



HAL
open science

Synthèse des résultats 2010-2013, recommandations opérationnelles et perspectives. OSR2

Hervé Piégay, Olivier Radakovitch, Guillaume Fantino

► To cite this version:

Hervé Piégay, Olivier Radakovitch, Guillaume Fantino. Synthèse des résultats 2010-2013, recommandations opérationnelles et perspectives. OSR2. [Rapport de recherche] CNRS; Irstea; ENTPE; IRSN; IFREMER; MIO. 2013. hal-03750081

HAL Id: hal-03750081

<https://hal.science/hal-03750081>

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.

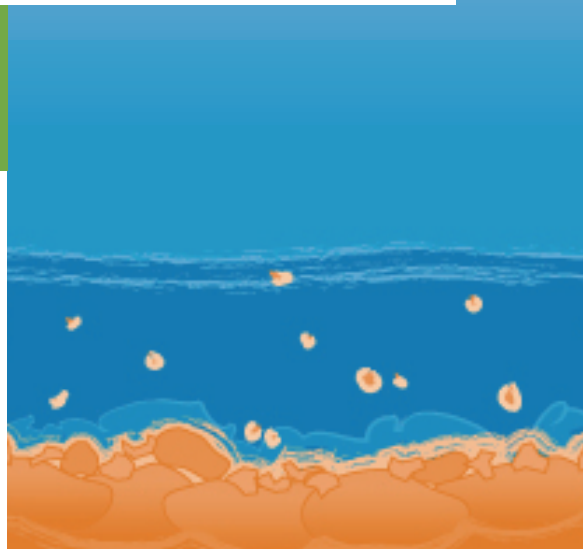
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Synthèse des résultats 2010-2013, recommandation opérationnelles et perspectives



Direction scientifique :
Hervé Piégay
Olivier Radakovitch

Coordination :
Guillaume Fantino



Direction scientifiques :

*H. Piégay
O. Radakovitch*

Coordination technique :

G. Fantino

Responsables d'actions :

*Action 1 : H. Piégay, M. Tal
Action 2 : H. Piégay, M. Tal
Action 3 : F. Sabatier
Action 4 : JP. Bedell, B. Mourier, Y. Perrodin
Action 5 : JP. Bravard
Action 6 : J. Le Coz, F. Eyrolle
Action 7 : M. Coquery, O. Radakovitch
Action 8 : C. Antonelli, J. Le Coz
Action 9 : J. Le Coz, B. Camenen
Action 10 : B. Camenen, JP Faure
Action 11: G. Fantino
Action 12: G. Fantino, H. Piégay, O. Radakovitch*

Contributeurs par équipe :

CNRS

- UMR EVS :

J. Ambert, L. Bultingaire, G. Fantino, P. Gaydou, L. Hammou, L. Mathieu, E. Parrot, C. Perial, H. Piégay, L. Vaudor

- UMR CEREGE :

P. Dussouilliez, B. Hanot, S. Gairoard, C. Linne, D. Sabatier-Delanghe, F. Sabatier, I. Sakho, G. Raccasi, M. Tal

Irstea

- équipe HH :

E. Andries, F. Branger, B. Camenen, G. Dramais, J.-B. Faure, L. Guertault, M. Lagouy, C. Le Bescond, J. Le Coz, M. Launay, L. Roux, F. Thollet, C. Walter

- équipe MALY – LAMA :

H. Angot, M. Coquery, G. Grisot, C. Miège, J. Panay, P. Sabot

ENTPE

J. Bedell, M. Delolme, M. Desmet, M. Hammada, M. Inglot, B. Malher, B. Mourier, Y. Perrodin, F. Rognard, G. Roux, M. Sibide, P. Van Metre

IRSN

C. Antonelli, V. Boullier, F. Eyrolle, F. Giner, M. Zebracki

IFREMER

D. Cossa

MIO

M. Fournier, P. Raimbault

Tables des matières

Préambule.....	5
Pourquoi observer la dynamique sédimentaire du Rhône ?	5
Introduction	7
Présentation générale de l'activité de l'OSR 2010-2013	8
Construction du programme de l'OSR : une co-construction acteurs du fleuve / scientifique	10
I) Etat du fleuve : approche rétrospective et éléments de diagnostic.....	16
1) Géométrie et granulométrie du lit actif	16
1a) Objectifs	16
1b) Résultats	17
1c) Synthèse et recommandations	26
2) Les sédiments fins stockés sur les marges	28
2a) Estimation des volumes stockés	28
2b) Analyse par carottage des stocks sédimentaires et contaminants associés	31
II) Les flux en transit : estimation, caractérisation et modélisation	38
1) Estimation des flux de matières en suspension	38
1a) Création du réseau de mesure et avancées techniques	38
1b) Flux de MES et de contaminants associés 2011-2012	41
1c) Outils géochimiques de caractérisation des particules	43
1d) Recommandations opérationnelles.....	44
2) Effets des évènements (crue, chasse, dragage) sur le transit.....	46
2a) Qualité du matériel en crue :	46
2b) Effets des chasses de 2012	47
2c) Crue de Mai-Juin 2008 :	50
2d) Suivi du dragage du Pontet.....	51
2e) Recommandations opérationnelles.....	52
3) Estimation de la charge de fond	52
3a) Tests méthodologiques de mesures du flux instantané.....	52
3b) Caractérisation et dynamique de la charge de fond à l'embouchure du Grand Rhône	54
3c) Recommandations opérationnelles.....	56
4) Modélisation du transfert sédimentaire	57
4a) Résultats	57
4b) Recommandations opérationnelles.....	58
III) Livrables opérationnels	60
1) Agir pour la restauration du chenal des Vieux Rhône : le schéma directeur de réactivation de la dynamique fluviale des marges du Rhône	60
1a) Objectifs et présentations générales de la méthodologie	60
1b) Principaux résultats	61
1c) Croisement des données et élaboration des cartes de synthèse de la faisabilité ..	62
2) Gérer les stocks sédimentaires pollués : Quelle est leur toxicité ?.....	64
3) Capitaliser la connaissance : site web, catalogue de métadonnées et cartographie dynamique.....	66
3a) Catalogue de métadonnées : MétaOSR.....	67
3b) La base de données géographiques de l'OSR : GéoOSR.....	67
3c) Le site internet de l'OSR.....	69
3d) Droit d'accès et groupe d'utilisateurs.....	69

3e)	Retour d'expérience sur l'utilisation et la maintenance des outils communs de l'OSR 70	
IV)	Conclusions générales	72
V)	Liste des figures	77

Préambule

Pourquoi observer la dynamique sédimentaire du Rhône ?

L'étude globale du Rhône réalisée en 2000 par Sogreah constitue la référence actuelle. Celle-ci souligne que :

- *Le Rhône donne une image d'un système figé en équilibre qui n'a pas connu d'évolutions significatives liées au transit de graviers depuis ces dernières décennies,*
- *Les apports solides des affluents ont été réduits par 5 suite aux extractions et aux aménagements hydroélectriques sur les affluents,*
- *Le transit des graviers dans les retenues est fortement limité par une pente motrice réduite,*
- *Les débits dans les Vx Rhône ne permettent plus aussi fréquemment le transport par charriage des matériaux arrivant encore de l'amont,*
- *Les anciennes fosses d'extraction sont de véritables pièges à graviers qui interrompent durablement le transit résiduel sur le Rhône.*
- *Avec cette dynamique fluviale actuelle presque à l'arrêt, le Rhône présente aujourd'hui un profil en long qui n'a que peu évolué depuis 1950 (système en équilibre).*
- *Le transit des matières en suspension reste d'une part globalement significatif et d'autre part peu perturbé par les aménagements CNR.*

Les connaissances acquises sont nombreuses mais restent assez générales et bien souvent parcellaires. Par ailleurs, les données n'étaient pas partagées et au-delà des restitutions graphiques qui sont proposées, il est ainsi difficile de ré-analyser ces données au regard de nouveaux acquis.

Partant du constat qu'il n'est pas possible de comprendre les phénomènes sans les mesurer, les observer et les quantifier, la volonté de créer un observatoire a alors émergé dans le cadre du Plan Rhône. C'est un effort important et sans précédent à l'échelle de ce fleuve.

L'amélioration et l'intégration des connaissances scientifiques permettront à terme de mettre en place des outils pour gérer durablement le fleuve et ses sédiments. Beaucoup

d'éléments sont aujourd'hui manquants pour quantifier la charge sédimentaire sous ses différentes formes, et pour définir les modalités d'action à mettre en œuvre pour remédier aux problèmes résultant de certains aménagements, limiter les pollutions, atténuer les risques et valoriser les écosystèmes rhodaniens.

Les actions de recherche actuelles sont la base des préconisations de gestion de demain. L'OSR a été construit dans cette perspective avec les partenaires du Plan Rhône. Il s'agit donc d'un observatoire de recherche pluri-disciplinaire, dont les travaux relèvent de la recherche, certaines actions ayant une finalité opérationnelle à court terme alors que d'autres permettent de préparer des actions plus lointaines et surtout de faire face de manière anticipée à des problèmes émergents. La démarche scientifique, élaborée en partenariat avec l'ensemble des chercheurs impliqués est basée sur des perspectives de recherche à 5-10 ans.

Introduction

Le Rhône est le quatrième fleuve européen et son bassin versant correspond au quart du territoire français (69 500 km²). De sa source dans les Alpes suisses à la mer Méditerranée, ce fleuve se déploie sur 765 km, dont près de 550 km sur le territoire français où son module passe de 250 m³/s (à Genève) à près de 1 700 m³/s (à l'embouchure). La vallée du Rhône a toujours été une voie de communication majeure à l'échelle européenne, mais le fleuve lui-même est une infrastructure de transport. Afin d'optimiser la navigation, mais également dans la perspective d'exploiter la puissance de ses flots, le Rhône a été aménagé très tôt, dès la première moitié du XIXe siècle. En 1933, est créée la Compagnie Nationale du Rhône qui a pour mission de développer l'hydro-électricité, d'assurer la navigabilité du fleuve et l'utilisation de ses eaux pour l'irrigation. Aujourd'hui, le Rhône français compte 20 centrales hydro-électriques et 19 écluses permettant une navigation fluviale au gabarit européen sur près de 300 km. L'aménagement du fleuve et du réseau hydrographique secondaire, les modifications de l'occupation du sol du bassin versant, les évolutions climatiques, les extractions de granulats ont profondément modifié la dynamique sédimentaire du fleuve. Face aux enjeux actuels, que sont notamment les inondations, le recul du trait de côte, la pollution des sédiments dans le chenal et sur les marges alluviales et les apports de contaminants à la mer Méditerranée, il est devenu urgent de mieux comprendre comment fonctionne ce système d'un point de vue sédimentaire, quels sont les flux qui transitent, comment évoluent les stocks, comment flux et stocks interagissent.

L'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR) est une plate-forme de recherche pluri-partenaire. Il s'est constitué comme un véritable laboratoire de sciences intégrées dont la vocation est de produire sur le long terme des connaissances scientifiques interdisciplinaires permettant de mieux comprendre la dynamique d'un tel système et d'éclairer les opérateurs publics.

L'OSR a été monté grâce à la collaboration de deux Zones Ateliers du CNRS : la Zone Atelier du Bassin du Rhône (ZABR) et la Zone Atelier de l'Observatoire Régional Méditerranéen sur l'Environnement (ORME) et s'inscrit dans une co-construction scientifiques – acteurs de l'eau. Les principaux gestionnaires du fleuve, les services d'Etat et l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, la Compagnie Nationale du Rhône et Electricité de France, ainsi que les régions riveraines du fleuve : Rhône Alpes, Provence Alpes Côte d'Azur et Languedoc Roussillon, sont associés à l'OSR. Côté scientifique, plusieurs équipes du CNRS localisées sur les sites de Lyon et d'Aix-Marseille (Unité Mixte de Recherche Environnement-Ville-Société ; Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géoscience de l'Environnement) collaborent étroitement avec Irstea¹ Lyon-Villeurbanne, l'Ecole Nationale des Travaux Publics d'Etat, l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, L'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer et Mediterranean Institute of Oceanography.

¹

Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture

Présentation générale de l'activité de l'OSR 2010-2013

Faisant suite aux questionnements collectifs qui ont émergé dans le cadre du Plan Rhône autour de la production de connaissances pour aider à la prise de décision, l'OSR produit et collecte des données quantitatives permettant de caractériser les flux de matière, les stocks sédimentaires et les pollutions associées. Les flux de matière se composent des limons et argiles transportés en suspension dans l'eau (matières en suspension ou MES) et des sables en suspension hétérogène, des graviers et galets charriés sur le fond du lit (charge de fond). Les stocks sédimentaires correspondent aux dépôts de sédiments qui ont été enregistrés tout au long du linéaire rhodanien à la suite de la construction des aménagements contemporains qui sont à l'origine de la rétraction du lit et de l'augmentation des capacités de piégeage (19^e et 20^e siècles).

L'objet d'étude de l'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 : chenal principal (le Rhône canalisé et les Vieux Rhône²), les îlônes (bras secondaires connectés ou non au chenal), les exutoires des principaux affluents, les retenues hydro-électriques, les canaux d'amenée et de fuite des usines hydro-électriques et les marges alluviales (secteur compris entre le lit mineur actuel et la plaine d'inondation). Tous ces espaces correspondent à différents compartiments d'un même hydrosystème qu'il est nécessaire de comprendre dans son ensemble.

L'OSR s'appuie sur un programme d'actions triennal (2010- 2013) dont l'objectif à long-terme est d'apporter des éléments de connaissance pour répondre aux questions suivantes :

- Comment interagissent les crues et la morphologie du fleuve ?

Il s'agit ici de comprendre les dynamiques hydro-sédimentaires d'un grand fleuve en lien avec son histoire et ses aménagements. En quoi les crues et le régime hydrologique du Rhône en général ont-ils un rôle dans la construction des formes du chenal et des berges ? Comment ces nouvelles formes influencent-elles à leur tour les écoulements ? Est-ce que le transport, l'érosion et le dépôt des sédiments ont des impacts sur l'écoulement des eaux ?

- Quel est le rôle du transport solide dans les évolutions actuelles du delta et de son littoral ?

L'objectif est de mettre en lien et d'analyser les flux de sédiments du Rhône et l'évolution du delta, en particulier celle de l'embouchure fluviale et du trait de côte. Dans cette perspective, il est nécessaire de comprendre le poids respectif des dynamiques fluviales et maritimes dans les processus morfo-dynamiques constatés.

- En quoi les sédiments du fleuve jouent-ils un rôle dans la qualité écologique des milieux alluviaux ?

² Les Vieux Rhône sont les sections court-circuitées par les aménagements hydroélectriques. Ils sont également nommés Rhône Court-Circuités (ou RCC).

Les milieux alluviaux sont le support d'une biodiversité importante. Quel est l'effet de la dynamique sédimentaire sur la formation d'habitats de qualité ? A contrario, quelles sont les évolutions physiques qui pourraient engendrer une dégradation de la capacité d'accueil de ces milieux ?

- Quelle est l'origine des sédiments transportés aujourd'hui et des contaminants organiques hydrophobes et métaux associés ? Quelle est la quantité de sédiments et de polluants transportée annuellement par le Rhône ?

L'investissement métrologique permettant de répondre à ces questions est lourd à mettre en place sur un fleuve tel que le Rhône et nécessite une réflexion initiale. Quelles sont les méthodes et les outils à déployer pour obtenir des données de qualité ? Est-il possible de connaître l'origine des sédiments et des pollutions transportés ?

- Quel rôle jouent des événements particuliers (naturels ou anthropiques) dans la dynamique globale ?

La vie d'un fleuve est déterminée en grande partie par des événements brefs et intenses que sont les crues. Comment est-il possible d'observer ces épisodes particuliers ? Quel est leur rôle dans la dynamique sédimentaire ? Quels sont les événements d'origine humaine (chasses de réservoir, dragages) qui jouent un rôle dans le transport solide et les contaminants associés ? Quels en sont les effets ?

- Comment produire des données nouvelles qui soient de qualité et quels sont les moyens pour les valoriser ?

La compréhension de la dynamique sédimentaire n'est possible que sur un temps long compte tenu de la variabilité temporelle des processus analysés. C'est pourquoi l'OSR est pensé pour s'inscrire dans la durée et le collectif scientifique se doit de gérer les données produites de manière pluri-annuelle, garantissant la qualité des résultats futurs. Quels sont donc les outils à mettre en place et à développer pour produire, collecter, archiver, structurer, mais aussi diffuser et rendre disponibles ces informations, voire modéliser les phénomènes afin de pouvoir établir des scénarios et s'appuyer sur ces éléments pour agir ?

Ces éléments de connaissance sont non seulement transmis aux partenaires du projet en charge de la gestion du fleuve mais une politique de communication plus large est également programmée afin d'informer les acteurs de l'eau, les riverains et les décideurs et alimenter le débat public pour mettre en œuvre une gestion durable du fleuve.

Chacune des grandes questions de recherche identifiées précédemment repose sur l'identification d'enjeux opérationnels. Les chercheurs se sont ainsi posé la question de savoir dans quelles mesures les résultats acquis et les méthodes élaborées dans le cadre de l'OSR peuvent aider les gestionnaires et les acteurs publics.

Construction du programme de l'OSR : une co-construction acteurs du fleuve / scientifique

Pour répondre à ces différents objectifs, l'OSR a mis en place un système d'observation qui est alimenté et valorisé par des séries d'actions programmées tous les trois ans. Le système d'observation est bâti dans une démarche de co-construction avec les partenaires. Il repose sur un schéma d'orientation stratégique (Figure 1) dont l'objectif est d'identifier les connaissances qu'il convient d'acquérir pour répondre aux questions complexes posées par les acteurs du fleuve, certaines de ces connaissances pouvant conduire à répondre à plusieurs questions. Produire ces connaissances est généralement long et les actions ont ainsi été définies dans le temps, regroupées par modules et les données sont bancarisées. Si certaines questions ne peuvent trouver réponse à 5 ans, d'autres en revanche peuvent être résolues plus rapidement. Le schéma est complexe mais a le mérite d'identifier clairement les manques en matière de connaissance et de faire le lien entre ce manque et les enjeux opérationnels associés. Il constitue ainsi un outil de travail pour le collectif scientifique.

Objectifs et enjeux gestionnaires

Vision stratégique OSR sur 5 à 10 ans - Démarches méthodologiques

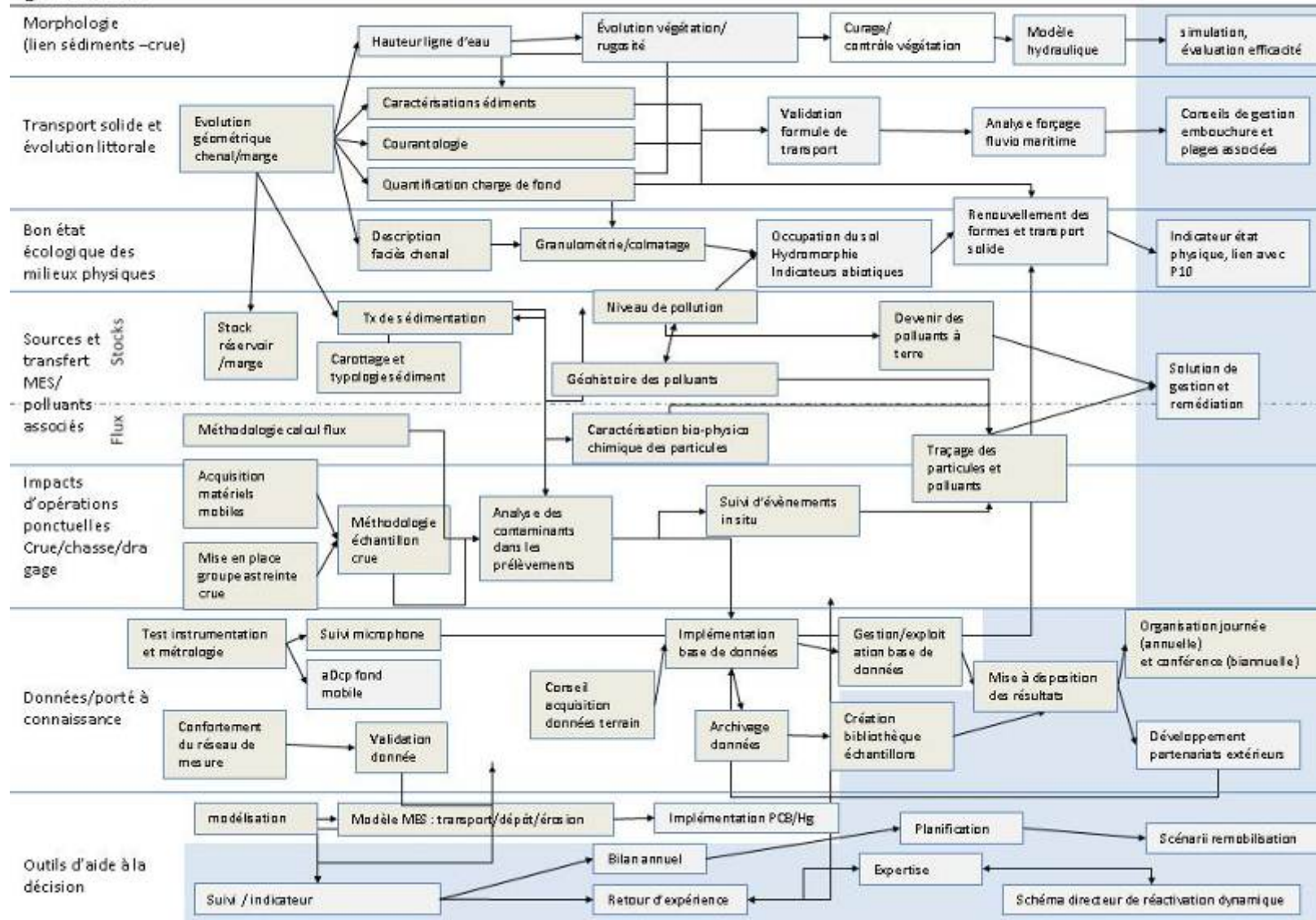


Figure 1 : Schéma d'orientation stratégique de l'OSR (sept. 2010)

Les enjeux opérationnels sont listés en colonne à gauche. Chaque boîte représente une tâche à réaliser pour arriver à un élément (un livrable) permettant de répondre aux questions posées initialement.

Afin de structurer la démarche et d'organiser les différentes tâches en un programme concis, les scientifiques ont défini les questions de recherche actuellement non résolues et qui présentent un intérêt opérationnel dans le cadre rhodanien. D'une manière générale, il s'agit de comprendre la variabilité spatiale et temporelle de la dynamique sédimentaire et de raisonner en terme de budget sédimentaire dans une perspective comparative et multiscalaire (variation amont/aval, inter-comparaison des sections court-circuitées ou des retenues, contribution événementielle, fluctuation saisonnière, évolution interannuelle et à long terme) afin de bien mesurer l'importance respective des facteurs de contrôle et caractériser les tendances évolutives.

Pour atteindre ces objectifs les questions scientifiques les plus importantes sont les suivantes :

- Comprendre l'évolution du chenal afin de mieux faire le lien entre la dynamique sédimentaire et le risque en matière d'inondation et promouvoir de nouvelles logiques de protection des biens et des personnes.
- Identifier, quantifier, caractériser le déficit sédimentaire et ses impacts, notamment au niveau de la zone deltaïque et du littoral méditerranéen.
- Connaître les flux de matière et les contaminants associés au transport de sédiments d'une manière globale, pour saisir la contribution du Rhône à la mer Méditerranée et en détail, pour identifier le rôle des différents affluents sur l'ensemble du corridor fluvial.
- Identifier les liens entre les formes sédimentaires et les habitats écologiques, qu'ils soient aquatiques ou riverains, en vue de les protéger ou de les restaurer.
- Analyser l'impact de certaines pratiques touchant directement les stocks sédimentaires ou les formes fluviales (chasse, dragage, essartement) afin d'améliorer les modes de gestion et minimiser leurs impacts environnementaux.
- Produire, centraliser, structurer et archiver les données portant sur les sédiments du Rhône afin d'optimiser la production des connaissances futures et les diffuser auprès des acteurs de l'eau, des décideurs publics et des citoyens.
- Quantifier le transfert sédimentaire de la charge en suspension et de la charge de fond à différentes échelles temporelles (séculaire, inter-annuelle, événementielle).

- Quantifier les flux de contaminants organiques et minéraux associés aux sédiments.
- Etudier les relations entre les dynamiques fluviales et les processus de morphogénèse deltaïque et littorale, caler les modèles morphodynamiques prédictifs d'évolution du trait de côte.
- Etablir un budget sédimentaire intégrant les discontinuités longitudinales et les entrées, c'est-à-dire toute la complexité géographique du continuum mettant en lumière le rôle des aménagements dans ce processus.
- Caractériser (datation, pollution) les stocks sédimentaires (retenues et marges alluviales) et établir une typologie des remplissages. Comprendre notamment la répartition des polluants hydrophobes stockés et des phénomènes de remobilisation.
- Modéliser les écoulements et évaluer les conséquences hydrologique et hydraulique de l'histoire sédimentaire contemporaine du corridor alluvial rhodanien.
- Analyser les effets du changement climatique sur les dynamiques fluvio-sédimentaires et sur l'interface fleuve-mer.

Ces questions scientifiques ne peuvent être résolues facilement et nécessitent une démarche collective et interdisciplinaire sur plusieurs années, étant entendu que les premières connaissances serviront de base pour produire les suivantes. La réflexion s'inscrit donc dans la durée. Ces questions sont des guides qui permettent de regrouper les tâches définies dans le schéma d'orientation stratégique pour définir des actions de recherche, qui sont au nombre de douze (Figure 2 : Liste des actions scientifiques du triennal OSR2).

Par exemple, la question de la définition du « bon état » écologique des milieux est une question de recherche qui intéresse à la fois les scientifiques (« Quelles sont les paramètres abiotiques déterminant dans la restauration d'écosystèmes de qualité ? ») et les gestionnaires (« Quels sont les espaces présentant une bonne qualité écologique ou quelles sont les zones fortement impactées par l'activité anthropique ? »). L'adéquation entre la connaissance scientifique produite par les équipes de recherche et l'usage de ces résultats par les gestionnaires pour bâtir une politique d'actions passe par la définition d'indicateurs d'évaluation permettant de juger de l'état des milieux physiques. Pour parvenir à la production d'indicateurs physiques, une série de tâches a été identifiée en vue de connaître au préalable les faciès d'écoulement, la nature granulométrique des sédiments et les modalités de mise en mouvement et de transport de la charge de fond. Des avancées significatives ont été faites dans ce cadre au cours du programme, les premières étapes étant maintenant validées.

Le programme d'actions établi sur les 3 premières années de fonctionnement de l'OSR vise à établir un diagnostic global de l'état et mettre en place des outils d'observation,

de bancarisation et de visualisation afin de créer les fondations de l'observatoire. Ce dispositif est pensé pour fonctionner sur le long terme, et quatre types actions ont été listés pour ceci :

- des opérations d'observation à long terme et à l'échelle de tout le continuum fluvial,
- des opérations de suivi et d'expérimentation in situ : à l'inverse des précédentes, ces actions correspondent à des mesures plus ponctuelles spatialement réalisées sur le terrain durant des campagnes définies. Elles correspondent à l'observation locale,
- des actions relatives au développement et à l'approfondissement méthodologique ; ces réflexions sont nécessaires pour l'acquisition de données via la définition de protocoles de mesure, ou pour établir une démarche de recherche à plus long terme,
- un transfert opérationnel et/ou la valorisation des résultats ; cela concerne la mise en place d'outils d'aide à la décision ou de communication des résultats de l'observation à destination des gestionnaires et du public.

Type d'action
Observation à long terme et mesure à large échelle
Mesure et suivi in situ
Approfondissement et développement méthodologique
Transfert opérationnel et valorisation

N° Action	Intitulé
1	Analyse de l'évolution géométrique du corridor de Lyon à la mer
2	Caractérisation du continuum sédimentaire
3	Caractérisation et dynamique de la charge de fond en transit à l'embouchure du Grand Rhône
4	Caractérisation et devenir des stocks sédimentaires pollués
5	Finalisation du schéma directeur de ré-activation de la dynamique fluviale des marges du Rhône
6	Consolidation du réseau de mesure des flux de MES et des contaminants associés
7	Caractérisation bio-physico-chimique et traçage des sédiments et des polluants associés
8	Suivi et retour d'expérience sur des évènements hydrologiques naturels ou anthropiques
9	Suivi de la charge de fond
10	Modélisation
11	Gestion et exploitation de la base de données géographique de l'OSR
12	Valorisation, diffusion des connaissances et des données produites par l'OSR

Figure 2 : Liste des actions scientifiques du triennial OSR2

Une série de « livrables » et de missions permettant d'exploiter les connaissances scientifiques produites par l'OSR à différents termes a été établie. Certains résultats sont d'ores et déjà disponibles alors que d'autres seront valorisables après plusieurs années de

travaux. Ces « livrables » prennent des formes diverses : notes et rapports fournissant des éléments de préconisation, organisation de journées d'échanges, mise à disposition de méthodes de calcul ou d'indicateurs, de modèles prédictifs ou encore de scénarii de gestion. Ils constituent le lien effectif entre recherche et gestion afin de répondre à des besoins d'ordre techniques, administratifs ou sociétaux.

Chacune des actions a fait l'objet de plusieurs livrables et d'une synthèse finale. Des fichiers de données ont également été produits, disponibles sur le site web de l'OSR. Il s'agit de données brutes (mesures analytiques) ou travaillées (cartes) qui pourront être utilisées par la suite.

Les chapitres ci-dessous font une synthèse de l'ensemble de ces données et résultats. Certains sont encore indisponibles, bien que la mise en commun de ces premiers résultats de l'OSR peut commencer. Cette synthèse est structurée autour de 3 grands thèmes :

- 1) Diagnostic de l'état du fleuve (géométrie, granulométrie, archives sédimentaires) ;
- 2) Les flux en transit : estimation, caractérisation et modélisation ;
- 3) Livrables opérationnels

I) Etat du fleuve : approche rétrospective et éléments de diagnostic

1) Géométrie et granulométrie du lit actif

1a) Objectifs

Il s'agit d'établir un diagnostic précis de l'évolution morphologique et granulométrique du lit du Rhône, suite aux différentes pressions anthropiques résultant d'aménagements, de prélèvements de granulats ou d'opérations d'entretien réalisés au cours du dernier siècle sur le corridor fluvial de Genève à la mer. La caractérisation morphologique à large échelle, couplée aux travaux sur la granulométrie, sert de référence pour aborder les questions de transport solide et les risques d'inondation associés, la restauration écologique et l'état des habitats.

L'analyse morphologique repose sur l'exploitation de données extraites des cartes bathymétriques de 1897, 1907-08 à l'aval de Lyon et de données que la CNR a levé après la création de chaque chute (1948 pour Génissiat à 1986 pour Sault-Brénaz). L'analyse de l'évolution verticale du lit à partir des données bathymétriques permet de localiser les secteurs en exhaussement et en incision et de caractériser les formes fluviales (distance entre deux mouilles ou deux seuils, amplitude moyenne des fonds). Les évolutions morphologiques sont analysées comparativement avant et après la construction des ouvrages hydro-électriques. Une analyse de l'effet morphologique des crues de 2002-2003 est également conduite afin de mesurer la sensibilité du lit à de tels événements considérés comme morphogènes.

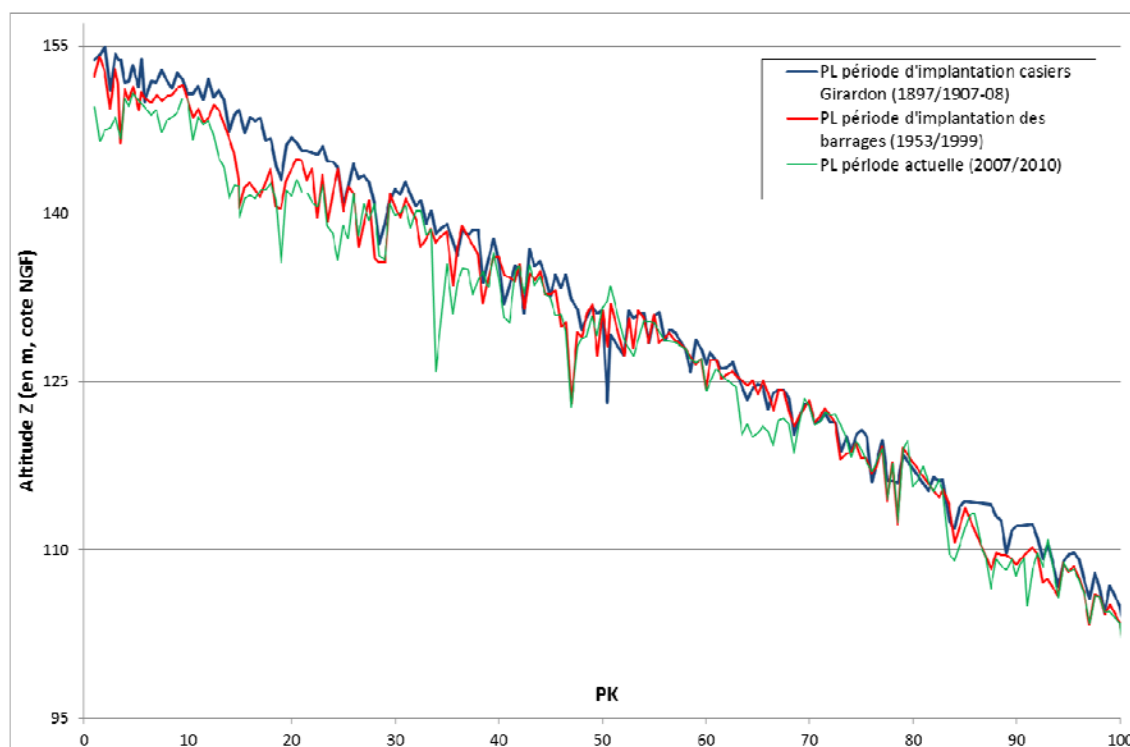
La granulométrie du fond a été établie à partir de mesures pour lesquelles on maîtrise l'échantillonnage (localisation, conditions de prélèvement, volume prélevé, traitement de la donnée). Les prélèvements ont été réalisés en deux temps :

- sur les bancs et dans le chenal adjacent des vieux-Rhône par comptage aléatoire des particules à pied, pour compléter les zones non accessibles en bateau et évaluer le degré de pavage (rapport entre surface et sub-surface).
- dans l'axe du chenal tout au long du linéaire, par une analyse volumétrique de prélèvements effectués à la drague à partir d'un bateau au niveau des points hauts du thalweg (tous les 5 km environ).

1b) Résultats

(a) Evolution verticale du profil en long de Lyon à la mer entre 1897 et 2010

53 cartes (30 datant de 1897 du PK0 au PK181, et 23 de 1907-08 du PK181 au PK323), ont été géo-référencées, permettant l'extraction d'un thalweg antérieur aux aménagements hydro-électriques entre Lyon et la mer. Ce profil en long représente notre état de référence le plus ancien du lit. Des profils en travers distants de 500 m acquis lors de la période post-aménagements hydro-électriques nous ont été fournis par la CNR sous un format numérique. Un état exhaustif de ces ressources a été réalisé permettant d'effectuer ainsi une sélection de profils afin de réaliser une analyse historique multi-dates de l'ensemble du linéaire : pré-aménagements CNR (1897-1907/08), post-aménagements CNR (1953-1981 de Lyon à Arles et 1986-1999 pour la partie aval sans ouvrage), actuel (2006-2010) et pré/post-crués 2001-2003 (Figure 3). Nous ne possédons pas de données correspondant à la période antérieure à la construction des barrages (sauf à l'aval du barrage de Péage de Roussillon et à l'amont de celui de Baix-le Logis Neuf). Nous avons donc utilisé le plus souvent pour caractériser cet état, des profils datant de la période de leur mise en service.



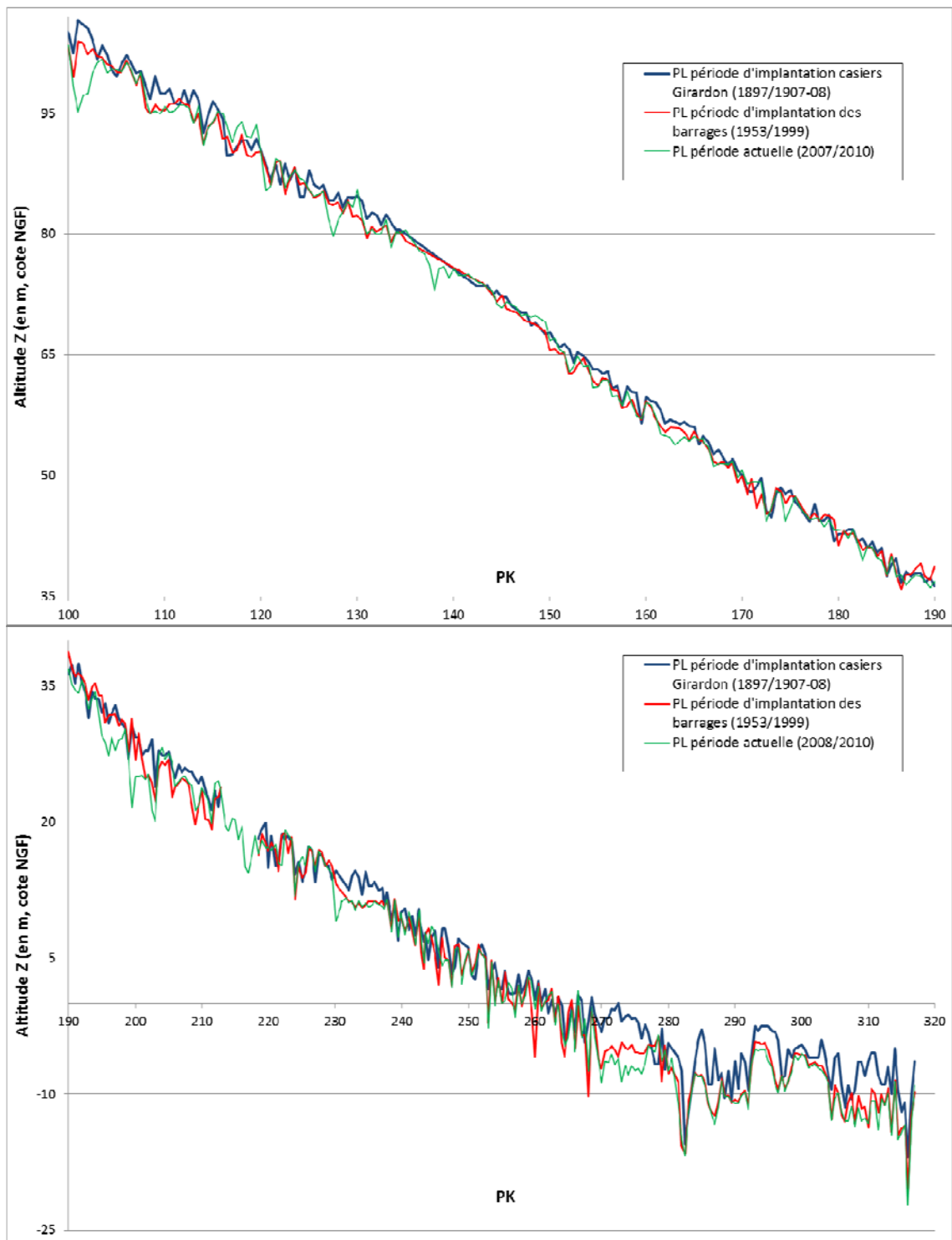


Figure 3 : Profils en long de 1897-1907 (bleu), de 1953-1999 (rouge) et de 2008-2010 (vert) découpés de haut en bas du PK 0 au PK 100, du PK 100 au PK 190 et du PK 190 au PK 320

L'étude des différences altimétriques existant entre les différentes dates de levé sur chacun des profils en travers a permis d'estimer les spécificités de chaque grande période :

- Période 1 : impact des casiers Girardon - différentiel [1953-1999] – [1897-1907/08]
- Période 2 : impact des barrages - différentiel [2006-2010] – [1953-1999]
- Période 3 : impact des crues de 2001-2003 - différentiel [1996-2000] – [2004-2007]

Entre la période d'implantation des casiers Girardon et la période actuelle, le Rhône enregistre une incision moyenne de 1,81 m soit en moyenne 1,72 cm/an. L'incision totale moyenne atteint 1,33 m, soit 1,77 cm/an sur la période 1, avant barrages, correspondant à la période de mise en place des casiers Girardon (40 ans après le début de leur implantation). Cette incision moyenne est de 0,46 m, soit 1,73 cm/an sur la période 2 celle suivant la construction des barrages, et 0,2 m, soit 3 cm/an sur la période 3 consécutivement aux crues de 2001-2003.

C'est ainsi la période précédant la construction des barrages qui enregistre les changements les plus spectaculaires, mais sur un temps plus long, avec un maximum local de près de 10 m, comme le montre la figure 4. La figure 5 permet de localiser les zones caractérisées par de fortes incisions ou exhaussements et de quantifier autant que possible l'impact de chaque phase d'aménagement. Le cumul vers l'aval des variations verticales facilite la visualisation de ces zones : une pente descendante signifie une incision, une pente ascendante signifie un exhaussement, et une pente nulle signifie aucun changement vertical sur le tronçon considéré.

La période 1 est caractérisée par une incision généralisée inscrite dans le temps et résultant sans doute des modifications hydrauliques résultant des ouvrages Girardon. Il convient néanmoins de souligner que certains secteurs n'ont pas réagi entre 1897-1907 et la période de construction des barrages. Il est probable que leur incision ait été contrecarrée par les apports des affluents locaux (Drôme et Ardèche notamment) et que les affleurements de roche en place toujours observables aujourd'hui n'ait pas permis cette incision. Il subsiste une zone d'exhaussement située à l'aval de la confluence de l'Ardèche.

Une tendance à l'incision est également observée après la construction des barrages (période 2) mais de manière beaucoup plus localisées et moins importante (Figure 4 : Cumul des évolutions verticales du fond du lit observées tous les 500 m entre deux dates sur le Rhône de Lyon à la mer pour 3 périodes

). Les différents prélèvements rentrent en jeu durant cette période, pouvant être à l'origine de ces incisions très locales au même titre que certains ajustements liés à la modification des conditions hydrauliques. La 4 décrit un patron longitudinal différent, avec une forte incision entre le PK 1 et le PK 25 (-1,8 m en moyenne), d'autres incisions plus ponctuelles avec la constitution de fosses à l'aval immédiat de certains barrages, couplés à des prélèvements et un stockage sédimentaire au niveau des réservoirs (Vaugris, Saint Vallier, Bourg-lès Valence), et des incisions localisées au PK 65 et entre les PK 190 et 205 (sans doute dû aux dragages de réajustement) et entre le PK 268 et 279 (au niveau de la diffluence, à l'amont du palier d'Arles). Les principales zones en incisions semblent donc être majoritairement dues aux prélèvements. L'évolution du profil en long laisse apparaître durant cette période plus de paliers (zones stables verticalement comme le vieux Rhône de Bourg-lès Valence et de Baix-le Logis Neuf). On observe aussi des exhaussements locaux correspondant aux réservoirs des barrages de Péage de Roussillon, Montélimar, Donzère-Mondragon, Caderousse, et Beaucaire. A l'aval du Beaucaire, malgré les fortes incisions localisées au niveau des prélèvements, on constate un exhaussement qui pourrait correspondre aux apports de graviers du Gard déjà relevé dans l'Etude Globale du Rhône.

Les variations verticales avant et après les crues de 2001 à 2003 (période 3) permettent d'évaluer la sensibilité actuelle du chenal au changement en mettant en lumière ses capacités de réactivité à la suite de crues de grandes ampleurs. Ces variations sont moins

marquées que dans les cas précédents mais se sont produites plus rapidement à l'échelle événementielle (Figure 4). La figure 5 montre des incisions très localisées dans certains réservoirs mettant en lumière les effets de l'augmentation des vitesses en crue (notamment à l'amont des barrages d'Avignon et Beaucaire), au contraire des exhaussements dans d'autres (Vaugris, Saint-Vallier Montélimar). Certains autres exhaussements locaux semblent résulter d'apports sédimentaires grossiers provenant d'affluents comme l'Ardèche ou le Gard.

Ces éléments permettent ainsi de souligner plusieurs phénomènes :

- une incision généralisée est observée après la construction des ouvrages Girardon et un processus de pavage pourrait déjà s'être mis en place sur certains secteurs 40 ans environs après le début de l'implantation des ouvrages.
- l'incision est localement exacerbée suite aux aménagements CNR à l'aval de certains barrages (fosse de dissipation de l'énergie) et surtout dans des zones enregistrant des dragages ou des extractions.
- les barrages semblent avoir un effet relativement modéré sur la géométrie du lit. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'ils ont été réalisés après les ajustements morphologiques et le tarissement des apports des principaux affluents. Le flux sédimentaire (potentiellement piégeable) est faible, les contraintes critiques sont rarement atteintes car le lit a été amené à se paver lors des incisions précédentes et dans les sections court-circuitées, le débit de pointe a été réduit.
- les évolutions morphologiques récentes semblent liées au transfert d'une charge principalement sableuse sur la géométrie pavée. Elle conduit à des accumulations dans les réservoirs qui peuvent alors être remobilisées lors des crues.

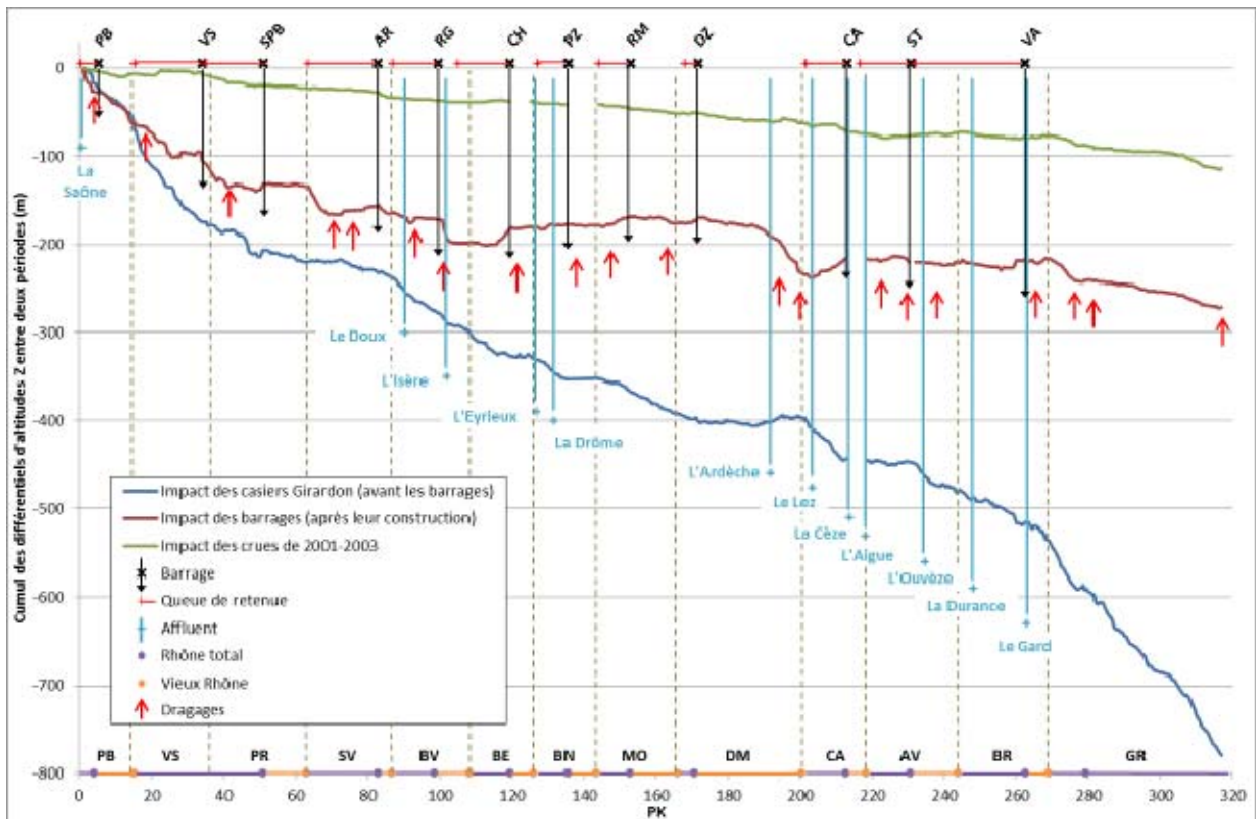


Figure 4 : Cumul des évolutions verticales du fond du lit observées tous les 500 m entre deux dates sur le Rhône de Lyon à la mer pour 3 périodes

En bleu la période correspondant aux aménagements Girardon, avant les barrages [1897/1907-08 - 1953/1999], en rouge la période après la construction des barrages [1953/1999 - 2007/2010], et en vert la période couvrant les effets des crues de 2001-2003 [1996/2000 - 2004/2007]

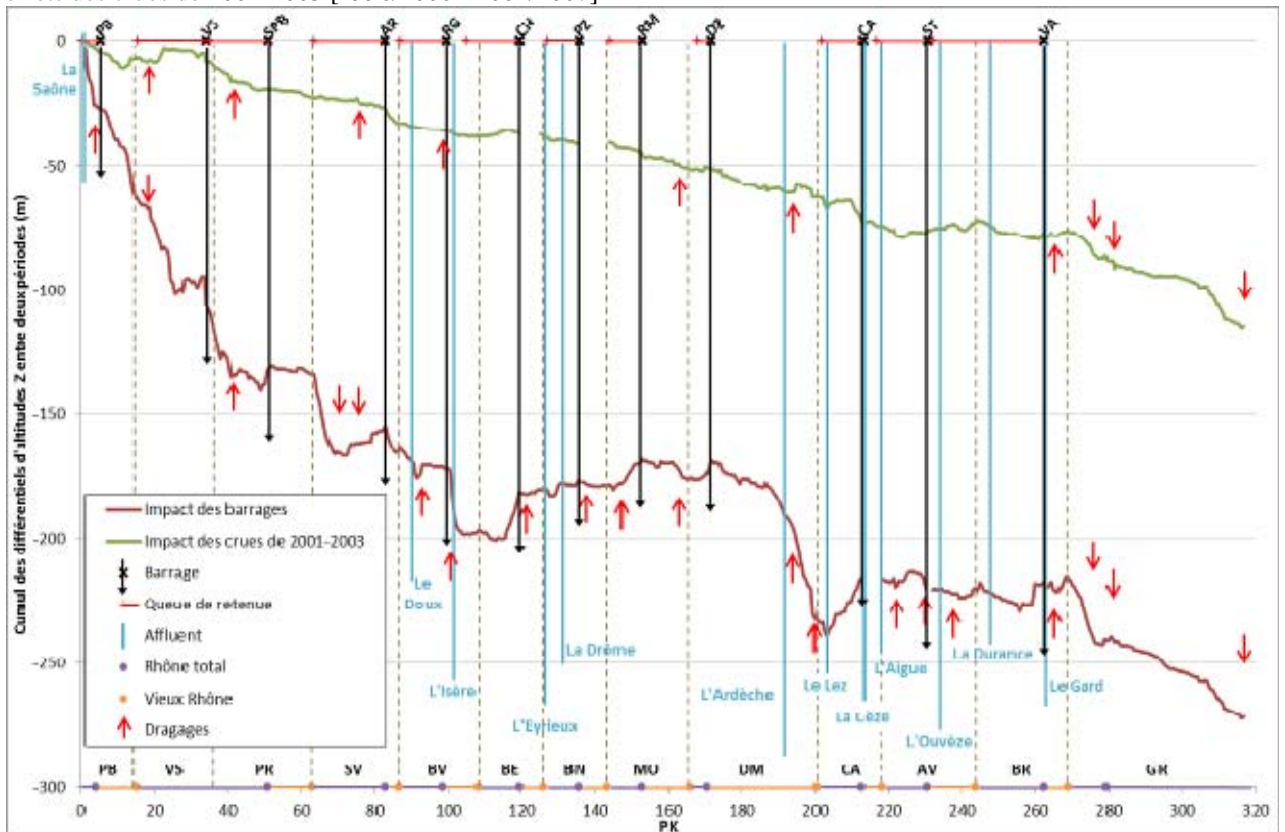


Figure 5 : Zoom sur le cumul des évolutions verticales du fond du lit du Rhône pour les périodes 1 et 2

En rouge la période après la construction des barrages, et en vert la période couvrant les effets des crues de 2001-2003

(b) Evolution des formes du lit

Le profil en long nous permet également d'étudier les faciès du fond du lit, voir comment les alternances notamment entre les seuils et les mouilles s'organisent longitudinalement. Cette organisation est une expression de la mobilité du lit et du transport sédimentaire. Une décomposition du signal correspondant à l'élévation du talweg a été réalisée avec la méthode des ondelettes qui isole des zones du signal présentant des variabilités (écart-type des coefficients d'ondelettes) significativement différentes. Cette zonation est représentée ci-dessous pour les 2 dates (Figure 6). La valeur des coefficients doit être interprétée de manière comparative entre les tronçons par date uniquement.

Les grandes formes fluviales rendent compte d'une morphologie assez typique de grands fleuves de plaine alors que les secteurs aux formes de moindre amplitude rendent compte de secteurs à fort transport solide présentant des bancs de galets en transit ou au contraire de secteurs s'écoulant sur le substratum et où la construction des formes est contrainte. Ces formes ont sans doute aussi été exacerbées par les différents dragages. Le lit actuel semble ainsi avoir perdu les caractéristiques d'un cours d'eau alpin à transport solide marqué. Les apports de la Drôme n'influence plus vraiment la morphologie du fleuve et de grands secteurs fluviaux présentant des formes de grande amplitude sont maintenant présents à l'amont (secteur de Sault-Brénaz-Jons) dans le secteur de Vienne-Péage de Roussillon ou encore à l'aval de l'Ardèche. Seul le secteur à l'aval de l'Ain présente encore des formes de petites tailles en lien avec un transport solide encore actif. La structuration longitudinale observée semble indépendante de la position des barrages, ce qui confirme que ces ajustements résultent d'autres facteurs et étaient sans doute déjà effectués lors de leur construction. Ces éléments synthétiques sont présentés en détail dans le rapport final de cette action.

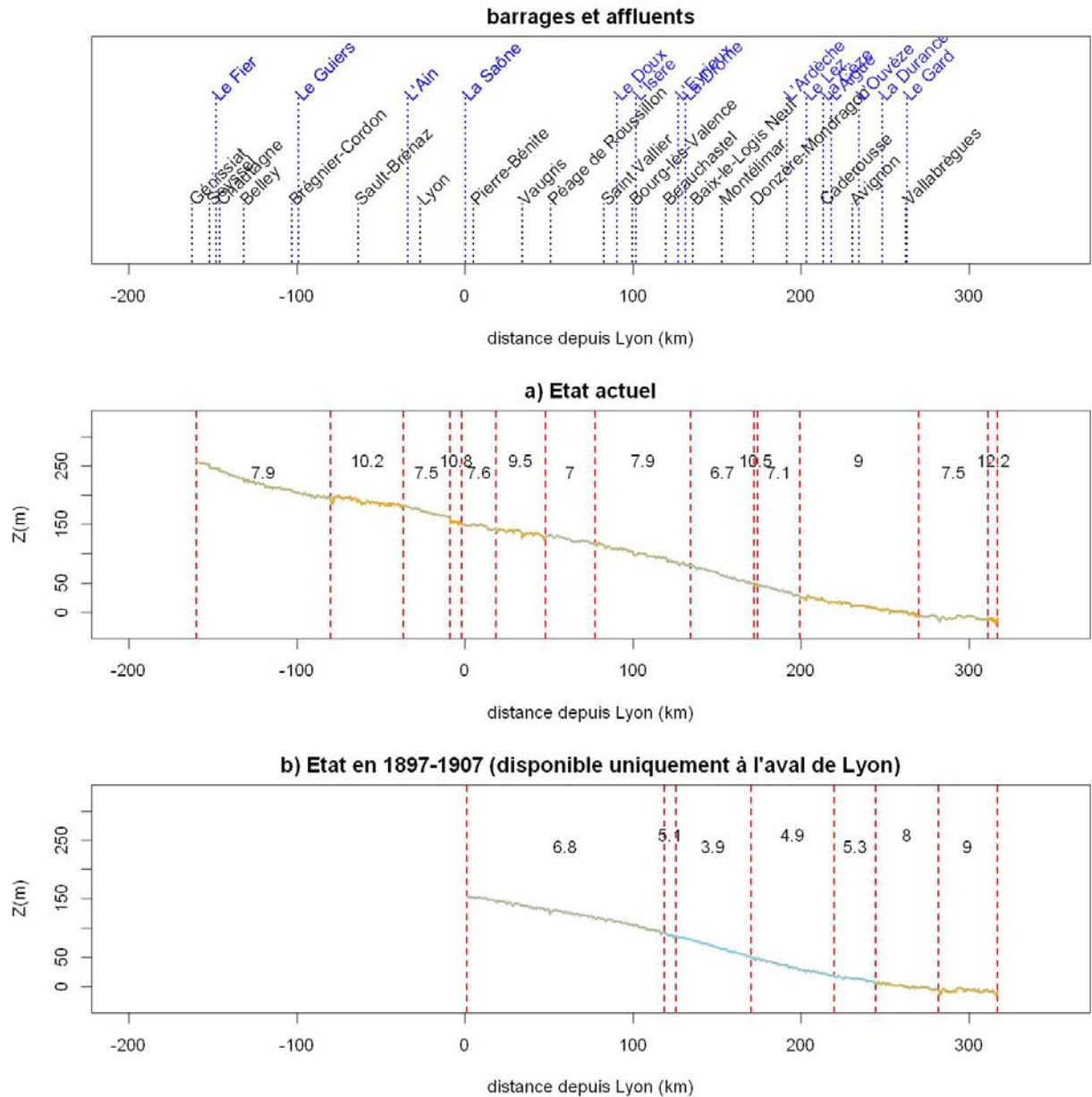


Figure 6 : Organisation longitudinale de la morphologie du fond du lit du Rhône observée à partir de l'analyse de la variabilité de l'altitude à l'échelle locale (tous les 500 m)

L'axe des ordonnées représente l'altitude et l'axe des abscisses la distance amont – aval (le 0 étant à Lyon). Les valeurs indiquées correspondent aux écarts-types moyens des coefficients d'ondelettes sommés pour les échelles 600m et 1200m. a) Etat actuel, b) Etat en 1897-1907 (disponible uniquement à l'aval de Lyon)

(c) Evolution longitudinale de la granulométrie

Nous avons établi un patron granulométrique de l'ensemble du Rhône, dans le chenal principal comprenant le Rhône total et les vieux Rhône (Petit Rhône et canaux exclus).

En ne tenant compte que des relevés effectués sur les têtes de bancs, l'organisation granulométrique longitudinale met en évidence 3 principaux secteurs :

Le Rhône amont : La Figure 7 : Mesure des D50 sur les bancs et dans le chenal au niveau des têtes de bancs au droit du banc

- , confirme le fait qu'il n'existe pas d'affinement granulométrique longitudinal sur le Rhône. Les secteurs amont (entre Chautagne et Miribel) présentent une granulométrie de surface relativement fine comparativement aux secteurs aval, et par hypothèse, potentiellement mobile. Les secteurs principalement à l'amont (Brégnier-Cordon, Chautagne, Belley) présentent des D50 sur les bancs supérieurs aux D50 dans le chenal, mettant peut être en lumière l'existence d'un transit sédimentaire résiduel dans le seul chenal. Le chenal ne semble pas pavé alors que les bancs sont en cours de pavage. On serait ici sur un système en voie de fixation mais encore caractérisé par une charge de fond résiduelle et de petite taille dans le chenal.

Le Rhône médian : Le secteur de Miribel présente aussi des D50 du chenal, supérieurs aux D50 des bancs, mais dans ce cas, l'écart entre les deux est beaucoup moins important qu'à l'aval (Figure 7 : Mesure des D50 sur les bancs et dans le chenal au niveau des têtes de bancs au droit du banc

-). Les indices de pavages dans ce secteur sont faibles dans tous les cas. On est ici dans un contexte où le transport solide pourrait être encore actif avec des bancs dynamiques.

Le Rhône aval : la Figure 7 : Mesure des D50 sur les bancs et dans le chenal au niveau des têtes de bancs au droit du banc

- montre que les secteurs de Pierre-Bénite et de Donzère-Mondragon présentent des granulométries plus grossières et constitueraient donc des secteurs où la charge est plus difficilement mobilisable. En effet, on observe que ces secteurs montrent des D50 dans le chenal, nettement supérieurs aux D50 des bancs, ce qui laisse penser que le lit pourrait être figé. Le pavage est très marqué sur ces deux secteurs, tant sur les bancs que dans le chenal. Les formes fluviales semblent figées depuis très longtemps compte tenu de la faible évolution planimétrique que l'on observe sur les séries photographiques de l'IGN. Il est probable que la fixation de ces formes ait eu lieu avant la construction des barrages. Elle serait donc la conséquence des aménagements Girardon qui affectent de façon irréversible les conditions morphologiques en lien avec un processus d'incision dans un contexte de déficit sédimentaire.

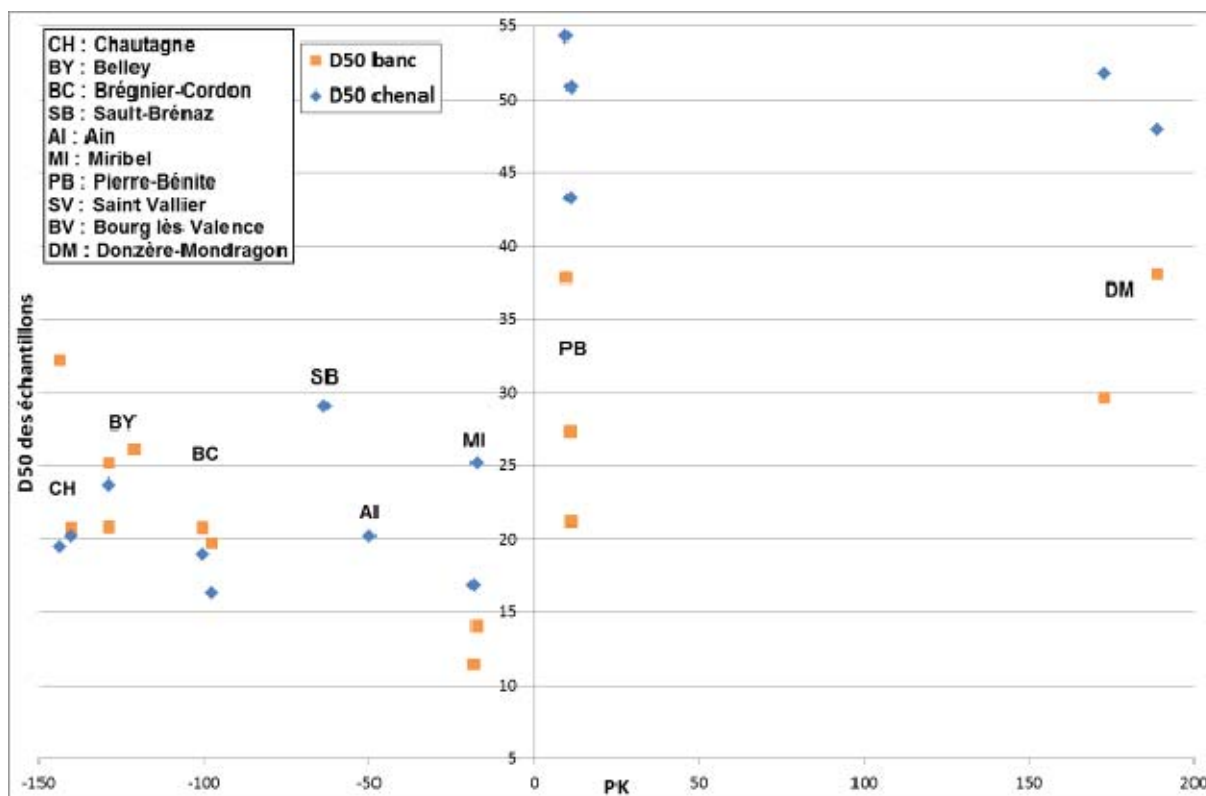


Figure 7 : Mesure des D50 sur les bancs et dans le chenal au niveau des têtes de bancs au droit du banc
Diamètre médian des échantillons effectués par comptage et exprimé en mm – campagne 2012

Nous avons établi pour les campagnes effectuées dans le chenal en eau un plan d'échantillonnage en respectant les éléments suivants : prélever dans le talweg et sur les seuils. Il est en effet nécessaire de toujours échantillonner les mêmes faciès pour étudier les variations longitudinales de la taille des sédiments sur de longs continuums fluviaux. Les points de prélèvements sont inter-distants d'environ 5 km.

La Figure 8 : Répartition longitudinale des valeurs granulométriques médianes des échantillons prélevés dans le chenal du Rhône

fournit une représentation de l'évolution longitudinale des D50 sur le continuum. Les D50 varient entre 0,001 mm et 119 mm. Il n'y a pas de tendances à un affinement granulométrique vers l'aval mais une très grande variabilité granulométrique. Les sédiments les plus grossiers sont observés dans le secteur de Montélimar –Donzère-Mondragon où les pentes sont les plus fortes. Les sédiments les plus fins (argileux, limoneux et sableux) sont observés dans les réservoirs ou le tronçon le plus aval. Le haut-Rhône présente globalement une gamme granulométrique plus homogène que le Rhône à l'aval de Sault-Brenaz. En amont des barrages (sauf à Vaugris), on observe des D50 plus faibles et des D50 plus importants à l'aval de ces barrages.

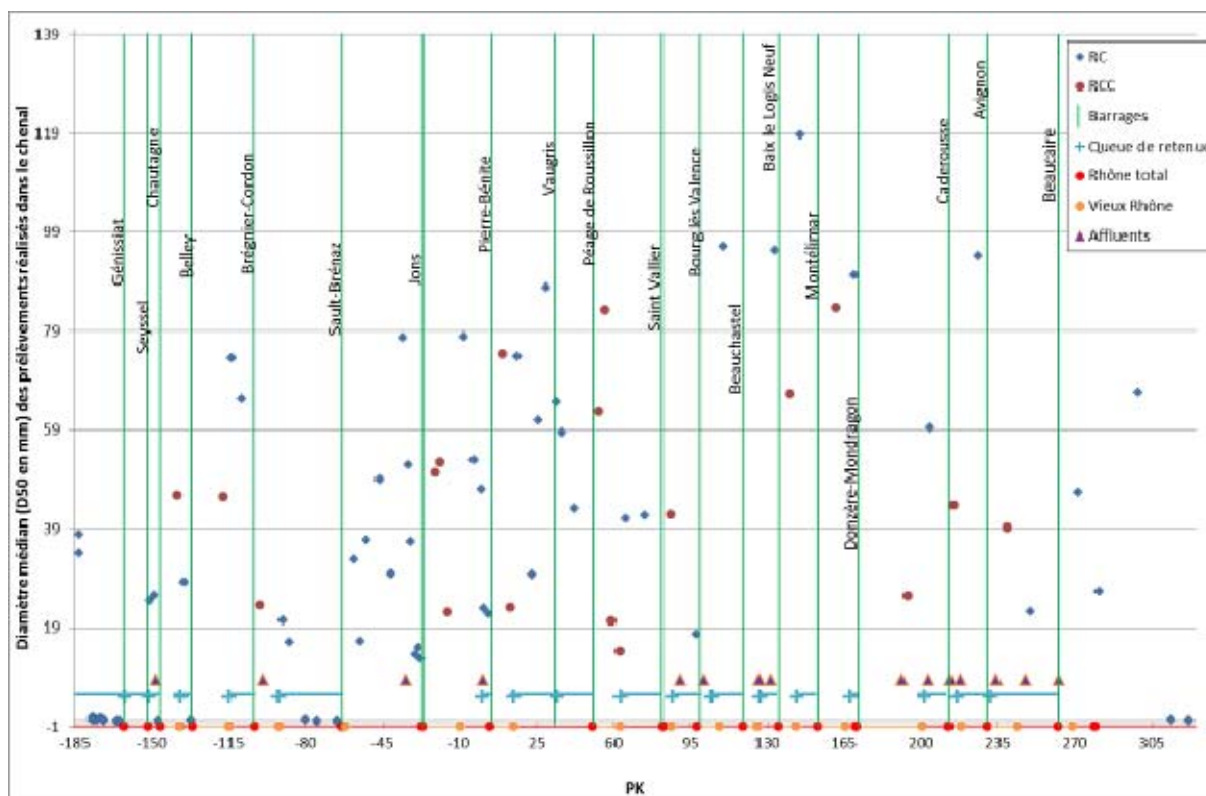


Figure 8 : Répartition longitudinale des valeurs granulométriques médianes des échantillons prélevés dans le chenal du Rhône

3 prélèvements moyennés par point entre le Pk -185 (Génissiat) et Pk +315 (Arles), Le trait bleu correspond à l'étendue de la retenue et la croix, son extrémité amont.

Il n'est pas évident d'observer une recharge par les affluents principaux à partir du seul indicateur granulométrique. La variabilité granulométrique observée est particulièrement complexe et son interprétation ne peut se faire sans tenir compte des conditions hydrauliques locales.

1c) Synthèse et recommandations

De multiples facteurs concourent à expliquer les évolutions verticales du lit et l'organisation du patron granulométrique actuel.

Les incisions s'expliquent d'abord par la construction des ouvrages Girardon qui ont augmenté la capacité de transport du lit sur un très long continuum. Ces incisions ont ensuite été exacerbées par des extractions locales ou des dragages ou encore par des fosses de dissipation à l'aval immédiat de barrages. Ces incisions semblent s'être atténuées du fait du pavage du lit ou de l'affleurement du substratum. La mise en mouvement est sans doute rarement atteinte dans les sections court-circuitées du fait du laminage des crues résultant des dérivations.

Il existe par ailleurs des exhaussements localisés, soit dans les barrages, principalement par des sédiments relativement fins qui soulignent notamment la discontinuité sédimentaire sur le continuum fluvial et l'absence sur l'essentiel du linéaire d'un transport solide grossier, soit sur des tronçons encore alimentés par des affluents. C'est

le cas du tronçon à l'aval immédiat de l'Ain ou encore de celui à l'aval de l'Ardèche et du Gard.

Ces évolutions altimétriques se sont accompagnées d'une transformation de la géométrie des formes du lit. Des formes de plus en plus marquées sont maintenant observées sur un plus long linéaire. Cette modification semble indiquer que la charge de fond en transit qui se caractérise par des formes fluviales de plus faibles amplitudes est moins abondante. Cette identité alpine s'atténue au profit d'un fleuve de plaine, aux formes plus profondes et présentant de moindres vitesses. Cette évolution a sans doute été favorisée par les ouvrages Girardon et les différents prélèvements. L'organisation longitudinale de ces formes ne se calque pas sur la position des barrages.

L'analyse granulométrique complète l'analyse morphologique et montre bien qu'une partie des sédiments observés dans le lit est héritée de conditions d'écoulement passées alors que les matériaux actuellement en transit et temporairement stockés dans les retenues sont de plus faible taille. Il a ainsi été possible de distinguer les zones pavées des zones non pavées, voire en cours de pavage. Il n'existe pas une structure granulométrique longitudinale évidente et on observe une forte variabilité entre les vieux Rhône. Globalement, le Rhône en amont de Lyon ne semble pas pavé, tandis que certains secteurs en aval présentent de forts taux de pavage, notamment à Pierre-Bénite et à Donzère-Mondragon.

L'organisation morpho-sédimentaire du Rhône de Genève à la mer met en lumière :

- des secteurs fortement incisés et aujourd'hui figés sur lesquels des questions de restauration écologique se posent en terme de redynamisation du transit de la charge de fond et d'amélioration des conditions d'habitats afin d'atteindre le bon potentiel écologique.
- les secteurs présentant un transport solide et sur lesquels des problèmes de gestion de ce transport peuvent se poser.

Il permet ainsi de mieux planifier les actions et fournit des éléments graphiques et chiffrés permettant également de bien les justifier et de communiquer avec les acteurs de l'eau et les riverains. La base de données utilisée pour cette synthèse est relativement riche et devrait également permettre d'établir des zooms plus fins pour affiner le diagnostic sur des secteurs plus ciblés.

La connaissance de la granulométrie du lit du Rhône permet de mieux évaluer la sensibilité du chenal au changement, la dynamique existante en termes de transport solide et la qualité de l'habitat aquatique dans le chenal. L'ensemble de ces résultats fournit ainsi une base de diagnostic pour évaluer la pertinence de différentes actions et si nécessaire les planifier :

- des opérations de curage, de dragage ou d'essartement des bancs en lien avec le risque d'inondation (excès ou déficits sédimentaires du lit) et intégrant mieux la dynamique du transport solide et les évolutions morphologiques associées,

- des opérations de restauration fondées sur une recharge sédimentaire ou le démantèlement des casiers en vue de la redynamisation des marges en lien avec les questions de qualité des habitats aquatiques (secteurs mobiles ou fixes),
- des actions de préservation de la continuité sédimentaire dans les sections encore alimentées.

L'analyse de l'évolution morphologique du lit souligne que les aménagements Girardon ont joué un rôle important dans la simplification des formes du lit et leur fixation progressive. Il semble important de s'engager effectivement dans le ré-élargissement du lit, notamment dans les vieux Rhône. Cette action doit s'accompagner d'une réflexion sur l'essartement et sur les conditions de transport solide, sans quoi ces actions auront des effets limités dans le temps. Une réflexion sur la modification de ces casiers permettant des écoulements internes plus fréquents mérite d'être également ouverte car il est peu probable que nous puissions intervenir sur de nombreux casiers et il convient sans doute de combiner différentes stratégies intégrant les coûts associés.

2) Les sédiments fins stockés sur les marges

2a) Estimation des volumes stockés

Une estimation des volumes de sédiment stockés dans les marges alluviales du Rhône a été réalisée dans le cadre de l'élaboration du Schéma Directeur de réactivation de la dynamique fluviale des marges du Rhône. Cette estimation a été conduite par l'analyse de données actuelles (BDT-Rhône, campagne topo/bathymétrique de la CNR) et historiques (Atlas dit « de 1860 ; Plan avant-travaux de la CNR).

(a) Données sources et méthodologie

- Description des données de 1860

Sur l'Atlas des Ponts et Chaussées, dit « de 1860 », figurent des informations topographiques sous la forme d'un profil en travers par PK sauf en amont du PK 101 pour les vieux Rhône de Chautagne et Belley, et en aval du PK 93 pour le vieux Rhône de Brégnier-Cordon. Il semble que les profils en travers aient été tracés sur une autre version de l'Atlas, à ce jour inconnue (plusieurs versions ont été utilisées, chacune apportant ses informations en matière de profils). La précision de la localisation des points de mesure est identique à la précision du géoréférencement des planches de l'Atlas, soit 50 mètres maximum. Pour chaque profil, l'Atlas présente en moyenne 33 points de mesure, soit un point de mesure tous les 80 mètres en moyenne. L'évolution altitudinale de la plaine entre deux points de mesure est donc supposée linéaire (un segment est tracé pour rejoindre les deux points ; parfois un point de mesure correspond à la crête d'une digue et le choix a été fait de rejoindre les deux points de mesure, et non de tracer un nouveau point fictif au pied de la digue). Les coordonnées d'altitude sont référencées dans le système Bourdalouë (1857-1864). La précision altimétrique est inconnue.

- Description des données avant-travaux CNR

La zone couverte par les Plans avant-travaux de la CNR correspond à l'emplacement du canal hydroélectrique. Ainsi lorsque le tracé du canal est proche du vieux Rhône, les plans avant-travaux couvrent les marges du vieux Rhône ; en revanche lorsque le canal est éloigné, le plan ne couvre pas intégralement, ou pas du tout, le vieux Rhône (cas de Belley ou Donzère-Mondragon par exemple). La date du plan dépend de la date de construction du canal hydroélectrique, il est en général tracé avant. L'échelle de ces Plans est soit du 1/5000ème soit du 1/2000ème. Les plans ont été géoréférencés, et vectorisés. Ils fournissent de nombreux points de mesure dans toute la plaine. Dans le cas de notre étude, seuls les points de mesure situés sur le tracé du profil en travers de 1860 nous intéressent, pour permettre une comparaison entre les deux dates. On relève en moyenne 36 points de mesure par profil ce qui représente une mesure tous les 73 mètres en moyenne. On suppose que l'évolution altimétrique est constante entre deux points de mesure. Les données altitudinales figurent en système de référencement Lallemand (orthométrique). On ne connaît pas la précision des levés topographiques, c'est pourquoi une marge d'erreur de plus ou moins 50 cm semble raisonnable. Les plans avant-travaux sont complétés par des profils bathymétriques issus de la base de données CNR dont les coordonnées X, Y sont en localisées en Lambert Zone II. Le système de référencement des coordonnées Z est l'orthométrique (Lallemand 1884 - 1892). Là encore, seuls les points situés à proximité du tracé du profil de 1860 sont conservés. La précision altitudinale des levés est inconnue, elle est probablement de l'ordre du décimètre. On dénombre en moyenne 181 points de mesure par profil bathymétrique. Les points sont espacés en moyenne de 5 mètres.

- Description des données récentes.

En ce qui concerne les vieux Rhône de Péage-de-Roussillon, Montélimar, Caderousse et Avignon, les campagnes topographiques ont été réalisées par N. Valé (2005), D. Nadal (2008), S. Robresco (2009) et N.A. Poyaud (2010). En ce qui concerne les autres vieux Rhône, la topographie a été extraite du levé LIDAR du Rhône réalisé en 2009-2010 (BDT-Rhône). Le LIDAR se présente sous la forme de planches de 1km² (d'une résolution de 2 m). Le LIDAR couvre l'intégralité de la plaine alluviale du Rhône. Il présente une précision planimétrique et altimétrique inférieure à 20 cm. Les points de mesure situés dans des zones immergées ne peuvent pas être pris en compte. Afin de compléter ces lacunes, la CNR a fourni des profils bathymétriques à raison d'un profil par Pk. Nous compléterons les données du LIDAR par des profils bathymétriques issus de la base de données de la CNR et situés à proximité du tracé du profil de 1860. La précision des levés bathymétriques de la CNR à l'intérieur du chenal des vieux Rhône est inconnue, elle est probablement proche de la précision du LIDAR.

- Traitement des données topographiques et bathymétriques

Le traitement des données n'a pas été nécessaire concernant les vieux Rhône de Péage-de-Roussillon, Montélimar, Caderousse et Avignon, qui ont fait l'objet d'études antérieures. Seuls quelques profils ont été tracés pour compléter les données sur les secteurs de Péage-de-Roussillon et Montélimar.

Pour les autres secteurs, les points de mesures pour les périodes 1860 et 1950 ont été vectorisés sous SIG et re-projetés en Lambert 93. Un profil de référence a ensuite été créé pour chaque Pk. Les données vectorisées sont projetées sur ce profil de référence à l'aide des outils de référencement linéaire disponible avec ArcGis. Concernant les données LIDAR, l'extraction des altitudes a été réalisée à partir des profils de référence, eux-mêmes préalablement convertis sous forme de points.

Les conversions altimétriques, à savoir le passage des altitudes Bourdalouë et Lallemand en système IGN 69 (la conversion Bourdalouë - Ortho est basée sur une carte issue d'un article de Jean Maillard cf. annexe 4 et la conversion Ortho - IGN 69 est basée sur un tableau de correspondance source IGN cf annexe 5) sont réalisés sous Excel, logiciel sous lequel sont tracés les profils. Ce sont ces graphiques qui permettent de mesurer la hauteur et la largeur de la sédimentation ayant eu lieu entre 1860 et 1950 et entre 1860 et 2009. On estime à 10 cm la précision de la mesure. Il est possible également de mesurer la largeur sur laquelle s'est effectué ce dépôt. A partir de l'étude historique et de l'évolution de la marge depuis 1860, il est également possible de savoir sur quelle longueur ce dépôt s'est fait. Il ne reste plus qu'à multiplier la hauteur par la largeur et la longueur du dépôt et nous obtenons un volume. On estime à 3% la marge d'erreur liée au calcul du volume déposé dans une unité modifiée par les aménagements Girardon. Par prudence, nous retiendrons une marge d'erreur de 10% du volume stocké à l'échelle des marges alluviales. Il est également essentiel de préciser que le volume annoncé comprend le volume des matériaux constituant les digues. Ainsi, le volume de sédiments potentiellement remobilisable correspond au volume estimé moins le volume des digues. Ce volume, qui n'a pas été calculé, dépend du nombre d'aménagement, de leur type, de leur état, de leurs matériaux de construction, etc...

(b) Principaux résultats

Avec cette méthode, le volume total des sédiments accumulés entre 1860 et 2010 dans les marges alluviales du Rhône est estimé à environ 95 Mm³ +/- 1 Mm³ (Figure 9 : Estimation des dépôts sédimentaires stockés sur les marges du Rhône par secteur

). Le stockage par hectare est très variable et est compris entre 600 et 80 000 m³/ha. Faisant l'hypothèse qu'il s'agit de sable, la masse sédimentaire retenue dans les marges avoisinerait les 140 Mt.

Secteur	Volume sédimentaire stocké depuis 1860 (en m3)	% non mesuré (m3 hypothétique)
Chautagne	---	---
Belley	2 945 178	86%
Brégnier Cordon	12 878 575	0%
Sault-Brenaz	---	---
Ain	---	---
Lyon-Miribel	2 133 743	0%
Pierre-Bénite	4 451 881	4%
Vaugris	---	---
Péage de Roussillon	4 866 490	15%
Saint-Vallier	2 469 538	0%
Bourg-les-Valences	5 035 881	0%
Beauchastel	5 132 041	0%
Baix Le Logis Neuf	5 997 492	0%
Montellimar	9 519 466	0%
Donzère-Mondragon	3 7 001 060	0%
Caderousse	10 16 105	0%
Avignon	3 511 226	0%
Beaucaire/Vallabrègues	2 203 155	0%
Total	99 161 831*	3%

Figure 9 : Estimation des dépôts sédimentaires stockés sur les marges du Rhône par secteur

*ce chiffre inclus les volumes des unités ABC, cf. Rapport de synthèse du Schéma directeur de réactivation de la dynamique fluviale des marges du Rhône.

2b) Analyse par carottage des stocks sédimentaires et contaminants associés

(a) Objectifs

Il s'agit d'établir un diagnostic précis des contaminants associés aux sédiments fins présents dans les annexes fluviales toujours en eau du lit majeur du Rhône. Ce diagnostic repose sur une campagne de carottages, réalisée dans le cadre de différents programmes entre 2008 à 2012, qui reste unique en termes de nombre, de diversité de sites et de méthodologie. Cette caractérisation des stocks sédimentaires pollués à large échelle sert de référence pour l'évaluation des risques liés à la restauration écologique des lônes ou à des opérations de dragage des stocks sédimentaires. La dimension historique de ces travaux fournit également des éléments de compréhension des dynamiques hydro-sédimentaires au sein du lit majeur, des sources de polluants et de l'impact des réglementations quant aux émissions vers le fleuve au cours des dernières décennies.

Une grande variété d'annexes fluviales (chenal secondaire, lône, gravière toujours en eau, réservoir) a été carottée sur l'axe rhodanien, en fonction de différents tronçons hydrologiques (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La méthodologie employée repose sur la description fine des carottes ainsi que sur des analyses multi-paramètres couramment

employé dans l'étude des séquences sédimentaires. L'objectif opérationnel de cette action était de compléter ces travaux (notamment à l'aval de Lyon) et de faire une synthèse et une analyse des données existantes. L'exploitation approfondie des analyses afférentes a permis de caractériser la dynamique de remplissage de ces annexes fluviales et de proposer un modèle de répartition des polluants hydrophobes (PCB) au cours des dernières décennies à l'échelle du Rhône.

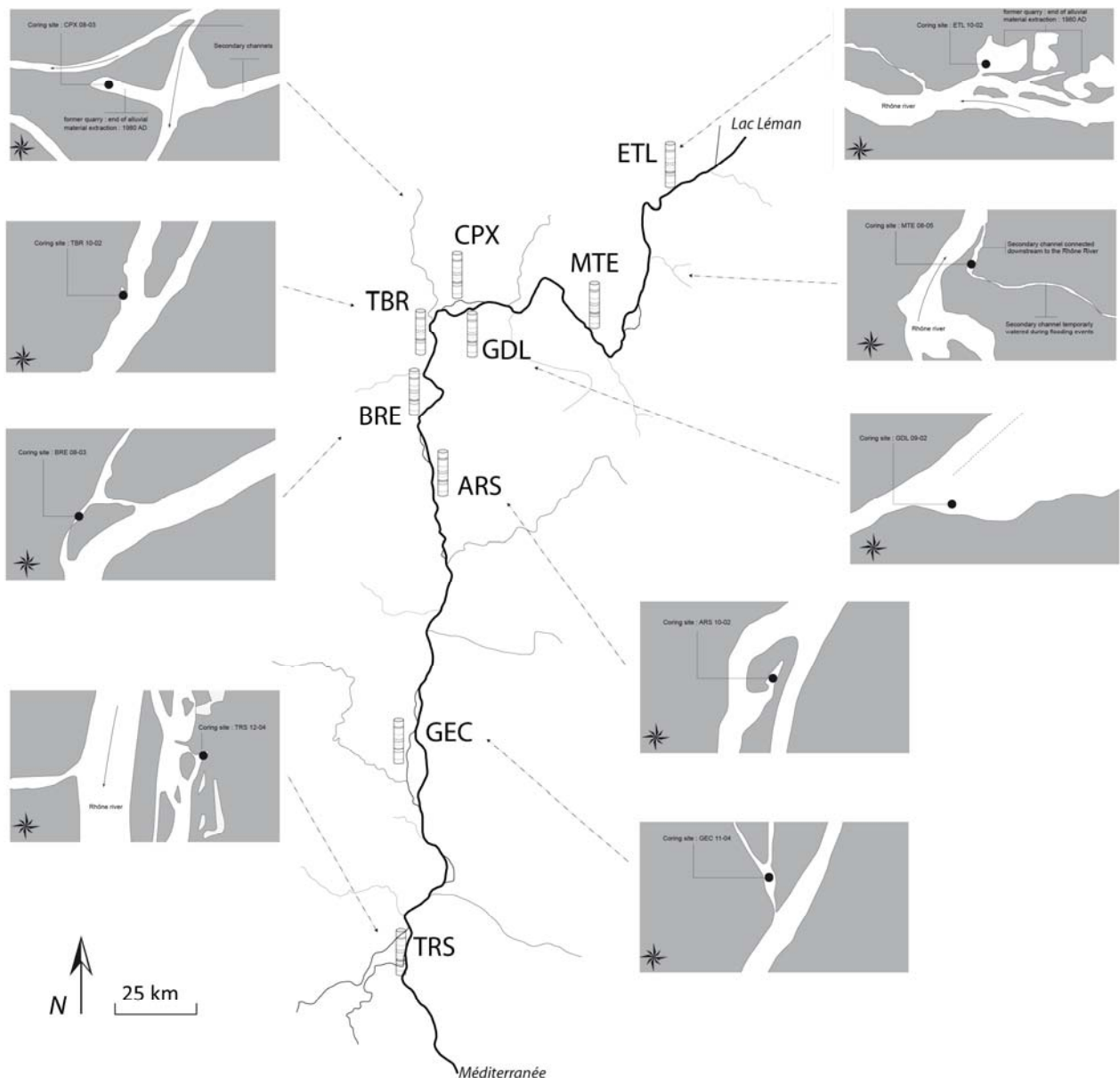


Figure 10 : Localisation des 9 sites de prélèvements à proximité du chenal actif du Rhône. L'emplacement de la carotte au sein de l'annexe fluviale est indiquée (cercle noir)

(b) Résultats

Deux grands types d'annexes fluviales ont pu être distingués grâce à l'analyse sédimentologique à haute résolution verticale des carottes. Cette distinction est fonction des modalités de remplissage des annexes (état de la connexion au chenal actif) et de la datation :

- Les zones de remplissage peu perturbées, à sédimentation lente et continue, qui agissent comme des décanteurs. Dans ces annexes, la connexion avec le chenal actif est faible et souvent située en aval. De faibles apports de particules grossières sont enregistrés lors des épisodes de crue mais le remplissage sédimentaire est quasi continu puisque la mise en eau est permanente. Cette accumulation de sédiments fins peu perturbés permet un enregistrement optimal dans le cas des grands hydrosystèmes, notamment pour l'étude des polluants. En revanche, la faible connexion avec le chenal actif ne permet pas d'étudier l'influence des processus hydro-sédimentaires sur la redistribution des polluants.

- Les zones de remplissage présentant un signal granulométrique fortement contrasté. Dans ces annexes, les archives sédimentaires sont plus délicates à étudier. L'augmentation soudaine du débit liquide et la connexion avec le chenal actif se traduisent par un apport de particules grossières qui gonfle les taux d'accumulation (dépôts instantanés importants), et qui parfois vanne la surface de contact eau-sédiment. La remise en suspension des sédiments et l'adjonction de particules grossières, peuvent fausser ou rendre délicate l'interprétation des profils verticaux. Néanmoins, ces archives sont complémentaires des précédentes. Plus discontinues, elles offrent des éléments pour comprendre l'influence des dynamiques hydro-sédimentaires sur le transport et la remobilisation des polluants.

Pour chaque carotte de sédiment, un modèle âge-profondeur a pu être déterminé à partir des mesures de radioéléments (principalement les pics d'émissions de ^{137}Cs), des niveaux de crues datés, des dates connues de mise en place de certains aménagements ou d'opération de gestion (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

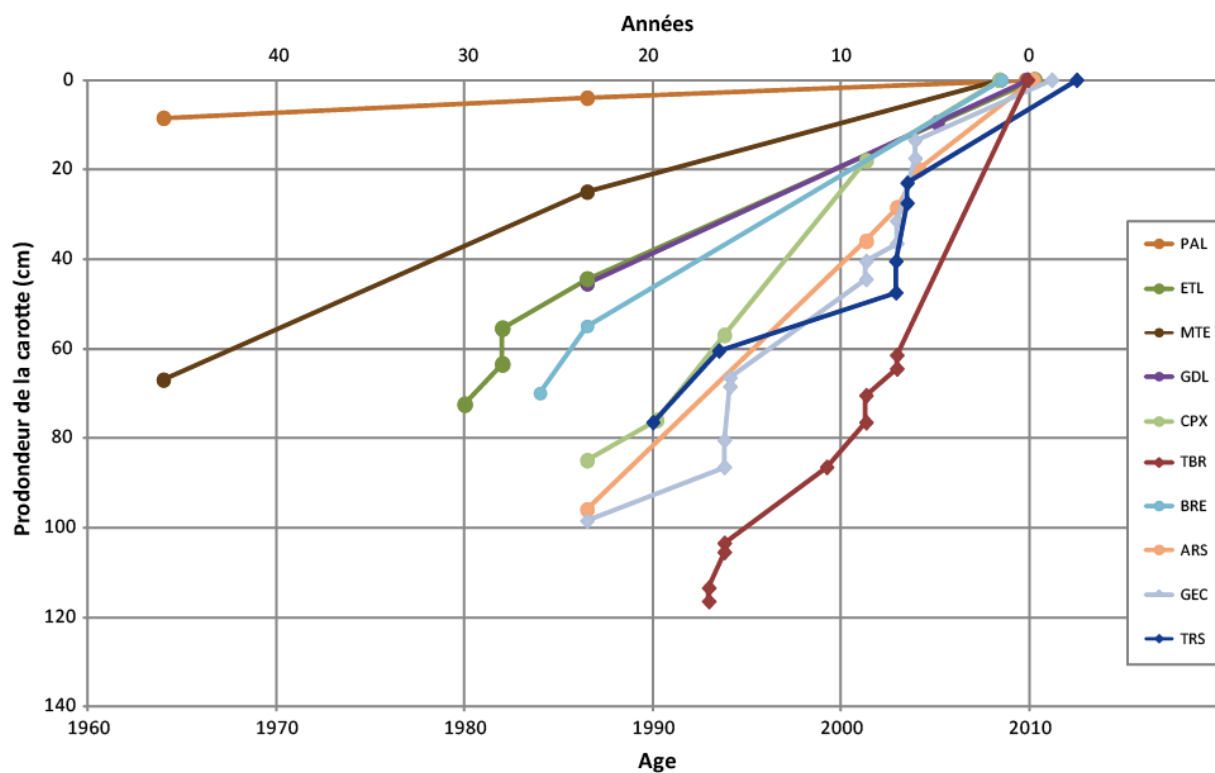


Figure 11 : Modèles d'âge-profondeur des 9 sites étudiés dans cette étude. Plus le pente du modèle est verticale, plus le remplissage sédimentaire est rapide. A titre de comparaison, le modèle du lac de Paladru (PAL) est présenté

Les taux d'accumulation sédimentaire (TAS) des annexes fluviales varient de 1,5 à 6,9 cm/an, avec une moyenne sur l'ensemble des sites de 3,6 cm/an. Les accumulations les plus rapides sont enregistrées à TBR, TRS, ARS, GEC et CPX avec respectivement des TAS de 6,9; 4,3; 4,1; 4,0; et 3,9 cm/an. Ces sites correspondent aux remplissages bien connectés au chenal actif avec de nombreux dépôts instantanés liés aux crues (principalement celles du début des années 2000 et 1990). Les mesures sur MTE, GDL, ETL et BRE ont des TAS plus bas (respectivement 1,5; 1,9; 2,4 et 2,9 cm/an). Ce sont des valeurs qui sont concordantes avec les taux d'accumulation calculés sur des lônes et anciens méandres toujours en eau du Rhône en amont de Lyon (Rostan et al., 1997³).

A titre de comparaison, les valeurs obtenues dans cette étude sont représentées vis-à-vis de la chronologie de l'enregistrement du lac de Paladru (PAL) qui possède un taux d'accumulation sédimentaire moyen de 0,2 cm/an. Cette valeur est typique des lacs d'origine glaciaire (e.g. 0,2 cm/an). Dans une étude récente de notre laboratoire sur un casier Girardon de l'île de la Platière (considéré comme une marge fluviale entre la bande active et la plaine d'inondation), les taux d'accumulation sont plus importants, entre 7,6 et 15,2 cm/an. Au niveau des marges alluviales (burrelet situé entre la bande active et la plaine d'inondation) du Rhône aval, Provansal et al. (2012)⁴ ont calculé des valeurs allant de 13 à 33 cm/an. Ces valeurs sont typiques d'une archive hautement discontinue puisque la déconnexion avec le lit principal est total sauf en cas d'événement exceptionnel, notamment dans un contexte fortement anthropisé.

Sur la base de ces datations et des profils de PCB dans les sédiments du Rhône obtenus de Genève à Montélimar, un modèle de répartition des polluants hydrophobes (PCB) dans le temps et l'espace à l'échelle du Rhône a pu être proposé (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

³ Rostan J.C., Juget J., Brun A.M., 1997, Sedimentation rates measurements in former channels of the upper Rhône river using Chernobyl 137Cs and 134Cs as tracers, *The Science of the Total Environment*, 193, 251-262

⁴ Provansal, M., Ferrand, E., Eyrolle, F., Raccasi, G., Monaco, M., Gurriaran, R. (2012). Spatial variability in sedimentation rates and artificial radionuclide storage in alluvial banks of the lower Rhône River. *Aquatic sciences* 74:735-750. DOI:10.1007/s00027-012-0257-4

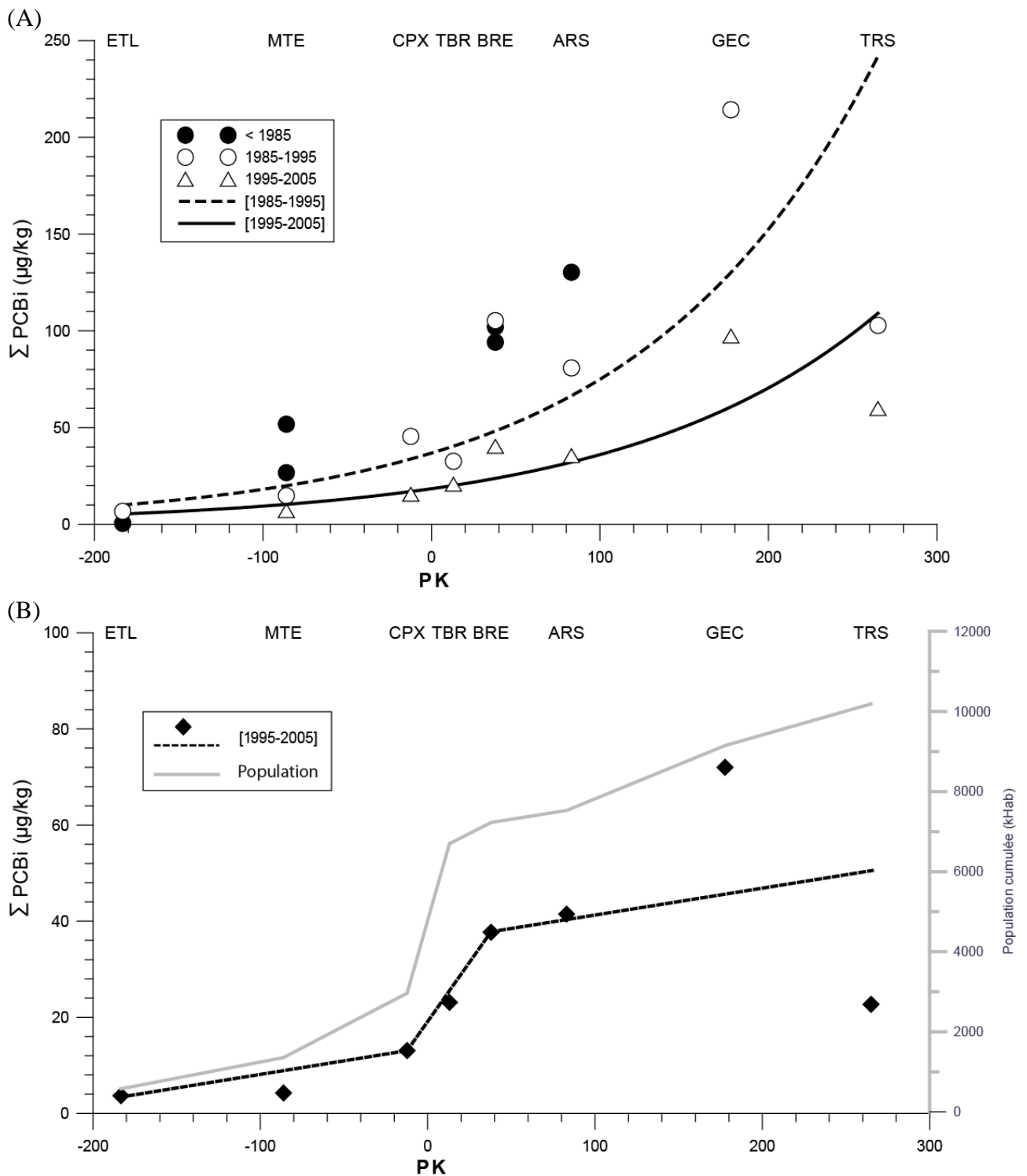


Figure 12 : Modèle global de répartition des PCB à l'échelle du fleuve Rhône pour les années 1990 et 2000 (panel A) et après 2005 (panel B)

Pour chaque fenêtre de temps considérée, la médiane de la somme des 7 PCB_i est calculée à partir des profils verticaux de PCB de chaque site. Chaque point représente une médiane de 4 à 28 mesures en fonction du site.

Les concentrations en PCB_i augmentent vers l'aval pour les fenêtres de temps considérées avec un maxima de 11,5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ au niveau du site le plus en amont et de 417 $\mu\text{g}/\text{kg}$ pour le site GEC situé en aval. L'ajustement d'un modèle exponentiel le long du gradient amont-aval sur les périodes 1986-1995 et 1996-2005 montre que ces tendances ont été plus marquées pour les sédiments les plus anciens (Figure 12A). Les écarts des médianes

par rapport au modèle soulignent l'importance des zones sources (agglomération Lyonnaise et le Giers pour BRE, Isère pour GEC). Le modèle implémenté (type *picewise*) pour les tendances récentes (2005 – actuel, Figure 12B) montre que si les sites en aval de Lyon continuent à accumuler des PCB, les sources ne se situent plus en amont de Lyon (e.g. concentrations très faibles mesurées entre ETL et CPX). La corrélation du modèle sur les données >2005 avec la population cumulée du bassin souligne que les agglomérations sont actuellement les principales sources de PCB. En aval de Lyon, la plupart des sédiments accumulés avant 2005 dépasse le seuil de recommandation V1 de 60 µg/kg. Bien qu'il y ait une grande incertitude associée à ces projections, elles donnent une idée sur le temps nécessaire à la baisse des contaminations PCB (écart des teneurs entre les modèles des fenêtres temporelles). Par exemple à GEC, on peut estimer que depuis 1995, les teneurs en PCB ont diminué de 66%. Ces études fournissent des preuves empiriques de l'impact des réglementations et de l'arrêt des usages sur la qualité des sédiments à l'égard des PCB ainsi que des éléments pour la gestion des sédiments à l'échelle du corridor rhodanien. Les tendances temporelles indiquent qu'il faudrait des décennies avant que les concentrations cibles, correspondantes aux seuils sanitaires pour le poisson (entre 10 et 27 µg/kg en fonction des modèles), soient atteintes sur certains sites. Par ailleurs une étude statistique des assemblages de congénères de PCB sur l'ensemble de ces mesures permet de mieux saisir la signature chimique de cette pollution et offrent des éléments pour évaluer son origine d'un site à l'autre.

(c) Recommandations opérationnelles

Ce travail fournit une typologie des sédiments du Rhône par grands tronçons hydrologiques, en intégrant le mode de remplissage des annexes fluviales. Cette typologie est notamment utile pour la caractérisation, à l'échelle du fleuve, des relations entre les dynamiques sédimentaires et la répartition spatio-temporelle des polluants. Par ailleurs, les taux d'accumulation sédimentaire calculés à partir des 9 carottes fournissent des indications chiffrées de la dynamique de remplissage de ces annexes fluviales.

Pour la caractérisation des stocks, ces résultats permettent une meilleure connaissance de la répartition spatiale des PCBs à l'échelle du fleuve. Si les dragages d'entretien n'affectent en théorie que les sédiments récents et suivent depuis 2008 les recommandations émises par les administrations (DREAL et SNRS), ces données seront utiles aux gestionnaires dans une perspective d'anticipation et de précaution lors de projets de restauration du vieux Rhône (démantèlement de casiers Girardon, restauration de îles). L'identification de l'origine spatiale de cette pollution permet d'intensifier la réduction des rejets de PCB au niveau de ces zones ou bassins contributeurs.

Les éléments acquis permettent une meilleure connaissance de la dynamique d'atténuation naturelle (amont/aval) de ces contaminants suite aux réglementations et permettent aussi d'estimer le temps nécessaire pour atteindre des valeurs sanitaires cibles dans les sites toujours sensibles. La composition des assemblages de congénères en PCB est utile pour caractériser les sources et étudier le devenir des PCB dans les milieux aquatiques. Notamment, pour mieux comprendre le phénomène de bio-médiation des congénères lors du transfert vers le biote (cf partie III 2).

II) Les flux en transit : estimation, caractérisation et modélisation

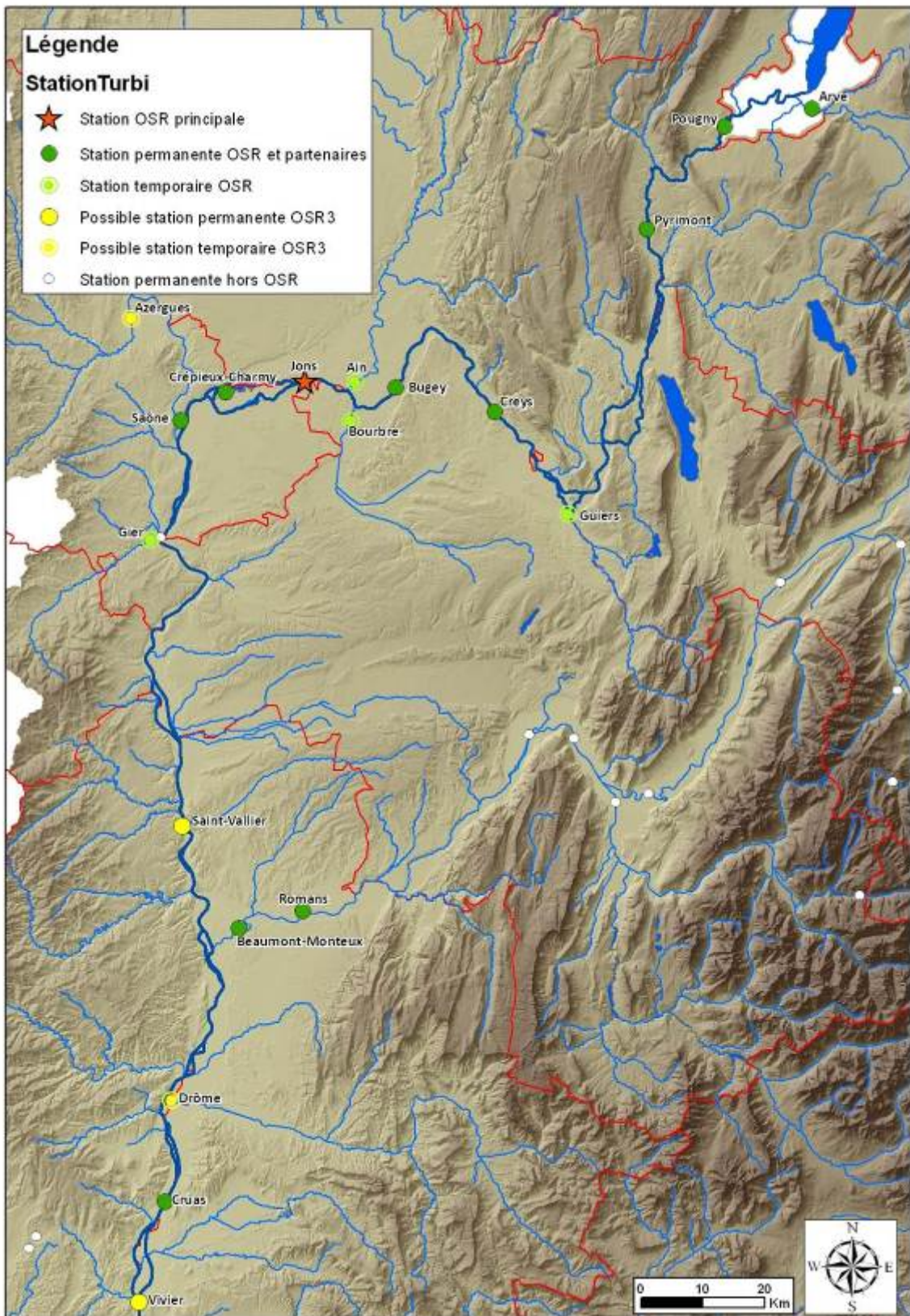
1) *Estimation des flux de matières en suspension*

L'OSR a fourni un effort majeur sur l'amélioration de l'évaluation du transport des matières en suspension (MES), les particules fines porteuses de la majeure partie des contaminants organiques hydrophobes et des métaux. Cet objectif s'est accompli par plusieurs axes :

- la mise en place d'un réseau de mesure des flux de MES à l'échelle de tout le bassin du Rhône ;
- l'évaluation des flux de MES aux deux stations principales de suivi de Lyon (Jons) et Arles (station SORA) avec la meilleure précision possible pour la prise en compte des crues ;
- la collecte des MES en suivi périodique et lors des crues pour l'analyse de contaminants organiques et inorganiques ciblés avec des limites de quantification les plus basses possibles ;
- la réévaluation des apports actuels par les affluents ;
- la définition de marqueurs géochimiques (éléments traces et radionucléides) susceptibles de tracer l'origine de ces MES dans le bassin versant.

1a) Création du réseau de mesure et avancées techniques

Une avancée majeure est la création du réseau de stations permanentes et temporaires de mesure des MES (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Il comprend différents types de stations (turbidimétrie, prélèvements automatiques ou analyse acoustique) qui nécessitent encore d'être harmonisées, mais qui permettent maintenant d'avoir une vision « en continu » du transit dans le Rhône et aux confluences de quelques principaux affluents (Arve, Saône, Isère, Durance). Cette vision est indispensable puisque plusieurs résultats ont montré qu'aucune méthode de calcul ne permettait de corriger les importants biais entraînés par un échantillonnage discontinu de ce fleuve. En l'absence d'une telle fréquence de mesures, il faut au moins prendre en compte la dynamique sédimentaire spécifique de chaque bassin versant considéré (fonte nivale, crues automnales...) pour s'approcher au mieux d'une évaluation correcte.



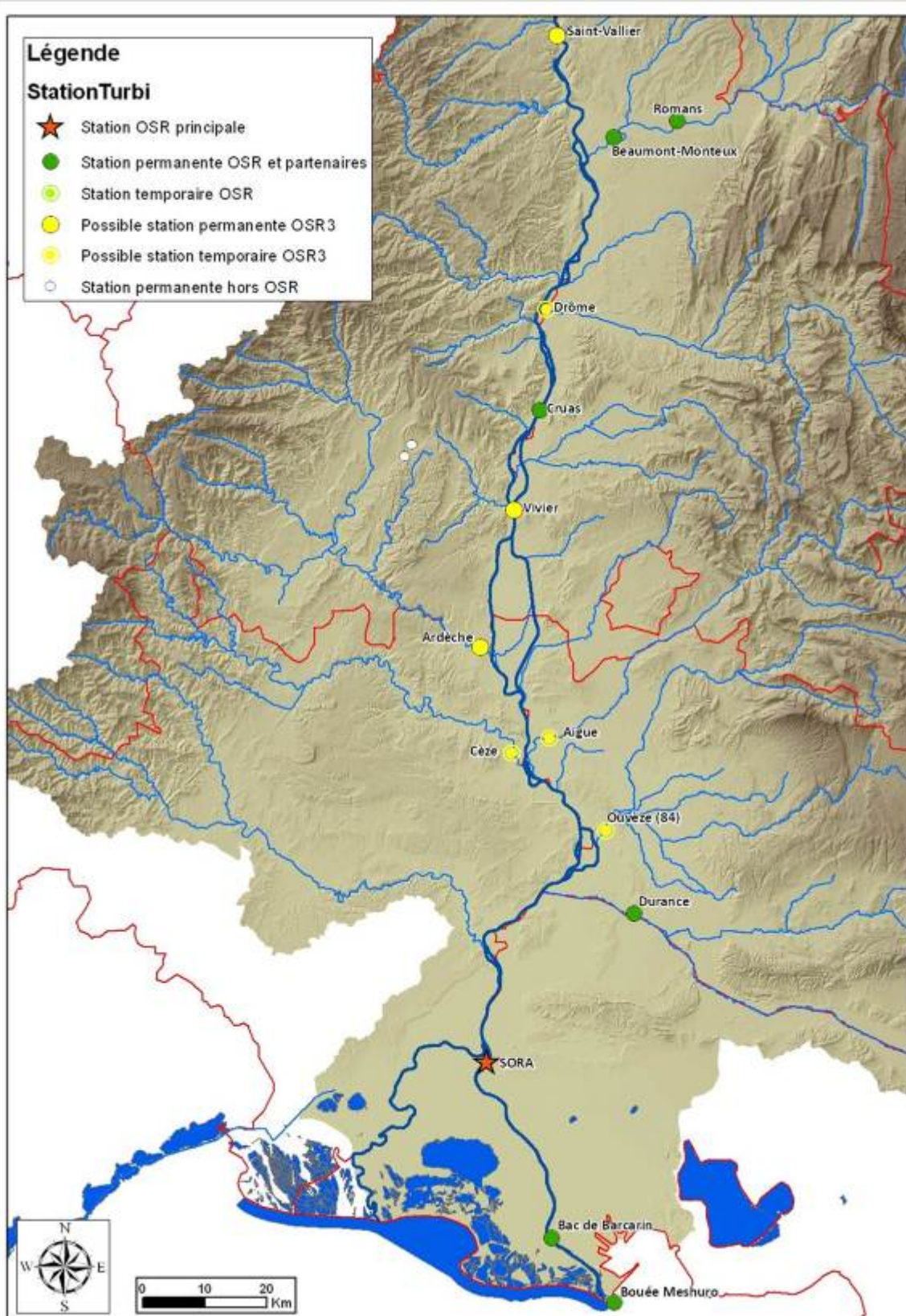


Figure 13 : Cartes de localisation des stations de mesures OSR et partenaires fonctionnelles et prévues

Ce réseau est encore trop récent pour avoir un recul correct sur ses performances, les dernières stations ayant été mises en place en 2012 et 2013. Cependant, nos travaux ont aussi réévalué les apports des affluents en MES au Rhône sur la base de données bibliographiques ou issues d'organismes (Agence de l'Eau RMC, Banque Hydro, EDF) et en appliquant des traitements adaptés pour combler les lacunes de données. Les bilans annuels en eau du lac Léman à Lyon (Haut-Rhône) et de Valence à Arles (Bas-Rhône) calculés sur la décennie 2000-2010 montrent que le bouclage entre amont-aval et apports des affluents quasiment équilibré, les 2 à 6% de manque pouvant être associés à des apports de bassins non jaugés. Le flux d'eau transitant à Valence représente 82 % de celui en Arles, les 18 % restants étant issus des affluents, dont les deux plus gros contributeurs sont la Durance (47% de ces affluents) et l'Ardèche (18%). Pour le Haut Rhône à Lyon, ce bilan indique que 25% de l'eau provient du Léman, 46% de la Saône, 10% de l'Ain et 7% de l'Arve. Les bilans de MES reconstitués ne sont eux par contre pas équilibrés. Ceci s'explique pour partie par les effets de sédimentation, remise en suspension et érosion des berges qui modifient la continuité à cette échelle, mais aussi par la difficulté d'une estimation précise du transit sur la base de données de MES discontinues dans le temps (l'erreur sur le flux est à minima de 20%). A ce jour il reste impossible donc d'évaluer correctement les dépôts dans le fleuve, mais le réseau le permettra rapidement grâce à de meilleures contraintes sur les flux. Un point important à souligner est que les flux en MES, calculés pour la première fois pour les affluents par ces travaux, sont inférieurs d'un facteur 10 à 100 à ceux estimés par SOGREAH (2000) pour le Bas-Rhône, et peuvent différer d'un facteur 2 à 10 pour le Haut-Rhône. Même si les données disponibles, notamment à la station de Grenoble-Campus, permettent des estimations de son flux moyen, les apports au Rhône d'un affluent sédimentaire aussi important que l'Isère nécessiteraient des études plus approfondies.

1b) Flux de MES et de contaminants associés 2011-2012

L'OSR a permis la finalisation de la deuxième station automatisée de prélèvements de MES sur le Rhône, à Jons, celle d'Arles étant déjà fonctionnelle. La période couverte par le suivi OSR à ces deux stations couvre les années 2011 et 2012 (les résultats 2013 étant en cours de traitement). Les flux de polluants métalliques pour 2012 sont encore des valeurs temporaires, les analyses des prélèvements de fin d'année étant encore en cours. Les prélèvements ont été faits notamment à partir de centrifugeuse en continue fixe ou mobile ; ce mode de prélèvement se révèle le meilleur système pour fournir une quantité suffisante de MES pour assurer toutes les analyses, tout en limitant la contamination des échantillons. Le fait de pouvoir mesurer sur un même échantillon l'ensemble des marqueurs géochimiques, des contaminants et d'autres paramètres (granulométrie, carbone organique particulaire) est une avancée forte pour la compréhension de ces flux.

L'année 2011 fut la plus sèche depuis 1925 (date de début de mesure des débits journaliers à Beaucaire) avec 34,6 Milliards m^3 d'eau sur Arles ; 2012 étant par contre au-dessus du débit moyen décennal avec 50,3 Milliards de m^3 . Les flux de MES sont respectivement de 2,6 et 5,4 Millions de tonnes, 90% ayant été produit chaque année en 3 mois avec les crues de novembre, décembre et janvier. Cette tendance s'observe aussi sur des données plus anciennes à Arles, où 70 à 90% du flux de MeS transite en 3 mois (Figure 14).

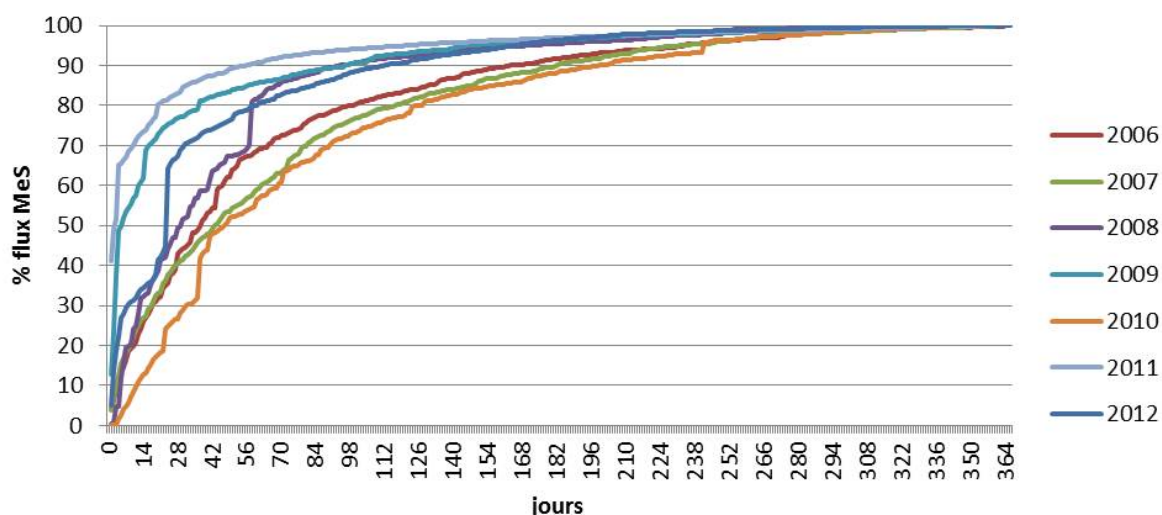


Figure 14 : Courbes cumulées des flux de MeS par ordre croissant entre 2006 et 2012 à Arles

Cette tendance classique, déjà démontrée, se retrouve également sur les flux de contaminants métalliques, dont la variation de concentration reste toujours inférieure à celle des teneurs en MES qui contrôlent donc ce flux de contaminants.

Une toute première comparaison des flux peut être réalisée entre Arles et Jons pour 2011 et 2012 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La différence de flux de MES entre ces deux stations est très grande (facteur 5 à 10) et démontre le rôle des apports des affluents en dessous de la Saône et/ou peut-être de la reprise possible au sein du fleuve, en aval de Lyon. Les différences sont encore plus marquées pour les flux de PCB et mercure, indiquant qu'il existe aussi une augmentation des teneurs en contaminants entre ces deux sites.

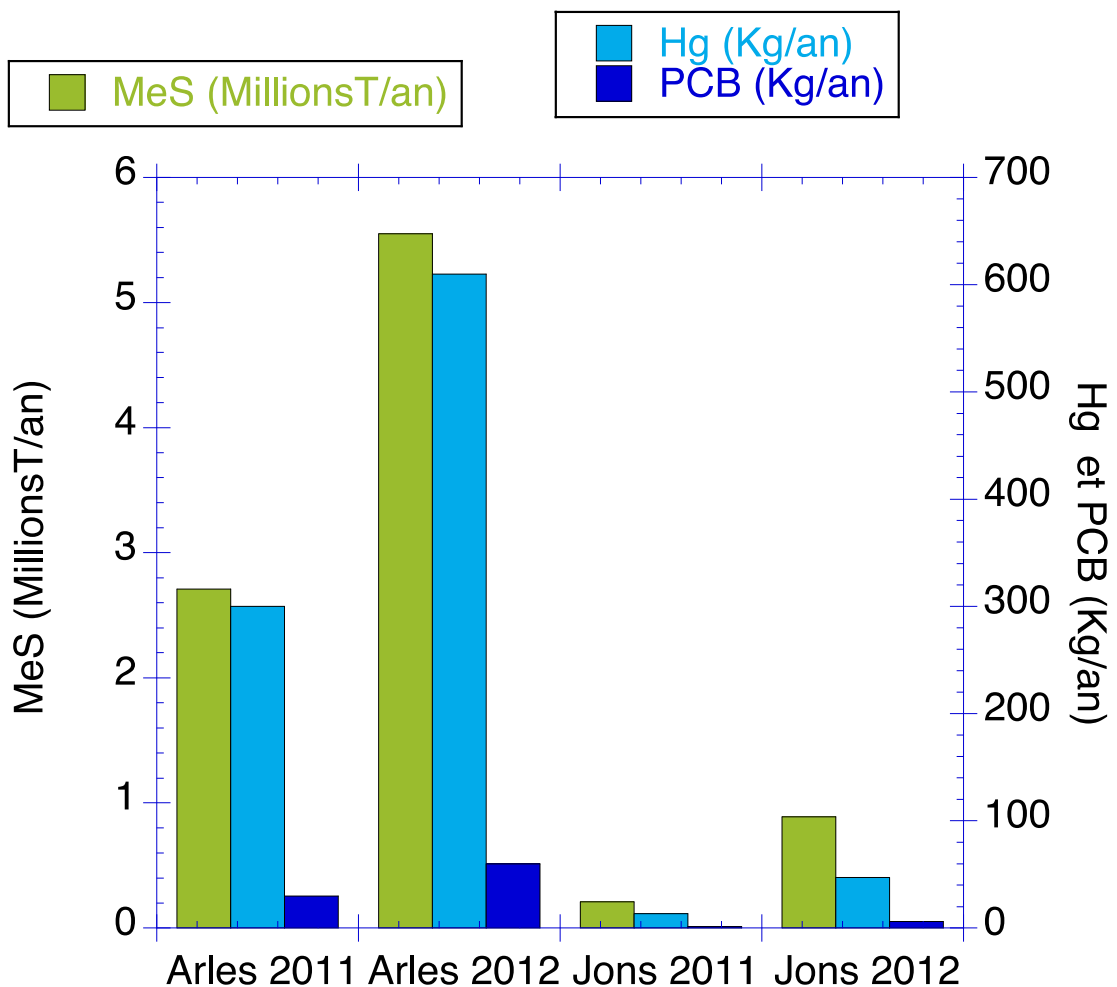


Figure 15 : Flux de MES (millions T), Hg et PCB (Kg) évalués pour 2011 et 2012 aux stations d'Arles et de Jons

1c) Outils géochimiques de caractérisation des particules

Un objectif novateur de l'OSR est le développement de la caractérisation de la nature et de l'origine des MES. Ceci passe par le prélèvement de nombreux échantillons récoltés sur le Rhône mais aussi sur les affluents lors des événements de crue, ainsi que par leurs analyses régulières, incluant la granulométrie, la teneur en carbone organique particulaire et des traceurs géochimiques potentiellement marqueurs de sources : éléments traces ou radionucléides naturels ou artificiels. Certaines de ces analyses ont fait l'objet d'inter-comparaisons entre laboratoires pour s'assurer de l'homogénéité des données, en particulier pour la granulométrie par diffraction laser.

Le mode dominant des MES à Arles se révèle très stable (11-12 μm). Il évolue durant les crues en fonction de l'origine des MES, qui sont plus grossières dans les affluents cévenols (35 μm) que dans les affluents alpins (5 μm pour la Durance), où l'essentiel des particules provient de l'érosion des terrains marneux (

Figure 16 : Spectres granulométriques des MeS à Arles et à Jons (pour chaque site, deux échantillons en débit normal et un en crue)

). Cette relative homogénéité indique qu'effectuer une correction granulométrique sur les données de contaminants à Arles ne changera pas grand chose, ce qui est moins le cas à Jons où la variation des sous-populations est plus importante en fonction de l'hydrologie.

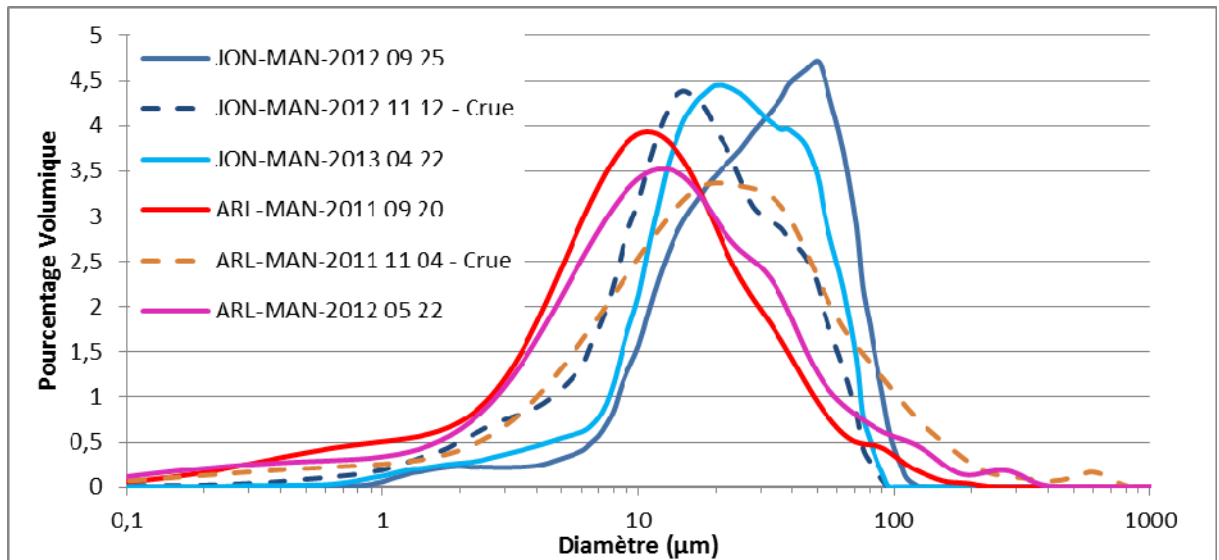


Figure 16 : Spectres granulométriques des MeS à Arles et à Jons (pour chaque site, deux échantillons en débit normal et un en crue)

Quelques éléments se révèlent particulièrement pertinents pour remonter à l'origine de certains affluents. Terres rares, strontium, barium devraient ainsi permettre de dissocier globalement les apports des affluents du Rhône Nord, de l'Ain, de la Saône, des affluents cévenols et des affluents alpins du Sud. Ces marqueurs se retrouvent également dans les laisses de crues, qui peuvent donc à posteriori être utilisées comme échantillon représentatif, à condition toutefois d'appliquer une correction granulométrique ou de travailler sur les fractions fines. Pour les radionucléides naturels, les affluents cévenols montrent des activités plus fortes en lien avec la nature du substratum, tandis que pour les radionucléides issus des dépôts atmosphériques (^{137}Cs et $^{239+240}\text{Pu}$) c'est au contraire les affluents alpins qui ont des activités plus fortes, traduisant des retombées plus fortes sur ces zones. Enfin, les radionucléides qui ne sont rejetés que par les effluents liquides de Marcoule et qui marquent le sédiment à l'aval permettent de mettre en évidence l'effet de la reprise de ces sédiments qui semble se produire pour chaque crue, mais dans des proportions très variables.

1d) Recommandations opérationnelles

La quantification précise des flux particuliers nécessite de disposer d'une chronique hydrologique fiable à un pas de temps suffisamment fin pour capturer la dynamique des événements. Sur le Rhône et ses affluents, le réseau de stations hydrométriques est suffisamment dense et fiable, des propositions de corrections de mesures ayant dans

certaines cas été faites pour quelques stations grâce aux travaux de l'OSR. Le modèle hydraulique du Rhône permet de reconstituer l'hydrogramme au niveau des stations de mesure des flux éloignées de stations hydrométriques (exemple : Jons). Pour le Haut-Rhône, le réseau de stations de mesure des MES apparaît maintenant suffisamment dense, mais certaines stations nécessiteraient une amélioration. Pour le secteur complexe sans affluent majeur entre les confluents Saône et Isère, une stratégie de stations temporaires sur les affluents apparaît pertinente dans un futur proche. Enfin pour le bas-Rhône, ce sont les flux en amont de Cruas et ceux des affluents qui devraient être mieux suivis, avec notamment des stations pérennes en amont du confluent Isère, Ardèche et/ou Gard.

Pour la mesure en continu des concentrations en MES, la technique privilégiée par l'OSR est la mise en place de stations turbidimétriques avec prélèvements automatiques asservis sur seuil de turbidité. Ces stations requièrent des étalonnages spécifiques au site et au capteur pour lesquels l'OSR peut maintenant s'appuyer sur une forte expertise, de même que pour le meilleur choix de l'emplacement. Pour les affluents encore non équipés, une reconstitution des flux de MES peut être maintenant proposée sur la base de prélèvements isolés, de débits d'eau, de forçage météorologiques et de données d'occupation des sols. Là encore l'expertise de l'OSR s'est améliorée, notamment sur les techniques de calage de courbes de tarage sédimentaires. Ces différents travaux ont permis de développer une base de données relationnelle FluxOSR spécialisée pour les séries temporelles hydrologiques qui a pour vocation de réunir dans le futur toutes les données nécessaires et de réaliser des calculs de flux en prenant en compte toutes les incertitudes.

Pour les prélèvements de MES, les travaux ont montré que la meilleure stratégie de collecte réside dans l'utilisation de centrifugeuses mobile ou fixe (échantillonnage « ponctuel » sur quelques heures) ou de pièges à sédiment. Ces derniers induisent un biais granulométrique dans le prélèvement qui peut être corrigé par la suite, mais outre son faible coût, son intérêt réside dans l'intégration des prélèvements au cours du temps qui permet de minimiser, si besoin, le nombre d'analyses.

Pour assurer une bonne comparaison des prélèvements, la mesure du carbone organique particulaire et de la granulométrie sur chaque échantillon est nécessaire. Par ailleurs, les protocoles de mesures des différents laboratoires doivent être connus et conservés afin de pouvoir mieux interpréter les données passées. Nos travaux ont montré que des variations temporelles observées sur certains contaminants étaient dans certains cas à associer à des changements de protocoles, bien que les laboratoires fournisseurs répondent parfaitement à des accréditations certifiées. D'une façon générale, la qualité des analyses produites doit être ajustée aux moyens disponibles et aux objectifs recherchés. En particulier, les limites de quantification doivent être adaptées aux niveaux de contamination que l'on souhaite mesurer, et la liste des substances recherchées mériterait d'être limitée au regard des enjeux et de la probabilité de les retrouver dans la phase particulaire (hydrophobie et présence dans la phase dissoute). Un suivi plus sélectif de moins de substances mais avec des incertitudes réduites peut être plus pertinent que l'inverse, en fonction des enjeux.

2) Effets des évènements (crue, chasse, dragage) sur le transit

Les évènements de crues et de chasse sont les mécanismes majeurs du transfert des MES et des contaminants associés. S'ils ont un effet direct sur le flux de contaminants, c'est généralement par la quantité plus importante de MES, plutôt que par des teneurs en contaminants plus élevées. Cette dissociation entre flux et teneur est importante à faire, les crues charriant ainsi un matériel généralement moins contaminé. Ce fait reste toutefois variable en fonction de l'origine des crues dans le bassin versant, du contaminant et de l'importance des reprises dans le lit. Cependant, des tendances générales peuvent être élaborées à partir de l'étude de ces événements.

2a) Qualité du matériel en crue :

Plusieurs crues ont été suivies en 2011 et 2012 notamment sur le Bas-Rhône et le Haut-Rhône. En 2011 deux crues importantes se sont produites en novembre puis décembre sur Arles ; en 2012 c'était en janvier (crue du haut-Rhône), novembre puis décembre.

Le matériel transitant lors des crues sur Arles est clairement dépendant des bassins versants d'origine de la crue, tout en étant dilué par les reprises sédimentaires au sein du fleuve. Les marqueurs géochimiques ainsi que l'étude minéralogique montrent, par exemple, que les MES cévenoles ont des teneurs en certains métaux naturellement plus fortes (bien que la taille des MES soit plus grossière) (Figure 17 : Concentrations en Pb et Zn en fonction des concentrations en Sr mesurées dans les MeS et laisses de crue durant la crue de Novembre 2011

) ; mais il reste encore impossible de préciser s'il s'agit d'un fond géochimique naturel seul ou associé à une contamination par le lessivage d'anciens terrils miniers. Les apports de la Durance se traduisent par des particules plus fines, avec de plus faibles teneurs en carbone et des signatures isotopiques traduisant un carbone dégradé issu des sols et de leurs lessivages. Lors des crues, les teneurs en métaux, mercure et PCB sont généralement parmi les plus faibles de l'année, mais ce trait est loin d'être généralisable et peut être en plus variable au cours de la crue.

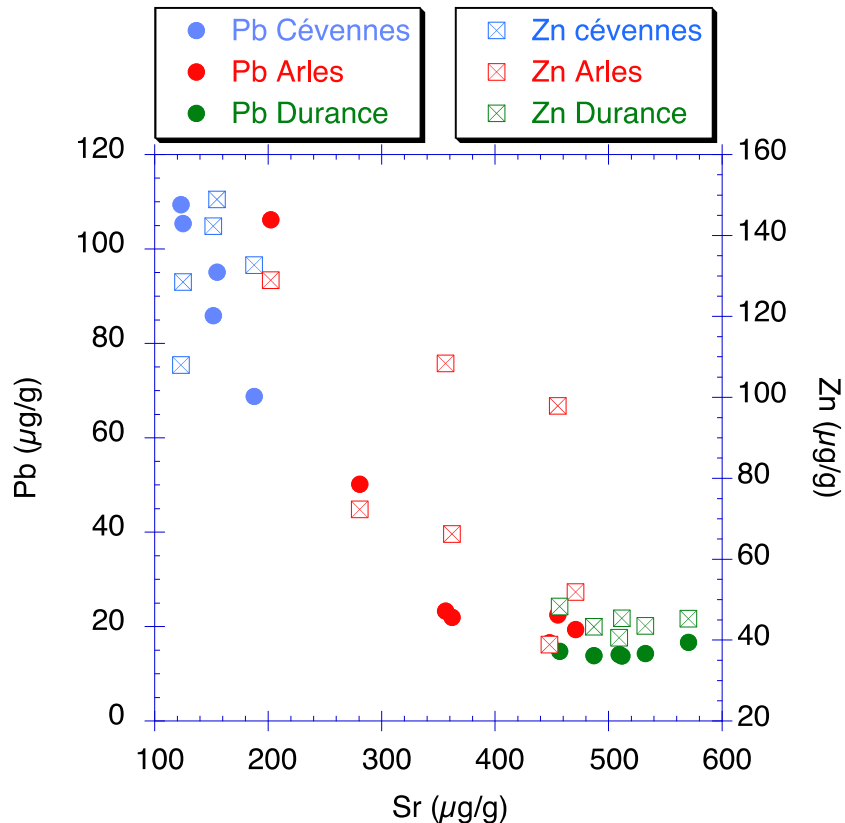


Figure 17 : Concentrations en Pb et Zn en fonction des concentrations en Sr mesurées dans les MeS et laisses de crue durant la crue de Novembre 2011

Cévennes = Ardèche, Gard et Cèze. Le Sr est un élément très discriminant pour l'origine des particules entre bassin alpin (Durance, fortes teneurs) et cévenol (faible teneurs). Le 4/11, les MeS mesurées à Arles sont issues des Cévennes. A partir du 5/11, la Durance entre en crue et ses MeS deviennent prépondérantes à Arles. Cette évolution explique le passage à Arles de fortes teneurs de Pb et Zn (MeS Cévennes) à de plus faibles teneurs (MeS Durance) au cours de la crue

2b) Effets des chasses de 2012

Le suivi de l'OSR réalisé lors des chasses du Haut-Rhône de juin 2012 a produit une grande quantité de données encore à exploiter. Il faut noter que cette chasse s'est produite dans un contexte particulier en même temps que des crues sur l'Arve, le Guiers, et l'Isère, toutes avec des concentrations globalement de l'ordre de 1000 à 1500 mg/L. Au même moment les autres affluents également en crue (Ain, Saône, Fier et les Usses) présentaient des concentrations en MES nettement plus faibles.

La reconstitution des flux de MES sur l'ensemble du système montre que 0,93 Millions de tonnes de MES ont été libérées lors de l'abaissement de la retenue de Genissiat contre 2,6 pour celle de Verbois. Ces flux sont très supérieurs aux apports de crues par les affluents au même moment. L'ouverture de ces barrages est associée à deux augmentations de turbidité à Jons qui ont atteint respectivement 250 et 1000 mg/L pendant 3 à 4 jours. Les dépôts et reprises sédimentaires associés ont pu être évalués sur les différents tronçons du système. Globalement les flux en transit diminuent d'un facteur 9 entre les barrages et Bregnier-Cordon et d'un facteur 13 à 40 entre les barrages et Perrache, attestant de dépôts importants. Dans la zone de Miribel-Jonage, l'ouverture du barrage de Jons joue sur la

vitesse du courant et sur les possibilités ou non de dépôt, mais les crues de 2012 semblent avoir limité l'intensité des dépôts dans le Vieux-Rhône de Crépieux-Charmy. Au final, le flux total de MES passé à Jons pendant ces chasses (0,25 Mt) est tout à fait similaire à celui des crues de fin 2011-début 2012 et de novembre 2012 (0,23 et 0,2 Mt).

Les teneurs en contaminants sur ces MES sont inférieures à celles habituellement mesurées, excepté pour l'arsenic et les HAP totaux à Seyssel seulement. Cette diminution est directement associée au fait qu'il s'agit de particules plus grossières et plus pauvres en carbone (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Aucun signal spécifique de tritium dissous (radionucléide artificiel) lié à ces opérations n'a été observé durant ces chasses.

Ces opérations de chasse ainsi que les crues concomitantes sur le Haut-Rhône ont engendrés des flux significatifs au niveau de Lyon, qui se sont propagés vers l'aval. L'interaction avec les aménagements hydro-électriques (conduits de façon habituelle) et l'occurrence de crues significatives sur l'Isère, rendent complexes l'observation et l'interprétation de l'influence des opérations de chasse sur la charge en suspension jusque dans la partie terminale du Rhône. Les données enregistrées à Arles soulignent une augmentation de la charge en suspension 10 jours après l'abaissement de Génissiat (5 jours après celui de Verbois) associée à une augmentation modérée des débits, puis 22 jours après sans augmentation significative des débits. Les valeurs de charges observées au cours de ces périodes sont 3 à 4 fois plus élevées que les références. Le cycle d'hystérésis inverse traduit une source d'apport sédimentaire distante qui reste à identifier, notamment entre les chasses du haut Rhône et celle de l'Isère. L'interprétation de traceurs des différentes sources (une fois mieux connue la signature de l'Isère) et l'utilisation du modèle hydro-sédimentaire du Rhône (une fois calé et validé de Lyon à la mer) permettront de quantifier la contribution respective de la chasse et des autres apports dans le flux observé à Arles.

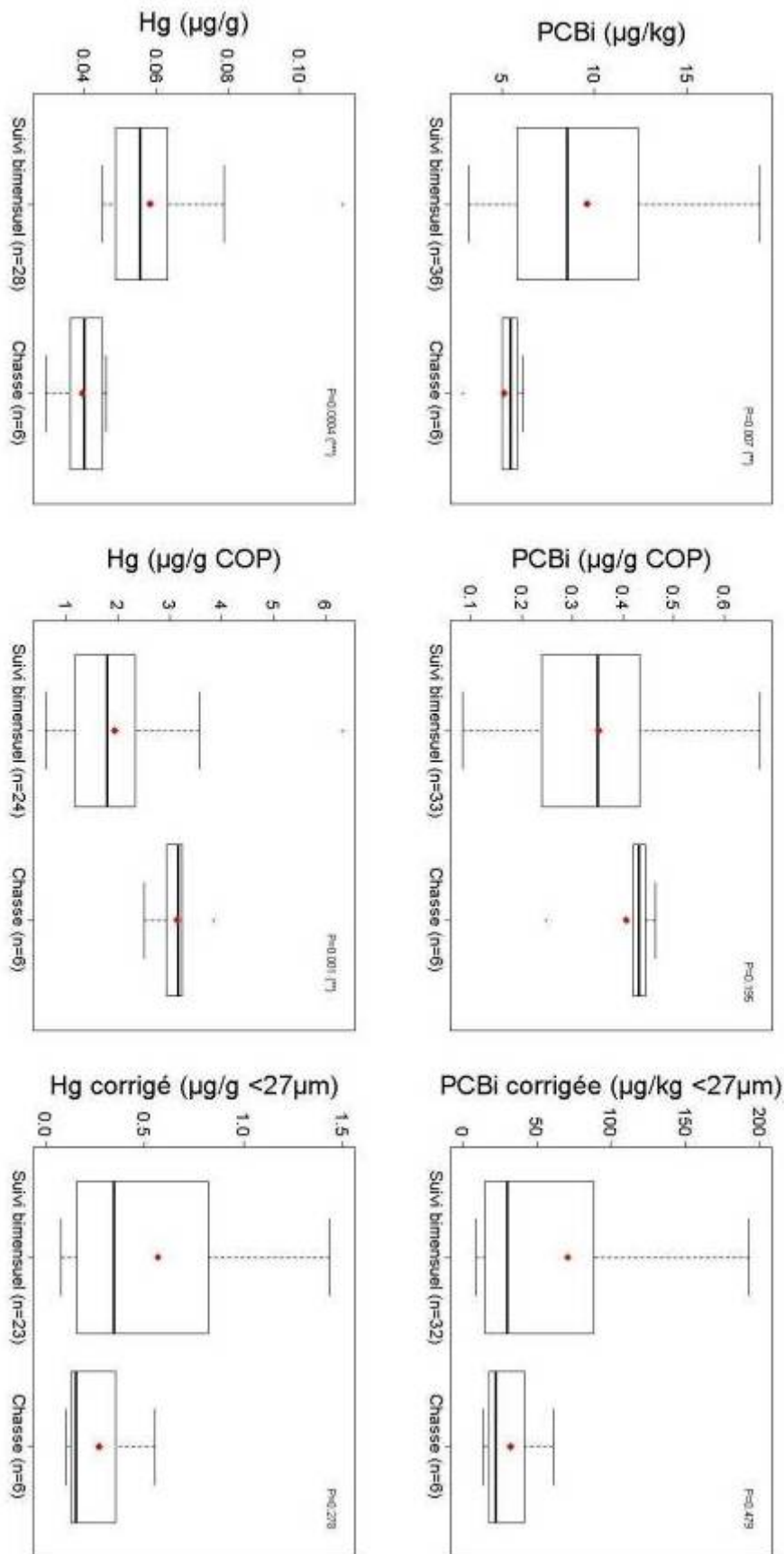
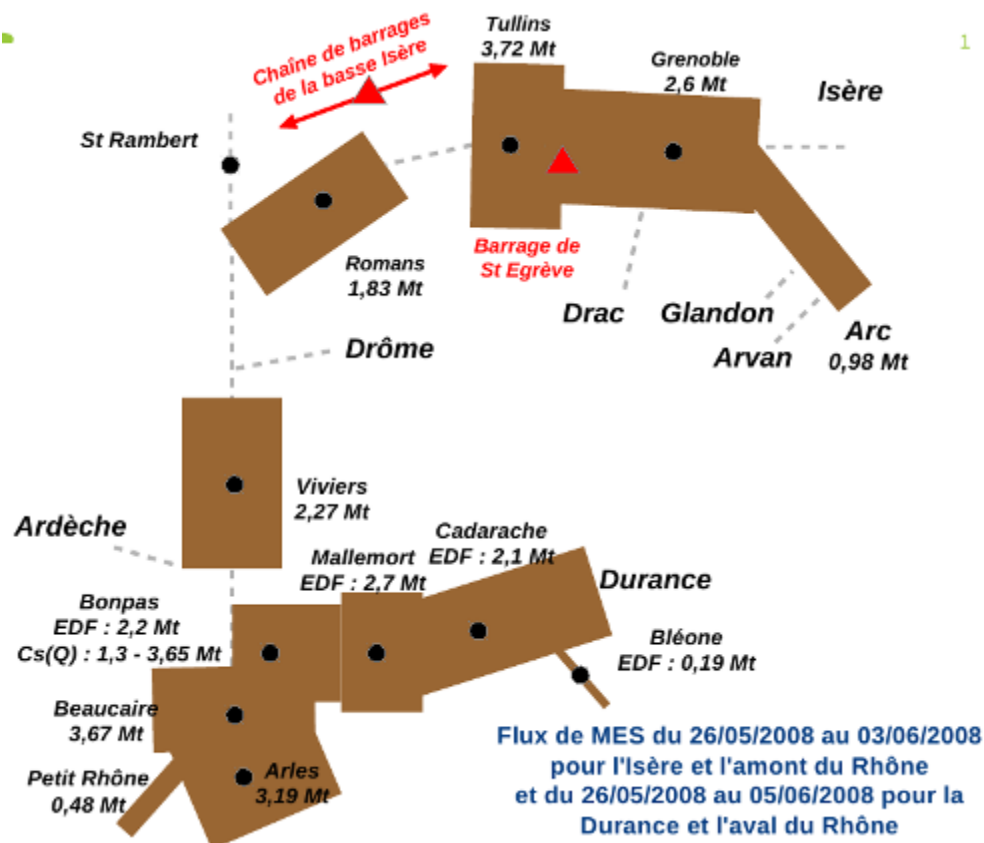


Figure 18 : Analyse comparative des MES du suivi annuel et du suivi des chasses du Haut-Rhône

2c) Crue de Mai-Juin et chasses Isère de 2008 :

La crue atypique de mai-juin 2008 à Arles a fait l'objet d'une étude rétrospective spécifique. Se développant en deux phases d'une semaine chacune, cette crue a entraîné des flux de MES aussi importants que ceux de décembre 2003 alors que les débits sont restés relativement modérés (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Pour cette étude une collaboration d'échanges de données et de discussions a été conduite avec succès entre l'OSR, la CNR, EDF et le LTHE et a permis d'établir des bilans de MES équilibrés sur le bassin versant. Cette réévaluation a permis de revenir sur l'idée que l'ouverture exceptionnelle des ouvrages de la Durance (Serre-Ponçon) était majoritairement responsable de ce fort transfert de MES. Il apparaît en fait que les apports de l'Isère ont aussi largement participé à ce flux, mais ils ont été eux plus fortement interceptés par les aménagements sur le Rhône. Cette crue se distingue donc bien par un caractère « semi-artificiel ». La gestion des ouvrages de la Durance a conduit à modérer les débits tout en laissant passer de grandes quantités de MES, mais les apports de l'Isère ont également été importants, modifiés toutefois par des manœuvres d'ouvrage qui ont joué un grand rôle sur le stockage et la production sédimentaire.



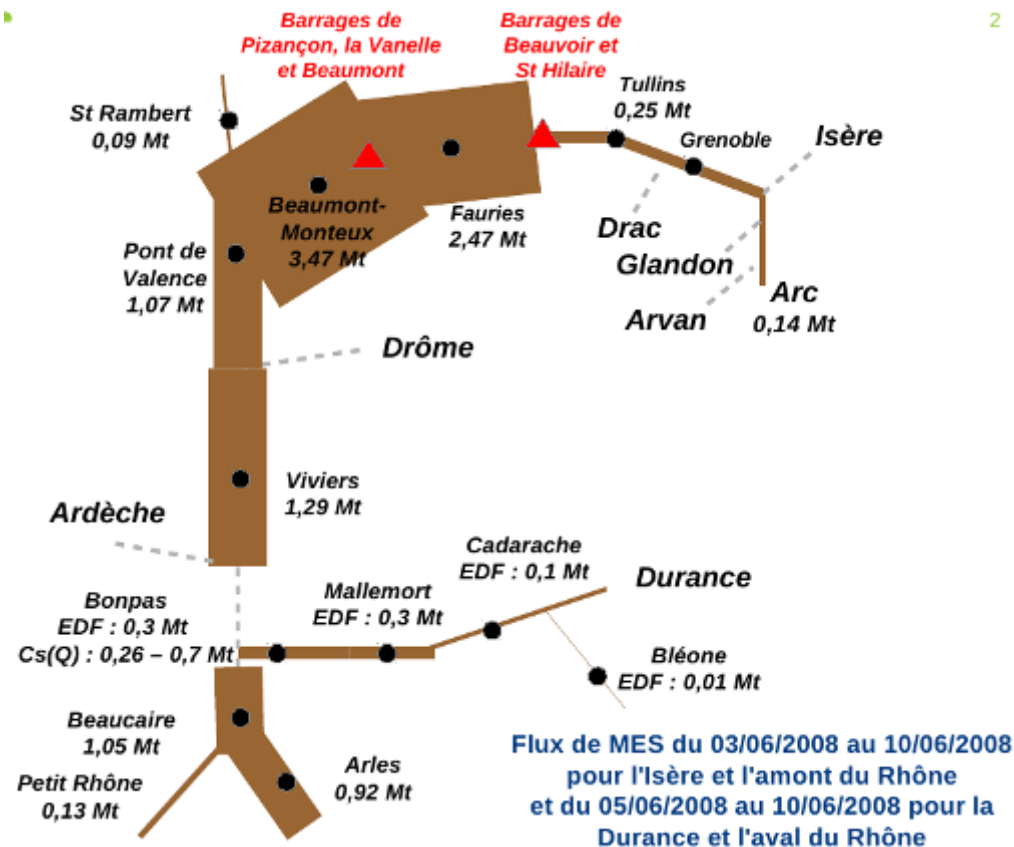


Figure 19 : schématisation des flux cumulés dans le réseau hydrographique, pendant la crue du Rhône de mai-juin 2008, première et deuxième phase

2d) Suivi du dragage du Pontet

En novembre 2011 un dragage de la CNR dans le vieux Rhône au Pontet a fait l'objet d'un suivi particulier de l'OSR. L'objectif était d'évaluer l'utilisation de l'ADCP pour mieux cerner les effets induits sur la resuspension et évaluer l'évolution de la concentration en éléments métalliques dissous et particulaires engendrée dans l'eau. Grâce à la vision de l'ensemble de la colonne d'eau par ADCP, on peut constater que 3 700 m après le rejet le panache n'est pas encore entièrement mélangé. Sur une rive les intensités rétrodiffusées sont similaires à celles de l'amont, mais sur la rive affectée par le panache elles restent encore légèrement supérieures. Les prélèvements réalisés pour calibration montrent des teneurs et granulométries en MES très variables à proximité du rejet à cause des forts gradients dans le nuage. La calibration de l'ADCP reste donc difficile pour couvrir toute la gamme, tout au moins dans le tout premier kilomètre. Au-delà, la suspension devenant plus homogène, cette calibration devient plus efficace et l'ADCP démontre son potentiel pour évaluer l'emprise du panache dans l'espace. Les analyses granulométriques montrent que les sables moyens et grossiers sédimentent vite après le point de rejet, et seules les particules en suspension de 15 jusqu'à 100 µm restent présentes jusqu'à 3 700 m.

L'opération n'a entraîné que peu de modifications sur les aspects physico-chimiques étudiés, avec une légère augmentation de conductivité et des phénomènes de sorption-désorption possibles pour certains métaux au niveau direct du rejet. Pour les MES, les particules les plus en aval montrent une signature en éléments traces métalliques tout à fait

similaires à celles du rejet, sans évolution notable, et ce malgré une diminution de la fraction sableuse. Les teneurs mesurées sont toutefois en dessous des moyennes observées sur Arles et ne montrent pas de contamination marquée. Enfin, les résultats disponibles pour les radionucléides artificiels ne témoignent d'aucune influence de ces opérations de dragages sur les MES remobilisées.

2e) Recommandations opérationnelles

L'étude de ces différents événements hydrologiques montre qu'il est nécessaire de multiplier les suivis fins (temps et espace) pour mieux comprendre leur rôle et leur spécificité. Si le dragage étudié a un impact minime, les crues comme les chasses sont les mécanismes majeurs du transport solide, au moins pour les MES.

Les teneurs en contaminants associées à de tels événements restent difficiles à prévoir précisément puisqu'elles dépendent de l'origine du matériel dans le bassin versant, mais aussi de l'efficacité de la reprise dans le lit ; cette deuxième source est plus difficile à caractériser. Nos résultats montrent que lors des chasses de 2012 les teneurs en contaminants étaient généralement inférieures à celles habituellement observées sur les MES, une différence pouvant aller jusqu'à un facteur 2. Il est donc important de ne pas appliquer les teneurs moyennes échantillonnées en régime de base, souvent plus élevées, aux flux de MES observés pendant les crues ou les chasses, sous peine de surestimer sensiblement les flux de contaminants associés. Cependant, cette différence en concentration de contaminants affecte moins les valeurs de flux de contaminants que les variations de concentration en MES, et en raison de la forte charge en MES, ces événements ont donc bien un rôle essentiel sur le flux de contaminant transféré.

La difficulté du suivi de contaminants réside aussi dans la comparaison temporelle et spatiale des résultats obtenus. Des paramètres de normalisation comme la teneur en COP ou la granulométrie se révèlent efficaces, en apportant en plus une meilleure compréhension des processus de transfert. Enfin, le suivi collaboratif mis en place entre partenaires opérationnels et de recherche lors des chasses du haut Rhône a prouvé son intérêt et son efficacité, entre autre par la masse de données accumulée et encore en traitement. Cette opération d'envergure est à envisager dans le cadre d'autres événements artificiels prévisibles et pouvant avoir un impact sur le transfert à grande échelle.

3) Estimation de la charge de fond

3a) Tests méthodologiques de mesures du flux instantanée

Les sédiments sablo-graveleux transportés par charriage au fond des cours d'eau contrôlent les évolutions morphologiques et constituent un enjeu majeur. L'estimation de leur flux reste une grande difficulté et une action de l'OSR visait à développer des méthodes pour ceci. Dans un premier temps, du matériel de prélèvement spécifiquement adapté a été testé en plusieurs points du Haut-Rhône et pour diverses conditions de débits. Ce matériel

qui requiert parfois de lourds moyens (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) de mise en place s'avère efficace pour des vitesses de courant de l'ordre de 1 m/s, mais devient très difficile à déployer au delà. Il permet d'obtenir la taille des sédiments en transit mais est difficilement exploitable partout, notamment dans le cas de mise à l'eau par grue qui doivent se faire sur un pont.



Figure 20 : Déploiement de préleveur à l'aide d'un camion grue à partir du pont Carnot

D'autres systèmes doivent donc être envisagés, tels que des stations hydrophones ou la mesure acoustique par ADCP. Les essais faits avec un hydrophone sont assez concluants mais les informations obtenues sont encore limitées. L'ambition actuelle pour cet appareil, s'il est équipé en station fixe, pourrait être de discerner si le transport solide existe lors des crues. Les informations pouvant être obtenues à partir d'ADCP et de traitements spécifiques semblent plus prometteuses, mais là encore cette technique requiert un calage quantitatif encore à développer. Des essais réalisés par l'OSR sur le Mékong (avec la CNR) et sur l'Amazone (avec l'ORE HyBAM) ont permis le développement d'une méthode hydro-acoustique tenant compte d'une population sédimentaire bi-modale. Il semble alors possible de mesurer par ADCP la distribution spatiale des concentrations en suspension grossière (sables), en supposant connues la concentration en suspension homogène (MES) et les caractéristiques granulométriques des deux populations. Cette technique présente l'avantage de ne requérir que peu ou pas de calage sur les prélèvements, alors utilisables comme données de validation.

3b) Caractérisation et dynamique de la charge de fond à l'embouchure du Grand Rhône

Les accumulations à l'embouchure du Rhône (limitée au lobe sous-marin jusqu'à 20m de profondeur) ont diminué d'un facteur 4 depuis la moitié du XIX^{ème} siècle. A l'échelle événementielle, des apports massifs semblent encore possibles, mais ils sont probablement lissés à moyen-long terme dans une dynamique générale de réduction. Pour mieux comprendre le rôle des événements, l'OSR a lancé des recherches sur la base d'une analyse saisonnière annuelle couplée à une caractérisation morphologique à haute résolution (maillage 1m) de l'embouchure (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le suivi réalisé de mars 2012 à février 2013 couvre pour l'instant une année moyenne (pas de crues ou tempêtes décennales ou exceptionnelles) mais des résultats nouveaux apparaissent.

Entre ces deux dates, l'embouchure (jusqu'à -8 m environ) montre un bilan positif de 150.000 m³, ce qui atteste que les apports du Rhône sont donc toujours conséquents, même durant des années de faible énergie. La morphologie se caractérise par une dissymétrie importante du lit du Rhône, avec une rive gauche profonde jusqu'à -9m environ et qui s'incise, et une rive droite de profondeurs si faibles (< 2m) que les mesures bathymétriques n'ont pu être réalisées que sur la moitié du chenal. Cette zone affiche une sédimentation depuis plusieurs décennies sur laquelle s'encre progressivement un poulcier d'embouchure. Dans la partie centrale, le talweg du chenal s'évase et remonte jusqu'à la barre dont la profondeur reste très difficile à déterminer du fait des conditions de navigations dangereuses.

Le lobe deltaïque ne montre pas une symétrie parfaite contrairement à la description des travaux antérieurs. Le bilan sédimentaire annuel distingue une partie Est en gains (350.000 m³) et Ouest en pertes (-59.000 m³). La partie Est est directement sous l'influence du débit fluvial et constitue la zone d'accumulation préférentielle du lobe dans l'axe d'écoulement du fleuve, qui se déplace progressivement vers l'Est sous l'effet de la flèche qui barre progressivement l'embouchure. La morphologie de la partie Ouest du lobe est plus surprenante car contrairement à ce qui est décrit dans les travaux antérieurs, cette zone connaît des effondrements par gravité, et un bilan sédimentaire déficitaire sur toute la durée de l'étude. La partie occidentale du lobe doit donc connaître des épisodes de gains et de pertes successifs à une échelle pluri annuelle. Il semble donc que lors des événements exceptionnels, les apports massifs de sédiments par le fleuve concernent l'ensemble de l'embouchure tandis que durant les crues modérées, la partie Ouest ne bénéficie pas des apports du Rhône. Les houles peuvent donc contrôler, au moins partiellement, les transferts sédimentaires. L'allongement de la flèche témoigne d'ailleurs d'une dérive d'Ouest puissante qui charrie des sables depuis les plages de Piémanson. Le fleuve joue alors le rôle d'un épi hydraulique.

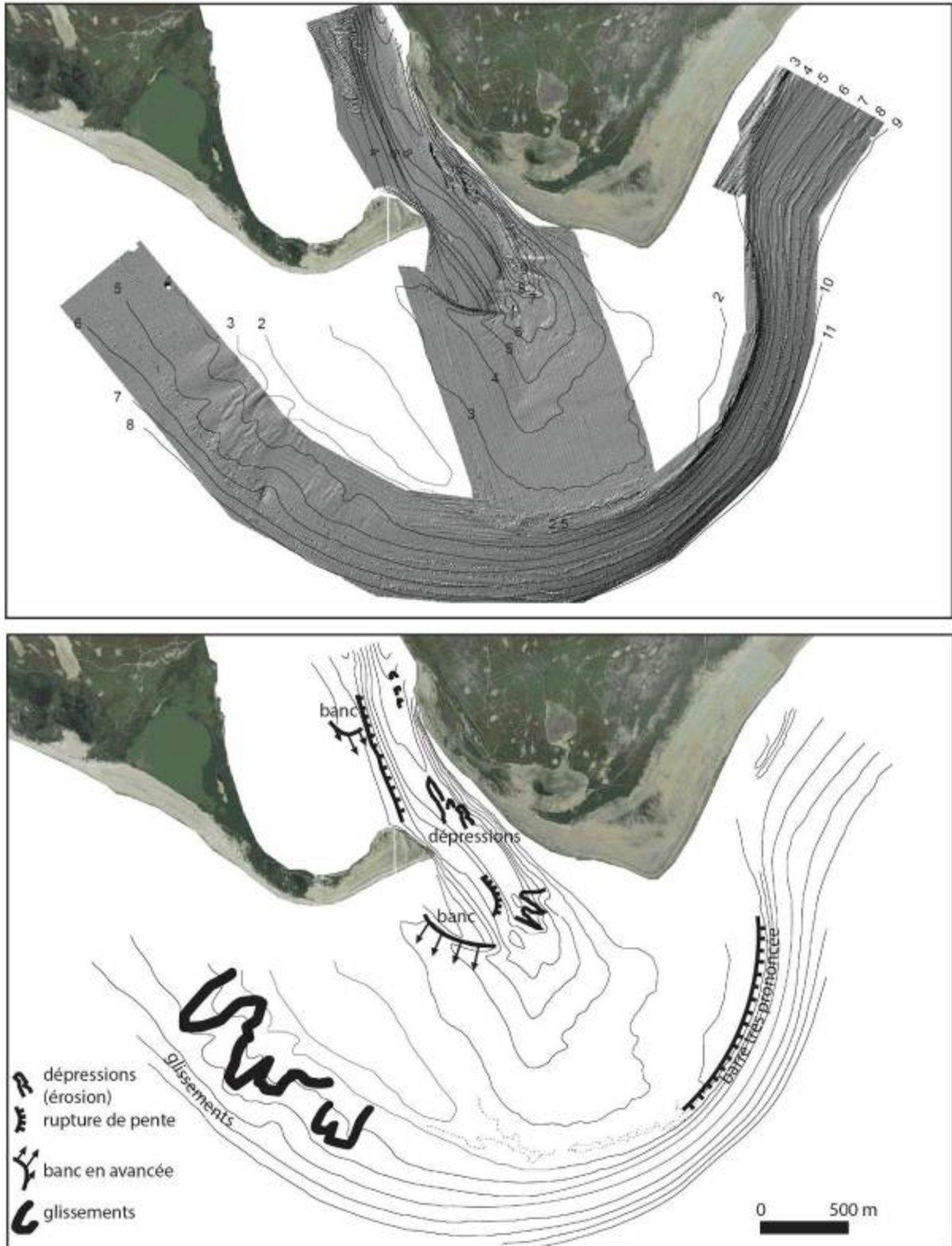


Figure 21 : Morphologie en ombrage de l'embouchure (février 2013) et b) interprétation géomorphologique de son fonctionnement

Le déplacement de la charge de fond a pu être étudié grâce au suivi de la progression des rides sédimentaires et des bancs. Le banc dans le chenal (2m de haut) s'avance de 60 m durant la période automne-hiver (charge solide déplacée de 6000 m³) mais ne montre pas

d'avancée significative durant les autres campagnes. Le seuil de mise en mouvement de ce banc de sable correspond donc à des débits moyens journaliers à Arles supérieurs à 2500 m³/s. Les dunes très fines (hauteur de 0,15 à 0,23 cm) observées sur ce banc se déplacent par contre beaucoup trop vite pour pouvoir être suivies à une échelle saisonnière, et seul la quantification du volume déplacé avec le banc est représentative à cette période de temps.

Un banc s'est mis en place dans l'embouchure au sud du poulier de rive droite, avec une avancée sédimentaire de 100 à 200 m sur une largeur de 500 m environ. Le banc accumule environ 60.000 m³ dont l'origine n'est pas facilement établie mais elle provient vraisemblablement de l'incision du chenal. La durée d'étude n'a pas permis d'observer la direction et le devenir de cette masse sédimentaire mais on soupçonne qu'elle joue un rôle important dans l'alimentation de la flèche et donc l'alimentation limitrophe des plages à l'ouest de l'embouchure. Enfin, la barre d'embouchure de la moitié Est avance vers le large de 30 m environ mais les mouvements sédimentaires sont très réduits en dessous de -6 m. Son avancée se fait par des étapes d'accrétion lors de crue, de stabilité estivale et d'érosion au printemps par les houles.

3c) Recommandations opérationnelles

Les résultats des tests de mesure de la charge de fond sont loin d'être finalisés mais augurent de la possibilité de mieux quantifier ce type de transport dans un futur proche. Les travaux conduits ont d'ores et déjà permis de proposer une nouvelle méthodologie simple pour réaliser une courbe de tarage sur une section de rivière pour relier débit solide par charriage et suspension sableuse au débit liquide. Cette méthodologie doit encore être validée et doit être autant que possible mise en place avec un calage sur site à partir de prélèvements. Des stations pérennes d'étude de la charge de fond pourraient être équipées dans des sites clés pour permettre le développement de cette mesure, tout en ayant un intérêt significatif pour la gestion (du Bac de Barcarin au débouché pour les apports à la mer, Haut-Rhône à Pougny, aval de l'Ain). Une stratégie de mesure multi-techniques apparaît indispensable pour réussir à quantifier les différents compartiments de la charge de fond, en combinant des prélèvements physiques (échantillonneur de charriage, bouteille de Delft pour les sables en suspension), des analyses morphodynamiques (échosondeur, dune-tracking) et des techniques hydro-acoustiques (hydrophone pour le charriage, ADCP⁵ et ABS⁶ multi-fréquence pour la suspension grossière). Dans tous les cas, la connaissance de la granulométrie est capitale pour l'interprétation des résultats et la quantification des flux.

Les variations bathymétriques de l'embouchure du Rhône se produisent essentiellement durant la saison des crues. Aujourd'hui le déplacement de la charge de fond concerne un banc dans le chenal et un banc au sud de la flèche d'embouchure qui vont alimenter dans les années à venir l'embouchure. La sédimentation du talus est dissymétrique et se concentre sur la partie Est où la barre se déplace vers le large pour alimenter le front du lobe mais cette situation semble varier dans le temps. La flèche qui

⁵ Acoustic Doppler Current Profiler

⁶ Acoustic Backscatter System (exemple : Aquascap)

barre progressivement l'embouchure joue un rôle déterminant dans le fonctionnement général car elle induit un approfondissement du chenal du fleuve, et entraîne progressivement l'écoulement du Rhône vers l'Est, laissant aux houles la possibilité de contrôler, au moins partiellement, la partie occidentale de l'embouchure. Les relevés bathymétriques multifaisceaux à très haute résolution réalisés pour la première fois dans des conditions difficiles ont démontré le fort potentiel de cette technique, capable de distinguer des figures sédimentaires de 15 cm de haut. Un suivi régulier de ce type permettra dans le futur de quantifier très précisément le volume de charge de fond déplacé et le sens de son écoulement, et ce aux échelles annuelles ou événementielles (si possible) car à ce jour le suivi d'une année reste insuffisant pour répondre à ces questions. Si ces premiers travaux montrent que l'alimentation en sable de l'embouchure existe encore, c'est l'emplacement du dépôt actuel vers l'Est qui pose peut être problème, empêchant ce sable d'être facilement redistribué vers l'ouest par la houle marine.

4) Modélisation du transfert sédimentaire

4a) Résultats

L'objectif de cette action est d'obtenir, à moyen terme, une modélisation 1-D du transport solide en suspension du Léman à la Mer, reproduisant tous les processus de transport et dépôt et permettant des simulations en temps réel ou à long terme. Ce modèle sera mis à disposition des partenaires pour supporter toute étude de la dynamique des flux sur le Rhône. Les réalisations se sont focalisées sur 3 points. Premièrement le développement du code de simulation (Adis-TS). Le programme est maintenant utilisable sur PC et le code hydraulique reproduit la régulation des aménagements hydro-électriques. Deuxièmement la construction précise de la géométrie du fleuve. Le linéaire est maintenant couvert sur sa totalité ainsi que quelques tronçons d'affluents pour le lit mineur et moyen, et les dimensions géométriques des aménagements sont intégrées avec des compléments encore nécessaires à l'aval de Lyon. Troisièmement, les premiers calages et validation du modèle ont eu lieu pour l'aspect hydraulique et transport de sédiments. Le suivi très important réalisé lors des chasses du Haut-Rhône est entre autre un événement de calage très important. Le modèle hydraulique a reproduit correctement l'hydraulique en amont de Lyon pour ces chasses (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), il reste maintenant à le valider sur d'autres événements et sur la partie aval. Pour les MES, certains paramètres sont maintenant calés (coefficient de dispersion longitudinale) mais ceux concernant les dépôts et érosion nécessitent encore du travail. Les résultats du traçage fluorescent du Rhône à Miribel-Jonage en novembre 2011 ont ainsi permis de déterminer les formules de dispersion les mieux adaptées au Rhône, et de montrer que l'estimation du coefficient de dispersion à partir de jaugeages ADCP présente un fort intérêt.

Ce modèle a pour but de reconstituer l'ensemble du linéaire mais il est d'ores et déjà utilisable pour des secteurs précis et il a ainsi été utilisé sur les sites de Miribel-Jonage, l'aval de Vienne et l'aménagement de Sault-Brénaz pour y répondre à des problématiques spécifiques (comportement de lônes, lois d'ouvrages...). Notamment, les dépôts observés dans la lône du Beurre au fil des ans ont pu être reproduits avec une tendance proche de la

réalité, et les flux sédimentaires en sortie des différents organes du barrage de Génissiat (vannes de fond, demi-fond, et évacuateur de crue) lors des opérations de chasse de 2012 ont pu être simulés. Le code de simulation permet de transporter plusieurs substances dissoutes ou particulières, passives ou réactives. Une synthèse bibliographique a permis de recenser l'état de l'art en matière de coefficient de partage des PCB (équilibre entre les phases dissoutes et particulières), et d'en déterminer les valeurs moyennes et leur variabilité usuelle.

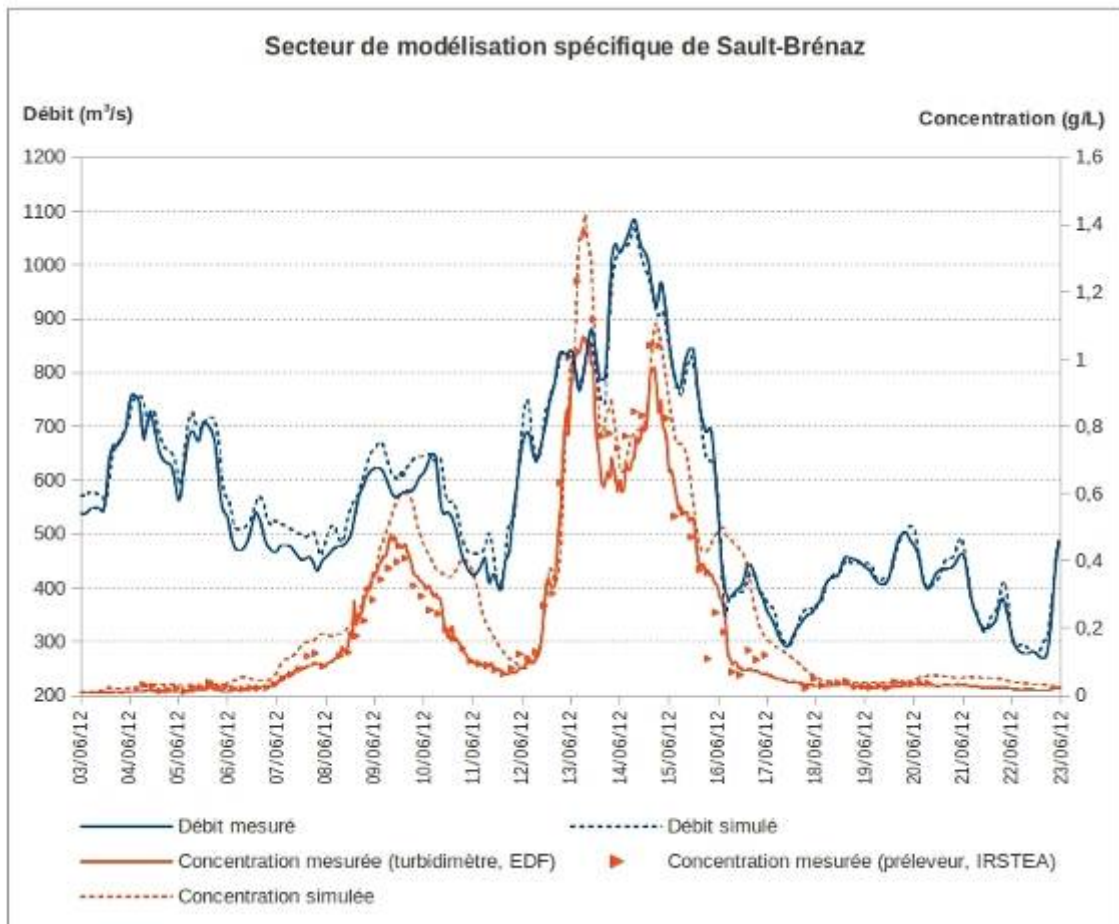


Figure 22 : Simulation des chasses du Haut-Rhône à l'aide du modèle

4b) Recommandations opérationnelles

Le code de simulation (Adis-TS) et le modèle du Rhône ont vocation à servir d'outil support pour les recherches et les applications opérationnelles des partenaires de l'OSR. Le code de simulation peut potentiellement être couplé à n'importe quel modèle hydraulique 1-D, comme le logiciel Crue de la CNR par exemple, moyennant l'adaptation des formats de résultats hydrauliques pris comme données d'entrée des simulations de transport solide. Le modèle hydraulique du Rhône (code Mage) peut être utilisé pour des études nécessitant de connaître les conditions hydrauliques en tout point du réseau au cours du temps, mais dans les limites de son paramétrage actuel, qui ne permet notamment pas la simulation des crues débordant en lit majeur (inondations hors digues). Cet outil pourra servir pour les études

d'optimisation de la gestion sédimentaire des ouvrages et aménagements, notamment dans le cadre des réflexions en cours sur la gestion sédimentaire du Haut-Rhône avec les SIG et la CNR. Les développements futurs concerneront entre autre l'extension à des affluents sédimentaires majeurs, un effort de paramétrage et de validation qui doit être étendu en aval de Lyon (notamment en utilisant le jeu de données de mai-juin 2008 de l'Isère à Arles), la simulation de la dynamique propre aux différentes substances d'intérêt ainsi que la représentation des échanges sédimentaires avec les annexes fluviales.

III) Livrables opérationnels

1) *Agir pour la restauration du chenal des Vieux Rhône : le schéma directeur de réactivation de la dynamique fluviale des marges du Rhône*

1a) Objectifs et présentation générales de la méthodologie

L'élaboration du schéma directeur de réactivation de la dynamique fluviale du Rhône correspond à l'action 5 d'OSR 2 mais a débuté en 2009 dans le cadre d'OSR 1. Cette étude repose sur une méthodologie qui comprend trois phases :

- la première partie du schéma directeur consiste à améliorer la connaissance des impacts des aménagements Girardon sur le fleuve par l'étude de l'évolution de la dynamique fluviale, de l'occupation des sols, de la topographie, de la dynamique sédimentaire et d'inondation, et du paysage au cours des 150 dernières années.
- la deuxième partie consiste à réaliser une base de données recensant les éléments de vulnérabilité, les enjeux écologiques et patrimoniaux. Elle amorce la réflexion sur la faisabilité hydraulique de la remobilisation des sédiments.
- la troisième partie est basée sur la réalisation d'un modèle de croisement des différentes informations afin d'aboutir à une carte de synthèse de la faisabilité.

Le schéma directeur est une base de données qui a pour vocation l'aide à la décision. Il améliore la connaissance des aménagements Girardon et de leurs impacts. La zone d'étude du schéma directeur correspond aux marges alluviales des Vieux Rhône (sauf celui de Sault Brénaz), plus le site de Miribel Jonage.

La méthodologie (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) est présentée en détail dans le rapport de synthèse de l'action 5-OSR2. Le schéma directeur doit être considéré comme une base de données permettant d'alimenter la réflexion et la décision. Il doit servir de base de discussion et ne pas fournir de conclusion définitive.

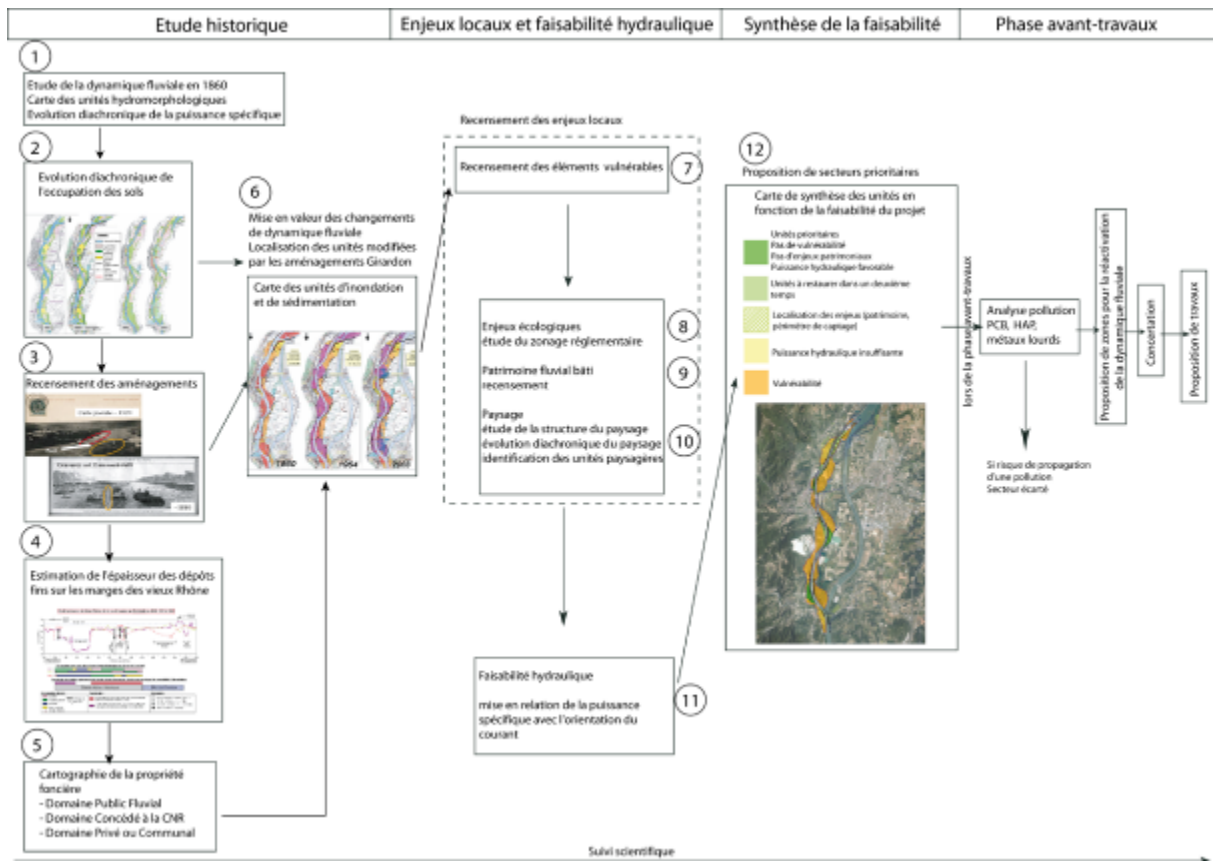


Figure 23 : Schéma présentant la démarche méthodologique mise en œuvre pour l'élaboration du schéma directeur de réactivation de la dynamique fluviale des marges du Rhône

1b) Principaux résultats

Seuls les principaux résultats, à l'échelle de l'ensemble des sites étudiés, sont présentés ici. Afin d'avoir des données plus détaillées, il est possible de se reporter au rapport détaillé existant pour chacun des Vieux Rhône.

Les aménagements Girardon sont un ensemble d'ouvrages : digue longitudinale basse, tenons, épis (plongeants et noyés), seuils de fond, barrages, qui ont été conçus et mis en place entre 1880 et 1920 par l'ingénieur des Ponts et Chaussées Girardon, pour favoriser la navigation sur le Rhône. Ces aménagements sont présents depuis le pont de Rochefort en amont (à l'aval du vieux Rhône de Chautagne) jusqu'à la mer. Ils sont moins nombreux en amont de Lyon, où ils se limitent à une digue longitudinale basse et des épis. Ils sont visibles sur 78% du linéaire étudié.

Ces unités sont caractérisées par une forte augmentation de la sédimentation et par une diminution progressive de leur sensibilité à l'inondation. Globalement le schéma de fonctionnement des unités a été le suivant : En 1860, le Rhône s'écoule en plusieurs bras, la bande active de tressage est large. Les aménagements Girardon sont mis en place de part et d'autre du chenal pour augmenter la profondeur du chenal navigable. Ils permettent une avancée de la berge au détriment du chenal principal (180 mètres sur les deux rives) et barrent les chenaux secondaires. Les sédiments commencent à se déposer au gré des crues. Ces ouvrages ont permis d'augmenter la période navigable de 170 j/an à 355 j/an. La

sédimentation des marges alluviales est rapide. Cinquante ans après la mise en place des aménagements Girardon, les bras secondaires sont en voie d'assèchement et les casiers ont stocké plusieurs mètres de sédiments, rendant parfois les aménagements invisibles. Ce processus est à relativiser en aval de Donzère-Mondragon, où des casiers sont encore en eau et en connexion avec le chenal. Les aménagements de la CNR dérivent la majeure partie du débit dans le canal hydroélectrique, il ne passe plus dans le vieux Rhône qu'un débit réservé. La forêt alluviale perchée sur les marges est progressivement déconnectée de la nappe alluviale. Les milieux annexes sont de plus en plus difficiles d'accès pour la faune aquatique.

Le démantèlement des ouvrages permet une érosion des marges alluviales, un élargissement du lit du fleuve et la fourniture de sables dans le chenal. De nouveaux milieux de grèves en pente douce peuvent ainsi être créés. Le volume total de sédiments stockés dans les unités est estimé à 95 Millions de m³ (marge d'erreur de 10%). En faisant l'hypothèse qu'il s'agit de sables, la masse de sédiments stockés dans les unités serait de 142 Millions de tonnes.

Le recensement des enjeux écologiques et patrimoniaux a permis d'identifier que

- toutes les unités abritent des enjeux écologiques, elles sont concernées par différents périmètres de protection : Natura 2000, Réserve Naturelle, ZNIEFF 1, ZNIEFF 2, ZICO, ZPS, APPB, ZSC.
- quasiment toutes les unités présentent des enjeux patrimoniaux, il peut s'agir des aménagements Girardon, de bornes en pierre du service Navigation, de repères de crue, de moulins, de bacs, pontons, bassins de joute, ponts suspendus, ruines, puits.

1c) Croisement des données et élaboration des cartes de synthèse de la faisabilité

La première étape de l'obtention de la carte de synthèse de la faisabilité est basée sur l'utilisation d'un modèle de géotraitement développé à l'aide ArcGis Builder (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Il permet d'automatiser le traitement des différentes couches SIG qui sont utilisés pour la définition des zones où des actions de restauration sont envisageables. Outre un gain de temps par rapport à une tâche à répliquer sur l'ensemble des vieux Rhône, il permet une uniformisation des données sur l'ensemble des tronçons, et offre par ailleurs la possibilité de tester différents scénarios en faisant varier les paramètres en entrée et une mise à jour simplifiée du schéma directeur quand une couche d'entrée a été modifiée.

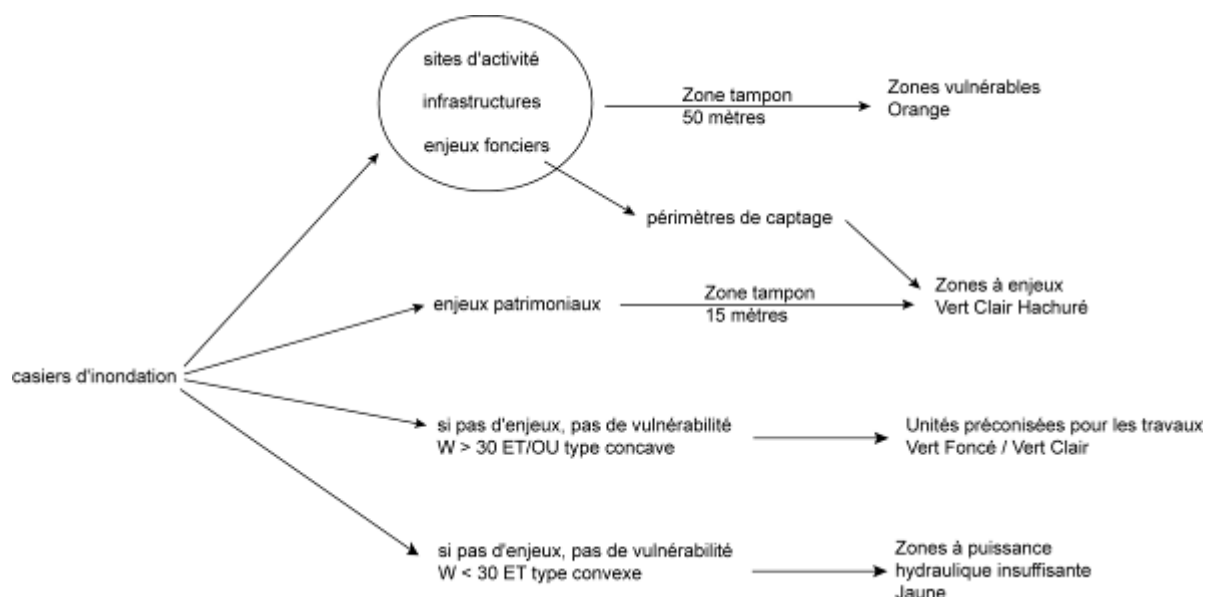


Figure 24 : Schéma illustrant le modèle de croisement des données pour aboutir à la première carte de synthèse

A l'échelle de l'ancienne bande active historique, cette méthode fournit des secteurs de grande dimension (car ne figure pas d'éléments vulnérables) dont la surface est irréaliste. La deuxième étape consiste donc en une phase de vérification par expertise, destinée à réduire ces surfaces en fonction de critères acceptables :

- protection systématique de toutes les infrastructures lourdes telles que les routes importantes, les barrages, les voies ferrées, qui figurent en orange.
- maintien en l'état des zones agricoles établies sur les plus vieux périmètres de tressage pour lesquels la berge est stable en 1860 : zone orange.
- prise en compte des zones de convexité pour lesquels l'énergie est trop faible et ne permet pas de garantir le succès du réélargissement même à moyen terme : zone jaune. Cela ne veut pas dire qu'à long terme une érosion ne soit pas envisageable.

L'érosion latérale est donc proposée dans les secteurs où la dépose d'aménagements post 1860, Girardon ou pré-Girardon, permet, grâce à une énergie suffisante, à l'érosion de s'exercer dans des zones incomplètement sédimentées. Cette deuxième phase intègre la notion de temporalité de la réalisation des travaux. En effet, la couleur verte foncée fait référence aux unités prioritaires. La couleur verte claire correspond à des unités qu'il est possible de réélargir dans un second temps compte tenu des enjeux locaux. Les zones sont localisées grâce à des cartes de synthèse de la faisabilité (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les zones jaunes sont celles qui présente une faisabilité hydraulique faible et les zones orange sont celles où la faisabilité à discuter en raison de présence d'éléments vulnérables.

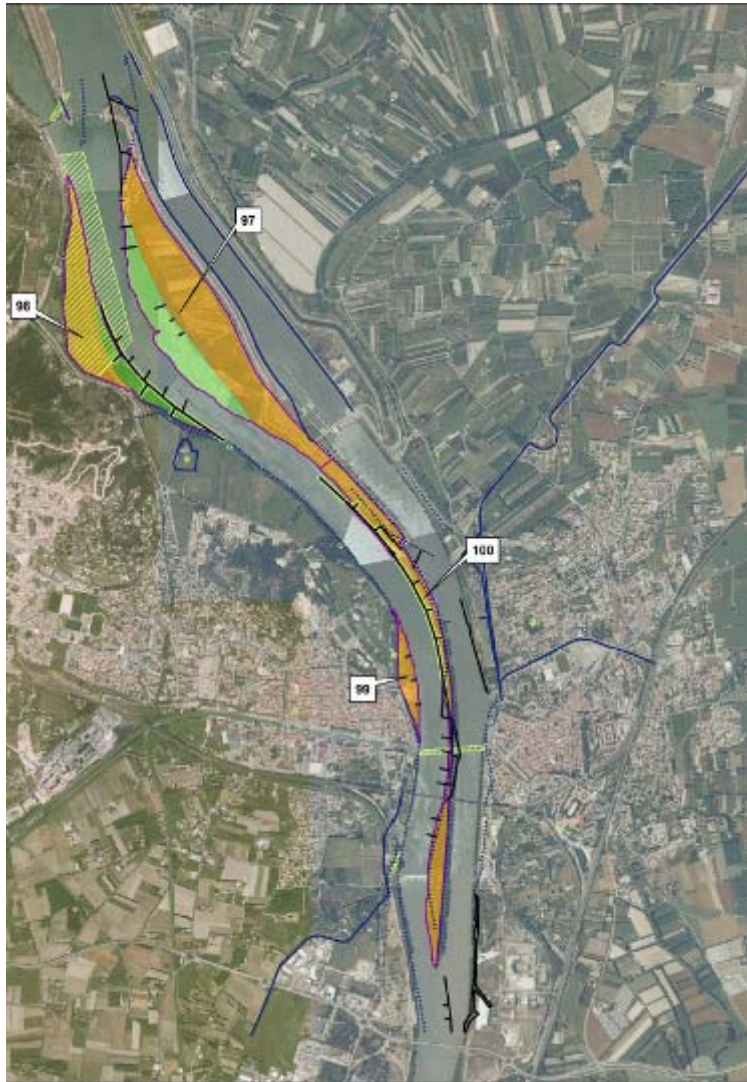


Figure 25 : Exemple de carte de synthèse de la faisabilité

Ces cartes de synthèse de la faisabilité du projet sont valables à la date à laquelle elles sont produites. Les enjeux et la puissance hydraulique pouvant varier par la suite, certains points devront sans doute être actualisés. L'ensemble des résultats de cette méthode est détaillé dans des rapports existant pour chacun des Vieux Rhône analysés.

2) Gérer les stocks sédimentaires pollués : Quelle est leur toxicité ?

Dans le cadre de cette action, nous avons travaillé sur le devenir des polluants dans un scénario bien particulier : « le dépôt à terre (et/ou hors d'eau) de sédiments plus ou moins contaminés à l'occasion d'un chantier de restauration d'une île ».

Pour évaluer les risques écotoxicologiques associés à ce dépôt à terre, la définition préalable et précise du scénario (sources, transferts et cibles à prendre en compte) est essentielle. Il convient ensuite de réaliser une caractérisation fine du sédiment (analyses physico-chimiques) et de mettre en place des essais de comportement des polluants, ainsi que des bio-essais pertinents au regard du scénario.

Les premiers résultats de cette étude ne montrent, d'une manière générale, pas de toxicité avérée des sédiments testés vis-à-vis des 5 organismes cibles sélectionnés. Néanmoins, une toxicité potentielle a été mise en évidence sur un des sédiments testés avec le test « ostracodes », », crustacé benthique *Heterocypris incongruens* » dont le test consiste en la mesure de la mortalité et de la croissance via ce test chronique de contact direct avec le sédiment.

Ce dernier semble particulièrement sensible pour caractériser la toxicité des matrices sédimentaires moyennement contaminées, ce qui va dans le même sens que des résultats obtenus par ailleurs sur des sédiments urbains. Parallèlement, les mesures de concentrations en métaux et PCB sur organismes (plantes) ont montré un risque de transfert trophique. En effet, certaines espèces végétales (après 70 jours de culture en pots sur sédiments) montrent une bioaccumulation de ces contaminants avec un transfert des racines vers les feuilles. L'analyse plus fine des résultats montre qu'il est possible qu'un fractionnement de l'assemblage des congénères de PCB intervienne au cours du transfert de la matrice sédimentaire jusqu'aux parties aériennes (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

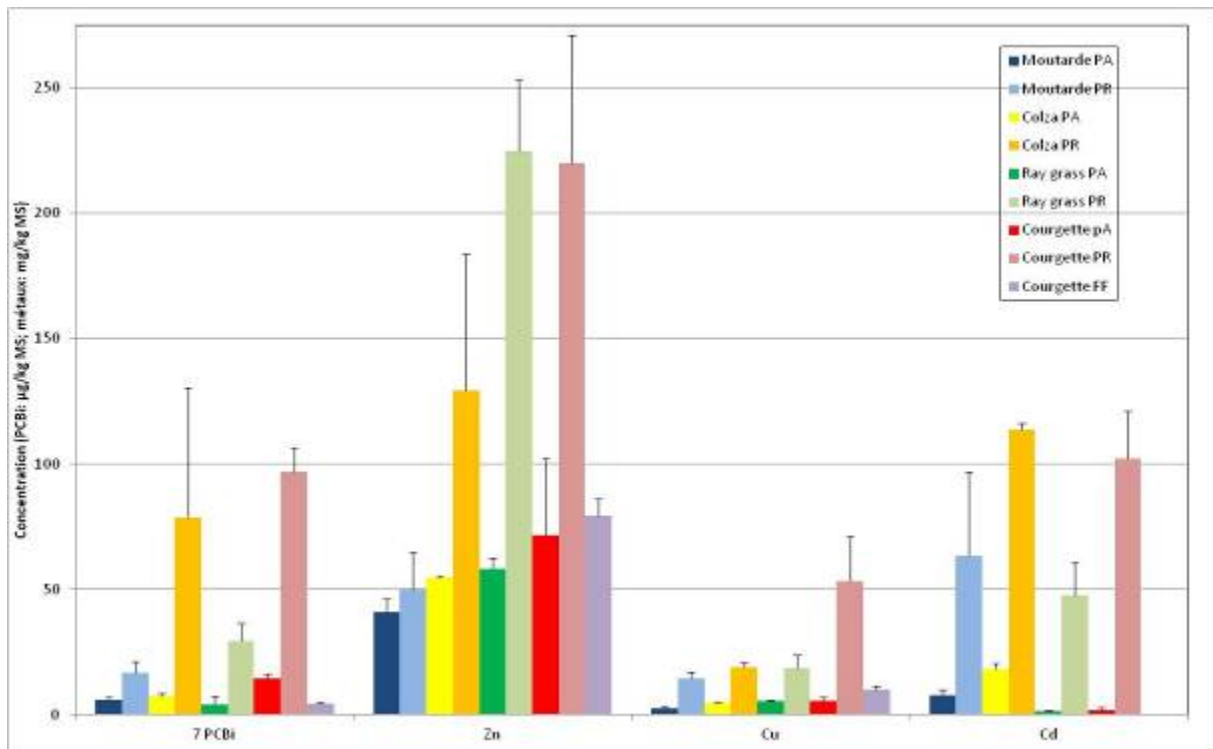


Figure 26 : Concentrations en 7 PCBi, Zn, Cu et Cd dans les parties aériennes (PA) racinaires (PR) et fruits/fleurs (FF) des végétaux ayant poussé pendant 70 jours sur une matrice sédimentaire (TRS : Mas des Tours ; Arles)

Teneur du sédiment TRS: (en mg/kg MS)) Zn : 123.74 ± 6.08 ; Cu : 22.01 ± 1.26 ; Cd : 0.90 ± 0.09 ; 7PCBi ($\mu\text{g/kg MS}$): 27.02 ± 0.86)

Concernant le devenir des stocks de sédiments pollués, les résultats obtenus dans le cadre d'un scénario de gestion à terre (et/ou hors eau), à l'occasion de la restauration d'une île, fournissent des informations intéressantes sur le transfert potentiel de polluants présents dans les sédiments contaminés vers la plante, et plus globalement vers la chaîne trophique. Cela nous permet d'établir quelques recommandations pour la gestion à terre (et/ou hors eau) de sédiments du Rhône, notamment en vue de la végétalisation ou non de ces dépôts. Ces recommandations sont présentées en détail dans le rapport d'étude « Essais

d'écotoxicité et préconisation de gestion de sédiments déposés à terre : Application à cinq sédiments du Bassin du Rhône »

Les principales recommandations concernées sont : (i) la caractérisation fine du sédiment (analyses physico-chimiques); (ii) la mise en place d'essais physico-chimiques et écotoxicologiques pertinents au regard du scénario étudié ; (iii) la définition de solutions techniques limitant le transfert et la remobilisation du dépôt. Ces recommandations sont bien entendues à exploiter au regard des contraintes techniques et financières locales, comme la disponibilité foncière pour le dépôt, le coût de la manipulation des sédiments, les coûts de transport évités,...

3) Capitaliser la connaissance : site web, catalogue de métadonnées et cartographie dynamique.

L'action 11 du programme triennal de l'OSR avait pour objectif de développer et de gérer une base de données géographique du programme. L'OSR regroupe sept équipes scientifiques géographiquement dispersées et rassemble différents laboratoires de recherche et les acteurs institutionnels du fleuve. Il s'agit d'un programme de recherche mais également d'un observatoire scientifique. A ce titre, il recueille des données, les centralise, mais doit également les rendre accessible auprès de l'ensemble des partenaires du projet. Dès le premier programme OSR (2009-2010), la volonté de créer une plateforme de mise à disposition des données est apparue (cf. Rapport S2 – Axe IV). Cette première année avait permis de définir les principes de structuration et de fonctionnement de cette plate-forme. Les trois années du triennal 2010-2013 ont servi au développement de cette plateforme qui regroupe plusieurs outils, qui prennent en compte la donnée scientifique dans toutes les étapes de son cycle de vie (Figure 27 : Schéma du cycle de vie d'une donnée numérique scientifique

) et dont les objectifs sont la capitalisation de la connaissance et sa diffusion.

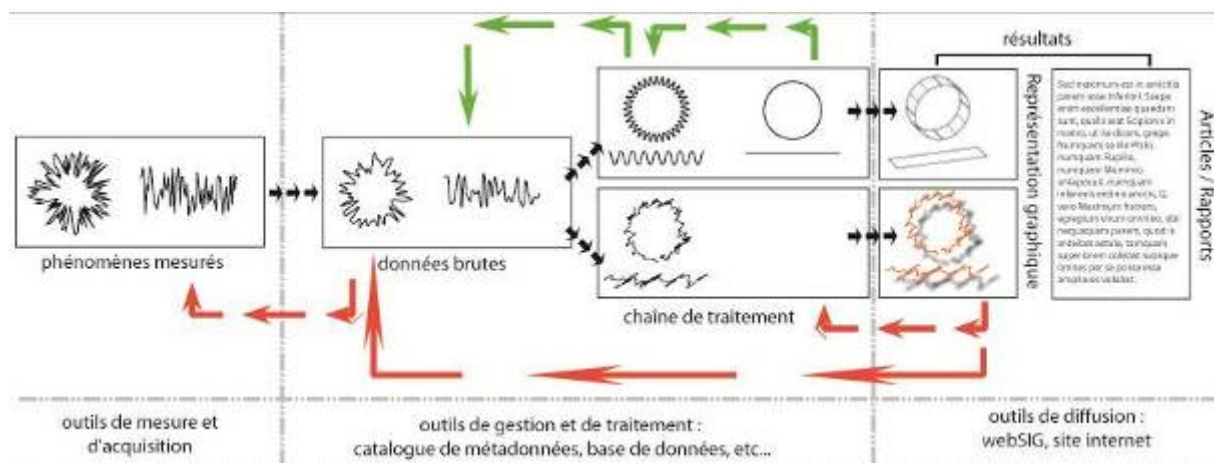


Figure 27 : Schéma du cycle de vie d'une donnée numérique scientifique

Les flèches vertes indiquent la possible ré-utilisation d'une donnée d'une étape de cycle de vie à l'autre. Les flèches rouges, quant à elles, indiquent l'impossible ré-utilisation de cette donnée.

Les outils choisis (sauf la bibliothèque d'échantillons) tiennent compte de deux contraintes fortes et paradoxales qui s'appliquent dans le cadre de l'OSR : la nécessité d'ouvrir les données au plus grand nombre et celle de respecter la propriété des données protégées juridiquement et contractuellement. Ces difficultés ont été levées grâce à l'utilisation de technologies qui s'appuient sur le web et l'instauration d'un système de compte utilisateur aux droits différenciés.

3a) Catalogue de métadonnées : MétaOSR

Une métadonnée est un ensemble structuré de données qui sert à décrire une ressource numérique. Le but des métadonnées est multiple : description des contenus et des droits d'accès, gestion de la ressource elle-même (suivi de son cycle de vie). Un catalogue de métadonnées est un espace de recherche et de consultation de fiches décrivant ces métadonnées. Les ressources numériques produites dans le cadre de l'OSR sont ainsi décrites dans un tel catalogue.

Le catalogue de métadonnées de l'OSR a été copié sur celui de l'Unité Mixte de Recherche EVS : ELVIS (Espace coLLaboratif de Valorisation de l'Information Scientifique). Les fiches concernant l'OSR sont bien distinguées des autres fiches d'EVS par des mots-clés spécifiques, une attribution à un groupe d'utilisateurs particuliers. De plus les fiches EVS ne sont pas en libre accès, alors que la description des ressources OSR est accessible à tous (libre accès via le web).

ELVIS est une instance personnalisée de GéoNetwork v.2.4.6. Il est installé sur une machine virtuelle administrée par la DSI de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon. Une instance de développement et de pré-saisie, est installée en parallèle à celle de production. Les fiches sont saisies sous la norme ISO 19139 compatible INSPIRE.

Le catalogue regroupe aujourd'hui (14/08/13) plus de 200 fiches. La plupart des ressources décrites sont des données géographiques dont :

- ~20 cartes/catalogues de cartes (Carte topographique, d'Etat Major, Atlas dits de 1860, ...)
- ~95 jeux de données vectoriels (occupation du sol, couche cartographique)
- ~65 jeux de données d'images aériennes (entre 1930 et 1990)

~60 jeux de données topographiques (profils en travers, MNT, ...)

Ce chiffre évolue régulièrement en raison de la validation et publication qui se fait au jour le jour. La catalogue est accessible via [la page « MétaOSR » du site internet de l'OSR](#).

Les ressources décrites par ces fiches correspondent aux contenus de la base de données géographique de l'OSR.

3b) La base de données géographiques de l'OSR : GéoOSR

La base de données géographique de l'OSR regroupe deux grands types de données :

- les données «transversales » : jeu de données plus ou moins exhaustives sur l'ensemble du linéaire et non produites spécifiquement dans un des grands programmes de recherche sur le Rhône ([Etudes de l'OHM](#), [OSR](#), [RhonEco](#)). Ces données représentent ~90Go d'informations (~26000 fichiers).
- les données produites dans le cadre des programmes OSR1 et OSR2. Ces données représentent ~13Go d'information (~10000 fichiers).

Le contenu de chacun de ces deux compartiments n'est pas présenté dans la présente synthèse car il est consultable grâce au catalogue de métadonnées.

Une partie du contenu de cette base est accessible pour une simple visualisation via des outils de webmapping. Les technologies du webmapping permettent de consulter des données spatiales éditées spécifiquement pour le web sous forme de « webservices » et mises en page dans des « webapplications », qui sont des interfaces dynamiques (zoom, choix des couches) de consultation.

Dans les premières années du triennal, les outils de webmapping étaient basés sur la solution commerciale Arc GIS Serveur, proposée par l'éditeur de logiciel ESRI. Cette solution avait été sélectionnée par la plate-forme ISIG au cours de l'année 2009, suite à une étude comparative. Ce choix a été motivé par la simplicité d'utilisation du logiciel et son ergonomie. ArcGis Serveur a été installé sur un serveur hébergé par l'équipe stéphanoise d'ISIG à l'université de St. Etienne et mis à disposition pour les besoins de l'OSR. L'utilisation de cette solution n'a toutefois pas été concluante ce qui a conduit à la mise en place d'une deuxième solution, MapMint (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), basée sur des technologies libres. Celle-ci est en cours de développement par un prestataire (société Cartogenic). Cette solution sera installée sur des machines virtuelles hébergées par la DSI de l'université de St. Etienne.

Les webapplications diffusant les données de GéoOSR sont accessibles sur [la page GéoOSR du site internet de l'OSR.](#)

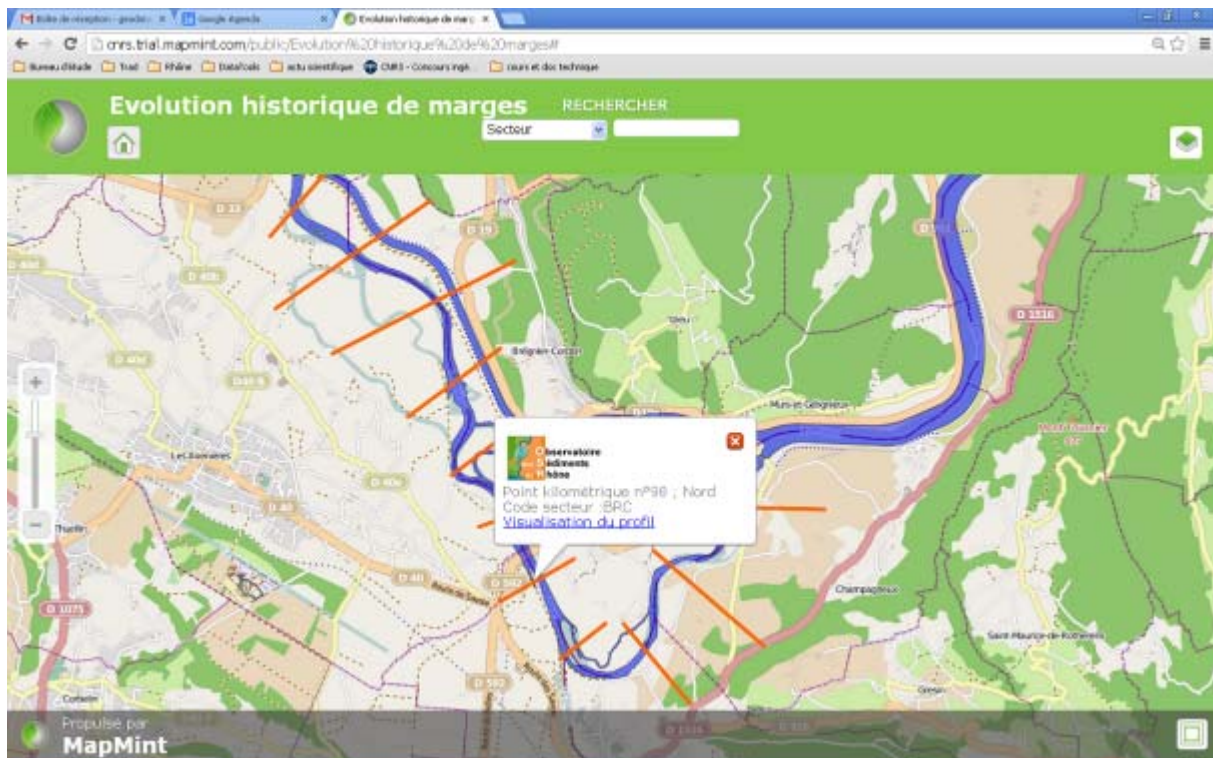


Figure 28 : Exemple de web-application en cours de développement (visualisation des données historiques)

3c) Le site internet de l'OSR

Le site internet de l'OSR est essentiellement un outil de communication. Il a été conçu comme un portail d'accès pour le projet. Il permet de présenter le programme et son contenu, ses objectifs, ses moments forts (rubrique « agenda » et « news ») ainsi que ses principales avancées. Le site est également un outil d'échange de l'information scientifique. Il donne accès aux différents outils cités précédemment et il sert d'espace de stockage et de partage des résultats des actions de recherche. L'ensemble des rapports d'avancement ou finaux y sont présents et peuvent y être téléchargés. Enfin, le site est une porte d'entrée pour les outils précédemment cités. Techniquement le site est géré à l'aide du CSM SPIP et est hébergé sur un serveur du GRAIE.

3d) Droit d'accès et groupe d'utilisateurs

Les outils cités sont accessibles à l'aide d'identifiant et de mot de passe. A l'heure actuelle, un compte utilisateur par partenaire (scientifique et opérationnel) a été créé. Les identifiants et mots de passe sont communs pour chacun des outils. Les utilisateurs sont classés en trois groupes ou « rôles » :

- partenaires extérieurs : organismes de recherche ou personnes liés au projet mais qui n'y participent pas contractuellement. Ce statut de partenaire extérieur est attribué après validation par le conseil scientifique de l'OSR et le comité de pilotage.

- partenaires financiers : organismes participant financièrement au projet. Cet engagement financier donne à ces partenaires un droit contractuel d'accès aux données sans toutefois en être propriétaires (utilisation limitée). Ils peuvent être également propriétaires de certains jeux de données (convention de données).
- partenaires scientifiques : organismes de recherche participant techniquement et financièrement au projet. Ces entités sont souvent les propriétaires des jeux de données produits dans le cadre du programme.

Ces groupes d'utilisateurs ont des droits d'accès différenciés, croissants et emboîtés. Cela signifie par exemple que les partenaires financiers ont accès à plus d'informations que les partenaires extérieurs ou que les partenaires scientifiques possèdent tous les droits des deux autres rôles. Ces rôles sont, à l'heure actuelle, surtout utilisés pour le site web. Pour ce qui concerne le catalogues de métadonnée, ils ne sont utilisés que pour les équipes scientifiques afin d'avoir un accès restreint pour la validation des fiches. Le reste du catalogue est accessible au grand public. Pour ce qui concerne la plateforme websig, les comptes utilisateurs ne sont pas utilisés dans la mesure où ils ne seraient utiles que dans le cas de création de webapplication de travail (entre scientifiques) ou de diffusion restreinte de résultats (entre scientifiques et partenaires).

3e) Retour d'expérience sur l'utilisation et la maintenance des outils communs de l'OSR

La valorisation progressive des résultats obtenus au cours de ces trois dernières années de recherche laisse penser que ces outils seront de plus en plus sollicités. Le module statistique du site internet montre ainsi une croissance progressive des consultations (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

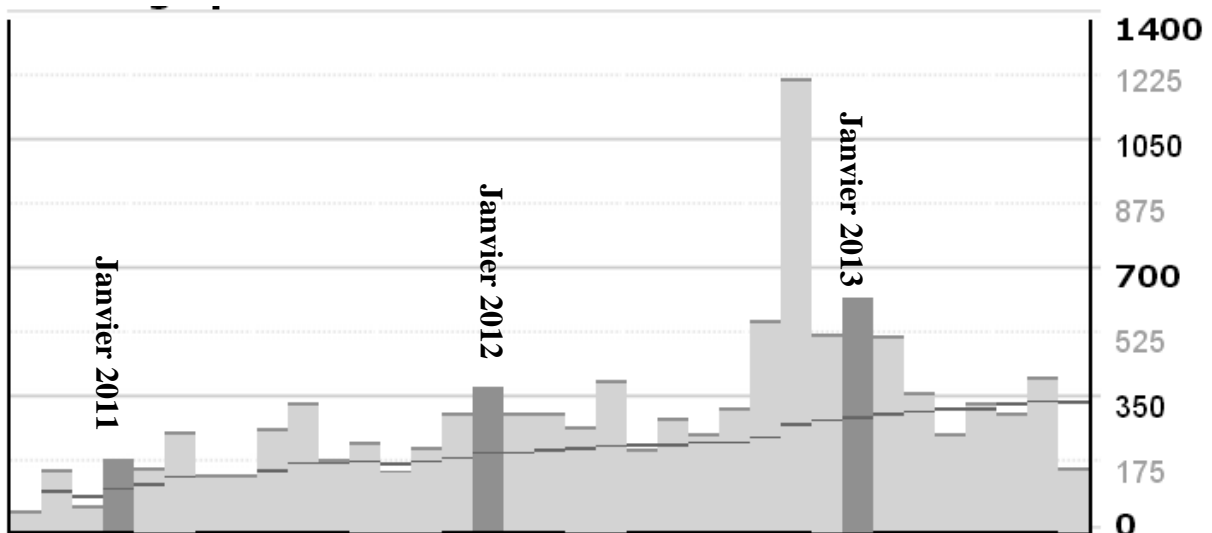


Figure 29 : Fréquentation du site internet de l'OSR au cours du triennal 2010-2013

En nombre de visite par mois. La valeur des consultations est faussée par les consultations d'administration, mais ces dernières étant régulières et constantes, la tendance à l'augmentation reste valable

La maintenance (vérification du bon fonctionnement, mise à jour du site internet, vérification des liens, modification des compte-utilisateur, etc...) de l'ensemble des outils demande une attention régulière. La fréquence de cette maintenance est hebdomadaire et représente un volume d'environ une journée de travail pour l'ensemble des outils. Au-delà de cette administration quotidienne, le rythme imposé par l'organisation du projet (rendus intermédiaires et finaux) implique des phases de mises à jour beaucoup plus importantes (saisie des métadonnées, création des webapplications).

3f) Perspectives et préconisations

Dans le cadre d'un observatoire, ces outils de gestion des données sont indispensables. La poursuite de leur maintenance est donc à prévoir dans les prochaines programmations de l'OSR. La poursuite de cette action se justifie aussi en partie par le décalage temporel entre les travaux scientifiques et la valorisation des résultats. Il est donc important d'engager dès à présent une réflexion sur les conditions de la pérennisation de ces outils qui comprend :

- les moyens humains nécessaires à la maintenance à court terme (prochaine programmation, couplage avec des tâches de traitement SIG prévus dans les actions) et à long terme (hébergement, gestion par du personnel permanent vs externalisation).
- le public cible de ces outils et la confrontation entre avantages et bénéfices de ces outils et des moyens pour leur maintien.

Techniquement, les pistes d'action pour l'avenir sont :

- de mettre en place des outils pour la gestion des données non géographiques, spécialement les chroniques,
- d'évaluer l'opportunité d'une gestion plus centralisée (notamment au niveau de l'hébergement) des différents outils.

IV) Conclusions générales

L'OSR est un programme de recherche opérationnelle engagé depuis l'automne 2009. Sa vocation d'observatoire s'est réellement concrétisée au cours de ce deuxième programme (2010/2013).

En tant qu'observatoire en environnement, la principale mission de l'OSR est de suivre des paramètres permettant de mieux comprendre la dynamique sédimentaire du fleuve. Or le Rhône est un objet d'étude complexe. Sa taille (500 km de linéaire depuis l'aval du lac Léman jusqu'à la mer, avec un débit moyen en Arles d'environ 1700 m³/s) demande des moyens humains et techniques importants pour l'acquisition de données. Son degré d'anthropisation et la diversité de ses affluents rendent l'interprétation des résultats parfois délicate. Ainsi l'étude de l'histoire du cours d'eau et de ses aménagements via une rétro-observation constitue un préalable nécessaire permettant de fixer les bases de cet observatoire. Ces connaissances amènent aussi à des questionnements prospectifs sur divers aspects, comme la restauration des dynamiques hydro-sédimentaires ou le renouvellement des pratiques d'entretiens et de gestion de la voie d'eau et des aménagements.

A l'issue de ces 4 années de travaux, une grande partie des données doit encore être interprétée pour fournir tous les résultats attendus. Ces données doivent notamment être discutées et échangées entre tous les scientifiques et les acteurs impliqués, quelle que soit leur discipline de spécialité, afin d'avoir une vision totalement intégrée du système, des mécanismes qui le régulent et des dynamiques passées et présentes, et ce pour aborder les dynamiques futures. Après 4 années de fonctionnement, plusieurs acquis majeurs peuvent d'ores et déjà être soulignés.

- **L'histoire sédimentaire du fleuve a pu être précisée.** Les principaux mécanismes d'évolution du cours d'eau étaient connus dans leurs grandes lignes (incision du chenal des Vieux-Rhône, engraissement des marges, blocage des avulsions au niveau du delta), mais les études historiques ont permis de quantifier ces phénomènes et de mieux les cadrer temporellement et longitudinalement. Il faut retenir par exemple l'importance des impacts physiques des aménagements dits « Girardon » (aménagement du XIX/XXe s. lié à la navigation) qui ont beaucoup contribué à l'incision du chenal (incision moyenne sur presque tout le continuum de près de 1,7 m entre Lyon et la mer). Ces derniers ont eu plus d'effets sur la morphologie du lit mineur que les aménagements hydroélectriques qui ont été réalisés dans un contexte morphologique déjà sans doute bien figé. Il est probable qu'ils aient encore contribué à renforcer la fixation du système par une réduction de la fréquence des crues morphogènes. Ces modifications se sont accompagnés également de nombreux prélèvements dans le lit du fleuve (près de 900 000 m³/an jusqu'en 1992 selon l'EGR) et sur ses affluents. Ces incisions ont été accompagnées par un stockage massif de sédiments dans les ouvrages dits « Girardon » et sur les berges (environ 90 Mm³). Cette sédimentation sur les

marges est de 3,5 m (sédimentation moyenne sur les unités de sédimentation de type casier). L'étude historique de ces stocks a permis de dresser une géo-histoire de la pollution aux PCB qui montre qu'il s'agit d'une pollution historique dont le pic (décennie 80-90) a été dépassé. Elle est encore active en raison d'un transfert progressif des stocks pollués qui peuvent être repris partiellement tout au long du continuum et elle tend à se réduire sur le Haut-Rhône.

- **Les connaissances relatives à la bathymétrie et à la granulométrie du chenal ont pu être actualisées** via la synthèse de données existantes et la réalisation de campagnes de mesure sur l'ensemble du corridor. Des données avaient été collectées et synthétisées dans l'Etude Globale Rhône, mais elles n'avaient jamais été réactualisées et restaient partielles. **Nous disposons aujourd'hui d'un état des lieux relativement solide qui permet de dresser un premier diagnostic morpho-sédimentaire du fleuve.** Le lit du Rhône se caractérise par une charge de fond qui ne connaît pas d'affinement granulométrique significatif entre le Léman et la mer et qui est essentiellement héritée, avec des tronçons caractérisés par un pavage important (hormis peut être sur le Haut-Rhône). Seuls quelques secteurs présentent des évolutions qui témoignent d'un transit de charge grossière composée de graviers et de galets, comme l'aval de la confluence de l'Ain ou encore de l'Ardèche. Aujourd'hui c'est avant tout un flux de sédiments plus fins (sables, limons) qui semble en transit. Celui-ci est amené à se déposer dans les secteurs de moindre hydraulicité lors de petites crues et à être remis en mouvement lors de crues de plus grande intensité. Cette dynamique explique les principaux changements morphologiques observés aujourd'hui à l'échelle pluri-annuelle, une dynamique valable aussi pour l'embouchure où le flux de sable s'observe encore, essentiellement lors des crues. La morphologie de cette embouchure est en évolution, avec l'avancée de la flèche sableuse de Piémanson.
- **Un réseau de suivi en continu des flux de matières en suspension (MES) et des principaux contaminants (métaux, Hg, PCB, radionucléides) est aujourd'hui opérationnel.** Certaines pièces de ce réseau de mesure existaient avant l'OSR mais le programme a permis d'intégrer ces stations à celles installées dans le cadre du projet. Le Rhône dispose aujourd'hui de deux stations de mesure en continu équipées de préleveurs automatiques qui permettent de suivre l'évolution des concentrations de MES et de contaminants: à Jons (exutoire du Haut-Rhône, à l'amont de l'agglomération lyonnaise) et en Arles (station SORA, à l'amont du Grand Rhône). Au-delà de ces deux stations, l'OSR collecte des données turbidimétriques pour comprendre la répartition longitudinale des flux de MES sur le continuum rhodanien en lien avec ses affluents. Ces données proviennent de stations installées sur le Rhône ou certains affluents soit par l'OSR (Isère à Romans-sur-Isère ; Saône à Lyon ; Arve dans la région de Genève, Grand Rhône au niveau des Salins-de-Giraud), soit par les partenaires du programme (CNR et EDF, sur le Haut-Rhône, le Rhône moyen et la Durance). Les deux stations permanentes permettent d'établir des bilans de flux annuels alors que le

réseau turbidimétrique permet de comprendre les dynamiques liées à des événements hydro-sédimentaires naturels ou anthropiques comme la chasse de mai 2008 ou le suivi des chasses du Haut-Rhône de 2012. Ce réseau a également permis l'établissement d'un premier bilan des transferts de MeS et de contaminants. Réalisé sur la base de toutes les données disponibles, il revient sur les estimations précédentes et démontre qu'il est nécessaire d'acquérir des données plus précises sur des affluents majeurs (affluents cévenols, Durance, Isère). Dans certains cas, ces données existent et devraient pouvoir être intégrées à l'OSR via des accords de partenariat. A terme, ce réseau sera l'outil indispensable pour comprendre la dynamique des flux sur tout le linéaire du Rhône. Les résultats obtenus par exemple lors de la chasse de Mai 2008 ou des Chasses de 2012, tant sur les estimations de flux que sur l'origine des particules et des contaminants, montrent bien en effet que le transfert durant un événement résulte, dans beaucoup de cas, de l'imbrication et de l'interaction de plusieurs événements naturels ou artificiels qui peuvent être très difficiles à dissocier. Sur ce point, les travaux menés sur la caractérisation des sources particulières ont clairement démontré l'intérêt de certains marqueurs géochimiques pour mener à bien cette distinction.

- **La mise en place d'outils numériques a permis de poser les premières bases d'une gestion structurée des informations et des données scientifiques produites dans le cadre du programme sur le Rhône.** Un catalogue de métadonnées offre la possibilité de rechercher les jeux de données produits par le collectif ou collectés dans le cadre du projet (grandes bases de données nationales ou rhodaniennes à l'image de la BDT-Rhône). Des services de consultations géographiques (plate-forme webSIG) ont été mis en place afin de visualiser cartographiquement les principaux résultats du programme. L'ensemble des données est bancarisé et sauvegardé pour permettre leur réutilisation ultérieure et une attention particulière a été apportée à la structuration des données, permettant ainsi un croisement d'informations thématiquement diverses.
- **L'OSR a permis de tester des équipements et de développer des protocoles de mesure.** D'importants efforts ont été effectués pour s'assurer que les données acquises sur tout le linéaire soient intercomparables dans le temps, et ce quel que soit l'organisme en charge de ces acquisitions. Ceci est maintenant le cas pour toutes les analyses granulométrique grâce à une étude comparative des différents granulomètres lasers utilisés. De la même manière, les travaux montrent qu'il est fortement souhaitable d'acquérir des paramètres de bases (granulométrie, carbone organique particulaire) avec la mesure des contaminants, paramètres qui permettent de normaliser ces valeurs et de les comparer sans biais. Différents instruments de mesure ont été testés sur le terrain : préleveurs pour la charge de fond en transit ou les sédiments du fond du chenal, construction et installation de trappes à sédiments, utilisation de techniques d'imagerie acoustique pour déterminer la granulométrie... Quelques tests n'ont pas été concluants mais ils ont tous permis de préciser les meilleures stratégies à adopter pour une mesure

efficace (en termes de résultats et de moyens financiers) des dynamiques sédimentaires. Ces avancées font véritablement de l'OSR un programme innovant permettant de définir les suivis de demain.

- **L'OSR à contribuer largement à la construction d'un modèle hydrosédimentaire à l'échelle du Rhône.** Ces premiers travaux ont concerné des aspects spécifiques nécessaires (développement du code, meilleure géométrie du fleuve, premières validations) avant d'aborder la grande échelle. Les nombreuses données acquises vont permettre d'améliorer encore ce modèle qui va être mis en place progressivement dans les années à venir. Cette modélisation est un objectif majeur du projet, et un effort tout particulier est fait sur ce point dans le prochain programme afin de fédérer toutes les compétences vers ce but et pouvoir envisager de tester des scénarios en termes d'évolution et de choix d'aménagement.

La deuxième programmation de l'OSR a donc permis de construire un système d'observation opérationnel, d'acquérir les données permettant d'avoir une vision globale du fonctionnement du fleuve et de fédérer les équipes de recherche. Elle a également fourni les premiers éléments opérationnels permettant d'engager des actions réparatoires. Citons à ce titre l'étude permettant de prioriser les secteurs susceptibles de faire l'objet de travaux de réélargissement du lit. Ainsi dans le schéma d'orientation stratégique de l'OSR (figure 1), une première étape importante a été franchie. Elle a permis d'obtenir des éléments objectifs et quantifiés qui seront une base partagée pour investir des questionnements répondant directement aux principales interrogations des acteurs du Rhône. Ces questions demandent souvent des connaissances précises et localisées, difficilement interprétables sans des données de contexte.

Le suivi des flux de MES et de contaminants sera évidemment poursuivi dans les prochains programmes de l'OSR afin de connaître les flux de matières et de polluants sur des séries temporelles pluriannuelles ayant du sens à l'échelle du réseau rhodanien mais l'équipe investira également les champs qui permettront à termes de répondre aux principaux enjeux de gestion : évaluer le potentiel écologique du fleuve, paramétrer et suivre des opérations de restauration, mieux prendre en compte le risque inondation en relation avec la dynamique des sédiments... La poursuite des actions de l'OSR permettra de consolider le réseau de mesure des flux et de tester des scénarios spatialisés d'évolution du chenal, tout particulièrement via la modélisation des processus sédimentaires.

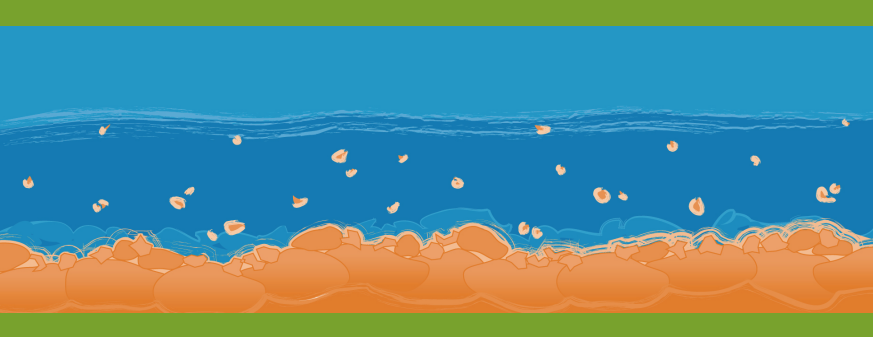
C'est dans cette perspective qu'ont déjà été élaborées les actions des prochains programmes OSR3/2014 et OSR4/2015-2018. Parmi les évolutions à souligner, l'OSR se restructura autour de quelques actions circonscrites afin de faciliter plus encore les échanges de données et les interactions entre chercheurs, et entre chercheurs et acteurs. Certaines actions seront par ailleurs ciblées sur des secteurs où des enjeux ont été exprimés (en termes de gestion du transport solide ou d'opérations de restauration) et où la masse critique de données pour répondre aux questions opérationnelles a été atteinte : confluence de l'Ain et entrée amont de l'agglomération lyonnaise (secteur Ain et Lyon-Miribel), de Péage-de-Roussillon et de Donzère-Mondragon, zone de l'interface fleuve/mer, haut Rhône avec la gestion des sédiments de l'Arve.

Les investissements scientifiques engagés sur ces sites se feront en lien avec les recherches existantes par ailleurs : les programmes RhonEco, Nappes-rivière et les différentes actions de recherche engagées par l'Observatoire Hommes – Milieux Vallée du Rhône (et plus spécifiquement le travail engagé sur la caractérisation morphologique et écologique des casiers dits « Girardon »). Pour cela cinq axes ont été définis : Géométrie du chenal et charge de fond, Morphologie et sédimentation du lit majeur, Réseau de suivi des flux, Sources et devenir des contaminants, Outils numériques et modélisation. Le prochain projet (OSR3) servira de transition entre deux programmations triennales en vue de continuer l'analyse des données acquises et préparer le programme suivant (OSR4/2015-2018). Les actions qui seront préférentiellement lancées dans un premier temps concernent la poursuite des mesures de flux de MES et de contaminants et l'approfondissement des connaissances des patrons de sédimentation des marges en vue de modéliser les dynamiques passées mais surtout d'évaluer les potentialités de restauration de ces milieux alluviaux. L'amélioration de la connaissance des caractéristiques du chenal et de la charge de fond est également envisagée.

V) Liste des figures

Figure 1 : Schéma d'orientation stratégique de l'OSR (sept. 2010).....	11
Figure 2 : Liste des actions scientifiques du triennal OSR2	14
Figure 3 : Profils en long de 1897-1907 (bleu), de 1953-1999 (rouge) et de 2008-2010 (vert) découpés de haut en bas du PK 0 au PK 100, du PK 100 au PK 190 et du PK 190 au PK 320	18
Figure 4 : Cumul des évolutions verticales du fond du lit observées tous les 500 m entre deux dates sur le Rhône de Lyon à la mer pour 3 périodes	21
Figure 5 : Zoom sur le cumul des évolutions verticales du fond du lit du Rhône pour les périodes 1 et 2	21
Figure 6 : Organisation longitudinale de la morphologie du fond du lit du Rhône observée à partir de l'analyse de la variabilité de l'altitude à l'échelle locale (tous les 500 m)	23
Figure 7 : Mesure des D50 sur les bancs et dans le chenal au niveau des têtes de bancs au droit du banc.....	25
Figure 8 : Répartition longitudinale des valeurs granulométriques médianes des échantillons prélevés dans le chenal du Rhône	26
Figure 9 : Estimation des dépôts sédimentaires sur les marges du Rhône répartis par secteur	31
Figure 10 : Localisation des 9 sites de prélèvements à proximité du chenal actif du Rhône. L'emplacement de la carotte au sein de l'annexe fluviale est indiquée (cercle noir)	32
Figure 11 : Modèles d'âge-profondeur des 9 sites étudiés dans cette étude. Plus le pente du modèle est verticale, plus le remplissage sédimentaire est rapide. A titre de comparaison, le modèle du lac de Paladru (PAL) est présenté	34
Figure 12 : Modèle global de répartition des PCB à l'échelle du fleuve Rhône pour les années 1990 et 2000 (panel A) et après 2005 (panel B)	36
Figure 13 : Cartes de localisation des stations de mesures OSR et partenaires fonctionnelles et prévues	40
Figure 14 : Flux de MeS (millions T), Hg et PCB (Kg) évalués pour 2011 et 2012 aux stations d'Arles et de Jons	43
Figure 15 : Spectres granulométriques des MeS à Arles et à Jons (pour chaque site, deux échantillons en débit normal et un en crue).....	44
Figure 16 : Concentrations en Pb et Zn en fonction des concentrations en Sr mesurées dans les MeS et laisses de crue durant la crue de Novembre 2011	47
Figure 17 : Analyse comparative des MES du suivi annuel et du suivi des chasses du Haut-Rhône	49
Figure 18 : schématique des flux cumulés dans le réseau hydrographique, pendant la crue du Rhône de mai-juin 2008, première et deuxième phase	51
Figure 19 : Déploiement de préleveur à l'aide d'un camion grue à partir du pont Carnot	53
Figure 20 : Morphologie en ombrage de l'embouchure (février 2013) et b) interprétation géomorphologique du fonctionnement de l'embouchure.....	55
Figure 21 : Simulation des chasses du Haut-Rhône à l'aide du modèle.....	58
Figure 22 : Schéma présentant la démarche méthodologique mise en œuvre pour l'élaboration du schéma directeur de réactivation de la dynamique fluviale des marges du Rhône	61
Figure 23 : Schéma illustrant le modèle de croisement des données pour aboutir à la première carte de synthèse.....	63
Figure 24 : Exemple de carte de synthèse de la faisabilité.....	64

Figure 25 : Concentrations en 7 PCB _i , Zn, Cu et Cd dans les parties aériennes (PA) racinaires (PR) et fruits/fleurs (FF) des végétaux ayant poussé pendant 70 jours sur une matrice sédimentaire (TRS : Mas des Tours ; Arles)	65
Figure 26 : Schéma du cycle de vie d'une donnée numérique scientifique.....	66
Figure 27 : Exemple de web-application en cours de développement (visualisation des données historiques).....	69
Figure 28 : Fréquentation du site internet de l'OSR au cours du triennal 2010-2013	70



RhôneAlpes



Observatoire des Sédiments du Rhône

École normale supérieure de Lyon
Sites Descartes – 15, parvis René Descartes
BP 7000 – 69342 Lyon Cedex 07
www.osr-rhone.org

Contact : contactosr@graie.org