



**HAL**  
open science

# Dynamique et flux de particules en suspension à l'embouchure des fleuves : approche intégrée mesures et télédétection

David Doxaran

► **To cite this version:**

David Doxaran. Dynamique et flux de particules en suspension à l'embouchure des fleuves : approche intégrée mesures et télédétection. Ingénierie de l'environnement. Sorbonne Université, 2017. tel-04023790

**HAL Id: tel-04023790**

**<https://hal.science/tel-04023790>**

Submitted on 13 Mar 2023

**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.

**HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES  
UNIVERSITÉ PIERRE & MARIE CURIE – PARIS VI**

**Dynamique et flux de particules en suspension à  
l'embouchure des fleuves : approche intégrée  
mesures et télédétection**

**David Doxaran**

Laboratoire d'Océanographie de Villefranche (LOV)  
UMR 7093 CNRS / UPMC  
Quai de la Corderie  
06234 Villefranche-sur-Mer

**Date de soutenance : 22 mai 2017**

---

**Composition du Jury :**

LEGENDRE Louis, Laboratoire d'Océanographie de Villefranche, UMR7093 CNRS/UPMC  
(Président)

LOISEL Hubert, UMR 8187 LOG Université du Littoral Côte d'Opale (Rapporteur)

OUILLOIN Sylvain, LEGOS, UMR IRD-CNRS-CNES-UPS, Université de Toulouse (Rapporteur)

FROUIN Robert, Scripps Institution of Oceanography, États-Unis (Rapporteur)

SCIANDRA Antoine, Laboratoire d'Océanographie de Villefranche, UMR7093 CNRS/UPMC  
(Examineur)

BOSS Emmanuel, School of Marine Sciences University of Maine, États-Unis (Examineur)



# *Première partie : résumé de carrière*

---

## **Curriculum vitae et parcours**

David DOXARAN

Chargé de Recherche de 1ère classe CNRS

Né à Saint-Palais (64), le 23/09/1975

Laboratoire d'Océanographie ed Villefranche (LOV)

UMR 7093, CNRS / UPMC

Equipe Optique Marine et Télédétection : Application à la Biogéochimie (OMTAB)

06230 Villefranche-sur-Mer

Tél./Fax : +33 (0)4 93 76 37 24 / 37 39

[doxaran@obs-vlfr.fr](mailto:doxaran@obs-vlfr.fr) <http://www.obs-vlfr.fr/LOV/OMT/>

### *Etudes et diplômes*

**Thèse de doctorat** (2000-2002)

UMR-EPOC 5805, Université Bordeaux 1 (France)

« Télédétection et modélisation numérique des flux sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde »

**D.E.A** (1998-1999)

UMR-EPOC 5805, Université Bordeaux 1 (France)

: Quantification of suspended sediments in the Gironde estuary using SPOT satellite data and the numerical transport model (SAM-2D).

**Maitrise en Physique Appliquée mention Océan-Atmosphère** (1997-1998)

Université de Toulon et du Var (France)

### *Expérience professionnelle*

**CR-CNRS** (2007-présent) - LOV, UMR 7093 (France)

**Post-doctorat Marie Curie Re-Integration** (2006-2007) « Remote Sensing of sedimentary Fluxes in coastal waters »

LOV, UMR 7093 (France)

**Post-doctorat Marie Curie** (2003-2005) « Apparent and inherent optical properties of turbid coastal waters »

Université de Plymouth (R.-U.)

### *Activités d'animation de la recherche*

**Membre du Comité Exécutif** du Groupe d'Intérêt Scientifique Couleur de l'Océan (GIS-COOC, [www.gis-cooc.org/fr/](http://www.gis-cooc.org/fr/)) **2010-2012**

**Co-directeur** du Groupe d'Intérêt Scientifique Couleur de l'Océan (GIS-COOC, [www.gis-cooc.org/fr/](http://www.gis-cooc.org/fr/)) 2013-2017

**Co-organisateur** de la conférence internationale Particles in Europe 2010, 80 participants, Villefranche-sur-Mer, 14-17 novembre 2010

(<http://www.sequoiasci.com/particles-in-europe-pie-2010/>)

**Co-organisateur** des séminaires de l'équipe OMTAB du LOV (2012-2014)

### *Activités d'évaluation de la recherche*

**Reviewer** pour Remote Sensing of environment, Limnology & oceanography, Applied Optics, Estuarine Coastal and Shelf Science, Deep Sea Research 1, Remote Sensing, Optics Express, Journal of Geophysical Research, Continental Shelf Research, Inland Waters, Geo-Marine Letters, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Geophysical Research Letters, etc.

**Reviewer** de projets soumis au CNES-TOSCA

**Editeur invité** du journal Geo-Marine Letters, issue spéciale PiE 2010, avril 2012.

**Rapporteur** de la thèse de doctorat de Stefani Novoa-Gautier, 2012, Université du Pays-Basque (Espagne).

**External examiner** de la thèse de Josuah W. Griffiths, 2017, Université de Bangor (R.U.)

**Membre du Comité AERES** pour l'évaluation de l'unité Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG), UMR 8187, novembre 2013.

**Membre du Centre National des Universités (CNU)** section 37 'Météorologie, océanographie physique de l'environnement' (2013-2015)

### *Participation à des contrats de recherche*

(*Acronyme, P.I., période, financement, objectif*)

**RSFLUX**, D. Doxaran (LOV), 2005-2007, CNES-TOSCA  
Télé-détection des flux sédimentaires dans les eaux côtières

**BELCOLOUR-2**, K. Ruddick (Belgique), 2008-2011, BELSPO  
Optical remote sensing of coastal waters

**FLUXSAT**, D. Doxaran (LOV), 2011-2012, PNTS  
Télé-détection des flux solides à l'embouchure d'un fleuve

**GOYA**, D. Doxaran (LOV), 2010-2012, CNES-TOSCA

Téledétection géostationnaire (GOCI) des particules en suspension dans un panache fluvial

**MALINA**, M. Babin (LOV), 2008-2010, ANR

How changes in ice cover, permafrost and solar radiation impact on biodiversity and biogeochemical fluxes in the Arctic Ocean?

**PROVPANACHE**, D. Doxaran (LOV), 2010-2014, GMMC / CNES-TOSCA

Etude des panaches fluviaux à l'aide de flotteurs-profileurs bio-optiques

**SeaSWIR**, E. Knaeps (Belgique), 2012-2013, BELSPO

Propriétés optiques des eaux extrêmement turbides dans le moyen-infrarouge

**RIVERCOLOR**, V. Lafon (EPOC), 2013-2015, CNES-TOSCA

Téledétection satellite multi-capteurs des matières en suspension dans l'estuaire de la Gironde

**GIGASSAT**, F. Pernet (IFREMER), 2013-2016, ANR

Adaptation des écosystèmes ostréicoles au changement global

**OCAPI**, D. Antoine / D. Doxaran (LOV), 2014-2016, CNES-TOSCA

Capteur satellite géostationnaire Europe de la couleur de l'eau

**MATUGLI**, F. Bourrin (CEFREM), 2015-2017, ANR

Mesures Autonomes de la Turbidité côtière à l'aide de GLiders

**HIGHROC**, K. Ruddick (Belgique), 2014-2017, UE-FP7

Produits et services issus de la télédétection de la couleur de l'océan à hautes résolutions spatiale et temporelle

**TTC**, D. Doxaran (LOV), 2016-2017, CNES-TOSCA

Téledétection de la taille et composition des particules en suspension dans les panaches fluviaux

**HYPERMAQ**, K. Ruddick (Belgique), 2017-2020, BELSPO

Téledétection hyperspectrale multi-missions des milieux aquatiques

**PONDER**, Q. Vanhellefont (Belgique), 2016-2018, BELSPO

Téledétection à très haute résolution spatiale des eaux côtières et lacustres

Pour plus de détails consulter : <http://omtab.obs-vlfr.fr/projects.htm>

*Participation à l'encadrement de la recherche et enseignement*

## **Etudiants en 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> cycles**

**Jérôme Cougoul** (2010). Télédétection à haute résolution spatiale des matières en suspension dans l'estuaire de la Gironde. Stage Master-2 ENVOLH, Université Bordeaux 1.

**Matthieu Jasek** (2011). 'Mesures de paramètres optiques et biogéochimiques dans des eaux côtières directement influencées par les apports fluviaux du Rhône dans le Golfe du Lion (Méditerranée occidentale)', stage IUT 2<sup>ème</sup> année Lyon 1.

**Axel Lucas** (2013). Mesures in situ et télédétection des matières en suspension (MES) dans un écosystème ostréicole (Baie de Bourgneuf). Stage Master 2 Master 2 STEE Spécialité Océanographie, Université Bordeaux 1.

**Morgane Larnicol** (2015). Optique Marine et télédétection des zones côtières : détermination de la concentration en chlorophylle-a dans la Baie de Bourgneuf. Stage Master 2 Sciences de la mer et du littoral, Université de Nantes.

### **Etudiants en 3<sup>ème</sup> cycle**

**Thomas Lorthiois** (2012). Dynamique des matières en suspension dans le panache du Rhône (Méditerranée occidentale) par télédétection spatiale « couleur de l’océan ». Thèse UPMC (*superviseur scientifique*).

**Matthieu Bressac** (2013). Devenir du fer atmosphérique, interactions des particules avec la matière organique et conséquences sur l’export de carbone. Thèse UPMC (*superviseur scientifique en optique marine*).

**Bertrand Saulquin** (2014). Analyse statistique de la variabilité spatio-temporelle des variables géophysiques, application à la couleur de l’eau et la température de surface observées depuis l’espace. Thèse Télécom Bretagne (*superviseur scientifique*).

**Sorin Constantin** (2015). Seawater turbidity analysis in the Romanian coastal area, based on satellite data. Thèse Université de Bucarest (Roumanie) (*Supervision scientifique au LOV pendant 4 mois*).

**Jinah Eom** (2016). Dynamique des matières en suspension en Baie de Gyeonggi (Corée du Sud) et influence des forçages physiques à partir de données satellites multi-capteurs (Landsat, MODIS, GOCI). Thèse KIOST (Corée du Sud) (*Supervision scientifique au LOV pendant 1 mois*).

**Gaël Many** (2016). Compréhension des phénomènes physiques côtiers influençant la dynamique sédimentaire à l’interface terre-mer (plateau continental) : Impact des évènements extrêmes. Thèse Université Perpignan (*collaboration scientifique*).

**Morgane Larnicol** (en cours). Télédétection hyperspectrale des eaux littorales turbides. Université de Nantes (*co-supervision scientifique*).

**Carmine Di Polito** (2017). Dynamique spatio-temporelle des matières en suspension dans le Golfe de Taranto (Mer Ionienne) à partir des données satellites MODIS-Aqua. Université de Basilicata (Italie) (*supervision scientifique au LOV pendant 6 mois*).

**Aurélien Gangloff** (en cours). Devenir des apports solides du Rhône dans le Golfe du Lion : contribution relative des transferts liés à la dynamique du panache et aux remises en suspension par les tempêtes. Thèse Université de Brest / IFREMER (*membre du comité de thèse et collaboration scientifique*).

**Yafei Luo** (en cours). Télédétection des particules en suspension dans le Yellow River Estuary. Université de Qingdao, Chine (*en visite 12 mois au LOV*).

## Postdoctorants

**Anouck Ody** (2015-2016). Postdoctorat HIGHROC (2 ans). Télédétection multi-capteurs des matières en suspension dans le panache du Rhône. Estimation des flux solides du fleuve aval jusqu'à l'embouchure.

**Stefani Novoa** (2016) et **Sorin Constantin** (2017). Postdoctorats HIGHROC (1 an). Télédétection multi-capteurs des matières en suspension dans les estuaires et panaches de la Gironde et de la Loire.

## Ingénieurs d'étude

**Sabine Marty** (2016) et **Guillaume Morin** (2017). Projet TTC (2×6 mois). Mesures des propriétés optiques des panaches fluviaux et de la concentration, taille et composition des matières en suspension.

## Liste des travaux publiés issus des encadrements ou co-encadrements

1. Constantin S., Constantinescu S. and D. Doxaran (2017). Long-term analysis of turbidity patterns in Danube Delta coastal area based on MODIS satellite data. *Journal of Marine Systems*. *Journal of Marine Systems*, 170, 10–21.
2. Novoa S., Doxaran D., Ody A., Vanhellefont Q., Lafon V., Lubac B. and P. Gernez (2017). Atmospheric corrections and multi-conditional algorithm for multi-sensor remote sensing of suspended particulate matter in low to high turbidity levels coastal waters. *Remote Sensing*, accepted.
3. Eom J., Choi J. K., Won J. S., Ryu J. H., Doxaran D., Ruddick K. and S. Lee (2016). Spatio-temporal variation in suspended sediment concentrations and related factors of coastal waters based on multispatial satellite data in Gyeonggi Bay, Korea. *Journal of Coastal Research*, accepted.
4. Ody A., Doxaran D., Vanhellefont Q., S. Novoa, Verney R., Pairaud I., Bourrin F., Ruddick K., G. Many (2016). Capabilities and limits of high spatial and temporal ocean colour satellite data to study the dynamics of suspended particles in non-tidal river plume. *Remote Sensing*, 8(3), 245; doi:10.3390/rs8030245.
5. Many G., Bourrin F. Durrieu de Madron X., Paired I., Gangloff A., Doxaran D., Ody A., Verney R., Menniti C., Le Berre D., Jacquet M. (2016). Particle assemblage characterization in the Rhone river ROFI, *Journal of Marine Systems*, doi: 10.1016/j.jmarsys.2015.12.010.
6. Constantin S., Doxaran D. and S. Constantinescu (2016). Estimation of water turbidity and analysis of its spatio-temporal variability in the Danube River plume (Black Sea) using MODIS satellite data. *Continental Shelf Research*, 112, 14–30.
7. Bressac M, Guieu C, Doxaran D, Bourrin F, Desboeufs K, Leblond N, Ridame C (2014) Quantification of the lithogenic carbon pump following a simulated dust-deposition event in large mesocosms. *Biogeosciences* 11: 1007-1020 | doi: 10.5194/bg-11-1007-2014.
8. Gernez P., Barillé L., Lerouxel A., Mazeran C., Lucas A. and D. Doxaran (2014). Remote sensing of suspended particulate matter in turbid oyster-farming ecosystem. *Journal of Geophysical Research - Oceans*, 119, doi:10.1002/2014JC010055.



9. Saulquin B., Fablet R., Ailliot P., Mercier G., Doxaran D., Mangin A. and Hembise Fanton d'Andon O. (2014). Characterization of Time-Varying Regimes in Remote Sensing Time Series: Application to the Forecasting of Satellite-Derived Suspended Matter Concentrations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, DOI 10.1109/JSTARS.2014.2360239.
10. Bressac M., Guieu C., Doxaran D., Bourrin F., Obolensky G. and J.M. Grisoni (2012). A mesocosm experiment coupled with optical measurements to assess the fate and sinking of atmospheric particles in clear oligotrophic waters. *Geo-Marine Letters*, DOI 10.1007/s00367-011-0269-4, 32, 153-164.
11. Lorthiois T., D. Doxaran and M. Chami (2012), Daily and seasonal dynamics of suspended particles in the Rhône River plume based on remote sensing and field optical measurements. *Geo-Marine Letters*, DOI: 10.1007/s00367-012-0274-2.
12. Petus, C., Chust, G., Gohin, F., Doxaran,, D., Froidefond, J.M. and Y. Sagarminaga (2010). Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. *Continental Shelf Research*, 30, 379-392.

## Liste des enseignements donnés

2006-2016 : Interventions chaque année depuis 2006 Master 2 Océanographie et Environnement Marin (OEM) de l'UPMC : « Principes de base en télédétection de la couleur de l'eau et applications aux eaux côtières » (3h) et « Panaches fluviaux » (3h).

2013 & 2015 : Interventions dans le cadre du Advanced Ocean Remote Sensing Training Course organisé par l'European Space Agency (ESA) : « Principles of Ocean Colour remote sensing » (3h), « Ocean Colour Algorithms and Applications in Case 1 waters » (3h), « Ocean Colour Algorithms and Applications in Case 2 waters » (3h).

<http://seom.esa.int/oceantrainingcourse2015/>

## Participation à des comités de thèse

**Cassandra Normandin** (en cours). UMR EPOC, Université Bordeaux 1.

**Aurélien Gangloff** (en cours). IFREMER DYNECO-DHYSED, Université de Brest.

**Mohamed Mograne** (en cours). UMR LOG 8187, Université Lille 1 / ULCO.

**Gaël Many**, (2016). CEFREM, UMR 5110, Université de Perpignan ViaDomitia.

# *Deuxième partie : Synthèse des travaux de recherche*

---

## **Table des matières**

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introduction.....                                                                                | 11 |
| 1.1 Problématique.....                                                                              | 12 |
| 1.2 Objectifs scientifiques .....                                                                   | 15 |
| 1.3 Méthodologie .....                                                                              | 17 |
| 2. Propriétés optiques des eaux côtières turbides. ....                                             | 20 |
| 2.1 Propriétés optiques apparentes.....                                                             | 20 |
| 2.1.1 Mesures in situ (protocoles, incertitudes et réduction des erreurs).....                      | 20 |
| 2.1.2 Signatures spectrales : réflectance de télédétection.....                                     | 23 |
| 2.2 Propriétés optiques inhérentes. ....                                                            | 26 |
| 2.2.1 Erreurs et incertitudes de mesures.....                                                       | 26 |
| 2.2.2 Coefficients d'absorption et d'atténuation ( $a$ et $c$ ). ....                               | 28 |
| 2.2.2 Coefficients de diffusion et rétrodiffusion particulières ( $b_p$ et $b_{bp}$ ). ....         | 29 |
| 2.3 Algorithmes de télédétection .....                                                              | 31 |
| 2.3.1 Concentrations en matières en suspension.....                                                 | 31 |
| 2.3.2 Concentrations en chlorophylle-a.....                                                         | 32 |
| 2.3.3 Turbidité de l'eau .....                                                                      | 33 |
| 2.3.4 Corrections atmosphériques.....                                                               | 34 |
| 3. Mesures et télédétection de la dynamique et des flux sédimentaires à l'embouchure des fleuves.37 |    |
| 3.1 Télédétection à haute résolution spatiale .....                                                 | 37 |
| 3.1.1 SPOT, ASTER et Landsat et Sentinel-2.....                                                     | 37 |
| 3.1.2 MERIS-FR et MODIS-250 .....                                                                   | 38 |
| 3.1.3 Match-ups : validation des produits satellitaires.....                                        | 39 |
| 3.2. Télédétection à haute résolution temporelle .....                                              | 40 |
| 3.2.1 Approche multi-capteurs .....                                                                 | 40 |
| 3.2.2 Observations géostationnaires (SEVIRI et GOCI...à OCAPI).....                                 | 40 |
| 3.3 Flux solides à l'embouchure des fleuves.....                                                    | 42 |
| 3.3.1 Estuaires macro-tidaux (Gironde) .....                                                        | 42 |
| 3.3.2 Deltas (Mackenzie et Rhône) .....                                                             | 42 |

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4 Advection et chute des MES dans la colonne d'eau, dégradation de la matière organique terrigène.....                                    | 44 |
| 3.4.1 Observations 2D des zones de maximum de turbidité et des panaches fluviaux en relation avec les forçages physiques .....              | 44 |
| 3.4.2 Observations 3D par mesures satellites et in situ profilantes (e.g., flotteurs-profileurs) ...                                        | 45 |
| 3.4.3 Expérimentations in vitro et en mésocosmes.....                                                                                       | 45 |
| 4. Conclusions et perspectives à court et moyen termes.....                                                                                 | 45 |
| 4.1 Conclusions.....                                                                                                                        | 45 |
| 4.2 Projets de recherche futurs.....                                                                                                        | 47 |
| 4.2.1. Evolution des apports solides fluviaux à l'océan depuis 20 ans : impacts du changement climatique et des activités anthropiques..... | 48 |
| 4.2.2. Devenir des substances terrigènes déversées par voie fluviale dans l'océan côtier.....                                               | 50 |
| 4.2.3. Calibration et validation autonomes des produits satellites couleur de l'eau multi-capteurs.....                                     | 54 |
| 5. Bibliographie. ....                                                                                                                      | 56 |
| Remerciements .....                                                                                                                         | 62 |
| Annexe 1 : liste des acronymes.....                                                                                                         | 63 |
| Annexe 2 : Tirés-à-part de 5 principaux articles publiés.....                                                                               | 64 |
| Annexe 3 : Liste exhaustive des publications.....                                                                                           | 65 |

# 1. Introduction.

Mes travaux de recherche depuis 2003 se sont inscrits dans la continuité des travaux réalisés en thèse de doctorat. Ces derniers étaient novateurs dans les domaines spécifiques suivants :

- Mesures et caractérisation de la réflectance des eaux estuariennes turbides à extrêmement turbides dominées par les sédiments en suspension
- Couverture des domaines spectraux visible (VIS) et proche-infrarouge (PIR)
- Mise en évidence de relations robustes entre rapports spectraux de réflectance (PIR / VIS) et concentration en matières en suspension (MES, 5 – 3000 mg/l)
- Modélisation semi-analytique des propriétés optiques des eaux dominées par des sédiments en suspension
- Application à la télédétection ‘couleur de l’eau’ pour cartographie à haute résolution spatiale des concentrations en MES en milieu estuarien
- Calibration/validation/réinitialisation d’un modèle de dynamique sédimentaire tridimensionnel (3D) à partir de mesures satellites (cartographie des MES dans les eaux de surface) et in situ (profils verticaux de MES).

Bien que ce dernier point pouvait apparaître comme un des plus originaux et à développer, c’est l’étude et la compréhension des propriétés optiques des eaux extrêmement turbides (riches en MES) qui m’a tout particulièrement passionné, ainsi que la possibilité de développer de nouvelles applications pour la télédétection de la couleur de l’eau exploitée jusqu’alors essentiellement pour étudier l’océan ouvert (estimation de la concentration en chlorophylle-a (O’Reilly et al. 1998) et de la production primaire océanique globale (Antoine et al. 1996) à régionale (e.g., Bosc et al 2004). Des travaux d’investigation des propriétés optiques des eaux turbides ont ainsi été réalisés au cours du post-doctorat Marie Curie à l’Université de Plymouth (2003-2004) tels que détaillés en section 2.

La mise en application des résultats obtenus (e.g., relations robustes entre la réflectance de l’eau dans le domaine spectral PIR et la concentration en MES) a par la suite permis d’étudier par télédétection (et mesures in situ) la dynamique diurne à saisonnière des sédiments en suspension dans l’estuaire de la Gironde et d’estimer la masse annuelle de sédiments exportés de l’estuaire vers l’océan côtier (post-doctorat Marie Curie Re-Integration au LOV).

Cette meilleure connaissance des propriétés optiques des eaux turbides riches en particules en suspension ainsi que cette utilisation nouvelle de la télédétection satellite couleur de l’eau sont à l’origine d’un projet de recherche visant à (i) améliorer nos estimations actuelles des flux de substances terrigènes solides déversées par voie fluviale dans l’océan côtier et à (ii) déterminer le devenir des particules en suspension exportées dans les panaches fluviaux. Il s’agit du projet de recherche développé et mûri en vue d’intégrer le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) en tant que Chargé de Recherche, ce qui fut finalement le cas en septembre 2007. Ce projet a pour but de développer et mettre en application une méthodologie originale pour atteindre ces deux objectifs.

## 1.1 Problématique.

Le transport particulaire en domaines fluvial et côtier a un impact direct sur la **morphologie des zones littorales** via les processus d'érosion, de transport, dépôt et sédimentation. Il conditionne par ailleurs le transfert de substances chimiques et métalliques (**polluants**) du continent vers l'océan. Il contribue fortement à l'apport en **nutriments** dans l'océan, donc à la fertilisation du milieu, mais aussi à l'atténuation de l'éclairement solaire dans la colonne d'eau, conditionnant ainsi la **production primaire** et indirectement l'ensemble de la **chaîne trophique** (e.g., Ouillon 1998). La turbidité de l'eau (diffusion de la lumière par les MES), associée aux concentrations en MES et chlorophylle-a dans la colonne d'eau, est ainsi un paramètre clé lié à la **qualité des eaux** d'après les Directives de la Communauté Européenne (WFD 2000/60/EC, MSFD 2008/56/EC).

La connaissance des flux particuliers et dissous à l'interface continent-océan que constituent les embouchures de fleuves est enfin essentielle pour les études biogéochimiques et biologiques, pour améliorer notre compréhension des **cycles élémentaires** (e.g., cycle du carbone).

Aux interfaces continent-océan les embouchures de fleuves constituent des environnements complexes et dynamiques, zones de transit qui filtrent les apports fluviaux (eau douce, substances terrigènes particulières et dissoutes) à l'océan. Ces zones dites **estuariennes** de mélange entre eau douce et salée se différencient avant tout par l'impact respectif des principaux forçages physiques en jeu (débit fluvial évènementiel à saisonnier, marée (estuaire micro- à macro-tidal), vent/houle) qui en façonnent à terme la morphologie (e.g., intrusion d'un **milieu confiné** à l'intérieur des terres ou formation d'une zone **deltaique** dans le milieu marin, avec ou sans barres sédimentaires). Il s'agit en tous les cas d'environnements stratifiés en termes de masses d'eau (stratification de densité entre eau douce et salée) et concentrations en MES (panache turbide de surface, néphéloïdes intermédiaires et de fond, formation de vase fluide dans les estuaires méso- à macrotidaux où les profils verticaux de MES dépendent surtout des cycles de dépôt et remise en suspension). Aux processus **d'advection** et **dilution** des masses d'eau turbide fluviale dans l'océan côtier s'ajoute le processus complexe de **floculation** ou agrégation des MES au contact d'ions salins et matière organique. Ce processus contrebalance le phénomène de stratification et se traduit au final par une augmentation de la vitesse de chute des MES et donc un dépôt massif de sédiments à l'embouchure des fleuves. Le temps de résidence des MES dans la colonne d'eau conditionne également les échanges entre les fractions dissoutes et particulières (sorption/adsorption). Enfin au niveau du sédiment superficiel l'énergie du milieu (frottement sur le fond) conditionne la **remobilisation** ou le **tassement** des sédiments et le devenir de la matière organique terrigène (diagénèse, enfouissement).

Or l'évolution de la morphologie des côtes, de la qualité des eaux et des cycles élémentaires de la matière à l'embouchure des fleuves et le long des plateformes continentales sont particulièrement sensibles (i) à la **pression anthropique** croissante (rejets industriels, agriculture intensive, aménagement portuaires et des bassins versants, activités minières, aquaculture, etc.) et (ii) aux effets du **changement climatique** (pluviométrie, érosion des sols,

fonte du pergélisol aux hautes latitudes, intensification des crues dans certaines régions tempérées).

De nombreux enjeux justifient donc de mieux connaître et d'assurer un suivi des flux sédimentaires dans les milieux fluvio-côtiers et de comprendre et maîtriser le devenir des substances terrigènes déversées par voie fluviale dans l'océan côtier. Ayant développé mon projet de recherche CNRS au sein de l'équipe 'Optique Marine et Télédétection, Applications à la Biogéochimie' du LOV, c'est assez logiquement que mes objectifs ont visé à améliorer nos connaissances sur les flux et le devenir des MES et du carbone organique terrigène à l'embouchure et dans les panaches fluviaux, comme expliqué en détail dans les paragraphes suivants.

L'océan joue un rôle central dans le système climatique terrestre par le transport de chaleur et les échanges d'eau qu'il induit et du fait de son importance dans le **cycle général du carbone**. Sa capacité à stocker du carbone et l'importance du flux de carbone à l'interface air-mer confèrent à l'océan un rôle clé dans le contrôle du contenu atmosphérique de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). De plus, c'est au niveau de l'interface eau-sédiment marin que s'opère l'enfouissement, pour des temps géologiques, des particules biogènes (et terrigènes), donc du **carbone organique**.

L'**océan côtier** joue un rôle crucial dans ce domaine (production primaire, échanges continents-océans). La question de l'impact du changement climatique global est donc particulièrement sensible sur les marges continentales où le stockage de carbone est jugé le plus important (Bauer et al. 2013). Hedges et Keil (1995) ont en effet estimé qu'environ 40% de l'enfouissement du carbone à l'échelle globale a lieu sur le plateau continental des grands fleuves. Les mesures satellites ont permis d'estimer la quantité de carbone issu de la production océanique primaire (Antoine et al. 1996) mais seule une très faible partie finit enfouie dans les sédiments marins. Dans l'océan côtier où la production primaire est estimée à  $6,9 \times 10^{15}$  gC.an<sup>-1</sup> (Wollast 1991), seulement **0.8%** du carbone produit (soit  $55 \times 10^{12}$  gC.an<sup>-1</sup> (Berger et al. 1989)) finirait **enfouie** dans les **sédiments**.

Les **échanges continents-océan** (essentiellement des **apports continentaux**) sont de quatre types : apports fluviaux et éoliens, érosion côtière et aux hautes latitudes apports par les glaciers et la banquise (Wagner et Dupont 1999). Les apports éoliens demeurent difficilement quantifiables du fait de la complexité des régimes de vent à l'échelle globale. Les apports par les glaciers aux hautes latitudes, a priori nettement moindres, représentent un intérêt croissant du fait de la fonte massive des glaces. Enfin, les apports fluviaux sont les plus élevés. Ils sont estimés entre 200 et  $500 \times 10^{12}$  gC.an<sup>-1</sup> (cf. références répertoriées dans Schlunz et Schneider (2000)), dont environ la moitié sous forme dissoute (Cauwet 2002). En comparaison, les apports d'eau douce souterrains et ceux dus au ruissellement peuvent être considérés comme secondaires. On estime de plus que les apports fluviaux solides sont 300 fois supérieurs à ceux dus à l'érosion côtière (Milliman et Syvitski 1992). Environ **10%** des apports fluviaux totaux (soit  $43 \times 10^{12}$  gC.an<sup>-1</sup>) se retrouveraient enfouis dans les sédiments de la plateforme continentale (Schlunz et Schneider 2000), valeur comparable au carbone organique d'origine océanique enfouie dans les zones côtières.

Les **apports fluviaux** dans l'océan côtier, jouent donc un rôle tout aussi important que la production primaire dans l'enfouissement du carbone organique, donc dans le cycle global du

carbone. Or le **changement climatique** va affecter 75% des principaux fleuves du monde (augmentation significative du débit liquide) (Labat et al. 2004). C'est pourquoi il est primordial de **préciser et assurer un suivi des apports fluviaux solides et de carbone organique terrigène** à l'océan côtier et le taux d'enfouissement actuel sur les marges continentales. Il apparaît surtout crucial de **connaître les processus physiques et biogéochimiques qui contrôlent ces flux** afin de prévoir quelle sera la réponse de l'océan au changement attendu du climat. Les travaux réalisés au cours de ces dernières années ont surtout été focalisés sur les interactions et flux de carbone entre les compartiments océan et atmosphère. Mes travaux de recherche ont pour but d'étudier ces interactions et de quantifier ces flux à l'interface continents-océans.

Les apports fluviaux solides et de carbone organique à l'océan sont très variables dans le temps (cycles saisonniers à multi-annuels) et géographiquement (e.g., les régions tropicale et arctique où se concentrent les plus grands fleuves). A ce jour, ils ne sont estimés que grossièrement. Ces estimations documentent les flux annuels mais pas les variations saisonnières. Ces imprécisions résultent du manque de mesures in situ disponibles à l'embouchure des fleuves et dans les panaches fluviaux. La solution pour affiner ces estimations serait d'équiper l'embouchure des plus grands fleuves de stations de mesure pour mesurer en continu le débit liquide (e.g. courantomètres) et les concentrations en sédiments en suspension et matière organique dissoute (e.g. turbidimètres et fluorimètres). Des analyses régulières devraient en plus documenter la teneur en carbone organique particulaire et dissous (POC et DOC) de ces substances. La mise en place d'un tel équipement est assez utopique. Néanmoins, l'utilisation de techniques d'observation telle que la télédétection satellite peut certainement pallier, du moins en partie, le déficit de mesures in situ à l'embouchure des fleuves.

C'est le transport, la chute et la sédimentation des particules terrigènes dans l'océan côtier qu'il faut étudier en priorité si on veut déterminer la quantité de carbone organique terrigène qui finira enfouie pour des temps géologiques dans les sédiments. Le stockage de la fraction dissoute du carbone organique terrigène dans l'océan (colonne d'eau et biosphère) est beaucoup plus court.

A ce jour, les apports fluviaux de carbone organique terrigène à l'océan et les taux d'enfouissement sur les marges continentales ne sont que grossièrement estimés du fait du manque d'observations pertinentes à intégrer dans des modèles numériques de transport. Dans ces conditions il est difficile d'étudier les mécanismes qui contrôleraient la reminéralisation massive du carbone organique terrigène dans l'océan côtier. Des efforts importants sont à réaliser pour : (i) préciser les apports fluviaux solides, dissous et de carbone organique terrigène à l'océan et (ii) déterminer le devenir des particules terrigènes déversées par les fleuves sur les marges continentales et les pertes de carbone organique subies dans la colonne d'eau et les sédiments des marges continentales.

Ces efforts permettront de mieux comprendre le rôle actuel joué par l'océan côtier dans le cycle global du carbone et seront utiles pour prédire sa réponse au changement attendu du climat.

## 1.2 Objectifs scientifiques

A partir des résultats antérieurs et des besoins répertoriés dans les sections précédentes, mes travaux de recherche se sont focalisés sur les apports solides fluviaux dans l'océan côtier et sur le devenir (dans la colonne d'eau) des particules terrigènes déversées par les fleuves sur les marges continentales.

Mes travaux ont eu et ont pour but de préciser quantitativement les apports fluviaux actuels et récents de sédiments et de carbone organique particulaire à l'océan (localement à régionalement) puis de contribuer à déterminer qualitativement leur devenir dans les eaux côtières, en fonction des forçages dynamiques en jeu. Ils s'appuient sur une observation 3D des concentrations en MES à l'embouchure et dans les panaches fluviaux en combinant des mesures physiques et bio-optiques in situ à des mesures satellites de la couleur de l'eau.

Les résultats attendus permettront à terme de mieux comprendre les transformations (floculation, agrégation) subies par les particules terrigènes exportées par les fleuves, de connaître leur temps de résidence dans la colonne d'eau et au final de déterminer sous quelle forme elles sédimentent sur les marges continentales. Il sera alors possible de mieux connaître et comprendre les pertes successives de carbone organique subies par les particules terrigènes dans la colonne d'eau et près du fond et de préciser le taux d'enfouissement du carbone organique terrigène fluvial sur les marges continentales.

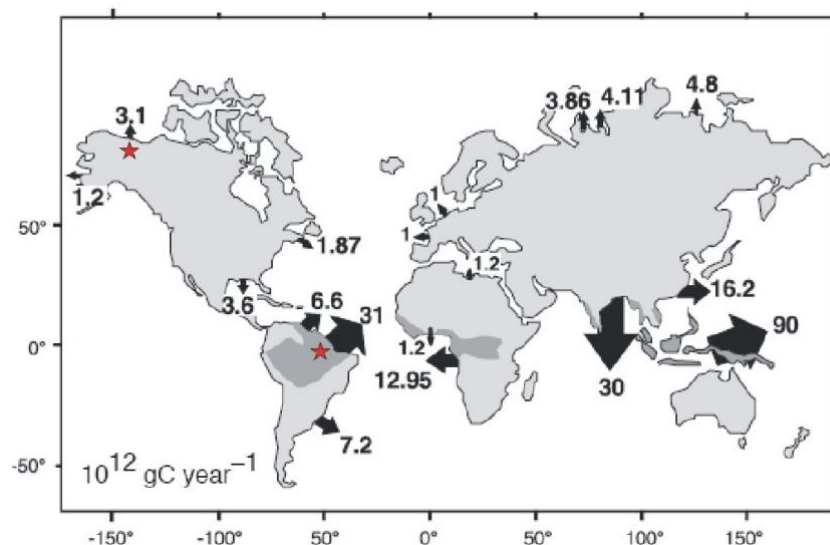


Figure 1. Estimation des flux de carbone organique exporté par les principaux fleuves du monde (reproduit d'après Schlunz et Schneider 2000).

Les **deux principaux objectifs** du projet sont de :

- 1) Quantifier les apports fluviaux solides et de carbone organique terrigène à l'océan.
  - Quels sont les flux de sédiments en suspension à l'embouchure des grands fleuves ?
  - Quelle quantité de carbone organique terrigène est déversée sous forme particulaire dans l'océan côtier ?
  - Quelle est la variabilité temporelle (saisonnière à pluri-annuelle) de ces flux ?



2) Déterminer, en fonction des conditions dynamiques, le devenir des eaux douces et sédiments en suspension déversés dans l'océan côtier par les fleuves

- En fonction des processus et forçages dynamiques, comment les eaux douces et turbides fluviales se mélangent-elles avec les eaux océaniques ?
- Comment et jusqu'où les particules terrigènes exportées par les fleuves sont-elles transportées par advection-dispersion dans les eaux côtières ?

Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie originale combinant mesures in situ et satellites a été développée. Elle a requis une caractérisation fine des propriétés optiques des eaux turbides étudiées via la mesure in situ, en laboratoire et la modélisation. A partir de cette caractérisation des relations empiriques et semi-analytiques robustes ont été établies entre la réflectance de ces eaux et la concentration en MES. Enfin la mise en application de ces relations à des séries temporelles d'observations satellites 'couleur de l'eau', calibrées, validées et complétées par des mesures in situ, ont permis d'étudier les flux solides et la dynamique des MES aux échelles spatio-temporelles souhaitées. Ces différentes étapes ont constitué autant d'objectifs méthodologiques intermédiaires dans le but de répondre aux questions posées.

- Propriétés optiques et biogéochimiques des eaux côtières turbides.

Les mesures in situ et satellites de la couleur de l'eau renseignent sur les propriétés optiques inhérentes et apparentes (IOPs et AOPs) des eaux qui à leur tour peuvent constituer des proxys robustes de la concentration en MES. Les relations entre la concentration en MES et les propriétés optiques de l'eau dépendent des propriétés physico-chimiques des MES, à savoir leur taille ou distribution de taille et leur indice de réfraction lui-même fonction de la minéralogie des MES et de leur teneur en matière organique (et de la nature de celle-ci) (e.g., Twardowski et al. 2001). Un effort tout particulier a ainsi été réalisé en vue de : (i) mesurer in situ et en laboratoire les propriétés optiques des eaux turbides étudiées tout en estimant et minimisant les erreurs associées à des mesures dans des milieux très absorbants et diffusants, (ii) mesurer in situ et en laboratoire la distribution de taille (PSD pour particle size distribution) et la composition (teneur en matière organique, POC, pigments phytoplanctoniques) des MES puis enfin (iii) mettre en relation les propriétés optiques, physiques et biogéochimiques des MES via des modèles empiriques, semi-analytiques et théoriques. La mise en application des relations établies a par ailleurs nécessité un effort tout particulier pour calibrer puis valider les corrections atmosphériques appliquées aux mesures satellites de la couleur de l'eau.

- Dynamique et flux sédimentaires à l'interface continent-océan.

Des méthodologies appropriées ont dû être développées afin d'estimer les flux solides exportés vers l'océan côtier à l'embouchure des fleuves étudiés, en tenant compte de leurs spécificités (e.g., delta, zone estuarienne macro-tidale) et en fonction des mesures in situ disponibles pour calibrer/valider et compléter les observations satellites.

De plus une utilisation optimisée des observations satellites a été développée en fonction de leurs résolutions spatio-temporelles afin de capturer au mieux les cycles temporels associés aux principaux forçages physiques contrôlant le transport et la dynamique des MES dans les milieux étudiés (cycles de marée, débits liquides, vent).

Ces travaux ‘méthodologiques’ sont détaillés dans la section 1,3.

### 1.3 Méthodologie

La **méthode générale** proposée prévoit de capturer, depuis l’embouchure des fleuves jusqu’à la limite de la marge continentale, le transport en suspension et la chute dans la colonne d’eau des particules terrigènes déversées par les fleuves.

La méthode proposée combine l’utilisation des **outils** suivants :

- Les bases de données régionales existantes et en cours de constitution
- Les mesures in situ embarquées, fixes et mobiles autonomes (e.g., gliders)
- La télédétection satellite (couleur de l’eau et de la température de surface).

Une grande partie des travaux est dédiée aux mesures in situ des concentrations en MES et POC et des propriétés optiques des systèmes étudiés (estuaires, embouchures et panaches fluviaux). Ces mesures in situ s’appuient en outre sur la modélisation bio-optique (transfert radiatif, théorie de Mie et simulations Monte-Carlo) afin de minimiser les incertitudes de mesures et mettre en relation des propriétés optiques et biogéochimiques des MES.

#### a. Estimation des apports solides fluviaux.

L’estimation des apports solides fluviaux est traditionnellement réalisée au niveau de stations hydrologiques souvent situées (très) en amont de l’embouchure physique des fleuves. La vitesse moyenne du courant est mesurée sur une section définie ( $S$ , en  $m^2$ , et fonction de la hauteur d’eau) afin d’obtenir le débit liquide fluvial ( $Q$  en  $m^3$  par unité de temps). La concentration en MES (en  $g.m^{-3}$ ) y est également mesurée au moins quotidiennement et souvent en sub-surface. Le débit solide ( $Q_s$  en masse par unité de temps) est simplement estimé en multipliant la concentration en MES par le débit liquide. Des mesures in situ, même ponctuelles, permettent quant à elles de connaître le rapport POC/MES, i.e., la teneur des MES fluviales en carbone organique, et ainsi d’estimer le flux de POC déversé dans l’océan.

Au cours des travaux rapportés ci-après, les mesures in situ des débits liquides fluviaux ont été utilisées et la télédétection satellite a permis d’estimer régulièrement la concentration en MES au niveau de l’embouchure des fleuves. Cette méthode ne requiert donc pas la mesure in situ régulière de la concentration en MES à l’embouchure des fleuves, mesures peu souvent disponibles notamment dans les régions tropicales et arctiques. Elle présente deux limites, à savoir l’absence d’observations satellites par temps couvert et l’estimation de la concentration en MES strictement dans l’épaisseur d’eau en sub-surface d’où provient l’éclairement solaire rétrodiffusé (Gordon et McCluney 1975), soit en fonction de la longueur d’onde et la turbidité de l’eau du premier mètre (ou moins) sous l’interface air-eau (Irigoien et Castel 1997). Pour pallier à cette dernière limite des mesures in situ profilantes sont à priori requises pour documenter les variations de concentrations en MES le long de la colonne d’eau (e.g., Lorthiois 2012).

Les estuaires méso à macro-tidaux représentent une difficulté toute particulière en vue d'estimer les débits ou flux exportés vers l'océan. L'alternance des courants de marée (flot et jusant) y requiert l'estimation du flux solide résiduel sur un à plusieurs cycles de marée. Une solution a été proposée dans le cadre d'une étude sur l'estuaire de la Gironde en vue d'estimer le débit solide mensuel exporté vers l'océan ([Doxaran et al. 2009](#), section 3,3).

b. Devenir des apports fluviaux.

Il est ici question d'observer et décrire à des échelles de temps et d'espace pertinentes la dynamique des MES dans les estuaires et/ou panaches fluviaux, et de déterminer le contrôle exercé par les différents forçages physiques. Une vision 3D de cette dynamique est requise à nouveau afin de pouvoir étudier la chute et remise en suspension des MES mais aussi le transport par advection dans le panache de surface et dans les néphéloïdes intermédiaires et de fond. Ces derniers résultent de la floculation des MES au contact d'eau salée et de matière organique ainsi que du transport par gravimétrie des particules les plus grossières (e.g., sables, graviers). Si la télédétection satellite s'avère très bien appropriée en termes de résolutions spatio-temporelles elle ne permet que d'observer les MES dans les eaux de surface (panache fluvial). Des mesures in situ profilantes sont donc à nouveau requises pour compléter les observations satellites. Les mesures physiques et bio-optiques à bord de plateformes autonomes telles que les gliders et flotteurs-profileurs sont requises pour obtenir une vision 3D de la dynamique des MES (Figure 2).

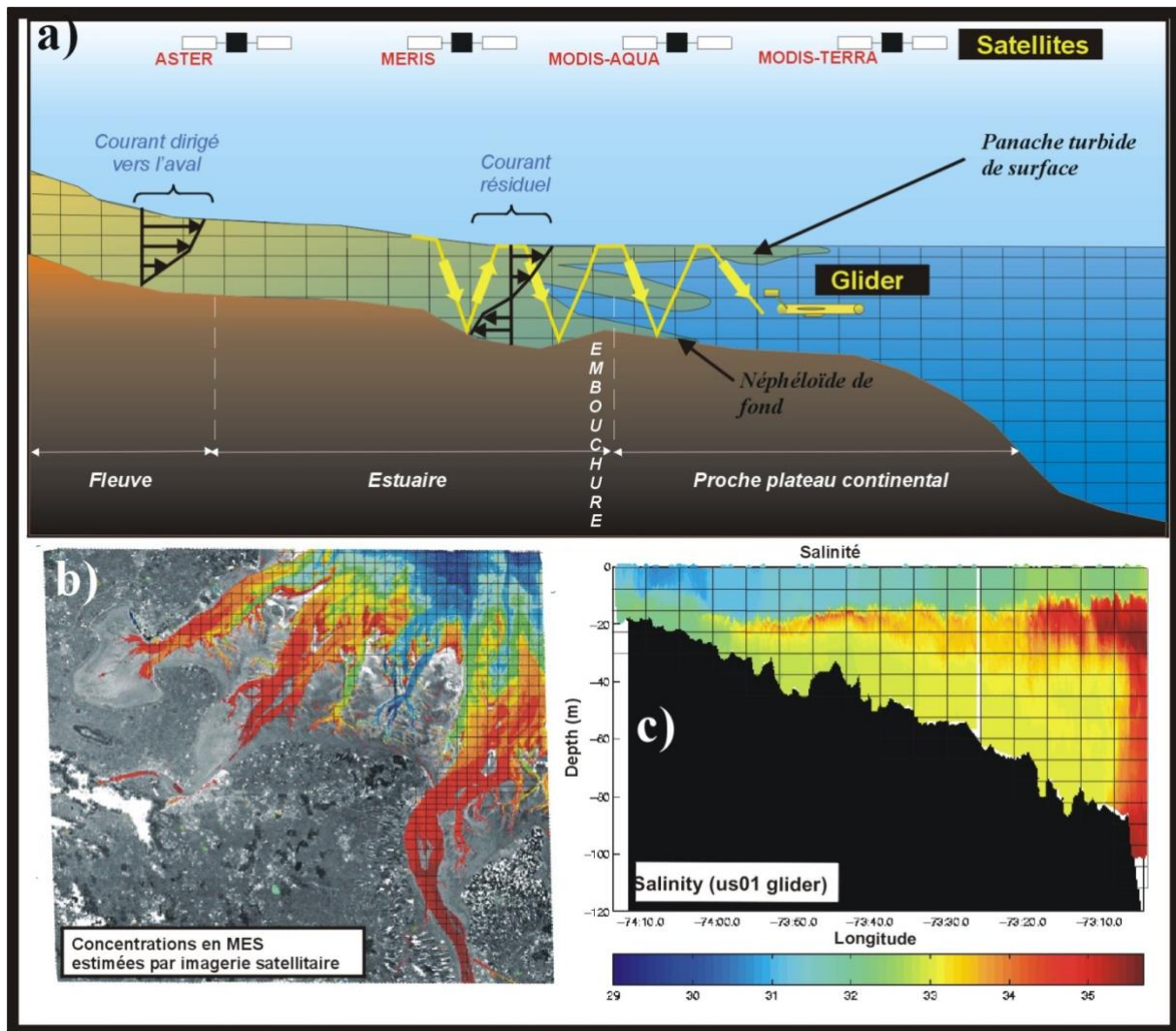


Figure 2. (a) Coupe transversale schématique d'un continuum (fleuve - estuaire - proche plateau continental). Les mesures satellites documentent sur les propriétés optiques des eaux de surface. Les mesures in situ (e.g. glider) renseignent en continu sur les structures physiques et bio-optiques verticales de la colonne d'eau.

(b) Exemple de cartographie satellite (ici SPOT-HRV) des concentrations de surface en MES à l'embouchure d'un fleuve (estuaire), source : EARSeL proceedings 2004).

(c) Les mesures in situ profilantes (ici glider) permettent d'examiner la stratification des eaux douce et salée (ici le panache turbide du fleuve Hudson, source : <http://marine.rutgers.edu>).

Superposition de la grille de calcul factice d'un modèle hydrosédimentaire.

La résolution spatiale ( $\approx 300$  m) des données satellites MODIS-250 et MERIS-FR a permis d'étudier les estuaires, embouchures et panaches fluviaux en mettant en application en routine des méthodes développées pour des données à haute résolution spatiale (SPOT, Landsat). Les radiomètres à bord des plateformes satellites récentes et à venir (Landsat-8, Sentinel-2) en plus des données couleur de l'eau (e.g., VIIRS et OLCI) devraient permettre de généraliser ce type d'études. La résolution temporelle (1 à 10 jours) des capteurs satellites ci-dessus peut représenter une limite pour l'étude du transport des MES dans des milieux aussi dynamiques que les embouchures et panaches fluviaux. Cette résolution procure cependant un nombre

d'observations suffisant par mois pour étudier l'influence des cycles de marée vive-eau / morte-eau et les cycles saisonniers liés au débit liquides fluviaux et régimes de vent. L'exploitation des premières mesures radiométriques à bord des capteurs satellites géostationnaires (SEVIRI et GOCI) autorise quant à elle l'étude de la dynamique journalière des MES en fonction des conditions de vent et cycles de marée diurnes (Neukermans et al. 2012a, section 3.2).

## 2. Propriétés optiques des eaux côtières turbides.

### 2.1 Propriétés optiques apparentes

Les mesures satellites 'couleur de l'eau' corrigées des effets atmosphériques et des effets de réflexion à l'interface air-eau permettent de retrouver la réflectance de l'eau. Cette réflectance de l'eau est une mesure directionnelle définie comme le rapport entre la luminance qui émerge de l'eau (water-leaving radiance,  $L_w$  en  $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ ) dans la direction définie par les angles de vue zénithal et azimutal et l'éclairement incident ou descendant juste au-dessus de la surface de l'eau (downwelling irradiance,  $E_d$  en  $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ ) :

$$Rrs(\lambda, \theta, \varphi) = \frac{L_w(\lambda, \theta, \varphi)}{E_d(\lambda)} \quad (1)$$

$Rrs$ , en  $\text{sr}^{-1}$ , est la réflectance de télédétection qui varie en fonction de la longueur d'onde,  $\lambda$ . Ignorant les effets directionnels de  $L_w$ , on considère également la réflectance de l'eau,  $R_w = \pi \times Rrs$ , soit une valeur sans dimension qui peut être exprimée comme le pourcentage de l'éclairement incident rétrodiffusé par la colonne d'eau.

En vue de télédétecter les particules en suspension dans les eaux côtières turbides (estuaires, embouchures de fleuves et panaches turbides), mes travaux ont eu pour but de multiplier les mesures in situ de la réflectance multi à hyper-spectrale de l'eau en minimisant les incertitudes de mesure (cf. paragraphe 2.1.1). Suivant une approche initiale résolument empirique, les propriétés bio-géochimiques (concentrations en MES, en chlorophylle-a et en matières organiques dissoutes colorées (CDOM), composition et distribution de taille des MES) des eaux de surface ont été mesurées simultanément. Ceci dans le but d'aller plus loin dans « l'exploration » du potentiel de la télédétection de la couleur de l'eau à retrouver des informations quantitatives et qualitatives sur les constituants colorés des eaux turbides côtières.

#### 2.1.1 Mesures in situ (protocoles, incertitudes et réduction des erreurs).

Les mesures radiométriques réalisées au cours de (et avant) ma thèse à l'aide d'un Spectron SE-590 m'ont très tôt alerté sur les incertitudes liées à ces mesures et de fait à la détermination du signal  $Rrs$  suivant Mobley 1999) :

$$Rrs(\lambda, \theta, \varphi) = \frac{Lt(\lambda, \theta_v, \varphi_v) - \rho \times Lsky(\lambda, \theta, \varphi)}{Ed(\lambda)} \quad (2)$$

Avec :

- $Lt$ , la luminance remontante de l'eau mesurée au-dessus de l'eau dans la direction de visée définie par les angles  $\theta_v$  et  $\varphi_v$ ,
- $Lsky$ , la luminance du ciel mesurée dans la direction de visée définie par les angles  $\theta_v$  ( $= \theta_v + 90^\circ$ ) et  $\varphi_v$ , et
- $\rho$ , la fraction de la luminance du ciel  $Lsky$  directement réfléchi à l'interface air/eau vers l'angle de visée.

L'éclairement incident est mesuré avec un capteur d'éclairement hors de tout effet d'ombre et pointant vers le zénith, ou avec un capteur de luminance pointant une cible en Spectralon dont la réflectance est connue.

Les calculs de transfert radiatif réalisées par Mobley (1994, 1999) ont permis de :

- déterminer les angles de visée optimaux pour une correction de ces effets de réflexion de surface ( $\theta_v = 40^\circ$  par rapport au nadir et  $\varphi_v = 135^\circ$  par rapport au soleil) et
- tabuler les valeurs de cette fraction  $\rho$  en fonction de l'angle zénithal solaire, de la couverture nuageuse et la rugosité de surface (vitesse du vent).

Il en découle des incertitudes sur les 3 paramètres mesurés et sur la fraction  $\rho$  estimée et donc sur le paramètre final  $Rrs$ .

Mes travaux ont contribué à comprendre et minimiser les erreurs associées à ces mesures, puis quantifier les incertitudes qui en découlent. A noter en particulier une expérimentation in situ (dans le Plymouth Sound et l'estuaire Tamar) réalisée dans des conditions optimales (conditions d'illumination stables, eaux turbides, rugosité de surface quasi-nulle). En tenant compte de l'atténuation exponentielle de la luminance remontante dans l'eau en fonction de la profondeur ( $Lu(z) = Lu(0) \times \exp(-K_{Lu} \times z)$ ), ces mesures ont permis d'estimer avec précision  $Lu$  à profondeur nulle puis la luminance émergente de l'eau ( $Lw$ ) (Figure 3 (a-c)). Des mesures de  $Lt$  et  $Lsky$  réalisées en quasi-simultanée ont été utilisées pour estimer avec quelle précision  $Lw$  peut être retrouvé à partir de mesures au-dessus de l'eau. Les résultats se sont avérés satisfaisants (Figure 3(d-e)) mais les incertitudes associées à  $Lw$  significatives et peu variables spectralement. Aussi l'utilisation de rapports spectraux de réflectance a-t-elle été préconisée pour minimiser ces erreurs ou incertitudes (cf. Figures 6 et 7 dans [Doxaran et al. 2004a](#)). Cette recommandation permettra d'ailleurs de comprendre, à posteriori, les observations faites pendant la thèse ([Doxaran et al. 2003](#)).

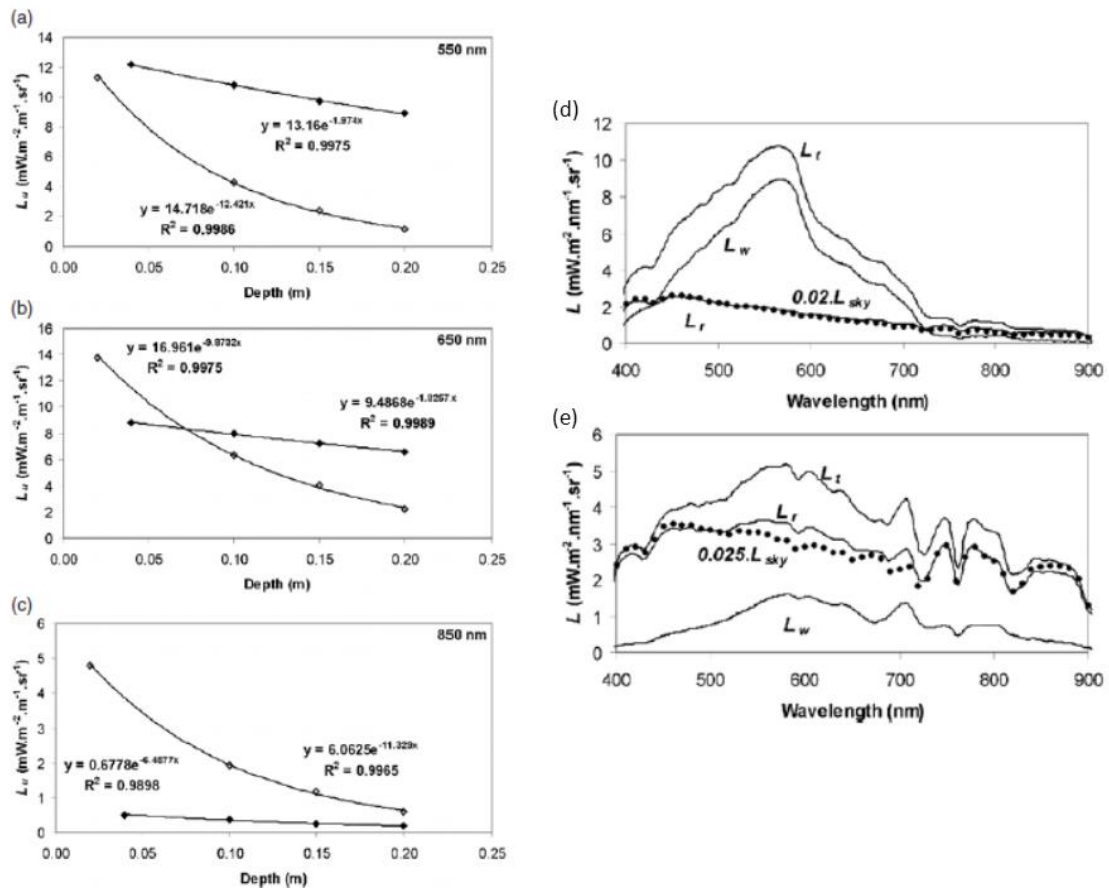


Figure 3. (a-c) Mesure de la luminance remontante dans l'eau ( $L_u$ ), en fonction de la profondeur, à 550, 650 et 850 nm, dans des eaux turbide (MES = 49 mg/l) et peu turbide (MES = 4 mg/l). L'atténuation exponentielle du signal en fonction de la profondeur permet d'estimer  $L_u(0)$  puis  $L_w$ . (d-e) Comparaison avec la luminance remontante mesurée au-dessus de l'eau ( $L_t$ ). La différence ( $L_t - L_w$ ) permet de retrouver la luminance due aux effets de réflexion de surface et donc la fraction  $\rho = (L_t - L_w)/L_{sky}$ . Source : Doxaran et al. (2004a).

Un travail spécifique a ensuite été réalisé pour quantifier les erreurs associées à des mesures indirectes de  $Ed$ , via l'utilisation d'une plaque en Spectralon et d'un capteur de luminance (Doxaran et al. 2004b). Au cours d'une simple expérimentation réalisée sur le toit d'un immeuble, un capteur d'éclairement (Trios RAMSES-ACC) a été placé au-dessus de tout objet et pointé vers le zénith pour mesurer  $Ed$ . Ce même éclairement  $Ed$  a été estimé en pointant un capteur de luminance (Trios RAMSES-ARC) vers une plaque en Spectralon placée à l'horizontale :  $Ed(0+) \approx \pi \times L_{dspec} / R_g$ , avec  $L_{dspec}$  la luminance mesurée et la réflectance de la plaque en Spectralon. Les résultats ont montré que les effets d'ombre sur la plaque en Spectralon pouvaient facilement engendrer une sous-estimation de 50 à 70% du signal, alors que le suivi strict de recommandations de base pour minimiser tout effet d'ombres autorise une estimation précise (+/-5%) du signal  $Ed$  (cf. Figures 2 et 3 dans Doxaran et al. (2004b)).

Les résultats obtenus à partir de mesures réalisées sous l'interface air/eau (Figure 3(a-c)) se sont par la suite avérées assez exceptionnelles, i.e., seules des conditions de ciel et de rugosité de surface optimales ainsi que des moyens techniques adaptés permettent de mesurer in situ aussi précisément l'atténuation de la lumière en fonction de la profondeur au centimètre près

entre 0 et 50 cm de fond. Par ailleurs les propriétés optiques et physiques des eaux côtières turbides varient souvent en fonction de la profondeur (stratifications (e.g., Forget et al. 2001)) et les effets d'ombre induite par les radiomètres peuvent être insuffisamment corrigés notamment dans les régions spectrales rouge et proche-infrarouge (Gordon et Ding 1992). De ce fait j'ai privilégié les mesures radiométriques réalisées in situ au-dessus de l'eau pour déterminer  $Rrs$  (e.g., Doxaran et al. 2006), en adoptant le protocole défini par Mobley (1999) et en adaptant le tri sélectif des mesures préconisé par Ruddick et al. (2006) :

- (i) sélection de périodes d'éclairement ( $Ed$ ) stable et faible tilt,
- (ii) élimination des spectres  $Lt$  et  $Lsky$  déviant des valeurs médianes avant calcul des valeurs moyennes de  $Ed$ ,  $Lt$  et  $Lsky$  puis
- (iii) détermination de  $Rrs$  après avoir calculé le coefficient de réflexion à l'interface air/eau,  $\rho$ , en fonction de la couverture nuageuse et de la vitesse du vent (cf. Eqs. 22-24 dans Ruddick et al. 2006).

A noter que ce protocole de mesure (géométrie et tri des données) peut être simplifié lorsque les mesures sont réalisées sur une plateforme fixe et stable (e.g., un ponton) dans un environnement en partie confiné (e.g., estuaire) où la zone de fetch est limitée.

Un paramètre optique probablement insuffisamment documenté et exploité au cours de mes travaux est l'épaisseur optique sous l'interface air/eau d'où provient le signal détecté par les radiomètres satellites. Or il s'agit d'un paramètre fondamental car il définit la couche de surface des eaux dans lesquelles sont estimées les concentrations en substances colorées, dans des eaux peu profondes et souvent fortement stratifiées. Ces épaisseurs optiques varient fortement en fonction de la longueur d'onde (cf. Figure 3(a-c)), ce qui pourrait apporter des informations complémentaires concernant la stratification des masses d'eau en surface. Dans les environnements que j'ai étudiés (estuaires et panaches fluviaux), ces épaisseurs optiques sont en général faibles (<1m) et fortement corrélées à la concentration en MES (Gordon et McCluney 1975, Irigoien et Castel 1997), ce qui en autorise une estimation facile bien que relativement peu précise. Des améliorations sont donc possibles à ce niveau (cf. section 2.3).

### 2.1.2 Signatures spectrales : réflectance de télédétection

L'étape suivante des travaux a consisté à caractériser la signature spectrale des eaux turbides échantillonnées dans les domaines spectraux visible (400-700 nm), PIR (700-900 nm) et même moyen-infrarouge (SWIR : 900-1300 nm). Là encore la première approche était empirique : observer la signature spectrale de ces eaux en s'appuyant sur des mesures in situ de qualité (cf. section 2.1.1). Puis il a été question de comprendre et expliquer ces signatures spectrales via la reproduction des spectres  $Rrs$  mesurés à l'aide d'un modèle semi-analytique. Il s'agissait là en fait de poursuivre et perfectionner la démarche déjà entreprise en thèse (Doxaran et al. 2003).

Observations - La signature spectrale des eaux turbides à extrêmement turbides dominées par les sédiments en suspension résulte en premier lieu d'une rétrodiffusion croissante de la lumière par les MES. Cette rétrodiffusion de la lumière, assez lisse spectralement, compense progressivement l'absorption de la lumière par les molécules d'eau dans le visible, puis dans le PIR voire même dans le SWIR. C'est ainsi l'inverse du spectre d'absorption de la lumière par l'eau pure qui caractérise la réflectance des eaux turbides dominées par les MES dans le rouge, le PIR et le SWIR. Dans le bleu et le vert, l'absorption de la lumière par les particules non-algales (NAP) augmente exponentiellement lorsque la longueur d'onde décroît (e.g.,

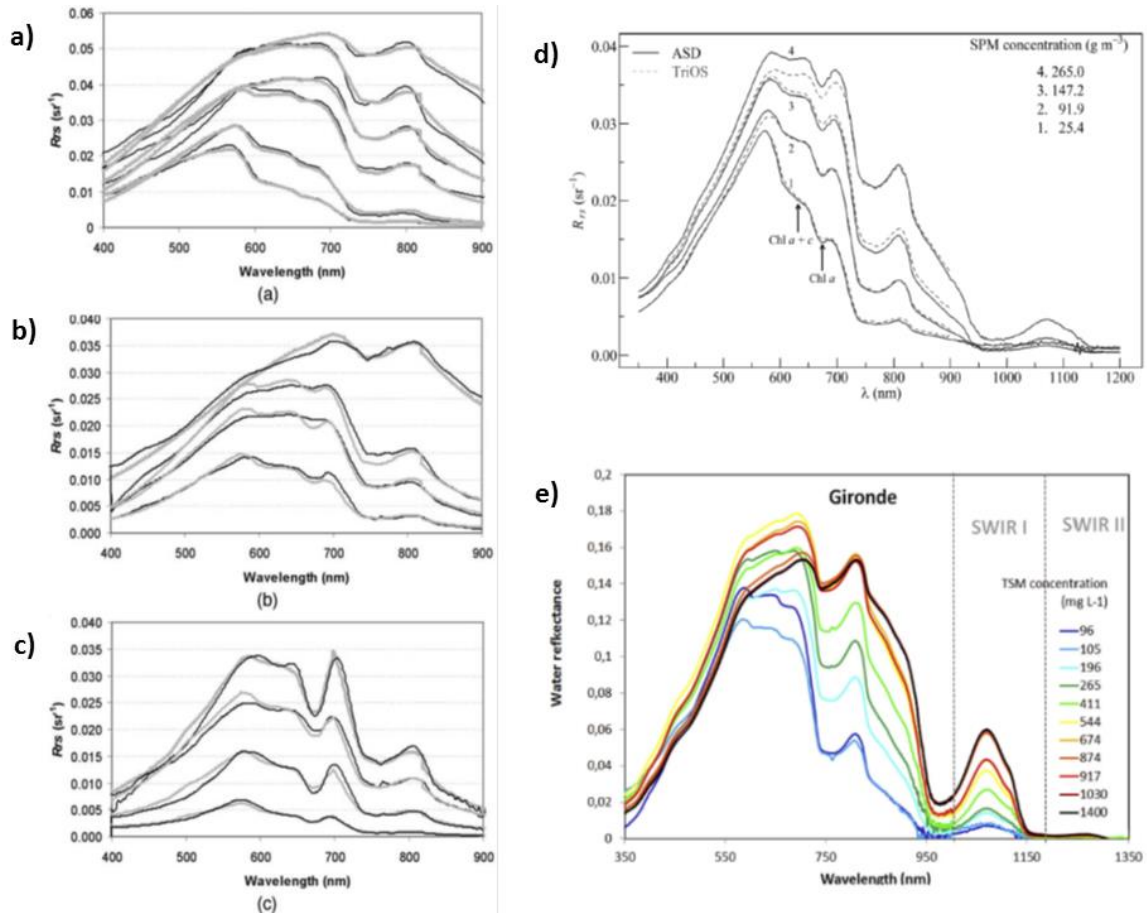


Babin et al. 2003a). C'est cette absorption de la lumière par les NAP (ainsi que par le CDOM) qui conditionne la signature spectrale des eaux turbides aux courtes longueurs d'onde visibles. Cela se traduit par une 'saturation' du signal *Rrs* entre 400 et 550 nm au-delà d'une certaine concentration en MES. Dans les gammes de concentrations rencontrées dans les eaux de surface des estuaires et panaches fluviaux étudiés (10 – 1500 mg/l), c'est essentiellement dans le rouge, et plus encore dans le PIR et le SWIR, que le signal *Rrs* augmente avec la concentration en MES.

Ces signatures spectrales sont clairement observées sur les spectres *Rrs* typiques mesurés in situ, entre autres dans les estuaires de la Gironde et du Tamar et en Baie de Bourgneuf (Figure 4). L'augmentation de la concentration en MES se traduit par une augmentation de *Rrs* dans le rouge et surtout le PIR, mais également dans le SWIR. Cette signature spectrale non-nulle dans le SWIR des eaux turbides dominées par les MES a été mise en évidence par Knaeps et al. (2012) et étudié en détail dans le cadre d'un projet de recherche dédié (SeaSWIR, cf. section 5) (Knaeps et al. 2015).

Une autre spécificité majeure concernant la signature spectrale des eaux turbides échantillonnées est le 'creux' parfois observé à 675 nm sur les spectres *Rrs*. Ce 'creux' a tout d'abord été observé sur les spectres *Rrs* des eaux dans la zone de maximum de turbidité de l'estuaire Tamar (Figure 4(c)), puis régulièrement dans les eaux de la Baie de Bourgneuf (Figure 4(d)). Il correspond en fait au second pic d'absorption du phytoplancton (chlorophylle-a) et ce type d'observations avait déjà été réalisé notamment dans certains lacs turbides et productifs (Dall'Olmo et al. 2003, Dall'Olmo et Gitelson 2005). Du fait de la forte rétrodiffusion de la lumière par les MES dans cette région spectrale, le signal *Rrs* y est suffisamment élevé pour observer ce pic d'absorption. Il peut sembler surprenant de trouver de fortes concentrations en Chla (donc en phytoplancton) dans des eaux estuariennes turbides (riches en NAP) où l'éclairement solaire pénètre peu dans la colonne d'eau ne favorisant pas la photosynthèse. Ce phytoplancton est en fait associé à la remise en suspension par les courants de marée d'algues benthiques qui se développent sur les zones d'estran (e.g., Gernez et al. 2014).

Mes travaux ont ainsi contribué à caractériser la signature spectrale des eaux côtières turbides dominées par les sédiments en suspension, en particulier dans le PIR et le SWIR. Ces régions spectrales y sont d'un grand intérêt pour la télédétection des MES (cf. section 2.3). Ils ont aussi mis en évidence la signature spectrale due la chlorophylle-a (pic d'absorption dans le rouge).



**Figure 4. Signatures spectrales typiques d'eaux estuariennes turbides dans le visible, PIR et SWIR pour différentes concentrations en MES et Chla. Ces spectres  $R_{rs}$  ont été mesurés in situ dans l'estuaire de la Gironde (a), estuaire du Tamar (b-c), Baie de Bourgneuf (d) et estuaire de la Gironde (e). Sources : Doxaran et al. 2006 (a-c), Gernez et al. 2014 (d) et Knaeps et al. 2015 (e).**

**Modélisation** – La réflectance de l'eau, définie comme le rapport entre l'éclairement remontant et l'éclairement incident à une profondeur nulle  $R(0^-)$ , est fondamentalement fonction de deux propriétés optiques inhérentes : les coefficients d'absorption et de rétrodiffusion du milieu ( $a$  et  $b_b$ , en  $m^{-1}$ , cf. section 2.2 pour définitions et décompositions). Elle peut être décrite comme une fraction de l'éclairement incident qui n'a pas été absorbé et a été rétrodiffusé.  $R(0^-)$  puis  $R_{rs}$  peuvent être reliés à  $a$  et  $b_b$  via des calculs de transfert radiatif (Mobley 1994, Doron et al. 2011) ou des formulations semi-analytiques simplifiées (Gordon et al. 1975, Morel et Prieur 1977) du type :

$$R(0^-) = g \times \frac{b_b}{a + b_b} \quad (3)$$

Où le coefficient  $g$ , parfois considéré comme constant, varie en fonction de l'angle solaire et des propriétés optiques inhérentes. Des résultats récents ont montré qu'en fait  $g$  peut varier d'un facteur 2 dans les eaux fortement chargées en MES (Lee et al. 2016).

C'est cette formulation simplifiée (Eq. 3) que j'ai utilisée en priorité au cours de mes travaux visant à modéliser  $R_{rs}$  en vue de comprendre et reproduire l'influence de l'absorption et la

rétrodiffusion de la lumière par les MES sur le signal  $Rrs$  mesuré in situ ou dérivé de mesures satellites (Doxaran et al. 2003, 2006, 2012). Or si cette formulation est en première approximation valide dans le milieu océanique elle l'est moins dans les milieux diffusants tels que les eaux côtières turbides où les MES conditionnent fortement les propriétés optiques. Une formulation semi-analytique mieux appropriée car spécifiquement développée pour les milieux diffusants a été rapportée par Shen et al. (2010) et repris par Lee et al. (2016) :

$$R(0^-) = \frac{b_b / a}{1 + b_b / a + \sqrt{1 + 2 \times b_b / a}} \quad (4)$$

Calculs de transfert radiatif (Doron et al. 2011) et formulations semi-analytiques (Eqs. 3 et 4) ont été utilisés au cours de mes travaux essentiellement en vue de comprendre comment les variations spectrales et en magnitude de  $Rrs$  sont sensibles aux variations de concentrations en MES, en fonction de la façon dont ces MES absorbent et rétrodiffusent la lumière. L'objectif principal était d'établir la (ou les) relation(s) les plus robustes entre la réflectance de l'eau  $Rrs$  et la concentration en MES (cf. section 2.3). La validité de tels modèles (Eqs. 3 et 4) repose enfin sur la validité de la paramétrisation des propriétés optiques (coefficients d'absorption et rétrodiffusion) des substances optiquement actives dans l'eau. C'est précisément l'objet de la section suivante (2.2).

## 2.2 Propriétés optiques inhérentes.

Il s'agit là d'une étape cruciale en optique marine : la connaissance des propriétés optiques inhérentes (IOPs) permet de faire le lien entre la composition (indice de réfraction), la taille ou distribution de taille et la concentration des MES d'une part et la réflectance de l'eau d'autre part via un code de transfert radiatif ou l'utilisation de relations semi-analytiques (e.g., Eqs. 3 et 4). Sans négliger bien sûr les propriétés optiques des autres constituants colorés de l'eau : molécules d'eau et CDOM, et en distinguant le phytoplancton (en l'occurrence son principal pigment, la chlorophylle-a (Chla)) des particules non-algales (NAP). Les coefficients d'absorption et rétrodiffusion des eaux naturelles sont en effet les sommes des contributions respectives de ces principaux constituants colorés : molécules d'eau, Chl, NAP et CDOM.

La paramétrisation des propriétés optiques des MES requiert des mesures in situ et/ou en laboratoire des IOPs. De telles mesures sont complexes et à priori associées à de fortes incertitudes dans les eaux côtières turbides riches en MES. Mes travaux ont tout d'abord contribué à quantifier, comprendre et parfois réduire les incertitudes associées à ces mesures dans les domaines spectraux visible, PIR et SWIR. Ils ont ensuite permis de mieux paramétrer les IOPs des MES dans les eaux côtières riches en sédiments en suspension.

### 2.2.1 Erreurs et incertitudes de mesures.

Ayant développé et mis en application des relations empiriques (notamment entre  $Rrs$ , MES et Chla) au cours de ma thèse et de mon post-doctorat, mon objectif a alors été d'explicitier les relations établies grâce à la connaissance des IOPs. Cette opportunité m'a été donnée à mon

arrivée au LOV (cf. sous-sections ci-après). Un long travail a cependant été nécessaire afin de s'assurer de la validité des IOPs qui peuvent être mesurées dans des eaux côtières turbides et diffusantes (régime de diffusions multiples) à l'aide d'instruments optiques (photomètres et diffusiomètres) initialement développés pour l'océan ouvert (régime de simple diffusion).

Ce travail a été possible grâce à un travail en collaboration avec E. Leymarie au LOV et l'exploitation de l'excellent outil développé par ce dernier : SimulO<sup>1</sup>. SimulO est un code de Monte Carlo 3D qui permet de suivre la trajectoire de photons un à un depuis leur source jusqu'au point où ils sont absorbés.

Cet outil a tout d'abord été utilisé pour comprendre et quantifier les erreurs associées à la mesure des coefficients d'atténuation et absorption (et par différence de diffusion particulaire) dans les eaux naturelles à l'aide d'un AC-9 (Wetlabs) (Leymarie et al. 2010), en appliquant les corrections préconisées par le constructeur. Les résultats ont montré que :

- les erreurs relatives associées au coefficient d'absorption sont en général inférieures à 25% mais s'approchent de 100% dans les eaux très diffusantes sans disposer de longueur d'onde de référence où l'absorption est négligeable (ou connue, ce qui est possible si une mesure annexe est réalisée avec un point-source integrating-cavity absorption meter (PSICAM (Rottgers et Gehnke 2012)) ;
- les erreurs associées aux coefficients d'atténuation et diffusion sont plus stables (de l'ordre de 20%) indépendamment du type d'eau échantillonnée, et essentiellement dépendantes de la fonction de phase particulaire.

Les mesures AC-9 ont ainsi été utilisées prioritairement pour étudier l'atténuation et la diffusion de la lumière par les MES.

Une seconde étude a été réalisée pour comprendre et quantifier les erreurs et incertitudes associées au coefficient de rétrodiffusion particulaire déduit de mesures réalisées avec les deux instruments les plus utilisés en optique marine : l'ECO-BB (Wetlabs) et le Hydroscat (Hobilabs) (Doxaran et al. 2016). Les résultats ont confirmé/montré que :

- Du fait de ses faibles dimensions (chemin optique nominal de 1.6 cm) les mesures réalisées avec un ECO-BB ne requièrent que d'être corrigées des pertes dues à l'absorption pour déterminer le signal rétrodiffusé,  $\beta(124^\circ, \lambda)$  en  $\text{m}^{-1}.\text{sr}^{-1}$ , avec une incertitude inférieure à 5% ;
- En raison de plus grandes dimensions (chemins optiques nominaux de 10 à 15 cm), les mesures réalisées avec un Hydroscat (4 ou 6) doivent être corrigées des pertes subies par absorption et diffusion. La correction sigma recommandée par Hobilabs s'est avérée très imprécise et une méthode de correction bien plus performante (erreurs inférieures à 10% pour des coefficients de diffusion inférieurs à  $30 \text{ m}^{-1}$ ) a été développée, mise en application et validée par des mesures indépendantes (fermeture optique) ;
- Les fonctions de phase de diffusion des particules marines étant très piquées vers l'avant, les mesures de rétrodiffusion réalisées dans des eaux turbides très diffusantes

---

<sup>1</sup> <http://omtab.obs-vlfr.fr/SimulO/index.htm>

restent représentatives d'une mesure de diffusion vers l'arrière à un angle proche de celle spécifiée par les constructions, même en régime de diffusion multiples.

Ces résultats se sont avérés très encourageants en vue de poursuivre l'étude du coefficient de rétrodiffusion particulaire et des informations que contient ce paramètre (qui peut être mesuré in situ mais aussi dérivé des mesures satellites) sur la concentration, composition et taille des MES.

En marge de ces travaux, on notera l'exercice réalisé par [McKee et al. \(2005\)](#) pour démontrer comment les incertitudes de mesures cumulées sur le rapport de rétrodiffusion particulaire peuvent fausser l'interprétation des valeurs en termes de variations de composition et taille des MES.

### 2.2.2 Coefficients d'absorption et d'atténuation ( $a$ et $c$ ).

Des mesures régulières ont été réalisées dans les eaux côtières étudiées afin de caractériser puis modéliser leurs propriétés optiques. Un effort particulier a été consenti pour mesurer le coefficient d'absorption en discriminant les contributions respectives des constituants colorés en plus de l'eau (NAP, Chl et CDOM). Ces mesures ont été réalisées in situ (Wetlabs AC-9) et en laboratoire (spectrophotomètre à sphère intégrante). Il a ainsi été possible de classer spatialement et spectralement les masses échantillonnées en fonction de la substance colorée prédominante optiquement. Ce travail a été réalisé en milieux estuariens ([Doxaran et al. 2006b](#)), dans les panaches fluviaux ([Bé langer et al. 2013](#), [Matsuoka et al. 2014](#)) et dans des eaux côtières contrastées comme en Mer du Nord ([Astoreca et al. 2012](#)).

En plus de résultats attendus (e.g., corrélation entre la concentration en MES et le coefficient d'atténuation, variations spectrales en loi puissance du coefficient d'atténuation), des cas particuliers voire atypiques ont pu être observés et en grande partie explicités. A titre d'exemple les variations spectrales de  $c$  observées au cours d'un bloom de phaeocystis en Mer du Nord ([Astoreca et al. 2012](#)). D'après les résultats obtenus en utilisant la théorie de Mie et des mesures LISST (Sequoia) in situ, ces variations (augmentation de  $c$  en fonction de la longueur d'onde) résultent de la distribution de taille 'en bosses' de MES essentiellement organiques (donc phytoplanctoniques) (Figure 5).

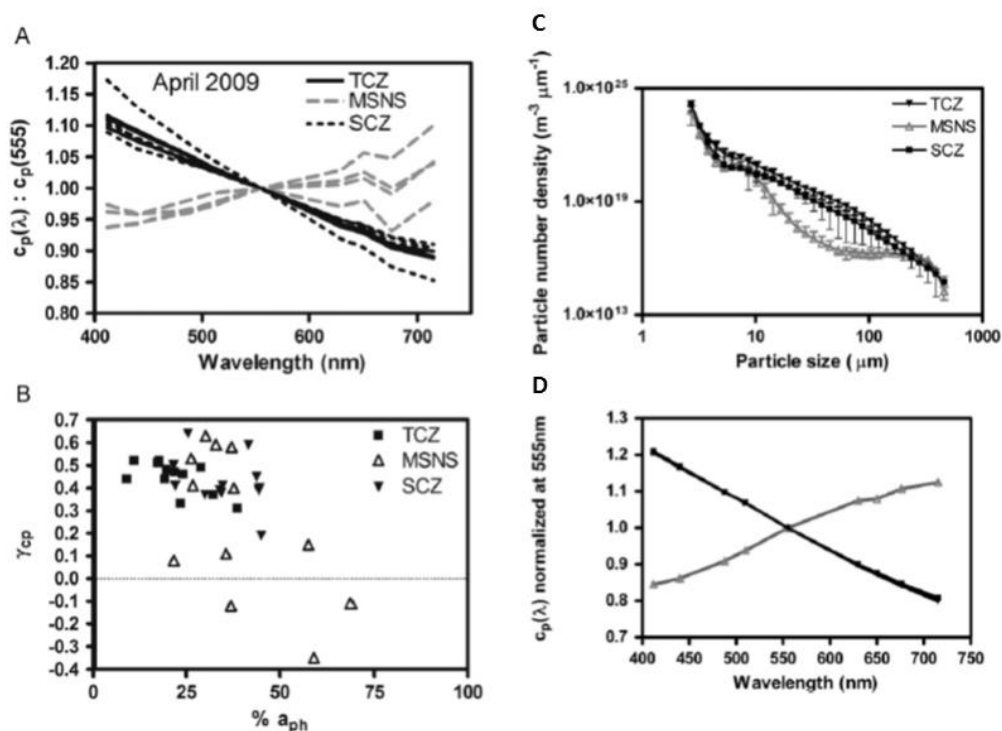


Figure 5. (a-b) Variations spectrales du coefficient d'atténuation particulaire ( $c_p$ ) mesurées en Mer du Nord et variations de la pente spectrale associée ( $\gamma_{cp}$ ). (c-d). Distributions de taille mesurées avec un LISST-100X (Sequoia) et variations spectrales de  $c_p$  associées (calculs utilisant la théorie de Mie). Source : Astoreca et al. 2012.

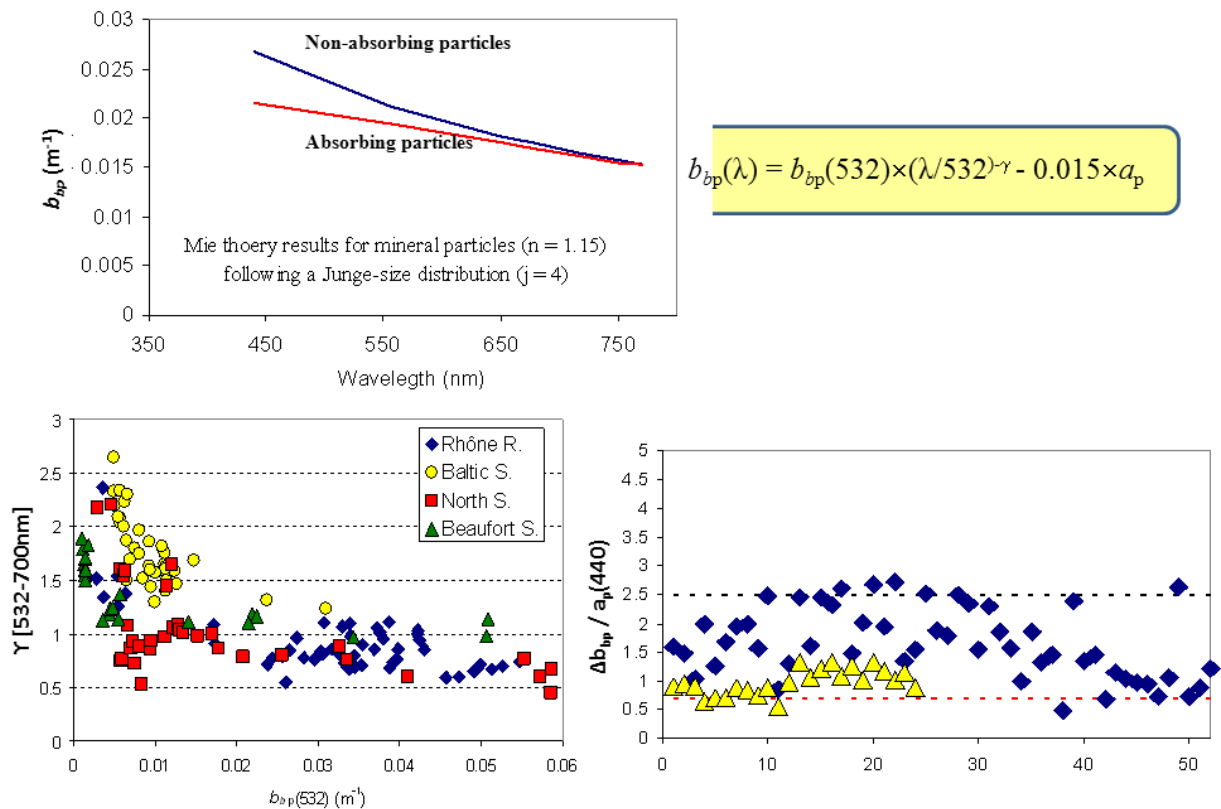
### 2.2.2 Coefficients de diffusion et rétrodiffusion particulaires ( $b_p$ et $b_{bp}$ ).

Ayant montré l'intérêt du domaine spectral procPIR à partir de spectres  $Rrs$  mesurés in situ, il s'est avéré logique de considérer ce domaine spectral (en plus du visible) dans l'étude des IOPs. A mon arrivée au LOV, M. Babin eut ainsi l'idée d'utiliser un photomètre AC-9 (Wetlabs) prototypé pour couvrir les domaines spectraux visible et PIR.

Les mesures réalisées dans diverses eaux côtières européennes ont permis pour la première fois de documenter les variations spectrales du coefficient de diffusion particulaire,  $b_p$  en  $m^{-1}$ , dans le PIR : ces variations suivent une loi puissance (en  $\lambda^{-\gamma}$ ), avec une pente spectrale  $\gamma$  variant de 0 à 1.2, probablement liées aux fortes variations de la distribution de taille des MES (Doxaran et al. 2007). Dans le visible, ces variations spectrales ne suivent plus une loi puissance en raison des effets d'absorption (Babin et al. 2003a). A partir de mesures in situ et de calculs (théorie de Mie), ces variations spectrales complexes ont été modélisées dans les eaux côtières turbides dominées par les sédiments en suspension (Doxaran et al. 2009a).

La suite logique a consisté à étudier les variations spectrales de  $b_{bp}$  en fonction de la concentration, composition et distribution de taille des MES. Ces variations spectrales constituent de plus un paramètre clé pour le développement d'algorithmes de corrections atmosphériques des mesures satellites dans les eaux côtières turbides.

Les résultats obtenus à ce jour montrent que les effets de l'absorption particulaire doivent également être pris en compte pour paramétrer/modéliser les variations spectrales de  $b_{bp}(\lambda)$  (Figure 6). La base de données toujours en cours de développement (e.g., mesures dans les eaux turbides estuariennes avec un Hydrosat-4 (Doxaran et al. 2016)) devraient permettre de conclure à ce sujet.



**Figure 6. Variations spectrales attendues (loi puissance) et observées de  $b_{bp}$  dans les eaux côtières turbides. Mesures et théorie de Mie montrent que l'écart observé par rapport à des variations en loi puissance sont en première approximation fonction du coefficient d'absorption particulaire ( $a_p$ ), d'où la nouvelle formulation proposée pour  $b_{bp}(\lambda)$ .**

Source : Doxaran et al. 2010 (Ocean Optics conference).

## 2.3 Algorithmes de télédétection

### 2.3.1 Concentrations en matières en suspension

Suite aux résultats obtenus en thèse, j'ai privilégié l'utilisation de rapports de  $Rrs$  entre bandes spectrales PIR et visible pour établir des relations robustes avec la concentration en MES. Suivant tout d'abord une approche empirique, les relations établies se sont avérées du même type mais régionales, i.e., une même équation (linéaire pour des concentrations en MES inférieures à 300 mg/l) mais avec différentes pentes d'un site à un autre, du fait à priori de MES différentes en termes de composition, densité et taille donc de propriétés optiques par unité de concentration.

Par la suite, un effort a été réalisé en vue de confronter mesures et modèles, i.e. en reproduisant avec un modèle semi-analytique (e.g., Eq. 3) les relations empiriques établies (Doxaran et al. 2006). Cette étude a permis d'examiner comment les différents paramètres utilisés pour modéliser les propriétés d'absorption et rétrodiffusion de la lumière par les MES influencent le plus les relations entre rapports spectraux  $Rrs$  et concentration en MES. Les résultats montrent que c'est le coefficient d'absorption de la lumière par les MES (coefficient par unité de concentration à 440 nm et pente spectrale) qui influe le plus sur les variations de la relation entre  $Rrs$  (rapport spectral 850/550 nm ou 850/650 nm) et concentration en MES. Le même type de relation a par la suite été établi sur les estuaires de la Gironde, de la Loire, du Tamar, en Baie de bourgneuf et dans le panache du fleuve Mackenzie (Doxaran et al. 2012). Ces relations s'avèrent robustes une fois établies sur un site d'étude spécifique comme en témoignent 10 années de mesures in situ dans l'estuaire de la Gironde (Doxaran et al. 2009b) ou les mêmes relations établies dans l'estuaire de la Loire et en Baie de Bourgneuf à 8 ans d'intervalle (cf. Fig. 6 dans Gernez et al. 2014).

A ce jour, l'utilisation de bandes simples ou rapports de bandes  $Rrs$  fait encore débat pour télédétection des MES dans les eaux côtières. L'utilisation de rapport spectraux permet de minimiser les erreurs de mesures ou de corrections 'blanches spectralement' qui peuvent affecter mesures in situ et mesures satellites corrigées des effets atmosphériques. Néanmoins l'étude de Nechad et al. (2010) a abouti au développement d'un algorithme générique multi-capteur qui met en relation  $Rrs$  (bande simple) et la concentration en MES suivant une formulation semi-analytique où les coefficients tiennent compte des propriétés optiques des MES par unité de concentration. En fonction de la gamme de concentrations en MES, cet algorithme générique utilise une bande spectrale verte, rouge ou PIR afin d'éviter la saturation de  $Rrs$  et conserver une bonne sensibilité du signal. C'est ce type de relation qui a inspiré la relation multi-capteurs établie par Ody et al. (2016) dans le panache du Rhône, relation similaire à celle préalablement établie par Ouillon et al. (1997) pour le capteur SPOT.

S'il est acquis que des relations robustes, et à priori régionales, peuvent être établies entre  $Rrs$  et concentrations en MES, des progrès peuvent encore être réalisés dans ce domaine, notamment :

- Le développement d'un algorithme de quantification des MES multi-conditionnel qui détecte les saturations successives du signal  $Rrs$  dans le vert puis dans le rouge lorsque la concentration en MES augmente, pour sélectionner la bande spectrale  $Rrs$  la plus

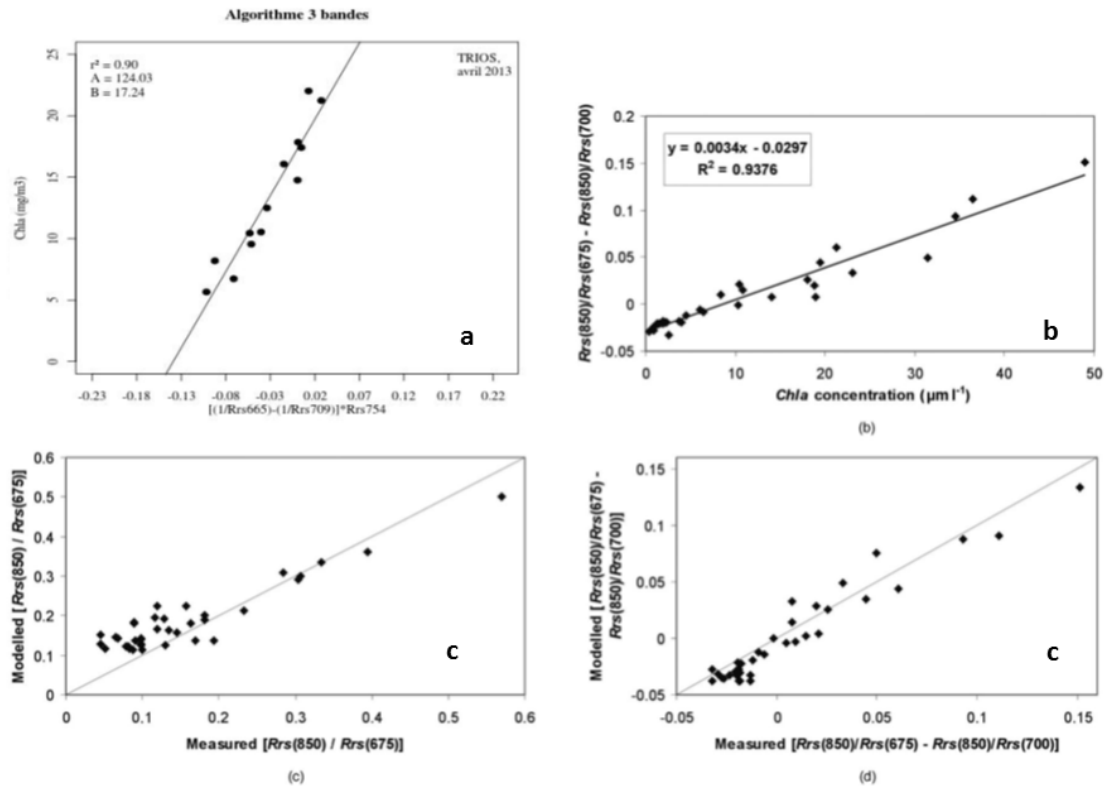


sensible aux variations de concentrations. Un tel algorithme a été développé à partir de mesures in situ (Novoa et al. 2017) ou de mesures satellites corrigées des effets atmosphériques (Ody et al. 2016).

- L'exploitation des mesures *Rrs* multi-spectrales, associées à des épaisseurs optiques différentes, pour estimer les variations de concentrations en MES en fonction de la profondeur dans les milieux stratifiés tels que les panaches fluviaux (Ouillon 2003).

### 2.3.2 Concentrations en chlorophylle-a

Dans les eaux côtières, le rapport spectral bleu/vert de *Rrs* est faiblement corrélé à la concentration en Chla, car les IOPs à ces longueurs d'onde y sont fortement influencées par les substances terrigènes (NAP et CDOM). C'est ce qui a été constaté dans les estuaires et panaches fluviaux étudiés. Dans ces eaux turbides (riches en NAP), *Rrs* est très significatif dans le rouge et le PIR et le pic d'absorption de la Chla à 675 nm est nettement visible (Figure 4). Il convient donc d'utiliser cette 'dépression' ou ce 'creux' de *Rrs* à 675 nm via une différence de bandes spectrales comme proxy de la concentration en Chla (Dall'Olmo et al. 2003, Dall'Olmo et Gitelson 2005, Gitelson et al. 2008). Nos mesures in situ réalisées dans les eaux turbides du Tamar et de la baie de Bourgneuf ont confirmé ces résultats et permis d'établir des relations robustes entre *Rrs* et la concentration en Chla (Figure 7).



**Figure 7. Relations établies entre rapports spectraux  $Rrs$  et concentrations en Chla en baie de Bourgneuf (a) et dans l'estuaire Tamar (b-d). Sources : rapport M2 M. Larnicol et Doxaran et al. (2006).**

### 2.3.3 Turbidité de l'eau

La turbidité de l'eau (T) est répertorié par l'Union Européenne comme un des paramètres indicatifs de la qualité des eaux et donc à surveiller par chaque pays membre, comme stipulé dans la Marine Strategy Framework Directive (European Union, 2008). La turbidité (en NTU, FTU ou FNU<sup>2</sup>) est définie comme la diffusion latérale ou arrière de la lumière rouge ou PIR par les MES le long d'un court chemin optique. C'est donc une IOP souvent utilisée comme proxy de la concentration en MES. Au cours des campagnes océanographiques réalisées, ce paramètre T a été quasi systématiquement mesuré (i) in situ notamment pour documenter les variations spatio-temporelles des MES et (ii) en laboratoire afin de déterminer la turbidité des échantillons d'eau filtrés pour estimer la concentration en MES (e.g., Neukermans et al. 2012b). On considère ici comme turbidité la mesure de diffusion latérale (à  $90^\circ$ ,  $b_{90}$ ) à 860nm et exprimée en FNU.

Contrairement aux relations a priori régionales qui ont été établies entre réflectance de l'eau et concentration en MES, Dogliotti et al. (2015) ont développé un algorithme supposé général permettant d'estimer la turbidité de l'eau jusqu'à 1000 FNU à partir de  $\rho_w(859)$ , avec  $\rho_w =$

<sup>2</sup> Nephelometric Turbidity Unit (NTU), Formazin Turbidity Unit (FTU) et Formazin Nephelometric Unit (FNU)

$\pi \times Rrs$ , (ou  $\rho_w(645)$  pour les turbidités plus faibles, i.e. inférieures à 100 FNU)) (cf. Fig. 7 dans [Dogliotti et al. \(2015\)](#)). En effet une seule et même relation a été établie à partir de mesures réalisées dans différents estuaires et eaux côtières (estuaire de la Gironde, de l'Escaut et du Rio de la Plata, Mer du Nord et Guyane Française). En considérant des fonctions de phase typiques de particules marines dans des calculs de transfert radiatif, il a en effet été montré que le rapport  $b_{bp}/b_{90}$  varie peu comparativement au rapport  $b_{bp}/MES$ . Les mesures satellites corrigées des effets atmosphériques permettent par inversion d'obtenir  $b_{bp}$ , donc un proxy robuste de la turbidité de l'eau (T en FNU). Par contre des relations régionales (voire saisonnières) doivent être utilisées pour convertir  $b_{bp}$  en concentration en MES.

#### 2.3.4 Corrections atmosphériques

Mes travaux n'ont pas contribué à développement et/ou à l'amélioration d'algorithmes de corrections atmosphériques. Néanmoins de par ma connaissance de la signature spectrale des eaux turbides étudiées (mesures in situ), j'ai pu tester et comparer différents algorithmes de corrections existants.

Il a tout d'abord été question de corriger des effets atmosphériques les données à haute résolution spatiale (SPOT, Landsat) ([Doxaran et al. 2006a](#)). J'ai pour cela utilisé le code de transfert radiatif 6s ([Vermote et al. 1997a](#)), les données météorologiques enregistrées au moment de la prise de vue satellite et enfin la méthode dite de la cible noire ([Chavez 1988](#)) qui consiste à utiliser des cibles au sol dont la réflectance est nulle (le signal enregistré à bord du satellite est donc purement atmosphérique).

Un aspect original de mon travail a été d'utiliser le produit MODIS 'surface reflectance' ([Vermote et al. 1997b](#)), i.e. un produit développé pour les surfaces terrestres. La correction des effets atmosphériques (notamment de la contribution des aérosols) est assez approximative mais n'impose aucune hypothèse forte sur la réflectance de l'eau. Or la réflectance des eaux turbides estuariennes (e.g., la Gironde) contribue à plus de 80% au signal enregistré par le satellite au sommet de l'atmosphère par beau temps (cf. Fig. 2 dans [Doxaran et al. 2009b](#)). Le produit MODIS 'surface reflectance' s'est ainsi avéré une alternative intéressante pour étudier les eaux turbides estuariennes là où les algorithmes de corrections atmosphériques développés pour la couleur de l'eau sont défectueux (à l'exception de certains algorithmes plus spécifiques tels que le NIR-SWIR ([Wang et Shi 2007](#))). Certains capteurs satellites n'étant pas dotés de bandes spectrales dans le SWIR (e.g., MERIS et GOCI), une méthode simple pour évaluer la validité des corrections atmosphériques de ces données a consisté à les comparer aux produits MODIS ([Lamquin et al. 2012](#), [Doxaran et al. 2014](#)).

Enfin un effort récent a été réalisé pour valider les corrections atmosphériques appliquées aux données satellites. Un système autonome de radiomètres hyperspectraux Trios a en effet été développé et installé sur la station Mesurho, à l'embouchure du Rhône (Figure 8). Ce système, qui doit être optimisé, a déjà fourni un nombre conséquent de match-ups de qualité pour la validation des produits satellites (Figure 9).

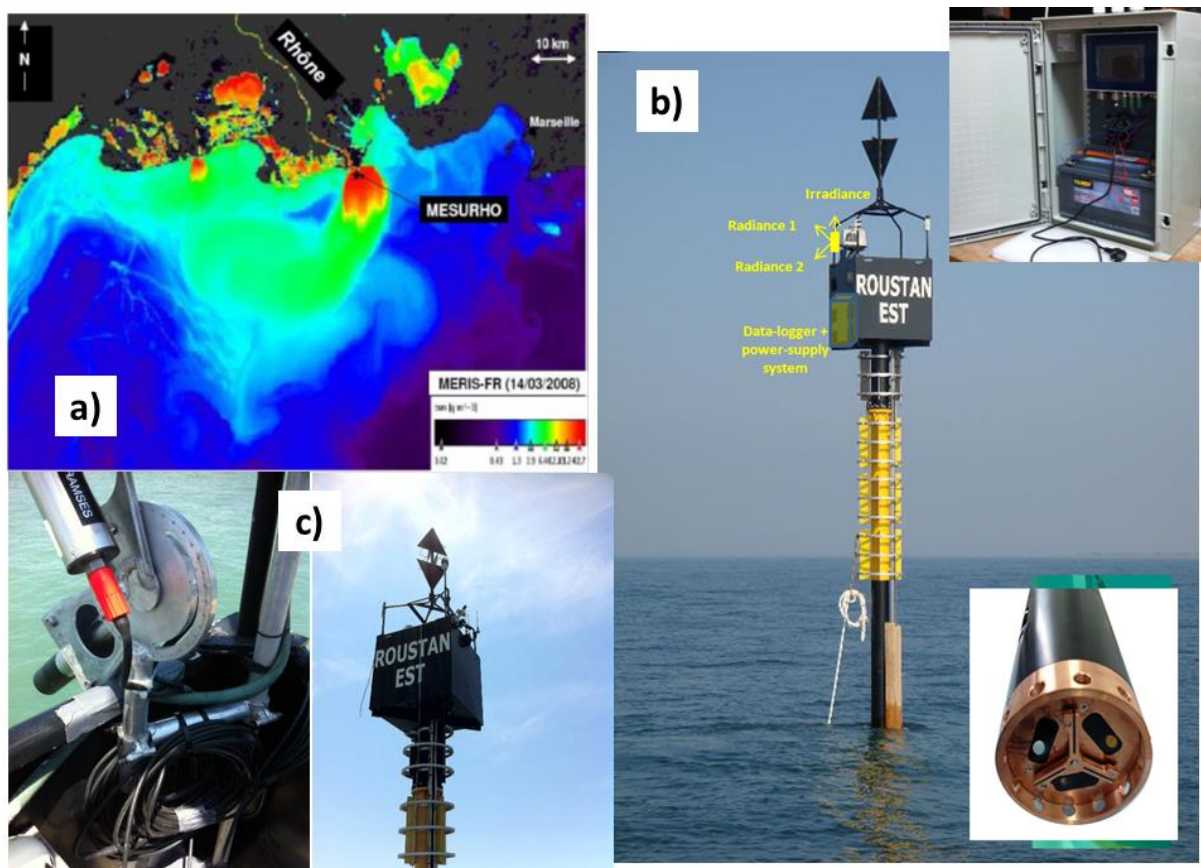


Figure 8. La station Mesurho à l'embouchure du Rhône ([www.ifremer.fr/medicis/projets/mesurho.html](http://www.ifremer.fr/medicis/projets/mesurho.html)) a été équipée d'un système autonome incluant une sonde optique multi-paramètres et de radiomètres hyperspectraux pour la calibration/validation des produits satellites couleur de l'eau.

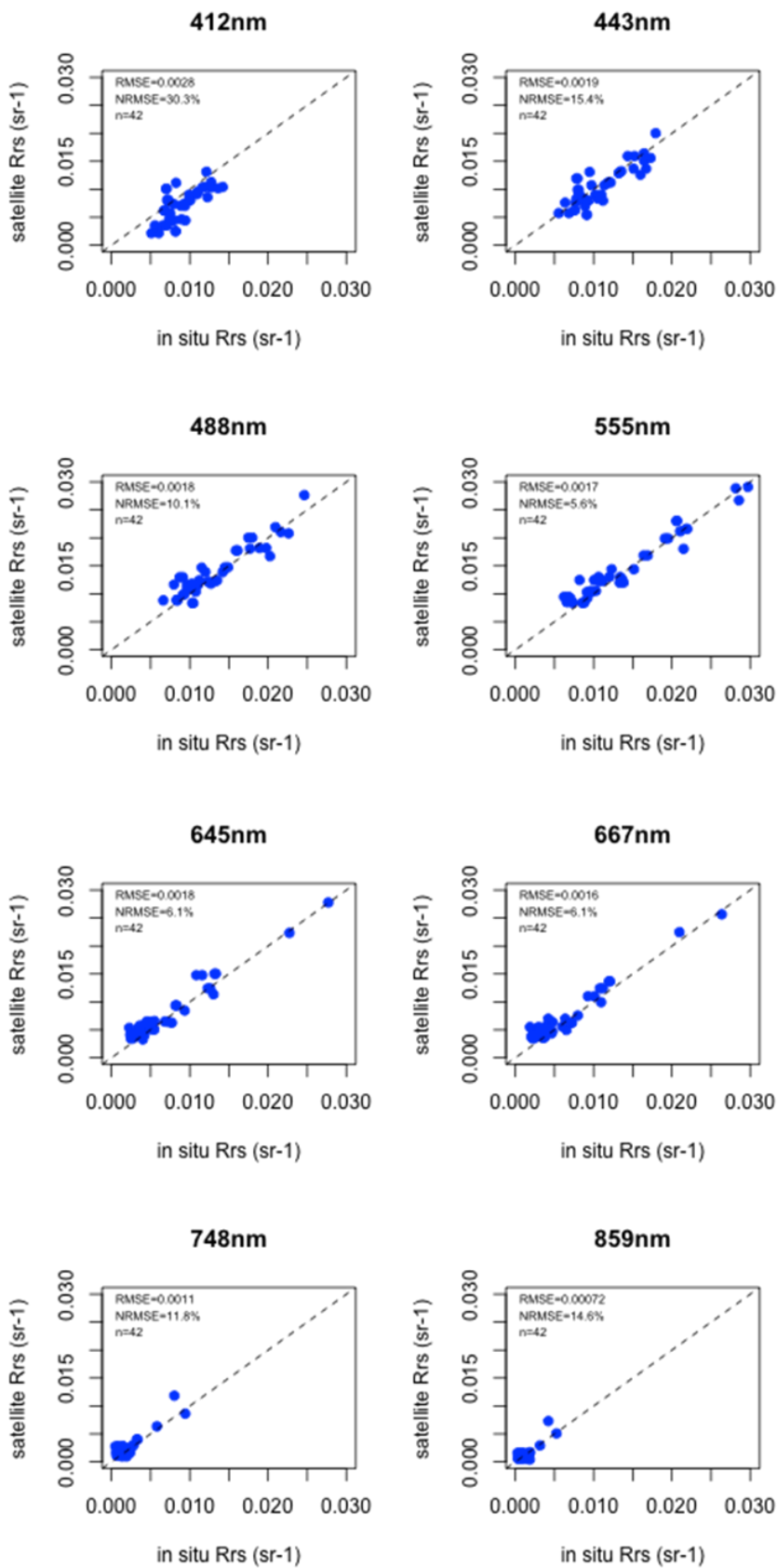


Figure 9. Match-ups entre le signal *Rrs* dérivé des mesures satellites (MODIS-Aqua) (1×1 pixel) et mesuré in situ (à 412, 443, 488, 555, 645, 667, 748 and 859 nm) à l’embouchure du. Overplot de la droite 1:1.

### 3. Mesures et télédétection de la dynamique et des flux sédimentaires à l'embouchure des fleuves.

#### 3.1 Télédétection à haute résolution spatiale

##### 3.1.1 SPOT, ASTER et Landsat et Sentinel-2

Dès mes débuts en thèse, j'ai utilisé les mesures satellites à haute résolution spatiale (SPOT, Landsat-7, ASTER) pour pouvoir estimer les concentrations en MES dans les milieux confinés que sont les estuaires. Des résultats probants ont été obtenus pour y localiser les zones de maximum de turbidité mais aussi pour y observer des structures turbides complexes (cf. Figures 2-4 et 6 dans [Doxaran et al. 2006b](#)). La principale difficulté liée à l'utilisation de ces mesures satellites en couleur de l'eau concernait les corrections atmosphériques.

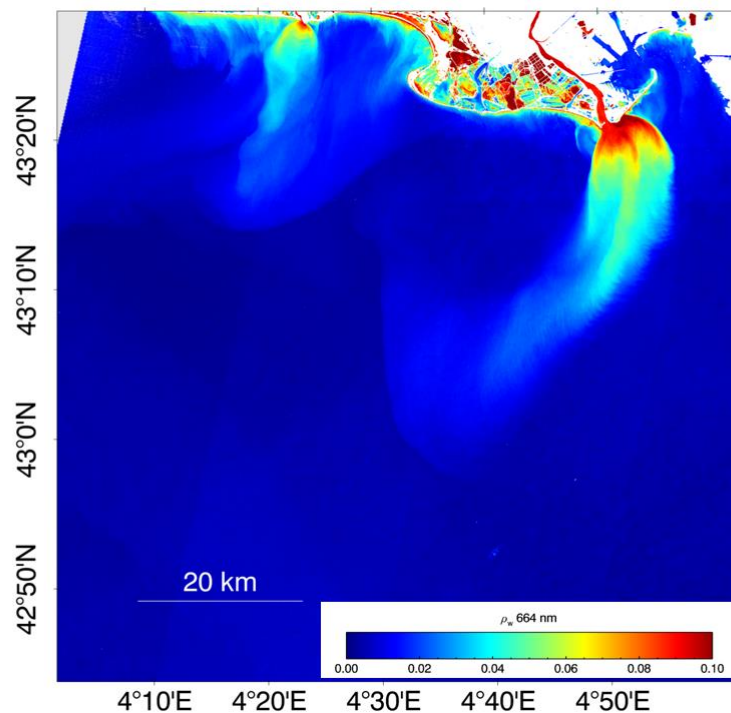


Figure 10. Réflectance de l'eau à 664 nm ( un proxy de la concentration en MES) à 10 m de résolution spatiale à l'embouchure du Rhône à partir de l'image S2-MSI du 18/09/2015 (traitement : [ACOLITE odnature.naturalsciences.be/remsem/software-and-data/acolite](http://ACOLITE.odnature.naturalsciences.be/remsem/software-and-data/acolite)).

L'amélioration des spécifications techniques des capteurs satellites récents (Landsat-8 OLI et Sentinel-2 MSI) en termes de nombres de bandes spectrales et rapport signal à bruit a permis de développer des algorithmes de traitement opérationnels pour les corrections atmosphériques et l'inversion du signal de réflectance dans les eaux côtières (Hagolle et al. 2015, Vanhellemont et Ruddick 2015). Ces avancées entraînent le développement de nouvelles applications dans les zones côtières (e.g., Vanhellemont et Ruddick 2014, [Ody et al. 2016](#)). Elles devraient notamment permettre d'étudier le transport des MES dans la partie aval

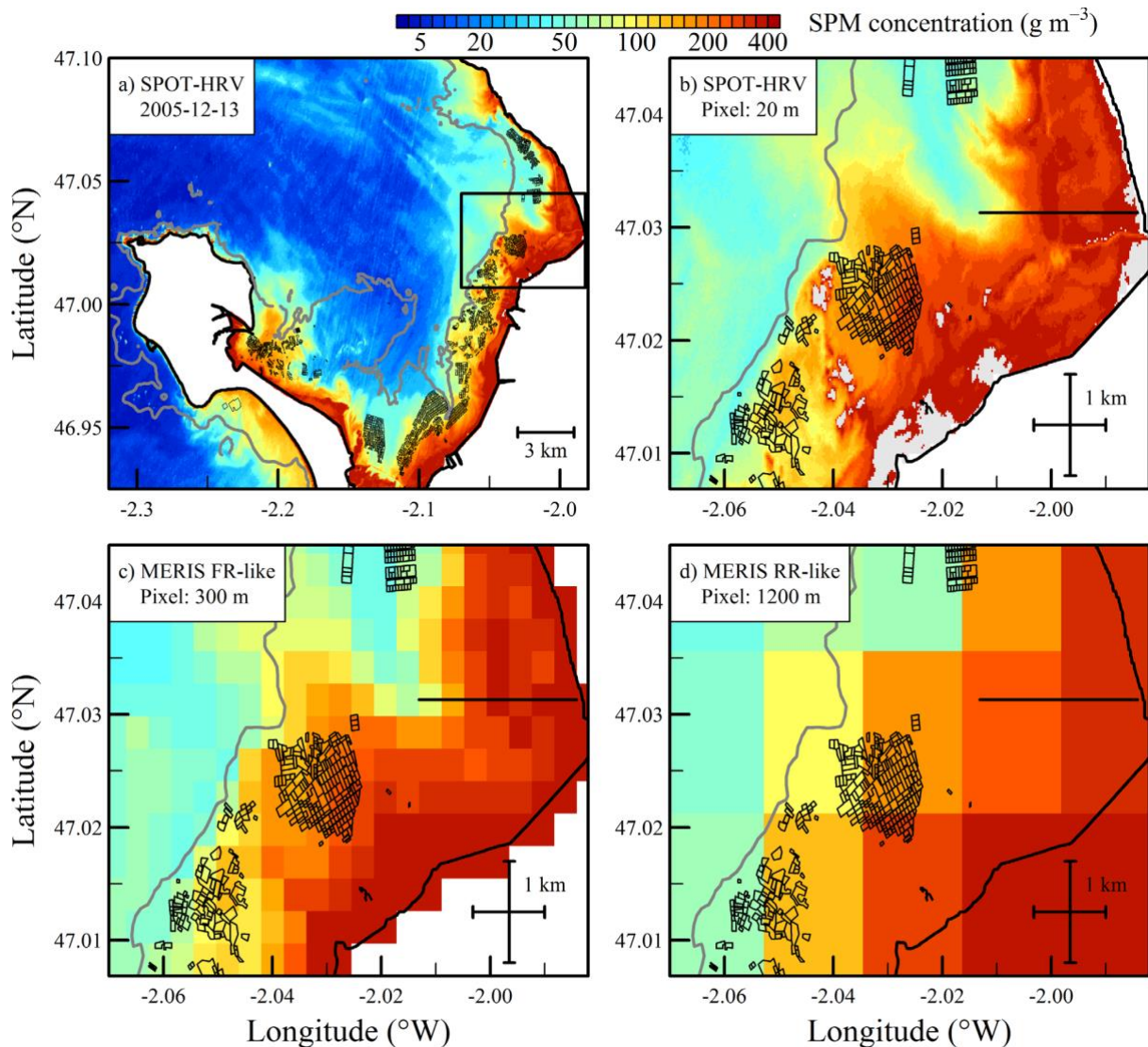
des fleuves (Figure 10) et de cartographier à haute résolution spatiale la concentration en Chla à partir des données S2-MSI (Gernez et al. 2016).

### 3.1.2 MERIS-FR et MODIS-250

Cependant la résolution temporelle des capteurs satellites (radiomètres) à haute résolution spatiale est encore insuffisante pour capturer la dynamique des MES dans les estuaires (cycles journaliers de marée) et au niveau des embouchures de fleuves (Ody et al. 2016).

La suite logique de mes travaux a donc consisté à utiliser au mieux la résolution spatiale ‘moyenne’ des capteurs satellites couleur de l’eau MODIS (250 m) et MERIS-FR (300 m) associés à une résolution temporelle mieux adaptée (2 images MODIS par jour aux moyennes latitudes, depuis 2002). La première étude a eu pour but d’observer au mieux la dynamique de la zone de maximum de turbidité (MTZ) dans l’estuaire macro-tidal de la Gironde (Doxaran et al. 2009a). Cette dernière étude a montré que même lors d’une journée sans nuage, les images MODIS ne permettent de capturer que deux moments du cycle de marée journalier. Mais sur une période de 30 jours le nombre d’observations satellites est suffisant pour ‘filtrer’ les influences des cycles de marée journalier et de vive-eau/morte-eau et ainsi générer des composites mensuels de la MTZ représentatifs du cycle saisonnier induit par les variations du débit liquide fluvial (Doxaran et al. 2009a, Derkacheva 2016).

Un effort particulier a été réalisé dans le cadre du projet européen HIGHROC (HIGH spatial and temporal Resolution Ocean Colour products and services) en vue de développer des produits et services pour des utilisateurs non scientifiques à partir des mesures satellites de la couleur de l’eau. Un exemple parmi d’autre est l’aide qui peut être apportée aux ostréiculteurs via la cartographie des MES et de la Chla (Gernez et al. 2014, Larnicol 2015). L’expérience montre que les résolutions spatiale et temporelle des produits satellites couleur cde l’eau sont cruciales pour intéresser les utilisateurs non-scientifiques.



**Figure 11. Cartes de concentrations en MES dans la baie de Bourgneuf à la résolution spatiale du capteur SPOT-HRV (20 m), avec zoom sur les parcs ostréicoles, et dégradées aux résolutions spatiales de MERIS-FR et MERIS-RR (300 m et 1200 m, respectivement).  
 Source : Gernez et al. 2014.**

### 3.1.3 Match-ups : validation des produits satellitaires

Un effort conséquent a par ailleurs été réalisé pour estimer les incertitudes associées aux nouveaux produits satellites développés (i.e., produits biogéochimiques obtenus par inversion de la réflectance de l'eau). Cette étape de 'validation' requiert de nombreux match-ups avec des mesures in situ de qualité qui ont le plus souvent été dérivées de mesures in situ autonomes de turbidité et fluorescence de la Chl<sub>a</sub> calibrées localement. Ces mesures ont notamment été fournies par des sondes IFREMER en Baie de Bourgneuf (Gernez et al. 2014, Figure 12), par les réseaux de surveillance automatisée MAGEST et SYVEL dans les estuaires de la Gironde et de la Loire, respectivement (Doxaran et al. 2009b, Gernez et al. 2015, Figure 12). D'après les résultats obtenus à ce jour, les incertitudes associées au produit satellite MES varient entre 15 et 40% en fonction des sites de mesures et gammes de



concentrations considérées. Les match-ups de qualité sont logiquement difficiles à établir ans les eaux très turbides et dynamiques (MTZ, embouchures de fleuves).

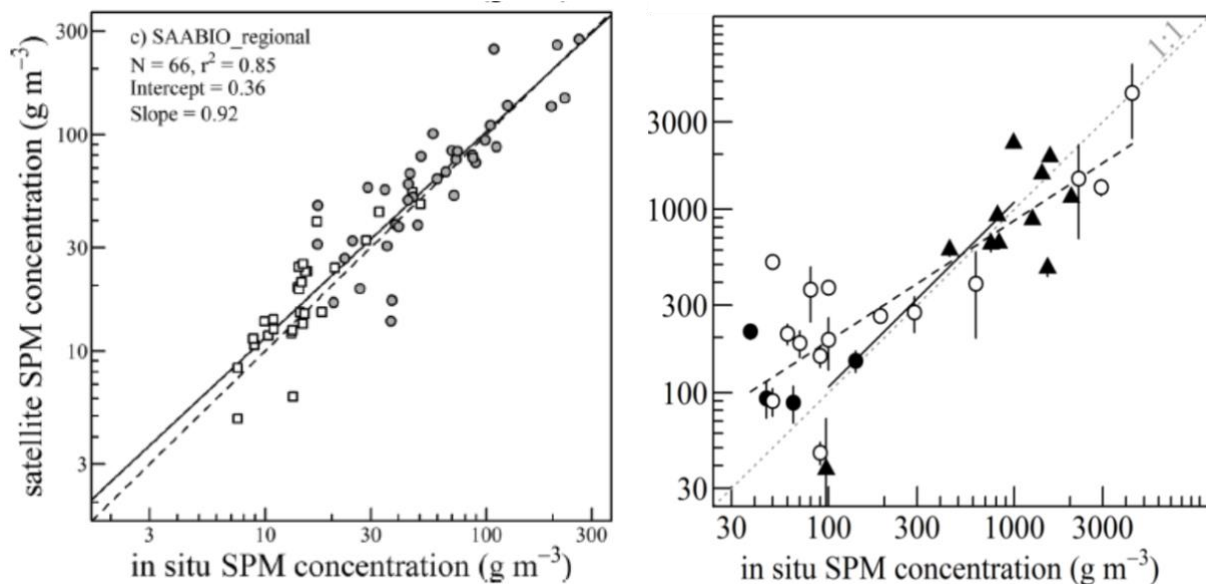


Figure 12. A gauche: match-ups entre concentrations en MES mesurées in situ et dérivées de mesures satellites MERIS-FR dans la baie de Bourgneuf (cf. Gernez et al. 2014 pour détails). A droite : match-ups entre concentrations en MES mesurées in situ et dérivées de mesures satellites, en utilisant SPOT4 (cercles noirs) et Landsat (triangles blancs) dans l'estuaire de la Gironde, et SPOT4 (cercles blancs) dans l'estuaire de la Loire (Gernez et al. 2015).

### 3.2. Télédétection à haute résolution temporelle

#### 3.2.1 Approche multi-capteurs

La première approche dans le but de capturer au mieux la dynamique spatio-temporelle des MES dans les milieux étudiés (estuaires, panaches fluviaux) a été de combiner l'utilisation de plusieurs capteurs, tels que MERIS, MODIS et GOCI (Lamquin et al. 2012, Doxaran et al. 2014) ou Landta8-OLI, MODIS et SEVIRI (Ody et al. 2016).

Le premier avantage dans cet exercice est de pouvoir intercomparer les produits satellites entre eux (en particulier le signal multi-spectral *Rrs*), ceci contribue à valider les corrections atmosphériques (entre autres) appliquées et à s'assurer de la concordance des produits entre eux.

Le deuxième avantage est la couverture spatio-temporelle obtenue pouvant aller de concentrations en MES dans la partie aval d'un fleuve et au détail des structures turbides à l'embouchure jusqu'à l'observation des MES dans le panache turbide à plusieurs moments d'une même journée (Ody et al. 2016).

#### 3.2.2 Observations géostationnaires (SEVIRI et GOCI...à OCAP1)

Il est vite ressorti de l'exercice précédent que même l'utilisation de plusieurs capteurs ne permet pas d'observer la dynamique des MES dans un estuaire ou un panache fluvial (Lamquin et al. 2012, Doxaran et al. 2014, Ody et al. 2016, Eom et al. (2016)).

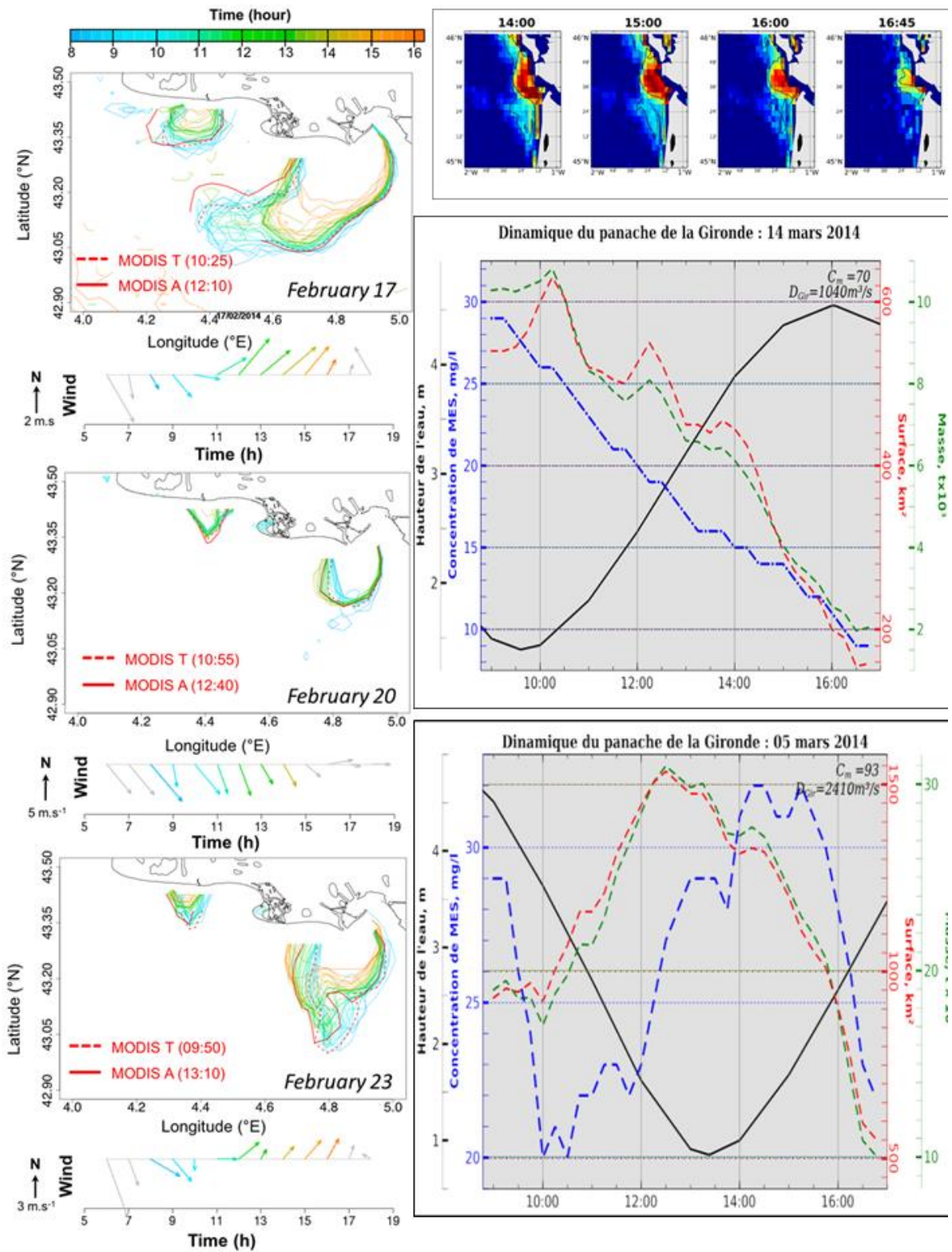


Figure 13. Dynamique des MES dans le panache du Rhône (à gauche, source : Ody et al. 2016) et dans le panache de la Gironde (à droite, Source : Derkacheva 2016) observée avec les mesures satellites géostationnaires SEVIRI (toutes les 15 mn).

Cela pouvait paraître évident dans les milieux méso à macro-tidaux où le cycle de marée journalier (~12h25) est le premier forçage qui conditionne les variations de MES (chute, dépôt et remise en suspension des sédiments).

Les premières observations du panache du Rhône (NO Méditerranée, milieu micro-tidal) avec le capteur géostationnaire SEVIRI à bord de la plateforme MSG-3 ont cependant montré que les influences combinées du vent et de la circulation régionale étaient suffisantes pour engendrer une dynamique journalière que seul un capteur géostationnaire peut en partie capturer (Ody et al. 2016, Figure 13).

Dans le panache de la Gironde (estuaire macro-tidal), des variations cycliques de la concentration moyenne en MES et de l'extension du panache ont pu être observées pour la première fois par imagerie satellite (Derkacheva 2016, Figure 13). Ces variations sont simplement opposées à celles de la hauteur d'eau à l'embouchure : maximum à basse-mer et minimum à plei-mer, avec même certaines variations rapides aux étales de marée pouvant correspondre à la chute des MES à la renverse des courants (Figure 13).

Ces observations faites avec SEVIRI permettent d'entrevoir le potentiel des véritables capteurs satellites couleur de l'eau dotés d'une résolution spatiale adaptée (250 m). D'où le challenge de développer et mettre en fonctionnement un capteur géostationnaire franco-européen capable d'observer les zones côtières mais aussi l'océan ouvert avec une résolution horaire. C'est précisément l'objectif du projet OCAP (PI D. Antoine), projet auquel j'ai eu le plaisir de contribuer depuis 2014.

### **3.3 Flux solides à l'embouchure des fleuves**

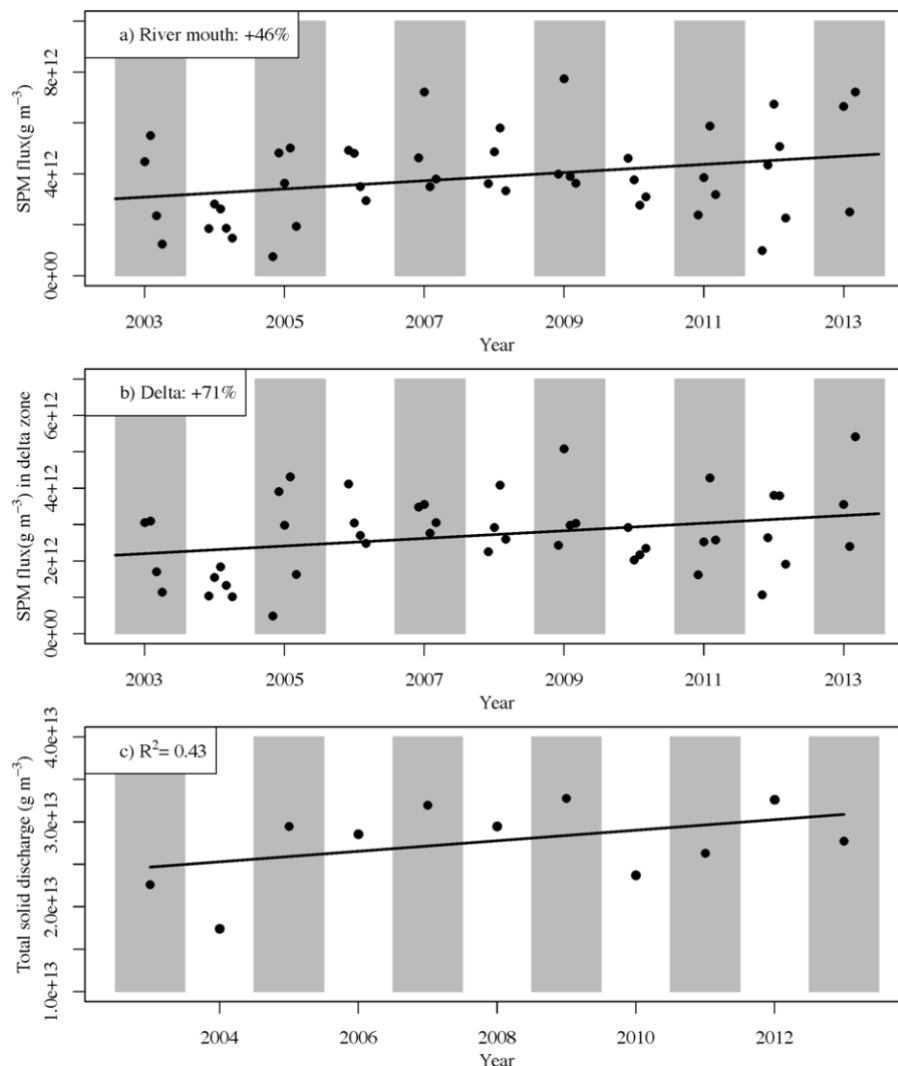
#### 3.3.1 Estuaires macro-tidaux (Gironde)

Estimer le flux solide résiduel exporté depuis un estuaire vers l'océan côtier constitue un challenge, que ce soit à partir d'observations ou via la modélisation. Ceci notamment du fait de l'asymétrie de l'onde de marée et de la stratification des masses d'eau (en densité et turbidité). Des mesures in situ de grande ampleur et en quasi-continu, donc trop coûteuses, sont a priori le meilleur moyen d'y parvenir. Néanmoins l'étude Doxaran et al. (2009b) basée sur des observations satellites (images journalières à composites mensuels), préalablement calibrées/validées par des mesures in situ, a été l'occasion d'estimer les flux solides déversés mensuellement par la Gironde dans le Golfe de Gascogne. Pour ce faire la concentration en MES moyenne dans l'estuaire a été utilisée comme proxy de la masse totale de MES.

#### 3.3.2 Deltas (Mackenzie et Rhône)

Estimer les apports solides d'un fleuve dans l'Océan Arctique constitue aussi un challenge, dans ces régions isolées, difficiles d'accès et aux conditions météorologiques peu propices pour des mesures autonomes. Ce travail a pu être réalisé à l'embouchure du fleuve Mackenzie (NO Canada) qui constitue la principale source d'apports en MES et POC terrigènes dans l'Océan Arctique). Il a été réalisé en deux temps :

- tout d'abord des relations régionales ont été établies à partir de mesures in situ (campagne MALINA) pour télédétecter les concentrations en MES et POC à l'embouchure du fleuve et des flux mensuels réalistes ont pu être estimés grâce aux images satellites MODIS [Doxaran et al. 2012](#) ;
- puis ces flux de MES et POC ont été estimés mensuellement à annuellement de 2003 à 2013 à partir de la série temporelle MODIS-Aqua ([Doxaran et al. 2015](#), Figure 14), en accord avec les estimations faites à partir de mesures in situ ([McClelland et al. 2016](#)), révélant une augmentation de près de 50% du flux de MES en 11 ans suite à une augmentation de 20% du débit liquide fluvial au cours de cette période.



**Figure 14. Estimation par télédétection des flux solides (a) à l'embouchure du fleuve Mackenzie (Océan Arctique canadien) et (b) dans le delta du Mackenzie. (c) Estimation du débit solide annuel à l'embouchure du fleuve en compilant les observations satellites mensuelles. Dans chaque cas la tendance de variation observée entre 2003 et 2013 est indiquée (source : Doxaran et al. 2015).**

Une étude similaire est en cours en vue de quantifier le débit solide du Rhône à l'embouchure à partir des mesures satellites MODIS (Ody et al. en prep.) en se basant notamment sur les profils verticaux de MES et POC complexes (stratification des masses d'eau, panache de surface) documentés par Lorthiois et al. (2012),

### 3.4 Advection et chute des MES dans la colonne d'eau, dégradation de la matière organique terrigène

#### 3.4.1 Observations 2D des zones de maximum de turbidité et des panaches fluviaux en relation avec les forçages physiques

Au niveau de différents sites d'étude, la télédétection couleur de l'eau a été utilisée pour étudier la dynamique spatio-temporelle des MTZ en milieu estuarien (Doxaran et al. 2009b) et des panaches fluviaux (Doxaran et al. 2012, 2015 pour le panache du Mackenzie, Petus et al. 2010 pour le panache de l'Adour, Lorthiois et al. 2012 et Ody et al. 2016 pour le panache du Rhône, Saulquin et al. 2014 et Derkacheva 2016 pour le panache de la Gironde, Constantin et al. 2016 pour le panache du Danube.

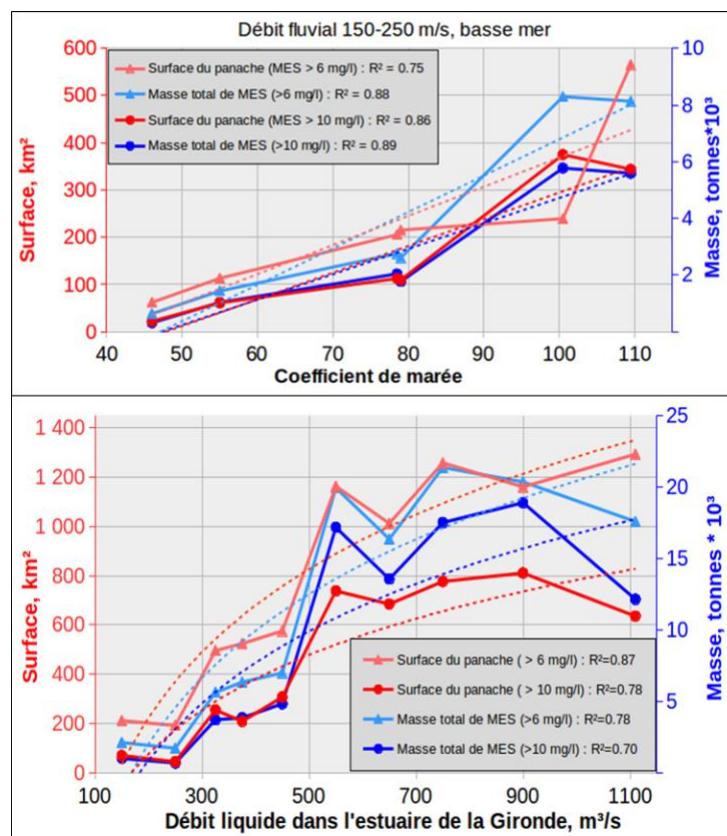


Figure 15. Influences du coefficient de marée et du débit liquide fluvial sur l'extension du panache de la Gironde (à partir d'une année de produits satellites MODIS).  
Source : Derkacheva (2016).

Ces travaux ont été réalisés en 3 étapes : (i) une relation régionale entre concentration en MES (ou turbidité) et  $Rrs$  a été établie, (ii) en fonction de la turbidité des eaux étudiées un algorithme de corrections atmosphériques adapté a été appliqué aux mesures satellites et (iii)

les cartes satellites de MES (ou turbidité) ont été analysées en vue de mieux comprendre la dynamique des MES en relation avec les forçages (houle, vent, marées et débit liquide fluvial)). [Derkacheva \(2016\)](#) a ainsi pu quantifier l'influence du coefficient de marée et du débit fluvial sur l'extension du panache turbide de la Gironde (Figure 15).

### 3.4.2 Observations 3D par mesures satellites et in situ profilantes (e.g., flotteurs-profileurs)

Indépendamment de la résolution spatio-temporelle des capteurs satellites et de l'incertitude associée aux produits satellites, la télédétection de la couleur de l'eau ne permet d'observer que les eaux de surface (e.g., [Forget et al. 2001](#)). Un effort particulier a de ce fait été réalisé pour compléter les observations satellites par des profils verticaux (de température, salinité, turbidité, rétrodiffusion et fluorescence) et ainsi observer/étudier le mélange vertical des masses d'eau, la chute des MES et remise en suspension des sédiments, la nature (composition, taille) des MES. En plus de mesures profilantes 'classiques' et ponctuelles réalisées au cours de campagnes océanographiques ([Lorthiois et al. 2012](#), [Forest et al. 2013](#)), des efforts significatifs ont été réalisés pour utiliser des plateformes autonomes tels que des flotteurs-profileurs bio-optiques 'Provbio' ([Lorthiois et al. 2012](#), [Doxaran et al. 2014](#)) et planeurs sous-marins ([Many et al. 2016](#)). La complémentarité avec les observations satellites est évidente en vue d'obtenir une vision 3D de la dynamique des MES. Les risques et difficultés liés à l'utilisation de ces plateformes dans les eaux côtières le sont aussi, mais l'expérience, notamment via des collaborations au LOV et avec le CEFREM, permet de les limiter.

### 3.4.3 Expérimentations in vitro et en mésocosmes

Enfin à la frontière entre les mesures in situ et en laboratoire, j'ai eu l'opportunité de participer et contribuer à des expérimentations in vitro et en mésocosmes. Ces expérimentations ont eu pour but de (i) caractériser de certains processus clés liés à la dégradation de la matière organique terrigène [Rontani et al. \(2014\)](#) et (ii) quantifier l'export de POC vers le fond généré par les apports atmosphériques (e.g., poussières sahariennes ([Bressac et al. \(2012, 2014\)](#)). Dans ce dernier cas, la contribution originale aura été d'introduire des mesures optiques dans les mésocosmes pour assurer un suivi des effets de floculation et chute des particules dans la colonne d'eau, i.e., des processus clés qui ont lieu dans les panaches fluviaux.

## **4. Conclusions et perspectives à court et moyen termes.**

### **4.1 Conclusions**

#### Propriétés optiques des eaux côtières turbides et algorithmes de télédétection.

Mes travaux ont tout d'abord eu pour but de caractériser et documenter la signature spectrale des eaux côtières et estuariennes turbides, avec un focus sur la réflectance de ces eaux ( $R_{rs}$ , signal obtenu après corrections atmosphériques des mesures satellites de la couleur de l'eau)

et en couvrant les régions spectrales visible, PIR et même SWIR. Après avoir répertorié et cherché à minimiser les erreurs associées aux mesures in situ, les nombreuses données collectées ont contribué à confirmer/montrez :

- La saturation progressive de  $Rrs$  dans le visible (dans le bleu-vert puis dans le rouge) lorsque la concentration en MES atteint environ 50 puis 100 mg/l
- La sensibilité du signal  $Rrs$  dans le PIR aux variations de concentration en MES entre ~5 et plus de 1000 mg/l
- La saturation du signal  $Rrs$  dans le PIR au-delà de 1000 mg/l et l'exploitation possible du signal  $Rrs$  dans le SWIR dans le cas d'eaux extrêmement turbides.

Par ailleurs la signature optique du phytoplancton (pic d'absorption dans le rouge, vers 675 nm) a clairement été identifiée dans les eaux estuariennes riches en algues benthiques, rendant la détection et quantification de la possible même dans les eaux turbides à fortes concentrations en NAP.

Une attention particulière a également été portée sur les IOPs, afin de mieux comprendre comment les MES atténuent, absorbent et (rétro-)diffusent la lumière en fonction de leur composition, taille et concentration (puis comment cela impacte le signal  $Rrs$ ). La principale difficulté rencontrée a été l'identification, la quantification et la minimisation des erreurs de mesures dans les eaux très absorbantes et surtout très diffusantes échantillonnées. L'utilisation d'un code de Monte Carlo 3D a permis de progresser dans ce domaine et de démontrer que les IOPs des eaux côtières turbides peuvent être mesurées avec une incertitude acceptable à condition d'opter pour des instruments de mesures adaptés et surtout des méthodes de corrections préalablement testées et validées.

Enfin un effort significatif a été réalisé afin de reproduire et expliciter les signatures spectrales ( $Rrs$ ) mesurées à l'aide de modèles semi-analytiques, en tenant compte des concentrations et des propriétés optiques (coefficients d'absorption et rétrodiffusion) des substances colorées dans les milieux échantillonnés.

L'exploitation des résultats obtenus sur les AOPs et IOPs a permis de développer des algorithmes empiriques puis semi-analytiques pour quantifier, par inversion du signal  $Rrs$ , les concentrations en MES et Chla et la turbidité. Dans les eaux très à extrêmement turbides (i.e., diffusantes), l'utilisation de  $Rrs$  dans le PIR est impérative pour éviter la saturation du signal. Dans les eaux peu à moyennement turbides (concentrations en MES inférieures à 10 et 50 mg/l, respectivement), il conviendra d'utiliser le signal  $Rrs$  dans le vert et le rouge, régions spectrales bien plus sensibles aux variations de concentrations en MES. L'estimation des MES dans une région caractérisée par des eaux peu à extrêmement turbides (e.g. estuaire et panache de la Gironde requiert ainsi un algorithme adaptatif qui détecte automatiquement la bande spectrale la plus sensible aux variations de MES (Novoa et al. 2017). Les relations établies entre  $Rrs$  (bandes simples ou rapports de bandes) et les concentrations en MES et Chla sont régionales, car dépendantes des IOPs par unité de concentration en MES variables en fonction de la taille et composition des MES. Une relation plus générale a pu être établie entre  $Rrs$  et la turbidité des eaux, du fait d'une variation moindre du rapport entre les coefficients de rétrodiffusion et diffusion latérale articulaires. A noter qu'un effort a été réalisé pour établir des relations de quantification 'multi-capteurs' à partir des mesures  $Rrs$  hyperspectrales réalisées in situ.

## Téledétection à hautes résolutions spatiale et temporelle des MES - Flux solides à l'embouchure des fleuves et dynamique des MES dans les panaches fluviaux.

La mise en application des relations établies précédemment a requis un travail préalable pour (i) corriger des effets atmosphériques les mesures satellites considérées et/ou (ii) valider/invalidier des algorithmes de corrections existants spécifiquement développés pour les eaux côtières en se basant sur des match-ups de qualité entre *Rrs* mesurés in situ et dérivés de mesures satellites (cf. Figure 9). Les algorithmes de corrections les plus performants sont respectivement le SWIR (Wang et Shi 2006, Vanhellemont et Ruddick 2015) en général et le MUMM (Ruddick et al. 2000) pour les eaux modérément turbides.

Une fois l'algorithme de corrections atmosphériques le plus performant identifié pour chaque capteur et site d'étude, les relations établies pour cartographier les MES ont été appliquées avec succès aux mesures satellites :

- à hautes résolutions spatiale (10 m avec Sentinel-2 MSI) et temporelle (15 mn avec MSG-SEVIRI) pour démontrer la faisabilité et développer de nouvelles applications
- en routine aux mesures satellites couleur de l'eau de moyennes résolutions (une à trois images par jour à environ 300 de résolution spatiale).

Il reste cependant à réduire encore les incertitudes liées aux produits satellites et à développer de nouveaux produits (cf. section 4.2).

Grâce à la haute (et moyenne) résolution spatiale des capteurs satellites, des études originales ont pu être menées en télédétection, tels que :

- La localisation et le suivi mensuel des concentrations en MES et donc de la zone de maximum de turbidité dans un estuaire confiné. Combinant les observations satellites à des mesures in situ, il a ainsi été possible d'estimer mensuellement le débit solide exporté vers l'océan côtier.
- L'estimation du flux solide mensuel puis annuel à l'embouchure d'un grand fleuve arctique, principale source fluviale de MES et POC dans l'Océan Arctique, et l'étude de l'évolution de ce flux depuis 2003 en réponse aux variations des forçages induits dans cette région par le changement climatique. L'augmentation très significative observée du débit solide n'aurait a priori pas pu être quantifiée via les rares mesures in situ disponibles. Il s'agit là indéniablement d'un atout de la télédétection en vue d'observer l'évolution de ces régions côtières arctiques difficilement accessibles.
- La dynamique sub-horaire des MES dans les panaches fluviaux dans un système micro-tidal et un système macro-tidal où le vent et le cycle de marée journalier sont respectivement les principaux forçages.

## **4.2 Projets de recherche futurs**

Mes projets de recherche à court terme (5 ans) s'inscrivent logiquement dans la continuité des travaux réalisés depuis l'obtention de ma thèse de doctorat. Ils se découpent en deux grands volets 'scientifiques' supportés par un volet 'ingénierie'.



Le **premier volet** aura pour but de mettre en **application** les méthodologies développées et éprouvées afin de quantifier les concentrations en MES puis les apports solides (MES, POC) fluviaux à l'océan à des échelles locales à régionales, et de reconstituer l'évolution de ces apports au cours des 20 dernières années en relation avec les pressions subies (changement climatique, actions anthropiques).

Le **deuxième volet** sera plus **exploratoire** et aura pour but de développer de nouveaux produits de télédétection couleur de l'eau dans les eaux côtières turbides et d'en tirer le meilleur partie en les combinant avec des mesures in situ et la modélisation numérique afin de mieux comprendre de devenir des MES et du POC terrigène exportés par voie fluviale dans l'océan côtier.

En support à ces deux axes de recherche, il sera question de poursuivre le développement d'un **volet 'ingénierie'** pour la calibration et validation des produits satellites couleur de l'eau via des mesures in situ autonomes (cf. section 2.3.4, Figure 8 et Figure 9).

## Volet 'Application'

### 4.2.1. Evolution des apports solides fluviaux à l'océan depuis 20 ans : impacts du changement climatique et des activités anthropiques.

Afin d'assurer un suivi de ces apports par télédétection, les données satellites MODIS (2000-présent), MERIS (2002-2012), VIIRS (2012-présent) et OLCI (2016-présent) seront combinées pour rapidement constituer une observation en continu au cours des 20 dernières années (2000-2020). Cet exercice demandera au préalable de s'assurer de la consistance des produits satellites générés pour ces différents capteurs.

Ce travail sera mené sur 3 régions clés :

La région **Arctique**, en considérant les 6 plus grands fleuves arctiques : Mackenzie, Yukon, Ob, Ienisseï, Lena et Kolyma (Figure 16). L'Océan Arctique est l'océan le plus influencé par les apports fluviaux et la région Arctique subit depuis 20 ans des impacts significatifs du changement climatique se traduisant par la hausse des températures sur les bassins versants (entraînant la fonte du pergélisol) et l'augmentation des précipitations (se traduisant par des débits liquides en hausse et une érosion accrue des sols). Une étude, menée en étroite collaboration avec l'UMR Takuvik (M. Babin, A. Matsuoka) et le Bedford Institute of Oceanography (E. Devred) a pour but de reconstituer l'évolution des débits solides (MES, POC) et dissous (CDOM et DOC) à l'embouchure de ces fleuves depuis 2000 et de la dispersion de ces substances terrigènes dans les eaux côtières adjacentes. Le résultat obtenu devrait donner une image assez complète de l'impact récent des apports fluviaux au niveau pan-arctique, tout en discriminant les différentes régions arctiques considérées différemment impactées par le changement climatique. Les algorithmes de télédétection des MES et du CDOM (et DOC) seront adaptés à chaque fleuve en se basant sur les résultats obtenus à ce jour (cf. section précédentes et [Matsuoka et al. 2014](#)). L'adaptation régionale des algorithmes s'appuiera par ailleurs sur les bases de données (mesures in situ) récemment développées pour ces fleuves via les projets PARTNERS (2002-2006), Arctic Great Rivers Observatory I

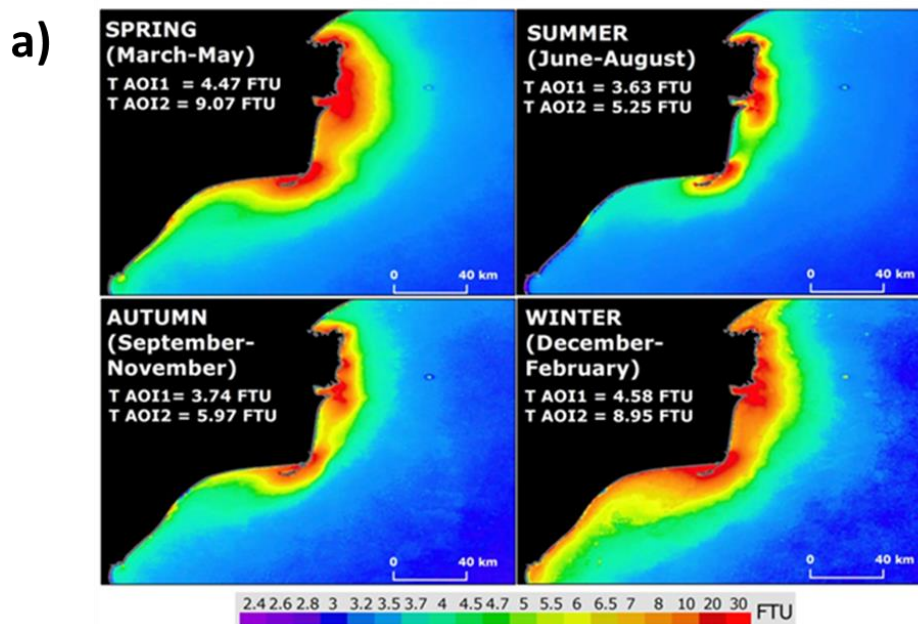
(2009-2011) et II (2012-2016). Ce travail s'intégrera bien dans les activités du Chantier Arctique français ([www.chantier-arctique.fr](http://www.chantier-arctique.fr)).



Figure 16. Bassins versants des 6 principaux fleuves arctiques en terme d'apports de substances terrigènes particulières et dissoutes dans l'Océan Arctique.

Source : <http://www.arcticgreativers.org/>

Les fleuves des **régions tempérées** tels que le Rhône, la Gironde et le Danube en Europe. Dans ces régions aussi des variations significatives des forçages (débits liquides fluviaux et régimes de vent) peuvent être observées et l'impact de ces variations sera quantifié dans le cadre de collaborations nationales (IFREMER, CEFREM et UMR-EPOC) et européennes (Université de Bucarest). Les travaux sont en cours sur les sites cités et les analyses des séries temporelles débutent (Figure 17).



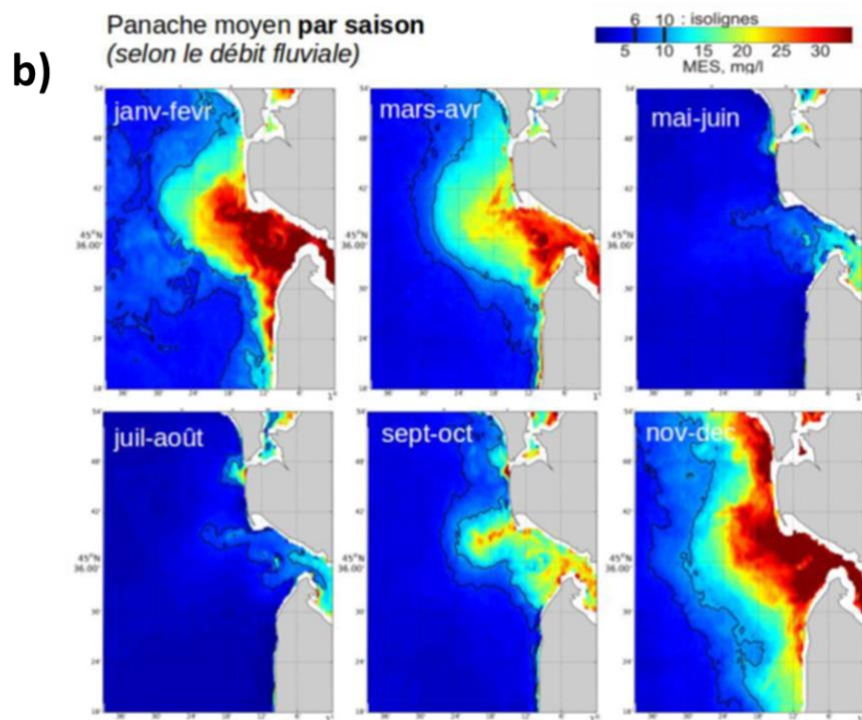


Figure 17. a) Cartographie de la turbidité des eaux dans le panache du Danube (Mer Noire) en fonction des saisons (série temporelle : 2002-2012). Source : Constantin et al. accepté.  
b) Concentrations en MES dans le panache de la Gironde (cartographie bi-mensuelle en 2005). Source : Derkacheva 2016.

La **région tropicale** où l'étude pourrait être focalisée sur l'Amazone, fleuve qui à lui seul a un impact très conséquent au niveau global, et où les séries temporelles satellites ont déjà montré leur grande utilité (Martinez et al. 2009, Gensac et al. 2016). Les études qui seront menées compléteront celles récemment réalisées dans le but de déterminer et quantifier l'impact d'interventions anthropiques au niveau des bassins versants de grands fleuves sur la turbidité des eaux dans les milieux estuarien et côtier adjacents (Shen et al. 2013, Loisel et al. 2014, Feng et al. 2014). Ces études, entre autres, ont démontré le potentiel de la télédétection de la couleur de l'eau pour assurer un suivi de l'évolution des zones côtières directement impactées par les apports fluviaux.

Ce travail de traitement de données satellites en masse et interprétation des résultats sera réalisé en étroite collaboration avec l'équipe REMSEM du RBINS (Belgique). Cette collaboration perdurera aussi quant à l'exploitation des données satellites haute et très haute résolution spatiale (S2-MSI, Pléiades) en vue de développer de nouvelles applications dans les zones côtières (e.g., embouchures de fleuves, deltas, estuaires et baies).

#### Volet 'Exploratoire'

##### 4.2.2. Devenir des substances terrigènes déversées par voie fluviale dans l'océan côtier.

a) Nouveaux algorithmes (télédétection de la taille et composition des MES).

Si la télédétection des MES dans les eaux côtières turbides est désormais opérationnelle (elle requiert essentiellement des adaptations régionales), il est en théorie possible d'extraire aussi des spectres  $Rrs$  des informations concernant la composition et la taille des MES. En effet les propriétés optiques (coefficients d'absorption et rétrodiffusion particulières) des MES dépendent au premier ordre de la concentration en MES mais sont aussi fonction, au deuxième ordre, de la distribution de taille et de l'indice de réfraction des MES (e.g., Bohren et Huffman 1983 ; théorie de Mie). Or la concentration, la taille et la composition des MES présentent de fortes variations le long d'un panache fluvial : particules essentiellement non-algales (sédiments en suspension) potentiellement grossières à l'embouchure des fleuves qui s'affinent vers le large (suite à la floculation et chute des particules) et particules majoritairement organiques (phytoplancton) à la limite offshore des panaches. Ces panaches fluviaux sont donc des sites d'étude appropriés pour espérer y retrouver de l'information sur la composition et la taille des MES par inversion du signal  $Rrs$ . Or de telles informations sont cruciales pour (i) modéliser le transport et la floculation/chute des MES et (ii) mieux comprendre le devenir des substances terrigènes exportées dans l'océan côtier. Un travail exploratoire sera réalisé afin de développer de nouveaux algorithmes, à savoir :

- **Taille des MES :**

Différentes méthodes semi-analytiques, simplifiées par des relations empiriques, ont été récemment développées et mises en application avec un certain succès en vue d'inverser le signal de réflectance de l'eau en diamètre moyen des MES dans les eaux côtières à partir de mesures satellites de la couleur de l'eau (Bowers et al. 2007, Qing et al. 2014, Zhang et al. 2015, Sun et al. 2016). Ces méthodes seront testées et adaptées au niveau de panaches fluviaux.

Une autre approche consiste à inverser le signal de la réflectance de l'eau afin de retrouver la pente spectrale ( $\gamma$ ) du coefficient de rétrodiffusion particulière ( $b_{bp}(\lambda)$ ) modélisé suivant une loi puissance (Whitmire et al. 2007, Snyder et al. 2008). Cette pente spectrale est, sous certaines conditions, directement reliée à la distribution de taille des MES (Morel 1973, Slade et Boss 2015). Cette approche a déjà été mise en application au niveau de l'océan global afin de télédétecter la pente spectrale  $\gamma$  (Loisel et al. 2006) puis une information sur la distribution de taille des MES (Kostadinov et al. 2009). Elle sera adaptée au niveau des estuaires et zones de remise en suspension de sédiments où la distribution de taille des MES et les IOPs varient en phase au cours du cycle de marée journalier (Doxaran et al. 2008). Au niveau du panache fluvial du Rhône, des résultats encourageants ont d'ores et déjà été obtenus par [Many et al. \(2016, soumis\)](#) qui ont observé une forte corrélation entre les pentes spectrales de  $b_{bp}(\lambda)$  dérivées des mesures satellites MODIS et mesurées in situ à partir d'un glider (Figure 18). Afin d'estimer la pente spectrale de  $b_{bp}(\lambda)$ , proxy de la distribution de taille des MES, en inversant le signal multi-spectral de la réflectance de l'eau, la méthode Quasi-Analytical-Algorithm (QAA, Lee et al. 2002, 2013), récemment validée par Zheng et al. (2014) dans les eaux côtières arctiques, sera utilisée en priorité.

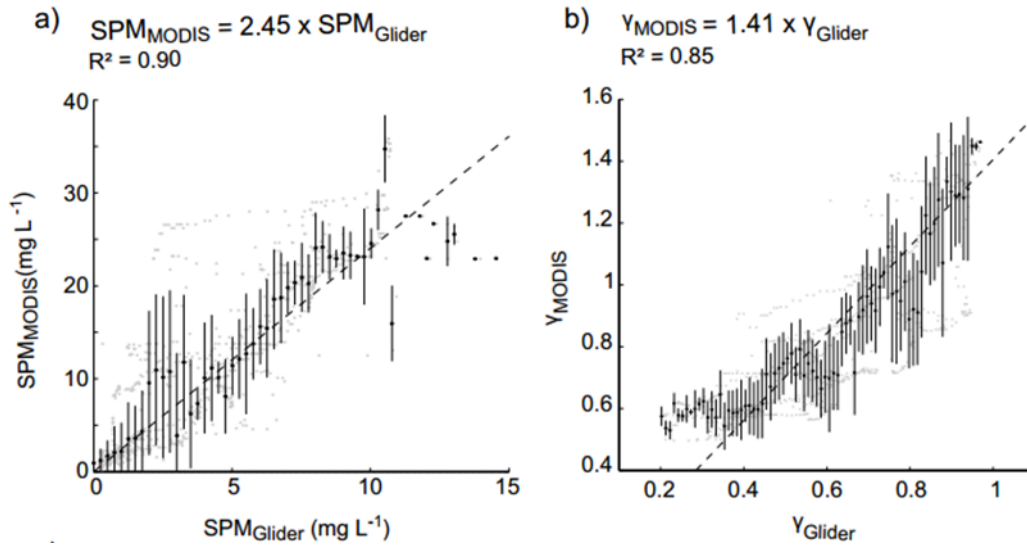


Figure 18. Comparaison entre les concentrations en MES (à gauche) et pentes spectrales de  $b_{bp}$  (à droite) dérivées de mesures in situ (glider) et satellites (MODIS) dans le panache turbide du Rhône. Source : Many et al. soumis.

- **Composition des MES :**

Bowers et al. (2007) ont observé que la nature des MES (prédominamment organiques ou minérales) affectent significativement les variations spectrales de la réflectance des eaux côtières (cf. leur Fig. 1). Ce type d'approche empirique sera testé le long des panaches fluviaux en vue d'y détecter le gradient entre MES minérales (embouchures des fleuves) et organiques (large).

Une deuxième approche consistera à estimer par télédétection les coefficients d'absorption et rétrodiffusion particulières par unité de concentration en MES ( $a_p^*$  et  $b_{bp}^*$ , en  $m^2 \cdot g^{-1}$ ). Ces coefficients dépendent de l'indice de réfraction des MES et sont liés à la composition de celles-ci : fractions organique et minérale, indice de réfraction, carbone organique/inorganique, oxydes de fer (Forget et al. 1999, Babin et Stramski 2004, Stramski et al. 2007, Estapa et al. 2012, Neukermans et al. 2012). Des méthodes empiriques (e.g., Ody et al. 2016, Novoa et al. 2017) ou semi-analytique (Nechad et al. 2010) seront utilisées pour estimer la concentration en MES. Un algorithme d'inversion (e.g., QAA) sera utilisé pour estimer les coefficients  $a_p$  et  $b_{bp}$ . La combinaison des résultats obtenus devrait permettre de retrouver une information sur les variations de composition des MES le long des panaches fluviaux.

Enfin une troisième approche aura pour but d'exploiter la saturation du signal de réflectance de l'eau. La réflectance de l'eau est fonction du rapport  $b_b/a$  ou  $b_b/(a+b_b)$  (cf. Eqs. 3 et 4). Lorsque la concentration en MES devient très élevée (e.g.,  $>100$  mg/l) la contribution des MES aux coefficients d'absorption et rétrodiffusion totaux tend vers 100%, i.e.,  $b_b \approx b_{bp} = MES \times b_{bp}^*$  et  $a \approx a_p = MES \times a_p^*$ ). Les rapports  $b_b/a$  et  $b_b/(a+b_b)$  ne dépendent alors plus de la concentration en MES et la réflectance de l'eau devient insensible aux variations de concentrations en MES. Lorsque celle-ci augmente la saturation de  $Rrs$  a d'abord lieu aux courtes longueurs d'onde visibles (bleu, vert), puis dans le rouge et même jusque dans le PIR

(Doxaran et al. 2002, Nechad et al. 2010, Knaeps et al. 2015). A condition d'observer cette saturation de  $Rrs$  à plusieurs longueurs d'onde, il est alors en théorie possible de résoudre les équations (3) et (4) et ainsi déterminer les coefficients  $a_p^*$  et  $b_{bp}^*$ , et leurs dépendances spectrales. Ceci est explicite dans la formulation semi-analytique développée par Nechad et al. (2010) pour relier  $Rrs$  à la concentration en MES : les coefficients  $A$  et  $C$  sont fonctions de  $a_p^*$  et  $b_{bp}^*$ . Il sera donc question d'exploiter la saturation du signal  $Rrs$  pour estimer ces deux derniers coefficients et en déduire, à partir de mesures in situ et/ou satellites, des informations relatives à la composition des MES dans les eaux côtières turbides (estuaires, panaches fluviaux).

Le développement de ces nouveaux algorithmes sera réalisé dans le cadre des projets TTC (CNES-TOSCA, en collaboration avec le CEFREM et IFREMER) et HYPERMAQ (BELSPO, en collaboration avec RBINS-REMSEM) et, si financé, au cours d'un post-doctorat CNES au LOV.

#### *b) Transport 3D des MES (embouchures et panaches fluviaux)*

Les moyens en place et en cours de développement seront optimisés afin d'observer puis reproduire le transport 3D des MES dans les estuaires et le long des panaches fluviaux. Le site d'étude référence sera le Rhône où la station fixe où les systèmes autonomes Trios et sondes bio-optiques en sub-surface seront régulièrement mis en place pour calibrer/valider les produits satellites. Ce système optique autonome et compact, donc facilement transportable, pourra ponctuellement être installé sur d'autres sites d'étude (e.g., estuaires et baies sur la façade atlantique). Dès 2017, dans le cadre du projet AMORAD (IFREMER), la bouée GEMMES (Gironde Estuary Mouth MEaSurements) sera mise en place pour un an à l'embouchure de la Gironde et sera équipée de capteurs physiques et bio-optiques du LOV. Des études de faisabilité seront réalisées en vue d'équiper ces stations de mesures fixes de capteurs bio-optiques profilants capables de discerner le long de la colonne d'eau le panache de surface ainsi que les néphéloïdes intermédiaires et de fond qui contribuent aussi significativement à l'export de MES par voie fluviale dans l'océan.

Au niveau des panaches fluviaux, les observations satellites seront complétées par les mesures enregistrées par des plateformes autonomes profilantes, i.e., des Provio-2 et Proval (LOV), des Arvor-c 'Bio' (collaboration avec IFREMER) et gliders (collaboration avec le CEFREM). L'utilisation combinée d'observations satellites géostationnaires (e.g., GOCI, GOCI-2, SEVIRI) et de mesures profilantes (e.g., gliders) permettront de capturer en 3D des champs de concentrations en MES, ainsi que des informations sur la taille et composition des MES, plusieurs fois par jour (Ody et al. 2016, Many et al. 2016, soumis).

Les observations relatives à la taille et composition des MES pourront être utilisées pour définir le nombre de classes de MES à considérer dans un modèle de transport sédimentaire réaliste (Lorthiois 2012). Il sera alors question de reproduire le transport 3D des MES observé à l'aide de modèles hydro-sédimentaires par exemple dans le panache du Rhône (MARS-3D Golfe du Lion, collaboration avec IFREMER (thèse A. Gangloff)) et dans l'estuaire de la Gironde (MARS-3D Gironde, collaboration avec l'UMR-EPOC). En fonction du site d'étude

(panache fluvial, estuaire), différentes méthodes seront testées pour contraindre au mieux les modèles avec les observations disponibles, via des ré-initialisations du modèle (Doxaran 2002, Lefouest et al. 2015) et/ou l'assimilation de données (des méthodes numériques devront être optimisées et/ou développées pour cela). Ces travaux permettront de déterminer des flux horizontaux (advection) et verticaux (chute, dépôt et remise en suspension) de MES sur l'ensemble de la colonne d'eau à des résolutions temporelles adaptées (cycles de marée à saisonniers).

## Volet 'Ingénierie'

### 4.2.3. Calibration et validation autonomes des produits satellites couleur de l'eau multi-capteurs.

Du fait de la diversité de la nature (composition, taille) des particules en suspension dans les eaux côtières, des calibrations et validations régionales des produits satellites couleur de l'eau sont nécessaires. La validation des produits satellites requiert une quantité suffisante de match-ups de qualité, i.e. de mesures in situ et satellites acquises en simultanée. Une première étape consiste à valider les corrections atmosphériques appliquées aux données satellites à partir de match-ups avec des mesures in situ de la réflectance de l'eau. La deuxième étape consiste à valider les produits satellites dérivés par inversion du signal de réflectance de l'eau, e.g. les coefficients d'absorption et rétrodiffusion de l'eau  $a(\lambda)$  et  $b_b(\lambda)$  et/ou les concentrations en substances optiquement actives (MES, Chla, CDOM) dans la couche de sub-surface d'où provient l'éclairement solaire rétrodiffusé.

L'expérience a montré que des campagnes océanographiques ponctuelles ne garantissent pas un nombre conséquent de match-ups, essentiellement du fait des conditions météorologiques imprévisibles à moyen terme. Par opposition l'utilisation de stations autonomes de mesures in situ en continu est un moyen sûr de multiplier des match-ups, à condition de pouvoir garantir la qualité/fiabilité des mesures in situ. Pour preuves l'utilisation privilégiée les stations BOUSSOLE ([www.obs-vlfr.fr/Boussole/html/home/home.php](http://www.obs-vlfr.fr/Boussole/html/home/home.php)) et MOBY ([moby.mlml.calstate.edu](http://moby.mlml.calstate.edu)) pour la calibration/validation des produits satellites couleur de l'eau dans l'océan ouvert, et le développement du réseau Aeronet-OC ([http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new\\_web/index.html](http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/index.html)) essentiellement pour les eaux côtières. Ce dernier réseau bien que performant et éprouvé présente des limites : un coût de fonctionnement élevé, une base de données limitée à des mesures radiométriques au-dessus de l'eau, mesures strictement multi-spectrales qui ne correspondent pas à la résolution spectrale de certains radiomètres satellites. Une alternative a été récemment proposée dans le cadre du projet HIGHROC via la mise en place en mode autonome de radiomètres hyperspectraux Trios (au-dessus de l'eau, reliés à un module étanche pour alimentation électrique et stockage des données) et d'une sonde optique multi-paramètres en sub-surface (Figure 8). Malgré un concept initial sommaire (notamment une géométrie de visée fixe), les premiers tests réalisés en 2016 se sont avérés concluants quant à la qualité des spectres  $Rrs$  dérivées des mesures Trios en vue de valider les corrections atmosphériques appliquées aux données satellites MODIS (Figure 9).

Un projet ‘ingénierie’ aura pour but de développer une station de mesures autonome pour la calibration/validation des données satellites couleur de l’eau, spécifiquement dans les estuaires et embouchures/panaches de fleuves. Les objectifs spécifiques seront :

- 1) D’optimiser le concept initial de station autonome de mesures radiométriques hyperspectrales, pour aboutir à un système robuste et peu coûteux ;
- 2) D’optimiser la mesure in situ de proxys bio-optiques des concentrations en MES, chlorophylle-a et CDOM, notamment en proposant un module flottant pour les mesures en sub-surface et un module profilant (optionnel) pour compléter les observations satellites et documenter l’ensemble de la colonne d’eau ;
- 3) D’éprouver le système via sa mise en fonctionnement opérationnel sur plusieurs sites côtiers turbides en y multipliant les match-ups de qualité avec les mesures satellites de plusieurs capteurs.

Le système consistera à un set de 3 radiomètres Trios RAMSES mesurant  $L_t$ ,  $L_{sky}$  et  $E_d$  pour déterminer  $R_{rs}$  (Eq. 2). Ces mesures hyperspectrales permettent de simuler le signal  $R_{rs}$  dans les bandes spectrales (350-950 nm) de tous les capteurs satellites d’intérêt (VIIRS, OLCI, OLI, MSI, Hyperion, etc.). La géométrie de vue sera celle préconisée par Mobley (1999), i.e. angles zénithaux fixes pour  $L_t$  et  $L_{sky}$  et un angle azimutal entre les plans solaire et de visée de  $135^\circ$ . Cet angle azimutal sera maintenu grâce à un système rotatif motorisé programmé en fonction de la date et de l’heure (cf. Simis et Olsson 2013). La programmation, l’alimentation et le stockage des données seront assurés dans un boîtier étanche compact et léger pour un adaptabilité multi-sites. Un système de transmission de données (GSM) permettra de contrôler régulièrement la qualité des mesures et/ou la nécessité d’interventions. Enfin l’autonomie électrique du système de mesures radiométriques sera optimisée grâce à l’utilisation de panneaux solaires.

En sub-surface les mesures bio-optiques seront réalisées à l’aide de sondes multi-paramètres autonomes (Wetlabs ECO-BB2FL, OBS3A). Le long d’une ligne de mouillage (optionnelle), un flotteur-profilant CTD et bio-optique (e.g., Provbio-2 ou Arvor-c Bio) échantillonnera sur l’ensemble de la colonne d’eau afin de caractériser les néphéloïdes de surface, intermédiaires et de fond.

Le système optimisé sera tout d’abord mis en place à l’embouchure du Rhône (station Mesurho où a été mis en place le système initial (Figure 8)). La deuxième mise en place se fera à l’embouchure d’un estuaire turbide sur la façade atlantique, e.g., à l’embouchure de la Gironde (station MAGEST) ou de la Seine (station PHRESQUES ou SMILE). Un troisième site estuarien pourra également être équipé du système développé : le Rio de la Plata, en collaboration avec l’UMI IAFE - CONICET/UBA (Argentine).

Le développement et optimisation de cette station de mesures autonomes pour la calibration/validation des produits satellites couleur de l’eau se fera au LOV en collaboration avec IFREMER et RBINS (Belgique), éventuellement avec la compagnie Trios (Allemagne). Ce projet sera soumis pour financement au CNES-TOSCA en France et/ou à la Communauté Européenne (H2020) pour un réseau élargi.



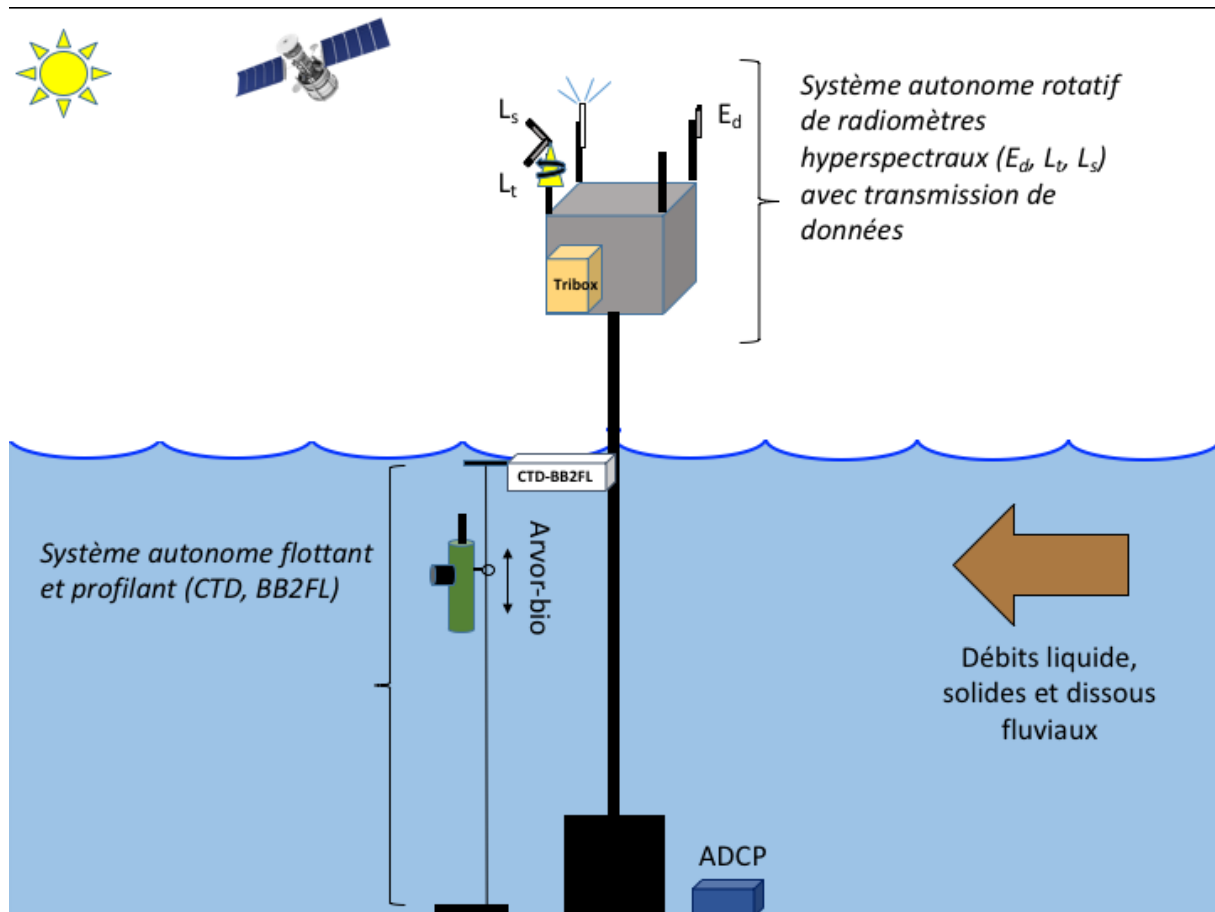


Figure 19. Schéma de la station autonome instrumentée qui sera développée/optimisée en vue de calibrer/valider les produits satellites couleur de l'eau et évaluer les débits (liquide, solides, dissous) à l'embouchure des fleuves.

## 5. Bibliographie.

Antoine, D., André, J.M. and A. Morel (1996). Oceanic primary production : II. Estimation at global scale from satellite (Coastal Zone Color Scanner) chlorophyll, *Global Biogeochemical Cycles*, 10, 57-69.

Babin, M., Morel, A., Fournier-Sicre, V., Fell, F. et Stramski, D., 2003a. Light scattering properties of marine particles in coastal and oceanic waters as related to the particle mass concentration. *Limnology and Oceanography*, 48, 843-859.

Babin, M., Stramski, D., Ferrari, G.M., Claustre, H., Bricaud, A., Obolensky, G., and Hoepffner, N., 2003b. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, non-algal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe, *Journal of Geophysical Research*, 10.1029/2001JC000882.

Babin, M., and D. Stramski (2005). Variations in the mass-specific absorption coefficient of mineral particles suspended in water. *Limnology and Oceanography*, 49, 756-767.

Bauer J.E., Cai W.J., Raymond P.A., Bianchi T.S., Hopkinson C. S. et P.A.G. Regnier (2013). The changing carbon cycle of the coastal ocean. *Nature*, 504, 61-69.

Berger, W.H., Smetacek, V.S. et Wefer, G. (1989). Ocean productivity and paleoproductivity: an overview. In: *Productivity of the ocean: present and past*. Wiley, Chichester, 1-34.

Bohren, C.F. et D.F. Huffmann (1983). *Absorption and scattering by small particles*. Wiley Eds.

Bosc, E., A. Bricaud and D. Antoine (2004). Seasonal and interannual variability in algal biomass and primary production in the Mediterranean Sea, as derived from four years of SeaWiFS observations. *Global Biogeochemical Cycles*, 18, GB1005, 10.1029/2003GB002034.

Bowers D.G., C.E. Binding and K.M. Ellis (2007). Satellite remote sensing of the geographical distribution of suspended particle size in an energetic shelf sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73, 457-466.

Cauwet G. (2002). DOM in the coastal zone. In: *Biogeochemistry of marine dissolved organic matter*, Elsevier, E-U.

Chavez, P.S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24, 459-479.

Dall'Olmo G., Gitelson A.A., and D.C. Rundquist (2003). Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. *Geophys. Res. Lett.* 30, 10.10292003GL018065.

Dall'Olmo G. and A.A. Gitelson (2005). Effect of the variability of bio-optical parameters on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results. *Appl. Opt.* 44, 412-422.

Derkacheva A. (2016). *Dynamique des matières en suspension dans le panache turbide de la Gironde par télédétection*. Rapport de stage Master-2, LOV / Université de Nantes, 46 pp.

Doxaran D., Babin M., Ruddick K., Park Y. et M. Fettweis (2008). Tidal variations of particle size distribution and optical properties in turbid coastal waters. *Perspectives for ocean colour remote sensing*. Conférence Particles in Europe 2008, Bologne, Italie.

Doxaran D., Babin M., Chami M., Lorthiois T., Ruddick K. and D. McKee (2010). Visible and near-infrared spectral variations of light scattering by hydrosols. *Ocean Optics XX conference*, Anchorage (USA), October 2010.

Estapa M., E. Boss, L.M. Mayer and C.S. Roesler (2012). Role of iron and organic carbon in mass-specific light absorption by particulate matter from Louisiana coastal waters. *Limnol. Oceanogr.* 57: 97-112, doi:10.4319/lo.2012.57.1.0097.

European Union (2008). Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). *Official Journal of the European Union*, 164, 19-40.

Feng, L., Hu, C., Chen, X., Song, Q., 2014. Influence of the Three Gorges Dam on total suspended matters in the Yangtze Estuary and its adjacent coastal waters: Observations from MODIS. *Remote Sens. Environ.* 140, 779-788. doi:10.1016/j.rse.2013.10.002.

Forget, P., Ouillon, S., Lahet, F., et Broche, P. (1999). Inversion of reflectance spectra of non-chlorophyllous turbid coastal waters. *Remote Sens. Environ.* 68 : 264-272.

Forget, P., Broche, P. and Naudin J.J. (2001). Reflectance sensitivity to solid suspended sediment stratification in coastal water and inversion; A case study. *Remote Sensing of Environment*, 77, 92-103.

Gensac E., J.M. Martinez, V. Vantrepotte et E.J. Anthony (2016). Seasonal and inter-annual dynamics of suspended sediment at the mouth of the Amazon river: The role of continental and oceanic forcing, and implications for coastal geomorphology and mud bank formation. *Continental Shelf Research*, 118, 49-62.

Gernez P., Lafon V., Lerouxel A., Curti C., Lubac B., Cerisier S. and L. Barillé (2015). Toward Sentinel-2 High Resolution Remote Sensing of Suspended Particulate Matter in Very Turbid Waters: SPOT4 (Take5) Experiment in the Loire and Gironde Estuaries. *Remote Sensing*, 7, 9507-9528.

Gernez P., Larnicol M., Barillé L. and D. Doxaran (2016). Remote sensing of chlorophyll a concentration in extremely turbid shellfish ecosystems: from algorithms to aquaculture applications. CLEO conference, 6–8 Septembre 2016, ESA-ESRIN, Frascati, Rome (Italie).

Gitelson, A. A., Dall'Olmo, G., Moses, W., Rundquist, D. C., Barrow, T., Fisher, T. R., and Holz, J. (2008). A simple semianalytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. *Remote Sensing of Environment*, 112(9), 3582-3593.

Gordon, H.R., O.B. Brown, and M.M. Jacobs (1975). Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat, homogeneous ocean. *Applied Optics*, 14, 417–427.

Gordon, H.R. and McCluney, W.R. (1975). Estimation of the sunlight penetration in the sea for remote sensing. *Applied Optics*, 14: 413 - 416.

Gordon H.R. and K. Ding (1992). Self-shading of in-water optical measurements. *Limnol. Oceanogr.* 37, 491–500.

Hagolle, O., Huc, M., Villa Pascual, D., & Dedieu, G., (2015). A multi-temporal and multi-spectral method to estimate aerosol optical thickness over land, for the atmospheric correction of FormoSat-2, LandSat, VEN $\mu$ S and Sentinel-2 Images. *Remote Sensing*, 7, 2668-2691.

Hedges, J.I. et Keil, R.G. (1995). Sedimentary organic matter preservation : an assessment and speculative synthesis. *Marine Chemistry*, 49, 81-115.

Irigoiien, X. and Castel, J. (1997). Light limitation and distribution of chlorophyll pigments in a highly turbid estuary: The Gironde (SW France). *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 44, 507-517.

Knaeps, E., Raymaekers, D., Sterckx, S., Ruddick, K., & Dogliotti, A. I. (2012). In-situ evidence of non-zero reflectance in the OLCI 1020 nm band for a turbid estuary. *Remote Sensing of Environment*, 120, 133–144.

Kostadinov, T.S., Siegel, D.A. and S. Maritorena (2009). Retrieval of the particle size distribution from satellite ocean color observations. *J. Geophys. Res.*, 114, C9, DOI: 10.1029/2009JC005303.

Labat, D., Godderis, Y., Probst, J.L. et Guyot, J.L., 2004. Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources*, 27, 631-642.

Lee, Z. Carder., K.L and Arnone., R.A. (2002). Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics*, 41(27), 5755-5772.

Lee et al. (2013). [http://www.ioccg.org/groups/Software\\_OCA/QAA\\_v5.pdf](http://www.ioccg.org/groups/Software_OCA/QAA_v5.pdf).

Le Fouest V., Chami M. et R. Verney (2015). Analysis of riverine suspended particulate matter fluxes (Gulf of Lion, Mediterranean Sea) using a synergy of ocean color observations with a 3-D hydrodynamic sediment transport model, *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 120(2), DOI:10.1002/2014JC010098.

Loisel H., J.M. Nicolas, A. Sciandra, D. Stramski and A. Poteau (2006). Spectral dependency of optical backscattering by marine particles from satellite remote sensing of the global ocean. *J. Geophys. Res.*, 111, C9, DOI: 10.1029/2005JC003367.

Loisel, H., Mangin, A., Vantrepotte, V., Dessailly, D., Ngoc Dinh, D., Garnesson, P., Ouillon, S., Lefebvre, J.P., Mériaux, X., Minh Phan, T. (2014). Variability of suspended particulate matter concentration in coastal waters under the Mekong's influence from ocean color (MERIS) remote sensing over the last decade. *Remote Sens. Environ.* 150, 218–230.

Lorthiois T. (2012). Dynamique des matières en suspension dans le panache du Rhône (Méditerranée occidentale) par télédétection spatiale « couleur de l'océan ». Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 250 p.

Martinez J.M., Guyot J.L., Naziano F. et F. Sondag (2009). Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. *Caneta.*, 10.1016/j.catena.2009.05.011.

McClelland J. W., R. M. Holmes, B. J. Peterson, P. A. Raymond, R. G. Striegl, A. V. Zhulidov, S. A. Zimov, N. Zimov, S. E. Tank, R. G. M. Spencer, et al. (2016). Particulate organic carbon and nitrogen export from major Arctic rivers. *Global Biogeochem. Cycles*, 30, 629–643.

Milliman, J.D. et J.P.M. Syvitski (1992). Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean : the importance of small mountainous rivers, *Journal of Geology*, 100, 525-544.

Mobley, C.D. (1994). *Light and water – Radiative transfer in natural waters*, Academic Press, San Diego, Californie, 592 pp.

Mobley, C.D. (1999). Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied Optics*, 38, 7442 - 7455.

Morel, A. (1973). Diffusion de la lumière par les eaux de mer; résultats expérimentaux et approche théorique, in *AGARD Lect. Ser.*, pp. 3.1.1.-3.1.76.

Nechad, B.; Ruddick, K.G.; Park, Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sens. Environ.* 2010, 114, 854–866.

Neukermans G., Ruddick K. and N. Greenwood (2012a). Diurnal variability of turbidity and light attenuation in the southern North Sea from the SEVIRI geostationary sensor. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 124 p. 564-580.

Neukermans G. and Ruddick K. and Loisel H. and P. Roose (2012b). Optimization and quality control of suspended particulate matter concentration measurement using turbidity measurements. *Limnology and Oceanography Methods*, 10, 1011–1023.

Ody A., Doxaran D., Vanhellefont Q., Verney R., Pairaud I., Bourrin F., Many G. and Ruddick K. (2016). Fluxes and dynamics of suspended particles in river plumes by combining in situ autonomous measurements and multi-sensor ocean colour satellite data. *CLEO conference*, 6–8 Septembre 2016, ESA-ESRIN, Frascati, Rome (Italie).

O'Reilly, J. E., S. Maritorena, B. G. Mitchell, D. A. Siegel, K. L. Carder, S. A. Garver, M. Kahru, and C. McClain (1998), Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS, *J. Geophys. Res.*, 103, 24937 – 24953.

Ouillon S. (1998). Erosion et transport solide : ampleur et enjeux, *la Houille Blanche*, 2, 52-58.

Ouillon S. (2003). An inversion method for reflectance in stratified turbid waters, *Int. J. of Remote Sensing*, 24 (3), 535-548.

Ouillon S. Forget P., Froidefond J.M., Naudin J.J. (1997). Estimating suspended matter concentrations from SPOT data and from field measurements in the Rhône river plume, *Marine Technology Society Journal*, 31 (2), 15-20.

Qing S., J. Zhang, T. Cui et Y. Bao (2014). Remote sensing retrieval of inorganic suspended particle size in the Bohai Sea. *Continental Shelf Research*, 73, 64–71.

Rottgers R. and S. Gehrke (2012). Measurement of light absorption by aquatic particles: Improvement of the quantitative filter technique by use of an integrating sphere approach. *Appl. Opt.* 51, 1336–1351.

Ruddick K., Ovidio F. and M. Rijkeboer (2000). Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters. *Applied Optics*, 39(6), 897–912.

- Ruddick K., De Cauwer V., Park Y. and Moore G. (2006). Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance: The similarity spectrum for turbid waters. *Limnology and Oceanography*, 5, 1167–1179.
- Schlunz, B, et Schneider, R.R. (2000). Transport of terrestrial organic carbon to the oceans by rivers: re-estimating flux and burial rates. *Int. J. Earth Sci.*, 88, 599-606.
- Shen F., Verhoef W., Zhou Y., Salama S. and X. Liu (2010). Satellite estimates of wide-range suspended sediment concentrations in Changjiang (Yangtze) estuary using MERIS data. *Estuaries and Coasts*. 33(6), 1420-1429.
- Shen F., Zhou Y., Li J., He Q. and W. Verhoef (2013). Remotely sensed variability of the suspended sediment concentration and its response to decreased river discharge in the Yangtze estuary and adjacent coast. *Continental Shelf Research*, 69, 52-61.
- Simis S.G.H. and J. Olsson (2013). Unattended processing of shipborne hyperspectral reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment* 135 (2013) 202–212.
- Slade W.H. et E. Boss (2015). Spectral attenuation and backscattering as indicators of average particle size. *Applied Optics*, 54, 24, 7264-7277.
- Snyder W.A., et al. (2008). Optical scattering and backscattering by organic and inorganic particulates in U.S. coastal waters. *Appl. Opt.*, 47, 666–677.
- Stramski, D., M. Babin and S.B. Wozniak (2007). Variations in the optical properties of terrigenous mineral-rich particulate matter suspended in seawater, *Limnology and Oceanography*, 52, 2418-2433.
- Sun, D., Z. Qiu, C. Hu, S. Wang, L. Wang, L. Zheng, T. Peng, and Y. He (2016). A hybrid method to estimate suspended particle sizes from satellite measurements over Bohai Sea and Yellow Sea, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 6742–6761, doi:10.1002/2016JC011949.
- Twardowski, M., Boss, E., Macdonald, J.B., Pegau, W.S., Barnard, A.H. and Zaneveld, J.R.V.(2001). A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters *J. Geophys. Res.* Vol. 106 ,(No.C7) , p. 14,129-14,142.
- Vanhellemont, Q., Ruddick, K. (2015). Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: examples from Landsat-8. *Remote Sens. Environ.* 161, 89–106.
- Vermote, E.F., Tanré, D., Deuze, J.L., Herman, M. and Morcrette, J.J. (1997a). Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum: An Overview. *IEEE Transactions in Geosciences and Remote Sensing*, 675–686.
- Vermote, E.F., El Saleoql, N., Justice, C.O., Kaufman, Y.J., Privette, J.L., Remer, L., Roger, J.C., Tanre´ , D. (1997b). Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces: background, operational algorithm and validation. *Journal of Geophysical Research* 102, 17131–17141.
- Wagner, T. et Dupont, L., 1999. Terrestrial organic matter in marine sediments : analytical approaches and aeolianmarine records of the central equatorial Atlantic. In: Fisher, G., Wefer, G. (eds) *Proxies in paleoceanography*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 547-574.
- Wang, M., & Shi, W. (2007). The NIR-SWIR combined atmospheric correction approach for MODIS ocean color data processing. *Optics Express*, 15, 15722–15733.
- Whitmire A., Boss E., Cowles T. and W. Pegau (2007). Spectral variability of the particulate backscattering ratio. *Opt. Express*, 15, 7019–7031.
- Wollast, R. (1991). The coastal organic carbon cycle: fluxes, sources and sinks. In: Mantoura, R.F.C., Martin, J.M., Wollast, R. (eds) *Ocean margin processes in global change*. Wiley, Chichester, 365-381.
- Zhang Y., Z. Huang, C. Chen, Y. He and T. Jiang (2015). Particle size distribution of river-suspended sediments determined by in situ measured remote-sensing reflectance. *Applied Optics*, 54(20), 6367-6376.

Zheng G., Stramski D. et R.A. Reynolds (2014). Evaluation of the Quasi-Analytical Algorithm for estimating the inherent optical properties of seawater from ocean color: Comparison of Arctic and lower-latitude waters. *Remote Sensing of Environment*, 155, 194–209.

## Remerciements

Tout d'abord un grand merci aux membres du jury, Président, Rapporteurs et Examineurs, pour leur temps, leur intérêt et leur expertise.

Un grand merci à nouveau à Jean-Marie Froidefond et Patrice Castaing qui m'avaient donné l'opportunité de réaliser un travail de thèse très intéressant et novateur, travail que j'ai eu depuis la chance et le plaisir de poursuivre.

Un grand merci à mes encadrants en post-doctorat, et donc à Samantha Lavender à l'Université de Plymouth puis à Marcel Babin au LOV qui m'a beaucoup aidé à développer mon projet de recherche.

Merci à mes collègues au sein de l'équipe OMTAB du LOV qui m'ont si bien accueilli en post-doctorat puis en tant que CR-CNRS, c'est un réel plaisir de travailler dans un tel environnement professionnel et chaleureux. Merci aussi aux autres membres du LOV avec lesquels j'interagis de plus en plus.

Une pensée très amicale pour tous les collègues hors LOV, en France et à l'étranger, avec qui j'ai le privilège de travailler depuis mon arrivée au LOV, je pense notamment aux collègues d'IFREMER, du CEFREM, du LOG et de l'UMR-EPOC. Une pensée toute particulière à Kevin Ruddick et ses collègues du RBINS avec qui j'ai le grand plaisir de travailler en collaboration depuis de nombreuses années, j'espère que cela continuera très longtemps.

Enfin merci à tous les étudiants et jeunes scientifiques (ingénieurs et post-doctorants) avec qui j'ai eu l'occasion de travailler et que j'ai (co-)encadrés, ce fut à chaque fois des expériences très enrichissantes, tant sur le plan humain que sur le plan professionnel.

## Annexe 1 : liste des acronymes

|        |                                                                |
|--------|----------------------------------------------------------------|
| ANR    | Agence Nationale de la Recherche                               |
| ASTER  | Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer |
| BELSPO | Belgian Federal Science Policy Office                          |
| CDOM   | Matières organiques dissoutes colorées                         |
| Chla   | Chlorophylle-a                                                 |
| CNES   | Centre National d'Etudes Spatiales                             |
| CNRS   | Centre National de la Recherche Scientifique                   |
| DOC    | Carbone organique dissous                                      |
| EE-9   | Earth-Explorer 9                                               |
| ESA    | Agence Spatiale Européenne                                     |
| FP7    | Framework Programme 7 (Union Européenne)                       |
| GMMC   | Groupe Mission Mercator Coriolis                               |
| GOCI   | Geostationary Ocean Color Imager                               |
| MERIS  | MEDium Resolution Imaging Spectrometer                         |
| MES    | Matières en suspension                                         |
| MODIS  | Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer                  |
| MSG    | Meteosat Second Generation                                     |
| MSI    | MultiSpectral Instrument                                       |
| OCAPI  | Ocean Colour Advanced Permanent Imager                         |
| OLCI   | Ocean Land Colour Instrument                                   |
| OLI    | Operational Land Imager                                        |
| PNTS   | Programme national de Télédétection Spatiale                   |
| POC    | Carbone Organique Particulaire                                 |
| RBINS  | Royal Belgian Institute of Natural Sciences                    |
| REMSEM | Remote Sensing and Ecosystem Modelling                         |
| SEVIRI | Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager                  |
| SPOT   | Satellite Pour l'Observation de la Terre                       |
| TOSCA  | Terre, Océan, Surfaces continentales, Atmosphère               |
| UPMC   | Université Pierre et Marie Curie                               |
| VIIRS  | Visible Infrared Imager Radiometer Suite                       |



## Annexe 2 : Tirés-à-part de 5 principaux articles publiés

1. Doxaran, D., Cherukuru, R.C.N. and Lavender, S.J., 2006. Inherent and apparent optical properties of turbid estuarine waters: measurements, modelling and application to remote sensing. *Applied Optics*, 45, 2310-2324.
2. Doxaran D., J.M. Froidefond, P. Castaing and M. Babin, 2009. Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81, 321–332.
3. Doxaran D., Ruddick K. McKee D., Gentili B., Tailliez D., Chami M., and M. Babin (2009), Spectral variations of light scattering by marine particles in coastal waters, from the visible to the near infrared. *Limnology and Oceanography*, 54, 1257-1271.
4. Doxaran, D., Lamquin N., Park Y. J., Mazeran C., Ryu J. H., Wang M. and A. Poteau (2014). Retrieval of the seawater reflectance for suspended solids monitoring in the East China Sea using MODIS, MERIS and GOCI satellite. *Remote Sensing of Environment*, 146, 36-48.
5. Doxaran, D., Devred E. and M. Babin (2015). A 50% increase in the amount of terrestrial particles delivered by the Mackenzie River into the Beaufort Sea (Canadian Arctic Ocean) over the last 10 years. *Biogeosciences*, 12, 3551–3565.

## Annexe 3 : Liste exhaustive des publications

1. Constantin S., Constantinescu S. and D. Doxaran (2017). Long-term analysis of turbidity patterns in Danube Delta coastal area based on MODIS satellite data. *Journal of Marine Systems*, 170, 10-21.
2. Novoa S., Doxaran D., Ody A., Vanhellefont Q., Lafon V., Lubac B. and P. Gernez (2017). Atmospheric corrections and multi-conditional algorithm for multi-sensor remote sensing of suspended particulate matter in low to high turbidity levels coastal waters. *Remote Sensing*, 9, 61, doi:10.3390/rs9010061.
3. Eom J., Choi J. K., Won J. S., Ryu J. H., Doxaran D., Ruddick K. and S. Lee (2016). Spatio-temporal variation in suspended sediment concentrations and related factors of coastal waters based on multispatial satellite data in Gyeonggi Bay, Korea. *Journal of Coastal Research*, in press.
4. Ody A., Doxaran D., Vanhellefont Q., Nehad B., Novoa S., Many G., Bourrin F., Verney R., Pairaud I. et B. Gentili (2016). Potential of High Spatial and Temporal Ocean Color Satellite Data to Study the Dynamics of Suspended Particles in a Micro-Tidal River Plume. *Remote Sens.* 2016, 8(3), 245; doi:10.3390/rs8030245.
5. Lee Z., Shang S. Lin G., Chen J. and D. Doxaran (2016). On the modeling of hyperspectral remote-sensing reflectance of high-sediment-load waters in the visible to shortwave-infrared domain. *Applied Optics*, 55(7), 1738-1750.
6. Many G., Bourrin F. Durrieu de Madron X., Paired I., Gangloff A., Doxaran D., Ody A., Verney R., Menniti C., Le Berre D., Jacquet M. (2016). Particle assemblage characterization in the Rhone river ROFI, *Journal of Marine Systems*, doi: 10.1016/j.jmarsys.2015.12.010.
7. Constantin S., Doxaran D. and S. Constantinescu (2016). Estimation of water turbidity and analysis of its spatio-temporal variability in the Danube River plume (Black Sea) using MODIS satellite data. *Continental Shelf Research*, 112, 14–30.
8. Doxaran D., Leymarie E., Nechad B. Dogliotti A., Ruddick K., Gernez P. and E. Knaeps (2016). Improved correction methods for field measurements of particulate light backscattering in turbid waters. *Optics Express*, 24(4), 3615-3637.
9. Dogliotti A.I., Ruddick K.G., Nechad B., Doxaran D. and E. Knaeps (2015). A single algorithm to retrieve turbidity from remotely sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment*, 156, 157–168.
10. Bressac M, Guieu C, Doxaran D, Bourrin F, Desboeufs K, Leblond N, Ridame C (2014). Quantification of the lithogenic carbon pump following a simulated dust-deposition event in large mesocosms. *Biogeosciences* 11: 1007-1020 | doi: 10.5194/bg-11-1007-2014.
11. Doxaran, D., Lamquin N., Park Y. J., Mazeran C., Ryu J. H., Wang M. and A. Poteau (2014). Retrieval of the seawater reflectance for suspended solids monitoring in the East China Sea using MODIS, MERIS and GOCI satellite. *Remote Sensing of Environment*, 146, 36-48.
12. Gernez P., Barillé L., Lerouxel A., Mazeran C., Lucas A. and D. Doxaran (2014). Remote sensing of suspended particulate matter in turbid oyster-farming ecosystem. *Journal of Geophysical Research - Oceans*, 119, doi:10.1002/2014JC010055.
13. Matsuoka, A., M. Babin, D. Doxaran, S. Hooker, B.G. Mitchell, S. Bélanger and A. Bricaud (2014). A synthesis of light absorption properties of the Arctic Ocean: application to semianalytical estimates of dissolved organic carbon concentrations from space. *Biogeosciences*, 11, 3131–3147, www.biogeosciences.net/11/3131/2014/, doi:10.5194/bg-11-3131-2014.

14. Rontani J.F., Charriere B., Sempéré R., Doxaran D., Vaultier F., Vonk J.E. and J.K. Volkman (2014). Degradation of sterols and terrestrial organic matter in waters of the Mackenzie Shelf, Canadian Arctic. *Organic Geochemistry*, 75, 61–73.
15. Saulquin B., Fablet R., Ailliot P., Mercier G., Doxaran D., Mangin A. and Hembise Fanton d'Andon O. (2014). Characterization of Time-Varying Regimes in Remote Sensing Time Series: Application to the Forecasting of Satellite-Derived Suspended Matter Concentrations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, DOI 10.1109/JSTARS.2014.2360239.
16. Bélanger, S., Cizmeli, S. A., Ehn, J., Matsuoka, A., Doxaran, D., Hooker, S., and Babin, M. (2013). Light absorption and partitioning in Arctic Ocean surface waters: impact of multiyear ice melting, *Biogeosciences*, 10, 6433-6452, doi:10.5194/bg-10-6433-2013.
17. Forest A., M. Babin, L. Stemmann, M. Picheral, M. Sampei, L. Fortier, Y. Gratton, S. Bélanger, E. Devred, J. Sahlin, D. Doxaran, F. Joux, E. Ortega-Retuerta, W.H. Jeffrey, J. Martín, B. Gasser, J.C. Miquel, Ecosystem function and particle flux dynamics across the Mackenzie Shelf (Beaufort Sea, Arctic Ocean): an integrative analysis of spatial variability and biophysical forcings. *Biogeosciences*, 10, 2833-2866.
18. Astoreca R., Doxaran D., Ruddick K., Rousseau V. and C. Lancelot (2012). Influence of suspended particle concentration, composition and size on the variability of inherent optical properties of the Southern North Sea. *Continental Shelf Research*, 35, 117–128.
19. Bressac M., Guieu C., Doxaran D., Bourrin F., Obolensky G. and J.M. Grisoni (2012). A mesocosm experiment coupled with optical measurements to assess the fate and sinking of atmospheric particles in clear oligotrophic waters. *Geo-Marine Letters*, DOI 10.1007/s00367-011-0269-4, 32, 153-164.
20. Doxaran, D., Ehn, J., Bélanger, S., Matsuoka, A., Hooker, S., and M. Babin (2012): Optical characterisation of suspended particles in the Mackenzie River plume (Canadian Arctic Ocean) and implications for ocean colour remote sensing, *Biogeosciences*, 9, 3213-3229, doi:10.5194/bg-9-3213-2012.
21. Lamquin N., Mazeran C., Doxaran D., Ryu J. H. and Y. J. Park (2012). Assessment of GOCI radiometric products using MERIS, MODIS and field Measurements. *Ocean Science Journal*, 47(3), 287-311.
22. Lorthiois T., D. Doxaran and M. Chami (2012), Daily and seasonal dynamics of suspended particles in the Rhône River plume based on remote sensing and field optical measurements. *Geo-Marine Letters*, DOI: 10.1007/s00367-012-0274-2.
23. Mikkelsen O.A., M. Chami, and D. Doxaran (2012). Contributions from Particles in Europe (PiE) 2010, Villefranche-sur-Mer, France: an introduction, *Geo-Mar. Letters*, 32, 85-87, DOI 10.1007/s00367-012-0279-x.
24. Doron, M, S. Bélanger, D. Doxaran and M. Babin (2011). Spectral variations in the near-infrared ocean reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 15, 1617-1631.
25. Mermex group including D'Ortenzio, M. Babin, M. Chami, D. Doxaran and V. Taillandier (2011). Marine ecosystems' responses to climatic and anthropogenic forcing in the Mediterranean. *Progress in Oceanography*, 91, 97-166.
26. Doxaran, D, Lorthiois, T., Chami, M., Ruddick, K. and A. Mangin (2010). Use of ocean color satellite data to study the dynamics of suspended particles in the Yangtze River plume (East China Sea). *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 7858, 78580H, DOI: 10.1117/12.869426.
27. Leymarie, E. , D. Doxaran, and M. Babin (2010). Uncertainties associated to measurements of inherent optical properties in natural waters, *Applied Optics*, 49, 5415-5436.

28. Petus, C., Chust, G., Gohin, F., Doxaran, D., Froidefond, J.M. and Y. Sagarminaga (2010). Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. *Continental Shelf Research*, 30, 379-392.
29. Doxaran D., J.M. Froidefond, P. Castaing and M. Babin (2009b). Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 81, 321–332.
30. Doxaran D., Ruddick K. McKee D., Gentili B., Tailliez D., Chami M., and M. Babin (2009a), Spectral variations of light scattering by marine particles in coastal waters, from the visible to the near infrared. *Limnology and Oceanography*, 54, 1257-1271.
31. McKee, D., Chami, M., Brown, I., Calzado, V. S., Doxaran, D., and A. Cunningham, A. (2009). Role of measurement uncertainties in observed variability in the spectral backscattering ratio: a case study in mineral-rich coastal waters, *Applied Optics*, 48 (24), 4663-4675.
32. Doxaran, D., M. Babin and E. Leymarie. Near-infrared light scattering by particles in coastal waters. *Optics Express*, Vol. 15, No. 20 12834-12849.
33. Doxaran, D., Cherukuru, R.C.N. and Lavender, S.J., 2006. Inherent and apparent optical properties of turbid estuarine waters: measurements, modelling and application to remote sensing. *Applied Optics*, 45, 2310-2324.
34. Doxaran, D., Castaing, P. and Lavender, S.J. (2006). Monitoring the maximum turbidity zone and detecting fine-scale turbidity features in the Gironde estuary using high spatial resolution satellite sensor (SPOT HRV, Landsat ETM+) data. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 2303-2321.
35. Doxaran, D., Cherukuru, R.C.N. and Lavender, S.J. (2005). Use of reflectance band ratios to estimate suspended and dissolved matter concentrations in estuarine waters. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 1763-1769.
36. Doxaran, D., Cherukuru, C. R.C., Lavender, S.J. and Moore, G.F. (2004b). Use of a spectralon panel to measure the downwelling irradiance signal: case studies and recommendations. *Applied Optics*, 43, 5981-5986.
37. Doxaran, D., Cherukuru, R.C.N. and Lavender, S.J. (2004a). Surface reflection effects on upwelling radiance field measurements in turbid waters. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 6, 690-697.
38. Froidefond, J.M., Lahet, F., Doxaran, D., Prost, M.T. and TERNON, J.F. (2004). Mudflats and mud suspension observed from satellite data in French Guiana. *Marine Geology*, 208, 153-168.
39. Doxaran, D., Froidefond, J.M. and Castaing, P. (2003). Remote sensing reflectance of turbid sediment- dominated waters. Reduction of sediment type variations and changing illumination conditions effects using reflectance ratios. *Applied Optics*, 42, 2623-2634.
40. Doxaran, D., Froidefond, J.M. and Castaing, P. (2002b). A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in coastal sediment-dominated waters. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 5079-5085.
41. Doxaran, D., Froidefond, J.M., Lavender, S.J. and Castaing, P. (2002a). Spectral signature of highly turbid waters. Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote Sensing of Environment*, 81, 149-161.

Impact des publications (source Web Of Science) :

1141 citations, H-index : 19.

# **Dynamique et flux de particules en suspension à l'embouchure des fleuves : approche intégrée mesures et télédétection**

**David Doxaran**

HDR 2017

## **Résumé**

Mes travaux de recherche ont pour but de quantifier et assurer un suivi des particules en suspension à l'embouchure des fleuves (estuaires, deltas, panaches fluviaux). L'approche combine la télédétection de la couleur de l'eau à des mesures in situ (calibration/validation des mesures satellites et profils verticaux le long de la colonne d'eau).

L'étude des propriétés optiques (dans le visible, proche et moyen-infrarouge) des eaux turbides à extrêmement turbides a permis de développer des algorithmes de télédétection pour y estimer la concentration en matières en suspension (MES, 1-1000 mg/l) depuis les zones de maximum de turbidité jusqu'à la limite offshore des panaches fluviaux. L'application de ces algorithmes aux mesures satellites assure un suivi des variations de flux solides (MES et carbone organique particulaire) à l'embouchure des fleuves en fonction des pressions en jeu (e.g., changement climatique) et une meilleure compréhension du rôle des forçages physico-chimiques sur la dynamique des MES.

Le développement de nouveaux algorithmes (détection de la composition et taille des MES) et l'analyse de séries temporelles satellites archivées sur les zones sensibles (e.g., région Arctique) devrait conduire à des bilans et prospectives sur les échanges de matière à l'interface continent-océan.

## **Abstract**

My research activity aims at monitoring the dynamics of suspended particulate matter (SPM) at river mouths (estuaries, deltas and river plumes). Methods combine the use of ocean colour remote sensing and in situ data (calibration/validation of satellite data and vertical profiles along the water column).

An improved knowledge of the optical properties (in the visible, near- and shortwave-infrared spectral regions) of medium to extremely turbid waters has led to the development of algorithms to remote sense SPM concentrations (1-1000 mg/l) from the maximum turbidity zones to the offshore limits of river plumes. Applying these algorithms to ocean colour satellite data allows monitoring solid (SPM and particulate organic carbon) fluxes at river mouths taking into account human and environmental pressures and better understanding the impact of the main physical forcings on SPM dynamics.

The development of new algorithms (to remote sense the composition and size of SPM) and analysis of archived satellite data time series in sensitive regions (e.g., the Arctic coastal zone) should provide new ways to monitor the exchanges of matter between land and ocean.