



HAL
open science

ZABR-OSR - Livrable action III.4: Interprétation des données de flux existantes aux stations de Jons et Arles

M. Launay, V. Dugué, Gaëlle Poulhier, B. Camenen, Jérôme Le Coz, Marina Coquery, O. Radakovitch

► To cite this version:

M. Launay, V. Dugué, Gaëlle Poulhier, B. Camenen, Jérôme Le Coz, et al.. ZABR-OSR - Livrable action III.4: Interprétation des données de flux existantes aux stations de Jons et Arles. [Rapport de recherche] irstea. 2017, pp.34. hal-02607084

HAL Id: hal-02607084

<https://hal.inrae.fr/hal-02607084>

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

Interprétation des données de flux
existantes aux stations de Jons et Arles



Observatoire
Sédiments
Rhône

Action III.4

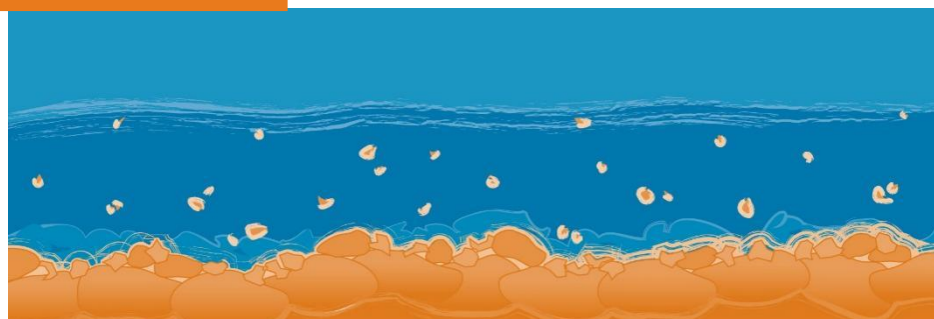
Version finale - décembre 2017



2015 - 2020



Donnons un avenir à notre fleuve



Personnes impliquées	Équipe de recherche
M. Launay, V. Dugué, G. Poulier, B. Camenen, J. Le Coz, M. Coquery	Irstea - Centre de Lyon-Villeurbanne
O. Radakovitch	Cerege

Rapport sur l'interprétation des données de flux existantes aux stations de Jons et Arles

Apport de la modélisation numérique

Résumé

L'objectif de ce livrable est d'interpréter les sources et les mécanismes de propagation des flux de Matières en Suspension (MES) et de contaminants du Rhône à l'aide des résultats du modèle numérique. Ce document reprend certains des principaux événements de crue solide suivis aux stations d'Arles et de Jons. Les flux mesurés sont comparés aux résultats des simulations numériques faites avec le modèle numérique du Rhône (décrit dans le livrable intermédiaire de l'axe V.2 de l'Observatoire des Sédiments du Rhône).

Les travaux effectués entre 2015 et 2017 se sont concentrés sur l'étude et la modélisation des flux de MES sur l'événement de mai-juin 2008 sur l'Isère et la Durance, en lien avec les résultats de la thèse de Launay (2014). Les simulations réalisées avec le modèle 1D du Rhône permettent de mettre en évidence le rôle important joué par la granulométrie. Une deuxième partie des travaux concerne la propagation des contaminants simulée pour la première fois avec le modèle du Rhône : l'influence de l'apport en PCB et en mercure de la Bourbre en avril-mai 2013 à la station de Jons. L'événement de mai 2015 est également simulé pour étudier la propagation du mercure de la Saône et du Rhône à Jons jusqu'à la station d'Arles.

L'utilisation de la modélisation numérique permet d'apporter des informations complémentaires pour l'interprétation des données de flux.

Mots-clés

Observatoire des Sédiments du Rhône, flux, modèle hydrosédimentaire 1D, matières en suspension, contaminants, événements hydrologiques.

Contexte

L'action « Interprétation des données de flux » (axe III.4) de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR) a été commencée en 2015 et s'est poursuivie jusqu'en 2017. Trois événements hydrosédimentaires ont été étudiés. La modélisation du flux sédimentaire en MES sur le réseau hydrographique du Rhône a été traitée de l'exutoire du Lac Léman jusqu'à la Mer Méditerranée. Les différents travaux menés au cours de cette période comprennent :

- ◆ L'événement de mai-juin 2008 sur l'Isère, la Durance et le Rhône aval. Cet événement qui regroupe des épisodes de crue et de chasses permet d'explorer les flux de MES et la granulométrie des sédiments associés (évolution et devenir des différentes classes de sédiment le long du réseau).
- ◆ Les flux du Rhône entre Lagnieu et Jons en avril-mai 2013. La propagation des PCB et du mercure de la Bourbre jusqu'à la station de Jons est étudiée via le modèle numérique 1D du Rhône.
- ◆ L'événement de mai 2015 sur l'Arve, la Saône et l'Isère. Cet événement permet d'étudier à la fois l'impact de la granulométrie (crue et chasse sur l'Isère) ainsi que le transport de contaminant (mercure de la Saône et du Rhône à Jons). La modélisation numérique permet de faire un lien avec les concentrations en MES mesurées à Barcarin et avec les teneurs en mercure mesurées à Arles.

Ce document, réalisé dans le cadre du programme OSR4, fait la synthèse des résultats obtenus à travers l'étude de ces trois événements hydrosédimentaires.

Table des matières

Contexte	3
Table des matières	4
1. Flux de Matières en Suspension - mai-juin 2008.....	5
a) Présentation du tronçon modélisé et des données d'entrée du modèle	5
b) Impact de la granulométrie sur les concentrations en MES simulées	9
c) Interaction des MES avec les aménagements hydroélectriques	10
d) Une meilleure compréhension des flux de MES	13
e) Conclusions sur l'étude des flux de MES.....	15
2. Flux de contaminants de la Bourbre - avril-mai 2013.....	16
a) Données d'entrée du modèle.....	16
b) Décomposition des apports en eau.....	18
c) Décomposition des flux de MES à Jons	18
d) Teneurs en contaminants à Jons	20
3. Flux de mercure - mai 2015	21
a) Présentation du tronçon modélisé et des données d'entrée du modèle	22
b) Décomposition des hydrogrammes	26
c) Transport des matières en suspension sans dépôt / reprise	27
d) Transport des matières en suspension avec dépôt / reprise	27
e) Transport de mercure.....	30
4. Suite et perspectives.....	31
Références.....	33
Annexe 1 : Modélisation du transport de contaminant sur la Bourbre	34

1. Flux de Matières en Suspension - mai-juin 2008

L'événement de mai-juin 2008 sur l'Isère et la Durance a fait l'objet d'une étude dans le cadre de la thèse de Launay (2014). La description des données utilisées ainsi que l'analyse de la dynamique des flux de MES sont disponibles dans la thèse et font l'objet de l'article en préparation :

Launay M, Dugué V., Faure J.-B., Coquery M., Camenen B. and Le Coz J. (2018), 1D numerical modelling of suspended particulate matters dynamics in a regulated river. Soumis à *Water Resources Research*, en révision.

Cet événement a entraîné des flux de MES importants mesurés à la station d'Arles. Le flux total cumulé atteint 4,7 Mt à Beaucaire (avant la séparation du Grand et du Petit Rhône), soit environ 50% du flux de MES moyen annuel du Rhône. L'événement, s'étalant sur deux semaines, peut se décomposer en deux événements naturels (crues concomitantes de l'Isère et de la Durance) et des événements artificiels (chasses des barrages de la Basse-Isère). Les caractéristiques des sédiments sont donc très hétérogènes.

Cet événement était donc particulièrement intéressant pour le calage du modèle hydrosédimentaire 1D du Rhône (Livrable OSR axe V.2). Cette section du présent rapport s'intéresse davantage aux apports du modèle sur la compréhension de la dynamique sédimentaire de cet événement. Des informations supplémentaires sur la modélisation 1D de cet événement au niveau de la confluence Isère sont disponibles dans le rapport de Naudet et al. (2015).

a) Présentation du tronçon modélisé et des données d'entrée du modèle

Les simulations ont été faites sur le Rhône entre la station de Ternay (PK 15,2) et la mer Méditerranée. Une vue d'ensemble de la zone d'étude est représentée sur la **Figure 1**.

Les données hydrauliques utilisées dans le modèle couvrent la période du 15/05/2008 jusqu'au 24/06/2008 et encadrent donc la crue du Rhône de mai-juin 2008. La station hydrométrique de Ternay (CNR) a été choisie comme condition amont au modèle. De même, la condition amont du bief de l'Isère est la station hydrométrique de Beaumont-Montoux et celle de la Durance est Bonpas. Les conditions limites aval du modèle sont les niveaux d'eau mesurés aux stations limnimétriques CNR de Petite Abbaye sur le Petit Rhône et Grand Boisviel sur le Grand Rhône. Les autres affluents situés sur ce tronçon sont ajoutés sous la forme d'apport ponctuel (données CNR et DREAL). Les hydrogrammes et chroniques de concentration en MES utilisés dans le modèle pour la simulation de la crue de mai-juin 2008 sont représentés dans la **Figure 2**. Les concentrations en MES utilisées dans les simulations comme données d'entrée sont les suivantes :

- ◆ Isère : Il n'y a pas eu de mesures à Beaumont-Montoux pendant la crue. La chronique de Beaumont-Montoux a été reconstruite (**Figure 3**) à partir des mesures de Tullins entre le 30/05/2008 et le 02/06/2008 (turbidimètre EDF), Romans entre le 26/05/2008 et le 30/06/2008 (HADCP CNR, analysé par Irstea (Moore, 2011)) et Beaumont-Montoux pendant la deuxième semaine de l'épisode (Prélèvements EDF) ;
- ◆ Durance : Les concentrations en MES ont été obtenues à partir des flux de MES à la station de Bonpas transmis par EDF (turbidimètre).

Deux stations permettent de suivre la propagation du flux de MES sur le Rhône : la station temporaire de Tricastin (PK 174,5, HADCP EDF, analysé par Irstea (Moore, 2011)) ainsi que la station d'Arles.



Figure 1 : Plan de situation du bief modélisé avec zoom sur la confluence Isère-Rhône.

L'événement peut être divisé en trois périodes productrices de MES. La première période couvre la chasse du barrage de Saint-Egrève sur l'Isère du 26/05/2008 au 29/05/2008. Cette chasse a eu lieu en même temps qu'une crue annuelle de l'Isère avec des débits atteignant $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ à la station de Beaumont-Monteux. Les barrages de la Basse-Isère situés en aval étaient alors opérés avec des niveaux d'eau élevés dans les retenues. Au cours de cette **première période**, une crue importante de la Durance s'est produite, avec des concentrations en MES supérieures à 10 g/L le 27/05/2008. La gestion des aménagements hydroélectriques de la Durance au cours de cette période a conduit à atténuer les débits (environ $800\text{ m}^3/\text{s}$) tout en libérant une grande quantité de MES.

Durant la **seconde période**, du 29/05/2008 au 02/06/2008, une importante crue de l'Arc a été enregistrée, provoquant un pic MES dans l'Isère à Grenoble et à Tullins le 30/05/2008. Ce pic a été enregistré dans le Rhône à Viviers le 31/05/2008. Pendant cette période, les réservoirs de la Basse-Isère n'ont pas été abaissés, mais les vannes ont été ouvertes laissant l'eau couler à travers les vannes de fond des barrages. Au cours de cette seconde période, une crue majeure de la Durance s'est produite avec des débits allant jusqu'à $1\,500\text{ m}^3/\text{s}$, et des concentrations en MES jusqu'à 6 g/L .

Durant la **troisième période**, du 02/06/2008 au 10/06/2008, les barrages de la Basse Isère ont été chassés, avec un faible niveau d'eau dans les réservoirs pour évacuer les sédiments. Un pic de MES a été enregistré à l'Isère à Beaumont-Monteux et, un jour plus tard, dans le Rhône à Viviers.

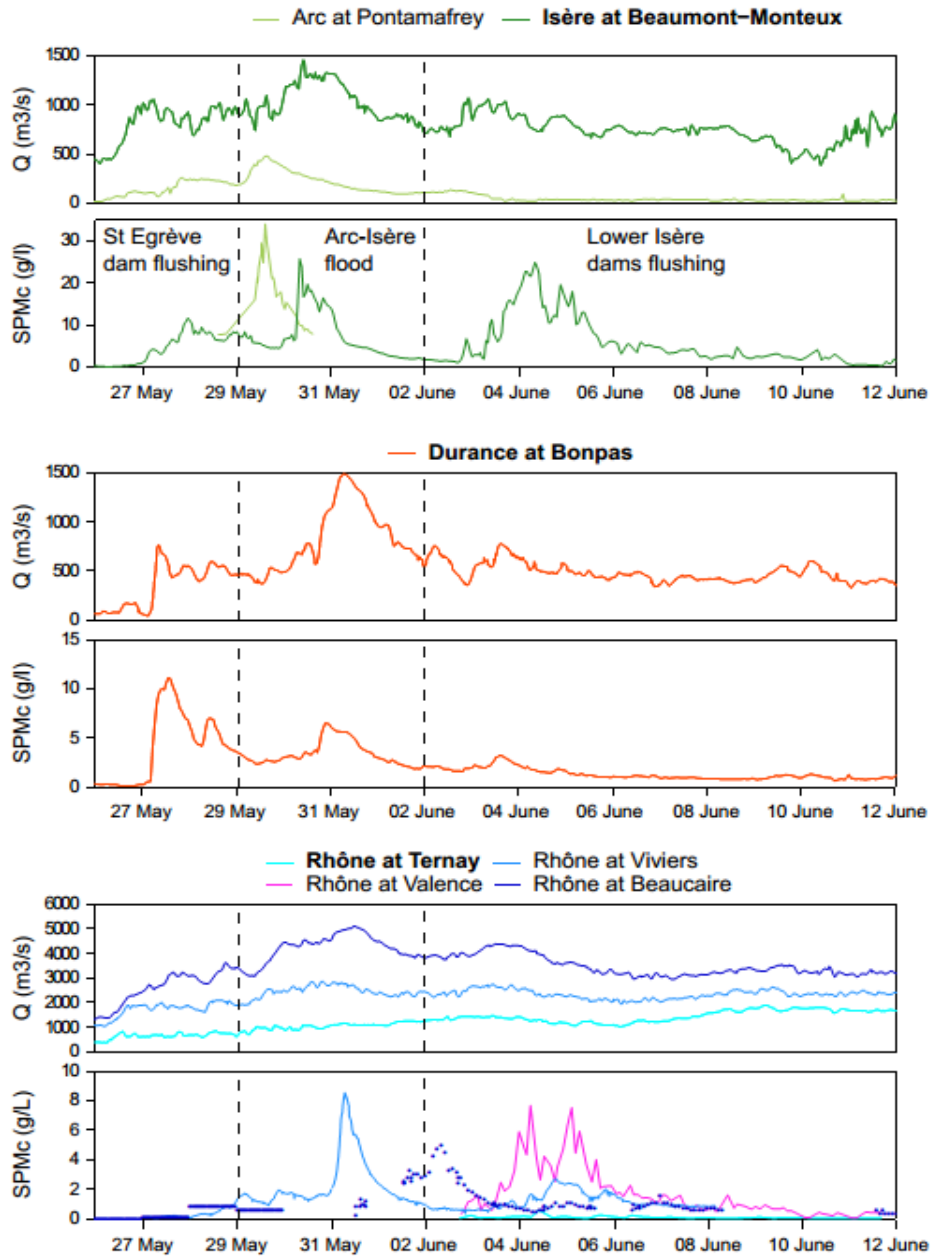


Figure 2 : Débits et concentrations en MES de l'Isère, de la Durance et du Rhône au cours de la crue de mai-juin 2008.

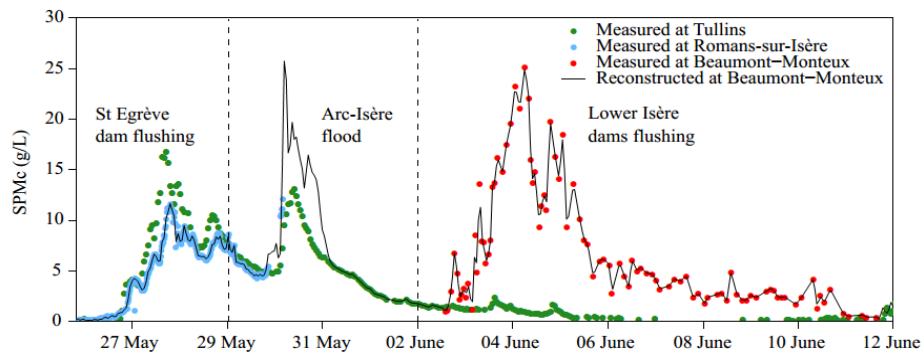


Figure 3 : Reconstruction de la chronique de concentrations en MES de l'Isère à Beaumont-Monteux pour la crue de mai-juin 2008.

Le modèle numérique 1D nécessite des informations sur la distribution granulométrique des MES. Aucune granulométrie n'a été mesurée dans l'Isère ou la Durance durant l'événement de mai-juin 2008. Des échantillons prélevés en d'autres occasions dans le réseau Arc-Isère ont été utilisés pour déterminer trois distributions possibles pour les MES transportées en mai-juin 2008, nommée Mélanges A, B et C (Figure 4 et Tableau 1). Ces trois distributions ont été obtenues à partir de :

- ◆ Deux échantillons d'eau de surface prélevés lors de crues de l'Arc (juin 2015) et de l'Isère (mai 2015). Ces échantillons ont été moyennés pour donner le Mélange A - granulométrie fine.
- ◆ Deux échantillons de sédiments du lit de la rivière prélevés après l'événement de mai-juin 2008, l'un en aval de l'usine de Bourg-lès-Valence (BLV) (06/08/2008), et l'autre dans le garage de l'écluse de BLV (23/06/2008). De plus, un échantillon a été prélevé après l'inondation de mai 2015 dans un dépôt en rive droite de l'Isère en aval de Beaumont-Monteux. Ils ont été moyennés pour composer le Mélange C - granulométrie grossière.
- ◆ Un échantillon prélevé dans la colonne d'eau près du fond à la confluence du Rhône et de l'Isère lors de la crue de mai 2015 contient des particules allant de l'argile au limon grossier en proportions égales. Cet échantillon intermédiaire constitue le Mélange B – granulométrie moyenne.

On a supposé que les MES de la Durance étaient composées de limon fin seulement, avec un diamètre médian d_{50} de 4 μm . Cette hypothèse repose uniquement sur l'observation de terrain de l'aspect très fin des particules transportées par la Durance.

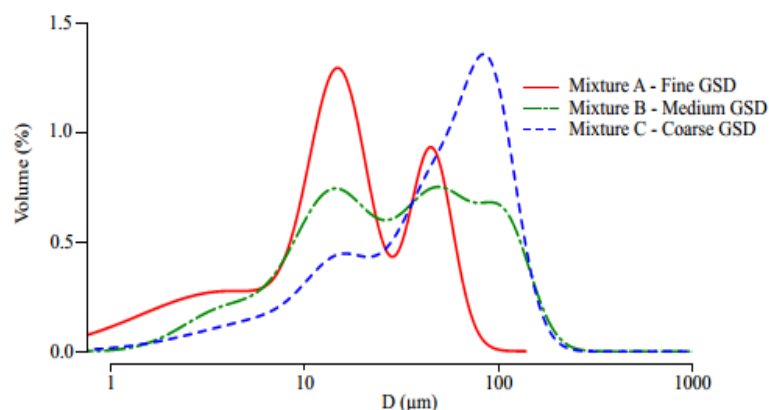


Figure 4 : Trois distributions granulométriques possibles pour les MES transportées par l'Isère lors de l'événement de mai-juin 2008.

Tableau 1 : Proportions des classes de MES dans les trois distributions granulométriques testées avec le modèle numérique pour les apports de l'Isère.

Type	d_{50} (μm)	Mélange A [%]	Mélange B [%]	Mélange C [%]
Argile (1 – 10 μm)	4	31	23	12
Limon fin (10 – 27 μm)	15	44	28	18
Limon moyen (27 – 80 μm)	45	25	31	40
Limon grossier (80 – 160 μm)	90	0	18	30

b) Impact de la granulométrie sur les concentrations en MES simulées

Au cours de l'événement de mai-juin 2008, l'Isère a produit des MES au cours des trois périodes distinctes décrites précédemment. Les processus de génération des MES étaient différents, avec des opérations de chasse de barrage pendant la 1ère et la 3ème période et des inondations naturelles pendant la 2ème période (**Figure 2**). Les particules transportées au cours des deux semaines avaient donc des origines très hétérogènes.

Des tests de simulation ont été effectués en utilisant les trois hypothèses de distributions granulométriques présentées sur la **Figure 4** pour les apports de l'Isère. Les concentrations en MES simulées obtenues à la station de Viviers ont été comparées aux MES mesurées sur la **Figure 5**. Plus la granulométrie supposée des MES de l'Isère est grossière, plus la concentration en MES estimée à la station de Viviers est faible. Ceci s'explique par le dépôt des particules les plus grossières dans les quatre aménagements hydroélectriques entre le dernier barrage sur l'Isère et Viviers. Comme le mélange C est composé de particules plus grossières que le mélange A, le dépôt est plus intense dans les simulations avec le mélange C.

À partir de ces observations, il apparaît que la granulométrie des MES transportées était différente au cours des trois périodes de l'événement de mai-juin 2008. Lors de la chasse du barrage de St Egrève, les MES grossières évacuées du réservoir de St Egrève ont été partiellement stockés dans les réservoirs de la Basse Isère. La granulométrie moyenne (mélange B) est cohérente avec cette situation. En revanche, lors pendant la crue du système Arc-Isère, le pic MES mesuré à Viviers a atteint environ 9 g/L. Seul le mélange A avec la granulométrie la plus fine permet de se rapprocher de telles concentrations. Pour la troisième période de l'événement, correspondant aux chasses des barrages de la Basse Isère, c'est le mélange C qui donne une chronique de MES à la station Viviers en accord avec les mesures. Ceci est cohérent avec l'ouverture des vannes du barrage qui conduit au mouvement des particules plus grossières précédemment déposées dans le réservoir.

Pour la simulation de l'événement de mai-juin 2008, la granulométrie a été paramétrée comme suit : la granulométrie moyenne du mélange B pour la première période, la granulométrie fine du mélange A pour la deuxième période et la granulométrie grossière du mélange C pour la troisième période.

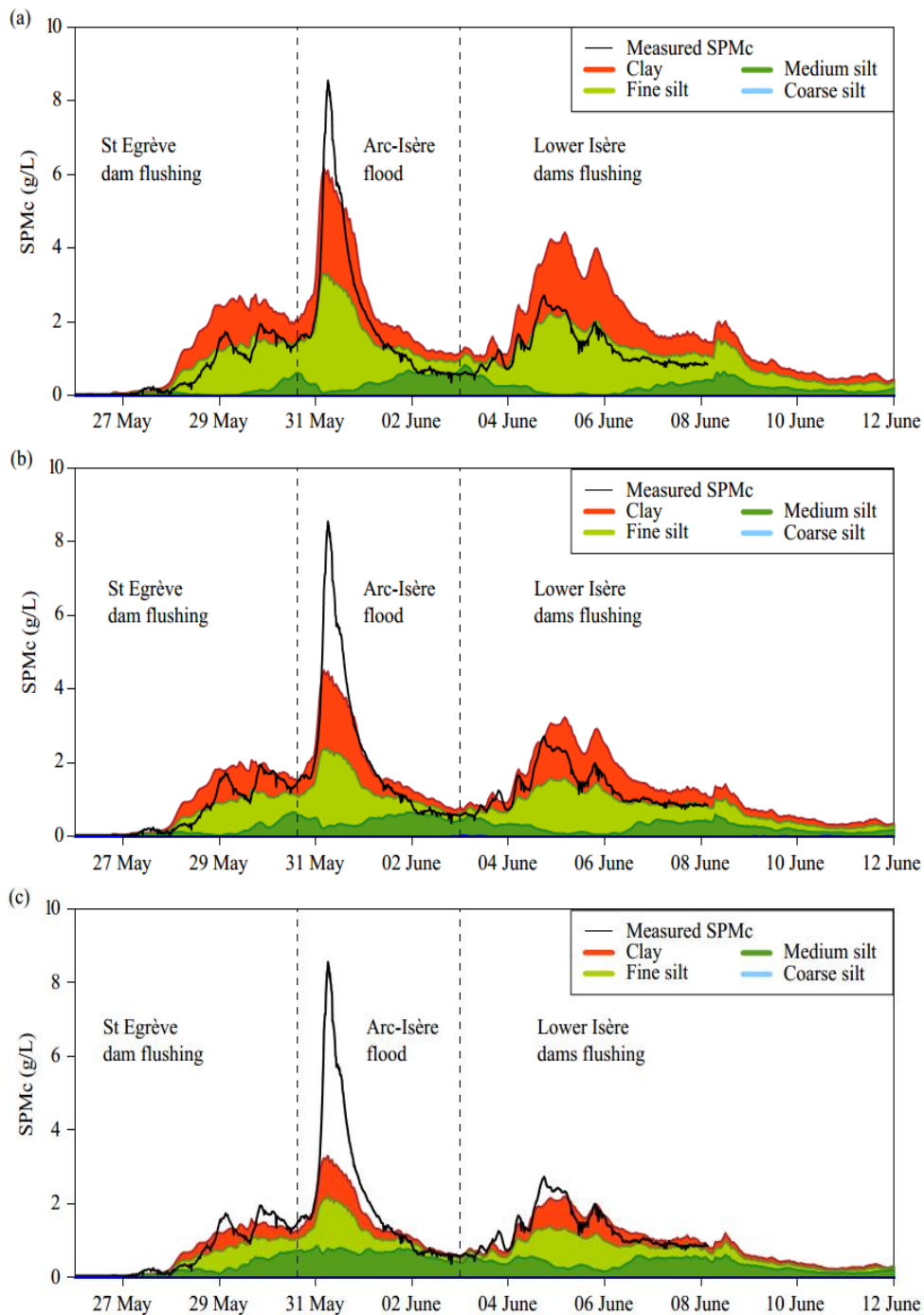


Figure 5 : Concentrations en MES simulées et mesurées à la station Viviers pour les trois hypothèses de distributions granulométriques : (a) Mélange A- granulométrie fine, (b) Mélange B- granulométrie moyenne et (c) Mélange C- granulométrie grossière.

c) Interaction des MES avec les aménagements hydroélectriques

L'objectif de cette section est d'étudier la dynamique des MES entre le dernier barrage de l'Isère et la station de Viviers (**Figure 1**). Cinq simulations ont été réalisées pour étudier les processus de dépôt/érosion survenant dans chaque schéma hydroélectrique du tronçon. La première simulation a été réalisée sans activer le dépôt/érosion sur l'ensemble du tronçon.

Pour les quatre autres simulations, le dépôt/érosion a été successivement activé dans les quatre aménagements hydroélectriques du réseau, ce qui a conduit à la diminution de la concentration en MES simulée à Viviers (**Figure 6**). Le pic de MES simulé a diminué de 4 à 2 g/L lors de la première période et de 8 à 2 g/L lors de la troisième période. Pendant la période de crue (deuxième période), le pic de MES simulé est passé de 9 à 6 g/L. La simulation des dépôts est nécessaire pour reproduire la concentration en MES mesurée à Viviers. Les dépôts sont particulièrement intenses pendant les périodes de chasse de barrage (première et troisième périodes), où les MES transportées sont plus grossières et se déposent derrière les barrages profitant de vitesses d'écoulement réduites.

Ces simulations suggèrent que la diminution la plus importante de concentration en MES, correspondant à un fort dépôt, a eu lieu dans l'aménagement de Bourg-lès-Valence (BLV), entre le dernier barrage de l'Isère et BLV. Les MES se sont également déposées dans les trois aménagements suivants, mais dans une moindre mesure.

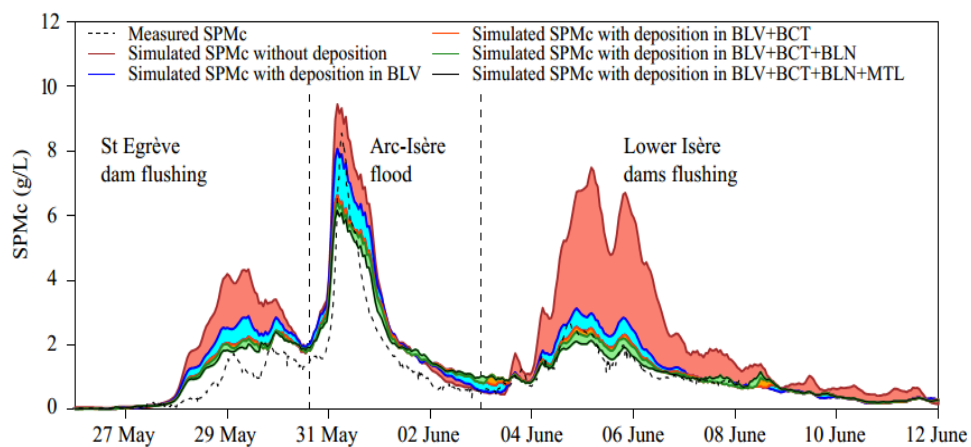


Figure 6 : Concentrations en MES simulées et mesurées à la station Viviers avec les processus de dépôt/érosion successivement activés dans les quatre aménagements hydroélectriques situés entre le dernier barrage de l'Isère et Viviers. BLV = Bourg-lès-Valence, BCT = Beauchastel, BLN = Baix-Le Logis Neuf, MTL = Montélimar.

Le modèle numérique fournit des informations détaillées sur la quantité et la qualité des MES présentes dans chaque branche du système fluvial à tout moment de la simulation. Les flux de MES cumulés en d'entrée et de sortie sont également fournis. Afin de mieux comprendre les processus de dépôt entre le dernier barrage de l'Isère et le barrage de BLV observés sur la **Figure 6**, les quantités cumulées de MES déposées dans la zone sont présentées sur la **Figure 7**. A l'échelle de l'ensemble de l'événement, l'Isère a produit un total de 7,7 Mt de MES, dont 2,8 Mt se sont déposées à la confluence Isère-Rhône. Le dépôt de MES s'est produit principalement dans trois branches du réseau : 60% dans la branche aval de l'Isère et 30% dans les canaux d'usine de BLV et BCT. Les dépôts se sont principalement produits au cours des deuxième et troisième périodes, avec une ségrégation de la granulométrie des particules déposées.

La crue du système Arc-Isère (deuxième période) a apporté principalement des MES fines. L'Isère a produit 2,8 Mt au cours de cette période, et 80% de ces intrants, principalement composés de MES fines, ont traversé les aménagements de BLV et BCT. Les 20% restants, composés principalement de particules plus grossières, ont été piégés dans les canaux d'usine de BCT et BLV.

La majeure partie des dépôts s'est produite au cours de la troisième période lors de la chasse des barrages de la Basse-Isère. Le flux SPM durant cette période était de 3,8 Mt, soit la moitié de l'apport total de l'Isère pendant l'événement.

Les MES grossières représentaient 30% des apports de l'Isère, et ces particules se sont déposées massivement dans la branche de l'Isère, et dans une moindre mesure dans les canaux d'usine de BLV et BCT.

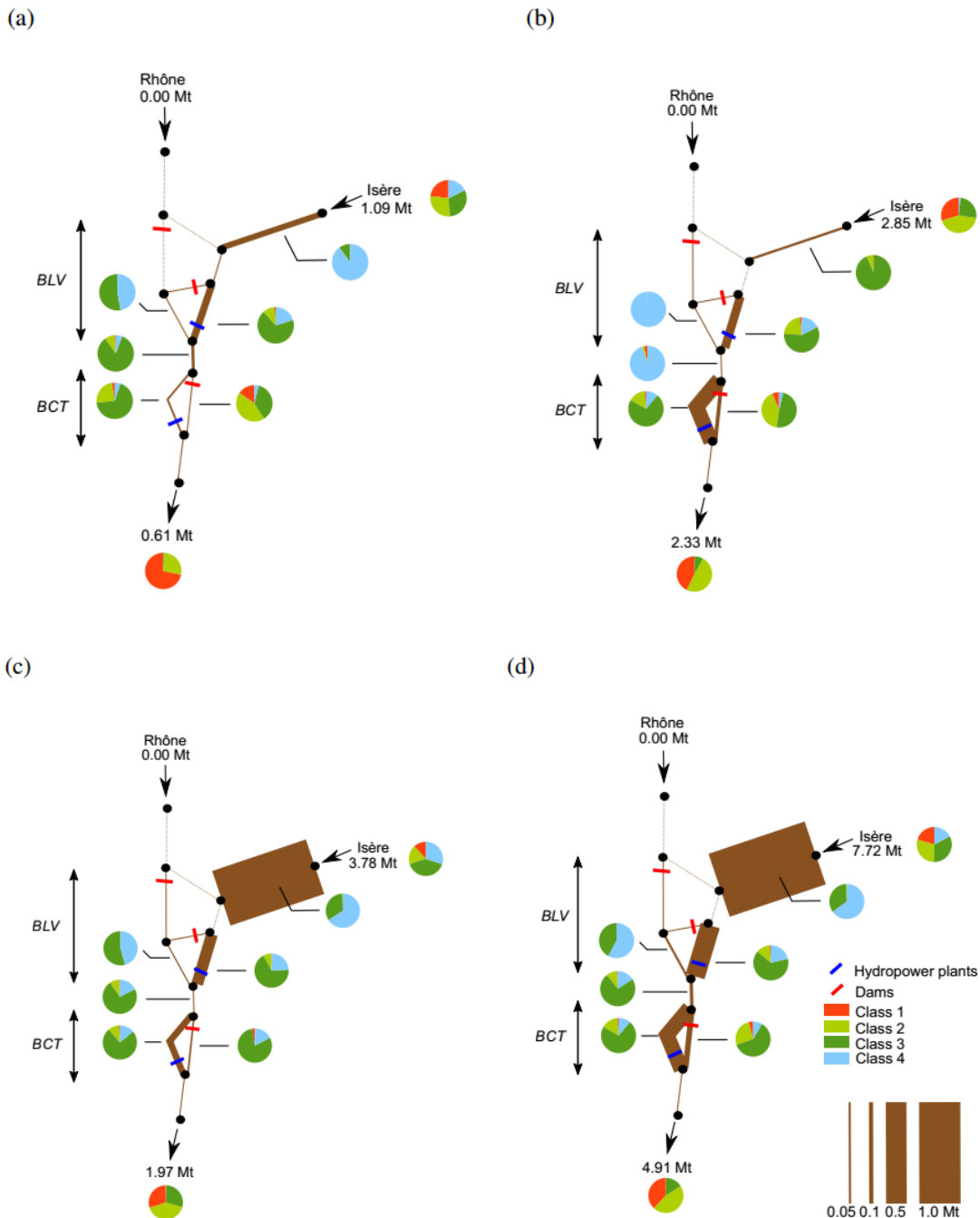


Figure 7 : Composition massique et granulométrique des entrées, sorties et dépôts de MES à la confluence Isère-Rhône lors de l'événement de mai-juin 2008 : première période (a), deuxième période (b), troisième période (c) et événement complet (d). L'épaisseur des lignes est proportionnelle à la masse de MES déposées dans chaque tronçon.

d) Une meilleure compréhension des flux de MES

Le modèle numérique est capable de reproduire convenablement les flux mesurés. Pour les différentes stations, l'erreur relative entre les flux cumulés mesurés et simulés au cours de l'événement de mai-juin 2008 est comprise entre +15 % et +36 %, sauf pour la première période (**Figure 8**). L'événement de mai-juin 2008 a produit un flux de MES cumulé mesuré de 4,9 Mt à Beaucaire. Le flux cumulé simulé était de 6,5 Mt. Grâce au modèle, une meilleure compréhension de l'origine des flux de MES et de leur évolution pendant l'événement est possible. En particulier, le modèle a permis de clarifier les flux de MES alors que les incertitudes des mesures étaient importantes, notamment pour l'Isère. Il a également permis d'estimer les flux de MES dans les parties non mesurées du réseau fluvial du Rhône.

Le flux de MES simulé à la station de Viviers pendant la première semaine était très proche du flux SPM mesuré pendant les trois périodes de l'événement (**Figure 8**). L'écart absolu était de l'ordre de + 0,8 Mt pour l'ensemble de l'événement pour un flux de MES total mesuré de 3,6 Mt à cette station. Cela a permis de valider la reconstitution de la série temporelle de concentration en MES à Beaumont-Monteux (**Figure 3**), et le choix d'une granulométrie variable pour les trois périodes.

Quant à la Durance, le modèle a mis en évidence la faiblesse de l'hypothèse d'une distribution granulométrique très fine pour l'ensemble de l'événement. Au cours de la première semaine de l'événement, l'écart relatif entre les flux mesurés et simulés a augmenté de +50% à +133% entre Viviers et Beaucaire (**Figure 8**). Ceci s'explique par le transfert des MES de la Durance directement à Beaucaire sans dépôt. Mais le flux de MES mesuré de 0,5 Mt seulement à Beaucaire au cours de la première semaine indique un dépôt important d'environ 1,0 Mt à la confluence de la Durance. Ce dépôt n'a pas été reproduit par le modèle numérique, probablement en raison d'une distribution granulométrique trop fine supposée pour l'apport en MES de la Durance durant cette première période. Pour les deuxième et troisième périodes, l'hypothèse d'une granulométrie fine pour les apports en MES de la Durance semble plus réaliste puisque les flux mesurés et simulés à Beaucaire sont en meilleur accord. Les MES provenant de la Durance au cours de ces deux périodes semblent avoir traversé le Rhône jusqu'au Delta sans se déposer.

Le modèle a également été utile pour estimer la quantité de MES transportées dans le Petit Rhône à Fourques, où aucune mesure de concentration en MES n'était disponible. Le flux de MES du Petit Rhône représente de 10 à 15% des flux de MES mesurés à la station de Beaucaire. Ceci est en bon accord avec la distribution des débits d'eau entre le Petit Rhône et le Grand Rhône observée dans les séries temporelles de débit à long terme (source CNR).

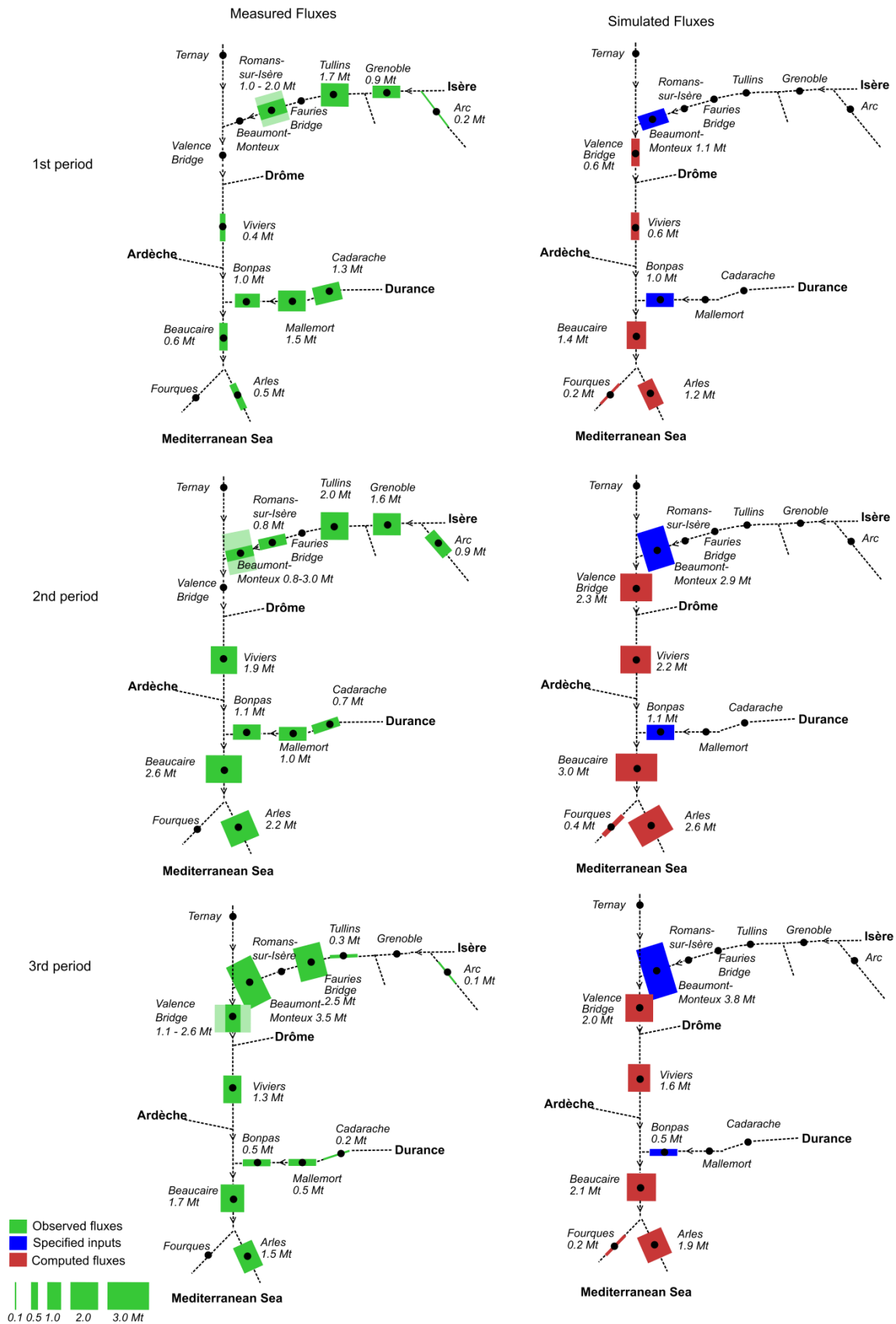


Figure 8 : Flux cumulés surveillés et simulés SPM (en Mt) le long du Rhône durant les première, deuxième et troisième période de l'événement 2008. L'épaisseur de la ligne est proportionnelle au flux SPM à la station correspondante.

L'origine des MES transportées pendant les trois périodes de l'événement a été clarifiée. En particulier, les apports de l'Isère qui n'ont pas été mesurés au cours de la première période ont pu être quantifiés avec le modèle. La **Figure 9** montre l'évolution de la concentration en MES mesurée et simulée à Arles et la proportion de MES provenant de l'Isère et de la Durance. Les concentrations en MES simulés sont proches des concentrations mesurées, à l'exception du pic enregistré le 01/06/2008. La concentration en MES maximale enregistrée était d'environ 5 g/L tandis que la concentration maximale simulée était de 4 g/L, soit une différence de 20%.

La **Figure 9** met en évidence la contribution importante de la Durance durant les premiers jours de l'événement et la contribution croissante de l'Isère pendant le reste de l'événement. Environ 50% des flux de MES provenaient de la Durance et les 50% restants provenaient de l'Isère. Il faut également garder à l'esprit que près de 50% des flux de MES apportés par l'Isère se sont déposés dans le réseau fluvial avant d'atteindre Viviers. Eyrolle et al. [2012] ont discuté de l'origine du SPM qui a transité et déposé dans le delta du Grand-Rhône lors de la manifestation de mai-juin 2008. Ils ont supposé que la majeure partie des MES provenaient de la Durance et ont se sont intéressés à l'origine des MES dans le bassin de la Durance. Nos résultats mettent en évidence la contribution importante de l'Isère.

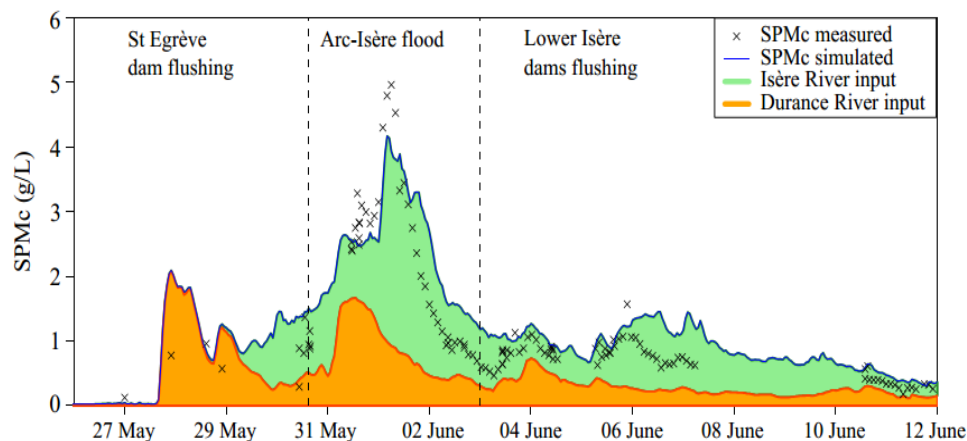


Figure 9 : Concentrations en MES simulées et mesurées dans le Rhône d'Arles lors de l'événement 2008 avec décomposition des apports SPM de l'Isère et de la Durance.

e) Conclusions sur l'étude des flux de MES

Les résultats de ces simulations permettent de mettre en avant plusieurs points importants listés ci-dessous :

- ◆ L'importance de la granulométrie sur les flux de MES. Pour pouvoir approfondir l'interprétation des flux de MES au cours d'un événement, il est nécessaire de connaître la granulométrie du sédiment associé en complément des mesures de concentration.
- ◆ L'impact des aménagements hydro-électriques sur les flux. En lien direct avec la granulométrie, le niveau d'eau dans les retenues du Rhône a un impact direct sur les flux de MES. Cet impact est moindre pour les sédiments fins mais est très important pour les sables en suspension. Plus le niveau dans les retenues est haut, plus la décantation des particules grossières est importante. Il est donc indispensable que leur fonctionnement soit reproduit au mieux par le modèle numérique.
- ◆ Les apports de la modélisation à un réseau de mesures existant. Le modèle permet de propager les données des stations de mesure ponctuelles sur l'ensemble du réseau tout en conservant

l'information sur l'origine des flux. Cela permet de déterminer à un instant t , quel affluent est le principal contributeur en MES dans le cas de crues concomitantes. L'évolution de la granulométrie au sein du réseau est également un résultat additionnel mais nécessiterait des mesures complémentaires pour être validé.

2. Flux de contaminants de la Bourbre - avril-mai 2013

Un des objectifs du modèle du Rhône 1D est de modéliser le transport de contaminants sur le réseau. Babut et Miège (2007) ont montré que la teneur moyenne en PCB indicateurs est 6 fois plus importante sur la Bourbre qu'à Jons. Une simulation a donc été faite sur une période où les débits et les concentrations en MES de la Bourbre ont été mesurés (avril-mai 2013). Les teneurs en contaminants (PCB indicateurs et mercure) ont également été mesurés sur cette période avec des pièges à particules aux stations de Jons sur le Rhône et de Tignieu-Jameyzieu sur la Bourbre.

a) Données d'entrée du modèle

Les flux d'eau, de sédiments et de contaminants ont été modélisés sur la période avril-mai 2013. Le secteur modélisé s'étend sur le Rhône de la station de Lagnieu (PK 56) à la station de Jons (PK 27,65). Ce tronçon inclue les apports de l'Ain (station de Port-Galland) ainsi que les apports de la Bourbre (station de Tignieu-Jameyzieu) (**Figure 10**).

La description du modèle sur ce secteur (bathymétrie et coefficient de frottement) est disponible dans deux livrables OSR (Livrables OSR 2013 et 2016). Le tronçon modélisé n'inclut aucun aménagement hydroélectrique. La condition limite aval du modèle est fixée à la station de Jons où le niveau de la retenue est connu.

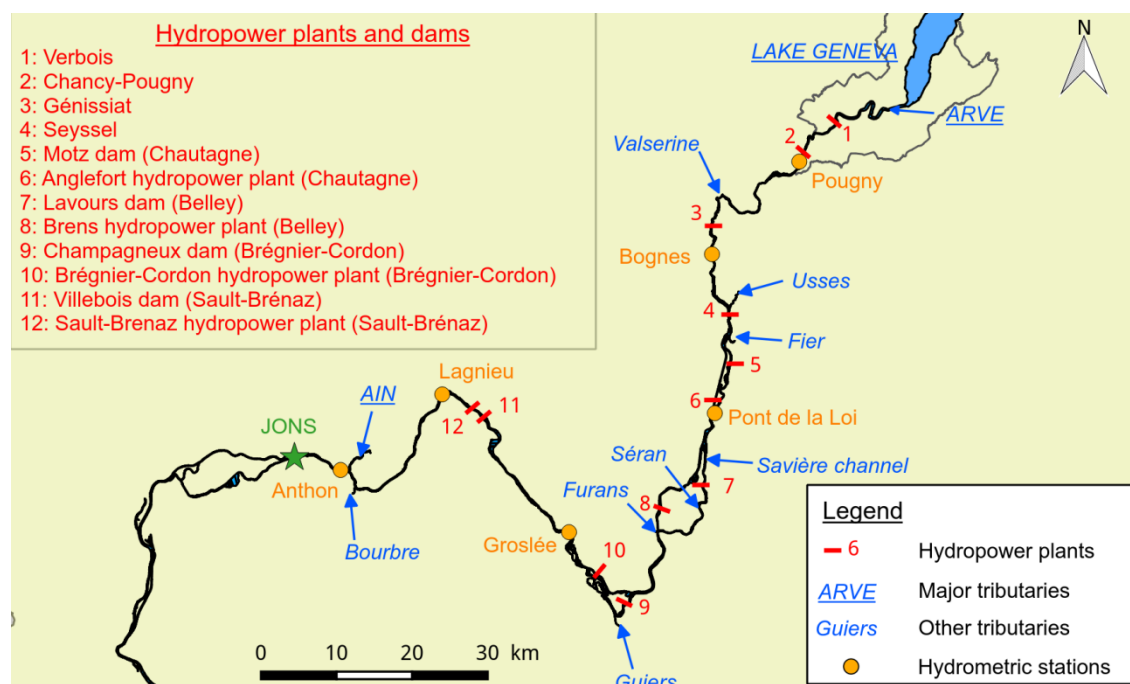


Figure 10 : Schéma du Haut-Rhône. Les simulations présentées dans ce chapitre se situent entre Lagnieu et Jons.

Les conditions limites amont utilisées pour la modélisation sont répertoriées dans le **Tableau 2**. Une station turbidimétrique temporaire était présente sur la Bourbre pendant la période simulée. Pour le Rhône à Lagnieu (Bugey) ainsi que l’Ain à Port-Galland, les formules $C(Q)$ issues de la thèse de Marina Launay ont été utilisées (Equation 1).

$$C = aQ^b \quad (\text{Eq. 1})$$

Où Q est le débit [m^3/s] et C la concentration en matière en suspension [g/l]. Les paramètres a et b dépendent de la station de mesure considérée et leurs valeurs sont indiquées dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Conditions limites amont du modèle.

	Débits	CMES	Type de données	Paramètres
Rhône	Lagnieu	Bugey	Formule $C = aQ^b$	$a = 3,27 \cdot 10^{-9}$; $b = 2,53$
Bourbre	Tignieu-Jameyzieu	Tignieu-Jameyzieu	Mesures	
Ain	Port-Galland	Port-Galland	Formule $C = aQ^b$	$a = 4,28 \cdot 10^{-5}$; $b = 1,11$

Les teneurs en PCB et en mercure ont été mesurées en mai-juin 2013 à l’aide de pièges à particules (intégration sur une période) aux stations de Jons (Rhône) et de Tignieu-Jameyzieu (Bourbre). La **Figure 11** compare les teneurs mesurées des deux contaminants. De manière générale, la teneur en PCB de la Bourbre est supérieure à celle mesurée à Jons. En revanche, la concentration en mercure à Jons dépasse celle de la Bourbre entre le 23/04 et le 06/05. Cela indique qu’il y a une autre source d’apport en mercure à la même période (Ain et/ou Rhône).

La simulation numérique peut apporter des éléments de réponse à ces questions.

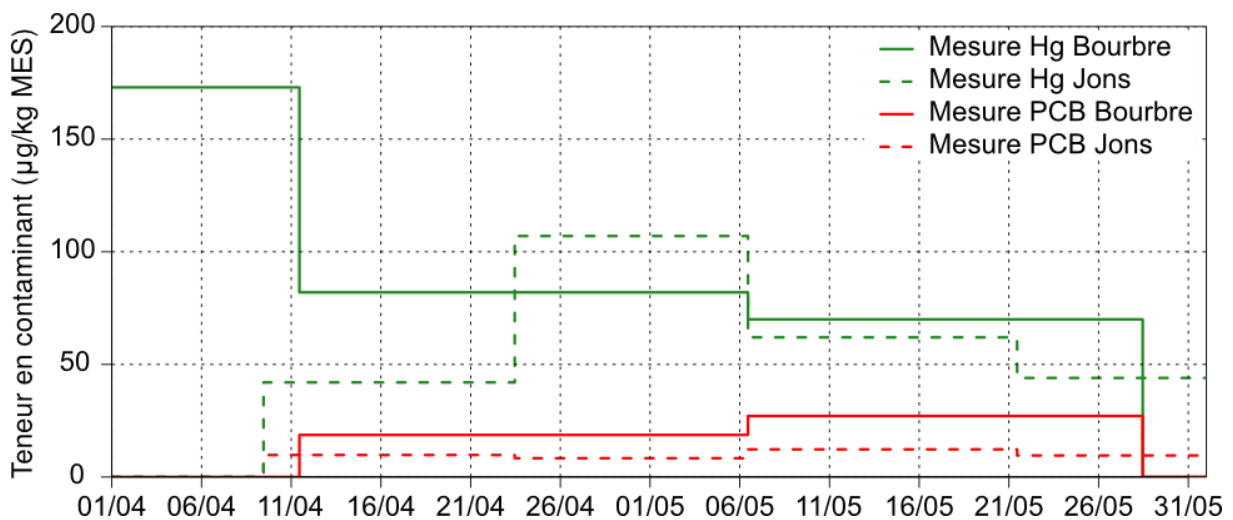


Figure 11 : Teneurs en PCB et en mercure sur la Bourbre à Tignieu-Jameyzieu et sur le Rhône à Jons (données BDOH).

b) Décomposition des apports en eau

La modélisation hydraulique ainsi que le traçage des contributions des affluents permettent de connaître la proportion d'eau provenant des différents affluents. La décomposition de l'hydrogramme à Jons est donnée dans la **Figure 12a**. La majorité de l'eau provient du Rhône (Lagnieu) et de l'Ain. Un pic de débit peut être remarqué sur l'Ain le 12/04/2013. La contribution de la Bourbre est négligeable devant ces deux apports.

Un bilan des flux d'eau sur cette période a été effectué et est présenté dans la **Figure 12b**. Les apports en eau du Rhône sont majoritaires à 78%, suivi par l'Ain (20%) et par la Bourbre (2%).

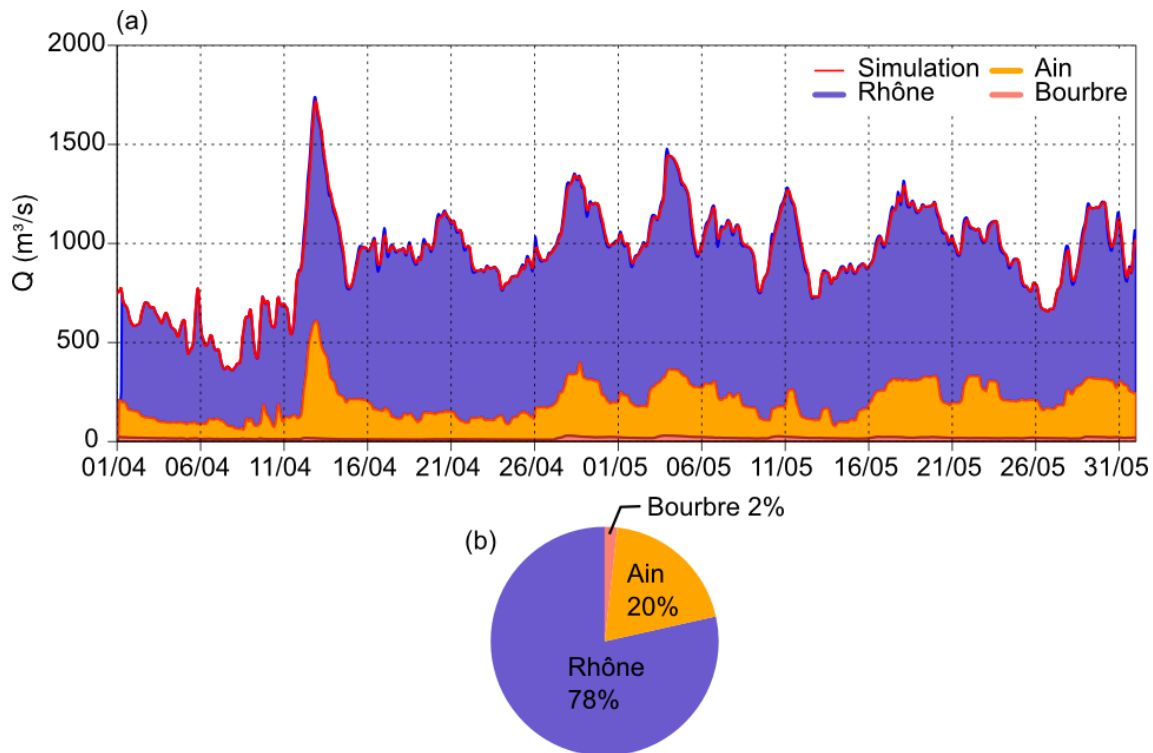


Figure 12 : Décomposition des apports en eau à la station de Jons: Flux instantané (a) et cumulé (b).

c) Décomposition des flux de MES à Jons

La même approche que pour la décomposition des apports en eau a été suivie pour étudier les flux de MES. La granulométrie des sédiments modélisés a été choisie d'après des échantillons collectés sur chacune des trois sources. Les différentes classes de chacune des granulométries sont présentées dans l'Annexe 1.

Pour les trois contributeurs, le sédiment choisi pour la modélisation avec Adis-TS est du limon fin (10-27 μ m). Le paramétrage d'Adis-TS pour cette classe de sédiment reprend celui validé par Guertault (2015).

Le flux de MES total modélisé est comparé avec le flux de MES mesuré à Jons (**Figure 13a**). La décomposition en fonction des apports est également présentée sur la figure. Les deux courbes de flux de MES suivent bien les mêmes tendances et, à l'exception du pic de MES observé le 12/04/2013, les valeurs obtenues sont cohérentes.

Les différences peuvent avoir plusieurs explications :

- ◆ Les formules $C(Q)$ utilisées comme conditions limites amont dans le modèle peuvent avoir tendance à surestimer les faibles apports et à sous-estimer les forts apports. Ici, le Rhône à Lagnieu semble être le principal contributeur et les variations de flux suivent bien les variations du débit à Lagnieu.
- ◆ Le pic de concentration correspondant à l'Ain est sous-estimé par le modèle. Il semblerait que la contribution de l'Ain ait été plus importante que celle donnée par la formule $C(Q)$. D'après les données existantes à la station de Pont-de-Chazey, lors d'une crue sur l'Ain, les concentrations en MES sont de l'ordre de 150 à 200 mg/L au pic de crue. En utilisant $C_{max} = 200$ mg/L sur l'Ain au pic de crue (12/04/2013), on retrouve une concentration en MES d'environ 400 mg/L à Jons. Une mise à jour de la relation $C(Q)$ de l'Ain avec les mesures récentes (APAVÉR 2016) doit être envisagée.
- ◆ Du dépôt a pu se produire entre la station de Lagnieu sur le Rhône et la station de Jons.

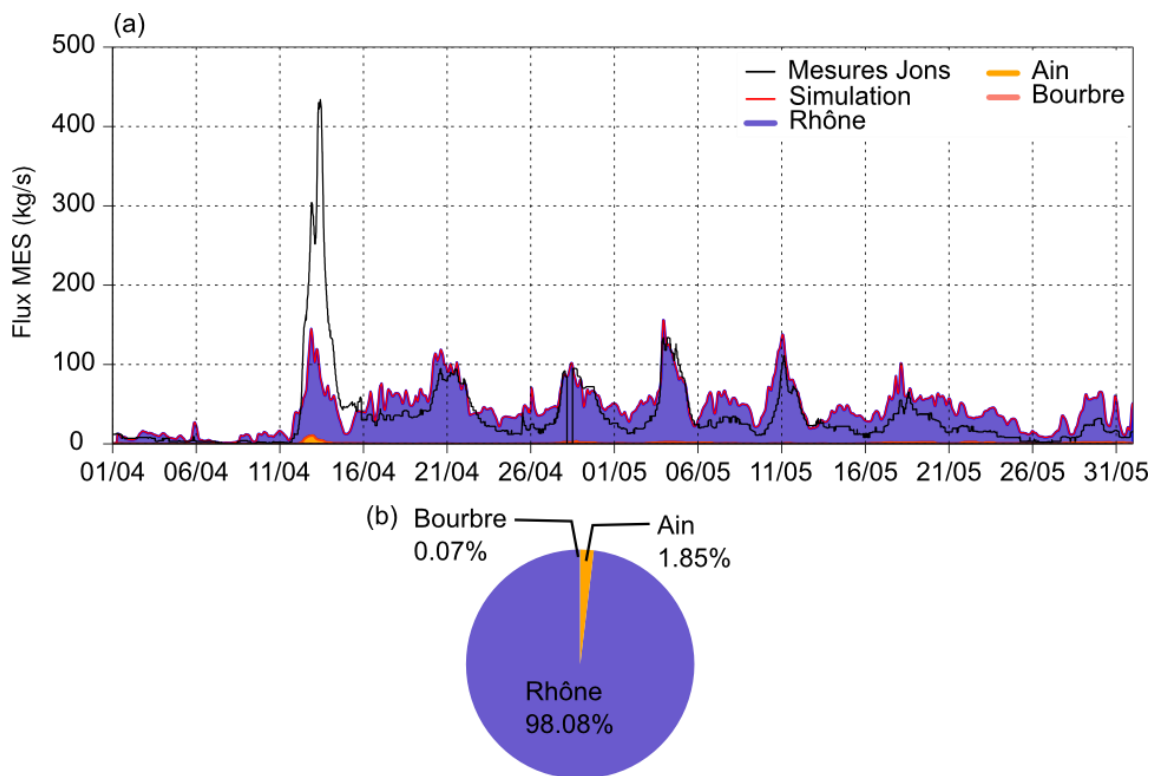


Figure 13 : Décomposition des flux de MES à Jons (modélisation avec une granulométrie fine 20 μ m).

Pour compléter, un bilan des flux de MES sur cette période est présenté dans la **Figure 13b**. La contribution de la Bourbre est très faible. Le Rhône apporte la majorité des sédiments (98,08%) tandis que l'Ain a une part très minoritaire dans les apports (1,85%). Dans l'ensemble, la simulation surestime de 20% le flux de MES par rapport aux mesures sur la même période. On reste dans l'ordre de grandeur des incertitudes liées aux mesures de concentrations en MES.

d) Teneurs en contaminants à Jons

La propagation des contaminants (PCB et mercure) de la Bourbre jusqu'à Jons a également été modélisée avec le modèle du Rhône.

Aucune mesure de PCB ni de mercure n'étant disponible sur le Rhône et l'Ain, seuls les apports de la Bourbre sont considérés et comparés aux mesures à Jons. Les teneurs en PCB et en mercure ont été mesurées à l'aide de pièges à sédiments (intégration sur deux semaines pour Jons). La variation temporelle de la teneur en contaminant n'est donc pas connue au pas de temps horaire.

La prise en compte de la teneur dans le modèle Adis-TS se fait de la manière suivante. Le sédiment total injecté est divisé en deux parties :

- ◆ Une partie porteuse du contaminant de concentration $C_s^{pol}(t)$
- ◆ Une partie non porteuse $C_s^{clean}(t)$

De manière à ce que :

$$C_s(t) = C_s^{pol}(t) + C_s^{clean}(t) \quad (\text{Eq. 2})$$

La concentration en sédiment porteur du contaminant peut être calculée à l'aide de l'Equation 3:

$$C_s^{pol}(t) = C_s(t) * Teneur_{PCB/Hg}(t) / Teneur_{PCB/Hg}^{max} \quad (\text{Eq. 3})$$

Où $Teneur_{PCB/Hg}$ est la teneur en contaminant [$\mu\text{g}/\text{kg}$ de MES]. Les valeurs utilisées sont présentées dans la **Figure 11**. Les valeurs utilisées pour $Teneur_{PCB/Hg}^{max}$ sont résumées ci-dessous :

- ◆ $Teneur_{PCB}^{max} = 30$ [$\mu\text{g}/\text{kg}$ de MES]
- ◆ $Teneur_{Hg}^{max} = 180$ [$\mu\text{g}/\text{kg}$ de MES]

Les résultats des simulations à Jons sont présentés dans la **Figure 14a** pour le transport de PCB et dans la **Figure 14b** pour le transport de mercure. Les teneurs simulées des deux contaminants à Jons sont très sous-estimées par rapport à celles mesurées.

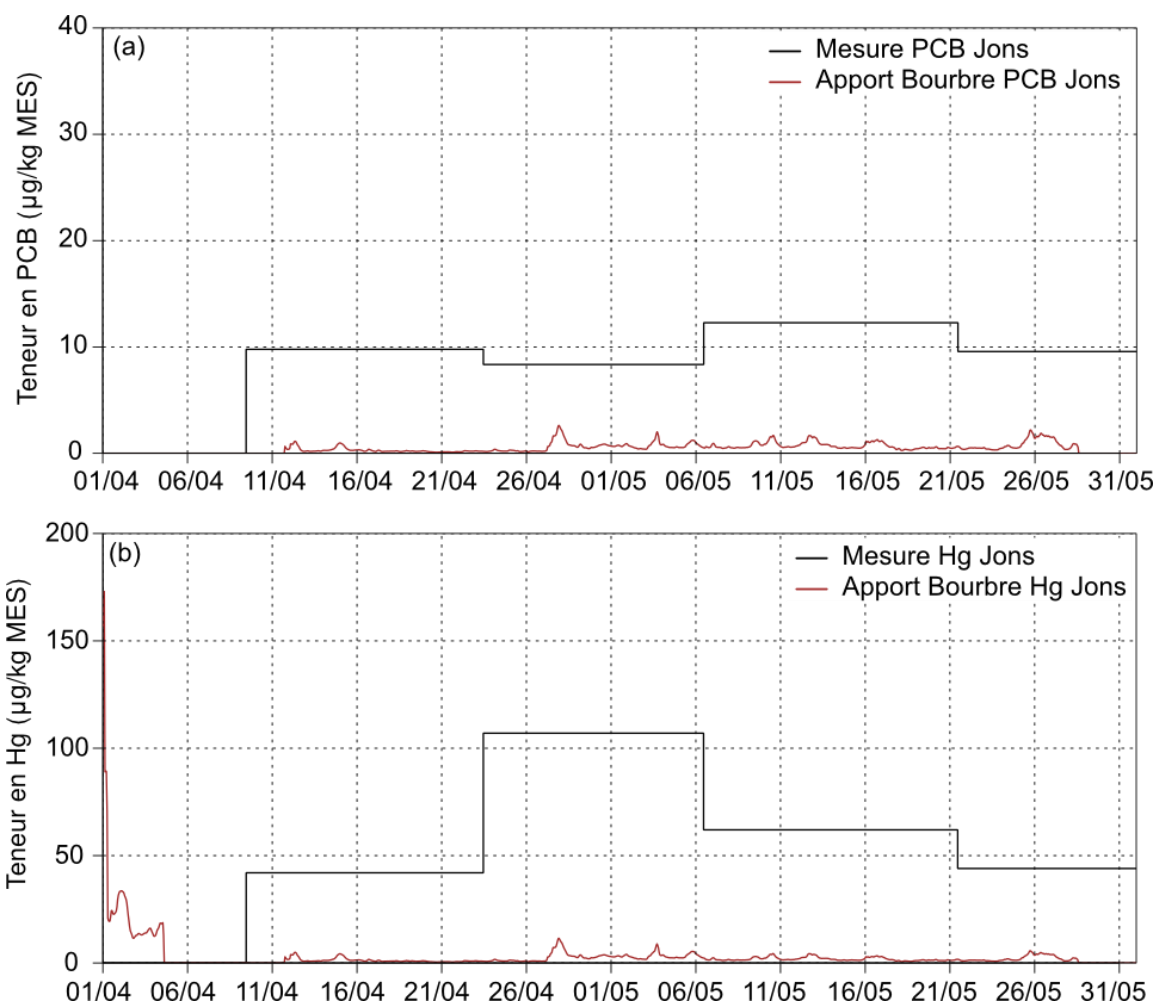


Figure 14 : Modélisation des flux de contaminants entre la Bourbre et la station de Jons. (a) Modélisation du transport de PCB et (b) modélisation du transport de mercure.

Ce résultat n'est pas incohérent avec les résultats de décomposition des apports en eau (**Figure 12**) et des apports en sédiments (**Figure 13**). Les apports de la Bourbre sont très faibles par rapport à ceux du Rhône à Lagnieu et de l'Ain. Il est donc envisageable que la majeure partie des PCB et du mercure mesuré à Jons provienne de ces deux contributions.

3. Flux de mercure - mai 2015

Dans cette partie, la propagation du mercure est étudiée sur le Rhône à l'aval de Lyon jusqu'à la station d'Arles. La Saône contribue en partie au flux de mercure mesurée à Arles et la modélisation numérique peut apporter une estimation de cette proportion.

La période choisie correspond à une crue généralisée sur les affluents du Rhône (Arve, Saône et Isère). Les flux de MES au cours de cet événement ont été importants et relativement bien suivis sur le Rhône à l'aval de Lyon (réseau OSR et suivi des chasses des barrages de la Basse-Isère).

Cette section présente les résultats obtenus sur l'étude des flux d'eau, de MES et de mercure à la station d'Arles avec le modèle numérique 1D du Rhône.

a) Présentation du tronçon modélisé et des données d'entrée du modèle

La modélisation hydrosédimentaire 1D de l'événement de mai 2015 couvre le linéaire du Rhône entre la station turbidimétrique de Jons (PK 26,75) et la mer Méditerranée. Le modèle prend en compte les apports en MES de la Saône, du Rhône et de l'Isère. Le modèle s'étend en aval jusqu'à la mer Méditerranée afin de bénéficier des mesures de concentrations en MES faites sur le Grand Rhône à Barcarin (PK 316,5). Sur la période étudiée, les concentrations en MES mesurées à Arles sont journalières (un échantillon collecté sur 24h regroupant 16 sous-échantillons (soit un échantillon toutes les 90 minutes)). Une vue d'ensemble de la zone couverte par le modèle est représentée sur la **Figure 15**.

Les données bathymétriques utilisées ainsi que le calage et la validation du modèle et l'intégration des ouvrages hydroélectriques sont décrits dans le rapport de Naudet et al. (2015) ainsi que dans le livrable de l'OSR (OSR4, 2015).

Les données hydrauliques utilisées dans le modèle couvrent la période du 15/04/2015 jusqu'au 29/05/2015 et encadrent donc la crue de mai 2015 sur l'Isère ainsi que les chasses des barrages de la basse-Isère. La station de Jons (Irstea) a été choisie comme condition amont au modèle. La condition amont des biefs de la Saône et de l'Isère sont respectivement les stations hydrométriques de Couzon (CNR) et de Beaumont-Montoux (CNR).

Le modèle couvre le linéaire du Rhône jusqu'à la mer Méditerranée (Figure 14). Le modèle inclut donc le delta du Rhône et deux conditions limites aval sur le Grand et le Petit Rhône. En l'absence des chroniques des limnimètres de Petite Abbaye (Petit Rhône, PK 326,8) et Grand Boisviel (Grand Rhône, PK 306,5), les niveaux à ces stations sont supposés constants.

Les hydrogrammes utilisés dans le modèle hydraulique sont représentés sur la **Figure 16**. Les débits mesurés à Jons sur le Rhône, à Couzon sur la Saône et à Beaumont-Montoux sur l'Isère sont utilisés comme condition amont au modèle tandis que les débits mesurés à Ternay (PK 15,2), à Valence (PK 109,7) et à Beaucaire (PK 269,6) sur le Rhône sont utilisés pour la validation des résultats hydrauliques. A titre indicatif, le débit mesuré à Bonpas sur la Durance est aussi représenté. Celui-ci est resté faible pendant la période étudiée. Aucune pointe de débit significative n'a été observée sur les affluents mineurs du Rhône au cours de cette période.

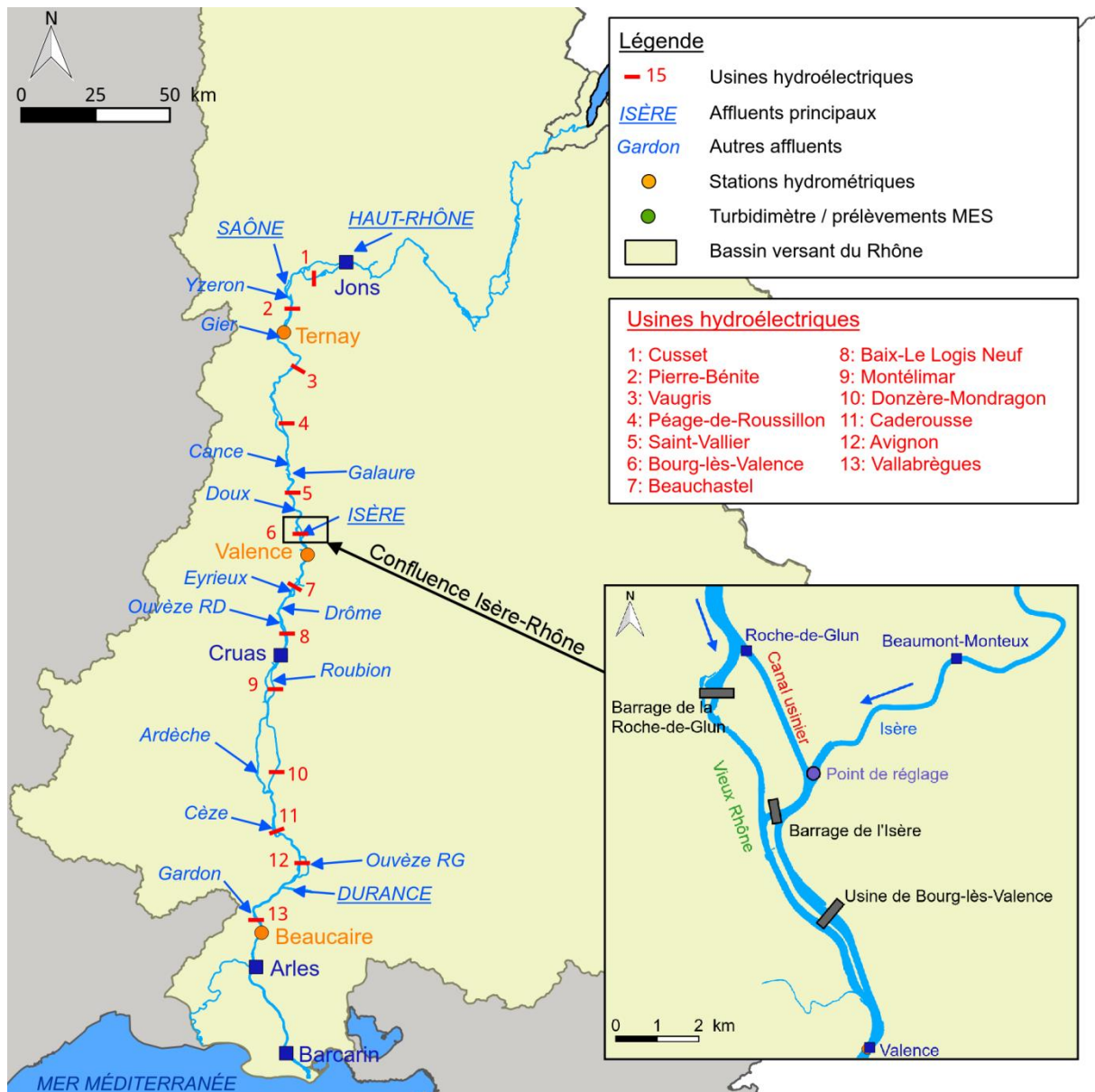


Figure 15 : Plan de situation du bief modélisé avec ouvrages hydroélectriques et stations de mesure. Zoom sur la confluence Rhône-Isère et l'aménagement de Bourg-lès-Valence (suivi chasses).

Trois périodes distinctes peuvent être observées pour les apports de l'Isère. La première couvre la crue. La deuxième, du 03/05/2015 à 09h00 au 09/05/2015 à 09h00, couvre les chasses des barrages de la basse-Isère. Enfin, à partir du 09/05/2015 à 09h00, les barrages de la basse-Isère sont progressivement remplis.

Les concentrations en MES ont été mesurées aux stations turbidimétriques Irstea de Lyon St-Georges (Saône) et de Jons (Rhône). Ces données ont été obtenues via l'application BDOH.

La turbidité de l'eau provenant de l'Isère est acquise à la station de Beaumont-Monteux (EDF). Sur cette station, la relation MES/Turbidité a été établie sur l'épisode de la chasse par des prélèvements d'eau (filtration, séchage et pesée des échantillons). Aucun prélèvement n'a été fait pendant la crue de l'Isère. Par conséquent, le coefficient de calage de la relation MES/Turbidité pendant la chasse a été conservé à 1,89 sur l'ensemble de l'événement. Cette hypothèse n'est pas totalement justifiée car la granulométrie des sédiments pendant la crue et la chasse est hétérogène.

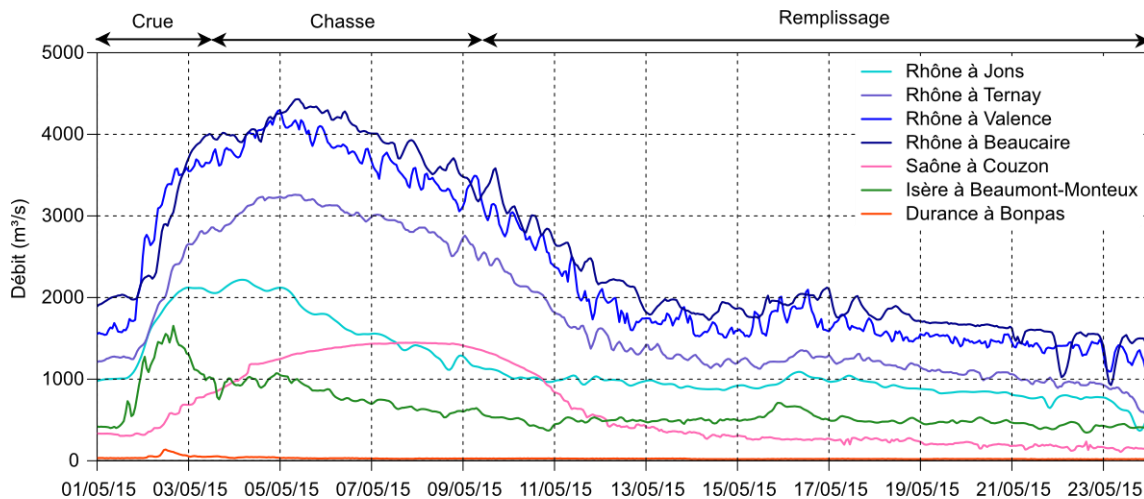


Figure 16 : Hydrogrammes du Rhône, de la Saône, de l'Isère et de la Durance au cours de l'événement de mai 2015.

Plusieurs mesures de concentration en MES sont disponibles sur le Rhône pour la validation des résultats. Les deux premières ont été réalisées par prélèvement (EDF) et encadrent l'aménagement de Bourg-lès-Valence (La Roche-de-Glun et Pont-de-Valence).

Un turbidimètre a été installé à Barcarin (PK 316,5) en 2014. La relation Turbidité/MES de cette station n'a pas pu être validée pour des fortes concentrations en MES ni pour une gamme d'événements différents (la granulométrie, étant susceptible de varier selon les apports des affluents, peut entraîner un détarage de la relation turbidité-concentration). Cependant, celle-ci a quand même été utilisée dans une première approche (Eq. 4) :

$$\text{CMES (en mg/l)} = 1,9 \text{ Turbidité} + 31,6 \quad (\text{Eq. 4})$$

Les concentrations en MES utilisées dans le modèle comme condition d'entrée et comme données de validation sont représentées dans la **Figure 17**.

La concentration en MES mesurée sur l'Isère est nettement plus importante que celles mesurées sur le Rhône et sur la Saône (**Figure 17b**). Ainsi, l'importance des apports se fait clairement ressentir entre les stations de la Roche-de-Glun et de Pont-de-Valence (**Figure 17a**). Les concentrations sur le Rhône sont plus faibles à Barcarin qu'à Pont-de-Valence, montrant qu'une partie des apports en MES s'est déposée dans le réseau.

Enfin, les données de concentrations en mercure mesurées à la station de Lyon Saint Georges sur la Saône et à la station de Jons sur le Rhône sont utilisées comme données d'entrée pour l'étude du transport de contaminant (**Figure 18**). Les résultats des simulations seront comparés aux mesures faites à la station d'Arles. Les mesures montrent que les concentrations sur la Saône sont plus importantes que celles du Rhône à Arles.

Aucune concentration n'est prise en compte pour les MES provenant de l'Isère, bien qu'il soit vraisemblable que les teneurs soient à prendre en compte (données non disponibles sur l'événement). Une prochaine étape dans les simulations sera de prendre en compte une teneur moyenne "réaliste" en s'appuyant sur d'anciennes mesures.

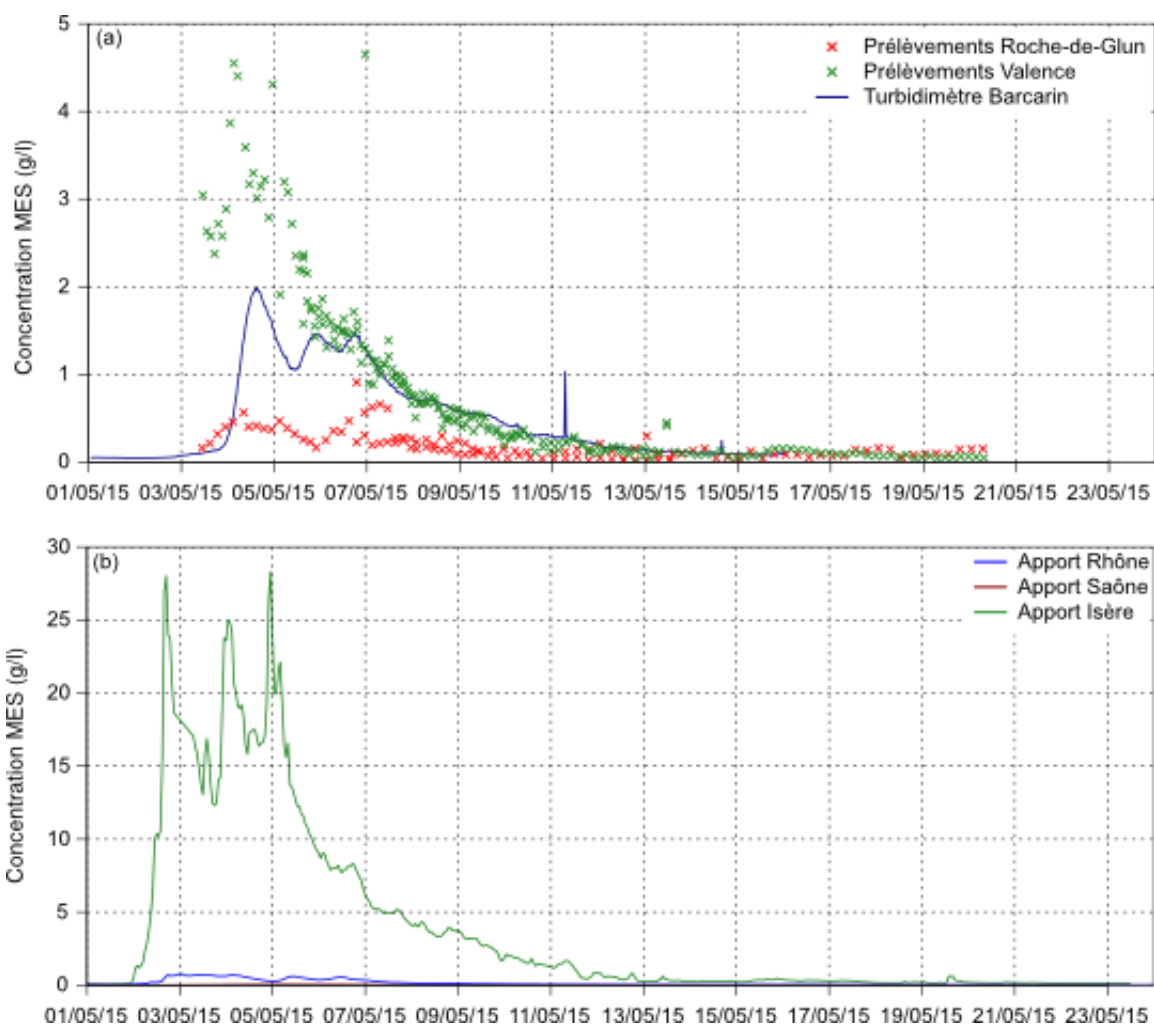


Figure 17 : Chroniques de concentration en MES (a) sur le Rhône et (b) utilisées comme condition amont du modèle numérique.

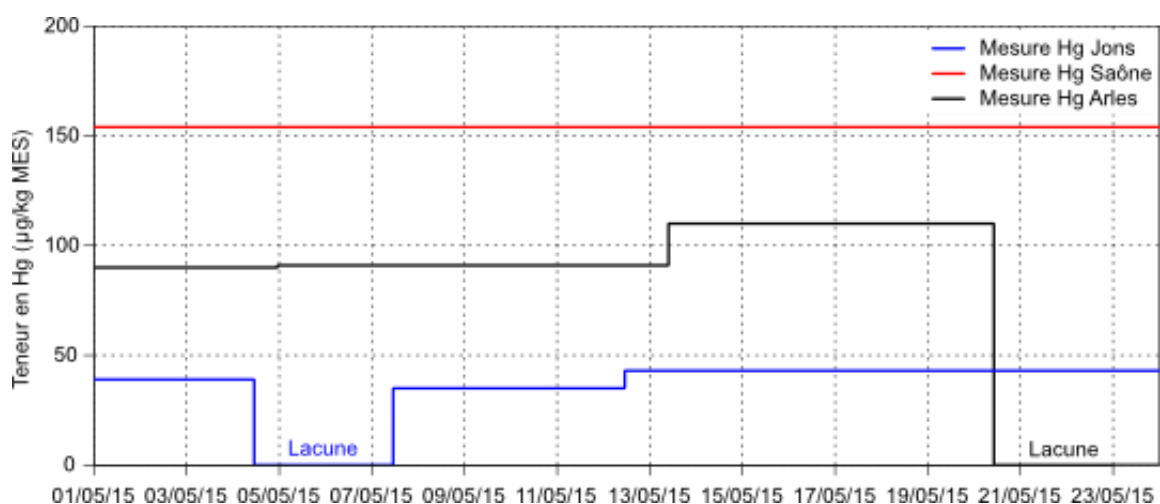


Figure 18 : Teneurs en mercure sur la Saône à Lyon Saint-Georges et sur le Rhône à Jons et à Arles (données BDOH).

b) Décomposition des hydrogrammes

Les premières simulations avec Adis-TS sur le tronçon modélisé sont faites en utilisant des solutés comme "traceur numérique de l'eau" des différents affluents. Ces simulations permettent de décomposer les hydrogrammes mesurés à Ternay, à Valence et à Beaucaire en fonction des apports des différents affluents. Les résultats de la décomposition des hydrogrammes sont présentés dans la **Figure 19**. A Ternay (**Figure 19a**), deux apports principaux se distinguent : le Rhône en provenance de Jons (bleu) et la Saône (rouge). Cette figure met en évidence la crue lente de la Saône (pic de crue arrondi) ainsi que les forts débits sur le Rhône.

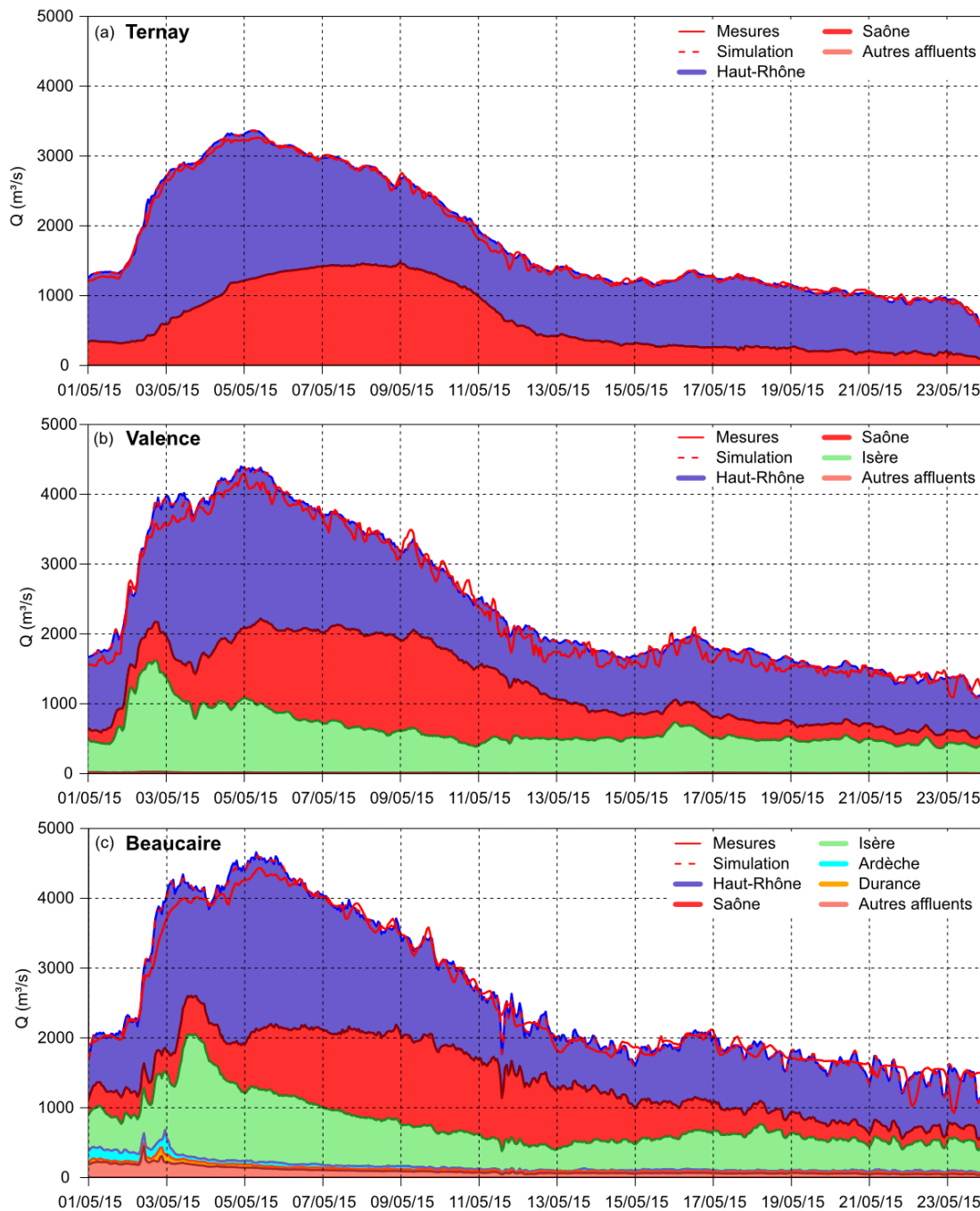


Figure 19 : Décomposition des hydrogrammes pour l'événement de mai 2015 aux stations hydrométriques de (a) Ternay (PK 15,2), (b) Valence (PK 109,7) et (c) Beaucaire (PK 269,6).

A Valence (**Figure 19b**), les apports de l'Isère (vert) sont également pris en compte. Le pic de débit de l'Isère arrive avant les forts débits de la Saône mais simultanément avec ceux du Rhône. La période de chasse des barrages de la basse-Isère a lieu pendant les forts débits de la Saône. L'apport des affluents mineurs du Rhône situés entre Jons et Valence a été très faible au cours de l'événement.

Enfin, à Beaucaire (**Figure 19c**), l'apport des affluents à l'aval de Valence est rajouté (dont l'Ardèche et la Durance). Quelques pics de débit peuvent être observés sur ces affluents avec des amplitudes très inférieures aux valeurs de débit observées sur l'Isère. Ces pics de débits sont observés à Beaucaire avant le pic de débit de l'Isère. L'hydrogramme général entre Valence et Beaucaire n'est pas sensiblement modifié par les apports des affluents mineurs.

c) Transport des matières en suspension sans dépôt / reprise

La première simulation hydrosédimentaire a été faite en utilisant les chroniques de concentration présentées dans la **Figure 17b**. La simulation est faite en considérant qu'il n'y a ni dépôt, ni reprise sur l'ensemble du linéaire considéré. De même, la diffusion est supposée constante et égale à 0. Les résultats de cette simulation sont présentés dans la **Figure 20**.

La comparaison des mesures et des simulations à La Roche-de-Glun (**Figure 20a**) montre que les MES observées à Jons se sont propagées jusqu'à La Roche-de-Glun sans se déposer. La variabilité des mesures à La Roche-de-Glun provient de l'utilisation de deux méthodes de prélèvement différentes (préleveur automatique ISCO et prélèvement au seau).

Les stations turbidimétriques situées en aval de la confluence Rhône-Isère (Pont-de-Valence et Barcarin) présentent des concentrations inférieures aux résultats des simulations sans dépôt ni érosion (**Figure 20b** et **Figure 20c**). Si les sédiments du Rhône sont toujours observables à la Roche-de-Glun, il est très possible qu'ils soient toujours observables à Barcarin. En revanche, les sédiments provenant de l'Isère se sont déposés en partie dans la retenue de Bourg-lès-Valence ou dans les retenues situées directement en aval.

Ces premiers résultats montrent qu'une simulation avec dépôt/reprise est nécessaire pour arriver à représenter correctement les processus en jeu dans le transit des MES de l'Isère jusqu'à la mer Méditerranée sur cet événement.

d) Transport des matières en suspension avec dépôt / reprise

La deuxième simulation hydrosédimentaire reprend la procédure de la simulation du Chapitre 3c en utilisant, comme données d'entrée, des MES qui ont la possibilité de se déposer dans le réseau mais aussi d'être reprises si jamais les vitesses d'écoulement sont importantes.

Le sédiment en provenance du Rhône et de la Saône est supposé être très fin et ne pas se déposer entre Lyon et La Roche-de-Glun (**Figure 20a**). Par conséquent, les MES du Rhône et de la Saône sont modélisées par du limon fin (**Tableau 1**).

Pour les MES de l'Isère, aucune granulométrie n'a été réalisée à la station de Beaumont-Montoux au cours de l'événement. Par conséquent, une double granulométrie "fictive", mise en place pour les simulations de l'événement de mai-juin 2008 (Naudet et al., 2015) a été réutilisée. Cette double-granulométrie suppose que le sédiment ayant transité pendant la crue (argiles et limons fins) est beaucoup plus fin que celui ayant transité pendant la chasse (limons grossiers et sables). Les pourcentages de chaque classe de sédiment sont les mêmes que celles du **Tableau 1**.

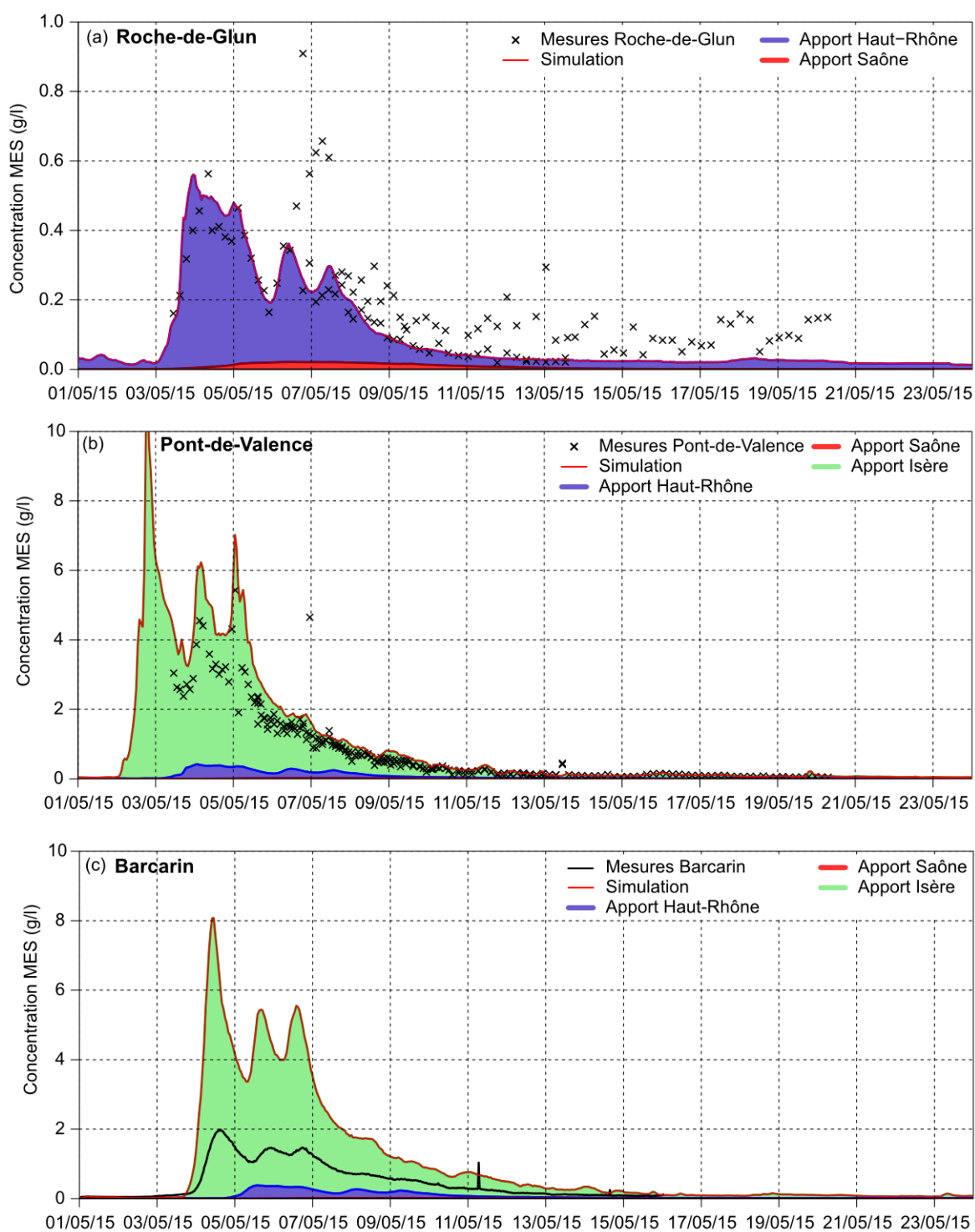


Figure 20 : Comparaison des mesures avec les résultats des simulations sans dépôt-érosion. Résultats à (a) La Roche-de-Glun, (b) Pont-de-Valence et (c) Barcarin.

Les résultats des simulations avec dépôt-érosion en utilisant les granulométries du Tableau 1 sont disponibles dans la **Figure 21**.

Les propriétés des sédiments n'ayant pas été modifiées sur le Rhône et la Saône, les résultats à La Roche-de-Glun ne sont pas modifiés par rapport aux résultats sans dépôt-érosion (**Figure 21a**). En revanche, pour les stations de Pont-de-Valence et de Barcarin, la concentration en MES est plus faible que dans les simulations sans dépôt-érosion. Les résultats de la simulation sur la période de chasse à la station de Pont-de-Valence (**Figure 21b**) sont plus proches des mesures. Une partie des sédiments s'est donc déposée dans la retenue de Bourg-lès-Valence pendant la chasse.

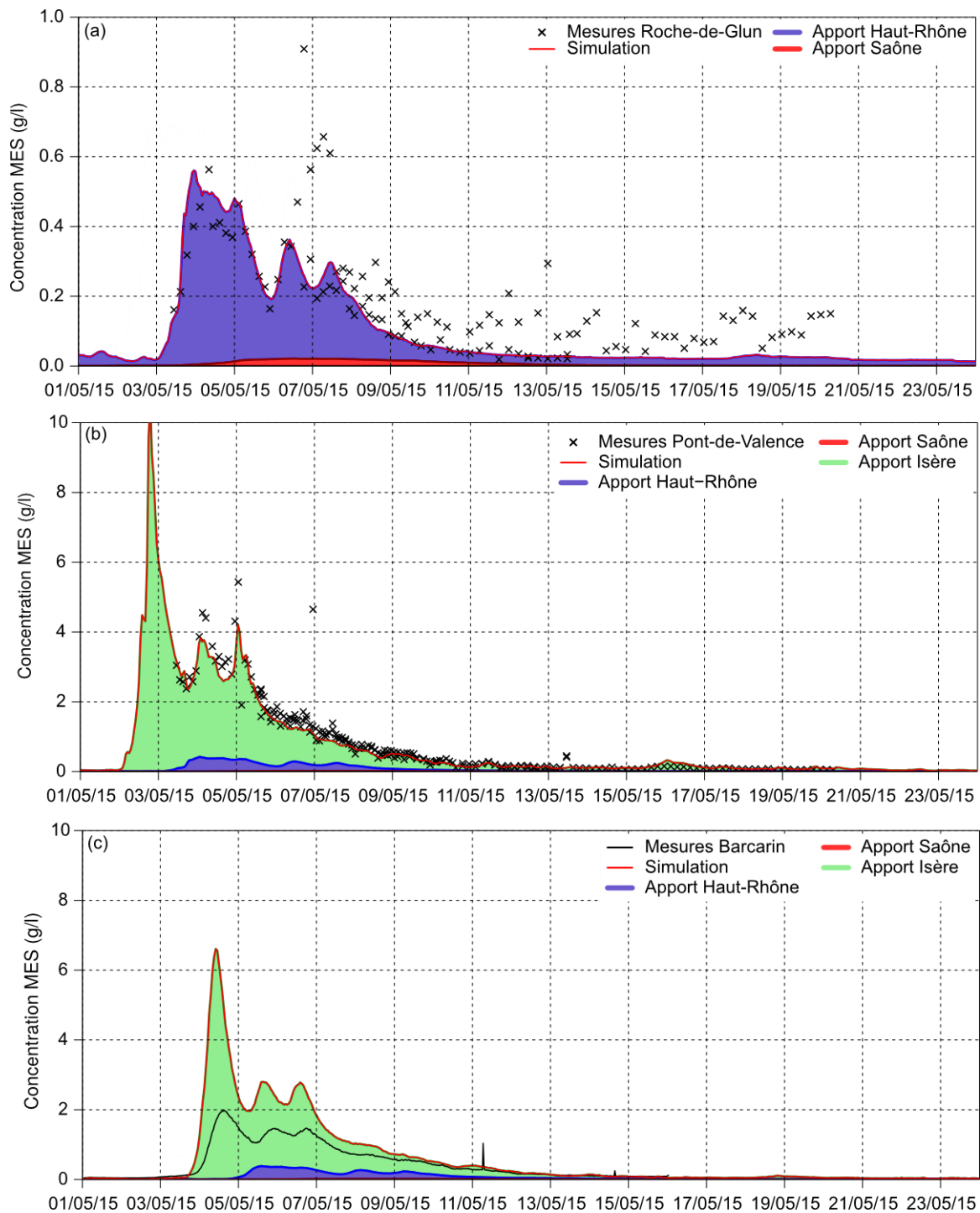


Figure 21 : Comparaison des mesures avec les résultats des simulations avec dépôt-érosion. Résultats à (a) La Roche-de-Glun, (b) Pont-de-Valence et (c) Barcarin.

En revanche, les résultats de la simulation surestiment toujours les concentrations en MES à Barcarin (**Figure 21c**). Cette observation peut avoir plusieurs explications :

- ◆ Soit les hypothèses sur la granulométrie ne sont pas correctes. En effet, les résultats montrent que le dépôt dans le réseau devrait être plus important. Si le calage du modèle est correct, ceci voudrait dire que la granulométrie pendant la crue et la chasse au niveau du turbidimètre de Beaumont-Montoux est plus épaisse que celle choisie pour le modèle (**Tableau 1**). Néanmoins, en utilisant une granulométrie plus grossière à Beaumont-Montoux, les concentrations en MES risquent d'être sous-estimées à Pont-de-Valence.
- ◆ Soit le turbidimètre de Barcarin (installé en 2014) n'est pas correctement calibré pour des concentrations en MES aussi importantes. Cependant, les concentrations en MES sont surestimées d'un facteur 3 pendant la crue et d'un facteur 2 pendant la chasse. Même si le calage du turbidimètre de Barcarin n'est pas parfait, il n'est pas possible de surestimer autant les résultats. De même, le calage du turbidimètre de Beaumont-Montoux peut ne pas être correct. En effet, celui-ci a été réalisé pendant la chasse mais pas pendant la crue.
- ◆ Soit le calage des paramètres hydrosédimentaires du modèle est à corriger. En effet, les paramètres hydrosédimentaires du modèle de Génissiat (Guertault, 2015) ont été repris dans cette étude. Il est possible que ce calage ne soit pas tout à fait adapté pour représenter correctement les chasses de l'Isère. Le calage s'était pourtant avéré concluant pour l'événement de mai-juin 2008 (cf. Chapitre 1) mais il est nécessaire de valider ce calage sur plusieurs événements.

Ces trois types d'erreur (granulométrie, calage des turbidimètres et calage du modèle hydrosédimentaires) peuvent également se combiner et expliquer la différence entre les mesures et les résultats de la modélisation à Barcarin.

e) Transport de mercure

Sur la base des résultats hydrosédimentaires, les calculs de transport de mercure sont réalisés. Une procédure similaire aux calculs effectués sur la Bourbre (Chapitre 2.d) est adoptée dans cette partie.

Les teneurs en mercure du Rhône à Jons et de la Saône sont utilisées comme condition d'entrée. Aucune mesure de mercure n'étant disponible sur l'Isère, celle-ci est considérée comme étant nulle. Les résultats de la simulation sont comparés aux mesures à la station d'Arles (**Figure 22**).

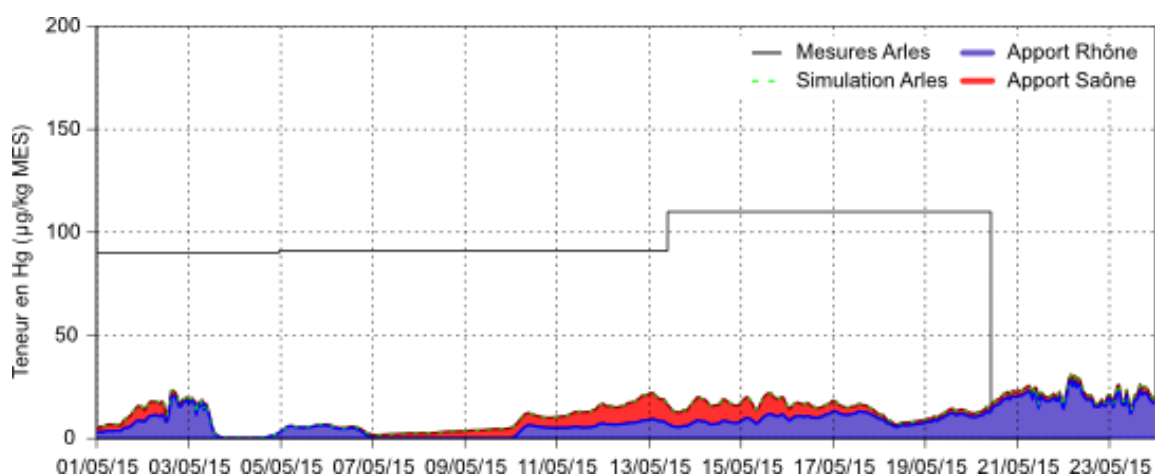


Figure 22 : Modélisation des flux de mercure entre Lyon et la station d'Arles.

Les résultats de la simulation sous-estiment les teneurs en contaminants à la station d'Arles. Ce résultat peut être expliqué par plusieurs raisons :

- ◆ La surestimation de la concentration en sédiments à Arles (cf. résultats Barcarin, **Figure 21c**) fait diminuer la proportion de sédiment en provenance du Rhône et de la Saône. Cette surestimation intervient directement sur le calcul des teneurs car la concentration de MES totale est utilisée dans le calcul (cf. Eq. 3). Pour pouvoir au mieux simuler la propagation des contaminants fixés sur la partie solide, il faut dans un premier temps que la modélisation de la propagation des MES soit parfaitement calée.
- ◆ Les apports des autres affluents ne sont pas pris en compte dans la modélisation. L'Isère qui apporte une grande quantité de sédiment au cours de cet événement doit également contribuer au mercure mesuré à Arles. La modélisation pourrait être poursuivie en prenant une teneur en mercure forfaitaire pour l'Isère, comprise par exemple entre 50 et 100 µg/kg

Il serait intéressant de comparer également les teneurs en contaminant aux stations de La Roche-de-Glun et de Pont-de-Valence. Malheureusement, aucune mesure de mercure n'a été faite sur ces deux stations en 2015. En revanche, les teneurs en métaux et en PCBi des MES de l'Isère à Beaumont-Montoux sont disponibles (Rapport technique Isère, EDF, 2015). Il serait intéressant de propager ces contaminants jusqu'à Arles avec le modèle numérique.

4. Suite et perspectives

Ce rapport présente la contribution de la modélisation hydrosédimentaire pour l'interprétation des flux de sédiments et de contaminants sur le Rhône. Trois événements hydrosédimentaires ont été simulés avec le modèle 1D et permettent de déterminer des premières pistes pour l'interprétation des flux :

- ◆ Le type d'événement hydrologique a une influence directe sur les flux mesurés à Jons ou à Arles. La comparaison des apports des affluents avec les valeurs mesurées aux stations de Jons et d'Arles doit tenir compte des concentrations en MES mais aussi de la granulométrie (et sa variation temporelle) de l'événement.
- ◆ Si les données d'entrée du modèle sont suffisamment bien renseignées, la granulométrie, la concentration et le flux en provenance de chacun des affluents peuvent être connus en tout point du linéaire du Rhône. Un événement hydrosédimentaire pourrait être ainsi suivi de la source jusqu'à la mer à l'aide des résultats des simulations (par exemple avec un effet "time-lapse"). Le même type de résultats peut être obtenu sur l'évolution de la granulométrie des sédiments pendant un événement au sein du réseau.
- ◆ Les premières modélisations de flux de contaminant avec le modèle 1D sont présentées dans ce rapport. Les résultats préliminaires montrent que la bonne modélisation des flux de contaminants passe obligatoirement par une bonne représentation des flux sédimentaires. Sur les deux événements étudiés, les teneurs en contaminants calculées avec le modèle sous-estiment très fortement les teneurs aux stations d'Arles et de Jons.

Quelques perspectives pour la suite du travail sur cet axe sont disponibles ci-après :

- ◆ Vérifier les relations $C(Q)$ des différentes stations hydrométriques (Launay, 2014) en propageant avec le modèle numérique des événements de crue jusqu'aux stations aval lorsque la mesure sur l'affluent n'est pas disponible.
- ◆ Refaire des simulations de la propagation des contaminants en comblant les lacunes, par exemple en prenant une valeur moyenne "réaliste" sur l'ensemble de la chronique en s'appuyant sur des mesures historiques. De la même manière, lorsqu'il n'y a pas de mesures sur les autres affluents pris en compte dans la modélisation (mercure sur l'Isère en 2015), les valeurs historiques moyennes peuvent être utilisées.
- ◆ Etendre les simulations sur des affluents qui disposent (ou disposaient) d'une station de mesure de concentration en MES dans le cadre de l'OSR (Arve, Fier, Bourbre, Gier...).

La principale lacune dans ce travail de modélisation est le manque de données intra-événement. Les concentrations ne sont pas connues sur toutes les sources, la granulométrie des affluents selon les événements n'est pas souvent mesurée. Avec l'amélioration du réseau de mesure OSR, ces lacunes sont petit à petit comblées. La modélisation numérique pourra alors être améliorée et représentera un outil précieux pour l'interprétation des flux.

Le livrable III.3 et les nouvelles observations OSR4 montrent

- ◆ à Beaucaire, un bilan excédentaire MES en 2015 et un déficit les autres années explicables par les affluents, mais aussi un déficit bien plus fort en PCB et Hg
- ◆ Haut-Rhône : stockage annuel (environ 0.2M/t) et déstockage en 2012 et 2016 (chasses)

La perspective serait donc de faire des simulations pluriannuelles sur les années suivies par l'OSR pour étudier le bouclage du bilan, en faisant des hypothèses sur les affluents non suivis (contamination, MES(Q)...). Pour le Haut-Rhône, le problème est de réussir à intégrer le module de Génissiat dans le modèle OSR complet. (Voir le futur programme OSR5)

Références

- Babut M., and Miège C. (2007). Contamination des poissons et des sédiments du Rhône par les polychlorobiphényles - synthèse des données disponibles. Rapport technique, Cemagref, Lyon.
- EDF (2015). Synthèse du suivi environnemental de la chasse de la basse-Isère du 3 au 26 mai 2015. Rapport technique EDF, France.
- Eyrolle, F., O. Radakovitch, and P. Raimbault (2012), Consequences of hydrological events on the delivery of suspended sediment and associated radionuclides from the Rhône River to the Mediterranean Sea, *Journal of Soils and Sediments*, 12, 1479–1495, doi:10.1007/s11368-012-0575-0.
- Guertault L. (2015). Evaluation des processus hydrosédimentaires d'une retenue de forme allongée : application à la retenue de Génissiat sur le Haut-Rhône. Thèse de Doctorat, Université Lyon 1, Lyon, France.
- 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, Université Claude Bernard, Lyon, France. 432 p.
- Launay M, Dugué V., Faure J.-B., Coquery M., Camenen B. and Le Coz J. (2018), 1D numerical modelling of suspended particulate matters dynamics in a regulated river. Soumis à *Water Resources Research*, en révision.
- Moore S. (2011). Monitoring flow and fluxes of suspended sediment in rivers using side-looking acoustic Doppler current profilers. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, France.
- Moore, S. A., J. Le Coz, D. Hurther, and A. Paquier (2012), On the Application of Horizontal ADCPs to Suspended Sediment Transport Surveys in Rivers, *Continental Shelf Research*, 46, 50–63.
- Naudet G., Dugué V., Camenen B., Le Coz J., Dramais G., and Paquier A. (2015). Etude de la dynamique hydrosédimentaire au niveau de la confluence entre l'Isère et le Rhône. Rapport technique Irstea, 112p.
- Observatoire des Sédiments du Rhône (2013). Suivi scientifique des opérations de chasses sur le Haut-Rhône de juin 2012. Rapport technique. Livrable OSR3.
- Observatoire des Sédiments du Rhône (2015). Modélisation hydrosédimentaire 1-D du Rhône de Lyon à la mer Méditerranée. Rapport technique. Livrable OSR4.
- Observatoire des Sédiments du Rhône (2016). Rapport sur le développement, le calage et l'amélioration du modèle hydrosédimentaire 1D du Rhône du Lac Léman à la Mer Méditerranée (OSR4). Rapport technique. Livrable OSR4.

Annexe 1 : Modélisation du transport de contaminant sur la Bourbre

Décomposition de la granulométrie des affluents contributeurs en 4 modes gaussiens selon la méthode Launay (2014)

Les tableaux donnent le pourcentage de chacune des classes de sédiments de l'échantillon ainsi que le diamètre moyen de chaque classe en μm . Pour chacun des échantillons, la classe dominante est surlignée en orange.

Tableau 3 : Granulométrie de 4 échantillons prélevés sur la Bourbre à Tignieu-Jamezieu.

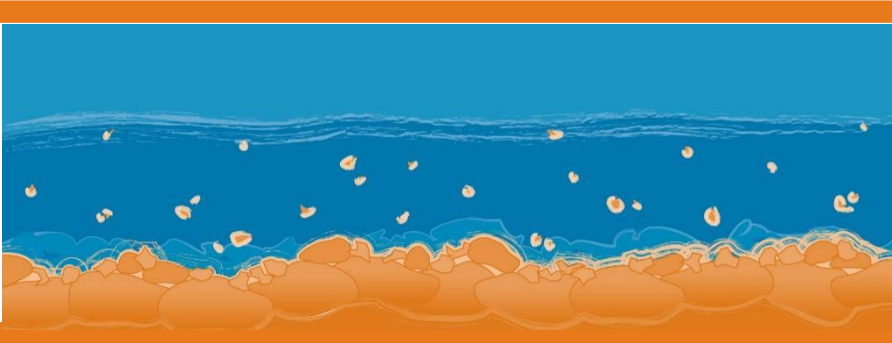
	Classe 1-10 μm	Classe 10-27 μm	Classe 27-80 μm	Classe 80-2500 μm
17/01/13	5,6 (11,7%)	18,3 (46,3%)	78,13 (29,1%)	170,34 (12,9%)
15/02/13	2,62 (7,3%)	17,5(62,3%)	62,87 (28,2%)	
15/03/13		20,73 (46,9%)	62,77 (19,6%) 78,6 (31,7%)	
11/04/13	2,99 (8,7%)	16,24 (61,1%)	56,03 (23,6%)	101,91 (6,7%)

Tableau 4 : Granulométrie de 4 échantillons prélevés à Port-Galland sur l'Ain

	Classe 1-10 μm	Classe 10-27 μm	Classe 27-80 μm	Classe 80-2500 μm
21/11/12	2,47 (8,8%)	15,37 (57%)	62,38 (31%)	156,38 (3,3%)
23/10/12	6,52 (30,6%)	18,72 (42,7%)	53,26 (24,7%)	
25/09/12	6,9 (30,4%)	18,52 (47,7%)	45,03 (20%)	
28/08/12	4,08 (10,7%)	18,89 (69%)	52,02 (16%)	

Tableau 5 : Granulométrie de 4 échantillons prélevés sur le Rhône au Bugey

	Classe 1-10 μm	Classe 10-27 μm	Classe 27-80 μm	Classe 80-2500 μm
16/06/12	5,59 (44,1%)	13,78 (36,5%)	32,02 (16,5%)	
15/06/12	4,58 (39,5%)	13,1 (44,6%)	27,28 (13,2%)	
01/05/12	7,71 (27,5%)	20,3 (34,5%)	64,36 (36,4%)	
01/06/12	5,54 (18,8%)	17,74 (43,5%)	40,02 (27,9%) 65,9 (9,8%)	



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