



HAL
open science

Mesure des flux et dépôts sédimentaires pour la gestion des ouvrages hydroélectriques sur le bassin du Rhône

G. Pierrefeu, F. Lauters, B. de Vandière, B. Camenen

► To cite this version:

G. Pierrefeu, F. Lauters, B. de Vandière, B. Camenen. Mesure des flux et dépôts sédimentaires pour la gestion des ouvrages hydroélectriques sur le bassin du Rhône. 26ème congrès des Grands Barrages, Jul 2018, Vienne, Autriche. 20 p. hal-01930743

HAL Id: hal-01930743

<https://hal.science/hal-01930743>

Submitted on 22 Nov 2018

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.

COMMISSION INTERNATIONALE DES
GRANDS BARRAGES

VINGT-SIXIEME CONGRES DES
GRANDS BARRAGES
Vienne. juillet 2018

MESURE DES FLUX ET DEPOTS SEDIMENTAIRES POUR LA GESTION DES OUVRAGES HYDROELECTRIQUES SUR LE BASSIN DU RHONE*

Gilles PIERREFEU
CNR - CACOH, France

François LAUTERS
EDF - DTG, France

Benoit De VANDIERE
EDF - DTG, France

Benoit CAMENEN
IRSTEA, France

1. INTRODUCTION

Le Rhône, ainsi que ses principaux affluents issus du massif Alpin, notamment l'Isère et la Durance, sont des cours d'eau avec un fort transport solide en suspension. Une estimation des flux moyens annuels de respectivement 7.5 Mt, 2.3 Mt et 1.6 Mt est faite pour la période 2001-2012 [1]. Ce transport solide nécessite une gestion adaptée des aménagements hydroélectriques de CNR et EDF. Gouverné par des processus géologiques, météorologiques, hydrologiques et hydrauliques complexes, il fait l'objet de recherches de la part d'une communauté scientifique locale en pointe sur le sujet (Irstea, CEREGE, IRSN, IGE-HyDRIMZ...). Hydro électriciens et scientifiques travaillent régulièrement ensemble sur ce sujet. La gestion des aménagements du bassin (retenues à faible temps de séjour des zones de piémont ou grandes retenues Alpines) étant principalement affectée par les sédiments fins, il est en

* Measurement of sediment flows and deposits for managing hydroelectric facilities in the Rhône basin

premier lieu nécessaire de quantifier les teneurs et les flux de matière en suspension (MES) y entrant et en sortant, ainsi que les dépôts dans les retenues et les cours d'eau. Ces données permettent notamment une surveillance de l'état d'envasement des aménagements (pour assurer le passage des crues, le non colmatage des organes, le respect du chenal navigable...), de mieux comprendre les phénomènes en jeu, d'alimenter des modèles hydro-sédimentaires simulant des situations de gestion différentes et enfin de mieux appréhender les effets des ouvrages sur le milieu naturel. Elles sont donc la base de tout travail concernant la gestion sédimentaire.

L'article présente une revue des expériences récentes d'Irstea, de CNR et d'EDF dans ce domaine de la mesure des flux de MES et des dépôts. Un point est fait sur les développements en cours. Une réflexion sur l'adéquation des moyens de mesures nécessaires pour un pilotage opérationnel des aménagements (précision, fréquence...) permet d'identifier les axes de développements méthodologiques et métrologiques à venir. Le premier chapitre montre, au travers d'exemples de comparaisons de bilans bathymétriques et de flux, l'intérêt de disposer de données de plusieurs natures pour consolider les informations qu'elles fournissent. Les sédiments transportés par charriage ne seront pas considérés ici dans les flux transités mais ils sont intégrés dans les approches topo-bathymétriques. Dans le bassin du Rhône et de ses affluents, ils constituent actuellement une part très faible des flux sédimentaires, sauf en tête de bassin.

2. LA DIFFICULTE DE REALISER DES BILANS DE FLUX OU D'EVOLUTION DES FONDS

La connaissance des quantités de dépôt (volume ou tonnage), pour une période de temps, peut être appréhendée à partir de bilans de données de flux solide ou d'évolution des fonds. En l'absence de biais de mesure, les deux méthodes doivent permettre d'obtenir la même information (équation 1).

$$(1) \quad (1 - p)\rho_s\Delta V - \Delta\Phi = 0$$

où p et ρ_s sont la porosité et la masse volumique du sédiment, ΔV le volume de matériau érodé ou déposé, et $\Delta\Phi$ la différence entre le flux amont et aval.

Toutefois, le bilan de volume ne pourra être utilisé que si les écarts pressentis entre deux mesures du fonds par bathymétrie (équation 2) sont bien supérieurs à l'incertitude reconnue pour la méthode de mesure utilisée. Il en est de même pour un bilan fait sur les flux (équation 3).

$$(2) \quad \Delta V = (V_2 \pm \varepsilon_{V2}) - (V_1 \pm \varepsilon_{V1}) \sim (V_2 - V_1) \pm \sqrt{2} \cdot \varepsilon_V \sim (V_2 - V_1) \pm \sqrt{2} \cdot S \cdot \varepsilon_z$$

avec V_1 et V_2 , les volumes en eau aux temps t_1 et t_2 , S la surface bathymétrée et ε_z le biais possible sur la cote du fond z .

$$(3) \quad \Delta\Phi = (\Phi_{am} \pm \varepsilon_{\Phi_{am}}) - (\Phi_{av} \pm \varepsilon_{\Phi_{av}}) \sim (\Phi_{am} - \Phi_{av}) \pm \sqrt{\varepsilon_{\Phi_{av}}^2 + \varepsilon_{\Phi_{am}}^2}$$

avec Φ_{am} et Φ_{av} les flux aux stations amont et aval.

De manière consensuelle, EDF et CNR admettent qu'un bilan bathymétrique n'a donc de sens que si le différentiel de volume est largement supérieur à environ 1.5 fois le biais possible sur la cote du fond multipliée par la surface du plan d'eau. Ainsi, un bilan de flux n'a de sens que si Φ_{am} est supérieur (ou inférieure si érosion) à environ 2 fois Φ_{av} en supposant une erreur de 30% sur les flux mesurés (incluant d'éventuels apports intermédiaires par exemple). Des bilans menés sur certains sites, où l'on dispose à la fois de mesures de flux et d'évolution des dépôts, montrent que des biais de mesure sont présents et peuvent se traduire par des bilans contradictoires.

Site	Surface volume	Période d'étude	Bilan bathymétrique	Bilan des flux
Bassin de stockage en dérivation de l'Arc	1.8 hm ³ 20 ha	28 mois : de août 2011 à nov 2013	Dépôt : 0.064 hm ³ soit 90 kt	Dépôt : 33 kt
Remarque : écart très important entre le bilan des flux et des dépôts. La médiocre qualité de la relation MES=f(turbidité) pour ce site pourrait expliquer cet écart. Une correction de 20% de la relation d'une des stations équilibrerait les bilans. L'incertitude sur le différentiel bathymétrique, potentiellement forte au regard des précisions de mesure et de l'évolution relativement faible, peut être réduite par une analyse spécifique comparant des zones sans dépôts.				
2 retenues en chaîne sur la basse Isère.	20 hm ³ 400 ha	21 mois : de mai 2015 à février 2017.	Dépôt : 1.2 hm ³ soit 1 800 kt	Dépôt : 630 kt
Remarque : écart important entre le bilan des flux et des dépôts. La présence de dunes sur les fonds bathymétriques indique une part de sable estimée à 50% dans les dépôts. Ce sable est peu pris compte dans la mesure de flux de MES amont ce qui biaise le bilan. L'incertitude sur la valeur de la densité des sédiments pour le passage des hm ³ aux kt peut aussi expliquer cet écart.				
Site	Volume Surface	Période d'étude	Bilan bathymétrique	Bilan des flux
Tronçon du Rhône en aval du Léman incluant 4 retenues	55 Km sur 50 à 100 m de large.	Avant et après chasse de barrages en mai 2016	Dépôt : 1.4 hm ³ soit 2 100 kt	Dépôt : 1 300 kt
Remarque : écart initial très important entre le bilan des flux et des dépôts. L'écart peut s'expliquer par le charriage comme le confirme des mesures ponctuelles (Helley Smith en deux sections distinctes) qui ne permettent toutefois pas de justifier avec précision l'écart de 800 kt dans le bilan.				

Il est donc nécessaire de disposer d'un ensemble de méthodes de mesure adaptées à chaque problématique et souvent d'appliquer plusieurs de ces méthodes pour obtenir une information consolidée. Il est aussi indispensable de bien maîtriser les processus de mesure pour en réduire les incertitudes, surtout pour limiter les biais liés à la mauvaise prise en compte de certains paramètres comme la densité du sédiments ou la présence de fractions granulométriques plus grossières (sableuse) mal prises en compte dans les flux de MES. Cette partie plus grossière est souvent concentrée au fond de la rivière.

3. LES MOYENS DE MESURE DES FONDS – LA BATHYMETRIE

La bathymétrie est une méthode de cartographie de zones immergées effectuée à l'aide de sonars, qui permet de disposer d'une représentation spatiale des évolutions des fonds liées aux dépôts et reprises sédimentaires. Dans une zone de forte production comme le bassin du Rhône, c'est donc une mesure essentielle pour la gestion des retenues et des tronçons de cours d'eau et canaux aux abords des ouvrages de production hydro-électriques pour :

- évaluer la capacité des retenues avec pour objectif d'optimiser la production et de mieux gérer les possibles soutiens d'étiage ou gestion des crues,
- garantir la sûreté tant vis-à-vis de l'exhaussement de ligne d'eau que de la navigation pour le chenal navigable du Rhône géré par la CNR,
- garantir la sûreté en inspectant l'envasement devant les organes immergés,
- alimenter en données les modèles hydro-sédimentaires pour mieux comprendre la dynamique sédimentaire et tester différents scénarios de gestion.

Pour effectuer une bathymétrie, on associe sur une embarcation un sonar à un système de positionnement. Du fait de la large variété de zones de mesure, liée à l'implantation des ouvrages, depuis les cours d'eau de montagnes au fleuve Rhône, EDF et CNR disposent d'une large gamme de moyens de mesure, qui s'est enrichie avec les évolutions techniques récentes. Concernant les sondeurs, selon que l'on cherche à obtenir un sondage partiel du fond, généralement sous la forme de profils en travers (cas par exemple des grands linéaires de rivières), ou une couverture intégrale du fond (recherche de précision dans la description de l'envasement) on utilise des sondeurs mono ou multifaisceaux. Pour garantir un positionnement précis, on utilise un GPS différentiel si la couverture satellite le permet. Mais dans certaines zones encaissées ou avec une végétation dense, on utilise un théodolite automatique. Enfin, on adapte la taille du bateau en fonction des contraintes de navigation :

- Drone télécommandé pour situations à risque (proche d'un ouvrage...),
- Bateau pneumatique (3 m max) pour petits plans d'eau difficiles d'accès,
- Vedette aluminium (5 m max) pour des plans d'eau facilement accessibles,

- Bateau hydrographique (30m max) pour les chenaux navigables du Rhône.

De la même façon que les moyens de mesure sont adaptés au site, les restitutions d'informations, sont adaptées aux objectifs des mesures. Pour l'exploitation d'une retenue, il est par exemple intéressant de calculer un abaque de capacité en fonction de la cote du plan d'eau (Figure 1).

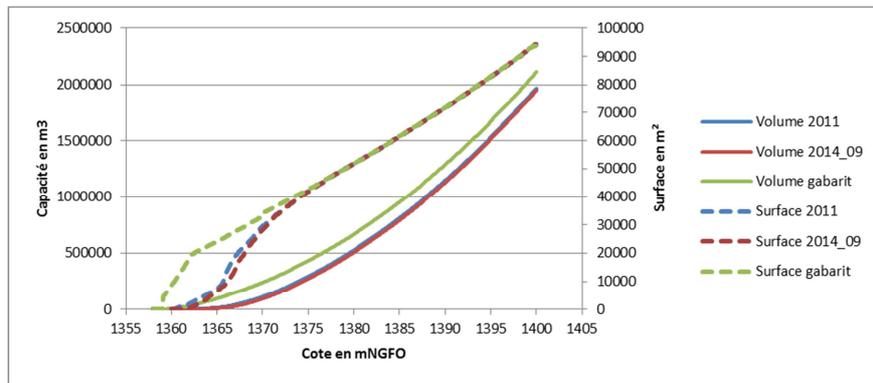


Figure 1

Exemple d'évolution dans le temps de la courbe de capacité d'une retenue
Example of changes in the reservoir capacity curve with time

Afin de surveiller les dépôts de sédiments devant les ouvrages de génie civil, on représente les cartes bathymétriques en mettant en évidence les zones à surveiller. On peut par exemple suivre l'évolution d'un banc de sédiment causé par des événements d'exploitation (Figure 2A). On peut aussi effectuer des vues en coupes des modèles numériques de terrain issus des bathymétries au droit des ouvrages immergés (Figure 2B). Pour comprendre les évolutions sédimentaires, on établit des cartes différentielles entre des bathymétries successives, ce qui permet de situer les zones de dépôts ou d'érosion et d'en évaluer l'amplitude. Sur l'exemple ci-après, les zones d'érosion et dépôts sont illustrés en Figure 3.

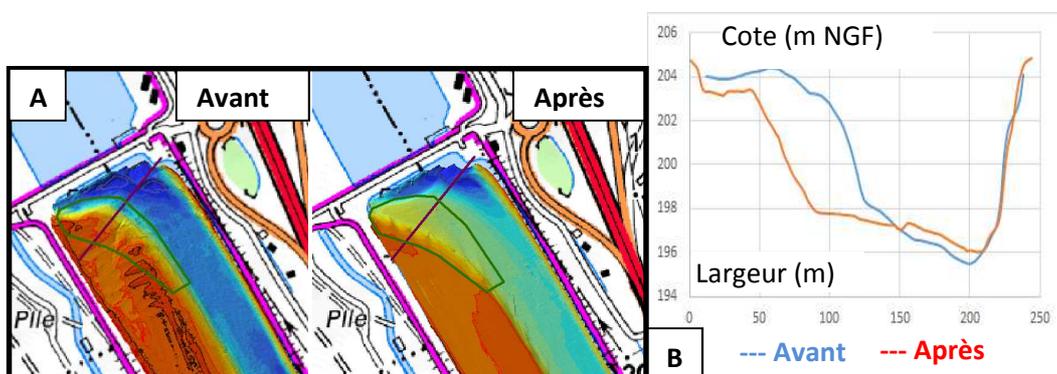


Figure 2

Evolution de l'envasement devant les vannes d'un barrage A) en plan B) en coupe
Changes in siltation in front of dam gates A) plan view B) cross-sectional view

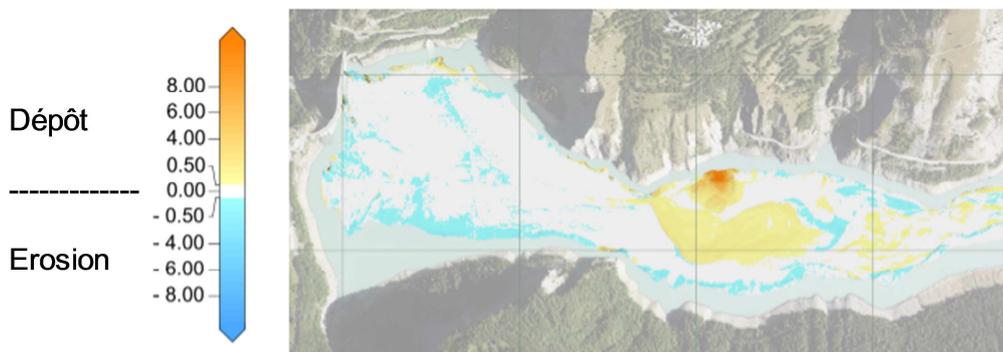


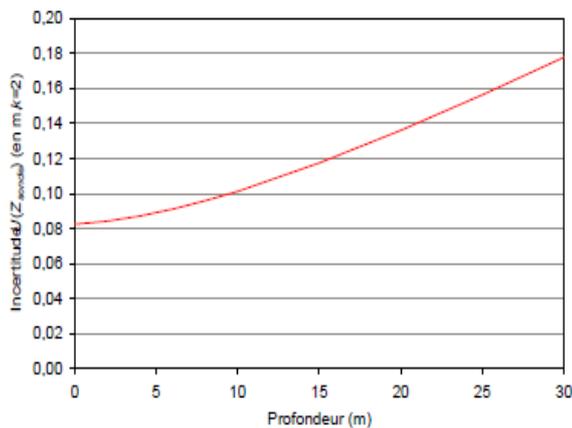
Figure 3

Exemple de carte différentielle pour observer l'évolution de l'envasement
Example of a differential map for observing changes in siltation

Une partie des restitutions d'information nécessitant la prise en compte d'un historique d'évolution des fonds, un archivage en base de données de l'ensemble des mesures effectuées sur chacun des aménagements EDF et CNR est mis en place [2].

Chaque interprétation d'informations produites à partir des mesures bathymétriques nécessite de connaître leurs « incertitudes » dans la mesure où cela peut avoir des implications en terme d'actions de gestion (déclenchement de curages ou de chasses, mode de gestion des volumes pour la production...). Les principaux facteurs d'incertitude sont présentés ci-après.

Les erreurs aléatoires de mesures sont liées au matériel et sont définies par le constructeur. Elles sont donc en théorie connues et devraient permettre de connaître la précision des mesures. La mise en œuvre sur le terrain de ces matériels rend en pratique difficile l'estimation exacte de cette précision. EDF a de ce fait défini une incertitude théorique maximale de $\pm (5 \text{ cm} + 1\% \text{ de la profondeur})$ soit par exemple $\pm 15 \text{ cm}$ pour une profondeur de 10 m. CNR a réalisé des tests sur le terrain [3] qui précisent cette incertitude et confirment l'enveloppe maximale proposé par EDF (Figure 4). Les erreurs systématiques sont dues à des biais de mesures qui peuvent persister même si des vérifications sont mises en place : contrôles topographiques du fond et de la hauteur du plan d'eau, de la vitesse du son dans l'eau... CNR a mis en place un processus consistant à réaliser régulièrement (12 à 36 mois) des inter-comparaisons de ses différents systèmes de mesure (chaque embarcation et son système de mesure) en réalisant une bathymétrie commune sur une zone test [4]. Une autre façon de valider une donnée est d'en vérifier la cohérence avec d'anciennes mesures, sur des zones stables, ou à l'aide de géostatistiques. EDF a développé des méthodologies en ce sens [5].



profondeur	Incertitude $U(Z)$
0-10 m	± 10 cm
20 m	± 14 cm
30 m	± 18 cm
50 m	± 27 cm

Figure 4

Incertitude de mesure bathymétrique estimée suite à des tests de terrains
Uncertainty in estimated bathymetric measurements following tests

Une autre source d'imprécision est la mauvaise prise en compte de l'ensemble du plan d'eau si des zones sujettes aux évolutions sédimentaires sont inaccessibles (queues de retenues, zones de végétation...) ou si la cote basse du plan d'eau limite la surface accessible par bateau. Lors de comparaison entre plusieurs mesures, il faudra prendre en compte la surface mesurée. Il faut aussi considérer que les bathymétries sont des images à un instant donné, et donc tenir compte de cet aspect de représentativité dans l'interprétation des résultats.

Des fonds peu consolidés (vaseux), peuvent être observés peu après des périodes de dépôt important. En fonction de la fréquence choisie pour le sondeur bathymétrique, les ondes acoustiques vont y pénétrer plus ou moins profondément. Le fond ainsi relevé ne correspond donc pas forcément à l'interface eau-sédiment. Avec un tassement plus important menant à un fond « dur », un résultat différent sera obtenu. Ce phénomène est délicat à considérer.

Les développements en cours ou envisagés par rapport à ces difficultés sont les suivants. Vis-à-vis des erreurs systématiques et aléatoires, il peut être intéressant de généraliser les campagnes d'inter-comparaison entre moyens de mesure et de tests sur des sites de référence à fond connu. L'amélioration et l'industrialisation de méthodes d'analyse des biais de mesure, entre plusieurs acquisition sur un même site, est une autre piste suivie actuellement. Vis-à-vis des difficultés de bonne représentation spatiale, l'utilisation de moyens de mesure complémentaires, pour pallier aux problèmes de déploiement de sondeur, est à privilégier avec des méthodes opérationnelles (LIDAR aérien ou embarqué) ou en développement (Drones bathymétrique et LIDAR bathymétrique aérien). Vis-à-vis des difficultés de représentativité temporelle, un développement est en cours pour un système de bathymétrie à poste fixe mesurant en continu devant un ouvrage. L'utilisation de drones pourrait permettre de multiplier les mesures. Enfin, si la problématique de la bonne mesure des fonds vaseux est inhérente à la technique par mesure acoustique,

l'utilisation de sondeurs à plusieurs fréquences est une solution déjà appliquée qui pourrait être systématisée (étude en cours à fort enjeu CNR et EDF sur la base Isère).

4. LES MOYENS DE MESURE DES FONDS –ANALYSE DES COUCHES SEDIMENTAIRES

La connaissance des différentes couches de matériaux constituant le fond de la rivière ou retenue est importante pour anticiper l'évolution potentielle des fonds : où vont se produire les dépôts ? doivent-ils être dragués ? Vont-ils se déplacer « naturellement » avec les crues ou chasses ? L'étude de la confluence Rhône Isère a permis d'éviter un dragage de l'ordre de 2.5 M€ compte tenu de l'auto-entretien de l'Isère [6]. La démarche de cette étude a été de mixer les mesures de terrain bathymétrie et sondage avec un modèle physique de la confluence. Plus récemment, l'étude de la retenue de Champagneux en amont du barrage de Brégnier a permis d'identifier les caractéristiques hydrologiques nécessaires à la remobilisation des zones de dépôts. La difficulté pour ces deux analyses a été de connaître les caractéristiques mécaniques des dépôts s'étendant sur des tronçons de rivière de l'ordre de 2 à 3 km de long pour 200 à 250 m de large. L'exemple de l'étude de la retenue de Champagneux est présenté ci-après [7]. Elle se situe sur l'aménagement de Brégnier Cordon sur le Rhône, 100km en amont de Lyon. Cette problématique fait également l'objet d'une communication détaillée dans le cadre de ce congrès (Delinares et al, 2018).

A l'inverse de la bathymétrie où la performance des mesures acoustique est bien connue, les sondeurs à sédiment n'ont pas encore atteint leur maturité. En effet, connaître la nature des fonds en profondeur passe encore par un compromis entre nombre de sondages (bien souvent carottage), incertitude spatiale et coût de l'opération au regard des enjeux. CNR et EDF sont attentifs à l'évolution des technologies pour progresser en ce domaine, notamment par comparaison de campagne de levé sur des secteurs connus.

5. LES RESEAUX DE STATIONS DE MESURE EN CONTINU DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION PAR TURBIDIMETRIE

Pour la gestion sédimentaire des cours d'eau et des aménagements, il est essentiel d'avoir des séries temporelles des teneurs et flux de Matières en Suspension (MES). La mise en place de stations de mesure pérennes en continu, comme pour l'hydrologie, est seule capable de prendre en compte la variabilité temporelle des flux de MES qui est très importante sur le Rhône et ses affluents alpins. Disposer d'un réseau de stations, distribuées sur le territoire en fonction des enjeux locaux (gestion d'un aménagement) ou régionaux (gestion

d'un cours d'eau), permet de prendre en compte la variabilité spatiale [8]. Les premières séries de mesure de flux de MES en continu produites étaient basées sur des prélèvements réguliers (journalier mais rarement plus) pour analyse par pesées (mesures dans les années 1920 par les Forces Motrice du Drac, dans les années 1990 sur l'Isère à Grenoble par l'IGA, sur le Rhône à Arles dans les années 2000 par l'IRSN...). La chronique à pas de temps fin (horaire) est alors généralement obtenue en établissant une relation moyenne entre la concentration en MES (C_{MES}) et le débit (Q) du type $C_{MES}=aQ^b$ [9]. Dans les années 2000, l'utilisation de stations de mesures automatiques en continu équipées de turbidimètres a permis à EDF de commencer à déployer un réseau. A ce jour, sur le Rhône et ses affluents, environ 70 stations sont en place (Figure 5B), gérées pour majorité par EDF (50 stations) mais aussi par la CNR (6 stations), Irstea et d'autres acteurs scientifiques (13 stations). Les échanges techniques ont conduit à une bonne homogénéité du matériel composant ces stations (Figure 5A) avec notamment un turbidimètre associé systématiquement à un préleveur à demeure ou temporaire permettant la réalisation de prélèvements.

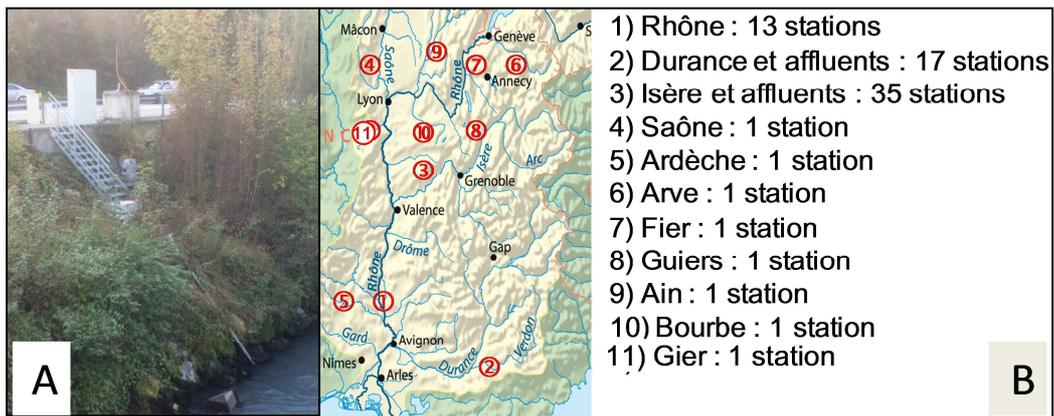


Figure 5

(A) Exemples de stations turbidité. (B) Liste des stations du bassin du Rhône.
 A) Turbidity meter station examples. (B) List of stations in the Rhône basin.

Chaque gestionnaire, en fonction de ses objectifs et moyens, a adopté des procédures de gestion de ces stations. Pour exploiter son parc d'une cinquantaine de stations, EDF suit des principes visant à obtenir un niveau de qualité répondant aux exigences des études utilisant ces données :

- Etude amont des sites d'implantation pour garantir la pérennité de la station et la représentativité de la mesure.
- Homogénéité des matériels pour faciliter l'entretien.
- Rapatriement des données vers une base de données centralisée.
- Intervention mensuelle d'entretien pour prévenir les pannes et surveillance régulière des données pour déclencher des interventions en cas de défaut.

- Réalisation régulière de prélèvements pour analyse de la teneur en MES par pesée (C_{MES}) et établissement d'une relation $C_{MES} = f(\text{Turbidité})$ qui permet de passer d'une chronique de turbidité à une chronique de teneur en MES, puis, avec les débits, à une chronique de flux de MES.
- Validation mensuelle des données. Bilan critique des données tous les deux ans en recoupant entre elles les données de plusieurs stations et en tenant compte des données hydro-météo et d'exploitation des ouvrages.

Toutefois, les difficultés d'exploitation restent importantes et peuvent entraîner une qualité des données dégradée. Nous les évoquerons par la suite.

Les stations en rivière permettent de caractériser le transport solide en suspension des cours d'eau étudiés au travers de paramètres tels que ceux présentés pour la station de Tullins sur l'Isère en aval de Grenoble, avec une chronique parmi les plus longues disponibles (Figure 6). La présence d'un ensemble de stations sur le même bassin versant permet d'avoir une vision spatiale des apports et fournit notamment des données indispensables pour caractériser les transferts des flux de l'amont vers l'aval.

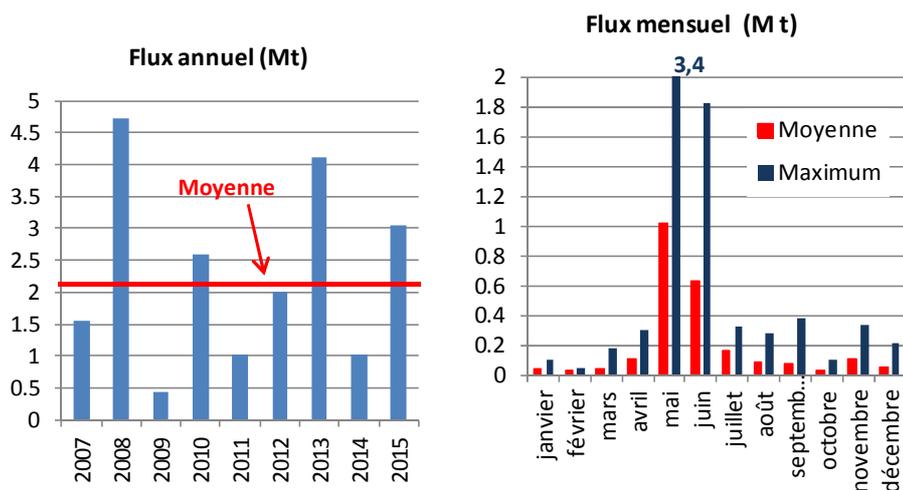


Figure 6
Transport solide en suspension sur l'Isère à Tullins de 2007 à 2015.
Suspended sediment in the Isère at Tullins from 2007 to 2015.

Ces stations en rivière, complétées avec des stations dans les ouvrages hydroélectriques (dans une prise d'eau par exemple), sont utilisées pour comprendre le fonctionnement sédimentaire des aménagements et en améliorer la gestion vis-à-vis des problèmes de dépôts sédimentaires. C'est le cas par exemple pour la retenue de Saint Egrève sur l'Isère. Elle est gérée au fil de l'eau et malgré une gestion par chasses annuelles, elle connaît des problèmes d'envasement à prendre en compte notamment vis-à-vis des risques de débordement en crue. Les données de flux solides acquises sur ce site ont permis de constater que l'essentiel du flux solide arrivant est très concentré dans

le temps (Figure 7a) et que des abaissements partiels de la retenue limitent très fortement le taux de décantation (Figure 7 b). Une gestion spécifique a été mise en place en 2007 en abaissant la retenue au moment où l'on observe l'arrivée de forts flux solide (moins de 5 % du temps pour limiter la gêne d'exploitation). On estime que le dépôt évité entre 2007 et 2013 est d'environ 1.6 Mt (pour un dépôt totale probable de 5.4 Mt) et qu'il concerne notamment un banc de sédiment qui s'érode peu lors des chasses (Figure 7c).

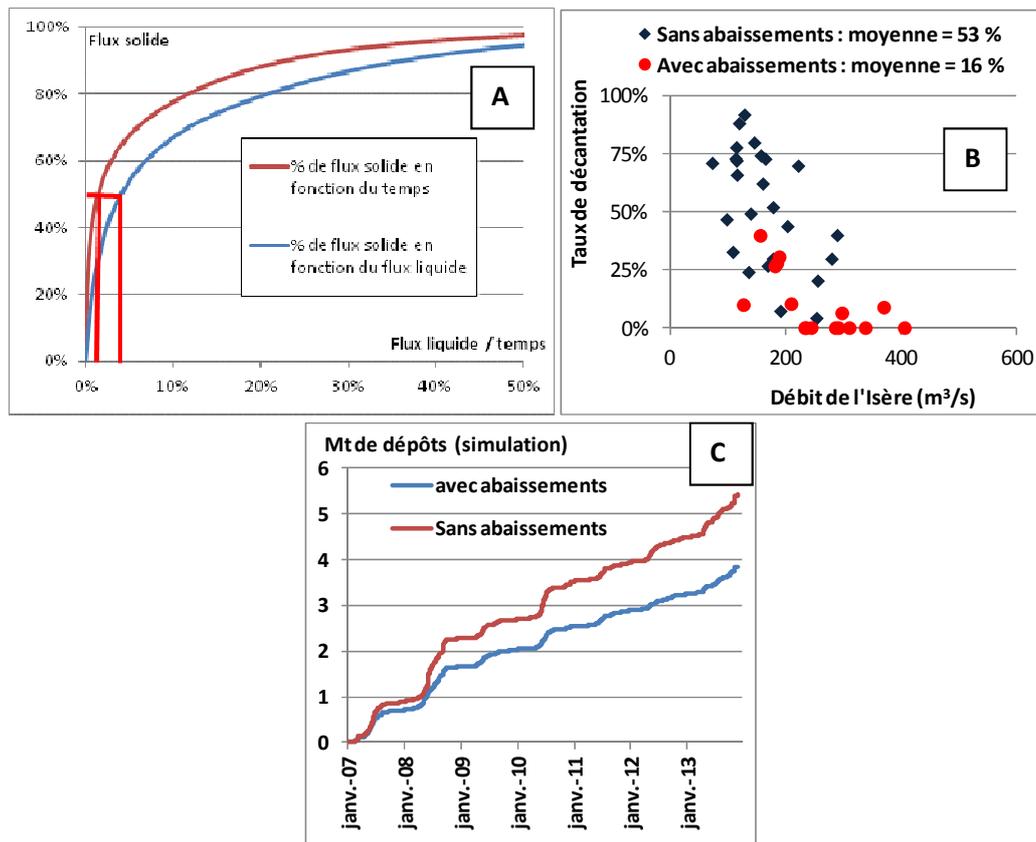


Figure 7

Données sur le transport solide en suspension pour la retenue de Saint-Égrève
Data on the suspended sediment for the Saint-Égrève reservoir

D'autres actions de gestion, sur les aménagements EDF utilisant ces réseaux de mesure, peuvent être citées : fermeture de certaines prises d'eau lorsqu'elles sont trop chargées en MES, pilotage d'opérations de gestion sédimentaire pour respecter des critères environnementaux, estimation à pas de temps fin des dépôts dans les retenues... Enfin, on peut citer le cas, sans doute unique, des prévisions d'apports de flux solide en suspension qui sont réalisées pour une gestion optimisée de la chaîne d'aménagements hydroélectrique de la Durance. Elles s'appuient sur un modèle hydrosédimentaire calé sur des données issues de plusieurs stations de mesure.

La plupart des données du réseau de stations de mesure turbidimétrique du bassin du Rhône sont gérées dans des bases de données : CASTOR pour EDF, BDOH pour IRSTEA et Hydromet pour CNR.

Lorsqu'on souhaite évaluer la précision des mesures de MES par turbidimétrie et apporter des améliorations métrologiques, un certain nombre d'éléments doivent être pris en compte. Concernant la qualité du capteur et de la chaîne d'acquisition, le matériel utilisé est éprouvé dans l'industrie. Il y a sur le réseau des stations du bassin versant du Rhône une assez bonne standardisation du matériel qui bénéficie d'un fort retour d'expérience. Il n'existe par contre pas de méthode d'étalonnage en g/l des capteurs dans des gammes de forte charge en MES (cf §6). La qualité du matériel permet un taux de panne assez faible permettant une bonne représentativité temporelle. Toutefois, des dommages peuvent survenir au matériel lors des crues, nous privant de donnée lors d'épisodes qui représentent l'essentiel du flux. Concernant la représentativité spatiale du point de mesure dans la section, les stations sont placées dans des zones aux caractéristiques requises pour une bonne homogénéité des teneurs en MES. Il n'existe toutefois pas d'outil de mesure facile à déployer pour contrôler l'homogénéité d'une section. Cela pourrait être justifié notamment en crue car l'on suspecte souvent la présence d'une fraction sableuse en suspension plus hétérogène, notamment entre surface et fond. Enfin, des questions se pose sur la qualité de la relation $C_{MES}=f(\text{Turbidité})$. Les stations de mesure sont équipées d'un préleveur automatique (à demeure ou non) pour disposer régulièrement d'échantillons d'eau pour faire des pesées et granulométries de MES servant à caler la relation (propre à chaque site voire à chaque événement hydrologique). Cependant, il reste difficile d'échantillonner suffisamment sur chaque station pour prendre en compte les variations temporelles de la relation, liées notamment à des changements de compositions minéralogiques ou granulométriques lors des crues [10], [11], [12]. La précision des données de concentration et de flux de MES dépendra essentiellement du calage de cette relation, étroitement lié au nombre de prélèvements (cf chapitre 6).

6. LES CAMPAGNES DE MESURE POUR DES SUIVIS D'ÉVÉNEMENTS

CNR et EDF ont développé des méthodes de mesures de flux sédimentaires en suspension notamment pour piloter, les aménagements hydrauliques lors des opérations de chasse ou de vidange des barrages. Outre le respect des contraintes environnementale sur les taux de MES notamment, ces mesures sont utiles pour comprendre le fonctionnement sédimentaire des aménagements lors de ces opérations. L'exemple du suivi de l'accompagnement des chasses Suisse sur les aménagements du Rhône (APAVÉR) est présenté ici.

Ces opérations, souvent triennales, consistent à remobiliser les sédiments accumulés au fil du temps qui risqueraient d'entraîner des inondations des bas quartiers de Genève. Les aménagements CNR en aval doivent alors être pilotés de façon coordonnée pour être le plus transparents possible, à savoir éviter l'accumulation de ces matériaux (remobilisés) dans les retenues tout en respectant les seuils de taux de MES compatibles avec la survie de la faune aquatique. Afin de réguler, voire d'amortir, le taux de MES en provenance de Suisse, CNR utilise sa 1^{ère} retenue comme « bassin tampon » [13] [14]. Cette retenue située à Génissiat dispose d'une vanne de demi-fond délivrant de l'eau moins chargée que sa vanne de fond. Le pilotage contrôlé de ces deux vannes permet de maîtriser le taux de MES évacué vers l'aval. Pour assurer ce pilotage, CNR utilise des stations de mesures de MES :

- en amont de Génissiat pour anticiper ce qui va arriver,
- en sortie de vanne de fond et demi-fond pour ajuster le flux de MES,
- 5km en aval de Génissiat (contrôle règlementaire du taux de MES).

Au total 15 stations ont été mises en œuvre : 6 pérennes à demeure et 9 provisoires installées pour une dizaine de jours, durée de l'opération. Les stations pérennes sont conformes au descriptif du § 5 : un turbidimètre associé à un préleveur automatique. Pour les stations situées immédiatement en amont et aval de Génissiat, des équipes dédiées ont toutefois été dépêchées sur site 24/24 pour les 10 jours de l'opération en complément des mesures automatiques. Ces équipes étaient chargées de réaliser des prélèvements afin de permettre l'ajustement en temps réel la relation $CMES=f(\text{Turbidité})$. 7 stations provisoires sur 9 étaient constituées d'un radeau permettant l'immersion d'un turbidimètre 80cm sous la surface de l'eau (

Figure 8). Ce radeau implanté au centre de la rivière assurait l'acquisition et la transmission des données au superviseur tout en s'adaptant aux variations éventuelles de plan d'eau (de quelques dizaine de centimètres pour certain, à presque 15 m pour le site de Bellegarde en amont de Génissiat). Les 2 autres stations provisoires étaient situées sur les vannes de fond (VdF) et demi-fond (V1/2F) de l'aménagement de Génissiat. A noter que deux stations pérennes sur six ont nécessité une maintenance pour dévaser la sonde turbidimétrique du fait de la formation de dépôt en berge pendant ces opérations APAVER. A l'opposé, toutes les stations provisoires « radeau » ont fonctionné sans aucun dysfonctionnement pendant toute la durée de l'opération.

Pour la campagne de mai 2016, afin d'améliorer le processus de mesure, CNR a mis en place plusieurs capteurs de technologies différentes sur la VdF (Figure 9).



Figure 8

Radeau pour la mesure de la turbidité accroché depuis pont à Bellegarde.
 Bridge-moored raft for measuring turbidity at Bellegarde

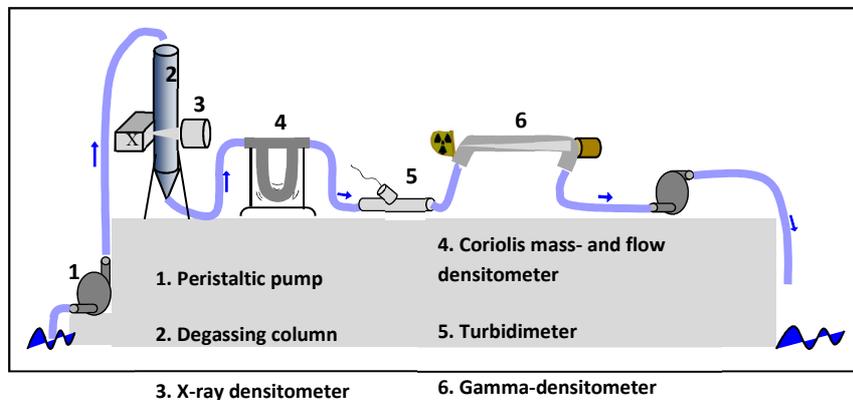


Figure 9

Schéma d'implantation du système de mesure des teneurs en MES à Génissiat
 Layout diagram of suspended particulate matter measuring system at Génissiat

Le processus consistait à pomper une partie du flux sortant de la V_{dF} ou $V_{1/2F}$ pour passer ensuite au travers de l'ensemble des capteurs avant d'être rejeté plus en aval. Les données acquises ont ensuite été comparées aux valeurs de prélèvements manuels, effectués dans le canal de fuite, pour ajuster les capteurs à ces mesures de référence ponctuelle. Une pré-calibration a été faite quelques semaines avant l'opération sur la gamme 0-100g/l avec un système de pompage en circuit fermé. Cette pré-calibration a été réalisée avec les sédiments pris sur site pour être représentatifs. Malgré cela, l'ensemble des capteurs méritaient d'être ajustés pendant l'opération pour réduire l'incertitude sur le taux de MES. Toutefois, par ordre de qualité de mesure, la technologie Coriolis est celle ayant conduit aux meilleurs résultats in-situ dans la gamme 0-70g/l et ce sans ajustement (+/- 20%), après quoi viennent les équipements à rayonnement (+/- 30%) puis en dernier le turbidimètre (200%). Ce constat est en phase avec les expérimentations du même type, coriolis / turbidimètre, menées récemment à l'ETH de Zurich [15].

En post-traitement, l'ensemble des capteurs continus ont permis d'avoir un signal continu du taux de MES à moins de 1% (signal ajusté) en moyenne par rapport aux prélèvements (Figure 10) sur la gamme 0-70g/l. Ceci n'est valable bien sûr qu'avec le nombre important de pycnomètres analysés sur l'ensemble de la période avec une équipe présente 24/24 sur 10 jours (540 pycnomètres pour VdF). Il est à noter que la dispersion de ce signal continu ajusté par rapport à chaque prélèvement est relativement importante : environ 20% dans 95% des cas. Cette dispersion s'explique avec la variabilité des prélèvements par rapport au un signal continu plus stable. Pour réduire l'impact de l'incertitude intrinsèque du prélèvement, le post-traitement a consisté à retenir les neuf prélèvements pycnomètres autour de la valeur du turbidimètre pour ajuster le signal continu.

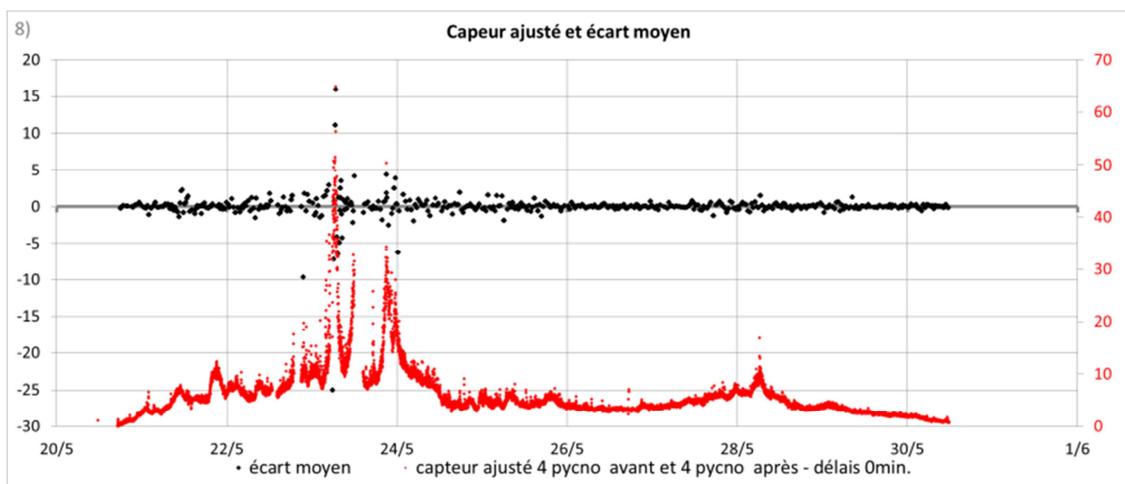


Figure 10

Evolution du taux de MES avec le capteur Coriolis ajusté en post-traitement (rouge) et écart aux pycnomètres de référence (noir).

Changes in suspended sediment concentration with the Coriolis sensor adjusted by post processing (red) and scatter at the reference pycnometers (black).

En temps réel, l'ajustement de ce signal avec les mêmes pycnomètres permet d'obtenir l'information de MES en continu à 10%. La différence entre post-traitement et temps réel réside à ne retenir que 4 prélèvements réalisés à minima une heure avant le calcul de l'ajustement.

Afin d'optimiser les ressources et éviter les prélèvements de nuit pour des raisons de sécurité, il a été simulé l'information qu'aurait donné le capteur continu ajusté en temps réel avec les prélèvements réalisés avec seulement 2 équipes (6-21h) au lieu de 3 (0-24h), puis une seule équipe travaillant de jour (8-12h / 13-17h).

Il est alors constaté que l'information des capteurs implantés à Génissiat avec un contrôle uniquement en journée permet de connaître le taux de MES en continu et en temps réel à moins de 20%, ce qui est largement compatible avec le pilotage de l'aménagement (Figure 11).

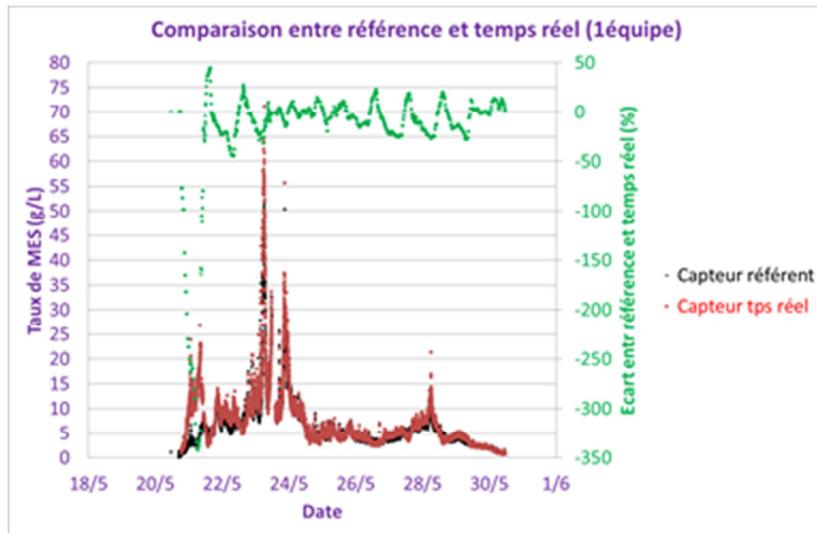


Figure 11

Evolution du taux de MES avec le capteur Coriolis ajusté en temps réel en journée (rouge) et écart à la série de référence (noir).
 Changes in suspended sediment concentration with the Coriolis sensor (red) adjusted in real time during the day and scatter at the reference pycnometers (black).

Toutefois, au droit de la section de contrôle règlementaire, située à Seyssel 5km en aval de Génissiat, le taux de MES doit être connu avec une incertitude proche du g/l sur la gamme 10-20g/l. Pour ce site, une équipe dépêchée 24/24 s'avère donc nécessaire pour garantir la précision souhaitée lorsqu'on sera susceptible d'atteindre ces seuils. Dans la gamme 0-10g/l, le suivi en continu via une sonde turbidimétrique ajustée avec les prélèvements effectués en journée est compatible avec l'enjeu : disposer d'une valeur moyenne de MES à moins de 5% près en moyenne par rapport aux prélèvements de référence.

Le retour d'expérience de ces opérations APAVER 2016 montre une forte variabilité des teneurs en MES obtenus à partir de prélèvements alors que les systèmes de mesure en continu permettent d'avoir un signal plus stable. Le turbidimètre est facile à instrumenter mais nécessite des ajustements fréquents de la relation $C_{MES}=f(\text{Turbidité})$, infra journalier à horaire, en fonction de la précision souhaitée. Pour pallier cette difficulté, le capteur Coriolis est une solution qui pourrait être déployée plus régulièrement puisque qu'il nécessite peu de pré-calibration. L'inconvénient majeur est qu'il nécessite une prise d'eau pour analyser ce flux.

Le nombre important de mesures APAVER 2016 a permis d'approcher l'incertitude en MES pour les capteurs de mesure continu. Les capteurs les plus robustes nécessitent une prise d'eau pour analyser ce flux. CNR collabore avec l'Irtea sur des travaux de thèse visant à utiliser le signal rétrodiffusé des capteurs Doppler pour estimer d'une part le taux de MES mais également la taille moyenne de ces grains en suspension. CNR est également impliqué dans un

projet de recherche ANR pour explorer les bases d'un capteur permettant d'explorer la partie sableuse du fond des rivières avec des équipements Doppler. Ces travaux, s'ils aboutissent, permettraient d'avoir une bonne mesure de MES en s'affranchissant des systèmes de prélèvement nécessitant souvent des ressources importantes en conception et maintenance pour un fonctionnement opérationnel.

7. PERSPECTIVES

Les mesures de flux sédimentaires de MES et les mesures de dépôts sédimentaires sont apparues dès la mise en place des premiers barrages hydroélectriques (Figure 12). La recherche d'optimisation de la gestion des ouvrages et les questions toujours plus pointues sur les aspects de sûreté ou d'environnement nécessitent d'obtenir des données toujours plus nombreuses et précises.



Figure 12

Bathymétrie sur le Drac en 1936 (d'après Bettega-2017)

Bathymétry in the Drac in 1936 (d'après Bettega-2017)

La collaboration entre gestionnaires hydroélectrique et organismes de recherches s'impose pour gagner en connaissance sur cette thématique hydro-sédimentaire. Compte tenu des avancées technologiques actuelles, on peut tenter d'anticiper les marges de progrès selon deux échéances :

- A court termes :
 - rendre plus systématique les campagnes d'inter-comparaison des moyens bathymétriques pour mieux maîtriser et corriger les éventuelles biais.
 - intégrer plus souvent dans l'élaboration des protocoles de mesure bathymétrique l'utilisation de supports télécommandés ou drones pour répondre aux enjeux de sécurité et d'optimisation de ressource.
 - rendre plus opérationnel l'utilisation mixte de données bathymétrique et Lidar aérien pour faciliter le levé de zone difficilement accessibles.
 - optimiser les méthodes pour la calibration de la relation $C_{MES}=f(\text{Turbidité})$ en condition in situ, intégrant l'incertitude sur les chronique de concentration.

- A plus long terme :
- déployer les profileurs Doppler pour obtenir des informations sur les concentrations en MES (y compris fraction sableuse), la granulométrie et leur répartition dans la section de mesure, l'objectif étant de limiter ainsi les prélèvements de calibration.
- utiliser les sondeurs de sédiments pour avoir mieux accès à la nature du sol en profondeur.

8. RESUME

L'article présente l'expérience de CNR et d'EDF sur le Rhône et ses affluents concernant les technologies de mesure des fonds des rivières ou retenues et des flux de matière en suspension. Ces flux, très importants sur ces cours d'eau, nécessitent une gestion adaptée des ouvrages (barrages, canaux...). EDF et CNR s'appuient sur le savoir faire de la communauté scientifique régionale, notamment celui d'Irstea pour progresser dans la mesure de flux. Concernant la mesure des fonds, les processus de levés bathymétriques sont bien maîtrisés et permettent, dans une gamme de situations très variés (de rivières de montagne au fleuve Rhône), de connaître les évolutions et de les restituer sous diverses formes : courbes de capacité des retenues, plans différentiels... Les développements en cours portent essentiellement sur la capacité de mesure dans des conditions spécifiques (en crue, dans des zones de navigation délicates...). La nature du fond, fait partie intégrante du processus sédimentaire. A ce jour sa connaissance reste basée sur des sondages ponctuels. Cette technique présente diverses limitations (prise en compte partielle de l'hétérogénéité spatiale...) qui pourraient être en partie levées, d'ici quelques années, avec l'amélioration des sondeurs à sédiment. Concernant la connaissance des flux de matière en suspension, l'article présente le réseau de mesures pérennes mis en place avec environ 70 stations par turbidimétrie optique sur le bassin du Rhône. Le mode de gestion de ces stations et des exemples d'informations produites sont présentés. En compléments de ces stations pérennes, pour des opérations spécifiques comme l'accompagnement des chasses suisse sur le Rhône français, des campagnes de mesures font appel à des moyens de mesure spécifiques. L'expérience acquise montre que les incertitudes sur ces mesures de flux doivent encore être mieux caractérisées en prenant notamment mieux en compte les hétérogénéités de concentration en MES dans la section de mesure et la part variable des sables en suspension.

9. SUMMARY

The article describes the experience of CNR and EDF on the Rhône and its tributaries with regard to technologies for measuring river or reservoir bottoms and suspended solid flows. These flows are highly substantial on these watercourses and require the facilities (dams, canals, etc.) to be suitably

managed. EDF and CNR rely on the expertise of the regional scientific community, particularly of IRSTEA (National Scientific and Technological Research Institute for the Environment and Agriculture). With regard to bottom measurements, bathymetric survey processes are well understood and provide knowledge of the changes in a highly varied range of situations (from mountain rivers to the River Rhône), which can be plotted in various forms: reservoir capacity curves, differential plans, etc. Current developments mainly relate to measurement capacity in particular conditions (in spate, in sensitive navigation areas, etc.). The nature of the bottom is an integral part of the sedimentary process. To date, knowledge of the bottom is still based on point sampling. There are various limitations to this technique (taking spatial heterogeneity, etc. partially into account), some of which could be removed in the next few years by means of improved sediment probes. With regard to knowledge of suspended solid flows, the article describes the permanent measurement grid set up with about 70 optical turbidity meter stations in the Rhône basin. It also describes the station management method and sets out examples of the data produced. In addition to these stations, for special operations such as monitoring the flushing of the Swiss dams on the Rhône, measuring surveys are carried out with special measuring equipment. The experience gained shows that the flow measurement uncertainty still needs to be better described, particularly by improving the way the unevenness of suspended solid concentrations is taken into account in the measured section and the variable content of suspended sand.

REFERENCES

- [1] MARINA LAUNAY. Flux de matières en suspension, de mercure et de PCB particulières dans le Rhône, du Léman à la Méditerranée. 2015.
- [2] PAUL HENRI FAURE. MapRhône : un logiciel CNR dédié à la surveillance des fleuves. Communication Orale colloque. CIDCO. 2017.
- [3] BERTRAND BLANQUART. Estimation des incertitudes de mesure en bathymétrie. *Etude Cétiat pour CNR*. 2008.
- [4] BERTRAND BLANQUART, SORAYA AMAROUICHE. Comparaison inter-vedettes 2015 en bathymétrie et comparaison avec les campagnes de 2010, 2011, et 2012. *Etude LNE pour CNR*. 2015.
- [5] BENOIT DE VANDIERE. Amélioration des méthodes de calcul des bilans sédimentaires dans les retenues. Communication Orale colloque CIDCO. 2017.
- [6] ERIC DOUTRIAUX. La confluence Rhône Isère : exemple d'utilisation d'un modèle physique pour optimiser la gestion d'un aménagement fluvial à buts multiples. *Houille Blanche*. 2004.

-
- [7] CHRISTOPHE PETEUIL. Evaluating favorable conditions for sediment transport in reservoirs: Champagneux dam case study, France. Icold 2017.
- [8] ANTOINE G., JODEAU M., CAMENEN B., ESTEVES M., NEMERY J. & LAUTERS F. Estimation des flux de matières en suspension lors des chasses hydrauliques de l'Arc de 2006 à 2011. *La Houille Blanche*, 4:43-49. 2013.
- [9] DUMAS D. The results of 10 years of daily observations of the load of suspended matter in one of the main watercourses in the European Alps: The Isère at Grenoble (France). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Geosciences 339 : 810–819*. 2007.
- [10] THOLLET F., LE COZ J., ANTOINE G., FRANÇOIS P., SAGUINTAAH L., LAUNAY M., CAMENEN B.. Influence de la granulométrie des particules sur la mesure par turbidimétrie des flux de matières en suspension dans les cours d'eau, *La Houille Blanche*, 4:50-56. 2013.
- [11] NAVRATIL, O., ESTEVES, M., LEGOUT, C., GRATIOT, N., NEMERY, J., WILLMORE, S., GRANGEON, T.. Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment. *Journal of Hydrology 398, 246259*. 2011.
- [12] NEMERY, J., MANO V., NAVRATIL O., GRATIOT N., DUVERT C., LEGOUT C., BELLEUDY P., POIREL A. ET ESTEVES M.. Retour d'expérience sur l'utilisation de la turbidité en rivière de montagne. *Techniques sciences méthodes, génie urbain génie rural. 1-2: 61-68*. 2010.
- [13] C. PETEUIL, F. FRUCHART, F. ABADIE, S. REYNAUD, B. CAMENEN AND L. GUERTAULT. 2013. *Sustainable management of sediment fluxes in reservoir by eco-friendly flushing: the case study of the Genissiat dam on the upper Rhone River (France)*. *Proceeding of 12th International Symposium on River Sedimentation. Kyoto, Japan*.
- [14] R. LE BOURSICAUD, G. PIERREFEU, D. BONHOMME, N. CORONNEL. *Multi-method monitoring of suspended sediment concentration on the Rhône River during a sediment management operation. Hydropower Montreux. 2016*
- [15] D. FELIX, I. ALBAYRAK & R.M. BOES. *Combining in-situ laser diffraction (LISST) and vibrating tube densimetry to measure low and high suspended sediment concentrations. Proceeding of 13th International Symposium on River Sedimentation. Stuttgart, Germany. (2016)*