



**HAL**  
open science

## Journée de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR4)

Olivier Radakovitch, Hervé Piégay, Dad Roux-Michollet

► **To cite this version:**

Olivier Radakovitch, Hervé Piégay, Dad Roux-Michollet. Journée de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR4). 2018. <hal-03750161>

**HAL Id: hal-03750161**

**<https://hal.science/hal-03750161v1>**

Submitted on 11 Aug 2022

**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.



HAL Authorization

# JOURNEE DE L'OBSERVATOIRE DES SEDIMENTS DU RHÔNE

Mardi 23 janvier 2018 | LYON

Programme,  
recueil des résumés,  
synthèses



ZABR  
graie



2015-2020  
**RHÔNE**  
Donnons un avenir à notre fleuve

**L'EUROPE S'ENGAGE**  
pour le Rhône  
et la Saône  
avec le FEDER





---

# Sommaire

---

<b>Avant-propos</b> .....	5
<b>Programme</b> .....	6
<b>Résumés et synthèses</b> .....	9
<b>INTRODUCTION</b>	
L'OSR : une plateforme de recherche pour comprendre le transit sédimentaire et l'évolution des formes fluviales du Rhône Hervé Piégay, <i>UMR 5600</i> - Olivier Radakovitch, <i>IRSN</i> - Dad Roux-Michollet, <i>GRAIE-OHM VR</i> .....	11
<b>SESSION 1   CHANGEMENTS MORPHOLOGIQUES ET ENJEUX ACTUELS</b>	
L'OSR vu par la DREAL Auvergne Rhône-Alpes Fanny Trouillard, <i>DREAL Auvergne Rhône-Alpes</i> .....	15
Evolution morphologique du Rhône au cours du dernier siècle, transport solide et enjeux actuels Thomas Dépret, <i>UMR 5600</i> .....	17
<b>SESSION 2   SABLES ET MATIÈRES EN SUSPENSION DU RHÔNE : SUIVI ET BILAN SUR LA PÉRIODE 2000-2016</b>	
Flux et origine des matières en suspension et des sables sur le Rhône et ses affluents Aymeric Dabrin et Marina Launay, <i>IRSTEA</i> .....	27
<b>SESSION 3   ÉVOLUTION TEMPORELLE ET VARIATIONS SPATIALES DES FLUX DE CONTAMINANTS</b>	
L'OSR vu par l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse Eve Sivade, <i>Agence de l'eau RMC</i> .....	37
Etat des lieux des contaminants prioritaires et émergents : concentrations, flux et tendances Gaëlle Poulhier, <i>IRSTEA</i> .....	39
<b>SESSION 4   SCHÉMA DE RÉ-ÉLARGISSEMENT DU RHÔNE ET REMOBILISATION DES MARGES ALLUVIALES</b>	
Éléments de connaissance pour la mise en œuvre du schéma de redynamisation du Rhône : expérimentations et suivis pour une gestion adaptative Hervé Piégay, <i>UMR 5600</i> .....	47
Réactivation de la dynamique fluviale sur le Rhône : de la faisabilité aux premières actions Christophe Moiroud, <i>CNR</i> .....	53
<b>SESSION 5   OUTILS NUMÉRIQUES DE L'OSR ET TRANSFERTS OPERATIONNELS DES CONNAISSANCES PRODUITES</b>	
Comment l'information et le savoir-faire produits par l'OSR sont-ils diffusés ? Valorisation, web-SIG et base de données de l'OSR Fanny Arnaud, <i>UMR 5600</i> .....	57
L'expertise de l'OSR au service du suivi de la gestion sédimentaire du Haut-Rhône 2016 Thomas Pollin, <i>CNR</i> .....	61
Miribel-Jonage : un site aux enjeux multiples Benoit Mottet et Isabelle Jacquélet, <i>EDF</i> .....	63
<b>SESSION 6   L'OSR AU QUOTIDIEN : MESURES DE TERRAIN, MÉTHODOLOGIES ET INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES</b>	
Dans les coulisses de l'OSR : visites virtuelles de terrain et de labo Jérôme Le Coz, Chloé Le Bescond, Aymeric Dabrin et Céline Berni, <i>IRSTEA</i> - Thierry Winiarski, <i>ENTPE</i> - Mathieu Cassel, <i>UMR 5600</i> .....	67



---

# Avant-Propos

---

## Contexte :



Créé en 2009, l'Observatoire des Sédiments du Rhône ([OSR](#)) a pour mission d'éclairer les gestionnaires sur le fonctionnement hydrosédimentaire du fleuve.

Ancré dans une démarche de co-construction entre scientifiques et acteurs du Plan Rhône, il fournit des éléments de connaissance sur l'évolution morphologique du fleuve, l'état actuel du transport solide, les stocks et flux de sables et matières en suspension et les niveaux de pollution des sédiments.

## Objectifs :

L'objectif de cette journée est de présenter une synthèse des résultats acquis sur quatre thèmes majeurs :

- (1) le bilan sédimentaire et le fonctionnement géomorphologique,
- (2) la redynamisation des marges alluviales,
- (3) les flux de matières en suspension et les apports des affluents,
- (4) la variabilité spatiale et temporelle des concentrations en contaminants, flux et tendances.

Les intervenants présenteront des exemples concrets de transferts opérationnels des connaissances produites et souligneront également les innovations technologiques réalisées.

## Publics :

Cette rencontre s'adresse aux acteurs institutionnels du Rhône, aux élus et aux responsables techniques des collectivités, aux gestionnaires des milieux aquatiques et à leurs partenaires techniques, aux scientifiques soucieux de la dynamique sédimentaire du Rhône.

Cette journée est ouverte aux acteurs d'autres bassins versants intéressés par les travaux conduits au sein de l'Observatoire des Sédiments du Rhône.

## Partenaires de l'OSR :



# Programme

09h00	ACCUEIL DES PARTICIPANTS
09h30	<b>L'OSR : une plateforme de recherche pour comprendre le transit sédimentaire et l'évolution des formes fluviales du Rhône</b> Hervé Piégay - UMR 5600 Olivier Radakovitch - IRSN Dad Roux-Michollet - GRAIE, OHM Vallée du Rhône
<b>Session 1   Changements morphologiques et enjeux actuels</b>	
09h45	 <b>L'OSR vu par la DREAL Auvergne-Rhône-Alpes</b> ( <i>vidéo</i> ) Fanny Trouillard - DREAL Auvergne Rhône-Alpes, Service Eau Hydroélectricité Nature
09h50	<b>Evolution morphologique du Rhône au cours du dernier siècle, transport solide et enjeux actuels</b> Thomas Dépret - UMR 5600
10h10	<b>Questions-débat</b>
<b>Session 2   Sables et matières en suspension du Rhône : suivi et bilan sur la période 2000-2016</b>	
10h30	<b>Flux et origine des matières en suspension et des sables sur le Rhône et ses affluents</b> Aymeric Dabrin - IRSTEA Marina Launay - IRSTEA
10h50	<b>Questions-débat</b>
11h10	PAUSE CAFÉ
<b>Session 3   Évolution temporelle et variations spatiales des flux de contaminants</b>	
11h45	 <b>L'OSR vu par l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse</b> ( <i>vidéo</i> ) Eve Sivade - Agence de l'eau RMC
11h50	<b>Etat des lieux des contaminants prioritaires et émergents : concentrations, flux et tendances</b> Gaëlle Poulhier - IRSTEA
12h10	<b>Questions-débat</b>
12h25	DÉJEUNER

---

# Programme (suite)

---

Session 4   Schéma de ré-élargissement du Rhône et remobilisation des marges alluviales	
14h15	<b>Éléments de connaissance pour la mise en œuvre du schéma de redynamisation du Rhône : expérimentations et suivis pour une gestion adaptative</b> Hervé Piégay - UMR 5600
14h35	<b>Réactivation de la dynamique fluviale sur le Rhône : de la faisabilité aux premières actions</b> Christophe Moiroud - CNR
14h50	<b>Questions-débat</b>
Session 5   Outils numériques de l'OSR et transferts opérationnels des connaissances produites	
15h05	<b>Comment l'information et le savoir-faire produits par l'OSR sont-ils diffusés ? Valorisation, web-SIG et base de données de l'OSR</b> Fanny Arnaud - UMR 5600
15h20	<b>L'expertise de l'OSR au service du suivi de la gestion sédimentaire du Haut-Rhône 2016</b> Thomas Pollin - CNR
15h35	<b>Miribel-Jonage : un site aux enjeux multiples</b> Benoit Mottet - EDF Isabelle Jacquelet - EDF
15h50	<b>Questions-débat</b>
Session 6   L'OSR au quotidien : mesures de terrain, méthodologies et innovations technologiques	
16h05	<b>Dans les coulisses de l'OSR : visites virtuelles de terrain et de labo</b> Jérôme Le Coz, Chloé Le Bescond, Aymeric Dabrin et Céline Berni - IRSTEA Thierry Winiarski - ENTPE Mathieu Cassel - UMR 5600
16h35	<b>Questions-débat</b>
Conclusion	
16h50	<b>Les grands messages à retenir de la journée, les perspectives de l'OSR</b> Hervé Piégay - UMR 5600 Olivier Radakovitch - IRSN
17h00	FIN DE LA JOURNÉE



---

# **RÉSUMÉS ET SYNTHÈSES**

---



# INTRODUCTION

---

## L'Observatoire des Sédiments du Rhône : une plateforme de recherche pour comprendre le transit sédimentaire et l'évolution des formes fluviales du Rhône

Olivier Radakovitch<sup>1</sup>, Hervé Piégay<sup>2</sup>, Dad Roux-Michollet<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IRSN

<sup>2</sup> ENS CNRS UMR 5600

<sup>3</sup> GRAIE – Observatoire Hommes-Milieus Vallée du Rhône

L'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR) a été créé en 2009 à la suite de questions qui ont émergé dans le cadre du Plan Rhône. Il a été mis en place par des équipes de recherche réparties sur l'ensemble du linéaire du fleuve. Cet observatoire a pour mission de produire et analyser des données caractérisant l'évolution du lit du fleuve ainsi que les flux sédimentaires et les contaminants associés. Il a également pour mission d'apporter des réponses concrètes aux acteurs du fleuve afin de les aider à définir des politiques durables de gestion du lit du fleuve et du transit sédimentaire.

L'OSR est un programme scientifique co-construit collectivement par un collectif de chercheurs issu de 5 établissements de recherche (CNRS, Irstea, ENTPE, IRSN et Ifremer) et les principaux gestionnaires du fleuve (DREAL, Agence de l'Eau RMC, Compagnie Nationale du Rhône, EDF, Région Auvergne Rhône-Alpes, Région PACA et Région Occitanie). Il est financé au titre du Plan Rhône et bénéficie du soutien du Fond Européen pour le Développement Régional (POP Rhône-Saône).

L'objet d'étude de cet observatoire est la vallée du Rhône, du Léman à la Méditerranée, soit un linéaire de plus de 500 km. L'ensemble de ce corridor fluvial est pris en compte, qu'il s'agisse du chenal en eau, des retenues à l'amont des aménagements hydroélectriques ou encore des marges alluviales et des milieux annexes. Ces espaces correspondent à différents compartiments d'un même hydrosystème qu'il est aujourd'hui nécessaire de comprendre dans son ensemble (continuum amont-aval, différences rive droite-rive gauche, connexion fleuve-littoral). L'étude des bilans et des dynamiques hydro-sédimentaires s'inscrit dans un cadre temporel emboîté allant du siècle à l'instantané.

Les recherches de l'OSR sont structurées en axes définis collectivement par le Conseil Scientifique. Les actions de recherche conduites entre 2014 et 2017 ont été structurées autour de 5 axes : (I) Charge de fond et géométrie du chenal, (II) Sédimentation et morphologie du lit majeur, (III) Flux de MES et contaminants associés, (IV) Sources de contaminants, et (V) Modélisation et outils numériques. Le prochain programme d'actions (2018-2020) a été organisé selon un plan en 4 axes qui permet de répondre aux priorités des partenaires et restructurer les équipes autour de questions collectives permettant de renforcer le dispositif de connaissances : A) redynamisation des marges alluviales, B) monitoring des flux, C) approfondissement des connaissances pour établir le diagnostic de l'état fonctionnel du Rhône, et D) Outils numériques et gestion des données.



# SESSION 1

---

## Changements morphologiques et enjeux actuels

*Mots clés : aménagements, transport solide, lignes d'eau, sédimentation des marges, delta, habitats, risques, modélisation, enjeux actuels.*

### 1- L'OSR vu par la DREAL Auvergne Rhône-Alpes

Fanny Trouillard<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Unité Travaux Fluviaux, Pôle Police de l'eau et Hydroélectricité, Service Eau Hydroélectricité Nature, DREAL Auvergne Rhône-Alpes

### 2- Evolution morphologique du Rhône au cours du dernier siècle, transport solide et enjeux actuels

**Pilotes :** Thomas Dépret<sup>1</sup> et Hervé Piégay<sup>1</sup>

**Ensemble des participants :** Amel Ati<sup>2</sup>, Adrien Barra<sup>1</sup>, Jean-François Berger<sup>1</sup>, Laurie Boudet<sup>2</sup>, Benoit Camenen<sup>3</sup>, Mathieu Cassel<sup>1</sup>, Violaine Dugué<sup>3</sup>, Jean-Baptiste Faure<sup>3</sup>, Marina Launay<sup>3</sup>, Jérôme Le Coz<sup>3</sup>, Brice Noiro<sup>1</sup>, Olivier Radakovitch<sup>4</sup>, Bianca Raeppe<sup>1</sup>, François Sabatier<sup>2</sup>, Gabrielle Seignemartin<sup>1</sup>, Michal Tal<sup>2</sup>, Alvaro Tena<sup>1</sup>, Daniel Vazquez Tarrío<sup>2</sup>, Thierry Winiarski<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ENS CNRS UMR 5600

<sup>2</sup>CEREGE CNRS UMR 7330

<sup>3</sup>Irstea Lyon Villeurbanne

<sup>4</sup>IRSN

<sup>5</sup>ENTPE CNRS UMR 5023



# L'Observatoire des sédiments du Rhône vu par la DREAL Auvergne Rhône-Alpes

Fanny TROUILLARD, DREAL Auvergne Rhône-Alpes

## Quel est le cadre de la gestion du fleuve, quelles sont les missions de la DREAL en lien avec le fleuve ?

Le fleuve Rhône a été fortement aménagé au cours du dernier siècle, pour la navigation et l'hydroélectricité. Il joue un rôle essentiel sur les territoires qu'il traverse et est au cœur de nombreux usages : navigation, hydroélectricité, tourisme et loisirs, irrigation, industries... Comme pour tous les cours d'eau, le code de l'environnement fixe des objectifs de gestion équilibrée et durable de la ressource en eau : prévention des inondations et préservation des écosystèmes, qualité des eaux, protection de la ressource en eau potable, conciliation des usages... Dans ses missions d'instruction, de contrôle et d'animation, la DREAL veille au respect de cette gestion équilibrée. Du point de vue de la politique de l'eau, l'action de l'Etat répond aux objectifs environnementaux de la directive Cadre sur l'eau : atteinte du bon état ou du bon potentiel écologique. Le Programme de Mesures (PdM) du SDAGE est la feuille de route des différents acteurs dans le domaine de l'eau pour atteindre le bon état. La DREAL a pour mission de traduire et d'animer ce PdM en plan d'actions concret, par exemple des actions visant à améliorer la morphologie, pression importante sur le fleuve. La DREAL œuvre également pour améliorer la connaissance du risque inondation en produisant des données sur le fonctionnement du Rhône (hydrologie, zones inondables, vulnérabilité...), et participe via le Plan Rhône au financement des travaux de protection contre les inondations. La DREAL anime la mise en œuvre de la doctrine PPRI Rhône, dans le cadre du volet inondation du Plan Rhône, et produit l'aléa de référence en vue de l'élaboration des PPRI par les DDT. Pour mettre en œuvre ces missions, il est important d'avoir une vision globale du fonctionnement du fleuve, et de comprendre la "trajectoire du fleuve". Cette notion est au cœur des travaux de l'OSR : comment le fleuve s'est transformé et comment évolue-t-il aujourd'hui ? Les actions menées aujourd'hui s'inscrivent dans cette perspective d'évolution.

## Comment les connaissances de l'OSR aident à la mise en œuvre des objectifs de gestion et de restauration du Rhône ?

La DREAL utilise les résultats de l'OSR dans le traitement opérationnel de certains dossiers, sur des secteurs ciblés, mais également l'échelle du fleuve pour ses missions de programmation.

**Dans le cadre de la gestion du risque d'inondation :** La DREAL est intéressée par les travaux menés par l'OSR pour comprendre les effets de la sédimentation sur les marges du fleuve sur le relèvement de la ligne d'eau et prévoir son évolution. D'autre part, à la croisée entre GEMA et PI, la DREAL suit avec intérêt les résultats des études sur les élargissements des marges et la suppression des casiers Girardon afin d'approfondir l'évaluation des effets de ces opérations de restauration écologique sur les crues d'un point de vue local mais également à une plus grande échelle.

**Pour les opérations ponctuelles sur la gestion des sédiments :** Dans le cadre de l'instruction des dossiers réglementaires, la DREAL est souvent confrontée à des problématiques sédimentaires. Notre attente vis-à-vis de l'OSR est d'avoir une meilleure connaissance du transport solide du fleuve pour orienter au mieux la gestion sédimentaire.

**Chasses Haut Rhône et Isère** : Sur certains barrages hydroélectriques, les gestionnaires doivent faire des « chasses » pour évacuer les sédiments qui se sont accumulés dans la retenue. Les impacts de ces chasses peuvent être importants et complexes à appréhender. L'OSR contribue à améliorer la connaissance des impacts des chasses afin de mieux conduire ces opérations, par des actions de suivi, de mesures, mais également de modélisation. C'est le cas dans le cadre des chasses du Haut Rhône, où un gros travail franco-suisse a été mené pour aboutir en 2016 à la définition de nouvelles modalités moins impactantes (= abaissement partiel et contrôle des teneurs en MES) qui nécessitent un suivi auquel l'OSR participe. C'est également le cas sur les chasses de l'Isère, la dernière en 2015 s'est révélée impactante sur le Rhône, notamment pour les installations hydroélectriques, la navigation, la qualité de l'eau mais aussi sur les annexes du fleuve, réservoirs de biodiversité. Il y a une forte attente de l'ensemble des acteurs concernés pour trouver des modalités de chasse moins impactantes, ce qui nécessite des études techniques à mener auxquelles l'OSR participe.

**Restitutions au fleuve des matériaux de curage** : De nombreux travaux sur le fleuve mobilisent des matériaux : des opérations de curage sont nécessaires pour l'entretien des ouvrages de navigation ou dans le cadre de la non aggravation des crues par exemple, mais également des travaux de restauration conduisent à recreuser des lînes et extraire des sédiments. Réglementairement, les pétitionnaires doivent privilégier la restitution au fleuve des sédiments excédentaires, compte tenu du déficit sédimentaire du fleuve. Cependant cette restitution au fleuve n'est pas toujours facile à mettre en œuvre par les maîtres d'ouvrages, et se pose la question d'où déposer les sédiments excédentaires, et comment les restituer pour satisfaire au mieux les différents enjeux : plus-value écologique, non aggravation des crues, gestion des sédiments contaminés... Les travaux de l'OSR et la meilleure connaissance du transport solide du fleuve pourront aider à répondre à ces questions.

**Pour la programmation dans le temps et l'espace** : L'OSR apporte un réel appui, notamment grâce à sa vision globale sur l'ensemble de l'axe, et par sa vision historique du fleuve.

**Identification des actions de restauration** : L'état des lieux réalisé dans le cadre du SDAGE a montré que le Rhône était en mauvais état écologique. Un des enjeux est de restaurer l'écologie du fleuve, notamment en travaillant sur les lînes et marges du fleuve, ce qui participe également à réduire l'impact des inondations. L'enjeu pour la DREAL et ses partenaires a été de construire un plan d'actions pour atteindre les objectifs de bon état. Aujourd'hui le plan d'actions est défini mais a encore besoin d'être précisé sur certains secteurs du Rhône. Pour cela, il faut identifier les actions de restauration les plus pertinentes d'un point de vue morphologique, écologique et vis-à-vis du risque inondation. L'OSR peut apporter un appui pour l'identification de ces actions, notamment avec le Schéma directeur de la réactivation de la dynamique fluviale.

**Etude pour le schéma de gestion sédimentaire du Rhône** : Il s'agit d'une nouvelle étape dans la gestion du Rhône, élaborer un schéma sur l'ensemble de l'axe afin d'obtenir un diagnostic partagé et des orientations de gestion pour tous les intervenants sur le fleuve, notamment pour une meilleure gestion du transport solide (qui ne sera jamais continue de la source au delta, mais qui peut être améliorée). Les travaux de l'OSR et les espaces communs de travail entre acteurs permettent d'alimenter la réflexion autour de ce schéma global.

## Quelles sont les attentes de la DREAL vis-à-vis de l'accès aux données ?

C'est important pour l'Etat et les gestionnaires d'avoir accès aux données et résultats des études scientifiques. L'OSR permet de produire, centraliser et conserver une connaissance collective produite par beaucoup d'acteurs et notamment des scientifiques pluridisciplinaires. Pour un fleuve comme le Rhône, il est important d'avoir des lieux d'échanges et de construction d'une culture commune entre acteurs différents : gestionnaires, collectivités, industriels, scientifiques, Agence de l'eau, services de l'État... L'OSR joue le rôle d'un collectif qui fait vivre, développe et partage la connaissance.

# Evolution morphologique du Rhône au cours du dernier siècle, transport solide et enjeux actuels

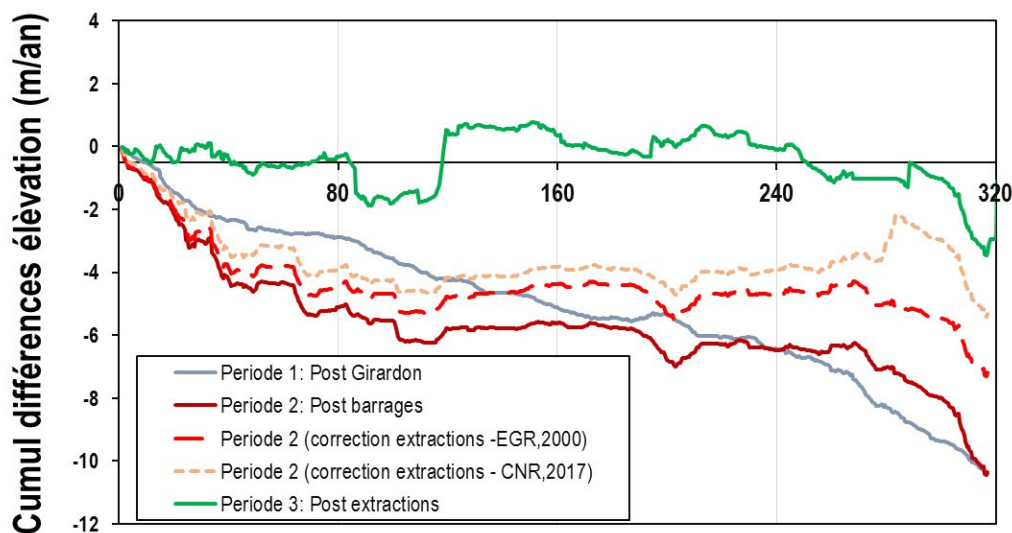
## I. Contexte et objectifs

Le Rhône au 20<sup>ème</sup> siècle a enregistré deux phases d'aménagements qui ont eu des effets potentiels sur sa morphologie. Les aménagements Girardon (deuxième moitié du 19<sup>ème</sup> siècle, première moitié du 20<sup>ème</sup>) ont conduit à la chenalisation du lit du Rhône de Lyon à la méditerranée et à la déconnexion de la plupart des bras secondaires. La construction d'une série de barrages en dérivation (deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle) est à l'origine d'une diminution des débits dans les sections court-circuitées et de l'énergie hydraulique du fleuve au niveau des retenues. Dans le même temps, une réduction des apports sédimentaires issus des affluents est également observée du fait des extractions en lit mineur ou de la présence accrue de protections de berges et d'ouvrages divers et variés (barrages, plages de dépôts, zones de rétention) faisant obstacle au transit des sédiments. Pour l'ensemble de ces raisons, le lit est aujourd'hui figé, pavé, bien souvent incisé, ce qui affecte significativement la mosaïque des habitats aquatiques et riverains. Si l'histoire morphologique du fleuve commence à se clarifier, l'objectif est aujourd'hui de bien **évaluer l'importance respective des différents facteurs** à l'origine de l'état actuel du fleuve, de comprendre son fonctionnement et de proposer des outils permettant de mieux **évaluer l'effet d'actions réparatoires** potentielles.

## II. Ajustements morphologiques

### II.1 Evolution verticale du lit

L'évolution verticale du lit a pu être reconstituée depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle grâce à l'exploitation de données bathymétriques (Figure 1).



**Figure 1.** Evolution cumulée de l'altitude du thalweg entre Lyon et la Méditerranée pour les différentes périodes d'étude.

L'analyse différentielle des profils en long disponibles a permis de mettre en évidence un enfoncement du chenal principal. Les taux d'incision en réponse aux différentes phases d'aménagement ont également été déterminés. La phase d'enfoncement la plus importante fait suite aux travaux « Girardon » (post-1860), destinés à promouvoir la navigation (1,7 cm/an). L'incision s'est poursuivie après la construction des ouvrages d'aménagement hydroélectrique (post-1950), mais à un taux plus faible (1.2 cm/an). Les extractions de graviers dans le lit expliquent environ deux tiers de l'incision survenue au cours de cette période. Depuis l'arrêt des prélèvements, l'incision a été très faible (0,2 cm/an).

## II.2 Evolution planimétrique

L'évolution planimétrique de la bande active du Rhône a été reconstituée depuis 1860, voire dans certain cas depuis 1810-1830, grâce à l'exploitation de cartes anciennes et de photographies aériennes sur les secteurs de Péage-de-Roussillon, Donzère-Mondragon et Pierre-Bénite (**Figure 2**). L'analyse diachronique de la planimétrie du fleuve indique une importante diminution des largeurs de bandes actives et du nombre de bras. Depuis le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle, la largeur du lit a ainsi été réduite de 65-70 %. Deux phases de rétraction sont à distinguer. La première, avec une réduction de 40% de la superficie du lit en 1860, est de loin la plus importante (**Figure 3**). Elle survient en réponse à la mise en place des aménagements Girardon et est principalement caractérisée par un atterrissement et une végétalisation des chenaux secondaires. (**Figure 3**). La seconde phase, qui est de l'ordre de 20% de réduction, est liée à la dérivation des débits au niveau des tronçons court-circuités et à l'effondrement de la ligne d'eau en débit réservé qui met à nu des surfaces importantes soumises pour partie à la végétalisation. Elle affecte pour l'essentiel les marges proximales du chenal : casiers et champs d'épis.

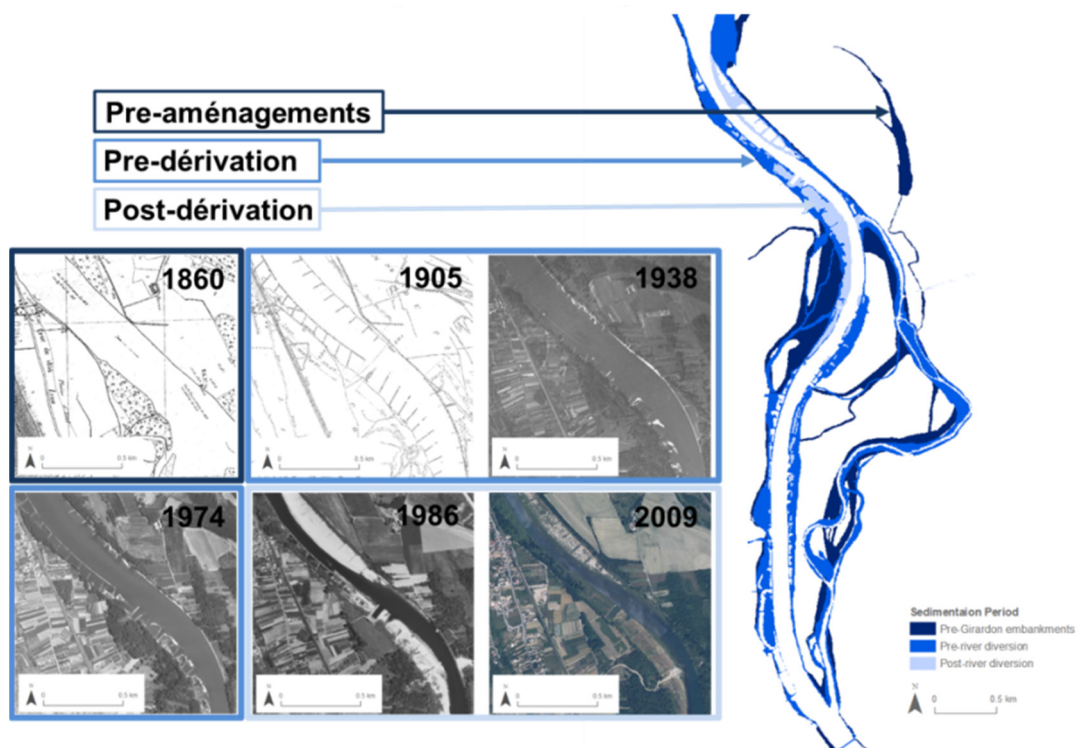
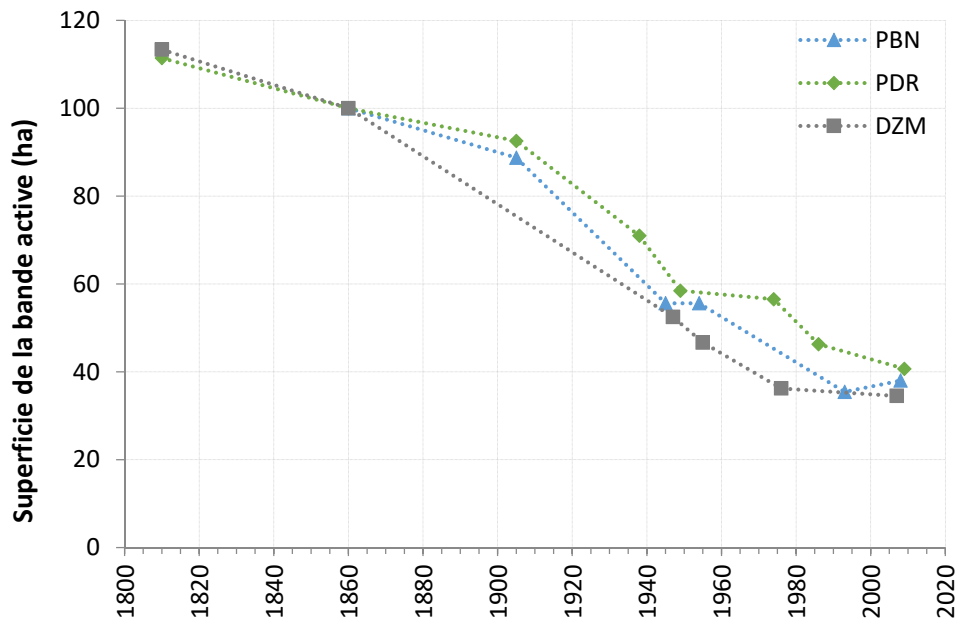


Figure 2. Evolution de la bande active depuis 1860 sur le secteur de Péage-de-Roussillon.



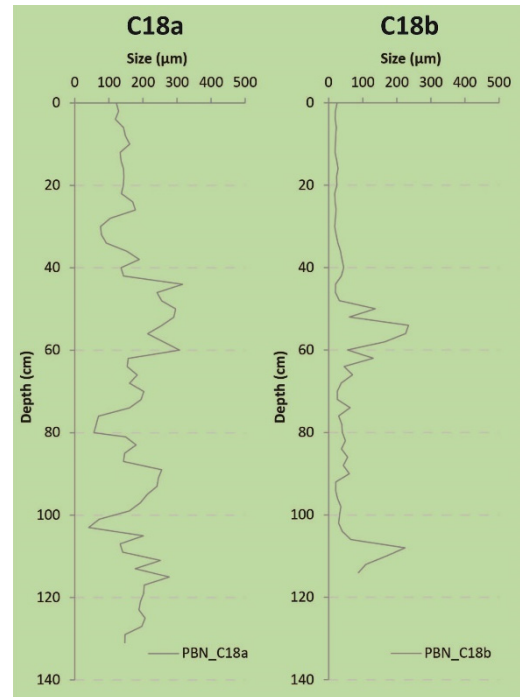
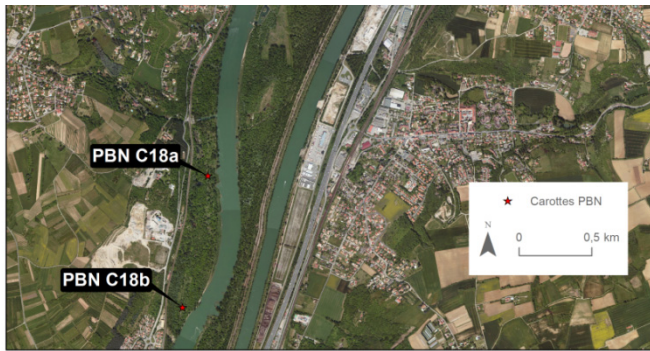
**Figure 3.** Comparaison de l'évolution de la largeur moyenne de la bande active du Rhône entre 1810 et 2009 en considérant 1860 comme référence (base 100) pour les 3 secteurs d'étude, Pierre-Bénite, Péage-de-Roussillon et Donzère.

Sur les trois secteurs d'étude, l'évolution de la plaine alluviale a également été étudiée plus précisément à partir de sondages à la perche et de profils radar (GPR). Ceci a permis de mesurer l'impact des phases d'aménagements sur la sédimentation.

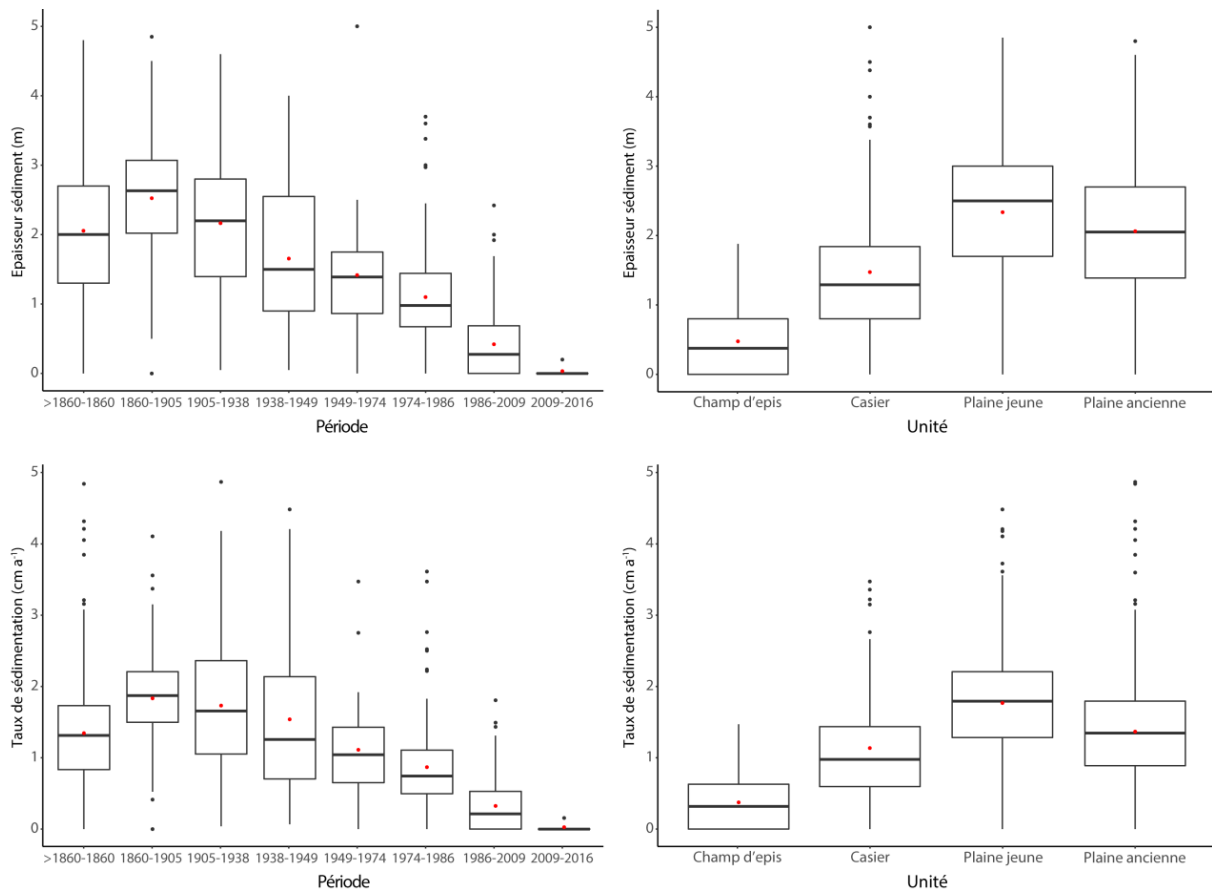
Le patron de sédimentation a été profondément transformé par les aménagements. Avant l'intervention Girardon, la sédimentation est beaucoup plus sableuse et plus importante (**Figure 4**). C'est ainsi que sur Péage de Roussillon les taux de sédimentation les plus forts sont observés sur les unités les plus anciennes (**Figure 5**). C'est le cas aussi sur Donzère. A noter que cette sédimentation était contrecarrée par une érosion latérale également très active, comme l'ont souligné les travaux de Dépret et al. (2017). Cette érosion favorisait ainsi une régénération périodique de ces milieux. Le lit étant fixé depuis la seconde moitié du 19<sup>ème</sup> siècle, cette régénération n'est plus permise. De plus, la plaine alluviale est actuellement perchée et n'enregistre quasiment plus de sédimentation. La sédimentation au 20<sup>ème</sup> siècle est principalement observée dans les bras secondaires déconnectés, actifs au 19<sup>ème</sup> siècle, et les casiers Girardon établis initialement dans le chenal en eau du fleuve.

La déconnexion des bras secondaires a favorisé une très forte sédimentation de ces bras et notamment de leurs marges. Cette sédimentation s'exprime principalement lors de la première phase d'aménagement. Les casiers sont également affectés, mais dans une moindre mesure. Lors de la seconde phase, ce sont principalement les casiers riverains du bras principal qui enregistrent une phase d'atterrissement et de sédimentation.

La granulométrie au 20<sup>ème</sup> siècle est beaucoup plus fine, sablo-limoneuse, que la granulométrie des dépôts antérieurs. Cela résulte de la réduction de l'énergie hydraulique dans les zones de sédimentation liée à la déconnexion de ces milieux du fait de l'incision du lit, de la construction d'ouvrages limitant les débordements ou encore du laminage des crues consécutif à la dérivation d'une partie des hautes eaux dans le canal.



**Figure 4.** Evolution verticale de la taille médiane des sédiments sur deux carottes prélevées sur le secteur de Pierre Bénite. Toutes deux enregistrent une rupture granulométrique marquée autour de 40 cm de profondeur indiquant une modification significative de la sédimentation dans la plaine, sans doute lors de la construction des ouvrages Girardon.



**Figure 5.** Taux de sédimentation observée pour chaque période d'atterrissement sur le secteur de Péage-de-Roussillon. Les unités les plus anciennes enregistrent les taux de sédimentation les plus importants.

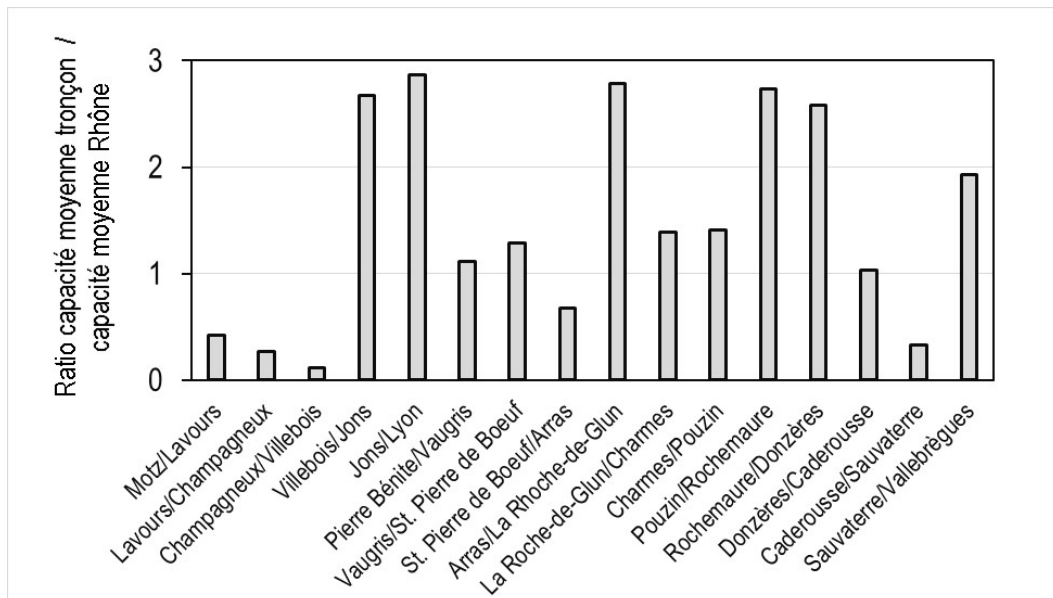
Si l'on considère à la fois les changements morphologiques du lit actif et de la plaine alluviale au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, on constate que celui se fige et se rétracte et qu'une déconnexion importante est observée entre le lit actif et ses marges. Cela résulte de l'incision du lit, du tarissement sédimentaire et de l'exhaussement des marges. Quelques différences existent selon les sites, notamment en termes de chronologie, mais ce schéma général est valable pour tous.

### III. Du diagnostic à la modélisation fonctionnelle au service de l'opérationnel

Le diagnostic géomorphologique a permis de bien évaluer l'évolution du chenal et les facteurs qui la contrôlent. A partir de ces éléments et du travail de modélisation hydraulique qui a été engagé dans OSR2, il est possible de commencer à mieux évaluer le fonctionnement actuel du fleuve et d'envisager des simulations afin de déterminer l'effet potentiel des actions. Ceci concerne la capacité de transport du chenal, la transparence des ouvrages, la mobilité des particules ou encore l'effet hydraulique des marges.

#### III.1 Evaluation de la capacité de transport du chenal

La capacité de transport de la charge du fond a été estimée pour le régime hydraulique actuel à partir du couplage de données issues d'un modèle hydraulique 1D (MAGE), de données granulométriques (OSR2) et d'équations du charriage. Les sorties du modèle indiquent tout d'abord que l'hydraulique actuelle du fleuve est fortement compartimentée par l'effet de retenue des barrages, et ce même pour les plus forts débits. Cet effet se répercute sur la capacité de transport, cette dernière diminuant fortement le long des retenues. Sur la portion amont des tronçons court-circuités, la capacité tend en revanche à augmenter en direction de l'aval, possiblement en lien avec un pavage plus important à l'aval immédiat des barrages. En utilisant le ratio entre capacité moyenne de chaque tronçon et capacité moyenne du Rhône, ces analyses ont également permis d'identifier les tronçons à plus ou moins forte intensité de transport (**Figure 6**).



**Figure 6.** Ratio entre la capacité annuelle de transport par charriage estimé pour chaque secteur et la capacité annuelle moyenne estimée pour tout le Rhône. Ce ratio permet d'identifier des tronçons à plus ou moins forte intensité de transport par charriage.

Par ailleurs, l'influence des dérivations sur les capacités de transport dans les tronçons court-circuités a été quantifiée. Cette analyse montre que les capacités de transport actuelles dans les tronçons court-circuités sont en moyenne 20 fois plus faibles par rapport à un régime non-aménagé. Les capacités de

transport ont aussi été calculées à partir d'une granulométrie plus fine, afin de caractériser les effets du déficit sédimentaire actuel. Les capacités ainsi déterminées sont en moyenne un ordre de magnitude plus élevées. Enfin, la compétence de l'écoulement pour différents débits a été estimée. Ces calculs indiquent que pour une crue de période de retour cinquantennale, la taille des particules potentiellement mobilisables est plus fine que la taille médiane du lit. Le lit actuel du Rhône est donc très peu mobile.

La méthode établie pour estimer la capacité du transport par charriage sur tout le chenal peut d'ores-et-déjà être appliquée afin d'analyser avec plus de détail les secteurs soumis à des enjeux opérationnels particuliers et de réaliser un diagnostic avant travaux.

### III.2 Evaluation de la transparence des barrages, un premier pas en direction de continuité sédimentaire

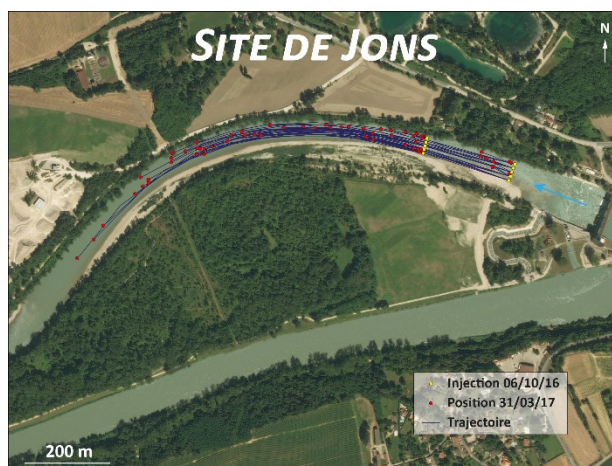
Ces travaux se sont focalisés sur le cas de la retenue de Bourg-lès-Valence, sujette depuis quelques années à des opérations de réinjections de sédiments grossiers. La méthodologie mise en place combine modélisation hydraulique 1D (MAGE), bilans sédimentaires et caractérisation granulométrique de surface et de subsurface (photographies et volumétrie). Les investigations réalisées ont permis de mettre en évidence la faible capacité d'ajustement morphologique du secteur. L'exportation à l'aval de la retenue de la totalité du stock sédimentaire réinjecté semble peu probable. Des simulations de chasse indiquent qu'au moins 20 % de ce stock resterait piégé dans le réservoir pour une crue cinquantennale. Pour un mode de fonctionnement classique, la taille maximale des particules exportables à l'aval du barrage est inférieure à 20 mm. Les réinjections de matériel grossier (> sable) dans la retenue à des fins de recharge sédimentaire sont donc vraisemblablement peu pertinentes.

De façon plus générale, et dans la mesure où les conditions de transport sur ce secteur sont probablement similaires à celles rencontrées dans la majorité des autres retenues du Rhône, espérer un rétablissement de la continuité sédimentaire pour l'intégralité du spectre granulométrique caractérisant le fond du lit du Rhône apparaît peu réaliste. Par ailleurs, accroître la robustesse des résultats tirés du modèle hydraulique 1D en matière de transport solide passe par une amélioration des connaissances relatives à la granulométrie du lit (méthodes d'acquisition, procédures de traitement, fiabilité des résultats, emprises spatiales caractérisées). Enfin, les suivis bathymétriques sont une source essentielle de données pour valider les simulations.

### III.3 Transport actif et vitesses de transport

Les vitesses de déplacement de la charge de fond constituent un paramètre de contrôle majeur des modalités d'ajustement morphologiques des rivières. Une méthodologie de suivi des déplacements de la charge de fond sur des tronçons de rivière larges et profonds a été développée à partir de RFID actifs (taux de retour élevés et investissement temps-personnel relativement limité) sur le secteur de Miribel-Jonage. Celui-ci est caractérisé par un transport de la charge de fond encore très actif. A ce titre, il fait aujourd'hui figure d'exception sur le Rhône français. Les données relatives à la détermination des distances de transport de la charge de fond sont les premières acquises à l'échelle de l'intégralité du linéaire du Rhône.

En raison de la faible activité hydrologique durant la période d'étude, une seule campagne de détection a pu être réalisée. Pour un débit maximal atteint de l'ordre de la crue annuelle, la distance moyenne parcourue est de 450 m (**Figure 7**). Ces suivis sont maintenant à pérenniser afin notamment de caractériser ces déplacements sur le temps « long » et d'établir des relations avec les caractéristiques hydrologiques et hydrauliques des événements mobilisateurs. Certaines contradictions entre résultats tirés du modèle hydraulique et résultats tirés du suivi par traceurs ont néanmoins été mises en évidence. Ce constat vient rappeler la nécessité de disposer de données de validation des modèles et de granulométries sans doute plus précises.



**Figure 7.** Trajectoires parcourues par les traceurs sur le site de Jons entre octobre 2016 et avril 2017.

Des mesures de terrain complémentaires (mesure des vitesses des écoulements à l'ADCP) devraient être réalisées afin de comprendre les raisons d'une telle discordance. C'est l'objectif d'OSR5 de valider les modèles à partir de données de terrain robustes afin de permettre de réaliser des simulations réalistes permettant d'évaluer les scénarios opérationnels.

### III.4 Transport solide sableux

Les expérimentations in situ réalisées sur les sites de Ripes, à la confluence Isère et à Barcarin ont pu montrer qu'un apport conséquent en sable peut avoir lieu lors des événements de chasse (Haut-Rhône, Basse-Isère) créant ponctuellement un transport de sable sur un lit plus grossier qui devient rapidement inférieur à la capacité de transport du Rhône (pour le sable) du fait des apports insuffisants. Cependant, dans le cas de la confluence avec l'Isère, les dépôts sableux dans le canal d'amenée peuvent être importants et impacter la navigation (chasse de 2008 et 2015) ; le transport des sables se fait principalement par charriage avec une évacuation vers l'aval relativement lente selon les débits du Rhône. Un protocole de suivi des chasses de la Basse-Isère se met donc actuellement en place en collaboration avec la CNR et EDF afin de limiter les dépôts à la confluence lors de ces événements. Les expériences à Barcarin n'ont pas permis de valider une courbe de tarage sédimentaire sur le site permettant d'évaluer les apports en sable au delta. Du fait des difficultés expérimentales, il a d'ailleurs été décidé d'abandonner ce site pour l'OSR5 et de faire des mesures plus proches d'Arles. Il n'a pas été possible de confirmer ou non si la capacité de transport était atteinte sur la partie aval du Rhône, ni de faire le lien entre des apports estimés et les évolutions morphologiques du delta. Il est à noter aussi que ces expériences ont permis de mettre en avant la problématique de sous-échantillonnage dans le cadre de la mesure du sable et d'améliorer le protocole de mesure (Dramais et al., soumis).

## IV. Conclusion et implications opérationnelles

L'ensemble de ces travaux relatifs à la caractérisation de l'évolution morphologique passée du Rhône et à son fonctionnement morfo-sédimentaire actuel ont permis de décrire et quantifier de façon précise la réponse du fleuve au tarissement des apports solides des affluents et aux deux phases d'aménagements subies au cours des 150 dernières années. Ils constituent le diagnostic préalable indispensable à la conception d'actions efficaces de restauration des habitats du fleuve et de gestion durable des sédiments. La fixation du lit, son importante rétraction ainsi que l'extrême simplification de ses formes en plan se sont accompagnées d'une incision généralisée et d'une déconnexion entre chenal actif et marges alluviales. Les capacités de transport ont fortement diminué et la compétence du fleuve est aujourd'hui nettement inférieure à la taille des sédiments de surface du lit. Par ailleurs, les barrages tels qu'ils fonctionnent

aujourd'hui constituent bien souvent des obstacles à la continuité de la charge de fond. Espérer un rétablissement de cette dernière pour l'intégralité du spectre granulométrique caractérisant le fond du lit du Rhône apparaît peu réaliste. Dans la perspective du schéma de ré-élargissement du lit, ils impliquent notamment qu'en fonction de la taille des grains considérée, la gestion future de la charge de fond devrait être vraisemblablement pensée à différentes échelles spatiales : très schématiquement, l'échelle du secteur pour les particules allant des graviers moyens aux galets (au maximum), l'échelle du corridor fluvial pour les sables grossiers et les graviers fins. De plus, la très probable absence de continuité sédimentaire dans les retenues pour les particules les plus grossières, et potentiellement pour la fraction supérieure aux sables, a des conséquences qu'il convient de considérer dans les stratégies de gestion à venir. Des solutions fondées sur les processus, et élaborées conjointement avec les partenaires dans le cadre d'un schéma de gestion sédimentaire conçu dans une perspective pluriannuelle et sur tout le continuum, peuvent permettre de concilier à la fois les objectifs de maximisation des bénéfices écologiques visés par les opérations de restauration, et la prise en compte des contraintes d'exploitation de l'hydro-électricité et de la navigation.

Les travaux d'OSR ont permis de préciser les protocoles de suivi et de tester à la fois des outils de simulation et de validation qu'il est possible d'utiliser sur les prochains sites d'intervention afin d'affiner les actions réparatoires.

## SESSION 2

---

# Sables et matières en suspension du Rhône : suivi et bilan sur la période 2000-2016

*Mots clés* : flux, apports des affluents, signatures géochimiques, stockage, dépôts, évènements hydrologiques, crues, chasses, transfert à la mer, modèle 1D.

### 1- Flux et origine des matières en suspension et des sables sur le Rhône et ses affluents

**Pilotes** : Aymeric Dabrin<sup>1</sup> et Marina Launay<sup>1</sup>

**Ensemble des participants** : Bernard Angeletti<sup>2</sup>, Jean-Paul Ambrosi<sup>2</sup>, Myriam Arrhor<sup>1</sup>, Céline Bégorre<sup>1</sup>, Abdeslam Benghouba<sup>2</sup>, Marie Bretier<sup>1</sup>, Alexis Buffet<sup>1</sup>, Benoit Camenen<sup>1</sup>, Laurent Colonette<sup>1</sup>, Marina Coquery<sup>1</sup>, Doriane Delanghe<sup>2</sup>, Lysiane Dherret<sup>1</sup>, Guillaume Dramais<sup>1</sup>, Violaine Dugué<sup>1</sup>, Philippe Dussouillez<sup>2</sup>, Jean Baptiste Faure<sup>1</sup>, Michel Fornier<sup>5</sup>, Stéphanie Gairoard<sup>2</sup>, Julie Gattacceca<sup>2</sup>, Thomas Geay<sup>3</sup>, Guislaine Grisot<sup>1</sup>, Elvire Henry<sup>1</sup>, Mickaël Lagouy<sup>1</sup>, Chloé Le Bescond<sup>1</sup>, Jérôme Le Coz<sup>1</sup>, Hugo Lepage<sup>4</sup>, Matthieu Masson<sup>1</sup>, Cécile Miège<sup>1</sup>, Valérie Nicoulaud<sup>4</sup>, Ivane Pairaud<sup>6</sup>, Josselin Panay<sup>1</sup>, Gaelle Poulhier<sup>1</sup>, Olivier Radakovitch<sup>4</sup>, Patrick Raimbault<sup>5</sup>, François Sabatier<sup>2</sup>, Michal Tal<sup>2</sup>, Fabien Thollet<sup>1</sup>, Daniel Vazquez Tarrio<sup>2</sup>, Adrien Vergne<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Irstea Lyon Villeurbanne

<sup>2</sup> CEREGE CNRS UMR 7330

<sup>3</sup> GIPSA-Lab

<sup>4</sup> IRSN

<sup>5</sup> MIO - Institut Méditerranéen d'océanologie

<sup>6</sup> Ifremer

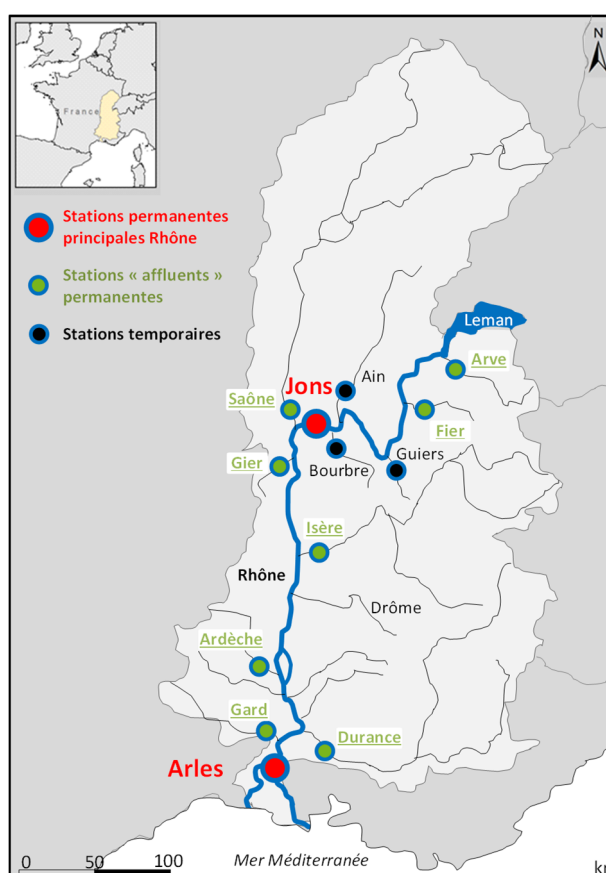


# Flux et origine des matières en suspension et des sables sur le Rhône et ses affluents

Dans sa stratégie d'observation et de quantification des flux solides dans le Rhône, l'OSR a pris soin de distinguer les principaux compartiments de transport : charriage (graviers et sables), sables en suspension graduée et suspension de lessivage (particules fines en suspension relativement homogène sur la colonne d'eau). Cette synthèse concerne les travaux de l'OSR sur les deux populations sédimentaires suivantes : particules fines (appelées ensuite « MES » pour matières en suspension, en lien avec les contaminants particuliers dont elles sont la principale phase porteuse) et sables en suspension graduée et en charriage (dont l'enjeu est principalement morphodynamique). Ces deux populations sédimentaires appellent des techniques de mesure et de calcul des flux différents et adaptés.

## Flux de MES et apports des affluents

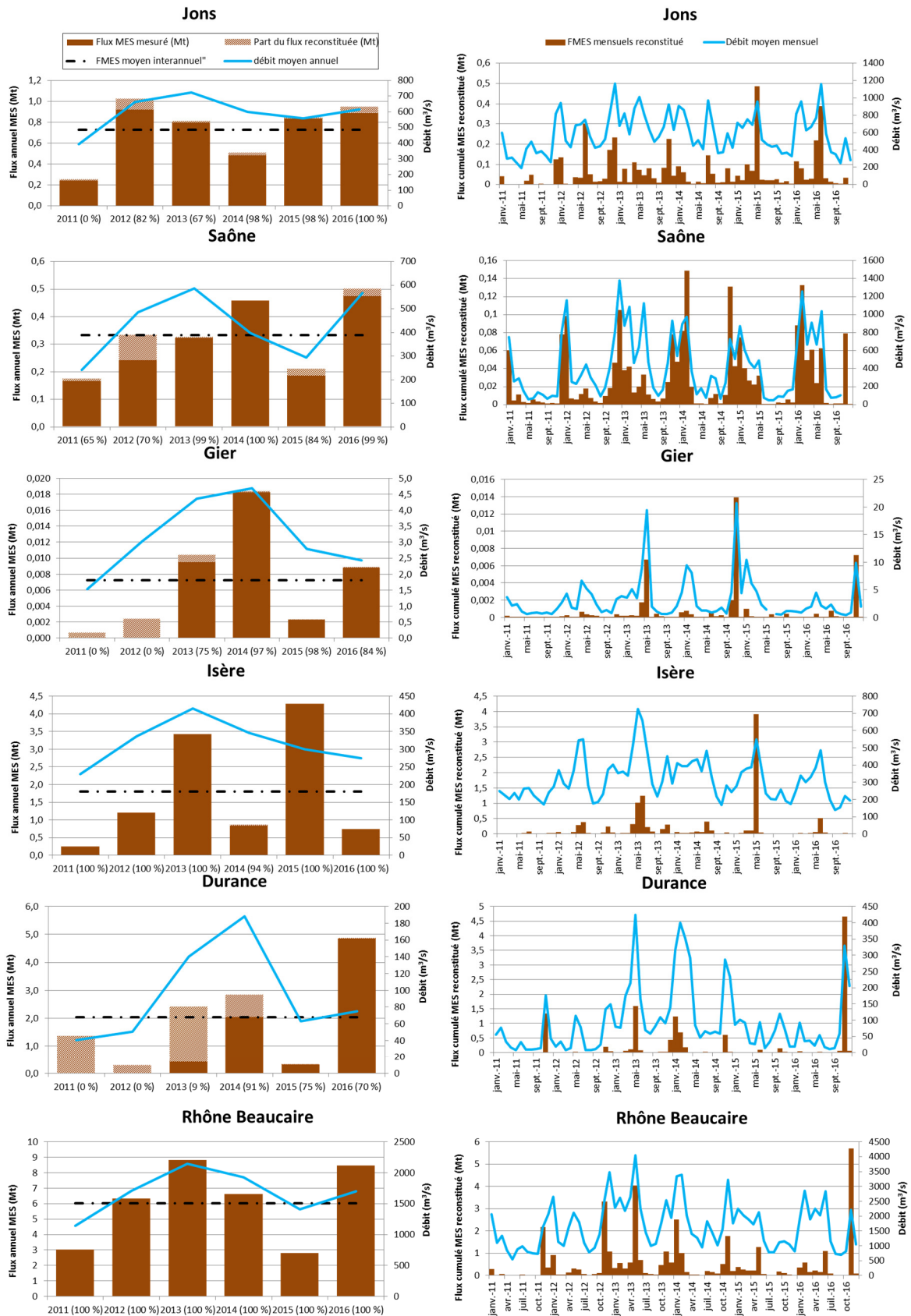
La pérennisation, l'extension du réseau et la bancarisation des données (BDOH) ont permis d'affiner l'estimation des flux instantanés et annuels de MES (particules fines) à l'échelle du bassin du Rhône et d'estimer la contribution de certains affluents qui ne sont pas intégrés à ce jour dans le réseau OSR. A l'issue des travaux du programme OSR4, on dispose d'un réseau d'observation complet et mature pour une observation des flux sur le long-terme (au moins 10 ans) : les principaux affluents contributeurs (y compris au Sud, avec les nouvelles stations de l'Ardèche, du Gardon bientôt la Drôme en 2019) disposent d'une station permanente (**Figure 1**).



**Figure 1.** Localisation des stations du réseau de l'Observatoire des sédiments du Rhône.

Les méthodes de calcul des flux et de bancarisation-validation des données dans la base BDOH/OSR sont formalisées et partagées de façon homogène sur toutes les stations et toutes les substances suivies par l'OSR. Une méthode de reconstitution des lacunes de concentration en MES (interruptions du suivi et ré-analyse des années précédant le suivi OSR) a également été mise au point, à partir de l'estimation bayésienne de courbes de tarage MES/débit à deux segments et du grand jeu de mesures de MES réuni par l'OSR et ses partenaires. Ceci a permis l'établissement de bilans de flux de MES annuels bien plus robustes que ceux précédemment établis par l'OSR ou par des équipes externes à l'OSR.

- Le flux annuel moyen de MES à l'embouchure du Rhône (station de Beaucaire) a été évalué à 6.0 Mt pour la période 2011-2016 (**Figure 2**). Les valeurs annuelles sont successivement de 3.0 Mt, 6.3 Mt, 8.8 Mt, 6.6 Mt, 2.8 Mt et 8.5 (Mt). Ce flux peut donc varier d'un facteur 3 d'une année à l'autre, en lien avec les événements de crue ou les périodes sèches. Ainsi, le flux maximum de 2013 (8.8 Mt) est lié à des crues survenues sur l'Isère et la Durance entre avril et juin 2013. Celui de 2016 (8.5 Mt) est dû à une seule crue généralisée et exceptionnelle survenue en novembre 2016. Tous les affluents étudiés ont été impactés sauf l'Isère. Sur cet affluent, la crue la plus intense a eu lieu en mai 2015 (période de retour > 10 ans) et est à l'origine de 90 % des apports de cette année-là.
- Le principal contributeur au flux de MES du Rhône (période 2011-2016) est la Durance (34 %), suivie de l'Isère (30 %), du Haut-Rhône (12 %) et de la Saône (6 %). La contribution du Gier en MES (particulièrement contaminées) est inférieure à 1 %. Toutefois, à l'exception de la Saône, dont le flux annuel est relativement stable, ces contributions peuvent varier sensiblement d'une année à l'autre. C'est particulièrement le cas pour la Durance, avec des variations de 5 % (2012) à 58 % (2016).
- Sur la période 2011-2016, 16 à 55% des flux de MES mesurés à Arles ne proviennent pas des 5 apports cités ci-dessus (Isère, Durance, Haut-Rhône, Saône et Gier). Cette part du flux solide pourrait provenir des affluents cévenols qui ne sont pas instrumentés ou encore peu documentés pour le moment. L'acquisition de données sur l'Ardèche et le Gardon et bientôt sur la Drôme apportera des précisions sur les contributions de ces affluents.

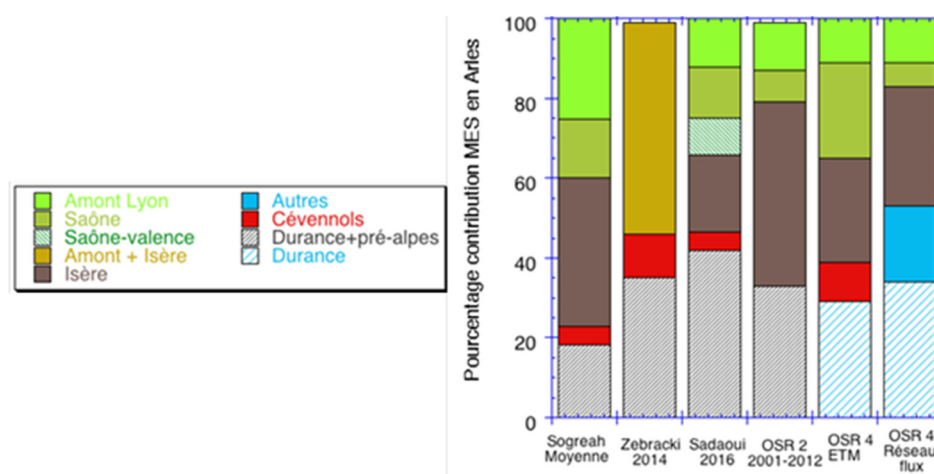


**Figure 2.** Flux annuels et mensuels (Mt) de MES sur le Rhône et ses affluents entre 2011 et 2016. Les lacunes ont été reconstituées. La proportion de temps disposant de données mesurées (valeurs moyennes horaires) est indiquée en % entre parenthèses. La part du flux annuel attribuable à des données extrapolées est indiquée en marron clair.

## Traçage géochimique des MES : origine et estimation de la contribution relative des affluents aux flux de MES sur le Rhône

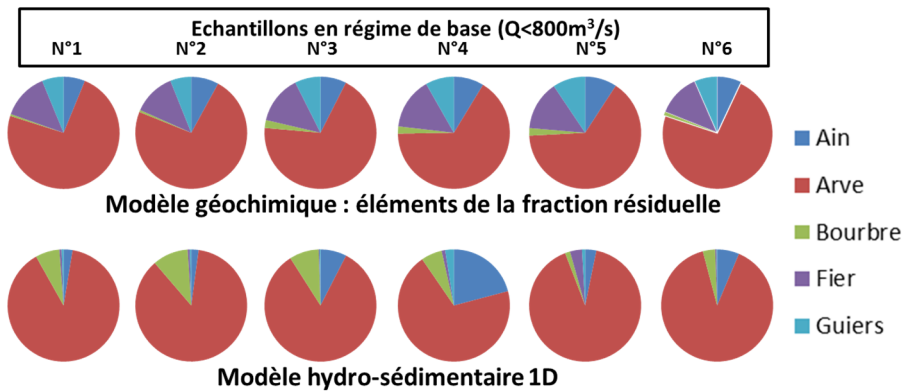
En complément du suivi des flux de MES, les propriétés géochimiques des particules ont été utilisées pour identifier les signatures des sous-bassins versants et estimer les contributions relatives des affluents.

- La première approche a consisté à utiliser le jeu de données sur près de 500 échantillons des concentrations en éléments traces métalliques totaux obtenus sur les différents affluents du Rhône depuis la mise en place de l'OSR. Un traitement mathématique de ce jeu de données a permis de définir des concentrations moyennes par affluents, de les différencier et d'estimer les contributions relatives des affluents. A l'échelle du suivi (2011-2016), les proportions obtenues sont cohérentes avec l'approche « Réseau flux » : 29% de la Durance (et affluents préalpins), 26 % de l'Isère, 24% de la Saône, 11 % du Haut-Rhône et 10% des Cévennes (Ardèche, Cèze, Gardon), **Figure 3**.



**Figure 3.** Contribution en pourcentage des MES en Arles calculées pour divers affluents. Les résultats des différentes études font parfois référence à des groupes d'affluents et ne peuvent pas être comparés directement les uns aux autres. Les calculs sont basés sur des flux de MES évalués (par modèle) ou mesurés (OSR4 – réseau de mesure des flux), ou sur des estimations à partir de concentrations en éléments chimiques (Zebraeki 2014, OSR4-ETM). Sogreah moyenne : moyenne des estimations publiées dans l'Etude Rhône (Sogreah, 2000). Zebraeki et al. 2014 et Sadaoui et al. 2016 ; OSR2 2001-2012 : livrable OSR2 2013. OSR4-ETM : livrable IV.1. (OSR 4- Réseau flux : livrable III.3, 2017).

- Une seconde approche géochimique a été développée à partir des concentrations en éléments traces et majeurs mesurées dans la fraction « résiduelle » ou « non réactive » des MES pour estimer leur origine à l'échelle de l'échantillon ponctuel. Cette approche a permis de tracer l'origine des MES sur le Haut-Rhône, mais aussi à l'aval de la confluence entre la Saône et le Rhône, pour des échantillons prélevés en régime de base (piège à particules), en crue ou lors d'une chasse hydro-sédimentaire (centrifugeuse ou ponctuel manuel). Ces résultats ont été confrontés aux résultats obtenus à partir des données du réseau ou à partir du modèle hydro-sédimentaire 1D développé par l'OSR (**Figure 4**). Ce modèle géochimique de mélange a confirmé que le flux de MES à Jons était principalement constitué de MES issues de l'Arve en période de basses eaux et lors des chasses de barrage de 2012 (Verbois).

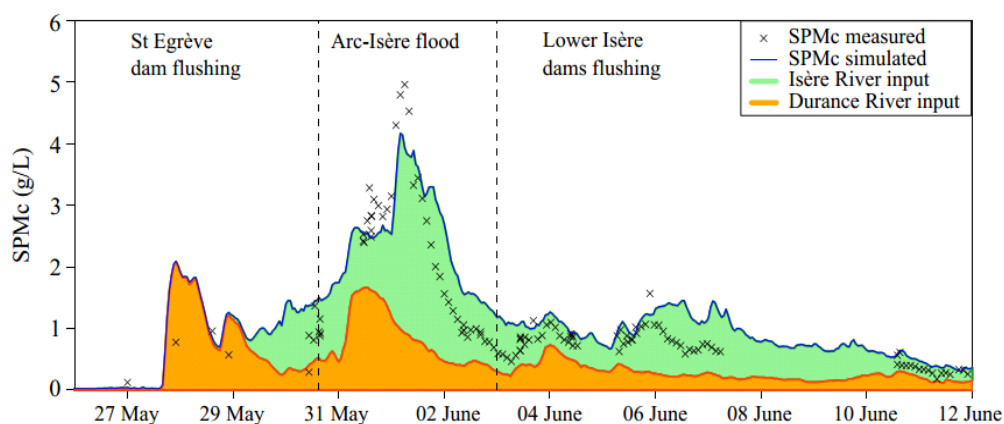


**Figure 4.** Contributions relatives des affluents du Haut-Rhône pour 6 échantillons à Jons en conditions de régime de base, obtenues à partir du modèle géochimique de mélange et du modèle hydrosédimentaire 1D.

## Modélisation numérique pour interpréter les flux de MES à Jons et à Arles

En complément de l'amélioration du réseau de mesure des MES et des méthodes de traçage, un modèle hydro-sédimentaire 1D a été développé sur le réseau hydrographique du Rhône de l'exutoire du Lac Léman jusqu'à la Mer Méditerranée. Ce modèle hydro-sédimentaire 1D a été appliqué à divers événements de crues et de chasses de réservoirs pour mieux analyser les phénomènes de propagation des flux de MES dans le réseau hydrographique complexe du Rhône et les interactions avec les aménagements hydro-électriques.

- En particulier, l'événement hydrosédimentaire de mai-juin 2008 a été modélisé, ce qui a permis de mieux comprendre les apports en MES de l'Isère et de la Durance au Bas-Rhône lors des phases de crue et de chasse des barrages de la basse-Isère. La **figure 5** met en évidence la contribution importante de la Durance durant les premiers jours de l'événement et la contribution croissante de l'Isère pendant le reste de l'événement. Au total, environ 50% des flux de MES provenaient de la Durance et 50% de l'Isère. De plus, près de 50% des flux de MES apportés par l'Isère se sont déposés dans les premiers kilomètres du réseau fluvial en aval de la confluence Rhône/Isère. L'impact de la granulométrie des MES sur les dépôts aux confluences et dans les aménagements hydro-électriques a également été reproduit numériquement.



**Figure 5.** Concentrations en MES simulées et mesurées dans le Rhône à Arles lors de l'événement hydro-sédimentaire de mai-juin 2008 avec décomposition des apports en MES de l'Isère et de la Durance. (OSR4- modélisation : livrable III.4, 2017).

- L'étude du transport des MES, des PCB et du mercure du Rhône entre Lagnieu et Jons en avril-mai 2013 a permis d'expliciter les contributions en contaminants de la Bourbre et de l'Ain au Rhône au cours d'un événement de crue. Le Rhône amont apporte la majorité des MES (98%). En comparaison, l'Ain a une part très minoritaire dans les apports (1,9%) et la part de MES de la Bourbre est négligeable (0,07%). Malgré des concentrations en contaminants plus élevées dans les MES de la Bourbre, sa contribution au flux de contaminant mesuré à Jons reste très faible, pilotée par un flux de MES négligeable. La majeure partie des PCB et du mercure mesurés dans les MES à Jons provient du Rhône amont et de l'Ain.

Les temps de calcul très courts de ce modèle permettent d'envisager des simulations de long-terme des flux de MES voire de contaminants pour le futur programme OSR5, afin d'étudier les bilans de flux annuels et interannuels et mieux appréhender les apports non suivis ainsi que les phénomènes de stockage et déstockage de particules dans le réseau hydrographique.

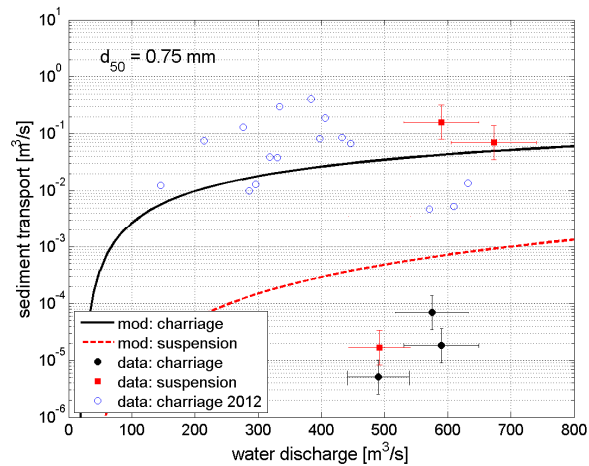
## Dynamique de la charge de fond

Si les flux de MES sont maintenant bien documentés grâce au réseau de suivi pérenne de l'OSR et à des mesures ponctuelles, la connaissance du déplacement de la charge de fond (charriage et suspension graduée des sables) demeure encore un champ de recherche important. Le sable en suspension dans les rivières a d'importants impacts morphologiques tels que le dépôt derrière les barrages ou le développement du delta, mais il reste difficile à mesurer en raison des fortes variations spatiales et temporelles. Il y a encore un manque critique de mesures du flux de sable charrié et de sa granulométrie pour évaluer le transport de charge de fond sur le Rhône.

Plusieurs campagnes de mesures ont été effectuées sur des sites pilotes du Rhône : Chancy-aux-Ripes et Bognes (retenue de Génissiat), Champagnieux et au niveau de la confluence avec l'Isère pour le secteur nord ; et à Arles et au niveau du bac de Barcarin pour le secteur sud. Des développements méthodologiques sur les mesures de terrain directes par prélèvements et indirectes via l'hydroacoustique pour l'étude des flux de sables en suspension ont été proposés.

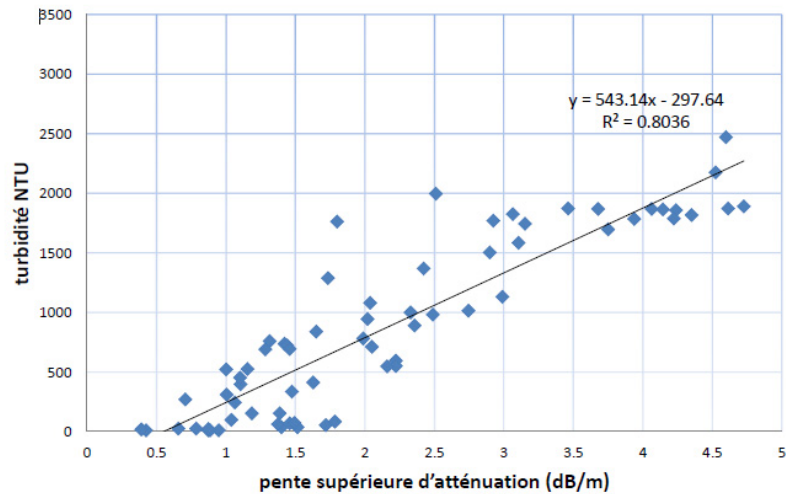
- De nombreuses données de mesures de flux de sable ont été collectées en particulier au cours des chasses du Haut-Rhône de 2012 et 2016 et à Barcarin. Pour les mesures du charriage et de la suspension de sable, l'utilisation d'une traîlle mécanisée (station de Chancy-aux-Ripes) s'est avérée très efficace pour réaliser une campagne de mesure de qualité (nombre d'échantillons suffisant sur une période assez courte). Si le tronçon est navigable, une campagne de mesure avec une bouteille Niskin permet aussi de réaliser des prélèvements distribués dans la section.
- Le fort gradient vertical des concentrations en sable dans la colonne d'eau entraîne des difficultés dans la mesure. Il est courant de ne pas être en mesure d'échantillonner les sables d'une part, et lors des analyses des concentrations et de la granulométrie d'autre part. Pour tenir compte de ces problèmes, les protocoles de prélèvements et d'analyse, notamment lors du sous-échantillonnage, ont été adaptés.
- Le transport des sables, en suspension et par charriage, fait intervenir un paramètre supplémentaire par rapport au transport des MES fines, la capacité de transport du cours d'eau. Il s'agit de l'énergie dont dispose le cours d'eau pour transporter des particules d'un diamètre donné. Dans le cas des MES, cette capacité est supposée infinie. Dans le cas des sables, cette capacité représente donc le transport maximum que l'on peut observer dans un cours d'eau pour un diamètre donné. Une technique courante pour déterminer la charge sédimentaire d'un cours d'eau

est de rechercher une relation, appelée courbe de tarage sédimentaire, entre le débit solide et le débit liquide pour un site donné. De nombreuses relations ont été proposées dans la littérature à partir des équations de la capacité de transport. La **Figure 6** montre les données collectées à Bognes, sur le Haut-Rhône, lors des chasses de 2012 et de 2016. Elles sont comparées avec les formules de capacité de Camenen (2014) pour la suspension et le charriage. Les données de charriage de 2012 sont très proches des valeurs obtenues par la formule (**Figure 6** ; *mod: charriage*) traduisant un transport par charriage intense lors de cet événement. En 2016, les valeurs de charriage mesurées sont plus faibles. L'hypothèse est que l'abaissement plus faible du réservoir de Génissiat en 2016 s'est traduit par une remobilisation moins importante des sables qu'en 2012. Les apports en sable étaient donc moins importants, entraînant un transport par charriage plus faible.



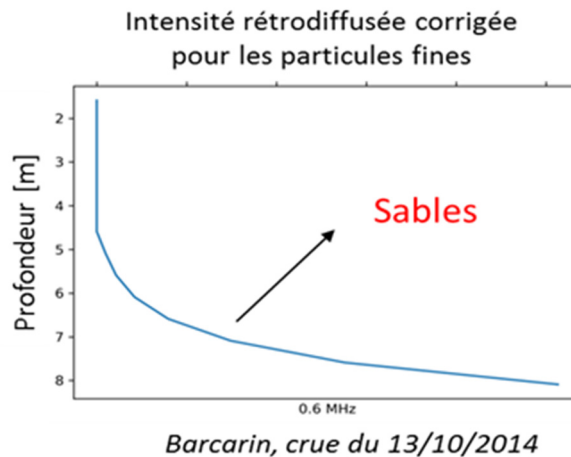
**Figure 6.** Courbe de tarage sédimentaire estimée à Bognes sur le Rhône avec les mesures expérimentales réalisées lors des chasses de 2012 et 2016. Comparaison des données expérimentales avec les formules de capacité proposées par Camenen 2014 (OSR 4- charge sableuse : livrable I.1, 2017).

L'intensité acoustique rétrodiffusée mesurée par les appareils acoustiques de type ADCP ou Aquascap dépend de la concentration et du diamètre des particules présentes dans l'écoulement. Une méthode pour utiliser les données acoustiques pour mesurer de façon indirecte les concentrations en MES et en sables a été proposée et testée sur les données ADCP de Barcarin. Il s'agit d'établir la pente du profil d'intensité acoustique le long de la colonne d'eau. Cette pente traduit l'atténuation acoustique liée à la présence de particules. Si la concentration et le diamètre des particules sont constants dans la colonne, alors la pente du profil d'intensité est proportionnelle à la concentration des particules. La **Figure 7** montre la relation obtenue entre la pente d'atténuation de l'intensité acoustique et la turbidité mesurées à Barcarin dans les premiers mètres du profil vertical au cours de la crue de novembre 2016. La turbidité en NTU est utilisée comme proxy pour la concentration en MES en mg/L. Cette relation est obtenue sous hypothèse de concentration homogène en particules de même diamètre. Dans les premiers mètres du profil vertical, l'hypothèse est que seules les MES fines, réparties de façon homogènes dans la section sont présentes.



**Figure 7.** Relation entre les pentes d'atténuation des profils d'intensité acoustique rétrodiffusée et la turbidité en surface à Barcarin lors de la crue de novembre 2016. (OSR 4- charge sableuse : livrable I.1, 2017).

Dans un deuxième temps, en corrigeant le profil d'intensité acoustique de l'atténuation liée aux MES fines, on peut alors observer l'atténuation acoustique liée à la présence d'autres particules. La **Figure 8** montre le profil vertical d'intensité acoustique rétrodiffusée corrigée de l'atténuation par les MES fines, à Barcarin lors de la crue du 13/10/2014. Les variations de l'intensité observées vers le fond trahissent la présence de sable en suspension. Cette méthode a montré des résultats encourageants pour les crues de 2014 et de novembre 2016 à Barcarin. Elle doit toutefois être confirmée sur d'autres événements. On arrive ainsi à détecter la présence de sable en suspension graduée près du fond, mais il n'est pas encore possible d'inverser le modèle de rétrodiffusion pour établir des concentrations de sable en suspension.



**Figure 8.** Profil vertical d'intensité acoustique rétrodiffusée corrigée de l'atténuation par les MES fines, à Barcarin lors de la crue du 13/10/2014.

## SESSION 3

---

# Evolution temporelle et variations spatiales des flux de contaminants

*Mots clés : origines, sources, traçages, apports des affluents, modèle 1D, niveaux de pollutions, niveaux écotoxiques, MES, stocks, lit majeur, crues, chasse, étiage, polluants émergents.*

### 1- L'OSR vu par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse

Eve Sivade<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse

### 2- Etat des lieux des contaminants prioritaires et émergents : concentrations, flux et tendances

**Pilote :** Gaëlle Poulhier<sup>1</sup>

**Ensemble des participants :** Jean-Paul Ambrosi<sup>2</sup>, Bernard Angeletti<sup>2</sup>, Christelle Antonelli<sup>3</sup>, Marina Coquery<sup>1</sup>, Aymeric Dabrin<sup>1</sup>, Frédérique Eyrolle-Boyer<sup>3</sup>, Michel Fornier<sup>4</sup>, Stéphanie Gairoard<sup>2</sup>, Julie Gattacceca<sup>2</sup>, Franck Giner<sup>3</sup>, Ghislaine Grisot<sup>1</sup>, Marina Launay<sup>1</sup>, Chloé Le Becond<sup>1</sup>, Jérôme Le Coz<sup>1</sup>, Hugo Lepage<sup>3</sup>, Christelle Margoum<sup>1</sup>, Cécile Miège<sup>1</sup>, David Mourier<sup>3</sup>, Olivier Radakovitch<sup>3</sup>, Patrick Raimbault<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Irstea Lyon Villeurbanne

<sup>2</sup> CEREGE CNRS UMR 7330

<sup>3</sup> IRSN

<sup>4</sup> MIO - Institut Méditerranéen d'océanologie



# L'Observatoire des sédiments du Rhône vu par L'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse

Eve SIVADE, Agence de l'eau RMC

## Quel est le rôle de l'Agence de l'eau dans le suivi de la pollution sur le Rhône ?

L'Agence de l'eau est un organisme financier et technique qui a pour mission la protection des milieux aquatiques. Aussi dès leur création, les Agences de l'eau ont mis en place un réseau de suivi de la qualité des cours d'eau et des nappes. Au démarrage, le réseau suivait une **cinquantaine de paramètres** sur la physico-chimie dite classique (matières azotées, phosphorées, la matière organique et quelques métaux). Trente ans plus tard, les moyens pour évaluer la contamination des cours d'eau ont été décuplés, le nombre de paramètres recherchés **a été multiplié par 20**, avec un panel de substances recherchées très large : métaux, pesticides, un grand nombre de micropolluants organiques ou encore des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)... Au total c'est **plus de 5 millions d'analyses** réalisées chaque année sur l'ensemble des cours d'eau et nappes du bassin RMC **sur 1600 stations**.

**Sur le fleuve Rhône**, l'Agence produit des données sur **26 stations** en moyenne, réparties sur tout le linéaire du fleuve. La fréquence de suivi est mensuelle sur l'eau et annuelle sur les dépôts récents de sédiments. Concernant les substances recherchées, ce sont à minima les 53 substances et familles de substances dangereuses prioritaires de la Directive Cadre sur l'Eau pour lesquelles des seuils de concentrations existent, avec pour objectif de protéger l'environnement et la santé humaine.

Mais l'Agence de l'eau va bien au-delà de la réglementation dans ses suivis pour éviter le syndrome du lampadaire, en ne portant l'effort que sur ce qui est mis en lumière par la réglementation, car le danger lié aux contaminations ne se limite pas à ce qui est connu et encadré par des normes. Sur certaines stations on peut avoir **plus de 1000 paramètres recherchés dans l'eau**.

Ainsi, les données produites via le réseau d'observation des Sédiments du Rhône permettent de compléter l'image de la contamination dressée par les réseaux de l'Agence de l'eau en ciblant le sous-compartiment des matières en suspension. L'OSR permet également de donner une **vision flux de Mes** et de polluants associés qui complète l'approche en concentration prévue dans la Directive Cadre sur l'Eau. Cette vision en flux est essentielle pour un fleuve à fort débit comme le Rhône sur lequel la problématique des substances toxiques se pose plutôt en quantité de polluants qui circulent dans le fleuve et en flux « tolérable » par les milieux aquatiques, et peu en concentration.

Enfin, la station SORA à Arles est essentielle pour connaître la **contribution du fleuve à la mer Méditerranée** en continu sur les supports eau et Mes. C'est un outil de pilotage pour l'Agence, pour relativiser les flux entre familles de micropolluants, qui permet de prioriser les actions de réduction sur certains groupes de substances plutôt que d'autres à l'échelle du bassin.

## Comment approcher la question de la pollution toxique à l'échelle d'un bassin versant aussi grand que celui du fleuve Rhône ?

La stratégie de « lutte contre les toxiques » du Plan Rhône est basée sur la réduction à la source des émissions de substances dangereuses auprès des principaux émetteurs. Encore faut-il les identifier. Ce travail a été fait en 2016 sur la base des campagnes RSDE (Recherche et Réduction de Rejets de Substances

Dangereuses dans l'Eau). Ainsi, jusqu'en 2021, des actions de réduction devront se mettre en place auprès de 36 industriels et 8 collectivités qui rejettent dans le fleuve.

Mais réduire les émissions dans le fleuve ne suffira pas pour **atteindre le Bon état écologique sur le Rhône**. En effet, le fleuve est le réceptacle des émissions de polluants sur les affluents. Les différents inventaires d'émissions montrent que certaines substances mesurées à l'aval du fleuve peuvent provenir de 40 à 80% des affluents et non du fleuve.

Les données produites dans le cadre de l'OSR sur la contribution des affluents aux flux de pollution qui seront présentées par Gaëlle Poulhier de l'IRSTEA tout à l'heure, sont des éléments d'information très utiles pour activer les bons leviers au bon endroit.

## Quelle image peut-on donner aujourd'hui de la pollution toxique du fleuve ?

Aujourd'hui par rapport aux exigences de la DCE, les réseaux de l'Agence classent **70% de stations en Bon état chimique sur le fleuve**. Les stations contaminées sur le support eau, le sont par 2 HAP que l'on retrouve sur la quasi-totalité des stations du bassin RM, ce n'est donc pas propre au fleuve Rhône et ils auraient plutôt une origine diffuse atmosphérique.

Néanmoins, plus de **150 substances différentes** sont mesurées à Arles et le bassin versant du Rhône représente **60% de la contribution** à la pollution toxique de la façade méditerranéenne. Il faut donc persister dans les efforts à faire pour réduire la pollution du Rhône.

Les connaissances produites dans le cadre de l'OSR permettent pour les substances bien connues et émises depuis longtemps **de placer le niveau actuel de pollution par rapport au passé**, mais aussi d'avoir des **réflexions méthodologiques** pour augmenter les performances des réseaux de suivi.

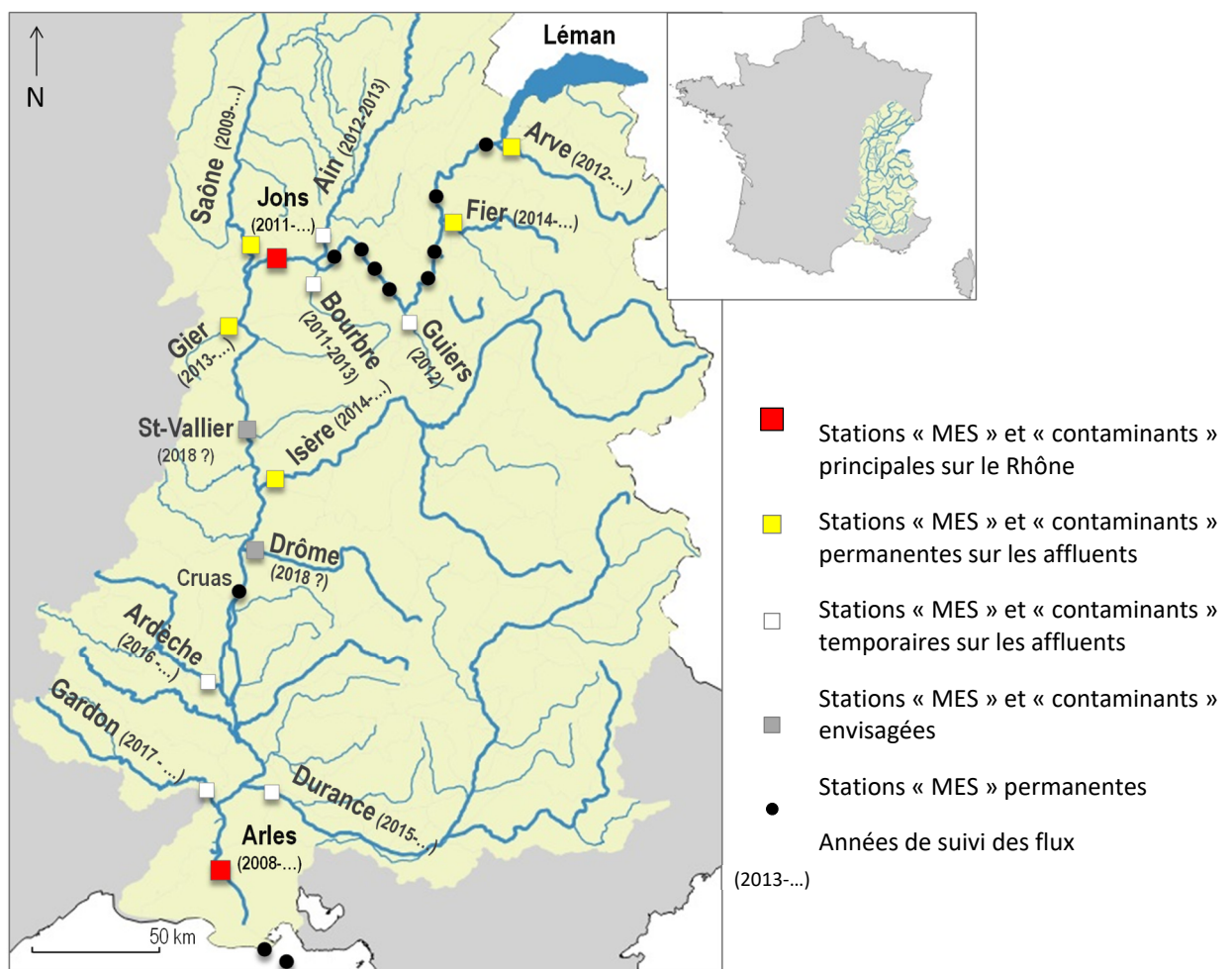
L'OSR peut également nous aider à cerner **quelles seront les substances qui poseront problème demain** sur les milieux aquatiques. C'est en effet l'une des difficultés du suivi de la contamination des milieux aquatiques car les effets ne sont souvent évalués qu'après des années, et l'on peut avoir l'impression « d'avoir un temps de retard ». Les données produites dans l'OSR devraient permettre de mieux identifier les substances émergentes à suivre dans l'avenir.

# Etat des lieux des contaminants prioritaires et émergents : concentrations, flux et tendances

Le réseau de mesure de l'OSR a été construit dans une optique de mesure des flux de contaminants d'une part, et des concentrations d'autre part. Ces deux aspects ont été largement approfondis et développés au cours de l'OSR 4, avec l'ajout d'une grande variété de contaminants et l'instrumentation de nouvelles stations, notamment dans la partie sud du bassin versant. Cette synthèse présente les principaux résultats de toutes les actions visant à observer, quantifier et interpréter les concentrations et les flux de contaminants sur le bassin du Rhône.

## Variabilité spatiale des concentrations en contaminants particuliers

- Le réseau de mesure de l'OSR inclue aujourd'hui une dizaine de stations, réparties sur le Rhône et ses principaux affluents (**Figure 1**). Grâce à ce réseau étendu, des tendances spatiales sur la contamination des MES peuvent être dégagées à l'échelle du bassin, du Lac Léman à la mer Méditerranée.



- Sur l'ensemble du bassin, le Gier et la Bourbre ont été identifiés comme les affluents les plus contaminés, non seulement en termes de nombre de contaminants quantifiés (**Figure 2a**), mais aussi en termes de niveaux de concentration (**Figure 2b**). Ces deux rivières sont notamment marquées par des niveaux plus élevés de polychlorobiphényles (PCB), polybromodiphényléthers (PBDE), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), nonylphénol, organoétains, glyphosate et acide aminométhylphosphonique (AMPA, métabolite du glyphosate) par rapport aux autres affluents. Sur le Gier s'ajoute en plus une contamination en pesticides à usage urbain (insecticides domestiques, antibactériens). La Saône est également impactée et se démarque par une contamination non négligeable en mercure. A contrario, l'Arve et la Durance sont les deux affluents les moins contaminés.

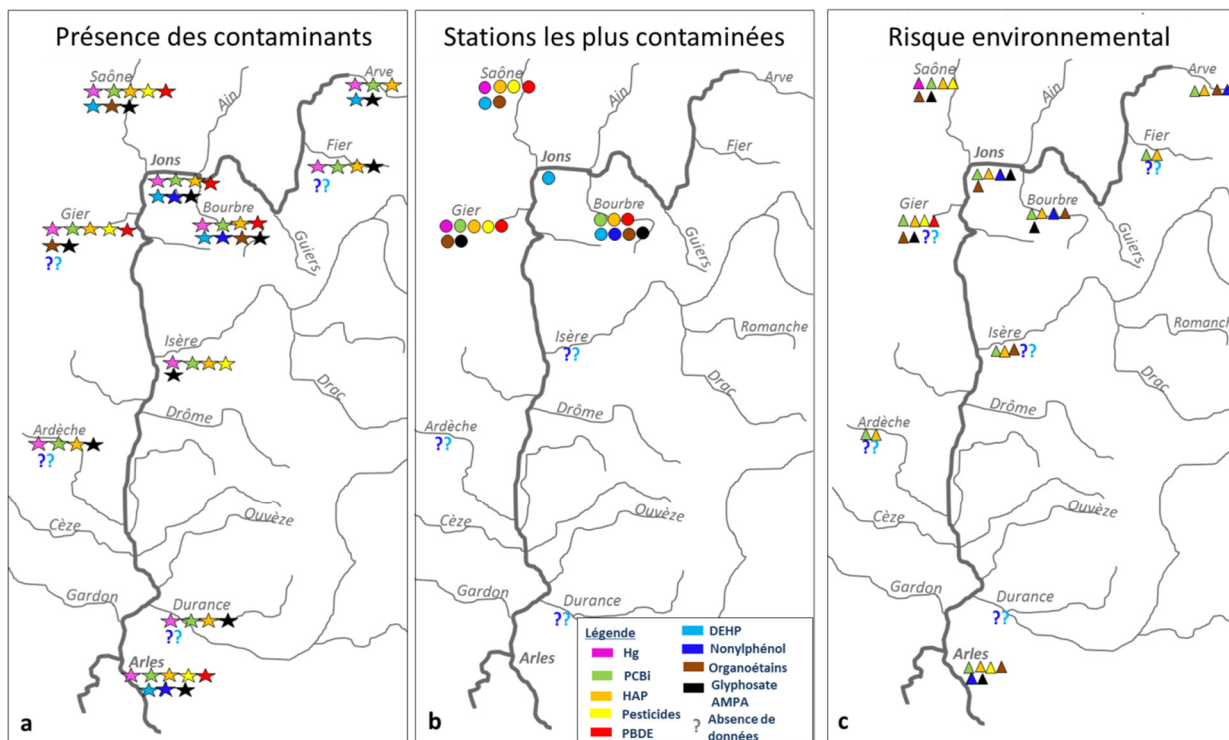


Figure 2 : Récapitulatif des tendances spatiales observées sur le bassin du Rhône pour les concentrations en contaminants particuliers (période 2011-2016).

- Le Tritium organiquement lié (TOL) est particulièrement marqué sur le Haut-Rhône et la Saône, et les niveaux observés sont très probablement à mettre en relation avec la présence de particules tritiées de synthèse (tritium technogénique) utilisées par le passé dans les ateliers d'horlogerie.

## Risque écotoxique

- Pour les contaminants organiques, le risque écotoxique a été évalué par comparaison des concentrations mesurées avec les valeurs seuils environnementales disponibles dans la littérature (PNEC sédiments).
- Les PCB, les HAP et le nonylphénol présentent un risque sur le Rhône et quasiment tous les affluents étudiés, notamment sur le Gier et la Bourbre (**Figure 2c**). Sur ces stations, les concentrations en PCBi sont par exemple entre 2 et 14 fois supérieures aux valeurs seuil.

- Parmi les micropolluants émergents, l'AMPA (métabolite du glyphosate) est le plus fréquemment quantifié à des niveaux égalant la PNEC sur quasiment toutes les stations. Sur le Gier, les concentrations sont 6 fois plus fortes que la PNEC.
- Le Gier est aussi impacté par un risque environnemental élevé pour certains micropolluants émergents à usage urbain (4 biocides, 1 cosmétique).
- Le risque écotoxique des métaux (ETM) a été évalué par comparaison des concentrations mesurées avec les valeurs seuils environnementales disponibles dans la littérature. Pour tous les métaux, les concentrations se trouvent pour l'essentiel en dessous de la valeur seuil « sans effet » (TEC), mais des échantillons dépassent systématiquement ces seuils. Cependant, très peu d'échantillons ont des concentrations qui dépassent la valeur seuil maximale correspondante à un effet très probable. Ces dépassements s'observent pour le Zn et le Cu, soit sur des affluents cévenols, soit durant des niveaux d'étiage sur Jons.
- Les premières estimations de débits de doses engendrés par les radionucléides artificiels et reçus par la faune et la flore à Arles montrent des valeurs très faibles, en dessous du bruit de fond naturel et des valeurs références où les premiers effets ont été constatés.

## Flux de contaminants particuliers : mercure et somme des PCB<sub>i</sub>

- L'ensemble des séries temporelles de flux de MES et de contaminants associés sont affichées publiquement et mises à disposition de façon contrôlée dans la base de données en ligne BDOH/OSR, également accessible via la couche « stations de mesure » du web-SIG.
- Pour les années 2014, 2015 et 2016, les flux annuels de mercure (Hg) particulaire à l'embouchure du Rhône (station de Beaucaire) sont respectivement de 240 kg, 267 kg et 833 kg (**Figure 3**). Les contributions des affluents varient d'une année à l'autre en lien avec les apports en MES. En 2016, le principal contributeur au flux de Hg est la Durance (29 %), suivi de la Saône (9 %), de l'Isère (5 %), du Haut-Rhône (4 %) et du Gier (<1 %). Toutefois, en raison de concentrations élevées en Hg, la contribution de la Saône peut parfois augmenter malgré des apports en MES faibles. En 2014, la Saône contribue ainsi à 30 % du flux de Hg alors qu'elle n'apporte que 7 % des MES. La contribution élevée de l'Isère en 2015 s'explique par la crue exceptionnelle de mai 2015 (période de retour > 10 ans), qui a occasionné un apport important de MES.
- Le flux annuel de  $\Sigma$ PCB<sub>i</sub> à Beaucaire est de 80 kg en 2014, 40 kg en 2015 et 118 kg en 2016. Les contributions des affluents du Haut-Rhône, de la Saône, de l'Isère et de la Durance varient entre 6 % et 15 % en fonction des années et des apports en MES. La contribution du Gier reste en-dessous de 2 %. Ainsi, même si la variabilité spatiale des concentrations  $\Sigma$ PCB<sub>i</sub> est forte (le Gier est 4 à 30 fois plus contaminé que les autres affluents), le principal moteur du flux de  $\Sigma$ PCB<sub>i</sub> est le transport solide.
- Les bilans de flux annuels de Hg et de  $\Sigma$ PCB<sub>i</sub> laissent apparaître des déficits récurrents, atteignant jusqu'à -70 % (**Figure 2**). La somme des apports des affluents ne permet donc pas d'expliquer en totalité les flux mesurés à Beaucaire. Ce résultat suggère l'existence de sources probables de ces contaminants sur le corridor du Rhône en aval de l'Isère. L'instrumentation de nouvelles stations de mesure (Ardèche, Gardon, Drôme) devrait permettre de vérifier cette hypothèse.

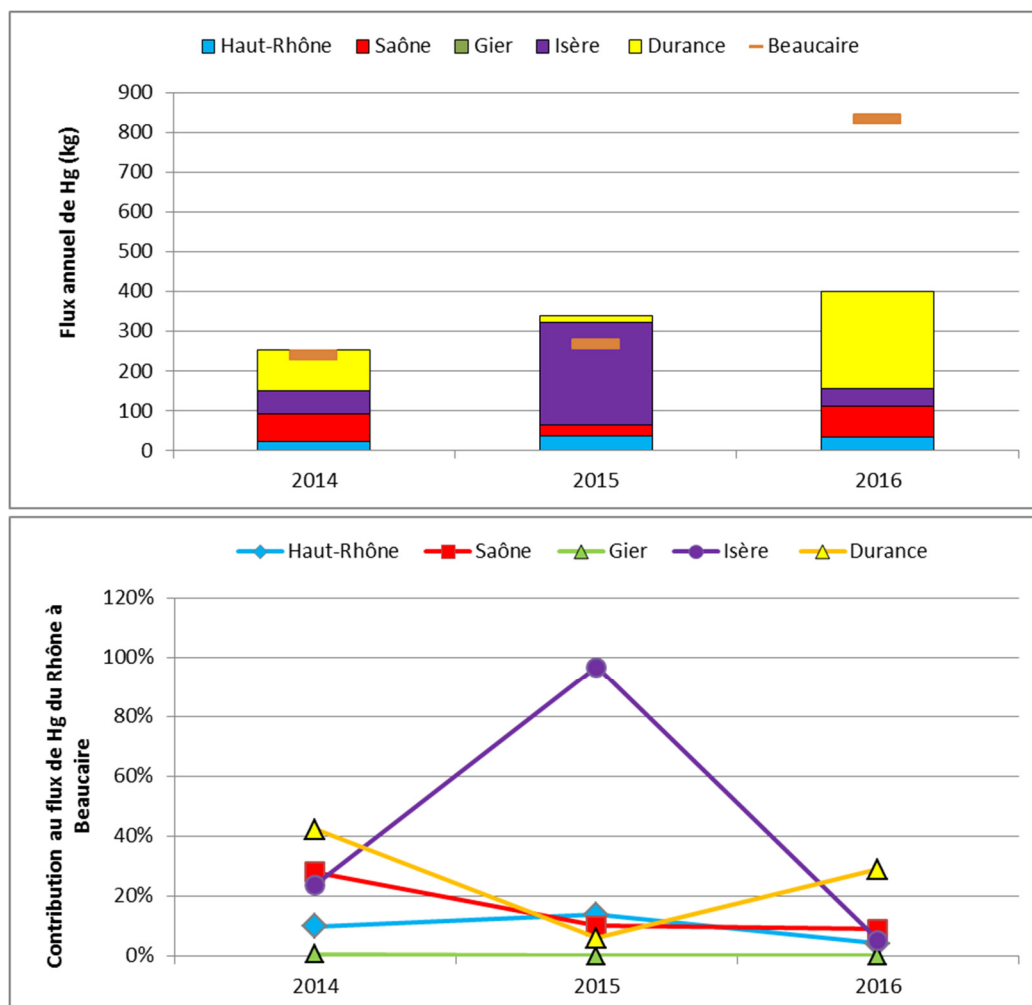


Figure 3 : Bilans de flux annuels de mercure (Hg) particulière sur le bassin du Rhône entre 2014 et 2016.

## Flux de contaminants : éléments trace métalliques et radionucléides

- Comme le Hg ou les PCB, les bilans de flux annuels d'éléments trace métalliques (ETM) sont déficitaires en 2014 et 2016 (jusqu'à -50 % pour certains éléments). Des apports en provenance des affluents cévenols (connus pour une contamination métallique marquée) sont probables et devront être étudiés.
- Les variations de flux de  $^{137}\text{Cs}$ , seul radionucléide artificiel systématiquement quantifié, sont principalement dus à celles des flux de MES. Les niveaux dans l'environnement étant hétérogènes, les flux constatés varient en fonction des affluents en crue. Les faibles niveaux observés sur l'Isère et la Durance, combinés aux flux des MES très importants lors des crues, engendrent une dilution du flux de  $^{137}\text{Cs}$  exportés par les autres affluents.

## Effets des crues, chasses, étiages sur les concentrations en contaminants particuliers

- L'important jeu de données acquis par l'OSR (prélèvements en situations hydrologiques contrastées) a permis d'évaluer l'effet des crues sur les concentrations en contaminants particuliers.
- Les concentrations en Hg, PCBi, glyphosate, AMPA et radionucléides artificiels sont en moyenne 20 à 40 % plus faibles lors des événements de crue et de chasse par rapport au régime de base à Arles, Jons et sur la Saône. Mais l'écart observé dépend des stations et des contaminants (**Figure 4**).

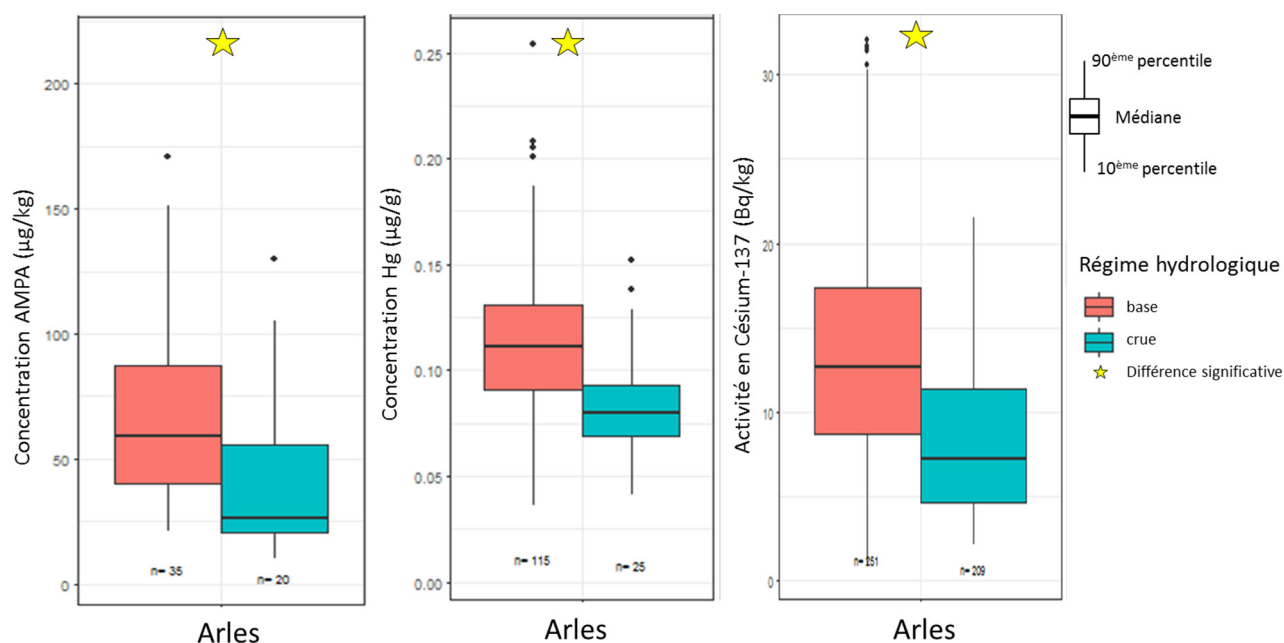


Figure 4 : Influence des conditions hydrologiques sur les concentrations en AMPA, Hg et Césium-137 particulaire à Arles.

- Pour l'essentiel, les concentrations en métaux particuliers ont des différences minimales entre crue et hors crue à Arles comme à Jons, avec des valeurs généralement plus basses en crue. Les affluents cévenols se démarquent de cette tendance car ils apportent des particules enrichies en cadmium, arsenic, plomb et zinc lors des crues. Leur influence dans le temps sur les MES en Arles reste cependant très ponctuelle. Ces valeurs plus hautes sont très probablement dues au bruit de fond géochimique plus élevé sur ces bassins versants (massifs granitiques et schisteux) et au lessivage des sols et d'anciens sites miniers.
- Lors des étiages, des métaux avec une affinité à la matière organique peuvent voir leurs concentrations augmentées (Zn, Cu), notamment sur Jons. Des observations similaires ont été faites pour les radionucléides.

## Tendances temporelles

- Les stations de l'OSR les plus anciennes (Arles et Jons) sont maintenant suivies depuis près de 5 ans. Cela permet aujourd'hui d'évaluer des tendances temporelles à moyen terme.
- Sur la période 2011-2016 à Arles, les concentrations en contaminants particuliers sont stables (HAP, glyphosate et AMPA, Hg) ou diminuent (PCBi, **Figure 5**). Si les tendances à la baisse se maintiennent, les teneurs en PCBi pourraient être divisées par 2 dans 3 à 6 ans.

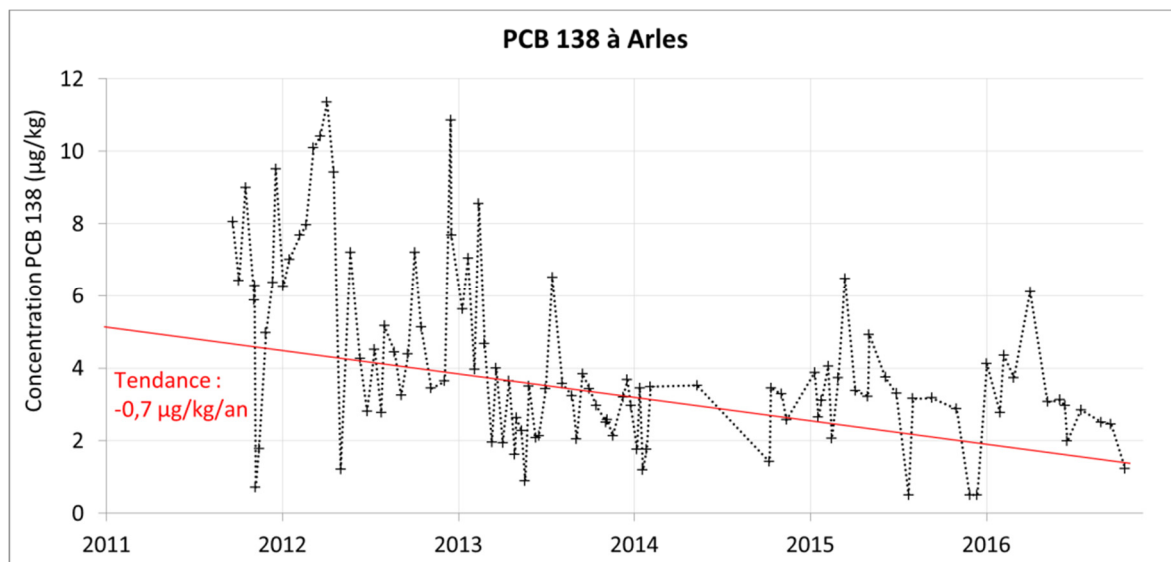


Figure 5 : Tendence temporelle des concentrations dans les MES observée pour le PCB 138 à Arles.

- A Jons, les concentrations en Hg sont stables sur la période 2011-2016. Les PCBi et HAP lourds (ex : benzo(a)pyrène) diminuent et cela pourrait se traduire par une baisse des concentrations d'un facteur 2 dans 4 à 7 ans. En revanche, les concentrations en naphthalène augmentent de 1 µg/kg/an, ce qui signifie que les facteurs d'émission de ce contaminant sont toujours actifs sur le bassin.
- Les données acquises sur les métaux dans les MES en Arles peuvent être maintenant confrontées à l'évolution historique. Pour l'essentiel, les concentrations sont redevenues similaires à celles de la période de pré-industrialisation du XIX<sup>ème</sup> siècle, et il n'y a pas de tendance notable entre les données 2011-2016 de l'OSR et celles acquises entre 1991 et 2016. Le plomb et le cadmium montrent encore des concentrations deux fois supérieures à la période préindustrielle, et quatre fois pour l'argent. Les signatures isotopiques du plomb attestent cependant que celui-ci provient d'une contamination généralisée et pas de sources industrielles spécifiques. La pollution des MES du Rhône par les métaux n'est plus d'actualité en Arles, mais des apports ponctuels existent encore avec les crues des affluents cévenols enrichis. Des actions pourraient sans doute encore permettre de baisser les niveaux.
- Depuis la forte diminution des rejets de Marcoule en 1991, les concentrations en contaminants radioactifs non naturels (émetteurs gamma, TOL et <sup>14</sup>C) continuent de diminuer ou se stabilisent (cas du Césium-137 dont les niveaux sont ceux de l'environnement correspondant principalement aux retombées de Tchernobyl).

## SESSION 4

---

# Schéma de ré-élargissement du Rhône et remobilisation des marges alluviales

*Mots clés : démantèlement, ouvrages, redynamisation, risque de relargage des polluants, transit sédimentaire, stocks de graviers, étude de faisabilité, gestion.*

### 1- Éléments de connaissance pour la mise en œuvre du schéma de redynamisation du Rhône : expérimentations et suivis pour une gestion adaptative

**Pilote :** Hervé Piégay<sup>1</sup>

**Ensemble des participants :** Amel Ati<sup>2</sup>, Benoit Camenen<sup>3</sup>, Mathieu Cassel<sup>1</sup>, Thomas Dépret<sup>1</sup>, Violaine Dugué<sup>3</sup>, Brice Mourier<sup>4</sup>, Bianca Raeppe<sup>1</sup>, Gwenaëlle Roux<sup>5</sup>, Gabrielle Seignemartin<sup>1</sup>, Michal Tal<sup>2</sup>, Alvaro Tena<sup>1</sup>, Daniel Vazquez Tarrio<sup>2</sup>, Thierry Winiarski<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ENS CNRS UMR 5600

<sup>2</sup> CEREGE CNRS UMR 7330

<sup>3</sup> Irstea Lyon Villeurbanne

<sup>4</sup> ENTPE CNRS UMR 5023

<sup>5</sup> EGEOS, Lyon

### 2- Réactivation de la dynamique fluviale sur le Rhône : de la faisabilité aux premières actions

Christophe Moiroud<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CNR, Direction de l'Ingénierie Technique, Département Génie civil et Environnement



# Éléments de connaissance pour la mise en œuvre du schéma de redynamisation du Rhône : expérimentations et suivis pour une gestion adaptative

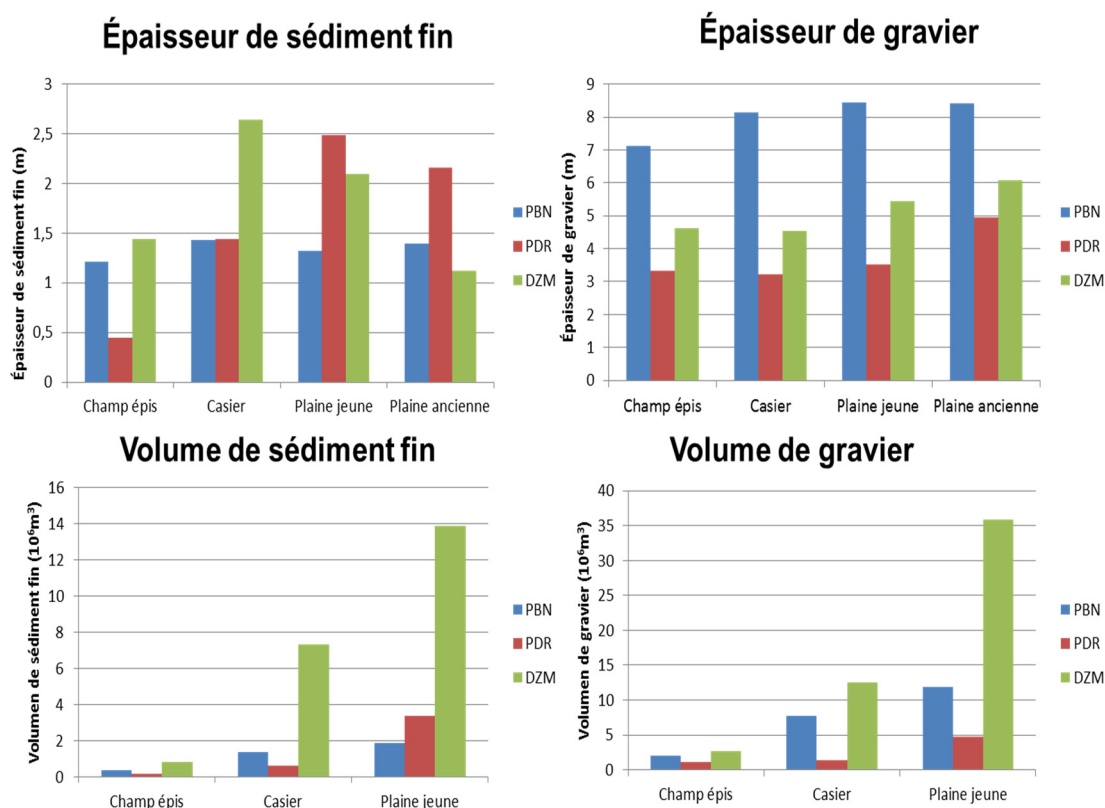
L'OSR a contribué au cours des 3 dernières années à éclairer les gestionnaires du fleuve dans la mise en œuvre du schéma de ré-élargissement du fleuve, de remobilisation des marges alluviales et plus largement de restauration écologique et hydraulique afin de répondre aux enjeux du SDAGE Rhône Méditerranée et de la DCE en produisant des connaissances spécifiques. Plusieurs questions ont ainsi été considérées : y-a-t-il plutôt du gravier ou des fines sur les marges aménagées ? L'idée communément admise était que le remplissage des casiers Girardon est plutôt composé de sédiments fins et les graviers sont plus rares alors même que dans l'optique d'une dynamique de ré-érosion, leur introduction dans le chenal constitue une opportunité et une alternative écologiquement optimale à une recharge mécanique. Lorsqu'il y a des fines sur ces marges, sont-elles par ailleurs potentiellement contaminées ? Les travaux précédents avaient montré que ces milieux peuvent abriter parfois des quantités de métaux et de PCB qui peuvent être significatives. Est-ce généralisable sur l'ensemble des tronçons ? Dans quel cas de figure peuvent se poser des problèmes de relargage potentiel de contaminants ? S'il y a érosion des berges et réinjection des sédiments dans le lit, vont-ils pouvoir transiter dans le chenal ? Au-delà de l'introduction de graviers dans le lit, comprendre comment celui-ci va transiter, ou peut transiter, constitue également un enjeu important pour évaluer la durabilité de ces politiques de restauration. D'autres actions sont conduites dans ce domaine, notamment pour évaluer la réponse écologique de ces actions mais elles ne relèvent pas spécifiquement du champ de l'OSR.

## 1. Y-a-il plutôt du gravier ou des fines sur les marges aménagées ?

L'étude des caractéristiques granulométriques des sédiments déposés sur les marges du Rhône s'est appuyée sur des campagnes de sondage à la perche - plusieurs centaines d'observations ont été réalisées sur chacun des sites d'étude (Pierre-Bénite, Péage-de-Roussillon, Donzère)-, sur des profils réalisés au GPR -trente kilomètres de profils ont été effectués sur l'ensemble des sites-, et des sondages avec un carottier mécanique permettant de caractériser finement la sédimentation et notamment d'appréhender la contamination dans un contexte chronologique contrôlé.

Ces travaux ont permis de montrer que les volumes de graviers stockés sur les marges du fleuve sont conséquents, non seulement dans la plaine alluviale mais aussi dans les casiers (**Figure 1**). Les épaisseurs de graviers par rapport au fond du lit actuel du Rhône peuvent atteindre près de 8 m sur Pierre-Bénite, 4 à 6 mètres sur Donzère, 3 à 5 m sur Péage-de-Roussillon, confirmant que des ressources alluviales grossières existent bien sur les marges du fleuve et permettent d'envisager durablement une recharge sédimentaire potentielle par érosion latérale sans qu'il soit nécessaire de solliciter des ressources externes.

L'un des enjeux à ce jour est de connaître plus finement la taille de ces matériaux car cela aura des implications en termes de capacité d'érosion et de transport dans le chenal.



**Figure 1.** Comparaison des épaisseurs et volumes de sédiments fins et de graviers pour les secteurs de Pierre-Bénite (PBN), Donzère-Mondragon (DZM) et Péage-de-Roussillon (PDR).

## 2. Les fines présentes sur les marges alluviales sont-elles potentiellement contaminées ?

L'analyse des stocks de sédiments souligne que les fines sont inégalement abondantes selon les secteurs et les compartiments (épis, casiers, plaine). Plutôt abondantes sur Donzère, notamment dans la plaine et les casiers, elles sont moins abondantes sur Pierre-Bénite et Péage. En moyenne dans les casiers, les épaisseurs de fines sont de 2,5 m sur Donzère et 1,5 mètre sur Péage et Pierre-Bénite.

Les travaux précédents (OSR2) conduits par J.P. Bedell, B. Mourier et leurs collègues sur les flux de contaminants à partir de carottes sédimentaires localisées dans des secteurs très connectés au fleuve et rendant compte de la chronologie du flux plus que de la chronologie du dépôt proprement dit dans la plaine, ont montré que les flux de métaux, notamment Cu, Zn et Pb sont très abondants dans les années 1970 et décroissent ensuite. C'est également le cas pour les PCB.

Les résultats de l'OSR 4 apportent plusieurs éléments nouveaux :

- La chronologie des flux et la chronologie des stocks sont distinctes sur la plupart des sites. La chronologie des stocks est notamment très influencée par les deux phases d'aménagement (aménagements Girardon et mises en RCC). Une grande partie de la sédimentation fine est antérieure à l'aménagement Girardon. Elle présente généralement des concentrations en métaux faibles, bien souvent en deçà des seuils de pollution, et une granulométrie à dominante sableuse. La sédimentation du 20<sup>ème</sup> siècle est généralement plus fine, limoneuse. La réduction de l'énergie

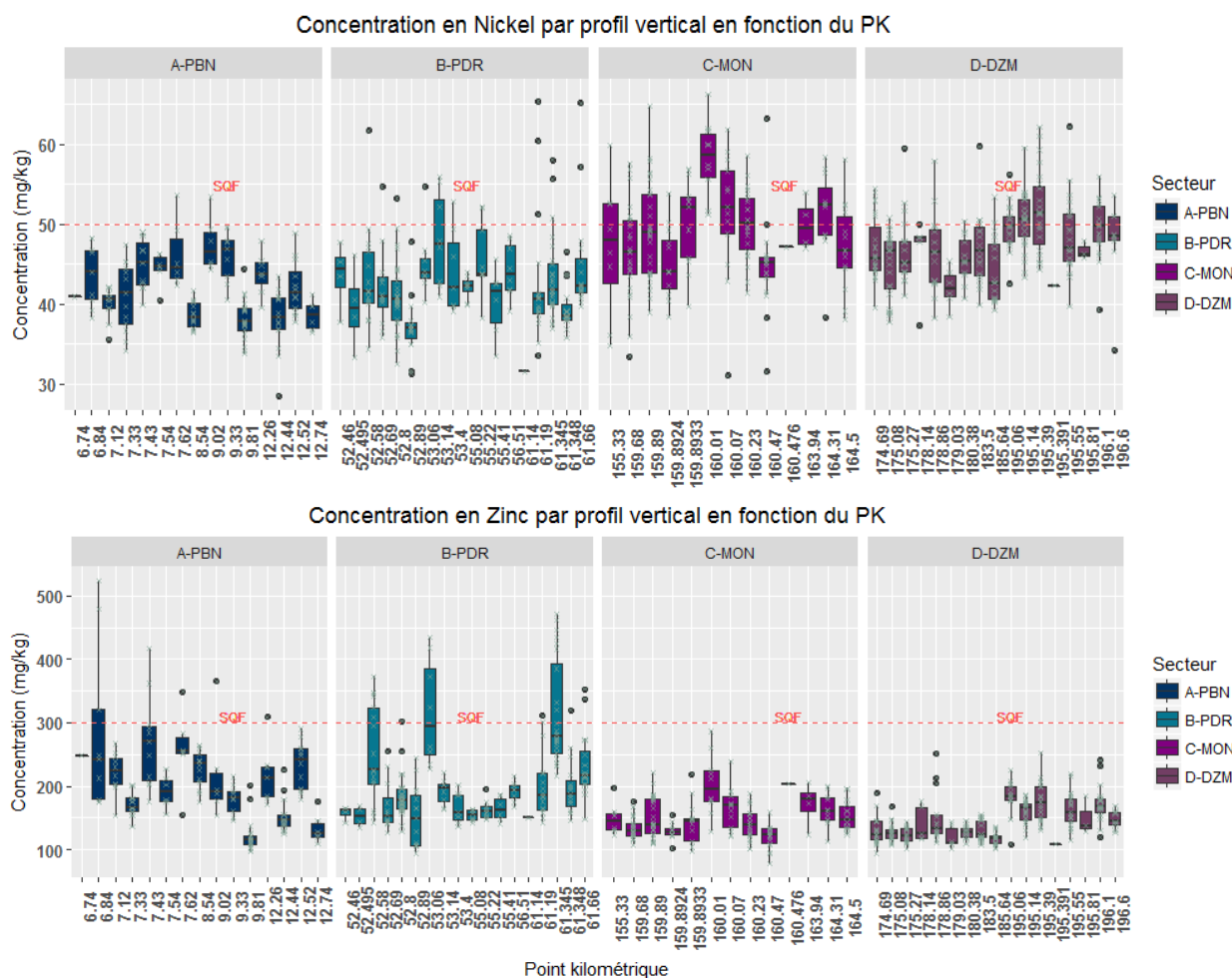
dans la plaine du fait de l'incision du lit, de la déconnexion par les ouvrages et de l'atténuation de l'intensité des crues après la mise en RCC a très fortement ralenti la sédimentation et celle-ci est plus fine.

- Quand la chronologie de la sédimentation coïncide avec la chronologie des flux de contaminants, ceux-ci peuvent être localement présents dans la plaine. Le cas le plus typique est celui de Péage qui s'atterrit et se sédimente assez significativement au moment où transitent les flux de contaminants les plus importants. Sur Donzère par exemple la sédimentation fine est déjà bien avancée quand transitent les flux contaminés et le secteur ne doit donc pas avoir piégé une grande quantité de ce flux. De fait bien souvent, les milieux riverains les plus hauts disposent d'un signal de contamination plus marqué en surface, sans que celui-ci dépasse les seuils SQF, car la sédimentation étant très faible, il reste encore dans les 20 premiers cm une signature des flux des années 70. Quand les milieux riverains sont plus connectés et enregistrent une sédimentation plus marquée, des poches de contamination peuvent exister en profondeur, principalement dans les casiers. Il est possible de détecter ces secteurs potentiellement contaminés par une analyse planimétrique de l'atterrissement et une mesure des taux de sédimentation. Ils sont potentiellement peu nombreux et doivent disposer d'une bonne connectivité au moment du flux de contamination dans les années 70.
- Péage-de-Roussillon et Pierre-Bénite se distinguent nettement de Montélimar et Donzère-Mondragon en termes de signature chimique (**Figure 2**). Ils présentent significativement plus de Zn, Pb et Cu, certains sites dépassant le seuil SQF alors que les deux secteurs aval se caractérisent par une présence plus marquée de Ni, celui-ci dépassant localement le seuil SQF. Le lien entre la chronologie du flux de Nickel et la chronologie du dépôt du Nickel dans la plaine reste encore à faire afin de bien comprendre cette différence sur le continuum fluvial. Il est fort possible que la présence de Ni soit également liée au contexte géologique. La signature de l'Ardèche bien marquée au niveau du Ni peut ainsi être d'origine naturelle.
- Il existe des sites très marqués par des contaminations de surface notamment en Zinc sur les marges de la plaine alluviale. C'est notamment le cas de Pierre-Bénite. Ceci pourrait correspondre à des pollutions d'origine urbaine et arrivant sur le site par ruissellement ou par l'atmosphère.

Les travaux de l'OSR permettent de montrer qu'à ce jour la contamination de la plaine alluviale par les métaux reste modeste et circonscrite localement, il s'agit maintenant de confirmer ces résultats avec les PCB. Les secteurs potentiellement contaminés, plutôt des casiers Girardon, peuvent être identifiés en considérant leur localisation dans la plaine et en analysant la chronologie de leur atterrissement en lien avec la chronologie de leur déconnexion, elle-même associée à celle des phases d'aménagement.

### 3. Les sédiments réintroduits dans le lit peuvent-ils transiter dans le chenal ?

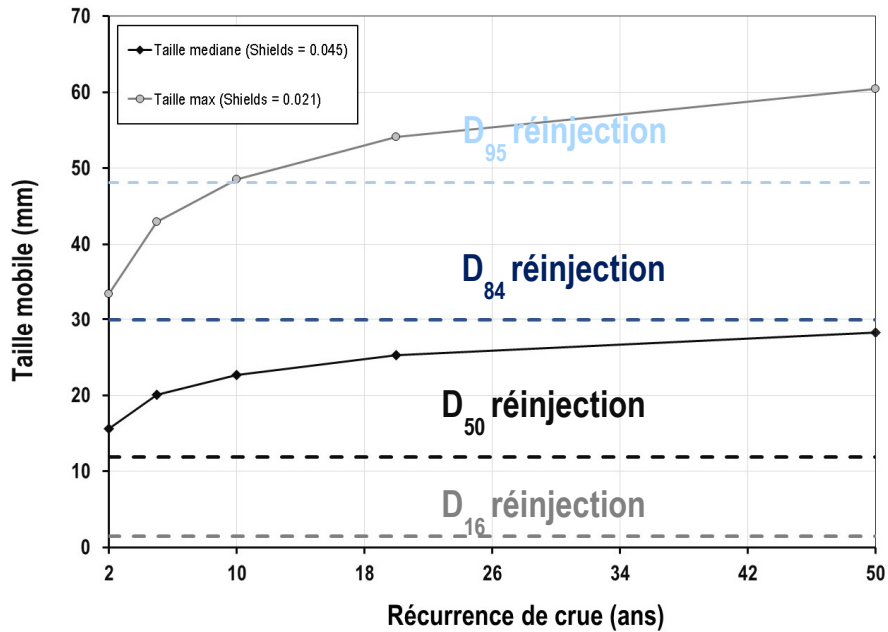
Deux actions ont été conduites pour alimenter ce questionnement. Un modèle 1D réalisé sur tout le continuum fluvial de la frontière Suisse à la mer permet aujourd'hui de calculer le transport solide potentiel pour différents débits. Cet outil est utilisable en phase avant-travaux pour évaluer la réponse potentielle du chenal aux travaux de restauration et voir notamment si la charge introduite pourra ou non transiter, quelle granulométrie et quel volume sédimentaire sont également à envisager. La seconde action a porté sur le développement de traceurs RFID et de protocoles de suivi pour permettre de valider les modélisations et les améliorer, tout en fournissant également des éléments sur les distances parcourues en fonction de l'hydrologie.



**Figure 2.** Concentration en Nickel et en Zinc d'échantillons de sédiments fins prélevés par tranche de 20 cm sur des profils verticaux réalisés dans les casiers Girardon de 4 RCC du Rhône. Chaque boîte à moustache correspond à un profil. La mesure a été réalisée sur la fraction fine inférieure à 63 microns.

Une opération de réinjection de sédiments a été réalisée au cours de l'année 2017, sur le territoire de la Réserve Naturelle de la Platière (casiers de l'Île des Gravier). Ainsi, 7000 m<sup>3</sup> de sédiments ont été réinjectés à l'amont du RCC. Nous avons tiré profit de cette action pour utiliser ce site à titre expérimental et réaliser un état des lieux avant travaux. Nous avons d'abord comparé la granulométrie du sédiment réinjecté avec celle actuellement dans le lit (données de Parrot, 2015). Nous avons également comparé la granulométrie du sédiment réinjecté avec la taille des sédiments potentiellement mobiles, déterminée à partir des sorties du modèle hydro-sédimentaire 1D. Cela permet de voir que la granulométrie réinjectée est potentiellement mobilisable pour des crues courantes (**Figure 3**).

Les travaux effectués sur le tronçon du canal de Miribel ont également permis de confirmer la mobilité de la charge sédimentaire lors des petites crues (**Figure 4**). Les suivis répétés devraient permettre au cours des prochaines années de disposer de lois permettant de calculer la distance de propagation de la charge en fonction du cumul d'énergie des événements de crue successifs et d'intégrer ces éléments de connaissance dans les scénarios de projet de ré-érosion et de recharge sédimentaire comme cela est aujourd'hui possible sur le Rhin dans le secteur de Kembs où l'on dispose aujourd'hui de 5 états observés entre la crue annuelle et la crue d'une période de retour de 15 ans.



**Figure 3.** Taille des sédiments potentiellement mobiles dans le lit du fleuve en fonction de la récurrence des crues sur le secteur de Péage-de-Roussillon. Les lignes pointillées horizontales correspondent à des percentiles de taille du sédiment réinjecté sur ce site en 2017 par GeoPeka.

#### 4. Conclusions

Les travaux de l'OSR4 ont produit un certain nombre de connaissances permettant de mettre en œuvre le Schéma de ré-élargissement du Rhône et la remobilisation des marges alluviales. Ils ont permis d'évaluer les stocks de sédiments grossiers disponibles et de les localiser. Les ressources locales pour la recharge existent et les opérations de recharge peuvent être considérées comme des actions potentiellement durables compte tenu des volumes disponibles. Les sédiments fins peuvent être localement contaminés par des métaux mais le risque semble être circonscrit à des contextes spécifiques que l'on rencontre localement. Il faut que la sédimentation se soit manifestée au moment des flux de contaminants, c'est-à-dire dans les années 70 (Zn et PCB notamment). Une grande partie des sédiments est déjà déposée avant cette période sur bien des sites. Des analyses complémentaires sur les PCB seront effectuées dans le cadre d'OSR5 sur Donzère afin de confirmer ces premiers résultats. La méthodologie existe pour détecter les secteurs potentiellement affectés.

L'OSR a développé un modèle hydraulique 1D permettant d'évaluer la capacité de transport et la taille des sédiments mobilisables, ainsi que des techniques pour suivre la charge en transit. Ces outils ont été testés sur des sites pilotes et permettent d'envisager une validation des modèles et la possibilité de les utiliser dans les phases avant-travaux pour évaluer les différents scénarios. C'est un des objectifs de l'OSR5.

L'OSR ne peut cependant pas répondre à toutes les attentes des partenaires quant aux suivis permettant d'évaluer la réponse morphologique et écologique du ré-élargissement du Rhône et la remobilisation des marges alluviales. Certains suivis complémentaires sont actuellement discutés avec les partenaires, plusieurs ont fait l'objet de travaux pilotes dans le cadre de l'OHM Vallée du Rhône (post-doc de P. Janssen sur le suivi de la végétation riveraine, projet de J. Lejot sur le suivi de la réinjection sédimentaire par photogrammétrie et LiDAR-drone). Une note technique rédigée par le collectif scientifique interdisciplinaire de la ZABR et de l'OHM VR a été transmise aux partenaires, et plusieurs chercheurs ont travaillé avec les ingénieurs de la CNR, RCC par RCC, pour identifier les actions pertinentes à mettre en œuvre pour une restauration écologique et hydraulique du fleuve, intégrant la réflexion sur le

rélargissement et la redynamisation du fleuve ainsi que la gestion sédimentaire à l'échelle du continuum dans une perspective très intégrative. Une première expérience est notamment conduite sur le RCC de Baix-le-Logis-Neuf.

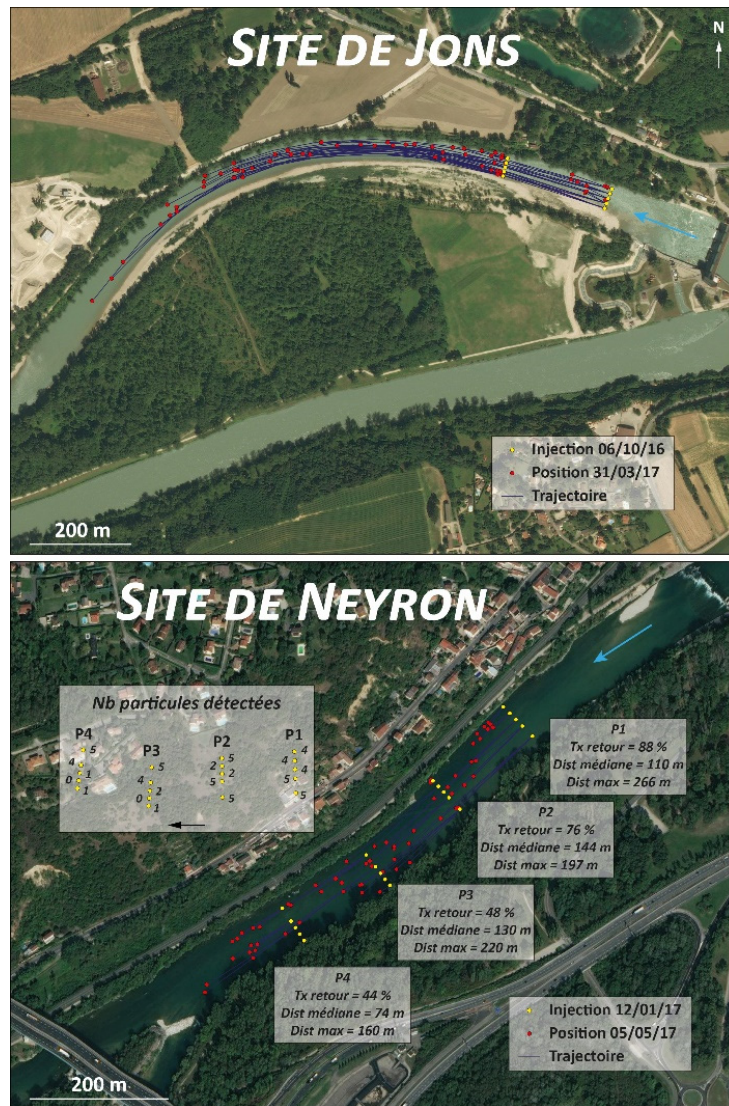


Figure 4. Trajectoires parcourues par les traceurs RFID injectés sur les sites de Jons et de Neyron (Canal de Miribel) lors des événements de crue de nov. 2016 et mars 2017. En raison de la faible activité hydrologique durant la période d'étude, une seule campagne de détection a pu être réalisée. Le débit instantané maximal s'élève à  $1472 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  dans le Rhône total, soit  $1021 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  dans le canal de Miribel (données EDF), ce qui correspond approximativement à la crue annuelle (la période de retour de 1,1 an, calculée via un ajustement de Gumbel à partir de la chronique de débits journaliers à la station de Lyon pour la période 1920-2013, indique un débit de  $1476 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Sur les sites de Jons et Neyron, le débit critique de mise en mouvement de la charge de fond ( $440 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  dans le canal de Miribel selon Petit et al. (2016)) a été atteint respectivement lors de quatre et deux événements distincts (durée totale de 81 h et 38 h).

# Réactivation de la dynamique fluviale sur de Rhône : de la faisabilité aux premières actions

Christophe MOIROUD, Compagnie Nationale du Rhône

Les aménagements successifs du Rhône (Girardon, canalisation...) depuis plus de 150 ans ont entraîné une diminution de la dynamique latérale et une accumulation de sédiments dans les annexes fluviales ainsi que sur les marges alluviales du fleuve. Dans la continuité des actions de restaurations de l'ône engagées depuis la fin des années 90, un programme de réactivation des marges alluviales du Rhône, par démantèlement des ouvrages Girardon, est en cours d'élaboration et de développement opérationnel sur différentes masses d'eau du Rhône situées au sud de Lyon (une des mesures définies pour l'atteinte du bon état écologique).

Des études de faisabilité ont été réalisées pour cerner l'éligibilité technique sur chaque site potentiel identifié au Schéma Directeur de réactivation des marges porté par l'OSR (26 unités hors Vieux-Rhône prioritaires). A l'issue de cette étape, une série de sites est déclinée en phase opérationnelle (Bourg-Lès-Valence, Baix-le-Logis-Neuf, Pierre-Bénite dans un premier temps...) en parallèle de la continuité d'actions sur les Vieux-Rhône prioritaires tels que Donzère-Mondragon ou Péage-de-Roussillon.

Les actions se concentrent essentiellement sur le traitement des marges alluviales par déconstruction des ouvrages Girardon ainsi que l'amorce d'ouvertures d'anciens chenaux et/ou de l'ônes. La mobilisation sédimentaire est induite par l'énergie du fleuve en crue. Les matériaux sont remobilisés directement dans le Rhône.

Des opérations d'envergure (sur plus de 400 ha) sont en cours de réalisation en rive droite et gauche des communes de Bourg-Saint-Andéol, Pierrelatte et Lapalud. D'autres sont prévues sur les communes de Cornas et Baix au cours de l'année 2018.

Ces travaux novateurs vont s'inscrire durablement dans les territoires. Ils nécessitent l'association au cours du projet (de l'amont à l'exécution des travaux) des élus, des scientifiques, des gestionnaires, des usagers (quels qu'ils soient) et des riverains afin de faire converger les points de vue sur la gestion de ces milieux rhodaniens ainsi que les périmètres d'intervention. Cette concertation s'inscrit également dans la recherche d'une action d'intérêt général plus transparente qui doit prendre en compte les attentes de tous ces acteurs et traiter les contraintes propres à chaque site.

Les « retours d'expérience » sont indispensables pour évaluer l'efficacité des actions projetées et améliorer par conséquent la conception des futurs projets.



## SESSION 5

---

# Outils numériques de l'OSR et transferts opérationnels des connaissances produites

**Mots clés :** *Infrastructure de Données Spatio-temporelles (IDS), web-SIG, base de données, métadonnées, site internet, chroniques hydrologiques, modélisation, restauration, durée de vie des lônes, redynamisation des marges, chasses.*

### 1- Comment l'information et le savoir-faire produits par l'OSR sont-ils diffusés ? Valorisation, web-SIG et base de données de l'OSR

**Pilote :** Fanny Arnaud<sup>1</sup>

**Ensemble des participants :** Aurélie Antonio<sup>1</sup>, Flora Branger<sup>2</sup>, Lucas Chiroi<sup>1</sup>, Chloé Le Bescond<sup>2</sup>, Jérôme Le Coz<sup>2</sup>, Kristell Michel<sup>1</sup>, Hervé Parmentier<sup>1</sup>, Hervé Piégay<sup>1</sup>, Dad Roux-Michollet<sup>3</sup>, Fabien Thollet<sup>2</sup>, Lise Vaudor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ENS CNRS UMR 5600

<sup>2</sup> Irstea Lyon Villeurbanne

<sup>3</sup> GRAIE – Observatoire Hommes-Milieus Vallée du Rhône

### 2- L'expertise de l'OSR au service du suivi de la gestion sédimentaire du Haut-Rhône 2016

Thomas Pollin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CNR, Direction Gestion d'Actifs et Concessions

### 3- Miribel-Jonage : un site aux enjeux multiples

Benoit Mottet<sup>1</sup> et Isabelle Jacquélet<sup>1</sup>

<sup>1</sup> EDF, Délégation de Bassin RMC



# Comment l'information et le savoir-faire produits par l'OSR sont-ils diffusés ? Valorisation, web-SIG et base de données

## Enjeux

La mutualisation et la diffusion des connaissances produites sur les sédiments du Rhône est une étape fondamentale du dispositif d'observation scientifique de long terme. L'OSR exerce en effet un rôle de plateforme qui vise à favoriser les échanges d'informations entre les équipes scientifiques, les acteurs de l'eau, les décideurs publics et les citoyens. Des outils numériques collaboratifs, organisés dans une Infrastructure de Données Spatio-temporelles (IDS), ont été développés pour centraliser, conserver, partager et visualiser les données acquises (**Figure 1**). La construction de cette IDS est un travail au long cours qui a débuté dès la création de l'OSR en 2009 (OSR1) et a été consolidée dans les programmes ultérieurs (OSR2 et OSR4). La mise à jour des outils mobilise des informaticiens, des géomaticiens, des techniciens et des hydrologues de l'OSR (laboratoires EVS et IRSTEA) ainsi qu'un animateur qui est chargé d'impliquer les scientifiques dans le processus de bancarisation et de mettre les données à disposition des gestionnaires.

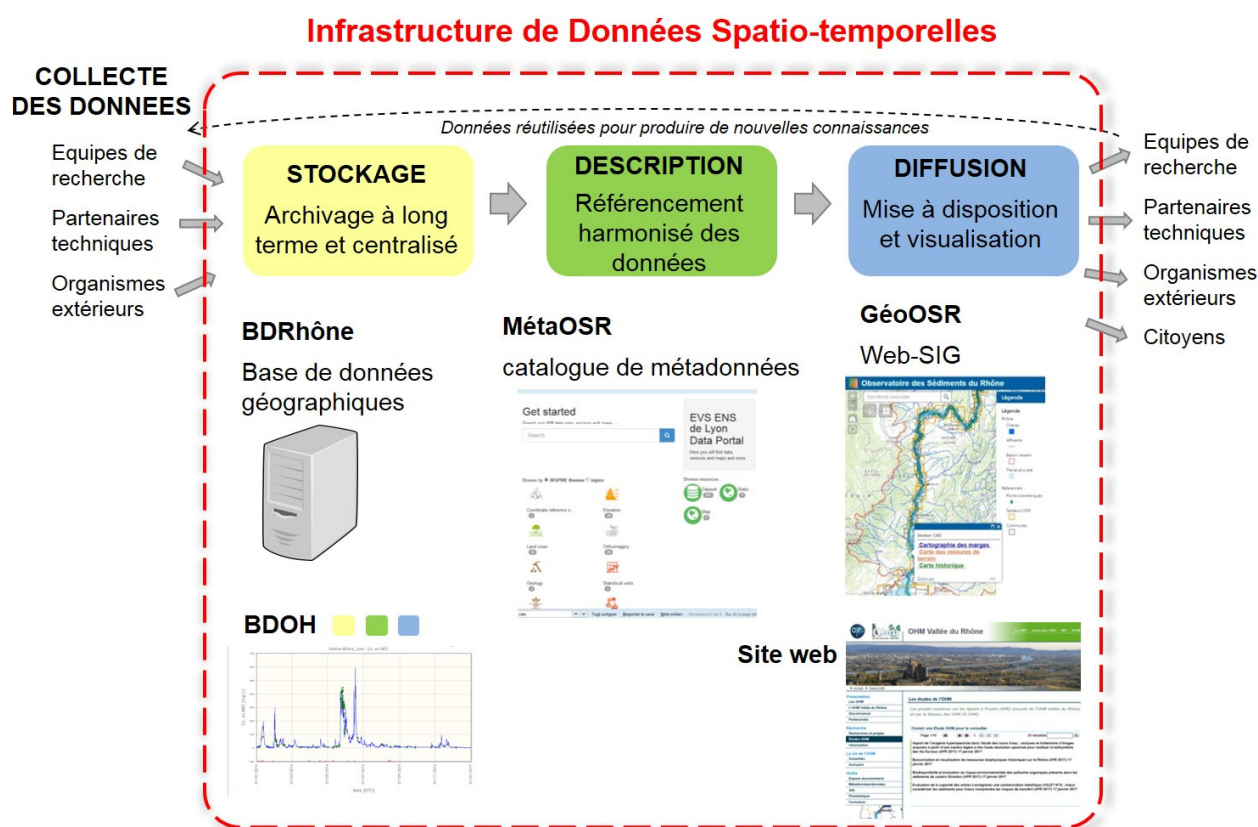


Figure 1. L'Infrastructure de Données Spatio-temporelles de l'OSR.

## La base de données géographiques BDRhône

La base de données géographiques de l'OSR est hébergée sur le serveur informatique du laboratoire EVS. Elle regroupe 210 Go de données organisées en types (images aériennes, cartes anciennes, couches vectorielles, tableaux...) et en thèmes (morphologie, topographie, flux...). Ces données ont été produites par les scientifiques ou ont été acquises auprès des grands producteurs nationaux et des partenaires techniques. BDRhône est en accès restreint aux administrateurs du serveur. Les demandes de données sont gérées au cas par cas par l'animateur qui informe systématiquement le producteur de la donnée. Une convention de mise à disposition des données de la Compagnie Nationale du Rhône a notamment été mise en place avec le CNRS et les équipes scientifiques de l'OSR. Une vingtaine de demandes de données est gérée annuellement depuis 2016, émanant des chercheurs, des partenaires techniques ou d'organismes extérieurs. Ce nombre est en nette augmentation depuis 2009, ce qui témoigne de la consolidation et de la meilleure visibilité du dispositif de mutualisation des données du Rhône.

## La plateforme de gestion des chroniques hydrologiques BDOH

BDOH est une base de données hydrologiques accessible en ligne (<https://bdoh.irstea.fr>), structurée par observatoires, stations et chroniques (séries temporelles de débit, paramètres physico-chimiques, etc.). Elle permet de calculer automatiquement des chroniques dérivées de ces paramètres (transformation de la turbidité en concentration en MES, calcul des flux par multiplication des débits par les concentrations). Les barèmes de transformation et leur historique sont archivés dans la base.

BDOH regroupe les données collectées à travers 11 observatoires en France, en particulier dans le bassin versant du Rhône. L'Observatoire des Sédiments du Rhône (2009-2017) comprend 22 stations et s'intéresse à 57 paramètres. Actuellement, 484 chroniques temporelles issues de 11 producteurs différents sont mises à disposition du public dans cet observatoire. Des conventions de mise à disposition des données ont été mises en place. Les chroniques sont visualisables par tous publics mais le téléchargement requiert la création d'un compte nominatif et l'attribution de droits (par chronique ou station) par les gestionnaires de la base. Ceci permet un traçage des téléchargements. La base de données a permis de stabiliser et partager un protocole de calcul des flux de MES et de contaminants homogènes pour toutes les stations, afin de produire les données de flux instantané, cumulé à différentes échelles de temps (événementielle, journalière, mensuelle, annuelle, etc.). Un DOI a été attribué au jeu de données, ce qui permet de le citer proprement comme une référence.

Des développements particulièrement utiles à l'OSR sont prévus dans le futur programme OSR5 et Irstea prévoit la spatialisation de BDOH (accès cartographique) à partir de 2019.

## MétaOSR : Le catalogue de métadonnées de l'OSR

Une métadonnée est un ensemble d'informations qui permettent de connaître l'historique de création d'une donnée et ses caractéristiques techniques : auteurs, mots-clés, précision de la donnée... dans le respect de normes européennes et internationales pour la diffusion des données environnementales (normes INSPIRE et ISO 19139). Les métadonnées sont consultables par tous sous forme de fiches publiées sur le web, dans des géo-catalogues qui permettent de savoir en une recherche quelles données existent sur un territoire ou une thématique, et qui contacter pour demander l'accès aux données. Un géo-catalogue est également utile aux scientifiques pour diffuser leurs données et potentiellement initier de nouvelles collaborations.

Le géo-catalogue [MétaOSR](#) alimente le géo-catalogue de la Zone Atelier Bassin du Rhône, le géo-catalogue national et le géo-catalogue européen. Il contient aujourd'hui 83 fiches « OSR » (voir le résumé du catalogue disponible en [pdf](#)). Ces fiches offrent une vue synthétique des sujets de recherche de l'OSR

(Figure 2) et des équipes impliquées. Les métadonnées des autres programmes de recherche sur le Rhône sont également consultables : MétaOSR contient au total 149 fiches « Rhône » issues notamment des programmes OSR, RhônEco et Observatoire Hommes-Milieux Vallée du Rhône.



Figure 2. Nuage de mots issu des mots-clés renseignés par les scientifiques sur leurs fiches de métadonnées.

Un guide pour la saisie des métadonnées en ligne a été créé pour assister les chercheurs dans le processus de bancarisation. MétaOSR a vocation à être alimenté régulièrement, de nouvelles fiches décrivant les données de l'OSR4 seront donc publiées en 2018.

## GéoOSR : La plateforme de webmapping de l'OSR

Une partie du contenu de la base de données géographiques de l'OSR est accessible pour une visualisation dynamique grâce à des outils de géovisualisation. Ces outils permettent de consulter des données spatiales éditées spécifiquement pour le web sous forme de "webservices" et mises en page dans des "webapplications". Depuis 2017, une carte générale et cinq cartes thématiques sont en ligne dans leur nouvelle version (Figure 4).

La cartographie générale visualise les différents secteurs d'étude de l'OSR de Genève à la mer Méditerranée, ainsi que diverses couches géographiques telles que le réseau hydrographique, les aménagements hydroélectriques et les sites Natura 2000.

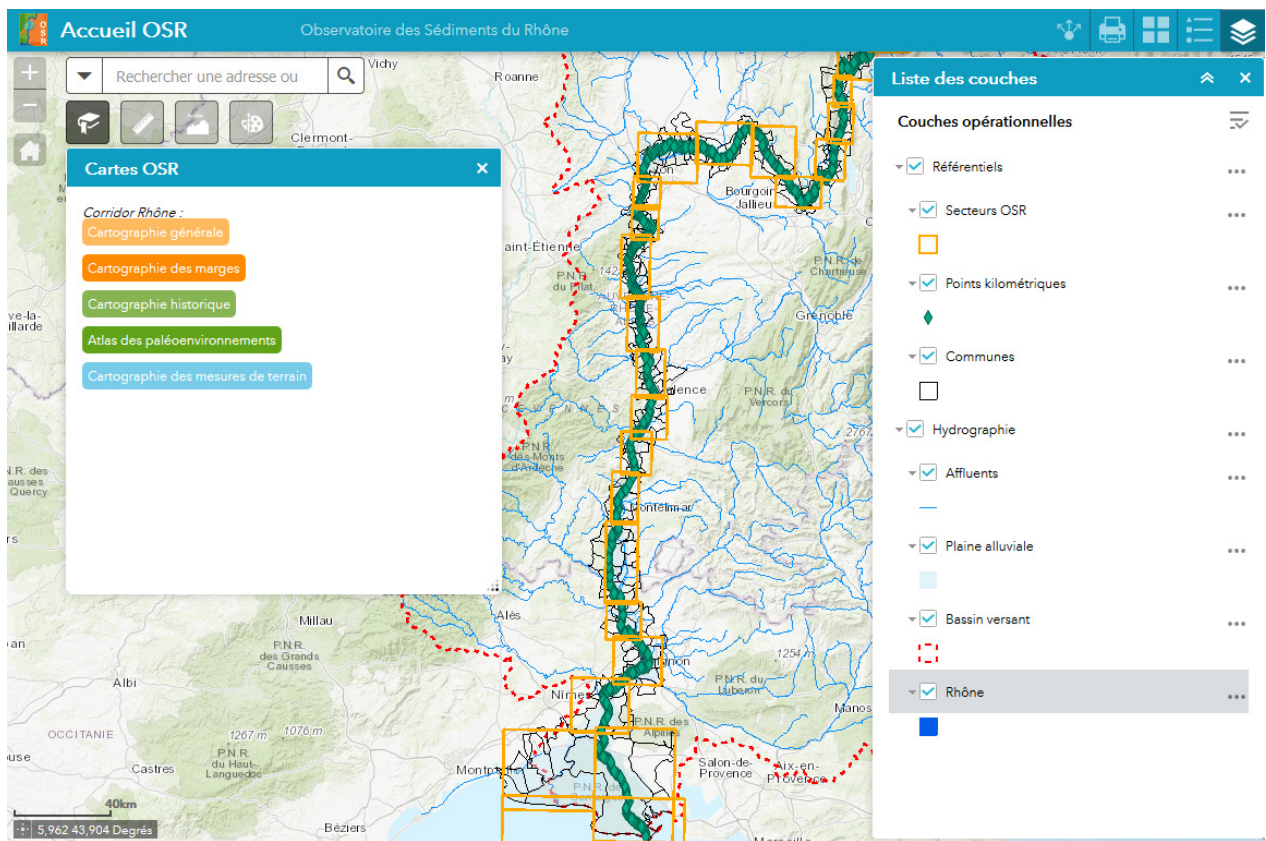


Figure 4. Carte d'accueil de GéoOSR.

La cartographie des mesures de terrain localise les stations de mesure des flux de matières en suspension et de contaminants mises en place depuis les années 2000 par les scientifiques de l'OSR et les gestionnaires (CNR, EDF, Grand Lyon) sur le Rhône et ses principaux affluents. Cette carte présente également la position de carottages sédimentaires réalisés dans les programmes OSR4 et OSR2, de sondages géophysiques (OSR4) et d'une campagne granulométrique qui a caractérisé le continuum sédimentaire sur l'ensemble du linéaire rhodanien (OSR2).

La cartographie des marges visualise les principaux résultats du schéma directeur de réactivation de la dynamique fluviale des marges du Rhône (OSR2) : évolution de la topographie et de l'occupation du sol entre 1860 et 2009, zonage de faisabilité du schéma directeur.

La cartographie historique présente deux atlas levés entre 1891 et 1908, restituant la position des ouvrages Girardon implantés dans le chenal ainsi que la bathymétrie, et superposés à la carte d'Etat-Major de 1860. Ces atlas ont permis notamment d'étudier l'évolution géométrique du lit du Rhône dans le programme OSR2.

Enfin, l'atlas des paléoenvironnements élaboré en 2007 dans le cadre du volet « Inondations » du Plan Rhône (maîtrise d'ouvrage DREAL Rhône-Alpes), rendant accessible l'ensemble des connaissances sur l'histoire du fleuve et de sa plaine alluviale depuis le début de l'Holocène jusqu'en 1860-1870, est en ligne sur GéoOSR.

Un tutoriel vidéo d'utilisation de GéoOSR et MétaOSR est désormais consultable.

# L'expertise de l'OSR au service du suivi de la gestion sédimentaire du Haut-Rhône 2016

Thomas POLLIN, Compagnie Nationale du Rhône

Le Haut-Rhône, tronçon du fleuve sur 180 km entre Genève et Lyon, est marqué par l'apport sédimentaire conséquent de la rivière Arve. L'accumulation d'une partie de ces matériaux dans la retenue Suisse de Verbois induit un risque accru d'inondation des quartiers bas de Genève.

Cette situation amène le concessionnaire suisse - les Services Industriels de Genève (SIG) - à évacuer régulièrement les dépôts sédimentaires par entraînement hydraulique : des abaissements désormais seulement partiels de la retenue de Verbois sont réalisés, en respectant des taux de MES limités à la frontière.

A l'aval, la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) - concessionnaire français - accompagne les manœuvres suisses par une gestion spécifique de ses ouvrages. L'objectif visé est ambitieux : optimiser le transit sédimentaire et limiter l'engrèvement des retenues françaises, tout en préservant les différents usages du fleuve.

Le premier abaissement partiel de Verbois accompagné par CNR a été mis en œuvre en mai 2016. La réussite de ces opérations repose en particulier sur un niveau de suivi élevé, assurant une maîtrise opérationnelle à la hauteur des enjeux.

Afin d'assurer ces nombreux suivis, des moyens importants ont été déployés par CNR et ses partenaires, dont l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR). Des suivis de flux de Matières En Suspension (MES) et de sables, ainsi que des suivis toxicologiques, ont été mis en œuvre par les équipes d'IRSTEA Hydrologie – Hydraulique, d'IRSTEA Laboratoire de chimie des milieux aquatiques (LAMA) et du Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement (CEREGE).

Pour illustrer l'implication de l'OSR dans le suivi de ces opérations, un focus est réalisé sur les résultats de flux de MES et de caractérisation de la charge sableuse. Outre l'intérêt de vérifier la cohérence entre les mesures CNR d'une part et les mesures de l'OSR d'autre part, la pertinence d'associer les scientifiques de l'Observatoire à ce type d'évènement prend tout son sens lorsqu'il s'agit de mieux comprendre des phénomènes hydrosédimentaires auxquels sont confrontés les gestionnaires. L'expertise de l'OSR est essentielle à l'optimisation de la maîtrise opérationnelle de cette gestion sédimentaire.

En l'occurrence, suite aux hypothèses et simulations des gestionnaires, confirmées par les constats effectués lors des abaissements partiels de 2016, l'amélioration des connaissances sur les sables en suspension est plus que jamais d'actualité. Le sujet est d'ailleurs inscrit au futur programme OSR5, preuve que l'interface entre scientifiques et gestionnaires est dynamique et fonctionnelle.



# Miribel-Jonage, un site aux enjeux multiples

Benoit Mottet et Isabelle Jacquelet, EDF

Le canal de Miribel, ancien bras de tressage du fleuve Rhône, creusé pour les besoins de la navigation au 19<sup>ème</sup> siècle, constitue sur cette section le cours principal du Rhône dont le débit se trouve « court-circuité » par le barrage de Jons. Il dérive une partie des écoulements vers le canal de Jonage affecté au fonctionnement de l'**usine hydroélectrique de Cusset** qui produit environ 415 GWh/an (soit l'équivalent de la consommation d'une ville de 100 000 habitants).

Plus bas que le canal de Jonage, le canal de Miribel draine sur un linéaire de 18 km la nappe alluviale du Rhône. En crue, il alimente **la nappe et les milieux aquatiques** annexes tels que les lônes et les plans d'eau des îles de Miribel Jonage et de Crépieux-Charmy.

Le site de Miribel-Jonage, est au cœur d'enjeux multiples qu'il convient de pérenniser : la sécurisation de l'alimentation en eau potable, la qualité et la préservation de la biodiversité, la sûreté hydraulique et la protection contre les crues, l'accueil et la sensibilisation des publics et le maintien des usages économiques dont la production d'électricité décarbonée.

Dans ce contexte, **EDF** et la **Métropole de Lyon** se sont engagées dans une démarche partenariale visant à restaurer ou préserver la fonctionnalité des milieux dans une approche intégrée des multiples enjeux.

L'exposé présente quelques actions réalisées et analyse le rôle des savoirs et outils générés par l'OSR dans la définition des actions : utilisation de modèles, alimentation et fourniture de bases de données, investigations de terrain, instrumentation et suivis.



## SESSION 6

---

# L'OSR au quotidien : mesures de terrain, méthodologies et innovations technologiques

**Mots clés :** *prélèvements, XRF, radar géologique, carottages, sondages GPR, hydroacoustique, granulométrie image, RFID actifs, canal hydraulique, centrifugeuse mobile, pièges à particules, analyses, réseau de mesures, recommandations.*

### 1- Dans les coulisses de l'OSR : visites virtuelles de terrain et de labo

**Pilotes :** Céline Berni<sup>1</sup>, Mathieu Cassel<sup>2</sup>, Aymeric Dabrin<sup>1</sup>, Chloé Le Bescond<sup>1</sup>, Jérôme Le Coz<sup>1</sup>, Thierry Winiarski<sup>3</sup>

**Ensemble des participants :** Fanny Arnaud<sup>2</sup>, Myriam Arrhor<sup>1</sup>, Alexis Buffet<sup>1</sup>, Benoît Camenen<sup>1</sup>, Valentin Chardon<sup>2</sup>, Marina Coquery<sup>1</sup>, Aymeric Dabrin<sup>1</sup>, Doriane Delanghe<sup>4</sup>, Lysiane Dherret<sup>1</sup>, Guillaume Dramais<sup>1</sup>, Philippe Dussouillez<sup>4</sup>, Michel Fornier<sup>5</sup>, Josiane Gahou<sup>1</sup>, Stéphanie Gairoard<sup>4</sup>, Julie Gattacecca<sup>4</sup>, Ghislaine Grisot<sup>1</sup>, Albert Herrero<sup>1</sup>, Mickaël Lagouy<sup>1</sup>, Marina Launay<sup>1</sup>, Hugo Lepage<sup>6</sup>, Matthieu Masson<sup>1</sup>, Brice Mourier<sup>3</sup>, Ivane Pairaud<sup>7</sup>, Josselyn Panay<sup>1</sup>, Gaelle Poulhier<sup>1</sup>, Patrick Raimbault<sup>5</sup>, Gwenaëlle Roux<sup>8</sup>, Fabien Thollet<sup>1</sup>, Adrien Vergne<sup>1</sup>, Romaric Verney<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Irstea Lyon Villeurbanne

<sup>2</sup> ENS CNRS UMR 5600

<sup>3</sup> ENTPE CNRS UMR 5023

<sup>4</sup> CEREGE CNRS UMR 7330

<sup>5</sup> MIO - Institut Méditerranéen d'océanologie

<sup>6</sup> IRSN

<sup>7</sup> Ifremer

<sup>8</sup> EGEOS, Lyon



# Outils, méthodologies et innovations technologiques de l'Observatoire des Sédiments du Rhône

## Introduction

Par sa dimension d'observatoire, l'OSR a investi dans le développement et la mise en œuvre de méthodologies expérimentales variées, de terrain et de laboratoire, pour des applications allant de l'observation du substrat alluvial et de la charge de fond au suivi des flux de matières en suspension (MES) et de contaminants associés. Les aperçus qui suivent, en lien avec de courtes séquences vidéo, visent à donner à illustrer ces efforts expérimentaux et méthodologiques qui font le quotidien des partenaires de l'OSR depuis des années, avec les difficultés du terrain et du laboratoire, mais aussi les avancées et les résultats obtenus.

## Traçage sédimentaire avec galets synthétiques équipés de transpondeurs actifs ultra hautes fréquences (a-UHF tags)

Les transpondeurs passifs intégrés (PIT tags) fonctionnant par radiofréquence (basse fréquence, 135 kHz) sont utilisés depuis une dizaine d'années pour suivre le déplacement des galets en rivière et quantifier ainsi le transport sédimentaire. Ces traceurs présentent des limites aujourd'hui bien identifiées. Parmi elles, leur faible distance de détection (< 1 m) implique des efforts importants de recherche sur le terrain pour des taux de retour parfois mitigés (< 47 %). C'est pourquoi une technique de traçage mieux adaptée aux cours d'eau profonds et/ou au transport sédimentaire intense a été développée<sup>1</sup>. Ces nouveaux traceurs sont composés de galets synthétiques dans lesquels sont moulés des transpondeurs actifs ultra haute fréquence (433 MHz) dont les propriétés d'émission et de détection du signal se sont montrées intéressantes. Les travaux menés ont permis (1) de déterminer les distances de détection dans les différents milieux rencontrés en rivière (40 m à l'air libre, 4 m en enfouissement dans la masse sédimentaire à 2,6 m de profondeur, ≈ 2 m en immersion à 2,6 m), (2) de développer un protocole de prospection et de positionnement des traceurs puis (3) d'identifier des indicateurs de la précision de ce positionnement.

Les traceurs sont actuellement déployés sur divers sites d'étude du bassin rhodanien (Rhône et Buëch, entre autres) et notamment sur le canal de Miribel dans le cadre de l'OSR (**Figure 1**). Ce tronçon court-circuité concentre divers enjeux : connexion cours d'eau/nappe phréatique (alimentation du champ captant de Crépieux Charmy), gestion des sédiments en amont de Lyon, transit des graviers au niveau des diffluences du barrage de Jons et de la brèche de Néron. La méthode présente des taux de retour in situ intéressants (> 64%) obtenus avec des courts temps de recherche sur le terrain (< 1 semaine). Cela valide l'intérêt de cette nouvelle approche foisonnante de perspectives.

---

<sup>1</sup> **Référence bibliographique:** Cassel, M., Dépret, T., and Piégay, H. (2017) Assessment of a new solution for tracking pebbles in rivers based on active RFID. *Earth Surf. Process. Landforms*, 42: 1938–1951. *doi:* 10.1002/esp.4152.

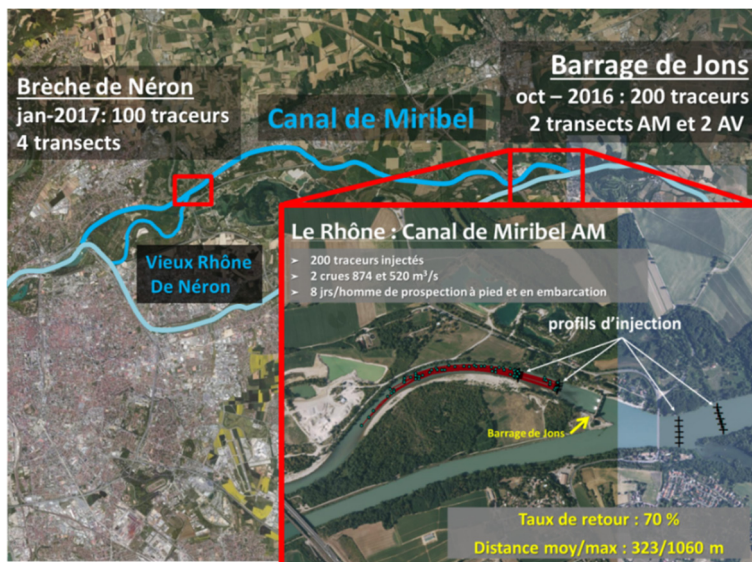


Figure 1. Zone d'étude sur le secteur de Miribel-Jonage.

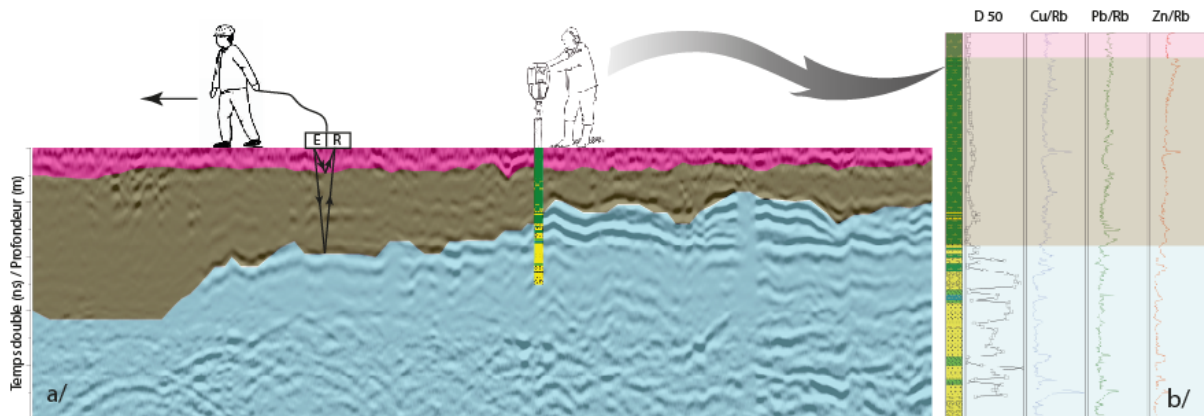
## Couplage géophysique (GPR) et analyse d'archives sédimentaires (carottes)

L'emplacement des carottes collectées sur les marges alluviales a été déterminé par l'analyse des radargrammes issus de la prospection au radar géologique. Cette technique permet d'obtenir une image de la subsurface à haute résolution. Une impulsion électro-magnétique est envoyée dans le sous-sol, via une antenne émettrice, à une fréquence déterminée. Cette impulsion se propage en s'atténuant dans les matériaux et, à chaque interface entre des milieux différents, une partie de son énergie est réfléchiée vers la surface ; les échos successifs sont enregistrés en fonction du temps par l'antenne de réflexion. La juxtaposition des signaux temporels enregistrés lors du déplacement de l'antenne radar permet d'obtenir une coupe-temps, ou radargramme (Figure 2a). Après traitement et interprétation des radargrammes : i/ les grandes structures sédimentaires sont identifiées ; ii/ une localisation des sites de carottage est proposée.

Les carottes de sédiments sont ensuite réalisées à l'aide d'un carottier motorisé à percussion conçu pour minimiser le remaniement des sols prélevés. Au laboratoire, dès l'ouverture des carottes une description des archives sédimentaires permet d'identifier les différents lithofaciès, la répartition granulométrique, les phénomènes physico-chimiques d'oxydo-réduction et la nature des dépôts (présence de matière organique, passées sableuses, etc.). Des photos ont été réalisées de manière systématique sur chaque archive. Il est alors possible d'effectuer les opérations suivantes sur l'ensemble de la longueur de la carotte (Figure 2b) :

- Analyses granulométriques afin d'obtenir les distributions des sables, limons et argiles tous les 2 cm à l'aide du granulomètre laser.
- Mesures de 24 éléments chimiques (semi quantitatif) de la surface d'une demi carotte avec un pas de 5 mm par spectrométrie de fluorescence des rayons X, ou XRF (Core scanner).
- Mesures des concentrations en éléments trace métalliques - ETM (quantitatif) de prélèvements avec un pas d'échantillonnage de 2 à 5 cm par spectrométrie d'absorption atomique - SAAF après minéralisation à l'eau régale.
- Mesures des concentrations en PCBi avec un pas d'échantillonnage de 5 cm par spectrométrie de masse haute résolution - HRGC-HRMS, après extraction et purification.
- Estimation des datations par mesures de l'activité de l'isotope naturel  $^{210}\text{Pb}$  et de l'isotope artificiel  $^{137}\text{Cs}$  provenant des essais nucléaires aériens (avant 1964) et de l'accident de Tchernobyl (1986).

Enfin, l'intérêt du couplage entre les analyses réalisées sur les archives sédimentaires et les radargrammes permet d'extrapoler les résultats des carottes sur les profils avec comme hypothèse que les analyses réalisées sont caractéristiques de toute la structure sédimentaire investiguée (**Figure 2**).



**Figure 2.** Illustration de la méthode GPR/Carotte, a/ radargramme traité et interprété avec positionnement de la carotte prélevée ; b/ exemple de résultats obtenus après analyses granulométrique (D 50) et au Core scanner (Cu/Rb, Pb/Rb, Zn/Rb).

### Prélèvement des matières en suspension par piège à particules et centrifugeuse fixe

L'analyse physico-chimique des matières en suspension (MES) requiert des techniques de prélèvement adaptées, notamment pour disposer d'échantillons représentatifs, non biaisés et en quantités suffisantes. L'OSR a principalement recours à deux techniques de prélèvement pour ses observations de routine : les centrifugeuses et les pièges à particules (**Figure 3**). Deux centrifugeuses fixes équipent les stations principales sur le Rhône à Jons (en amont de Lyon) et à Arles, et une centrifugeuse mobile sur remorque est utilisée pour échantillonner sur différents sites, en régime hydrologique normal ou lors d'épisodes de crue ou de chasse de réservoir. Les pièges à particules en inox reproduisant le modèle standard du German Specimen Bank sont déployés sur l'ensemble des stations d'observation des flux de l'OSR. Les deux techniques de prélèvement s'avèrent complémentaires. Les centrifugeuses sont coûteuses en investissement et en déploiement mais elles permettent la collecte ponctuelle d'échantillons de haute qualité, intégrés sur des durées limitées (quelques heures au maximum). Au contraire, les pièges à particules sont peu coûteux et intégratifs dans le temps, ce qui permet d'échantillonner tous les événements en chaque station du réseau.

L'OSR a permis d'établir des procédures et des modes opératoires détaillés, et de procéder à de nombreuses comparaisons de granulométrie et de teneurs en contaminants entre des échantillons issus des deux techniques de prélèvement, sur des périodes comparables<sup>2</sup>. Dans les bonnes conditions de déploiement sur le terrain, bien que les particules les plus fines soient légèrement sous-représentées dans les échantillons issus des pièges à particules, les différences de concentration en mercure et en PCB dans les MES ne sont pas significatives au regard des incertitudes analytiques.

<sup>2</sup> **Référence bibliographique:** M. Masson, H. Angot, C. Le Bescond, M. Launay, A. Dabrin, C. Miège, J. Le Coz, and M. Coquery, Sampling of suspended particulate matter using particle traps in the Rhône River: relevance and representativeness for the monitoring of contaminants, Science of the total environment (soumis).



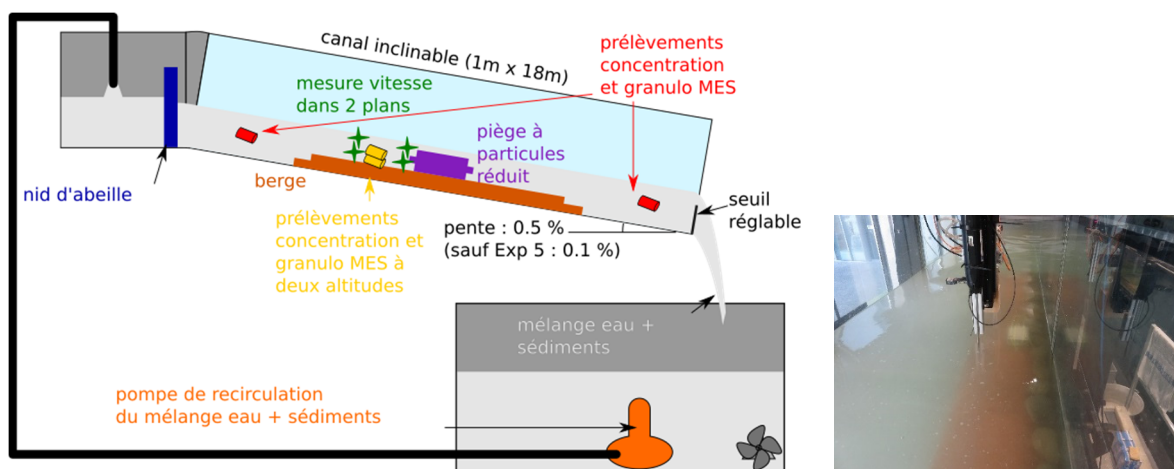
**Figure 3.** Prélèvement des matières en suspension du Rhône à la station de Jons par piège à particules et par centrifugeuse fixe.

### Prélèvements avec un piège à particule : étude en milieu contrôlé

Des expérimentations contrôlées en canal hydraulique de laboratoire ont été conduites pour mieux caractériser le fonctionnement hydrosédimentaire des pièges à particules, et mieux comprendre les phénomènes de ségrégation des particules, en lien avec les conditions de déploiement dans les cours d'eau (**Figure 4**). Ces expériences ont été menées pour différentes conditions de vitesse d'écoulement et de concentration et tailles de particules, à l'aide d'un piège à particule standard puis d'un modèle réduit à l'échelle 1/3.

Les expériences se sont heurtées à différentes difficultés expérimentales (dimensionnement du piège, maintien d'une concentration et granulométrie stable de MES, choix des sédiments, variabilité des concentrations sur la verticale) qui empêchent de donner des conclusions définitives à ce stade. Cependant, les résultats obtenus ont montré que les particules échantillonnées étaient globalement plus grossières que les particules en suspension, d'autant plus que le débit est fort. Cette différence est liée à une efficacité de piégeage plus faible des sédiments fins. Nous n'avons pas observé de récolte de sédiments grossiers significative non représentative des sédiments en suspension. Il semble que la mise en place du piège sur une berge surélevée par rapport au fond permette de s'affranchir de bouffées de sédiments plus grossiers lors d'évènements particuliers.

De nouvelles expérimentations sont prévues dans le prochain programme de l'OSR, en injectant une suspension contrôlée en concentration et en taille dans un piège en grandeur réelle.



**Figure 4.** Expériences dans le canal d'Irstea avec un piège à particule miniature déployé sur une berge.

## Conditionnement et analyses chimiques des matières en suspension

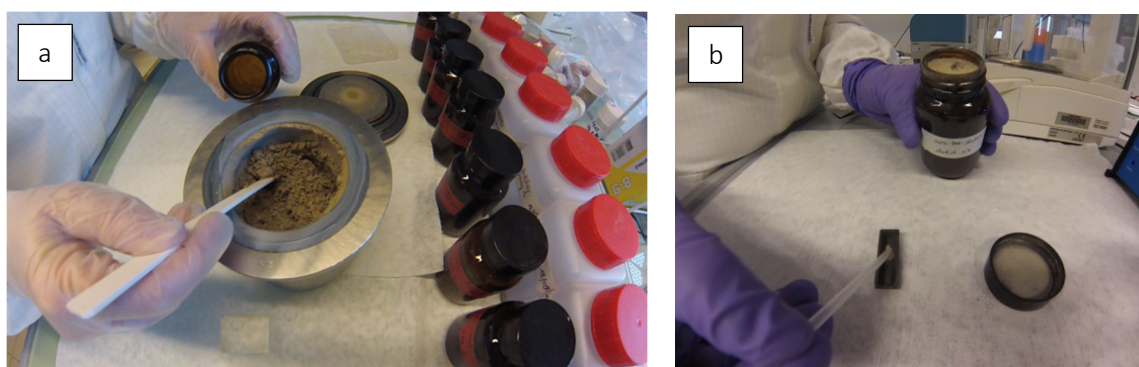
Une fois les matières en suspension prélevées, les échantillons sont mis à décanter puis siphonnés pour enlever l'eau surnageante avant d'être placés au congélateur à  $-18^{\circ}\text{C}$ . Les échantillons sont ensuite lyophilisés, ce qui consiste à extraire sous vide l'eau de l'échantillon, en sublimant l'eau congelée, pour éliminer toute trace d'humidité dans l'échantillon. Les échantillons sont ensuite broyés et homogénéisés au moyen d'un broyeur à billes en agate (**Figure 5a**), puis ils sont conditionnés dans un flacon en verre brun ambré et bancarisés.

L'analyse du carbone organique particulaire s'effectue sur quelques dizaines de milligrammes de MES. Une première étape consiste à enlever le carbone inorganique à l'aide d'acide orthophosphorique (décarbonatation). L'échantillon est ensuite introduit dans un analyseur élémentaire où il est chauffé à  $950^{\circ}\text{C}$  sous un flux d'oxygène. Le carbone est ainsi transformé en  $\text{CO}_2$ , pour être analysé par conductibilité thermique.

Pour l'analyse des polychlorobiphényles (PCB), 1 g sec d'échantillon est pesé dans un petit flacon métallique (cellule d'extraction), puis disposé sur un instrument réalisant une extraction accélérée par solvants (ASE). Cette technique consiste à extraire les contaminants des MES à l'aide de solvants organiques (cyclohexane et acétone) sous haute pression (100 bars) et haute température ( $80^{\circ}\text{C}$ ). A l'issue de cette étape, environ 20 ml de solvant contenant les contaminants extraits sont récupérés, purifiés et concentrés. La concentration est déterminée par chromatographie gazeuse couplée à un détecteur à capture d'électrons (GC-ECD).

Pour l'analyse du mercure, environ 30 mg sec d'échantillon sont pesés dans une petite nacelle qui est disposée sur le passeur automatique de l'analyseur (**Figure 5b**). L'échantillon passe ensuite dans un four dans lequel il subit une étape de combustion ( $850^{\circ}\text{C}$ ) sous flux d'oxygène libérant le mercure sous sa forme réduite volatile ( $\text{Hg}_0$ ). Ces vapeurs de mercure sont préconcentrées sur un piège d'or qui est ensuite chauffé de façon très rapide pour que les vapeurs de mercure soient analysées par spectrométrie d'absorption atomique.

Pour obtenir la concentration des métaux (ou éléments trace métalliques – ETM) autre que le mercure, une centaine de milligrammes de MES sont minéralisés dans des réacteurs en téflon au moyen d'acide nitrique, chlorhydrique et fluorhydrique. Les réacteurs fermés hermétiquement sont ensuite placés dans un four micro-onde pour accélérer le processus d'extraction des métaux de la matrice solide. Le minéralisat est ensuite récupéré et dilué avant son analyse par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS), permettant d'obtenir en quelques secondes une analyse simultanée de la concentration en éléments traces métalliques dans l'échantillon.



**Figure 5.** Récupération des matières en suspension dans un bol en agate après leur broyage (a) ; sous-échantillonnage des MES dans une nacelle en nickel pour le dosage du mercure particulaire (b).

