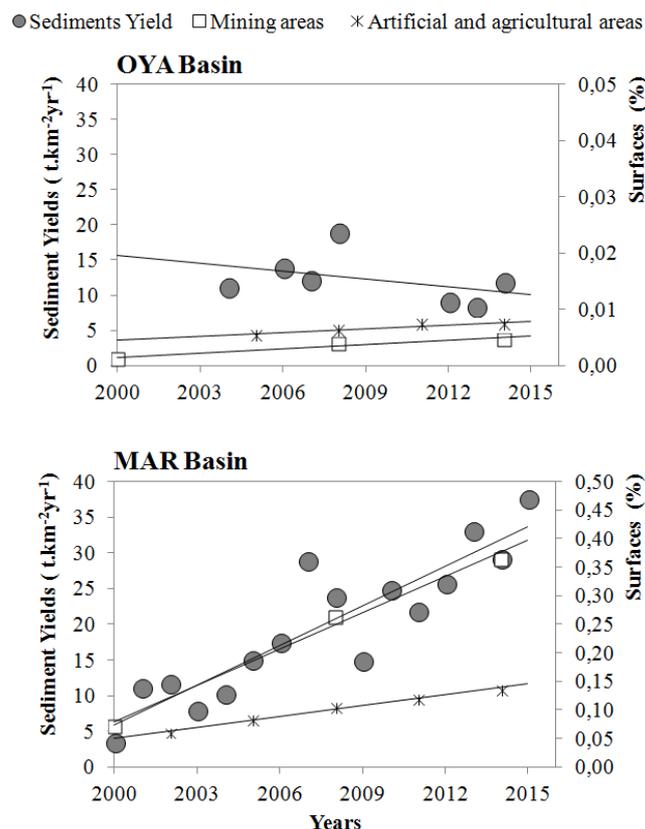


Figure 7. Comparison of the Sediments Yields (S_y), mining areas, artificial and agricultural areas trends in the a) OYA and b) MAR catchments. Areas are given in percentage relatively to the whole catchment surface area.

On the other hand, in the MAR basin approximately 16682 ha located in Surinam and 8058 ha located the French Guiana border regions were cleared for mining activities in 2014 (0.37%). In the OYA basin, it concerns 0.06% of the catchment area and over 1547 ha in French Guiana for only 327 ha in Brazil border regions. Mining activities use hydraulic methods for remove soils and bottom sediments in rivers (Cremers *et al.*, 2013; Heemskerk *et al.*, 2015). One hectare of forest is cleared and high-pressure water hoses are used to remove the soil and pump the water-soil mixture into a sluice box. The gold particles are then trapped in the sluice box, and the mine tailings, including gravel, sand, and clay, flow into abandoned mining areas, adjacent forest areas or into the river. Similar operations are carried out in rivers.

Between 2008 and 2014, the increase in the mining area occurred almost exclusively in Suriname but also in French Guiana in comparison with Brazil. Rahm *et al.* (2015) estimated in 2014 that 53669 ha within Suriname, 24282 ha within French Guiana, and 2125 ha within the Amapa region (Brazil) were impacted by small-scale gold mining activities. This contrasting situation may be explained by the legalization in 2011 of all small-scale mining

activities in Suriname, also by the repeated military expeditions launched to destroy illegal mining sites in French Guiana and the stricter regulation imposed in 1990's by Brazil to limited the local expansion of gold mining (de Theije, 2015; Dezécache *et al.*, 2017).

5.12.2 Long term trend of sediment concentrations and loads in the Maroni and Oyapock Rivers

French Guiana river waters present very low SSSC values, which are related to the extremely low erosion rates in the Precambrian Guiana Shield. Undisturbed rivers (with rainforest and no human activities) show SSSC values that vary between 4 and 25 mg.l⁻¹ (Eisma & Van der Marel, 1971; Jouanneau & Pujos, 1988; Lointier, 1993; de Mérona *et al.*, 2000).

During the year 2015, 94% of the SSSC values measured in the OYA River at SM fall within a range of concentrations of 0-10 mg.l⁻¹, and most were between 5-10 mg.l⁻¹. Few values were as high as 10 mg.l⁻¹, and only one of the values reached 20 mg.l⁻¹. Significant decreases in the annual mean and maximum SSSC values were observed for the period 2004-2015 with a breakpoint in 2008. The change in the long term trend may be explained by the exceptional high runoff that occurred in 2008, which may have washed out the riverbed, decreasing the amount of sediments available to be transported. The years 1989 (Lointier, 1993) and 2008 (our study) presented very similar S_y values (e.g 20 and 19 t.km⁻²yr⁻¹, respectively) and runoff values (47 and 44 l.s⁻¹km⁻²yr⁻¹, respectively). Furthermore, we assessed an average value of 303x10³ t.yr⁻¹. This assessment is slightly lower than that of Lointier *et al.* (1993), who estimated a value of 450x10³ t.yr⁻¹ for the same basin. These different results may be explained by the highest discharge of one hundred flood occurring during the years (1989-1990), the difference of the equation used here to estimate the S_L (which implies a correction of the SSSC with the ASSC) and the decrease of suspended sediment concentrations over the time.

In the MAR catchment at SH, we compared our SSSC results with the previous data acquired by Jouanneau & Pujos (1988), which analyzed SSSC frequencies at the SH station in 1984-1985. From 114 water surface samples collected, they assessed that the concentration frequencies for the ranges of 5-10 mg.l⁻¹, 10-20 mg.l⁻¹ and above 20 mg.l⁻¹ were 48%, 39% and 3%, respectively. In 2015, our results show that the concentration frequencies for the ranges of 5-10 mg.l⁻¹, 10-20 mg.l⁻¹, 20-30 mg.l⁻¹, 30-40 mg.l⁻¹ and above 40 mg.l⁻¹ were 7%, 26%, 22%, 13% and 32%, respectively. Thus, in 2015, 67% of the SSSC values measured at the SH station were above 20 mg.l⁻¹, whereas this percentage was of only 3% thirty years ago. The hydrological conditions measured in 1984-1985 by Jouanneau & Pujos (1988) were lower than

the annual hydrological conditions in 2015 (1475 versus 1830 m³.s⁻¹). However, between July 1989 and July 1991, [Lointier et al. \(1993\)](#) compared the SSSC in the MAR, OYA and Comté basins, observing no relationship between the SSSC with hydraulic conditions. Finally, [Vigouroux et al. \(2005\)](#) have shown that rivers in French Guiana with SSSC up to 20 mg.l⁻¹ presents human activities.

Furthermore we observed in the MAR River, for similar runoff values in 2001 and 2015 (32 and 35 l.s⁻¹km⁻²yr⁻¹, respectively), very different S_L and S_y values (743-2510 x10³ t.yr⁻¹ and 12-41 t.km⁻²yr⁻¹, respectively). In comparison, [Eisma et al. \(1971\)](#) estimated a S_L value of 1400x10³ t.yr⁻¹ with SSSC values from 4 to 12 mg.l⁻¹ and for a mean discharge of 5500 m³.s⁻¹. [Jouanneau & Pujos \(1988\)](#) estimated a S_L value of 600x10³ t.yr⁻¹ in 1984-1985, for SSC ranging from 0.8 to 27.4 mg.l⁻¹ at the border of the channel at LT. On the other hand, [Lointier et al. \(1993\)](#) calculated a S_L value of 1300x10³ t.yr⁻¹ between 1989 and 1991 at the LT station with a mean discharge of 1840 m³.s⁻¹ during these years. Finally, our assessment of S_y is very similar to that showed by [Sondag et al. \(2010\)](#), who reported a mean value of 21 t.km⁻²yr⁻¹, which was determined from HYBAM water samples collected between 2004 and January 2008.

In 2013, the highest turbidity values were observed at the upper station (MPS) of the MAR basin and lower values were observed to the stations downstream. The same observation was carried out in the OYA basin, with 55 NTU (equivalent to 50 mg.l⁻¹) measured at CM in March 2011 and 12 mg.l⁻¹ at SM. These lower SSSC values relative to the upstream values may be explained by several factors such as the deposition of particles in the riverbed and the dilution effect associated with local tributaries. In French Guiana, other studies have made the same observation. At the beginning of the gold mining, SSSC values of 50 mg.l⁻¹ were measured in the Petit Leblond River in the Sinnamary basin. However, SSSC values of 5,6 mg.l⁻¹ and 25,5 mg.l⁻¹ were found before and after the confluence of this river ([Horeau, 2003](#)). Between 1991 and 1993, on the dam of Petit Saut in the Sinnamary basin, the mean SSSC was 15,5 mg.l⁻¹ ([Richard, 1996](#)), but downstream of the dam a SSSC of 6790 mg.l⁻¹ was found and only 623 mg.l⁻¹ of SSSC was observed 4 km downstream the dam. Finally, the national services of the Brigade Nature ([Vigouroux et al., 2005](#)) have shown that the concentration in the creek can pass from 20-30 to 140000 mg.l⁻¹ without a settling pond before and after mining activities.

5.13 Conclusions

Gold mining has been an important cause of land use changes within the Maroni and Oyapock River catchments during the last decade and represent over 24463 ha in the Maroni catchment whereas it is over 1874 ha in the Oyapock catchment. The retrieval study of sediments performed in this work using MODIS remote sensing data (RMSE: 25%) has shown that fifteen years of intensive mining activities have changed the background concentrations of suspended sediments in the Maroni River, increasing the sedimentary loads and yields since the end of 2009. In 2015, at the main downstream station of SH, 67% of SSSC measurements were above 20 mg.l⁻¹, whereas this percentage was only 3% thirty years before. No relationship between sediment yields with runoff was found in the MAR basin. However, interesting positive relationships of sediment yield with mining surfaces ($R^2= 0.97$ $p < 0.0001$) were observed. On the other hand, although the upper Oyapock River is suffering from increasing land degradation by mining activities, the sediment fluxes in this catchment remain unaffected by anthropogenic activities. Moreover, decreases in the SSC and in the sedimentary loads and yields have been observed in the most downstream station of this catchment since the year 2008. However, 82% of the variance in the sediment load of the OYA River was explained by runoff, suggesting that natural processes remain important in this catchment. Finally, a critical boundary of 0.1% of deforestation in a catchment from mining activities is suggested to observe an impact on water SSC and turbidity in the most downstream station.

5.14 Acknowledgments

This research was initiated and supported by the 'Institut de Recherche pour le Développement' (IRD, France). The authors are grateful to the 'Conseil Régional de la Guyane' (CRG), the 'Office de l'Eau de la Guyane' (OEG), the 'Société SHELL', and the SNO-HYBAM long-term monitoring program for funding the project. Also, we thank to the 'Direction Regional de l'Aménagement et de l'Environnement' (DREAL Guyane) and the CNRS USR 3456, for equipment support during hydrological measurements. Furthermore, we thank the World Wildlife Funds (WWF), and the Forested Services of Brazil (SBB), Surinam (SEMA) and French Guiana (ONF & ONFI) for gold mining data.

5.15 Supplementary documents

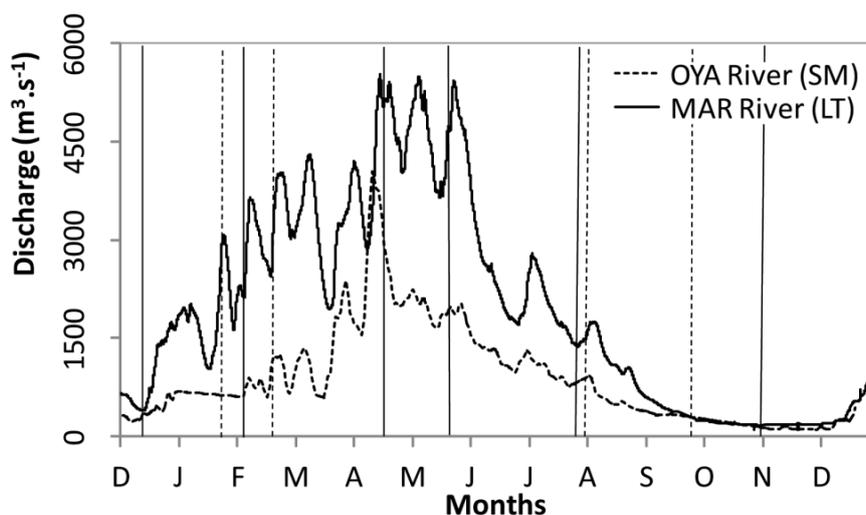


Figure S1: Representation of fields sampling campaigns during the hydrological cycle : OYA measurements were realized each month since 2004 at SH and more specific data were assessed in February, March 2014 and August, October 2015. MAR measurements were based on 4 campaigns of 5 consecutive days during the low period (November 15), the high period (August 15) and the rising period (January 2015 and May 2015). Furthermore, all months SSSC was taken at 166, 475, 772, 940 meters of the right bank in the MAR River at SH. Additionally, one campaign in rising stage (March 2015) until SH and MPS have been realized.

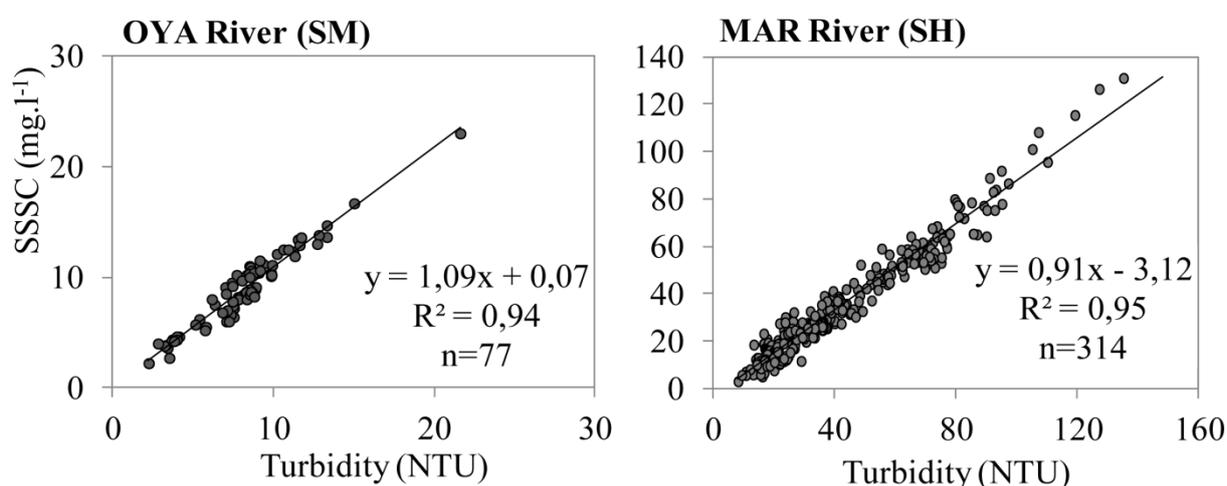


Figure S2: Relationship between Suspended Sediments Concentration and Turbidity at Saut Hermina (SH) and Saut Maripa (SM).

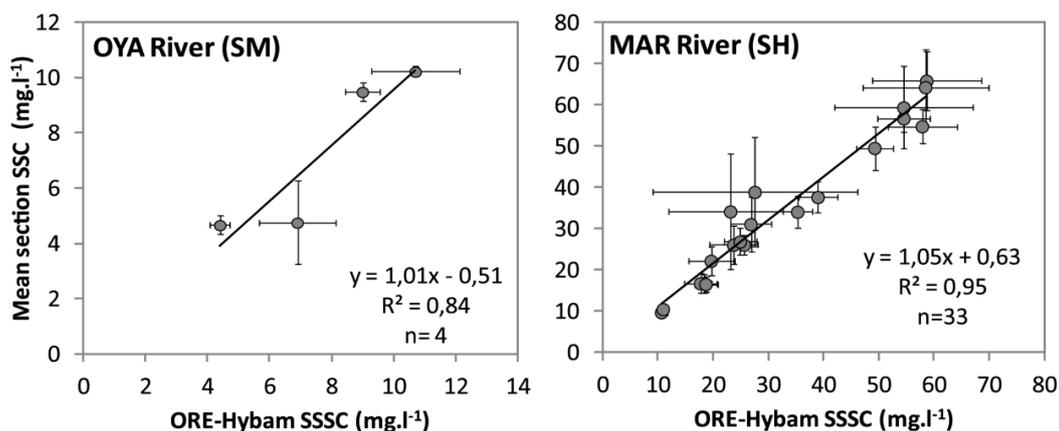


Figure S3: ASSC as a function of SSSC at Hybam sample (2014-2015): **SM**) assessed during 4 field sampling campaigns at 2 different verticals and 3 increasing depths; **SH**) assessed during 33 field sampling campaigns. Sampling within the water column was based on 12 point samples at 4 different verticals and 3 increasing depths. The Error bars stand for the standard deviation of all points collected at a given campaign, either at river surface or within water column.

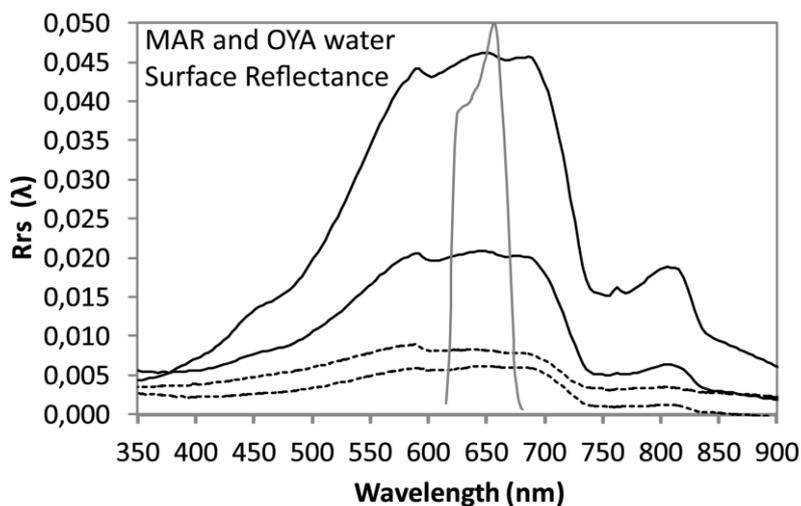


Figure S4: Comparison of spectrally normalized reflectance spectra associated with the MAR (solid line) and the OYA rivers (broken line). The grey line represent the position of the spectral MODIS Red Band

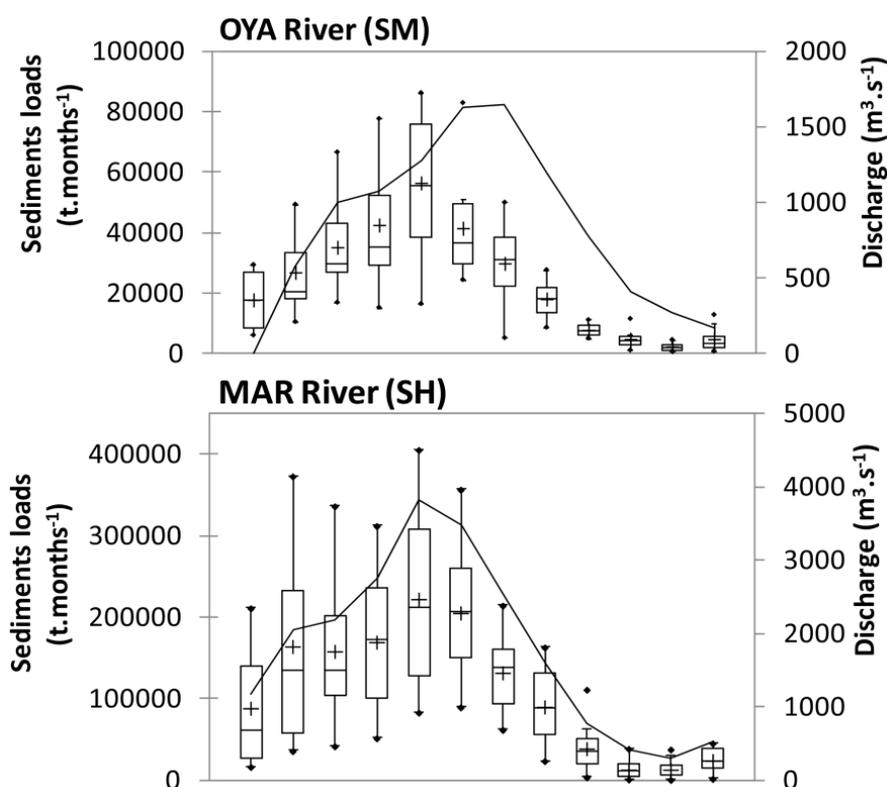


Figure S5: Boxplots of the monthly water discharge and sediments loads showing the minimum, maximum, mean, extreme values and standard deviation in the OYA and MAR rivers for all months of the year from January to December.

METHOD

Land use changes

The method used to identify the mining surfaces evolution consisted of five processing steps:

(1) Satellite image archiving: selection of the best images (SPOT, Landsat and RapidEye images) on the basis of minimal cloud coverage (maximum coverage of 60%);

(2) Image pre-processing, including (i) spatial geo-referencing, (ii) cloud masking based on the compilation of images taken at different times, (iii) filtering to enable the detection and delineation of bare soil (Gond and Brognoli, 2005);

(3) Mapping of gold mining activities using manual digitization and semi-supervised classification methods;

(4) Quality control: the results produced by each forest service were compiled and double-checked by the different data producers,

(5) Accuracy assessment. The accuracy of the final product was determined using a high density of ground control points on the extent of gold mining areas (1500 in French Guyana, 2500 in Suriname and 500 in the Amapá).

Monitoring SSSC with MODIS

Field-based and MODIS-derived SSSC values were compared, and a 25% relative difference (RMSE) for 81 data points was found. These values agreed with those from previous studies (Espinoza Villar *et al.*, 2012a, Espinoza Villar *et al.*, 2012b; Martinez *et al.*, 2015) that suggested an accuracy that varied between 18 and 45% in the Amazon Basin. Our results demonstrate that it is possible to monitor long term SSSC evolution with medium-resolution satellite imagery (MODIS) in medium to large rivers (from 250 m to 1 km wide) and for a large range of concentrations between 3 and 138 mg.l⁻¹. Satellite data, such as those collected by Sentinel-2 and Landsat-8, could become useful tools in the future for detecting cross-sectional variability and the implications of land use for water contamination. One limitation in the use of satellite data may be related to the fact that gold mining activities produce a large proportion of gravel-size sediments (quartz gravel and cobbles) and sand particles that are transported in the bedload and are invisible to satellite sensors.

TABLES

Table S1: Turbidity data, Suspended Sediment 582 Concentration (SSC), Sediments Loads (SL), Sediments Yields (Sy) in the: a) OYA and b) MAR rivers at SM and SH.

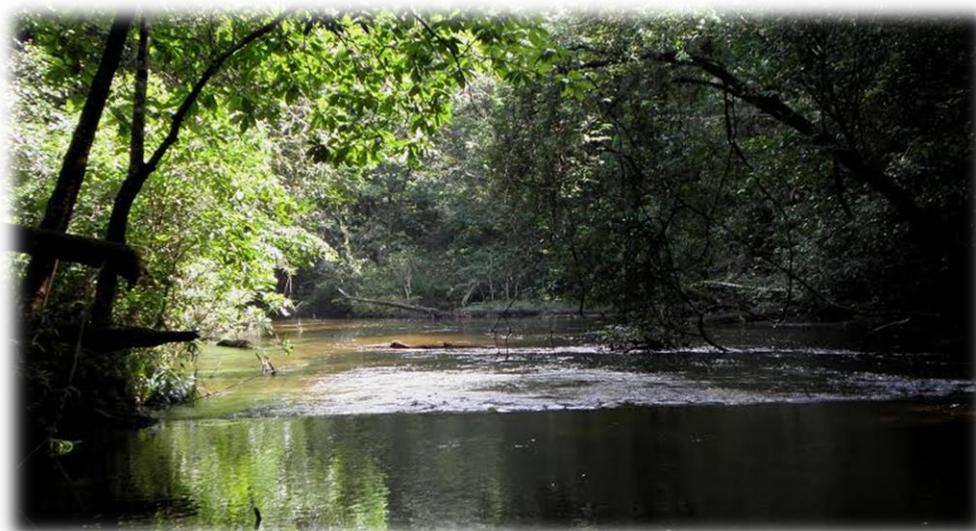
a) OYA												
River at SM Years	Turbidity (NTU)				SSC (mg.l ⁻¹)				SL		Sy	
	Median	Mean	Max	Min	Median	Mean	Max	Min	kg.s ⁻¹	t.yr ⁻¹	t.yr ⁻¹ km ⁻²	
2004	8,2	8,5	15,6	2,2	9,0	9,4	17,6	2,0	8,9	281 179	11,2	
2005	9,1	9,4	15,9	3,9	10,0	10,4	18,0	4,0				
2006	9,9	10,3	15,9	5,6	11,0	11,4	18,0	6,0	11,1	350 641	14,0	
2007	9,9	9,6	13,4	4,8	11,0	10,6	15,0	5,0	9,6	302 848	12,1	
2008	11,6	10,4	15,9	3,0	13,0	11,6	18,0	3,0	15,1	477 708	19,0	
2009	7,8	7,6	13,4	2,2	8,5	8,3	15,0	2,0				
2010	8,6	9,8	19,4	3,0	9,5	10,9	22,0	3,0				
2011	7,3	7,6	13,4	3,9	8,0	8,3	15,0	4,0				
2012	6,9	6,9	12,5	3,0	7,5	7,5	14,0	3,0	7,2	227 954	9,1	
2013	8,2	7,4	11,6	3,0	9,0	8,0	13,0	3,0	6,7	211 740	8,4	
2014	9,1	8,3	12,5	3,9	10,0	9,2	14,0	4,0	9,5	299 011	11,9	
2015	6,9	7,1	11,6	2,2	7,5	7,8	13,0	2,0	8,8	277 478	11,0	
mean	2009,5	8,6	8,6	14,3	3,4	9,5	9,4	3,4	9,6	303 570	12,1	
max	2015,0	11,6	10,4	19,4	5,6	13,0	22,0	6,0	15,1	477 708	19,0	
min	2004,0	6,9	6,9	11,6	2,2	7,5	7,5	2,0	6,7	211 740	8,4	

b) MAR River at SH Years	Turbidity (NTU)				SSC (mg.l ⁻¹)				S _L		S _y
	Median	Mean	Max	Min	Median	Mean	Max	Min	kg.s ⁻¹	t.yr ⁻¹	t.yr ⁻¹ km ⁻²
2000	16,8	18,4	37,2	11,7	11,5	13,2	32,1	6,4			
2001	15,8	16,0	24,3	8,2	10,5	10,7	19,2	2,8	23,6	742 935	12,2
2002	19,2	20,5	41,4	8,0	14,0	15,3	36,4	2,6	24,7	778 386	12,8
2003	20,0	21,8	36,4	9,1	14,7	16,6	31,4	3,8	16,8	530 203	8,7
2004	22,6	23,5	56,1	8,1	17,4	18,3	51,2	2,7			
2005	24,6	24,2	49,7	8,1	19,4	19,1	44,7	2,7	31,9	1 005 502	16,5
2006	23,9	25,1	68,4	15,2	18,8	19,9	63,6	9,9			
2007	25,8	26,2	39,3	15,4	20,6	21,0	34,2	10,1			
2008	21,5	22,2	43,4	8,1	16,3	17,0	38,4	2,8	50,6	1 595 532	26,2
2009	22,9	22,1	40,3	7,3	17,7	16,9	35,3	1,9	31,4	988 676	16,2
2010	26,8	28,3	46,6	16,6	21,3	23,0	41,6	11,3	52,5	1 655 951	27,2
2011	29,9	31,0	52,7	21,9	24,8	26,2	47,8	16,7			
2012	34,8	36,3	70,9	18,2	29,8	31,3	66,2	13,0	54,5	1 719 052	28,2
2013	38,4	41,3	66,6	28,9	33,3	36,3	61,8	23,7			
2014	35,0	37,0	77,3	19,5	30,0	31,9	72,6	14,3	61,7	1 946 208	31,9
2015	33,9	39,4	88,2	14,3	28,8	34,4	83,6	9,0	79,6	2 509 606	41,2
mean	25,8	27,1	52,4	13,7	20,6	21,9	47,5	8,4	42,7	1 347 205	22,1
max	38,4	41,3	88,2	28,9	33,3	36,3	83,6	23,7	79,6	2 509 606	41,2
min	15,8	16,0	24,3	7,3	10,5	10,7	19,2	1,9	16,8	530 203	8,7

**ARTICLE B : Dynamique et flux de Carbones, d'Azote particuliers et de la Chl-
a dans deux bassins versants impactés par des activités de déforestation et minières
en Guyane Française**



Eaux naturelles d'une crique guyanaise



Crique

Dynamics and fluxes of organic carbon and nitrogen in two Guiana Shield river basins impacted by deforestation and mining activities

HYDROLOGICAL PROCESSES

Accepté

Majorie Gallay^{1,2}, Abrahan Mora³, Jean-Michel Martinez⁴, Antoine Gardel³, Alain Laraque⁵, Max Sarrazin⁷, Eric Beaucher⁸, Jean-Claude Doudou⁹,
Christelle Lagane¹⁰

1 PhD Student. IRD/GET- UMR 5563, UR 234, Université de la Guyane, Cayenne, Guyane française

3 Postdoc Centro del agua para América Latina y el Caribe. Tecnológico de Monterrey, Monterrey, Mexico

4 GET-UMR CNRS/IRD/UPS–UMR 5563, UR 234, Brasilia, Brésil

5 LEEISA, USR mixte CNRS/UG/IFREMER – USR 3456, Cayenne, Guyane française

6 GET-UMR CNRS/IRD/UPS–UMR 5563, UR 234, Montpellier, France

7 IMAGO, US 191, Cayenne, Guyane française

8 OBHI, BP 165, Cayenne, Guyane française, France

9 GET-UMR CNRS/IRD/UPS–UMR 5563, UR 234, Toulouse, France

Abstract

Deforestation and mining activities have proven to be very damaging to rivers because these activities disturb the environmental characteristics of rivers. Thus, the concentrations of dissolved organic carbon (DOC), particulate organic carbon (POC), particulate nitrogen (PN) and Chlorophyll-a (Chl-a) were measured monthly during two hydrological years in the Maroni and Oyapock rivers to assess the dynamics and fluxes of organic carbon and nitrogen in these two Guiana Shield basins, which have been strongly (Maroni) and weakly (Oyapock) impacted by deforestation and mining activities. The two-year time series show that DOC, POC, PN and Chl-a concentrations vary seasonally with discharge in both rivers, indicating a hydrologically dominated control. Temporal patterns of DOC, POC and PN indicate that these variables show maximum concentrations in rising waters due to the yield of organic matter and nitrogen accumulated in soils, which are incorporated into the rivers during rainfall. However, the Chl-a concentrations were at a maximum during low water stages. The C/N and C/Chl-a ratios also showed a seasonal trend, with lower values during the low water periods due to an increase in algal biomass. During high water, the POC in both rivers is the result of terrestrial organic matter, whereas during low water autochthonous organic matter can reach up to 34% of the POC. The mean annual fluxes of TOC and PN were higher (4.56×10^5 TonC yr⁻¹ and 1.77×10^4 TonN yr⁻¹, respectively) in the Maroni River than those (1.84×10^5 TonC yr⁻¹ and 0.54×10^4 TonN yr⁻¹, respectively) in the Oyapock River. However, the specific fluxes of DOC, POC and PN from both basins were nearly the same. Although gold mining activities are performed in both basins, there is no conclusive evidence regarding the impact of these activities on the dynamics of organic matter and particulate nitrogen in the Maroni and Oyapock rivers.

Keywords: TOC, PN, Chl-a, French Guiana, mining, Fluxes

5.16 Introduction

Rivers transport carbon to the oceans and participate in long-term climate regulation and in the global carbon cycle, particularly today with the influence of human activities and the increase in CO₂ concentration in the atmosphere (Probst *et al.*, 1994). Some fraction of the carbon transported by rivers returns to the atmosphere as carbon dioxide (CO₂) (Richey *et al.*, 2002) or methane (Tranvik *et al.*, 2009), while some is stored in the river floodplain or transported to the oceans. The river transport of C and N is of great interest because a river load represents a source of nutrients from the terrestrial domain to the oceans.

Total organic carbon (TOC) comprises particulate organic carbon (POC) and dissolved organic carbon (DOC). POC originates from terrestrial sources (i.e., erosion, allochthonous source) and aquatic sources (i.e., phytoplankton, autochthonous source) (Lu *et al.*, 2012). In the high-turbidity waters of the Amazon, Orinoco, Yellow and Yangtze rivers, POC is mainly derived from terrestrial sources, whereas in low-turbidity river waters POC mainly comprises aquatic biomass. The allochthonous coarse POC fraction is composed of tree leaves and vascular plant detritus, while the fine fraction is the result of an association between mineral particles and organic molecules (Moreira-Turcq *et al.*, 2003a; Moreira-Turcq *et al.*, 2013). On the other hand, DOC originates completely from terrestrial sources (Raymond and Bauer, 2001). The dissolved organic matter is richer in C (Meybeck, 1982) and is more degraded and more recent than POC (Hedges *et al.*, 1986; Mayorga *et al.*, 2005). These features are closely related to diverse biogeochemical and physical processes within the drainage areas, and they are strongly associated with catchment characteristics such as soil composition, climate, hydrology, land use and forest coverage (Meybeck, 1982; Meybeck, 1993; Hope *et al.*, 1994). Thus, changes in the amount of C in soils and river waters are mainly associated with human disturbance such as deforestation, road construction, agricultural activities and dam construction (Moore, 1989; Kao and Liu, 1996; Houghton and Goodale, 2004; Van Oost *et al.*, 2007; Salimon *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2016).

Currently, river systems are often subject to high nitrogen loadings from agricultural activities and urban areas (Saunders and Kalff, 2001). The total nitrogen load in rivers is composed of dissolved and particulate nitrogen. Dissolved nitrogen may be either organic nitrogen (nitrogen contained in dissolved organic matter) or inorganic (in the form of NH₃, NH₄⁺, NO₂⁻ and NO₃⁻). The term particulate nitrogen (PN) refers to the nitrogen contained in total suspended sediments (TSS). In freshwater ecosystems, only a small fraction of the PN

consists of inorganic nitrogen because the majority of the PN is organic (Meybeck, 1982). In fact, the nitrogen contained in the particulate material is mostly an inherent part of the organic matter pool either derived from the terrestrial environment through erosion, or from in situ aquatic production.

A natural increase in carbon and nitrogen in river waters can be due to diverse factors such as the input of precipitation, yield from soils and/or the input of both nutrients under diverse atmospheric conditions. Similar to the carbon cycle, the nitrogen cycle can change in response to human activities such as agricultural fertilization, fossil fuel combustion and clearing and conversion of lands (Thurman, 1985; Moffat, 1998; Jennerjahn *et al.*, 2008). The POC/PN ratios (or C/N ratios) can be used to distinguish between the autochthonous and the allochthonous sources of organic carbon and to detect the changes at a catchment scale. Normal C/N ratios of terrestrial organic matter have a wide range (ca. 12-400), while the C/N ratios of phytoplankton are less variable (ca. 6-8) (Hedges *et al.*, 1986; Hedges *et al.*, 1997; Onstad *et al.*, 2000). In rivers, this C/N ratio is very constant, mostly between 8 and 10, similar to values found in superficial soil layers (Meybeck, 1982; Thurman, 1985).

South America is the second most forested geographical region (Keenan *et al.*, 2015) and has the largest availability of water stored in rivers (50%) (Shiklomanov and Rodda, 2004). Similarly, the study area, in northern South America (Guiana Shield, French Guiana), has the most forest cover by percentage in the world (98.6%) followed by Suriname (95.5%) (FAO, 2015). However, in the last 20 years, small-scale gold mining activities, deforestation and the removal of soils have been carried out (Fong-Sam, 2009; Heemskerk, 2011), impacting soils and river sediments and potentially affecting the capacity of the carbon storage of soils. Recent studies performed by Laperche *et al.* (2014) have shown that in addition to Hg sediment contamination, the impacts of gold mining in this region also include deforestation, changes in river regimes due to sedimentation and flow modification, changes in landforms and land degradation. Moreover, studies performed by Gallay *et al.* (submitted) have shown that in the last 15 years (from 2000 to 2015), there has been an increase in the sediment yields of approximately 400% in the Maroni River basin and an enhancement in the mining areas of approximately 30% in the Oyapock River basin, the two largest river basins of French Guiana. Nevertheless, although the impact of these mining activities on sediments, lands and soils may also affect and lead several changes in the fluxes of carbon from ecosystems to rivers, this important issue has not been yet evaluated in these two Guiana Shield basins. Thus, the aim of this study was to assess during two years (from October 2014 to October 2016) the temporal

variability and fluxes of organic carbon and particulate nitrogen of these two large basins in French Guiana: the Maroni Basin, which has been impacted by uncontrollable mining activities, and the Oyapock Basin, which has been less impacted (Laperche *et al.*, 2014). The specific objectives of this investigation were i) to assess the monthly variation of total suspended sediments (TSS), POC, DOC, TOC, PN, and chlorophyll-a (Chl-a) in the two rivers during the two years; ii) to analyse the relationships between the aforementioned parameters; iii) to calculate the fluxes of the studied nutrients and iv) to analyse the effect of land use and increased deforestation on the organic carbon and nitrogen dynamics in these two important rivers of French Guiana.

5.17 Study area and Hydrological settings

The Maroni and Oyapock rivers are located in the northeastern part of the Guiana Shield (**Figure 1a**), which represents the northern extension of the Amazonian platform (Edmond *et al.*, 1995). The Maroni watershed extends over Suriname (57% of the total catchment area) and French Guiana (43%) and covers a total area of 66 814 km² between longitudes 53-56°W and latitudes 2-6°N. The main channel of the Maroni River (612 km in length) is formed by the confluence of the Tapanahoni and Lawa rivers. During its entire course, the Maroni River receives contributions from several main tributaries, such as the Tampock and the Inini rivers toward its right bank, and other important rivers, such as the Abounami River toward its left bank. The Oyapock watershed covers an area of 33 614 km² and extends over Brazil (51%) and French Guiana (49%), between longitudes 51-53°W and latitudes 2-5°N in the eastern part of French Guiana. The Oyapock has a channel length of 404 km and has the same name from its headwaters to its mouth. On the left bank, the main tributaries of the Oyapock are the Yaroupi and the Camopi rivers, whereas the Matura, Lavé, Marupi and Anotaié rivers are the main right-bank tributaries.

Each river has more than 100 small waterfalls along its course. The most important waterfalls in the principal course of the Maroni River are the Poligoudou, Mambari, Mankada and Kreté. However, in spite of this, small fluctuations in altitude are observed, resulting in a gentle slope (Palvadeau, 1999). Both watersheds could be described as containing old bedrock, old deep soils that have been highly weathered and extensive forest cover. Similarly, the two studied basins are composed of three rock complexes: Imataca Archean gneiss (3.4-2.7 Ga), Lower Proterozoic volcano-sedimentary terrains and granite-gneiss rocks (2.3-1.9 Ga), and Middle Proterozoic continental deposits and magmatic rocks (1.9-1.5 Ga) (Négre and

Lachassagne, 2000). In this region, the population is mainly concentrated in the vicinity of the rivers.

The climate is equatorial and is characterised by wet (December-February and April-July) and dry (August-November) seasons controlled by the intertropical convergence zone (ITCZ) and El Niño/La Niña events in relation to the Atlantic and Pacific Ocean surface temperature (Gauchere, 2004; Labat *et al.*, 2012). The air temperature throughout the year commonly varies from 22 to 33°C, with extreme values of 17 and 35°C (Héritier, 2011). The mean relative humidity is approximately 80% (Négre and Lachassagne, 2000) and the mean annual precipitation is approximately 2970 mm (Héritier, 2011).

In the Maroni River, the main gauging station is Langa Tabiki (LT) (5°8'23.01"N and 54°21'24.25"W). At this gauging station, the Maroni basin covers an area of 60 930 km². In the Oyapock River, the main gauging station is located near Saut Maripa (3°48'6.56"N and 51°53'5.11"W). At this gauging station, the basin covers a drainage area of 25 120 km². The sampling locations in the Maroni and Oyapock rivers were in the Saut Hermina (SH) and Saut Maripa (SM) rapids (respectively), which are located 100 km and 60 km, respectively, upstream of each river's estuary (**Figure 1a**). Both rivers have a similar hydrological regimen marked by a unimodal "saw-tooth" profile (**Figure 1b**), with high water periods from May to July and low water periods from October to December. The mean annual water discharge of the Maroni at the LT gauging station was estimated to be 2021 m³.s⁻¹ and 1348 m³.s⁻¹ during the periods of 2014-2015 and 2015-2016, respectively, whereas the mean annual discharge of the Oyapock River at the SM gauging station was 900 m³.s⁻¹ and 702 m³.s⁻¹ during the same two periods.

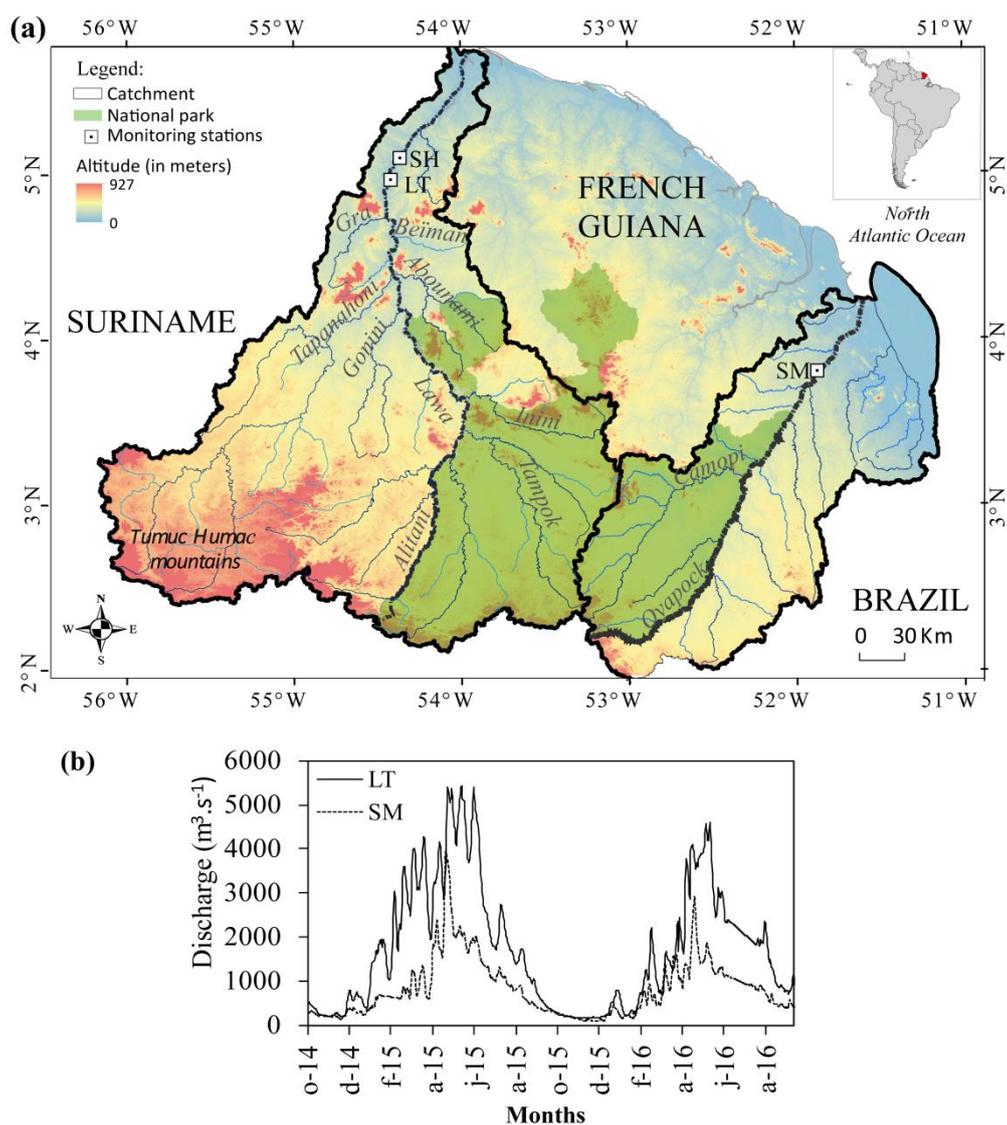


Figure 1. (a) Map showing the sampling locations (SM and SH) and the gauging stations (SM and LT) in the Oyapock and Maroni rivers. (b) Daily water discharge of both rivers were measured at LT and SM gauging stations during the study period (Oct. 2014- Oct.2016).

5.18 Material and methods

With the purpose of determining the temporal dynamics of organic carbon (dissolved and particulate), PN and Chl-a, water samples (2 L) were taken monthly in the Maroni and Oyapock rivers, approximately 30 cm below the water surface. These water samples were collected in glass bottles, which were prewashed with sulfuric acid and deionized water several times prior to use. During the sampling process, the bottles were rinsed three times and then were filled completely with river water, capped tightly and transported to the laboratory LAMA in the IRD Center of Cayenne, maintaining fresh and dark conditions.

In the laboratory, samples for DOC determination were filtered using Millipore ester membranes 47 mm in diameter with a 0.2 μm pore size. Before filtering, these membranes were precleaned by filtering 500 mL of deionized water. The filtered water samples were acidified with ultrapure H_3PO_4 and stored in glass bottles, which were previously treated in an oven at 450 °C for 2 h. For POC and PN analysis, approximately 300 mL of river water were filtered into ashed (450 °C for 4 h) and pre-weighted glass fibre filters 25 mm in diameter and with a 0.7 μm pore size using an all-glass filter holder (Millipore). Samples for Ch-a analysis were also filtered using a 0.7 μm pore sized glass fibre filter using all-glass filter holders. These filters were stored by freezing until the preliminary treatment for analysis. TSS concentrations were measured filtering 1 L of river water through pre-weighted 0.45 μm pore size cellulose membranes and calculated using the dry weight of the filtered material.

Chlorophyll-a was extracted from filters with methanol, measured using a Fluorometer TD 700 and calculated according to the equations proposed by [Lorenzen \(1967\)](#). The concentrations of DOC were measured in filtered water samples using the high-temperature catalytic oxidation method (HTCO), using a Shimadzu TOC-5000 instrument, whereas POC and PN were measured in the filtered material using an elemental analyser (C/H/N FISOONS NA-2000). Similarly, TOC concentrations were calculated as the sum of DOC plus POC.

The fluxes of DOC, POC, TOC and PN were calculated by multiplying the monthly average of the water discharge by the monthly concentration of each variable. Because the data did not follow a normal distribution, the nonparametric Spearman test was used to establish correlations between the measured parameters. Correlations were considered significant for any p value less than 0.05. Data of daily water discharge (Q) in **Figure 1b** were obtained using the Hydraccess Software ([Vauchel, 2004](#)), and using the discharge rating curves resulting from the measurements of water discharge through mechanical current metres and an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP 1200 kHz from RDI) and the river levels, which were automatically collected every half hour using satellite telemetry. All of the gauging stations in French Guiana were installed in 1952-1953 ([Sondag et al., 2010](#)) and have been operated by the IRD and by the French government since 2004.

5.19 Results and discussion

Seasonal variability in water discharge and TSS concentration

The results of the measured variables in the waters of the Maroní River at SH and the Oyapock River at SM are provided in **Tables S1** and **S2**, respectively. In addition, **Table 1** shows the weighed mean concentrations and the ranges of TSS, TOC, DOC, POC, PN and Chl-a in the Maroni and Oyapock rivers during the studied period. **Figure 2** depicts the temporal variation of these variables in both rivers together with the mean monthly values of water discharge during the two years of study. Indeed, the temporal variation in water discharge is very dependent on the distribution of precipitation. The short rainy season from the middle of November to the middle of February produces a slight increase in discharge in both rivers after the preceding dry season, whereas the intense rainy season from April until July results in the highest discharge values, which occur between May and June in both rivers. The dry season, which is a result of the displacement of the ITCZ towards a more northern position between August and late October, generates a strong decrease in the water discharge of both rivers from July to October and the lowest water discharge values in November and December.

Table 1. Weighted mean concentrations and ranges of TSS, POC, PN, TOC, DOC and Chl-a, and C/N and C/Chl-a ratios in the Maroni and Oyapock rivers. POC and PN is also expressed as a percentage of TSS.

Variables	Oyapock River		Maroni River	
	Average	Range	Average	Range
TSS (mg.l ⁻¹)	8.23	2.46 - 23.19	31.50	9.35 - 134
POC (mg.l ⁻¹)	1.31	0.64 - 3.16	1.83	0.45 - 4.56
PN (mg.l ⁻¹)	0.20	0.12 - 0.36	0.28	0.10 - 0.73
DOC (mg.l ⁻¹)	5.47	2.69 - 8.88	5.81	2.12 - 11.34
TOC (mg.l ⁻¹)	6.78	3.38 - 12.03	7.64	3.66 - 13.10
Chl-a (µg.l ⁻¹)	1.09	0.07 - 3.51	1.98	0.15 - 4.99
C/Chl-a	5490	200 - 17971	2850	198 - 13051
C/N	6.42	2.88 - 11.46	6.5	3.70 - 11.64
POC/TSS (%)	17.81	8.49 - 30.54	7.26	1.96 - 19.29
PN/TSS (%)	3.14	1.55 - 10.59	1.21	0.26 - 2.51

Although alluvial gold mining activities performed in the Maroní Basin (Rahm *et al.*, 2015; Dezécache *et al.*, 2017) have increased the sediment yield in the Maroni River (Gallay *et al.*, submitted), both the Maroni and Oyapock rivers showed low values of TSS, with weighted mean concentrations of 31.5 mg.l⁻¹ for the Maroni River and 8.2 mg.l⁻¹ for the Oyapock River. This is because the Guiana Shield has one of the lowest erosion rates in the world, with only two metres eroded every one million years in French Guiana and Suriname (Théveniaut and Delor, 2004). Indeed, such low TSS concentrations are typical from rivers draining the Guiana and Brazilian Shields, such as the Caura and Caroní rivers in the Orinoco River basin and the Negro, Branco, Tapajós, Trobetas and Xingú rivers in the Amazon River basin (Lewis and Weibezahn, 1981; Moreira-Turcq *et al.*, 2003b; Mora *et al.*, 2014).

Figure 2 indicates that both the Maroni and Oyapock rivers exhibit a typical unimodal TSS pattern observed for large rivers such as the Amazon, Yangtze, and Ubangui (Olivry *et al.*, 1989; Lu *et al.*, 2012; Moreira-Turcq *et al.*, 2013). The low concentrations of TSS during the low discharge periods can be attributed to the lack of the flow velocity required for sediment transport, which promotes the sedimentation of coarse- and fine-grained sediments. However, the increase in the water discharge at a rising stage produces an enhancement in water velocity and therefore the resuspension of fine grained-material, which has accumulated on channel beds during the preceding dry season. Because the sediment regime of both rivers is not synchronous with the hydrological regime, there are no significant correlations between the monthly water discharge values and the monthly TSS concentrations.

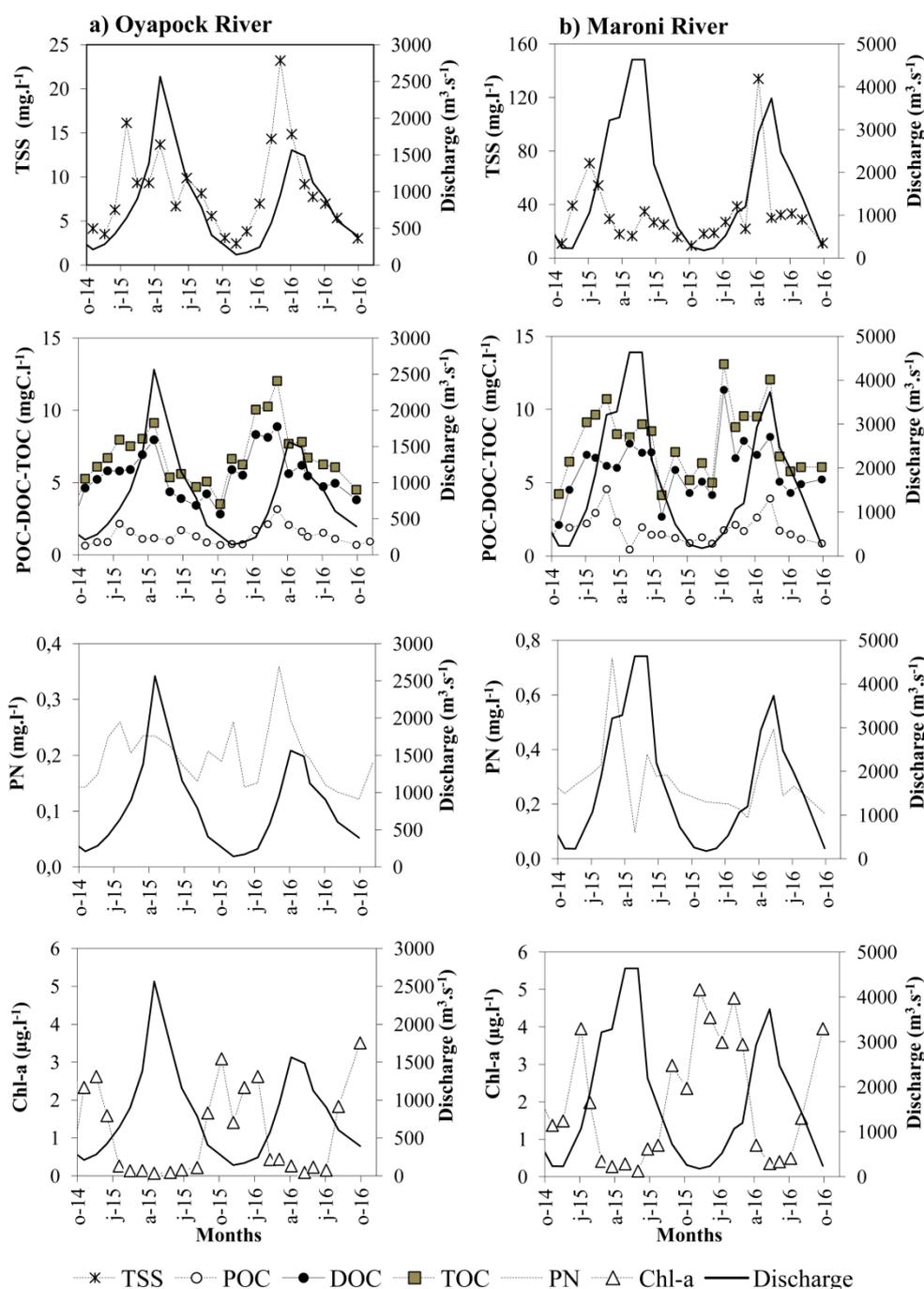


Figure 2. Temporal variability in the concentrations of TSS, POC, PN, TOC, DOC in the Oyapock and Maroni rivers during the studied period.

5.19.1 Concentrations and seasonal variability of DOC, POC, PN and Chl-a

The temporal patterns of the concentrations of DOC, POC, TOC, PN and Chl-a (**Figure 2**) show that the concentrations of DOC were higher than those of POC and PN in both rivers. On average, approximately 80% of the organic carbon in the Oyapock River was dissolved, and approximately 75% of the TOC transported by the Maroni River was DOC. The percentage of

POC content in the TSS had a high variability, which ranged from 8.5 to 30.5% in the Oyapock River and from 1.96 to 19.29% in the Maroni River. The range of concentration of DOC found in the Maroni River corresponds to that observed previously by (Sondag *et al.*, 2010) at LT between 2004 and 2008, while the range of concentrations of DOC in the Oyapock is very similar to that shown by Gadel *et al.* (1997) downstream of the Petit Saut dam in the Sinnamary River basin, which is another small basin in French Guiana. When comparing the results of DOC concentrations in both French Guiana rivers to those obtained in other rivers draining the Guiana and Brazilian Shields, it can be seen that the DOC values in the Maroni and Oyapock are higher than those found in the blackwaters of the Caura River (2.08 - 4.93 mgC l⁻¹) (Mora *et al.*, 2014), but lower than those found in the Negro River (2 - 18 mgC l⁻¹) (Moreira-Turcq *et al.*, 2003b). However, these values are similar to those reported in the clearwaters of the Trombetas River (Moreira-Turcq *et al.*, 2003b) (between 2 and 12 mgC l⁻¹). The ranges of POC concentrations observed in both the Maroni and Oyapock rivers were higher than those reported by Gadel (1997) upstream and downstream of the Petit Saut dam in the Sinnamary River (ranging from 1 to 2.5 mgC l⁻¹) in November 1994. Similarly, when comparing the values of POC reported in this study to those obtained in other clearwater, blackwater and whitewater rivers draining the Orinoco and Amazon basins, the POC concentrations found in the Maroni and Oyapock were higher than those reported by Mora *et al.* (2014) for the Caura (0.17 - 1.89 mgC l⁻¹), Apure (0.33 - 2.40 mgC l⁻¹) and Orinoco (0.24 - 2.29 mgC l⁻¹) rivers and higher than the POC values reported for the Negro (0.26 - 1.09 mgC l⁻¹), Trombetas (0.34 - 0.82 mgC l⁻¹) and other clearwater rivers from the Amazon basin (Moreira-Turcq *et al.*, 2003b). However, similar values of POC have been found by Moreira-Turcq *et al.*, (2003b) in the Abuna and Madeira rivers (from 3.95 to 7.36 mgC l⁻¹), which are whitewater tributaries of the Amazon River.

With regard to the temporal variability of organic carbon, the seasonal patterns of the DOC and POC concentrations show that the highest values of these variables in both rivers occur during the increasing branch of the hydrogram, a few months before the maximum values of water discharge, whereas the lowest values were found at the beginning of the low water stage. The enhancement of DOC concentrations during rising waters is a typical behaviour observed in several large worldwide rivers such as the Niger, Congo, Ganges, Brahmaputra and Orinoco rivers (Chowdhury *et al.*, 1982; Martins, 1982; Laraque *et al.*, 2013; Mora *et al.*, 2014) and it is produced mainly by the washout of the organic matter accumulated in soils during the preceding dry season, which is leached from the soils to the rivers during rainfall. Conversely,

another factor that can increase the concentrations of DOC during rising and decreasing waters is the decomposition of the submerged vegetation in the floodplain of large rivers (Mora *et al.*, 2014; Geeraert *et al.*, 2017). However, both the Maroni and Oyapock rivers lack extensive floodplains and, therefore, these small floodplains could not account for important leaching of organic carbon to the river mainstems. The temporal variations of the POC concentrations were similar to those shown by the TSS concentrations in both rivers, with the highest concentrations occurring during rising waters and low concentration values during the low water stage. Moreover, similar to other large South American rivers such as the Orinoco and the Amazon (Moreira-Turcq *et al.*, 2003b; Mora *et al.*, 2014), there are highly significant positive relationships between the POC and TSS concentrations in both the Maroni ($r = 0.64$, $p < 0.001$) and Oyapock ($r = 0.89$, $p < 0.001$). As will be discussed later, these positive correlations are because the pool of organic carbon content in the particulate material of these rivers is composed of organic carbon of allochthonous and autochthonous origin, where the allochthonous fraction is large organic molecules that are absorbed onto mineral surfaces, whereas the autochthonous POC consists of aquatic autotrophic organisms (phytoplankton, periphyton, etc). Hence, an increase in the concentrations of TSS results in an enhancement of the POC of allochthonous origin, whereas an increase in the algal biomass also results in an enhancement of the autochthonous POC.

At the SM and SH stations, the concentration of Chl-a in the Oyapock and Maroni waters ranged from 0.07 to 5 $\mu\text{g.l}^{-1}$ (mean of 1.09 and 1.98 $\mu\text{g.l}^{-1}$, respectively), where the highest concentration values were found during the low water stage and the lowest values occurred during the high water periods. The concentrations of Chl-a were higher than the Chl-a values reported by (Lewis, 1988) for the Apure, Caura and Orinoco rivers (mean of 0.36 $\mu\text{g.l}^{-1}$, between 0.01 and 0.04 $\mu\text{g.l}^{-1}$ and between 0.11 and 0.19 $\mu\text{g.l}^{-1}$, respectively), lower than those found in the Amazon River mainstream (mean of 5 $\mu\text{g.l}^{-1}$) and much lower than the levels of Chl-a reported for the highly productive lakes of the Amazon River floodplain (30 to 50 $\mu\text{g.l}^{-1}$) (Moreira-Turcq *et al.*, 2013). These low values of Chl-a in the Maroni and Oyapock may be because both rivers originate on the Guiana Shield and have very weakly mineralized waters (Sondag *et al.*, 2010), which results in a very poor availability of the necessary nutrients for algal growth. Otherwise, the waters of the Amazon River are more productive than those found in the Maroni and Oyapock because several tributaries of the Amazon (Solimões, Madeira and Purus, among others) originate in the Andes, a tectonically active mountain belt generating a high input of sediments and nutrients to the Amazon River (Moquet *et al.*, 2016). Similarly, the

relatively high concentrations of Chl-a found in both the French Guiana rivers during low water may be principally due to the decrease in turbidity (low TSS concentrations were found) in the waters and the increase in nutrients during this period (Sondag *et al.*, 2010), because an increase in the light path through the water column and an enhancement in the concentrations of nutrients produce an increase in the primary production in the rivers (Lewis, 1988). In fact, there are highly significant negative relationships between monthly water discharge values and Chl-a concentrations in both rivers ($r = -0.73$, $p < 0.001$ and $r = -0.69$, $p < 0.001$ for the Maroni and Oyapock, respectively), which are due to the increase in algal growth during low water periods given the low concentrations of TSS.

Similar to POC, the concentrations of PN show a significant positive relationship with TSS concentrations in the Maroni River ($r = 0.45$, $p < 0.05$) and a very significant positive relationship with the same variable in the Oyapock ($r = 0.61$, $p < 0.01$). Similarly, the PN concentrations correlate significantly with POC in the Oyapock ($r = 0.51$, $p < 0.05$) and in the Maroni ($r = 0.69$, $p < 0.001$). Although the range of PN concentrations was greater in the Maroni than that found in the Oyapock, both rivers present very low concentrations of PN in comparison to the range (0.2- 29.7 mgN.l⁻¹) observed in rivers of Southern and Southeastern Asia (Ziegler *et al.*, 2016), reflecting the exceptionally high erosion rates promoted by natural processes (tectonic and climatic events) and anthropogenic activities (land use change) in these regions of Asia. Indeed, the fluvial PN reveals the quality of the water as a signal of land-cover/land-use changes and other anthropogenic activities that accelerate erosion rates and affect soil quality. Therefore, because the Guiana Shield has one of the lowest erosion rates in the world, the concentrations of PN found in the Maroni and Oyapock are similar to those observed in the Negro River (0.15 mg N l⁻¹) (Pourriot and Meybeck, 1995) and near the global median surface water value of PN (0.25 mg N l⁻¹) excluding Europe (Heathwaite *et al.*, 1996). However, these PN concentration values were much lower than those found in European river surface waters (mean concentration of 4.5 mg N l⁻¹), which have been attributed to the high anthropogenic loading of N (Heathwaite *et al.*, 1996).

5.19.2 C/N and C/Chl-a ratios

Figure 3 shows the seasonal pattern of the C/N and C/Chl-a ratios in the suspended material of both the Maroni and Oyapock rivers. Indeed, these ratios refer only to the content of carbon and nitrogen in the particulate material (POC/PN and POC/Chl-a, respectively). The C/N ratios in the particulate material ranged from 3.70 to 11.64 in the Maroni River (mean of

6.50) and from 2.88 to 11.46 in the Oyapock River (mean of 6.42). These ranges differ from the C/N ratios found in the Amazon River mainstream (Moreira-Turcq *et al.*, 2013), which showed greater variability (from 6 to 18) with C/N values higher than those found in both the French Guiana rivers. Additionally, the seasonal patterns presented in **Figure 3** indicate that the highest C/N ratios are found during rising and decreasing waters in the Oyapock River and during rising waters in the Maroni River, whereas the lowest C/N values are observed during the low water stage in both rivers. Similarly, the seasonal patterns of the C/Chl-a ratios indicate that the maximum C/Chl-a values are found during rising and high waters, whereas the lowest C/Chl-a ratios occur during the low water stage in both rivers. Although these temporal patterns of C/Chl-a ratios are in agreement with those seen in the Amazon River at Óbidos (Moreira-Turcq *et al.*, 2013), the ranges of values in the Maroni (between 198 and 13 000) and the Oyapock (between 200 and 18 000) were much broader than those seen in the Amazon River, which presented C/Chl-a ratios between 150 and 1300. Hence, this broader range of C/Chl-a ratios is due to the very low Chl-a concentrations found in both rivers (between 0.1 and 0.4 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) during the high water stage, which were close to the detection limit (0.05 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) of the analytical method.

In addition to the low C/N and C/Chl-a ratios found in the particulate material of both rivers during the low water stage, there are significant positive correlations between the C/N ratios and the TSS concentrations ($r = 0.49$, $p < 0.05$ for the Maroni River and $r = 0.54$, $p < 0.01$ for the Oyapock) and between the C/Chl-a ratios and the TSS ($r = 0.44$, $p < 0.05$ for the Maroni River and $r = 0.75$, $p < 0.001$ for the Oyapock). Several studies carried out in large floodplain-river systems, such as the Amazon and Mississippi rivers, have shown that riverine algae have relatively low C/N ratios (Moreira-Turcq *et al.*, 2013; Pongruktham and Ochs, 2015). Therefore, several conditions, such as a decrease in the TSS concentration during the low water stage and an increase in the concentrations of nutrients during this period (Sondag *et al.*, 2010), are probably related to the phytoplankton growth having low C/N ratios. Indeed, it is well established that during favourable conditions (light and nutrients), there is a “bloom” of algal biomass in aquatic systems. On the other hand, during rain events soils are eroded and transported towards the river mainstems, producing a decrease in autochthonous organic matter and carrying with them organic matter of allochthonous origin, which has higher C/N ratios (Moreira-Turcq *et al.*, 2013). This behaviour has been previously explained by Ittekkot (1988) in several major world rivers and it consists of the fact that mineral particles coming from soil erosion reduce the autochthonous organic matter in rivers because of a decrease in

light penetration through the water column at the high turbidity values. Therefore, some physicochemical processes related to levels of erosion in river basins affect the nature of the riverine organic matter during the annual cycle.

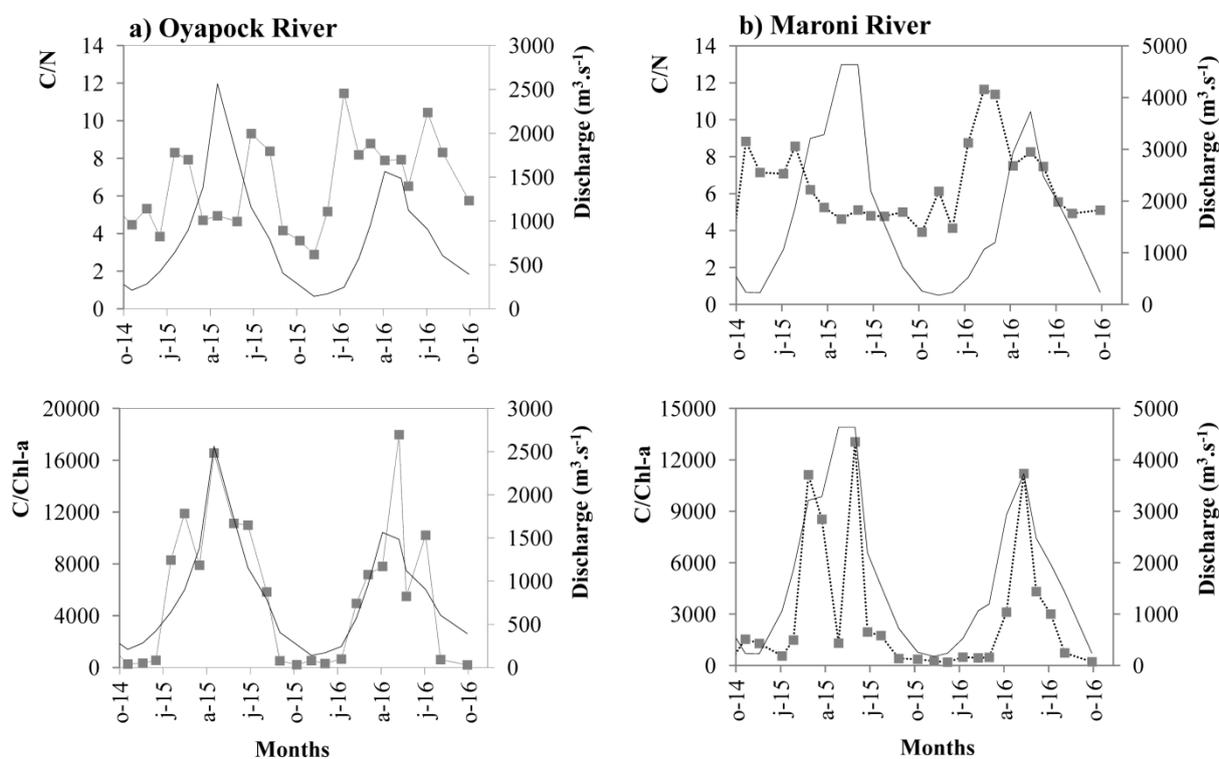


Figure 3. Temporal pattern of C/N and C/Chl-a ratios in the (a) Oyapock and (b) Maroni.

5.19.3 Content of organic matter and nitrogen in the particulate material

Figure 4 shows the seasonal variation of the weight percentage of organic carbon (%POC) and nitrogen (%PN) content in the particulate material of the Maroni and Oyapock rivers together with the mean monthly values of water discharge. The Oyapock River shows a broad range in the percentage of POC (between 8.5 and 30.5%) and PN (between 1.5 and 10.5%) in the TSS and a strong increase in the percentage of POC and PN during the low water stage. As previously discussed, this strong increase in the weight percentage of POC and PN in the suspended material can be related to an enhancement in the primary productivity during this stage. Although the low concentrations of Chl-a during this stage in the Oyapock River (between 1.59 and 3.51 $\mu\text{g.l}^{-1}$) seem to indicate that the contribution of allochthonous organic matter to particulate material is very low, the concentrations of TSS during this stage in the Oyapock are so low (between 2.5 and 7 mg.l^{-1}) that the autotrophic organisms constitute an important fraction of the POC in this river during this stage. In fact, during low water periods, the Oyapock showed the lowest C/Chl-a ratios, which ranged from 200 to 560. Assuming that

Chl-a constitutes approximately 1.5% of the autochthonous organic matter dry weight (Keeley, 1990), the expected dry weight of algal biomass in the Oyapock River during low water would be approximately 67 times the amount of Chl-a (between 0.107 and 0.235 mg.l⁻¹), which represents between 12% and 34% of the POC found in the Oyapock during the low water stage. Indeed, the increase in the autotrophic biomass with low C/N ratios during low water accounts for the strong increase in PN content in the suspended material at this stage.

Even though the Maroni River also shows a high percentage of POC and PN content in the TSS during low water, **Figure 4** indicates that high percentages of POC and PN in the suspended matter are also found during rising and high waters, suggesting that other processes (natural or anthropogenic) could account for the content of organic matter and nitrogen in the suspended material at these stages. In the Maroni River, the percentage of POC in the TSS during low water stage ranges between 7% and 19.3% and the expected dry weight of phytoplankton ranges between 13% and 33% of the total content of POC. However, during the rising water stage in 2015 (March and April), the POC contents in the TSS were 15.6% and 12.9% (respectively), but only a small quantity of this POC (0.6% and 0.8% according to the Chl-a concentrations) can be attributed to phytoplankton biomass. This same fact was observed in May 2016, month in which the percentage of POC content in the TSS was high (13%), but only a small fraction represented the dry weight of phytoplankton (0.6%), suggesting that this “excess” of POC originated from terrestrial sources. As previously mentioned, the Maroni River has increased its sedimentary yield by approximately 400% in the last 15 years mainly due to gold mining activities in the basin (Gallay *et al.*, submitted). Therefore, it is expected that during the intense soil erosion caused by mining activities, the richest organic detritus soil layers are removed and lixiviated towards the river mainstreams, increasing the percentage of allochthonous POC in sediments during intense rain events. This is the case in some highly impacted tributaries of the Cuyuni River (a Guiana Shield river that have been impacted by small-scale gold mining activities since the end of the last century), which have high concentrations of organic matter and TSS due to the removal of the more superficial soil layers at the beginning of the excavations produced by the mining activities (Pisapia *et al.*, 2009).

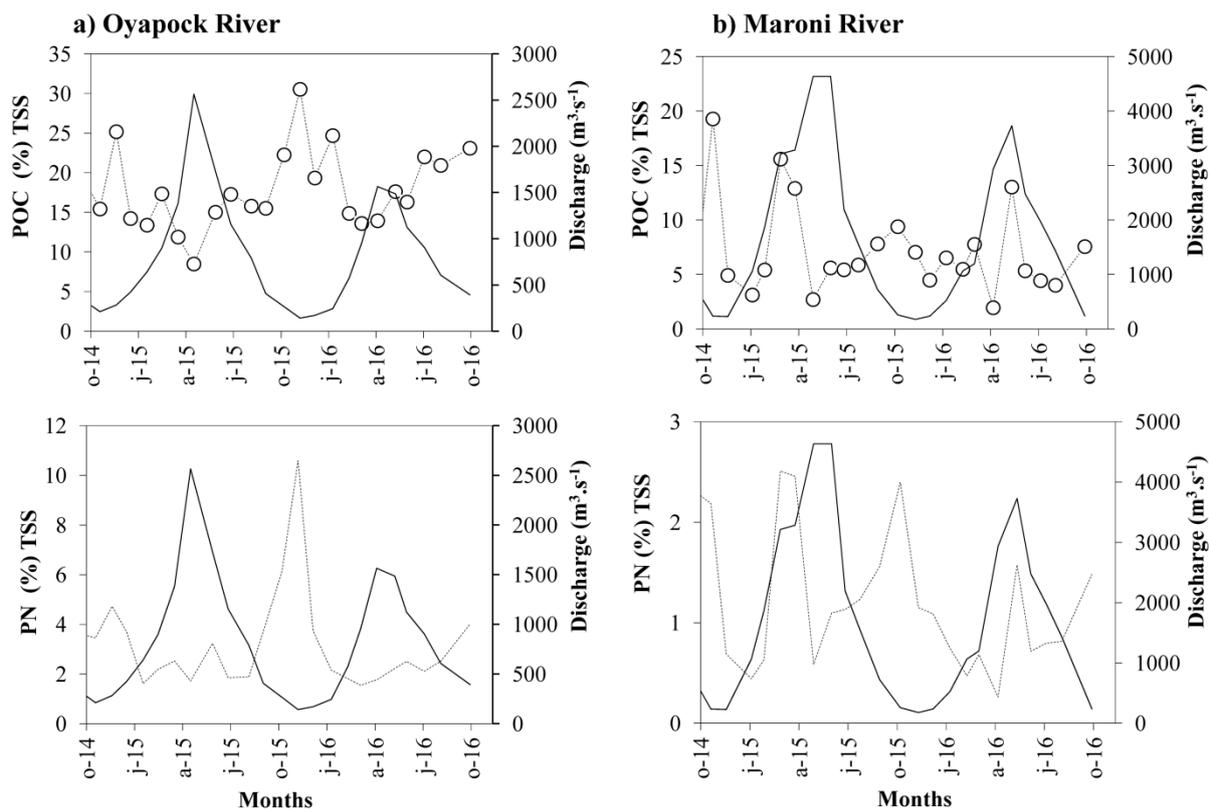


Figure 4. Temporal variability in the weight percentage of Particulate Nitrogen (PN%) and Particulate Organic Carbon (POC%) content in the TSS of the (a) Oyapock and (b) Maroni rivers.

Similar to large worldwide rivers such as the Amazon, Yangtze and the Orinoco rivers and their tributaries (Moreira-Turcq *et al.*, 2003b; Lu *et al.*, 2012; Mora *et al.*, 2014) and other smaller rivers of India and China (Gao *et al.*, 2002; Balakrishna and Probst, 2005; Gao *et al.*, 2007; Ran *et al.*, 2013), there is an inverse relationship between the percentage of POC in the TSS and the TSS sediment concentrations in both the Maroni and Oyapock rivers (**Figure 5**). This inverse relationship fits a negative exponential model, which implies a rapid decline in the percentage of POC content in the particulate material at low TSS concentrations and a typical decreasing trend towards an asymptotic value at high TSS values. This negative exponential relationship is a common feature of river systems with both low and high sedimentary loads, has been reported for a large number of rivers worldwide and is fundamentally similar on seasonal and spatial scales (Ludwig *et al.*, 1996).

Although the increase in autochthonous organic carbon during periods of low TSS concentrations seems to be the principal process determining the inverse relationships between the % POC in TSS and the concentrations of TSS, other processes can also account for this

tendency. Several authors indicate that the dilution of fine sediments rich in allochthonous organic matter by coarse sediments that have more mineral matter during high TSS concentrations and the export of deeper soil horizons with lower organic matter content during high erosion periods can also explain this negative exponential relationship (Ran *et al.*, 2013; Lu *et al.*, 2012; Mora *et al.*, 2014; Le *et al.*, 2017).

In addition to the inverse relationship between the percentage of POC in the suspended material and the TSS concentrations, **Figure 5** shows that the PN (as a percentage of TSS) also fits a negative exponential equation with the concentration of TSS in both rivers. Indeed, it is normal that a similar relationship exists for the percentage of PN content in the particulate material, given the positive relations between POC and PN in both rivers and the relatively small range of the C/N ratios.

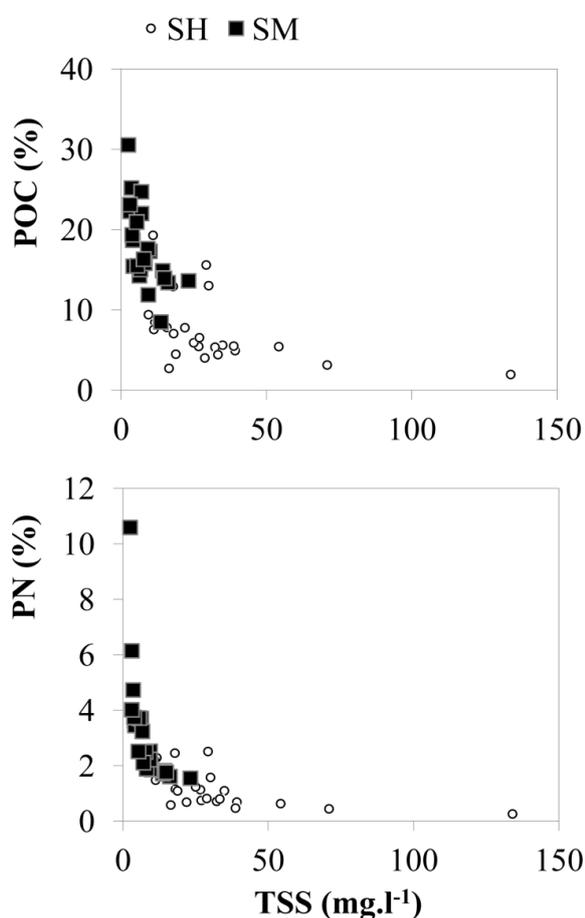


Figure 5. Scatter plot showing the negative exponential relationship between POC (in percentage of TSS), PN (in percentage of TSS) and the concentrations of TSS in the Oyapock (SM) and Maroni (SH) rivers.

5.19.4 Chl-a, Particulate Nitrogen and Organic Carbon Fluxes

Figure 6 shows the seasonal and inter-annual evolution of the monthly fluxes of PN, POC and DOC into the Atlantic Ocean in the Oyapock and Maroni rivers together with the mean monthly values of water discharge for each river. This figure indicates that the maximum fluxes of PN, POC and DOC in both rivers occur during the late rising water periods (months of March, April and May), which is probable because of the yield of organic matter and nitrogen accumulated in soils during the preceding dry season. During the beginning of the rising water period, there is an increase in the TSS concentrations due to the resuspension of fine- and coarse-grained material accumulated in the river channels during the preceding low water stage. However, these sediments are poor in organic material, and the fluxes of DOC, POC and PN are low. Hence, during intense rain events (late rising waters), the more superficial soil horizons, which are the richest in nitrogen and organic compounds, are incorporated from the land to river mainstreams, causing an increase in nitrogen and organic matter during this stage.

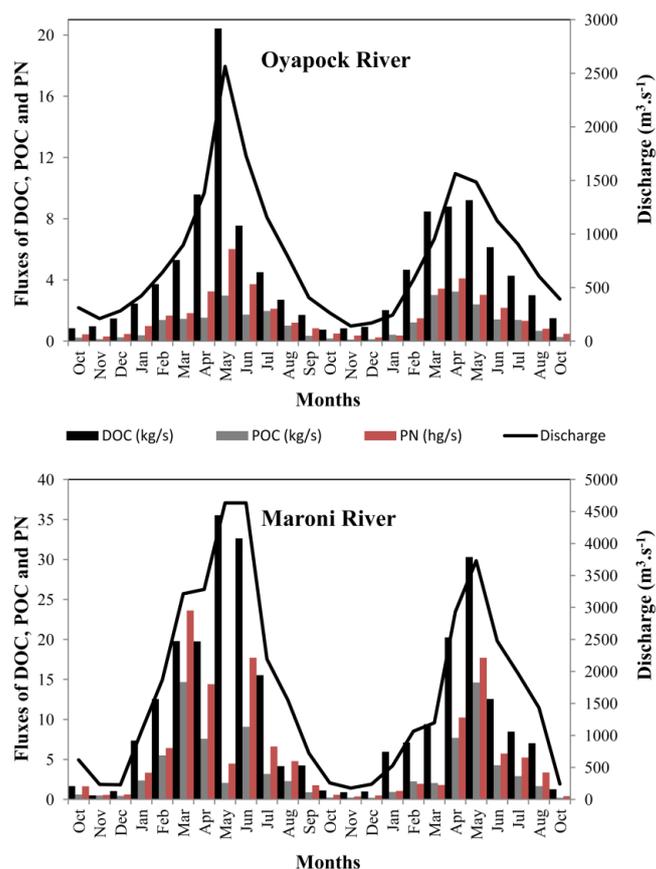


Figure 6. Mean monthly values of water discharge and fluxes of DOC, POC, and PN in the Maroni and Oyapock rivers during the studied period. Fluxes of DOC and POC are in kg.s⁻¹ and fluxes of PN are in hg.s⁻¹ (1x10² g.s⁻¹).

Table 2 shows the total and the specific fluxes of DOC, POC, TOC, and PN in the Maroni and Oyapock rivers during the years of 2014-2015 and 2015-2016. The total fluxes of DOC, POC, and PN in the Oyapock River showed a low inter-annual variability between the two studied years. However, the Maroni River showed a high inter-annual variation in the fluxes of DOC and PN between the two studied years, with increments of 46% and 74% (respectively) in 2015-2016 with respect to the fluxes calculated in 2014-2015. Although the fluxes of organic carbon and PN were between 2- and 3-fold greater in the Maroni River compared to the Oyapock, there were no major differences in the specific fluxes of these variables between both basins (**Table 2**). Therefore, this fact indicates that the fluxes of DOC, POC and PN are higher in the Maroni River because the Maroni drainage basin is larger than the Oyapock River basin.

Table 2. Annual and specific fluxes of DOC, POC, TOC, and PN in the Maroni and Oyapock rivers during the years 2014-2015 and 2015-2016.

		Maroni			Oyapock		
		2014-2015	2015-2016	Average	2014-2015	2015-2016	Average
DOC	Annual flux (tonC.yr ⁻¹)	4.06x10 ⁵	2.78x10 ⁵	3.42x10 ⁵	1.61x10 ⁵	1.33x10 ⁵	1.47x10 ⁵
	Specific flux (ton.km ⁻² .yr ⁻¹)	6.67	4.56	5.61	6.42	5.30	5.87
POC	Annual flux (tonC.yr ⁻¹)	1.28x10 ⁵	0.98x10 ⁵	1.13x10 ⁵	0.35x10 ⁵	0.38x10 ⁵	0.37x10 ⁵
	Specific flux (ton.km ⁻² .yr ⁻¹)	2.11	1.61	1.86	1.40	1.51	1.46
TOC	Annual flux (tonC.yr ⁻¹)	5.35x10 ⁵	3.76x10 ⁵	4.56x10 ⁵	1.97x10 ⁵	1.71x10 ⁵	1.84x10 ⁵
	Specific flux (ton.km ⁻² .yr ⁻¹)	8.77	6.17	7.48	7.83	6.82	7.33
PN	Annual flux (tonN.yr ⁻¹)	22.56x10 ³	12.92x10 ³	17.74x10 ³	6.01x10 ³	4.82x10 ³	5.42x10 ³
	Specific flux (kg.km ⁻² .yr ⁻¹)	370.2	212.0	291.1	239.8	192.0	215.6

As is indicated in **Table 2**, the average annual fluxes of TOC calculated for the Maroni and Oyapock rivers during the two years of study were 4.56 x 10⁵ tonC.yr⁻¹ and 1.84 x 10⁵ tonC.yr⁻¹, respectively. In the Maroni River, approximately 75% correspond to the flux of DOC and 25% to the flux of POC, whereas in the Oyapock approximately 79.9% of the flux of TOC correspond to DOC and 20.1% correspond to POC. Indeed, owing to the low annual water discharge values of these two rivers, the fluxes of organic carbon to the Atlantic Ocean are

much lower than those of other large rivers from the Americas and Africa such as the Orinoco River ($5.31 \times 10^6 \text{ tonC.yr}^{-1}$), Congo River ($14.4 \times 10^6 \text{ tonC.yr}^{-1}$), Amazon River ($40 \times 10^6 \text{ tonC.yr}^{-1}$) and Mississippi River, which annually discharges approximately $3.72 \times 10^6 \text{ tonC}$ into the Gulf of Mexico (Malcolm and Durum, 1976; Moreira-Turcq *et al.*, 2003b; Mora *et al.*, 2014; Spencer *et al.*, 2016).

Overall, a relevant characteristic of these two rivers draining the Guiana Shield is the high specific fluxes of organic matter during the annual cycle. The specific TOC fluxes of the Maroni and Oyapock rivers (mean of 7.5 and 7.3 $\text{ton.km}^{-2}.\text{yr}^{-1}$, respectively) were higher than the specific organic matter fluxes of the Caura and Orinoco rivers in Venezuela ($6.4 \text{ ton.km}^{-2}.\text{yr}^{-1}$ and $5.3 \text{ ton.km}^{-2}.\text{yr}^{-1}$, respectively) and higher than the specific fluxes of TOC of the two largest rivers in the world: the Amazon River at Óbidos ($6.5 \text{ ton.km}^{-2}.\text{yr}^{-1}$) and the Congo River ($3.9 \text{ ton.km}^{-2}.\text{yr}^{-1}$) (Moreira-Turcq *et al.*, 2003b; Mora *et al.*, 2014; Spencer *et al.*, 2016). However, the specific TOC fluxes of the Maroni and Oyapock were lower than those reported for the Caroní (main tributary of the Orinoco River) and Negro rivers ($9.9 \text{ ton.km}^{-2}.\text{yr}^{-1}$ and $12.6 \text{ ton.km}^{-2}.\text{yr}^{-1}$, respectively), which are two blackwater rivers draining a watershed with dense forest cover on the Precambrian Guiana Shield (Paolini, 1990; Richey *et al.*, 1990). Although the results found in this study indicate that these two Guiana Shield rivers are interesting contributors of organic carbon due to the high forest cover of their basins, more than 75% of the organic matter transported by the Maroni and Oyapock rivers is DOC, which is derived from terrestrial sources. Therefore, changes in land use inside these two basins (such as forest conversion to pasture) can decrease the stock of soil organic carbon (Maia *et al.*, 2010) and thereby decrease the concentrations and fluxes of both DOC and POC into the Atlantic Ocean.

5.20 Conclusion

This study provides the first estimation of the concentration and fluxes of organic carbon and particulate nitrogen for two headwater watersheds in the Guiana Shield with high forest cover but also impacted by deforestation and mining activities. The concentrations of DOC and POC show wide temporal variability in both rivers, with maximum concentration values during the increasing branch of the hydrogram due to the washout of allochthonous organic matter accumulated in soils during the preceding dry season. Overall, the DOC accounts for more than 72% of the TOC in the Oyapock River and for more than 50% in the Maroni River during all of the studied months. Similar to the POC and DOC, the concentrations of PN were at their maximum values during rising waters and at minimum values during low water discharge

periods. Conversely, the Chl-a concentrations were high during the low water stage due to the low concentrations of TSS in the river waters and extremely low during high discharge periods.

There are significant positive relationships between the concentrations of POC and PN and TSS. Moreover, the inverse relationships found between the percentages of POC and PN in the TSS with the concentrations of TSS fit a negative exponential model, which has also been reported in other rivers worldwide. The C/Chl-a ratios in the Maroni and Oyapock rivers showed a broader range than that found in the Amazon River. Additionally, the minimum values of both C/N and C/Chl-a ratios during the low water discharge periods indicate that organic matter from autochthonous origin can account for a considerable amount of POC content in the suspended material during low water. Hence, the expected dry weight of phytoplankton can reach values of approximately 34% of the total content of POC in both rivers during this stage.

The maximum fluxes of DOC, POC and PN in both rivers occur during the late rising water stage probably due to the yield more superficial soil horizons (which are rich in organic matter and nitrogen) from land to river mainstreams. Although both the Maroni and Oyapock rivers showed low fluxes of TOC into the Atlantic Ocean, these rivers have one of the highest specific TOC fluxes in South America (surpassed only by the Caroni River in the Orinoco basin and the Negro River in the Amazon basin). Indeed, this interesting characteristic is due to the dense forest cover of both of these Guiana Shield basins. Even though mining activities are carried out in these two basins, there is no clear evidence regarding the impact of these activities on the dynamics of organic matter and particulate nitrogen. However, high percentages of POC and PN in the TSS found in the Maroni River during rising and high waters might be related to mining activities.

5.21 Acknowledgments

This research was initiated and supported by the 'Institut de Recherche pour le Développement' (IRD, France). The authors are grateful to the 'Conseil Régional de la Guyane' (CRG), the 'Office de l'Eau de la Guyane' (OEG), the 'Société SHELL', and the project SNO-HYBAM (Geodynamical, hydrological and biogeochemical control of erosion/alteration and material transport in the Amazon Orinoco and Congo Catchments) for funding this project.

5.22 Supplementary documents

Table S1. Mean monthly water discharge, percentage of POC and PN in the TSS, C/Chl-a and C/N ratios and concentrations of TSS, POC, PN, DOC, TOC and Chl-a in the Maroni River at Saut Hermina during the study period.

Month	Discharge (m ³ .s ⁻¹)	TSS (mg.l ⁻¹)	Chl-a (µg.l ⁻¹)	PN (mg.l ⁻¹)	POC (mg.l ⁻¹)	DOC (mg.l ⁻¹)	TOC (mg.l ⁻¹)	C/Chl-a	C/N	POC/TSS (%)	PN/TSS %
Oct-2014	618	12	1.9	0.27	0.98	2.68	3.66	508	3.70	8.45	2.29
Nov	234	11	1.4	0.24	2.11	2.12	4.23	1540	8.83	19.29	2.18
Dec	229	39	1.5	0.27	1.93	4.51	6.44	1295	7.15	4.93	0.69
Jan-2015	1064	71	4.0	0.31	2.22	6.91	9.13	563	7.08	3.14	0.44
Feb	1870	54	2.0	0.34	2.94	6.70	9.64	1485	8.57	5.42	0.63
Mar	3215	29	0.4	0.73	4.56	6.15	10.72	11130	6.21	15.59	2.51
Apr	3284	18	0.3	0.44	2.30	6.02	8.32	8535	5.25	12.90	2.46
May	4634	16	0.3	0.10	0.45	7.67	8.11	1310	4.62	2.71	0.59
Jun	4634	35	0.2	0.38	1.96	7.04	9.00	13051	5.12	5.61	1.10
Jul	2193	27	0.7	0.30	1.45	7.08	8.53	1958	4.80	5.44	1.13
Aug	1553	25	0.8	0.31	1.47	2.68	4.15	1751	4.78	5.89	1.23
Sep	723	16	3.0	0.24	1.23	5.87	7.10	413	5.01	7.82	1.56
Oct	258	9	2.4	0.22	0.88	4.30	5.18	372	3.92	9.40	2.40
Nov	178	18	5.0	0.21	1.27	5.07	6.34	255	6.12	7.05	1.15
Dec	237	19	4.3	0.20	0.84	4.16	5.00	199	4.13	4.49	1.09
Jan-2016	525	27	3.6	0.20	1.76	11.34	13.10	490	8.75	6.54	0.75
Feb	1065	39	4.8	0.18	2.12	6.68	8.80	445	11.64	5.49	0.47
Mar	1198	22	3.5	0.15	1.70	7.85	9.55	482	11.38	7.78	0.68
Apr	2933	134	0.8	0.35	2.62	6.91	9.53	3121	7.51	1.96	0.26
May	3729	30	0.4	0.47	3.92	8.13	12.05	11202	8.26	13.02	1.58
Jun	2477	32	0.4	0.23	1.73	5.07	6.79	4318	7.47	5.35	0.72
Jul	1969	33	0.5	0.27	1.48	4.30	5.78	3011	5.55	4.43	0.80
Aug	1431	29	1.56	0.23	1.16	4.91	6.06	742	4.93	4.02	0.82
Oct	240	11	4.0	0.17	0.85	5.22	6.07	215	5.11	7.57	1.48

Table S2. Mean monthly water discharge, percentage of POC and PN in the TSS, C/Chl-a and C/N ratios and concentrations of TSS, POC, PN, DOC, TOC and Chl-a in the Oyapock River at Saut Maripa during the study period.

Month	Discharge (m ³ .s ⁻¹)	TSS (mg.l ⁻¹)	Chl-a (µg.l ⁻¹)	PN (mg.l ⁻¹)	POC (mg.l ⁻¹)	DOC (mg.l ⁻¹)	TOC (mg.l ⁻¹)	C/Chl-a	C/N	POC/TSS (%)	PN/TSS %
Oct-2014	313	4.4	0.6	0.14	0.74	2.69	3.43	1254	5.17	18.67	3.61
Nov	211	4.2	2.3	0.14	0.64	4.63	5.27	275	4.47	15.44	3.45
Dec	283	3.5	2.6	0.17	0.88	5.22	6.10	337	5.33	25.18	4.73
Jan-2015	424	6.3	1.6	0.23	0.89	5.82	6.71	561	3.84	14.23	3.71
Feb	641	16.1	0.3	0.26	2.16	5.81	7.97	8305	8.30	13.39	1.61
Mar	898	9.3	0.1	0.20	1.62	5.90	7.52	11893	7.93	17.35	2.19
Apr	1382	9.3	0.1	0.24	1.11	6.93	8.04	7904	4.71	11.88	2.52
May	2564	13.7	0.1	0.23	1.16	7.97	9.13	16571	4.94	8.49	1.72
Jun	1730	6.7	0.1	0.22	1.00	4.37	5.37	11124	4.65	15.03	3.23
Jul	1156	9.9	0.2	0.18	1.71	3.89	5.60	11008	9.31	17.29	1.86
Aug	789	8.1	0.2	0.15	1.28	3.42	4.71	5835	8.38	15.80	1.88
Sep	407	5.6	1.7	0.21	0.86	4.22	5.08	519	4.16	15.50	3.72
Oct	265	3.1	3.1	0.19	0.68	2.83	3.52	222	3.63	22.27	6.14
Nov	141	2.5	1.4	0.26	0.75	5.90	6.65	532	2.88	30.54	10.59
Dec	170	3.8	2.3	0.14	0.74	5.51	6.25	318	5.17	19.35	3.74
Jan-2016	244	6.9	2.6	0.15	1.72	8.33	10.05	656	11.46	24.70	2.16
Feb	574	14.3	0.4	0.26	2.13	8.13	10.26	4952	8.19	14.88	1.82
Mar	955	23.2	0.4	0.36	3.16	8.88	12.03	7178	8.79	13.62	1.55
Apr	1564	14.9	0.3	0.26	2.07	5.62	7.69	7810	7.89	13.94	1.77
May	1485	9.2	0.1	0.20	1.62	6.20	7.82	17971	7.93	17.63	2.22
Jun	1123	7.7	0.2	0.19	1.26	5.46	6.73	5494	6.52	16.32	2.50
Jul	905	6.9	0.2	0.15	1.53	4.72	6.25	10212	10.44	22.01	2.11
Aug	605	5.3	1.83	0.13	1.12	4.96	6.07	609	8.32	20.92	2.52
Oct	393	3.0	3.5	0.12	0.70	3.81	4.51	199	5.75	23.11	4.02

ARTICLE C : 1^{ère} évaluation de la variabilité spatiale de MES par télédétection dans le bassin de l'Orénoque



Rencontre des eaux noires de la rivière Caroni avec les eaux blanches de l'Orénoque



L'Orénoque en crue en août 2015 transporte aussi des débris végétaux

Assessment of the Orinoco River sediment discharge with MODIS remote sensing data

Journal of South American Earth Sciences

Soumis

Majorie Gallay^{1,2}, Alain Laraque³, Jean-Michel Martinez⁴, Abrahan Mora⁵, Santiago Yépez⁶, Gérard Cochonneau⁴, Juan-Andres Alfonso⁷, Juan-Manuel Carrerra⁷, Bartolo Castellano⁸, Antoine Gardel⁹, José Luis López⁸

1 GET- UMR CNRS/IRD/UPS–UMR 5563, UR 234, Cayenne, Guyane française

2 Université de la Guyane, Cayenne, Guyane française

3 GET-UMR CNRS/IRD/UPS–UMR 5563, UR 234, Montpellier, France

4 GET-UMR CNRS/IRD/UPS–UMR 5563, UR 234, Brasilia, Brésil

5 Centro del agua para América Latina y el Caribe. Tecnológico de Monterrey, Monterrey, México

6 GET-UMR CNRS/IRD/UPS–UMR 5563, UR 234, Toulouse, France

7 IVIC, Centro de Oceanología y Estudios Antárticos, Venezuela

8 CNRS en Guyane, LEEISA, USR mixte CNRS/UG/IFREMER – USR 3456, Cayenne, Guyane française

9 IMF, UCV, Ciudad Universitaria, Los Chaguaramos, Caracas, Venezuela

5.23 Abstract

The aim of this study was to derive the suspended sediment concentration (SSC) and sediment discharge (2000-2016) of the Middle and Lower Orinoco River reaches using MODIS remote sensing data. A single SSC retrieval algorithm was calibrated using HYBAM long term monitoring program data (N= 183). The comparison of satellite and field measurements showed a RMSE of 32%, corresponding to a mean absolute error of 21 mg.l⁻¹. These results supported the use of MODIS to monitor the surface suspended sediment concentration at six virtual stations along the Orinoco River. In the basin with MODIS estimation, the highest mean SSC were found downstream of the Meta River (101 mg.l⁻¹) and of the Apure River (99 mg.l⁻¹), which provide the major sediment input to the Orinoco main stream. The lowest mean SSC was found upstream of the Meta River (42 mg.l⁻¹). At Ciudad Bolivar and Ciudad Guayana we assessed a mean SSC of 88 mg.l⁻¹ and 92 mg.l⁻¹ respectively.

The relative difference between MODIS-derived annual sediment discharge ground measurement-derived data is of -4% demonstrating the possibility to use both datasets to complement each other. At Ciudad Bolivar station, for a mean discharge of 33,320 m³.s⁻¹ between 2001 and 2016, the sediment loads varied from 75 to 103 Mt yr⁻¹, corresponding to a sediment yield of 91 to 125 t.km⁻²yr⁻¹ and a runoff of 31 to 47 l.s⁻¹km⁻²yr⁻¹ with no positive or negative trends over the observed period.

Keywords: MODIS sensors, Suspended Sediments, Sediment Loads, Orinoco River

5.24 Introduction

Total suspended sediments transport in large fluvial systems is a useful tool to evaluate land use, tectonic regimes, and the hydrophysical, geomorphological and ecological functioning of basins, including the evolution of soil formation, river bank stabilization, hillslopes, channel-floodplain systems, biogeochemical cycles of organic and inorganic compounds, human intervention and sedimentation rates (Chakrapani, 2005; Latrubesse *et al.*, 2005; Milliman *et al.*, 2008).

The dynamics of suspended sediment loads (S_L) is complex in large basins and depends on climatic, geologic and tectonic conditions, the size of the floodplain and the hydrodynamic characteristics of the river and its tributaries (Walling and B.W., 1996; Bourgoin *et al.*, 2007; Filizola and Guyot, 2009). Moreover, factors such as biogeochemical processes, flash floods

and vertical and/or horizontal heterogeneity of sediments as a consequence of grain size distribution, sedimentation and/or tributary input can also increase the complexity of the distribution patterns of total suspended sediment in a particular basin (Bouchez *et al.*, 2010; Bouchez *et al.*, 2011).

In the last 50 years, S_L has increased in many tropical regions due to a decrease in soil conservation and changes in land use (Restrepo, 2005; Martinez *et al.*, 2009; Geeraert *et al.*, 2015), resulting in changes in sediment yield and runoff (Coe *et al.*, 2009; Costa *et al.*, 2013), with consequences for the geomorphology of bed rivers, banks and deltas (Restrepo and Lopez, 2008). In addition, many rivers in developed regions have exhibited decreases in S_L in response to river diversion and dam construction (Milliman, 2001). In the Yangtze River, Yang *et al.* (2011) showed that 50 years of ~50,000 dams have resulted in channel erosion and coarsening of bottom sediment. The monitoring of S_L in large rivers requires a high frequency of sampling and the choice of a gauging station to obtain temporal and spatial representativeness of the sedimentary load (Laraque *et al.*, 2005; Filizola *et al.*, 2009).

The examination of surface suspended sediments concentration (or SSSC) by remote monitoring has received increasing interest from the scientific community. Medium-resolution satellites can efficiently obtain uninterrupted daily values of the SSC at the water surface, allowing a more accurate estimation of loads and the detection of inter-annual variations in sedimentary flows (Martinez *et al.*, 2009). In large rivers and reservoirs, MODIS sensors are commonly used to estimate SSC and S_L (Espinoza Villar *et al.*, 2012b; Mangiarotti *et al.*, 2013; Park and Latrubesse, 2014; Robert *et al.*, 2016) and less commonly, to describe the cross-distribution of suspended sediments.

Pioneering studies of the temporal variation of SSC and S_L in the Orinoco River have been performed by several authors (Stallard, 1985; Paolini *et al.*, 1987; Stallard, 1987; Lewis and Saunders, 1989; Meade *et al.*, 1990; Laraque *et al.*, 2013b). Meade *et al.* (1990) found that the trend of SSC in the Orinoco River is not correlated with water discharge. In other words, the hydrological cycle of the Orinoco River depends only on the seasonal distribution of precipitation in the northern and southern areas of the basin, which is characterized by a unimodal regime, whereas the annual pattern of sediments is bimodal, with the first peak occurring during the rising flood (May) and the second peak of lower intensity occurring in November, during the falling flood stage (Laraque *et al.*, 2013b).

Stallard (1987) showed that greater concentrations were found downstream of the Meta and Apure rivers, which are “white water” rivers. Lower concentrations were found downstream of “black water” rivers such as the Caura and Caroni rivers, draining the Guyana Shield and flowing to the right bank. These differences results in a high heterogeneity of SSSC between the left and right banks in the Upper and Middle Orinoco. This heterogeneity tends to be interrupted at 8 major bedrock controls (Laraque *et al.*, 2013b) and homogenized between Musinacio and Ciudad Bolivar by a very turbulent bedrock controlled stretch known as El Infierno, before passing through its only complete meander (Stallard, 1987; Meade, 2007).

With regard to S_L , the Orinoco River loads at Ciudad Bolivar were estimated with a wide range of uncertainty to vary from 90 to 150 Mt yr⁻¹ (Paolini *et al.*, 1987; Lewis and Saunders, 1989; Meade *et al.*, 1990; Laraque *et al.*, 2013b). These authors proposed that this variation could be due to several factors, such as the asynchrony between the flow and the suspended sediment regime, the heterogeneity of SSSC between banks, interannual variations of loads due to land use erosion and the different methods and sampling frequencies used.

The main objectives of this paper were to identify the temporal patterns of SSSC along the Orinoco River and estimate long-term S_L at the main gauging station of Ciudad Bolivar. Considering the lack of field measurements, we made use of MODIS remote sensing data that we calibrated using HYBAM long term monitoring program applying the same methods as Martinez *et al.* (2009) to estimate SSSC at the river surface.

5.24.1 Study area

The Orinoco Basin is located in the Northern Hemisphere in South America, between 2° and 10°N and 75° and 62°W (**Figure 1**). Of the basin area 70% is in Venezuela, and 30% is in Colombia (Silva-Léon, 2005). The channel length of the Orinoco River is approximately 2140 km from its source at the Cerro Delgado Chalbaud in Sierra Parima to the Orinoco Delta. The Upper part extends from the Cerro Delgado Chalbaud (63°21'W et 2°19'N) to San Fernando de Atabapo (67°40'W and 4°05'N), covering an area of 101,000 km². The Middle Orinoco extends from the confluence with the Atabapo and Guaviare rivers to the Apure River (66°25'W and 7°38'N), covering an area of 98,000 km². The Low Orinoco extends from the Apure River until the Orinoco delta and drains an area of 301,000 km² (Meade *et al.*, 1990).

The Orinoco basin controlled at the Ciudad Bolivar gauging station covers an area of approximately 819,252 km² (Yépez *et al.*, in revision). The Orinoco River ranks third in the

world in terms of water discharged to the ocean and first in terms of specific discharge ($37.6 \text{ t.km}^{-2}\text{yr}^{-1}$) (Laraque *et al.*, 2013a; Laraque *et al.*, 2013b), surpassing the Congo ($11.6 \text{ l.s}^{-1}\text{km}^{-2}\text{yr}^{-1}$) and Amazon ($34.6 \text{ l.s}^{-1}\text{km}^{-2}\text{yr}^{-1}$) rivers (Laraque *et al.*, 2001; Callède *et al.*, 2010). The climate in the Basin is largely tropical, and the hydrological regime is controlled by the position of the Bolivian anticyclone and the oscillation of the intertropical convergence zone (ITCZ) (Lewis *et al.*, 1995; Pérez Hernández and López, 1998).

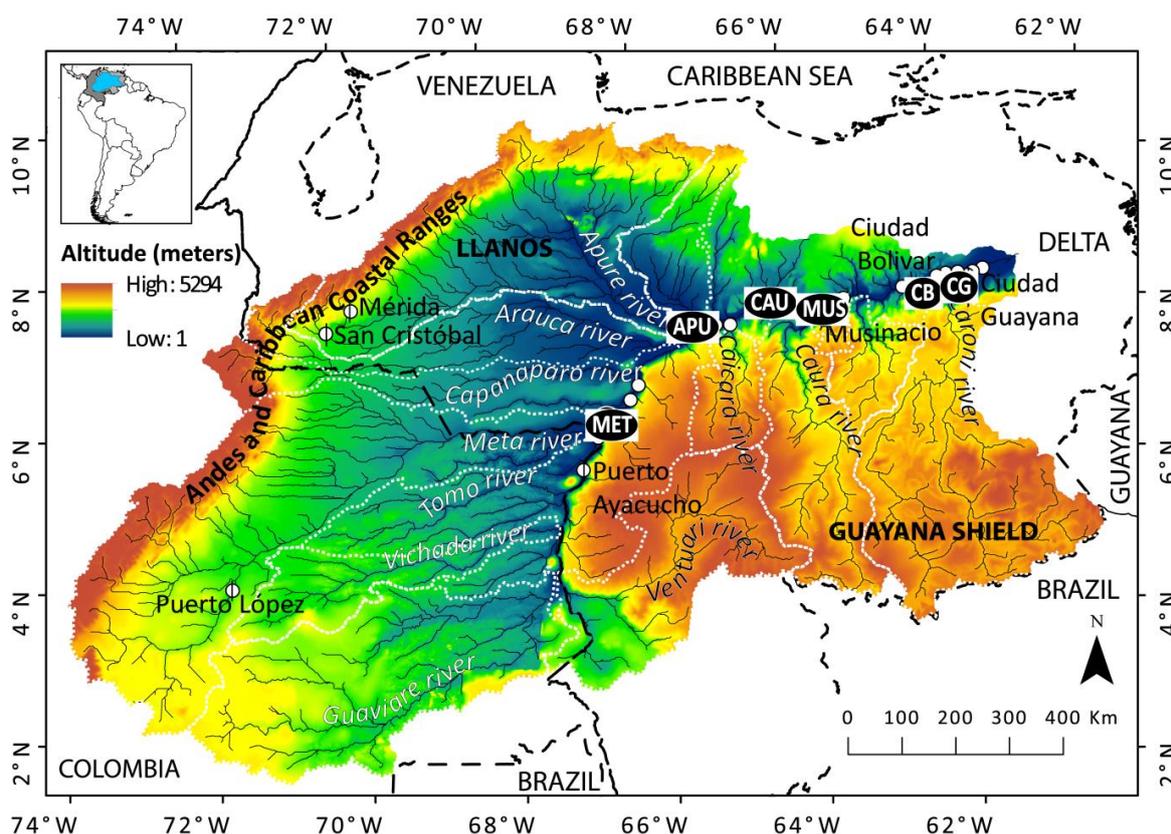


Figure 1. Orinoco Basin with its main physiographic regions, cities, tributaries and the location of the six MODIS Suspended Sediments monitoring stations in the Orinoco River upstream the confluence with : the Meta River (Station MET), the Apure River (Station APU), the Caura River (Station CAU), at Musinacio (Station MU), Ciudad Bolivar (Station CB) and Ciudad Guayana (Station CG). The white line presents the limits of the sub-basins.

The basin is divided into three physical regions: on the west side, the Andes with high relief (5254 m); on the south side, the Precambrian Guayana Shield with moderate relief (500 m); and on the east side, the Andean foreland basin of Colombia and Venezuela as well as the large alluvial plains named "Llanos" (Warne *et al.*, 2002), which function as an immense storage compartment of suspended sediments (Meade, 2007). The density of the population in the Orinoco basin is very low and essentially rural excepted along the Orinoco Oil Belt located in the low Orinoco.

5.25 Materials and methods

5.25.1 Water discharge

Discharge data for this study were provided by the *Instituto Nacional de Meteorología y Hidrología* (INAMEH), which has recorded the daily water level and discharge in the Orinoco River since 1926 at the main gauging station of Ciudad Bolívar (CB), (08°08'38"N, 63°36'28"E, 8 m a.s.l), which controls 83.6% of the total catchment area (Laraque *et al.*, 2013a). The rating curve used was elaborated by the INAMEH and the Central University of Venezuela (UCV) using traditional gauging with current meters before 2010 and acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) thereafter.

Figure S1 presents the water discharge at Ciudad Bolívar station. The mean discharge during the period 2000-2016 was $33,230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, with high water discharge values in August-September and low waters between February and March. The hydrological cycle of the Orinoco is characterized by a high ratio of 25 of high to low waters. Low flows occur between February and March, with high flows between August and September. The maximum value of water discharge observed was $78,398 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ in 2016, whereas the minimum value observed was $3067 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ in 2010.

5.25.2 Remote Sensing for Surface Suspended Sediments monitoring

MODIS images

In this study we considered MODIS surface reflectance 8-day composites at 250-meter and 500-meter resolution. The MODIS sensors are onboard Terra and Aqua satellites and have provided global coverage of Earth since February 2000 and July 2002, respectively. MODIS images provide 7 spectral bands at 500-meter resolution (MOD/MYD09A1 products) and 2 spectral bands at 250 meters (MOD/MYD09Q1 products). The 500-meter products provide additional information related to the image acquisition geometry and processing quality, such as the presence of clouds, cloud shadows and aerosol loading in each pixel.

MODIS surface reflectance from the sensors onboard Terra and Aqua can be used to assess SSSC measurements for a wide range of rivers size (250 m to 1 km wide) and for a wide range of concentrations (Espinoza Villar *et al.*, 2012b; Mangiarotti *et al.*, 2013; Robert *et al.*, 2016). The Orinoco River has a mean width of approximately 2 km upstream of the Meta River and approximately 8 km in the largest part. The water presents a wide range of sediment

concentrations from 3 to 560 mg.l⁻¹ (Nordin *et al.*, 1983; Lewis and Saunders, 1989; Laraque *et al.*, 2013a; Mora *et al.*, 2014). Many large islands are in its main course, and many sand banks appear during the falling stage. Consequently, we used MOD3R software ([freely distributed online at www.ore-hybam.org](http://www.ore-hybam.org)), which has been developed and tested to produce robust estimates of SSSC from MODIS data for rivers showing a wide range of concentrations while excluding automatically mixed spectra and eliminating those affected by sun-glint effects (Martinez *et al.*, 2009).

Surface suspended sediment estimate

We first used field data for SSSC with a 10-day frequency collected and processed in the framework of the HYBAM observation service program SNO- ([see: www.ore-hybam.org](http://www.ore-hybam.org)) at Ciudad Guayana (from 2005 to 2013), Ciudad Bolivar (from 2005) and at Musinacio between 2006 and 2008. 280 samples of Ciudad Guayana were taken downstream of “Puente Orinokia” on the surface water in the middle of the cross-channel section (8°16'26"N - 62°52'59"W). At Ciudad Bolivar, water samples (305 data points) were taken in the surface water of the river channel (8°9'1.79"N - 63°32'25"W). The transect was located just downstream from a bedrock control point provoking vortices, turbulences and flow homogenization (Laraque *et al.*, 2013a). At Musinacio, 79 water samples were collected in the surface water of the river channel (7°43'009"N - 64°42'693"W). The section were located in 23 km after the Caura River in a narrow canyon (< 2 km wide).

Second, we used field data from Mora *et al.*(2014), who collected 24 monthly SSSC samples in the Orinoco River from June 2007 to August 2008 upstream of the confluence of the Apure River (12 data points on the left bank, 7°34'53"N - 66°25'16"W, and 12 samples on the right bank, 7°35'52"N - 66°25'16"W) and upstream of the confluence with the Caura River (12 data points on the left, 7°40'13"N - 64°54'29"W, and 12 samples on the right bank, 7°38'47"N - 64°55'03"W). Finally, one sample was collected in 2013 at Puerto Ayacucho upstream the confluence Meta River with the Orinoco River (5°40'10"N - 67°38'24"W).

Calibration between SSSC and water surface reflectance at virtual stations

As stated by Martinez et al. (2009) for the Amazon River (Martinez *et al.*, 2009), direct comparisons of SSS samples and MODIS image is difficult since for most of the dates, the satellite images are not available on the same day than the water sampling but in a limited time range of a few days. To reduce this bias we considered monthly average of the SSS concentration (3 samples each month) and 8-day composites (between 3 and 6 reflectance

estimates each month) at the virtual stations of Musinacio (Station MUS), Ciudad Bolivar (Station CB) and Ciudad Guyana (Station CG). At the virtual stations upstream of the confluence of the Apure River with the Orinoco River (Station APU), we used average estimates of the SSSC (2 samples each month in the right and the left bank) and 8-day composites (2 reflectance estimates each month in the right and the left bank). In order to assess the robustness of the relationship, samples have not been stratified in relation to the season of the year. Two more virtual stations were created upstream the confluence of Caura (Station CAU) and Meta (Station MET) rivers with the Orinoco River, considering that the river present the same characteristics.

[Mangiarotti et al. \(2013\)](#) used a single simple linear regression model to derive SSS from MODIS surface reflectance for different stations separated by more than 700 km. More recently, [Martinez et al. \(2015\)](#) used a large dataset of field measurement of water optical properties to demonstrate that a single SSSC retrieval model can be used efficiently for all the rivers of the Amazon River basin. Based on these observations acquired over a large river basin, we used in this study a unique retrieval model to estimate the SSSC along the Orinoco River (over 695 km) and that was calibrated using three HYBAM monitoring stations located in the lower Orinoco and one station located in the middle Orinoco ([Mora et al., 2014](#)). The regional calibration was obtained by comparing MODIS reflectance-surface and SSSC field data at Station APU, Station MUS, Station CB and at Station CG. The relationship between the sediment concentration and satellite reflectance was tested in the red (620-670 nm) and infrared bands (841 to 876 nm).

5.25.3 Average suspended sediment concentration

Height sampling campaigns were conducted between 2009 and 2015 during flood peak, decreasing water and low water to relate the 10-day surface samples to the average suspended sediment concentration (ASS) across the whole river reach. During these campaigns the discharge were measured with Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP). Nine bottles of two liters were collected at three verticals and three different depths using horizontal bottles suitable for the Orinoco River's condition. Figure 2 show the relationship between the ASS and the SSSC. For the 90 samples collected over the Ciudad Bolivar section, we calculated an ASS of 58 mg.l⁻¹ which is similar to the SSSC of 56 mg.l⁻¹ found for the 72 samples.

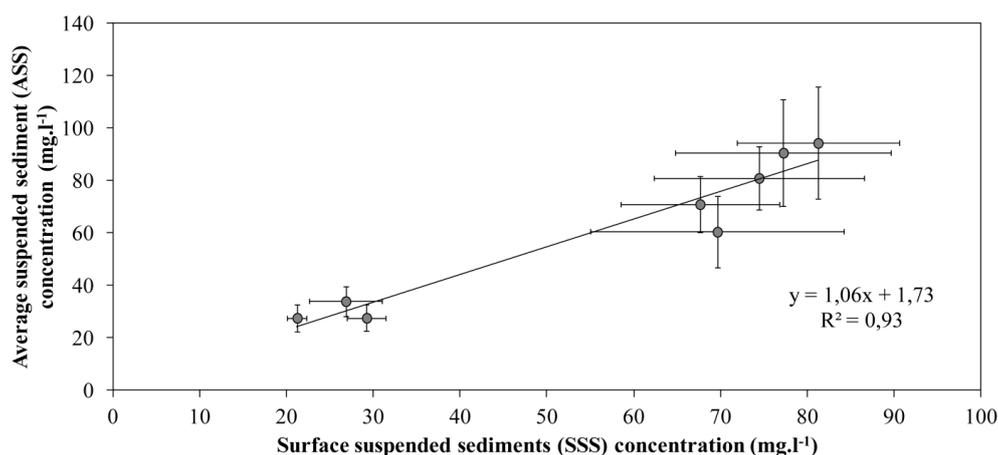


Figure 2. Average suspended sediment concentration as a function of the surface suspended sediment concentration assessed during 9 fields sampling campaign at various times of the hydrologic cycle. Sampling within the water column as based on 9 points samples at 3 different verticals and 3 increasing depths. Error-bars stand for the standard deviation of all points collected at a given campaign, either at the river surface (3 points) or within the water column (6 points).

5.25.4 Sediment Load, Sediment Yield and specific discharge calculation

A singularity of the sedimentological cycle of the Orinoco River is the occurrence of two peaks of sediment concentration before and after the maximum water discharge values. This singularity invalidates the use of a unique relation between SSSC and flow discharge to calculate the sediment loads (Laraque *et al.*, 2013b). Consequently, S_L was calculated (in $t\ months^{-1}$ and in $t\ yr^{-1}$) using the following equation :

$$S_L = \left[\sum_1^n \frac{(C_i * Q_j)}{Q_m} \right] \quad (4)$$

where n is the number of analyses during the time period, C_i is the ASS, and Q_j and Q_m are the daily and monthly water discharge.

Sediment yield (S_y) and runoff (R) are the sediment loads and the water discharge normalized by the drainage area, respectively. In the long term, these analyses can be used to evaluate the erosion and deposition processes in a catchment to provide an indicator of climate change and human impact. If the slope of the cumulative double mass plot does not change, the suspended sediment loads and discharge exhibit the same regular trend. By contrast, if the sediment load increases or decreases, then the catchment is influenced by anthropic activities (Walling, 2006).

5.26 Results

5.26.1 Development of SSSC-water reflectance relation

Figure 3 shows the relationship between the monthly-averaged water endmember reflectance at near infrared extracted from MODIS 250-meter 8 day composites and the monthly SSSC measurements derived from the 10-day samples ($R^2= 0.65$; $n= 183$) at three HYBAM stations (MUS, CG and CB) in the low Orinoco and one station in the middle Orinoco (APU). The water reflectance tended to increase with increasing SSSC at each station with a linear relationship and no saturation up to 250 mg.l^{-1} . The surface reflectance varied between 0.005 and 0.029 sr^{-1} for concentrations varying from 7 to 241 mg.l^{-1} with a mean value of 0.014 sr^{-1} and 83 mg.l^{-1} .

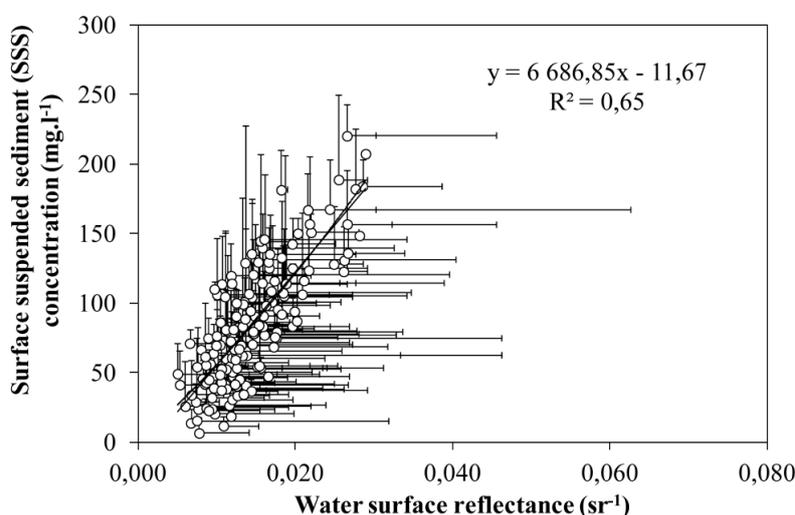


Figure 3. Surface reflectance of the Orinoco River derived from MODIS 8-day composite (Terra and Aqua Satellite) as a function of the surface suspended sediment concentration at each station along the Orinoco River. Surface reflectance was extracted from the infrared channels available in the 250 meter resolution mode. Measurements represent monthly average values and error-bars stand for the standard deviation of each month.

The error-bars (**Figure 3**) indicate the standard deviation based on the SSSC and the satellite reflectance of each month and show a significant variability during a month. For the all dataset (212 reflectance/SSS estimates), from the APU to the CG stations, the RMSE was of 21 mg.l^{-1} (32% relative error for concentration range of $7\text{-}241 \text{ mg.l}^{-1}$).

5.26.2 SSSC dynamic

Comparison of estimated long-term SSSC with ground SSSC

We estimated the satellite 8-day SSSC variation along the main stem of the Orinoco River.

Figure 4 compares the monthly SSSC assessed from satellite data and from ground data upstream the confluence between the Orinoco and the Meta River (station MET), the Apure River (station APU), the Caura River (station CAU) and at Musinacio (station MU), Ciudad Bolivar (station CB) and Ciudad Guayana (station CG). Within the entire reach, from January 2001 to January 2016, the satellite-derived and the measured SSSC along the Orinoco River main stem ranged respectively from 13 to 272 mg.l⁻¹ and from 7-290 mg.l⁻¹ with field data (average relative difference of 27%).

At MET station, upstream the Meta River, the satellite-derived monthly SSSC ranged from 11 to 114 mg.l⁻¹, with a mean concentration of 42 mg.l⁻¹. Monthly average field and MODIS SSSC shows a similar concentration (57 and 60 mg.l⁻¹). Downstream the Meta River at APU station, the satellite-derived SSSC varied from 28 to 272 mg.l⁻¹ (mean value of 101 mg.l⁻¹) while the field data varied from 52 mg.l⁻¹ to 236 mg.l⁻¹ (mean value of 103 mg.l⁻¹). The satellite-derived SSSC values varied between 35 and 290 mg.l⁻¹ (mean of 94 mg.l⁻¹) at CAU station, downstream the Apure River, and the field data showed SSSC from 46 to 251 mg.l⁻¹ (mean of 101 mg.l⁻¹). At MUS station, downstream of the Caura River, the SSSC varied between 32 to 269 mg.l⁻¹ (mean of 99 mg.l⁻¹) and from 23 to 292 mg.l⁻¹ (mean of 108 mg.l⁻¹) for satellite-derived and field estimates respectively. At CB station, the satellite-derived SSSC ranged from 13 to 247 mg.l⁻¹ (mean of 79 mg.l⁻¹) and the field estimates varied from 25 to 259 mg.l⁻¹ (mean of 90 mg.l⁻¹). Finally, at station CG, SSSC data from field measurements (7 to 234 mg.l⁻¹, mean of 79 mg.l⁻¹) showed very similar pattern to that of satellite-derived estimates (18 to 246 mg.l⁻¹, mean of 81 mg.l⁻¹).

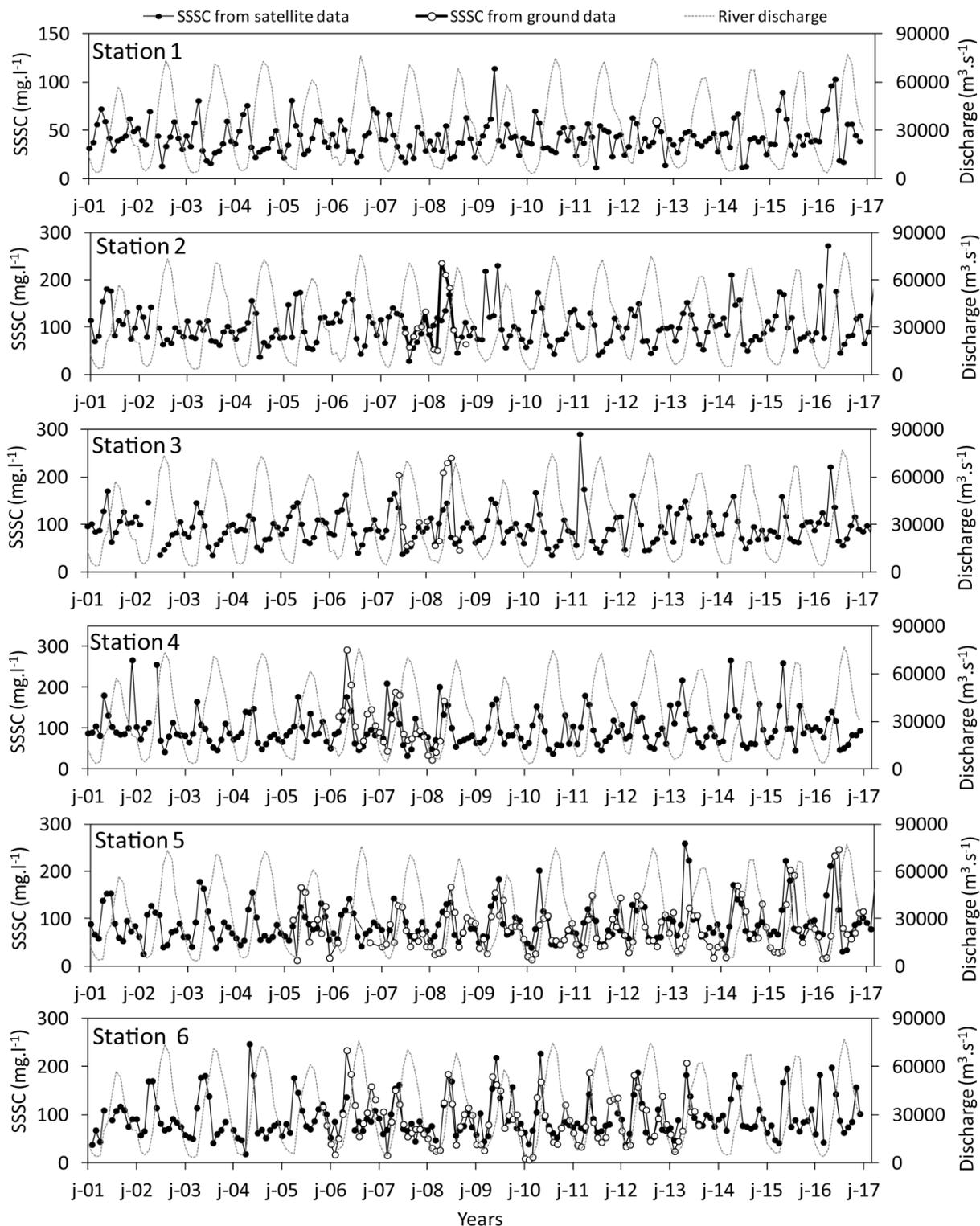


Figure 4. Comparison of monthly estimated (black circles) and field data (black line white circles) SSSC data along the Orinoco mainstream: upstream the Meta River (Station MET), the Apure River (Station APU), the Caura River (Station CAU), at Musinacio (Station MU), Ciudad Bolivar (Station CB) and Ciudad Guayana (Station CG). The grey line present the water discharge.

Two SSSC peaks

As expected, the temporal variations of SSSC over the Orinoco River do not show any relationship with water discharge (Stallard, 1987; Meade *et al.*, 1990; Laraque *et al.*, 2013b). The SSSC Concentration assessed from MODIS 8-day composites were averaged each month of the year at all virtual stations, enabling study of the two SSSC peaks along the main stem of the river between 2000 and 2016. **Figure 5** shows that the two SSSC peaks can be observed all along the Orinoco River with MODIS 8-day composites with no simple relationship with the river discharge. The SSSC exhibited a maximum value from March to May during the increasing waters. During the peak of waters, the SSSC presented a strong decrease from June to August. In November a second increase of the SSSC appeared systematically during the falling water stage.

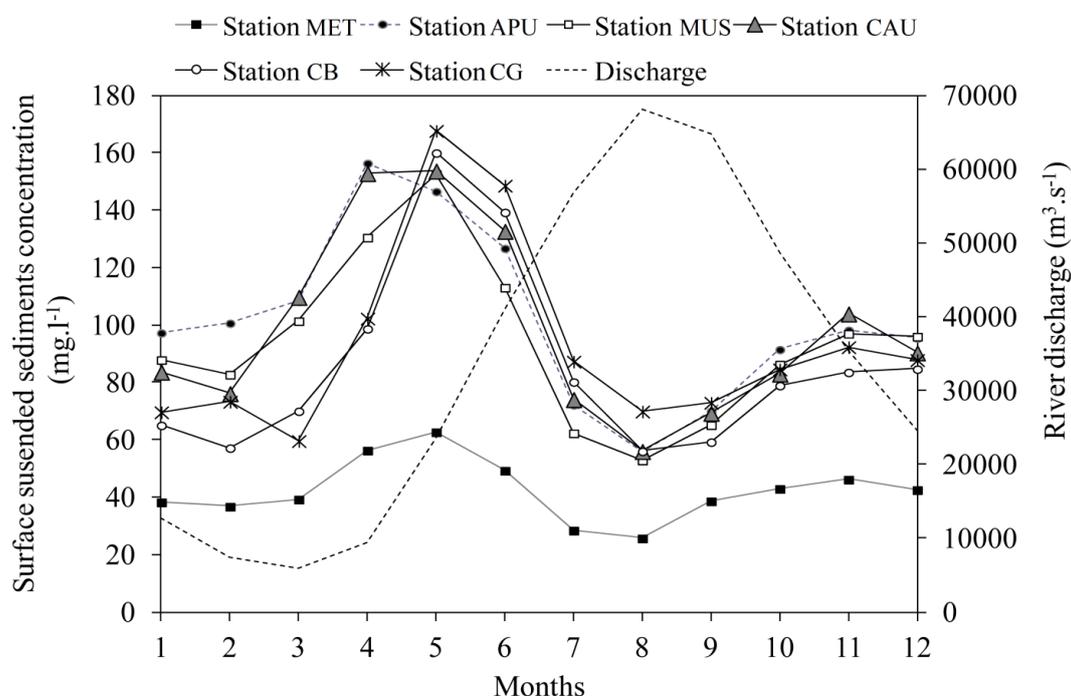


Figure 5. Monthly suspended sediment concentration along the Orinoco mainstream for all the study period (2000-2016) : upstream the Meta River (station MET), the Apure River (station APU), the Caura River (station CAU), at Musinacio (station MUS), Ciudad Bolivar (station CB) and Ciudad Guayana (station CG). The grey line present the water discharge.

Figure 6 display the hysteresis between the SSSC and the Orinoco River discharge from 2001 to 2016 measured at Ciudad Bolivar. We combined the SSSC from MODIS 8-day composite ($n = 581$) and from field SSSC ($n = 303$) to calculate the average monthly estimates for the period 2001-2016. The concentration peak occurred twice a year, between 20000 and 40000 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ before and after the annual peak flood. Accordingly, the minimum SSSC values

appeared twice each year for water discharge between 60000 and 80000 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (flood maximum event) and under 10000 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (low water stage). The monthly SSSC with both datasets were highly variable from 13 to 219 mg.l^{-1} . Three dates presented very high concentration at the beginning of the rising waters (April 2003, 2014 and 2016). Nevertheless, the retrieved pattern was relatively stable from year to year.

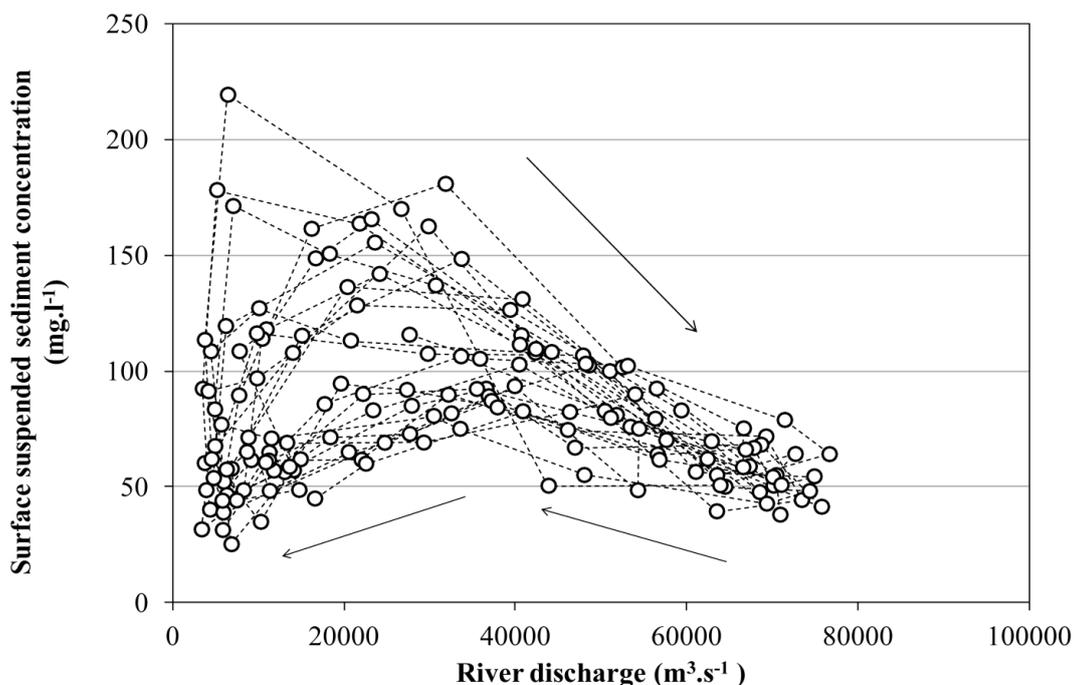


Figure 6. Monthly surface suspended sediment concentration at Ciudad Bolivar as a function of the Orinoco River discharge. Monthly SSSC measurements are a combination from MODIS 8-day SSSC and ground SSSC mostly collected every 10 days by the HYBAM program since 2005.

Satellite derived monthly average SSSC

Figure 7-7 show the variation all along the Orinoco River from the station MET to the station CG for 3 hydrological periods : low waters, rising waters and decreasing waters. The distance were calculated from the most upstream station (MET: 695 km) to the most downstream station (CG: 0 km). The SSSC exhibited increasing trends from MET to CG in all of the periods.

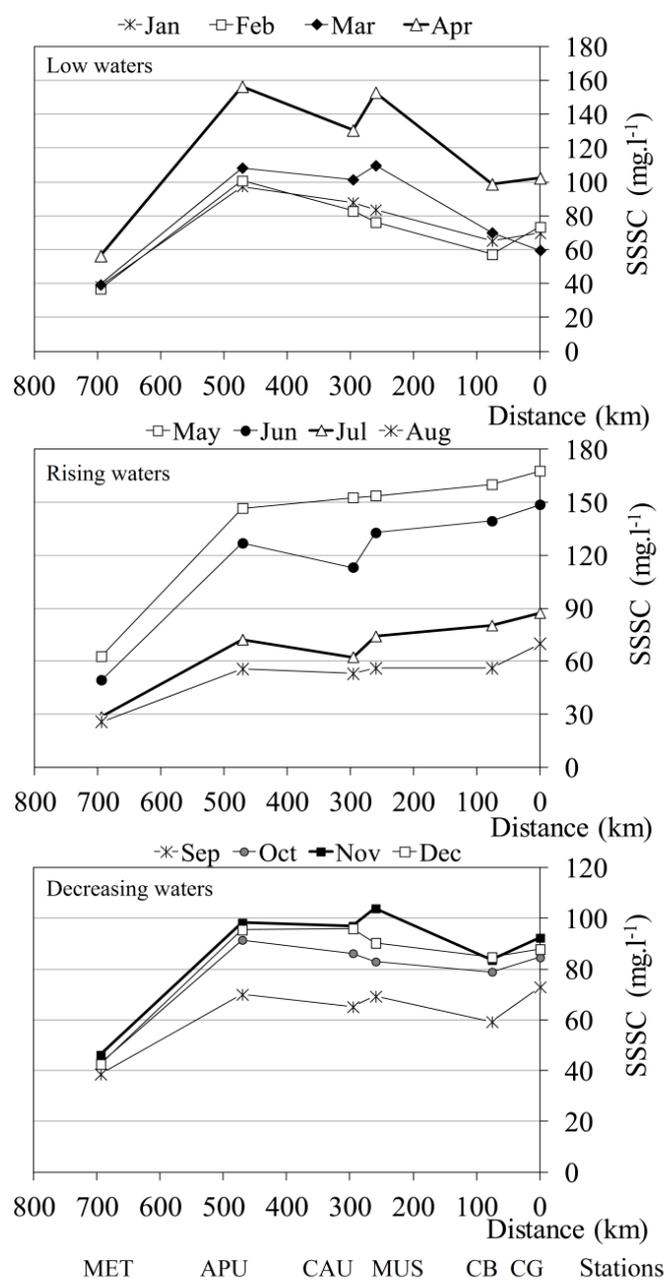


Figure 7. The satellite-derived monthly average SSSC assessed along a 695 km transect along the Orinoco River from MET station downstream to CG Station (set to 0 km). The data are presented for 3 hydrological periods: a) low waters (January to April); b) rising waters (May to August); and c) decreasing waters (September to December). The monthly average were computed over the 2000-2016 period.

During all seasons, the highest mean relative increase was detected between MET and APU stations (mean increase of 139 % varying from 81% in September to 178% in April).

During the low waters from January to April, the overall SSSC level is lower (mean SSSC of 42,70 mg.l⁻¹) at MET station. A consistent increasing trend was observed (mean

relative difference of 170%) between MET and APU stations. From the APU to the CB stations, we observed a slight decrease (mean relative difference of -23%, maximum of -76% in February). A second sharp increase was observed in March and April from the stations CAU to MUS (from 8 to 17%). The SSSC decreased from the MUS to CB stations (maximum of -83% in March). 5) Between the CB and CG stations the mean SSSC trend is slightly higher at CG for almost all month (mean increase of 6%) excepted for March (SSSC decrease of -15%).

During the rising waters from May to August, the overall SSSC level is higher with an increasing trend from upstream to downstream. A regular increase was observed along the Orinoco River, from the MET to the CG stations. The highest relative difference occur in May and June (of 201% and 207% respectively) during the first SSSC peak event. The relative difference in May and August are lower and over 167 and 172%. From the CAU to the MUS station a second sharp increase is observed of 17% and 19% in June and July.

During the decreasing waters (September to December), the concentration increase for all months from the MET to APU stations (relative difference of 81% in September to 124% in December). We noted also a slight SSSC decrease from the APU to the CB stations (-17% in September to -11% in December) and a slight increase from the CG to the CB stations (mean increase of 11%).

5.26.3 Suspended Sediment loads

Instantaneous average suspended sediment loads estimates

We measured the instantaneous average monthly suspended sediment load (in $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) estimated with satellite data and ground data and computed over the 2001-2016 period. **Figure 8** compare for satellite and ground data, the load estimated with one data (randomly selected in the month) and with several datas (between 2 and 4 in a month). All instantaneous data were corrected before with the ASS. Lowest and highest loads were of 224 and 6521 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ (in February and June) and estimated with one data and for the ground dataset. In comparison, for the satellite datas, lowest and highest loads were also found for one data (419 and 5621 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$).

Firstly, we noted that we can use both datasets to complement each other's, in the aim to decrease the error and calculate the annual load. Indeed, for the ground datas (**Figure 8 A**) 58% of the load were transported during the rising waters (from April to August), whereas 39% were conveyed during decreasing waters (from September to December) and only 4% during the low

waters (from January to March). Similar values were estimated (**Figure 8 B**) with satellite datas (57%, 37% and 5% respectively).

Secondly, we showed that the number of datas used to estimate the load influence on the final estimate load and for both datasets. Use several datas increase the monthly load for the ground dataset (average of +6%) with a maximum in April (+39%) and a minimum in March (+3%) but also decrease him (maximum of -17% in June). In contrast, use several datas decrease the loads estimated with satellite datas (average of -5%) with a maximum in July (-17%) and a minimum in May (-4%).

Furthermore, as for the water discharge, the sediment load temporal variability present a large ratio. For the load estimated with several datas, the ratio between the maximum and the minimum values was of 21 for ground datas (5836 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ and 278 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ respectively) and of 12 for satellite datas (5092 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ and 439 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ respectively).

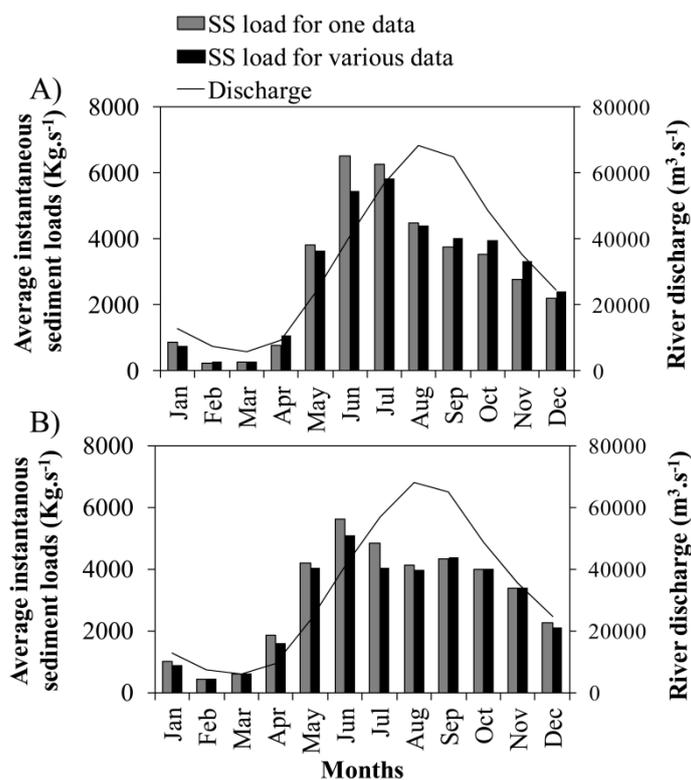


Figure 8. Monthly average of sediment loads estimated with one and various SSC data estimated from : A) ground data, B) MODIS 8-day composite. The black line present the daily water discharge values at the hydrological station of Ciudad Bolivar.

Monthly suspended sediment loads estimates

Figure 9 compares the monthly average river sediment discharge assessed from satellite data and from ground data with a minimum of 2 values in a month and over the 2007-

2013 period at CB station . We observe that : 1) for the 6 years, the average relative error between the monthly satellite-derived and ground-derived sediment discharge estimates is of 25% (mean relative error of $69 \times 10^3 \text{ t.months}^{-1}$), the satellite data underestimating the results assessed from field data; 2) the lowest mean relative difference were noted during high waters with 10% (from June to August) and during decreasing water levels with 3% (from September to January), whereas the highest mean relative errors were estimated during the low and rising waters from February to May (76%).

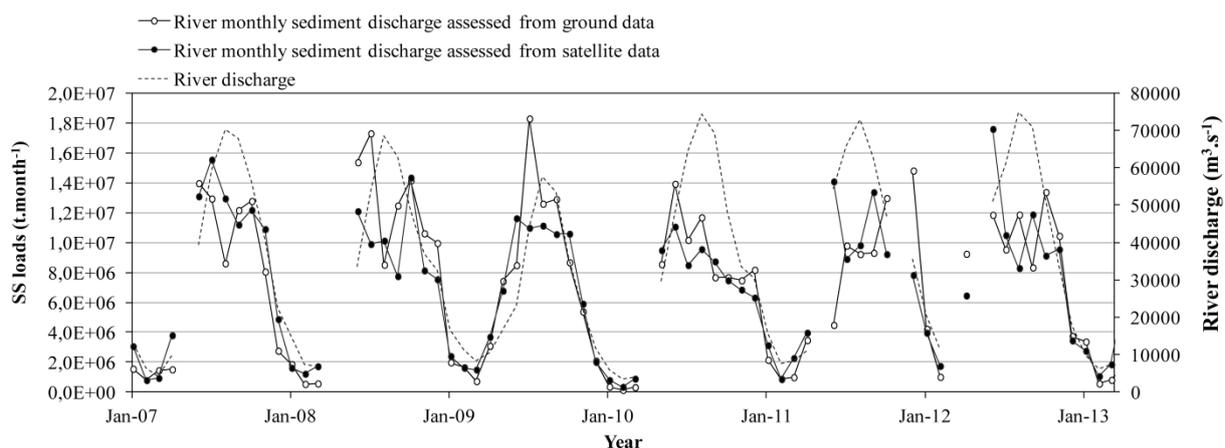


Figure 9. Comparison of the monthly average river load with suspended sediment concentration derived from field measurements and MODIS images for the 2007-2013 period.

Annual suspended sediment load estimates

We estimated similar annual mean relative difference of - 3% ($3.3 \times 10^6 \text{ t.yr}^{-1}$) between MODIS and Field estimates. We combined both satellite and field datasets to complete the SSSC time series from which we computed the annual sediment discharge from 2001 to 2016 (**Figure 9**). The annual river sediment discharge ranged from 75 Mt to 103 Mt (mean value of 89 Mt). The annual sediment yield ranged from 91 to 125 $\text{t.km}^{-2}\text{yr}^{-1}$, with a mean value of 109 $\text{t.km}^{-2}\text{yr}^{-1}$. The average river discharge ranged from 25,695 to 38,695 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ for a mean runoff estimate varying between 31 and 47 $\text{l.s}^{-1}\text{km}^{-2}\text{yr}^{-1}$ (**Table S1**).

Figure 10 A displays the time series of sediment yield and river runoff of the Orinoco River at Ciudad Bolivar Station assessed since 2001. The double mass plot (**Figure 10 B**), a tool frequently used to identify changes in the sediment response to the river (Walling and B.W., 1996; Walling, 2006), suggests that the runoff and the sediments have responded to similar controls, as a response to climate change and human impact.

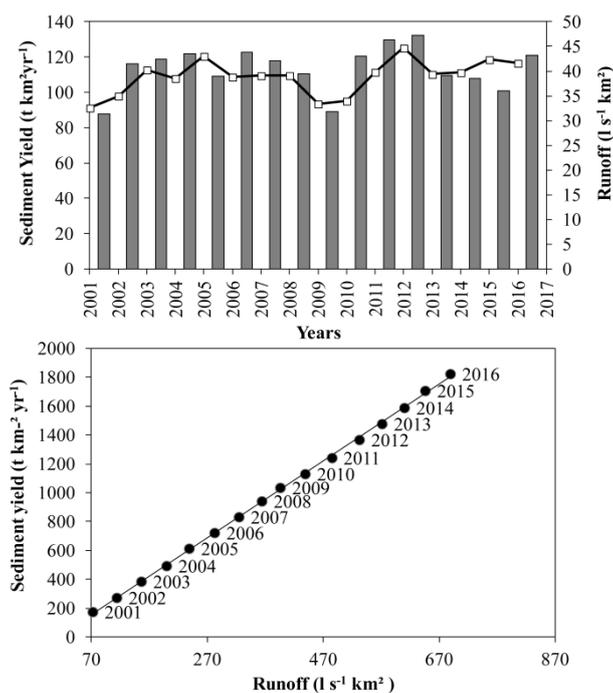


Figure 10. Recent trends of (a) suspended sediment yield (black line) and annual runoff (grey bars), (b) cumulative data for the complete years of runoff and sediment yield from 2000 to 2015 at Ciudad Bolivar.

5.27 Discussion

5.27.1 Contribution of main tributaries and general sedimentary trend along the Orinoco River

Our results are consistent with previous studies showing that the distribution of sediment concentrations in the Orinoco is mainly derived by the Meta and Apure rivers (Lewis and Saunders, 1989; Laraque *et al.*, 2013b; Mora *et al.*, 2014). In this study, the sediment concentration with MODIS estimations (range of : $11-272 mg.l^{-1}$) was lowest at the MET station (11 to $114 mg.l^{-1}$) and highest at the CAU station (35 to $290 mg.l^{-1}$). MUS and APU stations had similar concentrations (28 to $272 mg.l^{-1}$) as CB and CG downstream stations ($13-247 mg.l^{-1}$). Our MODIS monthly average estimated are much lower than field measurements reported by Lewis and Saunders (1989) between the Meta and the Apure rivers of $200-700 mg.l^{-1}$ and slightly lower than the measurements estimated by Mora *et al.* (2014) and Laraque *et al.* (2013b) that reported a range of $12-291 mg.l^{-1}$. The same authors assessed SSSC varying between 42 and $252 mg.l^{-1}$ (2007-2008) at the APU station, from 37 to $291 mg.l^{-1}$ at the CAU station, from 12 to $222 mg.l^{-1}$ at CB station and from 12 to $206 mg.l^{-1}$ at CG station.

Furthermore, [Laraque *et al.* \(2013b\)](#) reported SSSC between 3 and 206 mg.l⁻¹ (2005-2010) at the middle of the cross-section of CB and CG stations. Finally, according to [Lewis and Saunders \(1989\)](#) the lowest sediment concentrations upstream of the Meta River is due to the inputs of 1) black waters from the Upper Orinoco in the right bank, which present very low suspended sediment concentrations from 5 to 15 mg.l⁻¹ ([Lewis *et al.*, 1987](#)) and 2) clear waters of the Guaviare and Vichada rivers in the left bank, which drain the Andes and mix uniformly across the Orinoco channel ([Meade, 1994](#)).

Spatial and temporal trends in suspended sediment distribution were observed with satellite data including : 1) A consistent increase of SSSC from the MET to the APU stations during all the hydrological periods reflecting the sediment inputs of the Meta Rivers, as well as from CAU to MUS stations resulting of an homogenization of SSSC of the Apure River at Musinacio. because of the contraction of the wide of the section which reduced from 5 km to 1,3 km in a short time (25 km). [Meade *et al.* \(1983\)](#) suggested that the highest cross-channel difference in SSSC occurred above the confluence with the black waters of the Caura River that was completely homogenized 565 km downstream at CB.

2) A consistent decrease of SSSC from the APU to CB station during the low waters and at the beginning of the rising waters and a slight decrease during the high waters and the beginning of the decreasing waters. According to ([Meade *et al.*, 1983](#)), suspended sediments decrease during rising waters because of the extension of water in the channel and the transport of sediments throughout the floodplains. During decreasing waters the sediments are accumulated in the bed river and in the different functional units of the floodplain (for example the lakes or the flooded savannah). Indeed, the Orinoco has extensive floodplains from the delta to the Meta River (6940 km²) ([Lewis and Saunders, 1989](#)) suggesting that suspended sediments between the Meta River and Ciudad Guayana have a maximum opportunity to decrease. Also, they assumed that 50% of the load from the Meta River is deposited before the Apure River ([Lewis *et al.*, 1990](#)).

5.27.2 Two peaks of SSSC along the Orinoco River

Two SSSC peaks were observed from satellite data and ground data. During rising water, the first SSSC peak was attributed to the remobilization of sediments in the river channel and sheet erosion on hill slopes during the first rain events ([Lewis and Saunders III, 1984](#); [Meade *et al.*, 1990](#); [Paolini, 1995](#); [Mora *et al.*, 2010b](#); [Laraque *et al.*, 2013b](#)). The second peak during decreasing waters was explained by the backwater exerted by the Orinoco, particularly at the

confluences of the left-bank tributaries coming from the Andes. This effect causes deposition of sediments before entering the Orinoco river (Laraque *et al.*, 2013b). When the flow velocity of these tributaries increase thanks to the decreasing discharge in the mainstream, the sediments trapped in the left-bank channels and floodplains are flushed to the Orinoco River (Pérez Hernández and López, 1998; Rosales *et al.*, 2007; Rosales *et al.*, 2008). During the high waters, the lack of suspended sediment is mostly explained by the depletion of easily transportable sediments (Lewis and Saunders, 1989; Paolini, 1995; Laraque *et al.*, 2013b).

5.27.3 Comparison between remote-sensing and ground monitoring

We made used remote sensing MODIS sensors which are operating since 2000. Our results confirm that the MODIS time series facilitate the long-term monitoring of river sediment discharge in large basins as proposed by Martinez *et al.* (2009) and Espinoza *et al.* (2012).

SSSC was assessed in the Orinoco River main stream with 32% relative error between field-derived and satellite-derived SSSC estimates. Other studies using MODIS data to assess SSSC in rivers reported mean relative errors between 18 and 36% for similar concentrations in the Amazon basin near the confluence of the Marañon and Ucayali rivers in Peru (Espinoza Villar *et al.*, 2012a) and at Óbidos station in Brazil (Martinez *et al.*, 2009). Park and Latrubesse (2014) also made used of MODIS data to map SSSC along a long stretch of the Amazon River. More recently, Yepez *et al.* (in revision) made use of Landsat-8 images to map SSSC near CB station, reaching a RMSE of 9.63% when comparing satellite-derived and field-derived assessments.

In the Amazon River, Martinez *et al.* (2009) estimated a relative difference between satellite-derived and field-derived river sediment discharge of -3% ($788 \times 10^6 \text{ t.yr}^{-1}$ with field measurements and $811 \times 10^6 \text{ t.yr}^{-1}$ using satellite images). In our work, from 2001 to 2016, we assessed the same range of difference with an annual mean relative difference of - 4% ($3.7 \times 10^6 \text{ t.yr}^{-1}$) between MODIS and field estimates. However, when comparing monthly estimates stronger differences were found from 1% to 76%. In this work field derived and satellite derived have been used to achieve a complete time series for continuous river sediment discharge monitoring. Indeed, conventional monitoring can have failures including the change of the sampling method or the loss of samples.

5.27.4 Regular sedimentary loads, yields and runoff at Ciudad Bolivar

The annual sediments loads estimated at Ciudad Bolivar varied from 75 to 103 Mt yr⁻¹ from 2001 to 2016, with a mean value of 89 Mt yr⁻¹. These values are low compared with other tropical rivers such as the Amazon (1000 Mt yr⁻¹), Brahmaputra (520 Mt yr⁻¹), Ganges (524 Mt yr⁻¹) and Irrawady (260 Mt yr⁻¹) (Latrubesse *et al.*, 2005). The range is similar to those reported by several authors for the Orinoco River (Paolini *et al.*, 1987; Lewis and Saunders, 1989; Laraque *et al.*, 2013b) but differs from other reports (Nordin and Pérez-Hernández, 1989; Meade *et al.*, 1990; Millan and Lopez, 2001). Laraque *et al.* (2013b) calculated a mean material flux of sediments slightly lower of 74 Mt yr⁻¹, using HYBAM 10 days SSSC data, for the 2007-2010 period, downstream of an important tectonic bedrock control. Lewis and Saunders (1989) reported a sediment discharge of 90 Mt yr⁻¹ using depth-integrated samples collected each two weeks in 1982-1983 and each month in 1984 and 1985 near Barrancas as well as at Ciudad Bolivar and Ciudad Guayana. Paolini *et al.* (1987) calculated a sediment discharge of 95 Mt yr⁻¹ at Ciudad Bolivar under the suspension bridge at Angostura from samples collected in 1983 and 1984. On the other hand, Meade *et al.* (1994) calculated 150 Mt yr⁻¹ based on fully depth-integrated and discharge-weighted sampling at Musinacio and using data from (Nordin *et al.*, 1983) collected only one month (in the period August 15-23, 1982).

The long-term study carried out in this paper at CB station showed that the assessment of sediment fluxes depends on (i) the quantity of measurements of water discharge and suspended sediments as suggested by Meade *et al.* (1990) and especially during the increasing and high water stages; (ii) the SSSC variability at both river surface and in the water column (Lewis and Saunders, 1989); Nevertheless, more field campaigns have to be realized across the whole river reach during all periods of the hydrological waters to assess sediment discharge in other reaches of the river. Finally, the procedure employed to calculate the suspended sediment load may bring different results as suggested by Laraque *et al.* (2013b). In particular, as there is no single relationship between the SSSC and the river discharge, the sediment load cannot be assessed directly from the water discharge.

The sediment yield varied from 91 to 125 t.km²yr⁻¹ for runoff between 31 and 47 l.s⁻¹km²yr⁻¹. Our mean estimations of 109 t.km²yr⁻¹ and 41 l.s⁻¹km²yr⁻¹ are higher than those calculated by Laraque *et al.* (2013b) of 89 t.km²yr⁻¹ and 37.6 l.s⁻¹km²yr⁻¹. These differences may roots in the different period of observations used for calculation. The double mass plot, which is frequently used to identify changes in the sediment response of a river (Walling, 2006), revealed a regular trend, suggesting that there has been no important change in land use or

climate in the catchment in the last decade. Indeed, Walling *et al.* (2006) and Milliman *et al.* (2008) have shown that increasing human activities or a change in climate commonly impacts the sediments loads and the water discharge. Change in river sediment discharge have been observed in major rivers of the world, such as in South America, where significant changes have been observed in the Amazon River at Óbidos Station (Martinez *et al.*, 2009), the Sao Francisco River in Brazil (Milliman *et al.*, 2008), the Magdalena River in Columbia (Restrepo and Kjerfve, 2000) and the Maroni River in French Guiana (Gallay *et al.*, submitted).

5.28 Conclusion

This study contributed to the analysis of the erosion processes in the Orinoco basin. The relationship between the MODIS 8-day composite reflectance and the HYBAM SSSC measurements was investigated to assess the SSSC over a large part of the course of the Orinoco River from the Middle to the Lower channel and to calculate the sediment discharge at the main gauging station Ciudad Bolivar. The times series were processed at six different stations. The study demonstrated a fine agreement between the annual river sediment discharge assessed from MODIS data and conventional sampling. The results showed a general increasing trend in SSSC from the most upper to the most lower station with however spatial and temporal variations detected from one place to another. Furthermore, we observed that 1) there is not a single simple relationship between the SSSC and the discharge along the Orinoco River; 2) there is a good relationship between the SSSC and the average suspended sediment concentrations at CB station. Finally, the water and suspended sediment discharge showed any changes over the period of study suggesting limited impact of human activities and climate change in the hydrosedimentary cycles at the basin scale.

5.29 Acknowledgements

This work was supported by cooperation projects between Venezuela, France and French Guiana. The SNO-Hybam monitoring project (www.so-hybam.org) and the Ecos-NORD/Fonacit (V14U01) project supported the various field trip and collection of in-situ SSC data and laboratory analysis within the Orinoco River. Mrs Marjorie Gallay's PhD thesis is funded through Office de l'Eau, Shell company and French Guiana Region IRD. We wish to thank all Venezuelan and French participants of these projects who contributed to this study.

5.30 Supplementary documents

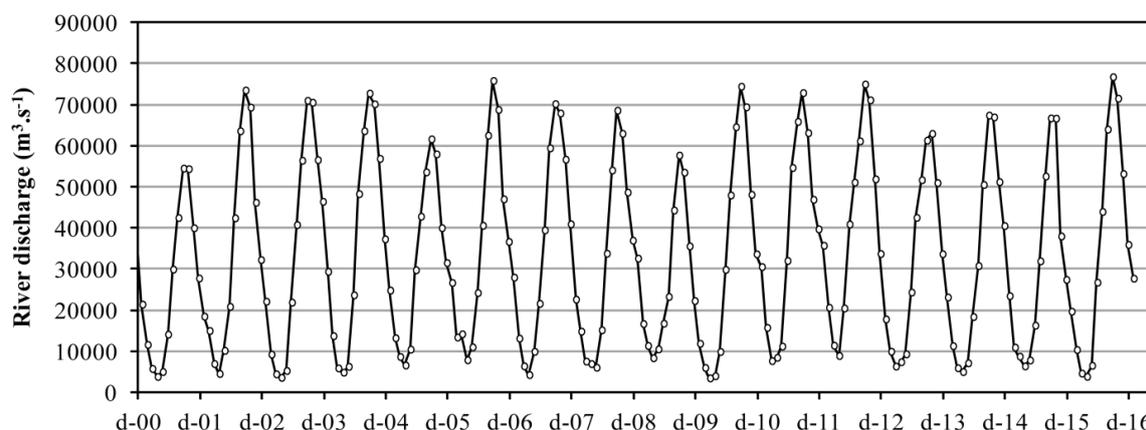


Figure S1: Monthly average river discharge of the Orinoco River at Ciudad Bolivar. Over the period considered in these study (2000 - 2016) the average discharge 33 230 m³.s⁻¹.

Table S1: Data of mean, maximum, minimum and median of surface suspended sediment concentrations (SSSC), suspended sediment loads (S_L), number of samples, suspended sediment yield (S_y), mean, maximum, and minimum of water discharge (Q) and runoff (R) calculated from 2001 to 2015 in the Orinoco River at Ciudad Bolivar (station 4).

Year	SSSC mean (mg l ⁻¹)	SSSC max (mg l ⁻¹)	SSSC min (mg l ⁻¹)	SSSC median (mg l ⁻¹)	Sam ples/ year	S _L (Mt yr ⁻¹)	S _y (t km ⁻² yr ⁻¹)	Q _{mean} (m ³ s ⁻¹)	Q _{max} (m ³ s ⁻¹)	Q _{min} (m ³ s ⁻¹)	R (l s ⁻¹ km ²)
2000							33 415	67 667	4 799	41	
2001	92	189	49	77	27	75	91	25 695	59 527	3 438	31
2002	74	151	22	69	29	80	98	34 002	74 367	3 868	41
2003	87	218	24	76	34	92	113	34 728	74 367	3 287	42
2004	79	224	26	71	42	88	108	35 717	74 208	4 071	44
2005	90	182	15	90	47	98	121	31 980	64 800	5 439	39
2006	91	178	26	83	41	89	109	35 901	77 422	6 521	44
2007	83	193	26	69	68	90	110	34 477	71 527	3 949	42
2008	85	214	20	76	70	90	110	32 378	70 436	4 754	39
2009	96	230	24	83	72	77	94	26 041	59 671	7 419	32
2010	72	215	13	64	68	78	95	35 286	75 807	3 067	43
2011	84	228	20	76	66	91	112	37 957	74 367	6 368	46
2012	85	202	24	78	60	103	125	38 685	77 909	7 805	47
2013	91	276	21	81	62	90	110	32 041	65 850	5 581	39
2014	91	183	13	81	45	91	111	31 632	71 214	4 364	39
2015	97	255	33	84	49	97	119	29 476	71 136	5 725	36
2016	98	275	14	78	47	95	117	35 474	78 398	3 514	43
mean	87	213	23	77	52	89	109	33 228	71 098	4 939	41
max	98	276	49	90	72	103	125	38 685	78 398	7 805	47
min	72	151	13	64	27	75	91	25 695	59 527	3 067	31
Min/Max	0,7	0,5	0,3	0,7	0,4	0,7	0,7	0,7	0,8	0,4	0,7