



Suivi et simulation des flux sédimentaires fluviaux par une approche couplée télédétection « couleur des eaux » et modélisation hydrologique

Jean-Michel Martinez, William Santini et al.,
UMR GET/IRD





Contexte

- Les flux sédimentaires fluviaux sont conventionnellement estimés à partir de relations entre la concentration et le débit ou à partir de prélèvements d'eaux
- La mesure des matières en suspension (MES) est sujette à de nombreuses incertitudes / erreurs liées à la fréquence d'échantillonnage, la méthode de prélèvements et la distribution verticale des particules dans la rivière
- 90 % du flux sédimentaire transportés durant moins de 10 % du temps
- Objectif : Développer les techniques de couleur de l'eau pour le suivi des flux sédimentaires fluviaux et dans les ouvrages hydroélectriques



Approche

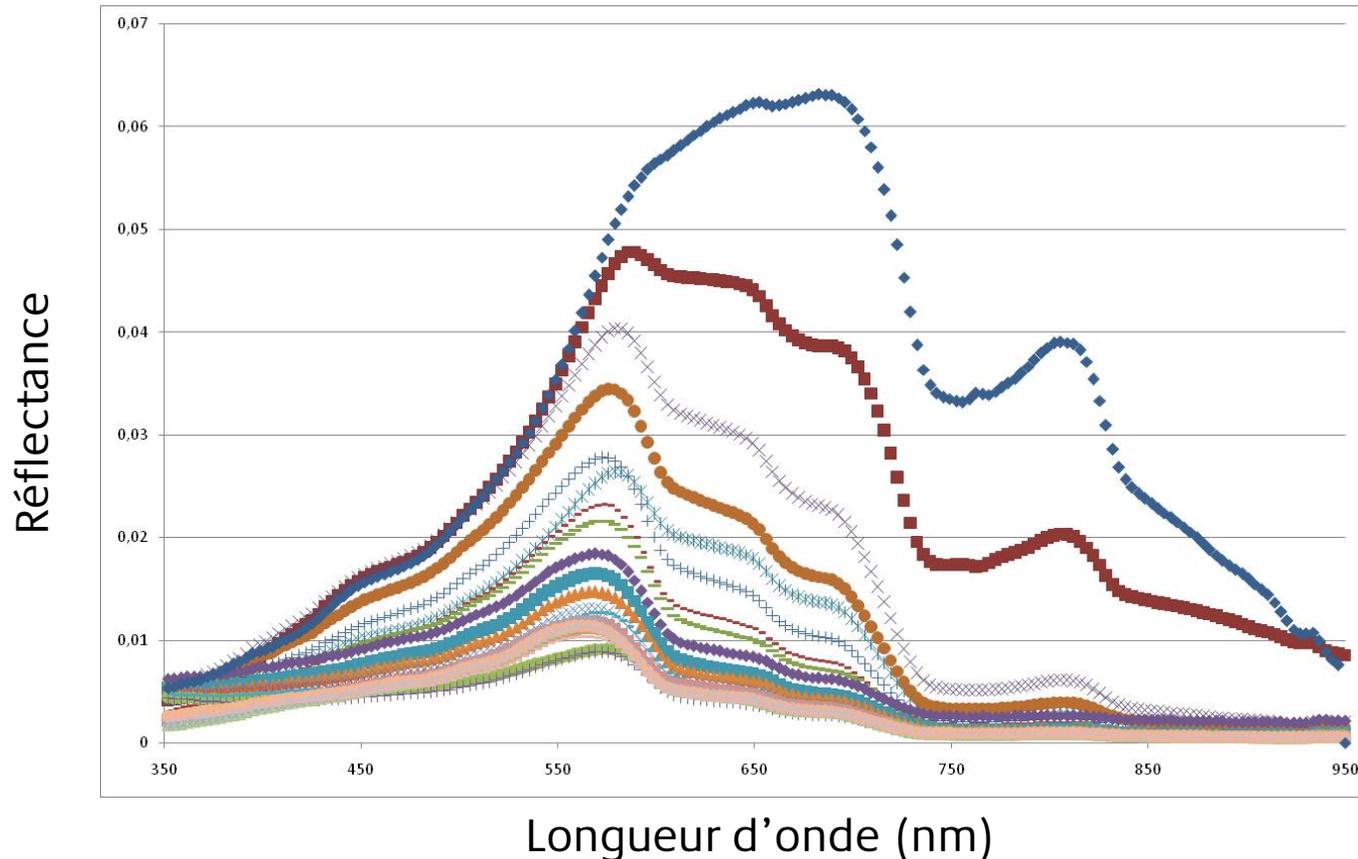
Différents défis & questions à considérer afin de prouver la robustesse de l'approche :

- **1.** La couleur des eaux est-elle un **prédicteur robuste** de la concentration en Matières en Suspension (MES)
 - Échantillonnage terrain intense et modélisation optique
- **2.** Est-il possible **d'exploiter des séries temporelles** satellite pour un suivi quantitatif des flux sédimentaire ?
 - Chaînes de traitement automatiques des images satellites
- **3. Intégrer** les flux sur la colonne d'eau les concentration de particules fines
- **4.** Coupler le suivi satellite avec la **modélisation hydraulique** afin d'estimer le flux total (particules fines + sables)



1. Compréhension des propriétés optiques

Exemples de réflectances hyperspectrales pour différents points au sein d'un lac de barrage suivant un processus de sédimentation (Barrage de Tres Marias, Rio São Francisco) :



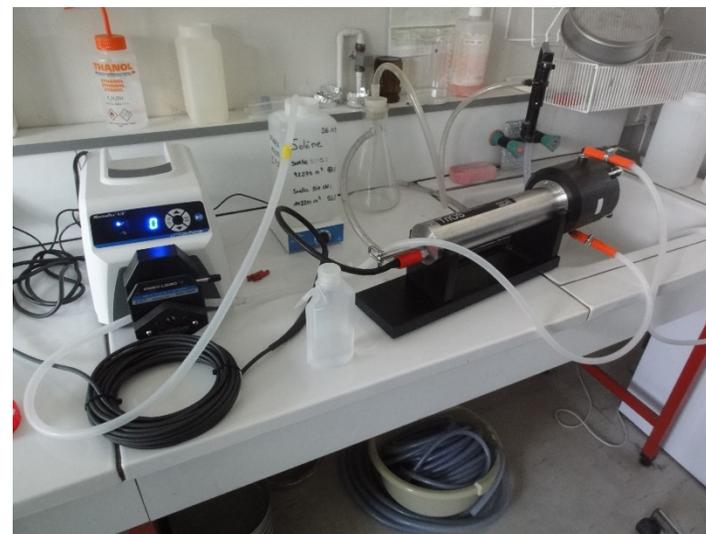


1. Compréhension des propriétés optiques

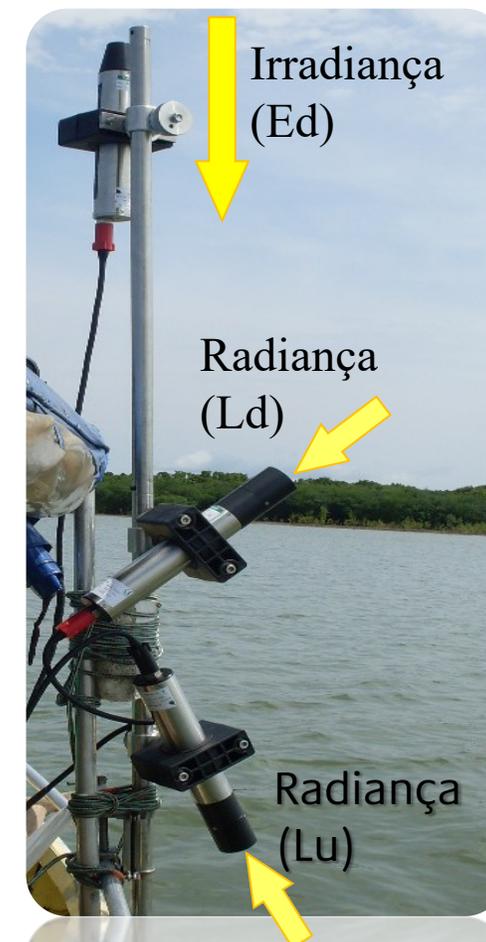
Spectroradiometer



Spectrophotometer



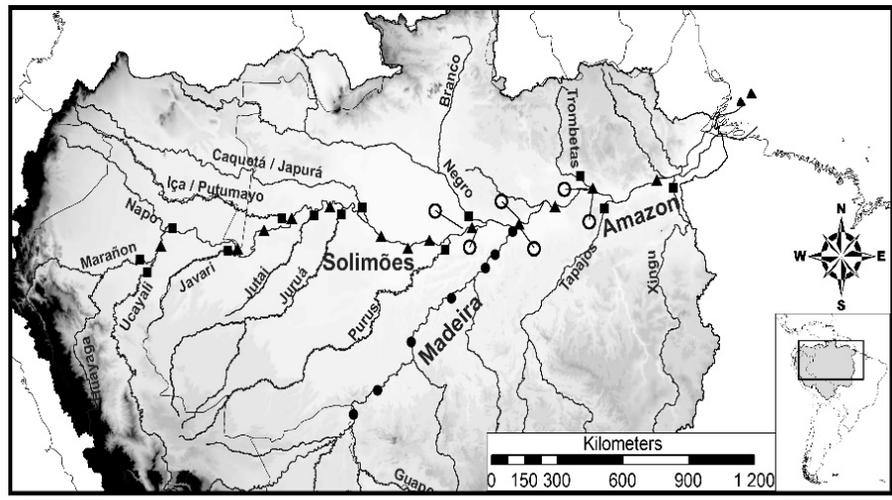
Reflectance meas.



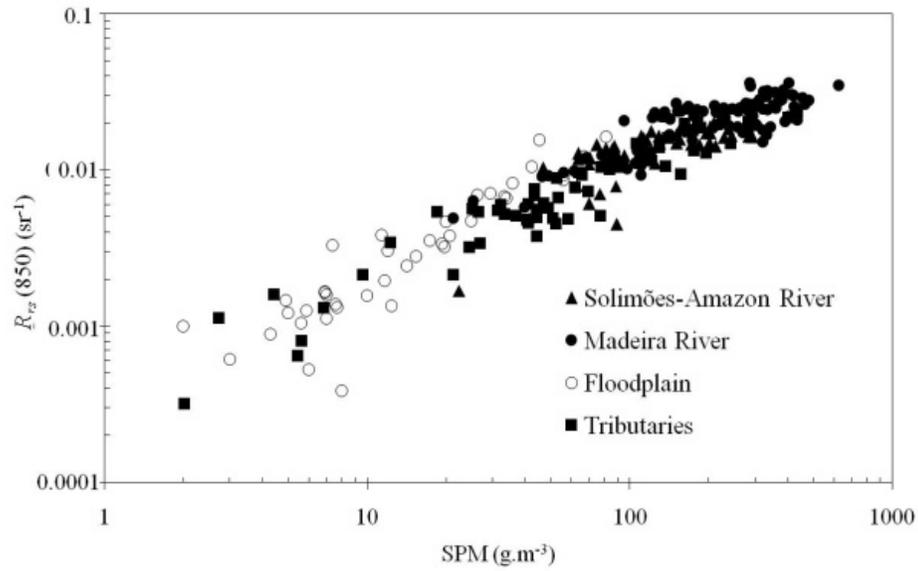
1. Compréhension des propriétés optiques

Exemple sur l'Amazon : 16 campagnes de mesures radiométriques afin d'enregistrer la variabilité des propriétés optiques des eaux et des particules sédimentaires

- Une relation unique entre concentration en matières en suspension et indice radiométrique rouge / infrarouge



▲ Solimões - Amazon Rivers ● Madeira River ■ Tributaries ○ Floodplain lakes



$r^2 = 0.81$ $N = 279$



Journal of Geophysical Research: Earth Surface

RESEARCH ARTICLE
 10.1002/2014JF003404

The optical properties of river and floodplain waters in the Amazon River Basin: Implications for satellite-based measurements of suspended particulate matter

Jean-Michel Martinez^{1,2}, Raul Espinoza-Villar^{1,2}, Elisa Armijos³, and Luciane Silva Moreira⁴

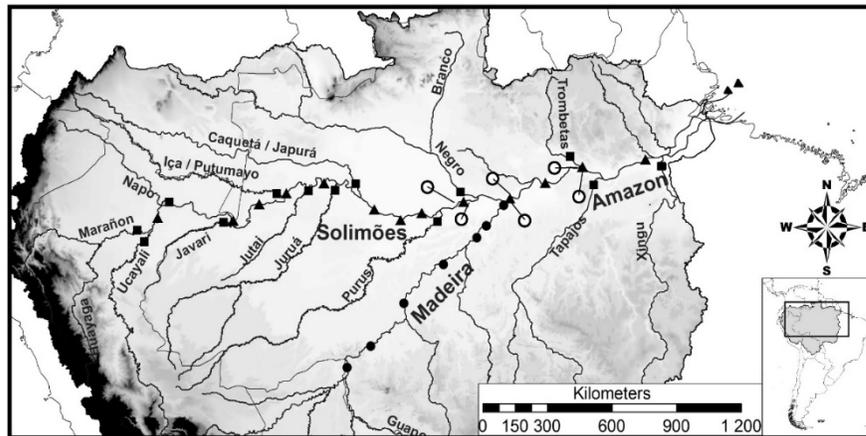
Key Points:

- Water optical properties and characteristics were assessed in the Amazon Basin
- CDOM absorption and SPM show reduced variability (size and type) at

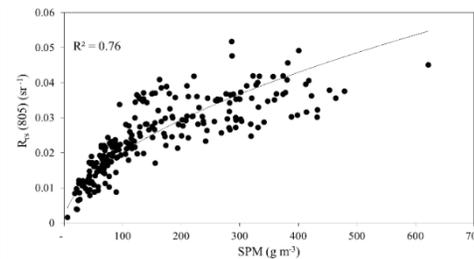
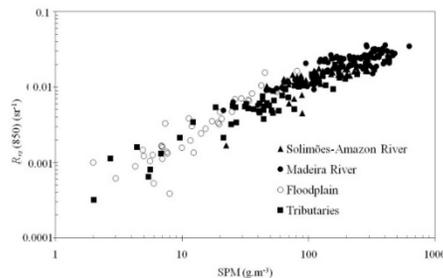


1. Compréhension des propriétés optiques

Une forte variabilité a été détectée sur un affluent principal : le Rio Madeira



▲ Solimões - Amazon Rivers ● Madeira River ■ Tributaries ○ Floodplain lakes

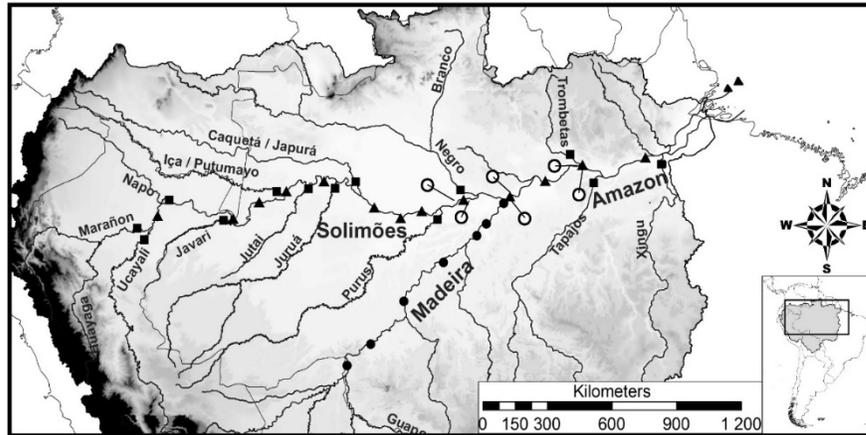


Rrs(850) vs Conc. MES

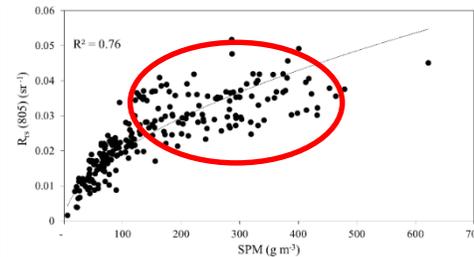
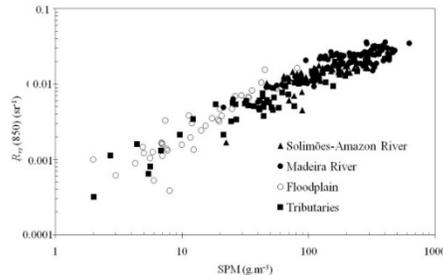


1. Compréhension des propriétés optiques

Une forte variabilité a été détectée sur un affluent principal : le Rio Madeira



▲ Solimões - Amazon Rivers ● Madeira River ■ Tributaries ○ Floodplain lakes

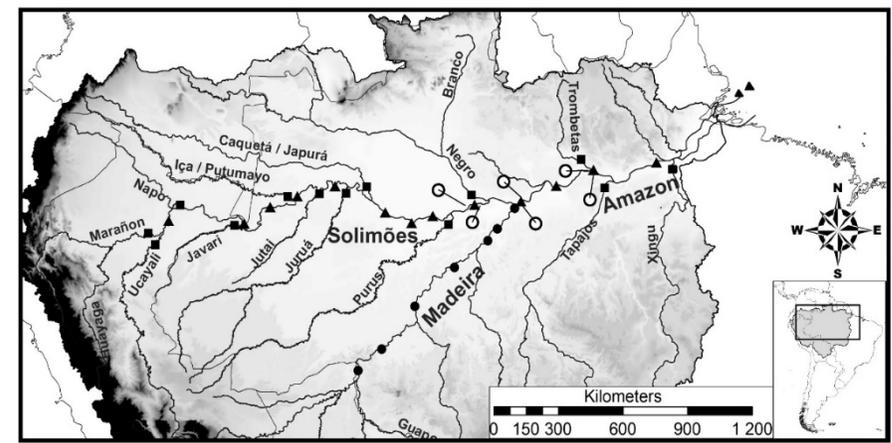


Rrs(850) vs Conc. MES

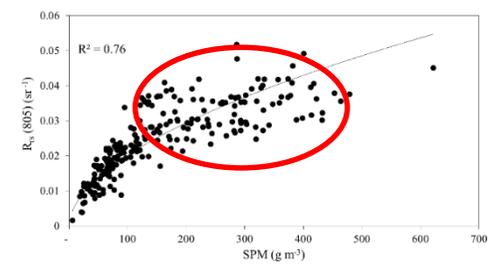
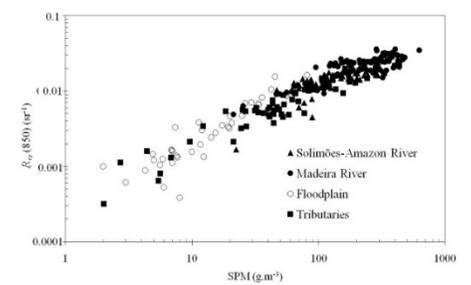


1. Compréhension des propriétés optiques

Une forte variabilité a été détectée sur un affluent principal : le Rio Madeira

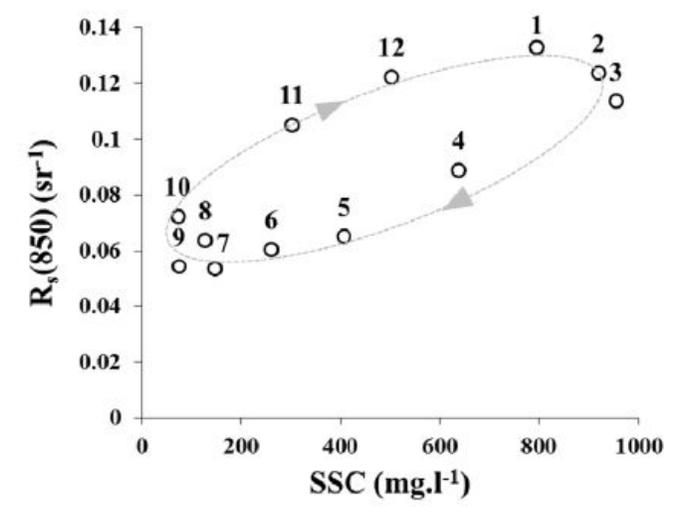


▲ Solimões - Amazon Rivers ● Madeira River ■ Tributaries ○ Floodplain lakes



Rrs(850) vs Conc. MES

Seasonal hysteretic process Rrs vs MES (Espinoza et al. 2013)

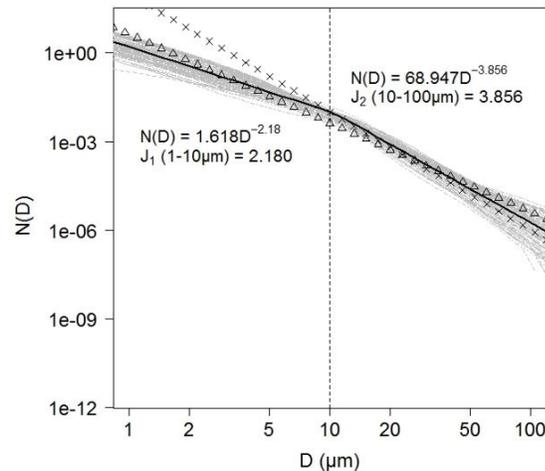




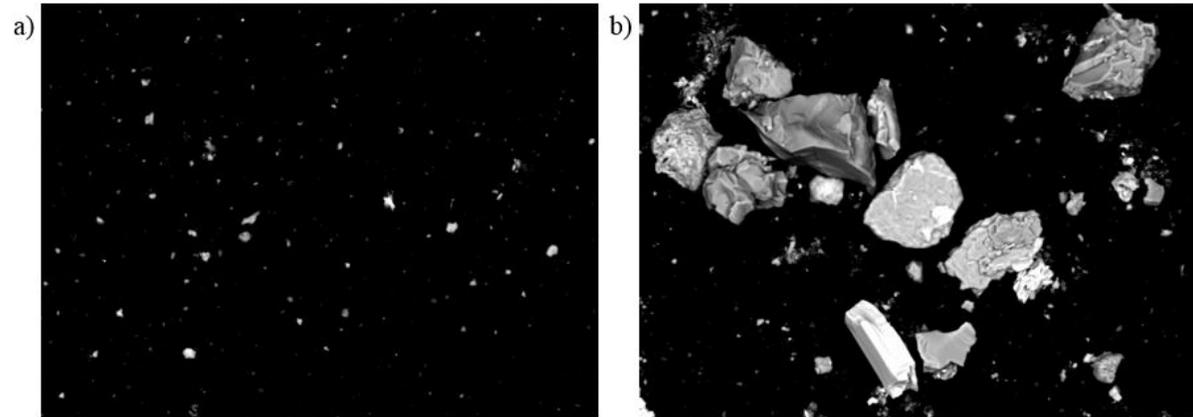
1. Compréhension des propriétés optiques

La modélisation optique (théorie de Mie) a été utilisée pour comprendre la variabilité des propriétés optiques en fonction des caractéristiques physiques des particules (thèse S. Pinet 2014-2016)

- Il est démontré que les particules fines (argiles, silts) contribuent majoritairement à la réponse optique



Distribution en taille des particules en surface
du Rio Madeira (Pinet et al. 2017)



Minéralogie déterminée par microscopie électronique (Pinet, et al. 2019)

Variability of apparent and inherent optical
properties of sediment-laden waters in large river
basins – lessons from in situ measurements and
bio-optical modeling

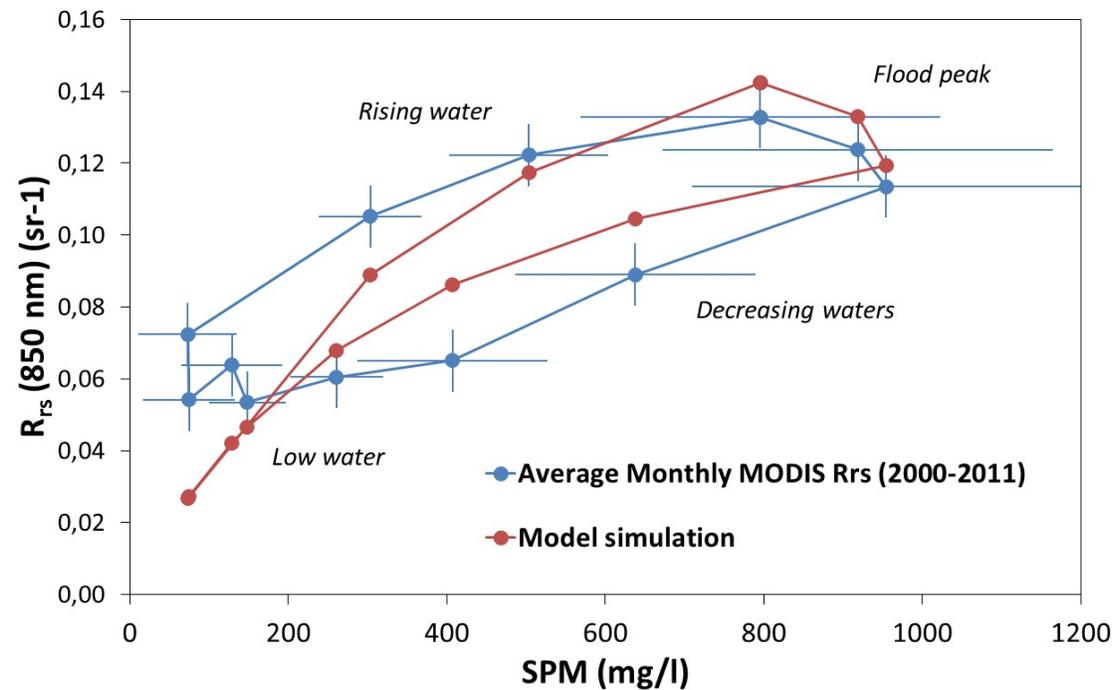
Sylvain Pinet, Jean-Michel Martinez, Sylvain Oullon, Bruno Lartiges, and Raul Espinoza Villar





1. Compréhension des propriétés optiques

Dans le Rio Madeira, le matériel en suspension fin montre une variation saisonnière avec une taille plus fine en début de crue (D50 variant de 8 à 5 micromètre) impactant principalement l'absorption de la lumière dans le rouge et l'infrarouge



Variability of apparent and inherent optical properties of sediment-laden waters in large river basins – lessons from in situ measurements and bio-optical modeling

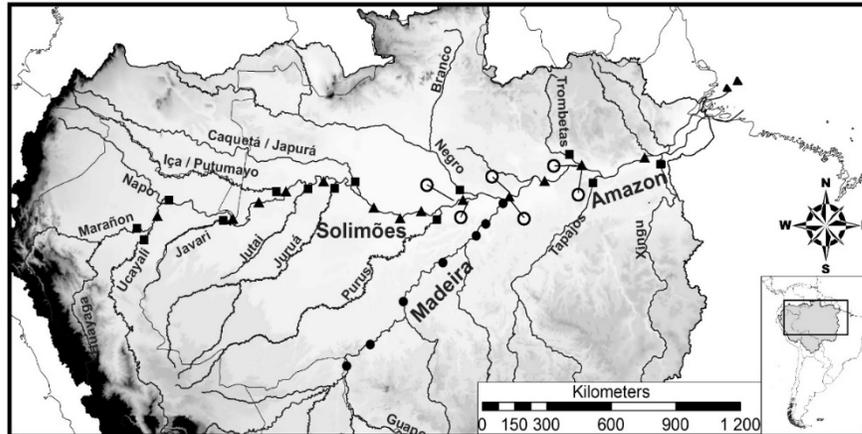
Sylvain Pinet, Jean-Michel Martinez, Sylvain Ouilon, Bruno Lartiges, and Raul Espinoza Villar



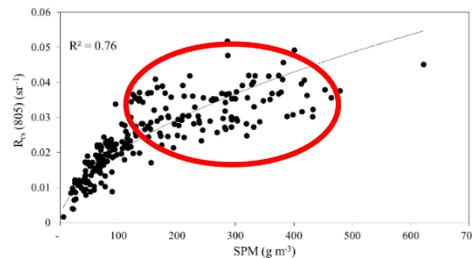


1. Compréhension des propriétés optiques

La variabilité de la réflectance en fonction de la taille des particules peut-être également corrigée efficacement en utilisant l'information spectrale (Espinoza et al. 2013 , Martinez et al 2015, Pinet et al. 2017)



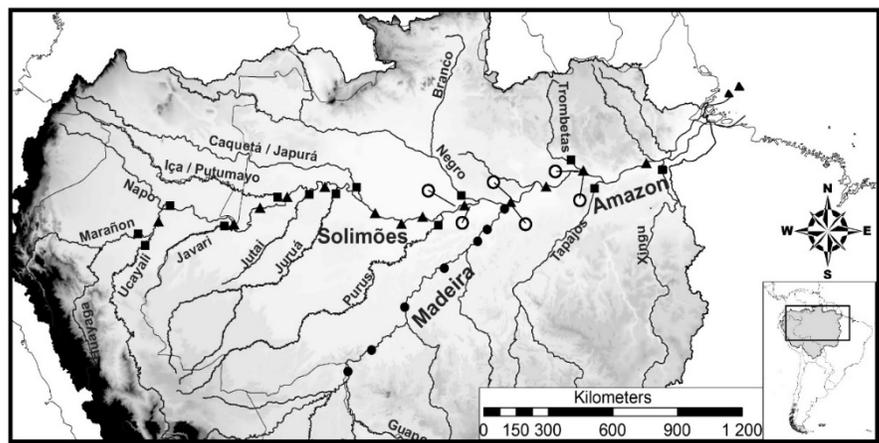
▲ Solimões - Amazon Rivers ● Madeira River ■ Tributaries ○ Floodplain lakes



Rrs(850) vs Conc. SPM

1. Compréhension des propriétés optiques

La variabilité de la réflectance en fonction de la taille des particules peut-être également corrigée efficacement en utilisant l'information spectrale (Espinoza et al. 2013 , Martinez et al 2015, Pinet et al. 2017)



▲ Solimões - Amazon Rivers ● Madeira River ■ Tributaries ○ Floodplain lakes

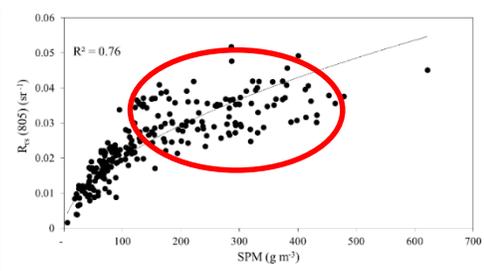
Journal of Geophysical Research: Earth Surface
 RESEARCH ARTICLE
 10.1002/2014JF003404

The optical properties of river and floodplain waters in the Amazon River Basin: Implications for satellite-based measurements of suspended particulate matter

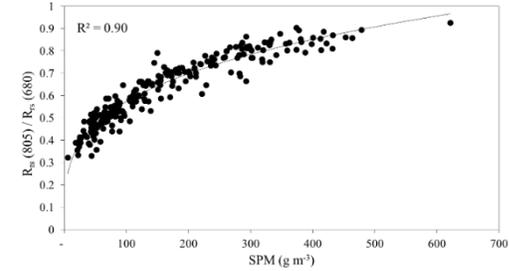
Key Points:

- Water optical properties and characteristics were assessed in the Amazon Basin
- CDOM absorption and SPM show reduced variability (size and type) at

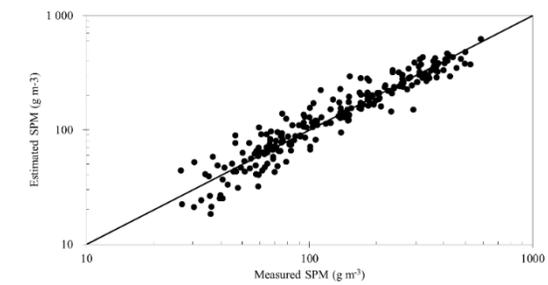
Jean-Michel Martinez^{1,2}, Raul Espinoza-Villar^{1,2}, Elisa Armijos³, and Luciane Silva Moreira⁴



Rrs(850) vs Conc. SPM



Rrs(850)/Rrs(665) vs Conc. SPM

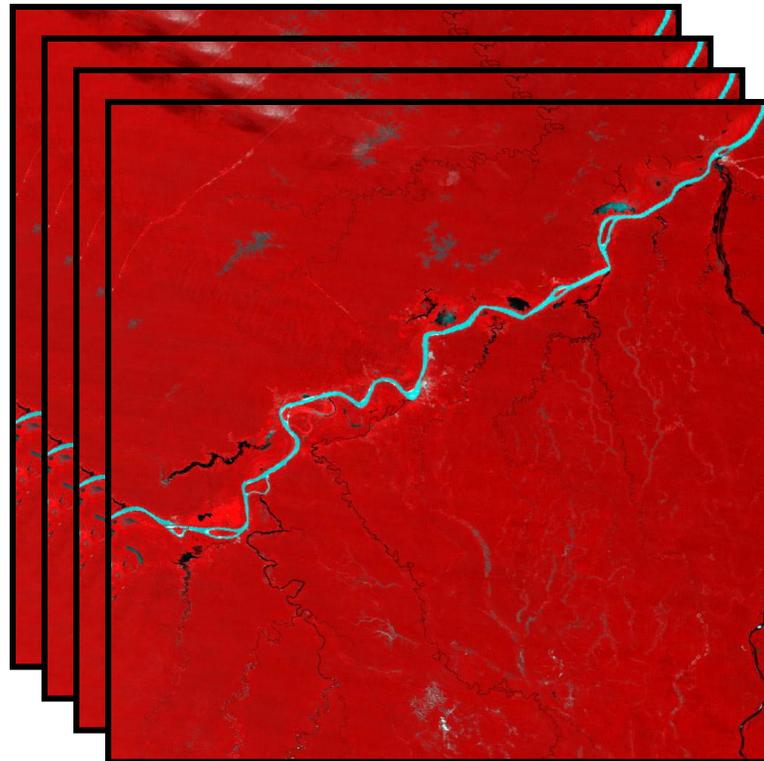


Estimated vs measured (RMSE = 38 mg/l, N=229)



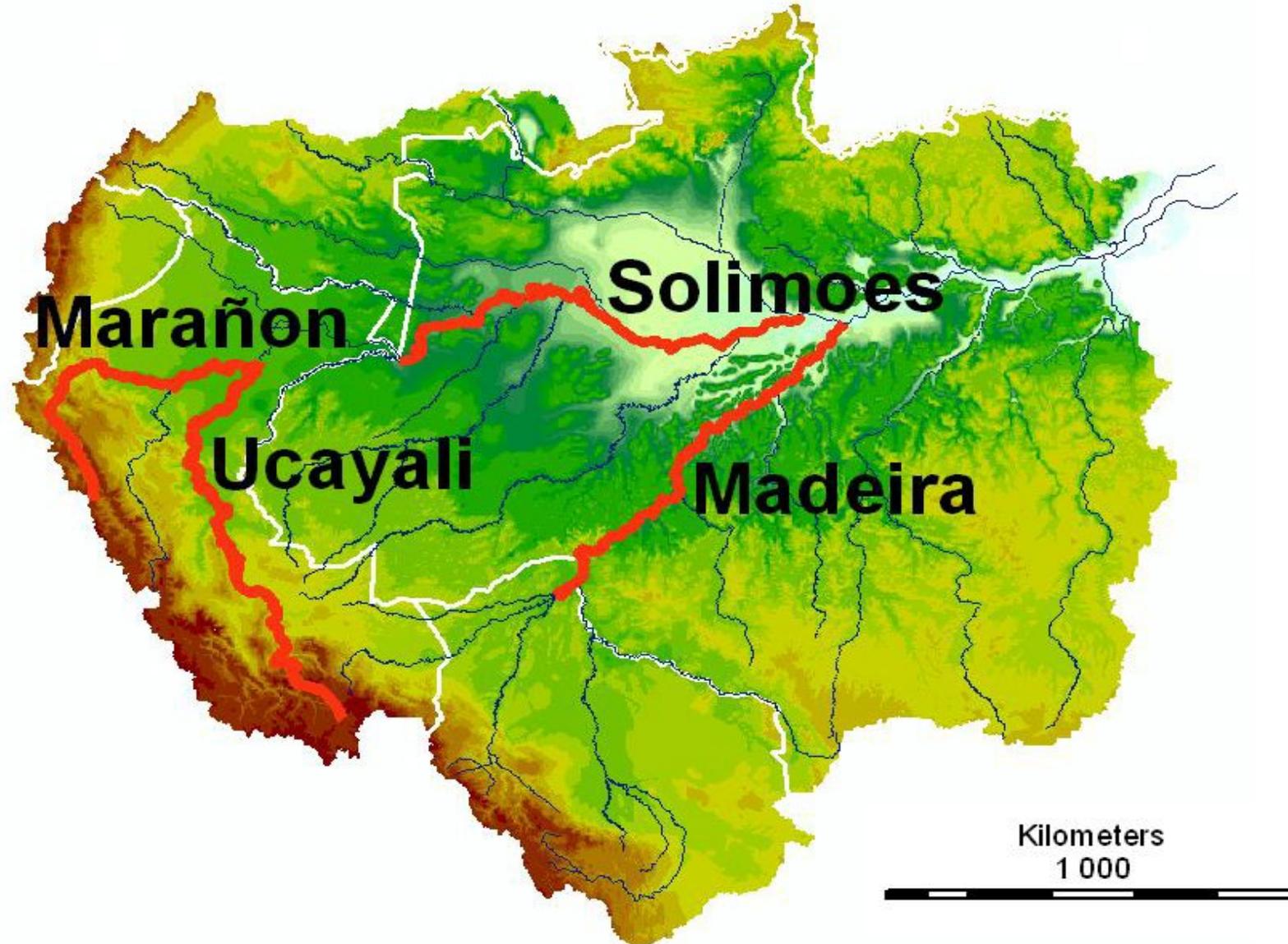
2. Exploitation de séries temporelles d'images satellite

Exploiter les travaux sur la radiométrie et l'appliquer sur les images satellites en masse (chaîne MOD3R)



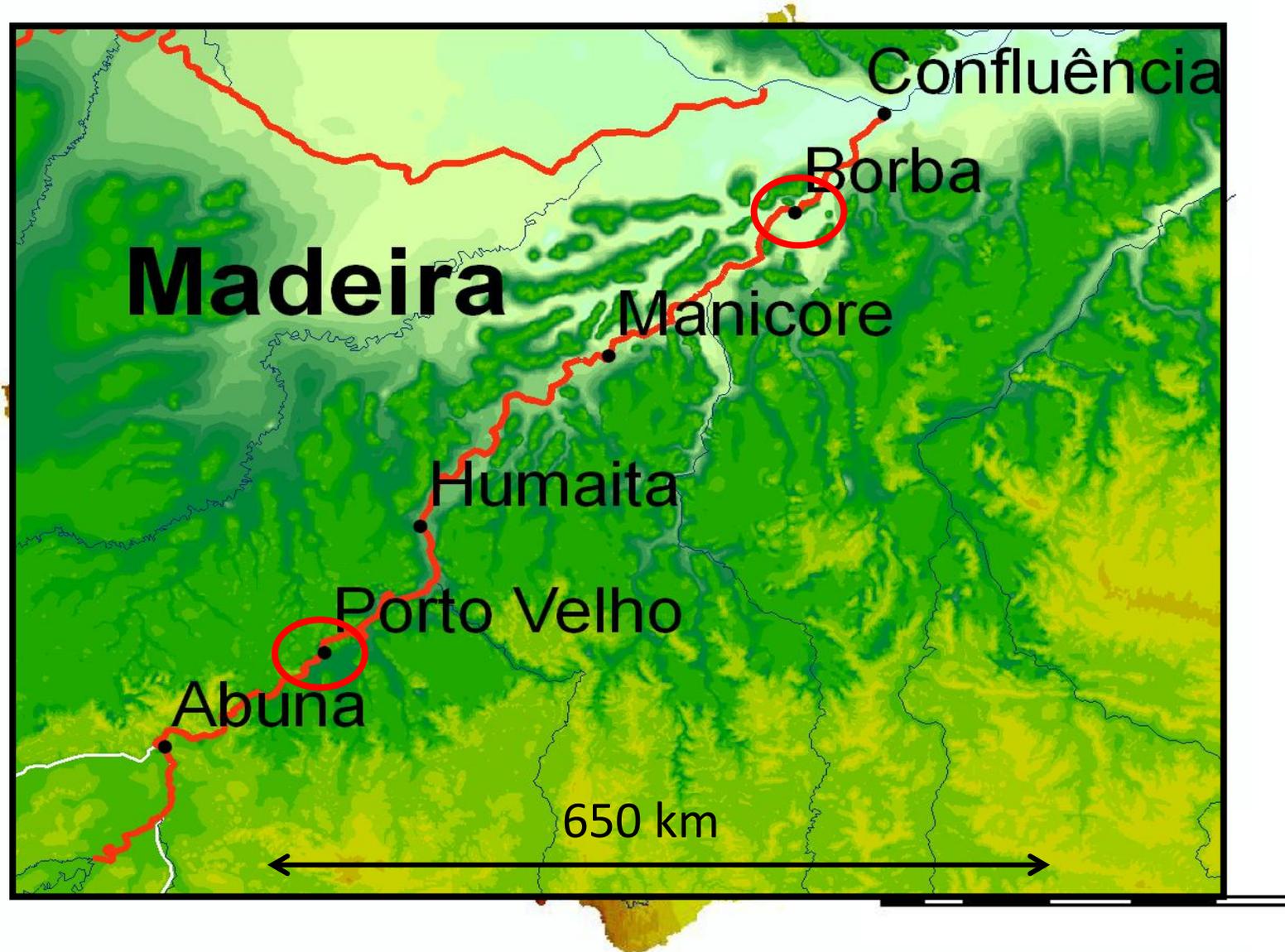


2. Exploitation de séries temporelles d'images satellite



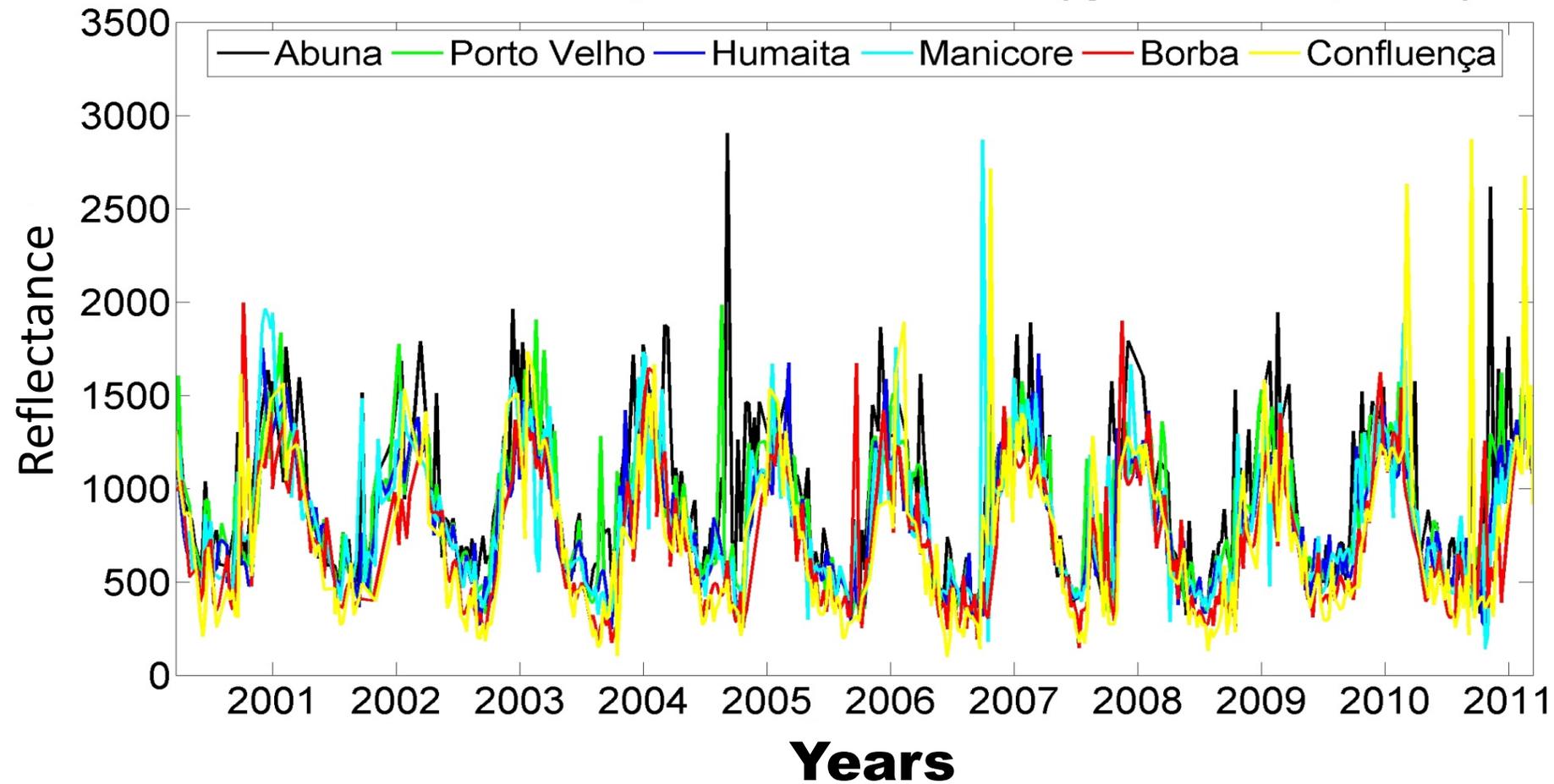


2. Exploitation de séries temporelles d'images satellite





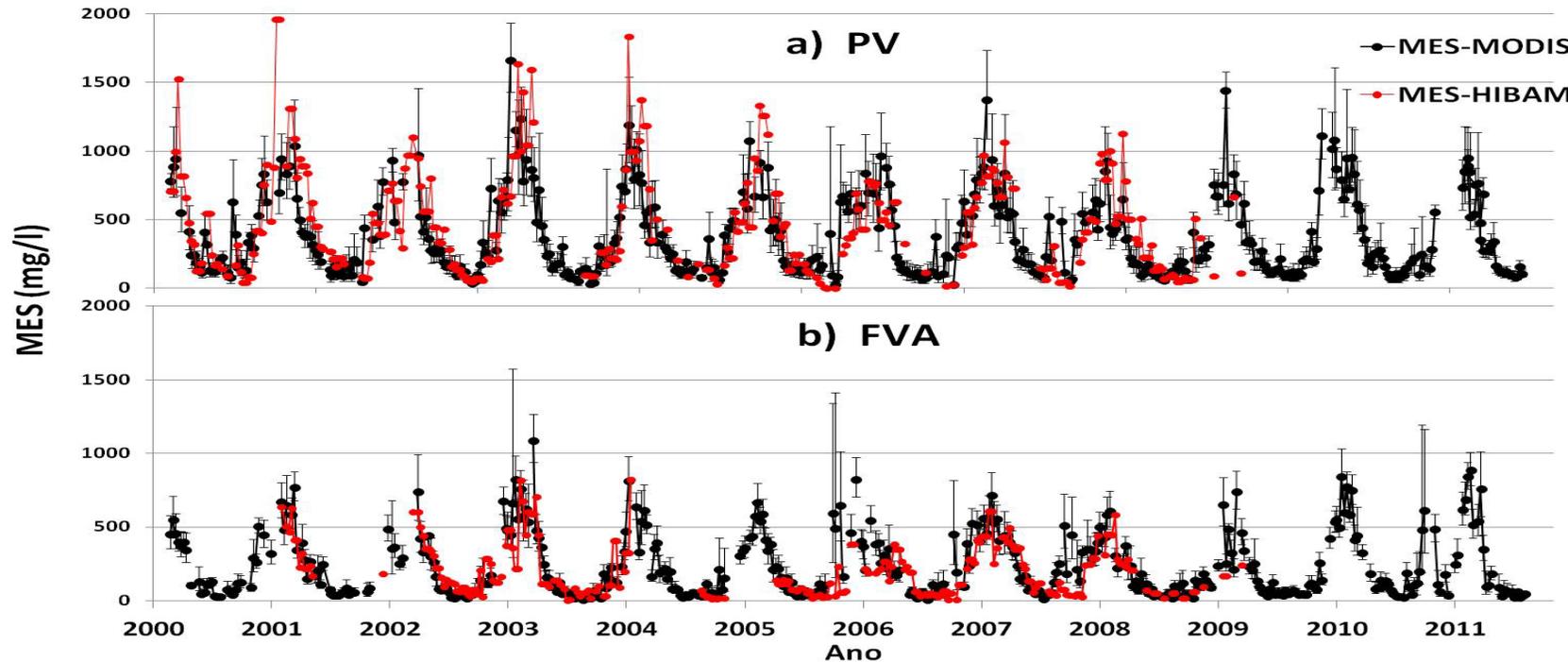
2. Exploitation de séries temporelles d'images satellite





2. Exploitation de séries temporelles d'images satellite

- **Satellite-derived vs 10-day field sampling measurements over 10 years at 2 stations (Madeira River) ($r = 0.79 - N = 282$)**



Espinoza et al. 2013 – Journal of South American Earth Sciences



Journal of South American Earth Sciences

Volume 44, July 2013, Pages 45-54



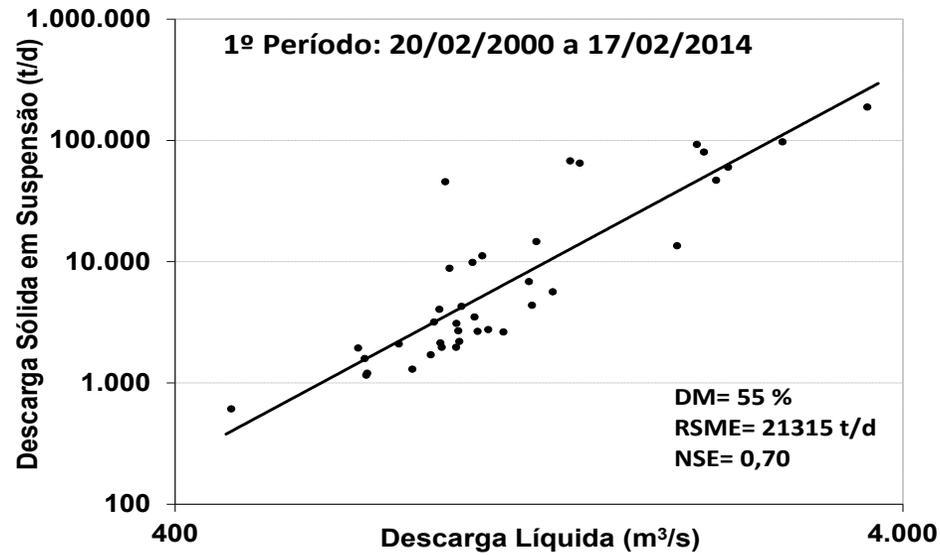
A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images

Raúl Espinoza Villar ^{a, b, c, d}, Jean-Michel Martinez ^{a, b, c, e}, Marie Le Texier ^{c, d}, Jean-Loup Guyot ^{b, c}, Pascal Fraizy ^{b, c}, Paulo Roberto Meneses ^a, Eurides de Oliveira ^e

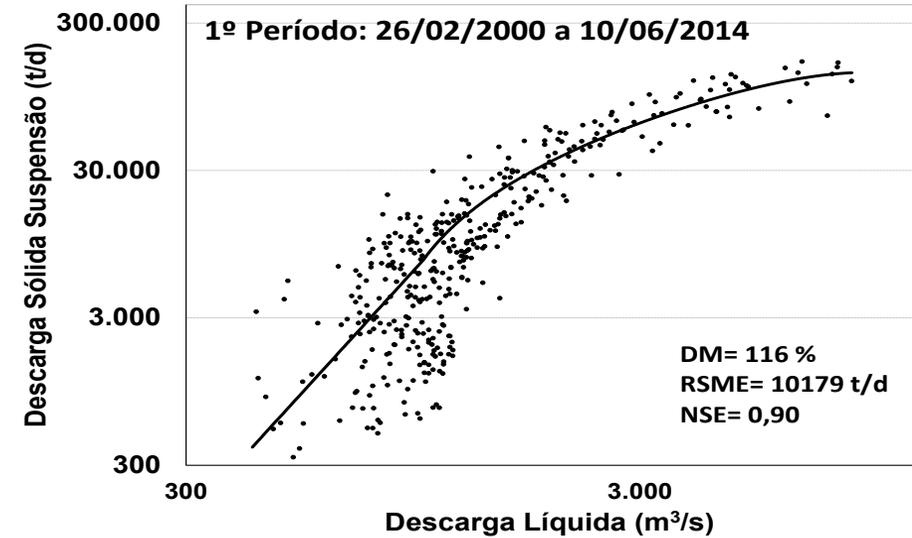


Relations concentrations MES - débits : mesures conventionnelles vs estimations satellites en milieu fluvial

Conventionnel

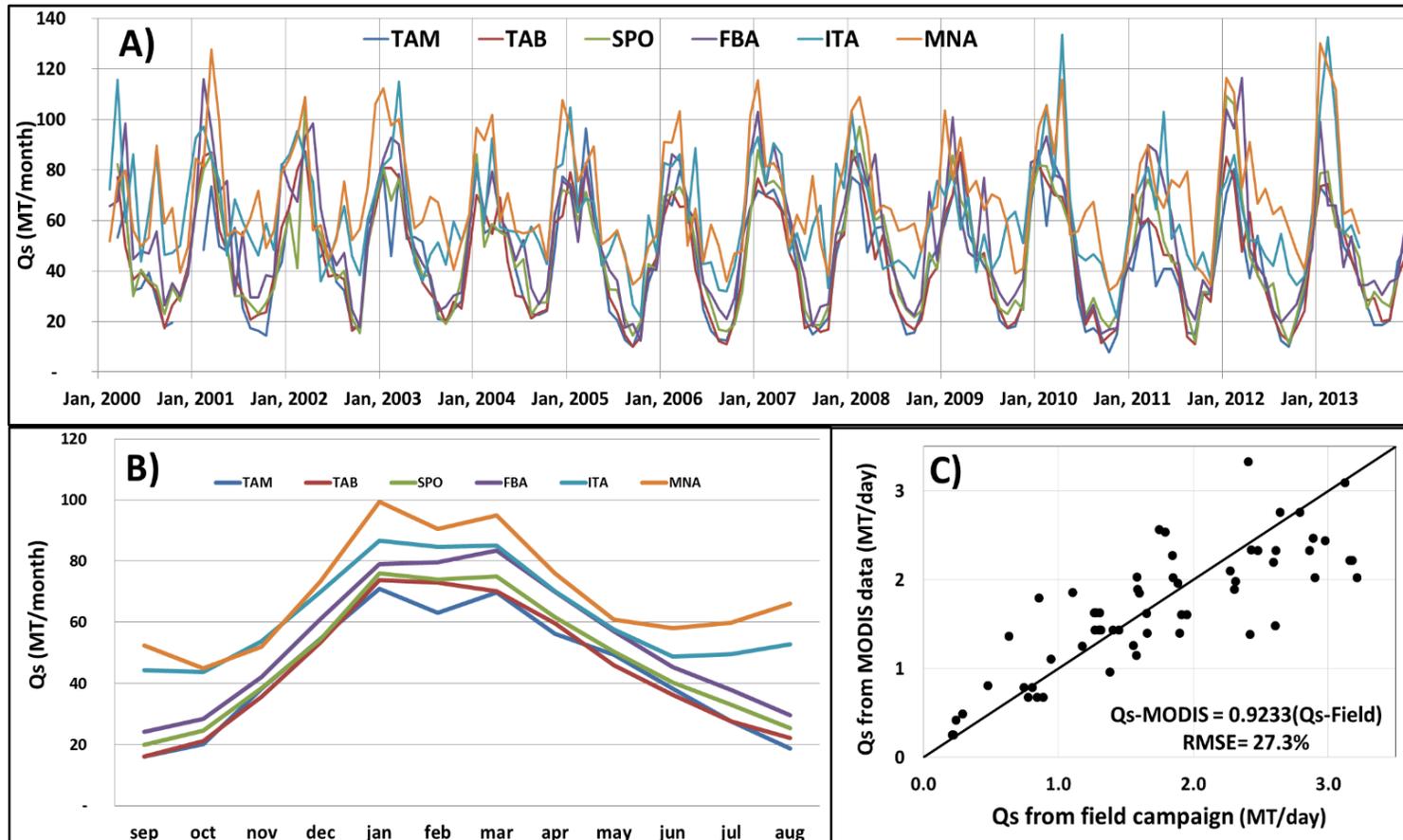


Télédétection





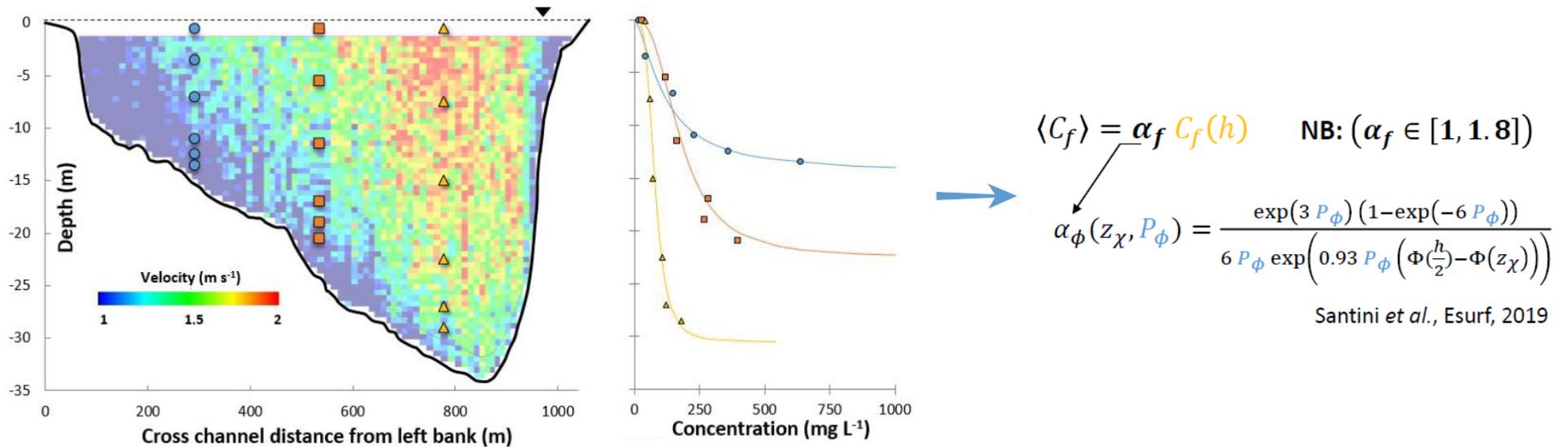
2. Exploitation de séries temporelles d'images satellite





3. Estimation satellite et intégration verticale

Les images satellites donnent accès aux concentrations de surface qui doivent ensuite être intégrées sur la verticale de la colonne d'eau :



- La modélisation hydraulique permet de prédire le profil vertical de concentration à partir des caractéristiques de l'écoulement et des particules (Santini et al. 2019)
 - Passage d'une concentration en surface à une concentration intégrée sur la hauteur d'eau



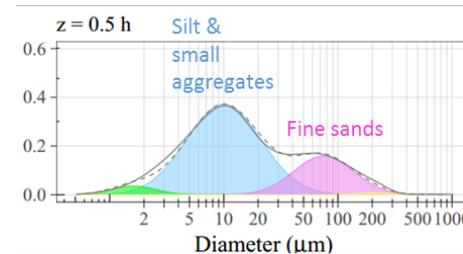
3. Estimation satellite et intégration verticale

Les **particules fines** sont majoritaires en surface, parfaitement identifiées par les satellites, et peuvent être prédites sur la profondeur de la section

- Le satellite est donc une solution robuste pour le suivi des particules fines

Les **particules grossières** (sables) sont peu présentes en surface et sont « invisibles » par satellite

- Les flux de sables doivent être déduits par des approches alternatives : modélisation hydrologique et hydraulique



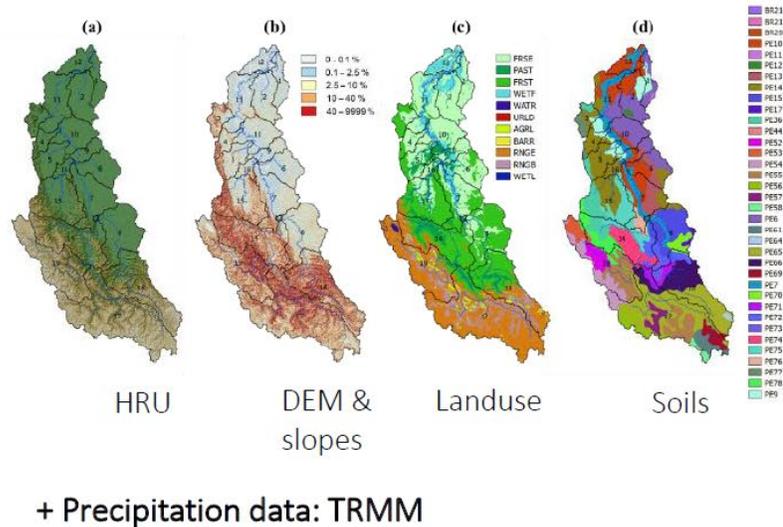


4. Modélisation intégrée flux liquide / particules fines et sables

Le couplage de différents modèles avec la télédétection permet de simuler les flux d'eaux, de matières fines et de sables

- Flux d'eau avec modélisation hydrologique
- Flux de particules fines avec imagerie satellitaire
- Flux de sables avec modélisation du transport de fond

Exemple de couplage avec le modèle hydro semi-distribué communautaire SWAT



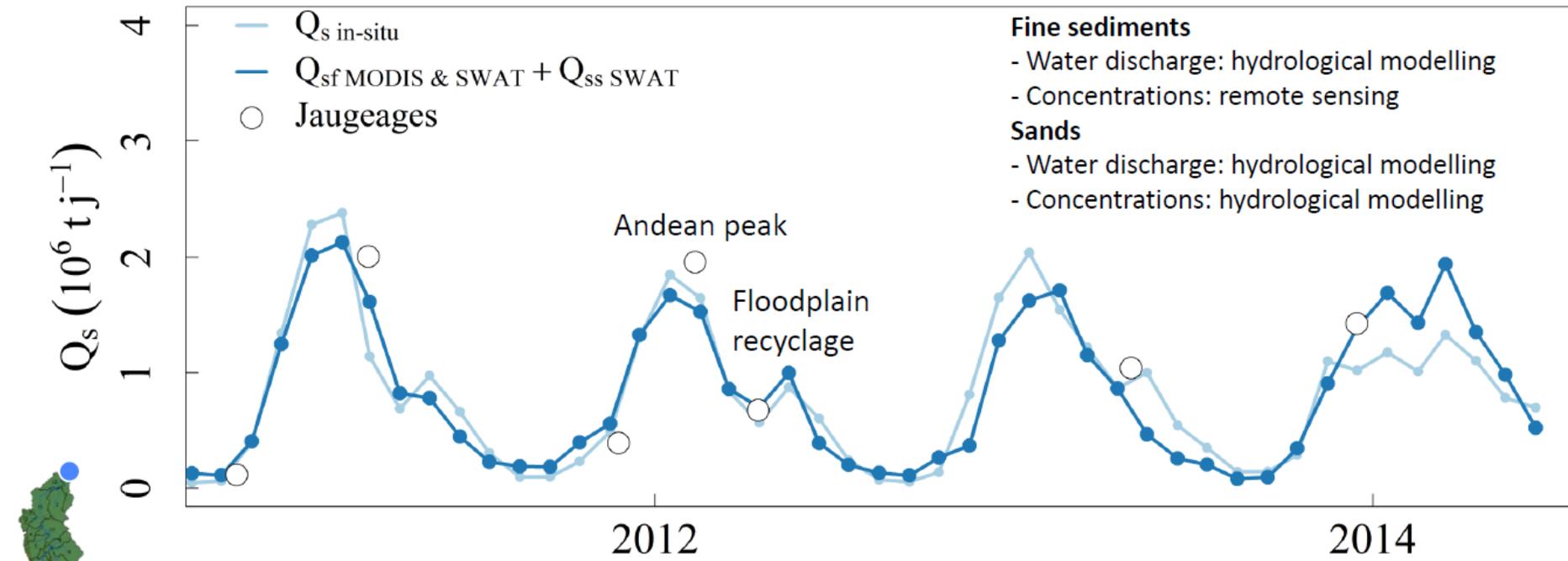
SWAT (Arnold *et al.*, 1998)

- Semi-distributed hydrological model
- Hydrological processes simulated at daily time steps
- Open source code (f90)
- Large community
- Biogeochemical modules
- Hydrological flow routing only
- Floodplain badly represented
- Sediment routing: very complex formalisms, bushy, with many physical inconsistencies



4. Modélisation intégrée flux liquide / particules fines et sables

Exemples de modélisation intégrée télédétection / modélisation hydrologique et hydraulique à l'exutoire du Rio Ucayali (Pérou) (Santini 2020)



In situ data are used only for calibration/validation

(Santini, PhD, 2020)



Conclusions

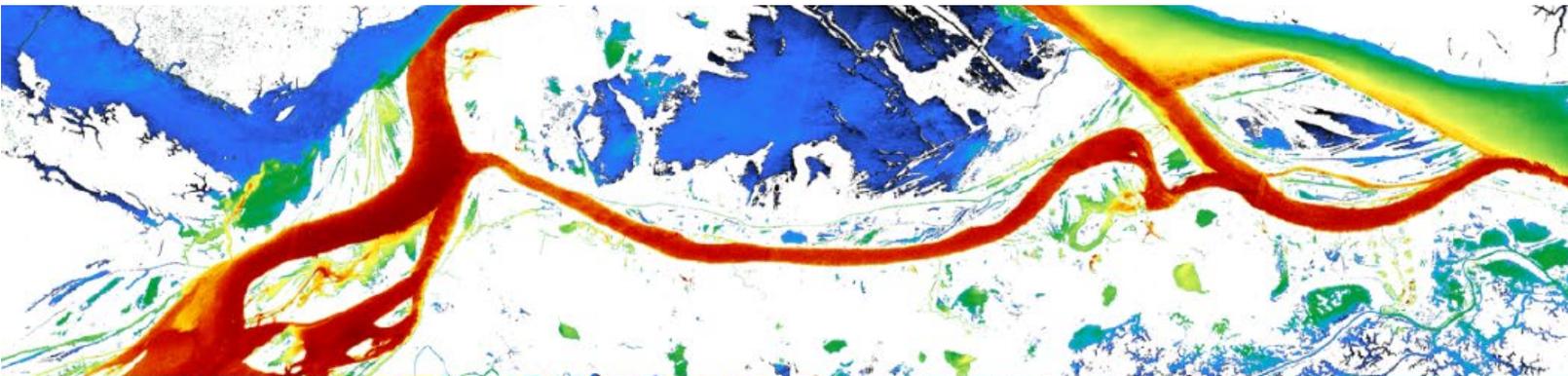
- La télédétection permet une estimation précise des concentrations de particules fines en suspension (argiles / silts) dans les systèmes fluviaux (Martinez et al. 2009, Espinoza Villar et al. 2018) grâce à l'information spectrale
 - Information supplémentaire sur le type de particules (taille)
- Information fondamentale pour une large gamme d'applications (Gallay et al. 2018) et l'identification des sources de particules
- Les flux de particules grossières (sables) sont peu présentes en surface et sont « invisibles » par satellite et peuvent être simulées séparément
- Intégration réseaux de mesures / télédétection / modélisation pour l'amélioration de la quantification des flux de particules au sein des BV et vers les océans



Conclusions

- Le Rhône à Lyon vu par Sentinel-2





Retrouvez toutes les présentations de l'atelier



LES UTILISATIONS DE LA TÉLÉDÉTECTION
POUR LA QUALITÉ DES EAUX CONTINENTALES ET AUX INTERFACES

sur www.theia-land.fr/eaux21





Surface water optical properties

- Water color is a function of **light scattering and absorption** by particulate and dissolved matter

- Light scattering and absorption by suspended particles is a function of the **material properties**
 - **Concentration**
 - **Diameter Distribution / Granulometry**
 - **Refraction index / Mineralogy / Organic content**

- **Problem : few available records on river water optical properties registering their spatial and temporal variability !**