



HAL
open science

Recommandations pour la quantification des flux particulaires sur le Rhône et ses affluents

Jérôme Le Coz, Marina Coquery, H. Angot, M. Launay, O. Radakovitch, S.
Gairoard, F. Eyrolle-Boyer, Cecile Antonelli

► **To cite this version:**

Jérôme Le Coz, Marina Coquery, H. Angot, M. Launay, O. Radakovitch, et al.. Recommandations pour la quantification des flux particuliers sur le Rhône et ses affluents. [Rapport de recherche] irstea. 2013, pp.20. hal-02601930

HAL Id: hal-02601930

<https://hal.inrae.fr/hal-02601930v1>

Submitted on 16 May 2020

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.

Recommandations pour la quantification des flux particuliers sur le Rhône et ses affluents



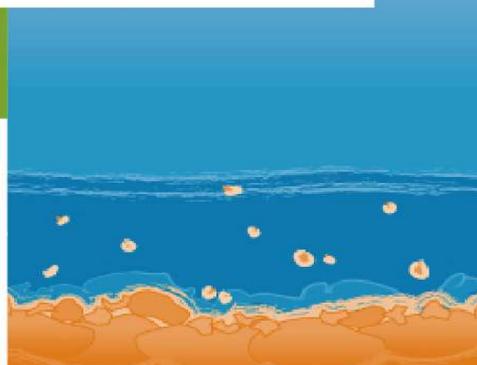
Action 6

Version Finale Septembre 2013



2
0
1
3

S
E
M
E
S
T
R
E
7



Rédacteurs	Equipe de recherche
J. Le Coz, M. Coquery, H. Angot, M. Launay	Irstea Lyon-Villeurbanne
O. Radakovitch, S. Gairoard	CEREGE Aix en Provence
F. Eyrolle-Boyer, C. Antonelli	IRSN Cadarache

Recommandations pour la quantification des flux particuliers sur le Rhône et ses affluents

Introduction

Ce document présente une synthèse des recommandations actuelles de l'Observatoire des sédiments du Rhône (OSR) pour la poursuite et le développement futur du réseau d'observation des flux particuliers sur le Rhône et ses affluents. L'objectif de ce réseau de stations permanentes et temporaires est de fournir les mesures nécessaires à une quantification des flux de matières en suspension et des substances d'intérêt qu'elles transportent. Dans les limites des moyens humains et financiers disponibles, on recherche une couverture spatiale en adéquation avec les enjeux et les points-clés du réseau hydrographique, tout en déployant des techniques de mesure présentant un optimum en terme d'efficacité (rapport coût-incertitudes). Nous proposons ainsi une stratégie d'ensemble pour la mesure des flux d'eau et de matières en suspension (MES), les prélèvements de MES pour analyses physico-chimiques, et les analyses des substances adsorbées et absorbées dans ces MES. L'exploitation d'un tel réseau d'observation est rendue possible par la mobilisation d'un certain nombre d'outils et de méthodes transversaux.

Les présentes recommandations opérationnelles s'appuient, sans les re-développer, sur les résultats et conclusions obtenus par l'OSR entre 2009 et 2013, à partir de recherches bibliographiques, de l'expertise d'expériences d'observation antérieures sur le bassin du Rhône, et de sa propre expérience en termes d'observation de long-terme, événementielle, et de comparaison et validation de techniques et de méthodes. Certaines de nos propositions sont classiques, d'autres originales et innovantes. Elles sont en partie généralisables à d'autres hydro-systèmes similaires, mais leur mise en œuvre est déterminée par la configuration du Rhône et de ses affluents, leurs caractéristiques de forte variabilité lors des crues, et la présence de stations d'observation déjà existantes, en particulier les stations hydrométriques et turbidimétriques de la CNR, des SIG, de l'Etat et d'EDF, ainsi que les réseaux de surveillance de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse (AE RMC).

1 Techniques de mesure et de quantification des flux

1.1 Débit

La quantification précise des flux particuliers nécessite de disposer d'une chronique de débit d'eau, fiable et à un pas de temps suffisamment fin pour capturer la dynamique des événements hydrologiques. Sur le Rhône et ses affluents, nous disposons d'un réseau de

stations hydrométriques suffisamment dense et fiable, avec acquisition des niveaux d'eau au pas de temps variable adaptatif. Différents producteurs rendent disponibles ces données : CNR, DREAL Rhône-Alpes, SPC-Grand Delta, EDF, SIG, OFEV¹. Si le pas de temps moyen journalier est inadapté, le pas de temps moyen horaire est souvent un bon compromis entre la taille des fichiers de données à manipuler et la résolution temporelle suffisante. Le pas de temps instantané variable (adaptatif) permet la description la plus fine des événements les plus importants.

Il n'existe pas toujours de station hydrométrique à proximité immédiate de la station de mesure des flux particulières considérée. C'est typiquement le cas de la station du Rhône à Jons, ainsi que le cas de différents affluents. Pour calculer les flux, il convient alors de modéliser le débit à la station, à partir des points de mesure situés en amont, ou en aval, et en tenant compte du temps de propagation hydraulique. A défaut, on peut établir des relations empiriques entre les deux stations. En plus de la vitesse variable de l'eau, la propagation dépend fortement de la conduite des aménagements du Rhône, en fonction du niveau de débit : en crue, les barrages s'ouvrent et une importante partie du débit est évacuée par les Vieux-Rhône. Le modèle hydraulique du Rhône, construit par l'OSR entre le Léman et la mer, et actuellement précisément paramétré entre le Léman et Lyon hors crues débordantes, est un outil bien adapté pour ce faire, puisqu'il tient compte de la gestion des ouvrages et est capable de combiner des écoulements issus de différents affluents. C'est l'outil utilisé pour calculer la chronique de débit à Jons, à partir des débits mesurés à Anthon, ou la somme des débits mesurés à Lagnieu (Rhône), Port-Galland (Ain) et Tignieu-Jamezieu (Bourbre).

La plupart des stations hydrométriques sur le Rhône et les affluents fonctionnent sur le principe d'une courbe de tarage (relation niveau-débit construite à l'aide de jaugeages), mais un certain nombre de stations situées dans des tronçons influencés par les aménagements aval fonctionnent avec une courbe de tarage à deux niveaux. Les incertitudes sur les débits produits sont variables en fonction des stations, de la gamme de débit, du type de courbe de tarage, de leur stabilité et sensibilité, et de la densité et qualité des jaugeages disponibles. Il est recommandé de prendre contact auprès du gestionnaire de chaque station utilisée, pour avoir des informations détaillées sur la fiabilité et les incertitudes associées aux chroniques de débit. Il est important de noter que le débit étant une grandeur calculée à partir de la mesure en continu des niveaux d'eau (à l'aide d'une courbe de tarage) et non directement mesurée, les chroniques sont susceptibles d'être révisées et ré-actualisées. Mieux vaut donc revenir régulièrement à la source (producteur), plutôt que de stocker et ré-utiliser des données anciennes.

L'incertitude communément admise sur un débit instantané issu d'une courbe de tarage de bonne qualité est de $\pm 10\%$. Des travaux sont en cours à Irstea, en collaboration avec le SCHAPI², la CNR et EDF-DTG³, afin de développer et valider des méthodes de quantification des incertitudes sur les jaugeages (Le Coz et al., 2012 et 2013) et les hydrogrammes issus de courbes de tarage (Le Coz et al., 2013). L'incertitude sur les flux d'eau moyens annuels et inter-annuels est en général plus faible, car les erreurs aléatoires sont alors lissées dans la moyenne. Le bouclage de bilans d'eau sur le réseau hydrographique est un bon moyen de quantifier ces incertitudes. L'OSR a réalisé de tels bilans annuels sur le Rhône de Valence à Arles (Linne, 2011) et du Léman à Ternay (Launay, 2013). Ces bilans sont typiquement bouclés à 2 à 6 % près, avec un biais négatif qui s'explique bien par les apports intermédiaires des sous-bassins non-jagés. Ces bilans

¹ Sigles : Compagnie nationale du Rhône, Direction régionale de l'environnement, de l'alimentation et du logement, service de prévision des crues, Electricité de France, Services industriels de la ville de Genève, Office fédéral de l'environnement (Suisse)

² Service central hydro-météorologique d'appui à la prévision des inondations

³ Division Technique Générale

réalisés en liaison avec les producteurs ont parfois permis d'améliorer la gestion des courbes de tarage, comme pour la station du Rhône à Anthon par exemple.

1.2 Concentration en matières en suspension (MES)

Après le débit, la concentration en matières en suspension (MES) est également un paramètre qu'il faut mesurer ou reconstituer en continu pour pouvoir quantifier précisément les flux particuliers. A part pour la station d'Arles où des prélèvements suffisamment fréquents en crue peuvent être réalisés, la technique privilégiée par l'OSR pour mesurer des chroniques continues de concentration en MES est la station turbidimétrique avec prélèvements automatiques asservis sur seuil de turbidité. Ces prélèvements, une fois filtrés et pesés au laboratoire, permettent l'établissement de relations turbidité-concentration en MES. L'installation et l'exploitation d'une telle station a fait l'objet d'un protocole diffusé par l'OSR (Thollet, 2012).

L'avantage principal d'un turbidimètre est sa haute fréquence d'acquisition avec un pas de temps recommandé de 10 ou 15 minutes pour des mesures moyennes. Durant la chasse du Haut-Rhône de juin 2012, certains turbidimètres partenaires programmés au pas de temps horaire instantané ont raté une partie de la dynamique sédimentaire. Contrairement aux mesures directes comme la filtration-pesée ou la densimétrie (pycnomètre), la turbidité est un paramètre optique sensible à d'autres facteurs d'influence que la concentration, en premier lieu la taille des particules. L'étalonnage du turbidimètre est spécifique d'un site, d'un capteur, et peut varier d'un événement à l'autre : il doit donc être établi et vérifié sur des prélèvements réguliers, en particulier lors des crues. Des recherches réalisées par l'OSR (Thollet et al., 2013) ont montré que la sensibilité de la réponse linéaire du turbidimètre est inversement proportionnelle au diamètre des particules en suspension. Ceci s'explique par le fait que le turbidimètre mesure des concentrations surfaciques de particules, et non des concentrations massiques : il est donc 10 fois plus sensible à des limons de diamètre 10 μm qu'à des sables de diamètre 100 μm , qui opposent 10 fois moins de surface que les limons, pour une même masse, si l'on suppose que toutes les particules sont assimilables à des sphères. Pour des concentrations faibles, typiquement inférieures à 100 mg/L, la réponse du turbidimètre peut ne plus être linéaire, mais sigmoïde, ce qui appelle un étalonnage adapté (Launay, 2013).

Un des principaux problèmes pour la mesure comme pour la modélisation des flux de MES vient du mélange des eaux à l'aval des confluences avec les affluents, rejets ou canaux. En effet, la distance nécessaire au bon mélange et donc à l'homogénéisation des concentrations dans toute la section en travers est souvent très importante, de l'ordre de kilomètres voire de dizaines de kilomètres. Cette distance peut être évaluée par différentes formules (Launay, 2013). Il est utile de réaliser des campagnes de prélèvements distribués dans la section, pour différentes situations hydrologiques, afin de vérifier l'homogénéité de la section des stations de mesure turbidimétrique. Par exemple, de telles campagnes ont permis de vérifier le bon mélange en crue de la station de la Saône à Lyon-St-Georges, ainsi que de la station du Rhône à Jons, sauf en cas de crue de l'Ain durant la chasse du Haut-Rhône. Il est alors possible de calculer les flux en tenant compte de la distance de mélange et de la répartition des débits dans le réseau hydrographique. Ici encore, le modèle hydro-sédimentaire du Rhône est un outil utile pour appliquer des règles de mélange. Il pourra être intéressant d'y implémenter des distances de mélange après les confluences.

La mesure des concentrations en MES en continu par les techniques décrites ci-dessus reste de loin la façon la plus précise de quantifier les flux particuliers. Cependant, les mesures sont souvent absentes dans le passé, et pour un certain nombre d'affluents et de points du réseau. Il est alors nécessaire de chercher à reconstituer les flux de MES, en fonction d'autres données disponibles, en premier lieu les prélèvements isolés de MES, les

débites, mais aussi les forçages météorologiques et les données d'occupation des sols. La technique de la courbe de tarage débit-MES est la plus communément utilisée car la plus facile à mettre en œuvre. Les tests réalisés sur la station de l'Arve à Genève (Launay, 2013) montrent que l'utilisation d'une courbe de tarage, comme l'interpolation des prélèvements réalisés par l'OFEV tous les 5 jours en moyenne entre 1965 et 2003, ne produit qu'une reconstitution très médiocre, et fortement sous-estimée, des flux mesurés en continu par la station OSR en 2012-2013. Une nouvelle technique de calage de la courbe de tarage pour mieux reproduire les flux a été proposée, mais rien ne remplace la mesure turbidimétrique en continu.

Pour évaluer les flux moyens inter-annuels issus des différents affluents, l'analyse spatiale peut être un outil intéressant. Des essais ont été réalisés sur le bassin du Rhône, avec des méthodes à indicateurs spatialisés (méthode PESERA - Delmas et al., 2009 - dérivée de la classique USLE, Universal Soil Loss Equation) permettant de quantifier des flux moyens exportés, et avec la méthode originale développée par l'OSR (Bertrand, 2009) qui a pour objectif de hiérarchiser qualitativement la production des sous-bassins. Ces analyses s'appuient sur le croisement de couches d'indicateurs d'occupation du sol (géologie, orientation, pente, couverture, etc.), de forçages climatiques (précipitations, fonte, etc.) et de connectivité au réseau hydrographique. Ici encore, la comparaison des flux quantifiés par la méthode PESERA aux flux mesurés s'est avérée très médiocre. En revanche, l'analyse qualitative (Bertrand, 2009) a permis de retrouver la hiérarchie des affluents, et offre donc des perspectives pour justifier des analogies à faire entre sous-bassins sans mesure de flux de MES et sous-bassins instrumentés, afin d'établir des bilans inter-annuels.

La base de données relationnelle BDOH développée par Irstea a permis d'initier une base de données FluxOSR spécialisée pour les séries temporelles hydrologiques. Cette base de données a pour vocation de réunir les chroniques de débit, de MES et de teneurs en contaminants particuliers utiles au calcul des flux. Une prise en compte des incertitudes est prévue, ainsi que la gestion des lois de transformation (courbes de tarage, relations turbidité-MES, etc.).

1.3 Prélèvement des MES pour analyses physico-chimiques

Différentes techniques de prélèvement des MES en vue des analyses physico-chimiques ont été testées et comparées par les équipes de l'OSR. Les principales contraintes pesant sur le prélèvement des MES sont la représentativité de l'échantillon (pas de biais granulométrique notamment), la collecte d'une masse suffisante de particules quelle que soit la concentration en MES du cours d'eau (exemple : plusieurs dizaines de grammes secs pour les analyses de contaminants organiques ou de radionucléides), et les précautions pour prévenir la contamination par les récipients et le matériel de prélèvement, en fonction des substances recherchées. Plusieurs techniques testées, notamment la filtration grand volume, la cartouche poreuse ou les hydro-collecteurs en plastique, ne répondent pas à l'ensemble des contraintes pratiques et techniques rencontrées dans le suivi OSR.

Suite à l'expérience acquise par les équipes de l'OSR, la meilleure stratégie de collecte de MES pour analyse des contaminants (excepté les métaux traces) nous semble devoir s'appuyer sur deux techniques complémentaires : la centrifugation en continu et les pièges à sédiment en acier inoxydable (inox). Ces deux techniques permettent d'obtenir un échantillon intégratif sur une durée donnée (typiquement quelques heures pour la centrifugation et quelques jours à 1 mois pour le piège à sédiment).

En revanche, pour les métaux (excepté le mercure), la technique de prélèvement la plus adaptée afin d'éviter tout risque de contamination par le matériel de prélèvement reste le

prélèvement manuel ponctuel dans des contenants adéquats, suivi d'une filtration rapide sur le terrain ou au laboratoire.

La centrifugeuse mobile (sur remorque) s'est en effet avérée très utile pour documenter différents points du réseau en régime de base ou en crue et chasse, tandis que la centrifugeuse fixe de la station d'Arles a permis de collecter efficacement les échantillons du suivi fin bi-mensuel. Une centrifugeuse similaire a été mise en service à la station de Jons en juillet 2013. La centrifugation est une technique de référence, au sens où elle fournit des échantillons de MES présentant très peu de biais granulométrique (en comparaison aux prélèvements manuels), réalisés dans un temps court (quelques heures maximum), et minimisant les risques de contamination ou d'évolution pendant le stockage. C'est cependant une technique très coûteuse en investissement (~100 k€), en exploitation (temps de personnel qualifié, entretien et maintenance), ou en prestation (2 k€ par prélèvement).

Les pièges à sédiment inox utilisés et testés par l'OSR apparaissent comme une technique très complémentaire de la centrifugation pour compléter un suivi opérationnel des flux particuliers. En effet, il s'agit de préleveurs de MES intégratifs dans le temps et peu onéreux (1 k€) qui permettent d'étendre la couverture spatiale du suivi (plus de stations équipées), ainsi que sa représentativité temporelle (intégration de plus longues périodes, et de toutes les crues). Le modèle de piège utilisé correspond à un modèle couramment utilisé en Allemagne et documenté dans plusieurs études. Les prélèvements ainsi réalisés sont affectés d'un biais granulométrique, provenant d'une part, du fait que les fractions les plus fines ressortent en partie du piège, et d'autre part, du fait que des fractions grossières en suspension près du fond peuvent s'introduire dans le piège. Lors des opérations de chasse de barrages sur le Haut-Rhône de juin 2012 par exemple, les mesures de contaminants organiques et mercure sur les MES issues des pièges ont montré un biais systématique par rapport à celles issues de la centrifugeuse ou de prélèvements manuels (OSR-Action 8, 2013). Pour éviter ce deuxième effet, mieux vaut placer le piège dans une zone suffisamment exposée au flux de MES fines, mais à bonne distance du transport de charge grossière en suspension, c'est-à-dire à distance suffisante du fond du chenal actif. Les recherches menées par l'OSR (Angot et al, n.d.) ont montré que si les proportions entre modes granulométriques sont modifiées par rapport aux MES prélevées manuellement ou par centrifugation, en revanche tous les modes sont bien présents dans les échantillons des pièges. Une normalisation des teneurs par la granulométrie est donc possible pour rendre ces teneurs équivalentes à celles des MES prélevées par centrifugation. Une normalisation par la teneur en carbone organique particulaire (COP) est également possible. Dans des stations comme Jons, où le piège est placé en bord de section et n'est pas exposé au transport de suspension grossière (sables), il n'y a en général pas de différence significative entre les échantillons issus du piège et ceux issus de la centrifugeuse.

Au-delà de ces pièges à sédiment inox, le réseau de suivi peut être étendu dans le temps et dans l'espace en utilisant le matériau offert par les dépôts de sédiments en suspension, que ce soit les laisses de crue, les sédiments du fond, ou encore les carottages d'archives sédimentaires. La question de la normalisation des teneurs par la granulométrie et/ou le COP est alors encore plus sensible que pour les pièges, puisque des fractions grossières s'ajoutent à la phase porteuse de contamination dans ces types d'échantillons. De plus, se pose la question de la représentativité temporelle (dépôt principalement en fin d'événement) et surtout spatiale de tels prélèvements. La normalisation des teneurs doit permettre de résorber en partie l'hétérogénéité spatiale des prélèvements, puisque la variation de proportion de sables l'explique en bonne partie. Mais les conditions locales de dépôt, dans les annexes fluviales notamment, sont intéressantes à caractériser. Et surtout, l'origine des matériaux déposés doit absolument être étudiée, en fonction des apports amont et de leur mélange et propagation dans le réseau hydrographique. Typiquement, une carotte prélevée dans une annexe du Vieux-Rhône de Crépieux-Charmy contient des sédiments issus des crues de l'Ain, affluent rive droite peu mélangé à Jons, tandis que les MES des crues de la

Saône emprunte principalement le Vieux-Rhône de Pierre-Bénite. L'OSR a entamé des travaux pour croiser l'analyse des flux de MES avec l'analyse des archives sédimentaires et des dépôts.

Une base de données prélèvements et une échantillothèque sont deux précieux outils pour mettre à disposition les informations sur les prélèvements, et conserver du matériau qui permettra de futures analyses, en fonction des substances d'intérêt du futur, tant à l'opérationnel qu'en recherche.

1.4 Analyses physico-chimiques des teneurs dans les MES

L'OSR a réalisé l'analyse de différentes substances d'intérêt dans les MES, en sous-traitance ou en interne (métaux par le Cerege, radionucléides par l'IRSN, contaminants organiques, organo-étains et mercure par Irstea, granulométrie par tous). Le suivi plus large réalisé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse (réseau Eau et MES, 1991-2009) a également été étudié par Roux (2011) et Linne (2011).

Il apparaît en premier lieu important de mesurer systématiquement le COP et la distribution granulométrique pour chaque échantillon, afin de caractériser la phase porteuse et normaliser les teneurs lorsque des comparaisons sont prévues. Le COP est peu onéreux à analyser, et la granulométrie par diffraction laser est une technique maintenant répandue qui fournit une information détaillée sous forme de distribution granulométrique. Cette technique a fait l'objet d'une intercomparaison et de validations dans le cadre de l'OSR. Une méthode de traitement de l'information granulométrique et de normalisation des teneurs en contaminants a également été proposée (Launay, 2013).

Des discontinuités liées aux protocoles d'analyse sont susceptibles d'apparaître. Il est donc capital de documenter et conserver l'ensemble des protocoles de préparation des échantillons et d'analyse, et les performances associées de ces méthodes, même et surtout lorsqu'il s'agit d'un laboratoire sous-traitant, indépendamment de ses accréditations. Il est également utile de disposer des cartes de contrôle qualité des analyses ou des résultats de ces contrôles (i.e., justesse et fidélité). L'OSR a formalisé et rendu disponible l'ensemble des méthodes d'analyses et leurs performances associées (limites de quantification et incertitudes). Une excellente façon de tester et assurer la continuité des protocoles est de réaliser des comparaisons inter-laboratoires, par exemple en conservant des échantillons pour ré-analyse par le nouveau laboratoire prestataire, en cas de changement de marché, ou bien en utilisant des échantillons de sédiment de référence (i.e., matériaux de référence certifiés).

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 doit être limitée au regard des enjeux et de la probabilité de les retrouver dans la phase particulaire (hydrophobie pour les contaminants organiques et présence dans la phase dissoute). Un suivi plus sélectif de moins de substances mais avec des incertitudes réduites et des fréquences de quantification élevées pourra être plus pertinent que l'inverse, en fonction des enjeux.

2. Stratégie d'observation des flux particulières

Cette section reprend et actualise le document OSR de 2011, en l'étendant aux contaminants particuliers :

Propositions opérationnelles pour la constitution d'un réseau de mesure en continu des flux de MES à l'échelle du corridor rhodanien français, Le Coz et al., OSR (2011).

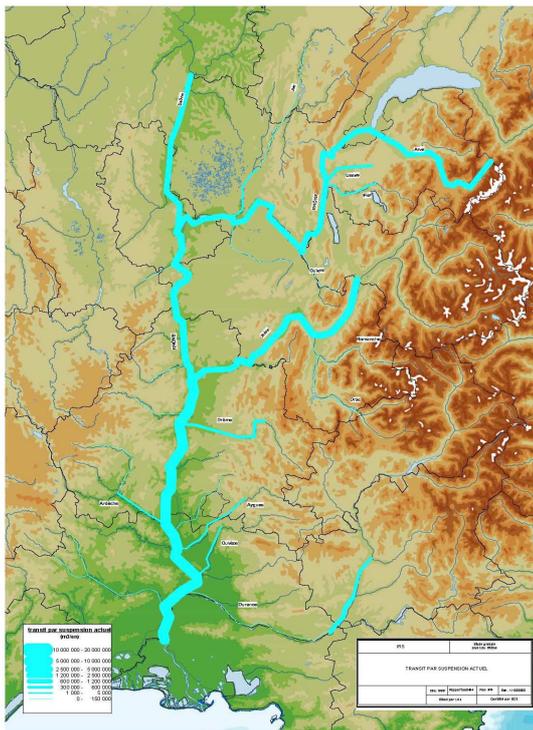
La mesure en continu des débits et concentration en MES, ainsi qu'une stratégie d'échantillonnage temporel centré sur les événements hydrologiques majeurs sont cruciaux pour une estimation précise des flux particuliers.

2.1 Propositions pour le développement du réseau d'observation

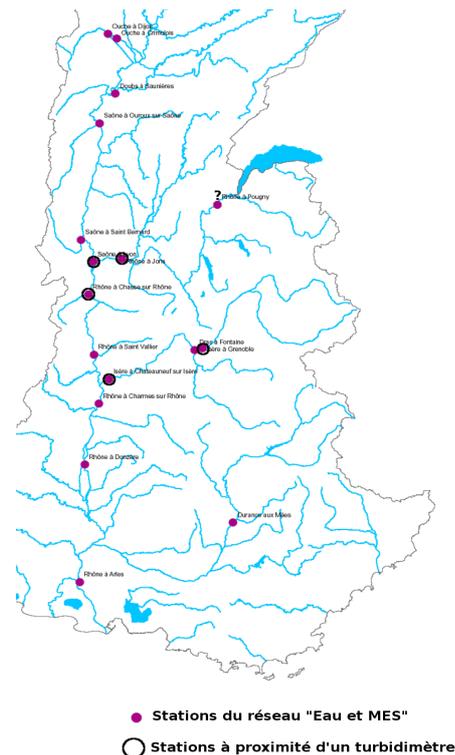
Démarche globale de bassin

Un réseau d'observation des flux particuliers doit tout d'abord être constitué en recherchant une cohérence hydrologique et sédimentaire à l'échelle du corridor rhodanien français (sans oublier le Rhône genevois et l'Arve). Il doit en particulier chercher à rendre possible l'observation et la quantification :

- des apports à la mer Méditerranée ;
- des apports des affluents les plus contributeurs en flux particuliers (cf. Fig.1a, Etude globale Rhône) : Arve, Saône, Isère, Durance... ;
- des flux de pollution apportés par l'agglomération lyonnaise et ses industries (points amont Rhône/Saône et points aval) ;
- de la propagation des flux le long du Rhône et de l'impact des aménagements sur ces flux.



(a)



(b)

Figure 1: (a) Flux de MES actuels estimés (étude globale Rhône, Hydratec – Sogreah – Minéa 2011)
(b) Réseau Eau-MES AE RM&C (Roux, 2011)

Contraintes techniques et opportunités

En regard des objectifs, la constitution d'un tel réseau d'observation doit se faire progressivement, en fonction des contraintes techniques (notamment liées au réseau hydrographique et des aménagements) et des opportunités (stations existantes) du bassin considéré :

- **sélection des points de mesure** de débit, concentration en MES et teneur en contaminants
 - cohérence spatiale et hydrologique
 - incertitudes à évaluer sur chacun des trois termes débit/concentration/teneur : échantillonnage spatial, échantillonnage temporel, mesure ponctuelle
- importance de l'**homogénéité spatiale des MES** dans la section de mesure (en concentration et en teneurs en contaminants)
 - principale difficulté : mauvais mélange en aval de confluences ou d'apports latéraux, et complexification par le jeu de répartition des débits dans les aménagements CNR et EDF
 - cette homogénéité peut être évaluée par des campagnes de prélèvement distribuées dans la section de mesure
- **turbidimètres et autres dispositifs de mesure des flux existants**
 - stations de mesure des flux et de recherche : Arles, Jons, bac Barcarin, Grenoble-Campus
 - stations turbidimétriques opérationnelles et stations d'alerte
 - stations hydrométriques pouvant sous conditions héberger un nouveau turbidimètre
- **données issues de prélèvements ponctuels**
 - concentrations MES issues du réseau Eau/MES Agence de l'Eau RMC et de campagnes ponctuelles (ex : suivi chasses Haut-Rhône par CNR, suivi crues basse-Isère ou Durance par EDF)
 - teneurs en contaminants sur support MES : réseau Eau/MES de l'Agence de l'Eau RMC 1991-2009 (Fig. 1b) : 17 points de prélèvement dont les suivants sur le corridor rhodanien et affluents principaux : 1-Pouigny 2-Jons 3-Saône St-Georges-Ile Barbe 4-Ternay/Chasse-sur-Rhône 5-Saint-Vallier 6-Isère Châteauneuf/Romans 7-Isère Grenoble 8-Drac Fontaine 9-Charmes-sur-Rhône 10-Donzère 11-Arles

Fonctionnement pérenne

Le rôle à jouer par les scientifiques dans le cadre de l'OSR porte sur la mise en réseau des dispositifs existants et l'établissement de propositions opérationnelles pour la constitution d'un réseau pérenne et homogène.

L'OSR pourra ensuite développer des partenariats (conventions) avec chaque producteur de données pour assurer l'exploitation en routine : accès aux enregistrements de débit et de concentration en MES, accès aux sites pour prélèvements/centrifugation en vue des analyses physico-chimiques.

L'OSR pourra également assurer l'homogénéité des pratiques métrologiques (étalonnage des turbidimètres et calcul des flux de MES notamment), la cohérence du réseau et des

choix de développement, la bancarisation des données dans une base FluxOSR avec convention juridique à établir avec les partenaires.

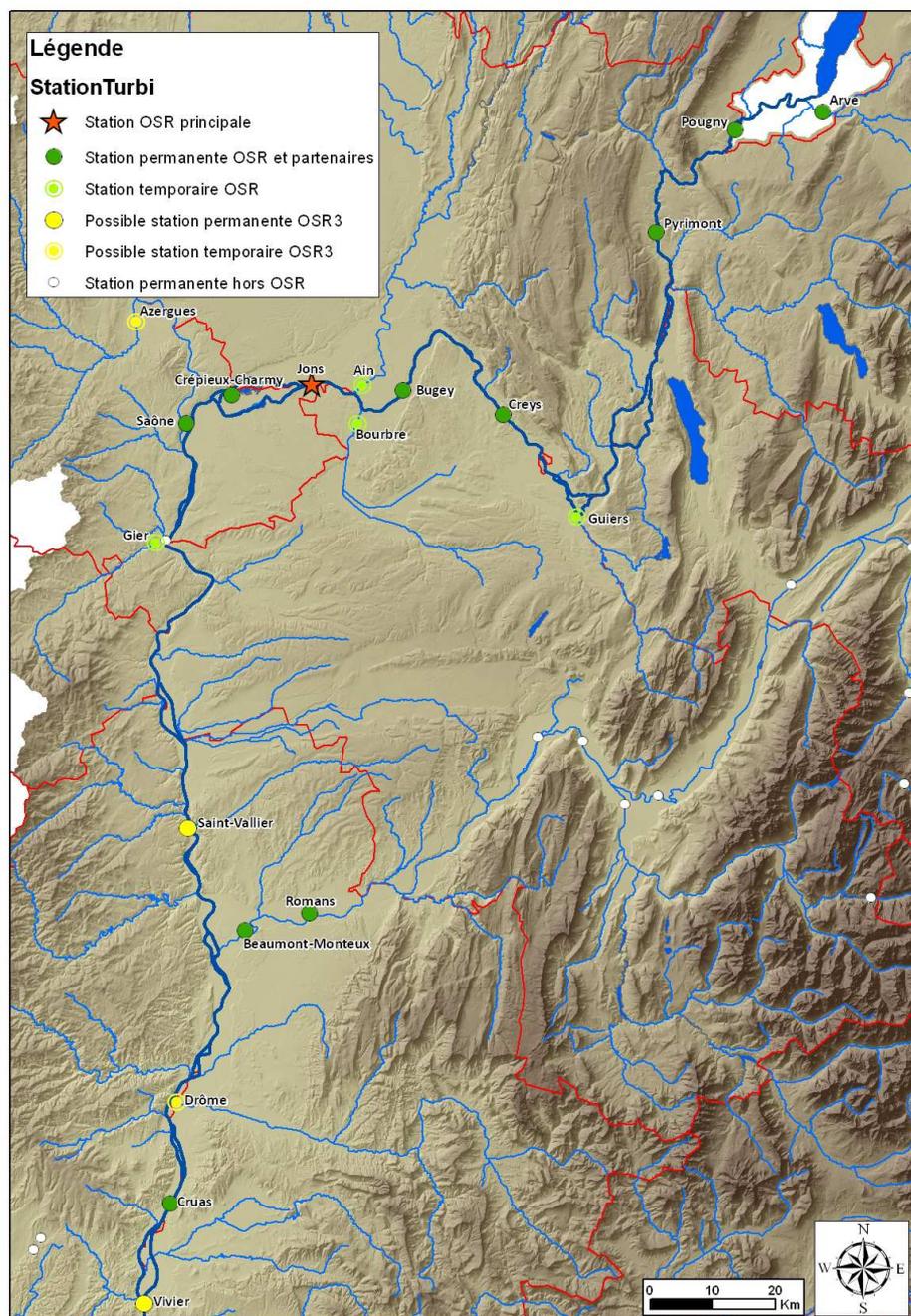


Fig.2a : Carte de localisation des stations d'observation des flux particulières sur le corridor du Rhône du Léman à Viviers, ainsi que les points de mesure potentiellement intéressants à équiper.

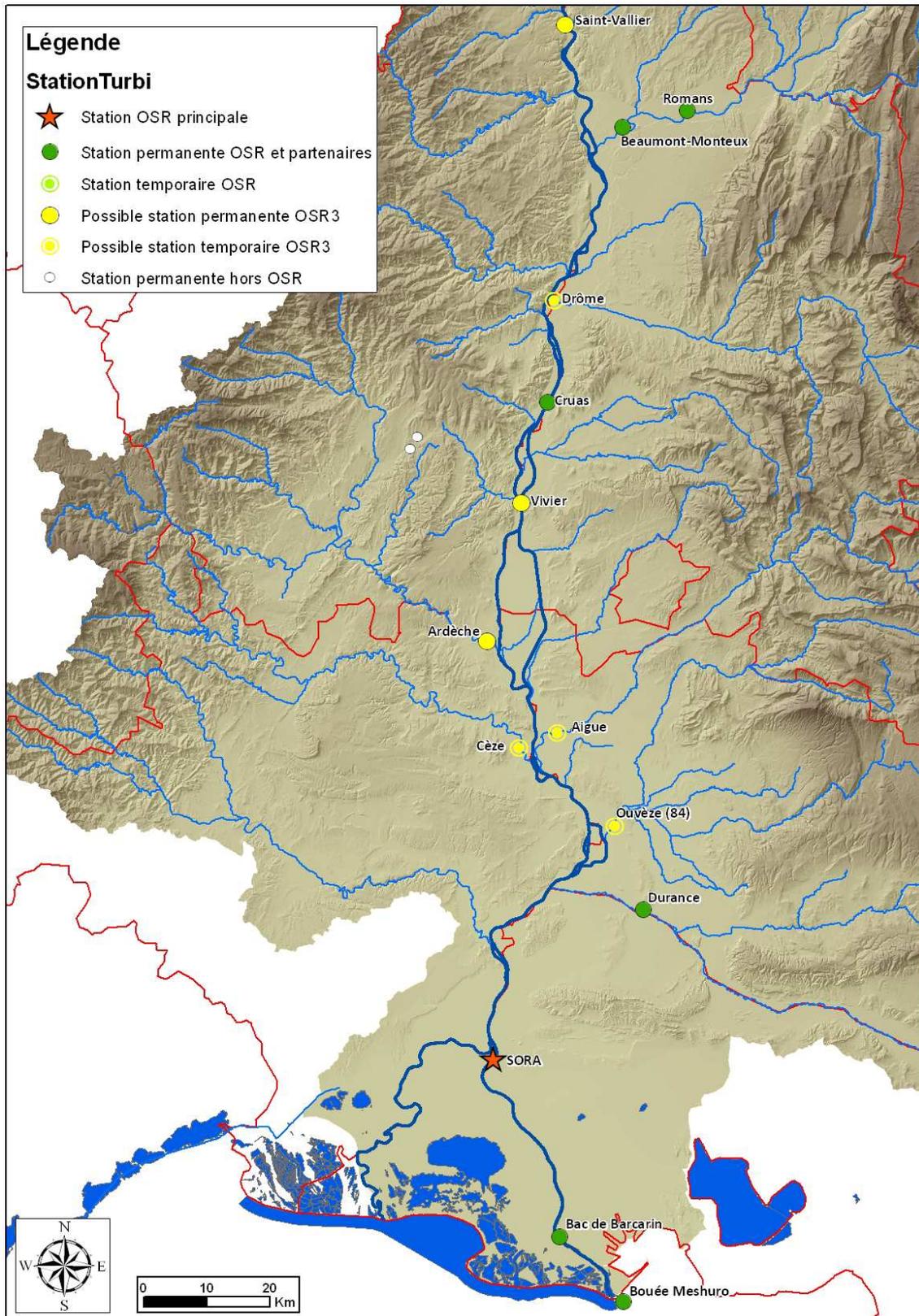


Fig.2b : Carte de localisation des stations d'observation des flux particulières sur le corridor du Rhône de l'Isère à la mer, ainsi que les points de mesure potentiellement intéressants à équiper.

2.2 Développement du réseau de stations MES

Haut-Rhône (du Léman à Lyon)

C'est le secteur où le réseau d'observation a été le plus développé par l'OSR et ses partenaires. Globalement, on peut considérer que le réseau de stations permanentes est suffisant même si certaines stations nécessitent une amélioration pour être complètement opérationnelles.

Dans le détail :

- La station OSR de **Jons** fait l'objet d'un suivi détaillé des teneurs en contaminants bimensuel avec centrifugation et relevé de piège à sédiment. Le turbidimètre opéré par Veolia (station Grand-Lyon) est opérationnel et étalonné correctement en MES par les prélèvements OSR. Elle permet de mesurer les flux du Haut-Rhône à l'arrivée sur Lyon avec des incertitudes réduites. Toutefois, le mauvais mélange des apports de crue de l'Ain dans certaines situations spécifiques doit être pris en compte dans l'interprétation des mesures. L'OSR a mis en service une centrifugeuse fixe en juillet 2013.
- La station turbidimétrique de l'**Arve à Genève**, mise en service en mars 2012 par l'OSR et les SIG dans la station OFEV, a fonctionné sans lacune ni dysfonctionnement, et l'étalonnage en concentrations de MES est bon. Le partenariat technique entre les SIG (prélèvements, filtrations, récolte du piège) et Irstea (analyses, traitement des données) fonctionne bien. Cette station permet la quantification des flux du principal affluent sédimentaire du Haut-Rhône.
- Les stations turbidimétriques EDF du **Rhône à Creys et Bugey** fonctionnent sans dysfonctionnement et avec un étalonnage MES fiable réalisé par EDF. Un pas de temps moyen horaire serait mieux adapté que l'instantané horaire actuel pour suivre les variations de concentration en MES du Rhône.
- Les stations turbidimétriques CNR du **Rhône à Pougny et Pyrimont** ont été mises place récemment, suite à la chasse du Haut-Rhône en juin 2012. Ces stations ne sont pas encore opérationnelles et nécessitent un effort de paramétrage, étalonnage et validation à réaliser avec Irstea/OSR.
- La station du **Vieux-Rhône de Crépieux-Charmy** (Veolia / Grand-Lyon) a été étalonnée surtout pendant le suivi des chasses de juin 2012. Elle permet d'estimer les concentrations et flux dans un bras secondaire proche des champs captant du Grand-Lyon.
- Des stations turbidimétriques provisoires ont permis à l'OSR de caractériser la dynamique hydro-sédimentaire de l'**Ain**, du **Guiers** et de la **Bourbre**, ce dernier affluent étant particulièrement intéressant du fait de teneurs en contaminants significativement supérieures aux autres points de mesure.

De la Saône à l'Isère

Les apports particuliers des deux affluents majeurs que sont la Saône et l'Isère sont mesurés grâce aux stations de Lyon-St-Georges (Irstea/CNR) et de Beaumont-Montoux (EDF) et Romans (CNR/Irstea). Si l'apport du Rhône avant la Saône est bien connu grâce à la station de Jons, en revanche la mesure du flux en aval de l'agglomération lyonnaise pose problème, car les deux flux amont ne sont pas mélangés à la station potentielle de Ternay. Aucun site de mesure pertinent n'a été identifié avant la station envisagée à St-Vallier, qui caractériserait bien les flux du Rhône en amont du confluent de l'Isère. La station turbidimétrique de Cruas, mise en service par EDF en 2013, permettrait de mesurer le flux

du Rhône après l'apport de l'Isère, sous réserve de bon mélange qui est loin d'être assuré. Un point de mesure aussi loin en aval que Viviers serait plus probablement bien mélangé. Une stratégie de stations temporaires sur les affluents d'intérêt (flux MES significatif ou contamination plus importante) apparaît donc pertinente sur ce secteur complexe. A noter aussi qu'une étude par l'OSR des flux de la basse-Isère aménagée serait très intéressante au vu de la chaîne de turbidimètres EDF, LTHE et Irstea de l'Arvan au Rhône, avec notamment la station-pilote de l'Isère à Grenoble-Campus et la station de l'institut Langevin sur le Drac.

Dans le détail :

- La station de la **Saône à Lyon-St-Georges** est équipée d'un turbidimètre (CNR/Irstea) qui fonctionne correctement mais présente des difficultés d'étalonnage liées aux faibles concentrations (<100-200 mg/L au max). L'effort d'étalonnage doit donc être intensifié. Le piège à sédiment est installé plusieurs kilomètres en amont en rive gauche sur un ponton dans un site fermé. Les centrifugations sont réalisées au niveau de l'Ile-Barbe, comme pour le suivi Eau et MES de l'Agence de l'Eau RMC.
- Une station provisoire OSR a été installée sur le **Gier à Givors** en raison de fortes teneurs en contaminants. Une future station provisoire sur l'**Azergues** serait aussi intéressante pour caractériser un affluent local qui présente aussi de fortes teneurs dans les sédiments. Des campagnes de prélèvements pour analyses incluant la station du **Rhône à Ternay** en rives droite et gauche sont en cours pour tenter de caractériser le fonctionnement du Y lyonnais. A noter également le lien possible avec l'observatoire Ardières-Morcille, pour l'étude de flux particuliers et de phytosanitaires liés à la viticulture.
- La station turbidimétrique de l'**Isère à Beaumont-Monteux** (EDF) est opérationnelle et étalonnée en MES. Celle de l'**Isère à Romans** (CNR/Irstea) assure une redondance fiable pour les concentrations >100 mg/L mais inexploitable pour les concentrations inférieures, en raison de problèmes liées au site de mesure.
- Une station turbidimétrique sur le **Rhône à St-Vallier** (station CNR) serait le meilleur site identifié pour mesurer le flux du Rhône en amont du confluent de l'Isère, avec possibilité d'exploiter les teneurs mesurées dans le réseau Eau/MES de l'Agence de l'Eau RMC. Cependant, des difficultés techniques n'ont pas rendu possible l'installation jusqu'à présent. Ce serait a priori une installation prioritaire pour le futur OSR.
- La nouvelle station turbidimétrique du **Rhône à Cruas**, mise en service par EDF en 2013, permettra de mesurer le flux du Rhône après l'apport de l'Isère, sous réserve de bon mélange qui est loin d'être assuré en raison des aménagements et Vieux-Rhône situés en amont. Un point de mesure aussi loin en aval que **Viviers** serait plus probablement bien mélangé, avec une station débitmétrique de référence.

De l'Isère à la mer

Ce secteur se caractérise à l'aval par le bouclage précis de l'export à la mer par la station d'Arles, complétée par le bac Barcarin et la bouée Meshuro (Ifremer) qui permettent une étude de la propagation des flux vers l'interface marine. Par contre, les flux dans le Rhône en aval de Cruas ainsi que les apports des affluents, à l'exception notable de la Durance, ne sont pas observés en continu. Le travail de Linne (2011) a estimé sur les bases des données Agence de l'Eau RMC que les apports de MES en aval de Valence par les affluents étaient associées prioritairement à la Durance (63%) puis la Drôme et l'Ouvèze (10% chacun), la Cèze (9%), le Gard (6%) et l'Ardèche (2%). L'erreur de calcul est probablement importante car les crues ne sont pas disponibles dans ces données. L'installation de stations turbidimétriques pérennes sur des affluents majeurs comme la Durance ou le Gard apparaît

donc nécessaire, tandis que les affluents plus modestes pourraient être équipés de stations temporaires.

Dans le détail :

- La station d'observation du **Rhône à Arles** (SORA, IRSN) fait l'objet de prélèvements de MES journaliers et plus fréquents en cas de crues ($Q > 3000 \text{ m}^3/\text{s}$), ainsi qu'un suivi bimensuel par centrifugeuse fixe (opérée par le MIO). Un granulomètre laser en continu a été installé, et la station réalise des prélèvements automatisés pour les analyses de radionucléides et d'autres substances (carbone organique, contaminants pour Agence de l'Eau). Il s'agit de la station la plus développée sur le réseau, ce qui est justifié par sa situation idéale pour boucler le flux du bassin du Rhône avant le domaine marin.
- Le **bac de Barcarin** (Cerege, ADCP en continu, GPS et turbidimètre) et la **bouée Meshuro** (Ifremer, multiparamètres) permettent une étude de la dynamique des flux vers l'interface marine, notamment les nutriments. L'évolution des fonds et du coin salé sont observables en continu à chaque traversée du bac de Barcarin, et les mesures hydro-acoustiques offrent des perspectives pour la mesure des flux de suspension grossière, mal connus et difficiles à mesurer. Une station turbidimétrique doit être installée en 2013 au Bac de Barcarin dans le cadre de l'OSR et de la ZABR.
- La station turbidimétrique de la **Durance à Bonpas** (EDF) est opérationnelle et étalonnée en MES. Elle permet de mesurer l'apport du principal affluent du secteur. A noter qu'un réseau de stations EDF, LTHE et Irstea remonte jusqu'aux zones de production de l'observatoire Draix-Bléone.
- Des stations turbidimétriques permanentes seraient utiles pour mesurer les flux des affluents majeurs comme le **Gard à Remoulins** ou l'**Ardèche à Sauze** (stations CNR/SPC-GD). Des stations provisoires seraient également utiles pour caractériser la dynamique et les apports d'affluents plus modestes comme la **Drôme**, la **Cèze**, l'**Ouvèze** ou l'**Aigue**. A noter pour l'Ardèche, qui serait l'installation prioritaire, qu'un raccordement au réseau de stations Gazel-Claduègne-Auzon-Ardèche (observatoire OHMCV), peut permettre à terme l'étude production/propagation des MES sur un grand cours d'eau à régime cévenol.

3 Outils et méthodes pour le réseau d'observation

3.1 Normalisation des résultats de teneurs particulières

La normalisation des teneurs issues de différents systèmes de prélèvement des MES, et aussi des sédiments déposés, notamment les archives sédimentaires, est possible si des paramètres complémentaires comme le COP et la distribution granulométrique sont systématiquement mesurés. Des mesures comparatives permettent de vérifier cette normalisation, utile pour étendre la perspective spatiale (suivi sédiments ou MES par pièges à sédiment) et temporelle (carottes sédimentaires) de la contamination des phases porteuses en suspension.

Une méthode originale a été développée par Launay (2013) pour mieux prendre en compte les distributions multimodales observées notamment dans les MES et sédiments du Rhône. Cette méthode est basée sur la décomposition en sous-populations gaussiennes, qui sont calées automatiquement par des routines simples d'utilisation, développées sous R et sous Matlab. Une fois choisi le nombre de sous-populations à rechercher, le calage automatique fournit les modes (également diamètres médians), écart-type et proportion de chaque sous-population dans la distribution combinée multimodale.

Des tests comparatifs ont été réalisés par Angot et al. (n.d.) sur la performance des normalisations, notamment pour les échantillons issus des pièges à sédiment, dont le biais granulométrique affecte essentiellement les proportions des sous-populations, avec l'apparition éventuelle d'un mode sableux en cas d'exposition au transport de fond. Dans ce cas (et potentiellement celui des dépôts, sédiments et carottes sédimentaires), la correction basée sur la décomposition en gaussiennes permet de supprimer efficacement la part non-porteuse de la fraction solide. La correction semble un peu plus performante qu'une simple coupure à 63 μm , et elle est surtout plus facile à justifier car adaptée au site considéré, et permet de mieux comprendre les différences de propriétés des échantillons. Pour les échantillons composés des modes les plus fins (diamètres médians inférieurs à 30 μm typiquement), la correction par le COP reste la plus efficace pour les substances testées (PCB, Hg, HAP).

3.2 Bases de données et échantillothèque

La constitution d'une échantillothèque, telle que celle initiée par l'OSR, permettra des analyses futures, plus ciblées sur les substances émergentes ou les futures substances réglementées. Si l'on ne dispose pas pour l'instant d'une base de données relationnelle pour les prélèvements, le principal est qu'ils sont actuellement tous référencés dans des tableurs avec un système homogène de codes échantillons OSR, ce qui permet des requêtes élémentaires, ainsi que la comparaison rapide quel que soit l'organisme qui a réalisé le prélèvement.

De même, les différents résultats d'analyses physico-chimiques sont tous référencés dans des tableurs qui sont gérés et sauvegardés par les équipes responsables de ces analyses. Une réflexion se poursuit sur l'opportunité et les modalités de la bancarisation de ces résultats dans une base de données propre, qui permette l'intégration des codes usuels et des métadonnées les plus utiles. Une comparaison avec les champs de la base de données de l'AE RMC est en cours, afin de s'assurer de la compatibilité des champs OSR et donc de la faisabilité de transférer ces résultats vers la base Agence, si besoin.

La constitution d'une base de données OSR pour les chroniques de débit, turbidité, concentration en MES et teneurs en contaminants nécessaires à la quantification des flux

instantanés et cumulés a démarré en 2013 : base FluxOSR avec l'outil BDOH (Irstea). L'objectif est de partager, via une interface web avec accès en liste ou cartographique, les chroniques et points de contrôle disponibles pour les principales stations d'intérêt sur le Rhône et l'arrivée de ses affluents. Les données de turbidité et concentration produites par Irstea Lyon sont déjà en bonne partie bancarisées. L'outil BDOH (Base de données pour les observatoires en hydrologie, Branger et al., 2013), déjà en production en interne, sera mis en ligne en octobre 2013. Il permet la gestion de différentes stations et différents paramètres par différents producteurs, et l'accès aux données est identifié, tracé et peut être limité ou ouvert de façon jugée appropriée pour chaque point de mesure, et chaque paramètre. Une convention de données multi-producteurs, calquée sur la convention de la banque hydro, est en cours d'élaboration et sera proposée aux différents gestionnaires de stations hydrométriques et turbidimétriques, et de prélèvements et analyses physico-chimiques. D'autres observatoires ont prévu d'utiliser BDOH ou l'utilisent déjà (ORACLE Orgeval, Draix-Bléone, Réal-Collobrier, ZABR Arc-Isère, ZABR/OTHU Yzeron, ZABR Ardières-Morcille, OHMCV⁴, Mont-Lozère, Gardons, etc.)

3.3 Gestion documentaire des protocoles et publications

Les différents protocoles utilisés et/ou développés par l'OSR pour les opérations sur le terrain comme au laboratoire ont été formalisés, rédigés et partagés, notamment sur le site web de l'OSR, et dans les systèmes de documentation qualité des équipes de recherche. Ces protocoles concernent les systèmes de prélèvement de MES (utilisation centrifugeuse mobile, centrifugeuse fixe, piège à sédiment, ...), les stations de mesure turbidimétriques (Thollet et al., 2012), les analyses physico-chimiques (mesure granulométriques, conditionnement des échantillons, méthodes d'analyse et contrôles qualité). Voir notamment le tableau des méthodes d'analyse pour les contaminants et performances analytiques associées en annexe du livrable « Estimation des flux de contaminants particuliers à Arles et Jons » (OSR – Action 6, 2013).

Les publications (rapports, thèses/mémoires, articles de conférence, articles de revue, en français et en anglais) qui se rapportent à l'OSR sont recensées, sur le site de l'OSR, comme dans les systèmes de gestion documentaire des équipes de recherche. La phrase suivante est insérée dans les remerciements :

Ce travail a été mené dans le cadre de l'Observatoire des Sédiments du Rhône et a été en partie soutenu par le Plan Rhône.

This work was conducted under the framework of the Rhone Sediment Observatory and was partly supported by the Plan Rhone.

Ce travail de documentation est capital pour assurer la traçabilité des méthodes et des résultats, et leur partage au sein de l'OSR, de ses partenaires, et de l'ensemble de la communauté nationale et internationale.

3.4 Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône et de son bassin versant

Le travail d'observation et de quantification des flux particuliers est indissociable d'un effort de développement et de validation d'outils de simulation numériques de ces mêmes flux, à différentes échelles de temps et d'espace.

En particulier, l'OSR développe et partage un modèle unidimensionnel du Rhône et de ses affluents majeurs basé sur le code de simulation hydro-sédimentaire Adis-TS, développé par

⁴ Sigles : Zone-Atelier bassin du Rhône, Observatoire de terrain en hydrologie urbaine, Observatoire Hydro-météorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais.

Irstea. Ce code prend en entrée les résultats de simulation de modèles hydrauliques transitoires sur réseau maillé unidimensionnels. Le modèle du Rhône est actuellement développé avec le logiciel hydraulique MAGE, qui permet notamment une représentation correcte du fonctionnement des aménagements hydro-électriques. La géométrie du modèle est construite entre le Léman et la mer, et permet une simulation des écoulements dans le Rhône pour les événements non (ou peu) débordants en plaine d'inondation. En 2012-2013, le modèle a été calé et validé sur la partie du Léman à Lyon, en s'attachant à reproduire l'événement hydro-sédimentaire de la chasse de juin 2012. Il est prévu d'étendre ce travail jusqu'à la mer, en utilisant l'événement documenté de mai-juin 2008, impliquant l'Isère et la Durance, comme cas de validation.

Concernant la modélisation des apports en MES par les sous-bassins versants du Rhône, une méthode d'analyse spatiale (SIG) a été développée par Bertrand (2009) et initialement appliquée au bassin de l'Arc en Maurienne, afin d'évaluer qualitativement la production sédimentaire des sous-bassins, à partir du croisement d'indicateurs spatialisés de sensibilité à l'érosion, de précipitations, et de connectivité au réseau hydrographique. Cette méthode, testée par Launay (2013) sur les sous-bassins du Haut-Rhône et la Saône, apparaît prometteuse pour mieux justifier les estimations de flux moyens faites par analogie avec des bassins disposant de mesures. C'est une méthode qu'il serait intéressant de généraliser à l'ensemble du bassin du Rhône, car elle constitue un préalable intéressant à une future modélisation hydrologique sédimentaire à l'aide du modèle hydrologique spatialisé (J2000) en développement à Irstea Lyon sur projet Agence de l'Eau (2013-2015). A terme, un tel modèle permettrait d'aller beaucoup plus loin sur l'estimation des flux à l'échelle du bassin du Rhône, et de tester des scénarios liés aux changements d'occupation des sols ou climatiques.

3.5 Analyse des incertitudes

Une méthode globale et conforme aux standards métrologiques pour croiser incertitudes sur les débits, les concentrations MES et les teneurs en substances particulières reste à formaliser par l'OSR. Cependant, les travaux menés (cf. Launay, 2013) ont permis de mettre à plat les différentes sources d'erreur qui entachent une quantification de flux particulaire, et commencer à les hiérarchiser et à les quantifier. Ces sources d'erreur sont liées aussi bien aux mesures (erreurs instrumentales, environnementales, représentativité spatio-temporelle) qu'aux méthodes de calcul et hypothèses permettant de quantifier un flux instantané, épisodique, annuel, ou moyen interannuel. Distinguer les effets systématiques (justesse) et les effets aléatoires (reproductibilité) est très utile pour à terme estimer l'incertitude sur les flux (somme temporelle, qui réduit les deuxièmes mais pas les premiers).

L'estimation des incertitudes nécessite, au-delà de méthodes de mesure contrôlées, une démarche métrologique rigoureuse (au sens des normes en vigueur) et le plus souvent, un consensus le plus large possible. L'OSR offre ainsi le cadre idéal pour échanger sur cette question, en vue de définir et de paramétrer une méthode de quantification des incertitudes sur les estimations de flux particulières.

Références bibliographiques

- Angot, H., Launay, M., Le Coz, J., Sabot, P., Coquery, M., (n.d.). Bias correction of selected micropollutants concentrations in suspended solids collected in rivers using integrative sediment traps, Manuscript in preparation.
- Bertrand, M., (2009). Caractérisation du fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant de l'Arc en Maurienne. Mise en place d'un Système d'Information Géographique, analyse spatiale et segmentation de l'espace. Rapport de stage Master 2 SIG et Gestion de l'Espace Université Jean Monnet – ENISE – Saint Etienne, Irstea Lyon, 57 p.
- Branger, F., Thollet, F., Crochemore, M., Poisbeau, M., Raidelet, N., Farissier, P., Lagouy, M., Dramais, G., Le Coz, J., Guérin, A., Tallec, G., Peschard, J., Mathys, N., Klotz, S., Tolsa, M., (2013). Acte de conférence, congrès SHF « Hydrométrie 2013 », Paris, 15-16 mai 2013.
- Burgéap-Camaly, (2005). Etude des stations d'alerte et de surveillance de la qualité des eaux superficielles dans l'agglomération lyonnaise. PHASE 4 - faisabilité du calcul des flux de pollution. Interprétation et préconisations.
- Burgéap-Camaly, (2007). Etude des stations d'alerte et de surveillance de la qualité des eaux superficielles dans l'agglomération lyonnaise. PHASE 6 – Synthèse et conclusions. Rapport final, 16 p.
- Delmas, M., Cerdan, O., Mouchel, J.-M., Garcin, M., (2009). A method for developing a large-scale sediment yield index for European river basins, *Journal of Soils and Sediments*, 9 (6), pp. 613-626.
- Hydratec – Sogreah – Minéa, (2011). Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Etude du transport solide. Synthèse de première étape, 38 p.
- Minaudo, C., (2011). Suivi des pollutions particulières dans l'Isère en amont de Grenoble. Rapport technique (M2R), LTHE, 57 p.
- Launay, M., (2013). Mesure et modélisation des flux de matières en suspension et de contaminants associés (PCB et mercure) dans le Haut-Rhône. Thèse de doctorat, Irstea, Université Lyon 1.
- Le Coz, J., Launay, M., Thollet, F., Coquery, M., Angot, H., Radakovitch, O., Raccasi, G., Eyrolle, F., Antonelli, C., Fantino, G., (2011). Propositions opérationnelles pour la constitution d'un réseau de mesure en continu des flux de MES à l'échelle du corridor rhodanien français, OSR, rapport technique.

- Le Coz J., Camenen, B., Peyrard, X., Dramais, G., (2012). Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity-area method, *Flow Measurement and Instrumentation*, vol.26, 18-29
- Le Coz J., Renard B., Bonnifait, L., Branger, F., Le Boursicaud, R., (2013, accepté). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: a Bayesian approach, *Journal of Hydrology*.
- Le Coz, J., Pierrefeu, G., Brochot, J.-F., Paquier, A., Chastan, B., Lagouy M., (2007). Suspended-load dynamics during floods in the river Saône, France, 10th International Symposium on River Sedimentation, 1-4 August 2007, Moscow, Russian Federation.
- Le Coz, J., Launay, M. Lagouy, M., Coquery, M., Angot H., (2011). Eléments de réponse aux questions de l'Agence de l'EAU RMC concernant l'acquisition d'une centrifugeuse fixe pour équiper la station de mesure du Rhône à Jons. Rapport technique, 5 p.
- Linne, C., (2011). Estimation des flux de contaminants dissous et particulaires sur le bas Rhône et ses affluents à partir des données du réseau de surveillance de l'Agence de l'Eau Rhône, Méditerranée Corse. Rapport de stage de fin d'études: Cerege, 46 p.
- OSR - Action 6, (version provisoire septembre 2013). Estimation des flux de contaminants particulaires à Arles et Jons, 35 p.
- OSR - Action 8, (septembre 2013). Résultats du suivi des opérations de chasse sur le Haut-Rhône de juin 2012. 83 p.
- Roux, L., (2011). Faisabilité du calcul de flux de contaminants particulaires à partir des données de l'Agence de l'Eau Rhône, Méditerranée Corse. Rapport de stage de fin d'études: Cemagref, 114 p.
- Thollet, F., (2012). Collecte de chroniques de matières en suspension avec une station turbidimétrique, Irstea, Rapport technique, 13 p.
- Thollet, F., Le Coz, J., Antoine, G., François, P., Saguintaah, L., Launay, M., Camenen, B., (2013). Acte de conférence, congrès SHF « Hydrométrie 2013 », Paris, 15-16 mai 2013.