



**HAL**  
open science

## Suivi scientifique des opérations de chasses sur le Haut Rhône de juin 2012

Jérôme Le Coz, M. Launay, C. Walter, L. Guertault, B. Camenen, M. Lagouy, F. Thollet, Guillaume Dramais, J.B. Faure, H. Angot, et al.

► **To cite this version:**

Jérôme Le Coz, M. Launay, C. Walter, L. Guertault, B. Camenen, et al.. Suivi scientifique des opérations de chasses sur le Haut Rhône de juin 2012. [Rapport de recherche] irstea. 2013, pp.58. hal-02601929

**HAL Id: hal-02601929**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02601929>**

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.

# Suivi scientifique des opérations de chasses sur le Haut Rhône de juin 2012

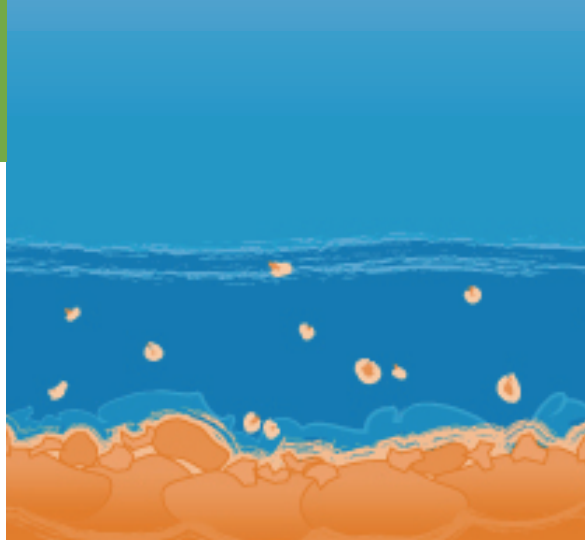


**O**bservatoire  
**S**édiments  
**R**hône

*Version finale - septembre 2013*



2  
0  
1  
3  
  
S  
E  
M  
E  
S  
T  
R  
E  
  
8



## Résultats du suivi des opérations de chasse sur le Haut-Rhône de juin 2012

Personnes impliquées	Equipe de recherche
Hydrologie – Hydraulique : J. Le Coz, M. Launay, C. Walter, L. Guertault, B. Camenen, M. Lagouy, F. Thollet, G. Dramais, J.-B. Faure  LAMA : H. Angot, M. Coquery, J. Panay, G. Grisot	Irstea Lyon
S. Gairoard, O. Radakovitch	Cerege
F. Eyrolle-Boyer, C. Antonelli, W. Adell, M. Zebracki, D. Tournieux	IRSN

### Résumé

Dans le cadre de l'Action 8, l'OSR a réalisé un suivi sédimentaire de la chasse du Haut-Rhône complémentaire des suivis réglementaires assurés par la CNR et le Grand Lyon. Les suivis décrits dans ce rapport ont eu pour objectif de quantifier et d'étudier la variabilité spatio-temporelle des flux de matières en suspension (MES) et de certains contaminants et paramètres d'intérêt associés, générés dans le Haut-Rhône par l'abaissement de la retenue de Génissiat (semaine 1) et par la chasse de la retenue de Verbois (semaine 2). Les opérations de chasse ont participé en deux semaines à la station de Jons à près de 30% du flux annuel de MES et près de 25% du flux annuel en polychlorobiphényles et mercure. Les flux de MES engendrés par les reprises de dépôts au cours des crues suivantes ont également été suivis dans le cadre de la surveillance des stations pérennes et du groupe d'intervention en crues.

### Mots clés

Matières en suspension, contaminants organiques, métaux, flux, retenue de barrage, crue.



Irstea – Centre de Lyon-Villeurbanne  
5 rue de la Doua – CS70077  
69626 VILLEURBANNE Cedex

### Avec le soutien de



## Table des matières

<b>Liste des Figures</b>	4
<b>Liste des Tableaux</b>	7
<b>1. Contexte et objectifs</b>	8
<b>2. Localisation des stations de suivi et paramètres mesurés</b>	
<b>3. Suivi des débits</b>	10
3.1 Le Rhône	
3.2 Les affluents du Rhône	
3.3 La zone Miribel-Jonage	11
<b>4. Suivi des matières en suspension</b>	13
4.1 Concentrations mesurées aux différents points du réseau	
4.2 Homogénéité des concentrations en MES dans la section de mesure du Rhône à Jons	16
4.3 Suivi des MES des affluents	18
4.4 Flux de MES sur le Haut-Rhône	20
<b>5. Teneurs en substances chimiques dans les MES</b>	23
5.1 Bilan des prélèvements et substances chimiques analysées	
5.2 Teneurs en contaminants des MES	26
5.2.1 Comparaison des systèmes de prélèvement	
5.2.2 Profil de contamination en PCB indicateurs	
5.2.3 Teneurs en contaminants sur le Rhône amont	27
5.3 Bilan	35
5.4 Evolution de la nature des particules et normalisation des teneurs	
5.4.1 Evolution de la teneur en carbone organique	
5.4.2 Evolution de la distribution granulométrique	36
5.4.3 Correction des données par le carbone organique	37
<b>6. Impact des opérations de chasse sur le Rhône aval</b>	39
<b>7. Suivi post-chasse</b>	42
7.1 Déclenchement du groupe d'intervention en crue	
7.2 Suivi des flux de MES à la station de Genève sur l'Arve	
7.3 Comparaison des flux de MES quantifiés à Jons	43
<b>8. Modélisation hydraulique du Rhône</b>	44
8.1 Structure du modèle hydro-sédimentaire	45
8.1.1 Le réseau	
8.1.2 La géométrie	46
8.2 Représentation des ouvrages	
8.3 Conditions limites et données d'entrée	49
8.3.1 Conditions limites et données d'entrée hydrauliques	
8.3.2 Conditions limites et données d'entrée sédimentaires	
8.4 Calage hydro-sédimentaire du modèle	50
8.4.1 Calage hydraulique	
8.4.2 Calage sédimentaire	53
8.5 Limites du modèle	55
8.6 Suite des travaux	56
<b>Conclusion</b>	57
<b>Références</b>	58

## Annexes

Annexe 1 : Fiche action chasse	59
Annexe 2 : Méthodes d'analyse et limites de quantification associées des différents contaminants sur MES	71
Annexe 3 : Concentrations en métaux aux différentes stations du suivi en fonction de la technique de prélèvement utilisée	72
Annexe 4 : Propriétés physico-chimiques des PCB indicateurs	74
Annexe 5 : Teneurs en mercure des MES échantillonnées sur le Haut-Rhône pendant les opérations de chasse	75
Annexe 6 : Teneurs en PCB indicateurs et en $\sum\text{PCBi}$ des MES échantillonnées sur le Haut-Rhône pendant les opérations de chasse	76
Annexe 7 : Synthèse des données topographiques utilisées pour la construction du modèle	79
Annexe 8 : Débits turbinables maximum et débits réservés pour les aménagements hydro-électriques du Haut-Rhône	80
Annexe 9 : Consignes d'exploitation avec points de réglage associés pour les aménagements hydro-électriques du Haut-Rhône	81
Annexe 10 : Coefficients de Strickler issus du calage hydraulique	82

## Liste des Figures

Figure 1 : Réseau hydrographique du Haut-Rhône, barrages de Verbois et Génissiat, et stations de suivi MES et contaminants du protocole OSR	8
Figure 2 : Débits du Haut-Rhône mesurés sur les stations CNR durant la période de chasse	10
Figure 3 : Débits des principaux affluents du Haut-Rhône durant la période de chasse en juin 2012	11
Figure 4 : Localisation des sections de jaugeage dans la zone Miribel-Jonage	11
Figure 5 : Débits à Jons, dans le canal de Miribel et dans le Vieux-Rhône en juin 2012	12
Figure 6 : Etablissement de la courbe d'étalonnage du turbidimètre installé sur le Rhône à Perrache du 31/05/12 au 26/06/12	13
Figure 7 : Exemple de signal turbidimétrique calé avec des prélèvements rapprochés (manuel automatisé) : station de Bugey (EDF)	14
Figure 8 : Concentrations en MES à Pougny et Seyssel en juin 2012. Débit à Pougny	14
Figure 9 : Concentrations en MES à Creys, Bugey et Jons. Débit à Jons en juin 2012	15
Figure 10 : Enregistrements de turbidité convertis en concentrations en MES aux sites situés à proximité de Lyon : Jons, canal de Miribel (Neyron), Vieux-Rhône amont, Vieux-Rhône aval, et Lyon Perrache	16
Figure 11 : Localisation de la section de prélèvements pour le contrôle de l'homogénéité des concentrations en MES dans le Rhône à Jons	16
Figure 12 : Concentrations en MES mesurées dans la section du Rhône située à l'amont de la diffluence de Jons le 06/11/2012	17
Figure 13 : Concentrations en MES mesurées dans la section du Rhône située à l'amont de la diffluence de Jons le 13/06/2012	18
Figure 14 : Concentration en MES aux stations OSR sur l'Arve, le Guiers et l'Isère en juin 2012	19
Figure 15 : Flux de MES sur le Haut-Rhône pendant la semaine d'abaissement de la retenue de Génissiat (du 06/06/2012 au 10/06/2012)	20
Figure 16 : Flux de MES sur le Haut-Rhône pendant la semaine d'abaissement de la retenue de Verbois (du 10/06/2012 au 18/06/2012)	21
Figure 17 : Bilan des prélèvements en MES pour les analyses chimiques réalisés dans le cadre du suivi OSR des opérations de chasse sur le Haut-Rhône de juin 2012	25
Figure 18 : Pourcentages moyens en PCB indicateurs des MES échantillonnées à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel (septembre 2011 à février 2013) et aux stations du Rhône à Jons, Creys, Seyssel et Pougny lors des opérations de chasse. (Proportion de la teneur moyenne en PCB <sub>i</sub> par rapport à la teneur moyenne de la somme des PCB indicateurs)	27
Figure 19 : Teneur en $\sum PCB_i$ des MES échantillonnées à la centrifugeuse à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR (septembre 2011 à février 2013) et pendant les opérations de chasse	28
Figure 20 : Teneur en mercure des MES échantillonnées à la centrifugeuse à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR (septembre 2011 à septembre 2012) et pendant les opérations de chasse	28

Figure 21 : Teneur en certains métaux des MES échantillonnées à la centrifugeuse à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR et pendant les opérations de chasse (cobalt, arsenic, étain, chrome, nickel, cuivre)	28
Figure 22 : Teneur en certains métaux des MES échantillonnées à la centrifugeuse à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR et pendant les opérations de chasse (zinc, argent, cadmium)	29
Figure 23 : Teneur en $\sum\text{PCBi}$ des MES échantillonnées manuellement (échantillons composites journaliers) aux stations du Rhône à Pougny et Seyssel pendant les opérations de chasse	29
Figure 24 : Teneur en mercure des MES échantillonnées manuellement (échantillons composites journaliers) aux stations du Rhône à Pougny et Seyssel pendant les opérations de chasse	30
Figure 25 : Teneur en $\sum\text{HAP}$ des MES échantillonnées avec un piège à sédiments à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR et pendant les opérations de chasse	33
Figure 26 : Teneur $\sum\text{HAP}$ des MES échantillonnées manuellement (échantillons composites journaliers) aux stations Rhône à Pougny et Seyssel pendant les opérations de chasse	34
Figure 27 : Teneur en arsenic des MES échantillonnées manuellement (échantillons composites journaliers) aux stations Rhône à Pougny et Seyssel pendant les opérations de chasse	34
Figure 28 : Teneur en COP des MES échantillonnées à la centrifugeuse à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR (septembre 2011 à janvier 2013) et pendant les opérations de chasse	35
Figure 29 : Teneur en COP des MES échantillonnées à la centrifugeuse aux diverses stations du Haut-Rhône pendant les opérations de chasse de juin 2012	35
Figure 30 : Exemple de décomposition des distributions granulométriques selon quatre modes	36
Figure 31 : Proportion des quatre sous-populations granulométriques volumiques des MES prélevées pendant les opérations de chasse aux différentes stations	37
Figure 32 : Proportion des quatre sous-populations granulométriques volumiques des MES prélevées à Jons en régime de base, crue, et pendant les opérations de chasse	37
Figure 33 : Evolution temporelle des proportions des quatre populations granulométriques dans les échantillons de Pougny, Seyssel et Jons	38
Figure 34 : Teneur en mercure, corrigée par la teneur en COP des MES échantillonnées à la centrifugeuse à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR (septembre 2011 à septembre 2012) et pendant les opérations de chasse	38
Figure 35 : Teneur en $\sum\text{PCBi}$ , corrigée par la teneur en COP des MES échantillonnées à la centrifugeuse à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR (septembre 2011 à janvier 2013) et pendant les opérations de chasse	38
Figure 36 : Suivi de la charge en suspension à la station du Rhône à Arles	39
Figure 37 : Marqueurs géochimiques (baryum et strontium) pendant les opérations de chasse à Creys, Jons, Pougny et Seyssel, du 11 au 26 juin à Arles, et entre janvier et mai 2012 à Arles	40
Figure 38 : Suivi de la granulométrie des particules en transit à la station du Rhône à Arles sur la période juin-juillet 2012	41

Figure 39 : Suivi de la teneur en tritium libre dans l'eau du Rhône à différentes stations lors des opérations de chasse	41
Figure 40 : Tableau de bord de la chronique de turbidité validée de la station Arve/Genève	42
Figure 41 : Enregistrements de turbidité (brute) pendant et après les opérations : Arve à Genève, Rhône à Jons	41
Figure 42 : Extrait de l'enregistrement de turbidité de l'Arve à la station Genève Bout-du-Monde (août 2012)	43
Figure 43 : Réseau du modèle 1D hydro-sédimentaire utilisé pour simuler les flux hydro-sédimentaires pendant les opérations de chasse de juin 2012 sur le Haut-Rhône	45
Figure 44 : Relation niveau-débit au seuil de Villeurbanne	47
Figure 45 : Abaissement des aménagements de Verbois, de Chancy-Pougny, de Génissiat et de Seyssel mesuré pendant la chasse 2012 (relativement à la cote du 03/06/12 00:00)	48
Figure 46 : Abaissement des aménagements de Chautagne, de Belley, de Brégnier-Cordon et de Sault-Brénaz mesuré pendant la chasse 2012 (relativement à la cote du 03/06/12 00:00)	48
Figure 47 : Calage des coefficients de Strickler avec la ligne d'eau du 24/03/2009 entre Sault-Brénaz et le barrage de Jons pour $Q = 525 \text{ m}^3/\text{s}$	51
Figure 48 : Validation des coefficients de Strickler entre Sault-Brénaz et le barrage de Jons	52
Figure 49 : Hydrogramme mesuré et simulé (simulation entre Groslée et Jons) pour la chasse 2012 à Anthon, station hydrométrique de la CNR	53
Figure 50 : Variation du stock de fond sur le secteur entre Creys et Bugey en fonction du coefficient $a_c$ (pour $a_{pd} = 0.01$ )	54
Figure 51 : Concentration en MES mesurée et simulée à Bugey (pour une simulation entre Creys et Bugey avec $a_c = 0.01$ et $a_{pd} = 0.055$ )	55



## Liste des Tableaux

Tableau 1 : Mesures de débit par jaugeage aDcp dans le système Miribel-Jonage	12
Tableau 2 : Concentrations en MES des affluents du Haut-Rhône pendant les opérations de chasse de juin 2012	19
Tableau 3 : Récapitulatif des analyses de contaminants dans les MES réalisées dans le cadre du suivi OSR des opérations de chasse sur le Haut-Rhône de juin 2012	24
Tableau 4 : Fréquence de quantification des 7 PCB indicateurs pour les 4 stations du suivi OSR sur le Haut Rhône	26
Tableau 5 : Teneur en chrome, cobalt, nickel, cuivre, zinc et cadmium des MES échantillonnées manuellement (échantillons composites journaliers) à la station du Rhône à Seyssel pendant les opérations de chasse	30
Tableau 6 : Teneur en PCB de type dioxines des MES échantillonnées avec un piège à sédiments à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR, des opérations de chasse (juin 2012), et d'un épisode de crue (novembre-décembre 2012)	31
Tableau 7 : Synthèse des résultats d'analyse des dioxines/furannes, PCB de type dioxines, $\Sigma$ PCBi sur des MES échantillonnées aux stations du Rhône à Creys et Jons pendant les opérations de chasse	32
Tableau 8 : Teneur en arsenic, argent et étain des MES échantillonnées manuellement (échantillons composites journaliers) à la station du Rhône à Seyssel pendant les opérations de chasse	33
Tableau 9 : Flux de MES quantifiés à Jons, par années, lors des opérations de chasse du Haut-Rhône et lors de différents évènements de crue	43
Tableau 10 : Flux de mercure et $\Sigma$ PCBi à Jons, par années, lors des opérations de chasse du Haut-Rhône et lors de différents évènements de crue	44

## 1. Contexte et objectifs

L'axe thématique « Métrologie des Flux » de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR) regroupe une série d'actions dont la vocation est de connaître les flux de matière dans le Rhône du Léman à la mer. La consolidation d'un réseau de mesure sur l'ensemble du bassin est nécessaire pour un suivi des matières en suspension (MES) et des polluants associés (Action 6). En plus d'un suivi en routine, des événements hydrologiques plus ponctuels sont également analysés. Dans cette optique, un groupe d'astreinte de crue a été constitué. Dans le cadre de l'Action 8, l'OSR a prévu un suivi sédimentaire de la chasse du Haut-Rhône, complémentaire des autres suivis, notamment le suivi réglementaire de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) et le suivi des champs captant du Vieux-Rhône de Crépieux-Charmy réalisé par le Grand Lyon. Les suivis décrits ci-après ont eu pour objectif de quantifier et d'étudier la variabilité spatio-temporelle des flux de MES et de certains contaminants et paramètres d'intérêt associés (polychlorobiphényles (PCB) et autres contaminants organiques, mercure, radioéléments, métaux, carbone organique, granulométrie), générés dans le Haut-Rhône par l'abaissement de la retenue de Génissiat (semaine 1) et par la chasse de la retenue de Verbois (semaine 2). Les flux de MES engendrés par les reprises de dépôts au cours des crues suivantes ont également été suivis dans le cadre de la surveillance des stations pérennes et du groupe d'intervention en crues.

## 2. Localisation des stations de suivi et paramètres mesurés

La Figure 1 présente les stations de suivi des opérations de chasse par les équipes OSR. Les opérations ont été suivies sur l'ensemble du Haut-Rhône (Rhône et affluents à l'amont de Lyon). Nous avons privilégié une fréquence d'échantillonnage temporelle élevée sur un nombre restreint de stations judicieusement situées par rapport aux principales zones de production et de stockage des sédiments. Sur ces stations, le flux de MES a été finement suivi durant les deux semaines des opérations de chasse. L'ensemble des informations concernant le suivi réalisé à chaque station est détaillé dans le document en Annexe 1.

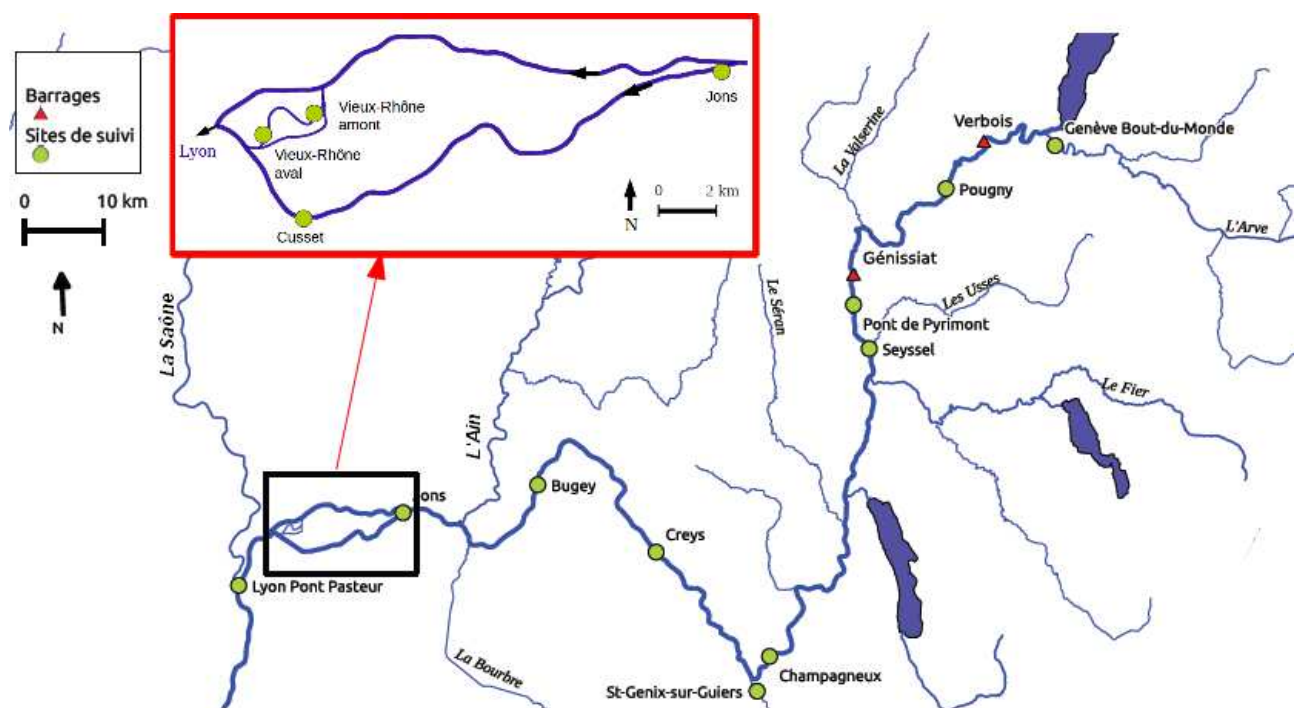


Figure 1 : Réseau hydrographique du Haut-Rhône, barrages de Verbois et Génissiat, et stations de suivi MES et contaminants du protocole OSR.

## Paramètres suivis et méthodes associées aux différentes stations :

- le débit :
  - stations hydrométriques permanentes (CNR, DREAL Rhône-Alpes)
  - jaugeages aDcp complémentaires (Irstea)
- la turbidité :
  - turbidimètres permanents aux stations de Creys-Malville (EDF), Bugey (EDF), Jons et Vieux-Rhône (Grand-Lyon/Véolia)
  - turbidimètres provisoires aux autres points de suivi (Irstea, CNR)
- la concentration en matières en suspension (MES) :
  - préleveurs automatiques légers et prélèvements manuels pour analyse par filtration-pesée (Irstea) ou par la méthode de la crêpe (CNR)<sup>1</sup>
  - pycnomètre<sup>2</sup> (CNR)
  - analyse aux rayons X (méthode CEA) sur vannes de fond et de demi-fond (CNR) en aval immédiat de Génissiat et au pont de Pymont
- la granulométrie :
  - analyse au granulomètre-laser en laboratoire (Irstea, CNR, Véolia)
  - granulomètre-laser portable LISST (Cerege)
  - granulomètre-laser LISST (station d'Arles)
- la teneur des MES en PCB, mercure total, métaux, radioéléments, et autres composés organiques (en fonction de la masse échantillonnée disponible) :
  - prélèvement avec une centrifugeuse mobile (Irstea)
  - prélèvements manuels composites (24h) en bonbonnes en verre de 34 L (CNR, Irstea)
  - pièges à sédiments (Irstea)
  - analyses en laboratoire (Irstea, CNR, Cerege, IRSN, Véolia, Trédi)

## Phases du planning : semaines 23 et 24 (du 4 au 18 juin 2012)

- semaine 1 : abaissement (chasse) de la retenue de Génissiat (début 04/06 0h)
- semaine 2 : abaissement (chasse) de la retenue de Verbois (début 09/06 7h)

Ce suivi a été assuré par quatre équipes évoluant tous les jours sur le terrain entre le 4 et le 15 juin 2012. Ces équipes étaient constituées de 15 agents Irstea, 1 Cerege et 1 OSR. Elles ont été épaulées par la CNR et AMP<sup>3</sup>, notamment lors des derniers jours du suivi pour pallier à la panne de la centrifugeuse mobile survenue le 11 juin.

Au total, environ 650 échantillons manuels ont été collectés pour mesure de la concentration en MES, ainsi que 50 échantillons provenant des pièges à sédiments, 30 échantillons des centrifugations et 20 des prélèvements manuels composites pour analyses chimiques (Cf. paragraphe 5.1).

---

<sup>1</sup> Filtration à partir d'un échantillon de 100 mL avec pesée du filtrat après séchage sur une plaque chauffante, selon Niel *et al.* (1985).

<sup>2</sup> Pesée directe d'un volume constant d'un échantillon pycnomètre + eau + sédiments. Par différence avec le même volume d'eau sans sédiment, on peut déterminer le poids net de sédiment et la concentration (Niel *et al.* (1985)).

<sup>3</sup> Société AMP – Analyses, Mesures et Pollution. <http://www.a-m-p.fr/>. Intervenant : E. Peenaert.

### 3. Suivi des débits

#### 3.1 Le Rhône

Les 5 stations hydrométriques permanentes de la CNR réparties sur le Haut-Rhône ont permis l'enregistrement des débits pendant la période des opérations de chasse (i.e., Pougny, Seyssel, Creys, Bugey et Perrache<sup>4</sup>). Ces débits sont présentés sur la Figure 2. Le débit utilisé pour calculer les flux au niveau de la station du Rhône à Jons est celui mesuré à la station de Perrache, située 28 km en aval et donc décalée de – 8h pour tenir compte du temps de propagation entre les deux stations. Lors des deux semaines d'opérations de chasse, le Rhône était en crue, avec un débit atteignant 1500 m<sup>3</sup>/s la seconde semaine à Perrache.

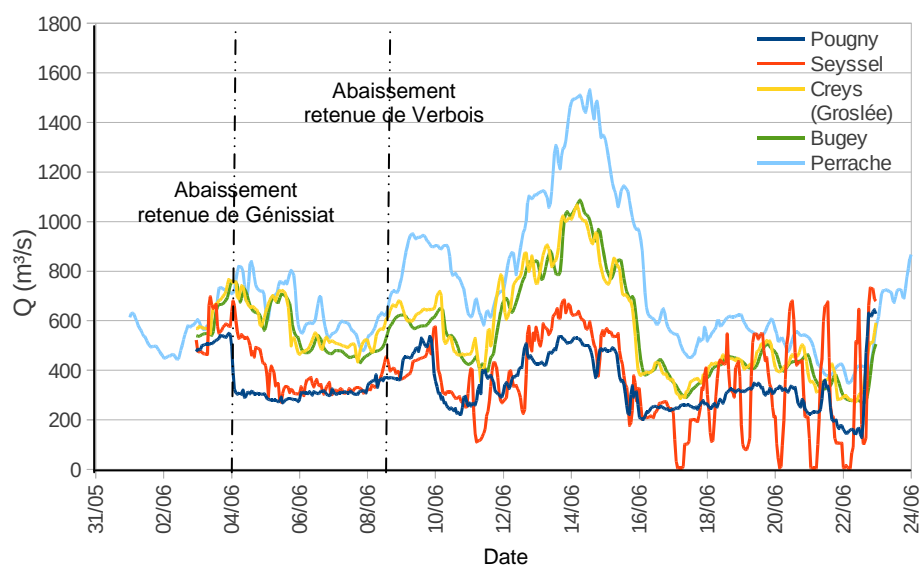


Figure 2 : Débits du Haut-Rhône ( $Q$  en  $m^3/s$ ) mesurés sur les stations CNR durant la période de chasse en juin 2012.

#### 3.2 Les affluents du Rhône

Le débit des principaux affluents du Haut-Rhône est reporté sur la Figure 3 (i.e., Arve, Valserine, Usses, Fier, Guiers, Ain et Saône). Les mesures de débit sont réalisées soit par la CNR (majorité des stations présentées), soit par les SIG<sup>5</sup>. On observe que durant la période de chasse, des crues ont été enregistrées sur la plupart de ces affluents. A l'amont, l'Arve était en crue quelques jours avant l'abaissement du barrage de Génissiat. Cet affluent est le principal contributeur au flux de MES du Rhône durant les périodes hors chasse. Il a de nouveau été en crue durant la seconde semaine des opérations. Le Fier a également été en crue pendant la semaine d'abaissement de Verbois (semaine 2). A l'aval, deux crues importantes se sont produites sur l'Ain durant la première et la seconde semaine des opérations.

<sup>4</sup> La station de Perrache est parfois appelée Lyon-Pont Pasteur. Il s'agit de la même station.

<sup>5</sup> Services Industriels de Genève.

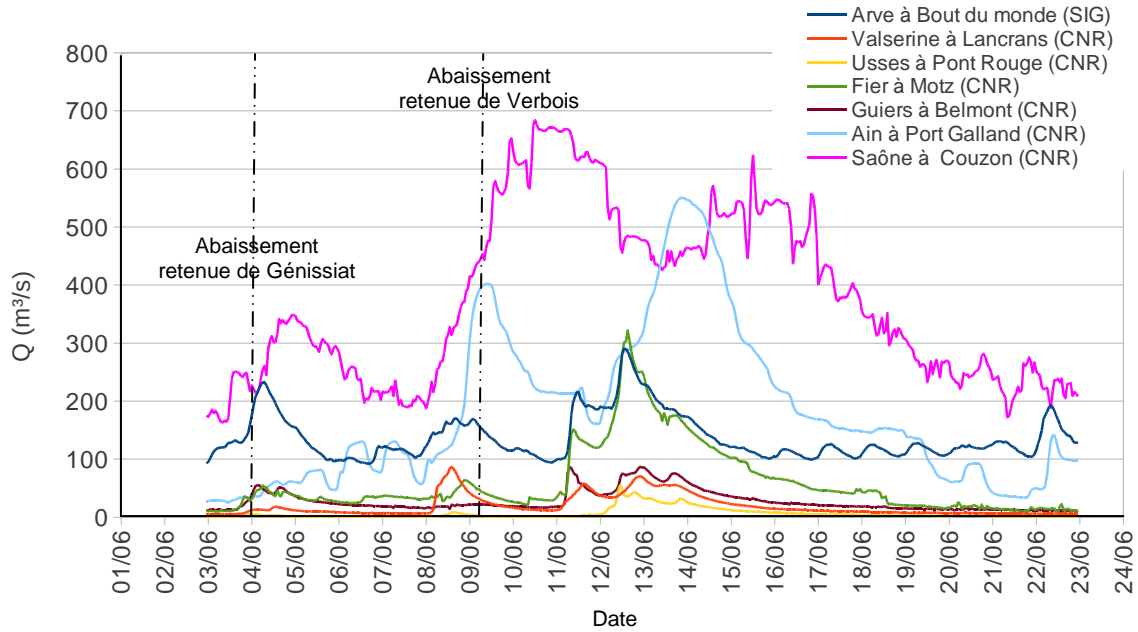


Figure 3 : Débits ( $Q$  en  $m^3/s$ ) des principaux affluents du Haut-Rhône durant la période de chasse en juin 2012.

### 3.3 La zone Miribel-Jonage

Des jaugeages avec un profileur Doppler de type aDcp ont été réalisés dans la zone de Miribel-Jonage pour connaître la répartition des débits entre les différents bras. La Figure 4 permet de localiser les sections de jaugeage et le Tableau 1 présente les débits horaires mesurés pendant les opérations de chasse.

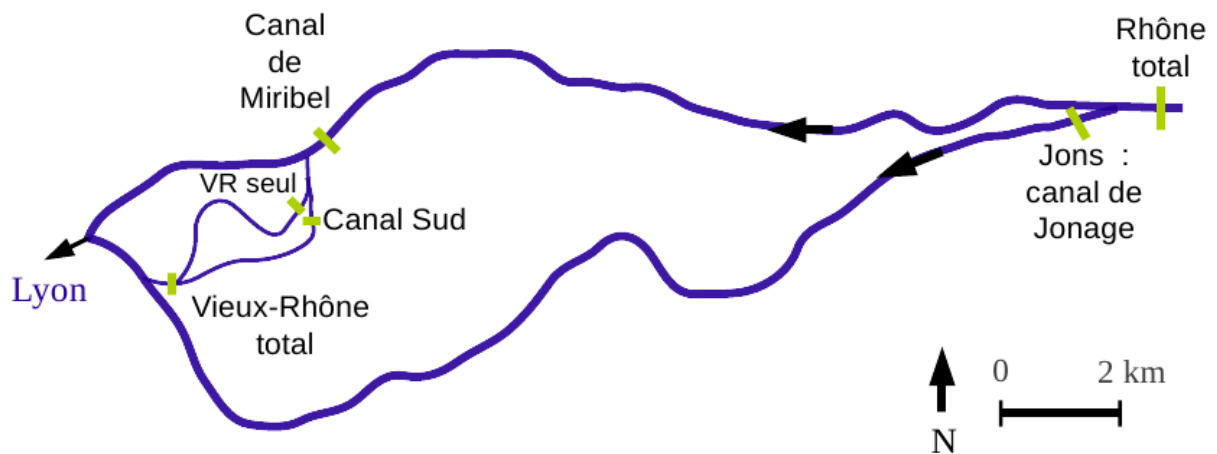


Figure 4 : Localisation des sections de jaugeage dans la zone Miribel-Jonage (traits en vert). VR signifie Vieux-Rhône.

Tableau 1 : Mesures de débit (Q en m<sup>3</sup>/s) par jaugeage aDcp dans le système Miribel-Jonage. CV : Coefficient de variation.

Date	Heures	Rhône total		Vieux-Rhône seul		Canal sud		Vieux-Rhône total		canal Miribel total		canal Jonage	
		Q (m <sup>3</sup> /s)	CV (%)	Q (m <sup>3</sup> /s)	CV (%)	Q (m <sup>3</sup> /s)	CV (%)	Q (m <sup>3</sup> /s)	CV (%)	Q (m <sup>3</sup> /s)	CV (%)	Q (m <sup>3</sup> /s)	CV (%)
04/06/12	14h30			45	1								
05/06/12	15h			38	2	13	4	50					
06/06/12	14h			18	1	6	2	25					
07/06/12	10h-10h15									89	1		
09/06/12	17h									294	1		
13/06/12	9h-11h	1296	15	215	3	52	5	275	3	717		579	1
21/06/12	10h40-11h40			13	6	13	2	26					

La répartition des débits entre le canal de Jonage et le canal de Miribel est contrôlée par le barrage de Jons. La consigne d'exploitation de l'usine de Cusset sur le canal de Jonage est de 640 m<sup>3</sup>/s et le débit réservé du canal de Miribel est en général de 30 m<sup>3</sup>/s (60 m<sup>3</sup>/s si la cote du lac des eaux bleues est inférieure au seuil de saisonnalité). Les jaugeages effectués à plusieurs reprises ont cependant montré que le débit maximum dans le canal de Jonage était de 580 m<sup>3</sup>/s et que le débit hors crue dans le canal de Miribel est de 90 m<sup>3</sup>/s. Ainsi, lorsque le débit du Rhône total à l'amont de la diffluence est inférieur à 670 m<sup>3</sup>/s, 90 m<sup>3</sup>/s sont déversés dans le canal de Miribel et le reste transite dans le canal de Jonage. Lorsque le débit du Rhône total dépasse 670 m<sup>3</sup>/s, 580 m<sup>3</sup>/s passent dans le canal de Jonage et le reste est déversé dans le canal de Miribel. En se basant sur ces informations, une chronique de débit dans le canal de Miribel a été calculée à partir du débit à Jons (obtenu à partir de la chronique horaire mesurée à Perrache par la CNR, en tenant compte du temps de propagation entre Jons et Perrache, déterminé avec le modèle hydraulique<sup>6</sup>). Les mesures de débit par jaugeage aDcp effectuées dans le canal de Miribel sont en accord avec la chronique de débits ainsi obtenue (Cf. Figure 5). Pour obtenir une chronique de débit dans le Vieux Rhône seul, nous avons utilisé le modèle hydraulique 1D qui permet de répartir les débits entre le canal de Miribel et le Vieux-Rhône au niveau de la diffluence de Neyron. La chronique fournie par le modèle est également présentée sur la Figure 5. Elle est en accord avec les jaugeages aDcp dans le Vieux-Rhône.

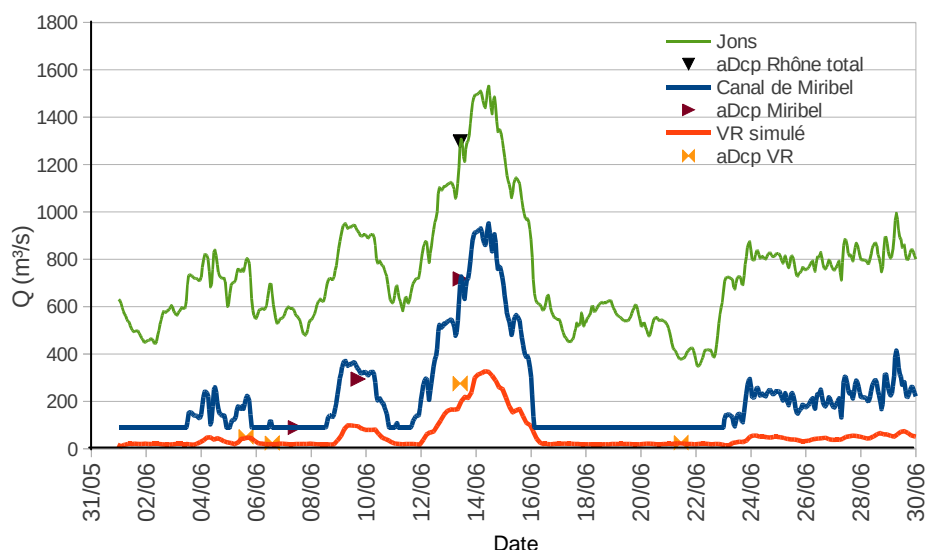


Figure 5 : Débit à Jons (Q en m<sup>3</sup>/s) (mesure CNR à Perrache décalée à Jons avec le modèle hydraulique pour tenir compte du temps de propagation), dans le canal de Miribel (chronique reconstituée à partir du débit à Jons et des informations sur la gestion du barrage de Jonage) et dans le Vieux-Rhône (VR, chronique reconstituée par modélisation) en juin 2012.

<sup>6</sup> Mage-AdisTS modèle hydrodynamique 1D (Irstea ; code Mage : 2009 et code AdisTS : 2011).

## 4. Suivi des matières en suspension

### 4.1 Concentrations mesurées aux différents points du réseau

La concentration en MES a été suivie tout au long du réseau avant, pendant et après les opérations de chasse des barrages, la fréquence d'échantillonnage dépendant du type de suivi effectué :

- prélèvements ponctuels manuels quotidiens à Pougny, Seyssel, Creys, Bugey, Jons, dans la zone de Miribel-Jonage et à Perrache. La concentration en MES de ces échantillons a été déterminée par filtration-pesée au laboratoire ;
- échantillons prélevés automatiquement toutes les 4 heures à Creys, Bugey, Jons, dans la zone de Miribel-Jonage et à Perrache. La concentration en MES de ces échantillons a été déterminée par filtration-pesée au laboratoire ;
- mesure en continu de la turbidité grâce à des turbidimètres effectuant une mesure toutes les 3 minutes, moyennée sur 15 minutes, à Jons, dans la zone de Miribel-Jonage, et à Perrache. Pour chaque turbidimètre, une courbe d'étalonnage a été établie afin de convertir la mesure de la turbidité en concentration MES (Cf. Figure 6 qui montre l'exemple de la courbe d'étalonnage du turbidimètre installé sur le Rhône à Perrache).

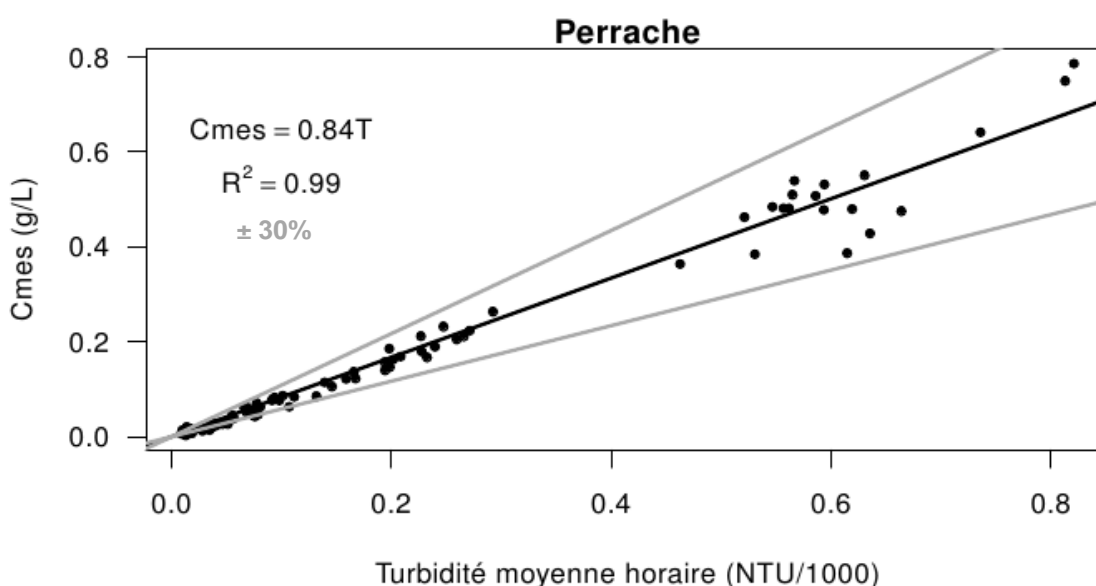


Figure 6 : Courbe d'étalonnage du turbidimètre installé sur le Rhône à Perrache du 31/05/12 au 26/06/12. (Cmes : concentration en MES en g/L mesurée par prélèvements ponctuels).

Les concentrations en MES obtenues par prélèvements manuels/automatiques et par mesure de la turbidité ont été comparées pour chaque site, permettant l'établissement d'une relation d'étalonnage pour chaque turbidimètre. La conversion de la turbidité en concentration en MES via ces relations a permis d'obtenir des chroniques continues de concentration en MES pour chaque station. La Figure 7 présente les mesures obtenues à la station de Bugey par les différentes techniques de prélèvement et de mesure, ainsi que la chronique de turbidité convertie en concentration en MES (Cmes).

La Figure 8 présente les concentrations en MES enregistrées par les pycnomètres de la CNR à Pougny et Seyssel. Ces données ont été comparées aux données obtenues par la méthode de la crêpe (CNR) et par filtration-pesée (Irstea). L'écart entre les valeurs obtenues

avec le pycnomètre et les valeurs obtenues par la méthode de la crêpe d'une part et les filtrations-pesées d'autre part est en moyenne de 2% (140 couples de valeurs testés). Les résultats des différentes méthodes de mesure sont donc cohérents et comparables. Les mesures pycnomètre permettant d'avoir une fréquence de mesure élevée (une donnée toutes les 30 secondes), ces données ont été choisies pour le calcul de flux de MES. En effet, des turbidimètres CNR, également installés à ces deux stations, étaient limités à une mesure jusqu'à 4000 NTU et n'ont donc pas permis un suivi de l'ensemble de l'épisode. Sur la Figure 8, nous remarquons les concentrations importantes enregistrées lors de la seconde semaine à Pougny, avec un pic dépassant 40 g/L le 11 juin. En aval, à Seyssel, les taux de MES atteignent 10 à 15 g/L lors des deux ouvertures de barrage.

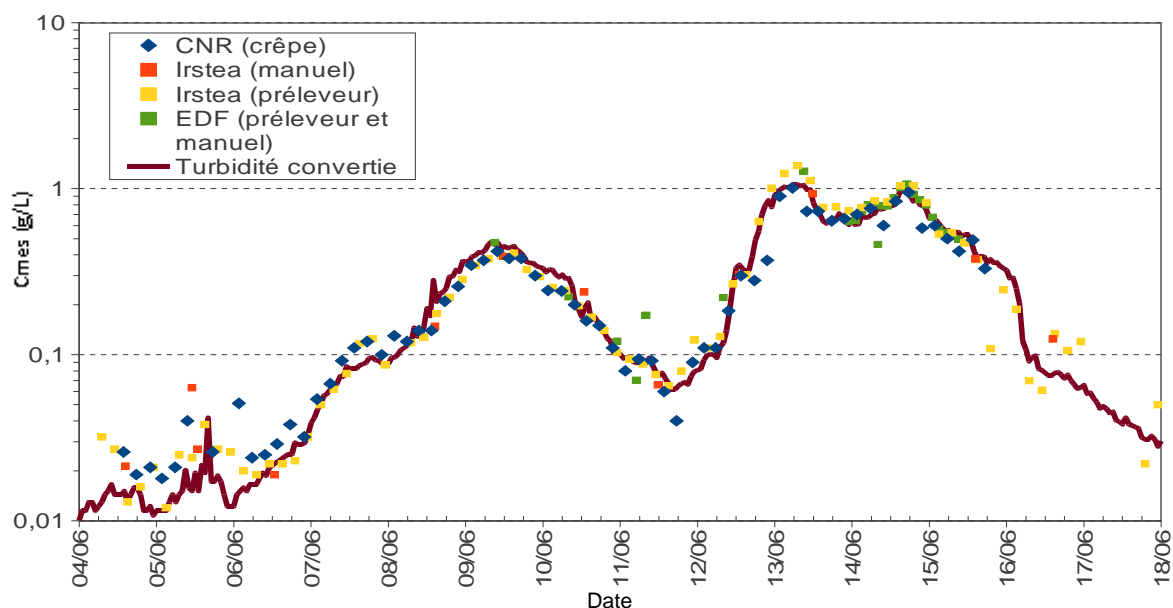


Figure 7 : Exemple de signal turbidimétrique calé avec des prélèvements rapprochés (manuels automatisés) pour la mesure de la concentration en MES ( $C_{mes}$  en g/L) : station de Bugey (EDF).

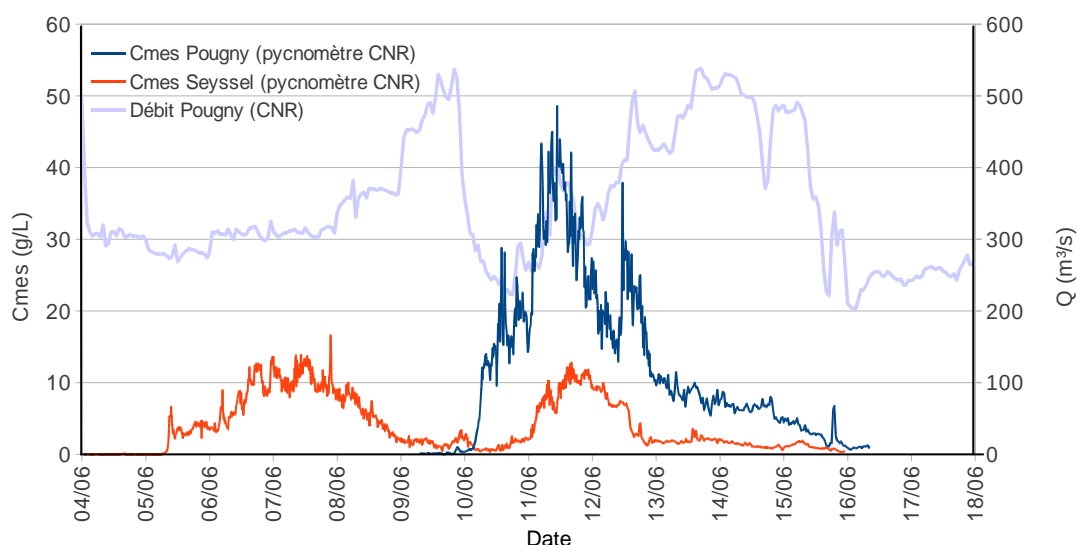


Figure 8 : Concentrations en MES (g/L) à Pougny et Seyssel en juin 2012. Débit ( $Q$   $m^3/s$ ) à Pougny.



La Figure 9 présente les concentrations en MES enregistrées aux stations de Creys, Bugey et Jons. On observe une diminution de l'intensité et un léger étalement des pics de MES en allant vers l'aval sous l'effet de la dispersion.

La Figure 10 présente les enregistrements de turbidité, convertis en concentration en MES, enregistrés aux stations de Jons, Neyron, Vieux-Rhône amont, Vieux-Rhône aval et Perrache. Pour chaque station, on observe distinctement les pics de concentration en MES associés à chaque ouverture de barrage. L'ouverture du barrage de Génissiat, qui a eu lieu le 4 juin, a entraîné une augmentation de la concentration en MES à proximité de Lyon à partir du 6 juin et jusqu'au 11 juin. La concentration est montée jusqu'à 250 mg/L à Jons au cours de cette semaine. L'ouverture du barrage de Verbois, qui a eu lieu le 9 juin, a entraîné une augmentation de la concentration jusqu'à 1 g/L à Jons. L'augmentation de la concentration en MES a duré du 12 au 17 juin. Les débits du Rhône à Anthon et de l'Ain à Lagnieu ont également été reportés sur cette figure. On remarque que deux crues de l'Ain ont eu lieu au cours de cette période. Les pics de débit de l'Ain ont eu lieu au même moment que les pics de concentration en MES et sont à l'origine des deux augmentations de débit enregistrées sur le Rhône à proximité de Lyon.

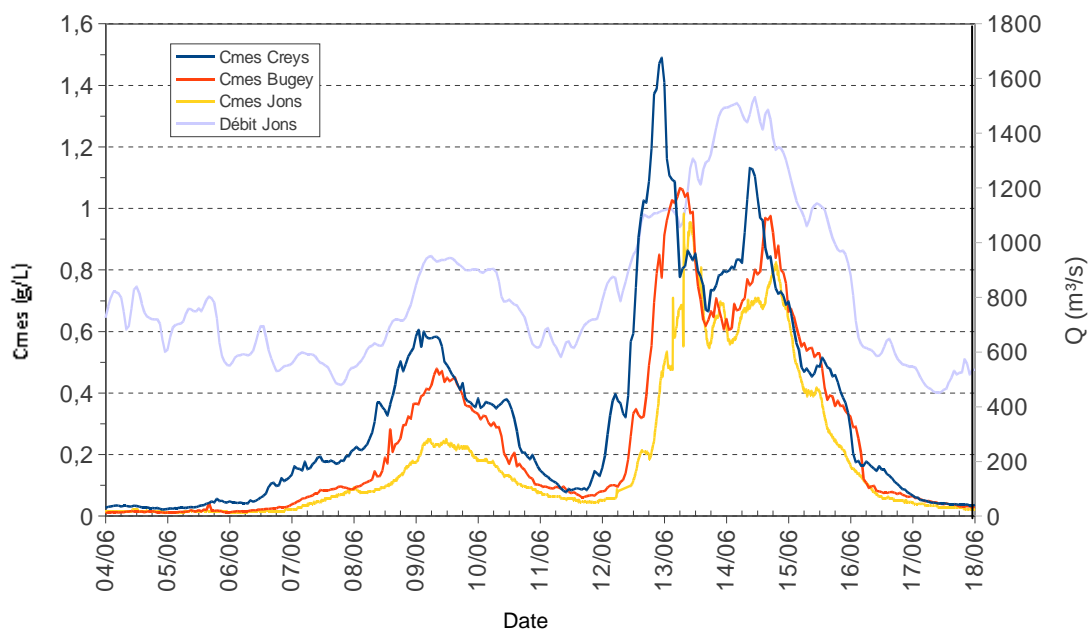


Figure 9 : Concentrations en MES à Creys, Bugey et Jons. Débit à Jons en juin 2012.

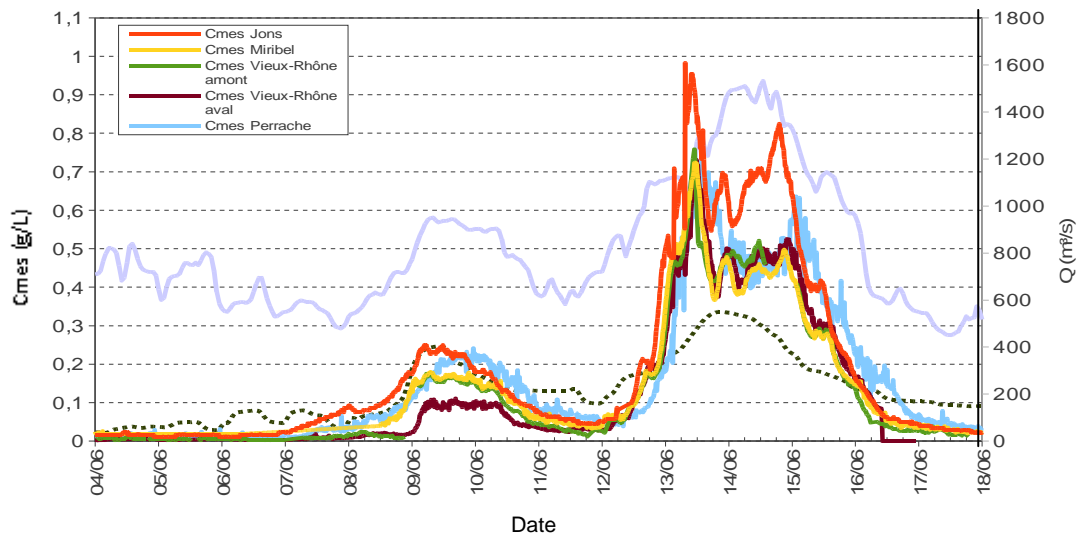


Figure 10 : Enregistrements de turbidité convertis en concentrations en MES (Cmes en g/L) aux stations situées à proximité de Lyon : Jons, canal de Miribel (Neyron), Vieux-Rhône amont, Vieux-Rhône aval, et Perrache.

#### 4.2 Homogénéité des concentrations en MES dans la section de mesure du Rhône à Jons

Le 13 juin 2012 des prélèvements manuels réalisés à la bouteille Niskin depuis un bateau à moteur, associés à des mesures aDcp ont été effectués dans la section située à l'amont de la diffluence de Jons (Cf. Figure 11). L'objectif était de mesurer la répartition des concentrations en MES dans cette section dans le cas d'une crue de l'Ain (confluence 7 km à l'amont) et de comparer ces résultats avec ceux de la campagne de mesure réalisée le 6 janvier 2012 dans la même section.



Figure 11 : Localisation de la section de prélèvements pour le contrôle de l'homogénéité des concentrations en MES dans le Rhône à Jons.

La Figure 12 présente les concentrations en MES mesurées le 6 janvier 2012. Le Rhône et l'Ain étaient alors en crue annuelle (débit de 1900 m<sup>3</sup>/s pour le Rhône et de 700 m<sup>3</sup>/s pour l'Ain) et les concentrations en MES étaient homogènes au sein de la section.

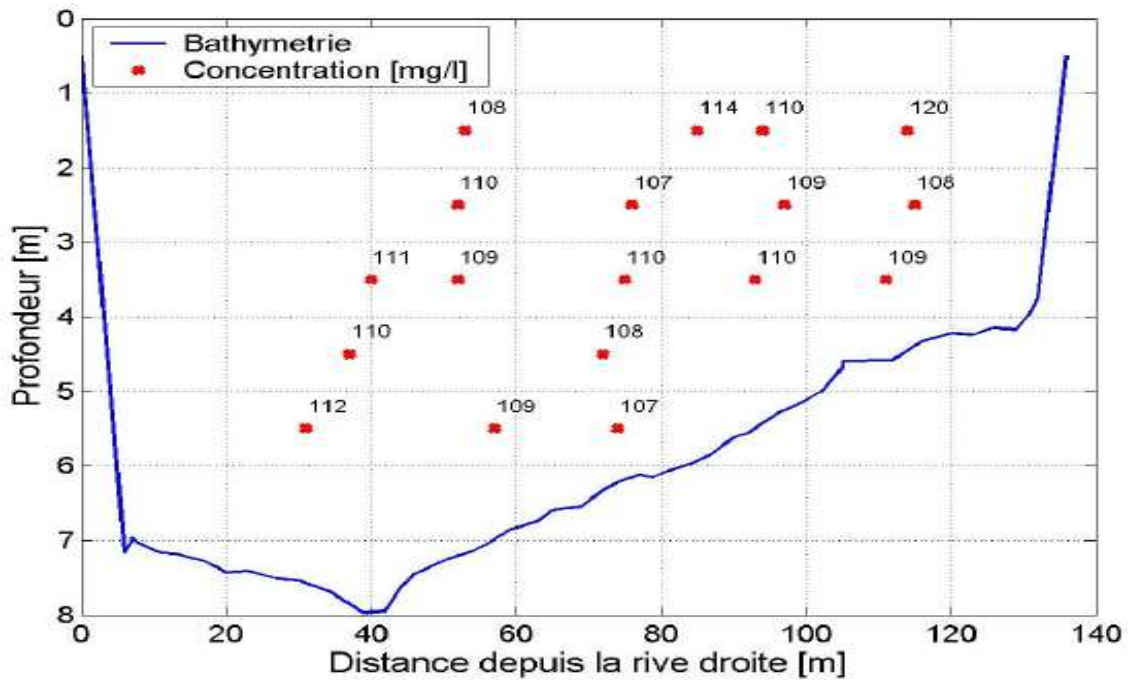


Figure 12 : Concentrations en MES (mg/L) mesurées dans la section du Rhône située à l'amont de la diffluence de Jons le 06/11/2012 (Pont de Jons, PK 32,5).

Le 13 juin 2012, les débits du Rhône et de l'Ain étaient respectivement de 1300 et 500 m<sup>3</sup>/s. Les concentrations en MES mesurées à travers la section sont présentées sur la Figure 13. Elles sont supérieures aux concentrations mesurées en janvier 2012 en raison des opérations de chasse. De plus, les concentrations dans la moitié gauche de la section sont deux fois supérieures aux concentrations dans la moitié droite. Cette campagne de terrain a mis en évidence que lorsque l'Ain est en crue, le mélange entre les eaux de l'Ain et les eaux du Rhône n'est pas effectif avant l'arrivée à la diffluence de Jons. Les eaux de l'Ain restent en rive droite et les eaux du Rhône en rive gauche. Les prélèvements effectués à la station de Jons dans ces conditions ne sont donc pas représentatifs de l'ensemble de la section. Notons que lorsque le débit du Rhône dépasse la consigne d'exploitation de 640 m<sup>3</sup>/s (théorique, souvent 580 m<sup>3</sup>/s en pratique) de l'usine de Cusset située sur le canal de Jonage, le surplus de débit est déversé dans le canal de Miribel. Si l'Ain est également en crue, les eaux déversées dans le canal de Miribel proviennent donc essentiellement de l'Ain. Ces considérations sont à prendre en compte pour le calcul des flux transitant dans le système Miribel-Jonage.

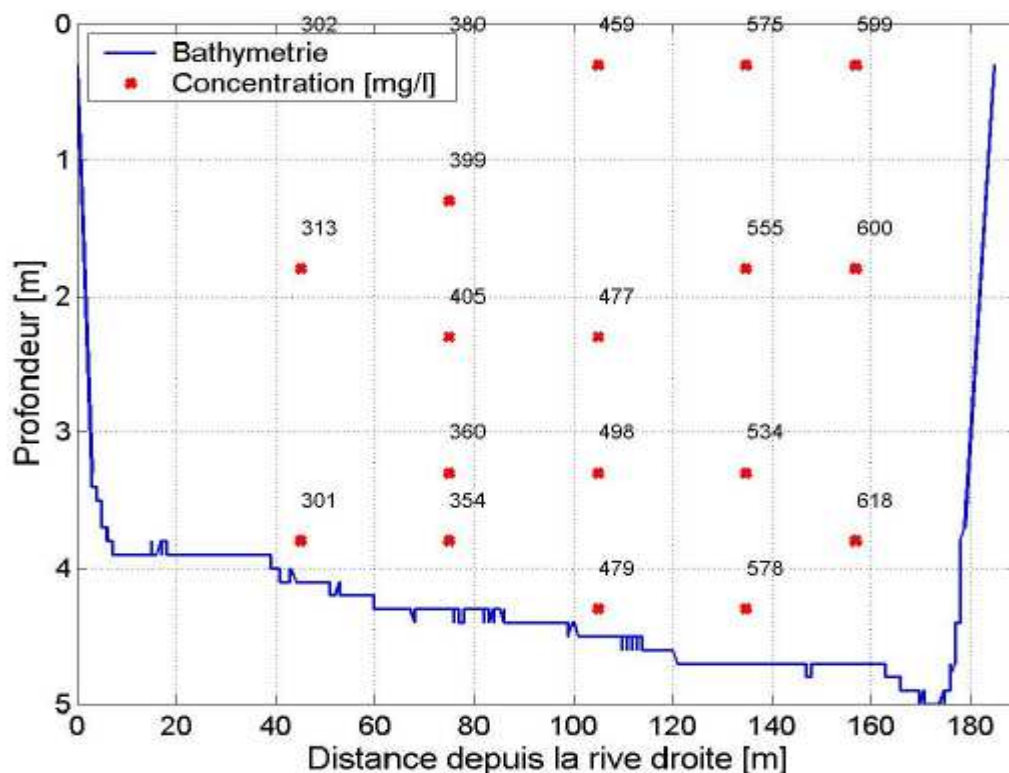


Figure 13 : Concentrations en MES (mg/L) mesurées dans la section du Rhône située à l'amont de la diffluence de Jons le 13/06/2012 (Anthon, PK 35,5).

### 4.3 Suivi des MES des affluents

Les concentrations en MES des principaux affluents du Haut-Rhône ont été mesurées pendant les opérations de chasse. Sur l'Arve, une station de mesure de la turbidité a été installée en mars 2012 par l'OSR et les SIG. Une station temporaire de mesure de la turbidité a également été installée par l'OSR sur le Guiers pendant la période de chasse. Les chroniques de concentrations en MES mesurées à ces deux stations sont présentées sur la Figure 14, où elles sont comparées aux concentrations enregistrées sur l'Isère à Romans pendant la même période. La concentration maximale en MES de l'Arve atteignait 1,4 g/L le 4 juin et 1,0 g/L les 11 et 12 juin. La concentration en MES du Guiers est montée jusqu'à 1,5 g/L le 11 juin. Durant la même période, l'Isère était également en crue et a apporté une quantité importante de MES au Rhône avec des pics de concentrations en MES atteignant 4,5 g/L le 6 juin et 1,5 g/L le 13 juin.

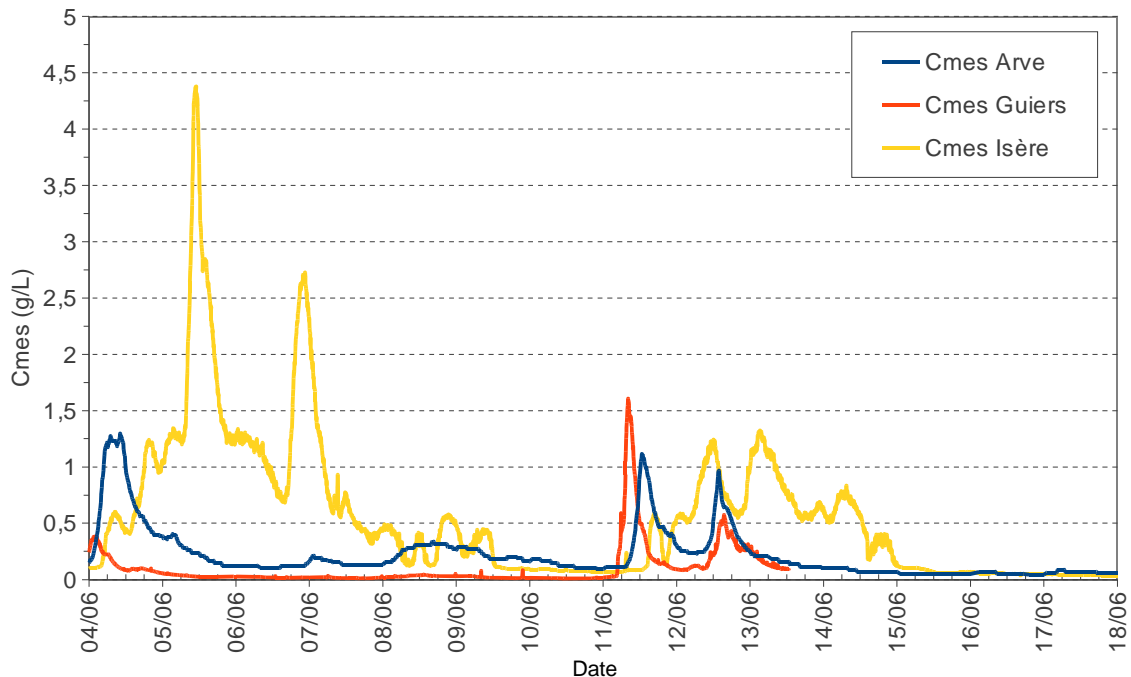


Figure 14 : Concentration en MES (Cmes en g/L) aux stations OSR sur l'Arve, le Guiers et l'Isère durant la période de chasse en juin 2012.

Des prélèvements manuels ont été réalisés par les équipes de la CNR et d'Irstea sur les 4 autres affluents du Haut-Rhône (i.e., Usses, Fier, Ain, Saône). Les concentrations en MES sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Concentrations en MES (g/L) des affluents du Haut-Rhône mesurées par prélèvements ponctuels pendant les opérations de chasse de juin 2012.

Les Usses		Fier		Ain		Saône	
Date TU+1	MES CNR (g/L)	Date TU+1	MES CNR (g/L)	Date TU+1	MES CNR (g/L)	Date TU+1	MES CNR (g/L)
12/06/12 11:51	3,72	11/06/12 10:21	0,28	13/06/12 08:45	0,06	12/06/12 05:35	0,033
13/06/12 07:30	0,11	12/06/12 08:25	0,41	13/06/12 11:05	0,06	12/06/12 13:04	0,038
		12/06/12 11:19	1,01	Date TU+1	MES Irstea (g/L)	13/06/12 07:04	0,032
		13/06/12 09:40	0,20	06/01/12 14:55	0,0790	13/06/12 13:03	0,028
				13/06/12 08:30	0,0310	14/06/12 05:03	0,019
				14/06/12 12:40	0,0570	14/06/12 13:45	0,027
						15/06/12 05:02	0,022
						15/06/12 13:24	0,025
						16/06/12 06:02	0,024
						16/06/12 16:02	0,029
						17/06/12 07:00	0,019
						17/06/12 16:15	0,016
						Date TU+1	MES Irstea (g/L)
						08/06/12 13:20	0,022
						10/06/12 07:00	0,036
						11/06/12 15:45	0,044

#### 4.4 Flux de MES sur le Haut-Rhône

Le flux de MES sur une période P est calculé à partir des chroniques de concentration en MES et de débit exprimées au même pas de temps :

$$\Phi_p = \int_P Q C_s dt = \sum_{i=1}^n Q_i C_{mes_i} \Delta t_i \quad (\text{Eq. 1})$$

avec  $\Phi$  le flux sur la période P, Q le débit ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $C_s$  la concentration en MES ( $\text{g/L}$ ) et  $\Delta t$  le pas de temps de mesure.

Afin de prendre en compte les variations de débit et de concentration en MES, un pas de temps adapté au cours d'eau doit être choisi. Un pas de temps horaire est donc le plus adapté pour étudier la dynamique du transport de MES et calculer des flux avec précision. Lorsque la concentration en MES n'est pas disponible à un pas de temps horaire, ce qui est le cas pour la plupart des affluents notamment, une relation entre le débit et la concentration en MES de type  $C_s = aQ^b$  a été établie à partir des données disponibles et une chronique continue de concentration en MES a été reconstituée. Les résultats des calculs de flux sur le Haut-Rhône pour les deux semaines d'opérations de chasse sont présentés sur les Figures 15 et 16. Il est à noter que l'estimation de l'incertitude associée à ce calcul de flux de MES est actuellement en cours.

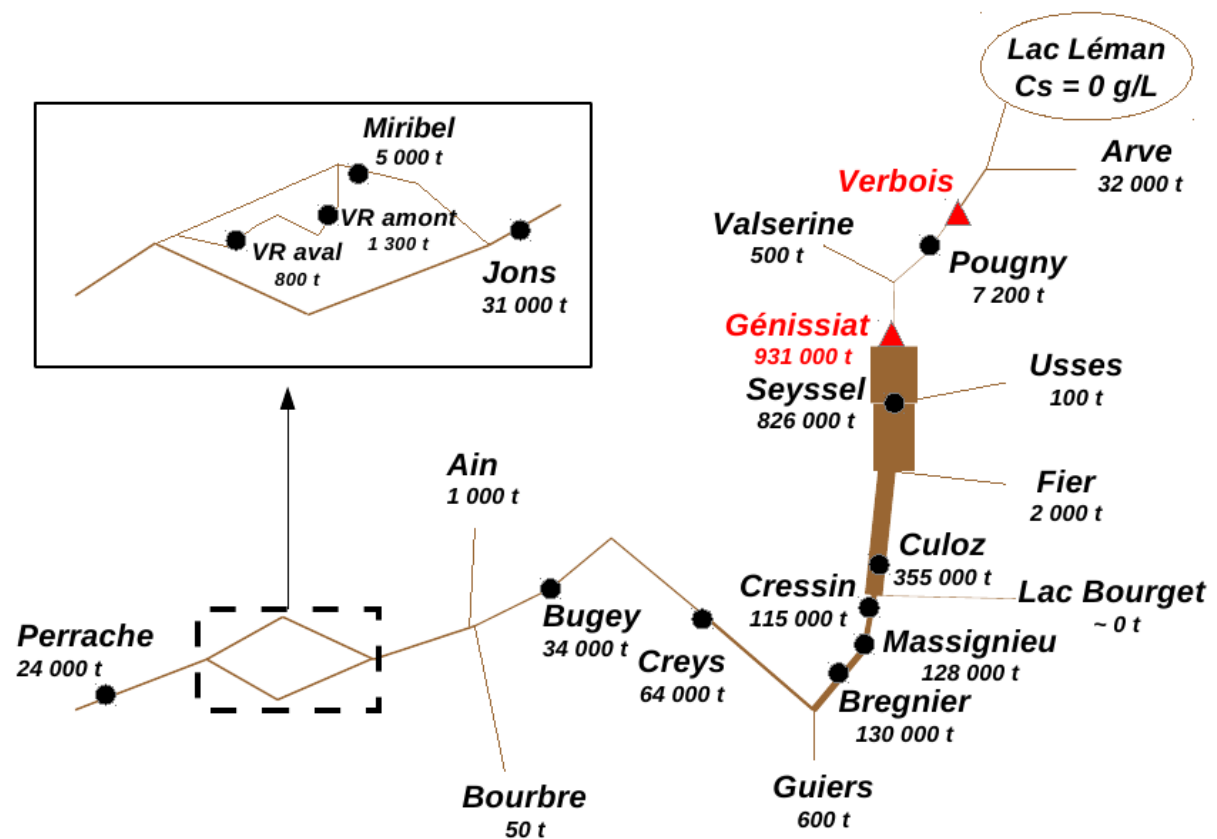


Figure 15 : Flux de MES (en t) sur le Haut-Rhône pendant la semaine d'abaissement de la retenue de Génissiat (du 06/06/2012 au 10/06/2012).

La première semaine (Cf. Figure 15), l'Arve en crue a produit environ 32 000 t de MES qui ont en partie été stockées derrière le barrage de Verbois, puisque seulement 7 000 t ont été mesurées à Pougny. Ces quantités restent toutefois négligeables par rapport aux 930 000 t

de MES libérées par Génissiat. Ces MES se sont rapidement déposées dans le réseau puisqu'une différence de 100 000 t est observée entre Génissiat et Seyssel. A Culoz, le flux mesuré correspond à seulement 40 % du flux de Génissiat. Les autres affluents n'ont pas produit de quantités significatives de MES au cours de cette semaine.

Entre Culoz et Cressin, le flux diminue encore de moitié. En revanche, dans la zone entre Cressin, Massignieu et Brégnier, on observe une reprise locale de MES de 15 000 t. Le flux est ensuite divisé par deux entre Bregnier et Creys, puis entre Creys et Bugey. Le barrage de Villebois, situé entre ces deux stations, doit favoriser le dépôt d'une partie des MES.

A l'aval, 90 % du flux de MES a transité jusqu'à Jons. L'Ain n'étant pas en crue cette semaine là, la section du Rhône en amont de la diffluence de Jons était homogène et l'enregistrement de turbidité à Jons représentatif de l'ensemble du Rhône. Les concentrations en MES circulant dans le canal de Jonage devaient être équivalentes à celles du canal de Miribel. En faisant cette hypothèse d'homogénéité des concentrations, il est possible d'estimer le flux entrant dans le canal de Miribel au cours de la première semaine. Si l'on multiplie le débit entrant dans le canal de Miribel (calculé à partir de la valeur corrigée de la consigne de gestion du barrage de Jons) par la concentration mesurée à la station de Jons, on obtient un flux entrant dans le canal de Miribel de 10 000 t la première semaine. Le flux mesuré dans le canal de Miribel au niveau de la diffluence entre le canal et le Vieux-Rhône est de 5 000 t. Une décantation de 5 000 t aurait donc eu lieu dans le canal de Miribel amont. Entre Jons et Perrache, 7 000 t se sont déposées au total. Le canal de Miribel amont serait donc la zone la plus importante de dépôt entre ces deux stations. Un dépôt a également eu lieu dans le Vieux Rhône, puisqu'on observe une différence de flux de 500 t entre l'amont et l'aval.

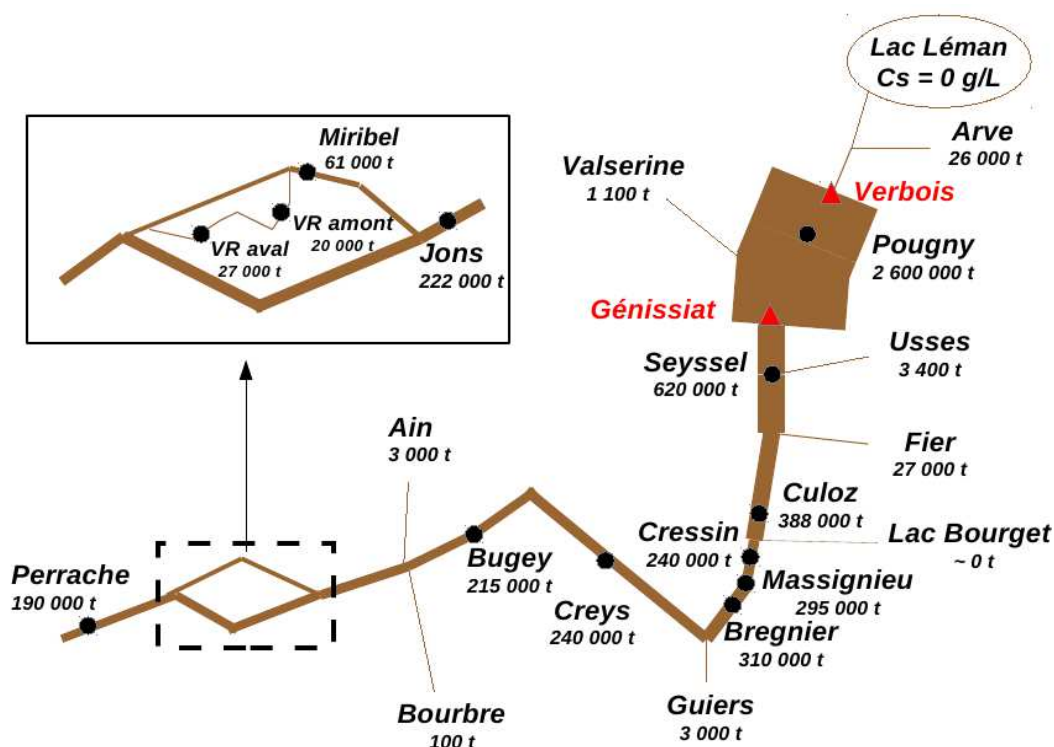


Figure 16 : Flux de MES (en t) sur le Haut-Rhône pendant la semaine d'abaissement de la retenue de Verbois (du 10/06/2012 au 18/06/2012).

Au cours de la seconde semaine (Cf. Figure 16), l'Arve, de nouveau en crue, a produit 26 000 t de MES. Ce flux ne représente toutefois que 1% du flux libéré par le barrage de

Verbois. En effet, 2 600 000 t de MES ont été enregistrées à Pougny. Environ 2 000 000 t se sont ensuite déposées entre Pougny et Seyssel au niveau de la retenue de Génissiat. Entre Seyssel et Cressin, le Fier en crue a apporté environ 27 000 t de MES. Le dépôt dans ce bief est donc de l'ordre de 400 000 t. Comme lors de la première semaine, une reprise est mesurée dans la zone entre Cressin et Brégnier. Cette reprise est de l'ordre de 50 000 t. Entre Brégnier et Creys, le Guiers en crue a apporté 3 000 t de MES supplémentaires. Le dépôt est donc de l'ordre de 73 000 t entre Brégnier et Creys. Entre Creys et Bugey, 25 000 t de MES se sont déposées. Le flux mesuré à Jons est de 222 000 t. Cependant, cette valeur ne prend pas en compte l'hétérogénéité de la section constatée au niveau de Jons lorsque l'Ain est en crue. Pour obtenir cette valeur, nous avons multiplié la chronique de concentration mesurée à Jons par la chronique de débit du Rhône total. Or l'Ain était en crue pendant cette seconde semaine. La chronique de concentration en MES à Jons n'est donc pas représentative de l'ensemble de la section, mais seulement de ce qui passe dans le canal de Jonage. Le flux à Jons présenté sur la Figure 16 est donc probablement surestimé.

En faisant l'hypothèse extrême que les eaux de l'Ain et du Rhône ne sont pas du tout mélangées au niveau de la station de Jons, le flux de MES peut être calculé de la façon suivante :

$$\Phi_{Jons} = C_{mes,Ain} \times Q_{Ain} + C_{mes,Jons} \times (Q_{Jons} - Q_{Ain}) \quad (Eq. 2)$$

Le flux calculé de cette manière pour la seconde semaine est de 152 000 t. Il s'agit d'une sous-estimation du flux circulant dans le Rhône total à l'amont de la diffluence, en considérant que la concentration en MES à Jons est représentative de la concentration en MES du Rhône en amont de la station. Le 13 juin, les prélèvements distribués au sein de la section et les mesures de débit par aDcp ont permis d'évaluer un flux solide de 561 kg/s, en estimant que la concentration en rive droite est de 0,2 g/L (cette concentration n'a pas été mesurée mais est estimée à partir de la diminution de la concentration en rive droite constatée dans les mesures effectuées dans la section). Les données de débit et de concentrations en MES de l'Ain et du Rhône entre 16h et 17h (heure du jaugeage) sont :  $Q_{ain} = 540 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{rhône} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_{ain} = 0,02 \text{ g/L}$  et  $C_{jons} = 0,57 \text{ g/L}$ , soit un flux compris entre 560 kg/s (eaux séparées) et 855 kg/s (mélange complet). Le flux jaugé se situe bien dans cette gamme et il est très proche du flux estimé pour des eaux complètement séparées.

Le flux entrant dans le canal de Miribel doit donc également être estimé selon les deux hypothèses, soit en considérant que les eaux de l'Ain et du Rhône ne sont pas du tout mélangées (sous-estimation), soit en considérant qu'elles sont complètement mélangées et que la concentration mesurée à Jons est représentative de la section (surestimation). On obtient 45 000 t et 113 000 t, respectivement. Le flux enregistré dans le canal de Miribel juste avant la diffluence avec le Vieux Rhône est de 61 000 t. On peut supposer que puisque les débits étaient importants dans le canal de Miribel pendant la seconde semaine (jusqu'à 1400  $\text{m}^3/\text{s}$ ), peu de dépôt a eu lieu dans ce tronçon. Dans le Vieux-Rhône, le flux mesuré à l'aval est supérieur au flux mesuré à l'amont, ce qui suggère une reprise des MES dans ce bief. Cependant, un fort doute subsiste quant à l'homogénéité des analyses de MES effectuées par Véolia (VR amont) et Irstea (VR aval).

Ainsi, il semble que l'ouverture du barrage de Jons pour laisser passer les forts débits du Rhône a permis d'obtenir des vitesses suffisantes pour éviter le dépôt des MES dans le canal de Miribel et le Vieux-Rhône, voire pour provoquer de la reprise sédimentaire dans les deux bras. Par ailleurs, le mauvais mélange des eaux de l'Ain peu chargées en MES et du Rhône très chargées a permis d'éviter un fort dépôt dans le canal de Miribel, ce dernier ayant reçu les eaux de l'Ain.



## 5. Teneurs en substances chimiques dans les MES

### 5.1 Bilan des prélèvements et substances chimiques analysées

Le suivi de la contamination des MES lors des opérations de chasse est basé sur un prélèvement fréquent des MES à différentes stations (Cf. Figures 1 et 17) à l'aide de différents dispositifs :

- une centrifugeuse mobile (CMO) : prélèvements quotidiens à Creys et Jons pendant en moyenne environ 1 heure. Nous avons également centrifugé deux fois à Perrache et une fois sur la Saône à l'île Barbe pendant les opérations de chasse ;

- pièges à sédiments (TAS) : Pougny, Seyssel, Champagneux, Creys, Jons et Perrache. Les échantillons ont été collectés tous les 1 à 4 jours en fonction de leur taux de remplissage des pièges ;

- prélèvements manuels composites en bonbonnes en verre (MAN) : Pougny et Seyssel. Les équipes CNR ont prélevé avec un seau en acier inoxydable un échantillon d'eau de surface d'environ 4 litres toutes les 4 heures, pendant 24 heures (soit 6 prélèvements transférés dans une bonbonne en verre de 34 L pour constituer un échantillon composite journalier).

De plus, des prélèvements manuels ponctuels ont été réalisés pour l'analyse du tritium libre par l'IRSN (Pougny, Seyssel, Jons).

Tous les échantillons ont été prélevés sur le terrain selon des protocoles permettant d'éviter les risques de contamination (matériels et flacons de prélèvement propres et adaptés). Ils ont ensuite été rapidement pris en main par l'équipe « laboratoire » d'Irstea. Un prétraitement est en effet nécessaire avant analyses chimiques : décantation pour éliminer le surplus d'eau contenu dans les échantillons (notamment pour les échantillons manuels composites), homogénéisation, suivie d'une congélation, dans les 24 h après les prélèvements. Ensuite, les échantillons sont lyophilisés, tamisés à 2 mm et enfin broyés afin d'obtenir un échantillon fin et homogène. Ils sont stockés à température ambiante et à l'abri de la lumière avant analyse.

Conformément au programme de l'OSR les substances suivantes ont été analysées :

- Polychlorobiphényles (PCB indicateurs<sup>7</sup>) ;
- Métaux<sup>8</sup> et mercure ;
- Radionucléides : tritium libre sur échantillons d'eau filtrée et tritium lié sur les MES ;
- Autres organiques : hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP<sup>9</sup>), di(2-éthylhexyl) phtalate (DEHP), alkylphénols<sup>10</sup>, organostanneux<sup>11</sup> et PCB de type dioxines (PCB-DL<sup>12</sup>).

---

<sup>7</sup> 7 PCB indicateurs : PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153 et 180. Par la suite on considère que la somme des PCB indicateurs est la somme de ces 7 PCB. Lorsqu'une concentration est inférieure à la limite de quantification (LQ), la LQ/2 est prise en compte dans le calcul de la somme des 7 PCB indicateurs.

<sup>8</sup> 9 Métaux : chrome, cobalt, nickel, cuivre, zinc, arsenic, argent, cadmium et étain.

<sup>9</sup> 16 HAP : Naphtalène, Acénaphtylène, Acénaphène, Fluorène, Phénanthrène, Anthracène, Fluoranthène, Pyrène, Benzo(a)anthracène, Chrysène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(k)fluoranthène, Benzo(a)pyrène, Indéno(1,2,3-cd)pyrène, Dibenz(a,h)anthracène, Benzo(g,h,i)pénilène. Par la suite on considère que la somme des HAP est la somme de ces 16 HAP. Lorsqu'une concentration est

Tous les échantillons prélevés pendant les opérations de chasse ne pouvant être analysés (coût, main d'œuvre), un ordre de priorité a été établi. Ainsi, les échantillons prélevés aux stations de Pougny, Seyssel, Creys et Jons ont été jugés prioritaires par rapport à ceux prélevés à Champagneux (chronique incomplète car vol du piège à sédiments), et Perrache (quelques échantillons uniquement et station située tout à l'aval du réseau de suivi donc moins impactée par les opérations de chasse) pour les analyses de PCB indicateurs, mercure, métaux, radioéléments, carbone organique et granulométrie. Les échantillons analysés pour les HAP proviennent de Pougny, Seyssel et Jons. Seuls des échantillons provenant de Jons ont été analysés pour le DEHP, les alkylphénols et les organostanneux. Le nombre d'échantillons analysés ainsi que les laboratoires d'analyse sont répertoriés dans le Tableau 3. L'Annexe 2 recense l'ensemble des méthodes d'analyse utilisées ainsi que les limites de quantification associées.

Tableau 3 : Récapitulatif des analyses de contaminants dans les MES réalisées dans le cadre du suivi OSR des opérations de chasse sur le Haut-Rhône de juin 2012.

Paramètres	Nombre échantillons	Résultats	Laboratoire	
PCB indicateurs	75	Disponibles	Irstea	
HAP	34		sous-traitance	
DEHP	4		sous-traitance	
Mercure	75		Irstea	
Alkylphénols	4		sous-traitance	
Organostanneux	4		sous-traitance	
Métaux	48		Cerege	
Tritium libre	48		IRSN	
Tritium lié	48		Analyses en cours	IRSN
PCB type dioxines	4		sous-traitance	
Granulométrie	75	Disponibles	Irstea	
Carbone organique	75		sous-traitance	

inférieure à la limite de quantification (LQ), la LQ/2 est prise en compte dans le calcul de la somme des 16 HAP.

<sup>10</sup> 4 nonylphénols ramifiés, nonylphénols, 4-n-nonylphénol, p-n-octylphénol, para-tert-octylphénol, 4-tert-butylphénol.

<sup>11</sup> 9 organostanneux : monobutylétain, dibutylétain, tributylétain, triphénylétain, octyl étain, di octyl étain, diphénylétain, tri octyl étain, mono phényl étain.

<sup>12</sup> 12 PCB-DL : PCB 77, 81, 105, 114, (118,) 123, 126, 156, 157, 167, 169 et 189.

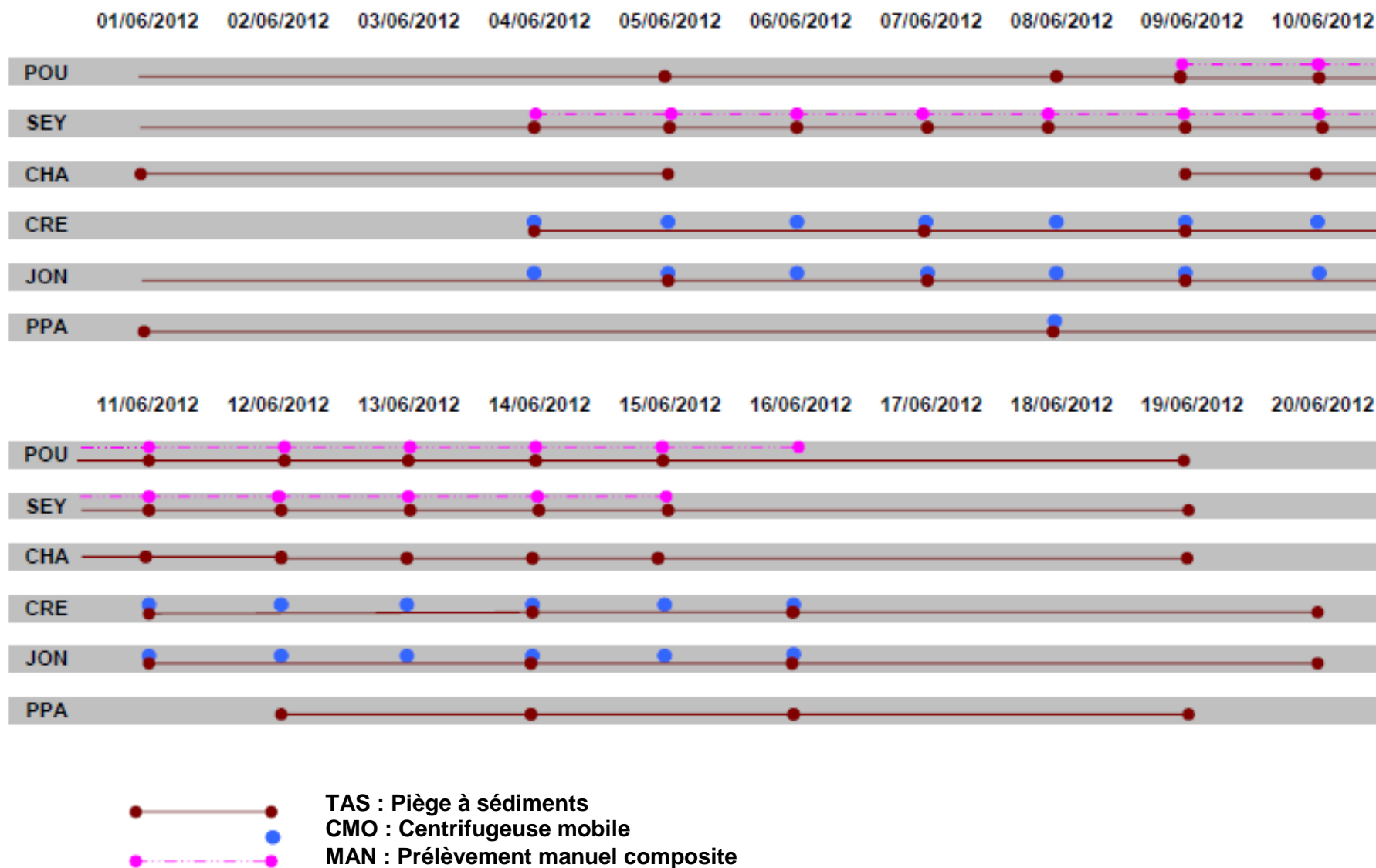


Figure 17 : Bilan des prélèvements de MES pour les analyses chimiques réalisés dans le cadre du suivi OSR des opérations de chasse sur le Haut-Rhône de juin 2012. (POU : Pougny ; SEY : Seyssel ; CHA : Champagneux ; CRE : Creys ; JON : Jons ; PPA : Perrache / Pont-Pasteur)

## 5.2 Teneurs en contaminants des MES

### 5.2.1 Comparaison des systèmes de prélèvement

Certains échantillons de MES ont été prélevés en parallèle par centrifugeuse mobile et pièges à sédiments ou par prélèvements manuels composites et pièges à sédiments (Cf. Figure 17). Tous ces échantillons ont fait l'objet d'une analyse de la distribution granulométrique, de la teneur en carbone organique particulaire (COP), et de certains composés d'intérêt (PCB, mercure, métaux, HAP). L'analyse des distributions granulométriques a révélé un biais induit par l'utilisation des pièges à sédiments : alors que toutes les populations granulométriques sont bien échantillonnées, leur proportion varie. Ainsi les échantillons prélevés avec un piège à sédiments contiennent moins de particules fines et plus de particules grossières que les échantillons prélevés manuellement ou avec la centrifugeuse mobile. Ceci est particulièrement vrai à Seyssel et Pougny où les pièges à sédiments ont été exposés à de très fortes concentrations en MES, et à des particules de fond. L'utilisation des pièges à sédiments a également engendré l'échantillonnage de MES dont la teneur en COP est significativement plus faible.

L'utilisation de pièges à sédiments a in fine engendré une sous-estimation des teneurs en contaminants des MES. L'Annexe 3 présente à titre d'exemple les concentrations en métaux en fonction de la technique de prélèvement. Alors que cette sous-estimation peut être considérée comme quasi-négligeable à Jons et Creys, notamment pour les PCB indicateurs et le mercure, elle est significative à Pougny et Seyssel (plus fort biais granulométrique). L'ensemble de ces résultats est présenté et discuté plus en détails dans un article dédié en cours de rédaction (Angot et al., n.d.). Dans la suite de ce rapport, nous privilégions l'étude des données non biaisées issues de la centrifugeuse mobile et de prélèvements manuels composites.

### 5.2.2 Profil de contamination en PCB indicateurs

Le Tableau 4 présente les fréquences de quantification des différents PCB indicateurs aux différentes stations du suivi OSR pendant les opérations de chasse (4 au 18 juin 2012), ainsi que pendant le suivi OSR bimensuel à la station de Jons (septembre 2011 à février 2013). Les PCB 28, 52 et 118 sont très rarement quantifiés.

Remarque : toutes les données de concentrations en contaminants sont exprimées par la suite en  $\mu\text{g}/\text{kg}$  ou  $\mu\text{g}/\text{g}$  de matière sèche (MS).

Tableau 4 : Fréquence de quantification (FQ) des 7 PCB indicateurs pour les 4 stations du suivi OSR sur le Haut Rhône. CMO : prélèvement centrifugeuse ; MAN : prélèvement manuel composite ; LQ : limite de quantification.

Station	Régime hydrologique	nombre d'échantillons	Mode prélèvement MES	PCB 28	PCB 52	PCB 101	PCB 118	PCB 138	PCB 153	PCB 180
				LQ = 0,50 $\mu\text{g}/\text{kg}$	LQ = 0,75 $\mu\text{g}/\text{kg}$	LQ = 0,50 $\mu\text{g}/\text{kg}$	LQ = 0,75 $\mu\text{g}/\text{kg}$	LQ = 0,50 $\mu\text{g}/\text{kg}$	LQ = 0,50 $\mu\text{g}/\text{kg}$	LQ = 0,50 $\mu\text{g}/\text{kg}$
				FQ (%)	FQ (%)	FQ (%)	FQ (%)	FQ (%)	FQ (%)	FQ (%)
Jons	chasse	6	CMO	0	0	67	0	100	100	83
Jons	suivi bimensuel	36	CMO	0	0	100	47	100	100	94
Creys	chasse	6	CMO	0	33	83	17	100	100	83
Seyssel	chasse	10	MAN	0	0	100	0	100	100	90
Pougny	chasse	5	MAN	0	0	0	0	100	100	40

La Figure 18 présente les proportions des différents PCB indicateurs à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel et aux stations du Rhône à Jons, Creys, Seyssel et Pougny lors des opérations de chasse. Les profils sont similaires : les PCB 153 et 138 prédominent, représentant à eux deux plus de 50% de la contamination totale. Ces résultats sont en accord avec les propriétés physico-chimiques des différents PCB indicateurs : les PCB les plus fréquemment quantifiés sur les MES du Haut-Rhône sont ceux dont le  $\log K_{ow}^{13}$  est le plus élevé (Cf. Annexe 4), et en accord avec la littérature. Ces profils suggèrent une contamination des MES du Haut-Rhône par des sources diffuses. Au contraire, une prédominance des PCB légers révélerait la présence d'une source d'apports locaux. Les teneurs à Pougny étant faibles (station la plus à l'amont), les PCB 28, 52, 101 et 118 ne sont jamais quantifiés (Cf. Annexe 6).

Par la suite, nous considérons la somme des 7 PCB indicateurs ( $\sum PCB_i$ ). Lorsque la concentration d'un des congénères est inférieure à la limite de quantification, la LQ/2 est alors considérée dans le calcul de la somme.

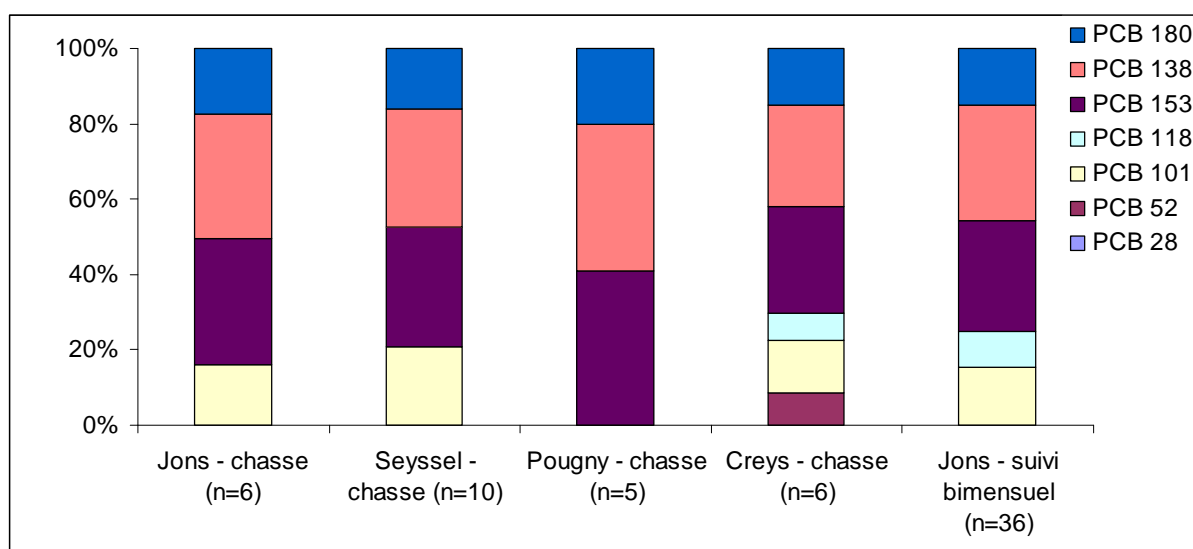


Figure 18 : Pourcentages moyens en PCB indicateurs des MES échantillonnées à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel (septembre 2011 à février 2013) et aux stations du Rhône à Jons, Creys, Seyssel et Pougny lors des opérations de chasse. (Proportion de la teneur moyenne en  $\sum PCB_i$  par rapport à la teneur moyenne de la somme des PCB indicateurs).

### 5.2.3 Teneurs en contaminants sur le Rhône amont

#### a. Apport de MES moins contaminées pendant les opérations de chasse

La Figure<sup>14</sup> 19 présente la teneur en  $\sum PCB_i$  des MES échantillonnées à la centrifugeuse à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR (septembre 2011 à février 2013) et pendant les opérations de chasse. Les teneurs sont significativement différentes entre le

<sup>13</sup>  $\log K_{ow}$  : coefficient de partage octanol/eau d'un composé organique. Il s'agit du rapport entre la concentration à l'équilibre d'une substance chimique dans l'octanol et la concentration en cette même substance dans l'eau. Cette valeur permet d'appréhender le caractère hydrophile ou hydrophobe d'une molécule.

<sup>14</sup> La représentation de données sous forme d'un boxplot permet de représenter la distribution de valeurs sous forme simplifiée avec la médiane (trait épais), la moyenne (point rouge), une boîte s'étendant du quartile 0,25 au quartile 0,75, et des moustaches qui s'étendent par défaut jusqu'à la valeur distante d'au maximum 1,5 fois la distance interquartile.

suivi bimensuel et les opérations de chasse ( $0,001 < P < 0,01$ , test Wilcoxon-Mann-Whitney<sup>15</sup>). Les opérations de chasse semblent ainsi avoir engendré une diminution significative de la teneur en  $\Sigma\text{PCBi}$  des MES du Haut-Rhône : apport de MES dont la teneur en  $\Sigma\text{PCBi}$  est plus faible lors des ouvertures de barrages ( $9,60 \pm 4,45 \mu\text{g/kg}$  lors du suivi bimensuel vs.  $5,12 \pm 1,16 \mu\text{g/kg}$  lors des opérations de chasse).

La même tendance est observée pour le mercure (Cf. Figure 20) : une différence significative est observée entre le suivi bimensuel (septembre 2011 à septembre 2012) et les opérations de chasse à la station de Jons ( $0,058 \pm 0,014 \mu\text{g/g}$  vs.  $0,039 \pm 0,006 \mu\text{g/g}$  ;  $P < 0,001$ ).

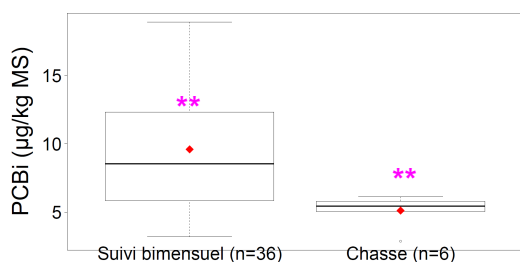


Figure 19 : Teneur en  $\Sigma\text{PCBi}$  des MES échantillonnées à la centrifugeuse à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR (septembre 2011 à février 2013) et pendant les opérations de chasse. \*\* signifie que la différence est hautement significative (test Wilcoxon-Mann-Whitney :  $0,001 < P < 0,01$ ). ♦ : moyenne.

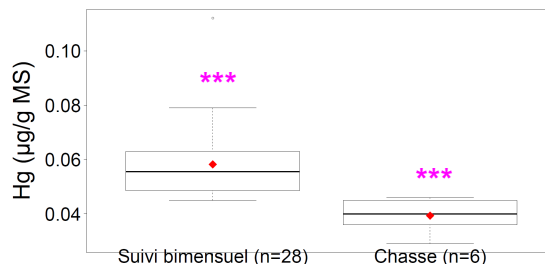


Figure 20 : Teneur en mercure des MES échantillonnées à la centrifugeuse à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR (septembre 2011 à septembre 2012) et pendant les opérations de chasse. \*\*\* signifie que la différence est très significative (test Wilcoxon-Mann-Whitney :  $P < 0,001$ ). ♦ : moyenne.

Les concentrations en métaux mesurées à Jons pendant les opérations de chasse ( $n = 5$ ) sont comprises entre les valeurs minimum et maximum enregistrées lors du suivi bimensuel à Jons (septembre 2011 à mars 2012,  $n = 22$ ), et sont dans la gamme des valeurs les plus faibles (Cf. Figures 21 et 22).

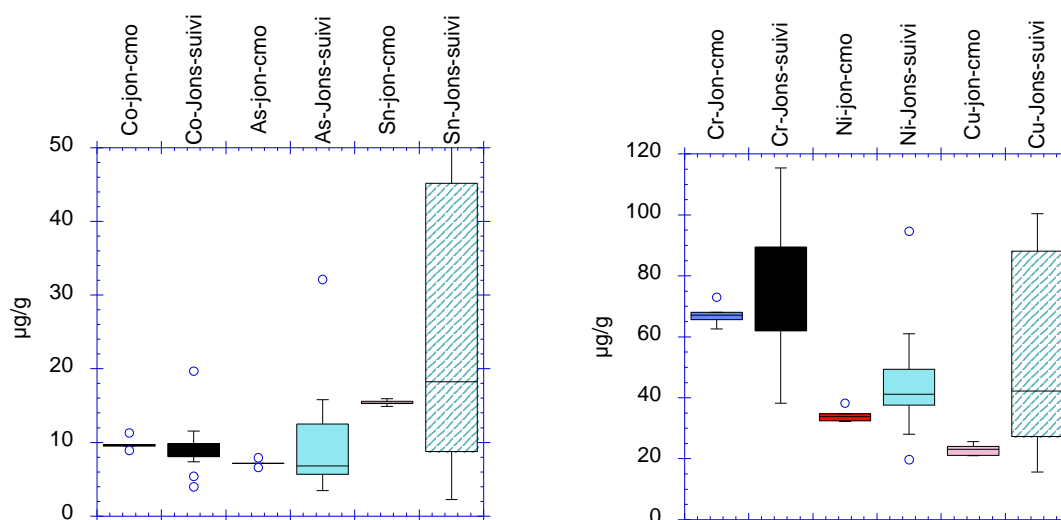


Figure 21 : Teneur en certains métaux des MES échantillonnées à la centrifugeuse à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR (« Jons-suivi », septembre 2011 à mars 2012) et pendant les opérations de chasse (« jon-cmo »). Co : cobalt ; As : arsenic ; Sn : étain ; Cr : chrome ; Ni : nickel ; Cu : cuivre.

<sup>15</sup> Test non paramétrique portant sur deux échantillons indépendants réalisé sous le logiciel R (version 2.9.0).

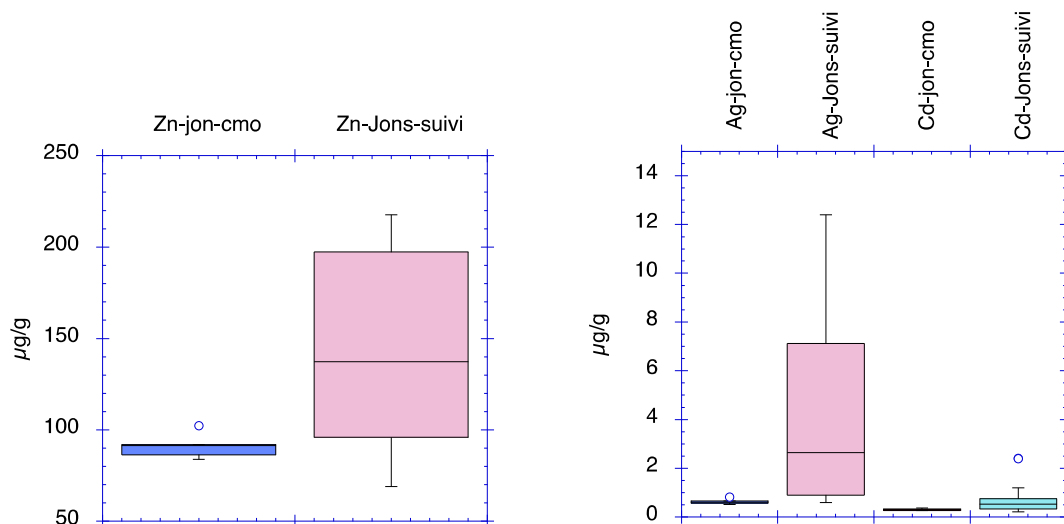


Figure 22 : Teneur en certains métaux des MES échantillonnées à la centrifugeuse à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR (« Jons-suivi », septembre 2011 à mars 2012) et pendant les opérations de chasse (« jon-cmo »). Zn : zinc ; Ag : argent ; Cd : cadmium.

Les Figures 23 et 24 présentent les teneurs en  $\Sigma$ PCBi et mercure, respectivement, des MES échantillonnées manuellement (échantillons composites journaliers) aux stations du Rhône à Pougny et Seyssel pendant les opérations de chasse. Les teneurs en  $\Sigma$ PCBi et mercure diminuent entre le 8 juin 15h et le 9 juin 12h, i.e. lors de l'abaissement de la retenue de Verbois. De même les teneurs en  $\Sigma$ PCBi et mercure à Seyssel sont inférieures en fin d'opérations de chasse à celles mesurées en début d'opérations de chasse ( $\Sigma$ PCBi :  $7,25 \pm 1,18 \mu\text{g/kg}$  du 5 au 8 juin vs.  $5,64 \pm 0,62 \mu\text{g/kg}$  du 9 au 15 juin ; mercure :  $0,052 \pm 0,006 \mu\text{g/g}$  du 5 au 8 juin vs.  $0,038 \pm 0,007 \mu\text{g/g}$  du 9 au 15 juin). Une diminution des teneurs en cobalt, chrome, nickel, cuivre et zinc d'un facteur 2 environ est également observée entre le 8 et le 10 juin (Cf. Tableau 5). L'abaissement de la retenue de Verbois ayant eu lieu le 9 juin à 7h, cela confirme l'hypothèse énoncée ci-avant : l'ouverture du barrage de Verbois semble avoir engendré un apport de MES dont les teneurs en ces contaminants sont plus faibles.

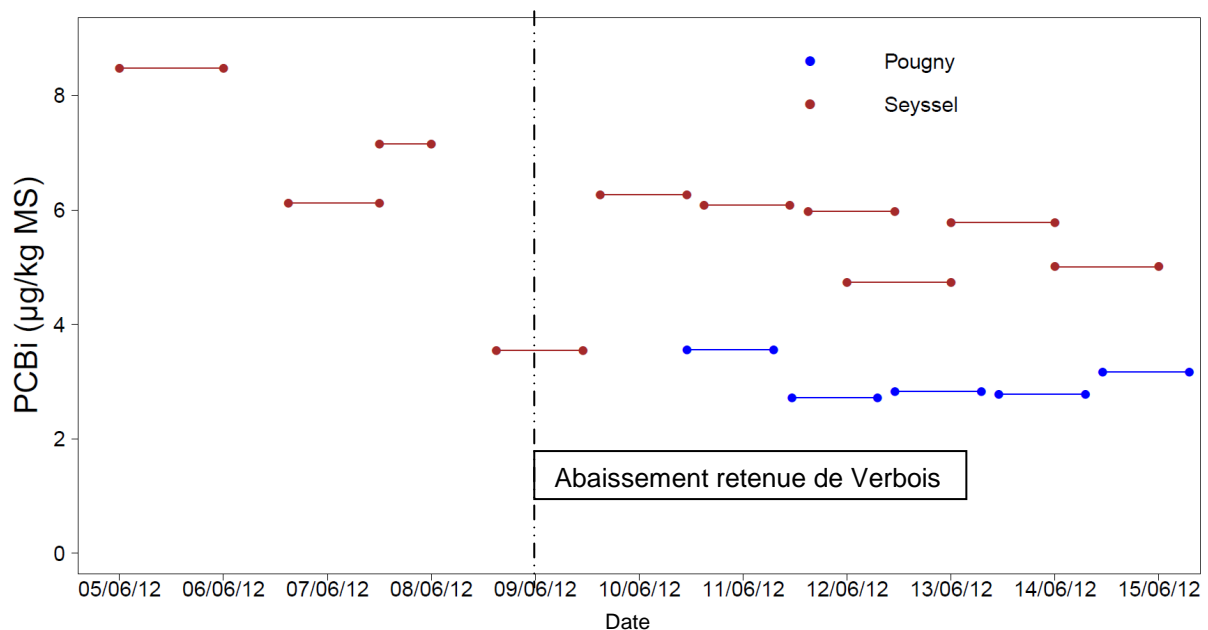


Figure 23 : Teneur en  $\Sigma$ PCBi des MES échantillonnées manuellement (échantillons composites journaliers) aux stations du Rhône à Pougny et Seyssel pendant les opérations de chasse.

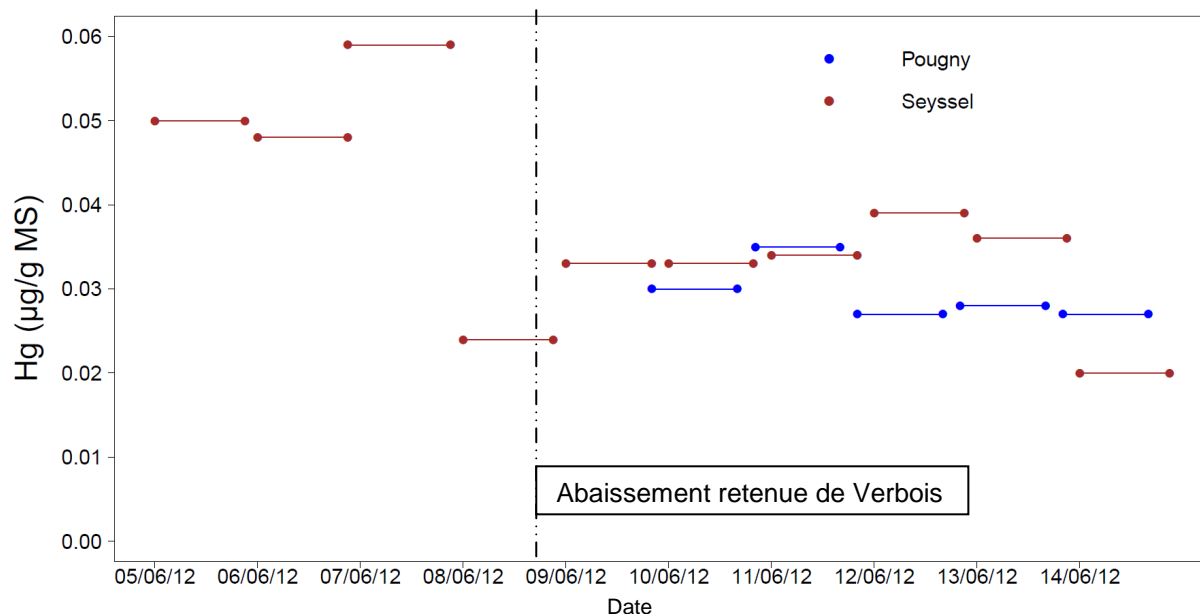


Figure 24 : Teneur en mercure des MES échantillonnées manuellement (échantillons composites journaliers) aux stations du Rhône à Pougny et Seyssel pendant les opérations de chasse.

Des analyses de teneurs en nickel des sédiments de surface des retenues de Verbois et Génissiat avant les opérations de chasse ont été commanditées par la CNR<sup>16</sup>. Il s'avère que les sédiments de surface de la retenue de Verbois ont des teneurs en nickel légèrement plus faibles que ceux de la retenue de Génissiat (27 mg/kg contre 35 mg/kg).

Tableau 5 : Teneur en chrome, cobalt, nickel, cuivre, zinc et cadmium des MES échantillonnées manuellement (MAN, échantillons composites journaliers) à la station du Rhône à Seyssel pendant les opérations de chasse.

Début prélèvement	Fin prélèvement	Cr (mg/kg)	Co (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)
05/06/2012 15:00	06/06/2012 12:00	67,9	10,4	38,6	35,0	101,9	0,4
06/06/2012 15:00	07/06/2012 12:00	69,0	10,6	39,6	30,1	100,2	0,4
07/06/2012 12:00	08/06/2012 12:00	72,8	11,1	41,0	31,8	105,7	0,5
08/06/2012 15:00	09/06/2012 12:00	47,7	6,1	25,3	14,7	52,8	0,3
09/06/2012 15:00	10/06/2012 11:00	50,9	6,8	26,7	20,2	58,8	0,3
10/06/2012 15:00	11/06/2012 10:45	63,7	11,0	35,2	27,4	102,3	0,4
11/06/2012 15:00	12/06/2012 11:00	63,1	10,2	32,9	24,3	91,4	0,3
12/06/2012 15:00	13/06/2012 12:00	66,8	10,0	32,8	21,0	89,7	0,2
13/06/2012 15:00	14/06/2012 12:00	67,0	10,1	33,9	23,8	88,6	0,3
14/06/2012 15:00	15/06/2012 12:00	71,3	11,2	36,9	24,7	98,4	0,3

Le Tableau 6 présente les résultats de teneurs en PCB de type dioxines des MES prélevées à la station du Rhône à Jons pendant le suivi bimensuel OSR, les opérations de chasse (en rose) et un épisode de crue (novembre-décembre 2012, en bleu). Les teneurs mesurées en  $\Sigma$ PCB-DL pendant les opérations de chasse ( $1,12 \pm 0,55 \mu\text{g/kg}$ ) se situent entre les teneurs classiquement retrouvées lors du suivi bimensuel à Jons ( $1,55 \pm 0,49 \mu\text{g/kg}$ ) et les plus faibles teneurs analysées lors de la crue ( $0,35 \pm 0,08 \mu\text{g/kg}$ ).

<sup>16</sup> Mesures d'accompagnement des chasses suisses 2012. Rapport de bilan. Novembre 2012, CNR.



Tableau 6 : Teneur en PCB de type dioxines des MES échantillonnées avec un piège à sédiments (TAS) à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR, des opérations de chasse (juin 2012 – en rose), et d'un épisode de crue (novembre-décembre 2012 – en bleu).

	PCB_77 (µg/kg MS)	PCB_81 (µg/kg MS)	PCB_105 (µg/kg MS)	PCB_114 (µg/kg MS)	PCB_118 (µg/kg MS)	PCB_123 (µg/kg MS)	PCB_126 (µg/kg MS)	PCB_156 (µg/kg MS)	PCB_157 (µg/kg MS)	PCB_167 (µg/kg MS)	PCB_169 (µg/kg MS)	PCB_189 (µg/kg MS)	Σ PCB- DL (µg/kg MS)
	LQ = 0,0010	0,0010	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0010	0,0100	0,0100	0,0100	0,0010	0,0100	
JON-TAS-111129-111213	0,0739	0,0081	0,2865	0,0101	0,8370	0,0621	0,0057	0,1755	0,0307	0,0841	0,0018	0,0307	1,6059
JON-TAS-120103-120118	0,0428	0,0105	0,2725	0,0132	0,6305	0,0602	0,0040	0,1098	0,0306	0,0393	0,0025	0,0178	1,2336
JON-TAS-120118-120216	0,0407	0,0062	0,4610	0,0221	0,9350	0,0816	0,0036	0,1500	0,0313	0,0555	0,0010	0,0152	1,8032
JON-TAS-120327-120410	0,0733	0,0086	0,3535	0,0160	1,0155	0,0784	0,0080	0,1895	0,0336	0,0927	0,0022	0,0353	1,9065
JON-TAS-120410-120424	0,0741	0,0101	0,4000	0,0157	1,1900	0,0877	0,0072	0,2170	0,0438	0,1040	0,0016	0,0319	2,1831
JON-TAS-120424-120507	0,0596	0,0096	0,3435	0,0135	0,6920	0,0788	0,0057	0,1245	0,0397	0,0442	0,0030	0,0225	1,4365
JON-TAS-120522-120605	0,0594	0,0070	0,2410	0,0119	0,2800	0,0472	0,0033	0,0050	0,0196	0,0050	0,0020	0,0143	0,6957
JON-TAS-120607-120609	0,0476	0,0054	0,2940	0,0157	0,5180	0,0550	0,0056	0,0917	0,0252	0,0433	0,0037	0,0188	1,1240
JON-TAS-120609-120611	0,0501	0,0129	0,3220	0,0156	1,1000	0,0751	0,0070	0,1830	0,0306	0,0839	0,0038	0,0240	1,9080
JON-TAS-120611-120614	0,0367	0,0058	0,1780	0,0111	0,3380	0,0317	0,0033	0,0525	0,0152	0,0233	0,0016	0,0104	0,7076
JON-TAS-120614-120616	0,0374	0,0069	0,1540	0,0112	0,3740	0,0383	0,0048	0,0686	0,0173	0,0296	0,0017	0,0127	0,7565
JON-TAS-120620-120703	0,0396	0,0073	0,2580	0,0113	0,8210	0,0585	0,0045	0,1350	0,0222	0,0665	0,0012	0,0175	1,4426
JON-TAS-120703-120717	0,0413	0,0071	0,2390	0,0105	0,7440	0,0564	0,0048	0,1330	0,0219	0,0604	0,0023	0,0212	1,3419
JON-TAS-120925-121009	0,0571	0,0039	0,2760	0,0050	0,1860	0,0544	0,0095	0,0939	0,0259	0,0347	0,0033	0,0404	0,7900
JON-TAS-121111-121112	0,0422	0,0023	0,1730	0,0050	0,0050	0,0242	0,0035	0,0050	0,0100	0,0050	0,0039	0,0138	0,2929
JON-TAS-121204-121217	0,0402	0,0034	0,2740	0,0050	0,0050	0,0394	0,0029	0,0050	0,0145	0,0050	0,0019	0,0050	0,4013
JON-TAS-121220-130108	0,0335	0,0122	0,2390	0,0050	0,5840	0,0471	0,0041	0,1520	0,0238	0,0931	0,0028	0,0248	1,2214

Certains échantillons prélevés à Creys et Jons durant les opérations de chasse ont été analysés par le laboratoire Carso par le biais de T. Meunier (Trédi). Le Tableau 7 présente les résultats obtenus pour l'analyse des dioxines/furannes, des PCB indicateurs et des PCB de type dioxines.

Tableau 7 : Synthèse des résultats d'analyse des dioxines/furannes, PCB de type dioxines,  $\sum PCB_i$  sur des MES échantillonnées aux stations du Rhône à Creys (CRE) et Jons (JON) pendant les opérations de chasse (prélèvements à l'aide de la centrifugeuse mobile, CMO).

	TEQ PCDD/F (OMS 2005 <sup>17</sup> - ng/kg MS)	TEQ PCB-DL (OMS 2005 - ng/kg MS)	$\sum PCB_i$ ( $\mu\text{g/kg MS}$ )
CRE-CMO-120606	1,50	0,65	7,9
CRE-CMO-120607	2,60	0,63	8,2
CRE-CMO-120615	0,72	0,39	5,6
JON-CMO-120607	1,50	0,90	9,3
JON-CMO-120615	0,79	0,41	6,1

Les teneurs mesurées en fin d'opérations de chasse (échantillons CRE-CMO-120615 et JON-CMO-120615) sont environ 1,5 fois inférieures à celles mesurées avant les opérations (échantillons des 6 et 7 juin).

#### b. Apport de MES plus contaminées pendant les opérations de chasse

La Figure 25 présente la teneur en  $\sum HAP$  (somme des 16 HAP) des MES échantillonnées à la station Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR et pendant les opérations de chasse. La Figure 26 présente quant à elle la teneur en  $\sum HAP$  des MES échantillonnées à Pougny et Seyssel pendant les opérations de chasse. Un pic de contamination est observé à Seyssel entre le 9 et le 10 juin, qui pourrait correspondre à l'abaissement de la retenue de Verbois (9 juin à 7h) et donc à l'arrivée de MES ayant des teneurs en  $\sum HAP$  plus élevées ( $1162 \pm 188 \mu\text{g/kg}$  avant le 9 juin,  $3545 \mu\text{g/kg}$  entre le 9 et le 10,  $1448 \pm 495 \mu\text{g/kg}$  après le 10 juin). Un pic de concentration est également observé à Jons entre le 9 et le 11 juin ( $1643 \pm 294 \mu\text{g/kg}$  avant le 9 juin,  $3189 \mu\text{g/kg}$  entre le 9 et le 11,  $878 \pm 15 \mu\text{g/kg}$  après le 11 juin). D'après les Figures 8 et 9, les MES mettent approximativement une journée pour transiter entre Seyssel et Jons. Ce pic de concentration en  $\sum HAP$  observé à Jons entre le 9 et le 11 juin pourrait ainsi correspondre au pic de concentration observé entre le 9 et le 10 juin à Seyssel, et donc à l'abaissement de la retenue de Verbois.

Des analyses de teneurs en  $\sum HAP'$  (somme de 14 HAP<sup>18</sup>) des sédiments de surface des retenues de Verbois et Génissiat avant les opérations de chasse ont été commanditées par la CNR. Alors que cette somme dépasse  $0,3 \text{ mg/kg MS}$  dans la retenue de Verbois, cette même somme est inférieure à la LQ dans la retenue de Génissiat (LQ non renseignée). Ces résultats corroborent l'hypothèse d'un apport en HAP consécutif à l'abaissement de la retenue de Verbois.

<sup>17</sup> Afin de calculer l'équivalent toxique global de l'échantillon (TEQ), les quantités de chaque composé toxique sont multipliées par leur Facteur d'Equivalence Toxique (TEF) respectif, et ensuite additionnées. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a récemment suggéré une réévaluation de ces TEF. Les TEF de 2005 sont ici utilisés pour le calcul de la concentration globale de l'échantillon en équivalents toxiques (TEQ).

<sup>18</sup> HAP précédemment cités hormis le Benzo(a)pyrène et le Benzo(b)fluoranthène.

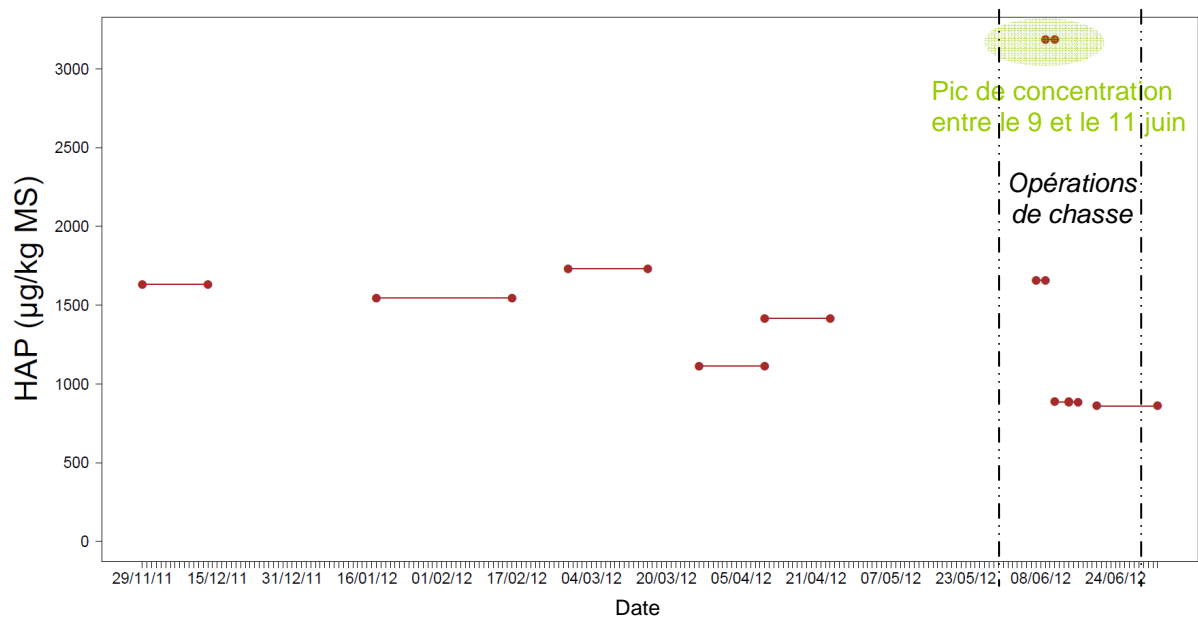


Figure 25 : Teneur en  $\Sigma$ HAP des MES échantillonnées avec un piège à sédiments à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR (piège exposé 15 jours) et pendant les opérations de chasse (piège exposé 2 jours).

Les teneurs en arsenic et étain présentent un profil différent des autres métaux à Seyssel pendant la chasse (Cf. Tableau 8 et Figure 27) : elles sont plus importantes en fin d'opérations de chasse qu'en début (ex :  $5,1 \pm 0,6$  mg/kg d'arsenic entre le 5 et le 9 juin, contre  $7,8 \pm 1,1$  mg/kg d'arsenic entre le 9 et le 15 juin). Dans ce cas, l'abaissement de la retenue de Verbois aurait engendré un apport de MES dont la teneur en arsenic est plus élevée. Les analyses de sédiments de surface réalisées par la CNR montrent que la teneur en arsenic était de 16 mg/kg MS dans la retenue de Verbois avant les opérations de chasse, contre 12 mg/kg MS dans la retenue de Génissiat, étayant notre hypothèse. Le suivi bimensuel à Jons entre septembre 2011 et mars 2012 donne des teneurs en arsenic comprises entre 3,5 et 16 mg/kg. Les concentrations mesurées à Jons pendant les opérations de chasse ( $7,2 \pm 0,5$  mg/kg) ne sont pas différentes de celles enregistrées le reste de l'année.

Tableau 8 : Teneur en arsenic, argent et étain des MES échantillonnées manuellement (échantillons composites journaliers) à la station du Rhône à Seyssel pendant les opérations de chasse.

Début prélèvement	Fin prélèvement	As (mg/kg)	Ag (mg/kg)	Sn (mg/kg)
05/06/2012 15:00	06/06/2012 12:00	5,1	0,7	9,1
06/06/2012 15:00	07/06/2012 12:00	5,4	0,7	11,2
07/06/2012 12:00	08/06/2012 12:00	5,7	0,8	11,8
08/06/2012 15:00	09/06/2012 12:00	4,2	0,5	12,0
09/06/2012 15:00	10/06/2012 11:00	5,1	0,8	12,1
10/06/2012 15:00	11/06/2012 10:45	8,6	1,0	12,4
11/06/2012 15:00	12/06/2012 11:00	8,6	0,9	14,0
12/06/2012 15:00	13/06/2012 12:00	5,9	0,9	12,0
13/06/2012 15:00	14/06/2012 12:00	7,8	0,9	10,3
14/06/2012 15:00	15/06/2012 12:00	8,1	0,9	15,9

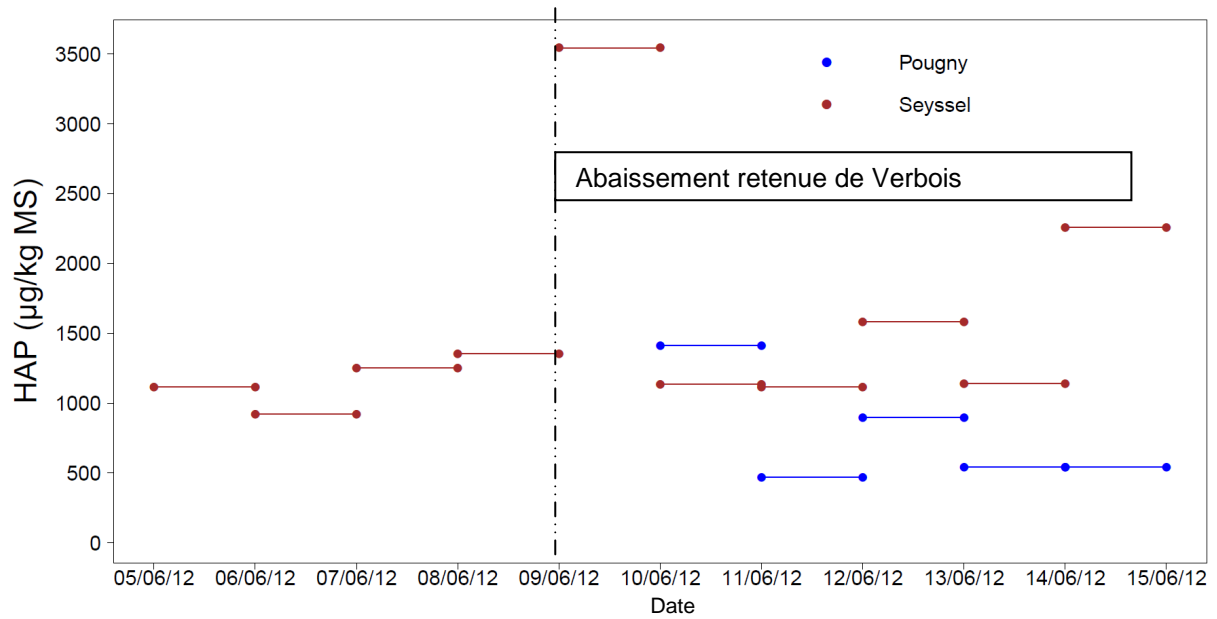


Figure 26 : Teneur en  $\Sigma$ HAP des MES échantillonnées manuellement (échantillons composites journaliers) aux stations Rhône à Pougny et Seyssel pendant les opérations de chasse.

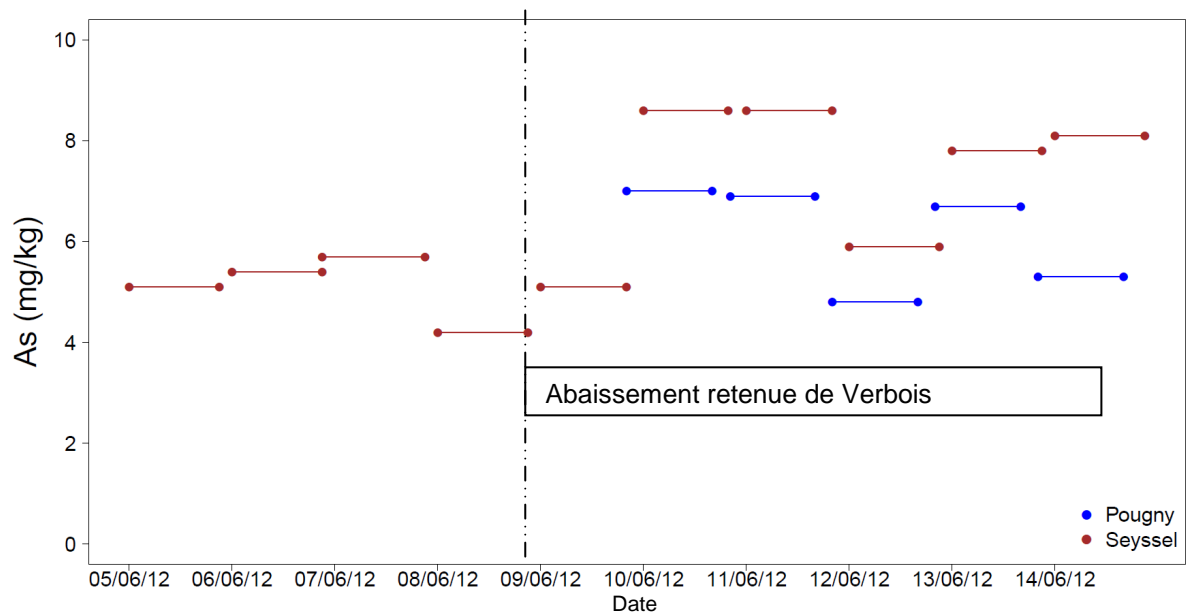


Figure 27 : Teneur en arsenic des MES échantillonnées manuellement (échantillons composites journaliers) aux stations Rhône à Pougny et Seyssel pendant les opérations de chasse.

### 5.3 Bilan

Le dispositif mis en place par l'OSR lors des opérations de chasse sur le Haut-Rhône de juin 2012 a permis de mettre en évidence un apport de MES de teneurs moindres en  $\Sigma$ PCBi, PCB-DL, mercure, cobalt, chrome, nickel, cuivre et zinc. L'ouverture de la retenue de Verbois semble néanmoins avoir engendré un léger pic de  $\Sigma$ HAP aux stations du Rhône à Seyssel et Jons. De plus, les opérations de chasse semblent avoir engendré un apport de MES de teneurs en arsenic et étain plus élevées à Seyssel, néanmoins non répercuté jusqu'à Jons où ces teneurs sont dans la même gamme de concentrations que lors du suivi bimensuel.

L'impact des opérations de chasse sur la nature des MES ayant transité sur le Rhône est étudié plus en détails ci-après.

### 5.4 Evolution de la nature des particules et normalisation des teneurs

Tous les échantillons de MES prélevés pendant les opérations de chasse ont fait l'objet d'une analyse de la teneur en carbone organique particulaire (COP) et de la distribution granulométrique afin de caractériser les particules prélevées. L'objectif premier est i) de comparer les caractéristiques des particules prélevées pendant les opérations de chasse à celles du suivi bimensuel OSR à Jons, et ii) d'étudier l'évolution amont/aval de ces caractéristiques pendant les opérations de chasse. Dans un second temps, nous tentons d'expliquer les teneurs en mercure et  $\Sigma$ PCBi plus faibles observées à Jons pendant les opérations de chasse via une étape de normalisation des données par le COP.

#### 5.4.1 Evolution de la teneur en carbone organique

La Figure 28 présente la teneur en COP des MES échantillonnées à la centrifugeuse à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR (septembre 2011 à février 2013) et pendant les opérations de chasse. Les teneurs sont significativement différentes entre le suivi bimensuel et les opérations de chasse ( $P < 0.001$ , test Wilcoxon-Mann-Whitney). Les opérations de chasse ont ainsi engendré une diminution significative de la teneur en COP des MES du Haut-Rhône à Jons ( $13 \pm 1$  g/kg vs.  $32 \pm 16$  g/kg). Les MES ayant transité pendant les opérations de chasse semblent ainsi être de nature différente de celles transitant usuellement (suivi bimensuel). La teneur en COP plus faible observée à Pougny (Cf. Figure 29) corrobore cette hypothèse.

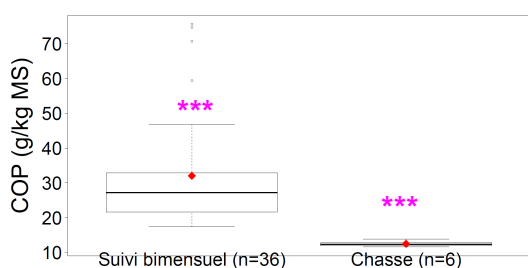


Figure 28 : Teneur en COP des MES échantillonnées à la centrifugeuse à la station du Rhône à Jons lors du suivi bimensuel OSR (septembre 2011 à janvier 2013) et pendant les opérations de chasse. \*\*\* signifie que la différence est très significative (test Wilcoxon-Mann-Whitney :  $P < 0.001$ ). ♦ : moyenne.

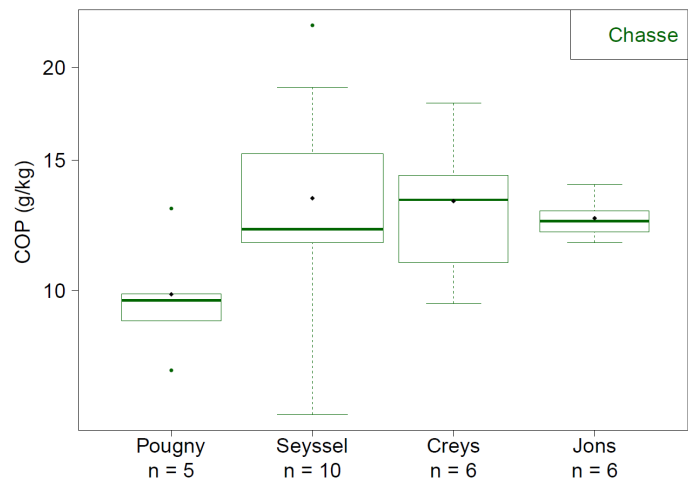


Figure 29 : Teneur en COP des MES échantillonnées à la centrifugeuse aux diverses stations du Haut-Rhône pendant les opérations de chasse de juin 2012.

## 5.4.2 Evolution de la distribution granulométrique

### a. Principe de la décomposition des modes granulométriques

Les données de granulométrie ont été obtenues par analyse au granulomètre laser (CILAS 1190) et un prétraitement aux ultra-sons a été appliqué à tous les échantillons de MES. Les distributions granulométriques volumiques obtenues présentent plusieurs modes. Afin de déterminer la proportion des différentes sous-populations de particules dans chaque échantillon, nous avons décomposé de façon automatique ces différents modes. Sous hypothèse de distributions normales, un calage automatique permet d'obtenir pour chaque sous-population granulométrique : le mode ou diamètre moyen  $d$  (en  $\mu\text{m}$ ) et l'écart-type  $\sigma$  (en  $\mu\text{m}$ ) de la distribution, et le poids  $\lambda$  (en %). Le poids représente la proportion en volume de cette sous-population dans l'échantillon. La Figure 30 donne un exemple de décomposition d'un échantillon selon quatre modes granulométriques. La somme pondérée des distributions obtenues par décomposition doit permettre de retrouver la distribution initiale. Nous avons montré qu'une décomposition selon quatre modes permet d'obtenir une courbe qui reproduit correctement la distribution initiale. Un mode parasite (poids négligeable) à environ  $0,2 \mu\text{m}$  apparaît sur plusieurs échantillons et nous soupçonnons un artefact lié à la mesure par le granulomètre.

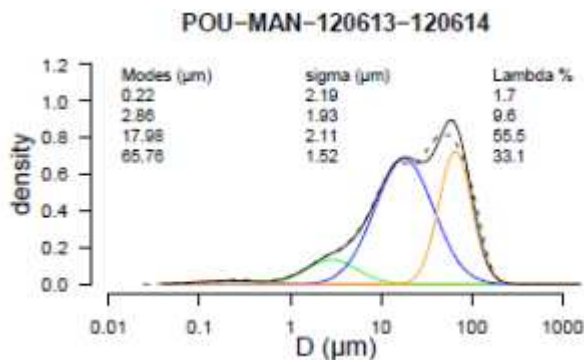


Figure 30 : Exemple de décomposition des distributions granulométriques selon quatre modes. Distribution granulométrique initiale (pointillés), distributions des 4 modes pondérés par leurs lambdas (rouge, vert, bleu et jaune) et somme des 4 distributions pondérées par leur lambda (noir continu). Echantillons prélevés à Pougny, entre le 13/06/12 et le 14/06/12, manuellement dans une bonbonne en verre (MAN, échantillon composite).

### b. Evolution de la distribution granulométrique

Afin de comparer les distributions granulométriques des échantillons, nous avons regroupé les modes obtenus en quatre sous-populations qui sont toujours représentées par les mêmes couleurs sur les graphiques :

- 1) rouge :  $1 < d \leq 10 \mu\text{m}$  (argiles et limons très fins) ;
- 2) vert :  $10 \mu\text{m} < d \leq 27 \mu\text{m}$  (limons fins) ;
- 3) bleu :  $27 \mu\text{m} < d \leq 80 \mu\text{m}$  (limons grossiers) ;
- 4) jaune :  $80 \mu\text{m} < d \leq 2500 \mu\text{m}$  (sables fins).

La Figure 31 présente les proportions ( $\lambda$ ) des quatre sous-populations granulométriques volumiques de MES échantillonnées pendant les opérations de chasse entre Pougny et Perrache (échantillons prélevés manuellement ou à l'aide de la centrifugeuse mobile). La proportion de la fraction grossière diminue de l'amont vers l'aval et le pourcentage de particules fines est plus important à Jons qu'à Pougny et Seyssel (Cf. Figure 31). Lors de la première semaine de chasse, les particules collectées à Pougny (en amont du barrage de Génissiat) sont plus fines que les particules prélevées à Seyssel (aval du barrage). Les MES prélevées à Pougny en première semaine provenaient majoritairement de l'Arve qui était en

crue à cette période et qui est connu pour transporter des particules fines. En revanche, lors de la seconde semaine, le pourcentage de particules plus grossières (fractions jaunes et bleues, Cf. Figure 33) est plus important à Pougny qu'à Seyssel. Les particules les plus grossières relarguées par le barrage de Verbois se sont en partie déposées entre les deux sites.

La granulométrie des particules collectées à Jons au cours des deux semaines des opérations de chasse est à peu près constante. Les opérations de chasse n'ont de plus engendré aucune modification de la distribution granulométrique des MES échantillonnées à Jons par rapport au suivi bimensuel OSR (Cf. Figure 32). Les teneurs plus faibles en COP et en contaminants observées à Jons pendant les opérations de chasse ne peuvent donc pas être expliquées par l'échantillonnage de particules plus grossières.

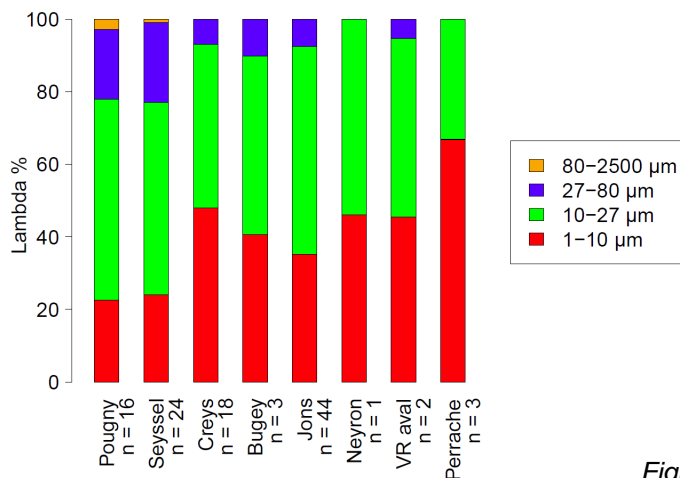


Figure 31 : Proportions ( $\lambda$  en %) des quatre sous-populations granulométriques volumiques des MES prélevées pendant les opérations de chasse aux différentes stations.

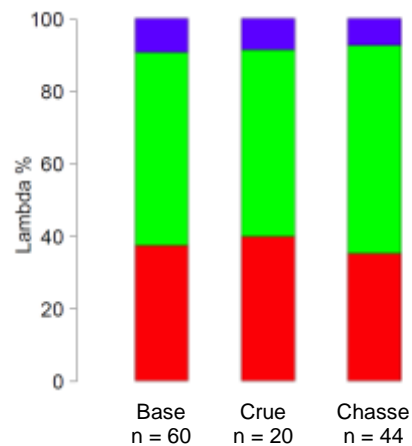


Figure 32 : Proportions ( $\lambda$  en %) des quatre sous-populations granulométriques volumiques des MES prélevées à Jons en régime de base, en crue ( $Q > 800 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et pendant les opérations de chasse.

### 5.4.3 Correction des données par le carbone organique

Les opérations de chasse ont engendré un apport de MES de teneur en COP significativement plus faible à Jons (d'un facteur 2,5 environ) qui pourrait expliquer les plus faibles teneurs en  $\Sigma\text{PCBi}$  et mercure observées à Jons. En effet, plusieurs études ont montré une corrélation entre la teneur en COP et la teneur en certains contaminants hydrophobes des MES. Il apparaît ainsi intéressant de corriger par le COP les teneurs en contaminants des MES échantillonnées à Jons afin de confirmer ou infirmer cette hypothèse.

Les Figures 34 et 35 présentent les teneurs en mercure et en  $\Sigma\text{PCBi}$ , respectivement, corrigées par la teneur en COP, des MES échantillonnées à la centrifugeuse à Jons lors du suivi bimensuel et lors des opérations de chasse. Pour la  $\Sigma\text{PCBi}$ , la correction par le COP permet de passer d'une différence significative ( $0.001 < P < 0.01$ , Cf. Figure 19) à une différence qui n'est plus significative ( $P > 0.05$ ). Les teneurs plus faibles en COP des MES ayant transité à Jons pendant les opérations de chasse semblent donc bien expliquer les teneurs plus faibles en  $\Sigma\text{PCBi}$ . En revanche, même après correction par le COP, les teneurs en mercure restent toujours significativement différentes entre le suivi bimensuel et les opérations de chasse. Les variations de teneurs en COP observées pendant les opérations de chasse ne semblent donc pas complètement expliquer la variation des teneurs en mercure.

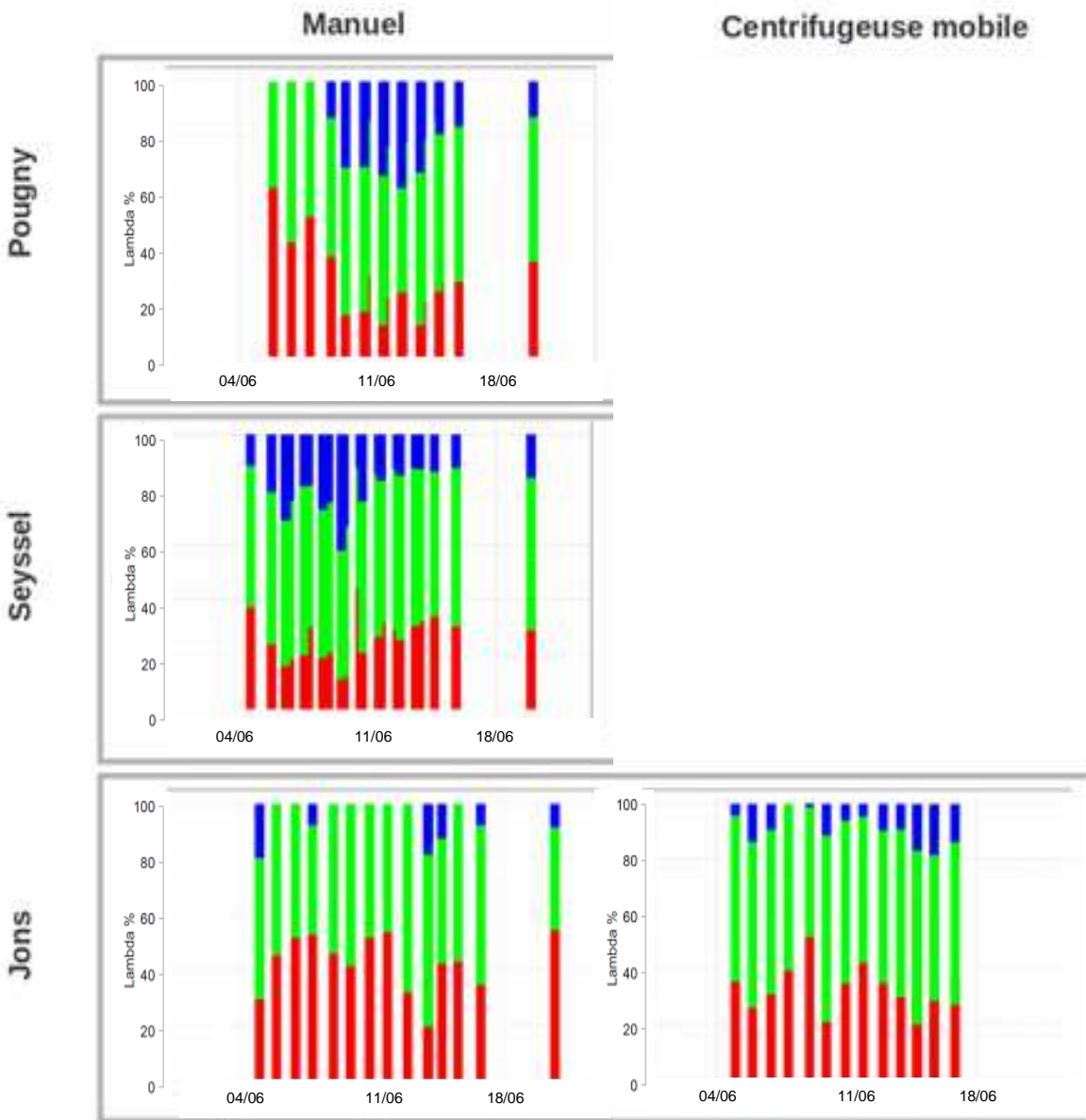


Figure 33 : Evolution temporelle des proportions ( $\lambda$  en %) des quatre sous-populations granulométriques des MES de Pougny, Seyssel et Jons (prélèvements manuels et par centrifugeuse mobile).

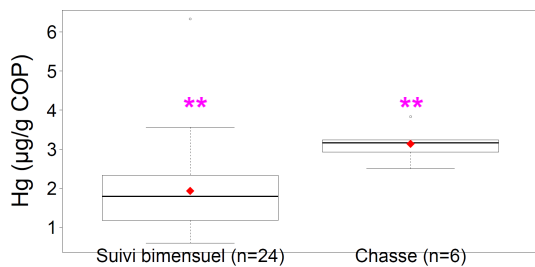


Figure 34 : Teneur en mercure, corrigée par la teneur en COP des MES échantillonnées à la station Rhône à Jons, lors du suivi bimensuel (septembre 2011 à septembre 2012) et pendant les opérations de chasse. \*\* signifie que la différence est hautement significative (test Wilcoxon-Mann-Whitney :  $0.001 < P < 0.01$ ).  $\blacklozenge$  : moyenne.

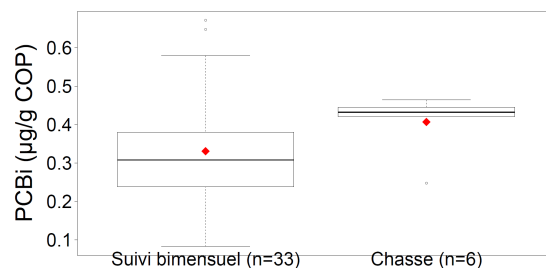


Figure 35 : Teneur en  $\Sigma\text{PCBi}$ , corrigée par la teneur en COP des MES échantillonnées à la station Rhône à Jons, lors du suivi bimensuel (septembre 2011 à janvier 2013) et pendant les opérations de chasse.  $\blacklozenge$  : moyenne.



## 6. Impact des opérations de chasse sur le Rhône aval

Les opérations de chasse ainsi que les crues concomitantes et postérieures sur le Haut-Rhône ont engendré des flux significatifs au niveau de Lyon, qui se sont propagés vers l'aval. L'interaction avec les aménagements hydro-électriques CNR (conduits de façon habituelle en aval de Lyon) et l'occurrence de crues significatives sur des affluents comme l'Isère rendent complexes l'observation et l'interprétation de l'influence des opérations de chasse sur la charge en suspension jusque dans la partie terminale du Rhône. Les données enregistrées à SORA (station du Rhône à Arles) soulignent une augmentation la charge en suspension à partir du 14 juin, associée à une augmentation modérée des débits, puis le 26 juin sans augmentation significative des débits (Cf. Figure 36, graphique du haut). Les valeurs de charges observées au cours de ces périodes sont significativement plus élevées (3 à 4 fois) que les valeurs de référence établies par la relation Charge/Débit de 2012 (Cf. Figure 36, graphique du bas), avec notamment l'enregistrement d'un pic de charge le 26 juin au niveau d'Arles<sup>19</sup>, 4 fois supérieur aux valeurs de référence.

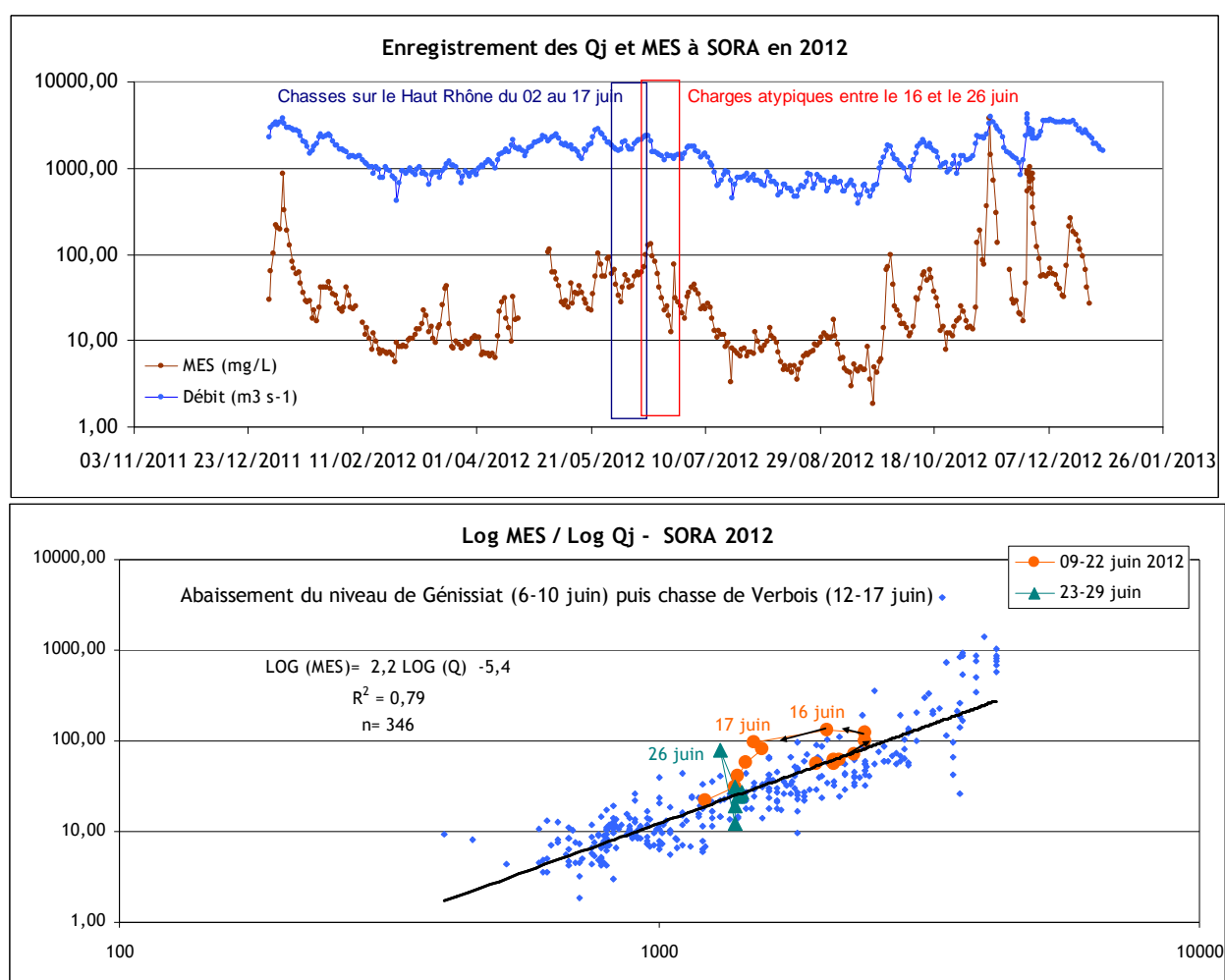


Figure 36 : Suivi de la charge en suspension à la station du Rhône à Arles. Abscisse : logarithme du débit, Ordonnée : logarithme de la concentration en MES.

<sup>19</sup> Pour mémoire les données de charges acquises à SORA sont des valeurs journalières déterminées à partir d'un prélèvement composite de 150 mL d'eau toutes les 90 minutes durant 24 heures.

Le cycle d'hystérésis inverse enregistré entre le 9 juin et le 22 juin, avec un pic de charge les 15 et 16 juin, ainsi que les valeurs des marqueurs Sr et Ba (Cf. Figure 37), suggèrent une source d'apport sédimentaire distante qui peut être associée aux opérations de chasse sur le Haut-Rhône, ou aux crues concomitantes comme celle de l'Isère (Cf. paragraphe 4.3).

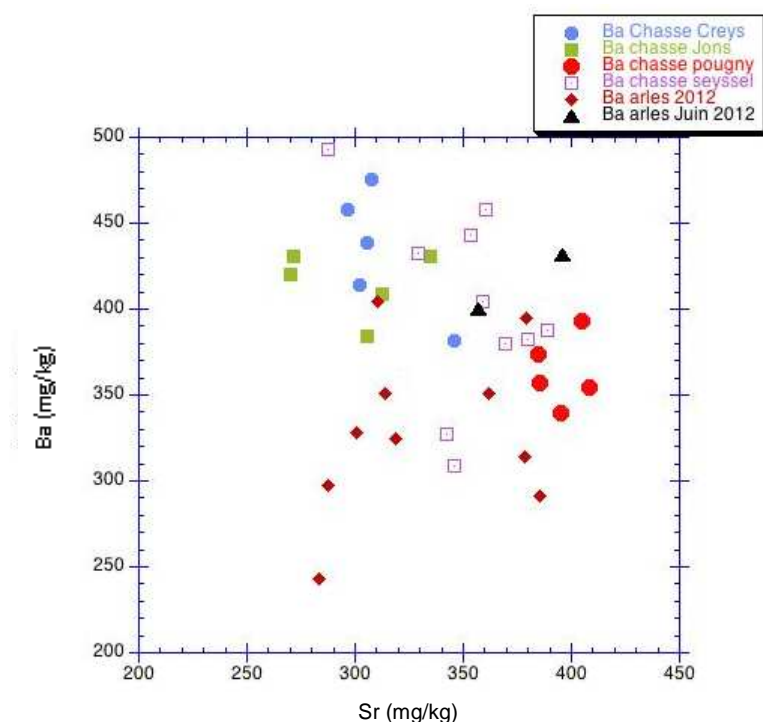


Figure 37 : Marqueurs géochimiques (Ba : Baryum, Sr : Strontium) pendant les opérations de chasse à Creys, Jons, Pogny et Seyssel, du 11 au 26 juin 2012 à Arles, et entre janvier et mai 2012 à Arles.

Sur la période d'observation de juin à juillet 2012, les spectres granulométriques enregistrés à fréquence horaire par la station SORA montrent comme attendu une augmentation de la concentration volumique en particules (en  $\mu\text{L/L}$ ) avec l'augmentation de la charge en matières en suspension (MES en mg/L), à l'exception du 26 juin. Les proportions de particules fines sont constantes au cours de la période étudiée ( $D_{25}^{20}$ ). Ainsi, elles composaient l'essentiel de la charge en transit les 15 et 16 juin à Arles. Une augmentation de la taille des particules a été enregistrée juste après le pic de MES à partir du 16 juin avec des valeurs maximales entre le 21 et le 30 juin ( $D_{75}$ ). Ce transit échelonné des particules sur la partie du Rhône aval pourrait être la signature des déstockages sédimentaires massifs à l'amont (opérations de chasse ou crue de l'Isère).

En perspective, l'interprétation de traceurs des différentes sources (une fois mieux connue la signature de l'Isère) et l'utilisation du modèle hydro-sédimentaire du Rhône (une fois calé et validé de Lyon à la mer) permettront de quantifier la contribution respective de la chasse et des autres apports dans le flux observé à Arles.

Le suivi des teneurs en tritium (HTO) dans l'eau du Rhône a été réalisé au cours des opérations de chasse depuis le Pont de Seyssel lors de l'abaissement de la retenue de Génissiat, puis depuis le pont de Pogny lors de la chasse du barrage de Verbois jusqu'à Arles (prélèvements ponctuels et déclenchement des hydro-collecteurs de l'IRSN répartis sur le linéaire rhodanien). Les enregistrements acquis (Cf. Figure 39) montrent que les opérations de chasse sur le Haut-Rhône n'ont pas entraîné d'augmentation significative des

<sup>20</sup> La valeur du percentile Di est interprétée comme suit : i% des particules présentes ont un diamètre inférieur ou égal à la valeur du Di ( $\mu\text{m}$ ).

teneurs en tritium dans l'eau (HTO). Jusqu'à l'amont du CNPE du Bugey (BUG), les teneurs en HTO sont restées proches des valeurs caractéristiques du bruit de fond (1 à 2 Bq/L), comme le soulignent les données acquises au Pont de Seyssel, à Pougny et à Creys-Malville (CRM). A l'aval du Bugey et jusqu'à Arles, les teneurs sensiblement plus élevées en HTO enregistrées (0,8 à 13 Bq/L, à Jons ; 3,8 à 10,4 Bq/L à Arles) sont directement liées aux rejets liquides des industries nucléaires.

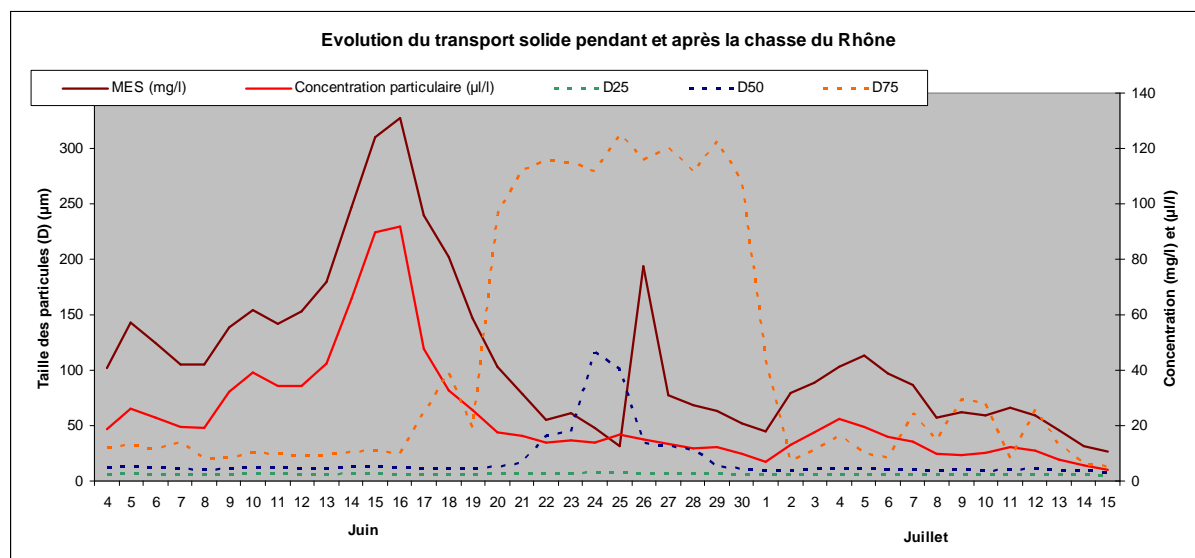


Figure 38 : Suivi de la granulométrie des particules en transit à la station du Rhône à Arles sur la période juin-juillet 2012.

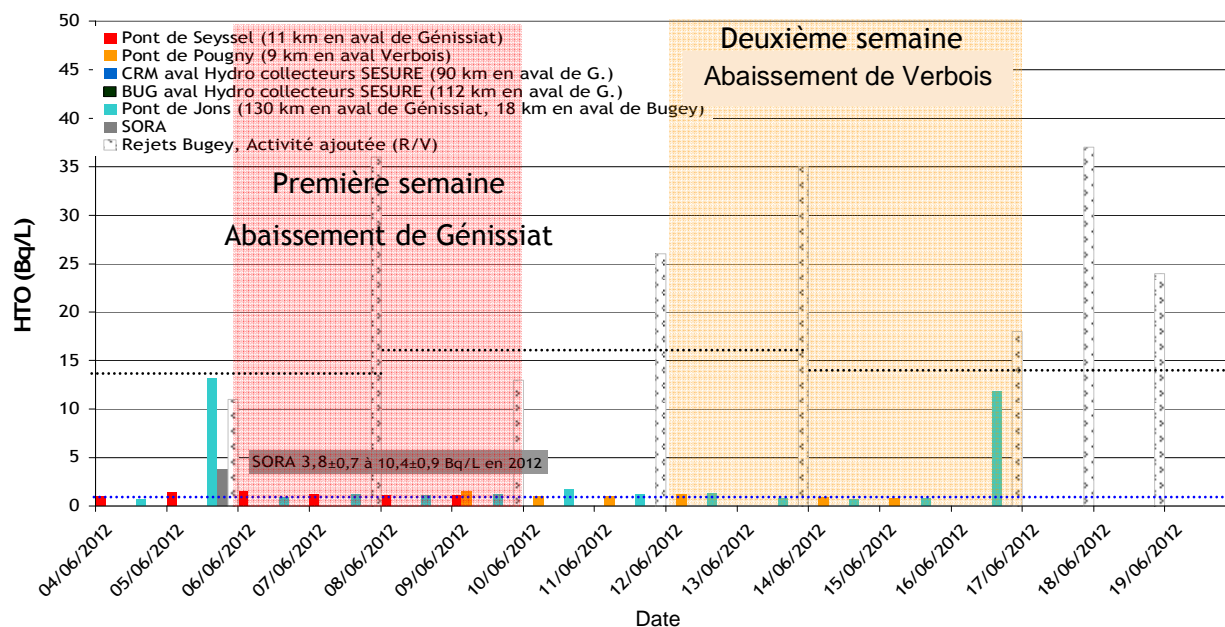


Figure 39 : Suivi de la teneur en tritium libre dans l'eau du Rhône à différentes stations lors des opérations de chasse.

## 7. Suivi post-chasse

### 7.1 Déclenchement du groupe d'intervention en crue

Depuis juin 2012, le groupe d'intervention en crues d'Irstea s'est mobilisé lors de deux périodes de crues à l'automne 2012 pour réaliser des prélèvements sur les affluents et sur le Rhône : 11 et 12 novembre 2012 à Jons, sur l'Ain et la Bourbre ; du 27 au 30 novembre 2012 sur la Bourbre (forte crue), la Saône et à Jons.

### 7.2 Suivi des flux de MES à la station de Genève sur l'Arve

La station de Genève sur l'Arve permet le suivi en continu de la turbidité et un étalonnage du turbidimètre permet de convertir l'enregistrement de turbidité en chronique de concentration en MES. La Figure 40 présente le tableau de bord de la chronique de turbidité telle qu'elle apparaît dans la base de données FluxOSR dans BDOH (base de données hydrologiques OSR). Ce tableau de bord indique le taux de collecte de la donnée pour chaque mois de mesure. On constate que depuis son installation en mars 2012, la station n'a pas connu de période sans enregistrement. Au cours des semaines qui ont suivi les opérations de chasse sur le Haut-Rhône, l'Arve a connu plusieurs crues importantes. Le 22 juin, la concentration en MES a atteint 3500 mg/L et son effet s'est fait ressentir deux jours plus tard à Jons, où la concentration en MES est passée de quelques mg/L à 100 mg/L durant deux jours (Cf. Figure 41). La Figure 42 présente l'enregistrement de turbidité pour le mois d'août 2012. Le 27/08/2012, la concentration en MES a dépassé les 8000 mg/L. Ces enregistrements confirment l'intérêt du suivi de l'Arve, qui est un contributeur majeur au flux de MES sur le Rhône amont.

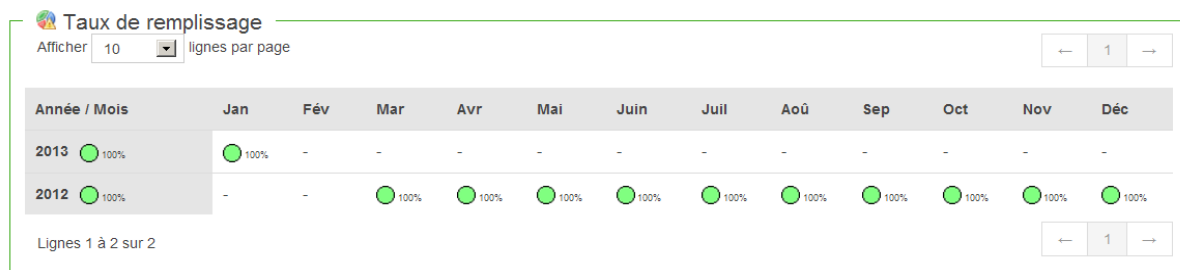


Figure 40 : Tableau de bord de la chronique de turbidité validée de la station Arve/Genève (base de données FluxOSR, BDOH, en développement).

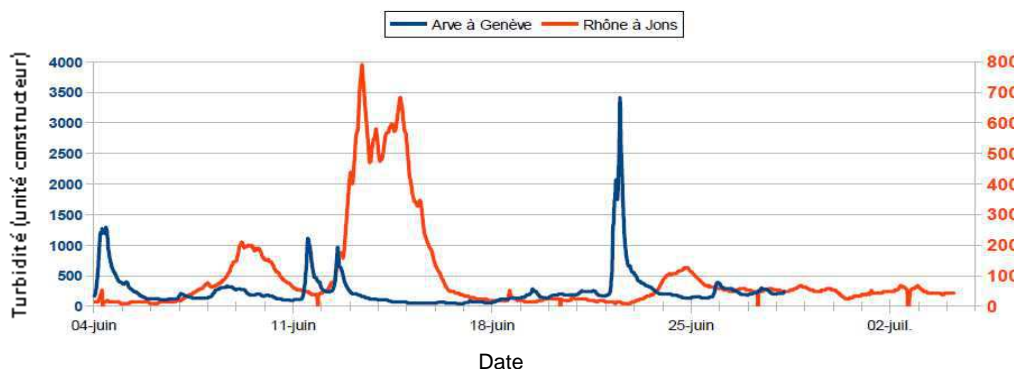


Figure 41 : Enregistrements de turbidité (brute) pendant et après les opérations : Arve à Genève (bleu), Rhône à Jons (rouge)

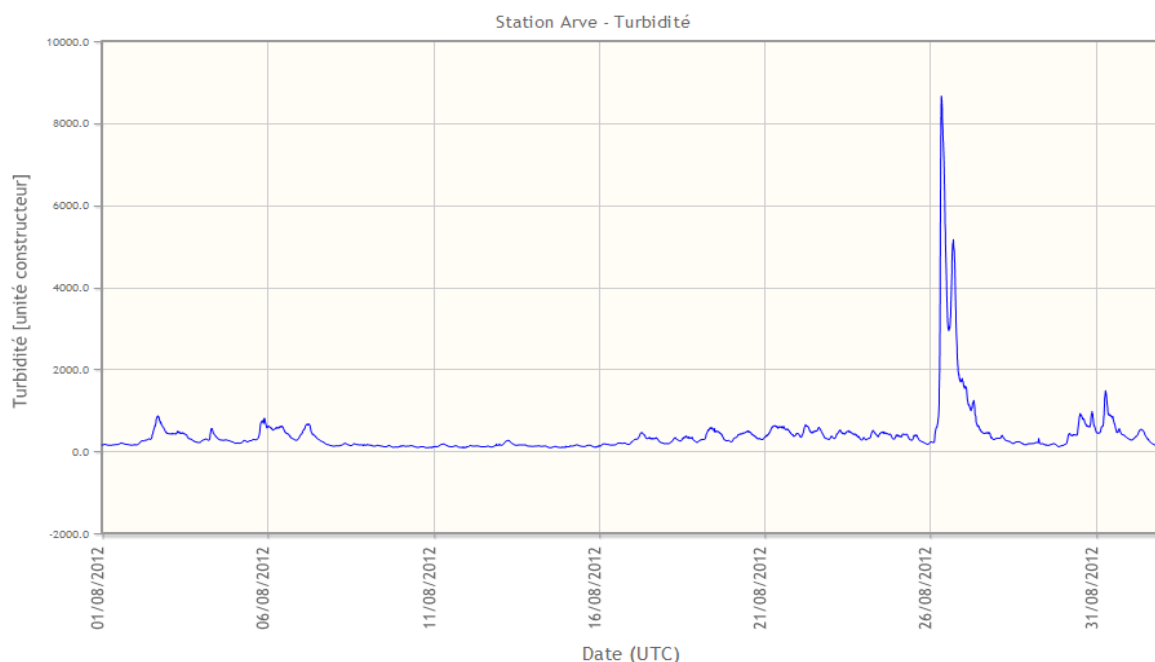


Figure 42 : Extrait de l'enregistrement de turbidité de l'Arve à la station Genève Bout-du-Monde (août 2012).

### 7.3 Comparaison des flux quantifiés à Jons

La station de mesure des flux de Jons a été installée en septembre 2010. Le Tableau 9 présente les flux de MES calculés pour chaque année et pour différents événements producteurs de flux de MES. L'année 2011 a vu passer un flux de MES à Jons plus de trois fois inférieur à celui de l'année 2012. L'année 2011 a en effet été très peu marquée par des crues. La principale crue a eu lieu fin décembre et début janvier 2012 et on constate que le flux passé lors de cet événement est équivalent au flux passé lors de l'année 2011 entière. D'autre part, c'est en 2012 qu'ont eu lieu les opérations de chasse des barrages du Haut-Rhône et le flux passé au cours de ces deux semaines représente à lui seul plus de 30 % du flux de MES de l'année 2012. La comparaison des crues de fin 2011 et de fin 2012 ne permet pas, pour le moment, de mettre en évidence un impact des chasses sur le fonctionnement sédimentaire du Haut-Rhône.

Tableau 9 : Flux de MES (t) quantifiés à Jons, par année, lors des opérations de chasse du Haut-Rhône et lors de différents événements de crue.

	Date de début	Date de fin	Flux (10 <sup>6</sup> tonnes)
Total enregistré	16/09/2010	20/11/2012	1,24
Année 2011	01/01/2011	31/12/2011	0,21
Année 2012	01/01/2012	31/12/2012	0,89
Chasse 2012 1ère semaine	01/06/2012	10/06/2012	0,03
Chasse 2012 2ème semaine	10/06/2012	22/06/2012	0,22
Crue de fin 2011- début 2012	01/12/2011	31/01/2012	0,23
Crue de novembre 2012	01/11/2012	20/11/2012	0,20

Les teneurs en contaminants des MES ne sont pas mesurées au même pas de temps que le débit liquide et la concentration en MES à Jons. Des concentrations journalières ont été reconstituées en appliquant la première mesure sur tous les jours sans analyse jusqu'au prélèvement suivant. Les flux de mercure et  $\Sigma$ PCBi à la station de Jons sont présentés dans le Tableau 10. Les flux obtenus en 2012 sont supérieurs à ceux de 2011 (3,5 fois plus pour le mercure et 4 fois plus pour la  $\Sigma$ PCBi). Cet écart s'explique en partie par les opérations de chasse des barrages du Haut-Rhône, qui ont engendré près de 25% du flux total en mercure et  $\Sigma$ PCBi cette année-là. Ce flux spécifique est toutefois comparable au flux enregistré lors des événements de crue. Compte tenu de la faible variabilité des concentrations en contaminants (facteur 2), les apports de contaminants plus importants lors d'événements hydrologiques s'expliquent par les flux plus conséquents de MES

Tableau 10 : Flux de mercure et  $\Sigma$ PCBi à Jons (en kg), par année, lors des opérations de chasse du Haut-Rhône et lors de différents événements de crue.

	Date de début	Date de fin	Flux de mercure (kg)	Flux de $\Sigma$ PCBi (kg)
<b>Année 2011</b>	<b>29/09/2011</b>	<b>31/12/2011</b>	<b>13,3</b>	<b>1,44</b>
<b>Année 2012</b>	<b>01/01/2012</b>	<b>31/12/2012</b>	<b>47,1</b>	<b>6,20</b>
1ère semaine des chasses du Haut Rhône 2012	01/06/2012	10/06/2012	1,8	0,30
2ème semaine des chasses du Haut Rhône 2012	10/06/2012	22/06/2012	9,0	1,23
Crue de fin 2011	01/12/2011	31/01/2012	13,9	2,76
Crue de fin 2011 – décembre 2011	01/12/2011	31/12/2011	7,0	1,41
Crue de novembre 2012	01/11/2012	20/11/2012	5,6	1,23

## 8. Modélisation hydraulique du Rhône

La modélisation du flux sédimentaire en MES sur le réseau hydrographique du Rhône entre le Lac Léman et la station hydrométrique de Lyon-Perrache a été réalisée à l'aide d'un modèle 1D. Pour cela, un logiciel de simulation hydraulique (Code de calcul MAGE, Irstea, 2009) couplé à un modèle d'advection-dispersion pour simuler le transport des sédiments (Code de calcul Adis-TS, Irstea 2012) a été utilisé.

La création du modèle a une visée clairement opérationnelle. Les informations prédictives qu'il peut apporter peuvent servir directement pour la gestion du fleuve, en particulier dans le cadre d'opérations ponctuelles de remobilisation artificielle des sédiments (dragages, chasses d'ouvrage) afin d'organiser ces opérations au regard de différents scénarios et de connaître par exemple leurs impacts potentiels.

Pour le cas des opérations de chasse 2012, l'objectif est dans un premier temps l'amélioration du modèle afin de représenter correctement les conditions hydrauliques qui se caractérisent principalement par l'abaissement des retenues de Verbois et de Génissiat et par l'accompagnement de la chasse par l'abaissement des retenues sur le Haut-Rhône français. Dans un deuxième temps il s'agit de reproduire correctement les flux en MES

engendrés par la reprise de dépôts sédimentaires et de la décantation de MES le long du réseau, au cours de la période. Le modèle doit être fiable et robuste.

Le modèle a été construit selon les étapes suivantes :

- Recueil des données : recueil de données topographiques supplémentaires par rapport au modèle existant pour représenter plus précisément les possibles zones de dépôt et d'érosion ; recueil de données hydrologiques pour le Rhône et chacun des affluents majeurs (hydrogrammes et cotes des retenues); recueil de données sédimentaires (concentration en MES et granulométrie) ;
- Mise en place du modèle hydraulique : paramétrage et calage du modèle hydraulique pour s'approcher au plus près du fonctionnement effectif du Rhône et de ses aménagements en respectant les consignes d'exploitation et la gestion spécifique pendant la chasse ;
- Mise en place du modèle sédimentaire : paramétrage et calage du modèle sédimentaire pour représenter le plus correctement possible le transport des MES ainsi que leurs zones d'érosion et de dépôt.

Plus d'informations sur la construction et les équations du modèle se trouvent dans les rapports Andries et *al.* (2012).

## 8.1 Structure du modèle hydro-sédimentaire

### 8.1.1 Le réseau

Le modèle couvre le linéaire du Rhône entre le Lac Léman et Lyon-Perrache, ainsi que les tronçons des deux principaux affluents entre leur dernière station hydrométrique et leur embouchure dans le Rhône, à savoir l'Arve et l'Ain. Le réseau du modèle est représenté en Figure 43.

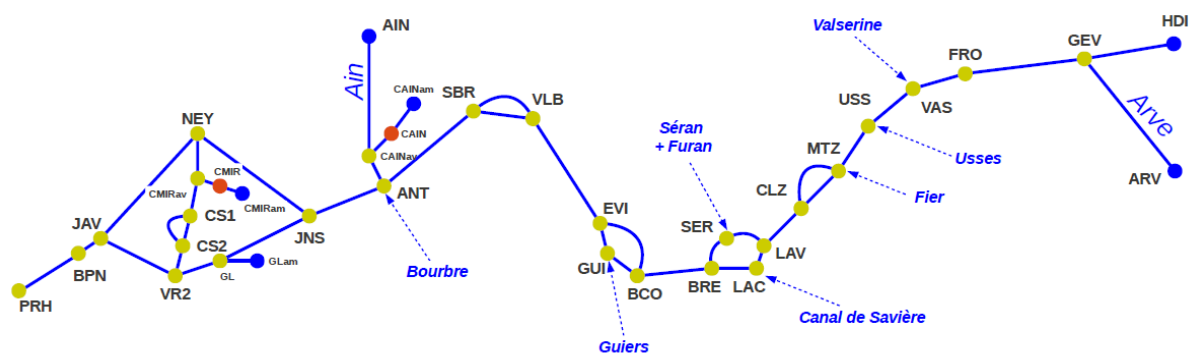


Figure 43 : Réseau du modèle 1D hydro-sédimentaire utilisé pour simuler les flux hydro-sédimentaires pendant les opérations de chasse de juin 2012 sur le Haut-Rhône.

Les points jaunes dans le réseau représentent des nœuds qui permettent de relier les différents biefs représentés en bleu. Les points bleus représentent les nœuds en limite amont du modèle, les points verts représentent les nœuds en limite aval. Les biefs sont délimités par l'arrivée d'un affluent ou par un branchement du réseau. La topologie du réseau peut être maillée ce qui permet de représenter des confluences, des diffuences et des conditions aval multiples.

Des annexes hydrauliques ont été modélisées plus précisément à trois endroits, en vue de mieux reproduire leur impact hydraulique et sédimentaire :

- Des annexes hydrauliques représentant le lit majeur devenant actif à partir d'une certaine cote et ayant une capacité de stockage d'eau importante ont été modélisées avec des casiers (points oranges, Cf. Figure 43) sur le Vieux Rhône du secteur Miribel-Jonage et sur la partie aval de l'Ain ;
- Une annexe hydraulique représentant un bassin ayant une connexion permanente avec le cours d'eau a été modélisée sur le canal de Jonage avec un bief ayant un débit entrant de zéro.

### 8.1.2 La géométrie

La géométrie du lit est définie par des profils en travers. MAGE permet la modélisation d'un lit composé d'un lit mineur, d'un lit moyen (ce qui correspond au lit majeur avec écoulement actif) et d'un lit majeur (ce qui correspond au lit majeur de stockage). La répartition des débits entre ces différents lits devient possible par l'utilisation des équations Debord avec la prise en compte de différents coefficients de Strickler pour le lit mineur et le lit moyen.

Pour une grande partie de la géométrie du lit, nous avons utilisé les données issues de la Banque de Données Topographiques Rhône (BDT Rhône) de l'IGN. Localement le modèle a également pu être précisé grâce à des données de la CNR (aux environs du barrage de Génissiat par exemple), ou encore grâce à des données internes Irstea issues de précédentes études (le Rhône de Sault-Brenaz à Lyon, équipe Dynam). Des données topographiques sur le secteur suisse ont été mises à disposition par la cellule Environnement Rhône du Service Industriel de Genève (SIG). Le tableau en Annexe 7 récapitule les différentes sources de données, leur date de production et l'espacement des profils.

Les profils en travers disponibles couvrent le lit mineur et ont dû être complétés à quelques endroits avec des données de terrain. Un MNT avec une résolution d'un mètre a été utilisé dans cette intention pour le secteur suisse. Sur le territoire français, des points cotés du réseau géodésique d'IGN sont disponibles dans la BDT Rhône.

## 8.2 Représentation des ouvrages

De nombreux aménagements hydrauliques sont présents sur la zone d'étude. On y trouve les ouvrages-types suivants :

- le barrage usine ;
- le barrage de retenue sur le Vieux-Rhône ;
- l'usine sur le canal d'aménée, encore appelé Rhône aménagé ;
- ainsi que quelques seuils naturels ou artificiels.

Pour chaque aménagement hydro-électrique, une consigne d'exploitation normale et en crue permet de respecter :

- la répartition de débits entre usines et barrages ;
- un niveau d'eau dans la retenue en fonction du débit entrant.



Les barrages assurent la répartition du débit entre le Vieux-Rhône, pour lequel au moins un débit réservé ( $Q_{res}$ ) doit être assuré, et le Rhône aménagé, pour lequel le débit est limité par le débit turbinable maximum ( $Q_{max}$ ). Les différents débits pour les aménagements du Haut-Rhône sont indiqués dans le tableau en Annexe 8. Il est important de noter que les débits réels peuvent être différents des valeurs théoriques. Par exemple, sur l'aménagement de Miribel-Jonage, le débit réservé a plusieurs fois été jaugé proche de 90 m<sup>3</sup>/s au lieu de 60 (débit théorique), tandis que le débit dans Jonage en situation de saturation était en général proche de 580 m<sup>3</sup>/s, en raison des contraintes techniques d'exploitation de l'aménagement.

Une loi niveau-débit, appelée consigne d'exploitation, est définie en un ou deux points précis de la retenue, appelés points de réglage. La régulation du plan d'eau est assurée par l'usine tant que le débit du Rhône est inférieur à son débit d'équipement. Au-delà, c'est le barrage qui s'ouvre progressivement et assure ainsi la continuité de la régulation. Les différents points de réglage et leurs cotes d'exploitation associées pour le Haut-Rhône sont listés dans le tableau en Annexe 9.

Dans le modèle, les barrages et les usines sont représentés par des orifices rectangulaires dont l'ouverture est modifiée par le modèle afin de respecter les consignes d'exploitation. Pour ce faire, des lois ont été associées à chaque orifice :

- une loi de type répartition des débits  $Q_{max}/Q_{res}$  aux orifices représentant les barrages ;
- une loi de type  $Z(Q)$  aux orifices représentant les usines et les barrages-usines.

Pour la reproduction d'un fonctionnement exceptionnel tel que l'abaissement des retenues lors de l'accompagnement des chasses suisses, la loi  $Z(Q)$  associée aux usines n'est plus valide. Dans ce cas, l'orifice représentant les usines est réglé par une loi  $Z(T)$  : l'utilisateur doit lui-même indiquer l'abaissement de la cote au point de réglage en fonction du temps. Un abaissement exceptionnel des retenues a été effectué lors des chasses suisses en 2012 sur le Haut-Rhône de l'aménagement de Verbois jusqu'à l'aménagement de Sault-Brénaz. Les figures 45 et 46 montrent les cotes mesurées qui ont été ensuite intégrées au modèle.

Si possible, les points de réglage utilisés pour la modélisation correspondent aux points de réglage réels indiqués dans les règlements d'eau des aménagements hydro-électriques. Pour quelques retenues, le point de réglage est trop éloigné de l'usine. Le réglage de l'usine étant instantané en fonction des conditions hydrauliques au point de réglage, le décalage temporel jusqu'à l'arrivée de ces conditions hydrauliques au niveau de l'usine n'est actuellement pas encore pris en compte et de grandes instabilités peuvent émerger. Dans ce cas, une consigne d'exploitation a été établie à proximité directe de l'usine.

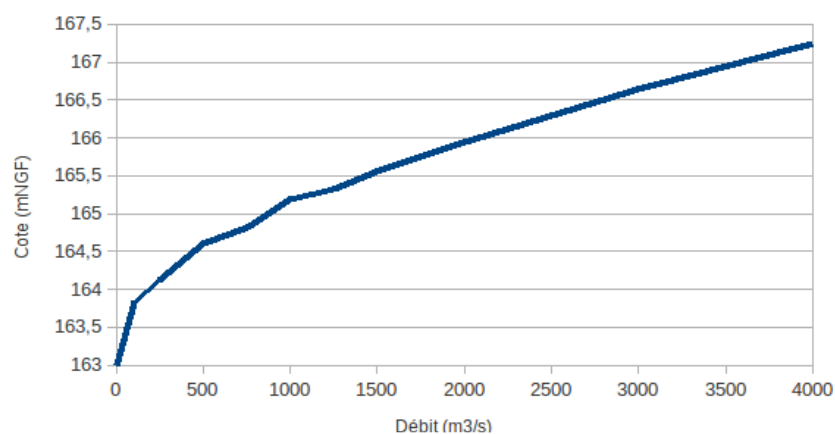


Figure 44 : Relation niveau-débit au seuil de Villeurbanne.

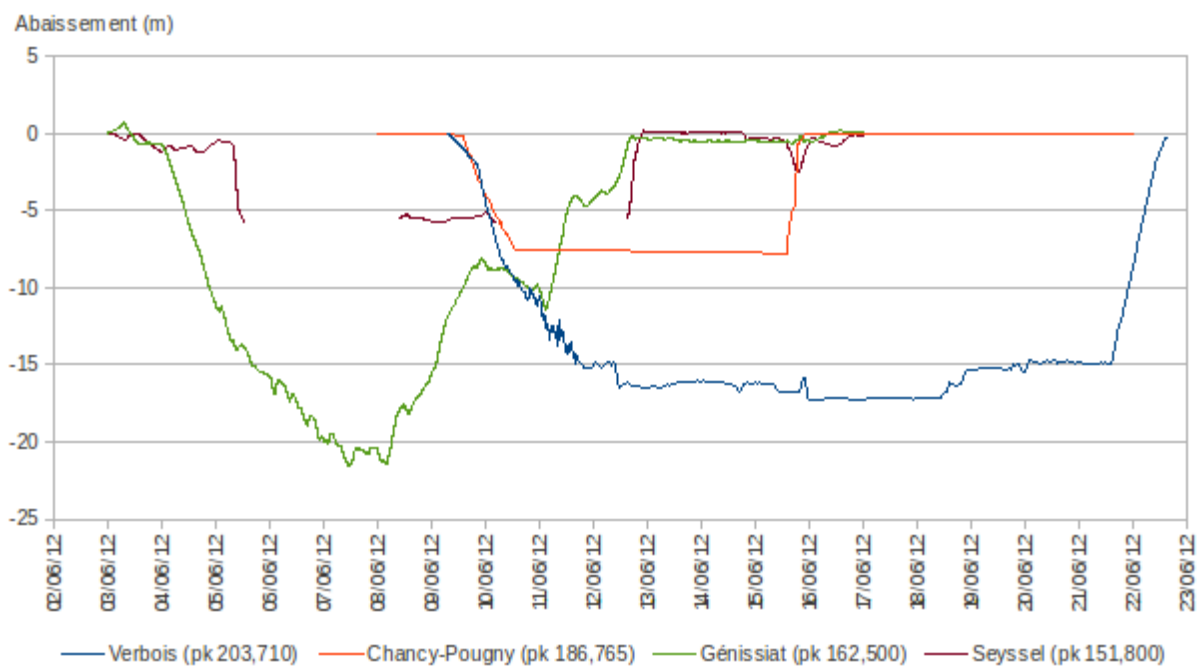


Figure 45 : Abaissement des aménagements de Verbois, de Chancy-Pougny, de Génissiat et de Seyssel mesuré pendant la chasse 2012 (relativement à la cote du 03/06/12 00:00).

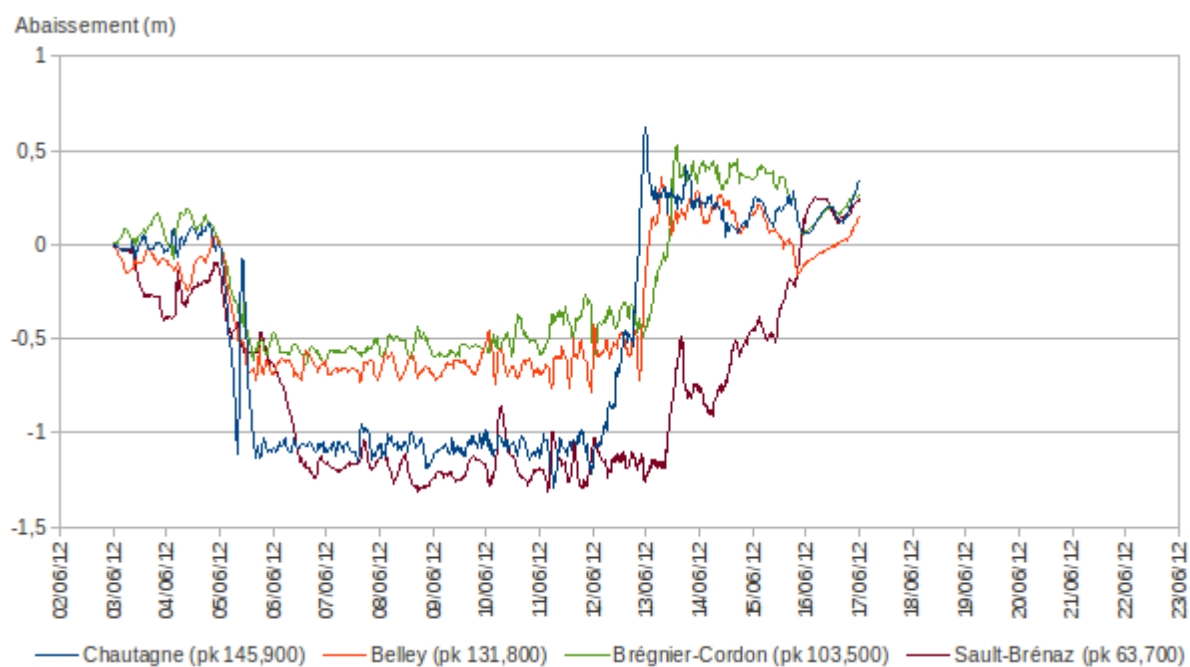


Figure 46 : Abaissement des aménagements de Chautagne, de Belley, de Brégnier-Cordon et de Sault-Brenaz mesuré pendant la chasse 2012 (relativement à la cote du 03/06/12 00:00).

## 8.3 Conditions limites et données d'entrée

### 8.3.1 Conditions limites et données d'entrée hydrauliques

Les conditions aux limites amont sont définies par des hydrogrammes qui sont injectés dans le modèle. Les différents hydrogrammes sont issus du suivi des débits présenté au paragraphe 3. Quatre limites entrantes ont été renseignées pour le Rhône et les affluents pour lesquels des informations topographiques étaient disponibles :

- L'hydrogramme du Rhône en aval direct de la sortie du Lac Léman (Seujet) ;
- L'hydrogramme de l'Arve à Bout du monde ;
- L'hydrogramme de l'Ain à Port Galland.

Là où des informations topographiques sur les affluents ne sont pas disponibles, ceux-ci sont représentés en tant qu'apport ponctuel. Les apports ponctuels se définissent au niveau des nœuds du réseau. Pour prendre en compte la distance entre la station hydrométrique et la confluence avec le Rhône, les hydrogrammes sont injectés dans le modèle avec un décalage temporel. Ce décalage temporel est déduit de la longueur du tronçon et d'une vitesse moyenne estimée à 1 m/s. Pour les affluents pris en compte avec des apports ponctuels, les stations hydrométriques et les décalages temporels associés sont comme suit :

- La Valserine à Lancrans (CNR) ; dt = 0,7 h ;
- Les Usses à Pont Rouge (CNR) ; dt = 1,5 h ;
- Le Fier à Motz (CNR) ; dt = 0 h ;
- Le Canal de Savière à Savière (CNR) ; dt = 0 h ;
- Le Séran à Belmont Luthézieu ; dt = 5 h ;
- Le Guiers à Belmont Tramonet (CNR) ; dt = 1,5 h ;
- La Bourbre à Tignieu-Jameyzieu ; dt = 2,2 h.

Le Furan, confluent avec le Rhône au niveau de Brens, ne dispose pas d'un suivi hydrométrique horaire. Par conséquent, son module inter-annuel a été utilisé en tant qu'apport ponctuel au lieu de l'hydrogramme.

La condition à la limite aval est une relation niveau-débit qui est connue pour le seuil de Villeurbanne (Etude Burgeap). Cette relation est représentée dans la Figure 44.

### 8.3.2 Conditions limites et données d'entrée sédimentaires

Les conditions aux limites amont dans le modèle Adis-TS sont définies soit par des courbes de concentration en MES soit par un débit massique. Des concentrations en MES ne peuvent être injectées qu'à un nœud amont du modèle (Cf. Figure 43). Des débits massiques peuvent être injectés aux nœuds intermédiaires.

Une chronique continue de concentrations en MES a été élaborée pour chaque station de suivi pendant la chasse (Cf. paragraphe 4). Les résultats de ces mesures servent de données d'entrée pour le modèle sédimentaire.

Quand le calage sédimentaire du modèle permet de représenter correctement les processus d'érosion et de dépôt, il suffit d'injecter uniquement les courbes de concentration pour les affluents (Arve et Guiers), la grande partie des MES étant mobilisée dans la zone d'étude. La représentation de la mobilisation des MES dans la retenue de Verbois durant la chasse posant des problèmes actuellement, l'injection d'un débit massique au niveau de Chancy-Pougny sert de solution intermédiaire.

Le modèle Adis-TS ne nécessite pas de définition de la condition limite aval qui est de type sortie libre (Neumann homogène).

Outre la concentration en MES amont, il est nécessaire d'indiquer quelques caractéristiques sédimentaires, dont :

- le type de MES (par exemple sable naturel ou limon) ;
- la taille caractéristique des particules ;
- la masse volumique (choisie à  $2650 \text{ kg/m}^3$ ) ;
- la porosité (choisie à 50%).

L'analyse des données granulométriques a montré l'existence de quatre sous-populations de particules définies par leur mode  $d$ , l'écart-type  $\sigma$  et leur poids  $\lambda$  (Cf. paragraphe 5.4). Les résultats de cette analyse servent de données d'entrée pour la taille caractéristique des particules.

## 8.4. Calage hydro-sédimentaire du modèle

Le suivi de la chasse 2012 sur le Haut-Rhône offre un jeu de données idéal pour le calage hydraulique et sédimentaire du modèle.

### 8.4.1 Calage hydraulique

Le calage hydraulique a été effectué tronçon par tronçon entre une station hydrométrique, pour laquelle on dispose de l'hydrogramme, et un point de réglage, pour lequel soit la loi  $Z(Q)$  soit la cote en fonction du temps  $Z(T)$  est connue. Les tronçons de calage sont les suivants :

- De Seujet jusqu'en amont du barrage de Génissiat ;
- De Pougny jusqu'en amont du barrage de Seyssel ;
- De Bognes jusqu'en amont du barrage de Lavours ;
- De Pont de la Loi jusqu'en amont du barrage de Villebois ;
- De Groslée jusqu'en amont du barrage de Jons ;
- De Jons jusqu'au seuil de Villeurbanne.

Le paramètre de calage hydraulique est le coefficient de Strickler qui est défini pour le lit mineur et le lit moyen en fonction du pk. Le coefficient de Strickler permet de définir la résistance à l'écoulement (perte de charge) ainsi que la rugosité du lit d'une rivière en fonction de sa nature (gravier, herbe, béton, ...). La valeur de ce coefficient a une influence importante sur la vitesse, les hauteurs d'eau et le débit, notamment là où il y a plusieurs bras, et donc sur la répartition de débits entre les bras. Le coefficient de Strickler a aussi un impact sur l'estimation du coefficient de dispersion et donc sur la dynamique du transport des MES. L'étape de calage du coefficient de Strickler est donc une étape importante.

Des coefficients de Strickler en fonction de la nature du lit de la rivière se trouvent dans la littérature scientifique. Pourtant, le choix de ces valeurs est souvent subjectif. De plus, ce paramètre englobe aussi des pertes de charges singulières qui ne sont pas directement liées à la nature du lit. Il est donc préférable de caler et valider les coefficients à l'aide de lignes d'eau mesurées pour un débit connu.

Les raisons permettant ce choix sont dans l'ordre de préférence :

- L'ordre de grandeur du débit correspondant au débit moyen durant la chasse 2012 ;
- La date la plus actuelle, si la géométrie n'est pas susceptible d'avoir changé depuis le relevé de la ligne d'eau ;
- La date correspondant à la date de la géométrie du modèle, si la géométrie est susceptible d'avoir changé depuis le relevé de la ligne d'eau ;

Les lignes d'eau qui n'ont pas été utilisées pour le calage des coefficients de Strickler servent à la validation de celui-ci.

La Figure 47 montre à titre d'exemple le résultat du calage pour le secteur entre Sault-Brénaz et le barrage de Jons pour un débit de  $525 \text{ m}^3/\text{s}$ . Les coefficients de Strickler issus de ce calage ont été validés avec trois autres lignes d'eau (Cf. Figure 48).

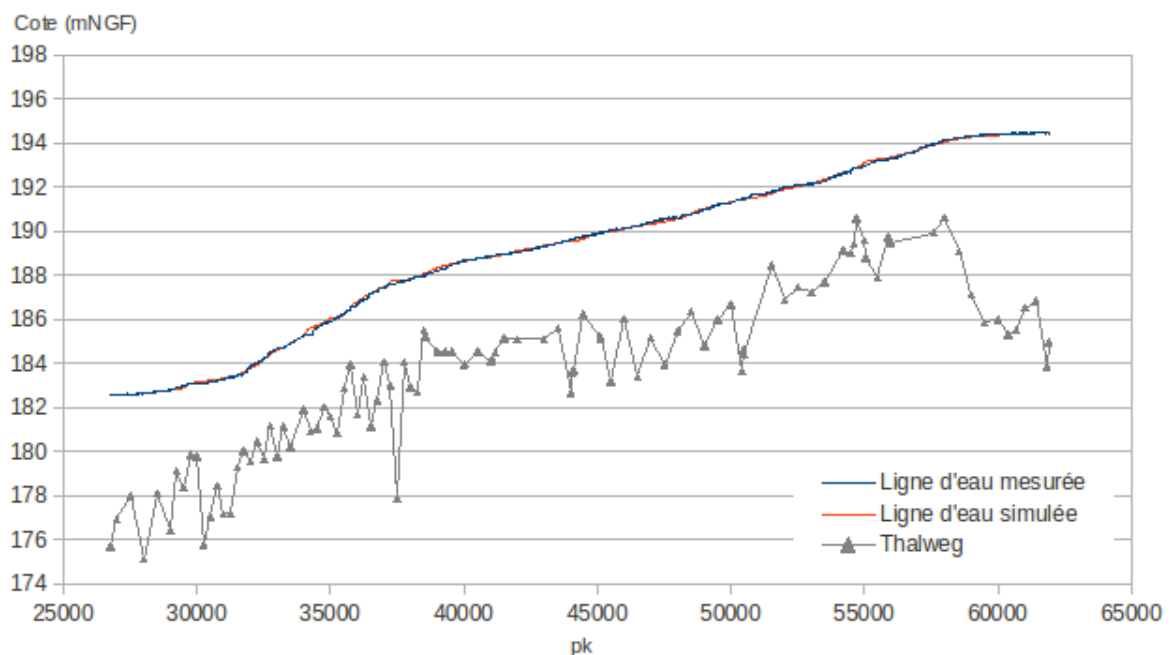


Figure 47 : Calage des coefficients de Strickler avec la ligne d'eau du 24/03/2009 entre Sault-Brénaz et le barrage de Jons pour  $Q = 525 \text{ m}^3/\text{s}$ .

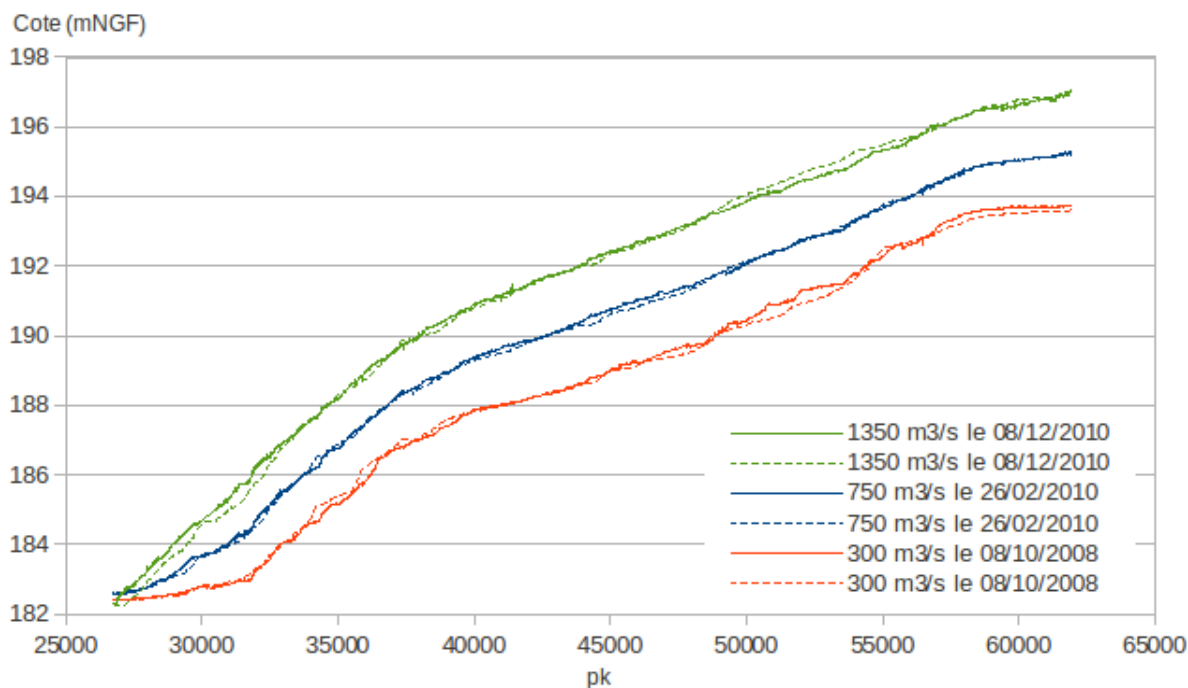


Figure 48 : Validation des coefficients de Strickler entre Sault-Brénaz et le barrage de Jons (ligne continue : ligne d'eau mesurée ; ligne discontinue : ligne d'eau simulée).

Pour trois secteurs, on ne dispose pas de lignes d'eau permettant le calage des coefficients de Strickler : le secteur suisse, la retenue de Chautagne et le secteur de Miribel-Jonage.

Pour le secteur suisse, les SIG ont commandé en 2004 une étude hydraulique et géomorphologique au bureau d'études AquaVision (AquaVision, 2004). Dans le cadre de cette étude, AquaVision a élaboré un modèle 1D du Rhône entre Le Seujet et Chancy-Pougny et de l'Arve entre Bout du Monde et la confluence avec le Rhône. Ce modèle ressemble au modèle présenté ici en ce qui concerne l'espacement des profils en travers et l'hydraulique. La gamme des valeurs des coefficients de Strickler allant de  $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  à  $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  correspond également bien à nos résultats de calage sur les autres tronçons du modèle. On a donc pu utiliser les coefficients de Strickler listés dans l'étude d'AquaVision pour notre modèle.

Pour la retenue de Chautagne, on ne dispose que de lignes d'eau datant de 1984 à 1993. Le calage avec la ligne d'eau la plus actuelle (de 1993) donne des valeurs de Strickler de  $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Cette valeur est plus importante que l'ensemble des valeurs de Strickler sur le reste du Haut-Rhône issues de calages avec des lignes d'eau plus actuelles. Vu la date de la ligne d'eau, il semble possible que la géométrie du lit ait changé, ce qui rend ces lignes d'eau obsolètes. Un coefficient de Strickler de  $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  correspondant aux résultats de calage pour des tronçons comparables a donc été choisi.

Pour le secteur de Miribel-Jonage, le bureau d'étude Burgeap a effectué un travail de calage des coefficients de Strickler. Le calage a été fait à bas débit et les valeurs couvrent une gamme allant de  $13 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  à  $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Correspondant au cas d'étiage, ces coefficients ne représentent pas les conditions hydrauliques pendant la chasse en 2012 et n'ont pour cela pas pu être utilisés. Nous nous sommes basés sur des valeurs issues de la littérature que nous avons ensuite légèrement modifiées pour atteindre une bonne répartition des débits au niveau des diffuences naturelles.

La Figure 46 présente une comparaison de l'hydrogramme mesuré à Anthon (station hydrométrique de la CNR) avec l'hydrogramme simulé pour une simulation entre Groslée et le barrage de Jons. La figure atteste de la bonne qualité de la représentation des ouvrages hydro-électriques et du calage des coefficients des Strickler obtenue par le modèle.

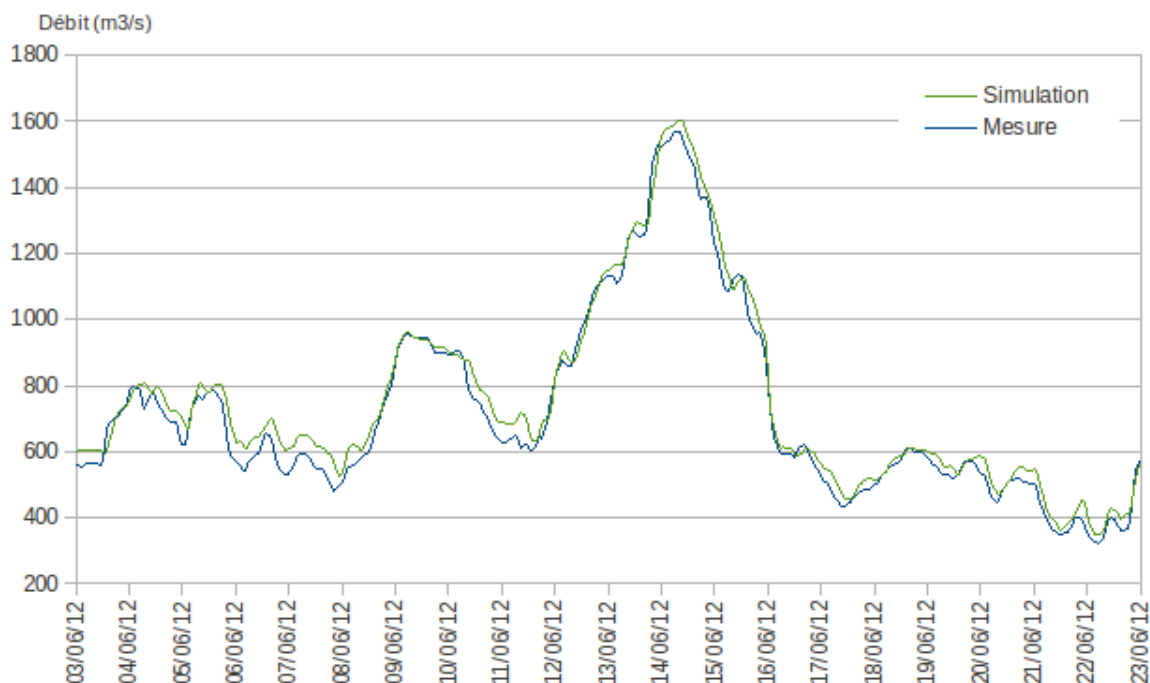


Figure 49 : Hydrogramme mesuré et simulé (simulation entre Groslée et Jons) pour la chasse 2012 à Anthon, station hydrométrique de la CNR.

Les valeurs des coefficients de Strickler sur l'ensemble du Haut-Rhône résultant de ce calage sont présentées en Annexe 10.

#### 8.4.2 Calage sédimentaire

Le calage sédimentaire s'effectue, comme le calage hydraulique, tronçon par tronçon. Les différents tronçons sont délimités par des stations de mesure de concentration en MES ou de turbidité. Il est ainsi possible de comparer la courbe de concentration simulée en aval du tronçon avec la courbe de concentration mesurée sur le terrain. Les différents tronçons de calage sont :

- De Seujet jusqu'à la station de Pougny ;
- De la station de Pougny jusqu'à la station de Seyssel ;
- De la station de Seyssel jusqu'à la station de Champagneux ;
- De la station de Champagneux jusqu'à la station de Creys ;
- De la station de Creys jusqu'à la station de Bugey ;
- De la station de Bugey jusqu'à la station de Lyon-Perrache.

Plusieurs paramètres permettent le calage des processus sédimentaires (voir la documentation du code de simulation Adis-TS) :

- Le coefficient de dispersion ;
- Le coefficient  $a_{pd}$ , permettant le calage de l'intensité des processus de dépôt et d'érosion ;
- Le coefficient  $a_c$ , permettant le calage de la concentration d'équilibre ;
- L'exposant  $b_c$ , permettant le calage de la concentration d'équilibre (choisi égal à 1).

Ces coefficients étant fortement dépendants des conditions hydrauliques, le calage sédimentaire s'effectue nécessairement après un calage hydraulique satisfaisant.

En ce qui concerne le coefficient de dispersion, des expériences de traçage menées par Irstea sur le secteur de Miribel-Jonage en 2011 ont montré que la formule d'Iwasa et Aya (1991) était un bon choix parmi les différentes formules génériques disponibles (Cf. Launay et al., 2013, soumis).

Pour le coefficient  $a_c$ , permettant le calage de la concentration d'équilibre, une valeur de 0,01 a été choisie. La Figure 50 montre pour le tronçon de calage entre Creys et Bugey, que pour cette valeur le processus dominant était le dépôt, ce qui correspond au bilan de masses discuté dans le paragraphe 4.

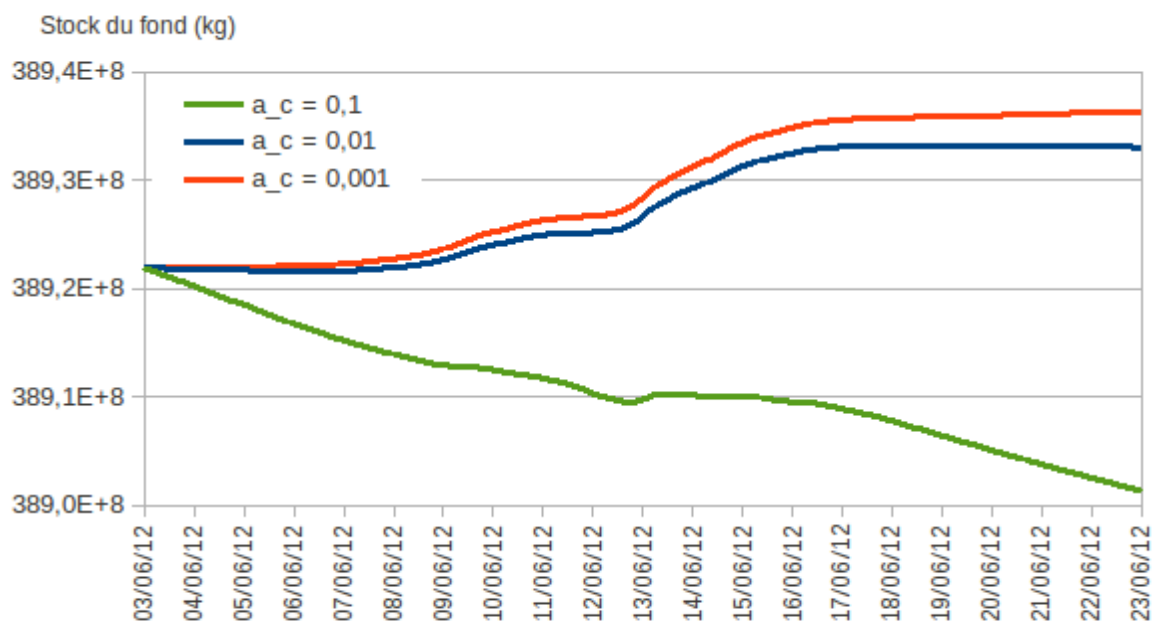


Figure 50 : Variation du stock du fond sur le secteur entre Creys et Bugey en fonction du coefficient  $a_c$  (pour  $a_{pd} = 0,01$ ).

Le coefficient  $a_{pd}$  permet le calage de l'intensité du dépôt et de l'érosion. Il a été calé de façon à reproduire au mieux la forme de la courbe de concentration observée en aval du tronçon de calage. La Figure 51 montre l'exemple pour le calage sur le tronçon de Creys à Bugey. La simulation donne des résultats satisfaisants en termes d'arrivée de la concentration, ce qui est principalement dû au bon calage hydraulique. Les pics de concentration sont également relativement bien reproduits. Mais, la figure montre un dépôt



de 47000 t sur ce tronçon alors qu'en réalité un dépôt d'environ 55000 t s'est effectué (Cf. Figure 15 et Figure 16). A deux moments (vers le 11/06/2012 et vers le 16/06/2012), le dépôt dans la simulation n'est pas satisfaisant.

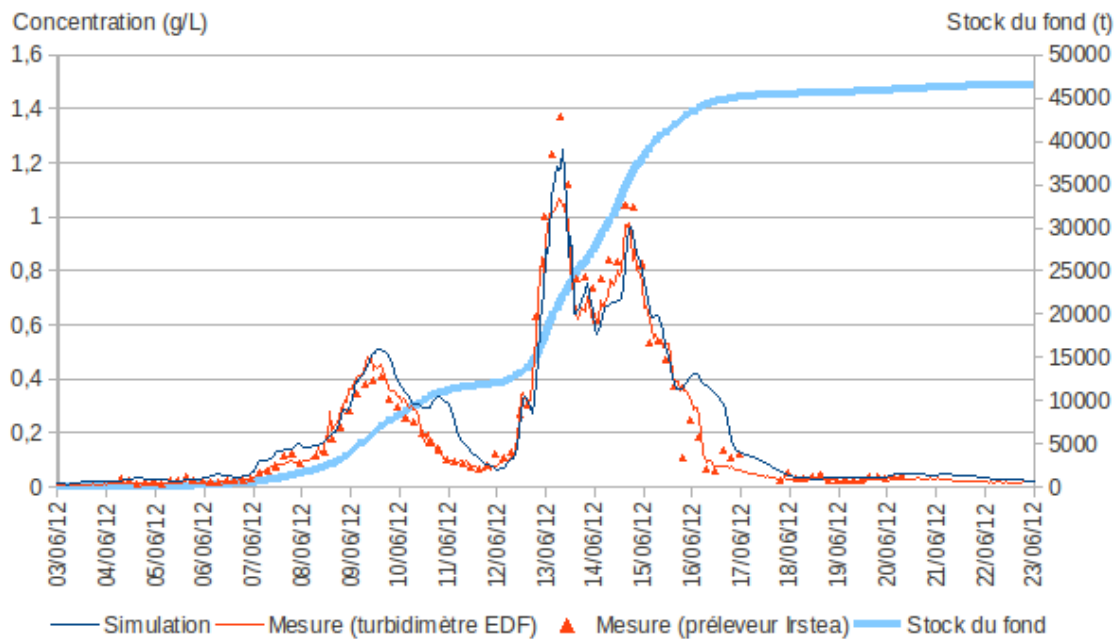


Figure 51 : Concentration en MES mesurée et simulée à Bugey (pour une simulation entre Creys et Bugey avec  $a_c = 0,01$  et  $a_{pd} = 0,055$ ).

A l'heure actuelle, Adis-TS ne représente les processus d'érosion et de dépôt que de façon globale, en termes de tendance. Des améliorations du logiciel sont en cours pour atteindre une meilleure représentation, de manière à reproduire finement la dynamique sédimentaire pendant les opérations de chasse, entre chaque couple de stations du suivi. Des cas de validation simplifiés ont été simulés en parallèle de cette étude, et ont permis d'identifier les problèmes à résoudre dans l'implémentation de la formule de dépôt-érosion. Une fois ces problèmes numériques résolus, le calage sédimentaire pourra être finalisé pour l'ensemble des tronçons.

## 8.5 Limites du modèle

Le modèle hydro-sédimentaire a quelques limites :

- Conservation de la géométrie : La géométrie du lit est conservée lors de la simulation du transport solide. Or, localement celle-ci peut être fortement modifiée lors de la chasse 2012, ce qui rétro-agit sur les conditions hydrauliques, et donc le transport solide. C'est surtout le cas pour les retenues de Verbois et de Génissiat. Un problème existe pour la modélisation à Verbois, où il y a un abaissement du fond jusqu'à 8 m. Dans le modèle, la géométrie post-chasse a dû être introduite dans le modèle à partir d'une certaine date, car une simulation de l'abaissement de la cote n'était sinon pas possible. Une évolution de la géométrie dans Adis-TS est une perspective envisagée pour les prochaines années.
- Valeurs de Strickler fixes : Le calage des valeurs de Strickler a été effectué pour le débit moyen de la chasse, ce qui semble assez robuste au vu des validations. Cependant, les valeurs de Strickler dans les modèles hydrauliques devraient pouvoir

varier avec le débit. Pour la simulation de la chasse 2012 avec l'occurrence simultanée de crues, des valeurs de Strickler dynamiques, variables avec la hauteur d'eau par exemple, seraient plus précises. C'est une perspective de développement possible avec MAGE.

## 8.6 Suite des travaux

L'important travail de mise à jour de la géométrie, d'implémentation des consignes de régulation des aménagements et de calage des lignes d'eau réalisé sur le suivi de la chasse de 2012 a produit un modèle hydraulique du Haut-Rhône beaucoup plus précis qu'auparavant. Nous disposons ainsi d'un outil de simulation fiable et robuste, et d'une méthodologie de paramétrage qui pourra être reproduite sur la partie du modèle entre Lyon et la mer.

Le calcul de la dynamique sédimentaire fonctionne correctement d'un point de vue informatique, mais des défauts dans l'implémentation de la loi de dépôt-érosion ont pu être identifiés, qui nécessitent des modifications du code de simulation Adis-TS, actuellement en cours. Si les tendances générales sont correctement reproduites, à l'heure actuelle, le travail sur le modèle hydro-sédimentaire du Haut-Rhône n'est pas encore terminé. En considérant également quelques améliorations moins cruciales, il reste donc à faire :

- L'intégration de la possibilité d'indiquer un décalage temporel pour les lois de consignes appliquées aux ouvrages hydro-électriques dans MAGE pour prendre en compte la distance entre le point de réglage et le barrage ou l'usine ;
- L'intégration des différents tronçons de calage hydraulique dans un modèle complet du Haut-Rhône ;
- L'amélioration du modèle sédimentaire et le calage sédimentaire du modèle ;
- Éventuellement, la quantification des apports pluviaux non-pris en compte par l'injection des hydrogrammes des affluents (des données pluviométriques suisses sont disponibles, des données françaises sont en attente).

## Conclusion

Dans le cadre de l'Action 8 de l'Axe II de l'OSR, les opérations de chasse de juin 2012 sur le Haut-Rhône ont fait l'objet d'un suivi scientifique. L'objectif était d'étudier la variabilité spatio-temporelle des flux de MES et de contaminants associés.

Durant les deux semaines d'opérations de chasse, les débits ont été suivis en différents points du réseau grâce aux stations CNR et SIG. Nous avons ainsi mis en évidence des crues sur la plupart des affluents amont (Arve, Fier, Ain), concomitantes aux opérations de chasse.

En s'appuyant sur des prélèvements manuels et automatiques ainsi que sur des enregistrements de turbidité en continu, des chroniques continues de concentrations en MES ont été établies pour chaque station. Ainsi, des flux de MES à pas de temps horaire ont été calculés : 930 000 tonnes de MES ont été libérées lors de l'abaissement de la retenue de Génissiat, et 2 600 000 tonnes lors de l'abaissement de la retenue de Verbois. Des zones de dépôt / reprise sédimentaires ont été mises en évidence sur le Haut-Rhône.

Le dispositif mis en place par l'OSR a également permis de suivre la contamination des MES ayant transité pendant les opérations de chasse. Un apport de matières en suspension de teneurs moindres en  $\Sigma$ PCBi, PCB-DL, mercure, cobalt, chrome, nickel, cuivre et zinc a été observé. L'ouverture de la retenue de Verbois semble néanmoins avoir engendré un léger pic de  $\Sigma$ HAP aux stations du Rhône à Seyssel et Jons. En outre, à Seyssel, ces opérations de chasse ont apporté des MES plus contaminées en arsenic et en étain, mais n'ayant pas transité jusqu'à Jons où les teneurs restent dans la même gamme que lors du suivi bimensuel OSR.

L'analyse de la teneur en carbone organique ainsi que la distribution granulométrique des MES échantillonnées pendant ces deux semaines ont montré que les MES ayant transité pendant les opérations de chasse sont de nature différente de celles transitant usuellement sur le Haut-Rhône. Une correction des teneurs en PCBi et mercure par le COP a permis de montrer que les teneurs moins importantes mesurées pendant ces deux semaines sont en partie liées à des MES de nature différente (teneur en COP plus faible).

L'impact des opérations de chasse et des crues concomitantes (Isère notamment) a été observé jusqu'à l'aval du Rhône, à la station SORA. Cette influence s'est traduit par une augmentation de la concentration en MES et du diamètre des particules. En revanche, aucun impact radiologique n'a été observé sur la base des résultats de mesures actuellement disponibles.

Un suivi post-chasse a été mis en place et plusieurs épisodes de crues ont été suivis sur le Rhône à Jons et sur différents affluents, notamment l'Arve à la station Genève Bout-du-Monde. Le calcul du flux de MES et de contaminants associés (PCBi et mercure) à la station du Rhône à Jons au cours de l'année 2012 a montré que les opérations de chasse ont participé à près de 30% du flux total de MES et près de 25% du flux total en  $\Sigma$ PCBi et mercure cette année-là.

Enfin, l'important travail de mise à jour du modèle hydraulique du Haut-Rhône réalisé grâce au suivi des opérations de chasse a permis de sensiblement l'améliorer. Cet outil est désormais fiable et robuste, et la méthodologie de paramétrage pourra être reproduite sur la partie du modèle concernant le Bas-Rhône, de Lyon à la Méditerranée.

## Références

- Andries, E., B. Camenen, J.-B. Faure, J. Le Coz, M. Launay, 2012, Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône à l'aide des modèles numériques Mage et Adis-TS, Rapport OSR, 76 pages.
- Andries, E., Faure, J.B., Camenen, B., 2012, Modélisation hydro-sédimentaire du site de Miribel-Jonage à l'aide des modèles numériques Mage et Adis-TS, Rapport Axelera, 48 pages.
- 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.
- AquaVision engineering Sàrl, 2004, Barrage de Verbois – Etude hydraulique et morphologique, Rapport pour le SIG, 139 pages.
- Bopp, R. F., Simpson, H. J., Olsen, C. R., Kostyk, N., 1981, Polychlorinated biphenyls in sediments of the tidal Hudson River, New York: Environmental Science and Technology, v. 15, p. 210-216.
- Dargnat, C., Fisson, C., Mars 2010, Les polychlorobiphényles (PCB) dans le bassin de la Seine et son estuaire: GIP Seine-Aval, 135 pages.
- Förstner, U., Calmano, W., Schoer, J., 1982, Heavy metals in bottom sediments and suspended material from the Elbe, Weser and Ems Estuaries and from the German Bight (south eastern North Sea): *Thalassia Jugoslavica*, v. 18, p. 97-122.
- Iwasa, Y., Aya, S., 1991, Predicting longitudinal dispersion coefficient in open-channel flows: 'Int. Symp. on Environmental Hydraulics', IAHR, Hong Kong, p. 505-510.
- Karickhoff, S. W., Brown, D. S., Scott, T. A., 1979, Sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments: *Water Research*, v. 13, p. 241-248.
- Launay, M., Le Coz, J., Camenen, B., Walter, C., Angot, H., Dramais, G., Faure, J.-B., Coquery, M, 2013 (soumis), Calibrating longitudinal dispersion in 1-D hydraulic modelling of pollutant transport in large rivers, *Water Resources Research*.
- Mesures d'accompagnement des chasses suisses 2012. Rapport de bilan. Novembre 2012, CNR, 168 pages.
- Niel, J. F., Collilieux, G., Giuliani, Y., 1985, Détermination simple et rapide des MES par la méthode du pycnomètre CNR. Application au contrôle des vidanges des retenues: *Revue française des Sciences de l'Eau* v. 4, p. 325-340.
- Olsen, C. R., Cutshall, N. H., Larsen, I. L., 1982, Pollutant-particle associations and dynamics in coastal marine environments: a review: *Marine Chemistry*, v. 11, p. 501-533.
- OSPAR Commission, 2011, JAMP Guidelines for the monitoring of sediments, Ref. No. 2002-16, 2002, updated in 2009, 2010, 2011, 113 pages.