



HAL
open science

Bilan actualisé des flux de matières en suspension et micropolluants associés sur le bassin du Rhône. Rapport final

Gaëlle Poulhier, Jérôme Le Coz, C. Le Bescond, F. Thollet, J. Panay, M. Lagouy, Guillaume Dramais, G. Grisot, M. Launay, S. Gairoard, et al.

► To cite this version:

Gaëlle Poulhier, Jérôme Le Coz, C. Le Bescond, F. Thollet, J. Panay, et al.. Bilan actualisé des flux de matières en suspension et micropolluants associés sur le bassin du Rhône. Rapport final. [Rapport de recherche] irstea. 2018, pp.93. hal-02607069

HAL Id: hal-02607069

<https://hal.inrae.fr/hal-02607069>

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.

OSR4 2015-2017

Bilan actualisé des flux particulaires du Rhône



Observatoire
Sédiments
Rhône

Action III.3

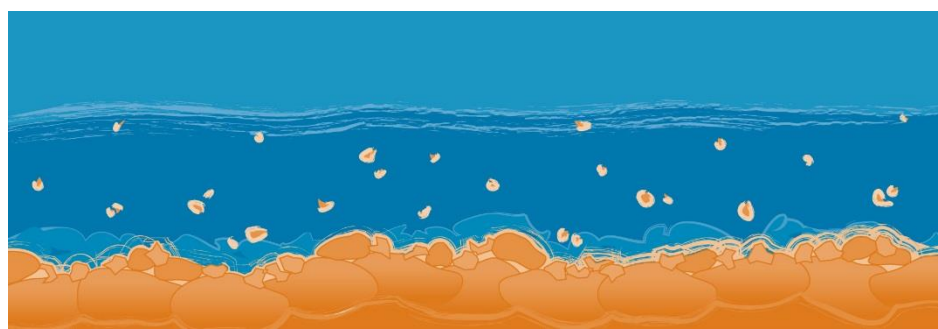
Septembre 2018 – Version finale



2015 - 2020



Donnons un avenir à notre fleuve



Personnes impliquées	Equipe de recherche
Gaëlle Poulhier (coordinateur), Jérôme Le Coz, Chloé Le Bescond, Fabien Thollet, Josselin Panay, Mickael Lagouy, Guillaume Dramais, Ghislaine Grisot, Marina Launay, Marina Coquery	Irstea Lyon
Julie Gattacceca, Stéphanie Gairoard, Olivier Radakovitch	CEREGE Aix-en-Provence
Hugo Lepage	IRSN Cadarache

Bilan actualisé des flux de matières en suspension et micropolluants associés sur le bassin du Rhône

Rapport final

Résumé

Ce livrable correspond à l'action III.3 de l'Observatoire des Sédiments du Rhône, programme 2015-2017 (OSR 4). Il a pour objet la quantification des flux de matières en suspension (MES) et des contaminants associés, du Lac Léman à la mer Méditerranée. Les chroniques de débit, de MES et de concentration en micropolluants (PCB indicateurs, mercure, éléments traces métalliques et radionucléides) acquises par l'OSR et ses partenaires depuis la mise en place de ce réseau de suivi sont bancarisées dans la Base de Données des Observatoires en Hydrologie (BDOH), qui permet également le calcul automatisé de flux de MES et de contaminants particuliers. Dans une première partie, le fonctionnement de cette base de données est décrit. Une méthodologie spécifique et harmonisée a été développée au cours de ce cycle de l'OSR pour combler les lacunes temporelles des chroniques bancarisées. Elle est détaillée dans une deuxième partie. Dans une troisième partie, les flux annuels de MES sont calculés pour la période 2011-2016 sur les stations principales du Rhône et ses principaux affluents *via* cette méthodologie spécifique, puis ils sont interprétés. Enfin, dans une dernière partie, les flux de contaminants particuliers sur le Rhône et ses principaux affluents sont actualisés et interprétés en termes de bilans annuels à l'échelle du bassin du Rhône pour les années 2014, 2015 et 2016.

Mots-clés

Contaminants organiques, éléments trace métalliques, radionucléides, matières en suspension, flux, Base de Données des Observatoires en Hydrologie (BDOH).

Table des matières

Liste des tableaux.....	7
Liste des figures	8
Liste des abréviations.....	10
Introduction générale	11
Chapitre 1. Description du réseau de mesure, des données et de BDOH.....	12
1 Objectifs.....	12
2 Présentation du réseau de mesure des flux de l'OSR 4.....	12
3 Présentation de l'outil BDOH.....	14
3.1 Les données brutes bancarisées	15
3.1.1 Le débit.....	15
3.1.2 La concentration en MES	15
3.1.3 Les concentrations en contaminants particuliers	17
3.2 La qualité des données.....	19
3.3 Méthode de calcul des flux dans BDOH.....	19
3.3.1 Principe général	19
3.3.2 Transformation d'une chronique discontinue en chronique continue	21
3.4 Tests préliminaires pour la reconstitution des lacunes dans BDOH : cas du mercure à Arles et Jons.....	22
3.4.1 Définition d'une lacune	22
3.4.2 Description des méthodes de reconstitution testées.....	23
3.4.3 Calculs de flux à partir des chroniques reconstituées	26
3.4.4 Résultats sur les méthodes de reconstitution testées	28
4 Conclusion du chapitre 1.....	34
Chapitre 2. Développement d'une méthode générale de reconstitution des chroniques lacunaires pour le calcul de flux de MES et de contaminants associés.....	35
1 Objectifs.....	35
2 Données disponibles	35
3 Reconstitution des lacunes de CMES : relations CsQ	38
4 Reconstitution des lacunes des concentrations en contaminants : valeurs forfaits par régime hydrologique .	42
4.1 Définition des seuils de crue et distinction des régimes hydrologiques	42
4.2 Valeurs forfaits : PCBi.....	43
4.3 Valeurs forfaits : mercure	45
4.4 Valeurs forfaits : ETM.....	45
4.5 Valeurs forfaits : radionucléides	46

5	Récapitulatif et conclusion partielle	47
Chapitre 3. Flux de matières en suspension sur le bassin du Rhône entre 2011 et 2016		
1	Objectifs.....	49
2	Données disponibles	49
3	Débits en eau	50
3.1	<i>Variabilité spatio-temporelle des débits.....</i>	50
3.1.1	Haut-Rhône	50
3.1.2	Rhône du Léman à la mer	52
3.2	<i>Bilans de flux d'eau.....</i>	54
4	Matières en suspension	55
4.1	<i>Variabilité spatio-temporelle des concentrations en matières en suspension</i>	55
4.1.1	Haut-Rhône	55
4.1.2	Rhône du Léman à la mer	57
4.2	<i>Flux de matières en suspension sur le Rhône et ses affluents</i>	59
4.2.1	Haut-Rhône	59
4.2.2	Rhône du Léman à la mer	61
4.3	<i>Bilans de flux de MES</i>	63
4.3.1	Haut-Rhône	63
4.3.2	Rhône du Léman à la mer	64
5	Conclusion du chapitre 3 et perspectives	65
Chapitre 4. Flux de contaminants en 2014, 2015 et 2016.....		
1	Objectifs.....	66
2	Variabilité spatiale des concentrations en contaminants.....	66
2.1	<i>PCB indicateurs.....</i>	66
2.2	<i>Mercuré.....</i>	68
2.3	<i>Eléments Trace Métalliques.....</i>	68
2.4	<i>Radionucléides.....</i>	72
3	Flux de contaminants sur le Rhône et ses affluents en 2014, 2015 et 2016.....	72
3.1	<i>Flux annuels de somme de PCB indicateurs</i>	72
3.2	<i>Mercuré.....</i>	74
3.3	<i>Eléments Traces Métalliques</i>	75
3.4	<i>Radionucléides.....</i>	77
4	Conclusion du chapitre 4 et perspectives	78
Conclusion générale et perspectives		79

Bibliographie.....	81
Annexe 1. Glossaire de l’outil BDOH	82
Annexe 2. Statistiques descriptives des données de concentrations particulières en PCBi	83
Annexe 3. Statistiques descriptives des données de concentrations particulières en mercure (Hg)	86
Annexe 4. Statistiques descriptives des données de concentrations particulières en éléments traces métalliques 87	
Annexe 5. Statistiques descriptives des données de concentrations particulières en radionucléides	88
Annexe 6. Flux de MES sur le Haut- Rhône.....	89
Annexe 7. Flux de MES sur le Rhône, du Léman à la mer	90
Annexe 8. Flux de contaminants sur le Rhône, du Léman à la mer.....	91

Liste des tableaux

Tableau 1 : Croisement des indices de qualité des chroniques mères dans le cas d'un calcul de chronique fille...	20
Tableau 2 : Concentrations moyennes en mercure particulaire (en $\mu\text{g/g}$) par régime hydrologique aux stations de Jons et d'Arles, sur la période 2011-2015.	25
Tableau 3 : Cumuls mensuels de MES calculés à Jons par deux méthodes de reconstitution des lacunes pour l'année 2013.	28
Tableau 4 : Cumuls hebdomadaires de MES calculés à Jons par 2 méthodes de reconstitution des lacunes pour l'année 2013	29
Tableau 5 : Variabilité sur les cumuls annuels et mensuels de mercure calculés à Jons selon 12 méthodes de reconstitution des lacunes (6 avec les centrifugations, 6 avec les pièges à particules) pour l'année 2013	30
Tableau 6 : Cumuls mensuels de MES calculés à Arles par deux méthodes de reconstitution des lacunes pour l'année 2013	32
Tableau 7 : Variabilité des cumuls annuels et mensuels de mercure particulaire calculés à Arles par 6 méthodes de reconstitution des lacunes pour l'année 2013	33
Tableau 8 : Données de flux de matières en suspension disponibles dans BDOH pour les stations principales sur le Rhône et les principaux affluents des bassins versants du Haut-Rhône et du Rhône en aval de Lyon.	36
Tableau 9 : Suivi réalisé par piège à particules pour différentes familles de micropolluants sur les stations de l'OSR de janvier 2011 à avril 2017 (pour Arles, suivi par centrifugeuse fixe).	37
Tableau 10 : Seuils de crue pour les différentes stations de l'OSR (Q2 : fréquence de retour biannuelle)	42
Tableau 11 : Statistiques descriptives des débits moyens horaires (en m^3/s) mesurés sur les stations de l'OSR du Haut-Rhône entre janvier 2011 et décembre 2016	50
Tableau 12 : Statistiques descriptives des débits moyens horaires (en m^3/s) mesurés sur les stations de l'OSR du bassin du Rhône entre janvier 2011 et décembre 2016	52
Tableau 13 : Flux d'eau annuels moyens et débits spécifiques moyens sur le Rhône et ses principaux affluents pour la période 2011-2016.	55
Tableau 14 : Statistiques descriptives des concentrations en matières en suspension (moyennes horaires en mg/L) sur le Haut-Rhône et ses affluents entre janvier 2011 et décembre 2016.	55
Tableau 15 : Statistiques descriptives des concentrations en matières en suspension (moyennes horaires, en mg/L) sur le Rhône et ses affluents entre janvier 2011 et décembre 2016.	57
Tableau 16 : Flux de MES moyen interannuel et flux spécifiques moyens de MES sur le Rhône et ses affluents pour la période 2011-2016.	65
Tableau 17 : Moyennes pondérées calculées pour équilibrer les bilans de flux en ETM à partir du flux manquant en MES. Les affluents pouvant présenter ces concentrations sont indiqués.	76

Liste des figures

Figure 1 : Stations de suivi des concentrations en MES et en contaminants particulaires de l'OSR au 11/09/2017	13
Figure 2 : Page d'accueil de BDOH/Flux OSR.....	14
Figure 3 : Exemple de courbe de calibration du turbidimètre pour la station du Rhône à Jons pour la période de juin 2011 à juin 2016.	16
Figure 4 : Exemple de transformation d'une chronique continue de turbidité en NTU (en haut) en chronique de concentration en MES en mg/L (en bas) par l'application d'un barème de conversion pour la station du Rhône à Jons en 2015	16
Figure 5 : Exemple de chroniques discontinues de mercure particulaire (en mg/kg) à Jons sur des MES prélevées par centrifugation (en haut) et par piège à particules (en bas) entre 2011 et 2014	18
Figure 6 : Méthode de calcul des flux de MES et de contaminants particulaires dans BDOH	20
Figure 7 : Transformation d'une chronique intégrative (PAP) de concentration en mercure discontinue (en haut) en chronique continue (en bas).....	21
Figure 8 : Transformation d'une chronique ponctuelle (centrifugation) discontinue de concentrations en contaminant particulaire en chronique continue par une méthode par paliers centrés sur chaque point de prélèvement.....	22
Figure 9 : Exemple d'une chronique de concentrations en MES (en mg/L) contenant des lacunes et camemberts des taux de remplissage mensuels des données pour la station de Jons en 2013	23
Figure 10 : Exemple de méthodes de reconstitution des lacunes dans les chroniques de concentrations en MES (en mg/L) pour la station de Jons.....	24
Figure 11 : Méthodes de reconstitution des lacunes dans les chroniques de concentrations en mercure particulaire	25
Figure 12 : Croisement des chroniques mères reconstituées à la station de Jons pour calculer les flux de mercure particulaire (données 2013).....	26
Figure 13 : Croisement des chroniques mères reconstituées à la station d'Arles pour calculer les flux de mercure particulaire (données 2013).....	27
Figure 14 : Chroniques continues de débit (en bleu foncé), de concentration en MES lacunaire (en vert), de concentration en MES estimée par interpolation linéaire (en bleu clair), et à l'aide de la relation débit/MES (en orange) à Jons en juin 2013	30
Figure 15 : Résultats des cumuls annuels de mercure particulaire à Jons en 2013 pour les 12 méthodes de reconstitution des lacunes testées.....	31
Figure 16 : Chroniques continues lacunaires des concentrations en mercure particulaire (en µg/g) à partir de centrifugations (en bleu) et de pièges à particules (en vert) à Jons pour l'année 2013	32
Figure 17 : Résultats des cumuls annuels de mercure particulaire à Arles en 2013 pour les 6 méthodes testées	34
Figure 18 : Comparaison de relations débit-concentrations en MES (relations CsQ) à un ou deux segments sur le Fier.....	38
Figure 19 : Schéma explicatif de la méthode SiRCA mise en œuvre pour l'estimation de relations débit-concentration en matières en suspension (relations CsQ) pour le Rhône et ses affluents.	39
Figure 20 : Relations entre le débit moyen horaire (Q en $m^3 s^{-1}$) et la concentration moyenne horaire en MES (C_s en mg/L).....	40
Figure 21 : Relations CsQ obtenues à la station de Beaucaire pour les données de l'OSR (en noir) et après ajout de données issues d'études antérieures (en rouge).....	41

Figure 22 : Influence du régime hydrologique sur la concentration en PCB 180 particulaire (en haut) et la somme des PCB _i (en bas).	44
Figure 23 : Influence du régime hydrologique sur la concentration en mercure (Hg) particulaire	45
Figure 24 : Influence du régime hydrologique sur la concentration en zinc particulaire (en mg/kg).....	46
Figure 25 : Influence des conditions hydrologiques sur l'activité du césium-137 à Arles et Jons	47
Figure 26 : Schéma récapitulatif de la méthodologie mise en œuvre pour le comblement des lacunes et le calcul des flux de matières en suspension et de contaminants associés sur le Rhône et ses principaux affluents.	48
Figure 27 : Débits moyens journaliers mesurés sur le Haut-Rhône et ses affluents entre janvier 2011 et décembre 2016.....	51
Figure 28 : Débits moyens journaliers mesurés sur le Rhône à Jons et Arles et ses principaux affluents entre janvier 2011 et décembre 2016.....	53
Figure 29 : Bilan de flux d'eau annuels sur le bassin du Rhône entre 2011 et 2016 (A) ; et contribution des principaux affluents (B).	54
Figure 30 : Débits et concentrations en MES (moyennes journalières) sur le Haut-Rhône à Jons et ses principaux affluents entre janvier 2011 et décembre 2016.....	56
Figure 31 : Débits et concentrations en MES (moyennes journalières) sur le Rhône à Jons et Arles et ses principaux affluents entre janvier 2011 et décembre 2016.....	58
Figure 32 : Flux mensuels et annuels de MES sur le Haut-Rhône et ses affluents entre 2011 et 2016. Les lacunes ont été reconstituées... ..	60
Figure 33 : Flux mensuels et annuels de MES sur le Rhône et ses affluents entre 2011 et 2016. Les lacunes ont été reconstituées.. ..	62
Figure 34 : Bilan de flux de MES annuels et moyen interannuel sur la bassin du Haut-Rhône entre janvier 2011 et décembre 2016 (A) ; et contribution des principaux affluents (B).	63
Figure 35 : Bilan de flux de MES annuels et moyen interannuel sur le bassin du Rhône entre janvier 2011 et décembre 2016 (A) ; et contribution des principaux affluents (B).. ..	64
Figure 36 : Variabilité spatiale des concentrations en PCB indicateurs sur le bassin du Rhône.	67
Figure 37 : Variabilité spatiale des concentrations en mercure sur le bassin du Rhône entre 2011 et 2016. Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre d'échantillons analysés.....	68
Figure 38 : Variabilité spatiale des concentrations en éléments trace métalliques (ETM en mg/kg) sur le bassin du Rhône entre 2011 et 2016.. ..	71
Figure 39 : Variabilité spatiale des concentrations Césium-137 sur le bassin du Rhône.. ..	72
Figure 40 : Bilans de flux annuels de \sum PCB _i particulaires sur le bassin du Rhône entre 2014 et 2016 ; et contribution des principaux affluents.	73
Figure 41 : Bilans de flux annuels de mercure (Hg) particulaire sur le bassin du Rhône entre 2014 et 2016 ; et contribution des principaux affluents.	74
Figure 42 : Bilans des flux annuels des ETM particulaires sur le bassin du Rhône entre 2014 et 2016 et contribution des principaux affluents.	76
Figure 43 : Bilan des flux de Césium-137 à Jons et Arles en fonction des régimes hydrologiques.....	77

Liste des abréviations

BDOH	Base de données des Observatoires en Hydrologie
C137	Césium 137
CMES	Concentration des matières en suspension
ETM	Élément trace métallique
FMES	Flux de matières en suspension
FQ	Fréquence de quantification
CV	Coefficient de variation
Hg	Mercure
LD	Limite de détection
LQ	Limite de quantification
MES	Matières en suspension
NTU	Unité de turbidité néphélogométrique
OSR	Observatoire des Sédiments du Rhône
PAP	Piège à particules
PCBi	Polychlorobiphényle indicateur
Q	Débit
Q1	Premier quartile
Q2	Valeur du débit à fréquence de retour biennale
Q3	Troisième quartile
Relation CsQ	Relation entre le débit et la concentration en matières en suspension
SORA	Station d'Observation du Rhône en Arles

Introduction générale

L'axe III de l'Observatoire des Sédiments du Rhône, programme 2015-2017 (OSR 4) a pour objet l'étude des flux de matières en suspension (MES) et de contaminants associés, dans le Rhône, du lac Léman à la mer Méditerranée. L'action III.3 vise en particulier à améliorer la connaissance des apports en MES et en contaminants particuliers des affluents, en régime de base et en crue, et à évaluer leur contribution au flux total du Rhône. Pour cela, les données acquises à l'issue des programmes précédents de l'OSR ont été complétées, notamment par des mesures de concentrations en contaminants effectuées de 2014 à 2016, et l'ensemble de ces données ont été réinterprétées. Ainsi, plusieurs familles de micropolluants ont fait l'objet d'analyses chimiques régulières dans les MES du réseau de suivi de l'OSR depuis 2011 : les polychlorobiphényles indicateurs (PCBi), le mercure, les éléments trace métalliques (ETM) et les radionucléides. Il s'agit des contaminants « historiques » de l'OSR. L'ensemble des données de débit, concentrations en MES et micropolluants sont disponibles dans la base de données en ligne BDOH, qui permet la consultation et le calcul automatisé de flux de MES et de contaminants associés à partir des données bancarisées de l'OSR. Cette base a fait l'objet d'améliorations importantes au cours de l'OSR 4 et elle est présentée dans le chapitre 1. Les flux de MES et contaminants particuliers présentés par les partenaires scientifiques de l'OSR seront dorénavant calculés à partir des chroniques bancarisées dans cette base.

Les chroniques bancarisées présentent inévitablement des lacunes temporelles qui doivent être comblées afin de calculer des flux annuels et réaliser des bilans à l'échelle du bassin versant. Grâce aux nouvelles données acquises au cours de ce cycle de l'OSR, une méthodologie spécifique a été développée à la fois pour les chroniques de concentration en MES et les chroniques de contaminants particuliers. Les flux de MES (chapitre 3) et de contaminants particuliers (chapitre 4) présentés dans ce rapport ont ainsi pu être réactualisés, et sont interprétés en termes de bilans, afin d'identifier les principaux affluents contributeurs.

Chapitre 1. Description du réseau de mesure, des données et de BDOH

Chloé Le Bescond, Fabien Thollet, Gaëlle Poulhier, Marina Coquery, Jérôme Le Coz

1 Objectifs

Ce chapitre a pour objet la description détaillée de La Base de Données des Observatoires en Hydrologie (BDOH), développée par Irstea (Branger *et al.*, 2014) et utilisée pour gérer, bancariser et mettre à disposition les données acquises au sein de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR). Le réseau de mesure de l'OSR est brièvement décrit afin de localiser les stations de suivi et de présenter les données disponibles. Les méthodes de traitement des données permettant d'établir des chroniques continues de débit, de concentrations en MES et en contaminants particulaires, ainsi que de calculer des flux sont également présentées. Enfin, des tests préliminaires ont été réalisés pour étudier l'effet de la reconstitution des lacunes dans BDOH.

2 Présentation du réseau de mesure des flux de l'OSR 4

Sous hypothèse d'homogénéité de la phase porteuse au sein d'une section en travers de cours d'eau, le flux cumulé sur une période donnée d'un contaminant particulaire est défini à partir du flux instantané, qui est le produit du débit, de la concentration en MES et de la concentration en contaminant particulaire des MES d'après l'équation suivante :

$$\Phi_i = \int_T Q \cdot CMES \cdot C_i \cdot dt$$

avec :

- Φ_i , le flux cumulé de contaminant particulaire i (en μg sur la période T)
- Q , le débit (en m^3/s)
- $CMES$, la concentration en matières en suspension (en mg/L)
- C_i , la concentration en contaminant i particulaire des MES (en $\mu\text{g}/\text{kg}$)
- T , la période prise en compte pour le calcul du flux.

Dans le programme de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), le suivi de ces 3 paramètres (débit, matières en suspension et concentrations en contaminants) est assuré à travers un réseau de stations pérennes sur le bassin du Rhône et de stations temporaires sur les affluents secondaires (**Figure 1**).

Le réseau de suivi de l'OSR comprend ainsi 10 stations, dont :

- Deux stations principales situées sur le Rhône : Jons au nord, Arles (SORA) au sud ;
- Cinq stations secondaires permanentes sur des affluents principaux du Rhône : Arve, Saône, Gier, Isère, Durance ;

- Trois stations secondaires temporaires sur quelques affluents mineurs à l'amont et à l'aval de Lyon : Fier, Bourbre, Ardèche.

Un suivi de quelques mois a également été réalisé sur l'Ain et le Guiers en 2012 (stations temporaires), mais la durée de suivi, trop courte, ne permet pas d'interpréter ces données dans ce rapport. Le suivi de l'Ardèche a démarré très récemment (en 2016) et nécessite des données complémentaires avant de pouvoir calculer des flux. Pour plus d'informations sur le réseau de suivi de l'OSR, le lecteur est invité à consulter les livrables de l'action III.1. de l'OSR 4 (Le Bescond *et al.*, 2016, 2017). Une carte permettant de localiser les sites est présentée en **Figure 1**.

Les données brutes de débit, de concentration en MES et de concentration en contaminants associés aux MES (ou contaminants particulaires) issues du réseau d'observation sont bancarisées dans la Base de Données des Observatoires en Hydrologie (BDOH). Elles constituent les chroniques mères utilisées dans le calcul de flux instantanés et cumulés de MES et de contaminants particulaires.

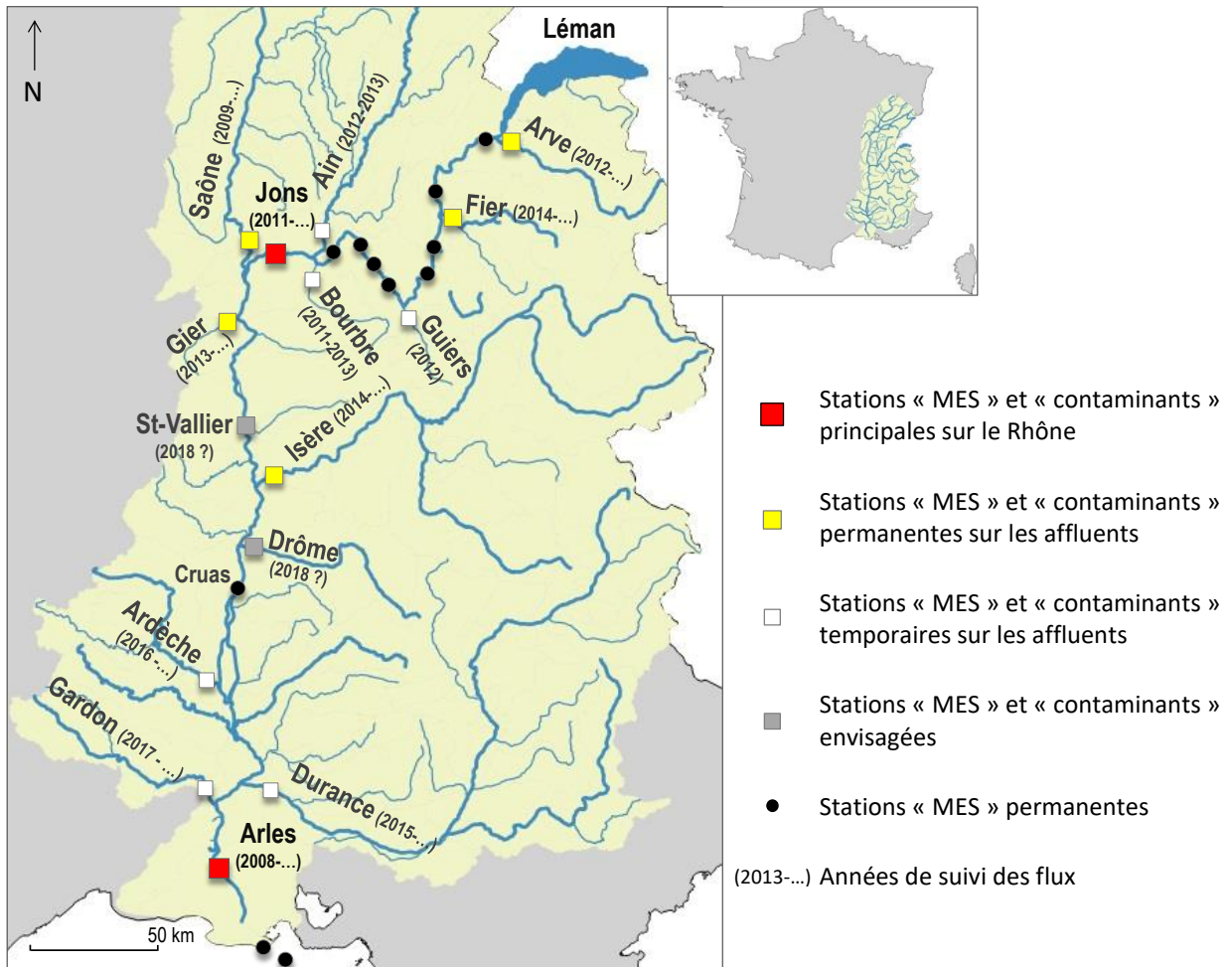


Figure 1 : Stations de suivi des concentrations en MES et en contaminants particulaires de l'OSR au 11/09/2017.

3 Présentation de l'outil BDOH

La Base de Données des Observatoires en Hydrologie (BDOH) a été développée par Irstea pour gérer, bancariser et mettre à disposition des données hydrologiques et biogéochimiques issues des observatoires de long terme (Branger *et al.*, 2014).

Les données issues du réseau d'observation des flux particulaires et de contaminants associés collectées/obtenues dans le cadre du programme de l'OSR sont stockées dans la base de données BDOH (cf. **Figure 2**) et accessibles sur une page spécifique à l'adresse suivante :

<https://bdoh.irstea.fr/OBSERVATOIRE-DES-SEDIMENTS-DU-RHONE/> (DOI : 10.17180/OBS.OSR).

Observatoire des Sédiments du Rhône | Consultation des données | Contact | Français

Se connecter | Créer un compte | Observatoires

« Observatoire des Sédiments du Rhône » Bienvenue | Présentation | Partenaires | Conditions d'utilisation

L'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR) a été créé en 2009 à la suite de questions qui ont émergé dans le cadre du plan Rhône. Sur le Rhône, du Léman à la Méditerranée, soit un linéaire de plus de 500 km, cet observatoire a pour mission de produire, rassembler et gérer des données visant à caractériser les stocks et les flux sédimentaires, ainsi que les pollutions associées à ces sédiments.

L'OSR est un programme de recherche financé au titre du Plan Rhône et bénéficie du soutien du Fond Européen pour le Développement Régional. L'OSR est un programme de recherche regroupant scientifiques (CNRS, Irstea, ENTPE, IRSN, Ifremer) et les principaux gestionnaires du fleuve (DREAL, Agence de l'Eau, la CNR, les régions Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Languedoc-Roussillon, et EDF). Il constitue l'un des observatoires de la Zone Atelier du Bassin du Rhône (ZABR).

Pour citer ces données: Thollet, F.; Le Bescond, C.; Le Coz, J.; Coquery, M.; Panay, J.; Lagouy, M.; Dramais, G.; (2015): Observatoire des Sédiments du Rhône; Irstea. <http://dx.doi.org/10.17180/OBS.OSR>

Pour en savoir plus : <http://www.graie.org/osr/>

Sites expérimentaux

- **Flux OSR**
Ce site expérimental regroupe les suivis par les différents partenaires de l'OSR des débits, des concentrations en sédiments en suspension et des taux de micropolluants sur le Rhône et ses affluents.

Paramètres étudiés

- Co. en MES
- Co. en mercure
- Débit
- Flux de matières en suspension
- Flux de mercure particulaire
- Turbidité

Recherche avancée

Figure 2 : Page d'accueil de BDOH/Flux OSR.

Les calculs de flux instantanés et de cumuls de MES et de contaminants particulaires (mercure, métaux, PCB et radionucléides) sur une période donnée sont réalisés directement à travers l'interface Web de BDOH. Les chroniques produites sont consultables en ligne par tous les utilisateurs inscrits sur BDOH (le formulaire de demande de création de compte est accessible en ligne). Elles sont visualisables

graphiquement directement sur l'interface en ligne de BDOH et téléchargeables (données validées et données calculées telles que des moyennes ou des cumuls) sur une période choisie.

BDOH offre ainsi la possibilité d'actualiser les bilans de flux de MES et de contaminants sur le Rhône et ses principaux affluents de manière simple et homogène pour toutes les stations de suivi de l'OSR.

Un glossaire des termes de BDOH utilisés dans la suite de ce document est disponible en **Annexe 1**.

3.1 Les données brutes bancarisées

3.1.1 Le débit

Les débits sont mesurés aux différentes stations du réseau par les partenaires de l'OSR : OFEV, CNR et DREAL. Pour ce paramètre, les données bancarisées dans BDOH correspondent à des moyennes horaires exprimées en m³/s. Les débits mesurés par la CNR sont fournis avec une incertitude de $\pm 10\%$.

Les débits du Rhône à Jons sont calculés à l'aide du modèle hydraulique Rhône1D, développé par Irstea dans le cadre de l'OSR (Dugué *et al.*, 2015), à partir des hydrogrammes du Rhône à Lagnieu (données CNR), de l'Ain à Port-Galland (données CNR non bancarisées dans BDOH) et de la Bourbre à Tignieu-Jamezieu (données DREAL Rhône-Alpes). Les débits issus de cette simulation sont bancarisés dans BDOH au pas de temps moyen horaire.

3.1.2 La concentration en MES

Au niveau de la station SORA d'Arles, les concentrations en MES sont mesurées par plusieurs partenaires (MIO/IRSN/Cerege) sur des prélèvements d'eau composites réalisés quotidiennement.

Sur toutes les autres stations du réseau d'observation de l'OSR, le suivi des concentrations en MES s'effectue à travers l'acquisition en continu de la turbidité à un pas de temps de 10 minutes (données EDF ou Irstea selon les stations).

Les données enregistrées par Irstea sont compressées afin de limiter la taille des données stockées et de faciliter leur exploitation sans perte d'information. Cette opération, réalisée à l'aide d'un utilitaire développé en Fortran par Irstea, consiste à supprimer des données redondantes (plusieurs valeurs successives identiques), à une tolérance près (± 2 NTU par exemple). Les données compressées sont ensuite validées manuellement (suppression des valeurs aberrantes, croisement des données avec d'autres chroniques pour vérifier la cohérence, recalage des valeurs en cas de dérive du capteur, identification des périodes de lacune,...), avant d'être importées dans BDOH en tant que chronique continue. De plus, en dehors de BDOH, une relation entre la turbidité et la concentration en MES est construite pour chaque capteur turbidimétrique. Des analyses de MES sont réalisées par filtration et pesée selon la norme NF EN 872 de juin 2005 (AFNOR, 2005) sur des échantillons horodatés prélevés manuellement ou à l'aide d'un échantillonneur automatique (Thollet, 2012). Lorsque la courbe de calibration turbidité/MES est documentée avec un nombre de points suffisant sur une gamme de turbidité étendue, une droite de régression linéaire forcée par 0 est tracée, son équation correspond au facteur de conversion turbidité/MES de chaque station (cf. **Figure 3**).

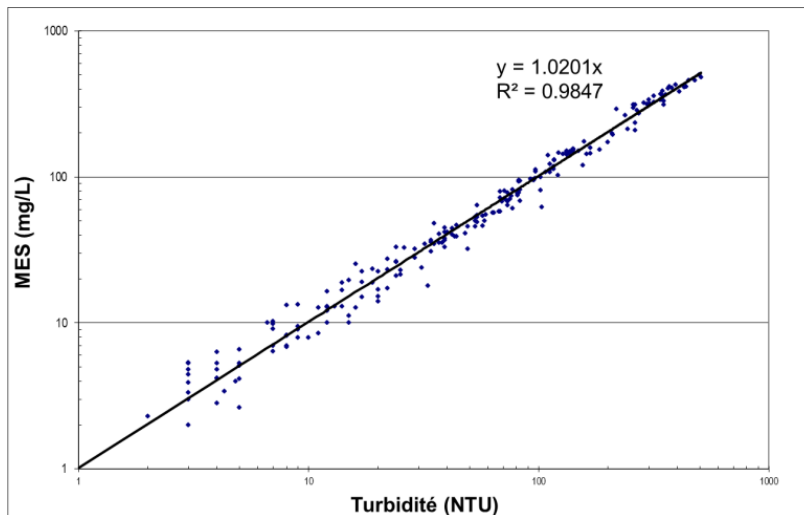


Figure 3 : Exemple de courbe de calibration du turbidimètre pour la station du Rhône à Jons pour la période de juin 2011 à juin 2016.

Ces facteurs de conversion sont stockés dans BDOH par périodes de validité et permettent de transformer les chroniques de turbidité (bancaarisées en NTU ou unité constructeur selon les stations) en chroniques de concentration en MES (calculées en mg/L) directement dans BDOH (cf. **Figure 4**).

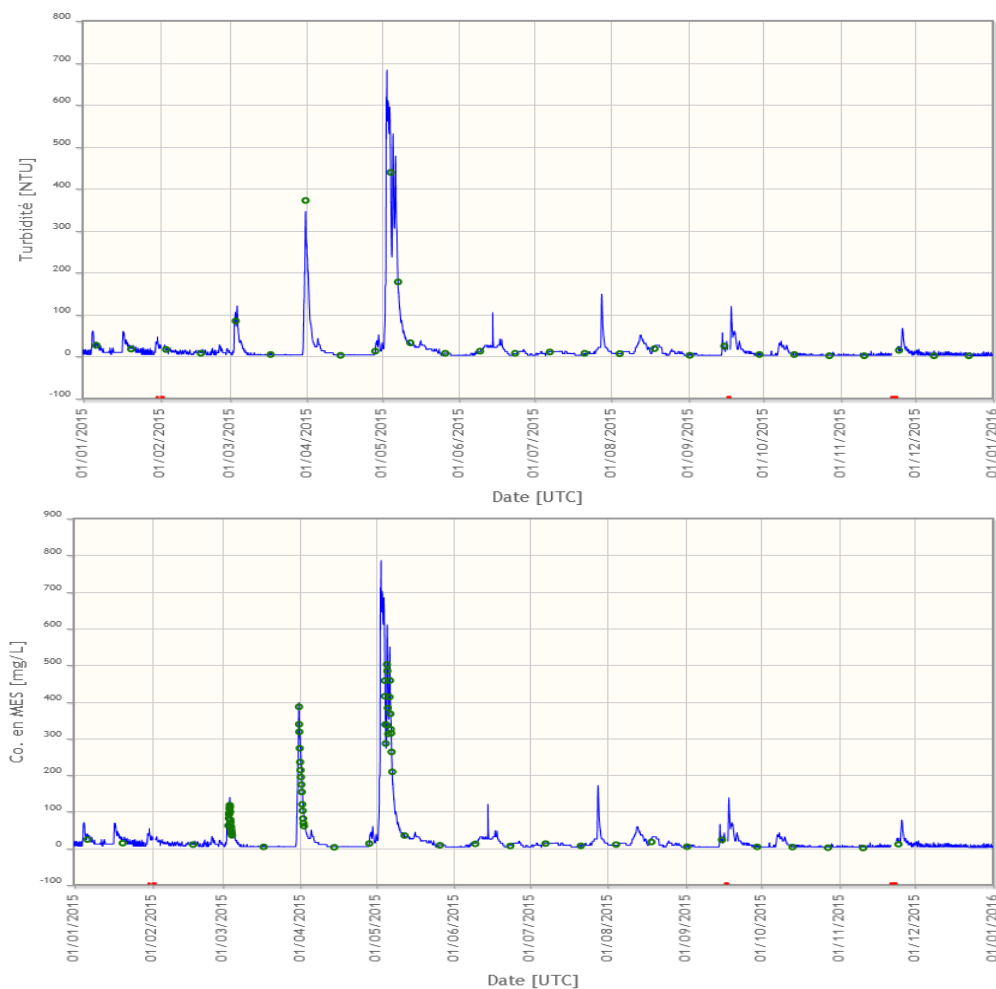


Figure 4 : Exemple de transformation d'une chronique continue de turbidité en NTU (en haut) en chronique de concentration en MES en mg/L (en bas) par l'application d'un barème de conversion pour la station du Rhône à Jons e 2015 (en bleu les données, en rouge les lacunes, en vert les points de contrôle manuels).

Les données enregistrées par EDF sont fournies directement en concentration en MES ; la turbidité et le facteur de conversion turbidité/MES ne sont pas bancarisés dans BDOH.

Les incertitudes sur la détermination des concentrations en MES par des mesures de turbidité en continu varient selon les affluents et leurs niveaux de concentration en MES. L'estimation de ces incertitudes est prévue dans la suite du programme de l'OSR.

3.1.3 Les concentrations en contaminants particuliers

Actuellement, les 7 PCB indicateurs (PCBi), le mercure, les éléments traces métalliques et les radionucléides sont analysés sur des échantillons de MES prélevés par centrifugation continue et à l'aide de pièges à particules (PAP) (cf. description détaillée des méthodes de prélèvement et d'analyse dans les rapports de l'OSR sur le fonctionnement du réseau d'observation des flux : Le Bescond *et al.*, 2016, 2017).

Les stations principales du Rhône à Jons et à Arles sont équipées d'une centrifugeuse fixe qui permet de réaliser des prélèvements ponctuels de MES à un pas de temps fin. Les prélèvements, d'une durée de 4 heures en moyenne, sont réalisés toutes les 2 semaines en régime de base et plus fréquemment en cas de crue.

Sur la station de Jons, les centrifugations sont doublées par des prélèvements de MES réalisés à l'aide d'un piège à particules intégratif. La collecte des échantillons est effectuée toutes les 2 semaines en régime de base et plus fréquemment en cas de crue. Les stations de suivi des affluents sont également équipées de pièges à particules pour la collecte de MES, qui sont relevés tous les mois en régime de base et plus fréquemment en cas de crue.

Les concentrations en contaminants particuliers analysés sur des MES issues de centrifugation ou de pièges à particules sont bancarisées dans BDOH sous forme de chroniques discontinues exprimées en mg/kg (ou µg/g) pour le mercure et les métaux, en µg/kg pour les PCBi et en Bq/kg pour les radionucléides (cf. **Figure 5**). Quelle que soit la technique de prélèvement utilisée, les dates et heures de début et de fin de prélèvement sont bancarisées.

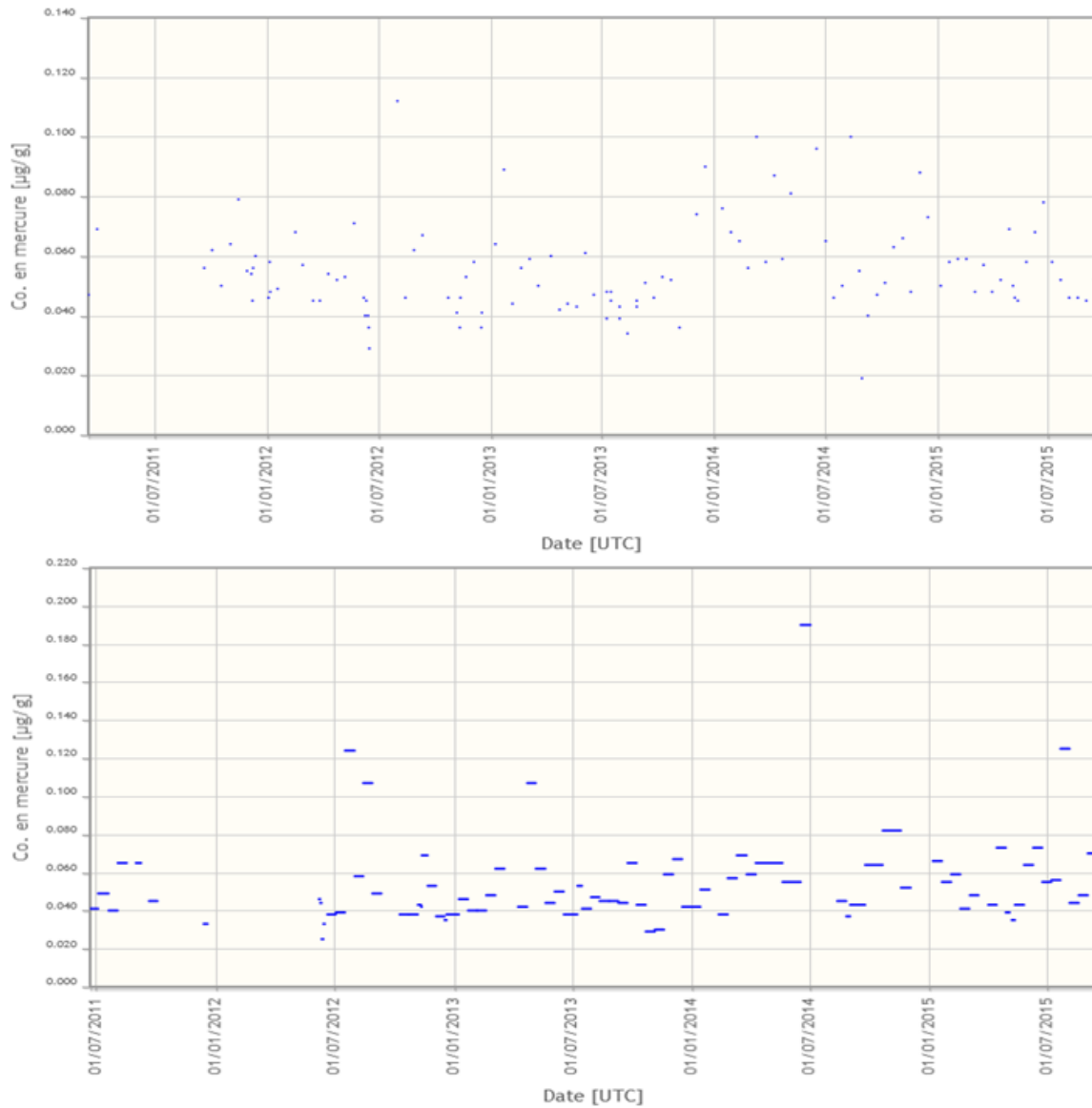


Figure 5 : Exemple de chroniques discontinues de mercure particulaire (en mg/kg) à Jons sur des MES prélevées par centrifugation (en haut) et par piège à particules (en bas) entre 2011 et 2014.

Les concentrations des 7 PCB indicateurs sont communément exprimées en somme des 7 congénères. Or, Sabot (2013) a montré que le choix de la valeur de la concentration attribuée aux congénères non quantifiés, ou ceux dont la fréquence de quantification est inférieure à 50%, influence considérablement le calcul de la somme des PCB_i et la répartition des congénères dans cette somme. Il est en effet possible de donner différentes valeurs aux concentrations inférieures à la limite de quantification (LQ, LQ/2, 0 ou une valeur calculée à l'aide d'un modèle mathématique). Dans BDOH, les PCB_i sont donc bancarisés individuellement. La somme des 7 composés Σ PCB_i peut être calculée en dehors de BDOH par les utilisateurs qui le souhaitent à partir des 7 chroniques indépendantes de PCB_i (concentrations ou flux instantanés). Dans ce rapport, pour le calcul de la Σ PCB_i, les concentrations inférieures à la limite de quantification (LQ) ont été remplacées par la valeur de la LQ.

3.2 La qualité des données

Les données bancarisées dans BDOH sont nécessairement accompagnées d'un indice de qualité, attribué par chaque producteur de données d'après le jeu de codes qualité suivant :

- V pour Valide, la donnée est jugée correcte car elle est cohérente avec les valeurs habituelles, avec les valeurs mesurées en amont ou en aval de la station, ou avec les valeurs d'autres chroniques de la même station ;
- A pour Absent, l'information sur la qualité de la donnée est manquante ;
- L pour Lacune, la donnée est manquante suite à une panne de capteur par exemple ;
- I pour Invalide, la donnée est supprimée car jugée aberrante lors de la validation ;
- D pour Douteux, la donnée est suspecte. Sa valeur est correcte mais ne coïncide pas avec d'autres paramètres par exemple ;
- E pour Estimé, la donnée manquante (lacunaire ou invalidée) a été reconstituée à l'aide d'une équation mathématique qui relie le paramètre manquant à un autre paramètre (relation entre le débit et la concentration en MES par exemple) ou d'un modèle numérique (modèle hydraulique Rhône 1D par exemple) ;
- LQ pour limite de quantification, la valeur est inférieure à la limite de quantification de la méthode d'analyse utilisée ;
- LD pour limite de détection, la valeur est inférieure à la limite de détection de la méthode d'analyse utilisée.

Dans le visualisateur graphique de BDOH, les données associées aux codes qualité V, A, D, E, LQ et LD sont affichées en bleu ; les données lacunaires et invalidées sont représentées en rouge par un trait continu sur l'axe des abscisses. Un affichage différent pour les données estimées, non quantifiées et non détectées est à l'étude.

3.3 Méthode de calcul des flux dans BDOH

3.3.1 Principe général

Les chroniques continues de débit, de concentration en MES et de concentration en contaminants particuliers bancarisées dans BDOH sont appelées chroniques mères. Elles interviennent dans les calculs de chroniques de flux instantané de MES et de contaminants particuliers, appelées chroniques filles. Chaque chronique fille est issue de la multiplication de deux chroniques mères entre elles.

De cette manière, pour une station donnée, la chronique de flux de MES est obtenue en multipliant la chronique continue de concentration de MES par la chronique continue de débit correspondante. La chronique fille ainsi calculée est ensuite multipliée par la chronique correspondante de concentration en contaminant pour obtenir la chronique de flux du contaminant particulier considéré (cf. **Figure 6**).

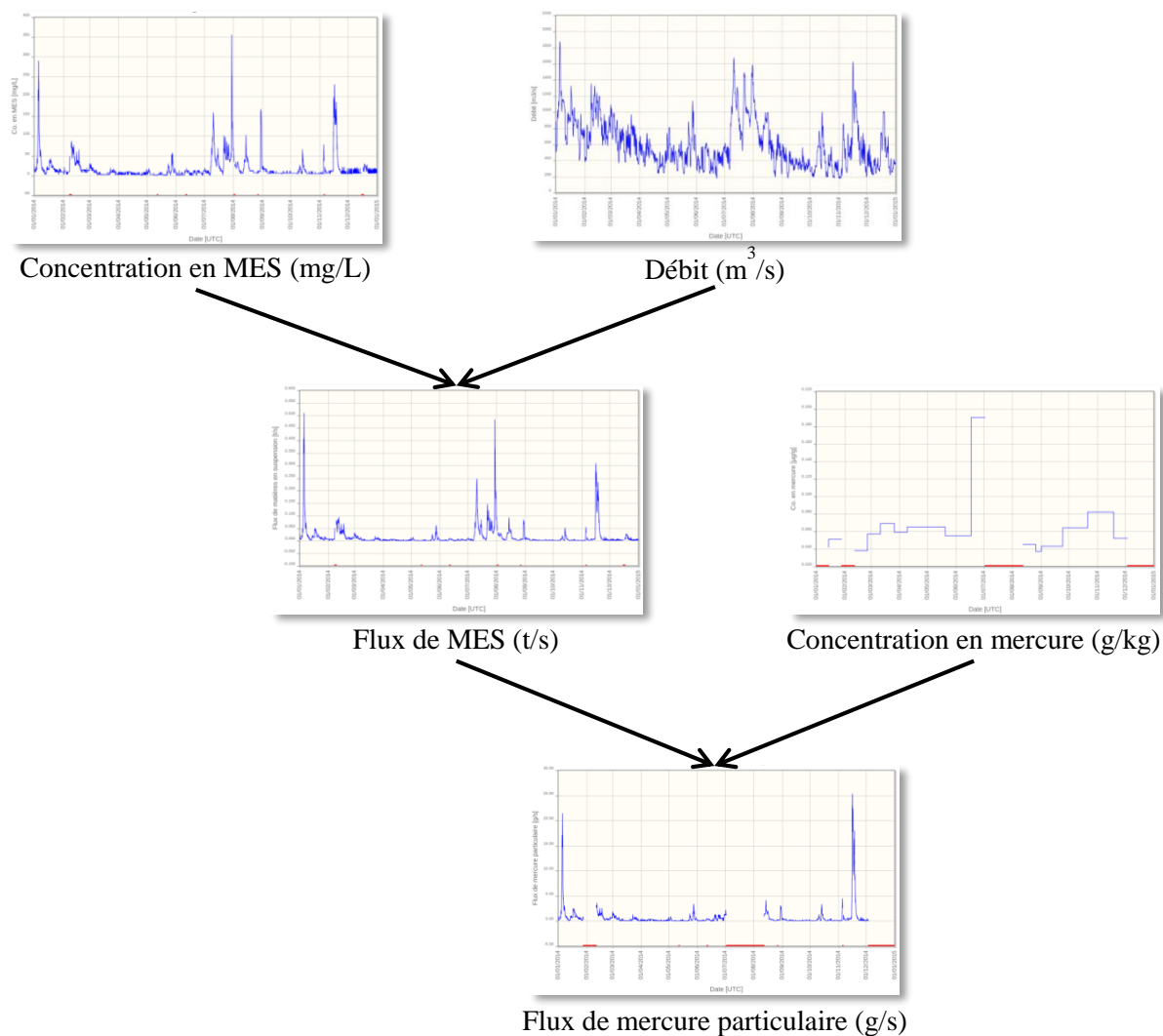


Figure 6 : Méthode de calcul des flux de MES et de contaminants particulaires dans BDOH (en bleu les données, en rouge les lacunes).

Les multiplications de chroniques continues sont effectuées automatiquement dans BDOH, les deux chroniques mères sont mises au même pas de temps par interpolation linéaire à la seconde près entre deux points pour ne pas perdre d'information. L'indice de qualité affecté à chaque donnée d'une chronique fille correspond au plus défavorable de ceux des deux données mères multipliées (Tableau 1).

Tableau 1 : Croisement des indices de qualité des chroniques mères dans le cas d'un calcul de chronique fille.

	V	A	L	I	D	E	LQ	LD
V	V	A	L	I	D	E	E	E
A	A	A	L	I	A	A	A	A
L	L	L	L	L	L	L	L	L
I	I	I	L	I	I	I	I	I
D	D	A	L	I	D	D	D	D
E	E	A	L	I	D	E	E	E
LQ	E	A	L	I	D	E	LQ	LQ
LD	E	A	L	I	D	E	LQ	LD

Cependant, les calculs de cumulés dans BDOH ne peuvent être exécutés que sur des chroniques mères impérativement continues et sans lacunes. C'est pourquoi il est nécessaire au préalable de transformer les chroniques discontinues de contaminants particuliers en chroniques continues.

3.3.2 Transformation d'une chronique discontinue en chronique continue

La méthode de transformation d'une chronique discontinue en chronique continue concerne les données de concentration en contaminants particuliers.

Actuellement, les chroniques discontinues de concentration en contaminants issus de pièges à particules sont transformées à l'aide d'un script codé en R en dehors de BDOH. Les chroniques continues dérivées de cette transformation sont bancarisées dans BDOH, de même que les chroniques discontinues initiales (cf. **Figure 7**).

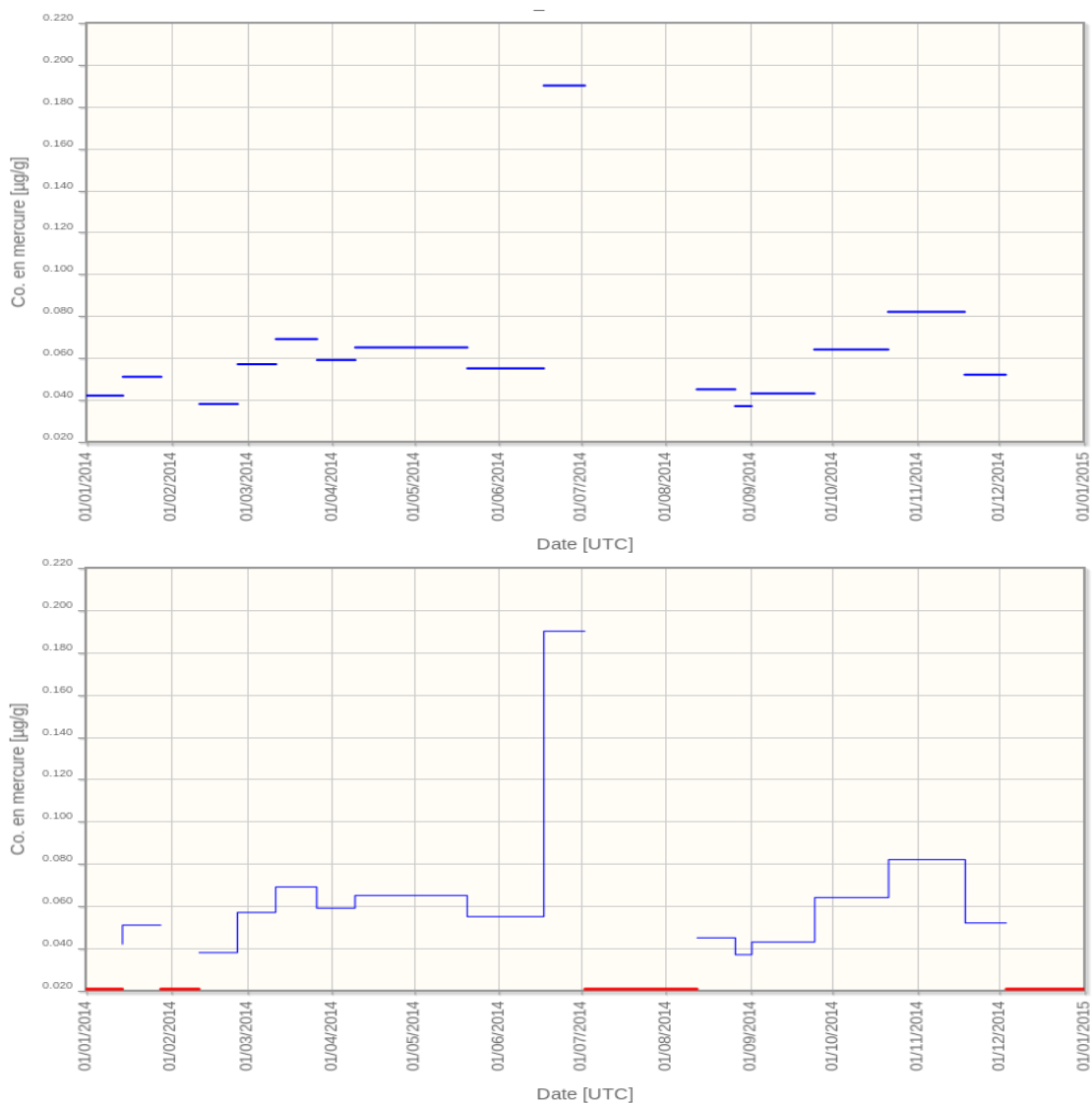


Figure 7 : Transformation d'une chronique intégrative (PAP) de concentration en mercure discontinue (en haut) en chronique continue (en bas) (en bleu les données, en rouge les lacunes).

Les chroniques discontinues de concentration en contaminants particulaires issus de prélèvements ponctuels (centrifugation continue) sont transformées en chroniques par une méthode par paliers centrés sur les valeurs des points de prélèvements (cf. **Figure 8**). Cette étape est réalisée hors de BDOH, puis les chroniques continues dérivées de cette transformation sont bancarisées dans BDOH, de même que les chroniques discontinues initiales.

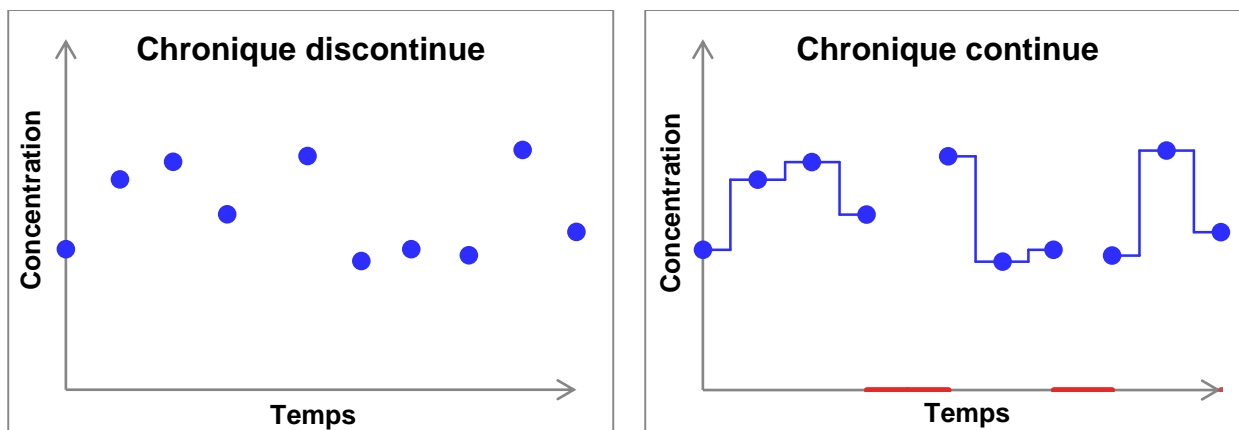


Figure 8 : Transformation d'une chronique ponctuelle (centrifugation) discontinue de concentrations en contaminant particulaire en chronique continue par une méthode par paliers centrés sur chaque point de prélèvement (en bleu les données, en rouge les lacunes).

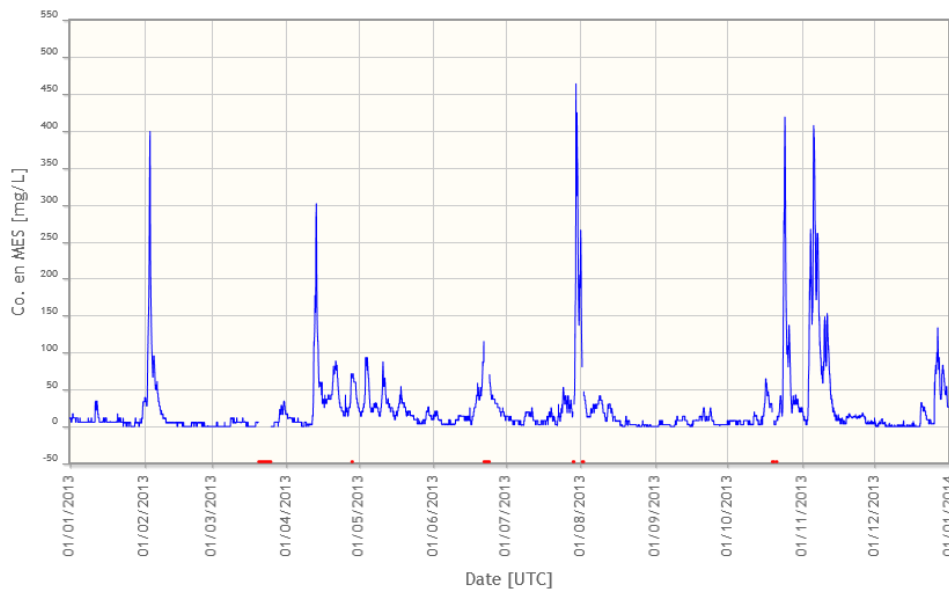
L'automatisation de la transformation d'une chronique discontinue en une chronique continue directement dans BDOH est l'une des améliorations prévues dans le cadre de l'OSR 5.

3.4 Tests préliminaires pour la reconstitution des lacunes dans BDOH : cas du mercure à Arles et Jons

3.4.1 Définition d'une lacune

Les chroniques acquises en continu sur les stations d'observation contiennent inévitablement des lacunes. L'origine de l'absence de données peut être diverse : lacune suite à une panne du capteur de turbidité pour le suivi des concentrations en MES, au renversement d'un piège à particules ou au dysfonctionnement de la centrifugeuse pour les données de contaminants particulaires, donnée invalidée car jugée aberrante lors de la validation, etc.

La durée de temps entre deux valeurs successives à partir de laquelle une chronique est considérée comme lacunaire varie selon le pas de temps d'acquisition et la variabilité temporelle des données. Ainsi, dans une chronique de turbidité, une lacune est avérée lorsque la période d'absence de données dépasse plusieurs heures avec une variation importante entre les valeurs encadrant cette période. Dans une chronique de concentration en contaminant particulaire, une lacune résulte de l'omission d'au moins un prélèvement ou d'une analyse dans la série de données par rapport à la fréquence de prélèvement établie à une station (cf. **Figure 9**).



Année / Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
2013	100%	100%	84%	99%	100%	92%	98%	98%	100%	98%	100%	100%

Figure 9 : Exemple d'une chronique de concentrations en MES (en mg/L) contenant des lacunes (en bleu les données, en rouge les lacunes) et camemberts des taux de remplissage mensuels des données pour la station de Jons en 2013.

Cependant, dès lors qu'une des chroniques mères utilisées pour le calcul de flux comporte une lacune, la chronique fille dérivée contient inévitablement une lacune, interdisant ainsi le calcul de flux particulière instantané ou cumulé sur cette durée. C'est pourquoi il est nécessaire au préalable de reconstituer les périodes de lacunes dans les chroniques mères continues.

Plusieurs méthodes de reconstitution des chroniques ont été testées afin d'évaluer l'influence des différentes options sur le calcul final de flux. Les tests ont été réalisés aux stations principales de Jons et d'Arles pour l'année 2013. Les résultats de flux à différentes échelles temporelles ont ensuite été comparés.

3.4.2 Description des méthodes de reconstitution testées

Différentes stratégies de reconstitution des chroniques continues lacunaires ont été testées en fonction de la chronique mère considérée.

- **Le débit**

Les chroniques brutes de débit contiennent 2 heures de lacune par an, observées lors du passage à l'heure d'hiver. Ces lacunes sont comblées par interpolation linéaire.

- **Les MES**

Les stations de Jons et d'Arles ont des stratégies d'observation des concentrations en MES différentes (cf. § 3.1.2). A Jons, les lacunes dans la chronique de concentrations en MES ont été comblées de deux manières différentes (cf. **Figure 10**) :

- par interpolation linéaire entre les deux valeurs encadrant la lacune ;
- à l'aide de la relation établie entre le débit et la concentration en MES à cette station.

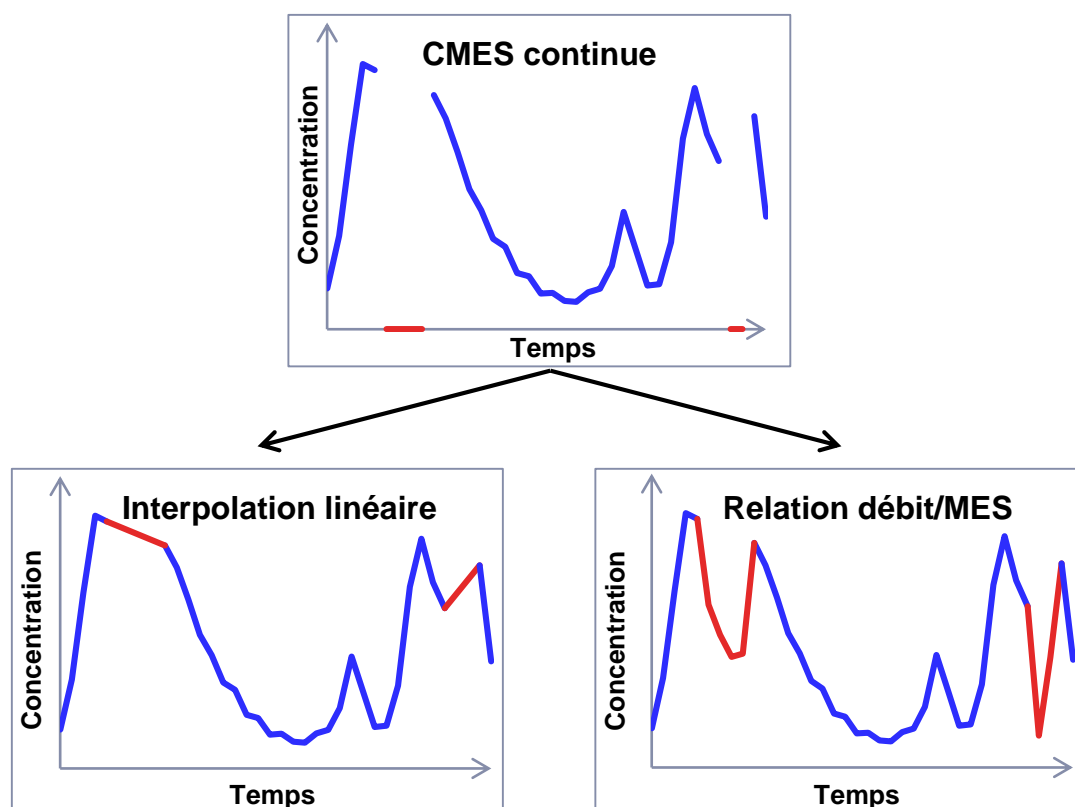


Figure 10 : Exemple de méthodes de reconstitution des lacunes dans les chroniques de concentrations en MES (en mg/L) pour la station de Jons (en bleu les données mesurées, en rouge les données estimées).

A Arles, la chronique continue de concentrations en MES, établie à partir des données de mesure (MIO/IRSN/CEFREM), a été reconstituée en cas de lacune :

- à l'aide de la relation établie entre le débit et la concentration en MES à cette station ;
- avec la relation « $\log \text{MES} = 2,05 \times \log Q - 5,05$ » (Eyrolle *et al.*, 2012) pour les faibles débits, complétée par les résultats de la simulation du modèle Rhône 1D pour les forts débits.

L'intervalle de temps entre deux valeurs successives à partir duquel les données sont considérées comme lacunaires a été adapté en fonction de la variabilité temporelle des concentrations en MES et de la fréquence du suivi à chaque station : 1 heure à Jons et 24 heures à Arles.

• Le mercure

Après transformation des chroniques discontinues en chroniques continues (cf. §3.3.2), les chroniques complètes de concentrations en mercure particulaire ont été reconstituées selon trois méthodes (cf. Figure 11) :

- par interpolation linéaire entre les deux valeurs encadrant la lacune ;
- en dupliquant la valeur précédant la lacune sur toute la durée de la lacune ;
- avec une concentration moyenne en mercure particulaire déterminée par type de régime hydrologique (base, crue ou chasse).

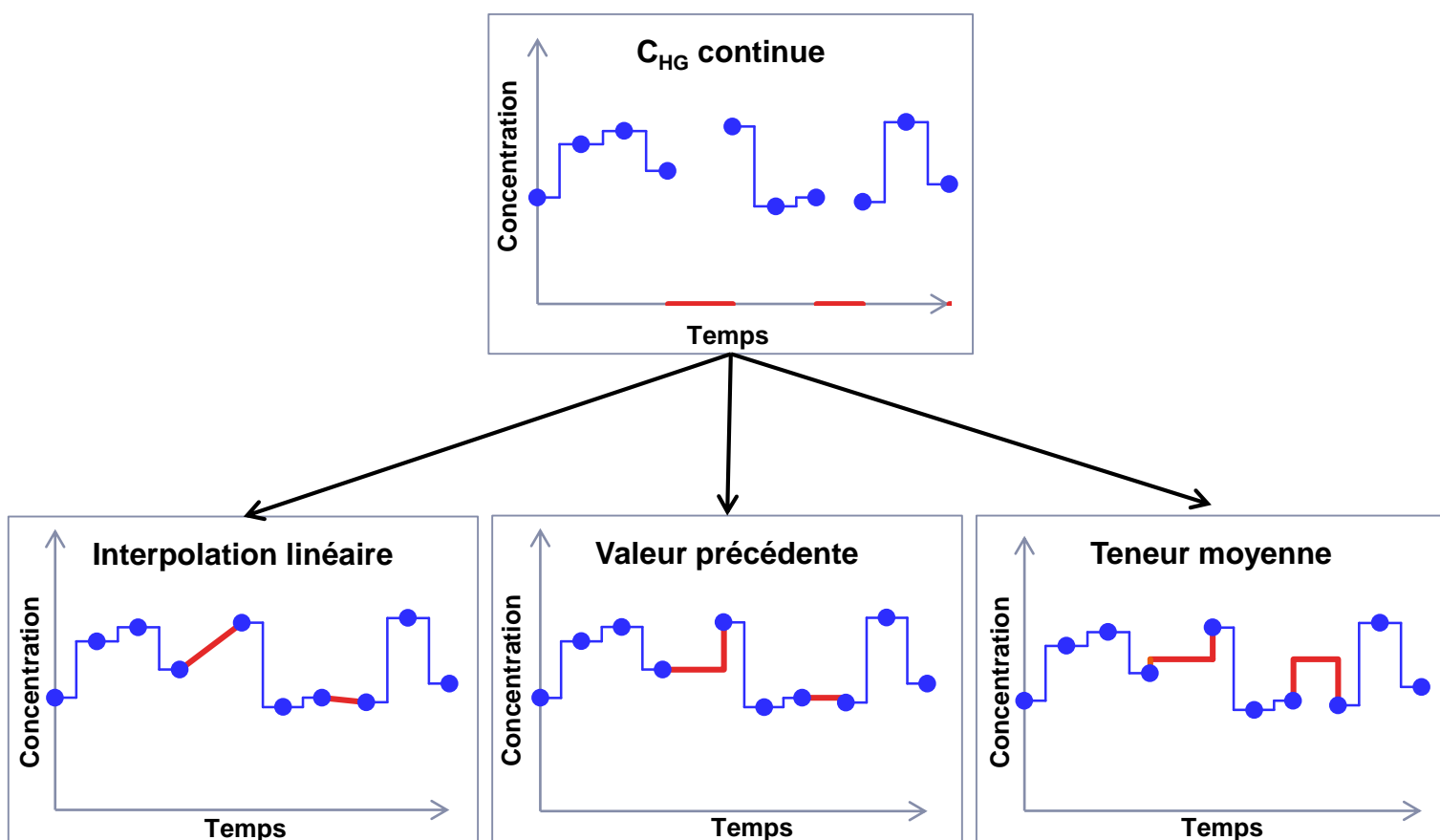


Figure 11 : Méthodes de reconstitution des lacunes dans les chroniques de concentrations en mercure particulaire (en bleu les données mesurées, en rouge les données estimées).

Les concentrations moyennes en mercure particulaire à Jons et à Arles calculées par régime hydrologique sont détaillées dans le **Tableau 2**. Elles ont été calculées à partir des données de l'OSR recueillies sur la période 2011-2015 (**Tableau 9**).

Tableau 2 : Concentrations moyennes en mercure particulaire (en $\mu\text{g/g}$) par régime hydrologique aux stations de Jons et d'Arles, sur la période 2011-2015. Nombre d'échantillons entre parenthèses (l'ensemble des données n'était pas disponible lors de ces tests ; les moyennes calculées sont très proches de celles calculées par la suite ; cf. annexe 3).

		Station de Jons	Station d'Arles
Seuil de crue (en m^3/s)		800	3000
Concentration moyenne en mercure particulaire (en $\mu\text{g/g}$)	Base	0,061 (47)	0,117 (92)
	Crue	0,048 (44)	0,087 (24)
	Chasse (2012)	0,037 (4)	

Sur les deux stations, les tests ont été réalisés sur les résultats de mercure sur des échantillons de MES prélevés par centrifugation. L'intervalle de temps entre deux valeurs successives à partir duquel les données sont considérées comme lacunaires a été fixé à 14 jours, correspondant à la durée entre deux passages sur la station lors du suivi normal en régime de base.

A Jons, les tests ont également été réalisés sur des résultats de mercure sur des échantillons de MES prélevés par piège à particules. La chronique continue est considérée comme lacunaire lorsque la date de remise à l'eau du piège ne correspond pas à la date de prélèvement de l'échantillon précédent.

3.4.3 Calculs de flux à partir des chroniques reconstituées

Les flux annuels de MES et de mercure particulaire ont été calculés à partir des multiples chroniques reconstituées. Toutes les combinaisons possibles par station sont récapitulées ci-après. A noter qu'une seule méthode a été utilisée pour la reconstitution du débit (par interpolation linéaire), il n'intervient donc pas dans les croisements de chroniques détaillés pour les stations de Jons et d'Arles.

- **A Jons**

Au total à Jons, les deux méthodes de reconstitution de la chronique de MES et les trois méthodes de reconstitution des concentrations en mercure conduisent à 12 chroniques de flux de mercure particulaire différentes (cf. **Figure 12**).

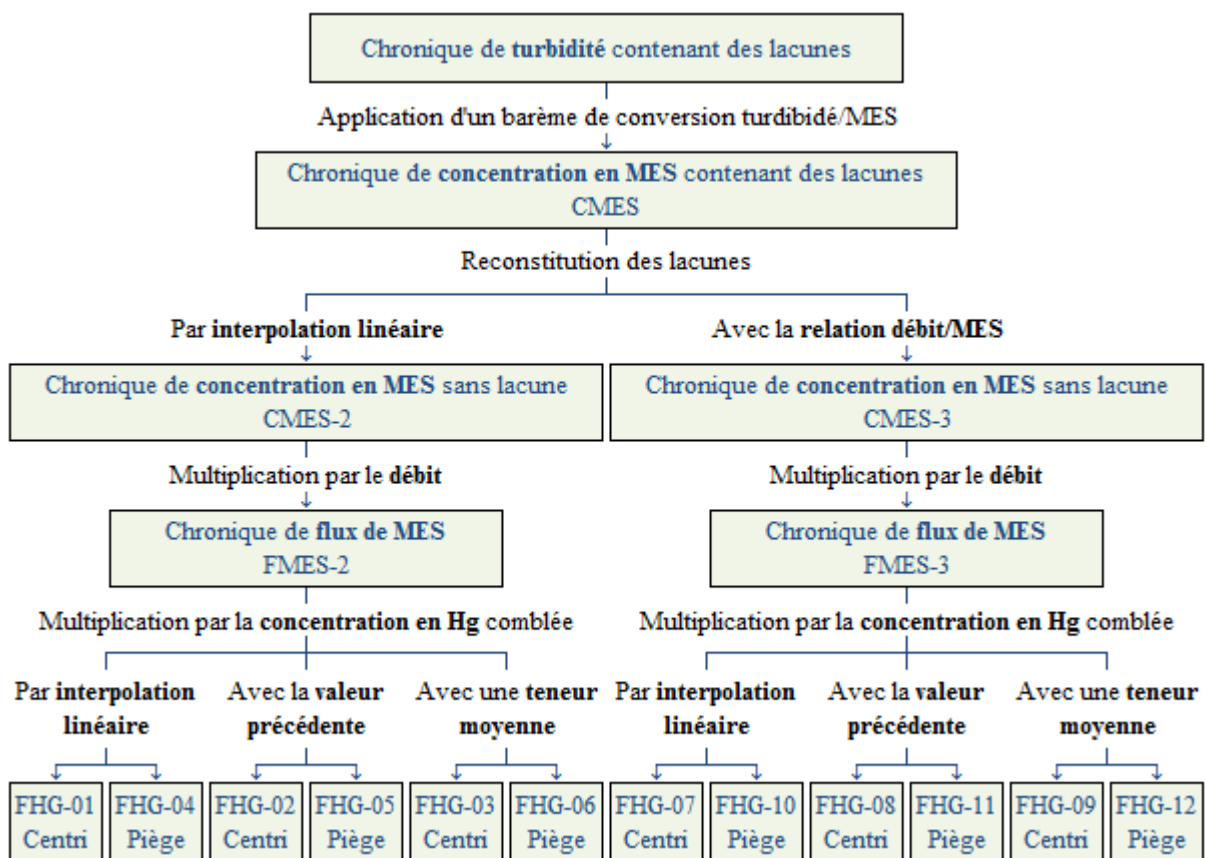


Figure 12 : Croisement des chroniques mères reconstituées à la station de Jons pour calculer les flux de mercure particulaire (données 2013).

- A Arles

A Arles, deux méthodes de reconstitution de la chronique de MES et trois méthodes de reconstitution des concentrations en mercure ont été utilisées pour calculer six chroniques différentes de flux de mercure particulaire (cf. **Figure 13**).

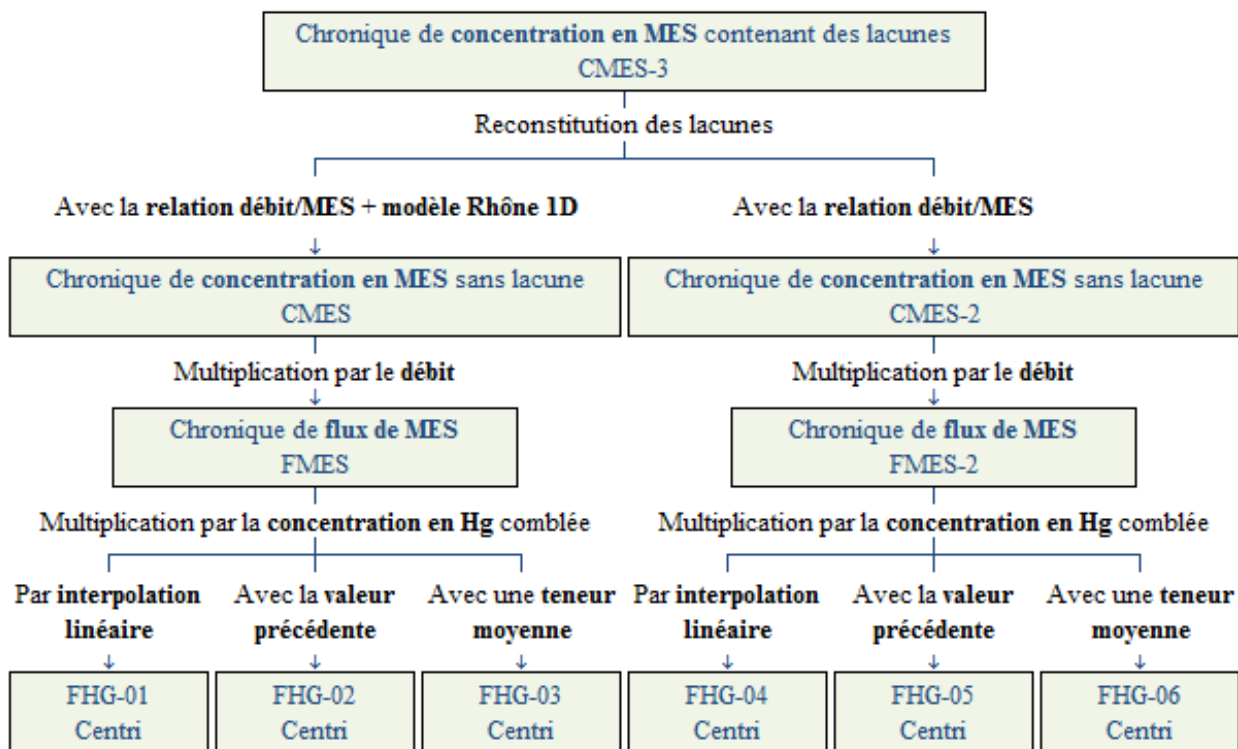


Figure 13 : Croisement des chroniques mères reconstituées à la station d'Arles pour calculer les flux de mercure particulaire (données 2013).

3.4.4 Résultats sur les méthodes de reconstitution testées

- **A Jons**

Les cumuls mensuels de MES sur l'année 2013 ont été calculés à Jons à partir des 2 chroniques de concentration en MES reconstituées. Les résultats sont comparés dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Cumuls mensuels de MES calculés à Jons par deux méthodes de reconstitution des lacunes pour l'année 2013.

	Avec la relation débit/MES (en Mt)	Par interpolation linéaire (en Mt)	Différence relative (%)	Lacunes dans la chronique de MES (%)
Janv. 13	0,015	0,015	0,0	0
Fév. 13	0,078	0,078	0,0	0
Mars 13	0,011	0,010	-8,4	16
Avr. 13	0,109	0,109	0,4	1
Mai 13	0,074	0,074	0,0	0
Juin 13	0,043	0,054	22,5	8
Juil. 13	0,082	0,083	0,6	2
Août 13	0,030	0,032	7,4	2
Sept 13	0,010	0,010	0,0	0
Oct. 13	0,082	0,082	0,1	4
Nov. 13	0,226	0,226	0,0	0
Déc. 13	0,044	0,044	0,0	0
Cumul	0,804	0,818	1,7	3

Les cumuls annuels de MES calculés à partir des deux chroniques reconstituées sont similaires (1,7% de différence). Sur les cumuls mensuels, la différence la plus élevée atteint 22,5% en juin. D'après ces résultats, les cumuls annuels et mensuels de MES sont similaires pour les deux méthodes de reconstitution testées.

Pour les mois comportant des lacunes (mars, avril, juin, juillet, août et octobre), les cumuls de MES ont été calculés à une échelle plus fine, au pas de temps hebdomadaire. Les résultats sont comparés dans le **Tableau 4**.

Tableau 4 : Cumuls hebdomadaires de MES calculés à Jons par 2 méthodes de reconstitution des lacunes pour l'année 2013.

		Par interpolation linéaire (en t)	Avec la relation débit/MES (en t)	Différence relative (%)	Lacunes dans la chronique de MES (%)
Mars	Semaine 1	85	85	0,0	0,0
	Semaine 2	2671	2671	0,0	0,0
	Semaine 3	955	1300	30,5	22,0
	Semaine 4	905	1447	46,1	52,4
	Semaine 5	5438	5438	0,0	0,0
Avril	Semaine 1	3007	3007	0,0	0,0
	Semaine 2	45008	45008	0,0	0,0
	Semaine 3	30101	30101	0,0	0,0
	Semaine 4	22192	21704	2,2	5,4
	Semaine 5	8771	8771	0,0	0,0
Juin	Semaine 1	4034	4034	0,0	0,0
	Semaine 2	4511	4511	0,0	0,0
	Semaine 3	18056	17455	3,4	1,2
	Semaine 4	25464	15126	50,9	32,7
	Semaine 5	2059	2059	0,0	0,0
Juillet	Semaine 1	3081	3081	0,0	0,0
	Semaine 2	4668	4668	0,0	0,0
	Semaine 3	3332	3332	0,0	0,0
	Semaine 4	9579	9476	1,1	1,8
	Semaine 5	62361	61933	0,7	13,9
Août	Semaine 1	20443	18153	11,9	9,5
	Semaine 2	9882	9882	0,0	0,0
	Semaine 3	1453	1453	0,0	0,0
	Semaine 4	423	423	0,0	0,0
	Semaine 5	46	46	0,0	0,0
Octobre	Semaine 1	1701	1701	0,0	0,0
	Semaine 2	2349	2349	0,0	0,0
	Semaine 3	13275	13206	0,5	17,3
	Semaine 4	58738	58738	0,0	0,0
	Semaine 5	5643	5643	0,0	0,0

A l'échelle hebdomadaire, des différences parfois importantes sont constatées sur les cumuls de MES calculés avec les deux méthodes, jusqu'à 51% de différence sur la 4ème semaine de juin. La reconstitution par la relation débit/MES est jugée meilleure car elle prend en compte les variations du débit sur la période de lacune (cf. **Figure 14**). Pour juin 2013, cependant, la relation débit/MES calculée à Jons semble sous-estimer les concentrations en MES reconstituées.

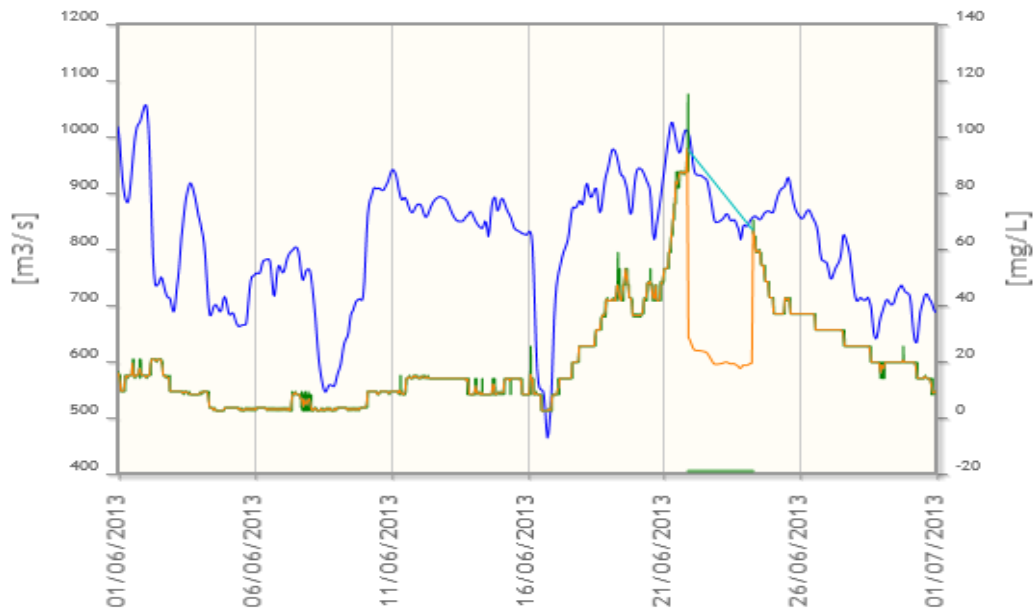


Figure 14 : Chroniques continues de débit (en bleu foncé), de concentration en MES lacunaire (en vert), de concentration en MES estimée par interpolation linéaire (en bleu clair), et à l'aide de la relation débit/MES (en orange) à Jons en juin 2013.

D'après ces résultats, le calcul dans BDOH des flux cumulés de MES sur une période inférieure à 1 mois est possible sur une période ne comportant pas de lacunes ; en revanche, il est déconseillé sur une période lacunaire.

Pour le mercure particulaire, les résultats des cumuls mensuels et annuels d'après les 12 combinaisons possibles sont présentés dans le **Tableau 5**.

Tableau 5 : Variabilité sur les cumuls annuels et mensuels de mercure calculés à Jons selon 12 méthodes de reconstitution des lacunes (6 avec les centrifugations, 6 avec les pièges à particules) pour l'année 2013.

	Centrifugeuse				Piège à particules				Lacunes (%) dans la chronique de MES
	Moyenne (en kg)	Ecart-type (en kg)	CV (%)	Lacunes (%) dans la chronique	Moyenne (en kg)	Ecart-type (en kg)	CV (%)	Lacunes (%) dans la chronique	
Janv. 13	1,00	0,03	3,2	24	0,65	0,00	0,0	0	0
Fév. 13	3,48	0,00	0,0	0	3,15	0,00	0,0	0	0
Mars 13	0,56	0,03	5,4	40	0,60	0,05	7,8	40	16
Avr. 13	5,52	0,02	0,4	28	6,27	0,04	0,6	28	1
Mai 13	3,39	0,10	2,9	48	5,45	0,00	0,0	0	0
Juin 13	2,40	0,29	12,0	42	1,97	0,23	11,5	0	8
Juil. 13	3,62	0,03	0,8	27	3,66	0,01	0,3	0	2
Août 13	1,25	0,08	6,7	48	1,45	0,06	4,1	0	2
Sept 13	0,48	0,00	0,0	0	0,45	0,00	0,0	0	0
Oct. 13	4,18	0,00	0,0	0	2,66	0,00	0,1	0	4
Nov. 13	9,18	1,05	11,4	85	6,93	0,00	0,0	0	0
Déc. 13	3,26	0,85	26,0	55	1,86	0,00	0,0	0	0
Cumul	38,32	0,62	1,6	33	35,11	0,30	0,9	6	3

A l'échelle annuelle, les variations des cumuls de mercure particulaire calculés à partir des chroniques de concentrations en mercure issues de centrifugations et de pièges à particules sont de moins de 2% (respectivement 1,6% et 0,9%).

Cependant, les cumuls annuels obtenus à partir de la chronique de mercure issue de centrifugations sont en moyenne plus élevés que ceux calculés avec les résultats de mercure issus de pièges à particules (38,3 kg en 2013 pour les centrifugations et 35,1 kg en 2013 pour les pièges à particules, soit une différence de 8,4%). Cette différence pourrait s'expliquer par un taux de lacunes plus important dans la chronique de mercure issue de centrifugations (33% sur 2013 et 9 mois lacunaires) que dans celle de mercure issue de pièges à particules (6% sur 2013 et seulement 2 mois lacunaires).

Pour une méthode de prélèvement de MES donnée (centrifugeuse ou piège à particules), les cumuls annuels de mercure particulaire à Jons sont donc similaires quelle que soit la méthode de reconstitution des lacunes testée. Ils varient un peu selon la technique de prélèvement utilisée (**Figure 15**).

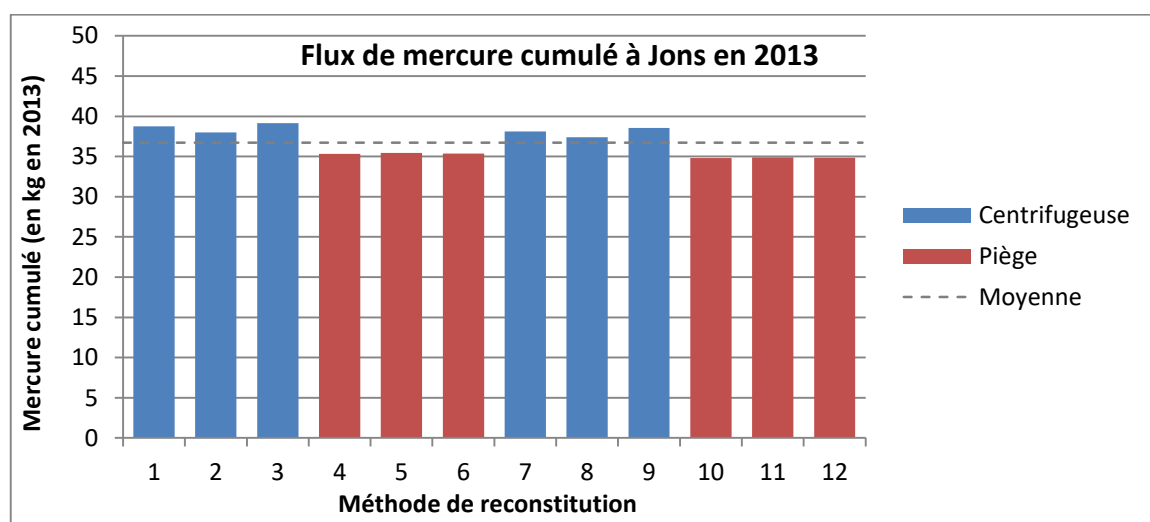


Figure 15 : Résultats des cumuls annuels de mercure particulaire à Jons en 2013 pour les 12 méthodes de reconstitution des lacunes testées.

A l'échelle mensuelle, des variations importantes sont parfois observées entre les cumuls obtenus avec les différentes méthodes de reconstitution (jusqu'à 26% de différence en décembre 2013 avec la chronique de mercure issue de centrifugations). Pour un même mois, ces différences varient selon la méthode de prélèvement considérée. En novembre, par exemple, les cumuls de mercure varient de 11,4% entre les 6 méthodes de reconstitution de la chronique de mercure issue de centrifugations, alors qu'ils sont identiques pour la chronique de mercure issue de pièges à particules. Ces différences s'expliquent d'une part, par un taux de lacunes plus important dans la chronique de concentrations en mercure particulaire issue de centrifugations et d'autre part, par une variation temporelle des concentrations en mercure issues des deux techniques de prélèvements de MES (cf. **Figure 16**).

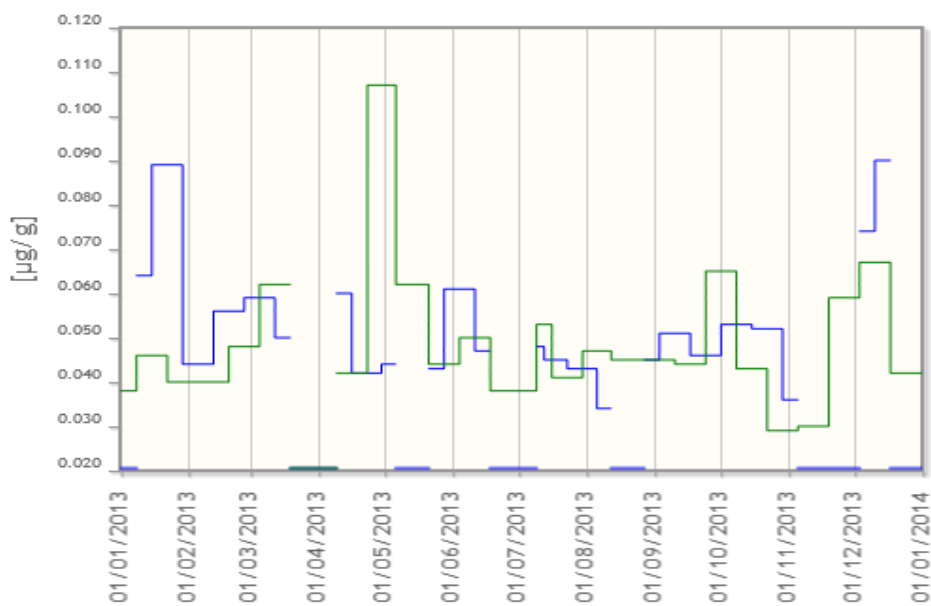


Figure 16 : Chroniques continues lacunaires des concentrations en mercure particulaire (en $\mu\text{g/g}$) à partir de centrifugations (en bleu) et de pièges à particules (en vert) à Jons pour l'année 2013.

- **A Arles**

Les cumuls mensuels de MES sur l'année 2013 ont été calculés à Arles à partir des deux chroniques de concentration en MES reconstituées. Les résultats sont comparés dans le **Tableau 6**.

Tableau 6 : Cumuls mensuels de MES calculés à Arles par deux méthodes de reconstitution des lacunes pour l'année 2013.

	Avec la relation débit/MES + modèle Rhône 1D (en Mt)	Avec la relation débit/MES (en Mt)	Différence relative (%)	Lacunes dans la chronique de MES (%)
Janv. 13	0,293	0,288	-1,8	6
Fév. 13	0,503	0,500	-0,6	3
Mars 13	0,293	0,293	0,0	0
Avr. 13	0,529	0,528	-0,2	3
Mai 13	3,417	3,364	-1,6	39
Juin 13	0,630	0,626	-0,6	13
Juil. 13	0,102	0,101	-1,6	13
Août 13	0,060	0,060	0,0	0
Sept 13	0,026	0,026	0,3	3
Oct. 13	0,434	0,434	0,0	0
Nov. 13	0,951	0,951	0,0	0
Déc. 13	0,448	0,448	-0,1	3
Cumul	7,69	7,62	-0,9	7

Les cumuls annuels calculés à partir des deux chroniques reconstituées de concentration en MES sont similaires (moins de 1% de différence). Sur les cumuls mensuels, la différence maximale s'élève à 2% en janvier. D'après ces résultats, les cumuls annuels et mensuels de MES calculés à Arles sont similaires pour les deux méthodes de reconstitution testées.

Pour le mercure particulaire, les résultats des cumuls mensuels et annuels calculés à Arles d'après les 6 combinaisons possibles sont présentés dans le **Tableau 7**.

Tableau 7 : Variabilité des cumuls annuels et mensuels de mercure particulaire calculés à Arles par 6 méthodes de reconstitution des lacunes pour l'année 2013.

	Centrifugeuse			Lacunes (%) dans la chronique	Lacunes (%) dans la chronique de MES
	Moyenne (kg)	Ecart-type (kg)	CV (%)		
Janv. 13	25,33	1,19	4,7	30	6
Fév. 13	55,72	0,13	0,2	13	4
Mars 13	28,22	1,89	6,7	37	0
Avr. 13	37,59	0,05	0,1	0	3
Mai 13	226,2	11,05	4,9	35	39
Juin 13	41,85	0,17	0,4	0	13
Juil. 13	9,74	0,58	6,0	51	13
Août 13	6,29	0,48	7,7	81	0
Sept 13	2,44	0,00	0,2	0	3
Oct. 13	48,49	2,24	4,6	54	0
Nov. 13	85,85	1,12	1,3	53	0
Déc. 13	8,92	0,26	2,9	30	0
Cumul	576,7	16,35	2,8	32	7

A l'échelle annuelle, les variations entre les cumuls de mercure particulaire sont de moins de 3%, malgré un pourcentage élevé de lacunes dans la chronique de mercure (32% et 10 mois lacunaires). Ces faibles variations sont principalement influencées par la technique de reconstitution des lacunes de la chronique de mercure. Les cumuls annuels de mercure sont donc similaires quelle que soit la méthode de reconstitution des lacunes utilisée, même lorsque les calculs sont réalisés à partir d'une chronique mère de mercure très lacunaire (**Figure 17**).

A l'échelle mensuelle, la différence de cumuls de mercure la plus importante s'élève à 7,7% en août 2013. Ces variations restent négligeables et sont uniquement dues aux différentes méthodes de reconstitution des lacunes de la chronique de mercure (la chronique de MES est complète) qui sont très importantes sur ce mois le plus lacunaire de l'année (seulement 19% de remplissage).

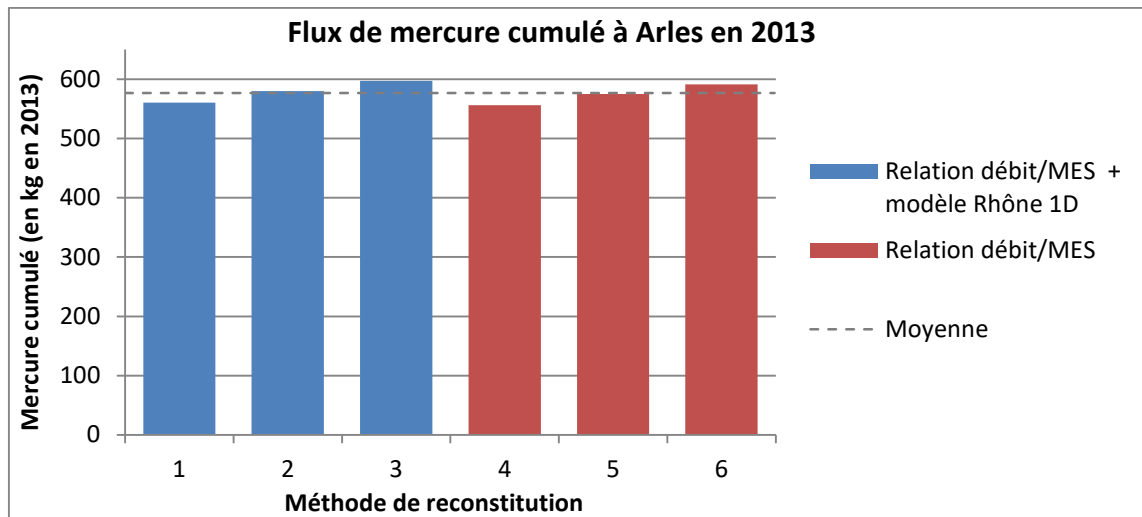


Figure 17 : Résultats des cumuls annuels de mercure particulaire à Arles en 2013 pour les 6 méthodes testées.

A Arles, les cumuls annuels de mercure particulaire calculés avec les 6 méthodes de reconstitution testées sont très peu variables et ne semblent pas être influencés par le taux important de lacunes dans la chronique de mercure. A l'échelle mensuelle, des variations un peu plus importantes sont observées du fait de très longues lacunes dans la chronique de mercure. Ces différences restent négligeables, ce qui permet de conclure que les résultats de cumuls de mercure particulaire obtenus avec les 6 méthodes de reconstitution testées sont similaires.

4 Conclusion du chapitre 1

En conclusion, les tests réalisés sur les stations de Jons et d'Arles montrent que la méthode de reconstitution des lacunes utilisée a une influence négligeable (inférieure à 3%) sur les flux cumulés de MES et de mercure particulaire à l'échelle annuelle. En revanche, à l'échelle mensuelle, elle peut générer des différences plus élevées (jusqu'à 26%). Ces différences restent acceptables et peuvent s'expliquer par l'importance de la durée des lacunes, la variabilité temporelle des concentrations en mercure particulaire et la technique de prélèvement utilisée.

A ce stade nous avons fait les choix suivants :

- Sur des lacunes inférieures à 1 mois, les flux de MES cumulés et instantanés sont réalisés à partir de la chronique de concentration en MES estimée avec une relation débit/MES ;
- Les chroniques de mercure, et des autres contaminants particulières, issues de pièges à particules intégratifs sont à privilégier pour les calculs des flux instantanés et cumulés.

Les premiers résultats de ces tests de sensibilité réalisés à l'aide de BDOH ont été complétés par une étude similaire élargie aux stations des principaux affluents du Rhône et à des contaminants supplémentaires, aux variabilités temporelles différentes. Dans l'objectif de calculs de flux instantanés et cumulés, un travail spécifique et approfondi a été mené pour aboutir à une méthodologie de calcul des flux fiable, robuste et applicable à toutes les stations. Ces développements sont détaillés dans le Chapitre 2.

Chapitre 2. Développement d'une méthode générale de reconstitution des chroniques lacunaires pour le calcul de flux de MES et de contaminants associés

Gaëlle Poulhier, Marina Launay, Chloé Le Bescond, Fabien Thollet, Marina Coquery, Jérôme Le Coz

1 Objectifs

Les tests réalisés dans le chapitre précédent ont permis de montrer que les différentes méthodes de reconstitution des lacunes influencent peu le résultat de flux annuels lorsque ces lacunes sont peu nombreuses. L'une des méthodes testées consiste à établir une ou des relations empiriques entre le débit et la concentration en MES, communément appelées « relations CsQ ». C'est cette dernière méthode qui a été sélectionnée pour combler les chroniques de CMES, ou pour reconstituer des flux passés à partir du débit. Le premier objectif de ce chapitre est de décrire les développements mis en place pour améliorer la fiabilité et la robustesse de ces relations CsQ pour les stations de Jons et Arles/Beaucaire sur le Rhône et pour les stations du réseau de l'OSR situées sur les principaux affluents du Rhône.

Les chroniques de concentrations en contaminants particuliers comportent elles aussi des lacunes temporelles. Nous avons choisi de les combler par l'utilisation de « valeurs forfaits », correspondant à la valeur médiane de l'ensemble des concentrations disponibles. Les concentrations particulières peuvent varier en fonction des conditions hydrologiques (Launay, 2014) ; c'est pourquoi il est nécessaire d'examiner les concentrations en contaminants en distinguant les régimes de base et de crue. Le deuxième objectif de ce chapitre est d'établir ces valeurs médianes pour les contaminants historiques de l'OSR, c'est-à-dire les PCB indicateurs, le mercure, les autres éléments trace métalliques et les radionucléides.

2 Données disponibles

L'une des fonctionnalités importantes de BDOH est de permettre le calcul automatisé de flux de MES et de flux de contaminants à différentes échelles de temps (mensuelle, annuelle), à partir des chroniques de débit, concentration en MES et concentration en contaminants bancarisées (cf. Chapitre 1). Toutefois, ces chroniques présentent inévitablement des lacunes temporelles qu'il convient de reconstituer pour calculer des flux complets. En général, les chroniques de débits présentent très peu de lacunes. En revanche, les chroniques de MES peuvent présenter des lacunes temporelles importantes en raison d'incidents impactant les appareils de mesure (turbidimètres). Les flux de MES qui en découlent présentent donc également des lacunes.

Par ailleurs, toutes les stations n'ont pas été instrumentées au même moment et les données recueillies ne couvrent donc pas toujours la même période en fonction des stations. Cela pose problème pour réaliser des bilans de flux annuels à l'échelle du bassin versant du Rhône.

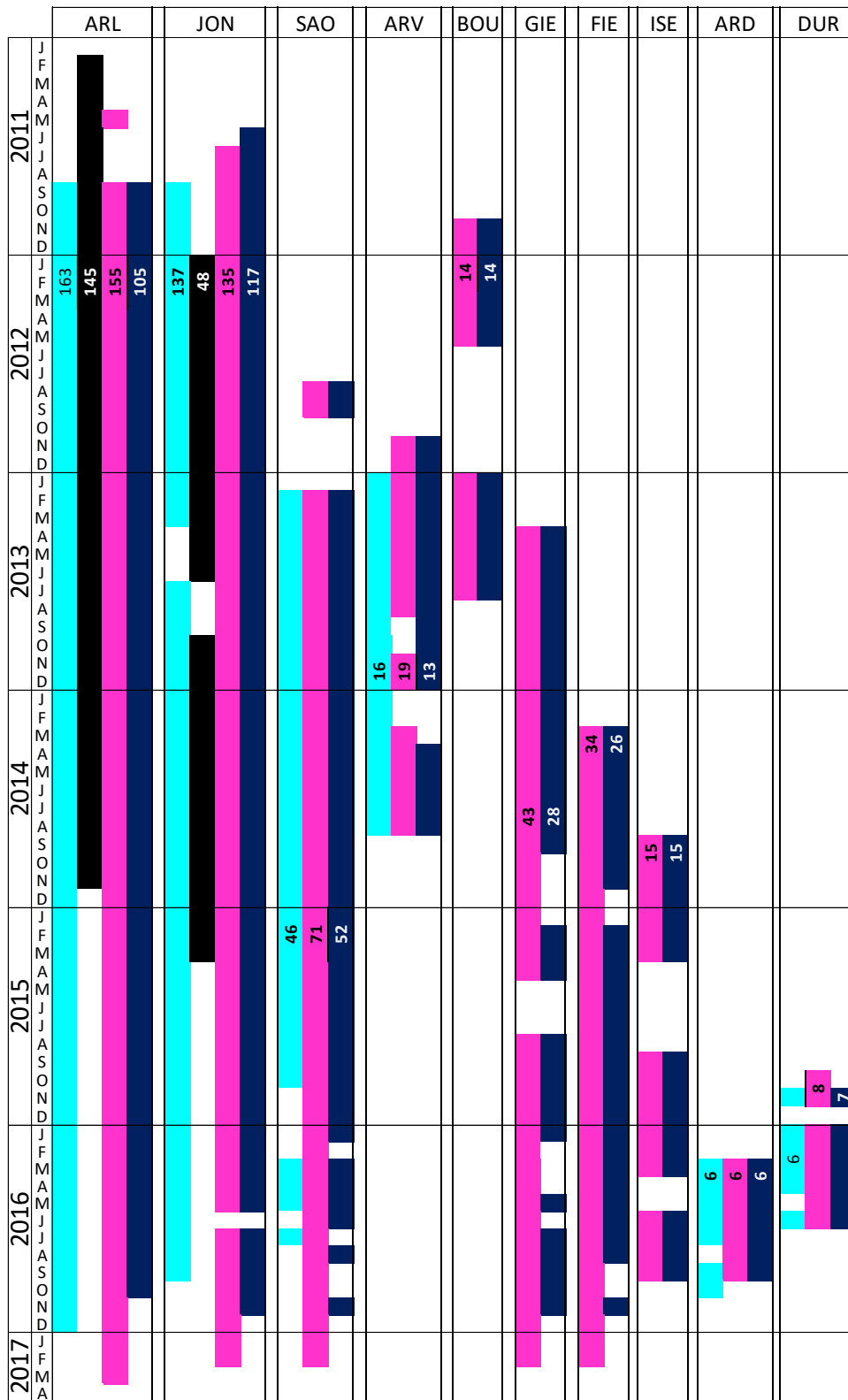
Les données de flux de MES actuellement disponibles dans BDOH pour la période 2011-2016 pour les stations principales sur le Rhône et ses principaux affluents sont présentées dans le **Tableau 8**, avec le pourcentage de données mesurées associé par année (en termes de couverture temporelle).

Les concentrations en PCBi, éléments trace métalliques et radionucléides dans les MES ont été mesurées à partir de 2011 à Arles et Jons. Les principaux affluents du Rhône ont ensuite été ajoutés progressivement. La durée de suivi s'étend donc de 5 ans à quelques mois en fonction des stations. Un récapitulatif des données de concentrations en micropolluants particulières disponibles pour chaque station est présenté dans le **Tableau 9**.

Tableau 8 : Données de flux de matières en suspension disponibles dans BDOH pour les stations principales sur le Rhône et les principaux affluents des bassins versants du Haut-Rhône et du Rhône en aval de Lyon. Le pourcentage de données mesurées (non lacunaires) par année (en termes de couverture temporelle) est indiqué sur les barres.

		Haut-Rhône				Rhône Aval de Lyon				
		Arve	Fier	Bourbre	Jons	Saône	Gier	Isère	Durance	Beaucaire
2011	J				99%	64%		100%		100%
	F									
	M									
	A									
	M									
2012	J			22%						
	F			23%						
	M	82%			98%	70%		100%		100%
	A									
	M									
2013	J									
	F									
	M	67%		59%	97%	99%	75%	100%		100%
	A								9%	
	M									
2014	J									
	F									
	M	98%	62%		98%	100%	97%	94%	92%	100%
	A									
	M									
2015	J									
	F									
	M	98%	97%		99%	84%	98%	100%	75%	100%
	A									
	M									
2016	J									
	F									
	M	100%	97%		97%	99%	84%	100%	70%	100%
	A									
	M									

Tableau 9 : Suivi réalisé par piège à particules pour différentes familles de micropolluants sur les stations de l'OSR de janvier 2011 à avril 2017 (pour Arles, suivi par centrifugeuse fixe). Le nombre total d'échantillons de MES analysés par famille est indiqué sur les barres.



Legende

ETM

Radionucléides (IRSN)

Hg (Irstea)

PCBi (Irstea)

3 Reconstitution des lacunes de CMES : relations CsQ

La méthode privilégiée pour combler les lacunes de concentrations en MES consiste en l'estimation d'une relation entre le débit (Q) et la concentration en MES (Cs), généralement de la forme $Cs = aQ^b$.

Au cours de l'OSR, ainsi que dans la thèse de Launay (2014), plusieurs solutions ont été développées et testées pour l'élaboration de ces relations CsQ. Les travaux effectués nous ont permis de conclure que les CsQ les plus fidèles étaient généralement obtenues par le biais de relations à deux segments. En effet, sur certains affluents, il peut arriver que la relation CsQ diffère selon que le cours d'eau est en étiage (débit faible) ou en crue (débit élevé). Par ailleurs, les données recueillies en étiage sont souvent plus nombreuses que celles recueillies en crue et ont tendance à « tirer » la relation vers le bas. Il en résulte souvent une sous-estimation des Cs de crue, qui constituent pourtant une part importante du flux annuel. Dans ces deux cas, une relation CsQ en deux segments peut alors s'avérer judicieuse, comme illustré pour le Fier sur la **Figure 18**. Cependant ce n'est pas systématique.

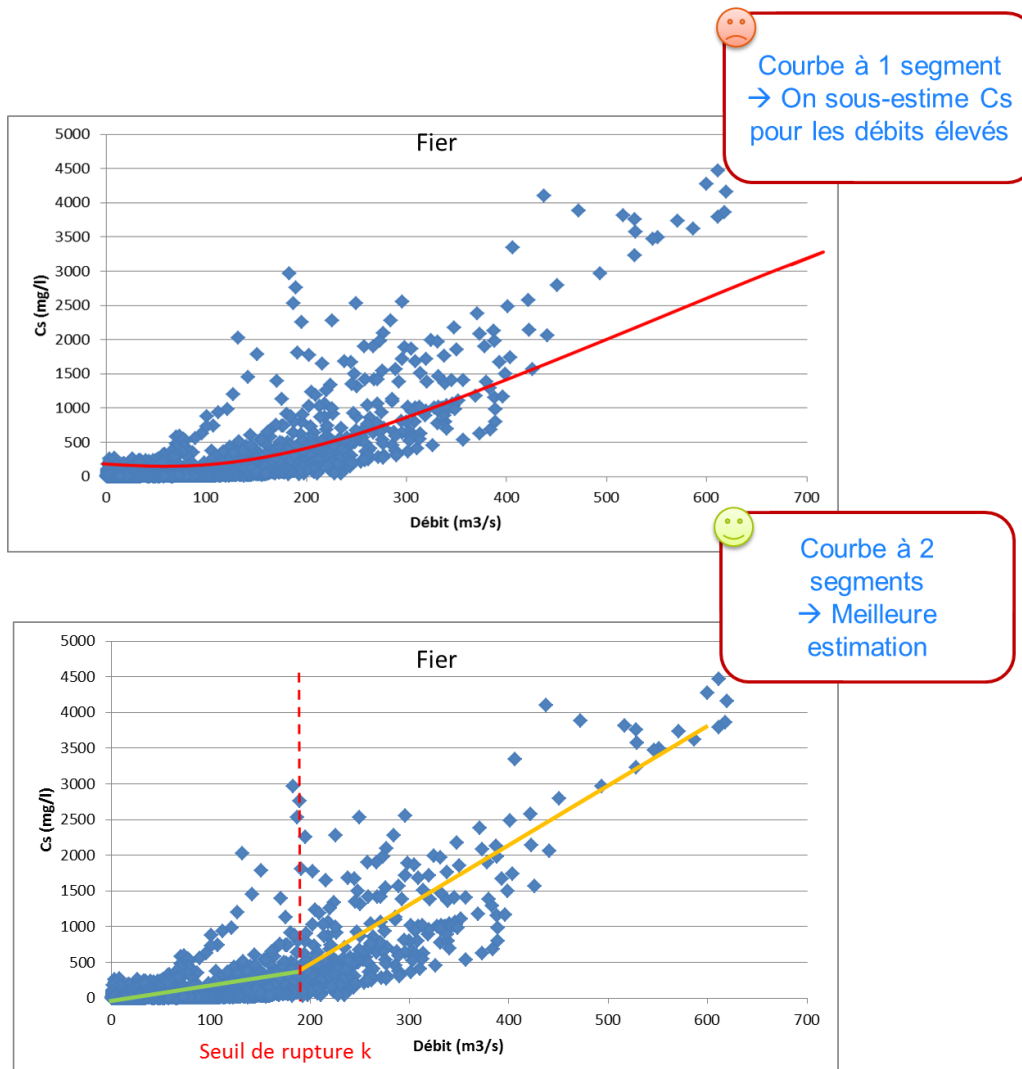


Figure 18 : Comparaison de relations débit-concentrations en MES (relations CsQ) à un ou deux segments sur le Fier.

L'intérêt de cette relation en deux segments doit donc être vérifié, ce que permet le logiciel Baratin (Le Coz *et al.*, 2014). Ce logiciel développé par Irstea est généralement utilisé pour réaliser des courbes de tarage entre la hauteur d'eau et le débit. Ici, nous l'avons utilisé pour estimer des relations entre le débit et concentration en MES. L'un des avantages de ce logiciel est la possibilité d'obtenir directement le seuil de rupture (k) s'il y a lieu, c'est à dire le débit à partir duquel les coefficients a et b de la relation CsQ changent de façon significative.

De plus, les relations CsQ à deux segments obtenues ont été améliorées en appliquant la méthode SiRCA. Cette méthode, développée par Sadaoui *et al.* (2016), consiste à établir la relation CsQ à partir de Cs moyennes par classes de débit. Les limites des classes de débit sont fixées par l'étude des fréquences de retour. Pour simplifier, les classes sont « larges » pour les débits les plus fréquents (souvent peu élevés et pour lesquels on dispose d'un grand nombre de données). Les classes sont « resserrées » pour les débits les moins fréquents (souvent les plus élevés, qui correspondent aux crues). La mise en œuvre de ces classes de débit permet de donner plus de poids aux débits élevés, pour lesquels on dispose souvent de moins de données, mais qui représentent une part importante du flux annuel. Les Cs moyennes sont ensuite appariées au débit moyen correspondant. Ce sont ces données moyennes (Cs-Q) par classe de débit qui sont ensuite traitées dans le logiciel Baratin pour estimer le modèle et la pertinence d'une relation à 2 segments (**Figure 19**).

Elaboration des relations CsQ :

→ Méthode SiRCA

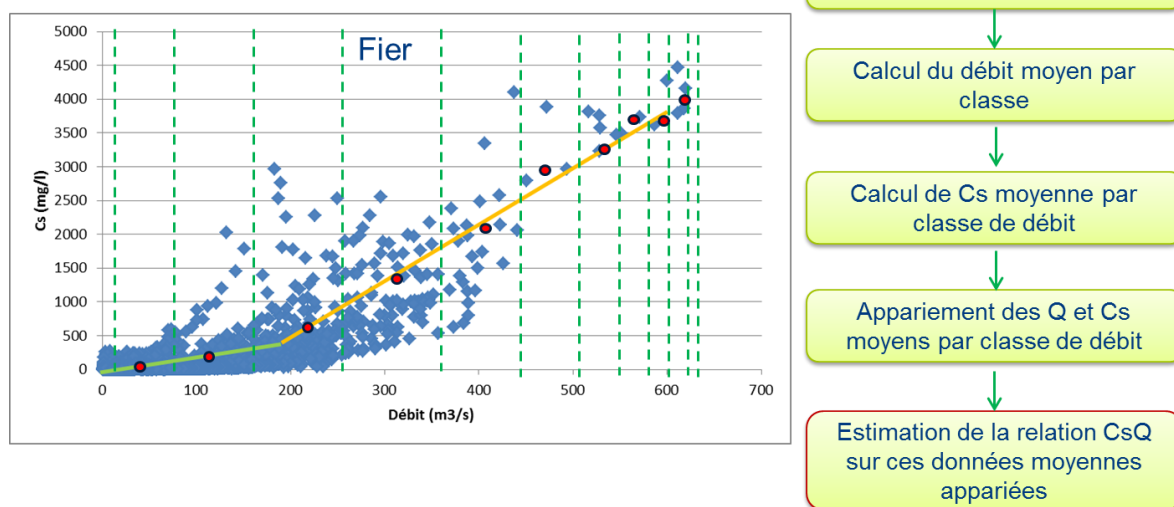


Figure 19 : Schéma explicatif de la méthode SiRCA mise en œuvre pour l'estimation de relations débit-concentration en matières en suspension (relations CsQ) pour le Rhône et ses affluents.

L'application de la méthode SiRCA a permis d'obtenir des relations CsQ à un ou deux segments pour le Rhône (à Jons et à Beaucaire/Arles) et ses principaux affluents. Les résultats sont présentés sur la **Figure 20**. Les données utilisées sont des moyennes horaires. Sur tous les affluents sauf la Saône, le meilleur modèle est obtenu grâce à une relation à deux segments.

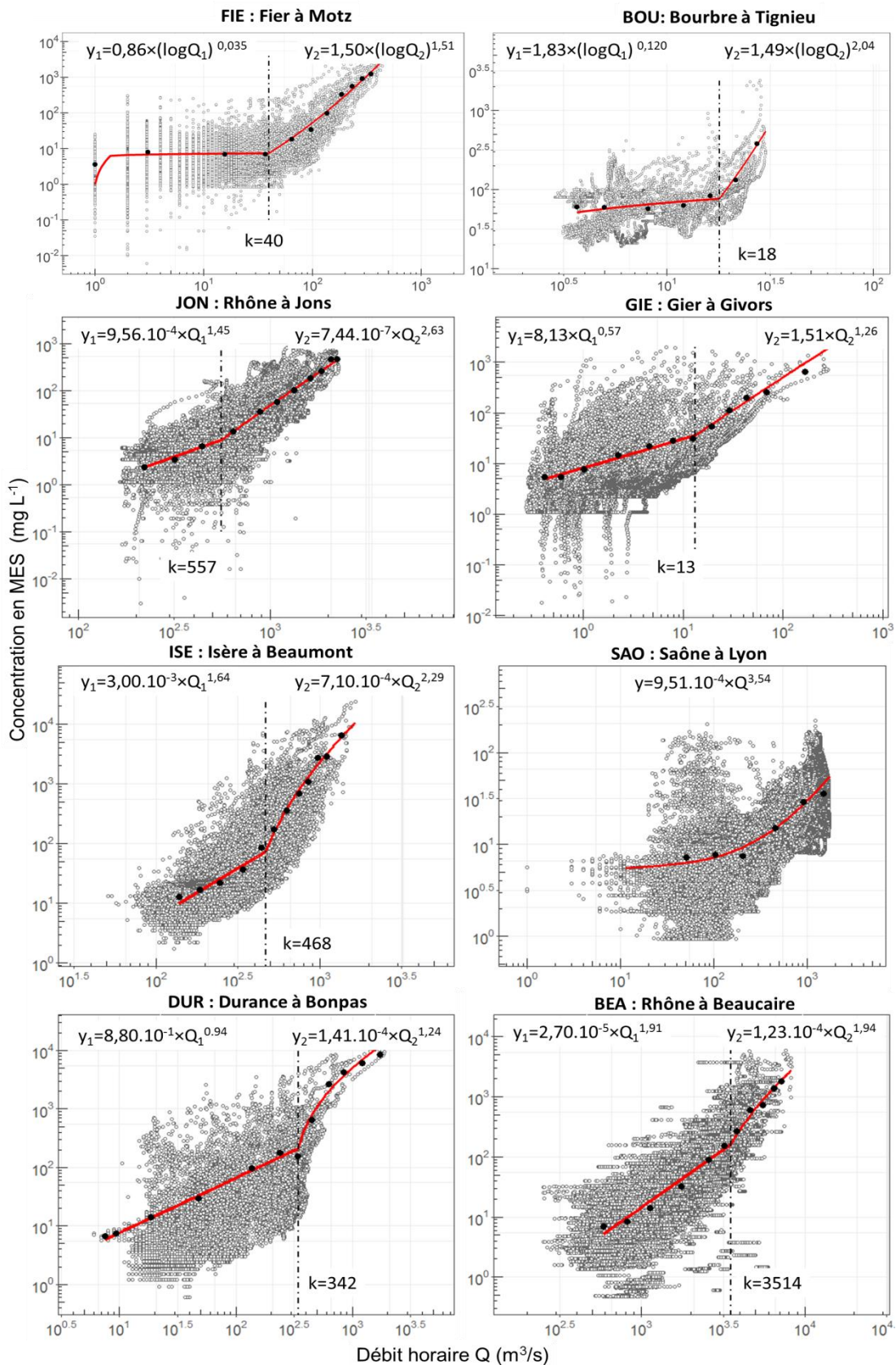


Figure 20 : Relations entre le débit moyen horaire (Q en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) et la concentration moyenne horaire en MES (C_s en mg/L). Les paires C_s - Q sont représentées en gris. Les moyennes par classes de débit sont représentées par les points noirs. La relation C_s - Q obtenue est représentée en rouge.

Dans le cas de la station du Rhône à Beaucaire, nous avons ajouté aux données acquises au sein de l'OSR entre 2005 et 2015, les données publiées par d'autres auteurs pour les années antérieures. Nous avons ainsi utilisé les données de Pont *et al.* (2002) couvrant la période 1992-1995, ainsi que celles de Ollivier *et al.* (2010) et Eyrolle *et al.* (2012) couvrant la période 2002-2005. Cela a permis d'élargir la gamme de débit prise en compte pour l'établissement de la relation CsQ, en incluant notamment les événements de crue de janvier 1994 ($Q=10572 \text{ m}^3/\text{s}$), novembre et décembre 2002 ($Q=9209 \text{ m}^3/\text{s}$), et décembre 2003 ($Q=11499 \text{ m}^3/\text{s}$). La CsQ à deux segments ainsi obtenue est présentée sur la **Figure 21**.

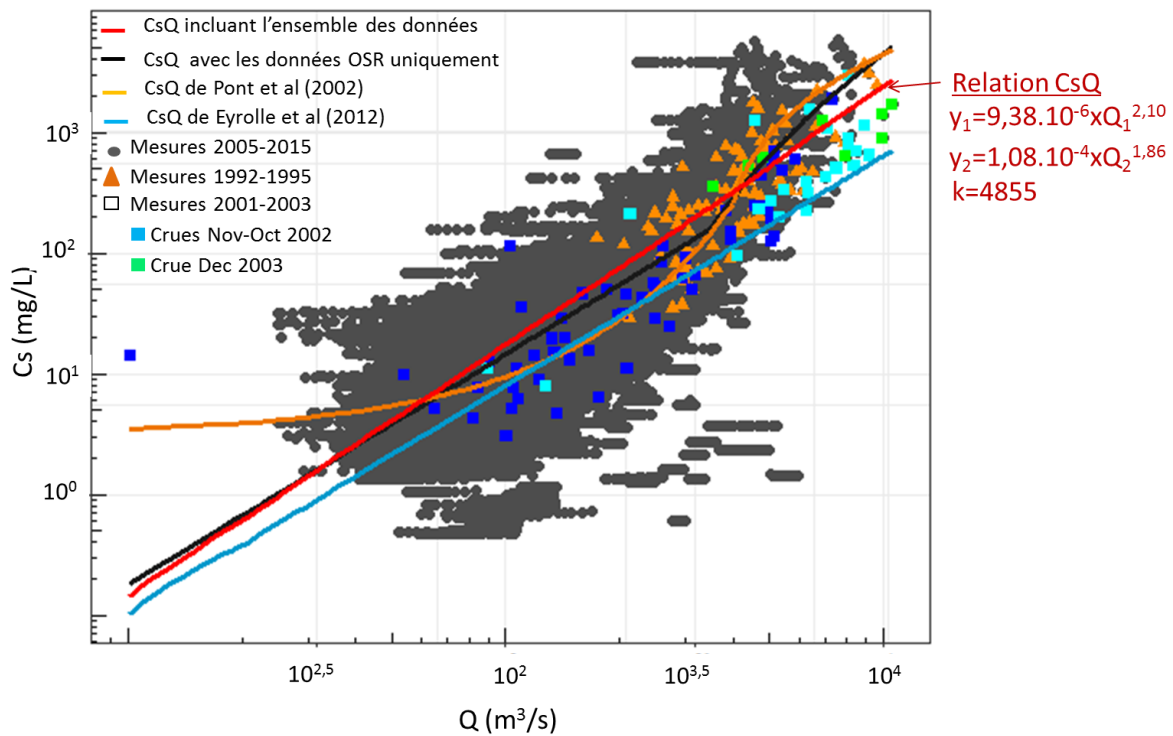


Figure 21 : Relations CsQ obtenues à la station de Beaucaire pour les données de l'OSR (en noir) et après ajout de données issues d'études antérieures (en rouge). Les données de la période 1992-1995 (triangles) sont extraites de Pont *et al.* (2002), celles de la période 2001-2003 (carrés) sont extraites de Ollivier *et al.* (2010). L'équation de la relation CsQ résultant de l'addition de l'ensemble des données est donnée en haut à droite avec k (m^3/s) le seuil de rupture, y_1 l'équation pour $Q < k$ et y_2 l'équation pour $Q > k$.

La CsQ établie uniquement avec les données de l'OSR sur la période 2005-2015 (droite en noir sur la **Figure 21**) décrit bien la crue de janvier 1994 et est très proche de celle publiée par Pont *et al.* (2002) pour ces débits élevés. En revanche, cette même CsQ conduit à une surestimation des concentrations en MES pour les crues de novembre 2002 (carrés bleu clair) et décembre 2003 (carrés verts). Dans le même temps, la relation CsQ établie par Eyrolle *et al.* (2012) à partir de ces deux événements (droite bleue) sous-estime grandement les autres données mesurées en 2005-2015 et 1992-1995 (d'un facteur 4 en moyenne).

Ces résultats mettent en lumière les difficultés relatives à l'établissement d'une relation CsQ générique, car la relation entre le débit et la concentration en MES peut grandement varier d'une crue à une autre. Toutefois, en incluant l'ensemble des données disponibles, nous sommes parvenus à une nouvelle relation CsQ en 2 segments (droite rouge), plus fiable car plus proche des données réelles mesurées pour les débits élevés. La crue de 2002 est toujours légèrement surestimée, mais dans une moindre mesure comparée à la relation CsQ initiale (obtenue avec les données de l'OSR seulement).

4 Reconstitution des lacunes des concentrations en contaminants : valeurs forfaits par régime hydrologique

Les chroniques de concentrations en contaminants présentent également des lacunes temporelles qu'il convient de combler pour estimer des flux annuels. Pour ce faire, nous avons choisi de remplacer les valeurs manquantes par des valeurs forfaits, correspondant à la médiane de l'ensemble des données disponibles, en distinguant les régimes de crue et de base, lorsque cela était possible. La médiane a été privilégiée par rapport à la moyenne, car elle est moins sensible aux valeurs extrêmes.

L'ensemble des données de concentrations en contaminants particulières acquises par l'OSR depuis 2011 ont été utilisées pour calculer les valeurs forfaits par régime hydrologique, pour chacune des stations étudiées et pour tous les contaminants « historiques » de l'OSR. Pour l'Ardèche et la Durance, qui ont été instrumentés récemment, les données de MES en crue ne sont pas encore disponibles pour réaliser ces calculs. Les données de concentrations en contaminants particulières issues de pièges à particules intégratifs sont utilisées lorsqu'elles sont disponibles (sauf à Arles). Le caractère significatif ou non des différences observées entre les régimes de crue et de base a été évalué par comparaison des médianes (test de Kruskal-Wallis, $p < 0,05$).

4.1 Définition des seuils de crue et distinction des régimes hydrologiques

Le seuil de crue a été défini comme la moitié de la valeur du débit à fréquence de retour biennale (Q2). Au-dessus de cette valeur, le cours d'eau est considéré en crue. Les seuils de crue utilisés sont extraits de la thèse de Launay (2014) et sont rappelés dans le **Tableau 10**.

Tableau 10 : Seuils de crue pour les différentes stations de l'OSR (Q2 : fréquence de retour biennale).

Cours d'eau	Station	Q2 (m ³ /s)	Seuils de crue (m ³ /s)
Arve	Bout du monde	487	250
Fier	Motz	398	200
Rhône	Jons	–	800
Bourbre	Tignieu	30	15
Saône	Couzon	1700	850
Gier	Givors	66	33
Isère	Beaumont-Monteux	1200	600
Durance	Bonpas	600	300
Rhône	Arles	6000	3000

Il est aisé de définir le régime hydrologique d'un échantillon de MES prélevé par centrifugation comme c'est le cas à Arles, car c'est une mesure ponctuelle, étalée sur quelques heures tout au plus. Il suffit donc de se référer au débit horaire correspondant à la date de prélèvement. Si ce débit dépasse le seuil de crue alors l'échantillon est qualifié « en crue ». Cette tâche est plus complexe pour des échantillons de MES prélevés par piège à particules exposés de 15 jours à un mois. Dans ce cas, nous avons choisi, en première approche¹, de qualifier l'échantillon « en crue » si le débit horaire dépasse au moins une fois le seuil de crue sur la période d'exposition.

4.2 Valeurs forfait : PCB_i

Dans le cas des PCB_i, il n'y a pas de différence significative entre les régimes de crue et de base à Jons et Arles sur le Rhône (différence relative des médianes < 15 %). En revanche, sur la Saône, le Fier, l'Isère, la Bourbre et le Gier, les concentrations médiane en PCB_i sont significativement plus faibles lors des crues, avec un écart qui varie généralement de -20 % à -50 % selon les stations. Les écarts sont les plus importants sur la Bourbre et le Gier (au-delà de - 50 % dans certains cas), avec des concentrations médianes en PCB_i dans les MES qui sont les plus fortes, quelque soit le régime hydrologique.

Un exemple est présenté en **Figure 22** pour le PCB₁₈₀ et pour la \sum PCB_i. Ces résultats confirment les observations de Launay (2014), qui expliquait la baisse des concentrations observée en crue par la présence de particules plus grossières et moins riche en carbone organique, diminuant ainsi l'adsorption de certains micropolluants.

Sur l'Arve, le nombre de données quantifiées est trop faible pour conclure.

Un récapitulatif des données acquises pour l'ensemble des PCB_i et des valeurs forfait obtenues est disponible en **Annexe 2**.

¹ Une deuxième approche est proposée et en cours de test, basée le classement en crue des échantillons intégrés sur une période durant laquelle le flux de MES passé en crue (F_{MES} calculé pour les débits > seuil de crue) représente plus de 50% des MES transportées sur toute la période d'exposition considérée.

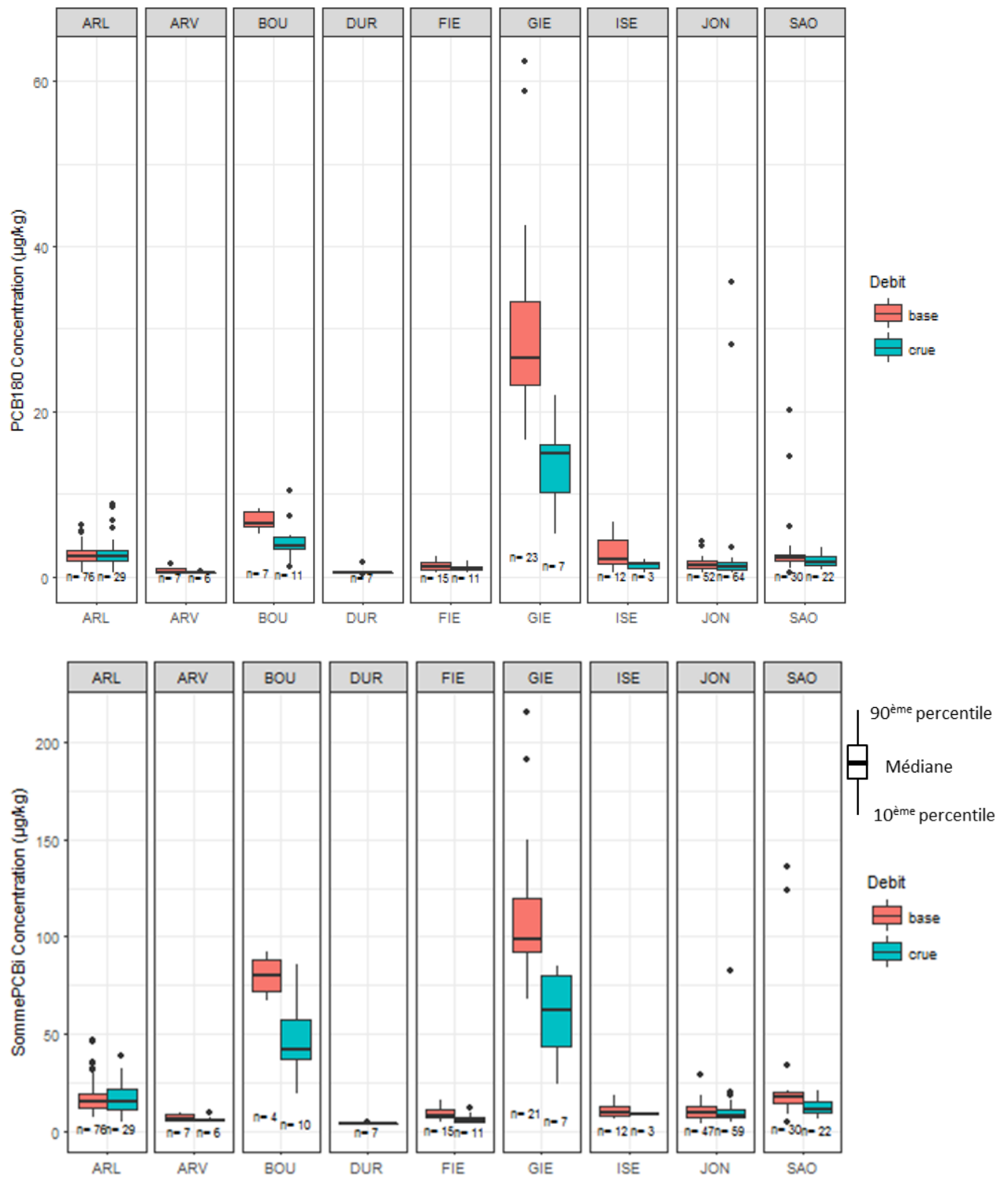


Figure 22 : Influence du régime hydrologique sur la concentration en PCB 180 particulaire (en haut) et la somme des PCBi (en bas).

4.3 Valeurs forfait : mercure

Les concentrations médiane en mercure sont significativement plus faibles en crue sur toutes les stations, excepté la Durance qui n'a pas été étudiée en raison du manque d'échantillons prélevés en crue (**Figure 23**). Sur le Rhône à Jons et à Arles, et sur la Bourbre, l'Isère et la Saône, la baisse varie entre -20% et -30%. Sur l'Arve et le Fier les concentrations baissent de -40 %. Sur le Gier la baisse atteint -60% lors des crues (cf. **Annexe 3** pour les valeurs chiffrées).

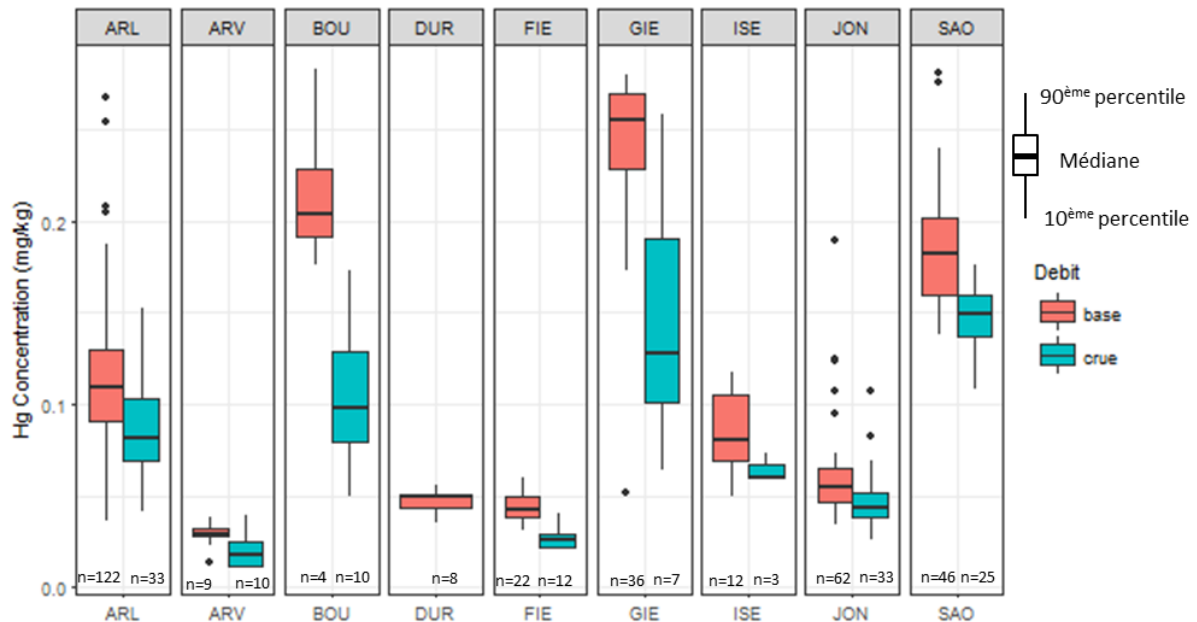


Figure 23 : Influence du régime hydrologique sur la concentration en mercure (Hg) particulaire.

4.4 Valeurs forfait : ETM

Sur les stations principales du Rhône, les concentrations en ETM présentent des valeurs significativement plus faibles en période de crue : (1) à Arles pour tous les éléments, avec des baisses supérieures à -15% ; et (2) à Jons pour le Cu, Zn et le Pb avec une baisse supérieure à -15% et de manière moins marquée pour l'As (-5%). Sur Jons, seul le Cr présente une concentration plus élevée en crue, avec une hausse relative de 9%.

Sur les affluents, les concentrations en ETM sont significativement plus faibles en crue pour la majorité des éléments avec des écarts variables selon les éléments et les affluents (entre -4 et -56 %). Les variations les plus importantes sont observées pour :

- La Durance en As, Cr, Zn et Ni
- L'Ardèche en Cd, Zn et Cu
- Le Gardon en Cd, Zn, As, Co, Ni et Cu
- La Saône en Pb, Cu et Zn
- L'Arve en Cr, Ni, Cu et As
- L'Isère en Cu, Pb et Zn

Quelques métaux présentent des concentrations plus élevées en régime de crue. C'est le cas notamment pour l'Ardèche pour le Cr et l'As.

Un exemple est donné pour le zinc en **Figure 24**. Un récapitulatif des données acquises pour l'ensemble des ETM et des valeurs forfait obtenues est disponible en **Annexe 4**.

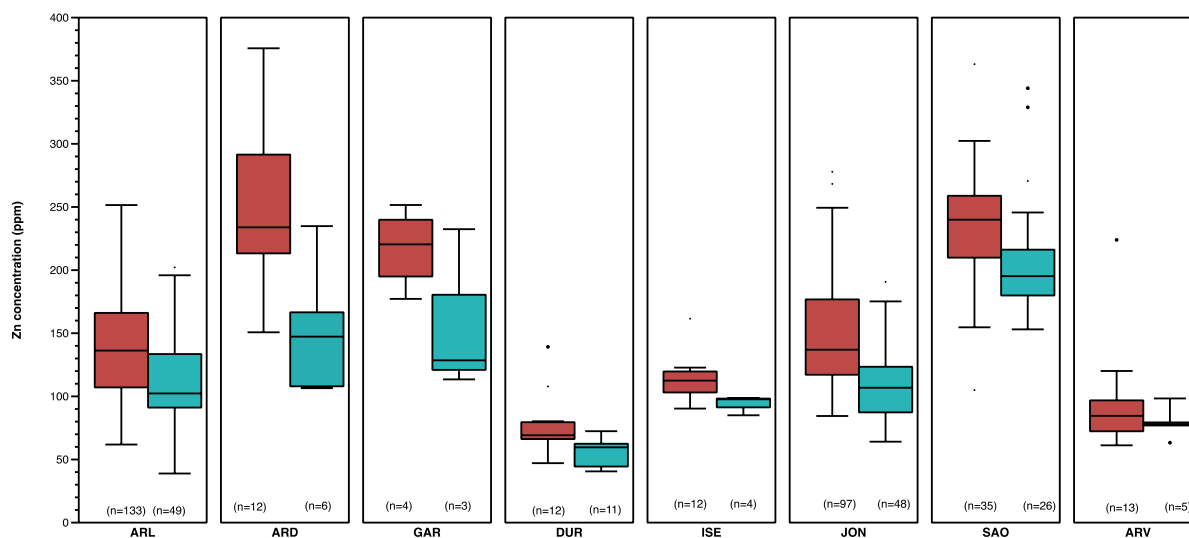


Figure 24 : Influence du régime hydrologique sur la concentration en zinc particulaire (en mg/kg).

4.5 Valeurs forfaits : radionucléides

Dans l'ensemble, les concentrations en Césium-137 (le radionucléide le plus fréquemment quantifié) observées lors des crues sont significativement inférieures à celles mesurées en période hydrologique normale (**Figure 25**). Cette observation s'explique (1) par la remise en suspension de sédiments peu marqués et plus grossiers (sable) ; et (2) par le lessivage de sols faiblement impactés par les retombées de Tchernobyl. En effet, des travaux complémentaires en cours de réalisation montrent que les niveaux les plus faibles observés à Arles le sont lorsque l'Isère est en crue et cette rivière est très peu marquée par le Césium-137. Il est cependant nécessaire de mieux caractériser les concentrations en Césium-137 provenant de cet affluent pour confirmer cette observation (deux échantillons pour le moment). Par ailleurs, une concentration plus faible est également observée pour les radionucléides naturels en période de crue (impact de la granulométrie).

Un récapitulatif des données acquises pour l'ensemble des radionucléides et des valeurs forfait obtenues est disponible en **Annexe 5**.

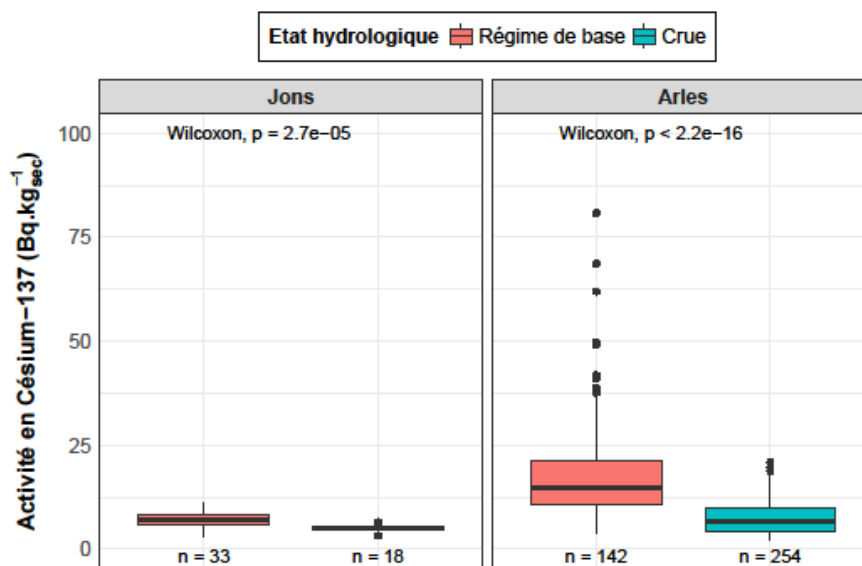


Figure 25 : Influence des conditions hydrologiques sur l'activité du césium-137 à Arles et Jons.

5 Récapitulatif et conclusion partielle

La méthodologie de calcul des flux a fait l'objet d'un travail spécifique et approfondi au cours de l'OSR 4. Le maintien et le bon fonctionnement du réseau de suivi a permis d'augmenter considérablement le nombre de données disponibles par rapport aux cycles précédents. Les données obtenues ont permis de calculer des relations CsQ plus fiables et plus robustes sur les stations du Rhône et sur les principaux affluents, car élaborées d'une part, à partir d'un grand nombre de données couvrant plusieurs années de suivi et d'autre part, à partir d'une méthodologie plus élaborée.

Il en est de même pour les valeurs forfaitaires de concentration en contaminants particuliers. Un effort d'échantillonnage particulier a été fait afin d'acquérir des données supplémentaires concernant les concentrations en crue. Ceci a permis d'évaluer l'influence du régime hydrologique sur les niveaux de micropolluants. Nous avons ainsi observé une tendance à la baisse des concentrations de certains micropolluants particuliers lors des crues. Nous avons calculé des valeurs forfaitaires pour chaque régime hydrologique. Le comblement des lacunes des chroniques de concentration a été rendu possible grâce à ces nouvelles données.

Un schéma récapitulatif de la méthodologie employée pour le comblement des lacunes et le calcul de flux est présenté en **Figure 26**. Les flux de MES et contaminants particuliers reconstitués grâce à cette méthodologie sont présentés et discutés dans les chapitres qui suivent.

Méthodologie de calcul des flux

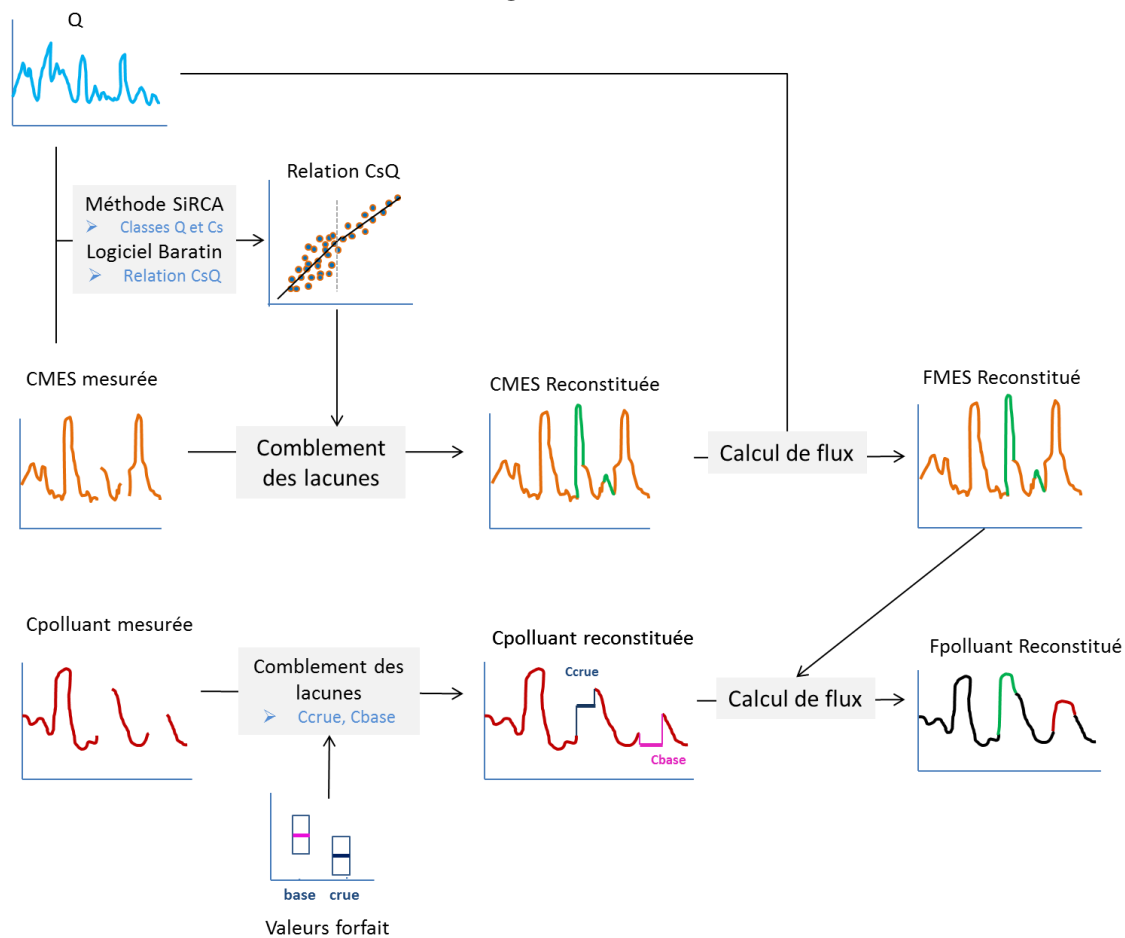


Figure 26 : Schéma récapitulatif de la méthodologie mise en œuvre pour le comblement des lacunes et le calcul des flux de matières en suspension et de contaminants associés sur le Rhône et ses principaux affluents.

Chapitre 3. Flux de matières en suspension sur le bassin du Rhône entre 2011 et 2016

Gaëlle Poulhier, Marina Launay, Chloé Le Bescond, Fabien Thollet, Marina Coquery, Jérôme Le Coz

1 Objectifs

Ce chapitre a pour objet de présenter les résultats de flux de matières en suspension sur le bassin du Rhône entre 2011 et 2016 qui ont été calculés avec la méthodologie spécifiquement élaborée au cours de l'OSR 4 pour extrapoler les données manquantes dans les chroniques. L'objectif final est d'identifier les principaux affluents contributeurs au flux de MES du Rhône, du lac Léman à la mer Méditerranée, et d'évaluer la variabilité annuelle de ces apports.

Nous nous focalisons dans une première partie sur le bassin du Haut-Rhône, qui s'étend du lac Léman au point de confluence avec la Saône, puis sur le bassin du Rhône en aval de Lyon.

2 Données disponibles

Les données de débit et de concentrations en MES mesurées qui ont été utilisées sont celles bancarisées dans BDOH. Sur le bassin du Haut-Rhône, les principaux affluents considérés, de l'amont vers l'aval, sont les suivants : l'Arve, le Fier et la Bourbre. Sur le bassin du Rhône en aval de Lyon, les principaux affluents étudiés sont la Saône, le Gier, l'Isère, l'Ardèche et la Durance.

Les données de débit (moyennes horaires) sont disponibles pour toutes les stations sur toute la période 2011-2016. Les lacunes sont rares et ont lieu essentiellement lors des passages à l'heure d'hiver ou à l'heure d'été.

Pour les concentrations (et donc les flux) de MES, les données mesurées disponibles dans BDOH sont détaillées dans le **Tableau 8** avec le pourcentage de données non lacunaires (c'est-à-dire mesurées). Dans l'objectif de calcul de flux et afin de réaliser des bilans annuels, les périodes non renseignées (pour les affluents dont le suivi a débuté après 2011) et les lacunes ont été extrapolées selon la méthodologie détaillée au Chapitre 2. Instrumentée récemment (2016), la station de l'Ardèche ne dispose pas de données suffisantes de concentrations en MES et a donc été exclue des calculs de flux.

Il est à noter que le calcul des flux de MES à l'embouchure du bassin du Rhône a été réalisé à partir des concentrations en MES mesurées à Arles et des débits mesurés à la station de Beaucaire (cf. Figure 1). En effet, bien que les concentrations en MES et en contaminants soient mesurées à la station SORA d'Arles dans le Grand-Rhône, nous privilégions le calcul des flux à la station du Rhône à Beaucaire, afin de quantifier le flux total du bassin versant du Rhône exporté à la mer Méditerranée. En effet, la station hydrométrique historique du Rhône à Beaucaire (CNR) jauge le débit total du Rhône à l'aval du dernier principal affluent important (le Gardon), alors que le débit du Grand-Rhône à Arles exclut le débit dérivé dans le Petit-Rhône et dans le Canal du Bas-Rhône Languedoc. Il est réaliste de supposer que les concentrations en MES et contaminants à Beaucaire soient très proches de celles mesurées à Arles, donc les mêmes concentrations peuvent servir à calculer le flux à Arles (avec le débit d'Arles) et à Beaucaire (avec le débit de Beaucaire). Les deux flux sont calculés et bancarisés dans la base de données BDOH/OSR.

3 Débits en eau

3.1 Variabilité spatio-temporelle des débits

3.1.1 Haut-Rhône

Les débits mesurés sur le Haut-Rhône à Jons et ses principaux affluents révèlent des dynamiques différentes (**Figure 27**). A Jons et sur la Bourbre les crues liquides sont longues et peuvent durer plusieurs jours voire plusieurs semaines. Sur l'Arve et le Fier, en revanche, les périodes de crue sont beaucoup plus courtes, deux à trois jours en moyenne.

Les crues les plus importantes (débits moyens horaires) par affluents ont été mesurées :

- à Jons : le 31 mars (2279 m³/s) et le 3 mai 2015 (2211 m³/s). A cette station, qui englobe l'ensemble des apports des affluents du haut-Rhône, les crues sont fréquentes et régulières (plusieurs par an).
- sur l'Arve : le 2 mai 2015 (902 m³/s). C'est l'unique crue de forte intensité observée au cours de la période.
- sur le Fier : le 2 mai 2015 (620 m³/s).
- sur la Bourbre : le 5 janvier 2014 (40 m³/s).

L'étude statistique des débits moyens horaires (**Tableau 11**) montre que l'Arve est l'affluent du Haut-Rhône qui présente les débits les plus élevés (72 m³/s en moyenne) avec des maxima pouvant atteindre 900 m³/s. La Bourbre apparaît en revanche comme un affluent mineur avec des débits moyens horaires ne dépassant pas 40 m³/s. L'écart entre les valeurs minimum et maximum varie de un à deux ordres de grandeur selon les stations.

Tableau 11 : Statistiques descriptives des débits moyens horaires (en m³/s) mesurés sur les stations de l'OSR du Haut-Rhône entre janvier 2011 et décembre 2016.

Site	Min	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Moyenne	Max
Arve	6	38	58	90	72	902
Fier	0	6	26	46	37	620
Bourbre	2	4	7	11	9	40
Jons (Rhône)	169	350	525	756	592	2279

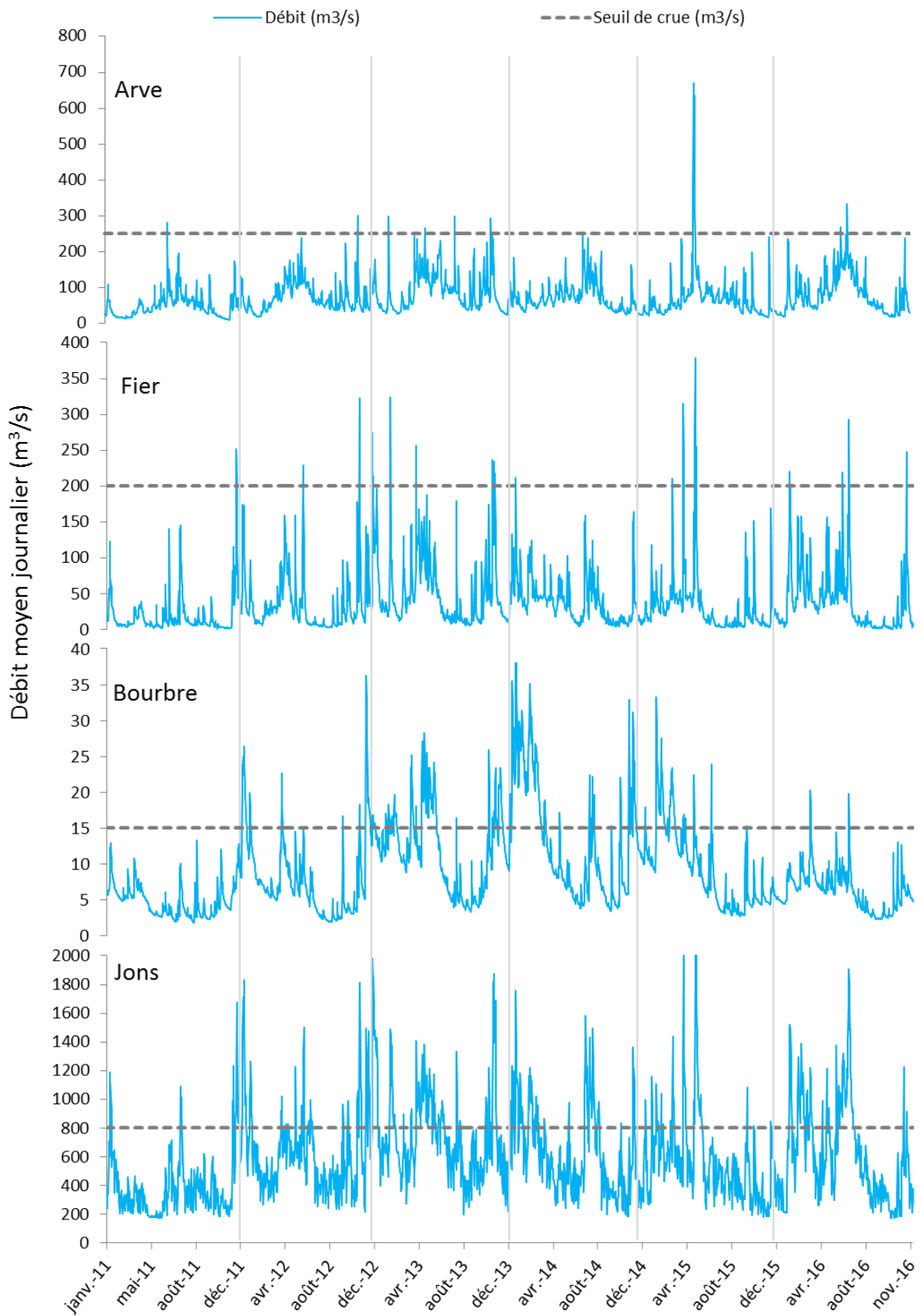


Figure 27 : Débits moyens journaliers mesurés sur le Haut-Rhône et ses affluents entre janvier 2011 et décembre 2016.

3.1.2 Rhône du Léman à la mer

Sur le Rhône à l'aval de Lyon, les affluents présentent également des dynamiques contrastées. Sur la Durance et le Gier, les crues sont courtes (un à deux jours en moyenne) et de forte intensité. A Arles (Beaucaire) et sur la Saône les périodes de crue sont plus longues et peuvent durer plus de deux semaines (**Figure 28**).

Les crues les plus importantes (débits moyens horaires) par affluents ont été mesurées :

- sur la Saône : le 24 décembre 2014 (1751 m³/s). Des crues d'intensité similaire sont observées chaque année à partir de l'automne et se poursuivent en hiver. La décrue s'amorce à la fin du printemps.
- sur le Gier : le 4 novembre 2014 (284 m³/s) et le 22 novembre 2016 (267 m³/s). Les crues sont rares sur cet affluent.
- sur l'Isère : le 2 mai 2015 (1654 m³/s). Cette crue est exceptionnelle par son intensité et correspond à période de retour de 10 ans. D'autres crues d'intensité moindre sont observées en mai 2012 (820 m³/s), novembre 2012 (935 m³/s), mai 2013 (1094 m³/s), juillet 2014 (893 m³/s) et juin 2016 (843 m³/s).
- sur la Durance : le 22 novembre 2016 (1912 m³/s). Quatre autres évènements sont observés le 6 novembre 2011 (1692 m³/s), le 11 novembre 2012 (914 m³/s), le 19 mai 2013 (1439 m³/s), le 20 janvier 2014 (1882 m³/s) et le 16 novembre 2014 (975 m³/s).
- sur le Rhône à Beaucaire : le 23 novembre 2016 (8268 m³/s). Cinq autres crues ont eu lieu en novembre 2011 (6800 m³/s), novembre 2012 (5100 m³/s), mai 2013 (6900 m³/s), janvier 2014 (6700 m³/s), et novembre 2014 (7200 m³/s).

L'évènement de novembre 2016 peut être qualifié de crue exceptionnelle et généralisée car l'ensemble du bassin du Rhône a été impacté, avec des débits très élevés sur toutes les stations excepté l'Isère.

L'étude statistique des débits moyens horaires (**Tableau 12**) montre que le Haut-Rhône présente les débits les plus élevés (592 m³/s en moyenne) avec des maxima pouvant atteindre 2300 m³/s. Le Gier est un affluent mineur avec des débits moyens horaires ne dépassant pas 300 m³/s. C'est toutefois un affluent très nerveux, l'écart entre les débits minimum et maximum pouvant atteindre trois ordres de grandeur. Même constat pour la Durance. Sur les autres stations cet écart varie seulement de un à deux ordres de grandeur.

Tableau 12 : Statistiques descriptives des débits moyens horaires (en m³/s) mesurés sur les stations de l'OSR du bassin du Rhône entre janvier 2011 et décembre 2016.

Site	Min	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Moyenne	Max
Jons (Rhône)	169	350	525	756	592	2279
Saône	0	101	244	611	421	1751
Gier	0,3	0,7	1,4	3,0	2,2	284
Isère	51	208	288	392	316	1654
Durance	5	15	34	120	92	1912
Beaucaire (Rhône)	250	905	1407	2177	1669	8268

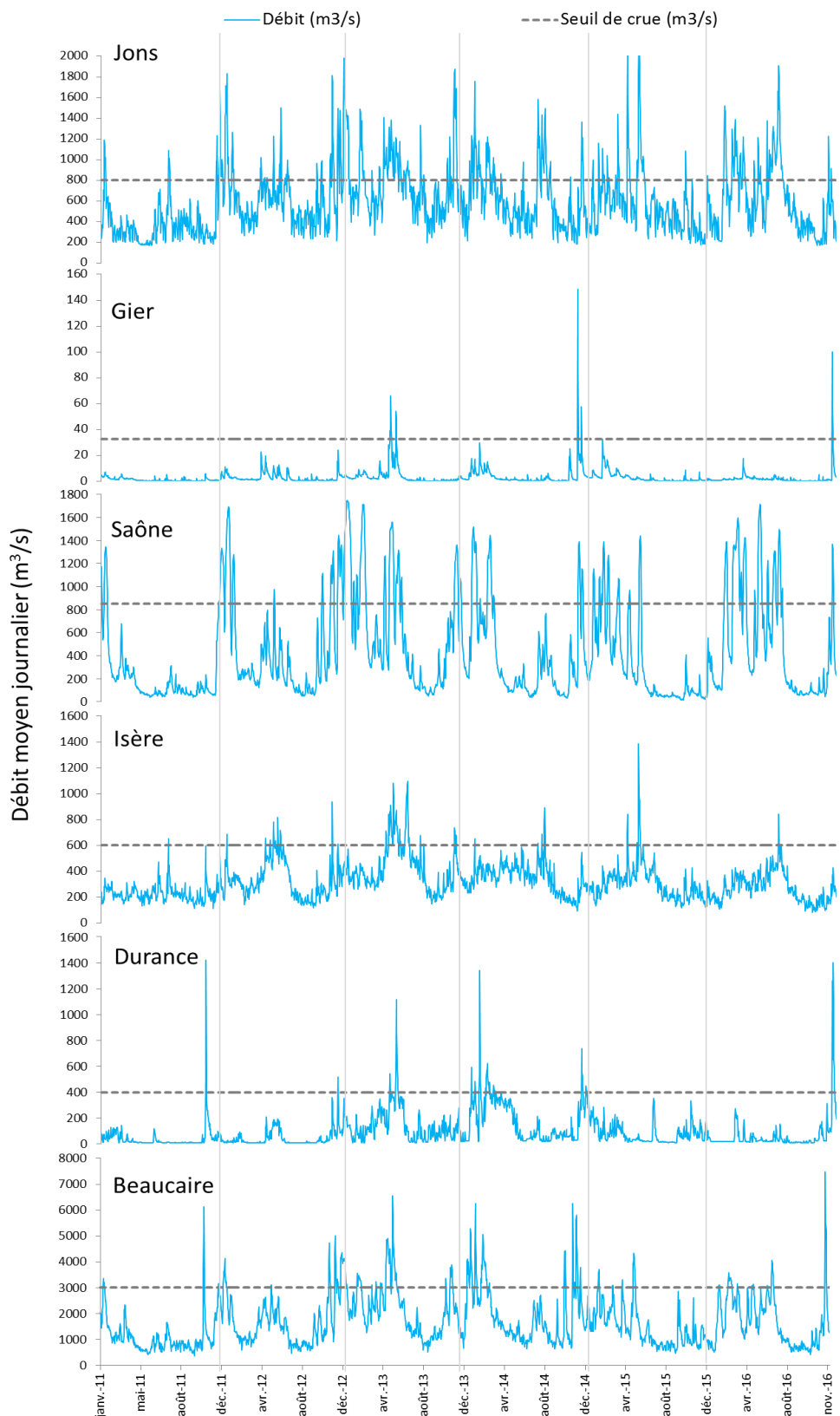


Figure 28 : Débits moyens journaliers mesurés sur le Rhône à Jons et Arles et ses principaux affluents entre janvier 2011 et décembre 2016.

3.2 Bilans de flux d'eau

Sur la période 2011-2016, le flux d'eau moyen interannuel du Rhône à Beaucaire est de $53 \times 10^9 \text{ m}^3$ (Figure 29). Le flux maximum est mesuré en 2013 ($68 \times 10^9 \text{ m}^3$), le minimum en 2011 ($36 \times 10^9 \text{ m}^3$). Le principal contributeur au flux d'eau est le Haut-Rhône (35 % en moyenne sur la période), suivi de la Saône (25 %), de l'Isère (19 %) et de la Durance (6 %). La contribution de la Durance est toutefois particulièrement variable, avec un flux qui peut passer de $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ en 2011 (contribuant à 3 % du flux d'eau à Beaucaire), à $6 \times 10^9 \text{ m}^3$ en 2013 (contribution de 10 %). La contribution du Gier peut être considérée comme négligeable, avec un flux d'eau annuel n'excédant pas $0,1 \times 10^9 \text{ m}^3$.

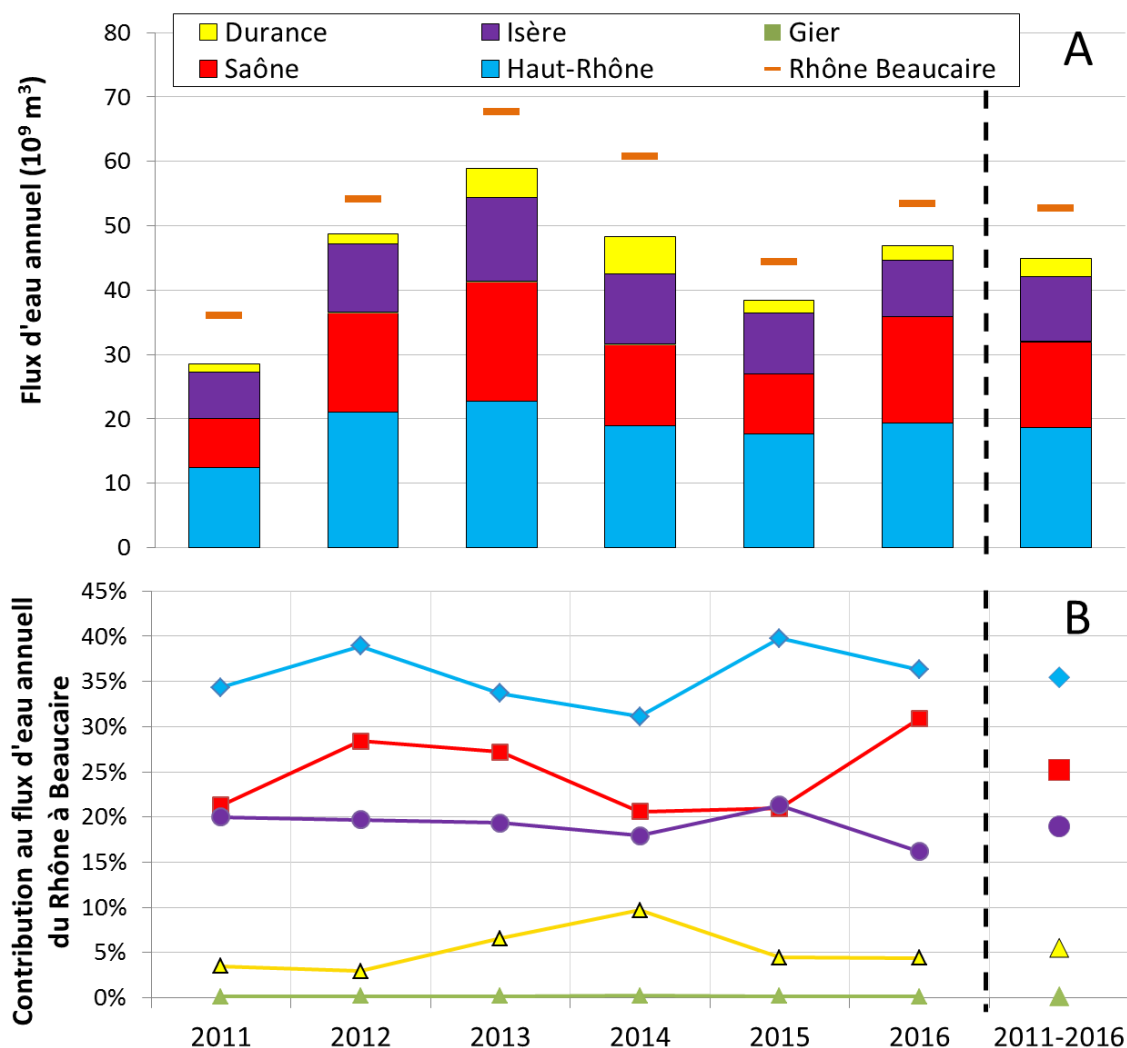


Figure 29 : Bilan de flux d'eau annuels sur le bassin du Rhône entre 2011 et 2016 (A) ; et contribution des principaux affluents (B).

Environ 15 % du flux d'eau mesuré à Beaucaire sur la période 2011-2016 ne provient pas des cinq cours d'eau étudiés (Haut-Rhône, Saône, Gier, Isère, Durance). Cette part du flux pourrait être expliquée par la surface de bassin non couverte par le Rhône à Jons et les affluents cités (21 %). Cette surface non jaugée, qui se situe principalement en plaine, a probablement un faible débit spécifique moyen et une faible sensibilité à l'érosion. C'est ce que confirment les données présentées dans le **Tableau 13**. Par conséquent, nous pouvons conclure que les bilans d'eau sont bien bouclés à l'échelle du bassin. Cela rejoint les conclusions établies par Launay (2014).

Tableau 13 : Flux d'eau annuels moyens et débits spécifiques moyens sur le Rhône et ses principaux affluents pour la période 2011-2016.

	Période 2011-2016						
	Haut Rhône	Saône	Gier	Isère	Durance	Rhône Beaucaire	Surface non jaugée
Flux d'eau (10 ⁹ m ³) (Mt)	18,69	13,29	0,10	9,98	2,92	52,70	7,72
Débit spécifique (L/s/km ²)	30	14	7	27	7	17	12
Contribution (%)	35%	25%	<1%	19%	6%	100%	15%

4 Matières en suspension

4.1 Variabilité spatio-temporelle des concentrations en matières en suspension

4.1.1 Haut-Rhône

Sur le Haut-Rhône (Tableau 14 et Figure 30), l'Arve est l'affluent le plus chargé en MES, avec une moyenne des concentrations de 129 mg/L sur la période 2011-2016. C'est presque six fois plus que les concentrations moyennes observées à Jons et sur le Fier, les stations les moins turbides. L'écart entre les concentrations minimales et maximales varie de 3 (Jons) à 5 ordres de grandeur (Arve) selon les stations.

Tableau 14 : Statistiques descriptives des concentrations en matières en suspension (moyennes horaires en mg/L) sur le Haut-Rhône et ses affluents entre janvier 2011 et décembre 2016. Les lacunes ont été reconstituées. (les concentrations inférieures à 5 mg/L sont jugées très incertaines).

Site	Min	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Moyenne	Max
Arve	1	19	52	123	129	22908
Fier	1	5	7	11	29	4470
Bourbre	17	52	61	70	78	2405
Jons (Rhône)	1	3	7	17	21	905

Les concentrations en MES les plus élevées (moyennes horaires) sont généralement observées lors des crues :

- A Jons : le 13 juin 2012 (905 mg/L) lors des chasses de barrage, et le 3 mai 2015 (785 mg/L) au cours de la crue la plus importante observée sur la période.
- Sur l'Arve : le 25 juillet 2015 (22908 mg/L). Cette concentration très élevée est surprenante car à cette date le cours d'eau n'était pas en crue et le débit était modéré (80 m³/s).
- Sur le Fier : le 2 mai 2015 (4470 mg/L), au cours de la crue exceptionnelle du 2 mai 2015 (période de retour > 2 ans).
- Sur la Bourbre : le 5 janvier 2014 (2405 mg/L) au cours de l'une des crues les plus importantes observées sur la période.

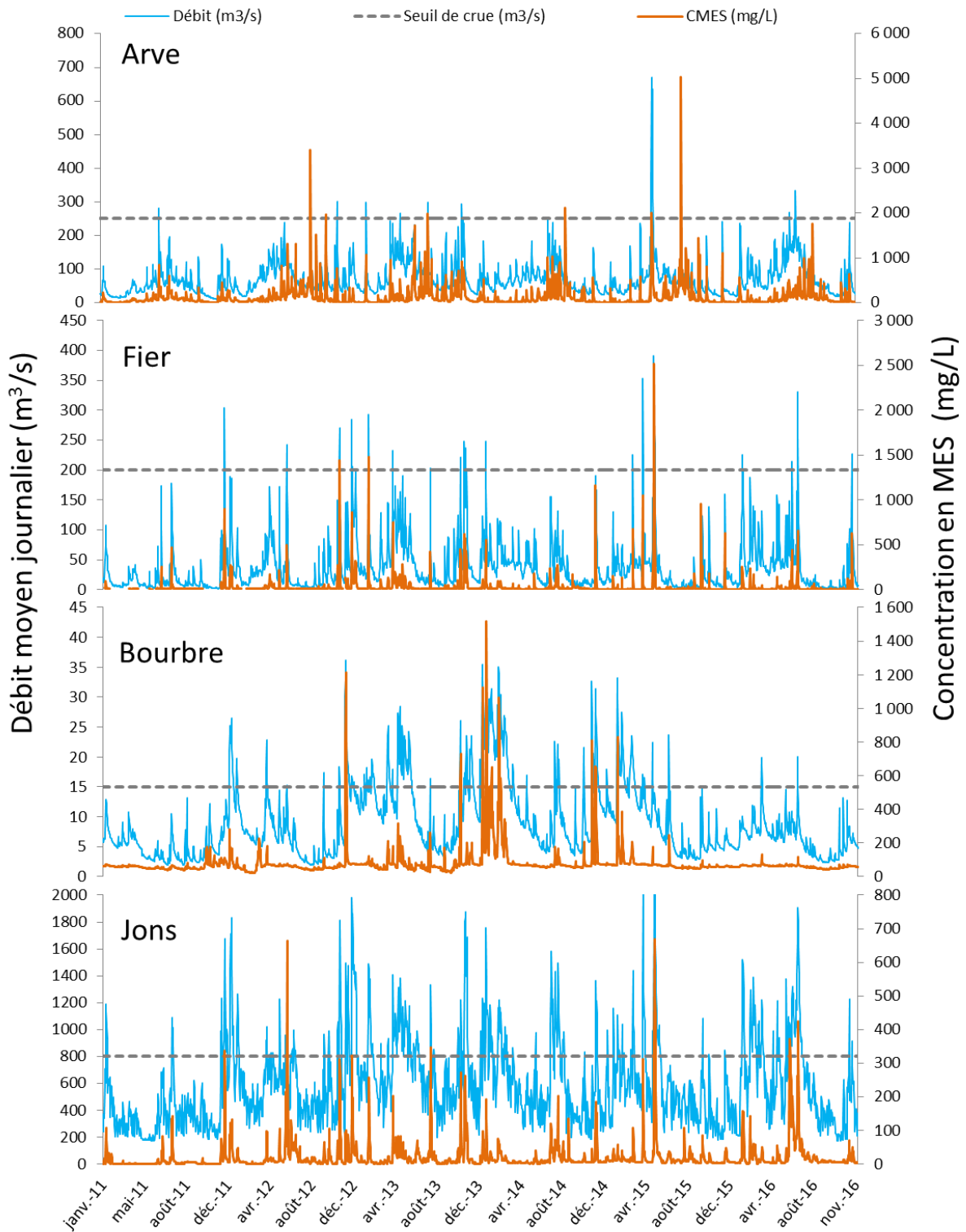


Figure 30 : Débits et concentrations en MES (moyennes journalières) sur le Haut-Rhône à Jons et ses principaux affluents entre janvier 2011 et décembre 2016. Les lacunes de concentrations en MES ont été reconstituées (cf. Chapitre 2).

4.1.2 Rhône du Léman à la mer

Sur le Rhône à l'aval de Lyon (**Tableau 15** et **Figure 31**), l'affluent le plus chargé en MES est la Durance, avec une concentration de 111 mg/L en moyenne sur la période 2011-2016. Vient ensuite l'Isère avec une concentration moyenne de 85 mg/L. Les maxima peuvent atteindre 20 g/L sur ces deux affluents. C'est 50 fois plus que sur la Saône, l'affluent le moins turbide. L'écart entre les concentrations en MES maximales et minimales (moyennes horaires) varie de 3 (Saône) à 6 ordres de grandeur (Durance) selon les stations. La variabilité des concentrations en MES est donc trois fois plus élevée que pour les débits.

Tableau 15 : Statistiques descriptives des concentrations en matières en suspension (moyennes horaires, en mg/L) sur le Rhône et ses affluents entre janvier 2011 et décembre 2016. Les lacunes ont été reconstituées. (les concentrations inférieures à 5 mg/L sont jugées très incertaines).

Site	Min	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Moyenne	Max
Jons	1	3	7	17	21	905
Saône	1	5	9	18	14	393
Gier	1	3	6	13	15	1984
Isère	2	14	21	41	85	23928
Durance	1	8	15	60	111	20844
Arles	1	8	19	48	57	5869

A quelques rares exceptions près (chasses de juin 2012 sur le Haut-Rhône par exemple), les concentrations en MES les plus élevées (moyennes horaires) sont observées lors des crues :

- Sur la Saône : en 2016 (393 mg/L), lors de la crue généralisée du 22 novembre 2016.
- Sur le Gier : le 17 septembre 2015 (1980 mg/L), au cours de la crue la plus importante observée sur la période.
- Sur l'Isère : en 2015 (23930 mg/L), au cours de la crue exceptionnelle du 2 mai 2015 (période de retour > 10 ans).
- Sur la Durance : en 2016 (20840 mg/L) au cours de la crue généralisée du 23 novembre 2016.
- A Arles : au cours de la crue généralisée du 23 novembre 2016 (5870 mg/L).

La crue de novembre 2016 revêt donc un caractère exceptionnel non seulement par son aspect généralisé mais également par l'importance des concentrations en MES observées, maximales pour la période sur la Durance, la Saône et sur le Rhône à Arles.

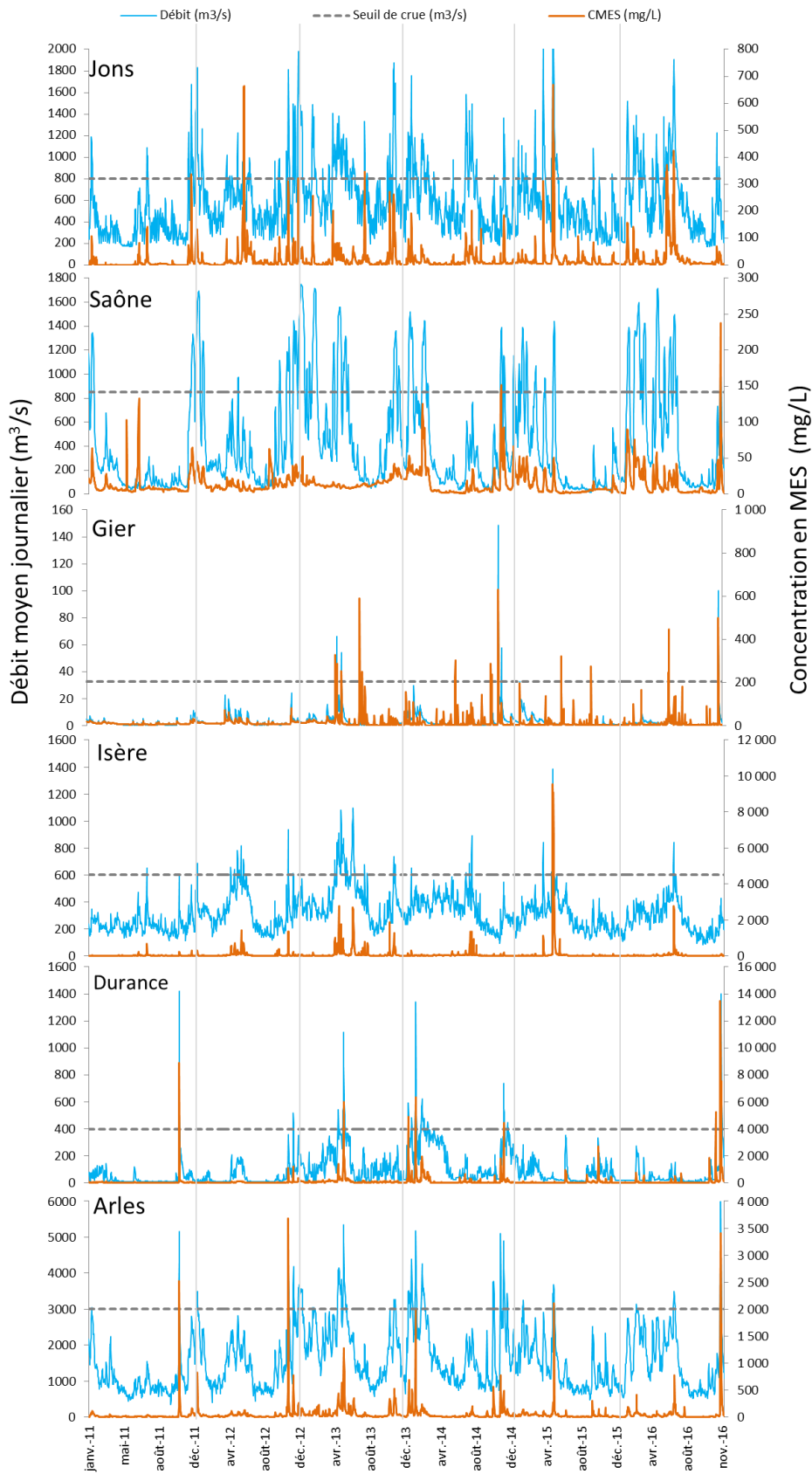


Figure 31 : Débits et concentrations en MES (moyennes journalières) sur le Rhône à Jons et Arles et ses principaux affluents entre janvier 2011 et décembre 2016. Les lacunes de concentrations en MES ont été reconstituées (cf. Chapitre 2).

4.2 Flux de matières en suspension sur le Rhône et ses affluents

4.2.1 Haut-Rhône

Les flux mensuels et annuels de MES ont été calculés pour la période 2011-2016 sur le Haut-Rhône et ses affluents (**Figure 32** et **Annexe 6**). Les chroniques de concentrations en MES ont été préalablement complètes selon la méthode détaillée au Chapitre 2.

Sur l'Arve, les flux annuels de MES ont varié entre 0,22 Mt (2011) et 0,88 Mt (2015) au cours de la période étudiée, avec un pourcentage de variation annuel de 42 %. En 2015, la crue de mai (la plus importante de la période) est à l'origine de 48 % des apports annuels.

Sur le Fier, les flux annuels de MES minimum (0,082 Mt) et maximum (0,31 Mt) sont mesurés en 2011 et 2015 respectivement. Le pourcentage de variation annuel est de 53 %. La crue la plus intense est observée en mai 2015 et représente 62 % du flux annuel.

Les flux de MES de la Bourbre varient fortement d'une année à l'autre (variation de 80 % sur la période) et sont passés de 0,011 Mt (2011) à 0,084 Mt (2014). La crue de janvier 2014 représente 84 % du flux annuel.

Les flux annuels de MES mesurés à Jons sur le Haut-Rhône sont en lien avec les variations observées sur les affluents. Ainsi, comme pour tous les affluents, le flux mesuré en 2011 (0,25 Mt) est le plus faible de la période. Le flux maximum est mesuré en 2016 (0,95 Mt), mais ce chiffre inclue les MES libérées lors des chasses de barrage de juin 2016 ($\approx 0,19$ Mt).

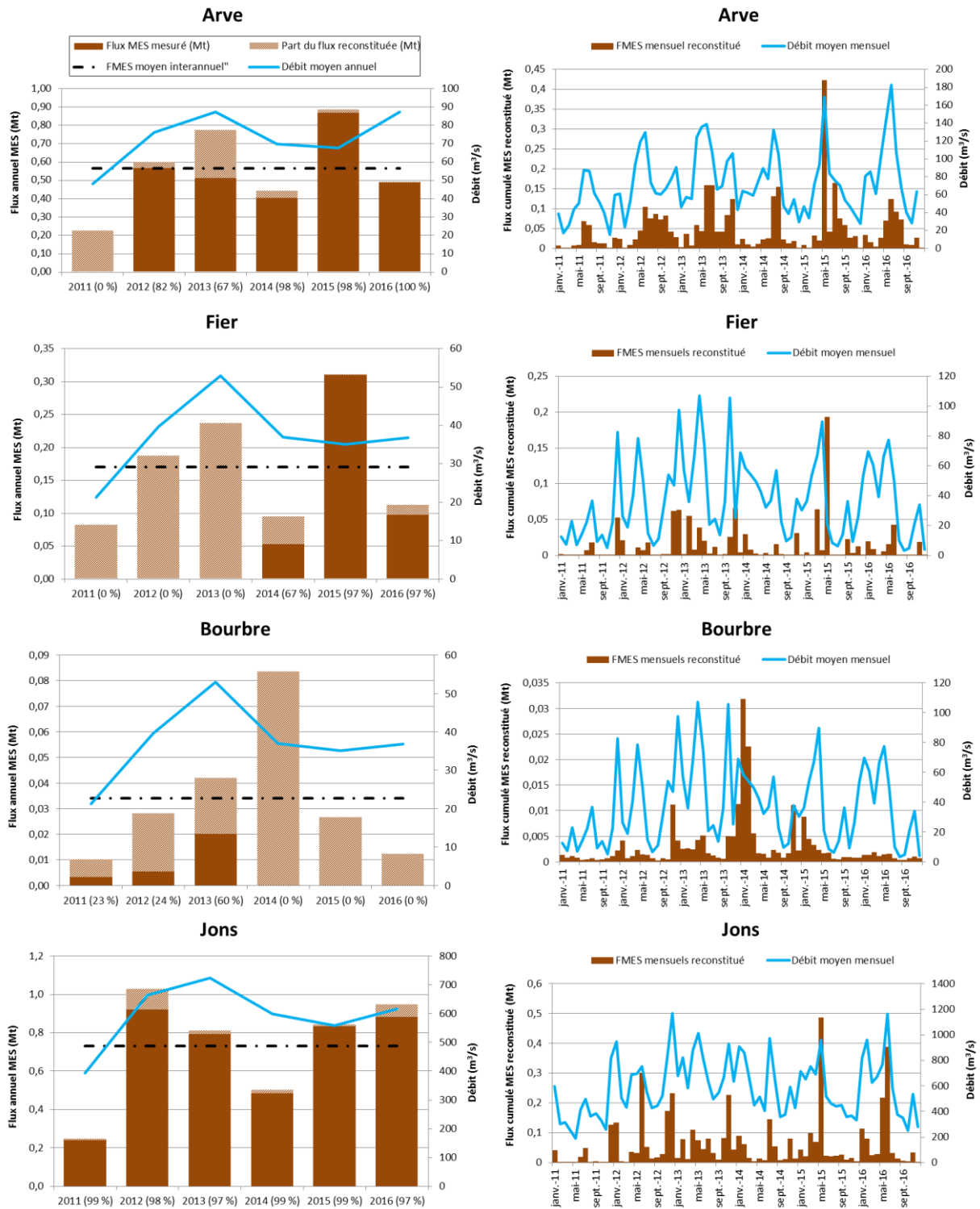


Figure 32 : Flux mensuels et annuels de MES sur le Haut-Rhône et ses affluents entre 2011 et 2016. Les lacunes ont été reconstituées. Le pourcentage de données mesurées (valeurs moyennes horaires) est indiqué entre parenthèses. La part du flux annuel attribuable à des données extrapolées est indiquée en marron clair.

4.2.2 Rhône du Léman à la mer

Les flux de MES ont été calculés pour la période 2011-2016 sur le Rhône en aval de Lyon et ses affluents (**Figure 33** et **Annexe 7**). Les chroniques de concentrations en MES ont été préalablement complétées selon la méthode détaillée au Chapitre 2.

Sur la Saône, les flux de MES minimum (0,17 Mt) et maximum (0,50 Mt) sont mesurés en 2011 et 2016 respectivement. Comme à Jons, le pourcentage de variation annuel est de 40 %. La crue la plus intense est observée en février 2014 et représente 33% du flux annuel.

Les flux de MES du Gier varient fortement d'une année à l'autre (variation de 80 % sur la période) et sont passés de 0,001 Mt (2011) à 0,18 Mt (2014). La crue de novembre 2014 représente 75 % du flux annuel.

Sur l'Isère, les flux annuels de MES ont varié entre 0,25 Mt (2011) et 4,3 Mt (2015) au cours de la période étudiée, avec un pourcentage de variation annuel de 92 %. Cette forte variation annuelle est due à l'importante augmentation des charges en MES lors des crues sur cet affluent. En 2015, la crue de mai (la plus importante de la période) est à l'origine de 90 % des apports annuels.

Sur la Durance, les flux de MES minimum (0,30 Mt) et maximum 4,9 (Mt) sont mesurés en 2012/2015 et 2016 respectivement. Comme sur l'Isère, les flux sont extrêmement variables d'une année à l'autre (70 %). La crue la plus intense est observée en novembre 2016 et représente 95 % du flux annuel.

Les flux annuels de MES mesurés à l'embouchure de Rhône (station de Beaucaire) sont globalement le reflet des variations observées sur les affluents. Ainsi, comme pour la plupart des affluents (excepté la Durance), le flux mesuré en 2011 (3,0 Mt) est l'un des plus faibles de la période. Le flux maximum est mesuré en 2013 (8,8 Mt) et est à mettre en relation avec des crues successives ayant eu lieu sur l'Isère et la Durance entre avril et juin. Étonnamment, la crue exceptionnelle de mai 2015 observée sur l'Isère n'a pas entraîné d'augmentation du flux de MES à Beaucaire, qui reste faible cette année-là (2,8 Mt).

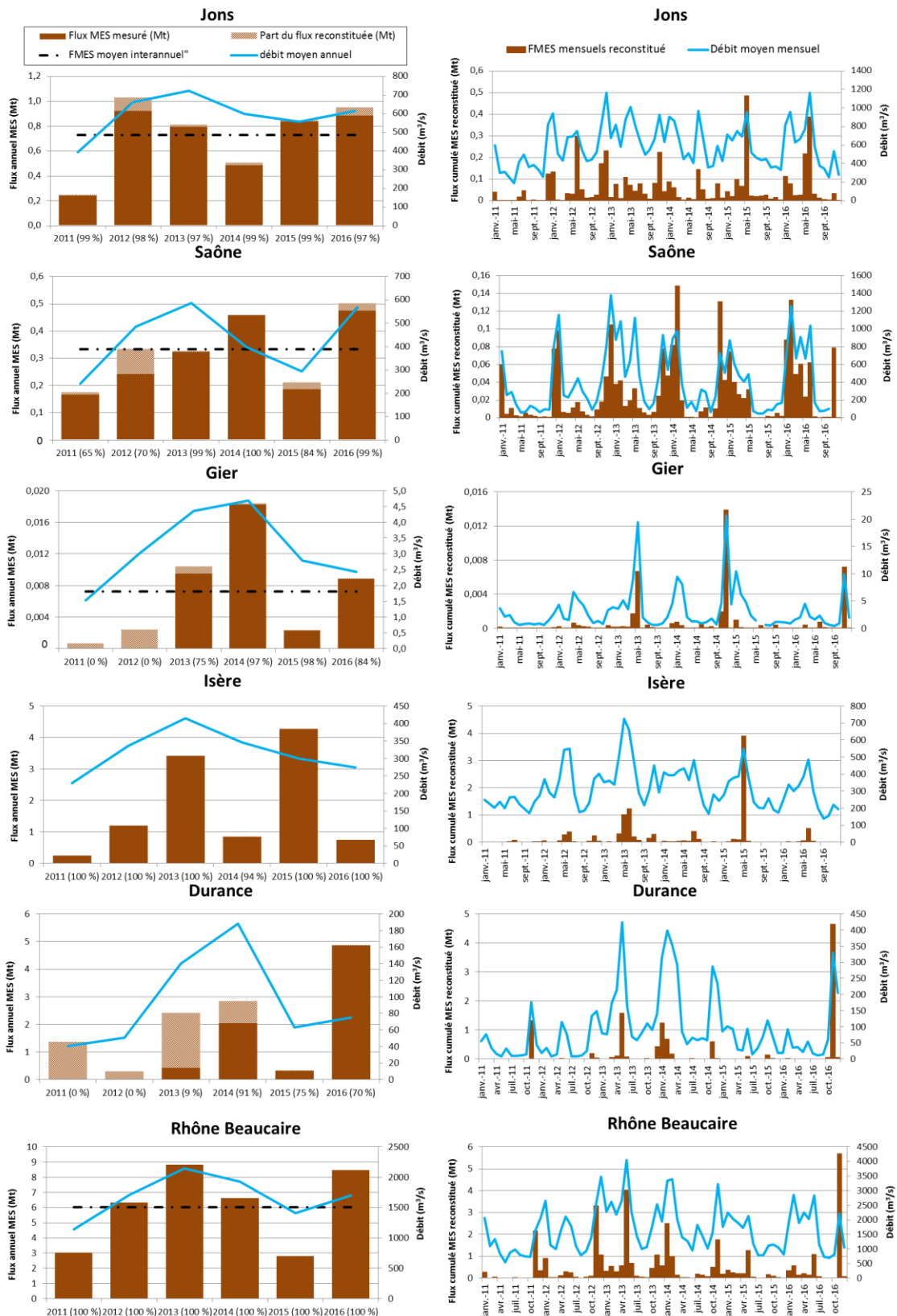


Figure 33 : Flux mensuels et annuels de MES sur le Rhône et ses affluents entre 2011 et 2016. Les lacunes ont été reconstituées. Le pourcentage de données mesurées (valeurs moyennes horaires) est indiqué entre parenthèses. La part du flux annuel attribuable à des données extrapolées est indiquée en marron clair.

4.3 Bilans de flux de MES

4.3.1 Haut-Rhône

Sur la période 2011-2016, le flux de MES moyen interannuel du Rhône à Jons est de 0,73 Mt (**Figure 34**). Le principal contributeur au flux de MES est l'Arve (78% en moyenne sur la période), suivie du Fier (23%), puis de la Bourbre (5%). Ces résultats, obtenus à partir de données mesurées, confirment les estimations de Launay (2014), identifiant l'Arve et le Fier comme les principaux contributeurs au flux de MES du Rhône à Jons.

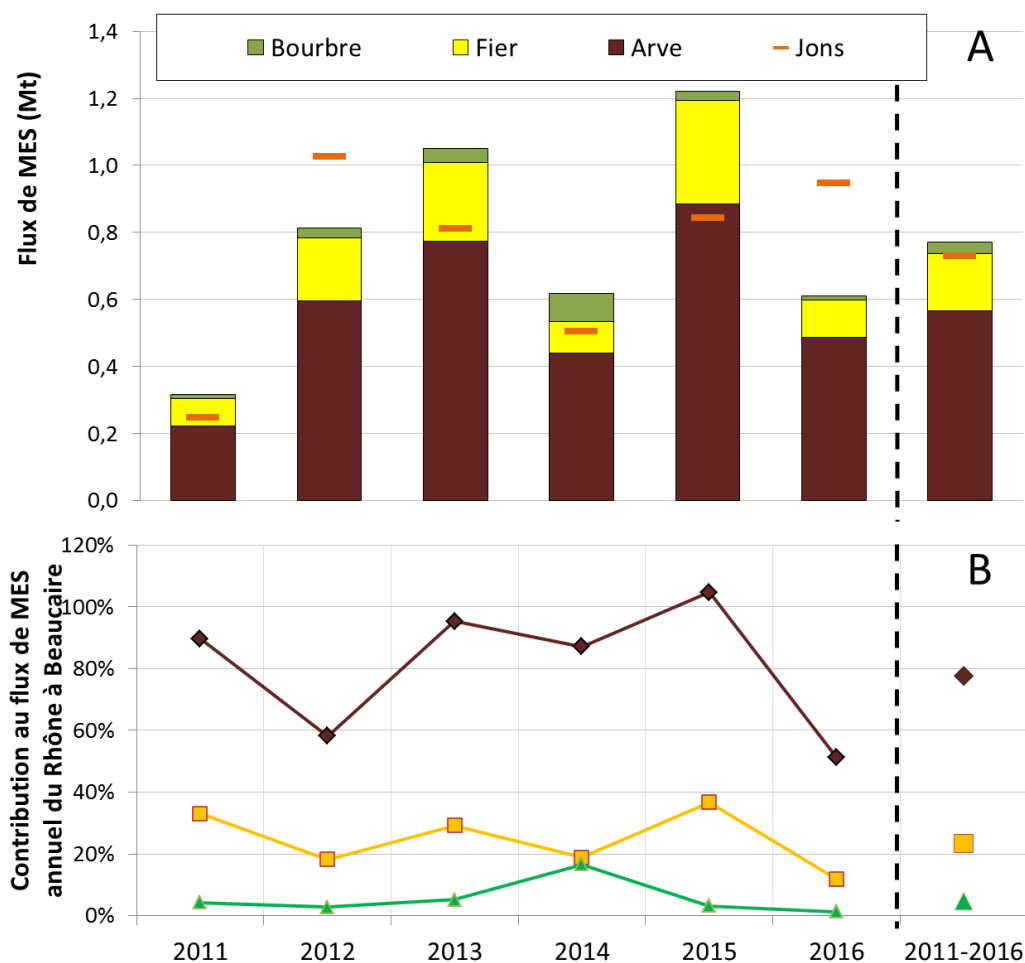


Figure 34 : Bilan de flux de MES annuels et moyen interannuel sur la bassin du Haut-Rhône entre janvier 2011 et décembre 2016 (A) ; et contribution des principaux affluents (B).

Le bilan de flux de MES moyen interannuel est globalement équilibré sur la période 2011-2016, mais on peut observer des excédents en 2013, 2014 et 2015, les apports des affluents étant supérieurs aux flux mesurés à Jons. Cet écart peut signifier que des dépôts de MES ont lieu dans le réseau hydrographique à l'échelle annuelle (notamment dans les réservoirs de barrages hydroélectriques). En 2012 et 2016, le bilan est déficitaire, ce qui peut s'expliquer par les chasses de barrages réalisées en juin 2012 et mai 2016 qui ont libéré un stock de MES mesurés dans le Rhône à Jons, mais ne provenant pas des affluents. Ces résultats confirment également les observations de Launay (2014), qui évaluait à 0,2 Mt le stock de MES pouvant être stocké dans le réseau annuellement, et constatait un rétablissement à l'équilibre par les chasses de barrages.

4.3.2 Rhône du Léman à la mer

Sur la période 2011-2016, le flux de MES moyen interannuel du Rhône à Beaucaire est de 6,0 Mt (Figure 35). Le principal contributeur au flux de MES est la Durance (34 % en moyenne sur la période), suivie de l'Isère (30 %), du Haut-Rhône (11 %) et de la Saône (6 %). La contribution de la Durance est particulièrement variable, avec un flux qui varie de 0,3 Mt en 2012 (contribuant à 5 % du flux de MES à Beaucaire), à 4,9 Mt en 2016 (contribution de 58 %). La contribution du Gier peut être considérée comme négligeable, avec un flux de MES annuel n'excédant pas 0,1 Mt. Ces résultats sont en accord avec les observations de Launay (2014), identifiant l'Isère et la Durance comme les principaux contributeurs au flux de MES du Rhône à Beaucaire.

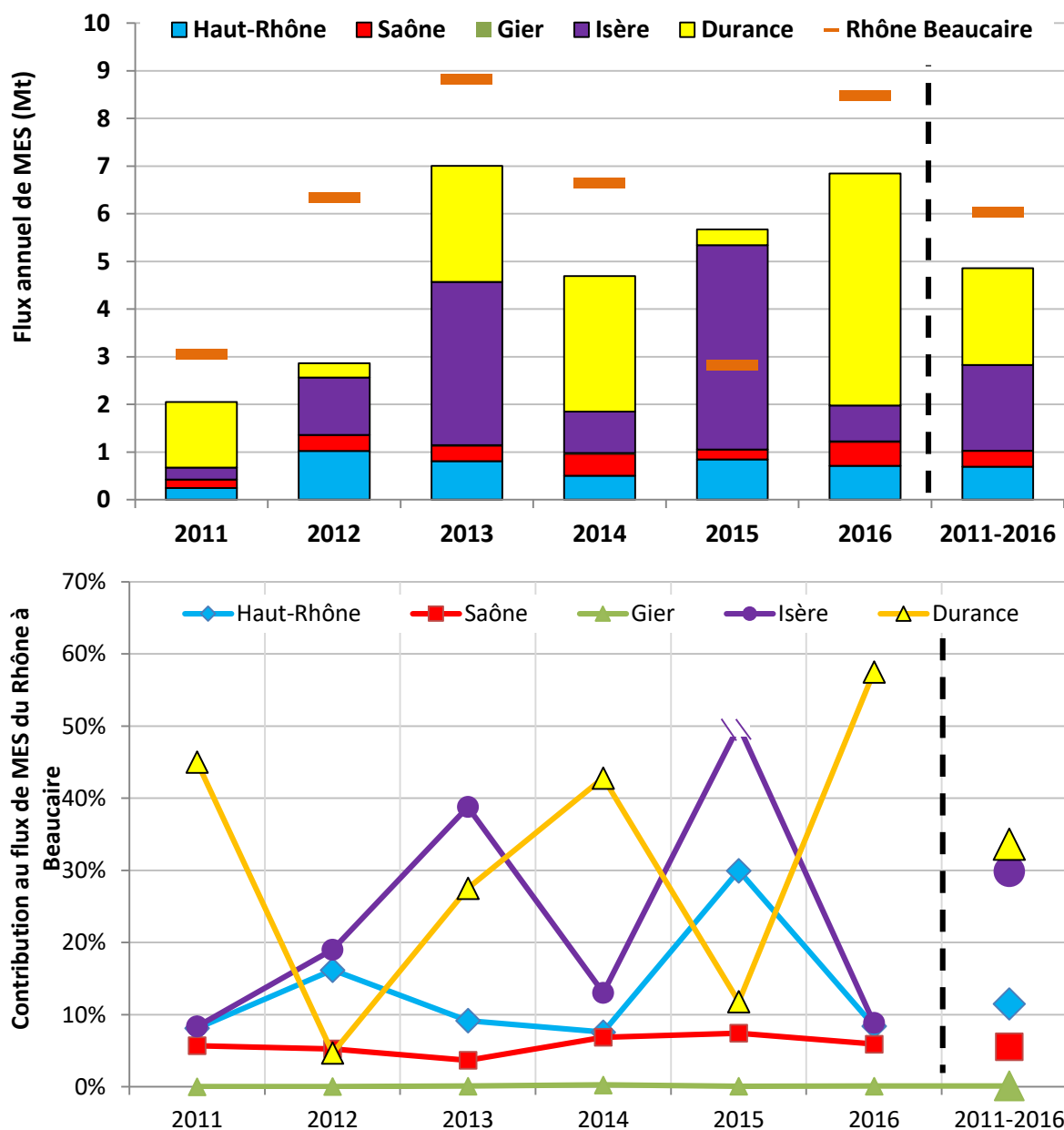


Figure 35 : Bilan de flux de MES annuels et moyen interannuel sur le bassin du Rhône entre janvier 2011 et décembre 2016 (A) ; et contribution des principaux affluents (B). En 2015 la contribution de l'Isère n'est pas indiquée sur le graphique car > 100 %.

Environ 19 % (1,2 Mt) du flux de MES moyen interannuel mesuré à Beaucaire sur la période 2011-2016 ne provient pas des cinq cours d'eau étudiés (Haut-Rhône, Saône, Gier, Isère, Durance). Cette part du flux pourrait être expliquée par la surface de bassin non couverte par les affluents cités (21 %), notamment les affluents cévenols (Gardon, Ardèche, Cèze), dont la contribution a été estimée à environ 10 % par Sadaoui *et al.* (2016). Ces apports pourraient aussi être engendrés par des déstockages de sédiments au sein du réseau hydrographique. Les flux spécifiques calculés pour les affluents, ainsi que pour la surface de bassin non documentée, sont présentés dans le **Tableau 16**.

Tableau 16 : Flux de MES moyen interannuel et flux spécifiques moyens de MES sur le Rhône et ses affluents pour la période 2011-2016.

	Période 2011-2016						
	Haut Rhône	Saône	Gier	Isère	Durance	Rhône Beaucaire	Surface non jaugée
FMES (Mt)	0,73	0,33	0,01	1,80	2,03	6,02	1,13
Flux spécifique (t/km ²)	36	11	17	152	143	63	55
Contribution (%)	12%	6%	<1%	30%	34%	100%	19%

L'année 2015 représente un cas particulier avec un bilan excédentaire, la somme des apports des affluents représentant approximativement le double du flux de MES mesuré à Beaucaire (2,8 Mt) (cf. **Annexe 7**). Cet excédent est principalement attribuable à l'Isère dont la crue de mai 2015 a occasionné une importante charge en MES (près de 4 Mt) (cf. **Figure 33**), qui n'a probablement pas été véhiculée jusqu'à Beaucaire. Ainsi, les 2,9 Mt de MES manquant à l'embouchure du Rhône pourraient donc avoir été stockées dans le réseau hydrographique entre les deux stations au cours de cet événement.

5 Conclusion du chapitre 3 et perspectives

Grâce aux données acquises au cours de ce nouveau cycle de l'OSR, nous avons pu confirmer que l'Arve est le principal contributeur au flux d'eau et flux de MES du Haut-Rhône.

A l'échelle de l'ensemble du bassin (Haut-Rhône et Rhône aval de Lyon), le Haut-Rhône représente le principal contributeur au flux d'eau, suivi de la Saône. Cette répartition est grandement modifiée lorsque l'on s'intéresse au flux de MES. En raison de concentrations en MES extrêmement élevées en périodes de crue, l'Isère et la Durance contribuent chacun à plus de 30 % des apports en MES du Rhône, alors que leurs apports d'eau sont nettement inférieurs : 20 % (Isère) et 10 % (Durance).

Les bilans d'eau et de MES sont globalement équilibrés sur la période 2011-2016, entre les apports des affluents et l'export à la mer, compte tenu des affluents non étudiés. L'évaluation des apports des affluents cévenols devrait être améliorée, avec l'instrumentation récente d'une station sur l'Ardèche (janvier 2016) et sur le Gardon (juin 2017). L'instrumentation de la Drôme est prévue en 2018.

Chapitre 4. Flux de contaminants en 2014, 2015 et 2016

Gaëlle Poulhier, Julie Gattacceca, Hugo Lepage, Cécile Miège, Jérôme Le Coz, Marina Coquery

1 Objectifs

Ce chapitre a pour objet de présenter les résultats de flux de contaminants particuliers (PCBi, mercure, ETM et radionucléides) qui ont été calculés sur le Rhône et ses affluents pour les années 2014, 2015 et 2016. Dans un premier temps, la variabilité spatiale des concentrations en micropolluants est étudiée afin d'identifier les affluents les plus contaminés. Les flux annuels sont ensuite détaillés et interprétés en termes de variabilité, de contribution des différents affluents et de bilan à l'échelle du bassin du Rhône.

2 Variabilité spatiale des concentrations en contaminants

2.1 PCB indicateurs

Les concentrations en PCB indicateurs montrent une forte variabilité spatiale à l'échelle du bassin du Rhône (**Figure 36**). Pour les PCB les plus fréquemment quantifiés (PCB 138, PCB 180 et PCB 153), les niveaux de contamination sont 20 à 50 fois plus élevés sur la Bourbre (médiane 5 – 13 µg/kg) et le Gier (médiane 21 – 25 µg/kg) par rapport à la Durance, la station la moins contaminée (< 0,5 µg/kg). Il y a peu de différence entre les concentrations mesurées sur la Saône, l'Isère, le Fier, à Jons et à Arles. Ces stations ont des niveaux de contamination que l'on peut qualifier d'intermédiaire (médiane entre 1,1 et 4,1 µg/kg). L'Arve et l'Ardèche sont très peu contaminées en PCBi (entre 0,5 et 1,0 µg/kg).

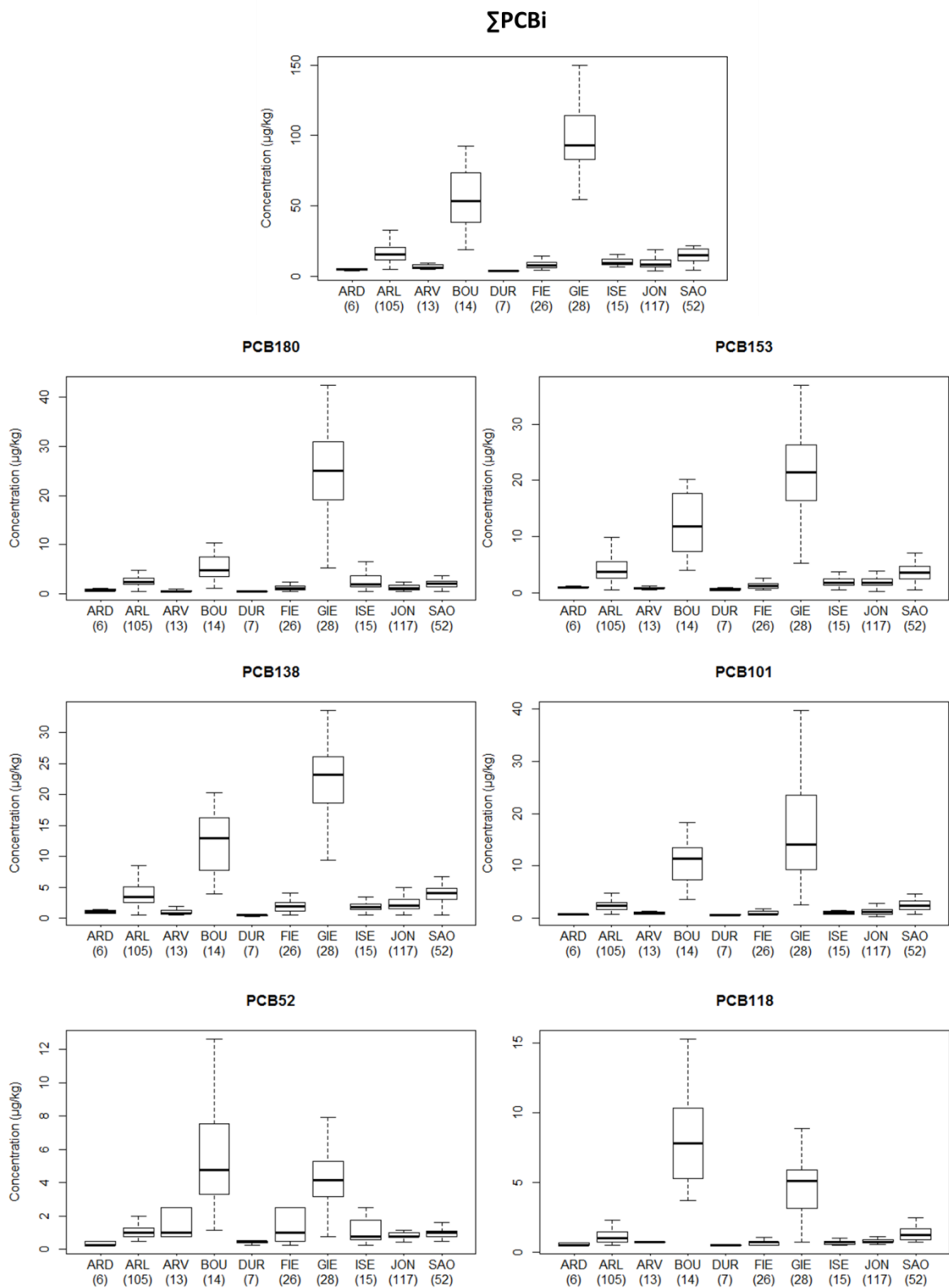


Figure 36 : Variabilité spatiale des concentrations en PCB indicateurs sur le bassin du Rhône. Le PCB 28 n'est pas représenté en raison de sa faible fréquence de quantification. (pour le calcul de la Σ PCBi, les concentrations <LQ sont remplacées par LQ).

2.2 Mercure

On observe une forte variabilité spatiale des concentrations en mercure à l'échelle du bassin du Rhône. La Saône et le Gier apparaissent clairement comme les sites les plus contaminés avec des concentrations 7 à 10 fois plus élevées (médiane 0,17-0,28 mg/kg) que l'Arve, le site le moins contaminé (médiane 0,02 mg/kg). Suivent ensuite la Bourbre et Arles (médiane 0,10-0,13 mg/kg), puis l'Isère, l'Ardèche et la Durance (0,05-0,07 mg/kg). L'Arve, le Fier, l'Ardèche, la Durance et Jons ont des niveaux de pollution que l'on peut qualifier de faibles à l'échelle du bassin (médiane $\leq 0,05$ mg/kg).

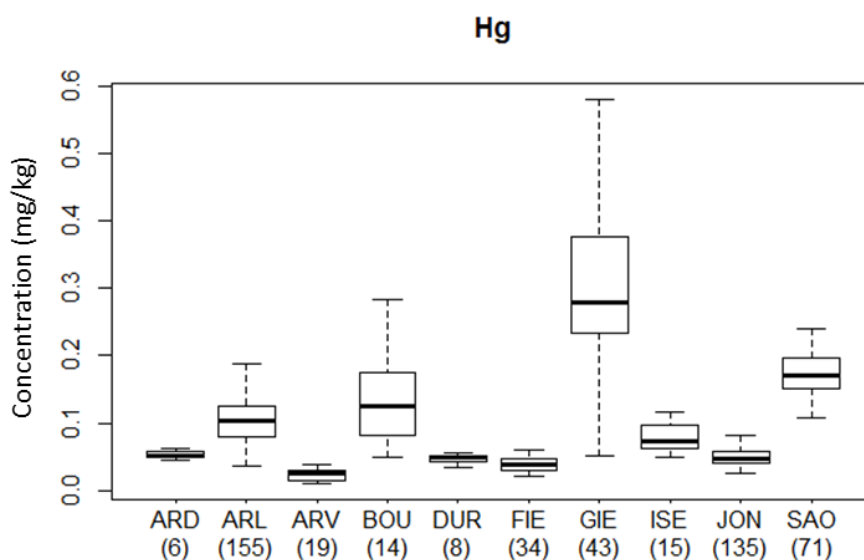


Figure 37 : Variabilité spatiale des concentrations en mercure sur le bassin du Rhône entre 2011 et 2016. Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre d'échantillons analysés.

2.3 Eléments Trace Métalliques

On observe quelques variabilités spatiales bien marquées des concentrations en ETM à l'échelle du bassin du Rhône (Figure 40). Les affluents du bassin cévenols (Ardèche, Cèze, Gardon) présentent les concentrations les plus importantes en Cd, Co, Cu, Pb, Zn et As (sauf Ardèche) avec des concentrations jusqu'à 20 fois plus élevées par rapport au site le moins contaminé pour chaque élément. La Cèze et le Gardon présentent des valeurs médianes en ces métaux qui dépassent le TEC-PEC², bien que les concentrations des mêmes ETM mesurés sur le Rhône à Arles en aval se retrouvent en dessous de ce seuil par effet de dilution.

A l'échelle du bassin, l'Ain, l'Ouvèze, la Drôme et la Durance présentent de manière générale les niveaux de concentrations les plus faibles pour chaque élément. Le nickel et le chrome sont les éléments qui présentent le moins de variabilité à l'échelle du bassin du Rhône : l'Ain présente les concentrations les plus basses (19,7 mg/kg et 38,6 mg/kg en moyenne pour Ni et Cr respectivement). L'Isère et la Saône sont les affluents qui présentent les concentrations les plus élevées avec des moyennes respectives en Ni et Cr de 43,4 et 44,7 mg/kg et 83,6 et 97,5 mg/kg.

² TEC (Threshold effect concentration) et PEC (Probable effect concentration) sont les écotoxicologiques seuils « sans effet » et « effet très probable » proposés par MacDonald et al 2000]

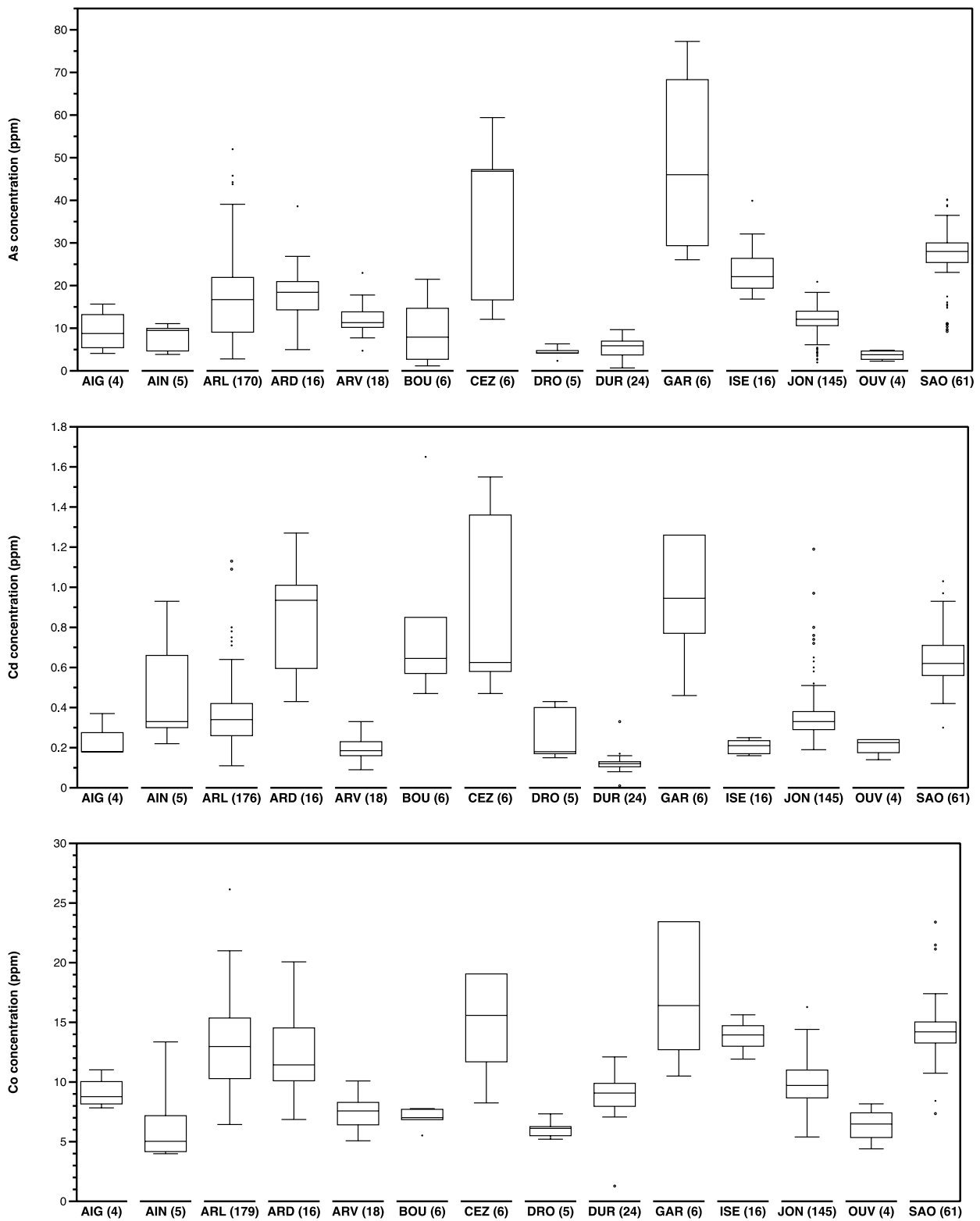


Figure 38 : Variabilité spatiale des concentrations en éléments trace métalliques (ETM en mg/kg) sur le bassin du Rhône entre 2011 et 2016. Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre d'échantillons analysés. – As, Cd, Co

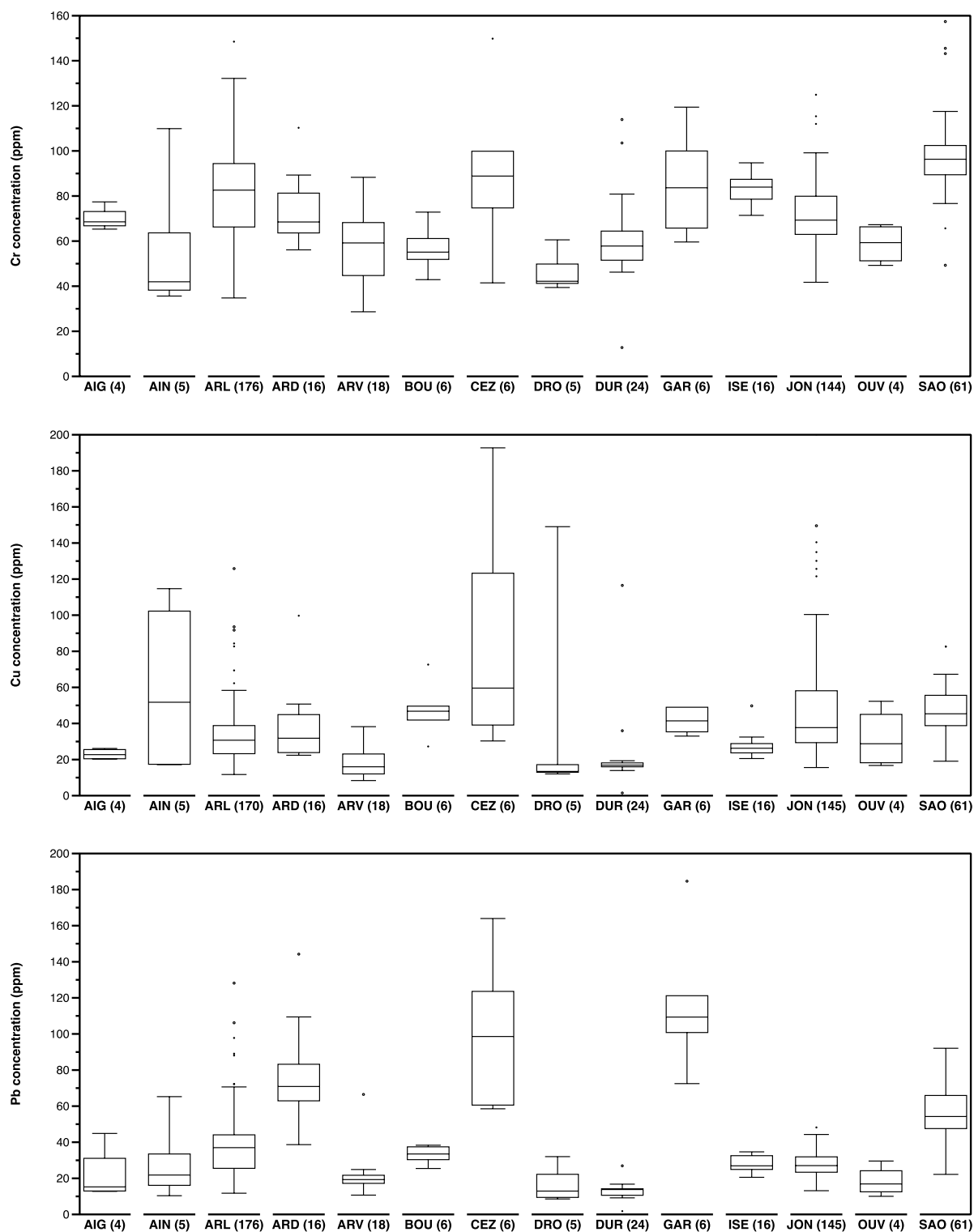


Figure 39 : Variabilité spatiale des concentrations en éléments trace métalliques (ETM en mg/kg) sur le bassin du Rhône entre 2011 et 2016. Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre d'échantillons analysés. – Cr, Cu, Pb

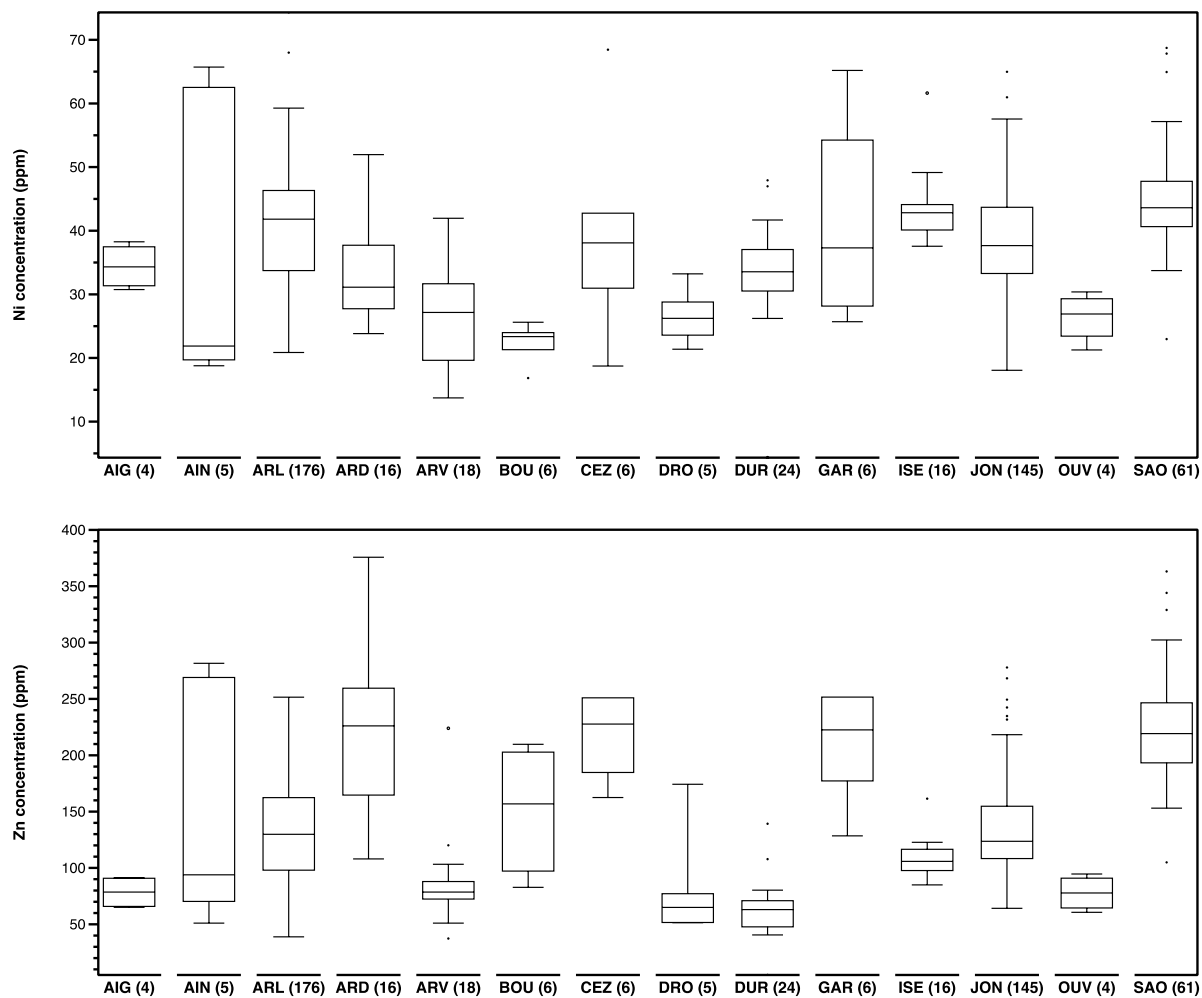


Figure 40 : Variabilité spatiale des concentrations en éléments trace métalliques (ETM en mg/kg) sur le bassin du Rhône entre 2011 et 2016. Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre d'échantillons analysés. – Ni, Zn.

2.4 Radionucléides

Les concentrations du Césium-137, seul radionucléide artificiel quantifié de façon systématique, varie généralement peu entre les différentes stations (**Figure 41**). Ainsi, 75% des mesures se situent entre 5,2 et 13,2 Bq/kg. Ces niveaux sont majoritairement issus des sols contaminés par les retombées de l'accident de Tchernobyl et des essais des bombes dans l'hémisphère Nord. Les différences observées entre les affluents viennent du fait que les retombées n'étaient pas homogènes et que les niveaux rencontrés varient spatialement.

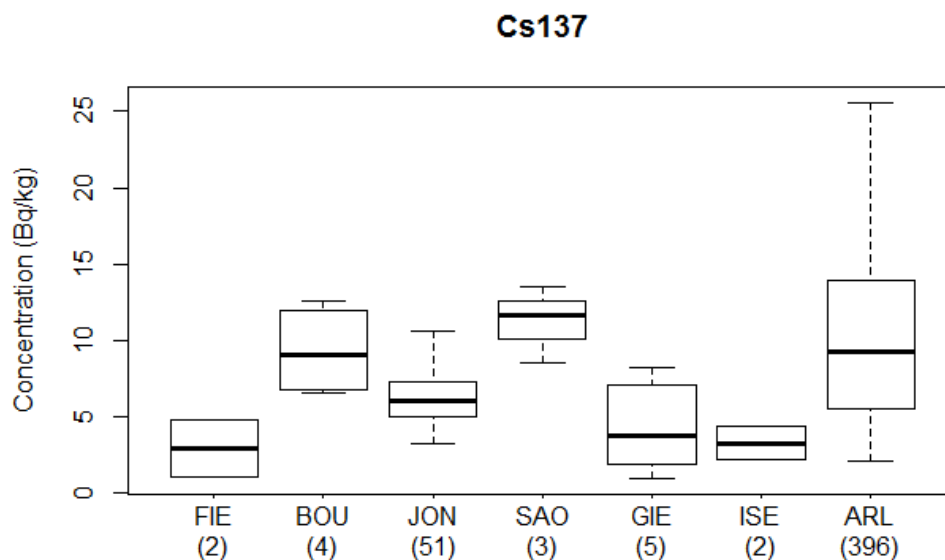


Figure 41 : Variabilité spatiale des concentrations Césium-137 sur le bassin du Rhône. Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre d'échantillons analysés.

3 Flux de contaminants sur le Rhône et ses affluents en 2014, 2015 et 2016

Les flux de contaminants ont été calculés en 2014, 2015 et 2016, année à partir de laquelle les concentrations en contaminants étaient mesurées sur la plupart des affluents. Nous étudions ici la contribution des affluents les plus importants que sont la Saône, la Durance et l'Isère, en plus des apports du Haut-Rhône (Jons). Sur l'Isère et la Durance, dont le suivi n'a débuté qu'en fin 2014 et 2015 respectivement, les concentrations en PCB_i et Hg antérieures ont été extrapolées selon la méthode décrite au Chapitre 2. Les bilans de flux de contaminants n'ont pas été réalisés sur le Haut-Rhône, car le suivi a été arrêté avant 2014 sur les principaux affluents (Arve, Bourbre, Ain et Guiers).

3.1 Flux annuels de somme de PCB indicateurs

Les flux annuels de \sum PCB_i particuliers sont évalués à 80, 40 et 118 kg à Beaucaire en 2014, 2015 et 2016 respectivement (**Figure 42**). Malgré la forte variabilité spatiale des concentrations en PCB_i (cf. §2.1) les apports des affluents sont relativement proches avec des contributions variant entre 5 % et 15 %. En raison d'un flux de MES très faible, la contribution du Gier au flux de \sum PCB_i reste négligeable (<2 %) malgré des concentrations extrêmement élevées. La contribution élevée de l'Isère en 2015 est due à un flux de MES exceptionnel cette année-là, en lien avec la crue de mai 2015. En conclusion les flux de \sum PCB_i sont principalement influencés par les flux de MES.

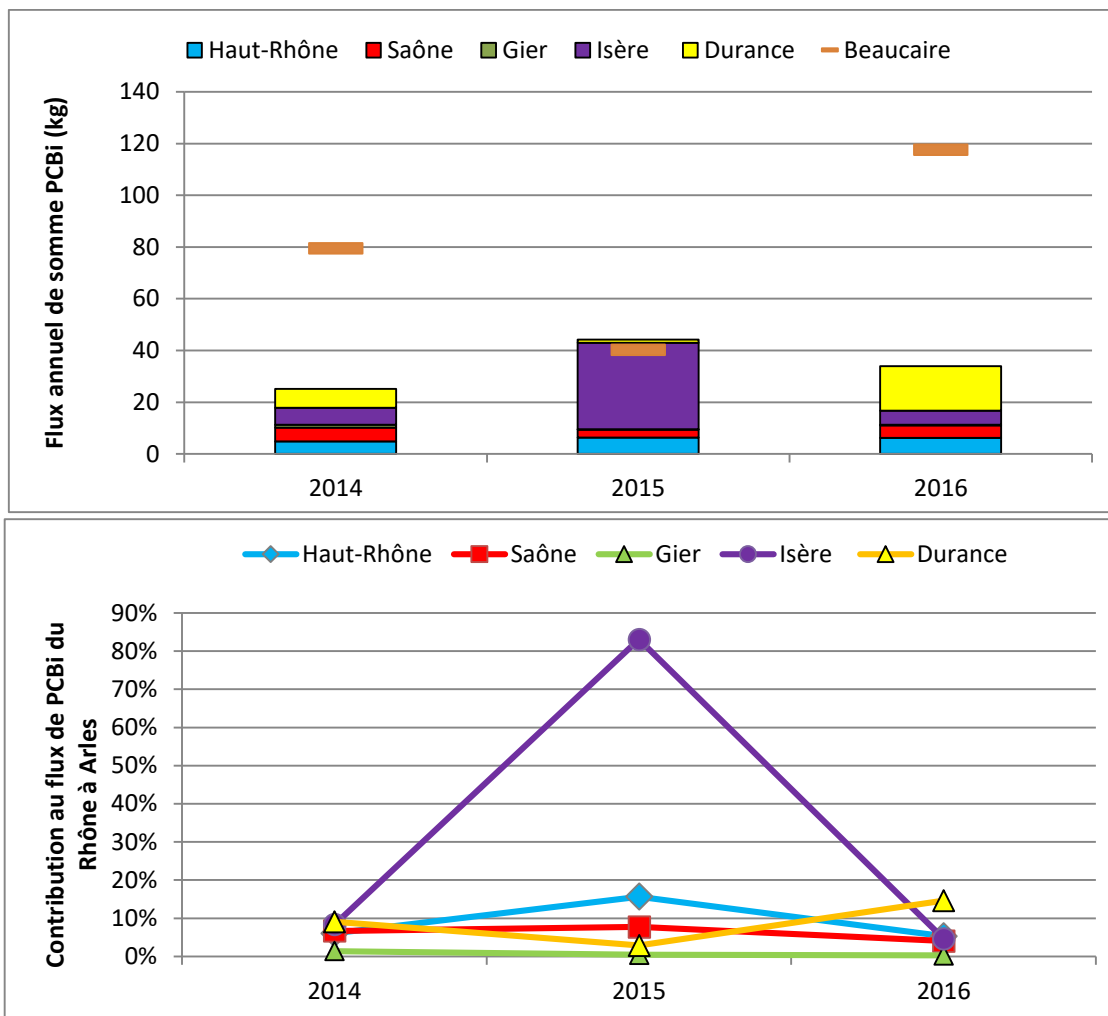


Figure 42 : Bilans de flux annuels de Σ PCBi particuliers sur le bassin du Rhône entre 2014 et 2016 ; et contribution des principaux affluents.

Les bilans de flux de Σ PCBi sont déficitaires pour les années 2014 et 2016 (- 70 %). Les affluents considérés étant les principaux contributeurs au flux de MES, nous pouvons nous attendre à ce que les bilans de Σ PCBi soient équilibrés au même niveau que le bilan de MES (-29 % et -16 % respectivement en 2014 et 2016). Ce résultat suggère que des reprises de dépôts de fond plus contaminés ont lieu et/ou que certains affluents non considérés ici pourraient être à l'origine d'apports importants de PCBi dans le Rhône. Pour vérifier cette hypothèse nous avons évalué les flux attribuables aux affluents non inclus afin que les bilans de Σ PCBi bouclent à -29 % (2014) et -16 % (2016). Les flux ainsi obtenus sont de 33 kg et 64 kg en 2014 et 2016 respectivement. Les **concentrations moyennes pondérées en Σ PCBi** particulières calculées à partir de ces flux sont de **19 $\mu\text{g}/\text{kg}$ et 46 $\mu\text{g}/\text{kg}$** en 2014 et 2016 respectivement. Ces concentrations sont élevées mais réalistes, car du même ordre de grandeur que les valeurs médianes observées sur la Bourbre (55 $\mu\text{g}/\text{kg}$) ou la Saône (15 $\mu\text{g}/\text{kg}$). A partir de données sédiments extraites de la banque de données de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse entre 2006 et 2011, Bourg (2013) a montré que des concentrations en Σ PCBi de l'ordre de 10 à 120 $\mu\text{g}/\text{kg}$ étaient fréquentes sur le corridor du Rhône en aval de la confluence avec l'Isère. Ces résultats confortent l'hypothèse d'une source de PCBi à l'aval de Lyon et en amont de la station d'Arles. Cela pourra être vérifié au cours du prochain cycle de l'OSR grâce à l'instrumentation de l'Ardèche (janvier 2016), du Gardon (juin 2017) et de la Drôme (prévue en 2018).

3.2 Mercure

Les flux annuels de mercure particulaire sont évalués à 564, 267 et 833 kg à Beaucaire en 2014, 2015 et 2016 respectivement (**Figure 43**). La forte variabilité spatiale des concentrations en mercure (cf. §2.2) se traduit par une modification des contributions de certains affluents par rapport aux MES. La Saône, dont le niveau de contamination en Hg est relativement élevé (médiane 0,17 mg/kg), contribue ainsi à près de 12 % du flux de mercure en 2014 (soit une contribution proche de celle de l'Isère = 10 %), alors qu'elle n'apporte que 7 % des MES. En revanche, en raison d'un flux de MES très faible, la contribution du Gier au flux de Hg reste négligeable (<0,5%) malgré des concentrations en Hg plus élevées (médiane 0,28 mg/kg). La contribution importante de l'Isère en 2015 (97%) est due à un flux de MES exceptionnel cette année-là, en lien avec la crue de mai 2015 (cf. **Figure 33**). En conclusion, les flux de Hg sont principalement influencés par les flux de MES, mais des concentrations en Hg particulaire plus élevées peuvent engendrer une augmentation des contributions pour certains affluents selon les conditions hydrologiques.

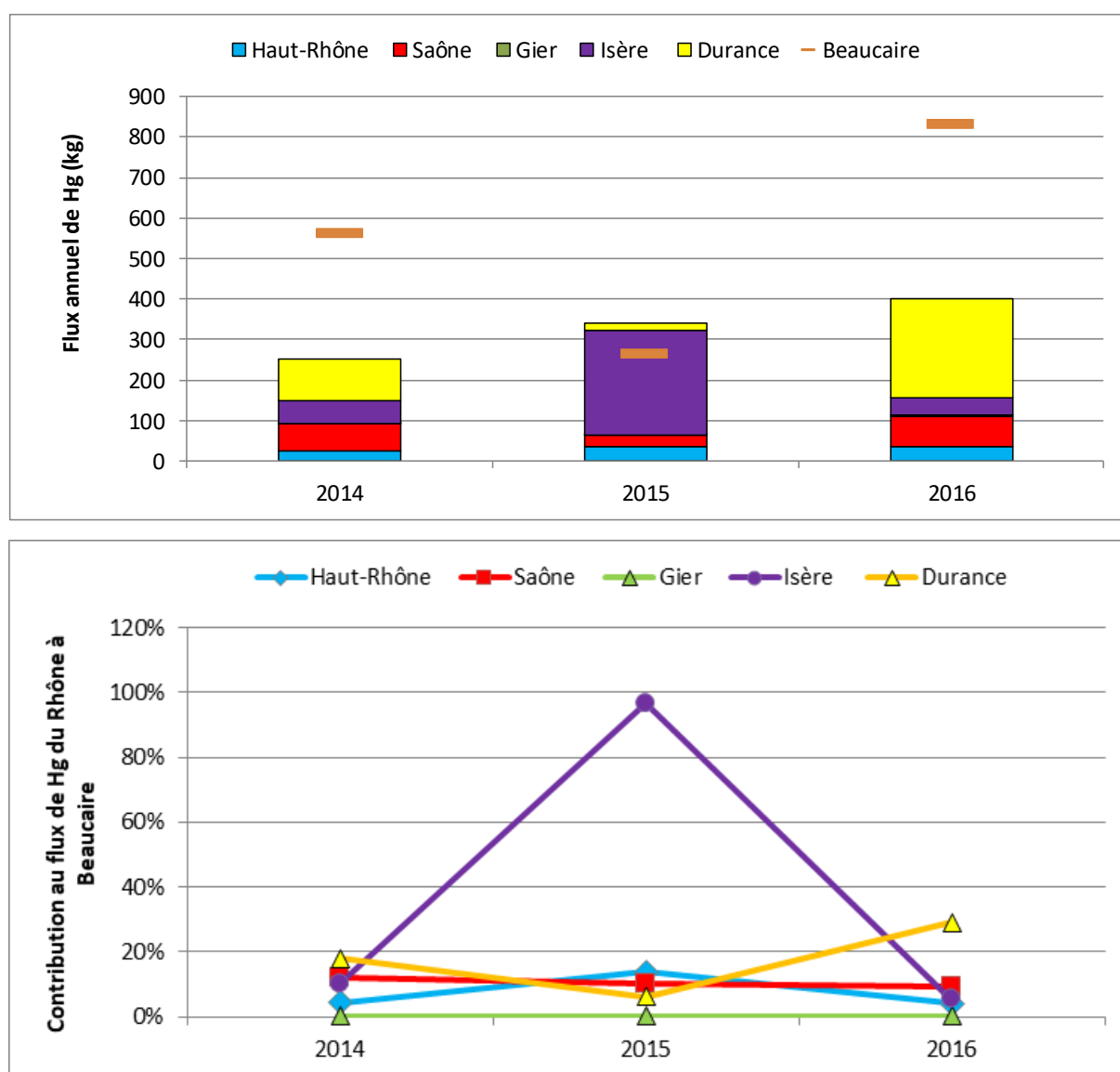


Figure 43 : Bilans de flux annuels de mercure (Hg) particulaire sur le bassin du Rhône entre 2014 et 2016 ; et contribution des principaux affluents.

Les bilans de flux de Hg sont légèrement excédentaires en 2015 (+ 27 %), mais déficitaires en 2014 (-55%) et en 2016 (-52 %). Le bilan en MES étant relativement équilibré en 2014 (-26%) et 2016 (-16 %) nous pouvions, comme pour les PCB, nous attendre à ce que les bilans de Hg soient équilibrés au même niveau. Nous avons estimé qu'il faudrait une **concentration moyenne pondérée en Hg de 0,09 mg/kg en 2014 et 0,21 mg/kg en 2016** sur les affluents non considérés ici afin d'équilibrer ces bilans (cf. calculs explicités pour les PCB au § 3.1). Selon Bourg (2013), des concentrations en mercure allant de 0,2 à 3 mg/kg ont été mesurées dans des sédiments des bassins versants de la Cance, l'Ouvèze, l'Eyrieux et dans le Rhône à Beauchastel. Ces stations sont situées en aval du Gier et en amont de Beaucaire. De plus, des concentrations en mercure dans les MES de l'ordre de 0,2-0,6 mg/kg observées dans le Rhône à Arles ont été associées à une crue des affluents cévenols en novembre 2008 (Cossa, 2012). Il est donc probable que des apports en provenance de certains de ces cours d'eau, non pris en compte dans notre étude soient à l'origine du déficit en mercure observé en 2014 et 2016.

3.3 Eléments Traces Métalliques

Les flux annuels pour chaque ETM ont été calculés pour la période 2014-2016 sur le Rhône à Jons et Arles. Les chroniques de concentrations en MES et de concentration en ETM ont été préalablement complétées selon la méthode détaillée au Chapitre 2.

De même que pour les bilans de PCB et Hg, nous étudions ici la contribution des affluents les plus importants que sont la Saône, la Durance et l'Isère, en plus des apports du Haut-Rhône (Jons). A l'inverse, Le Gier n'est pas pris en compte pour l'instant car les analyses en ETM sur les MES de cet affluent sont encore en cours.

Les flux annuels pour chaque ETM ont été estimés pour ces affluents pour la période 2014-2016 de manière plus simple, en multipliant le flux annuel de MES calculé (chapitre 3) par la médiane de la concentration de chaque ETM. Ce calcul pourra être affiné dans le futur à partir des chroniques horaires, mais permet toutefois ici d'obtenir une bonne première estimation. Les bilans de flux sont présentés dans la **Figure 44**, et les valeurs de ces flux sont détaillées en Annexe 8.

Les bilans en ETM sont excédentaires en 2015, et la contribution de l'Isère est supérieure à 100%. Comme vu pour les flux en Hg et PCB, l'importante contribution de l'Isère en 2015 est due à un flux de MES exceptionnel cette année-là, en lien avec la crue de mai 2015.

Les bilans de flux en ETM sont largement déficitaires en 2014 et 2016 (jusqu'à -50% pour certains éléments). Les affluents considérés ici ne suffisent donc pas à expliquer les flux observés sur Arles. Les concentrations moyennes pondérées en ETM sur les affluents non considérés ont été calculées pour équilibrer le bilan (**Tableau 17**). Pour chaque élément, les affluents présentant ces concentrations sont indiqués, et bien qu'il soit difficile à ce stade de conclure pour chaque année et pour chaque élément, il apparaît comme évident que les apports du bassin cévenols sont en principalement à l'origine des déficits observés en 2014 et 2016. Ceci est d'autant plus marqué sur les flux manquants en 2016, en raison de la non prise en compte de l'événement de novembre 2016 au cours duquel les rivières du bassin cévenol étaient également en crue.



Figure 44 : Bilans des flux annuels des ETM particulières sur le bassin du Rhône entre 2014 et 2016 et contribution des principaux affluents.

Tableau 17 : Moyennes pondérées calculées pour équilibrer les bilans de flux en ETM à partir du flux manquant en MES. Les affluents pouvant présenter ces concentrations sont indiqués (Sao : Saône, Ise : Isère, BC : Bassin Cévenol (Ardèche, Cèze, Gardon)).

	Moyenne pondérée (mg/kg)							
	Ni	Pb	Cu	Cr	As	Co	Cd	Zn
2014	44,9	69,8	35,3	96,1	27,3	15,9	0,56	171
Affluent ?	Sao / Ise / BC	BC	BC / Sao / Bou	BC / Ise / Sao	Ise / Sao / BC	BC / Sao / Ise	Sao / BC	Sao / BC
2016	41,1	80,5	64,5	116	42,9	19,8	0,72	350
Affluent ?	Sao / Ise / BC	BC	BC / Sao	BC / Ise / Sao	BC	BC / Sao / Ise	BC	BC / Sao

3.4 Radionucléides

Le manque de données sur les principaux affluents ne permet malheureusement pas le calcul des flux ni de leur contribution à celui calculé à Arles. Les chroniques de Jons, bien que lacunaire (40 à 98% de données disponibles) permettent cependant d'évaluer les flux pour cette station.

Les résultats présentés dans les graphiques de la **Figure 45** montrent que le ^{137}Cs est majoritairement transporté lors des crues (le pourcentage du temps en crue étant indiqué entre parenthèse sous les graphiques). Par exemple en 2008 à Arles, pour 10% du temps en crue, le flux était équivalent à celui hors crue (90% du temps). Cette proportion de flux exporté lors des crues ne dépend pas que de leurs occurrences, mais également de l'origine de celles-ci. En effet, nous avons vu précédemment que les concentrations en ^{137}Cs étaient hétérogènes. Sur la figure 43, les années 2009 et 2010 ont été caractérisées par une durée totale similaire des crues (4%). La différence observée entre les flux lors des crues s'explique par l'origine des crues, car de nombreuses crues impliquant l'Isère ont eu lieu en 2010 contrairement à 2009. Des travaux complémentaires doivent avoir lieu pour mieux caractériser les flux apportés par l'Isère.

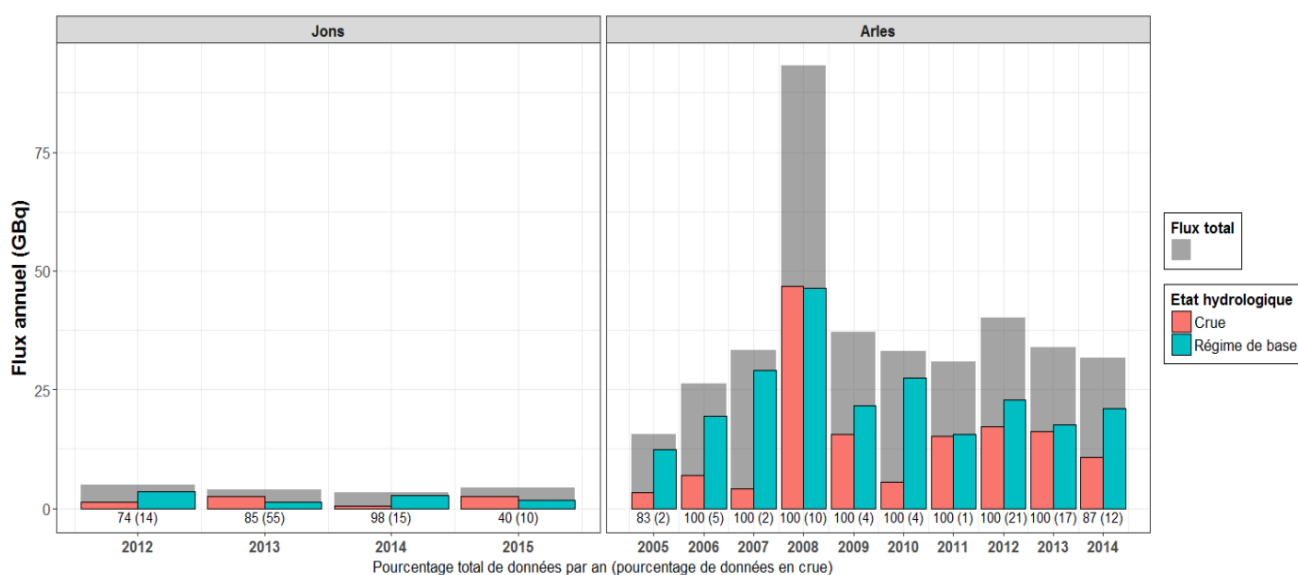


Figure 45 : Bilan des flux de Césium-137 à Jons et Arles en fonction des régimes hydrologiques.

4 Conclusion du chapitre 4 et perspectives

En conclusion, ces résultats ont mis évidence une forte variabilité spatiale des concentrations en PCB_i et mercure sur le bassin du Rhône. Le Gier et la Bourbre apparaissent clairement comme les sites les contaminés en PCB_i, avec des concentrations 20 à 50 fois plus élevées que sur les sites les moins impactés. Toutefois, malgré ces fort niveaux de pollutions les contributions de la Bourbre et du Gier au flux de PCB_i restent faibles, et ce sont l'Isère et la Durance qui contribuent le plus au flux de PCB_i du Rhône, en raison de leurs apports importants en MES.

Pour le mercure, les concentrations les plus élevées sont mesurées sur les stations du Gier et de la Saône. En raison de ces niveaux élevés, la Saône a été identifiée comme l'un des principaux contributeurs au flux annuel du Rhône, malgré des apports en MES faibles (environ 5% en moyenne sur la période 2011-2016).

Pour les ETM, ces résultats montrent l'importance des contributions de la Saône, l'Isère et la Durance au flux annuel à Beaucaire. Toutefois, les concentrations les plus élevées pour la plupart des ETM ont été observées sur les rivières des bassins cévenols (Ardèche, Cèze, Gardon) malgré leur flux de MES relativement moindre dans le Rhône. Les travaux futurs s'attacheront à évaluer précisément leur contribution au flux d'ETM à l'embouchure du Rhône.

Des investigations supplémentaires devront être menées sur certains affluents du Sud afin de comprendre d'où proviennent les déficits observés certaines années lors des bilans de flux de contaminants. L'instrumentation récente de l'Ardèche (2016) et du Gardon (2017) devrait permettre d'affiner notre vision globale des flux à l'échelle du bassin.

Conclusion générale et perspectives

La méthodologie de calcul des flux a fait l'objet d'un travail spécifique et approfondi au cours de l'OSR 4. Le maintien et le bon fonctionnement du réseau de suivi a permis d'augmenter considérablement le nombre de données disponibles sur la base de données BDOH par rapport aux cycles précédents. Les données bancarisées ont permis de calculer des relations débit/concentration en MES sur le Rhône et ses principaux affluents, plus fiables et plus robustes, car élaborées à partir d'un grand nombre de données couvrant plusieurs années de suivi et grâce à une méthode affinée. De plus, un effort d'échantillonnage spécifique a permis d'acquérir des données supplémentaires pour mieux documenter les concentrations en contaminants particuliers lors des crues. Ceci a permis d'évaluer l'influence du régime hydrologique sur les niveaux de contaminants. Nous avons ainsi observé une baisse de 20 à 50 % des concentrations en contaminants particuliers lors des crues par rapport au régime de base pour certains affluents ; et des valeurs forfaitaires ont été calculées pour chaque régime hydrologique. Le comblement des lacunes des chroniques de concentration a été rendu possible grâce à ces nouvelles données. L'ensemble de ces mesures ont permis le calcul des flux de MES et des contaminants associés sur une période élargie sur l'ensemble du bassin du Rhône.

Grâce aux données acquises au cours de ce nouveau cycle de l'OSR nous avons pu confirmer que l'Arve est le principal contributeur au flux d'eau et au flux de MES du Haut-Rhône, suivi par le Fier. A l'échelle de l'ensemble du bassin, le Haut-Rhône (station de Jons) représente le principal contributeur au flux d'eau (35% en moyenne), suivi de la Saône (25%). Cette répartition est grandement modifiée lorsque l'on s'intéresse au flux de MES. En raison de concentrations en MES extrêmement élevées en périodes de crue, l'Isère et la Durance contribuent en moyenne respectivement à 30 et 34 % des apports en MES du Rhône, alors que leurs apports d'eau sont nettement inférieurs (19 % et 6 % respectivement). En comparaison, les apports en MES du Haut-Rhône (11%) et de la Saône (6%) sont nettement plus faibles.

Concernant les contaminants particuliers, ces résultats ont mis évidence une forte variabilité spatiale des concentrations en PCB_i et en mercure sur le bassin du Rhône. Le Gier et la Bourbre apparaissent clairement comme les sites les plus contaminés en PCB_i, avec des concentrations 20 à 50 fois plus élevées que sur les stations les moins impactés (Arve, Fier, Durance). Malgré ces forts niveaux de pollution, les contributions de la Bourbre et du Gier au flux de PCB_i restent faibles ; et l'Isère et la Durance contribuent majoritairement au flux de PCB_i du Rhône, en raison de leurs apports importants en MES. Néanmoins, les contributions du Haut-Rhône et de la Saône sont loin d'être négligeables, sauf en 2015 (crue exceptionnelle de l'Isère). Pour le mercure, c'est sur les stations du Gier et de la Saône que sont mesurées les concentrations les plus élevées, tandis que l'Arve, le Fier et la Durance ont les concentrations les plus faibles. En raison de ces niveaux élevés, la Saône a été identifiée comme l'un des principaux contributeurs de mercure particulière au flux annuel du Rhône, malgré des apports en MES relativement faibles (6%).

À l'échelle de plusieurs années (2011-2016), les bilans de flux de MES sont équilibrés entre les apports des affluents et l'export à la mer. Cependant, certaines années, il peut se produire un stockage ou un déstockage de MES dans le réseau hydrographique (les réservoirs en particulier), au gré d'événements de crues ou de chasses de réservoirs (sur le Haut-Rhône et la Basse-Isère en particulier). Les bilans en contaminants sont plus délicats à boucler. Nous suspectons que des sources de pollution entre Lyon et la mer (affluents non suivis, rejets ou ruissellement) soient négligées dans ce bilan actuel. Des investigations supplémentaires devront être menées sur certains affluents du Sud afin de comprendre

d'où proviennent les déficits observés certaines années lors des bilans de flux de contaminants. L'instrumentation récente d'une station de suivi de l'OSR sur l'Ardèche (janvier 2016) et sur le Gardon (juin 2017), et prévue sur la Drôme (en 2018), devrait permettre d'affiner notre vision globale des flux à l'échelle du bassin. Par ailleurs, un nouvel axe de recherche a été initié sur le césium 137, afin d'évaluer l'influence de l'origine des crues sur les flux mesurés à l'embouchure du Rhône.

Bibliographie

- AFNOR (2005). Qualité de l'eau - Dosage des matières en suspension - Méthode par filtration sur filtre en fibre de verre. Norme NF EN 872. 16 p.
- Bourg, C. (2013). Micropolluants dans les sédiments de la région Rhône-Alpes - Données cours d'eau et plans d'eau 2006-2011, DREAL: 84 p.
- Branger, F., F. Thollet, M. Crochemore, M. Poisbeau, N. Raidelet, P. Farissier, M. Lagouy, G. Dramais, J. Le Coz, A. Guerin, G. Tallec, J. Peschard, N. Mathys, S. Klotz, M. Tolsa (2014). Le projet base de données pour les observatoires en hydrologie : un outil pour la bancarisation, la gestion et la mise à disposition des données issues des observatoires hydrologiques de long terme à Irstea, La Houille Blanche 1: 33-38.
- Cossa, D. (2012). Suivi des concentrations en mercure, PCB et PBDE dans les particules en suspension du Rhône en Arles en 2010 et 2012. Rapport OSR, Ifremer, 9 p.
- Dugué V., Le Coz J., Camenen B., Faure J.-B. (2016). Rapport sur le développement, le calage et l'amélioration du modèle hydro-sédimentaire 1-D du Rhône de Lyon à la mer Méditerranée - OSR4. 15 p.
- Eyrolle, F., O. Radakovitch, P. Raimbault, S. Charmasson, C. Antonelli, E. Ferrand, D. Aubert, G. Raccasi, S. Jacquet et R. Gurriaran (2012). Consequences of hydrological events on the delivery of suspended sediment and associated radionuclides from the Rhine River to the Mediterranean Sea. *Journal of Soils and Sediments* 12(9): 1479-1495.
- Launay, M. (2014). Flux de matières en suspension, de mercure et de PCB particulières dans le Rhône, du Léman à la Méditerranée Thèse de Doctorat, Irstea - Université de Lyon 1. 478 p.
- Le Bescond, C., J. Le Coz, M. Coquery, F. Thollet, J. Panay, M. Lagouy, G. Dramais, V. Dugué, A. Dabrin, M. Masson, S. Gairoard, O. Radakovitch, D. Delanghe, B. Angeletti, P. Raimbault, M. Fournier, F. Eyrolle-Boyer, C. Antonelli (2016). Rapport sur le fonctionnement du réseau OSR d'observation des flux de matières en suspension et de contaminants particulaires et sur la bancarisation des données pour l'année 2015 (OSR 4). Action III.1 : 20 p.
- Le Bescond, C., J. Le Coz, M. Coquery, F. Thollet, J. Panay, M. Lagouy, A. Buffet, G. Poulier, A. Dabrin, M. Masson, C. Miège, G. Dramais, G. Grisot, J. Gattacceca, O. Radakovitch, D. Delanghe, B. Angeletti, P. Raimbault, M. Fournier, H. Lepage, I. Pairaud (2017). Rapport sur le fonctionnement du réseau OSR d'observation des flux de matières en suspension et de contaminants particulaires et sur la bancarisation des données pour l'année 2017 (OSR 4). Action III.1 : 35 p.
- Le Coz, J., B. Renard, L. Bonnifait, F. Branger et R. Le Boursicaud (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology* 509: 573-587.
- Ollivier, P., B. Hamelin et O. Radakovitch (2010). Seasonal variations of physical and chemical erosion: A three-year survey of the Rhone River (France). *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 74(3): 907-927.
- Pont, D., J. P. Simonnet et A. V. Walter (2002). Medium-term Changes in Suspended Sediment Delivery to the Ocean: Consequences of Catchment Heterogeneity and River Management (Rhône River, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 54(1): 1-18.
- Sabot, P. (2013). Etude de la variation spatiotemporelle de la concentration en contaminants associés à des matières en suspension transportées dans le Rhône. Rapport de stage M2 - Université de Lyon/Irstea: 64 p.
- Sadaoui, M., W. Ludwig, F. Bourrin et P. Raimbault (2016). Controls, budgets and variability of riverine sediment fluxes to the Gulf of Lions (NW Mediterranean Sea). *Journal of Hydrology* 540: 1002-1015.
- Thollet, F. (2012). Collecte de chroniques de matières en suspension avec une station turbidimétrique, rapport Irstea: 13 p.

Annexe 1. Glossaire de l'outil BDOH

Chronique : série temporelle monovariée à pas de temps fixe ou variable (un seul paramètre et une seule valeur numérique par pas de temps).

Chronique continue : chronique pour laquelle le paramètre est supposé varier linéairement entre deux valeurs successives. Le pas de temps choisi est suffisamment fin pour reproduire les variations naturelles du paramètre étudié.

Chronique discontinue : chronique pour laquelle le paramètre ne peut pas être supposé varier linéairement entre deux données avec des dates successives.

Chronique mère : les chroniques mères correspondent aux données enregistrées sur le terrain ou en laboratoire. Dans l'OSR, il s'agit des mesures de débit, de turbidité et de concentrations en matières en suspension et en contaminants particuliers. Elles sont utilisées pour le calcul de chroniques dérivées (voir ce terme, ci-après).

Chronique dérivée (ou chronique fille ou chronique calculée) : les chroniques dérivées sont issues d'une ou plusieurs chroniques mères. Les transformations sont gérées directement dans BDOH, à l'aide d'une de ces deux méthodes :

- multiplication par un jeu de barèmes fixe (cas de la conversion de la turbidité en concentration en MES). Plusieurs barèmes peuvent être utilisés sur des périodes de validité définies, la traçabilité est assurée grâce à la possibilité d'export des jeux de barèmes ;
- multiplication de deux chroniques mères entre elles, mises au même pas de temps (le plus fin possible) par interpolation linéaire à la seconde près entre deux points (pas de perte de données). Les chroniques mères sont nécessairement des chroniques continues. Néanmoins, elles peuvent ne pas être situées géographiquement exactement sur une même station. Dans ce cas, un décalage temporel est appliqué à l'une ou l'autre (ou aux deux) des chroniques pour la « projeter » vers l'amont ou vers l'aval.

Point de contrôle : les points de contrôle sont des mesures ponctuelles réalisées indépendamment d'une chronique continue. Ces valeurs peuvent être superposées à la chronique continue du même paramètre pour vérifier la cohérence des données.

Pas de temps : intervalle de temps défini par une date de début et une date de fin (pour une chronique discontinue) ou entre 2 valeurs (pour une chronique continue).

Annexe 2. Statistiques descriptives des données de concentrations particulaires en PCB_i

Analyse	Site	Débit	Effectifs	Moyenne (µg/kg MS)	Médiane (µg/kg MS)	FQ
PCB101	ARD	base	6	0,7	0,8	0,0
PCB101	ARD	crue	0			
PCB101	ARL	base	76	2,4	2,2	96,1
PCB101	ARL	crue	29	2,4	2,5	96,6
PCB101	ARV	base	7	1,2	1,0	42,9
PCB101	ARV	crue	6	1,2	1,0	33,3
PCB101	BOU	base	7	14,5	14,8	100
PCB101	BOU	crue	11	8,6	7,5	100
PCB101	DUR	base	7	0,6	0,5	0,0
PCB101	DUR	crue	0			
PCB101	FIE	base	15	1,2	1,2	73,3
PCB101	FIE	crue	11	0,8	0,8	27,3
PCB101	GIE	base	23	19,2	19,1	100
PCB101	GIE	crue	7	8,0	7,0	100
PCB101	ISE	base	12	1,2	1,0	66,7
PCB101	ISE	crue	3	0,8	0,8	33,3
PCB101	JON	base	52	1,4	1,4	76,9
PCB101	JON	crue	64	1,3	1,2	78,1
PCB101	JON	chasse	11	0,7	0,7	45,5
PCB101	SAO	base	30	4,1	2,7	96,7
PCB101	SAO	crue	22	2,1	1,8	90,9
PCB118	ARD	base	6	0,6	0,5	33,3
PCB118	ARD	crue	0			
PCB118	ARL	base	76	1,4	1,0	77,6
PCB118	ARL	crue	29	1,1	1,0	69,0
PCB118	ARV	base	7	0,7	0,8	28,6
PCB118	ARV	crue	6	0,8	0,8	0,0
PCB118	BOU	base	7	10,2	10,4	100
PCB118	BOU	crue	11	7,3	5,7	100
PCB118	DUR	base	7	0,5	0,5	0,0
PCB118	DUR	crue	0			
PCB118	FIE	base	15	0,8	0,8	40,0
PCB118	FIE	crue	11	0,6	0,7	9,1
PCB118	GIE	base	23	4,8	5,5	82,6
PCB118	GIE	crue	7	3,1	3,1	100
PCB118	ISE	base	12	0,7	0,7	41,7
PCB118	ISE	crue	3	0,8	0,8	66,7
PCB118	JON	base	52	0,8	0,8	38,5
PCB118	JON	crue	64	0,8	0,8	34,4
PCB118	JON	chasse	11	0,5	0,5	18,2
PCB118	SAO	base	30	3,0	1,5	86,7
PCB118	SAO	crue	22	1,1	1,0	86,4
PCB138	ARD	base	6	1,0	1,0	100
PCB138	ARD	crue	0			
PCB138	ARL	base	76	4,2	3,5	96,1
PCB138	ARL	crue	29	3,9	3,2	100
PCB138	ARV	base	7	1,3	1,0	57,1
PCB138	ARV	crue	6	0,9	0,8	33,3
PCB138	BOU	base	7	15,2	15,5	100
PCB138	BOU	crue	11	10,4	8,9	100
PCB138	DUR	base	7	0,4	0,5	14,3
PCB138	DUR	crue	0			
PCB138	FIE	base	15	2,5	2,2	93,3
PCB138	FIE	crue	11	1,3	1,1	72,7
PCB138	GIE	base	23	24,3	25,0	95,7

PCB138	GIE	crue	7	16,1	16,0	100
PCB138	ISE	base	12	1,8	1,7	75,0
PCB138	ISE	crue	3	2,0	2,0	100
PCB138	JON	base	52	2,6	2,5	90,4
PCB138	JON	crue	64	2,9	2,1	96,9
PCB138	JON	chasse	11	1,3	1,2	100
PCB138	SAO	base	30	5,4	4,6	93,3
PCB138	SAO	crue	22	3,3	3,2	95,5
PCB153	ARD	base	6	1,1	1,0	33,3
PCB153	ARD	crue	0			
PCB153	ARL	base	76	4,8	3,8	92,1
PCB153	ARL	crue	29	4,2	3,4	96,6
PCB153	ARV	base	7	1,0	0,9	57,1
PCB153	ARV	crue	6	0,8	0,8	33,3
PCB153	BOU	base	7	16,2	16,6	100
PCB153	BOU	crue	11	9,6	8,4	100
PCB153	DUR	base	7	0,6	0,5	0,0
PCB153	DUR	crue	0			
PCB153	FIE	base	15	1,5	1,5	80,0
PCB153	FIE	crue	11	1,0	0,9	63,6
PCB153	GIE	base	23	24,7	23,4	100
PCB153	GIE	crue	7	15,7	15,0	100
PCB153	ISE	base	12	2,4	1,9	83,3
PCB153	ISE	crue	3	1,5	1,5	100
PCB153	JON	base	52	2,3	2,2	88,5
PCB153	JON	crue	64	2,4	1,8	92,2
PCB153	JON	chasse	11	1,2	1,3	72,7
PCB153	SAO	base	30	5,1	4,5	93,3
PCB153	SAO	crue	22	2,7	2,5	90,9
PCB180	ARD	base	6	0,8	0,7	100
PCB180	ARD	crue	0			
PCB180	ARL	base	76	2,6	2,4	98,7
PCB180	ARL	crue	29	3,2	2,5	93,1
PCB180	ARV	base	7	0,8	0,5	42,9
PCB180	ARV	crue	6	0,5	0,5	16,7
PCB180	BOU	base	7	6,8	6,5	100
PCB180	BOU	crue	11	4,4	3,7	100
PCB180	DUR	base	7	0,7	0,5	28,6
PCB180	DUR	crue	0			
PCB180	FIE	base	15	1,3	1,1	80,0
PCB180	FIE	crue	11	1,1	1,1	90,9
PCB180	GIE	base	23	30,4	26,4	100
PCB180	GIE	crue	7	13,5	14,9	100
PCB180	ISE	base	12	2,8	2,2	83,3
PCB180	ISE	crue	3	1,4	1,5	66,7
PCB180	JON	base	52	1,5	1,4	90,4
PCB180	JON	crue	64	2,2	1,2	92,2
PCB180	JON	chasse	11	0,8	0,8	90,9
PCB180	SAO	base	30	3,3	2,3	96,7
PCB180	SAO	crue	22	1,9	1,7	95,5
PCB28	ARD	base	6	0,2	0,1	0,0
PCB28	ARD	crue	0			
PCB28	ARL	base	76	0,7	0,5	30,3
PCB28	ARL	crue	29	0,8	0,8	41,4
PCB28	ARV	base	7	0,6	0,5	0,0
PCB28	ARV	crue	6	0,6	0,5	0,0
PCB28	BOU	base	7	3,0	2,9	100
PCB28	BOU	crue	11	1,1	1,2	72,7
PCB28	DUR	base	7	0,4	0,5	14,3
PCB28	DUR	crue	0			
PCB28	FIE	base	15	0,7	0,8	0,0

PCB28	FIE	crue	11	0,5	0,5	0,0
PCB28	GIE	base	23	3,1	2,5	78,3
PCB28	GIE	crue	7	1,1	0,8	57,1
PCB28	ISE	base	12	0,6	0,7	25,0
PCB28	ISE	crue	3	0,8	0,8	0,0
PCB28	JON	base	52	0,6	0,5	11,5
PCB28	JON	crue	64	0,6	0,5	7,8
PCB28	JON	chasse	11	0,3	0,4	45,5
PCB28	SAO	base	30	1,0	0,6	33,3
PCB28	SAO	crue	22	0,7	0,5	27,3
PCB52	ARD	base	6	0,3	0,3	0,0
PCB52	ARD	crue	0			
PCB52	ARL	base	76	1,1	1,0	32,9
PCB52	ARL	crue	29	1,2	1,0	44,8
PCB52	ARV	base	7	1,3	1,0	0,0
PCB52	ARV	crue	6	1,4	1,0	16,7
PCB52	BOU	base	7	9,3	9,2	100
PCB52	BOU	crue	11	3,8	3,5	100
PCB52	DUR	base	7	0,4	0,5	0,0
PCB52	DUR	crue	0			
PCB52	FIE	base	15	1,3	1,0	13,3
PCB52	FIE	crue	11	1,0	0,8	9,1
PCB52	GIE	base	23	5,1	4,6	100
PCB52	GIE	crue	7	2,2	2,3	71,4
PCB52	ISE	base	12	1,1	0,7	41,7
PCB52	ISE	crue	3	1,5	1,0	0,0
PCB52	JON	base	52	0,9	0,8	7,7
PCB52	JON	crue	64	0,9	0,8	3,1
PCB52	JON	chasse	11	0,5	0,4	18,2
PCB52	SAO	base	30	2,2	1,0	36,7
PCB52	SAO	crue	22	1,0	0,9	31,8

Annexe 3. Statistiques descriptives des données de concentrations particulières en mercure (Hg)

Analyse	Site	Débit	Effectifs	Moyenne (mg/kg MS)	Médiane (µg/kg MS)	FQ
Hg	ARD	base	5	0,053	0,053	100
Hg	ARD	crue	0			
Hg	ARL	base	122	0,115	0,110	100
Hg	ARL	crue	33	0,088	0,081	100
Hg	ARV	base	9	0,029	0,029	100
Hg	ARV	crue	10	0,020	0,018	70
Hg	BOU	base	4	0,217	0,204	100
Hg	BOU	crue	10	0,107	0,098	100
Hg	DUR	base	8	0,047	0,049	100
Hg	DUR	crue	0			
Hg	FIE	base	22	0,056	0,042	100
Hg	FIE	crue	12	0,027	0,025	100
Hg	GIE	base	36	0,334	0,316	100
Hg	GIE	crue	7	0,148	0,128	100
Hg	ISE	base	12	0,083	0,081	100
Hg	ISE	crue	3	0,064	0,060	100
Hg	JON	base	62	0,060	0,055	100
Hg	JON	crue	33	0,046	0,043	100
Hg	JON	chasse	11	0,035	0,035	100
Hg	SAO	base	46	0,378	0,184	100
Hg	SAO	crue	25	0,148	0,149	100

Annexe 4. Statistiques descriptives des données de concentrations particulaires en éléments traces métalliques

Analyse	Site	Débit	Effectifs	Moyenne (µg/kg MS)	Médiane (µg/kg MS)	FQ
As	ARL	base	127	16,9	17,9	100
AS	ARL	Crue	41	16,5	12,8	100
As	JON	base	61	12,9	12,6	100
As	JON	crue	17	11,4	11,1	100
As	JON	chasse	5	14,3	14,8	100
Cd	ARL	base	122	0,34	0,34	100
Cd	ARL	crue	41	0,34	0,30	100
Cd	JON	base	91	0,39	0,33	100
Cd	JON	crue	36	0,34	0,32	100
Cd	JON	chasse	10	0,32	0,33	100
Co	ARL	base	122	13,8	13,6	100
Co	ARL	crue	41	12,2	12,0	100
Co	JON	base	91	9,80	9,7	100
Co	JON	crue	36	9,31	9,1	100
Co	JON	chasse	10	10,3	10,5	100
Cr	ARL	base	122	86,0	86,1	100
Cr	ARL	crue	41	77,0	75,4	100
Cr	JON	base	73	68,5	66,0	100
Cr	JON	crue	30	72,4	71,0	100
Cr	JON	chasse	10	67,3	67,2	100
Cu	ARL	base	122	34,8	32,1	100
Cu	ARL	crue	41	29,9	25,0	100
Cu	JON	base	91	62,9	46,6	100
Cu	JON	crue	36	30,0	29,6	100
Cu	JON	chasse	10	26,6	25,8	100
Ni	ARL	base	122	42,9	43,8	100
Ni	ARL	crue	41	38,7	37,2	100
Ni	JON	base	73	31,2	33,4	100
Ni	JON	crue	30	39,8	38,9	100
Ni	JON	chasse	10	22,6	21,6	100
Pb	ARL	base	122	37,1	37,0	100
Pb	ARL	crue	41	37,8	31,5	100
Pb	JON	base	91	29,5	28,2	100
Pb	JON	crue	36	23,0	23,1	100
Pb	JON	chasse	10	27,7	29,7	100
Zn	ARL	base	122	138,4	134,0	100
Zn	ARL	crue	41	118,9	100,9	100
Zn	JON	base	91	153,0	136,9	100
Zn	JON	crue	36	99,7	100,3	100
Zn	JON	chasse	10	110,6	109,1	100

Annexe 5. Statistiques descriptives des données de concentrations particulaire en radionucléides

Analyse	Site	Débit	Effectifs	Moyenne ($\mu\text{g}/\text{kg MS}$)	Médiane ($\mu\text{g}/\text{kg MS}$)	FQ
Ac228	ARL	base	290	39,5	39,8	99,7
Ac228	ARL	crue	211	32,6	31,8	100
Ac228	JON	base	12	58,8	59,5	100
Ac228	JON	crue	39	34,5	33,0	100
Ag110m	ARL	base	289	1,8	1,08	14,2
Ag110m	ARL	crue	211	1,2	0,86	2,4
Ag110m	JON	base	12	2,4	2,55	16,7
Ag110m	JON	crue	39	1,7	1,2	7,7
Be7	ARL	base	289	178	92,8	92,0
Be7	ARL	crue	211	55,2	37,5	85,8
Be7	JON	base	12	130	71	58,3
Be7	JON	crue	39	138	11,2	66,7
Co60	ARL	base	289	5,8	2,51	80,3
Co60	ARL	crue	211	1,1	0,79	48,8
Co60	JON	base	12	1,6	1,4	25,0
Co60	JON	crue	39	1,1	1,0	2,6
Cs134	ARL	base	289	1,0	0,67	1,4
Cs134	ARL	crue	211	0,7	0,56	0,0
Cs134	JON	base	12	1,3	1,15	0,0
Cs134	JON	crue	39	1,0	0,8	0,0
Cs137	ARL	base	290	18,1	13,8	100
Cs137	ARL	crue	211	8,8	7,33	100
Cs137	JON	base	12	8,6	8,55	100
Cs137	JON	crue	39	5,6	5,4	100
K40	ARL	base	289	525	523	100
K40	ARL	crue	211	466	447	100
K40	JON	base	12	564	600	100
K40	JON	crue	39	388	380	100
Mn54	ARL	base	289	2,2	1,53	33,9
Mn54	ARL	crue	211	1,1	0,78	14,7
Mn54	JON	base	12	1,8	1,75	0,0
Mn54	JON	crue	39	1,4	1,3	0,0
Pb210	ARL	base	285	72,6	78,0	83,5
Pb210	ARL	crue	210	54,7	53,2	96,7
Pb210	JON	base	12	122	117	100
Pb210	JON	crue	39	73,8	72	100
Th234	ARL	base	285	31,5	32,8	78,2
Th234	ARL	crue	210	28,2	28,6	94,8
Th234	JON	base	12	50,4	49,5	100
Th234	JON	crue	39	34,0	32	100

Annexe 6. Flux de MES sur le Haut- Rhône

Surface drainée (km ²)	8011	1970	1327	694	20058	8056	
Contribution (%)	40%	10%	7%	3%	100%	40%	
	Leman	Arve	Fier	Bourbre	Jons	Surface non couverte	
	2011					Excès/Déficit (Mt)	Excès/Déficit (%)
FMES (Mt)	0	0,222	0,082	0,011	0,248	-0,07	27%
Flux spécifique (t/km ²)	0	113	62	15	12		
Contribution (%)	0%	90%	33%	4%	100%		
% données	0%	0%	99%	23%	99%		
	2012						
FMES (Mt)	0	0,596	0,187	0,028	1,026	0,21	-21%
Flux spécifique (t/km ²)	0	303	141	41	51		
Contribution (%)	0%	58%	18%	3%	100%		
% données	0%	82%	0%	24%	98%		
	2013						
FMES (Mt)	0	0,772	0,237	0,042	0,810	-0,24	30%
Flux spécifique (t/km ²)	0	392	178	61	40		
Contribution (%)	0%	95%	29%	5%	100%		
% données	0%	67%	0%	60%	97%		
	2014						
FMES (Mt)	0	0,440	0,095	0,084	0,504	-0,11	23%
Flux spécifique (t/km ²)	0	223	72	121	25		
Contribution (%)	0%	87%	19%	17%	100%		
% données	0%	98%	67%	0%	99%		
	2015						
FMES (Mt)	0	0,884	0,310	0,027	0,844	-0,38	45%
Flux spécifique (t/km ²)	0	449	234	39	42		
Contribution (%)	0%	105%	37%	3%	100%		
% données	0%	98%	97%	0%	99%		
	2016						
FMES (Mt)	0	0,487	0,112	0,013	0,947	0,34	-35%
Flux spécifique (t/km ²)	0	247	84	18	47		
Contribution (%)	0%	51%	12%	1%	100%		
% données	0%	100%	97%	0%	97%		
	2011-2016						
FMES (Mt)	0,00	0,57	0,17	0,03	0,73	-0,04	6%
Flux spécifique (t/km ²)	0	288	129	49	36		
Contribution (%)	0%	78%	23%	5%	100%		

Annexe 7. Flux de MES sur le Rhône, du Léman à la mer

Surface drainée (km ²)	20 058	29 470	416	11 794	14 124	96363	20500	
Contribution (%)	21%	31%	0,4%	12%	15%	100%	21 %	
	Jons	Saône	Gier	Isère	Durance	Rhône Beaucaire	Surface non couverte	
	2011						Excès/déficit (Mt)	Excès/déficit (%)
FMES (Mt)	0,248	0,174	0,001	0,255	1,373	3,048	1,00	-33%
Flux spécifique (t/km ²)	12	6	2	22	97	32		
Contribution (%)	8%	6%	0%	8%	45%	100%		
% données	0%	65%	0%	100%	0%	100%		
	2012							
FMES (Mt)	1,026	0,333	0,003	1,205	0,298	6,334	3,47	-55%
Flux spécifique (t/km ²)	51	11	6	102	21	66		
Contribution (%)	16%	5%	0%	19%	5%	100%		
% données	82%	70%	0%	100%	0%	100%		
	2013							
FMES (Mt)	0,810	0,326	0,010	3,426	2,431	8,830	1,83	-21%
Flux spécifique (t/km ²)	40	11	25	291	172	92		
Contribution (%)	9%	4%	0%	39%	28%	100%		
% données	67%	99%	75%	100%	9%	100%		
	2014							
FMES (Mt)	0,504	0,457	0,018	0,866	2,846	6,647	1,95	-29%
Flux spécifique (t/km ²)	25	16	44	73	201	69		
Contribution (%)	8%	7%	0%	13%	43%	100%		
% données	98%	100%	97%	94%	91%	100%		
	2015							
FMES (Mt)	0,844	0,210	0,002	4,285	0,333	2,817	-2,86	101%
Flux spécifique (t/km ²)	42	7	6	363	24	29		
Contribution (%)	30%	7%	0%	152%	12%	100%		
% données	98%	84%	98%	100%	75%	100%		
	2016							
FMES (Mt)	0,947	0,501	0,009	0,751	4,873	8,471	1,39	-16%
Flux spécifique (t/km ²)	47	17	22	64	345	88		
Contribution (%)	11%	6%	0%	9%	58%	100%		
% données	100%	99%	84%	100%	70%	100%		
	2000-2016							
FMES (Mt)	0,73	0,34	0,01	1,64	1,55	6,56	2,30	-35%
Flux spécifique (t/km ²)	36	12	27	139	110	68		
Contribution (%)	11%	5%	0%	25%	24%	100%	65%	

Annexe 8. Flux de contaminants sur le Rhône, du Léman à la mer

Flux annuels en somme de PCBi particulaire (kg/an) sur Jons, Saône, Gier, Isère, Durance et Arles (Beaucaire) entre 2014 et 2016

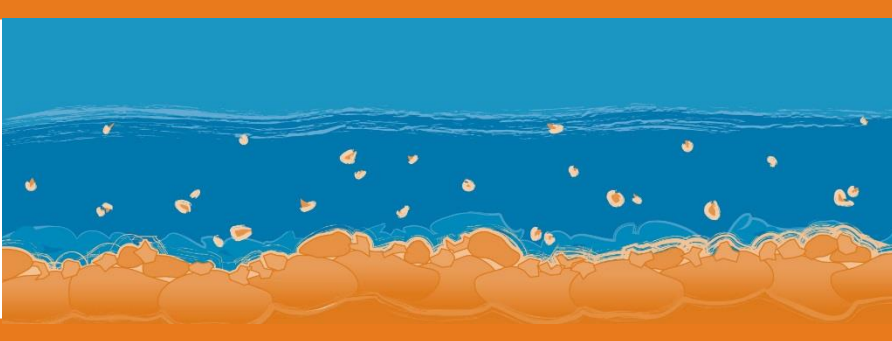
Flux somme PCBi (kg/an)						
	Jons	Saône	Gier	Isère	Durance	Beaucaire
2014	4.8	5.3	1.1	6.7	7.2	79.5
2015	6.3	3.1	0.2	33.4	1.2	40.3
2016	6.2	4.8	0.3	5.4	17.2	118

Flux annuels en mercure particulaire (kg/an) sur sur Jons, Saône, Gier, Isère, Durance et Arles (Beaucaire) entre 2014 et 2016

Flux somme Hg (kg/an)						
	Jons	Saône	Gier	Isère	Durance	Beaucaire
2014	24.2	67.5	1.8	57.3	102	564
2015	36.9	27.4	0.4	258	16.4	267
2016	35.0	76.2	1.2	44.7	242	833

Flux annuels en ETM particulières (T/an) sur Arles (Beaucaire), Jons, Isère, Saône et Durance entre 2014 et 2016

	Flux ETM (T/an)							
	As	Cd	Co	Cu	Cr	Ni	Pb	Zn
2014								
Arles	98,80	1,86	75,50	166,3	473,9	245,2	215,1	697,2
Jons	5,91	0,15	5,04	18,99	36,64	19,53	12,61	55,47
Saône	9,12	0,20	4,63	14,78	31,41	14,22	17,69	71,48
Isère	19,12	0,18	12,08	22,77	72,71	37,08	23,33	91,65
Durance	16,79	0,34	25,96	48,10	165,0	95,77	39,27	180,0
2015								
Arles	54,40	0,79	35,82	84,77	230,3	122,9	101,3	283,8
Jons	9,04	0,21	7,80	28,68	61,60	33,24	19,23	73,28
Isère	94,61	0,90	59,78	112,7	359,8	182,3	115,4	453,5
Saône	23,62	0,52	11,98	38,28	81,31	36,81	45,79	185,1
Durance	1,96	0,04	3,04	5,63	19,31	11,21	4,60	21,06
2016								
Arles	135,8	2,47	101,2	250,9	637,8	318,5	260,7	1129
Jons	10,82	0,28	8,55	26,72	62,21	34,09	22,56	97,64
Isère	16,58	0,16	10,48	19,75	63,05	32,16	20,23	79,48
Saône	19,98	0,44	10,14	32,38	68,79	31,14	38,73	156,5
Durance	28,75	0,58	44,44	82,35	282,6	164,0	67,25	308,2



Observatoire des Sédiments du Rhône



Provence-Alpes-Côte d'Azur



Observatoire des Sédiments du Rhône

GRAIE – OHM Vallée du Rhône

66 bd Niels Bohr – CS 52132

69603 Villeurbanne Cedex

www.graie.org/osr/

Contact : dad.roux@graie.org