



HAL
open science

Étude de la dynamique hydrosédimentaire au niveau de la confluence entre l'Isère et le Rhône (Phase 2)

G Naudet, B Camenen, V Dugue, A Paquier

► **To cite this version:**

G Naudet, B Camenen, V Dugue, A Paquier. Étude de la dynamique hydrosédimentaire au niveau de la confluence entre l'Isère et le Rhône (Phase 2). Irstea. 2017. hal-04087433

HAL Id: hal-04087433

<https://hal.inrae.fr/hal-04087433v1>

Submitted on 3 May 2023

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.



Étude de la dynamique hydro-sédimentaire au niveau de la confluence entre l'Isère et le Rhône (Phase 2)

Auteurs : G. NAUDET, B. CAMENEN, V. DUGUE, et A. PAQUIER

Version du document:
21/04/2017

Irstea
Unité de recherche Hydrologie-Hydraulique
5 rue de la Doua - BP 32108,
69616 VILLEURBANNE Cedex - FRANCE
Tél : 04 72 20 87 87 – Fax : 04 78 47 78 75

avril 2017

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|----|
| 1. Contexte de l'étude..... | 6 |
| 2. Gestion des ouvrages de l'Isère et du Rhône..... | 8 |
| 2.1. Plan de situation..... | 8 |
| 2.2. Consignes de chasse sur la basse Isère..... | 8 |
| 2.2.1. Historique des chasses de la Basse Isère..... | 8 |
| 2.2.2. Règle de gestion pendant l'épisode de 2008..... | 9 |
| 2.2.3. Règle de gestion pendant l'épisode de 2015..... | 9 |
| 2.3. Consignes des ouvrages du Rhône..... | 11 |
| 2.3.1. Règles générales de gestion..... | 11 |
| 2.3.2. Règle de gestion pendant l'épisode de 2008..... | 13 |
| 2.3.3. Règle de gestion pendant l'épisode de 2015..... | 13 |
| 3. Analyse des érosions / dépôts 2015..... | 14 |
| 3.1. Levés bathymétriques disponibles..... | 14 |
| 3.1.1. Bathymétrie disponible..... | 14 |
| 3.1.2. Bathymétrie de référence..... | 17 |
| 3.2. Méthodologie pour le calcul des volumes et des tonnages déposés..... | 17 |
| 3.2.1. Calcul des volumes de dépôt et d'érosion..... | 17 |
| 3.2.2. Masse volumique sèche des matériaux déposés..... | 18 |
| 3.3. Quantification des volumes chassés des retenues de la basse Isère..... | 18 |
| 3.4. Analyse des données bathymétriques de la basse Isère..... | 19 |
| 3.4.1. Phase de dépôt..... | 19 |
| 3.4.2. Phase de reprise..... | 22 |
| 3.5. Analyse des données bathymétriques du canal d'amenée..... | 25 |
| 3.6. Dragages réalisés dans les retenues à l'aval de la confluence..... | 40 |
| 3.6.1. Aménagement de Bourg les Valence..... | 40 |
| 3.6.2. Aménagement de Beauchastel..... | 40 |
| 3.6.3. Aménagement de Baix le Logis Neuf..... | 41 |
| 3.6.4. Aménagement de Montélimar..... | 41 |
| 3.7. Evolution du volume total de dépôt..... | 41 |
| 4. Synthèse des données de flux sédimentaire lors de la crue/chasse de mai 2015 et analyses complémentaires..... | 42 |
| 4.1. Synthèse des mesures de MES réalisées en 2015 aux stations hydro-sédimentaires de la basse Isère..... | 43 |
| 4.2. Comparaison des volumes chassés et des volumes déposés..... | 45 |
| 4.3. Synthèse des mesures et de l'analyse du transport sédimentaire entre la station de Beaumont Monteux et l'usine de Bourg-lès-Valence..... | 45 |
| 4.3.1. Basse Isère (hors confluence)..... | 45 |
| 4.3.2. Confluence..... | 47 |
| 4.3.3. Chenal navigable..... | 50 |
| 4.4. Estimation des flux de Sédiments en Suspension (MES) à la station de Beaumont-Monteux..... | 55 |
| 4.4.1. Débit liquide..... | 56 |
| 4.4.2. Concentrations en MES..... | 57 |
| 4.4.3. Discussion sur le calage du turbidimètre..... | 59 |
| 4.4.4. Flux de matières en suspension..... | 61 |

| | |
|---|-----|
| 4.5. Estimation des flux de sables à la station de Beaumont-Montoux..... | 63 |
| 4.5.1. Modèle hydraulique..... | 63 |
| 4.5.2. Courbe de tarage sédimentaire..... | 63 |
| 4.5.3. Qualité des sables ayant transités lors de la chasse de 2015..... | 65 |
| 4.5.4. Estimation des flux de sables lors de la chasse de 2015..... | 66 |
| 4.6. Conclusion..... | 70 |
| 5. Comparaison avec la chasse de 2008..... | 71 |
| 5.1. Érosion dans les retenues de la basse Isère..... | 71 |
| 5.2. Taux de MES..... | 71 |
| 5.3. Volumes déposés à l'aval de Beaumont-Montoux..... | 72 |
| 5.4. Granulométrie des dépôts..... | 73 |
| 5.5. Analyse des incidents..... | 73 |
| 5.6. Analyse des débits..... | 79 |
| 5.6.1. Isère..... | 79 |
| 5.6.2. Canal amont..... | 81 |
| 5.6.3. Canal commun..... | 81 |
| 5.6.4. Canal aval..... | 82 |
| 5.7. Conclusion..... | 83 |
| 6. Modèle sédimentaire 1D..... | 84 |
| 6.1. Zone couverte par la modélisation 1D..... | 84 |
| 6.2. Simulation hydraulique de l'événement de mai 2015..... | 85 |
| 6.2.1. Données hydrauliques utilisées..... | 85 |
| 6.2.2. Hydrogrammes simulés..... | 85 |
| 6.2.3. Respect des consignes d'exploitation..... | 86 |
| 6.2.4. Décomposition des hydrogrammes..... | 88 |
| 6.3. Simulation hydro-sédimentaire de l'événement de mai 2015..... | 89 |
| 6.3.1. Conditions limites amont du modèle..... | 89 |
| 6.3.2. Transport des matières en suspension sans dépôt / reprise..... | 91 |
| 6.3.3. Transport des matières en suspension avec dépôt / reprise..... | 93 |
| 6.4. Sensibilité du modèle au fonctionnement des ouvrages..... | 95 |
| 6.4.1. Événement de mai 2015..... | 95 |
| 6.4.2. Événement de mai-juin 2008..... | 98 |
| 6.5. Conclusions sur la modélisation 1D..... | 101 |
| 7. Construction du modèle sédimentaire 2D..... | 102 |
| 7.1. Code de calcul utilisé..... | 102 |
| 7.2. Emprise..... | 102 |
| 7.3. Topographie utilisée et maillage..... | 103 |
| 7.4. Données d'entrée..... | 104 |
| 7.5. Calage hydraulique..... | 104 |
| 7.6. Validation du calage..... | 106 |
| 7.7. Incidence d'un abaissement de la retenue de Bourg-lès-Valence sur les contraintes efficaces..... | 109 |
| 8. Modélisation de la crue/chasse de mai 2015..... | 112 |
| 8.1. Équation utilisée..... | 112 |
| 8.2. Hypothèses de calculs..... | 112 |
| 8.3. Conditions aux limites..... | 112 |
| 8.4. Tests réalisés..... | 113 |
| 8.5. Vérification des niveaux..... | 113 |
| 8.6. Résultats sur le canal d'amenée..... | 114 |
| 8.7. Résultats sur le bief Isère..... | 115 |

| | |
|---|-----|
| 8.7.1. Influence du paramètre $\tau_{cr,ad}$ | 115 |
| 8.7.2. Influence du paramètre α | 116 |
| 8.7.3. Chronologie de la formation des dépôts..... | 120 |
| 8.7.4. Modélisation avec le fond de l'Isère érodable..... | 121 |
| 8.8. Influence de la gestion du barrage de Bourg-lès-Valence sur la formation des dépôt dans le bief Isère..... | 121 |
| 9. Modélisation avec dépôts en place..... | 123 |
| 9.1. Modification de la bathymétrie..... | 123 |
| 9.2. Test de reprise des dépôts dans le canal d'amenée..... | 123 |
| 9.2.1. Formulation de type suspension..... | 123 |
| 9.2.2. Formulation de type charriage..... | 124 |
| 9.3. Test de reprise des dépôts dans l'Isère : Épisode du 17 juin 2016..... | 126 |
| 9.3.1. Formulation type suspension..... | 127 |
| 9.3.2. Formulation type charriage..... | 128 |
| 9.3.3. Conclusion..... | 128 |
| 9.4. Influence des dépôts sur une opération de chasse..... | 128 |
| 10. Préparation des mesures complémentaires..... | 130 |
| 11. Conclusions et perspectives..... | 132 |
| 12. Références..... | 133 |

1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Dans le cadre d'une convention entre les partenaires CNR / EDF / IRSTEA / CNRS/AMU, un suivi complémentaire des flux sédimentaires apportés par la Basse-Isère au Rhône a été programmé pour Irstea et le Cerege dans le cadre de l'Observatoire des sédiments du Rhône (OSR).

Ce suivi est complémentaire au suivi propre des chasses de la Basse-Isère basé sur l'évaluation des conséquences environnementales de ces dernières et dont les modalités sont précisées par la consigne elle-même. Il avait comme principal objectif d'améliorer les connaissances scientifiques sur le fonctionnement hydro-sédimentaire de la zone de confluence Isère-Rhône afin de permettre de modéliser de façon plus objective le fonctionnement de ce secteur.

Le périmètre d'investigation va de la retenue de Beaumont-Montoux à l'aménagement de Beauchastel. Le cœur du problème est le manque de connaissances sur la quantité et la dynamique des **flux de sables** (suspension graduée), qui :

- ne sont pas mesurés : les prélèvements de surface et les turbidimètres ne mesurent que la suspension homogène fine (MES), dont la dynamique dépend principalement des apports amont, tandis que celle du sable dépend plus de la remobilisation du matériau de fond mais aussi des apports amont des barrages lors de chasses ;
- et posent des problèmes spécifiques de modélisation : notamment, une transition de la suspension au charriage, de l'Isère au Rhône, est suspectée. Dans les deux modes de transport, les interactions avec le fond ont un bien plus fort impact sur les flux que pour les MES.

Dans ce cadre d'étude, Irstea a achevé une majeure partie des travaux proposés. Ces derniers consistaient en :

- un examen des données disponibles
- des essais de faisabilité de prélèvements in-situ
- des tests de modélisation des sables

En particulier, un certain nombre de mesures in-situ ont pu être réalisées, y compris pendant la crue/chasse de l'Isère au mois de mai 2015. Des mesures de charriage ont été faites à l'aide de la traîle de mesure sur la station CNR de Beaumont-Montoux et ont montré l'intérêt de cette station pour l'étude. Des premières mesures de la suspension graduée de sable ont été faites au niveau de la confluence incluant la prise d'échantillons et des jaugeages ADCP. Ces mesures ont ainsi permis une meilleure compréhension de la dynamique sédimentaire sur ce site et des protocoles de mesure sont proposés. Ces travaux seront prolongés dans le cadre de l'OSR4.

De plus, un gros travail de compréhension de la dynamique sédimentaire sur la confluence Isère-Rhône a été réalisé par l'intermédiaire d'une modélisation numérique. D'une part, le modèle 1D hydro-sédimentaire du Rhône (code de calcul Adis-TS) a été appliqué sur le cas de la crue/chasse de 2008. De plus, un modèle hydraulique 2D (code de calcul Rubar20) a été créé sur la confluence Isère-Rhône.

Les programmes OSR3 (2014) et OSR4 (2015-2017) n'inclut pas de volet particulier sur la modélisation numérique de la confluence Isère-Rhône et seule une action financée de l'OSR4 inclut des mesures de la charge sableuse au niveau de la confluence Isère-Rhône.

La présente étude vise donc à compléter la première étude financée par EDF et la CNR dans le cadre de la convention de recherche entre CNR / EDF / IRSTEA / CNRS/AMU. Elle consiste prin-

cipalement en une analyse complémentaire des données existantes (bathymétries, mesures ADCP données hydro-sédimentaires, etc) issues notamment des chasses de 2008 et 2015, ainsi qu'en des tests de modélisation numérique du transport de sables.

2. GESTION DES OUVRAGES DE L'ISÈRE ET DU RHÔNE

2.1. Plan de situation

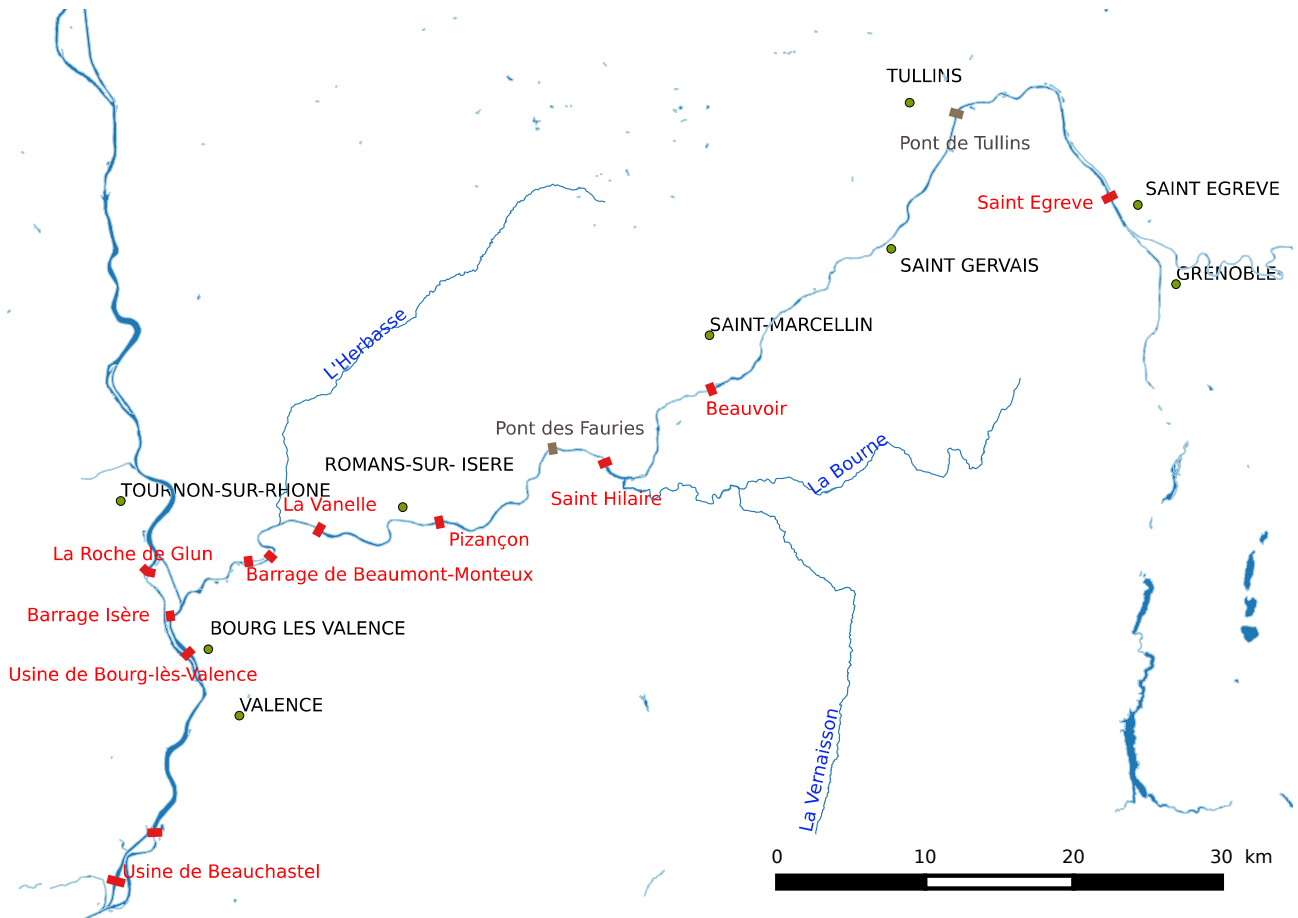


Figure 1: Plan de situation

2.2. Consignes de chasse sur la basse Isère

2.2.1. Historique des chasses de la Basse Isère

| Date | Beauvoir | St-Hilaire | Pizançon | La Vanelle | Beaumont-Monteux |
|---------|----------|------------|----------|------------|------------------|
| 02/1990 | X | X | V | V | X |
| 10/1992 | X | X | X | X | X |
| 05/1995 | X | X | V | V | X |
| 05/1999 | X | X | X | X | X |
| 10/2000 | | X | X | X | X |
| 03/2001 | X | X | X | X | X |
| 01/2004 | | | | | X |
| 06/2008 | X | X | X | X | X |
| 05/2015 | X | X | X | X | X |

| |
|---|
| V : retenue déjà vide (barrage effacé) du fait de la loi d'abaissement et du débit de l'Isère |
|---|

2.2.2. Règle de gestion pendant l'épisode de 2008

Une chasse de la basse Isère a été réalisée du 02/06/2008 à 18h25 au 12/06 à 18h mais le barrage de Beaumont-Monteux a été fermé le 11/06 à 4h.

Elle fait suite à une crue importante de plus de 1300 m³/s fin mai, avec chasse de St Egrève.

Les précédentes chasses ont été réalisées en janvier 2004 mais celle-ci n'a concerné que la retenue de Beaumont Monteux (volume de stockage très faible). La précédente chasse qui a concerné toutes les retenues date de 2001, soit 7 ans. Cette durée correspond à la durée qui sépare les chasses de 2008 et 2015.

| | Début de chasse | Ouvrage effacé | Début de remplissage | Fin de remplissage |
|------------------|-----------------------------|----------------|----------------------|--------------------|
| Beaumont-Monteux | 02/06 à 18h25 | 02/06 à 22h45 | 10/06 à 18h00 | 11/06 à 4h00 |
| La Vanelle | Passage en crue le 29/05 | le 29/05 | 09/06 à 8h30 | 10/06 à 16h00 |
| Pizançon | 02/06 à 23h15 | 03/06 à 7h00 | 09/06 à 17h00 | 10/06 à 8h00 |
| Saint Hilaire | 03/06 à 7h30 | 03/06 à 18h45 | 09/06 à 8h05 | 09/06 à 18h15 |
| Beauvoir | 03/06 à 21h30 | 04/06 à 6h00 | 12/06 à 5h45 | 12/06 à 18h00 |

2.2.3. Règle de gestion pendant l'épisode de 2015

Une chasse de la basse Isère a été réalisée du 3 au 9 mai 2015, suite à un pic de crue à environ 1350 m³/s à Saint Gervais, suivie d'un remplissage des retenues du 9 au 26 mai 2015.

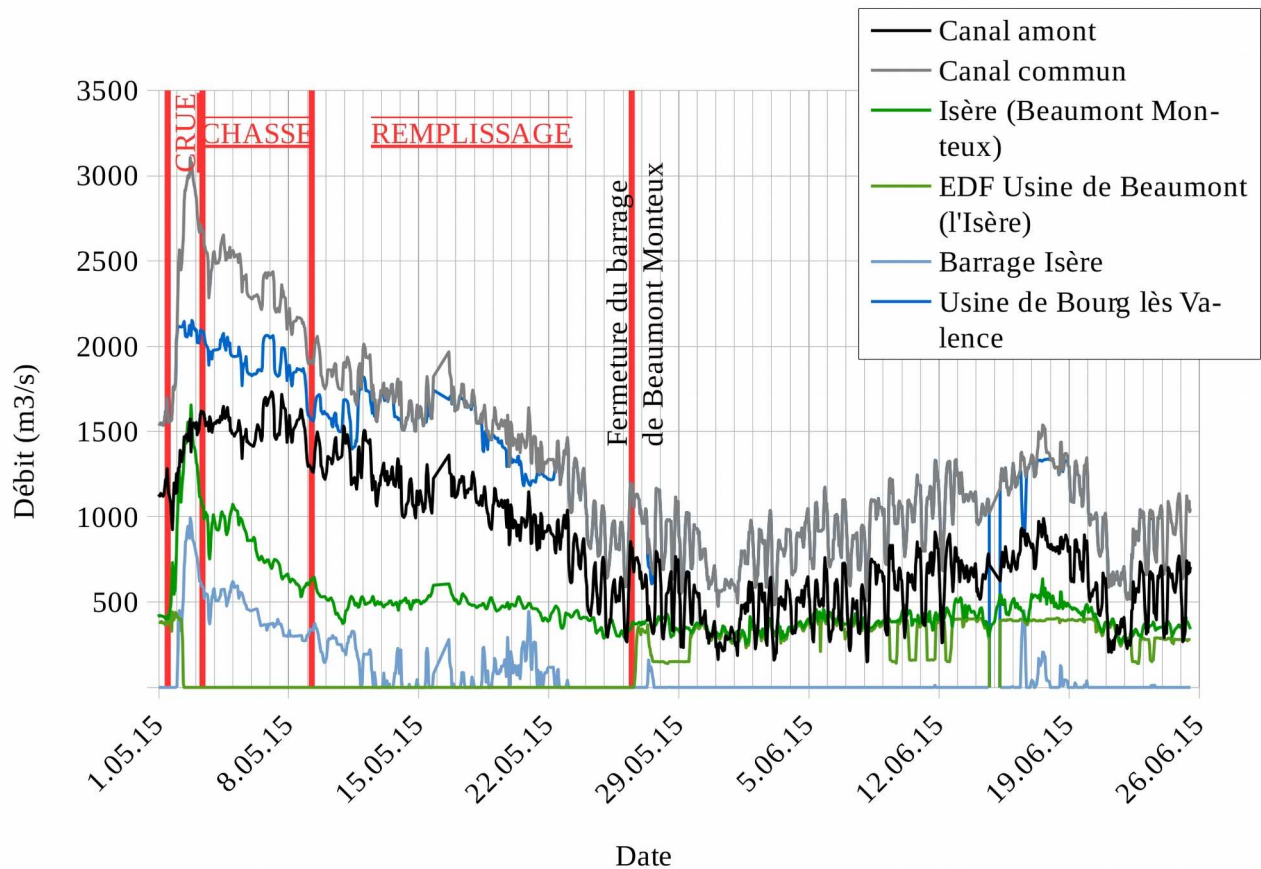


Figure 2: Débits mesurés le long de l'Isère et du Rhône lors de la crue/chasse de mai 2015 (source CNR).

L'Isère a été déclaré en crue à partir du vendredi 1er mai. Afin de respecter la consigne de niveau au droit des ponts de Roman et des Fauries, EDF a abaissé les niveaux dans les aménagements de la Vanelle et Pizançon. Cela a conduit potentiellement à une première phase de remise en suspension des sédiments piégés dans les retenues. La retenue de Beaumont-Montoux s'ouvrant assez vite en sous-verse, les sédiments du fond ont pu transiter pendant la crue.

A partir du 3 et jusqu'au 9 mai, EDF a mis en chasse tous les autres ouvrages (de l'aval vers l'amont). Du 9 au 26 mai, s'est déroulée la phase de remplissage : EDF a fermé ses ouvrages de l'amont vers l'aval (mais avec Saint Hilaire avant Beauvoir). Même si cette phase n'est pas incluse dans la phase de chasse, il faut bien avoir en tête que le dernier barrage (Beaumont-Montoux) est resté ouvert jusqu'au 26 mai et a donc pu apporter des sédiments jusqu'à cette date.

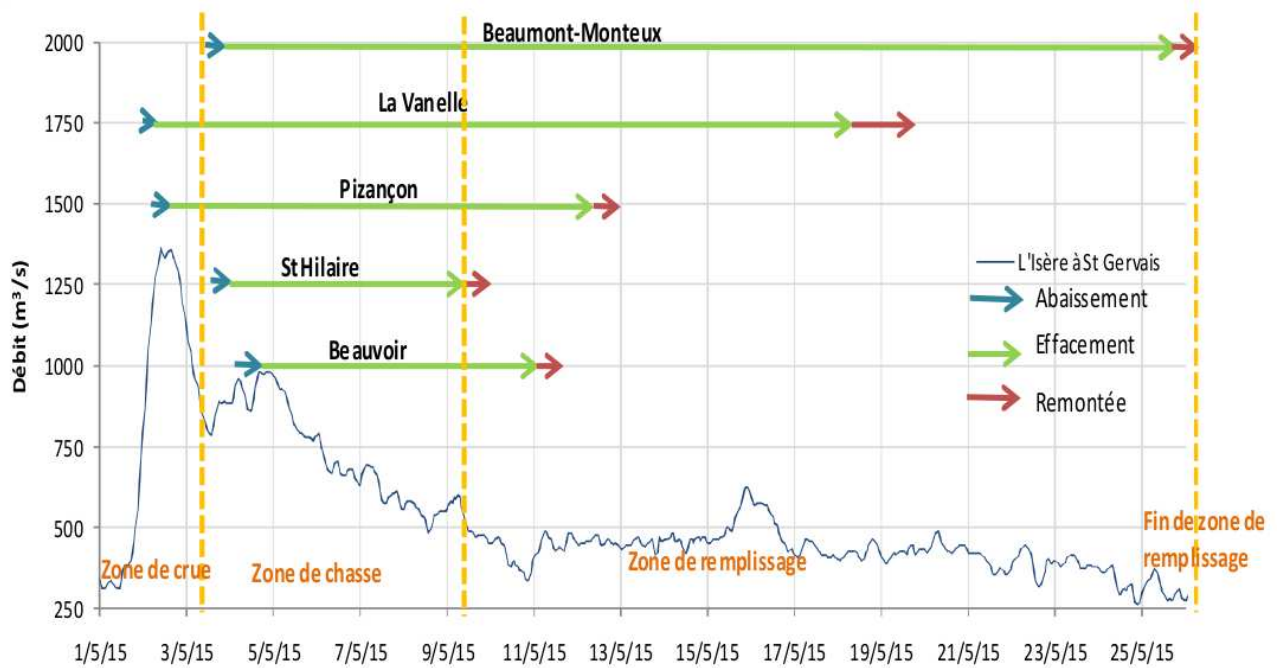


Figure 3: Gestion des ouvrages EDF pendant la crue et la chasse de mai 2015 (source EDF)

2.3. Consignes des ouvrages du Rhône

2.3.1. Règles générales de gestion

Les ouvrages sont réglés de façon à :

- respecter les critères de niveaux aux points de réglage PR1 (amont de la défluence de la Roche de Glun) et PR2 (pont SNCF sur l'Isère).
- ne pas dépasser les débits seuils indiqués sur la Figure 4.

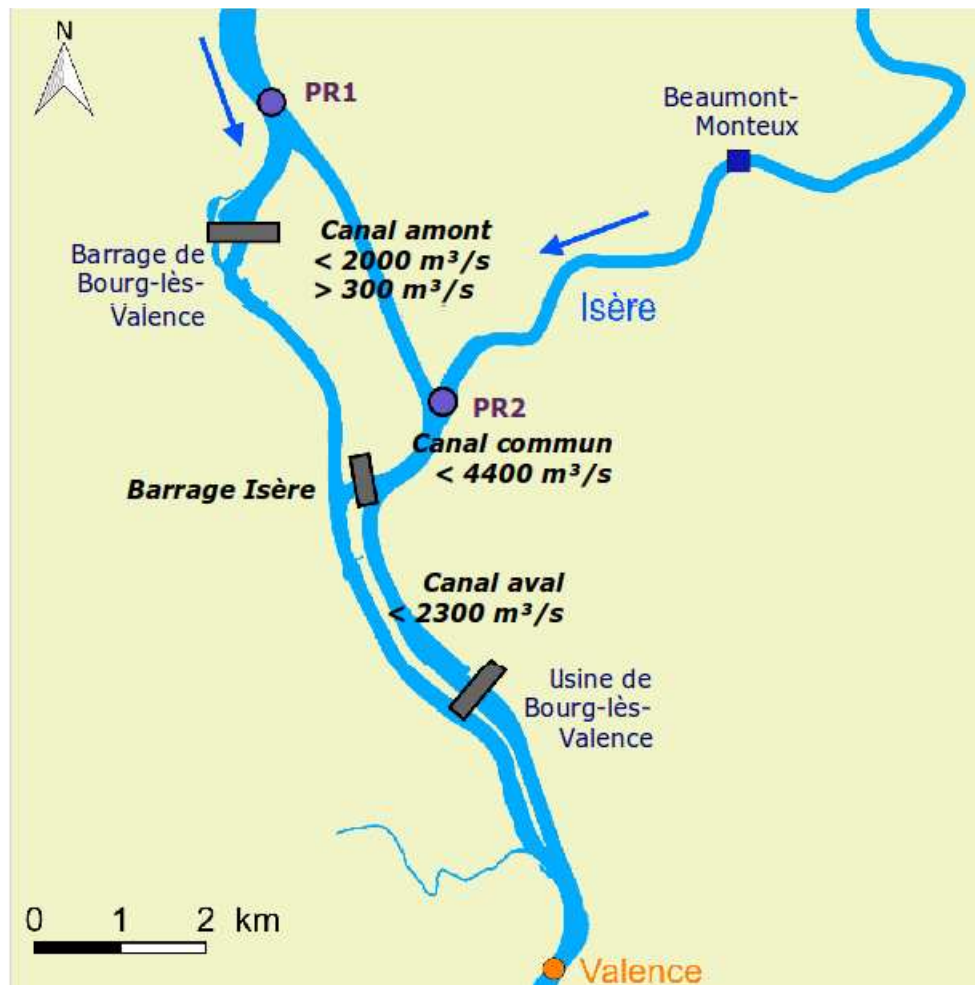


Figure 4: Règles de gestion des ouvrages de la retenue de Bourg-lès-Valence

Le débit turbinable maximal à l'usine de Bourg-lès-Valence est de 2300 m³/s. En pratique, et surtout lors des crues de l'Isère, ce débit est compris entre 2000 et 2100 m³/s afin de protéger les équipements.

Le barrage Isère est ouvert si le débit de l'Isère associé à celui du canal amont est supérieur à 2300 m³/s. Dans ce cas, le débit évacué est $Q_{\text{barrage Isère}} = 0,8 \times (Q_{\text{Isère}} - 300)$. Lors de l'épisode de 2008, le débit du Rhône était trop faible pour dépasser ce seuil de 2300 m³/s, le barrage Isère était alors resté fermé.

A l'aval, le barrage de Bourg-lès-Valence est géré de manière à :

- respecter le débit réservé dans le Vieux-Rhône
- faire transiter le maximum de débit possible à l'usine, tout en respectant les débits seuils.
- respecter les consignes de niveaux aux points de réglage PR1 et PR2.

2.3.2. Règle de gestion pendant l'épisode de 2008

Les débits associés du canal amont et de l'Isère n'ayant pas dépasser les débits critiques, le barrage Isère est resté fermé.

2.3.3. Règle de gestion pendant l'épisode de 2015

Cette crue de l'Isère a été synchrone avec une crue du Rhône dont le débit a atteint sur l'épisode plus de 3200 m³/s à Ternay. Les ouvrages CNR ont été gérés en suivant les règles de gestion définies précédemment. Cependant, afin de préserver l'usine de Bourg-lès-Valence, le débit à l'usine n'a pas dépassé les 2100 m³/s et le barrage Isère a été ouvert.

3. ANALYSE DES ÉROSIONS / DÉPÔTS 2015

3.1. Levés bathymétriques disponibles

3.1.1. Bathymétrie disponible

La bathymétrie disponible sur le secteur d'étude est constitué des profils localisés sur le figure 5.

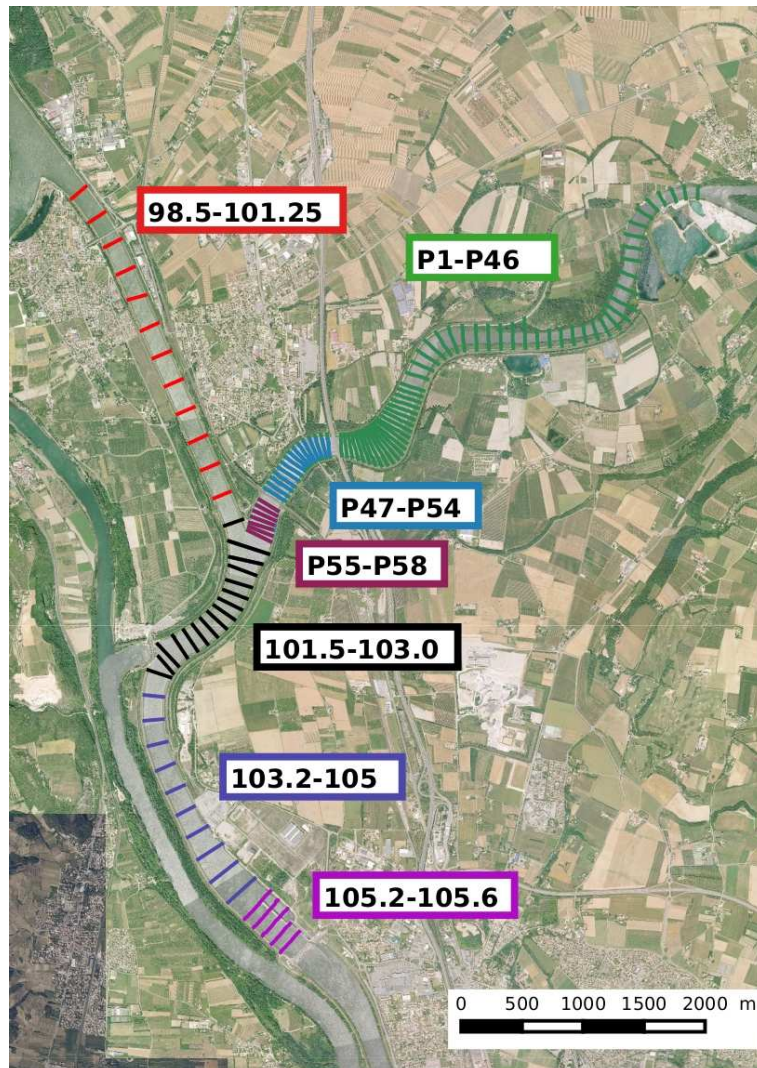


Figure 5: Profils en travers de l'Isère et du canal d'amenée

Les figures 6 et 7 précisent les dates de levé.

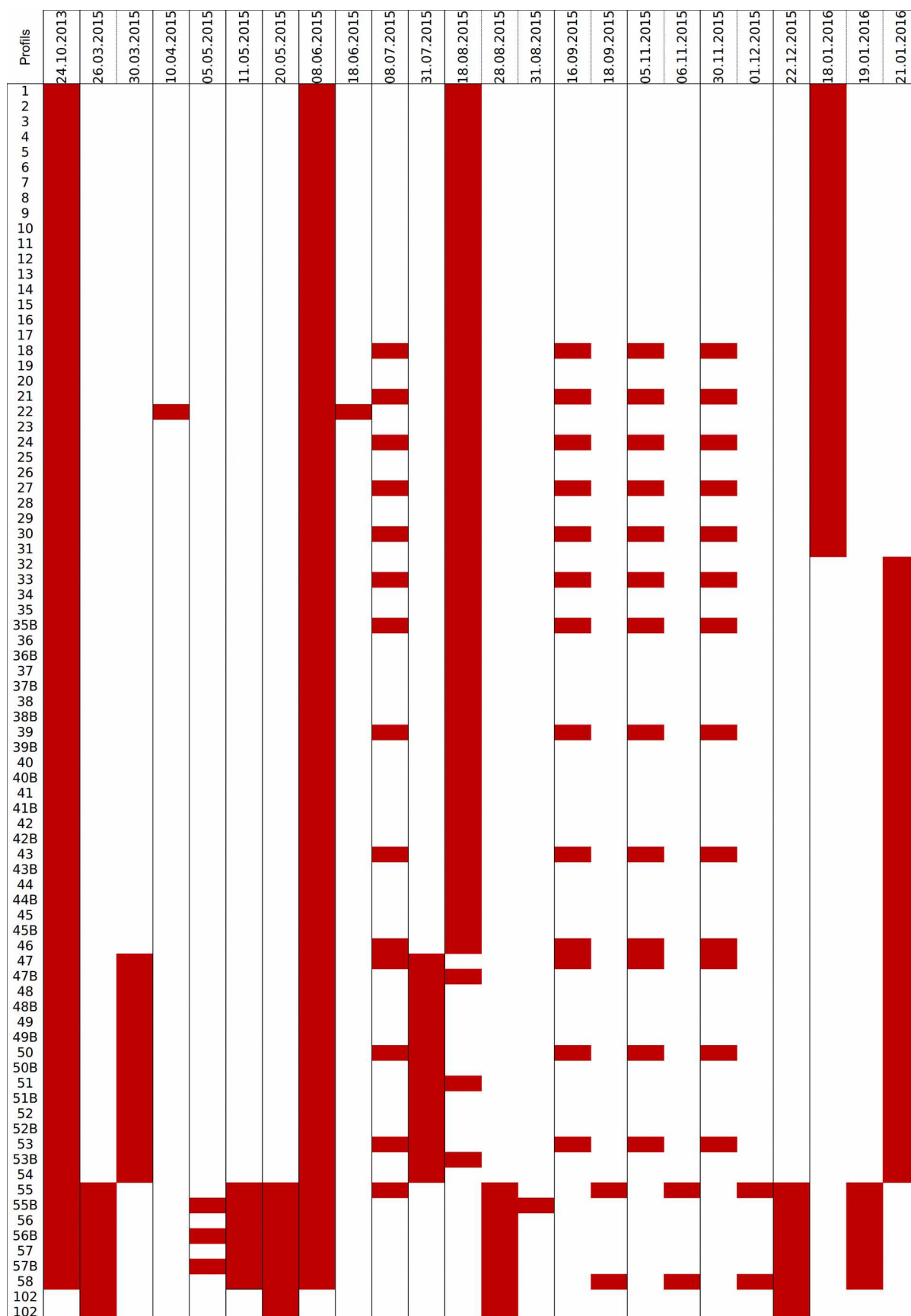


Figure 6: Dates des levés bathymétriques sur l'Isère

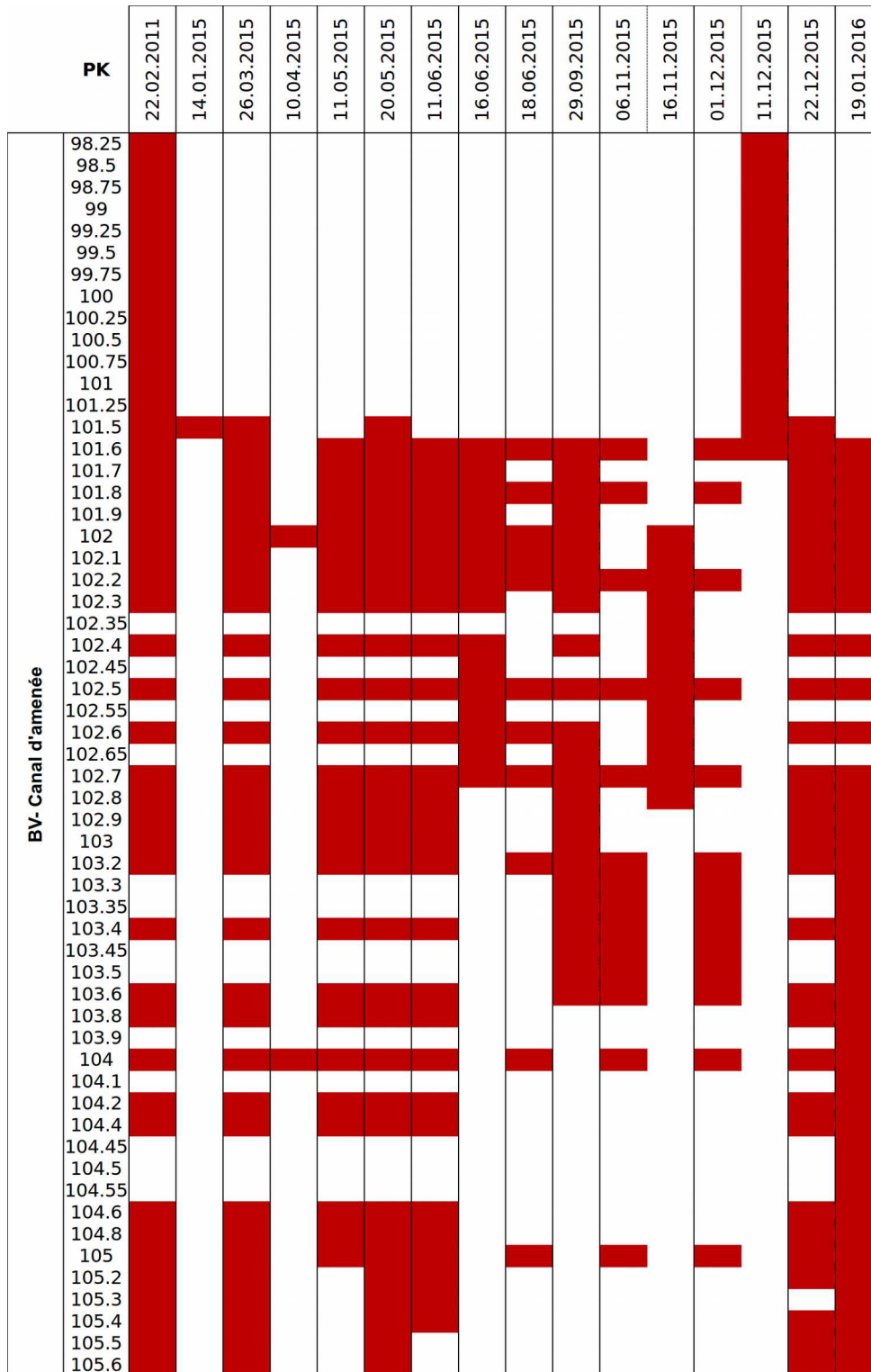
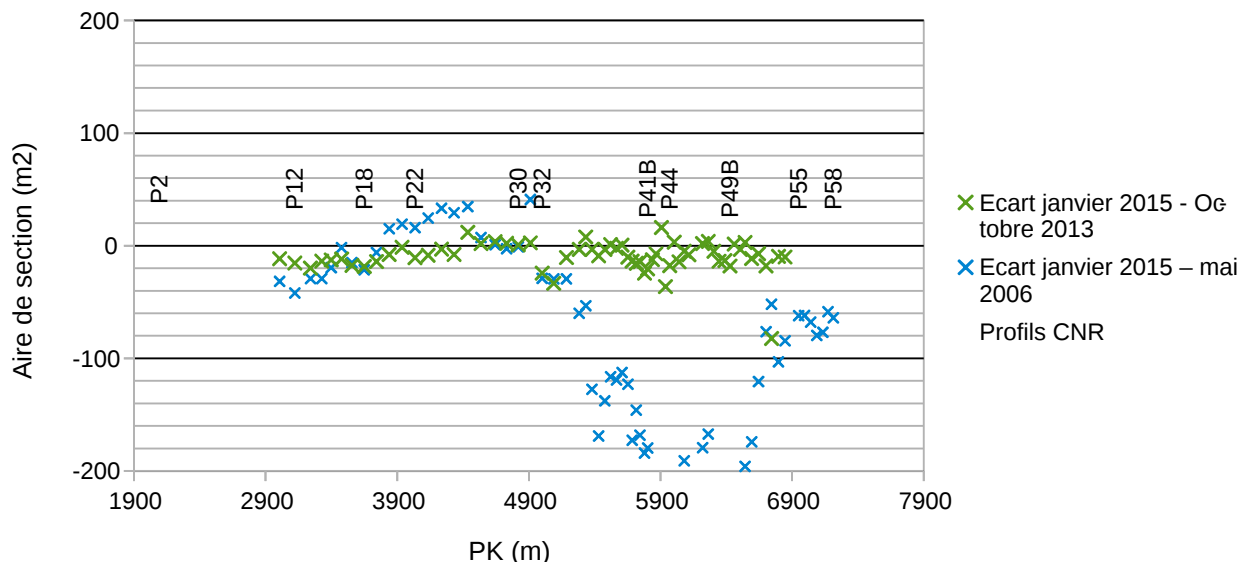


Figure 7: Dates des levés bathymétriques sur le canal d'amenée

3.1.2. Bathymétrie de référence

Une bathymétrie 2D de l'Isère et du canal d'amenée a été réalisée par l'entreprise INGEO pour le compte de la CNR au cours de six sessions de mesures entre le 08/01/2015 et le 08/04/2015. Elle couvre l'Isère à partir du profil P11 et le canal d'amenée.

Le semi ne commençant qu'au droit du profil P11, nous cherchons une bathymétrie de référence pour les profils plus en amont. Pour cela, nous comparons la bathymétrie INGEO avec les bathymétries de mai 2006 et octobre 2013.



Nous remarquons que la bathymétrie levée en mai 2006 est assez différente de celle de référence, notamment à l'aval du profil P32, profil à partir duquel **les fonds étaient plus hauts en 2006**.

La bathymétrie d'octobre 2013 est en revanche plus proche de celle de début 2015. Nous prendrons cette bathymétrie pour les profils P1 à P11.

3.2. Méthodologie pour le calcul des volumes et des tonnages déposés

3.2.1. Calcul des volumes de dépôt et d'érosion

Dans ce chapitre, nous appellerons aire de la section de dépôt ou d'érosion l'aire entre le profil levé à la date considérée et celui de référence (aire de la partie grisée sur la Figure 8). Cette aire de section est négative si la section a subi une érosion. Elle correspond à un volume de dépôt ou d'érosion par unité de longueur.

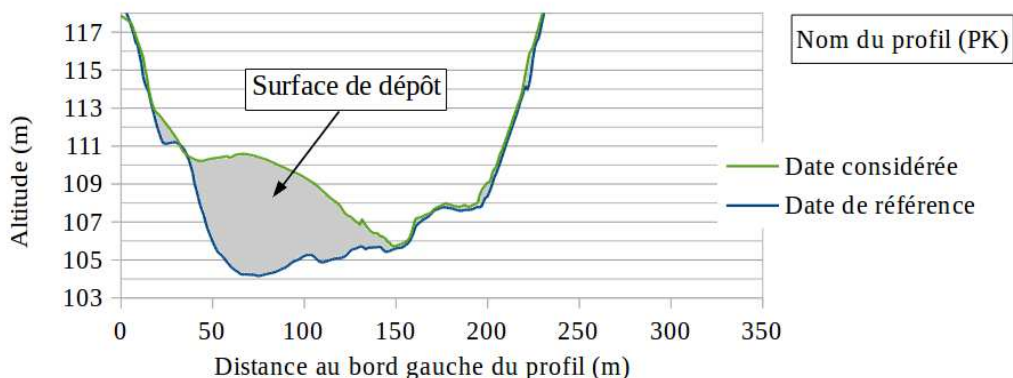


Figure 8: Définition de la surface de dépôt

Le volume de dépôt ou d'érosion entre deux profils en travers est égal à la moyenne des deux sections multipliée par la distance les séparant.

3.2.2. Masse volumique sèche des matériaux déposés

Les bilans bathymétriques et le bilan des entrées/sorties ne sont pas exprimés dans la même grandeur (respectivement volume et masse). Afin de les comparer, nous devons convertir l'un des deux paramètres. Cela nécessite de connaître la masse volumique sèche des dépôts en place.

Des mesures de densités sèches ont été réalisées sur des échantillons prélevés en octobre 2003 en rive droite et rive gauche des profils P54 et P57 (Migniot, 2004). Cette densité sèche peut varier rapidement en fonction de la teneur en limon ($d < 0.08\text{mm}$), des débris végétaux et de l'âge des dépôts, ceux-ci ayant tendance à se tasser au court du temps. Il est précisé que « *la densité sèche [des matériaux prélevés] peut passer de 1,35 (moyenne) pour les échantillons contenant de 1 à 2 % de limons à 0,9 pour des échantillons contenant 30 % de limons et de débris végétaux.* »

[...] la plupart des échantillons ont des densités sèches atteignant 1,5 à 1,6 (62%) et que 14 % seulement des échantillons ont des densités inférieures à 1 et atteignent 0,8. La majorité est donc constituée d'élément sableux. »

Dans la suite de l'étude et sauf précision autre, nous utiliserons une masse volumique sèche de $1\,300\text{ kg/m}^3$ pour les dépôts sableux formés pendant la chasse à l'aval de Beaumont-Monteux.

3.3. Quantification des volumes chassés des retenues de la basse Isère

EDF a fait réaliser un levé bathymétrique sur l'ensemble des cinq retenues de la basse Isère en 2014 et juillet/août 2015.

Pour comparer les deux situations avant et après chasse, nous en avons extrait des profils en travers espacés de 200m et avons calculé les aires de sections d'érosion correspondantes.

La figure 9 présente les volumes d'érosion cumulés dans chacune des cinq retenues de la basse Isère.

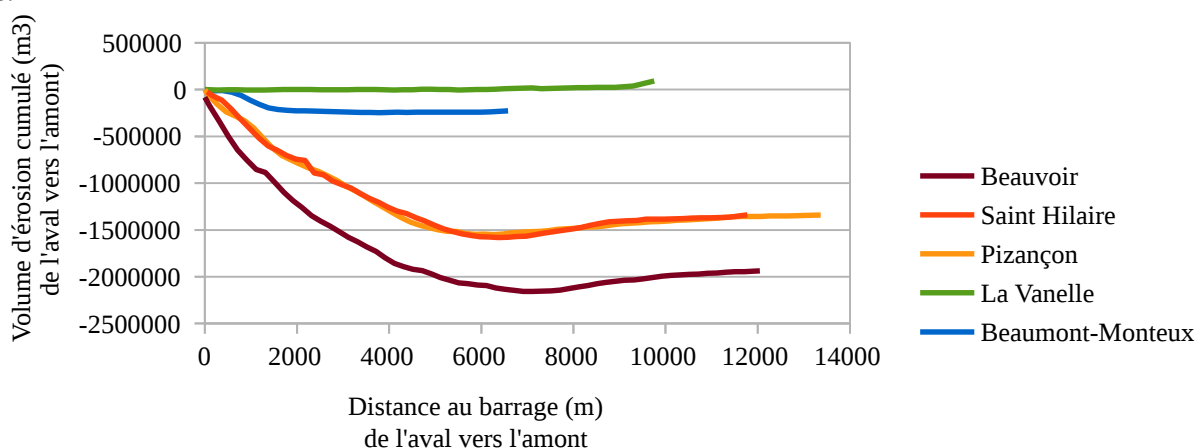


Figure 9: Volume d'érosion cumulé dans chacune des cinq retenues de la basse Isère

Nous remarquons que les trois retenues amont ont subi des érosions jusqu'à environ 6 500 et 7 200 m en amont des barrages. Au delà, des exhaussements sont observés. Les retenues de Saint Hilaire et Pizançon ont le même comportement.

La retenue de la Vanelle est la seule retenue dont le volume global de sédiments augmente légèrement.

Les quantités de sédiments déstockés sont :

| Retenues | Volume déstocké (10 ⁶ m ³) | Poids (10 ⁶ tonnes) Avec $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$ | Poids (10 ⁶ tonnes) Avec $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$ | % du total |
|------------------|---|---|---|------------|
| Beauvoir | -1,94 | -2.13 | -2.52 | 41% |
| Saint Hilaire | -1,34 | -1.47 | -1.74 | 28% |
| Pizançon | -1,34 | -1.47 | -1.74 | 28% |
| La Vanelle | 0,09 | 0.10 | 0.12 | -2% |
| Beaumont-Monteux | -0,23 | -0.25 | -0.30 | 5% |
| TOTAL | -4,75 | -5,23 | -6,18 | |

Ces valeurs sont cohérentes avec celles fournies par EDF.

La modélisation présentée dans le rapport Étude de nouvelles modalités de réalisation des chasses sur les ouvrages de la basse Isère - rapport préliminaire de calage (Sogreah, 2010) indique que les volumes potentiellement déposables dans les retenues sont les suivants :

| Retenues | Volume stockable (10 ⁶ m ³) | Durée de remplissage |
|------------------|--|-----------------------------|
| Beauvoir | 3,00 | 10 ans |
| Saint Hilaire | 1,50 | 10-20 ans |
| Pizançon | 1,50 | 10-20 ans avec oscillations |
| La Vanelle | 0,00 | |
| Beaumont-Monteux | 0,40 | 10-20 ans avec oscillations |
| TOTAL | -5,40 | |

3.4. Analyse des données bathymétriques de la basse Isère

3.4.1. Phase de dépôt

La figure 10 précise la localisation des mesures bathymétriques réalisées sur l'Isère ainsi que les hauteurs de dépôts par rapport à la bathymétrie de référence.

L'analyse des profils en travers de l'Isère montre que les fortes épaisseurs de dépôt apparaissent là où l'Isère est le plus profond (à partir de P32) et dans l'axe d'écoulement. Les dépôts tendent à lisser le profil en long. Cela va dans le sens d'un transport par veine et non d'une suspension généralisée.

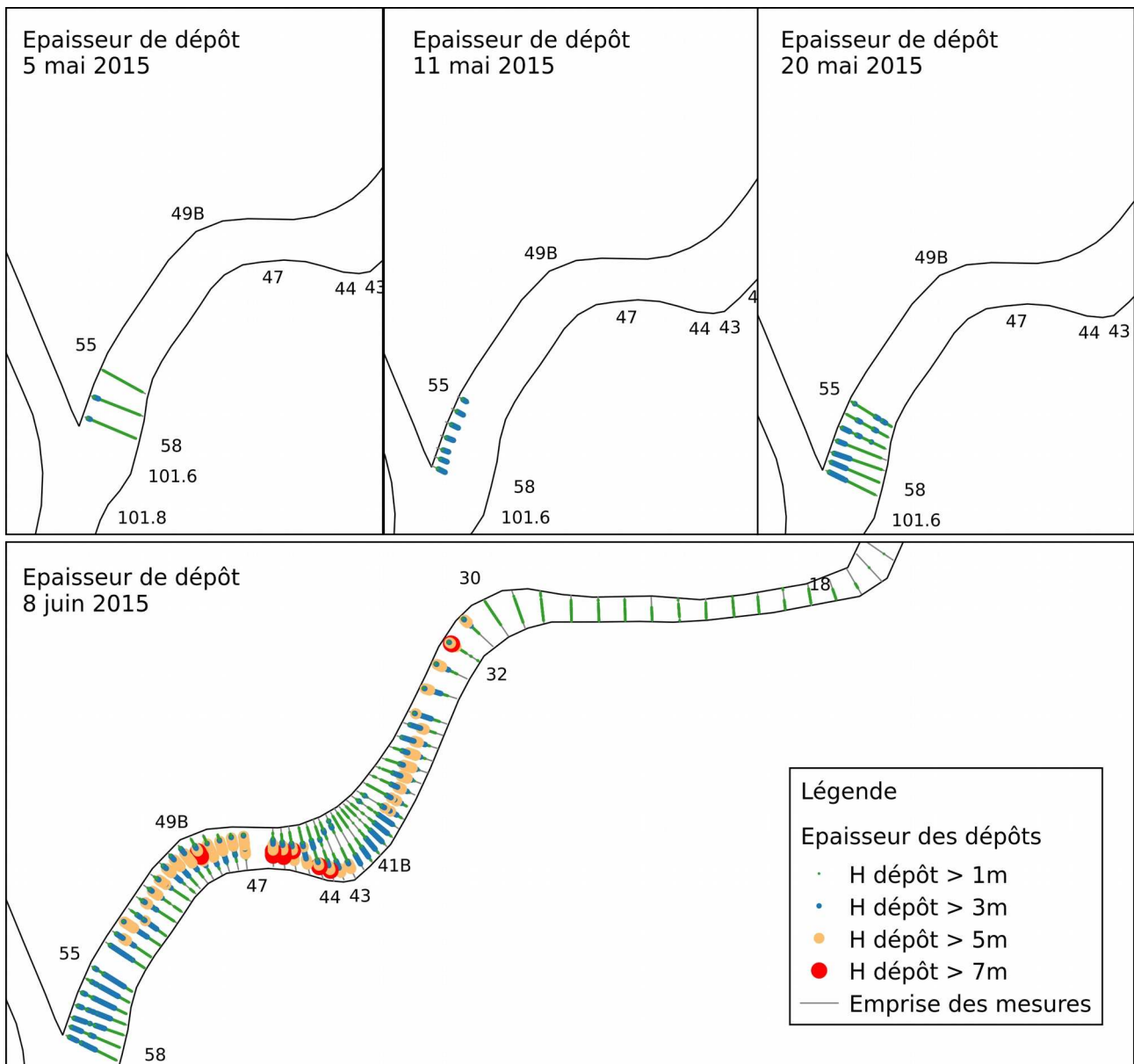


Figure 10: Localisation des mesures bathymétriques et épaisseurs des dépôts

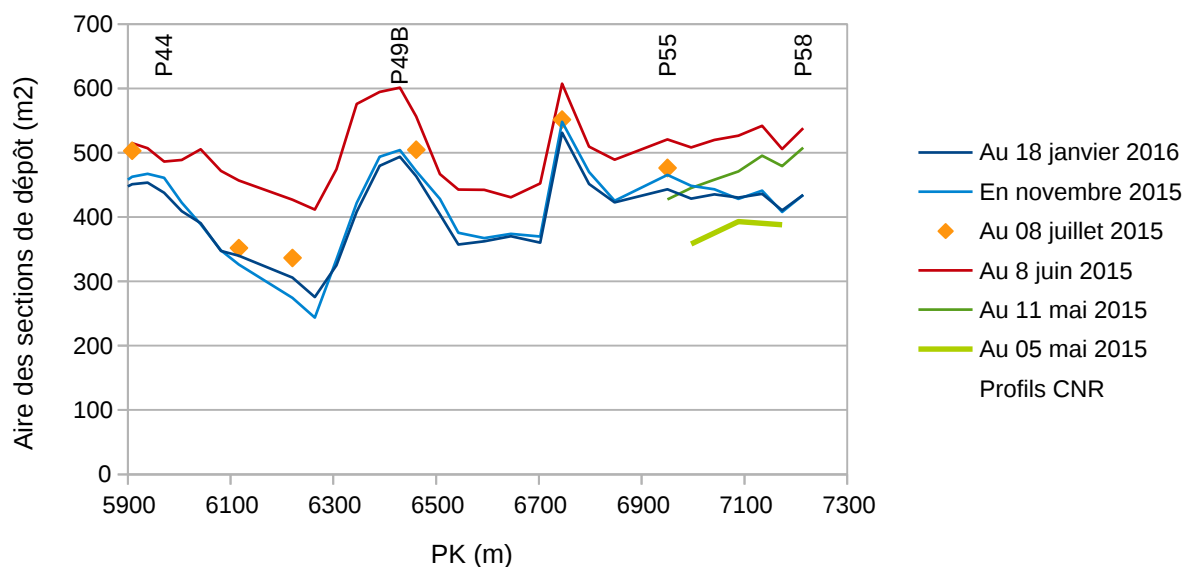


Figure 11: Aires des sections de dépôt à la confluence

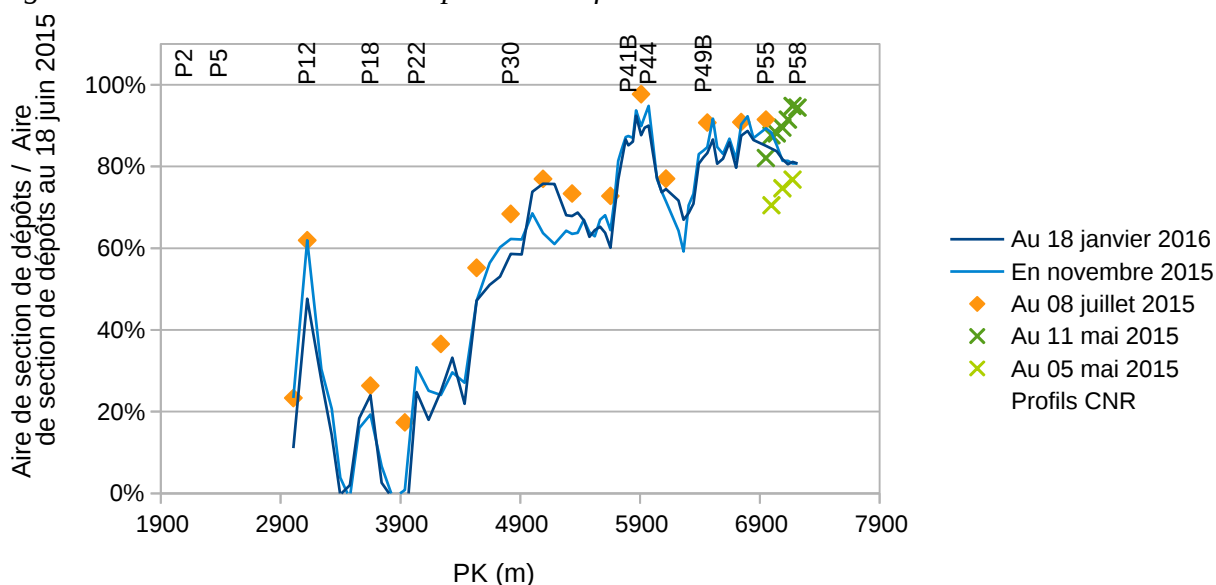


Figure 12: Rapport des aires de sections de dépôt

Les figures 11 et 12 montrent que :

- dès le 05/05/2015, entre 70 et 80 % des dépôts sont en place à la confluence.
- la bathymétrie réalisée à l'aide de la trille CNR le 07/05/2015 correspondent aux dépôts maximaux levés sur ce profil P2 (Volume de dépôts calculé à partir de la bathymétrie du 24/10/2013). Nous ne notons pas d'évolution des profils en amont de P5 après cette date, ce qui semble étrange. Cela signifie peut-être que la bathymétrie de référence en amont de P11 n'est pas représentative de la bathymétrie avant chasse.
- au 11/05/2015, entre 80 et 95 % des dépôts sont en place à la confluence.
- au 20/05/2015, il est possible que les dépôts atteignent leur volume maximal à la confluence. En effet, le tirant d'eau rive gauche n'était pas suffisant pour naviguer et réaliser les levés bathymétriques. La comparaison des zones levées en rive droite montrent que les fonds étaient légèrement plus hauts ou à la même altitude qu'au 18 juin 2015.
- au 26/05/2015 : fermeture de Beaumont-Monteux

- le 8/06/2015 est la date des premiers levés bathymétriques sur l'ensemble du secteur d'étude (P1 à P58). Nous considérerons cette bathymétrie comme représentative des dépôts maximaux. Le volume déposé dans l'Isère est alors de 1,3 Mm³ (figure 16).

3.4.2. Phase de reprise

La figure 13 présente l'évolution du volume de dépôt dans l'Isère et le débit mesuré à la station de Beaumont-Monteux.

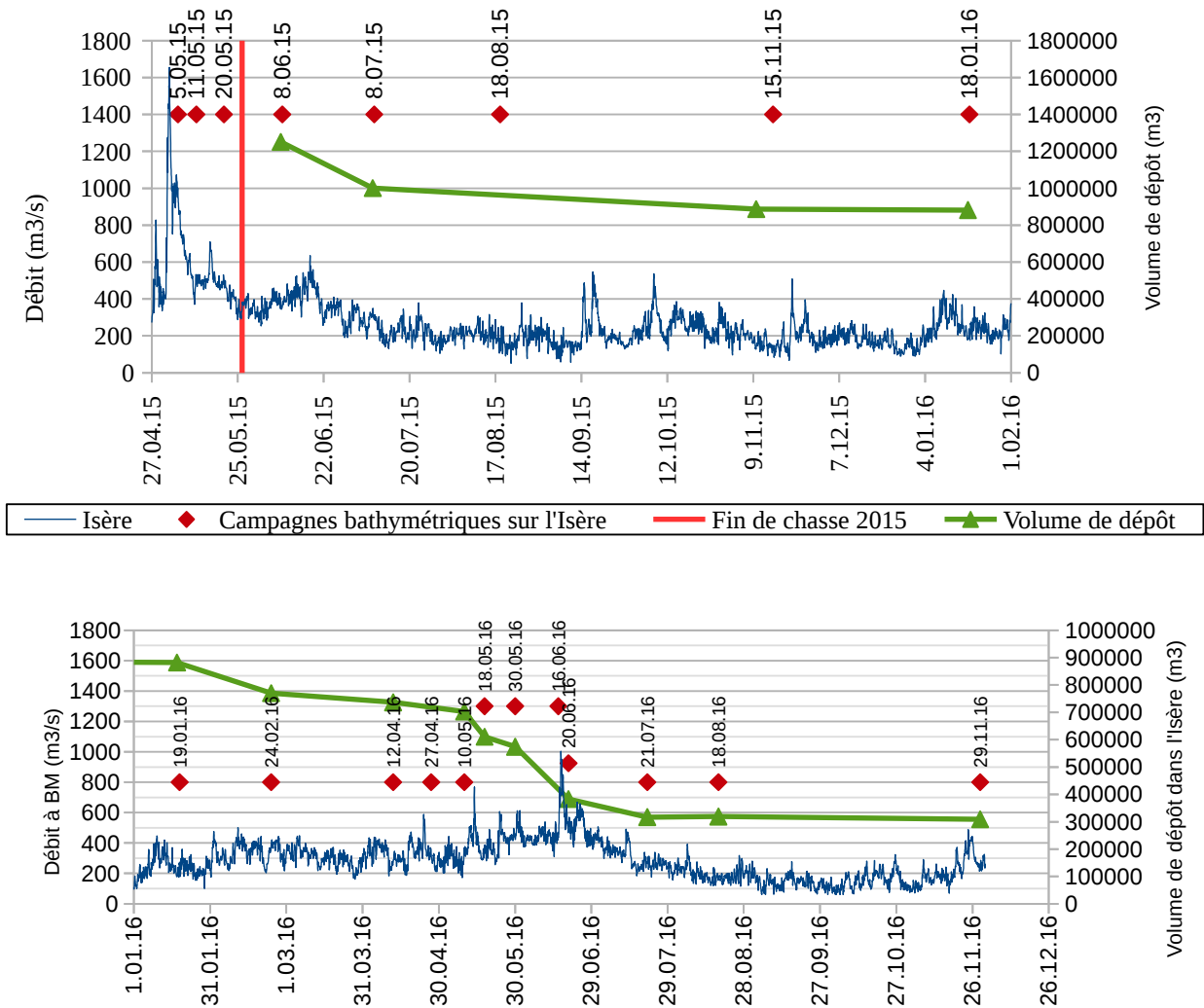


Figure 13: Hydrogramme à Beaumont Monteux, dates des campagnes bathymétriques sur l'Isère et évolution du volume des dépôts

La figures 14 représente les aires de section de dépôt des campagnes bathymétriques jusqu'au 18 janvier 2016.

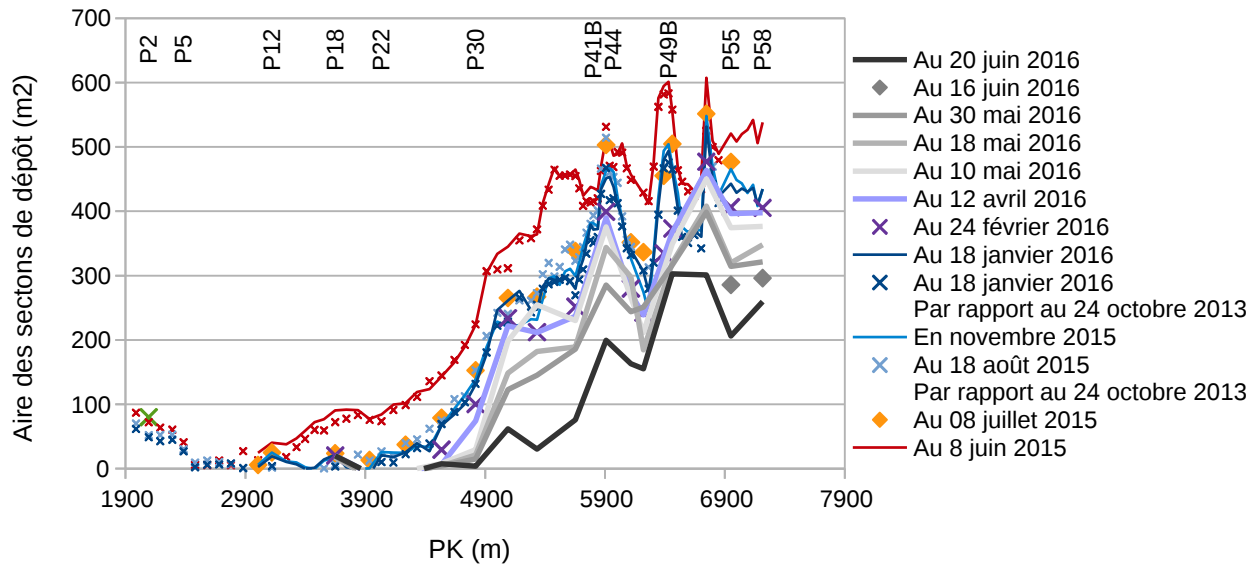


Figure 14: Aires des sections de dépôt

La figure 15 représente le volume érodé par rapport au débit au pic de crue.

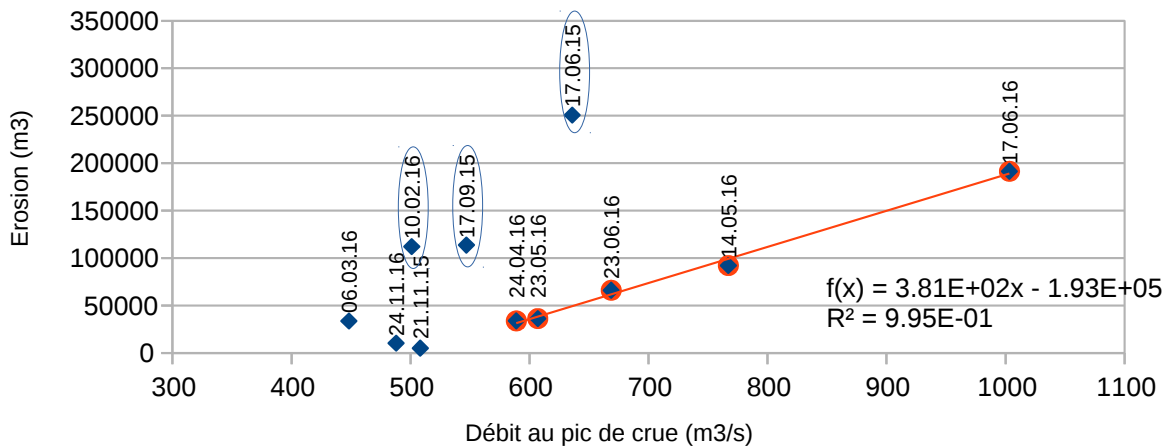


Figure 15: Volume érodé par rapport au débit de pic de crue

Les figures 13 et 15 montrent que le débit de début d'érosion se situe entre 400 et 500 m³/s. La relation entre le débit au pic de crue et le volume érodé est donnée à titre indicatif et est à prendre avec précaution car elle ne tient pas compte de la durée de l'événement. Les mesures bathymétriques dont sont issues les volumes érodés n'encadrent pas parfaitement les événements hydrologiques.

Il n'a pas été possible d'établir une relation entre le volume de sédiment érodé et le volume d'eau écoulé pendant l'événement.

D'une manière générale, les volumes érodés sont d'autant plus importants que les stocks sont élevés. Le niveau à la confluence étant relativement stable (faible marnage au point PR2), la hauteur d'eau est essentiellement liée à la position du fond. Ainsi, pour un même débit, la contrainte au dessus du dépôt diminue à mesure que le fond s'érode. C'est pourquoi les événements du 17.06.15, 17.09.15 et 10.02.16 ont érodé plus que d'autres événements plus intenses. Par exemple, entre 19.01.16 et le 24.02.16, nous notons une érosion d'environ 110 000 m³ alors que les débits restent inférieurs à 500 m³/s.

Ainsi en juillet 2016, il reste environ 300 000 m³ de sédiments dans l'Isère (figure 16).

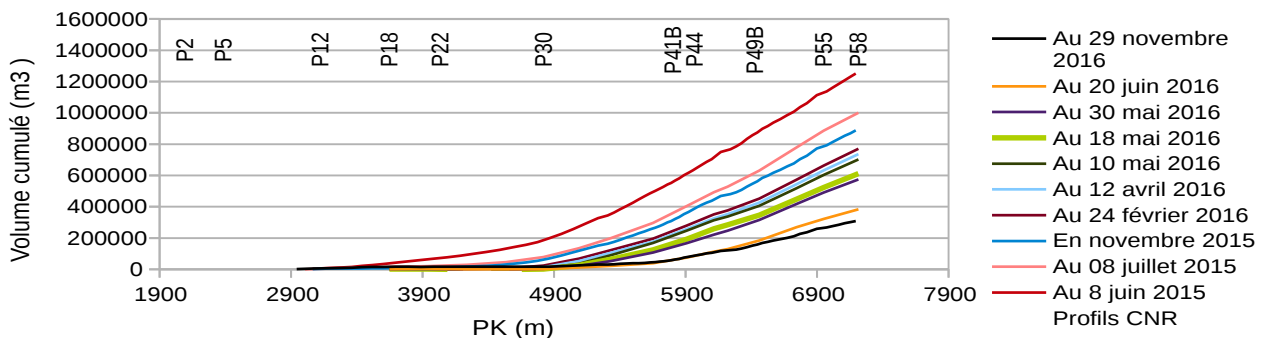


Figure 16: Volume de dépôt cumulé

Enfin, Irstea a réalisé des mesures par ADCP le 15/06 de 12h15 à 16h25 sur l'Isère et le canal d'amenée. La mobilité du fond à la confluence n'a pas permis d'y avoir des mesures fiables. En revanche, cela témoigne que les débits étaient suffisants (entre 425 et 460 m³/s) pour mettre en mouvements les sédiments à la confluence. Le tableau 1 indique les vitesses de fond relevé par l'ADCP (600 kHz). Ces valeurs sont cependant à prendre avec beaucoup de précautions. D'une part, elles sont très hachées. D'autre part, il est difficile de déterminer si la couche suivie est réellement représentative du transport par charriage. L'épaisseur de la couche de particules qui renvoient l'écho des impulsions de bottom-track de l'ADCP est difficile à estimer et elle décroît avec la fréquence de l'ADCP (épaisseur plus faible avec un 600kHz qu'avec un 1200kHz). Elle peut ainsi englober des sédiments du fond immobiles, ainsi que des particules en suspension très concentrées au dessus du fond.

| Profil | Vitesse du fond |
|--------|--------------------|
| P22 | Entre 0 et 0.2 m/s |
| P43 | < 0,5 m/s |
| P55B | < 1 m/s |

Tableau 1: Vitesses du fond mobile mesurées par ADCP

A titre de comparaison, les vitesses du fond estimées lors des mesures du 05/05/15 à la confluence étaient en moyenne comprises entre 1 et 2 m/s.

On note une augmentation des vitesses de l'amont vers l'aval qui peut-être due à la différence de granulométrie relevée lors des mesures de charriage du 18/06/15.

3.5. Analyse des données bathymétriques du canal d'amenée

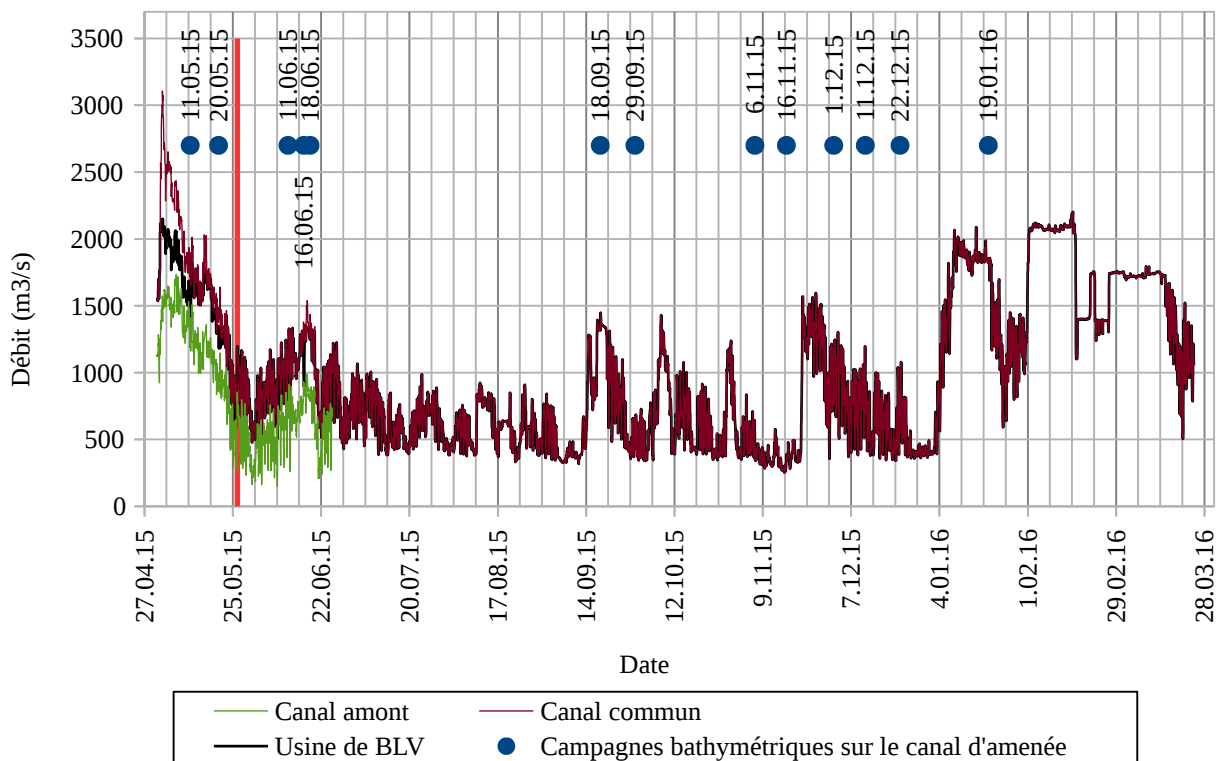


Figure 17: Date des mesures bathymétriques et hydrologie du canal d'amenée

La figure 17 précise les dates auxquelles les mesures bathymétriques sur le canal d'amenée ont été effectuées ainsi que les débits associés.

Les figures 18 et 19 précisent la localisation des mesures bathymétriques réalisées sur le canal d'amenée ainsi que les hauteurs de dépôt par rapport à la bathymétrie de référence.

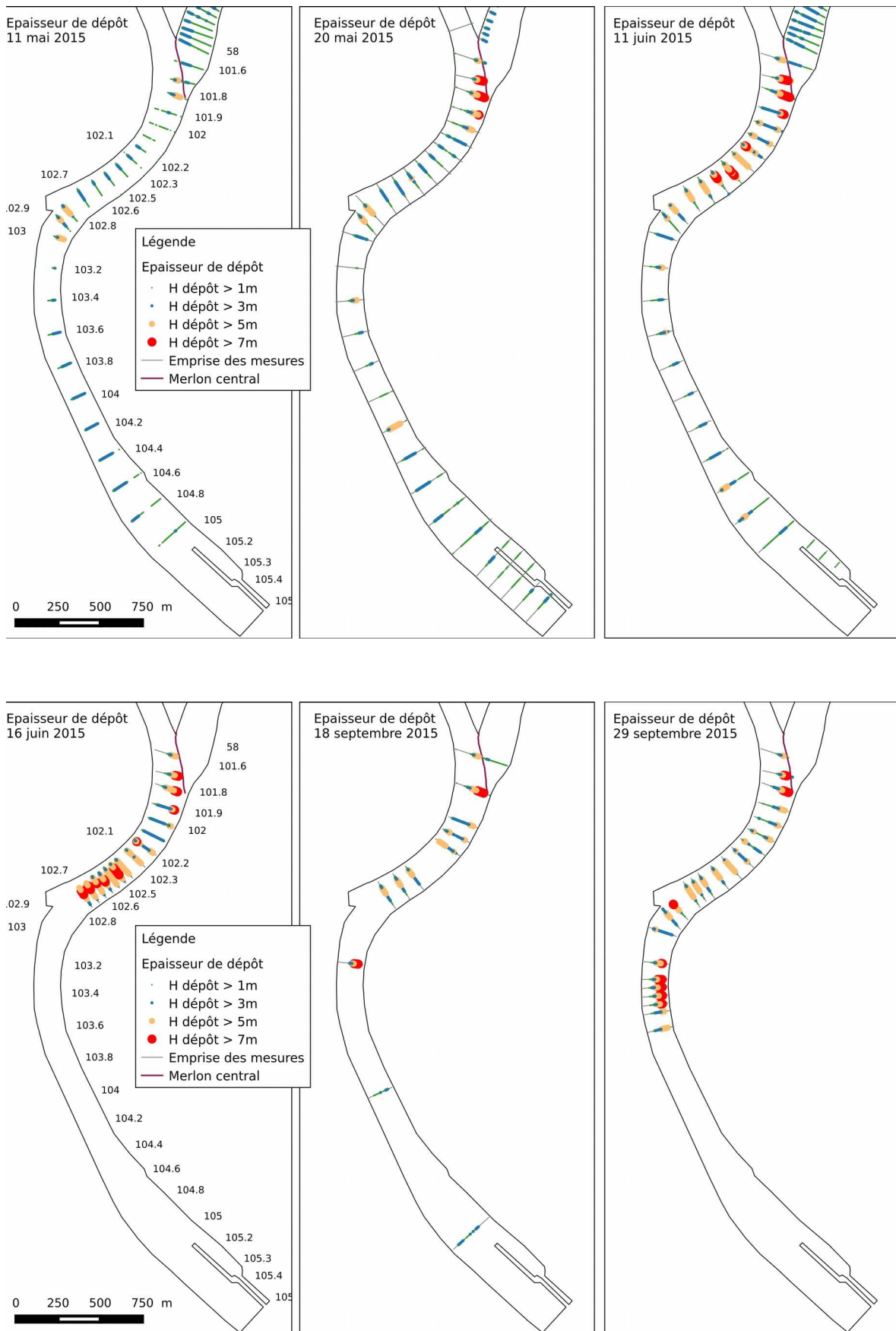


Figure 18: Localisation des mesures bathymétriques dans le canal d'amenée et hauteurs des dépôts du 11.06.15 au 29.09.15

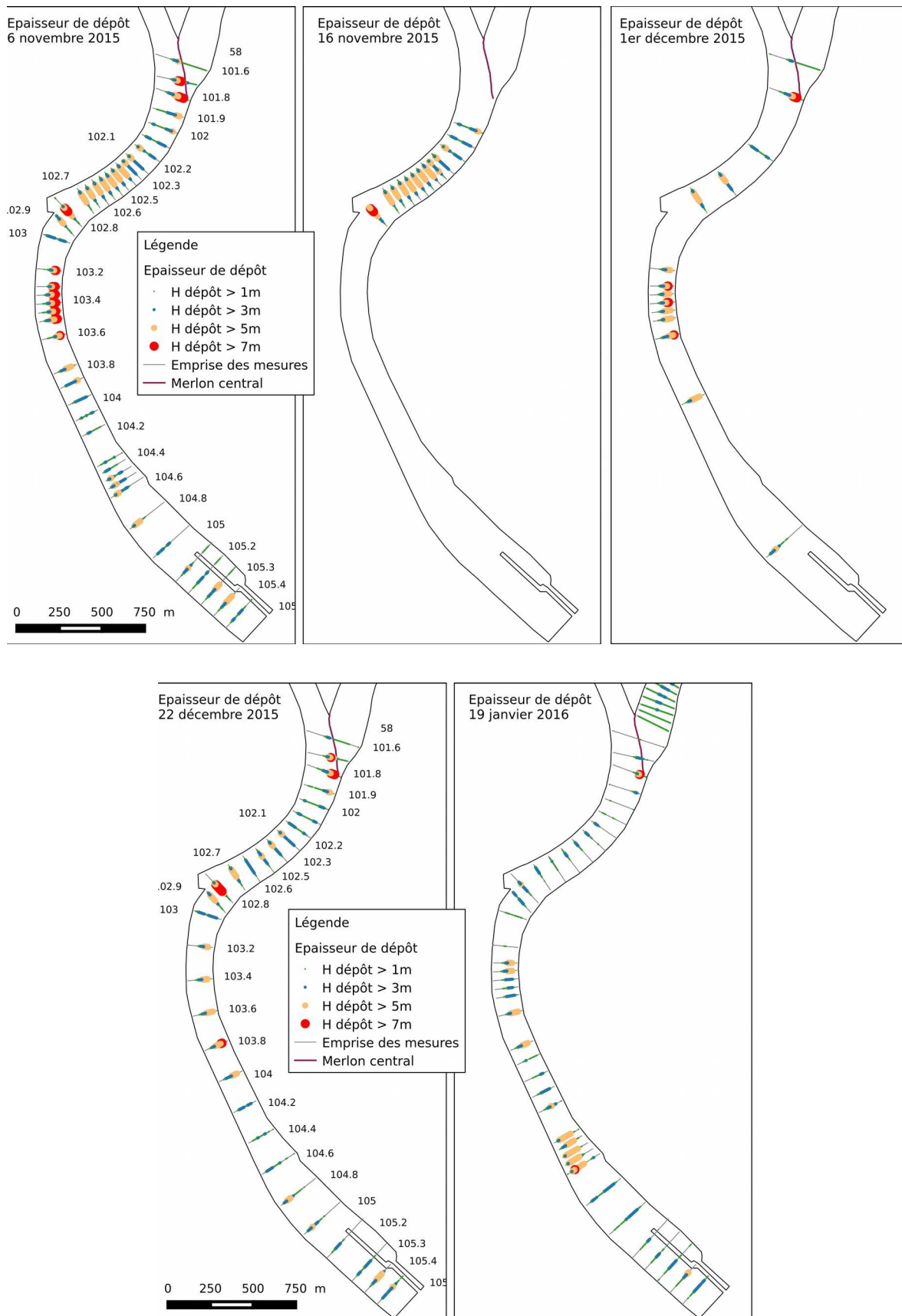


Figure 19: Localisation des mesures bathymétriques dans le canal d'aménée et hauteurs des dépôts du 06.11.15 au 19.01.16

La figure 21 précise les aires de section de dépôt dans le canal d'amenée jusqu'aux mesures du 11/06/2015.

Dès le 11 mai 2015, nous observons des dépôts sur l'ensemble du canal d'amenée avec cependant des dépôts moindres au milieu du canal commun et à l'aval du barrage Isère. Les zones de dépôts principales sont donc situées à la confluence, au droit du barrage Isère et à l'aval du canal aval.

Au profil 101.8, 43 % du dépôt relevé le 8 juin est en place.

Le 20 mai, le profil en long des aires de section de dépôts à la même forme générale. Les dépôts s'accroissent à la confluence, diminuent légèrement au barrage Isère et entre les profils 103.2 et 104.

Au profil 101.8, 78 % du dépôt relevé le 8 juin est en place. Entre le 11/05 et le 20/05, les débits dans le canal commun et aval baissent légèrement mais restent compris entre 1500 et 2000 m³/s (figure 20).

Le maximum de dépôt à la confluence a été observé le 11.06.15.

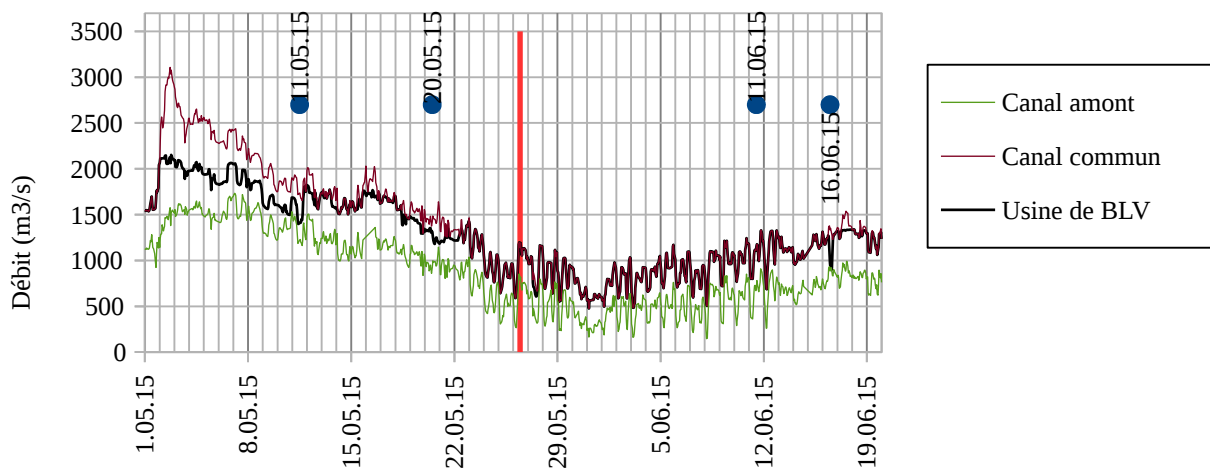


Figure 20: Hydrologie du canal d'amenée et dates des mesures bathymétriques

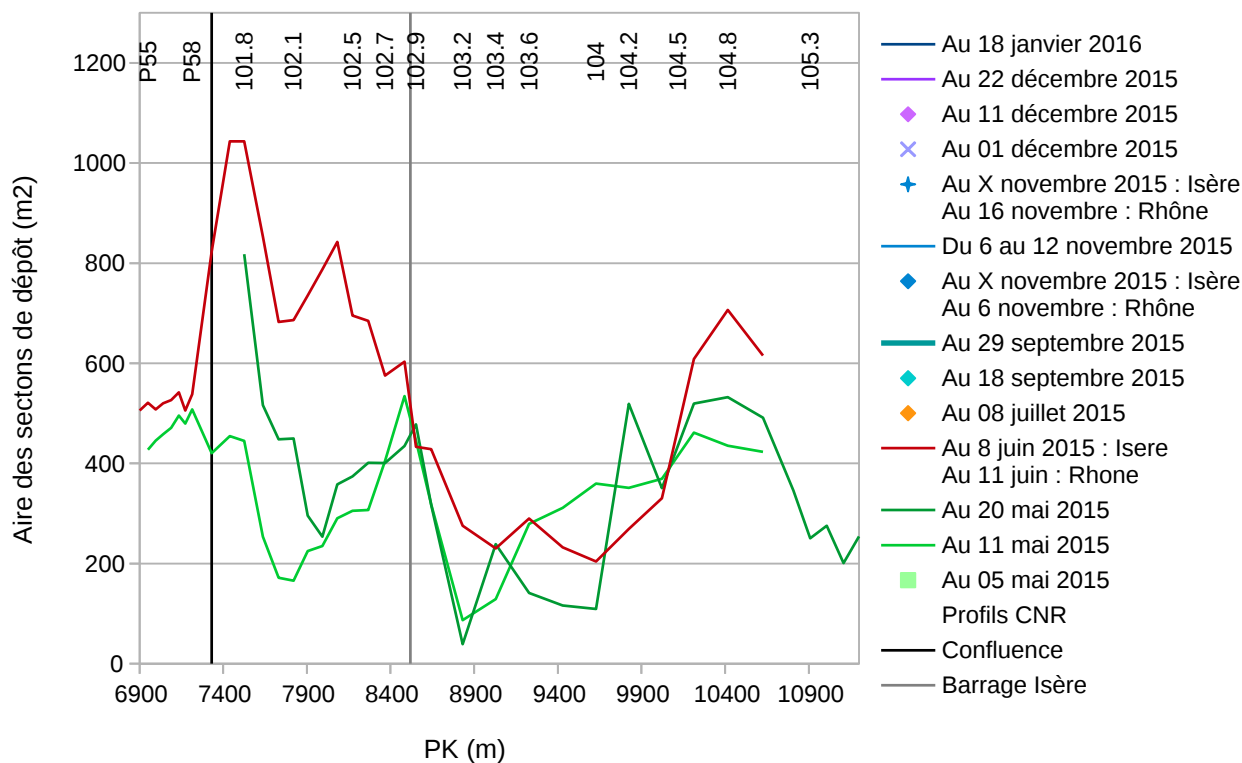


Figure 21: Aires des sections de dépôt du 05/05, 20/05 et 11/06/2015

Le 15/06 à 16h, le bateau l'Atlantis s'échoue au droit du PK 102.5, ce qui entraîne l'arrêt de la navigation. Il est désengagé le 15/06 à 21h30 suite à la remonté du plan d'eau de la retenue. Le 16/06, le barrage Isère est ouvert de 10h à 16h. L'arrêt de navigation est levé le 16/06 à 17h avec restriction du chenal navigable et interdiction de croisement. Le barrage Isère a été ouvert par intermittence jusqu'au 18/06 à 22h.

Le 22/06 débutent les opérations de dragage.

Ces événements correspondent à des débits dans l'Isère dépassant les 500 m³/s (entre le 12/06 et le 18/06), débit permettant une érosion dans l'Isère. Sur la même période, le débit du canal commun varie entre 1000 et 1500 m³/s, soit des débits probablement trop faibles pour évacuer rapidement les sédiments provenant de l'Isère.

Ainsi, le 17/06/15, les débits sont de 1500 m³/s sur le canal commun et 1300 m³/s sur le canal aval (figure 22) :

Le 18/09/15, le débit est de 1450 m³/s sur le canal d'amenée (barrage Isère fermé) et le débit de l'Isère présente un pic à 530 m³/s.



Figure 22: Hydrologie du canal d'amenée et dates des mesures bathymétriques

Des mesures bathymétriques ont été réalisées le 11/06 (ensemble du canal d'amenée), le 16/06 (canal commun jusqu'au profil 102.7) et le 18/06 (profils 102 et 104). Des mesures de profondeurs ont de plus été réalisées par le Frédéric Mistral le 16/06 (figure 23). Nous les utilisons pour chercher à expliquer l'échouage de l'Atlantis. Les profils n'ayant pas été levés sur toute la largeur d'écoulement, nous comparons les profils de chaque date par rapport aux profils les plus courts. Les aires de sections de dépôt et les volumes cumulés sont donc partielles.

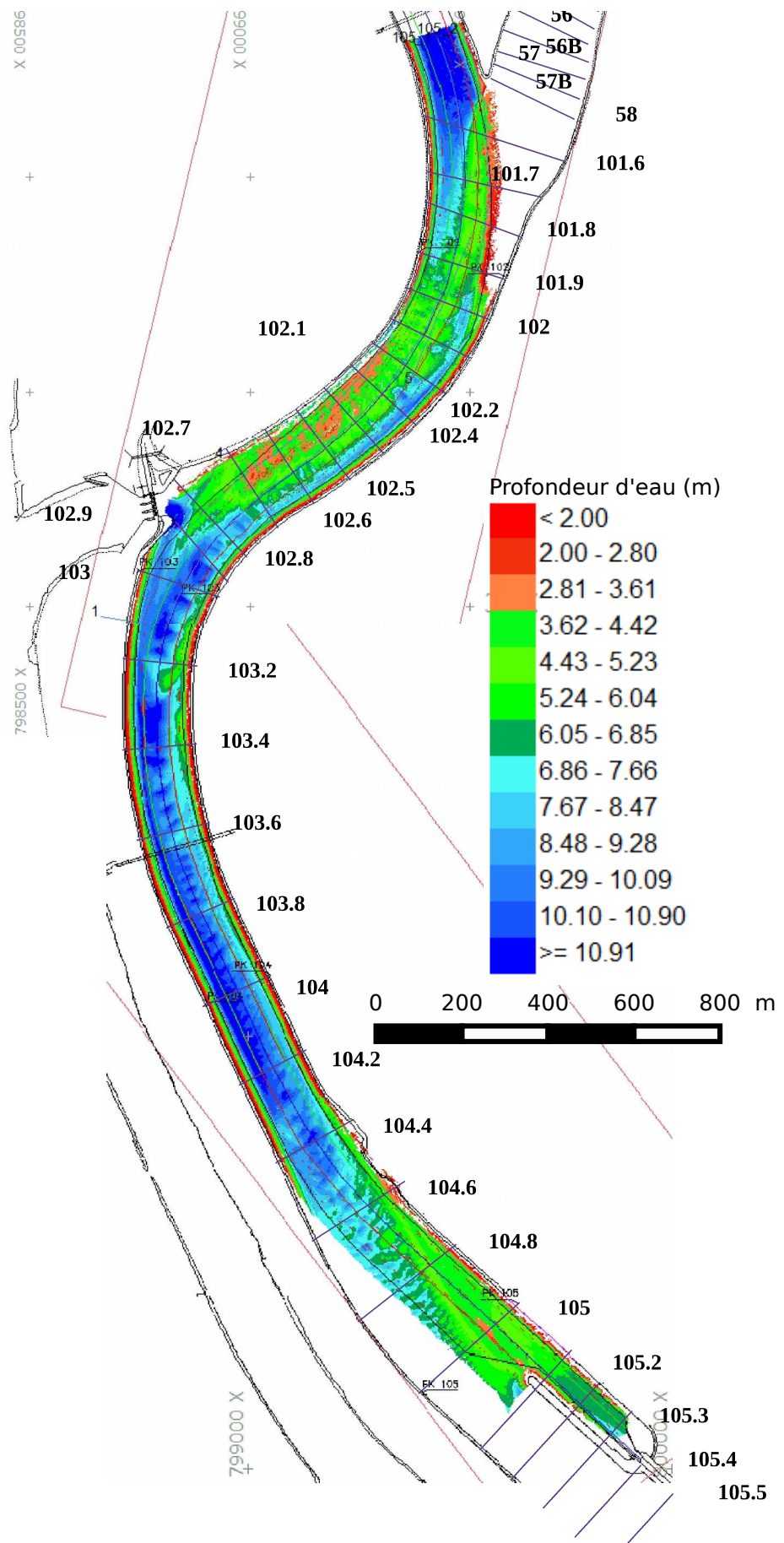
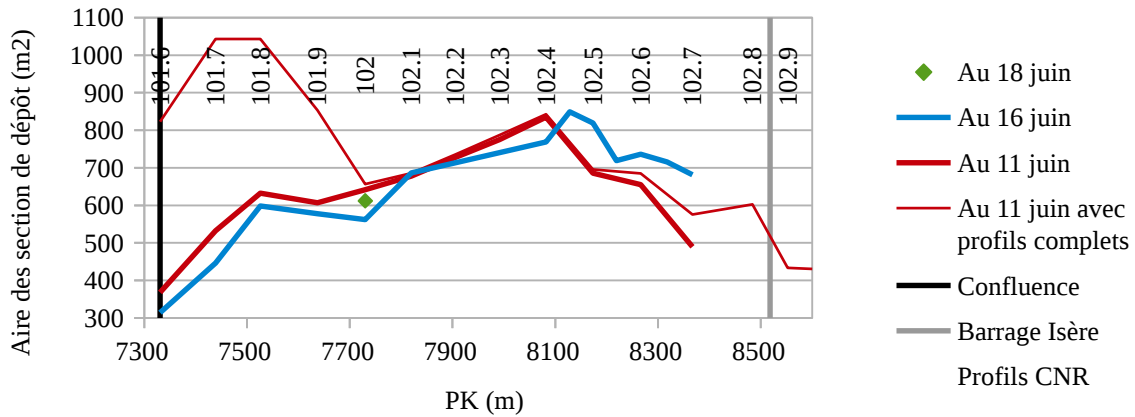


Figure 23: Mesures de profondeurs réalisées par le bateau Frédéric Mistral le 16/05/15



Nous observons une légère érosion à l'amont du canal commun et une zone de dépôt à partir du profil 102.5 (zone d'échouage de l'Atlantis). L'analyse des volumes cumulés montre que le volume déposé est quasiment égale au volume érodé et il n'est donc pas possible d'isoler les matériaux provenant de l'Isère de ceux déjà en place dans le canal commun.

Les figures 24 à 27 décrivent certains profils en travers du canal d'amenée à différentes dates. Le profil 102.8 au 15/06/2015 a été estimé à partir des mesures de profondeur du Frédéric Mistral.

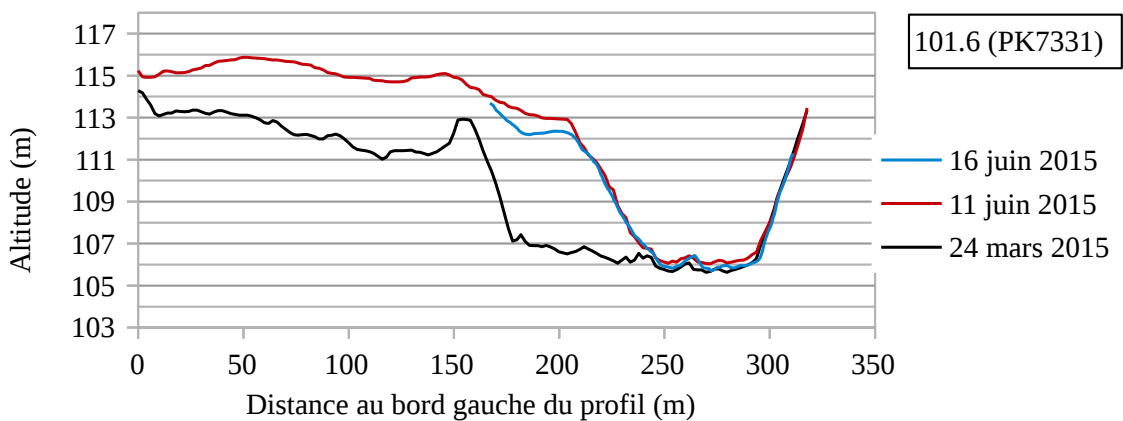


Figure 24: Évolutions bathymétriques du profil 101.6

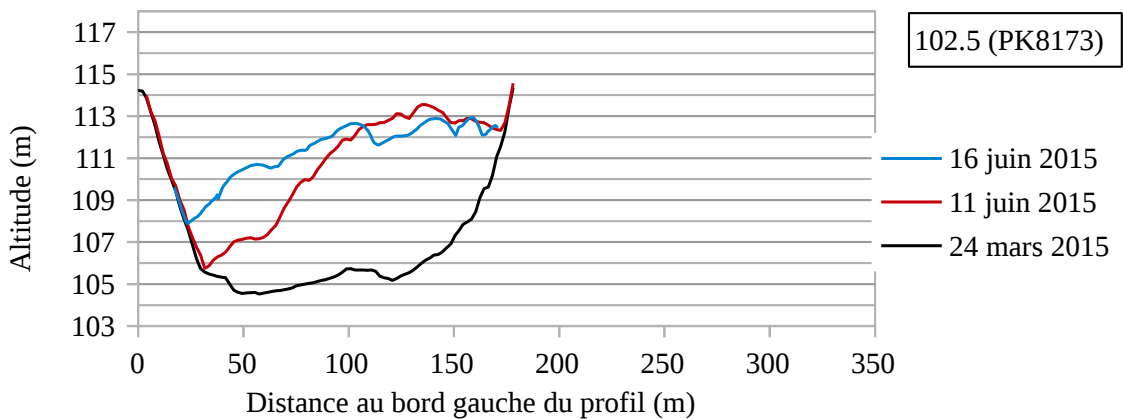


Figure 25: Évolutions bathymétriques du profil 102.5

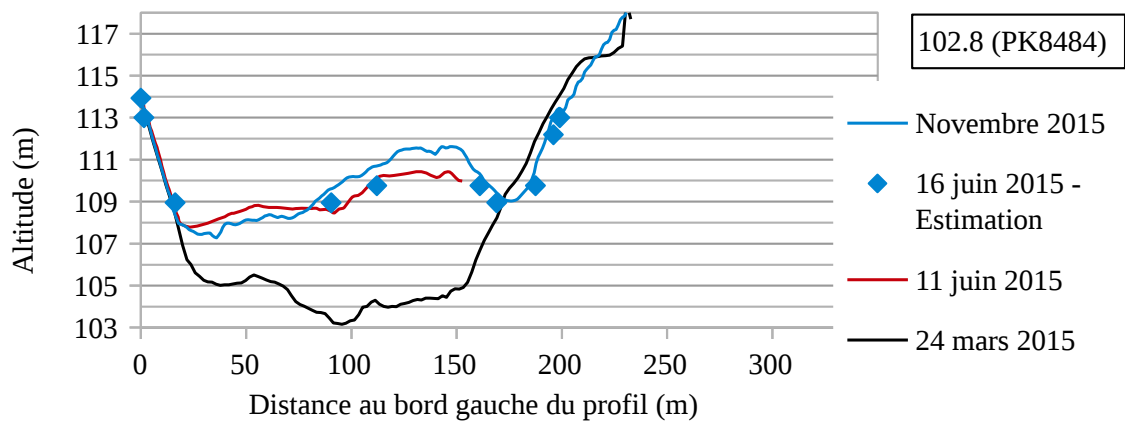


Figure 26: Évolutions bathymétriques du profil 102.8

A l'aval du barrage Isère, nous observons une érosion marquée en partie gauche du profil 103 mais les autres profils levés ne permettent pas de localiser de zone de dépôt qui pourrait en résulter à l'aval.

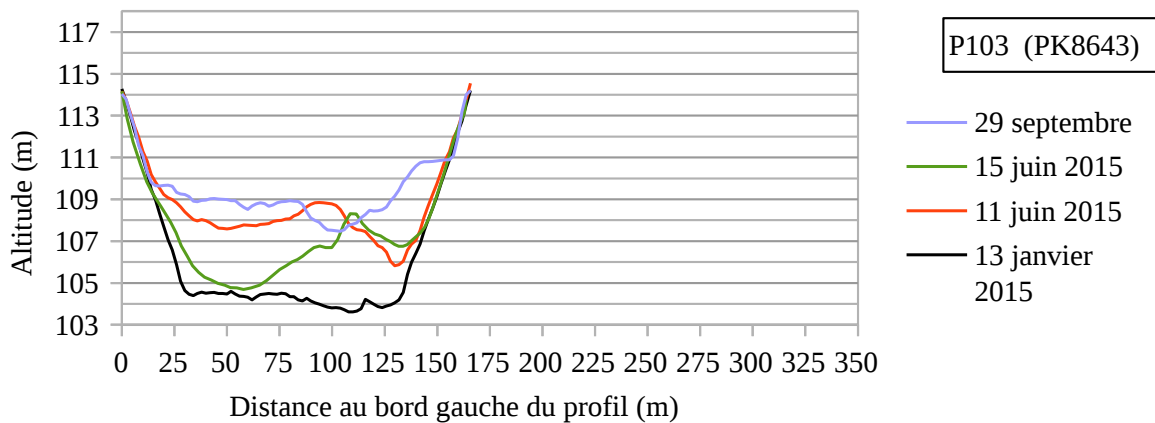


Figure 27: Évolutions bathymétriques du profil 103

Les mesures ADCP au droit du profils 103 détectent bien un fond mobile faible dans la partie gauche du profil.

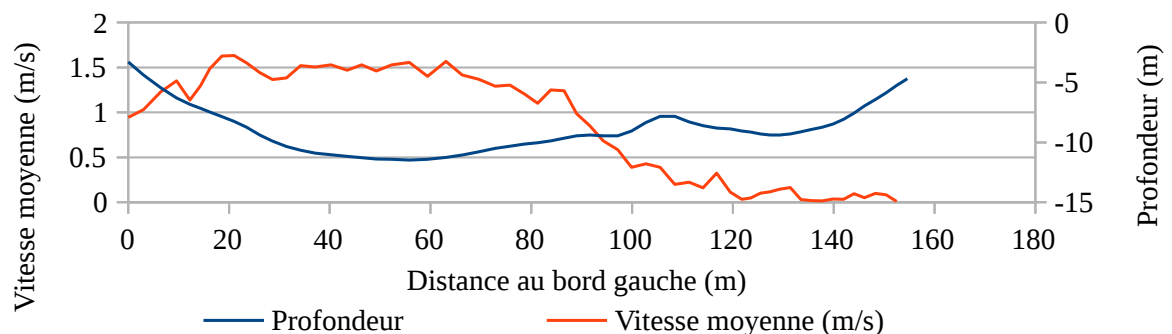


Figure 28: Vitesse moyenne mesurée par ADCP

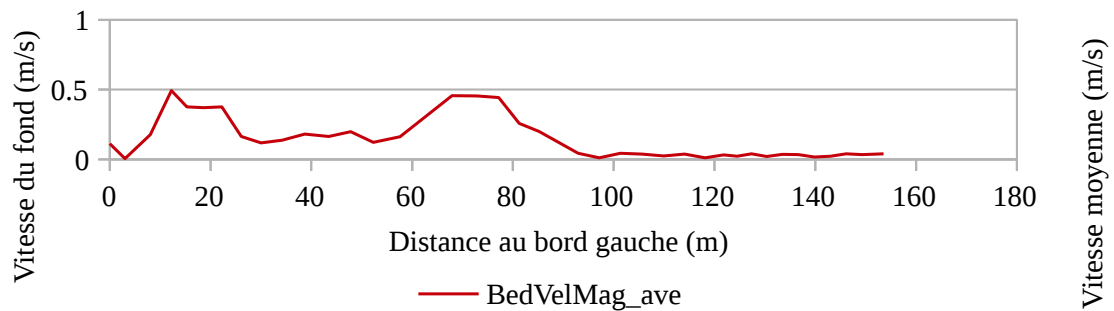


Figure 29: Vitesse du fond mobile mesurée par ADCP

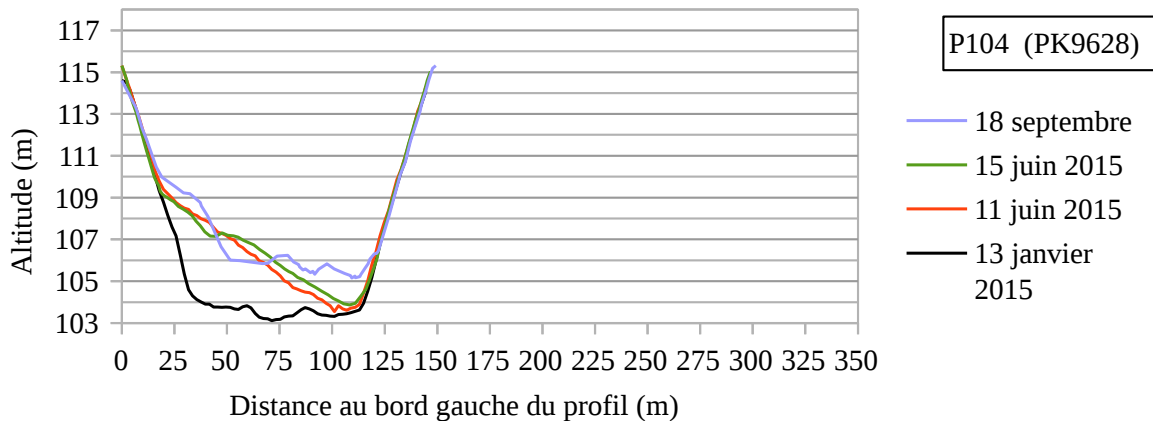
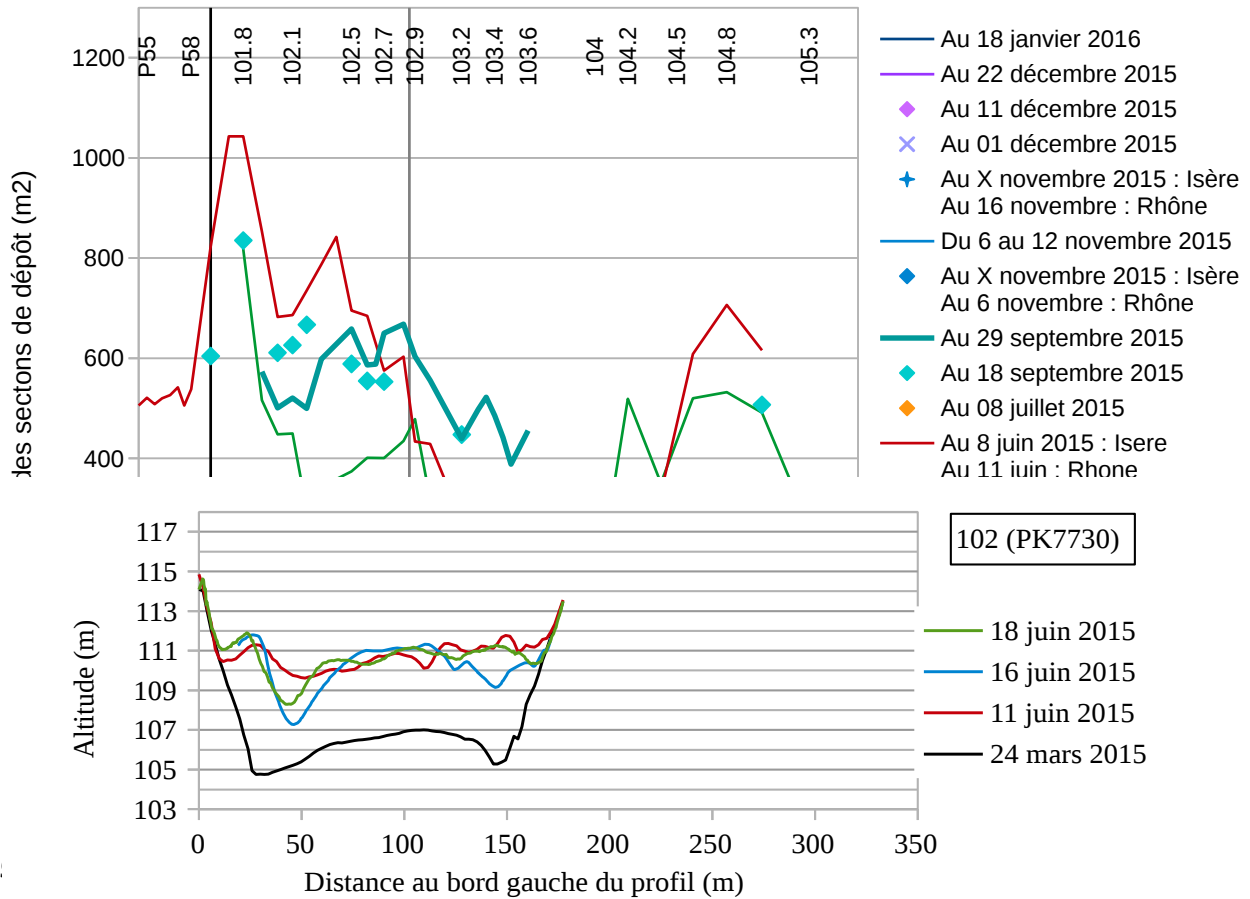


Figure 30: Évolutions bathymétriques du profil 104

Les mesures bathymétriques du 18/09 et du 29/09 montrent une reprise des dépôts à la confluence et sur le canal commun par rapport au 11/06. Au profil 101.8, nous retrouvons un volume de dépôt proche de celui du 20 mai 2015.

Ces volumes érodés entre la confluence et le barrage Isère se retrouvent dans le canal aval. Ainsi, le profil 103 qui avait subi une forte érosion entre le 11/06 et le 15/06 retrouve un volume de dépôt important. Cela montre la forte variabilité des volumes de dépôts dans le canal d'aménée et confirme que des campagnes bathymétriques trop espacées dans le temps et l'espace ne permettent pas de voir tous les phénomènes de reprise/dépôt.

Les érosions qui ont lieu dans le canal commun entre le 18/09 et le 29/09 provoquent une augmentation des dépôts au droit du barrage Isère (figure 31).



Fi

Figure 32: Évolutions bathymétriques du profil 102

Entre le 29/09 et le 16/11, nous observons les pics de débits suivants (figure 33) :

- du 07/10/15 au 08/10/15 : > 1200 m³/s
- 29/10/15 : > 1200 m³/s

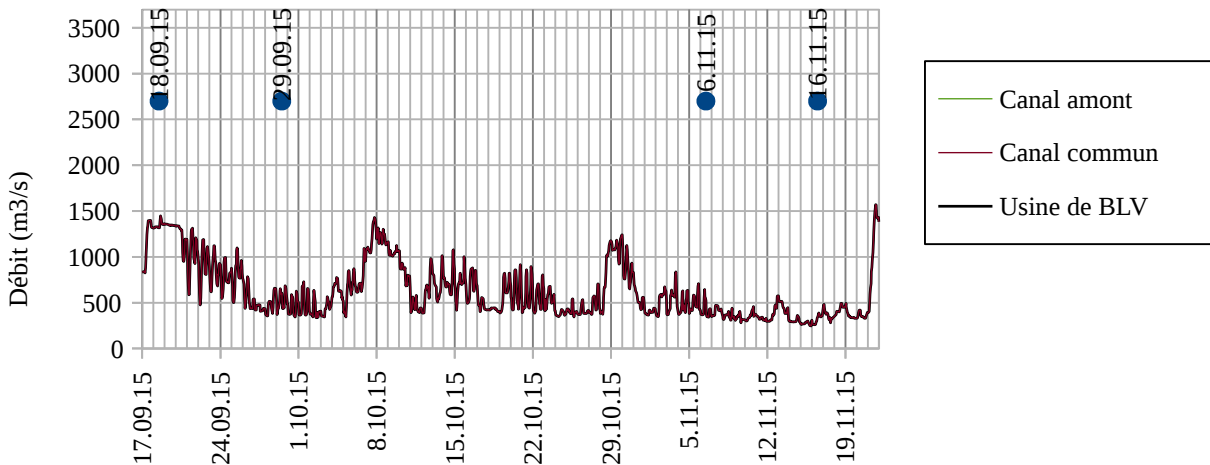


Figure 33: Hydrologie du canal d'amenée et dates des mesures bathymétriques

Durant cette période, les dépôts à la confluence poursuivent leur déplacement vers l'aval mais de manière peu prononcée. Cela montre que les pics de débits n'ont pas été suffisants pour modifier significativement les dépôts.

Au 06/11, 34 % du dépôt au profil 101.8 ont été évacués.

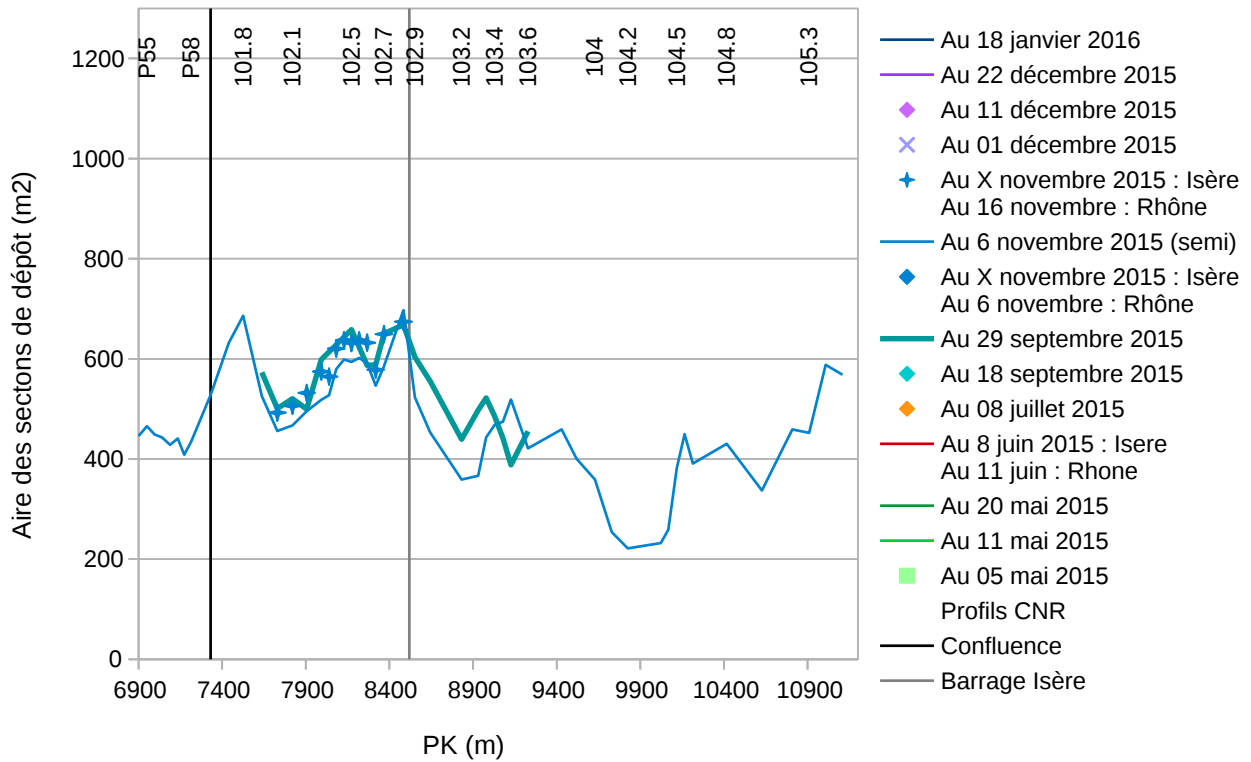


Figure 34: Aires des sections de dépôt du 29/09, 06/11 et 16/11/2015

Entre le 22/11 et le 03/12, nous observons des débits supérieurs à 1200 m³/s avec des pointes à 1500 m³/s (figure 35). Puis les débits restent relativement faibles (< 1000 m³/s) jusqu'au 03/01/2015.

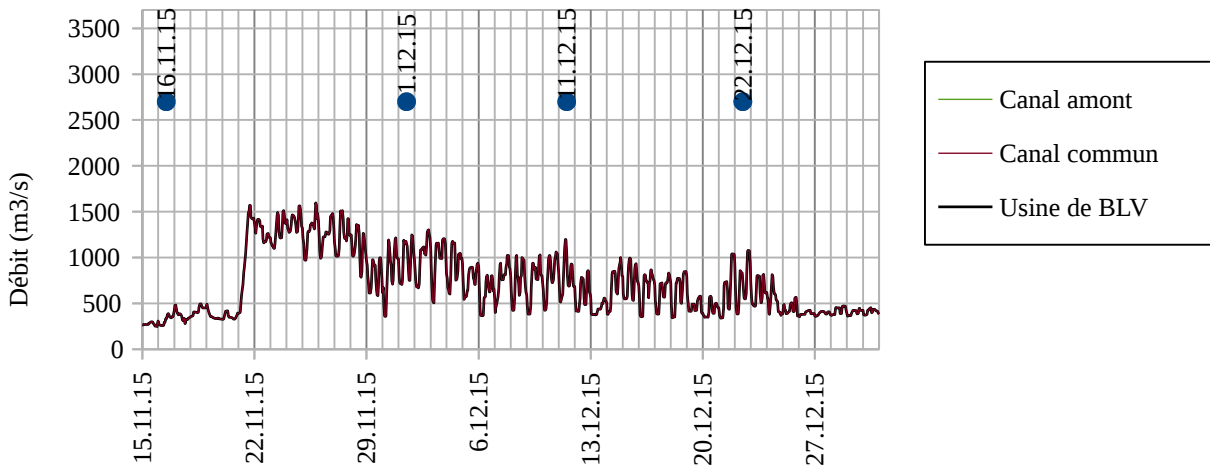


Figure 35: Hydrologie du canal d'amenée et dates des mesures bathymétriques

La confluence et le canal commun continue d'évacuer ses dépôts qui semblent se déposer à l'aval du PK104 (figure 36).

Au 01/12, 42 % du dépôt au profil 101.8 ont été évacués.

Du 01/12 au 22/12, la bathymétrie à la confluence n'évolue pas. Nous notons une érosion en amont du barrage Isère.

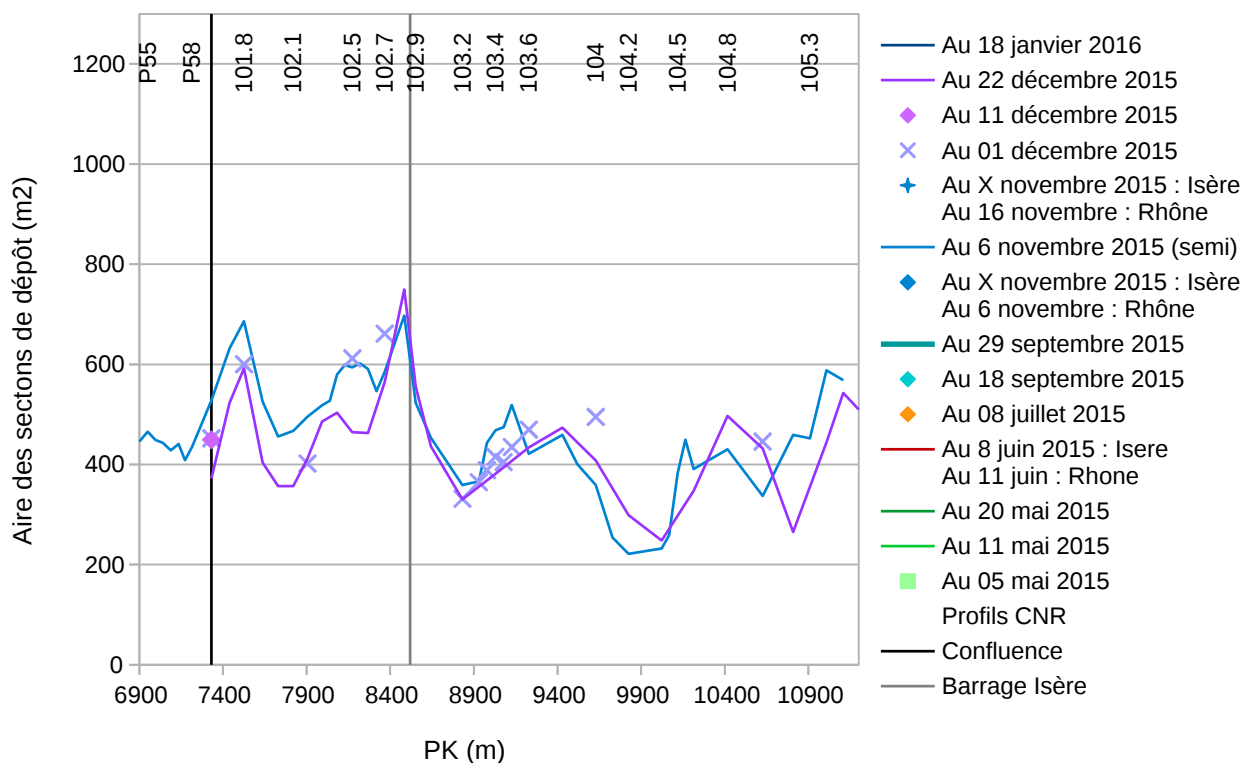


Figure 36: Aires des sections de dépôt du 16/11, 01/12, 11/12 et 22/12/2015

Entre le 22/12/15 et le 03/01/16, les débits restent faibles (< 500 m³/s). Au delà de cette date, ils augmentent fortement pour atteindre 1500 m³/s le 05/01/16 et 2000 m³/s le 08/01/16 (figure 37). Les débits ne redescendent sous les 1500 m³/s que le 20/01/16. Depuis la chasse, il s'agit donc de la plus longue période avec les plus forts débits.

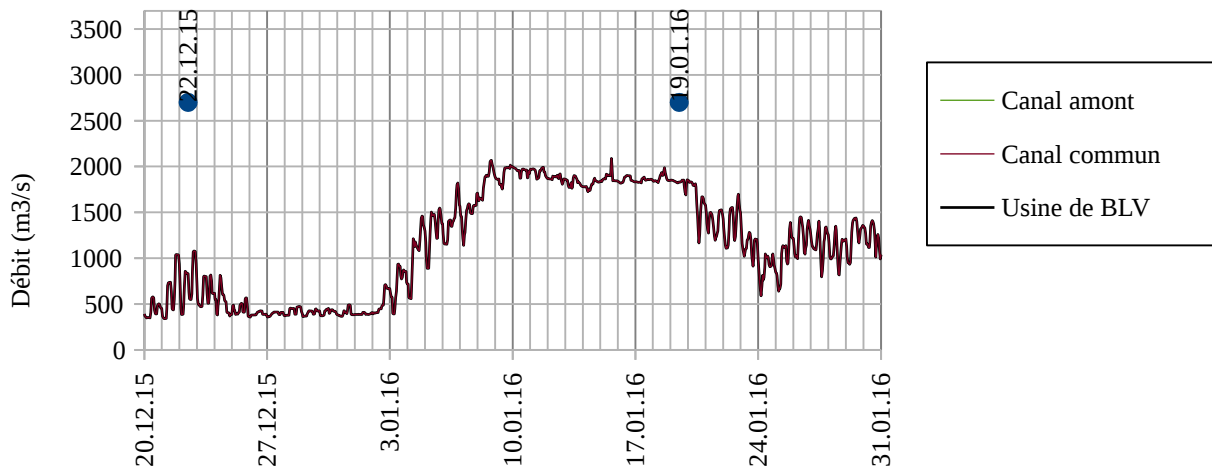


Figure 37: Hydrologie du canal d'amenée et dates des mesures bathymétriques

Durant cette période se produit une reprise importante des dépôts de la confluence (côté canal d'amenée du merlon central), du canal commun et du canal aval jusqu'au PK 104.2 (figure 38).

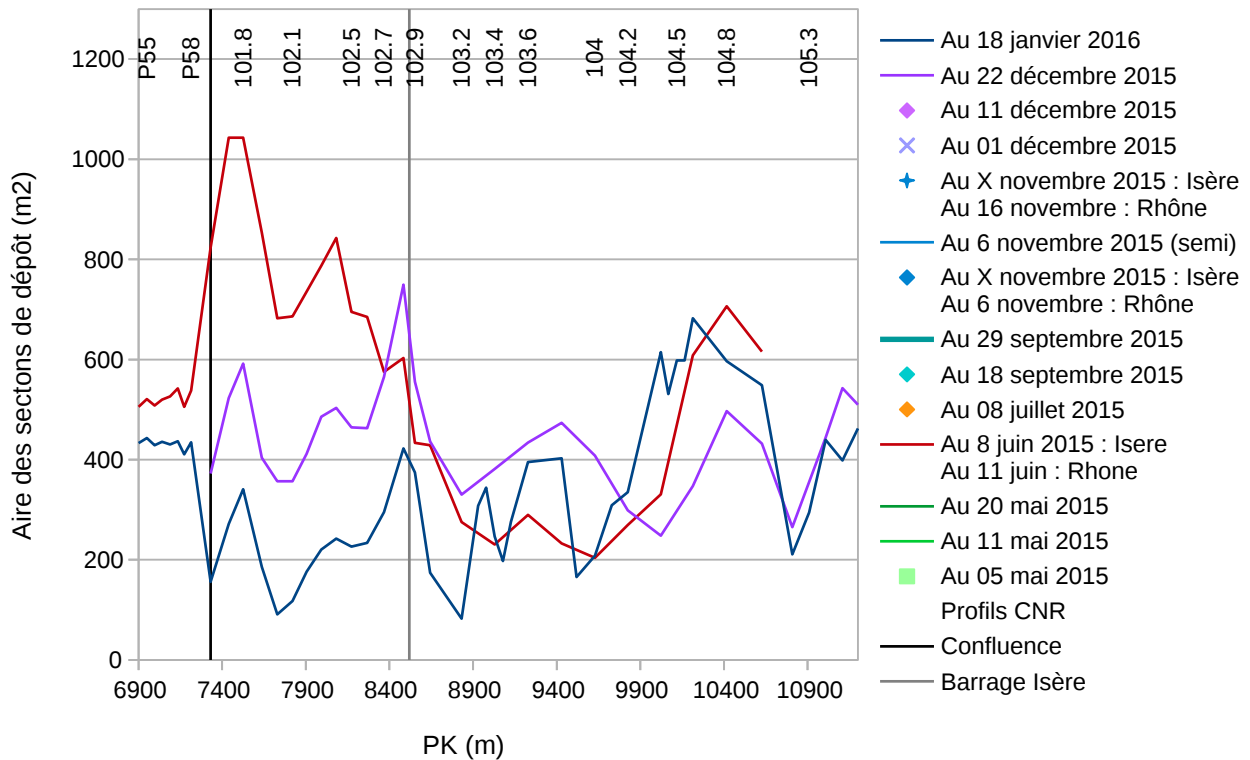


Figure 38: Aires des sections de dépôt du 11/06, 22/12/2015 et du 18/01/2016

Au 18/01/16, 67% du dépôt au profil 101.8 ont été évacués.
 A l'aval du PK104.2, les dépôts sont proches de ceux de juin 2015

L'analyse des bathymétrie montrent que pour que les dépôts évoluent de manière continue même pour les faibles débits. Cependant, pour observer une évolution significative, il faut que les débits du canal d'amenée dépassent les 1500 m³/s pendant plusieurs jours.

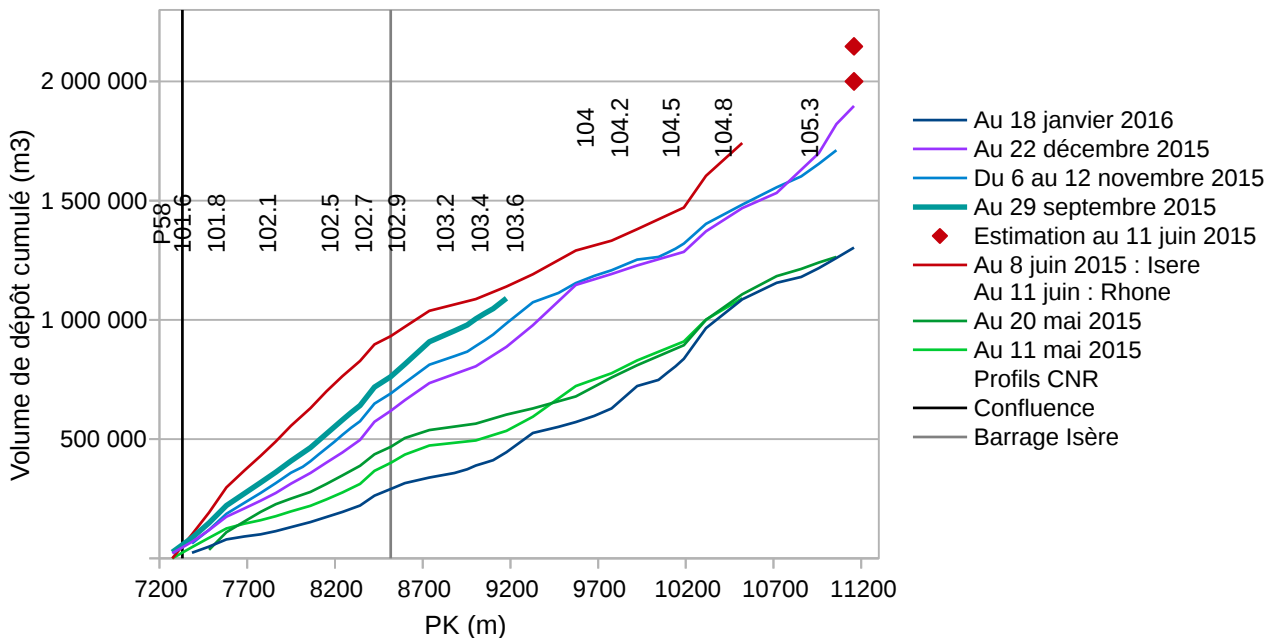


Figure 39: Volumes de dépôt cumulé dans le canal d'aménée

En termes de volume de dépôt, le volume cumulé dans le canal d'aménée est estimé à environ 2 000 000 m³. (Figure 39)

Au 11/05 et 20/05/2015, environ 65 % des volumes sont en place dans le canal d'aménée (calcul réalisé à partir du volume cumulé jusqu'au profil 105).

Au 29/09/2015, l'amont du canal d'aménée s'est vidé mais l'écart entre les courbes de volumes cumulés se réduit à partir du barrage Isère et semble rattraper celle de juin 2015 à partir du profil 103.5. Cela indique une vidange de la confluence au profit d'un remplissage du canal aval.

Entre le 06/11 et le 22/12, les matériaux érodés à l'amont restent dans le système et remplissent le canal aval. Le volume de sédiments présent dans le système évolue peu. Au total, le volume total présent dans le canal d'aménée n'a diminué que d'environ 5 % par rapport à juin 2015.

Au 18/01/2016, le volume de sédiments présents dans le canal d'aménée est équivalent aux volumes présents au 11/05 et 20/05/2015 mais la répartition est différente. L'amont s'est vidé au profit de l'aval. Par rapport au 11/06/2015, le volume total des dépôts a baissé de 35 %. La majorité des sédiments ont été évacués entre le 22/12/2015 et le 18/01/2016 (diminution de 30%).

Au 18/01/2016, il reste encore dans le canal d'aménée 1 300 000 m³ de sédiments.

Au niveau de l'hydrologie, les débits sur le canal commun entre la fin de la chasse (26/05/2015) et le 22/12/2015 sont en général compris entre 500 et 1000 m³/s mais nous observons 5 épisodes à plus de 1000 m³/s.

Les plus forts déplacements de sédiments ont eu lieu pour des débits dans le canal commun proche de 2000 m³/s.

3.6. Dragages réalisés dans les retenues à l'aval de la confluence

Dragages d'urgence chasses de l'Isère sur DRVA.

Les informations qui suivent sur l'avancement des chantiers en date du 14 mars 2016

3.6.1. Aménagement de Bourg les Valence.

Dragage du chenal de navigation en amont du barrage de l'Isère

Un volume de 70 000 m³ (volume définitif à confirmer) a été dragué du XXX au 08/01/2016 en amont du barrage Isère.

Dragage du garage amont de l'écluse.

Volume de dragage effectué au 12 février 170 000 m³ pour 170 000 m³ estimé.

Apport très important de matériaux (160 000 m³) suite au coup d'eau du Rhône de janvier.

Poursuite du dragage au niveau de ces apports entre l'amont du musoir de l'écluse en rive droite du garage d'écluse et le quai des Combeaux en rive gauche au PK 104.500

Le volume actualisé de dragage du garage amont est de 90 000 m³. Suite au coup d'eau de février, un volume important de matériaux a été repris par le fleuve pour transiter naturellement en aval de l'usine de B.V.

Dragage de la prise d'eau écluse (R.D écluse, R.G usine CNR)

Engagement des dragages le 11 juillet. Les travaux sont terminés depuis le 13 août. Volume de dragage final 55 000 m³ pour 70 000 m³ estimé.

Reprise du dragage de la prise d'eau écluse suite au blocage de l'écluse (vanne de remplissage VR2 inopérante pour cause d'envasement du pertuis et du blocage de la vanne en position fermée.)

Dragage partiel à partir du 17 février jusqu'au 26 février pour un volume de 16 000 m³.

Dragage du garage aval d'écluse.

Dragage terminé le 7 janvier pour un volume de 20 à 25 000 m³ en cours d'évaluation finale

Problème d'apport de matériaux supplémentaires en provenance de l'amont

Dragage du garage aval à reprendre à la suite du garage amont en cours (engagement du chenal navigable en R.G aval) pour un volume estimé de 30 000 m³

3.6.2. Aménagement de Beauchastel.

Dragage du garage aval d'écluse.

Engagement des travaux à partir du 29 février pour un volume estimé de 17 000 m³.

Suite aux analyses la qualité des matériaux est bonne.

Contrôles de la qualité de l'eau en phase chantier selon les modalités usuelles.

3.6.3. Aménagement de Baix le Logis Neuf

Dragage du garage aval d'écluse.

Reprise du dragage depuis le 18 janvier fin des travaux vers le 19 février. Volume de dragage effectué au 12 février 22 000 m³ pour 25 000 m³ estimé

Fin du dragage du garage aval le 25 février pour un volume de 25 000 m³, volume définitif à finaliser.

3.6.4. Aménagement de Montélimar

Dragage du garage amont d'écluse.

Travaux terminés depuis le 16 octobre .Volume de dragage effectué 170 000 m³ pour 180 000 m³ estimé.

Dragage du garage aval d'écluse.

Travaux terminés depuis le 23 novembre .Volume de dragage effectué 16 000 m³.

3.7. Evolution du volume total de dépôt

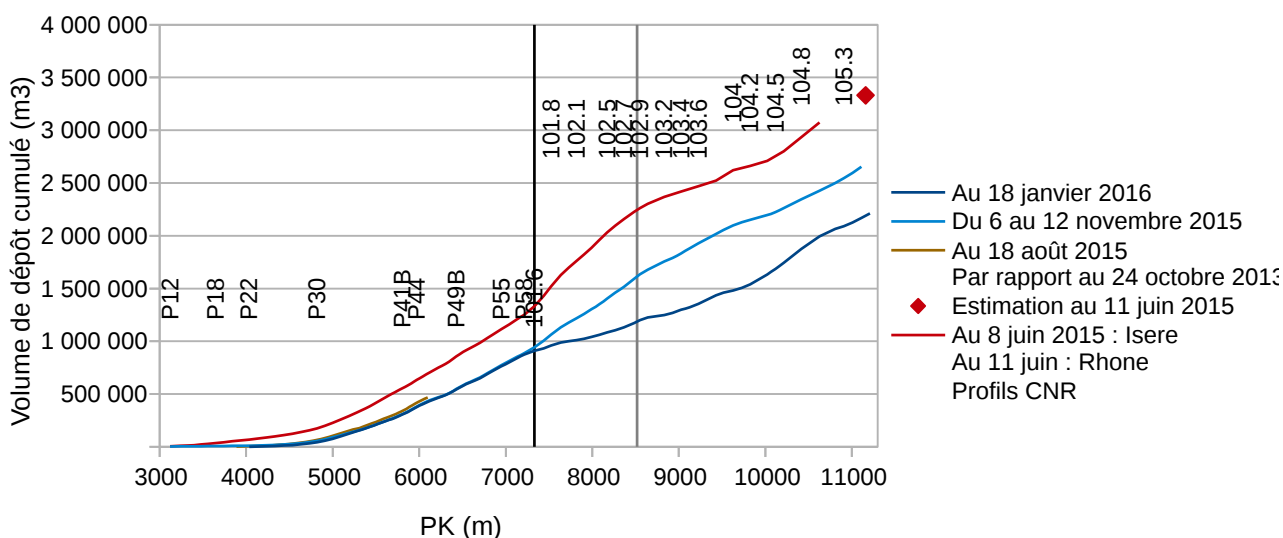


Figure 40: Volumés de dépôt cumulés dans l'Isère et le canal d'aménée

Sur l'ensemble du système, environ 3 300 000 m³ de sédiments se sont déposés au 11 juin 2015 (soit environ 5 000 000 tonnes). (Figure 40).

Le 6 novembre 2015, environ 630 000 m³ ont été évacués depuis juin 2015 (20%, 950 000 tonnes).

Le 18 janvier 2016, environ 1 120 000 m³ ont été évacués depuis juin 2015 (35%, 1 700 000 tonnes).

4. SYNTHÈSE DES DONNÉES DE FLUX SÉDIMENTAIRE LORS DE LA CRUE/CHASSE DE MAI 2015 ET ANALYSES COMPLÉMENTAIRES

La plupart des résultats fournis ci-après sont détaillés dans Naudet et al, 2016.

Les mesures ponctuelles suivantes (autres que les levés bathymétriques) ont été réalisées :

04/05/2015 et 05/05/2015 :

- mesures de transport par suspension à différentes profondeurs et en différents endroits entre la confluence et l'usine de Bourg-lès-Valence (concentration et granulométrie) à l'aide d'une bouteille Ninskin
- mesures ADCP (jaugeage et suivi de fond mobile)

07/05/2015 :

- mesures de transport par charriage à l'aide d'un helley-smith au droit de la station de jaugeage de la CNR (débit solide et granulométrie)

18/06/2015 :

- mesures de transport par charriage à l'aide d'un helley-smith au droit de la station de jaugeage de la CNR (débit solide et granulométrie)
- prélèvements et analyses granulométriques au sein des dépôts de la confluence et du canal commun par la CNR

EDF a également réalisé des suivis de turbidité en continue sur les différentes stations de l'Isère. Cependant, les prélèvements servant à la calibration de la relation turbidité/MES n'ayant pas été conservés, aucune mesure granulométrique n'a pu être réalisée.

La Figure 41 précise la date de réalisation des différentes mesures ainsi que l'hydrologie associée.

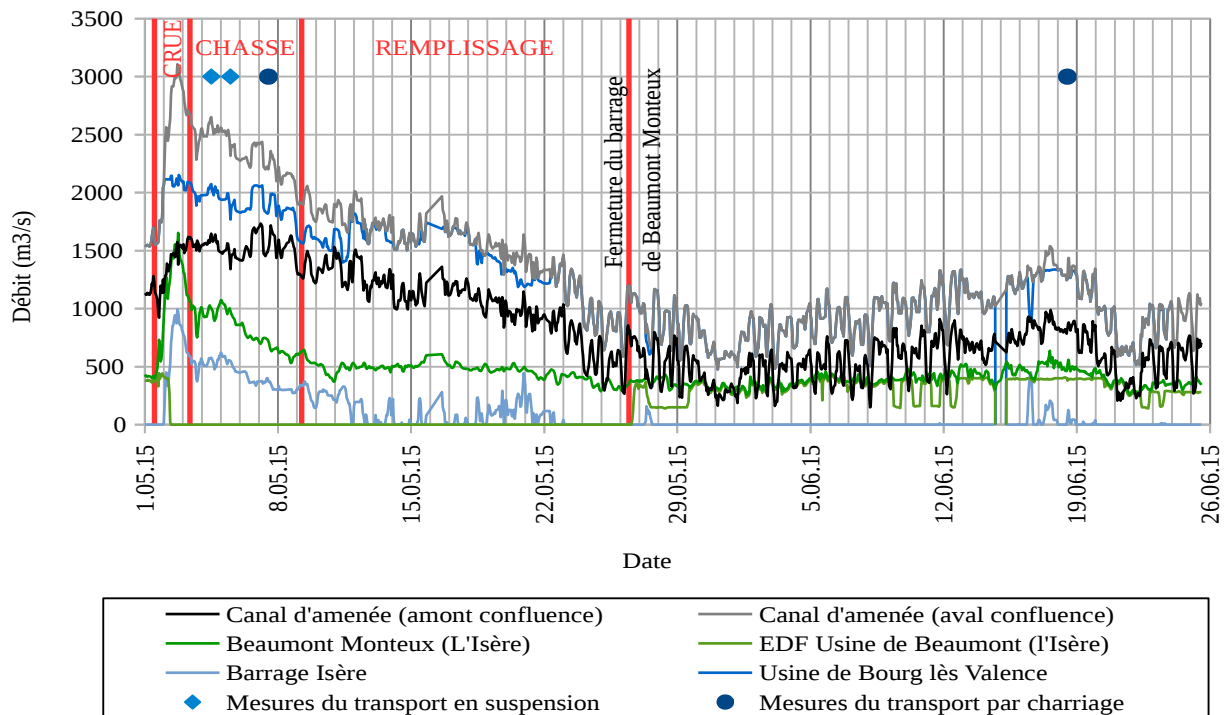


Figure 41: Débits mesurés le long de l'Isère et du Rhône lors des campagnes de mesure de mai-juin 2015.

4.1. Synthèse des mesures de MES réalisées en 2015 aux stations hydro-sédimentaires de la basse Isère

La turbidité de l'eau provenant de l'Isère est acquise au pas de temps horaire à la station de Beaumont-Montoux (EDF). La relation MES/Turbidité a été établie sur l'épisode de la chasse via des prélèvements d'eau (filtration, séchage et pesée des échantillons) :

$$\text{Taux de MES} = 1,89 * \text{Turbidité}$$

Les données permettant le calage de la relation Turbidité/CMES ont été uniquement récoltées pendant la période de chasse. Les données de turbidité sont donc disponibles du 15/04/2015 au 03/05/2015 mais la relation de MES/Turbidité n'est pas connue. En effet, cette relation est certainement supérieure à la relation classique du fait de l'abaissement de 2 retenues de la Basse-Isère en cours et de la crue, mais inférieure à la relation en chasse car le barrage de Beaumont-Montoux joue encore le rôle de décanteur.

En résumé, si les données pendant la chasse sont fiables, ce n'est peut-être pas le cas pour la période de crue. La figure 42 utilise les données fournies par EDF. Les valeurs pendant la crue sont données à titre indicatif et sont susceptibles d'évoluer.

Une mesure de concentration en surface a été réalisée au seau au pont de Beaumont-Montoux le 04/06/2015 à 18h45. La concentration mesurée est de 8,2 g/l. La mesure réalisée par EDF à la même heure à la station de Beaumont-Montoux indique une concentration de 17,7 g/l. Cela montre la forte hétérogénéité des mesures.

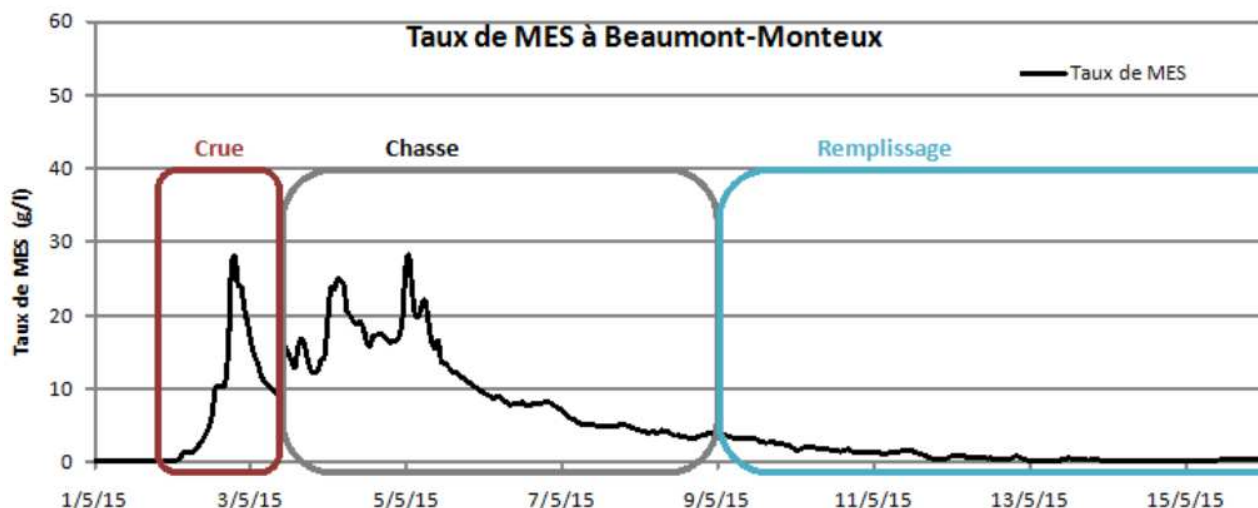


Figure 42: Evolution du taux de MES à la station de Beaumont-Monteux (source EDF)

Le tableau 2 indique les flux de MES en tonnes mesurés par EDF à ses différentes stations de mesures (source : rapport technique Synthèse du suivi environnemental de la chasse de la basse-Isère du 3 au 26 mai 2015 de septembre 2015).

| | Tullins | Pont des Fauries | Beaumont-Monteux | Roche de Glun | Valence |
|---|-----------|------------------|------------------|---------------|-----------|
| 01/05/2015– 03/05/2015 Crue | 1 400 000 | 2 100 000 | 3 100 000 | - | - |
| 03/05/2015 – 09/05/2015 Phase de chasse | 865 000 | 3 600 000 | 4 900 000 | 405 000 | 3 600 000 |
| 09/05/2015 – 22/05/2015 Phase de remplissage | 85 000 | 160 000 | 400 000 | 120 000 | 300 000 |
| TOTAL | 2 350 000 | 5 860 000 | 8 400 000 | 525 000 | 3 900 000 |

Tableau 2: Flux de MES en tonnes mesurés par EDF (source: EDF)

Il est de plus précisé que « ces chiffres reflètent des ordres de grandeur pertinent, mais restent des estimations car :

- des incertitudes subsistent sur les données de MES (représentativité des points de mesure par exemple, relation MES/turbidité) et de débit,
- les sédiments grossiers ne sont pas pris en compte,
- les sables peuvent être pris en compte de manière différente sur les trois points de mesure, la part de sable en suspension, donc mesurée par les turbidimètres peut être différente du fait des écoulements différents, des positions des turbidimètres...

Ainsi il n'est pas possible de calculer un différentiel de flux de MES entre Valence et Beaumont-Monteux, les échantillons de MES réalisés sur l'Isère incluant une part de sable plus importante dans l'Isère que ceux prélevés sur le Rhône car les points de mesures étaient de configuration différente de même que les conditions hydrauliques des deux cours d'eau. »

« [...] le flux de MES en entrée de chaîne (Tullins) mesuré sur l'ensemble de l'événement (crue + chasse) est de 2.4 Mt. Il est de plus de 8.4 Mt à Beaumont, soit un solde de 6 Mt (1,7 Mt pendant la crue et 4,4 Mt pendant les phases de chasse et de remplissage).

Ces chiffres doivent être pris comme des ordres de grandeur étant données les imprécisions de mesure. »

4.2. Comparaison des volumes chassés et des volumes déposés

Dans les calculs qui suivent la masse volumique des dépôts est prise égale à 1600 kg/m³.

| Site | Type de sédiments | Mesure / Modèle | Volume (M m ³) | Masse (M tonnes) | Incertitudes (M tonnes) |
|---------------------------------------|-------------------|--|----------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Flux entrants amont | Limons | Station hydro-sédimentaire (Tullins) | | $M_{MES_Tullins} = 2,4$ | 0,5 (20%) |
| Barrages Basse-Isère | Sables + limons | Evolution bathymétrique barrages | 4,8 | $M_{retenues} = 7,5$ | 2,5 (30%) |
| Flux sortant aval | Limons | Station hydro-sédimentaire (BM) | | $M_{MES_BM} = 7,6$ | 1,5 (20%) |
| | Sables | Modèle sable (BM) | | $M_{Sable_modèle} = 4,8$ | |
| Dépôts aval (Isère et canal d'amenée) | Sables | Evolution bathymétrique confluence-Rhône | 3,3 | $M_{Dépôts} = 5,3$ | 1,0 (20%) |

La masse de sédiments fin en provenance des barrages est ainsi d'environ 5 Mt ($=M_{MES_BM} - M_{MES_Tullins}$) et l'apport en sable d'environ 5 Mt ($=M_{Sable_modèle}$ ou $M_{dépôts}$), soit un total de 10Mt.

Cette valeur est supérieure à celle issue des évolutions bathymétriques des barrages, ce qui signifie que la porosité a été surestimée.

4.3. Synthèse des mesures et de l'analyse du transport sédimentaire entre la station de Beaumont Montoux et l'usine de Bourg-lès-Valence

4.3.1. Basse Isère (hors confluence)

Il n'a pas été possible de naviguer pendant l'épisode de chasse / crue.

Les mesures de transport par charriage réalisées au droit de la traille CNR le 07/05/2015 (profil CNR P2) ont permis d'estimer le transport solide par charriage à environ 29 kg/s. Les matériaux charriés présentaient un d_{50} de 0.2 mm. Très peu de matériaux plus grossiers ont été prélevés. Cette valeur ne permet pas de retrouver les volumes déposés pendant l'événement.

En revanche, le 18/06/2015, soit après la fermeture de Beaumont-Montoux, le débit solide était compris entre 3 et 9 kg/s et les matériaux charriés étaient beaucoup plus grossiers (d_{50} entre 0,3 et

11 mm). Les mesures ADCP réalisées en parallèle le matin ont détecté un fond peu mobile (valeurs de vitesses du fond comprises entre 0,05 et 0,15 m/s). Les variations de débits liquides pendant la mesure permettent d'estimer que le débit de mise en mouvement des particules est proche de 500 m³/s.

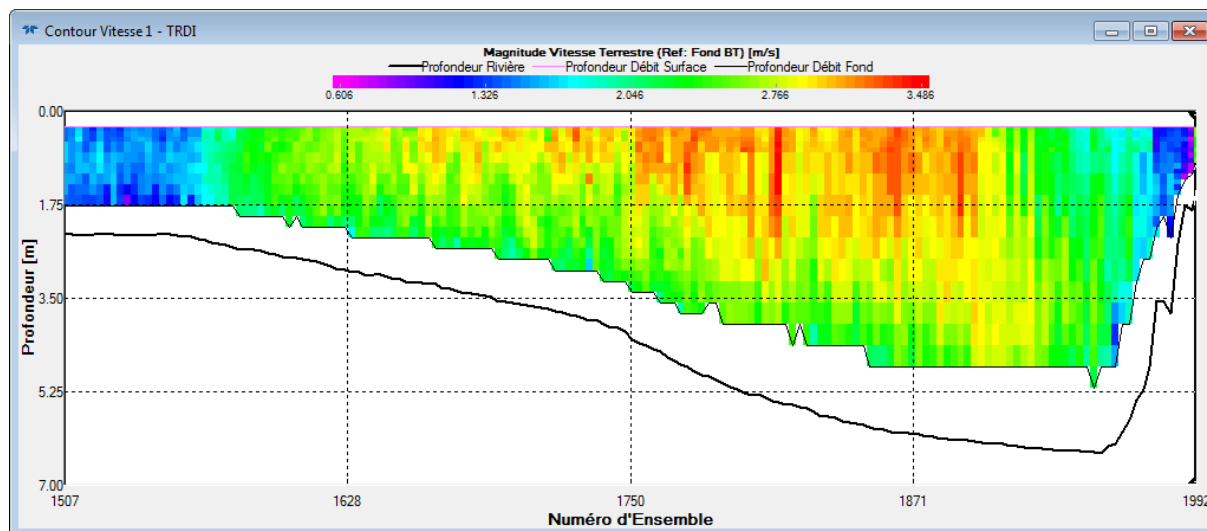
Les mesures ADCP réalisées lors de la crue du 19/06/2013 (débit de l'Isère d'environ 1000 m³/s) ne suivaient pas le fond et n'apportent donc pas d'information supplémentaires quant au transport par charriage.

L'analyse de la rétrodiffusion mesurée par les ADCP (Basse fréquence, 600 kHz ou moins) peut permettre de déterminer la présence de sable dans la section car on peut alors négliger la rétrodiffusion par les fines. Cependant pour tester des relations entre la concentration en sable, sa granulométrie et la rétrodiffusion il faut des échantillons d'eau et de sédiment obtenus en même temps que la mesure ADCP. Ces méthodes sont encore expérimentales mais peuvent permettre d'améliorer l'estimation du flux en guidant l'intégration spatiale des concentrations sur la section. L'analyse des processus complexes qui expliquent le signal acoustique enregistré font l'objet de la thèse d'Adrien Vergne (Irstea/CNR, 2015-2018).

Il y a actuellement plusieurs processus pouvant expliquer les contrastes observés sur la rétrodiffusion enregistrées par l'ADCP dans les sections :

- L'atténuation par les particules selon leur taille et nombre (concentration)
- Les variations de température dans la rivière, faisant varier l'atténuation par l'eau
- La présence de micro-bulles d'air

On ne peut donc pas quantifier actuellement la concentration en sable ou en sédiment par la seule analyse acoustique de données ADCP mono-fréquence. Il est nécessaire de croiser ces données avec des analyses d'échantillons liquides de la section explorée et des hypothèses complémentaires sur les transducteurs, le milieu, les particules et les micro-bulles.



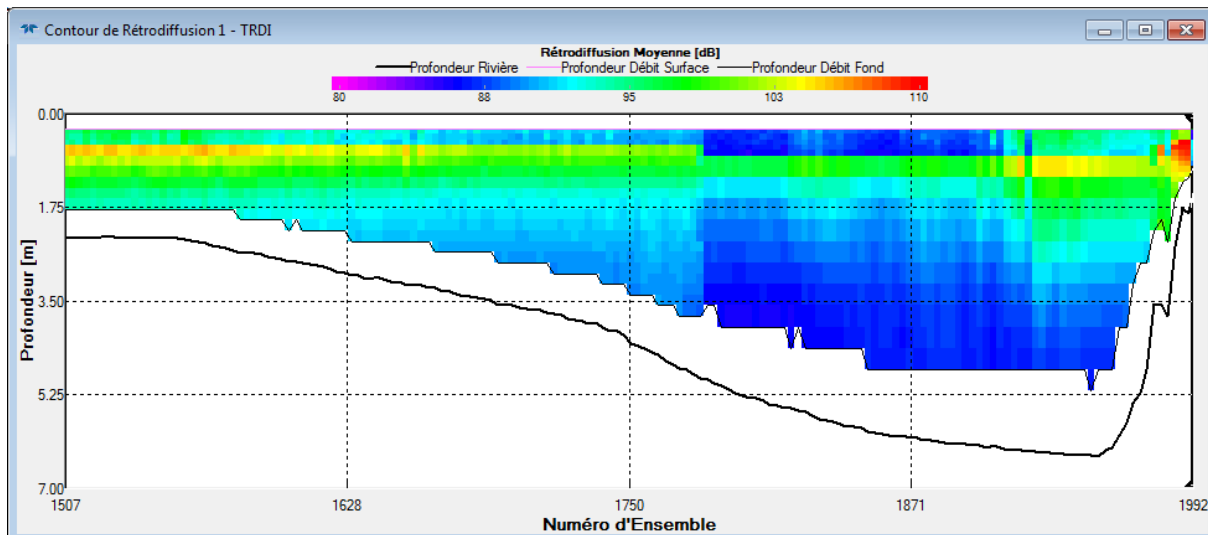


Figure 44: Données ADCP 600 kHz du 19 juin 2013 sur l'Isère à Beaumont Montoux - Profil de rétrodiffusion

EDF note dans son rapport technique qu' « il a été constaté à l'aval de Beaumont-Montoux, un dépôt important de galets » dans le tronçon en débit réservé de Beaumont Montoux en amont de la station. Lors des mesures du 07/05/2015, ces matériaux grossiers étaient soit « recouverts » sous le sable en mouvement, soit non encore arrivés à la station de mesure en quantité suffisante.

Le très faible transport solide du 18/06/2015 et la granulométrie correspondante montrent que les sables ont été évacués vers l'aval. Cela est cohérent avec les relevés bathymétriques qui indiquent un début de vidange à l'amont et un maximum des dépôts autour de cette date à la confluence.

4.3.2. Confluence

Les prélèvements à l'aide de la bouteille Ninskin au droit de la confluence réalisée les 4 et 5 mai 2015 ont permis de proposer une distribution spatiale des concentrations au droit de la confluence au moment des mesures sur le transect T004 (Profil CNR 57B)(Figure 45). Une certaine cohérence des mesures peut être observée avec des concentrations aux environs de 5 g/l en surface augmentant jusqu'à près de 20 g/l près du fond. Il faut bien noter que ces mesures correspondent à des concentrations totales incluant sables et fines (limons, argiles). Les mesures réalisées par EDF à Beaumont-Montoux indique des concentrations d'environ 17 g/l le 04/05 et de 12 g/l le 05/15/2015. Cela tendrait à montrer un début de sédimentation à la confluence.

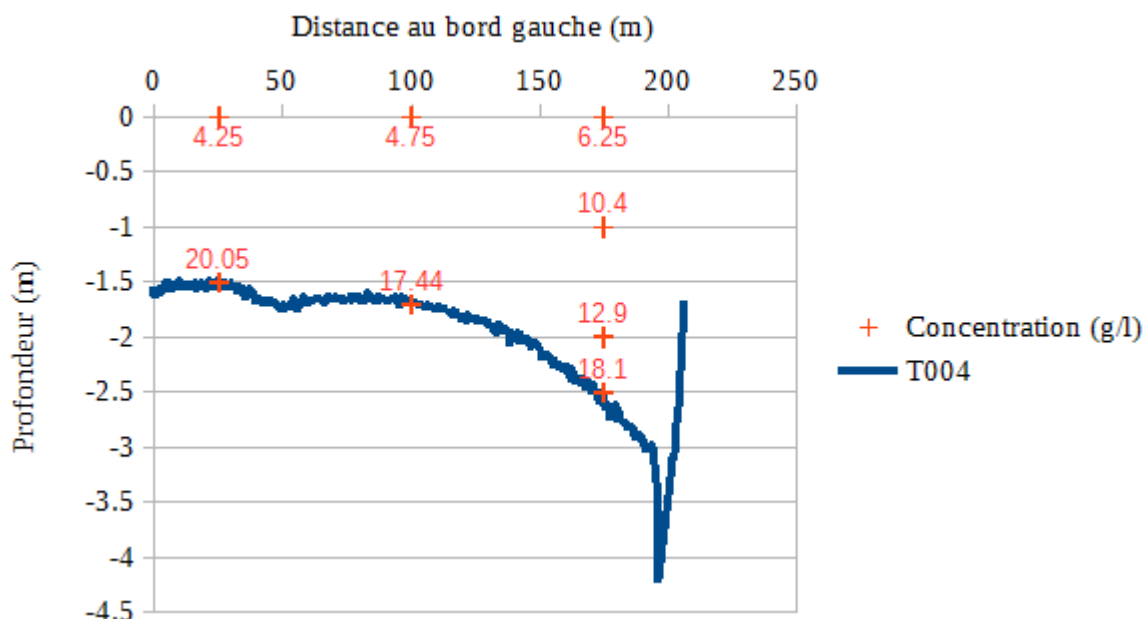


Figure 45: Estimation des concentrations en fonction de la profondeur et de la verticale de mesure au-dessus du transect de mesure T004 (Profil CNR 57B)

La Figure 46 présente les vitesses mesurées par ADCP le 4 mai 2015. On s'aperçoit que les vitesses restent concentrées au centre de la section et pas nécessairement en rive droite là où les profondeurs les plus élevées sont observées.

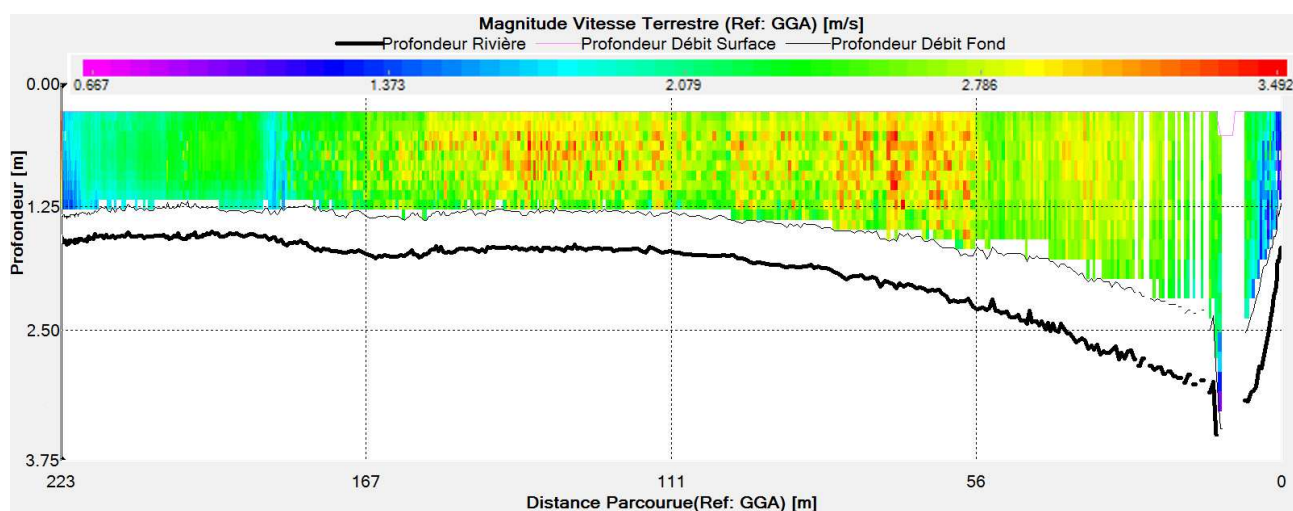


Figure 46: Vitesses mesurées par l'ADCP le 4 avril 2015 en amont du transect T004 (Isère).

L'analyse des fonds mobiles tend à confirmer que le transport au fond est relativement homogène sur la section avec des vitesses au voisinage de 1,5 m/s (figure 47). Cette valeur est cependant à prendre avec beaucoup de précautions. En effet, il est difficile de déterminer si la couche suivie est réellement représentative du transport par charriage. L'épaisseur de la couche de particules qui renvoient l'écho des impulsions de bottom-track de l'ADCP est difficile à estimer et elle décroît avec la fréquence de l'ADCP (épaisseur plus faible avec un 600kHz qu'avec un 1200kHz). Elle peut ainsi englober des sédiments du fond immobiles, ainsi que des particules en suspension très concentrées au dessus du fond.

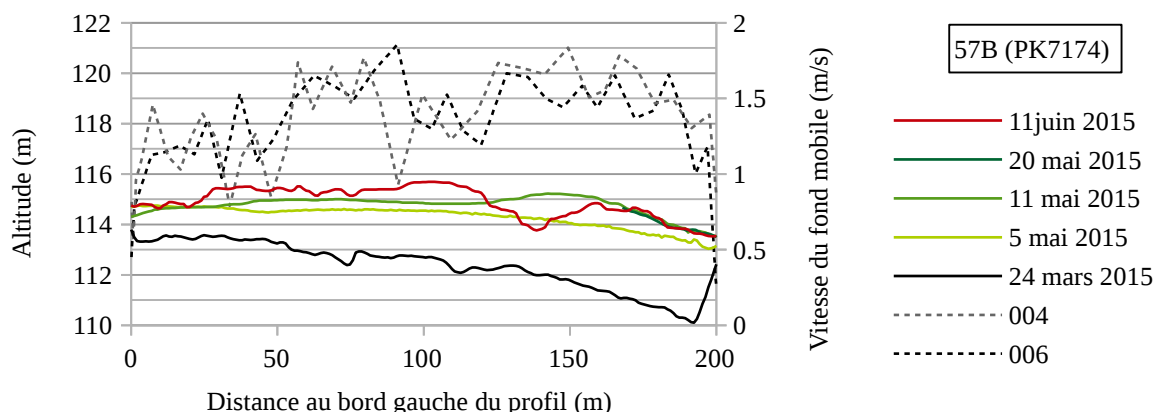


Figure 47: Évolutions bathymétriques du profil 57B (traits pleins) et vitesses du fond mobile mesurées par ADCP le 05/05/2015 (tirets)

Les caractéristiques granulométriques des matériaux prélevés par la CNR dans les dépôts de la confluence le 18/06/2015 sont :

| Profondeur (m) | d_{10} | d_{30} | d_{50} | d_{90} |
|----------------|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.6 |
| 3 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 60.6 |

Ces valeurs sont cohérentes avec celles relevées en 1998 et 2003 à la confluence (C.Migniot, 2004).

| Année | Profondeur (m) | d_{10} | d_{25} | d_{50} | d_{90} |
|-------|----------------|----------|----------|----------|----------|
| 1998 | 1 | 0.19 | 0.27 | 0.35 | 0.59 |
| 2003 | 1 | 0.16 | 0.23 | 0.32 | 0.49 |
| 1998 | 3-4 | 0.14 | 0.19 | 0.27 | 0.61 |
| 2003 | 3-4 | 0.13 | 0.19 | 0.27 | 0.48 |

Ces valeurs sont légèrement supérieures à celles déterminées lors des mesures de charriage du 07/05/2015 ($d_{50} = 0.2$ mm). Cela est cohérent avec les mesures de charriages du 18/06/2015 qui montre que la granulométrie des sédiments transportés augmentent avec le temps.

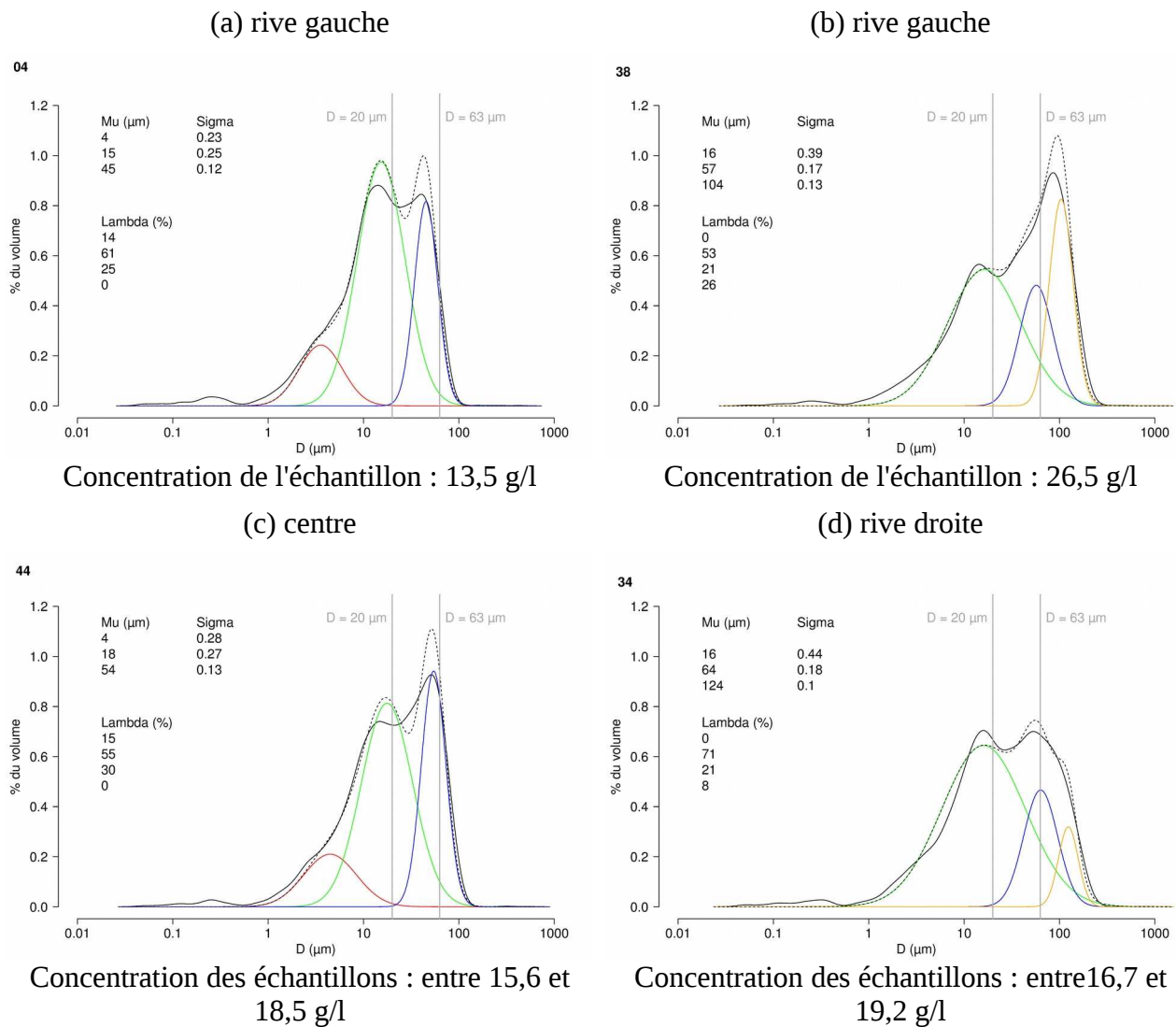


Figure 48: Comparaison des distributions granulométriques d'échantillons pris proche du fond sur l'Isère à la confluence en rive gauche (a et b), au centre (c) et en rive droite (d)

4.3.3. Chenal navigable

L'analyse des échantillons prélevés ont montré qu'à la confluence les eaux de l'Isère plongent sous les eaux du Rhône et que le mélange se fait principalement à partir du barrage Isère.

La Figure 49 montre que les concentrations en surface ne sont impactées par les eaux de l'Isère (plus chargées) qu'à l'aval du barrage Isère.

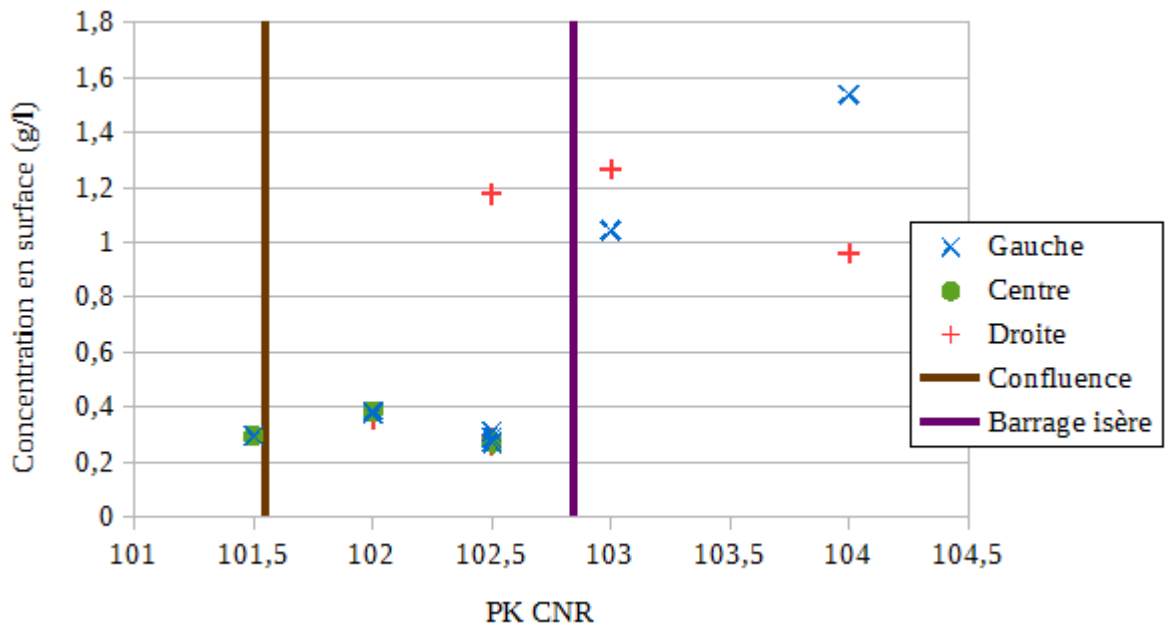


Figure 49: Concentration en surface le long du canal d'amenée

On retrouve cette distance de mélange en comparant les distributions granulométriques (Figure 50).

En effet, la distribution granulométrique des échantillons de surface prélevés sur le canal d'amenée en amont de la confluence est identique à celle retrouvée en amont immédiat du barrage Isère.

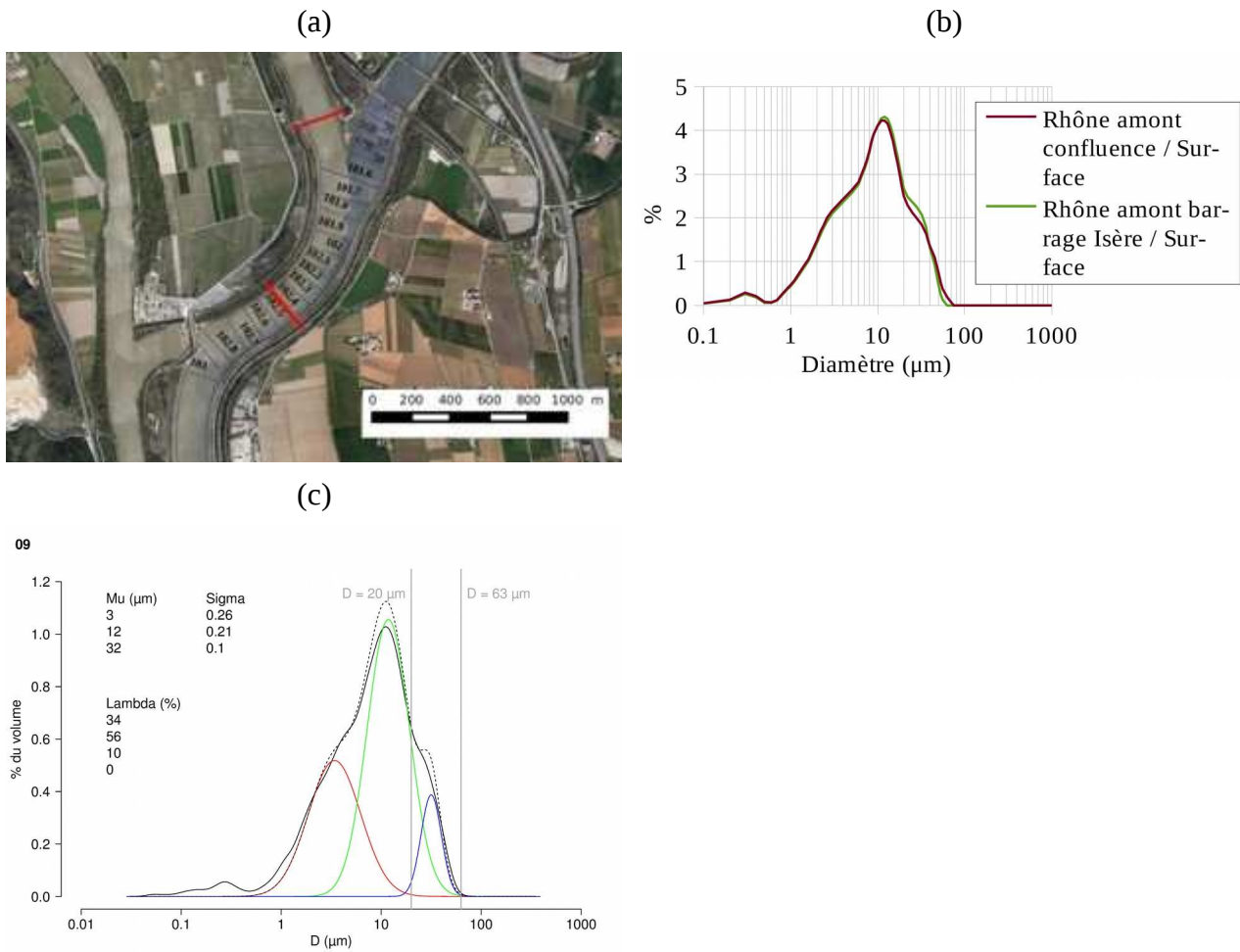


Figure 50: Comparaison des distributions granulométriques d'échantillons de surface pris sur le canal d'amenée en amont de la confluence et en amont du barrage Isère

En revanche, les prélèvements réalisés à 6 mètres de profondeurs en amont immédiat du barrage Isère sont très proches de ceux réalisés à la confluence proche du fond. La part de sable est néanmoins plus faible en amont du barrage Isère (Figure 51).

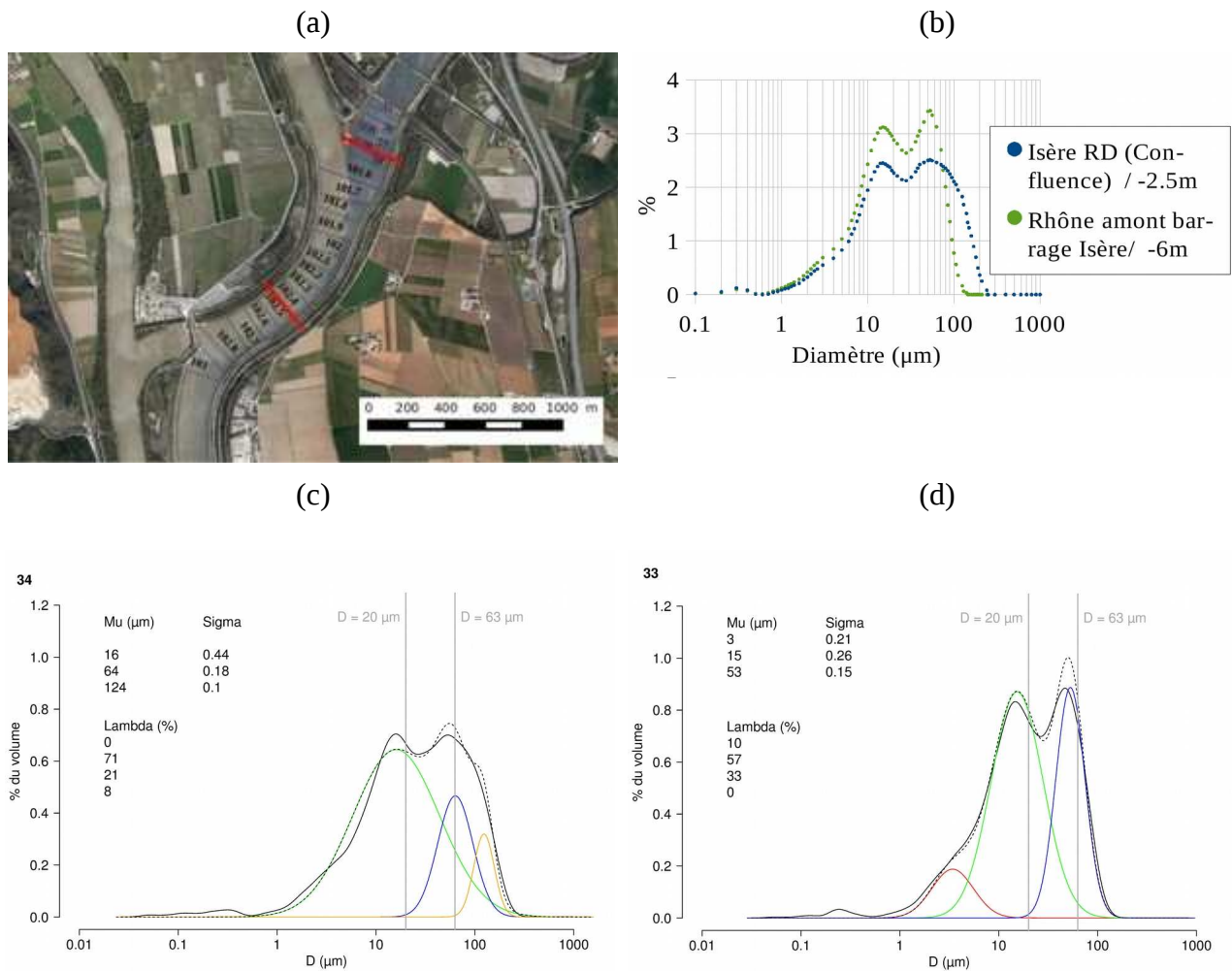


Figure 51: Comparaison des distributions granulométriques d'échantillons prélevés en rive droite à 2,5m de profondeur à la confluence (c) et à 6 m de profondeur en amont du barrage Isère (d)

A l'aval du barrage Isère, la granulométrie de surface se rapproche de celle de l'Isère en surface (Figure 52).

Synthèse des données de flux sédimentaire lors de la crue/chasse de mai 2015 et analyses complémentaires

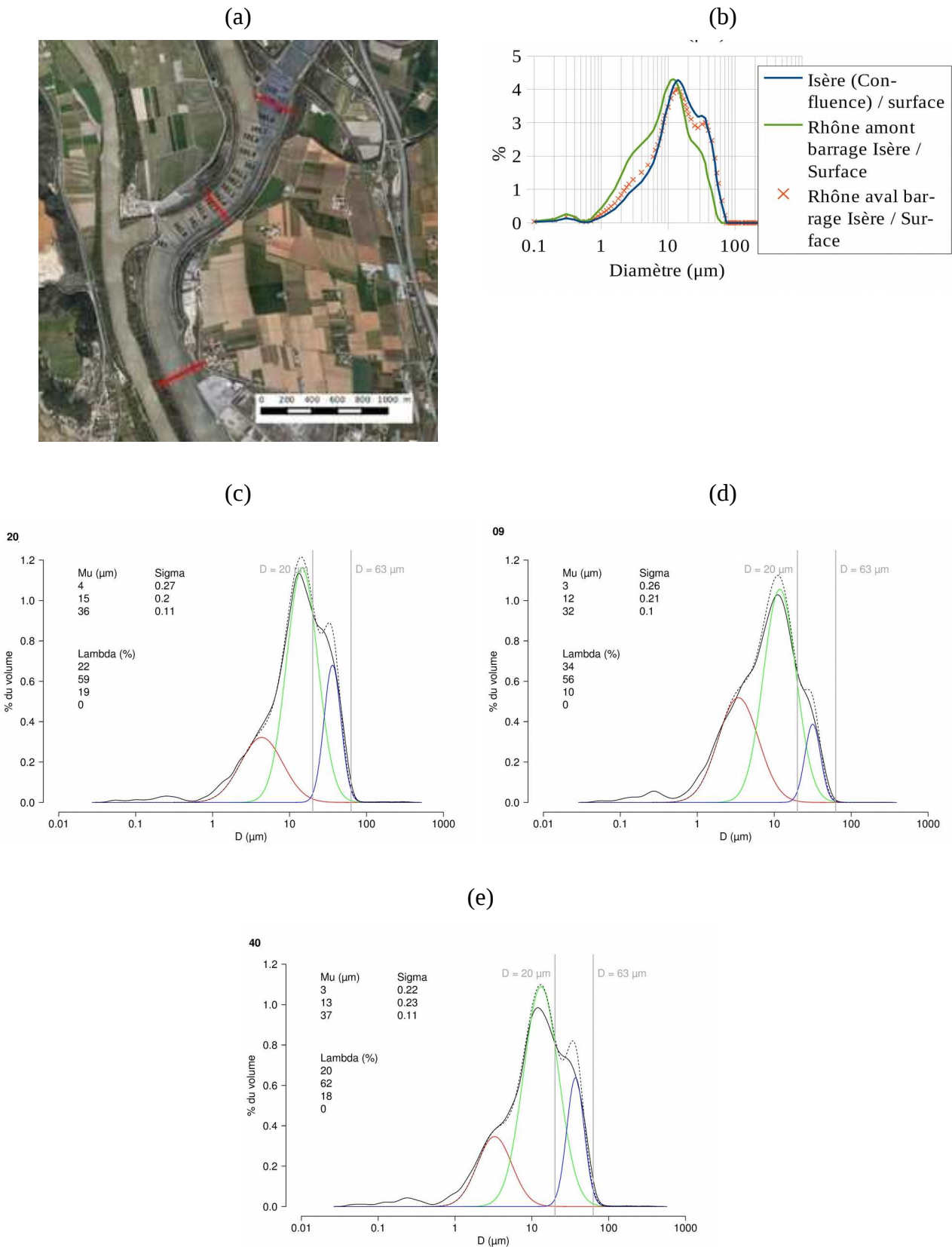


Figure 52: Comparaison des distributions granulométriques d'échantillons de surface pris sur l'Isère à la confluence (c) et sur le Rhône (amont (d) et aval (e) du barrage Isère)

Les écoulements sur la zone d'étude sont donc complexes et tridimensionnels.

Les mesures ADCP réalisées le 05/05/2015 au droit du profil 102.5 indiquent que le fond est mobile avec un transport légèrement plus fort en rive droite. Cette observation est cohérente avec les évolutions bathymétriques qui montrent des dépôts plus importants en rive droite.

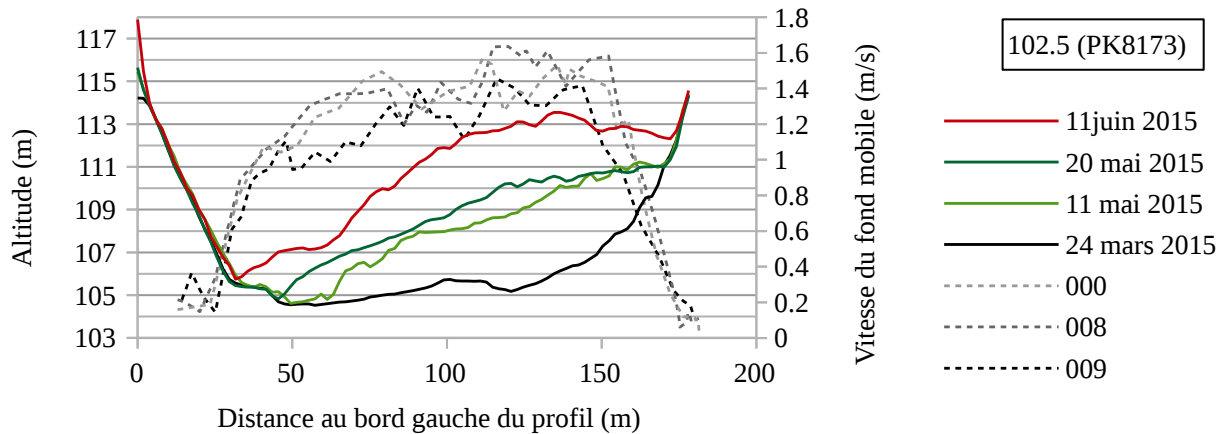


Figure 53: Évolutions bathymétriques du profil 102.5 (traits pleins) et vitesses du fond mobile mesurées par ADCP le 05/05/2015 (tirets)

Les analyses granulométriques réalisées par la CNR le 18/06/2015 ne montrent pas de modification de la granulométrie par rapport aux dépôts de l'Isère.

| PK CNR | Profondeur | d_{10} | d_{30} | d_{50} | d_{90} |
|---------------------|------------|----------|----------|----------|----------|
| 102.5 | 0 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.6 |
| 102.5 | 2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.5 |
| 102.5 | 3 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.6 |
| 102.4 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.9 |
| 102.4 | 3 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.5 |
| 102.3 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.5 |
| 102.3 | 3 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 |
| 102.2 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 1.9 |
| 102.2 | 2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.6 |
| 102.2 | 3 | 0.088 | 0.184 | 0.234 | 0.467 |
| 100.5 (Rhône amont) | 0 | 1.4 | 16.8 | 33.2 | 58.1 |

4.4. Estimation des flux de Sédiments en Suspension (MES) à la station de Beaumont-Monteux

Les modèles 1D et 2D ont pour conditions à la limite amont la station de Beaumont-Monteux en aval du dernier barrage de la chaîne de la Basse-Isère. Il est donc très important de bien estimer les conditions hydrauliques mais surtout sédimentaires au niveau de cette station. Un effort important doit être réalisé afin de distinguer les flux de MES (Matières en Suspension) incluant argiles et limons des flux de sables par charriage ou suspension. L'estimation des flux de sable (condition amont du modèle 2D) est effectuée au 4.5.

4.4.1. Débit liquide

La Figure 54 présente la chronique de débit à la station de Beaumont-Monteux pour l'événement du mois de mai 2015. Trois périodes peuvent être mises en évidence :

- La période de crue (du 1^{er} mai 13h30 au 3 mai 9h00) correspond à la crue naturelle de l'Isère où la retenue de Beaumont-Monteux reste fermée. La date du 3 mai 9h00 correspond au début de l'abaissement de la retenue. Il est à noter que l'aménagement de St Egrève était chassé dès la montée de crue (2 mai) afin de limiter les risques d'inondation de l'agglomération de Grenoble, les aménagements hydro-électriques de la Vanelle et Pizançon ont été effacés dès le pic de crue (2 mai au soir), celui de St Hilaire après celui de Beaumont-Monteux (4 mai).
- La période de chasse (du 3 mai 9h00 au 9 mai 6h00) correspond à la chasse des retenues avec l'ensemble des ouvrages effacés.
- La période de remplissage (du 9 mai 6h00 au 26 mai) correspond à la remontée une à une des retenues et le retour à un mode d'exploitation normal en commençant par l'aménagement de St Hilaire (10 mai), Beauvoir (11 mai), Pizançon (12 mai), la Vanelle (18 mai) et enfin Beaumont-Monteux (26 mai).

Il s'entend donc que le retenue de Beaumont-Monteux était effacée sur l'ensemble des périodes de chasse et de remplissage.

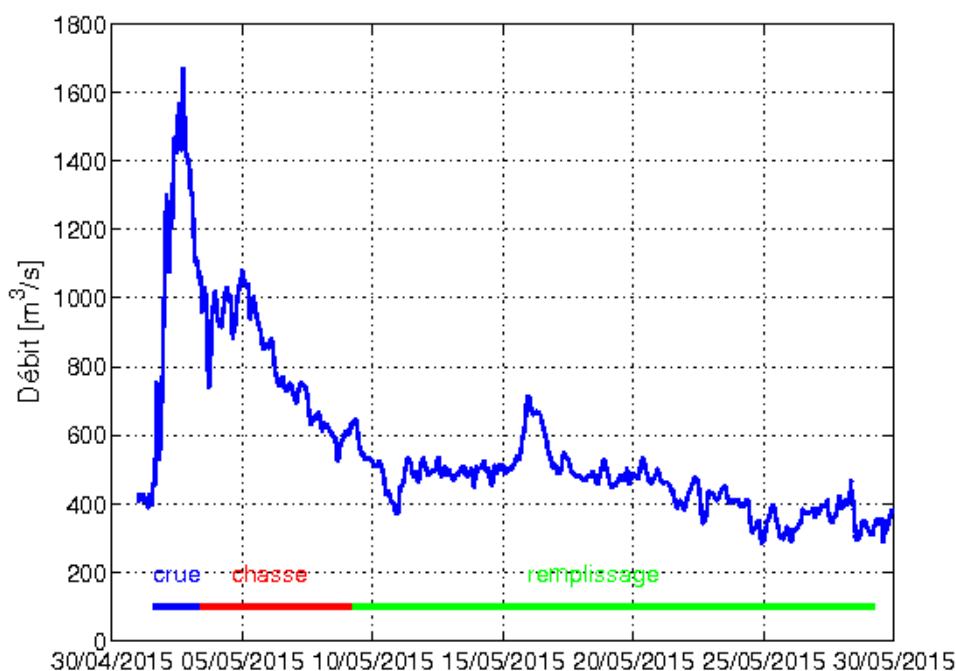


Figure 54: Chronique des débits à la station de Beaumont-Monteux au mois de mai 2015.

Le Tableau 3 indique les caractéristiques hydrauliques principales de ces différentes périodes. Il apparaît que si le remplissage dure 4 fois plus longtemps que la chasse qui elle-même dure 3 fois plus longtemps que la crue, les volumes d'eau ayant transité au cours de ces 3 périodes sont similaires (quelques centaines de millions de m³).

Tableau 3: Caractéristiques physiques des différentes périodes de la chasse de l'Isère de mai 2015.

| Période | Crue | Chasse | Remplissage |
|--|----------------|-----------|-------------|
| Durée | 1 j. 19h. 30mn | 5 j. 21h. | 20 j. |
| Q_{moyen} en [m ³ /s] | 1150 | 805 | 510 |
| Q_{max} en [m ³ /s] | 1670 | 1080 | 710 |
| V en [10 ⁶ m ³] | 180 | 410 | 475 |

4.4.2. Concentrations en MES

Les concentrations en MES sont évaluées de manière quasi continue à l'aide d'un turbidimètre placé à la station de Beaumont-Monteux (dans le mode TSS, soit en rétrodiffusion à 130°). Ce dernier est calé à partir de prélèvements réalisés à la même position que le turbidimètre avec un préleveur automatique selon l'équation :

$$C = a_T T \quad \text{Eq. 1}$$

avec a_T le coefficient de calage.

La correction du signal de turbidité est présentée sur la Figure 55. Quatre périodes ont été distinguées pour le calage afin de distinguer des périodes de concentrations à peu près homogènes (2 lors de la période de la chasse séparée au 6 mai 0h et 2 lors de la période de remplissage séparées au 12 mai 0h).

Les coefficients jugés les plus probants pour limiter les incertitudes sont donnés au Tableau 4. La valeur moyenne et l'écart type de la différence adimensionnée (i.e. $(C_{est} - C_{mes})/C_{mes}$) donne respectivement les valeurs 0.08 et 0.61. Il apparaît donc qu'une incertitude d'un facteur 1.6 existe sur l'estimation des concentrations avec le turbidimètre.

Tableau 4: Valeur de calage du turbidimètre à Beaumont-Monteux.

| Période | Crue 01/05-03/05 | Chasse (1) 03/05-06/05 | Chasse (2) 06/05-09/05 | Remplissage (1) 09/05-12/05 | Remplissage (2) 12/05-29/05 |
|-------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| a_T | 1.4 | 1.8 | 2.2 | 3.0 | 1.9 |
| $a_{T,min}$ | 0.9 | 1.1 | 1.4 | 1.5 | 1.0 |
| $a_{T,max}$ | 2.5 | 2.9 | 3.5 | 4.8 | 3.0 |

Ces valeurs du coefficient a_T sont étonnamment élevées par rapport aux valeurs usuelles observées en fonctionnement normal de la chaîne de barrages de la Basse-Isère où a_T varie entre 0.8 et 1.1. Cette variabilité peut être expliquée par la granulométrie (Thollet et al., 2013). Aucune mesure n'a été réalisée lors de la période de crue, ne permettant donc pas de calage direct. En première approximation, le coefficient moyen de 1.4 est utilisé pour la crue (voir discussion sur le calage du turbidimètre au paragraphe 4.4.3). Une très forte incertitude existe cependant sur ce coefficient ; une valeur $a_{T,max} = 2.5$ est ainsi proposée.

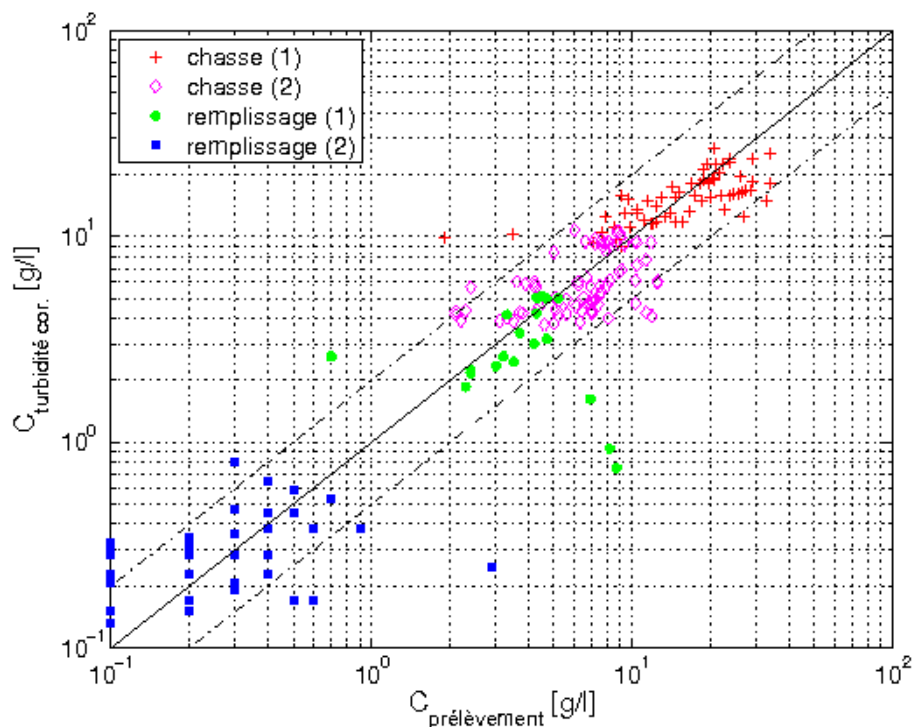


Figure 55: Comparaison entre la mesure de turbidité corrigée et les concentrations mesurées par prélèvement (la courbe en trait plein correspond à l'égalité $C_{\text{turbidité, cor}} = C_{\text{prélèvement}}$ alors que les courbes en trait mixte correspondent à $C_{\text{turbidité, cor}} = 0.5 C_{\text{prélèvement}}$ et $C_{\text{turbidité, cor}} = 2 C_{\text{prélèvement}}$, respectivement).

La Figure 56 présente la chronique de concentration à la station de Beaumont-Monteux avec la correction du signal de turbidité (coefficients a_T moyen). Les prélèvements indiquent que les concentrations ont dépassé 30 g/l au cours de deux pics lors de la période de chasse. Le turbidimètre indique qu'un pic au-delà de 30 g/l a aussi eu lieu lors de la période de crue.

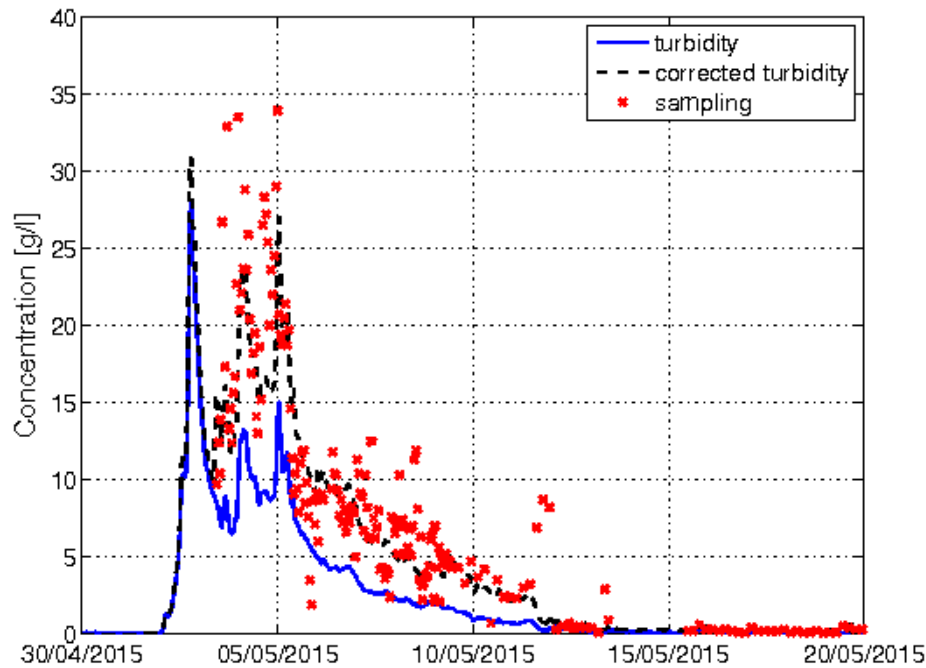


Figure 56: Chronique de concentration estimée au cours du mois de mai 2015 à Beaumont-Monteux à partir du signal de turbidité.

4.4.3. Discussion sur le calage du turbidimètre

Même si l'on observe une tendance linéaire assez nette entre la mesure de la turbidité et la concentration en MES, une forte variabilité du coefficient a_T peut être observée d'un événement à l'autre du fait de la potentielle variabilité de la composition de la suspension (Thollet, 2013; voir aussi Figure 57). Pour les faibles concentrations ($C < 1 \text{ g/l}$), il apparaît que le coefficient a_T est souvent supérieur à 1; ceci peut être expliqué par un comportement non linéaire de la relation turbidité-concentration pour le mode en rétrodiffusion à 130° . Par contre, pour tous les événements où les retenues sont en fonctionnement normal et le débit de l'Isère modéré (événement de lave torrentielle sur l'Arc ou sur la Haute Isère, crue d'un affluent comme l'Herbasse), le coefficient a_T est inférieur à 1 ou très légèrement supérieur à 1 (chasse de la retenue de St Egrève).

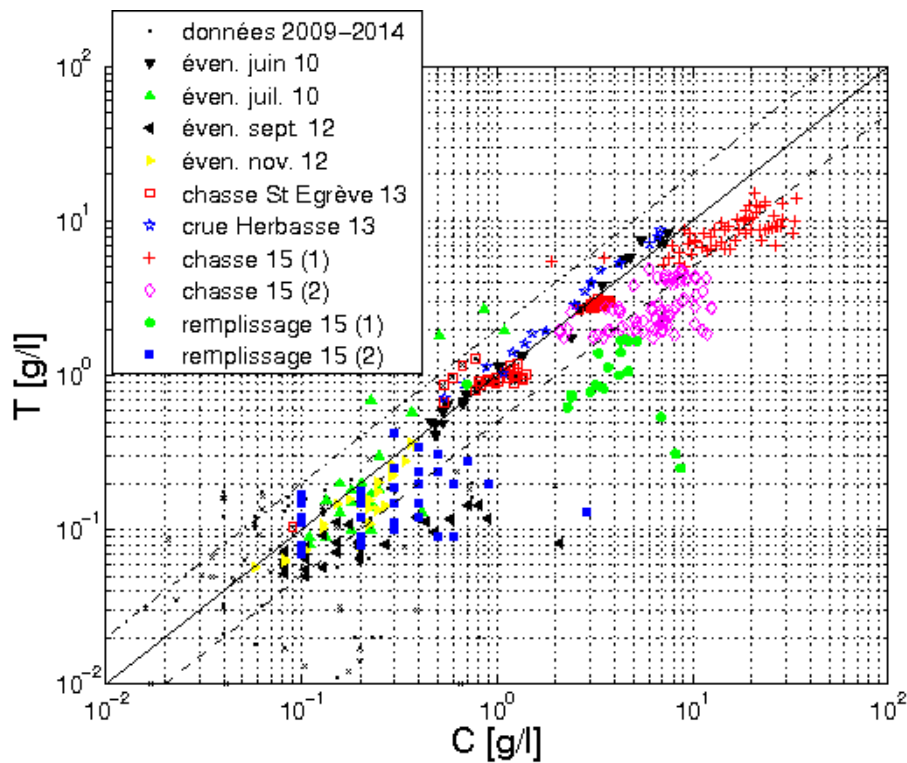


Figure 57: Courbe de tarage de la turbidité à la station de Beaumont-Montoux avec les principaux événements mis en valeur.

Une démodulation des échantillons de surface pendant la chasse a montré l'existence de 3 modes principaux (Naudet et al., 2015):

- un mode très fin ($d_1=4\mu\text{m}$) minoritaire ($\lambda=15\%$)
- un mode fin ($d_2=15\mu\text{m}$) majoritaire ($\lambda=60\%$)
- et un mode limoneux ($d_3=40\mu\text{m}$) minoritaire ($\lambda=25\%$).

Une 4ème classe plus grossière ($d_4=100\mu\text{m}$) a été observée sur certains échantillons de fond mais la classe majoritaire pour les mesures par charriage ($d=200\mu\text{m}$) reste minoritaire pour les mesures de suspension réalisées à la confluence de l'Isère (Naudet et al., 2015).

Les échantillons de surface pris de la berge en rive droite au niveau du turbidimètre n'ont pas montré la présence de sable lors de la chasse. La présence de sable ne peut donc être l'explication de l'augmentation du coefficient a_T lors de la chasse. En supposant que l'ensemble des particules composant les MES se comporte de manière similaire face au turbidimètre (impact de la densité, forme, couleur, etc.), il est possible de développer l'Equation 1 en fonction de la taille d_i des principaux modes et de leur proportion λ_i (Thollet et al., 2013) :

$$C = a_T T = a'_T \left(\sum_i \lambda_i d_i \right) T \quad \text{Eq. 2}$$

Dans le cas de l'Isère à Beaumont-Montoux, en supposant que seuls les coefficients λ_i peuvent varier selon des types d'événement, $a'_T=10^5$ a été obtenu à partir des mesures en chasse avec $a_T=2.0$ (moyenne des deux périodes de la chasse). Le Tableau 3 présente des hypothèses sur les proportions de chacune des classes de sédiment pour expliquer les différentes valeurs de a_T . Sachant que la turbidité est plus sensible aux petites tailles de particules, le calage du coefficient a_T est lui sensible à la présence de particules grossières. Ainsi il apparaît que pour obtenir un coefficient $a_T=1.1$, il faut que la classe de sédiments avec $d_3=40\mu\text{m}$ devienne négligeable. Et

pour avoir des valeurs de a_T inférieures à l'unité, il faut que la classe de sédiments avec $d_1=4\mu\text{m}$ devienne prépondérante. Des mesures granulométrique pour un régime normal permettraient de valider ou non ces hypothèses.

Tableau 5: Estimation du coefficient de turbidité a_T en fonction de la distribution granulométrique.

| Proportion λ_i de chacune des classes de sédiment (%) | | | | a_T |
|---|---------------------|---------------------|----------------------|-------------|
| $d_1=4\mu\text{m}$ | $d_2=15\mu\text{m}$ | $d_3=40\mu\text{m}$ | $d_4=100\mu\text{m}$ | |
| 15 | 60 | 25 | 0 | 2.00 |
| 14 | 57 | 24 | 5 | 2.40 |
| 18 | 70 | 12 | 0 | 1.65 |
| 20 | 80 | 0 | 0 | 1.30 |
| 40 | 60 | 0 | 0 | 1.10 |
| 60 | 40 | 0 | 0 | 0.85 |

4.4.4. Flux de matières en suspension

Les flux de MES peuvent être aisément estimés à partir des chroniques de débit et de concentrations en continu (cf. Figures 54 et 56). La Figure 58 présente la chronique de flux en MES avec le calage du turbidimètre en Tableau 4.

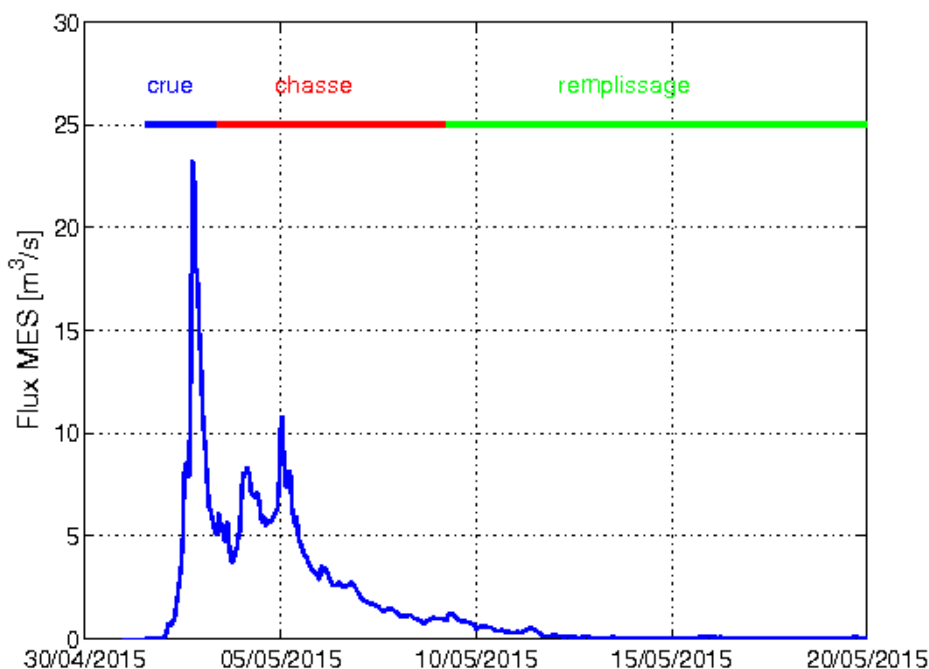


Figure 58: Chronique de flux en MES estimée au cours du mois de mai 2015 à la station de Beaumont-Montoux (le passage à l'unité $[m^3/s]$ s'est fait en prenant une masse volumique des sédiments égale à $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$).

Il est alors possible d'estimer la masse totale de MES ayant transité à la station de Beaumont-Montoux lors de l'événement de mai 2015. Le Tableau 6 présente les résultats obtenus à partir des choix de calage du turbidimètre donnés dans le Tableau 4. Des valeurs similaires à celle d'EDF-DPIH (2015) sont ainsi obtenues, la différence tenant principalement dans le choix de a_T pour la crue (pris légèrement supérieur dans le rapport d'EDF-DPIH, 2015, où $a_T = 1.8$). On retrouve ainsi une masse totale M_{MES} de 7.6 millions de tonnes ayant transité au cours de l'événement dont 4.8 millions pendant la chasse et 2.4 pendant la crue. Les incertitudes restent élevées et on encadre M_{MES} tel que $4.8 < M_{MES} < 12.6$.

Tableau 6: Masse totale de MES ayant transité à la station de Beaumont-Montoux (en millions de tonnes) pour les différentes valeur du coefficient a_T (Tableau 4).

| Période | Crue | Chasse | Remplissage | Total |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| a_T | 2.35 | 4.79 | 0.45 | 7.60 |
| $a_{T,min}$ | 1.60 | 2.96 | 0.23 | 4.79 |
| $a_{T,max}$ | 4.20 | 7.70 | 0.72 | 12.62 |

4.5. Estimation des flux de sables à la station de Beaumont-Monteux

4.5.1. Modèle hydraulique

Le modèle proposé s'appuie sur une estimation des paramètres hydrauliques à partir de la courbe de tarage $Q = f(Z)$ de la station de mesure de Beaumont-Monteux, où Q est le débit liquide exprimé en m^3/s et Z la cote de la surface libre en m NGFO. Ce modèle est décrit plus en détail dans Naudet et al. (2015). Pour la station de Beaumont-Monteux, nous avons donc la relation :

$$Q = a_Q (Z - Z_0)^{5/3} \quad \text{Eq. 3}$$

avec $a_Q = 130$ et le niveau de référence $Z_0 = 116.6$ m pour lequel le débit est supposé nul. Si une chronique de débit est donnée en entrée, la cote de la surface peut être retrouvée à partir de l'équation 3 :

$$Z = \left(\frac{Q}{a_Q} \right)^{3/5} + Z_0 \quad \text{Eq. 4}$$

A partir de l'Eq. 3 et de la géométrie de la section au niveau de la station hydrométrique, il est possible d'estimer les paramètres hydrauliques moyennés sur la section :

- rayon hydraulique $R_h = S_m / P_m$, avec S_m la section mouillée et P_m le périmètre mouillé ;
- vitesse moyenne sur la section $V = Q / S_m$;
- paramètre de Shields θ estimé tel que :

$$\theta = \frac{u_*^2}{g(s-1)d_{50}} = \frac{C_D V^2}{g(s-1)d_{50}} \quad \text{Eq. 5}$$

où u_* est la vitesse de frottement moyenne sur la section, $g = 9.81$ m/s^2 l'accélération de la pesanteur, $s \approx 2.65$ la densité du sable, d_{50} la taille médiane des grains de sable, et C_D un coefficient de frottement (ou coefficient de traînée) qui peut s'écrire en se basant sur l'hypothèse d'un profil de vitesse logarithmique :

$$C_D = \left(\frac{\kappa}{1 + \log(z_0 / R_h)} \right) \quad \text{Eq. 6}$$

avec $\kappa = 0,41$ la constante de Von Karman, $z_0 = k_s / 30$ la longueur de rugosité, k_s la hauteur de rugosité et R_h le rayon hydraulique. On distingue ainsi un paramètre de Shields de peau en prenant $k_s = 2 d_{90}$ (où d_{90} est le diamètre pour lequel 90 % de la population de sédiment est plus fin) et un paramètre de Shields de forme en prenant $k_s = H_d / 2$ (où H_d est la hauteur des formes de fond, Van Rijn, 1993)

Dans le cas de la section de la station de Beaumont-Monteux, il apparaît que la vitesse moyenne de l'écoulement peut être très élevée lors des crues ($V \approx 4$ m/s), impliquant une valeur du paramètre de Shields très grande (proche de 10 en prenant $d_{50} = 0,22$ mm). Ceci induit potentiellement que le transport solide par suspension prédomine largement lors des crues si les apports en sable sont suffisants.

4.5.2. Courbe de tarage sédimentaire

La courbe de tarage sédimentaire pour les sables est basée sur le papier de Camenen et al. (2014). Le transport solide par charriage et par suspension est calculé à l'aide des formules de Camenen & Larson (2005, 2008). Pour le transport solide par charriage, on a ainsi l'équation :

$$q_{sb,CL} = 12 \sqrt{(s-1)g} d_{50}^3 \theta^{3/2} \exp\left(-4.5 \frac{\theta_{cr}}{\theta}\right) \quad \text{Eq. 7}$$

où q_{sb} est le flux solide charrié unitaire (par unité de largeur) [$m^3/s/m$], θ le paramètre de Shields de peau, et θ_{cr} est le paramètre de Shields critique.

Pour la suspension graduée, on utilise de même :

$$q_{ss} = V c_R \frac{\epsilon_s}{W_s} \left[1 - \exp\left(\frac{-W_s}{\epsilon_s R_h}\right) \right] \quad \text{Eq. 8}$$

où q_{ss} est le flux solide par suspension unitaire [$m^3/s/m$], c_R la concentration de référence, ϵ_s la diffusion sédimentaire verticale, et W_s la vitesse de chute du sédiment. La concentration de référence se calcule comme pour le charriage avec le paramètre de Shields de peau :

$$c_R = 1.5 \times 10^{-3} \exp(-0.2 d_*) \exp\left(-4.5 \frac{\theta_{cr}}{\theta}\right) \quad \text{Eq. 9}$$

avec $d_* = [(s-1)g/\nu^2]^{1/3} d_{50}$ le diamètre sédimentologique ($\nu \approx 10^{-6} m^2/s$ est la viscosité cinématique de l'eau). Le coefficient de diffusion sédimentaire vertical ϵ_s s'estime à partir du paramètre de Shields de forme ($\theta_t = u_{*t}^2 / [g(s-1)d_{50}]$) :

$$\epsilon_s = \frac{K}{6} u_{*t} R_h \quad \text{Eq. 10}$$

Une estimation du flux solide total de sable (en kg/s) au travers de la section est ainsi donnée d'après l'équation suivante :

$$Q_s = Q_{sb} + Q_{ss} = \rho_s (q_{sb} + q_{ss}) L_a \quad \text{Eq. 11}$$

avec $\rho_s \approx 2650 \text{ kg/m}^3$ la masse volumique du sédiment, L_a la largeur active de la rivière.

Les résultats sont présentés Fig. 59 où une classe de sable avec $d_{50} = 0.22 \text{ mm}$ a été utilisée (les rugosité de peau et de forme, respectivement $k_s = 20 \text{ mm}$ et $k_{st} = 50 \text{ mm}$, ont été utilisées). Les points expérimentaux (charriage) issus des campagnes de mesure des 7 mai 2015 en fin de chasse (barrage de Beaumont-Monteux ouvert) et 18 juin 2015 après la chasse (barrage de Beaumont-Monteux fermé) sont représentés et permettent de caler une loi de tarage sédimentaire sur l'expérience telle que :

$$Q_{sb, \text{réel}} = \alpha Q_{sb, \text{cap}} \quad \text{Eq. 12}$$

Les résultats indiquent que la capacité de transport n'étaient pas atteinte.

Un coefficient α_b variable dans le temps permettrait de caler une loi de tarage sédimentaire pour le charriage sur la période de la chasse (α_b varie de 0.1 à 0.03 pour les deux points de mesure). Un coefficient α_s pour la loi de tarage sédimentaire pour la suspension serait donc aussi nécessaire.

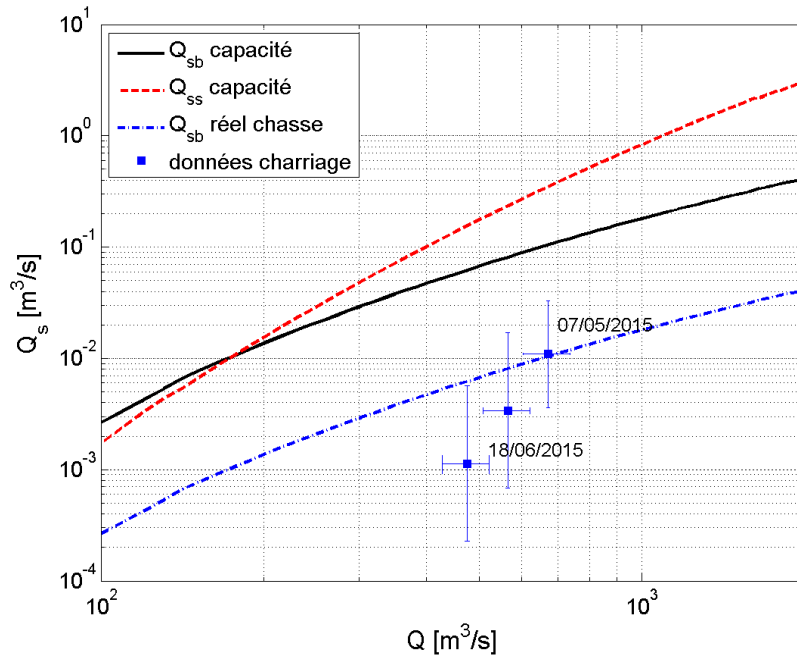


Figure 59: Courbe de tarage sédimentaire pour la station hydrométrique de Beaumont-Monteux.

4.5.3. Qualité des sables ayant transités lors de la chasse de 2015

Les mesures de terrain réalisées ne permettent pas de caler la courbe de tarage sédimentaire avec certitude en particulier pour la suspension de sables. En effet, seules quelques mesures de charriage ont été réalisées au niveau de la station et une seule campagne a eu lieu lors de la chasse (7 mai). Ces mesures ont indiqué que le diamètre moyen des sédiments était $d_{50}=0.22$ mm (Naudet et al, 2015).

12 échantillons de fond ont été prélevés par la CNR le long de l'Isère (entre les PK 100.5 et 102.5) le 18 juin 2015 en surface et à des profondeurs de 2 ou 3 m environ, a priori dans les dépôts de sédiments suite à la crue-chasse de l'Isère. Les distributions granulométriques (en volume ou masse) de ces échantillons sont présentées par classes de diamètre sur la Figure 60. Les deux échantillons particuliers sur cette figure correspondent à des échantillons proches de la retenue EDF (plus fin, cf. courbe 19565 Fig. 60) et en amont de la confluence sur le canal d'amenée (plus grossier, cf. courbe 19564 Fig. 60). Le mode principal des 12 échantillons de l'Isère aval restent très proche de ceux observés pour les mesures par charriage, soit $d_{50}=0.22$ mm (Naudet et al., 2015). On peut remarquer aussi un second mode plus grossier tel que $d_{M2}\approx 0.4$ mm un mode plus fin apparaît moins nettement $d_{M0}\approx 0.12$ mm. Le diamètre médian résultant $d_{50}=0.28$ mm est ainsi un peu plus élevé du fait de la classe $M2$ plus importante au niveau des dépôts. Pour ces dépôts, nous avons de plus $d_{16}=0.18$ mm et $d_{84}=0.45$ mm.

Cependant, les mesures de charriage ont montré que sur le site de Beaumont-Monteux, il y a une présence de sédiments plus grossiers (centimétriques) au fond. Pour le site de Beaumont-Monteux, nous prendrons donc $d_{84}=10$ mm. Il est à noter que cette hypothèse affecte de manière non-négligeable le transport solide puisque cela impacte directement le calcul des contraintes au fond ($k_s=2d_{90}\approx 2d_{84}$). De la même manière, pour le calcul de la rugosité de forme, nous supposons ici la présence de rides de fond : $k_{st}=50$ mm.

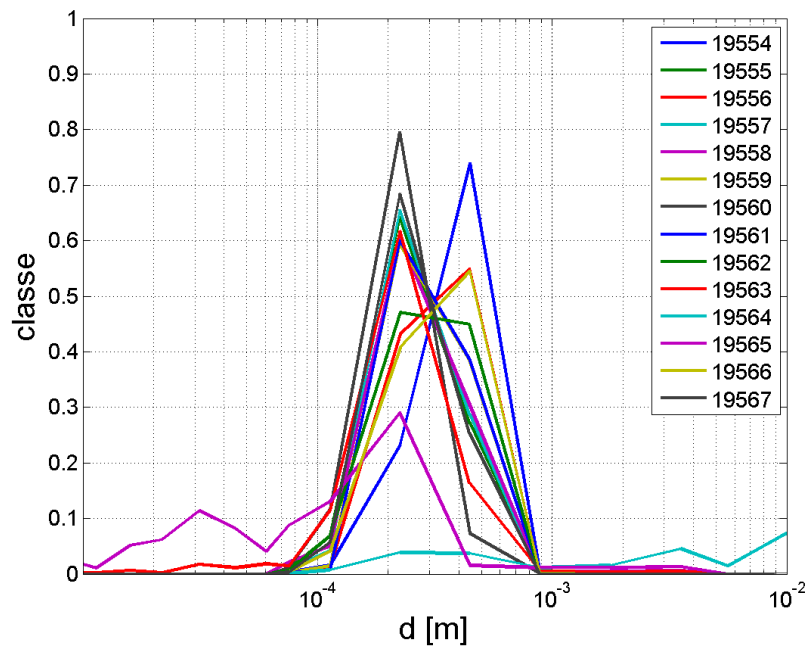


Figure 60: Courbe granulométrique par classe des échantillons de fond prélevés dans l'Isère aval le 18 juin 2015.

4.5.4. Estimation des flux de sables lors de la chasse de 2015

On se propose ici de tester des hypothèses sur les coefficients α_b et α_s ainsi que sur les modes granulométriques principaux afin de retrouver la quantité de sable retrouvée à la confluence entre l'Isère et le Rhône par comparaison bathymétrique. En effet, un volume de 3.3 millions de m^3 se serait déposé avant le 11 juin 2015. En prenant une porosité du dépôt de 0.4 et une masse volumique des sédiments $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$, la masse totale de sable ayant transité à la station de Beaumont-Monteux serait de 5.25 millions de tonnes.

Le Tableau 7 liste les différentes hypothèses faites sur α_b et α_s pour calculer les flux de sables. En première hypothèse, nous supposons que le transport suit les capacités de transport estimées par le modèle en prenant un unique mode pour la granulométrie des sédiments, soit $d_{M1} \approx d_{50} \approx 0.22 \text{ mm}$. En seconde hypothèse, des valeurs plus réalistes basées sur les mesures de charriage réalisées les 7 mai et 18 juin 2015 (cf. Figure 59) sont utilisées. En troisième hypothèse, nous avons estimé α_b et α_s afin de retrouver le volume de sédiment déposé tout en conservant des valeurs réalistes. Nous avons ainsi supposé que la capacité de transport était partiellement atteinte lors de la crue même si la retenue de Beaumont-Monteux était fermée (débit suffisamment important pour créer une turbulence permettant au sable d'être en suspension et passer la surverse). Lors de la chasse, un facteur 2 a été proposé en supposant que la formulation empirique de Camenen & Larson (2008) sous-estimait le transport. Pour la période de remplissage, α_b et α_s ont été pris décroissants exponentiellement dans le temps jusqu'à une valeur de 0.1 en fin de chasse. Enfin, en quatrième hypothèse, nous avons repris l'hypothèse 3 en supposant 3 classes de sédiments, M_0 , M_1 , M_2 , avec les proportions respectives 0.3, 0.4 et 0.3.

Tableau 7: Coefficients α_b et α_s testés pour établir la courbe de tarage sédimentaires pour les sables à Beaumont-Monteux.

| | Période | Crue | Chasse | Remplissage |
|----------------------|------------|------|--------|-----------------|
| Hyp. 1: Capacité | α_b | 1 | 1 | 1 |
| | α_s | 1 | 1 | 1 |
| Hyp. 2: Mesures | α_b | 0.05 | 0.1 | 0.05 |
| | α_s | 0.05 | 0.1 | 0.05 |
| Hyp. 3 & 4: Capacité | α_b | 0.5 | 2 | $2 \exp[-f(t)]$ |
| | α_s | 0.5 | 2 | $2 \exp[-f(t)]$ |
| Hyp. 5 & 6: Capacité | α_b | 2 | 2 | $2 \exp[-f(t)]$ |
| | α_s | 2 | 2 | $2 \exp[-f(t)]$ |

Les résultats sur ces flux sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8: Masse totale M_{sable} de sable ayant transité à la station de Beaumont-Monteux (en millions de tonnes) pour les différentes hypothèses faites sur α_b et α_s .

| | Période | Crue | Chasse | Remplissage | Total |
|--------------------------|------------|-------------|--------------|-------------|-------|
| Hyp. 1: Capacité | charriage | 0.09 | 0.18 | 0.17 | 0.44 |
| | suspension | 0.49 | 0.74 | 0.46 | 1.69 |
| Hyp. 2: Mesures | charriage | 4.10^{-3} | 18.10^{-3} | 8.10^{-3} | 0.03 |
| | suspension | 0.02 | 0.07 | 0.02 | 0.12 |
| Hyp. 3: Capacité mod. | charriage | 0.04 | 0.36 | 0.12 | 0.53 |
| | suspension | 0.25 | 1.47 | 0.33 | 2.05 |
| Hyp. 4: Capacité + d_i | charriage | 0.04 | 0.36 | 0.12 | 0.52 |
| | suspension | 0.51 | 3.16 | 0.763 | 4.43 |
| Hyp. 5: Capacité mod. | charriage | 0,18 | 0.36 | 0.12 | 0,66 |
| | suspension | 0,99 | 1.47 | 0.33 | 2,79 |
| Hyp. 6: Capacité + d_i | charriage | 0,18 | 0.36 | 0.12 | 0,66 |
| | suspension | 2,03 | 3.16 | 0.76 | 5,95 |

Si l'on prend l'hypothèse 2 pour le choix de α_b et α_s , on obtient une masse totale de sable ayant transité à la station de Beaumont-Monteux bien inférieure à ce que l'on pourrait s'attendre à partir de l'analyse bathymétrique : $M_{sable} = 120000$ tonnes, soit une valeur plus de 250 fois inférieure... En se basant sur les loi de capacité de transport (Hyp. 1), les résultats sont globalement plus cohérents mais restent inférieurs à la masse déposée : $M_{sable} = 2.1 \times 10^6$ tonnes. De plus, on retrouve des flux supérieurs lors de la phase de remplissage, ce qui semble peu réaliste. La 3ème hypothèse est proposée en multipliant par 2 la capacité de transport pendant la chasse et en la réduisant de manière exponentielle lors de la phase de remplissage. Cela n'affecte que très peu le résultat final par rapport la première hypothèse. Enfin, la 4ème hypothèse supposant un mélange de 3 classes de sédiments n'affecte pas le transport solide par charriage (ce dernier étant quasi-indépendant de la taille des

sédiments) mais induit un transport solide par suspension 2 fois plus élevé. Au total avec l'hypothèse 4, nous obtenons un flux de 4.95 millions de tonnes, ce qui est proche des 5.25 millions de tonnes estimés à partir de la mesure bathymétrique du dépôt.

Sachant que le barrage de Beaumont-Monteux était ouvert dès le début de la crue même s'il n'était effacé qu'à la fin de la crue, on peut aussi faire l'hypothèse que la capacité de transport était atteinte dès le début de la crue (hypothèses 5 et 6). Ce choix impacte la masse totale charriée et transportée par suspension graduée. Dans le cas de l'hypothèse 6, nous arrivons ainsi à une masse totale de 6.6 millions de tonnes, ce qui semble surestimé. **Nous conserverons ainsi par la suite l'hypothèse 4 pour l'estimation des flux entrant dans le modèle.**

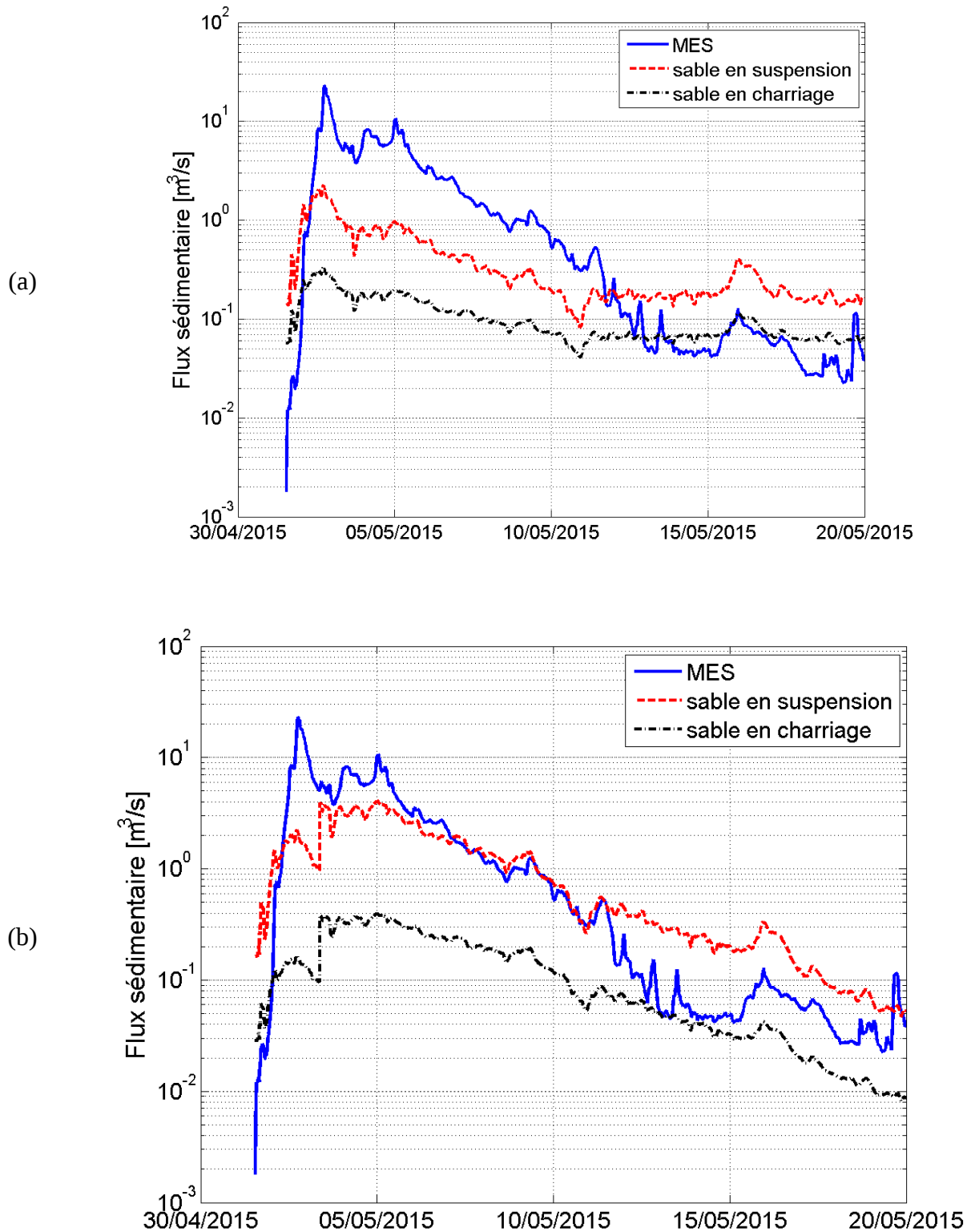


Figure 61: Chronique de flux sédimentaire estimée au cours du mois de mai 2015 à la station de Beaumont-Monteux avec pour les flux de sables (a) Hyp. 1 et (b) Hyp. 4.

4.6. Conclusion

Une estimation des flux de sédiments ayant transités à la station de Beaumont-Monteux sur l'Isère lors de l'événement de crue-chasse de mai 2015 a été réalisée.

A partir de la station turbidimétrique de Beaumont-Monteux, nous avons estimé le **flux de matière en suspension (sable exclu) à 7.6 millions de tonnes**. De fortes incertitudes existent sur cette valeur du fait de l'absence de données lors de la période de crue et du manque de données granulométriques permettant le calage du turbidimètre. Il est en effet important de connaître les principaux modes transportés et leurs poids dans la courbe granulométrique en particulier pour les limons qui peuvent plus facilement se déposer dans les zones de faible énergie (garage d'écluse).

Concernant les **sables**, le flux estimé à partir des **mesures bathymétriques** du dépôt à l'aval de l'Isère et dans le canal d'amenée est de **5.25 millions de tonnes**. Un **modèle de transport de sable** basé sur les formulations de transport solide de Camenen & Larson (2005, 2008) et appliqué à la station de Beaumont-Monteux a permis de retrouver ce flux (**4.88 millions de tonnes**) avec les hypothèses suivantes :

- les rugosités de grain et de forme ont été estimées à $k_s=0.02$ mm et $k_{st}=0.05$ mm en supposant une présence de sédiments grossiers à la station de Beaumont-Monteux ($d_{84}=10$ mm) ainsi que la présence de rides ;
- la capacité de transport solide a été utilisée pour la crue avec un facteur 0.5 bien que le barrage de Beaumont-Monteux était fermé, un coefficient 2 à cette capacité a été utilisé lors de la période de chasse (barrage ouvert), un coefficient décroissant exponentiellement lors de la période de remplissage du fait d'une réduction des apports en sables a priori observé lors des mesures de charriage ;
- un mélange de 3 classes de sédiments ($d_{M0}\approx 0.12$ mm , $d_{M1}\approx 0.22$ mm , $d_{M2}\approx 0.4$ mm) a finalement été utilisé. La classe M_0 est plus facilement transportée en suspension mais ne se retrouve que minoritairement dans les dépôts, ce qui ne valide pas cette hypothèse

5. COMPARAISON AVEC LA CHASSE DE 2008

5.1. Érosion dans les retenues de la basse Isère

Le rapport Sogreah (2010) indique que des bathymétries des retenues de Beauvoir et Saint Hilaire ont été levées en juin 2005 et juillet 2008 encadrant la chasse de mai-juin 2008. Leur comparaison a conduit aux variations de volumes suivantes :

| Retenues | Volume déstocke entre juin 2005 et juillet 2008 (10 ⁶ m ³) | Volume déstocke en 2015 (10 ⁶ m ³) |
|---------------|---|---|
| Beauvoir | 1.6 | 1,94 |
| Saint Hilaire | 0,3 (après correction) | 1,34 |

Cependant, ces situations n'intègrent pas les éventuels érosions/dépôts intervenus entre juin 2005 et fin mai 2008.

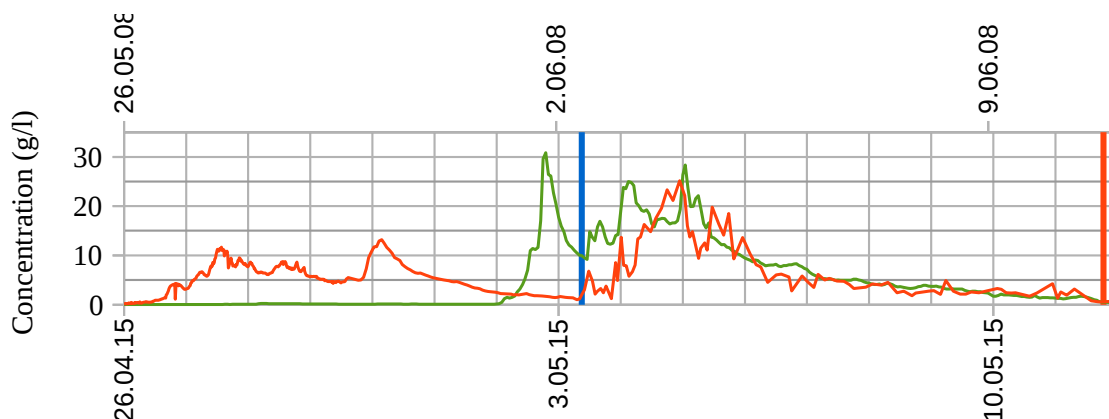
Le paragraphe 2.2.1 rappelle que la chasse de 2008 survient après 4 ans sans chasse de la retenue de Beaumont -Monteux et 7 ans sur les autres retenues, soit la même durée qu'entre la chasse de 2008 et celle de 2015. Ainsi, à part la retenue de Beaumont-Monteux, les volumes stockés dans les retenues amont en 2008 devaient être proches de ceux de 2015.

5.2. Taux de MES

Lors de la chasse de 2008, les taux de MES ont été mesurés par filtration, séchage au micro-onde et pesée. Les prélèvements ont été réalisés au Pont de Chateauneuf, à l'aval du barrage de Beaumont-Monteux du 02/05/2008 au 11/06/2008. La chronique de concentration en MES n'étant pas disponible à Beaumont-Monteux sur l'intégralité de l'événement, une nouvelle chronique a été reconstruite par Irstea à l'aide des mesures faites à Tullins et à Romans (Irstea,2016).

La figure 62 compare les chronique en MES, de débits et de flux de MES de 2008 et 2015 en les superposant par rapport à la date d'ouverture de Beaumont-Monteux.

(a)



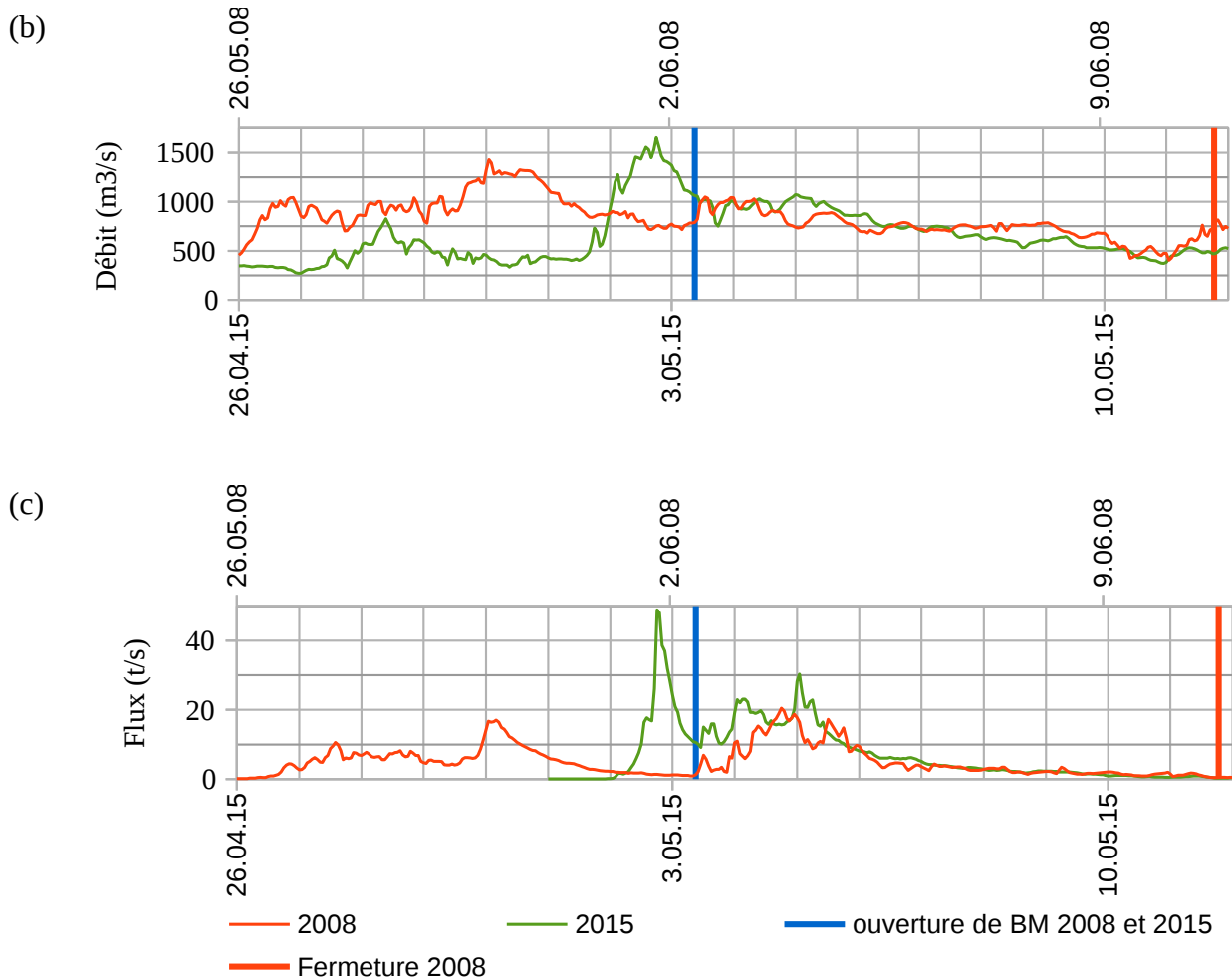


Figure 62: Chronique en MES (a), de débits (b) et de flux de MES (c) à Beaumont-Monteux de 2008 et 2015. Les chroniques sont superposées par rapport à la date d'ouverture de Beaumont-Monteux. En 2015, Beaumont Monteux a été fermé le 26.05

On remarque qu'en 2015, le pic de MES pendant la crue a été plus fort, plus bref et plus rapproché de la chasse qu'en 2008. Ceci peut clairement être mis en lien avec les différentes chroniques de débits (Figure 62b) Par contre, les concentrations en MES après l'ouverture de Beaumont-Monteux sont relativement similaires pour les deux événements avec un premier pic plus élevé pour la chasse de 2015.

5.3. Volumes déposés à l'aval de Beaumont-Monteux

Le volume déposé dans le canal d'amenée entre les profils 101.6 et 103 (soit jusqu'à l'aval immédiat du barrage Isère) lors de événements de 2008 avait été estimé 572 000 m³ auxquels s'ajoutent les 215 000 m³ curés dans le garage de l'écluse. En réalité, ce volume est le volume déposé sur cette section du canal d'amenée encore présent le 17/09/2008. A cette date, une partie non négligeable a pu être évacuée et il ne correspond pas au maximum de dépôt. Ainsi, le profil 101.6 ne présente aucun dépôt en septembre 2008.

Le volume calculé est donc a priori une sous-estimation du dépôt à l'issue de l'événement de mai 2008.

5.4. Granulométrie des dépôts

Les échantillons prélevés dans l'Isère en rive gauche et en surface à la confluence le 05/06/2009 et le 06/08/2009 (sondages C5 et C9) présentent des d_{50} respectivement de 0.1 et 0.2 mm, soit légèrement plus fins que ceux relevés après la chasse de 2015 (plus proche de 0.3mm). Ils correspondent cependant tout de même à des sables fins. Les prélèvements ayant été réalisés plus d'un an après la chasse, ils ne sont peut-être pas représentatif des matériaux ayant transités pendant l'événement.

Les échantillons prélevés à l'amont de l'usine le 06/08/08 et dans le garage amont le 23/06/08 présentent des d_{50} entre 0,05 mm et 0.2 mm (tableau 9). Seul les prélèvements à 1m de profondeur présente un d_{50} entre 0.02 et 0.05 mm.

| d (mm) | Amont usine | | | Garage amont |
|----------|---------------------------|------|------|---------------------------|
| | Prélèvement du 06/08/2008 | | | Prélèvement du 23/06/2008 |
| | Surface | -1m | -2m | Surface |
| 0 | 0% | 0% | 0% | 0% |
| 0 | 6% | 9% | 6% | 6% |
| 0.02 | 19% | 29% | 20% | 23% |
| 0.05 | 36% | 62% | 35% | 43% |
| 0.2 | 98% | 100% | 99% | 99% |
| 2 | 100% | 100% | 100% | 100% |
| D50 (mm) | 0.08 | 0.04 | 0.09 | 0.07 |

Tableau 9: Caractéristiques granulométriques des sédiments déposés en 2008

La granulométrie des dépôts est donc très légèrement plus faible en 2008 qu'en 2015 à la confluence.

5.5. Analyse des incidents

D'après le rapport Evolution de la consigne de chasse des ouvrages de la Basse Isère (CNR / EDF, 2012), les perturbations liées à l'engrèvement sont apparues dès le 07/06/2008 (systèmes de refroidissement de l'usine de Bourg les Valence bouché), soit 5 jours après le début de chasse et avant la fin de celle-ci. Les sédiments ont commencé à se déposer les jours précédents, ce qui confirme la rapidité du déplacement des sédiments. En 2015, le 1^{er} incident à eu lieu plus d'un mois après le début de la chasse et concernait le PK 102.5 (amont barrage Isère). **Cela signifie que les sédiments arrivant dans le canal d'amenée ont été transporté vers l'usine de Bourg-lès-Valence en quantité supérieure et plus rapidement en 2008 qu'en 2015.**

La figure 63 présente les hydrogrammes de l'Isère à Baumont-Monteux dans les 5 jours qui suivent le début de la chasse.

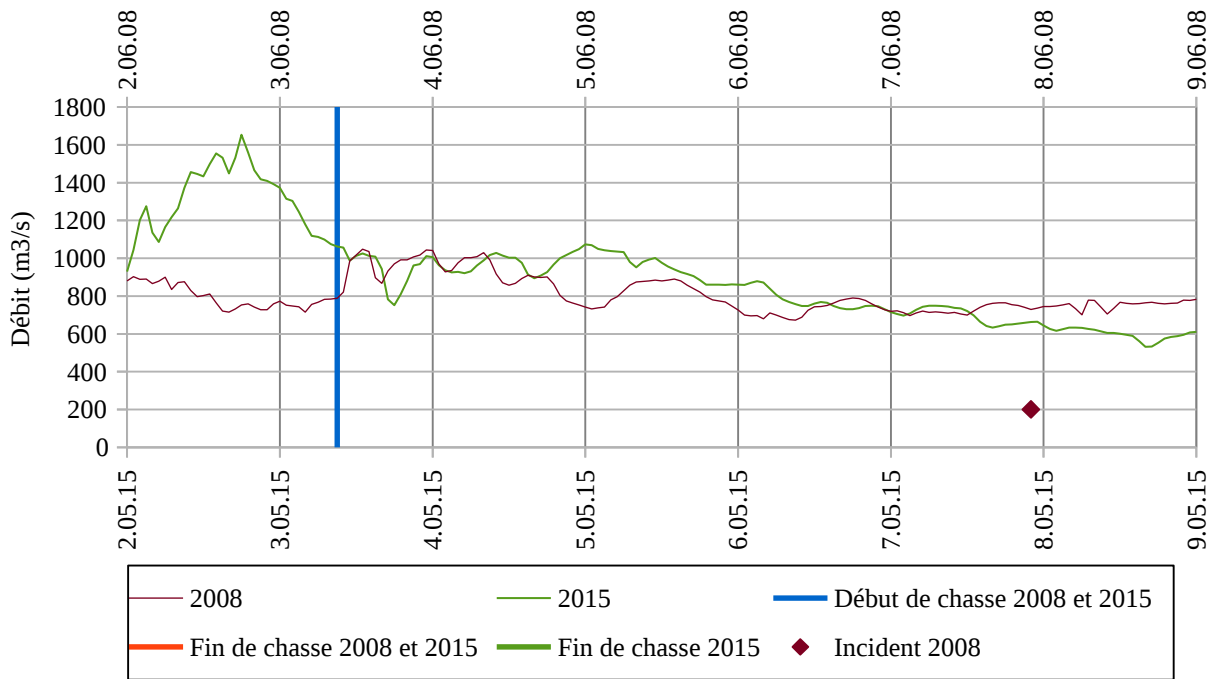


Figure 63: Hydrogrammes de l'Isère à Beaumont-Monteux en 2008 et 2015. Les hydrogrammes sont superposés par rapport aux dates de début de chasse.

Les figures 64 et 65 montrent que dans les 5 jours qui suivent le début de la chasse les durées de débits supérieurs à 600 m³/s sont égales en 2008 et en 2015. En revanche en 2008, on retrouve principalement des débits compris entre 700 et 800 m³/s alors qu'en 2015 les débits sont plus répartis entre 600 et 1100 m³/s.

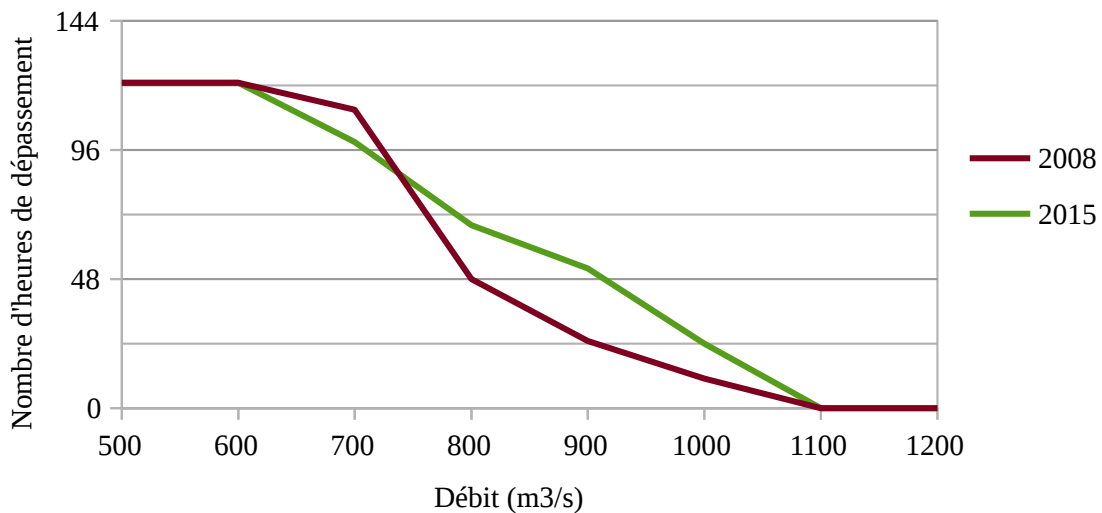


Figure 64: Nombre d'heures de dépassement de débit dans les 5 jours qui suivent le début de la chasse

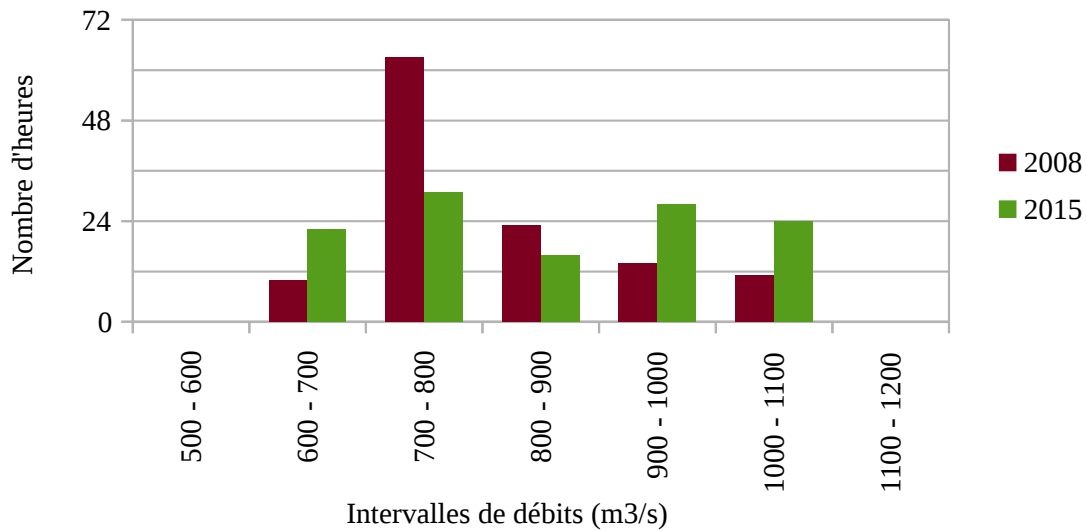


Figure 65: Durées durant lesquelles chaque classe de débits est atteinte à Beaumont-Monteux en 2008 et 2015 dans les 5 jours qui suivent le début de la chasse

Ces résultats ne permettent pas de dégager une différence majeure entre 2008 et 2015 sur l'Isère.

La figure 66 présente les hydrogrammes du canal amont dans les 5 jours qui suivent le début de la chasse. Elle montre que les débits du canal amont étaient bien supérieurs en 2015 qu'en 2008.

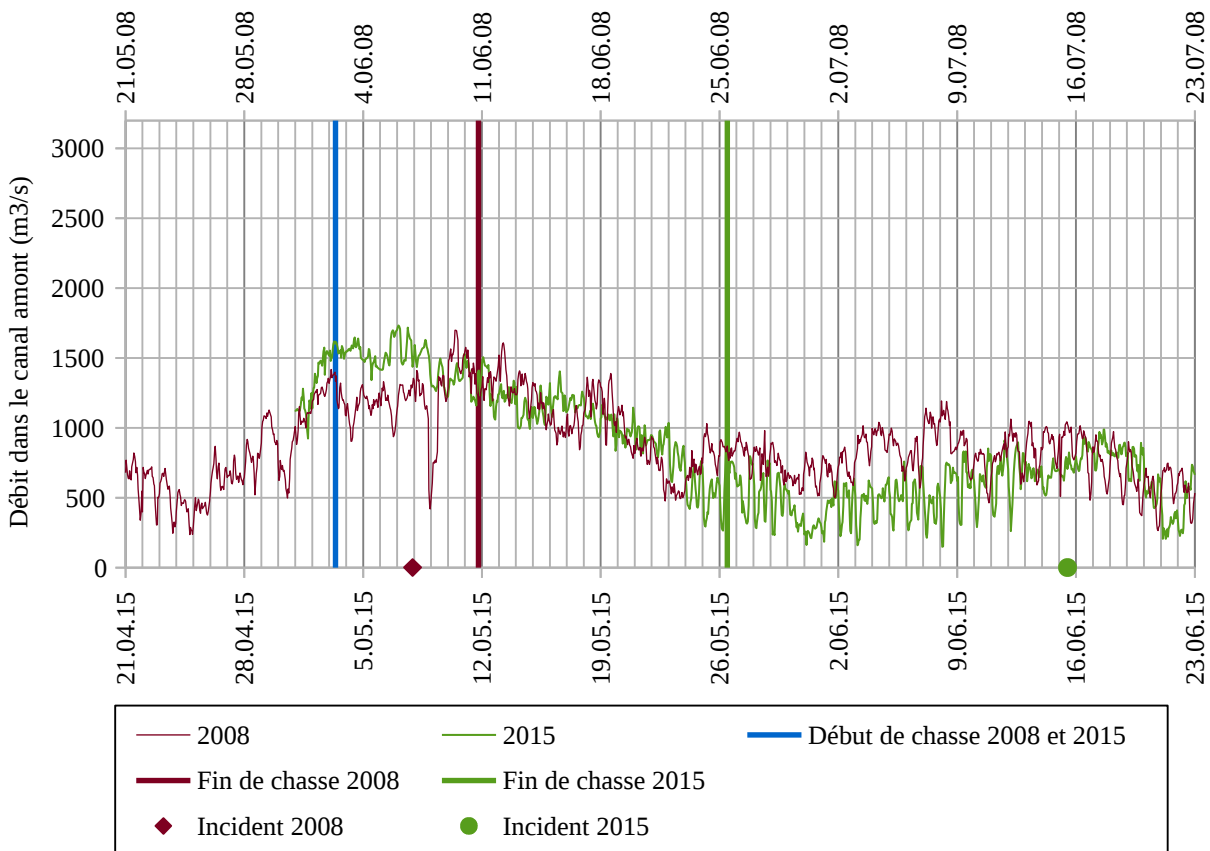


Figure 66: Hydrogrammes du canal amont en 2008 et 2015. Les hydrogrammes sont superposés par rapport aux dates de début de chasse.

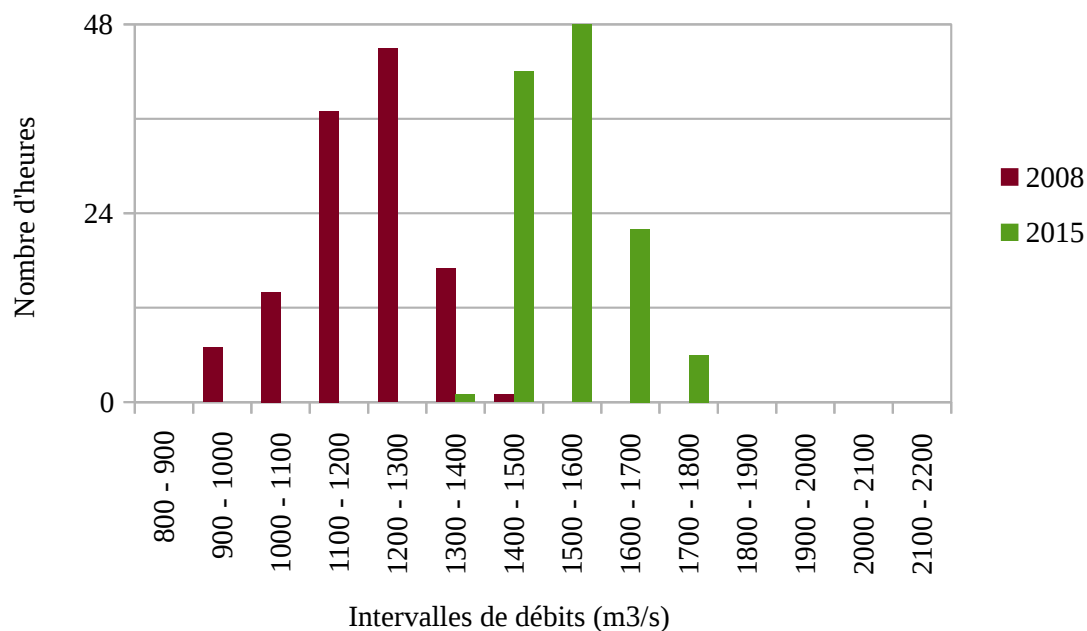


Figure 67: Durées durant lesquelles chaque classe de débits est atteinte dans le canal amont en 2008 et 2015 dans les 5 jours qui suivent le début de la chasse

L'analyse des débits du canal amont ne permettent donc pas d'expliquer pourquoi les dépôts auraient été moins importants à l'usine en 2008.

La figure 68 présente les hydrogrammes du canal commun dans les 5 jours qui suivent le début de la chasse. Les débits du canal amont étant plus importants en 2015 pour des débits de l'Isère semblables, il est normal que les débits du canal commun soient plus forts en 2015 qu'en 2008.

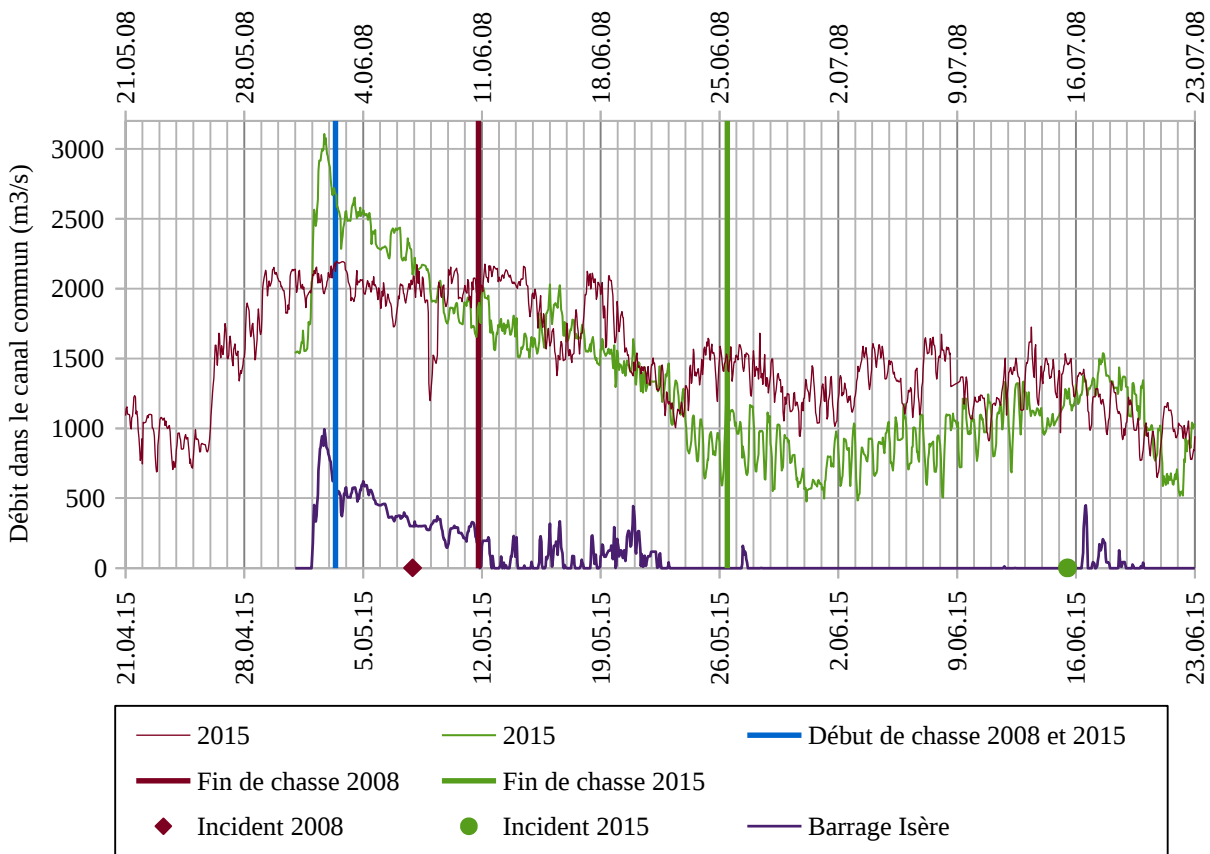


Figure 68: Hydrogrammes du canal commun en 2008 et 2015. Les hydrogrammes sont superposés par rapport aux dates de début de chasse.

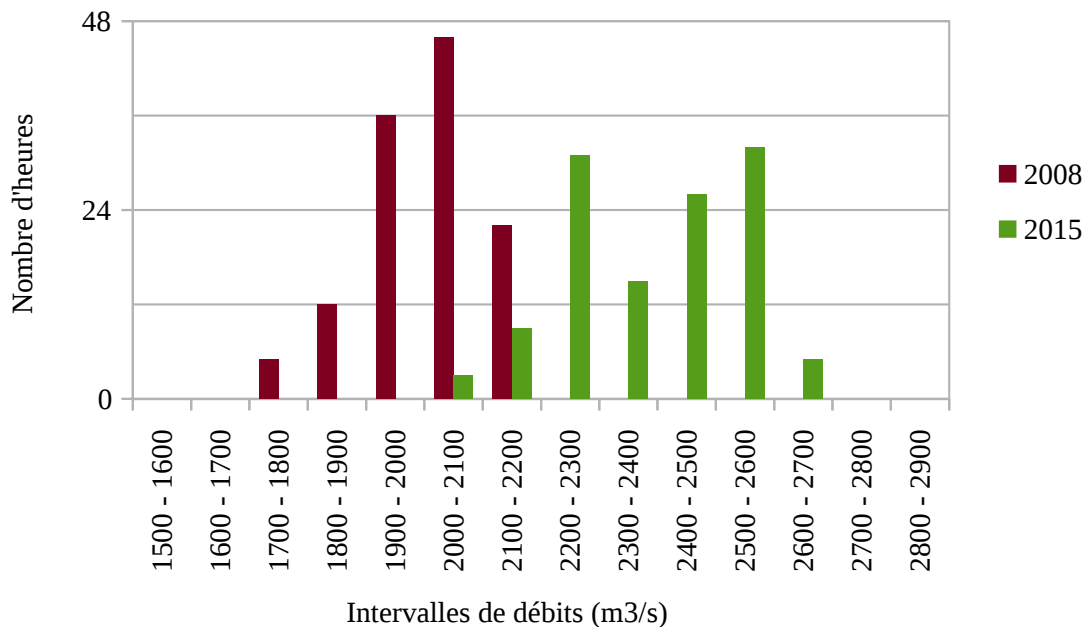


Figure 69: Durées durant lesquelles chaque classe de débits est atteinte dans le canal commun en 2008 et 2015 dans les 5 jours qui suivent le début de la chasse

L'analyse des débits du canal commun ne permettent donc pas d'expliquer pourquoi les dépôts auraient été moins importants à l'usine de Bourg-lès-Valence en 2008. Les figures

montrent cependant qu'en 2015, le barrage Isère évacue en moyenne 19 % du débit du canal commun dans les 5 jours qui suivent l'ouverture du barrage Isère.

La figure 70 présente les hydrogrammes du canal aval (débit à l'usine de Bourg-lès-Valence) dans les 5 jours qui suivent le début de la chasse. Du fait de l'ouverture du barrage Isère, les débits du canal aval sont légèrement plus forts en 2008 qu'en 2015, même si les débits en 2015 restent supérieurs à 1700 m³/s et dépassent les 2000 m³/s pendant 37 heures.

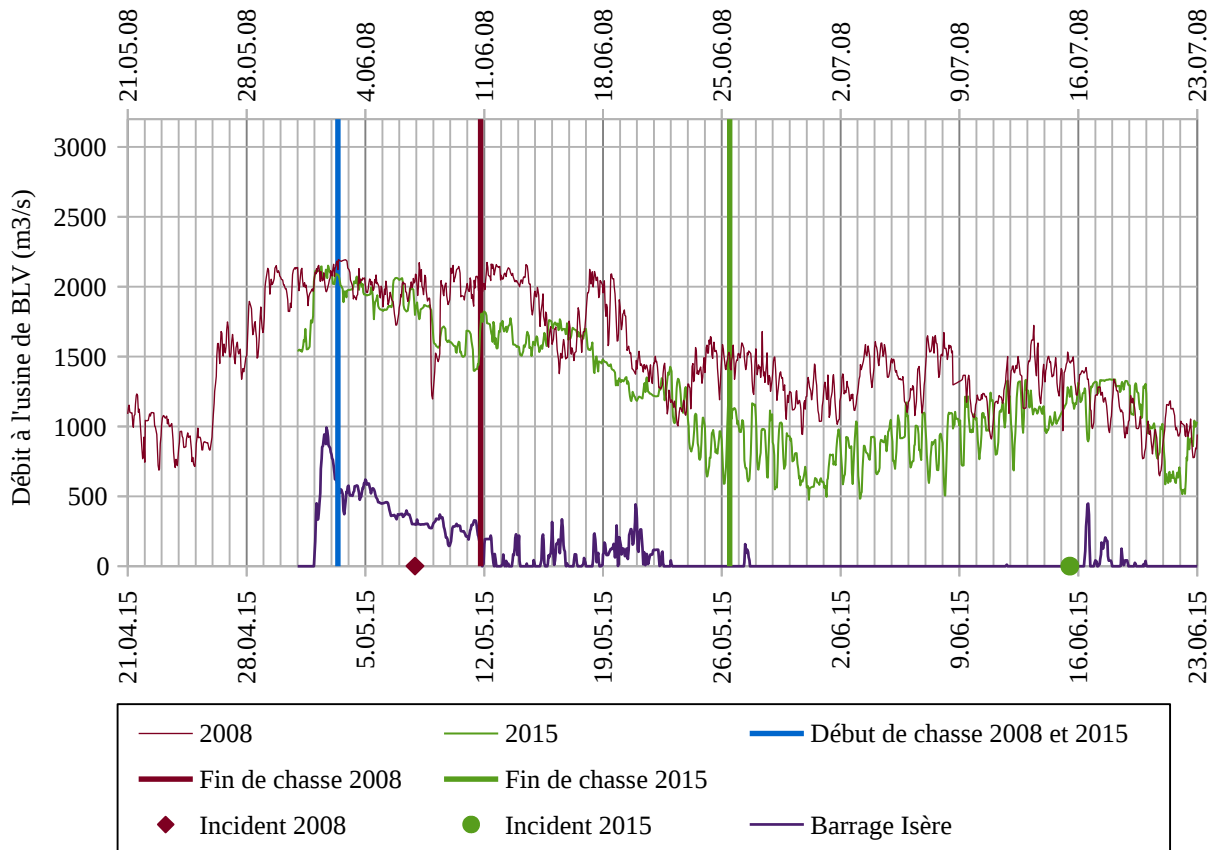


Figure 70: Hydrogrammes du canal aval et du barrage Isère en 2008 et 2015. Les hydrogrammes sont superposés par rapport aux dates de début de chasse.

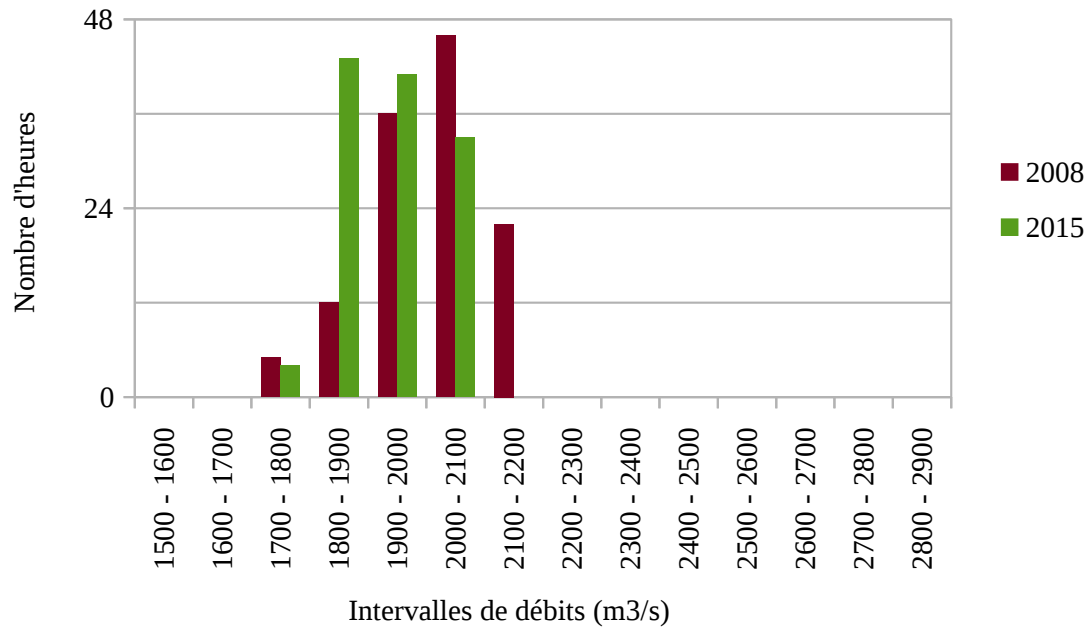


Figure 71: Durées durant lesquelles chaque classe de débits est atteinte dans le canal aval en 2008 et 2015 dans les 5 jours qui suivent le début de la chasse

Ainsi, l'analyse des débits de l'Isère et des différents tronçons du canal d'amenée ne permettent pas de dire que les dépôts ont été plus faibles en 2008 qu'en 2015. Les forts débits du canal amont et commun en 2015 tendraient d'ailleurs à prévoir l'inverse. Il est ainsi possible qu'en 2015 les sédiments aient été évacués par le barrage Isère, protégeant ainsi des dépôts et des incidents rencontrés en 2008 à l'usine.

5.6. Analyse des débits

5.6.1. Isère

Les figures 72 et 80 montrent que si les débits lors des 5 premiers jours après le début de la chasse sont assez comparables entre 2008 et 2015 ils baissent en revanche beaucoup plus tôt en 2015. En effet ils diminuent en dessous des 600 m³/s le 09/05/2015 à 11h, soit 6 jours après l'ouverture de Beaumont-Monteux. En 2008, les débits supérieurs à 600 m³/s se raréfient aux environs du 27/06/08, soit un peu moins de 2 mois après le début de la chasse.

En 2008, quelques épisodes de débits supérieurs à 600 m³/s ont lieu par la suite, notamment entre le 05/09 et le 15/09/2008 où les débits atteignent 1200 m³/s. En 2015, seul l'événement du 16/06 dépasse les 600 m³/s pendant une vingtaine d'heures.

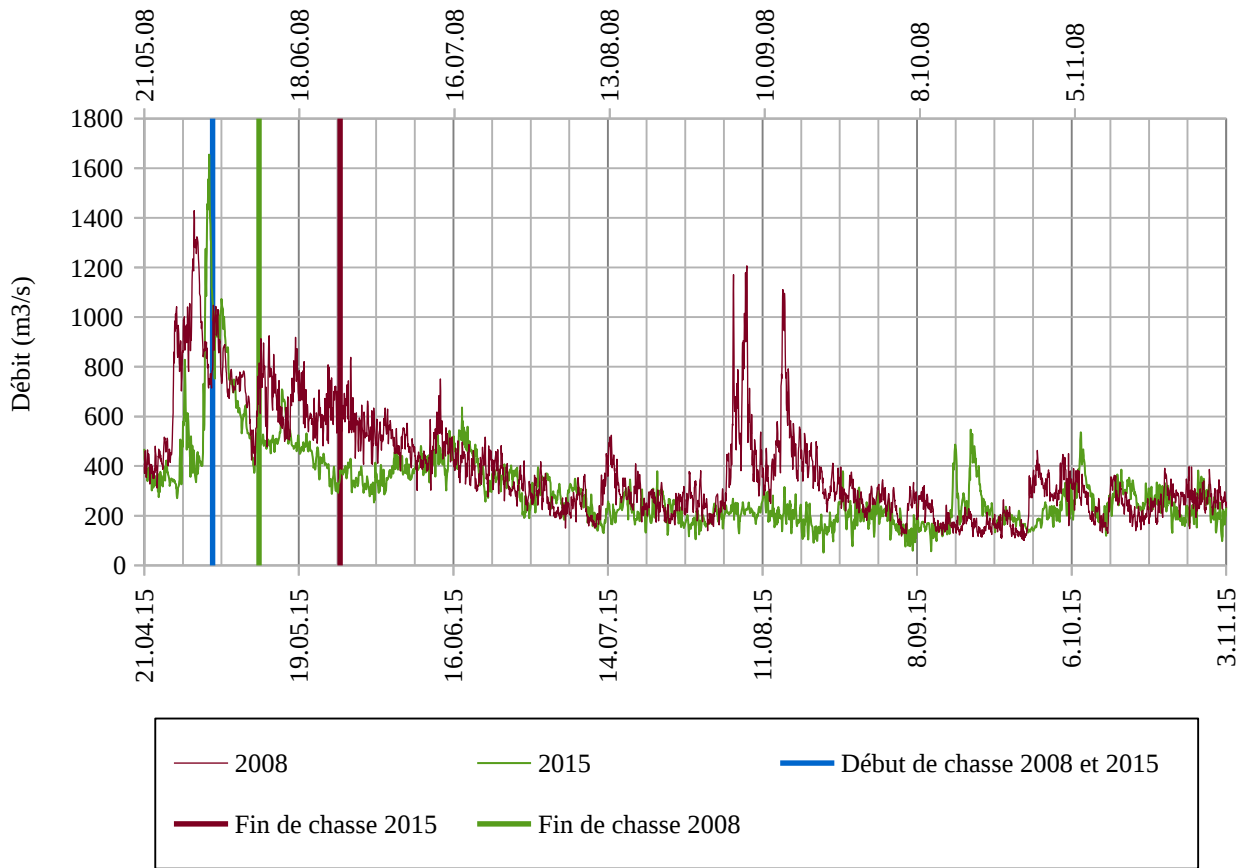


Figure 72: Comparaison des débits de 2008 et 2015 à Beaumont-Monteux. Les courbes sont superposées par rapport à l'ouverture du barrage

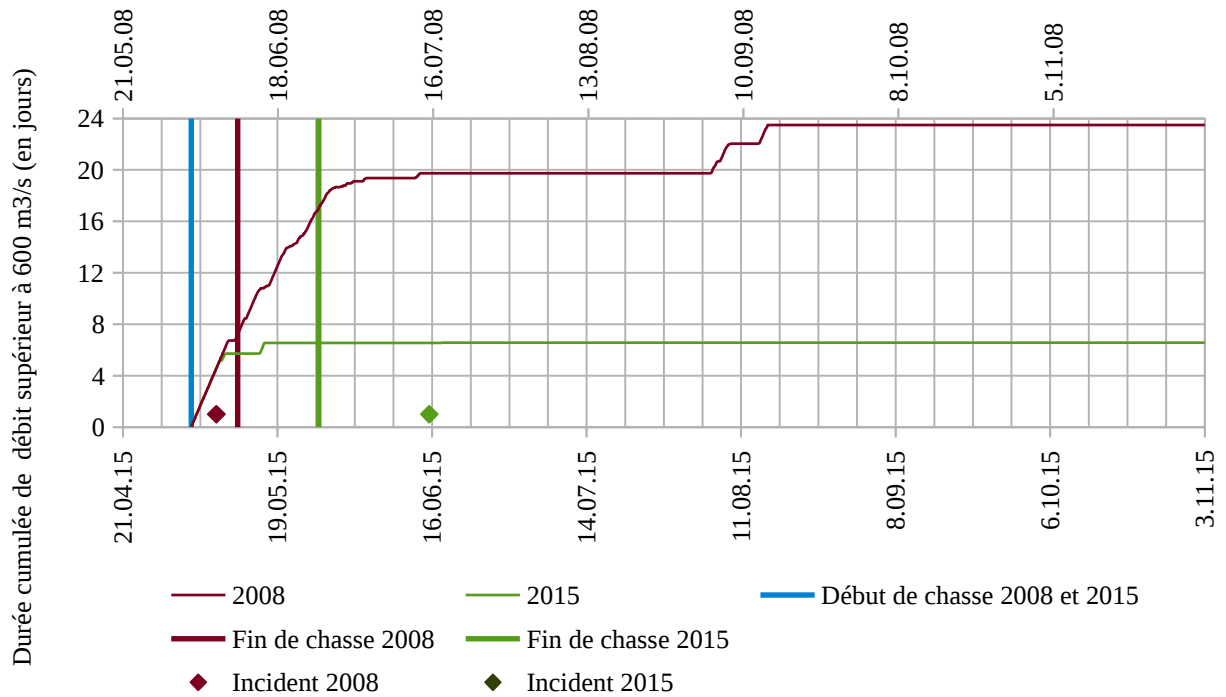


Figure 73: Durée cumulée de débit supérieur à 600 m³/s à Beaumont Monteux en 2008 et 2015.

La diminution rapide des débits en 2015 explique que les sédiments n'ont pas pu s'évacuer comme on le suppose en 2008.

5.6.2. Canal amont

Nous avons vu que pendant le début de la chasse, les débits dans le canal amont étaient plus soutenus en 2015. Cependant, comme sur l'Isère, les débits vont diminuer plus rapidement. En 2015, le canal amont ne dépasse plus les 1200 m³/s du 18/05 au 23/11.

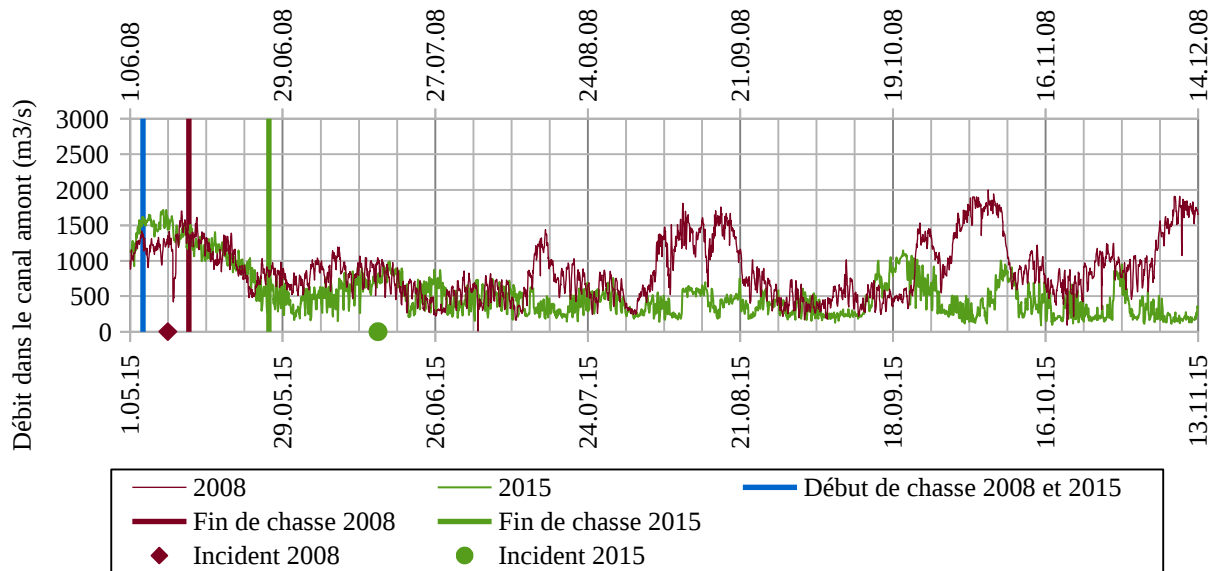


Figure 74: Comparaison des débits de 2008 et 2015 dans le canal amont. Les courbes sont superposées par rapport à l'ouverture du barrage

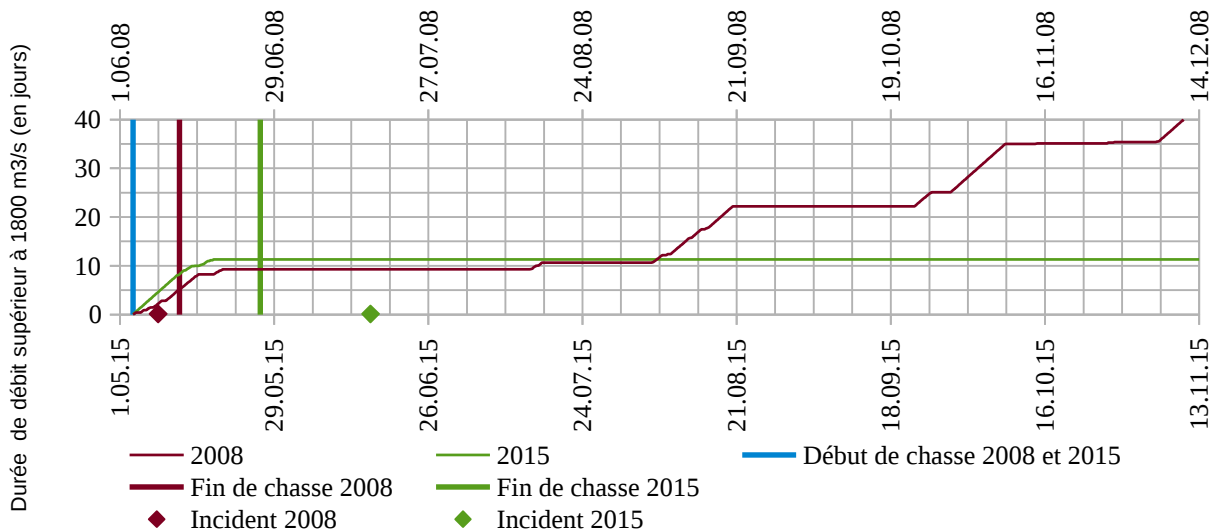


Figure 75: Durée cumulée de débit supérieur à 600 m³/s dans le canal amont en 2008 et 2015.

5.6.3. Canal commun

Les débits de l'Isère et du canal amont diminuant rapidement en 2015, il en va de même pour le canal commun. Cela explique que les sédiments sont repris plus lentement en 2015 qu'en 2008.

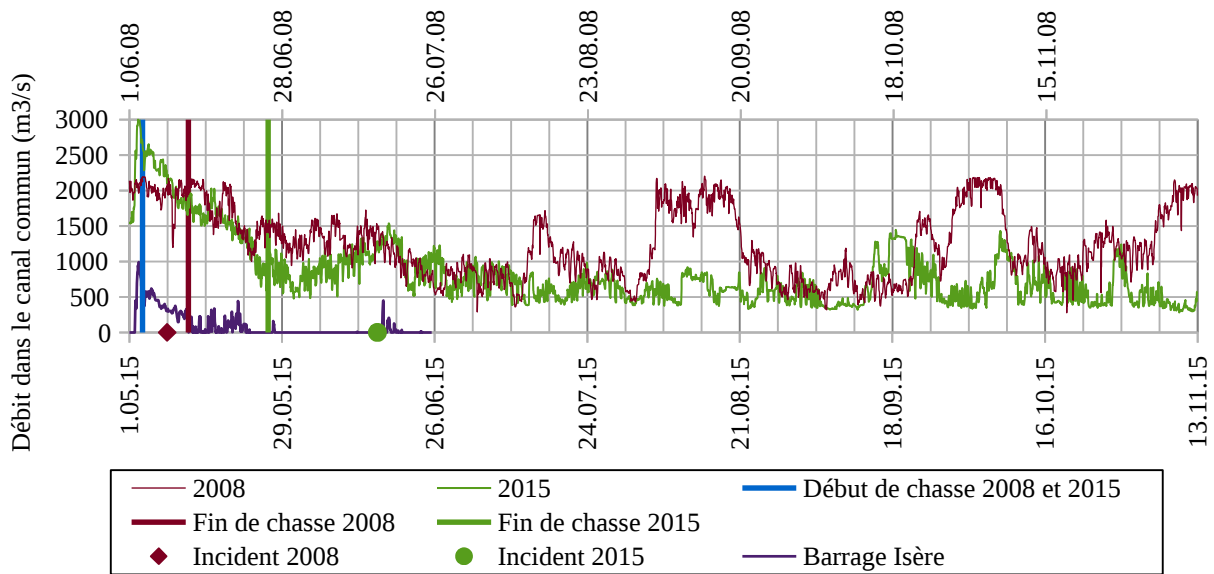


Figure 76: Comparaison des débits de 2008 et 2015 dans le canal commun. Les courbes sont superposées par rapport à l'ouverture du barrage

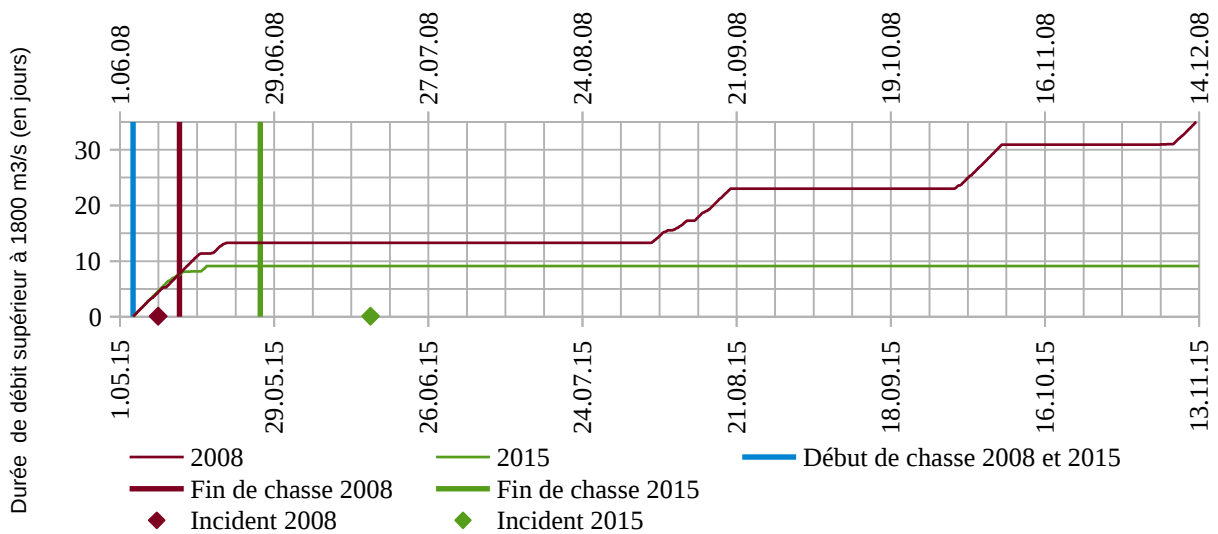


Figure 77: Durée cumulée de débit supérieur à 600 m³/s dans le canal commun en 2008 et 2015.

5.6.4. Canal aval

Dans le canal aval, du fait de l'ouverture du barrage Isère en 2015, les débits supérieurs à 1800 m³/s ne sont plus atteints encore plus tôt. Lorsque le barrage Isère est fermé, les débits sont les mêmes que ceux du canal commun

5.7. Conclusion

Les apports ont sans doute été proches en 2008 et en 2015, tant en volume qu'en granulométrie.

En début de chasse, les débits du Rhône étaient plus favorables à l'évacuation des sédiments en 2015 qu'en 2008. En 2015, les débits suffisants pour ouvrir le barrage Isère, ont sans doute permis d'éviter l'incident à l'usine rencontré en 2008 en évacuant une partie des sédiments vers le Vieux Rhône.

Cependant, la rapide diminution des débits à la fois de l'Isère et du Rhône en 2015, avant évacuation des sédiments déposés, n'a pas permis leur reprise comme cela avait été le cas en 2008.

6. MODÈLE SÉDIMENTAIRE 1D

6.1. Zone couverte par la modélisation 1D

La modélisation hydro-sédimentaire 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. En amont de la confluence Rhône-Isère, le modèle s'étend jusqu'en amont de Lyon afin de prendre en compte les apports de la Saône et du Rhône, en crue également au cours de l'événement. En aval de la confluence, le modèle s'étend jusqu'à la mer Méditerranée afin de bénéficier des mesures de concentration en MES faites sur le Grand Rhône à Barcarin (PK 316,5). Une vue d'ensemble de la zone couverte par le modèle est représentée sur la Figure 78.

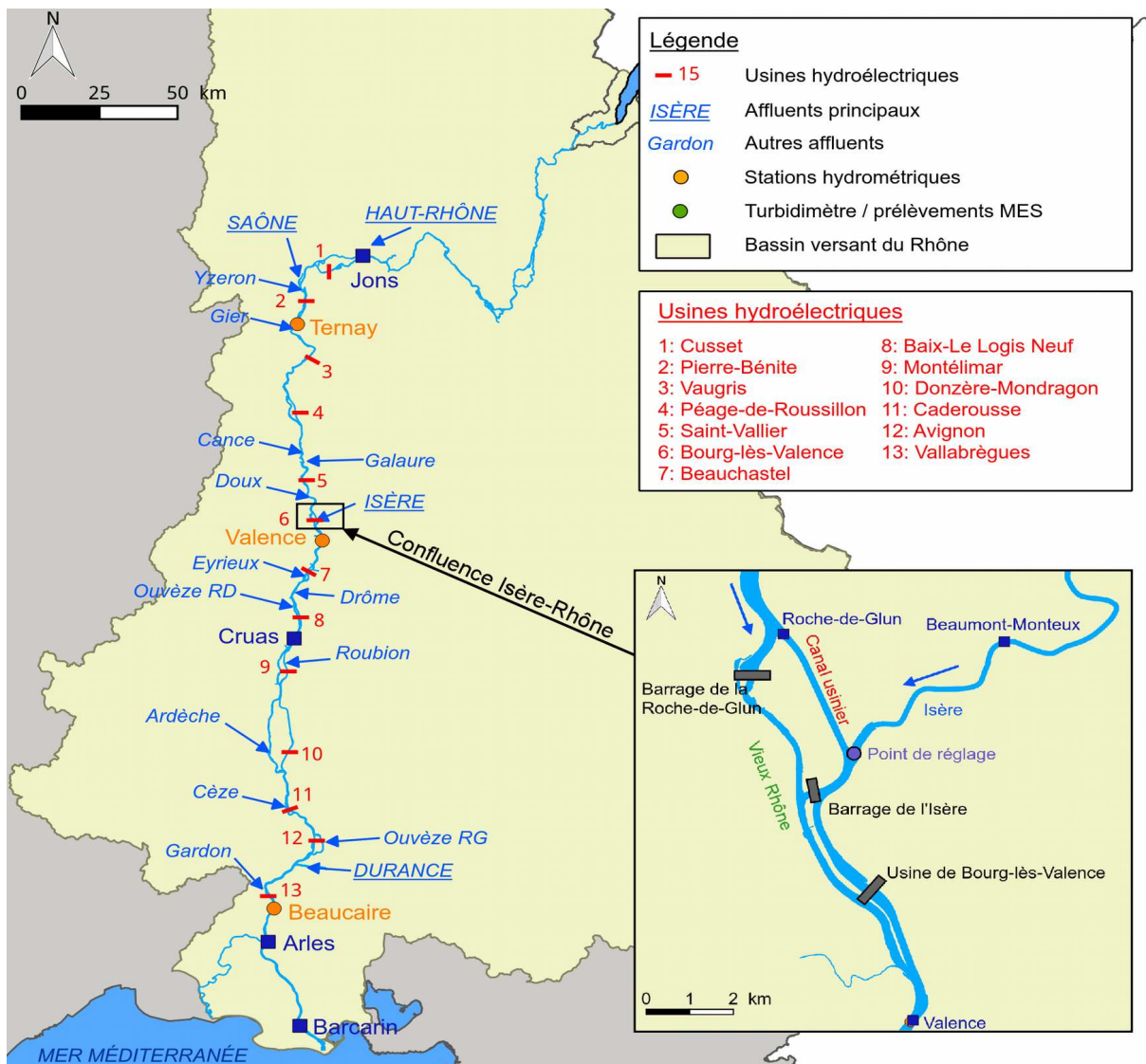


Figure 78: Plan de situation du bief modélisé avec ouvrages hydroélectriques et stations de mesure. Zoom sur la confluence Rhône-Isère et l'aménagement de Bourg-lès-Valence.

Les données bathymétriques utilisées ainsi que le calage, la validation du modèle et l'intégration des ouvrages hydroélectriques sont décrits dans le rapport « Étude de la dynamique hydro-sédimentaire au niveau de la confluence entre l'Isère et le Rhône » (Irstea, 2015) ainsi que dans le livrable de l'OSR4 (OSR4, 2015).

6.2. Simulation hydraulique de l'événement de mai 2015

6.2.1. Données hydrauliques utilisées

Les données hydrauliques utilisées dans le modèle 1D couvrent la période du 15/04/2015 jusqu'au 31/05/2015 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) étant la dernière station turbidimétrique sur le Rhône à l'amont de la confluence avec l'Isère, celle-ci a été choisie comme condition amont au modèle. De même, la condition amont des biefs de la Saône et de l'Isère sont respectivement les stations hydrométriques de Couzon (CNR) et de Beaumont-Monteux (CNR).

Le modèle couvre le linéaire du Rhône jusqu'à la mer Méditerranée. Le modèle inclut donc le delta du Rhône et deux conditions limites 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 l'aval sont supposés constants. L'influence des niveaux à la mer Méditerranée sur l'aménagement de Bourg-lès-Valence est de toute façon très limitée.

Les hydrogrammes utilisés dans le modèle hydraulique pour la simulation de la crue de mai 2015 sont représentés dans la Figure 79. Les débits mesurés à Jons sur le Rhône (amont Miribel-Jonage), à Couzon sur la Saône et à Beaumont-Monteux 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 durée de la chasse des barrages de la Basse-Isère. Aucune pointe de débit significative n'a été observé sur les affluents mineurs du Rhône au cours de cette période.

Trois périodes distinctes peuvent être observées. La première couvre la crue de l'Isère. La deuxième, du 03/05/2015 à 09h00 au 09/05/2015 à 9h00, couvre les chasses hydrauliques des barrages de la Basse-Isère. Enfin, à partir du 09/05/2015 à 9h00, les barrages de la Basse-Isère sont progressivement remplis.

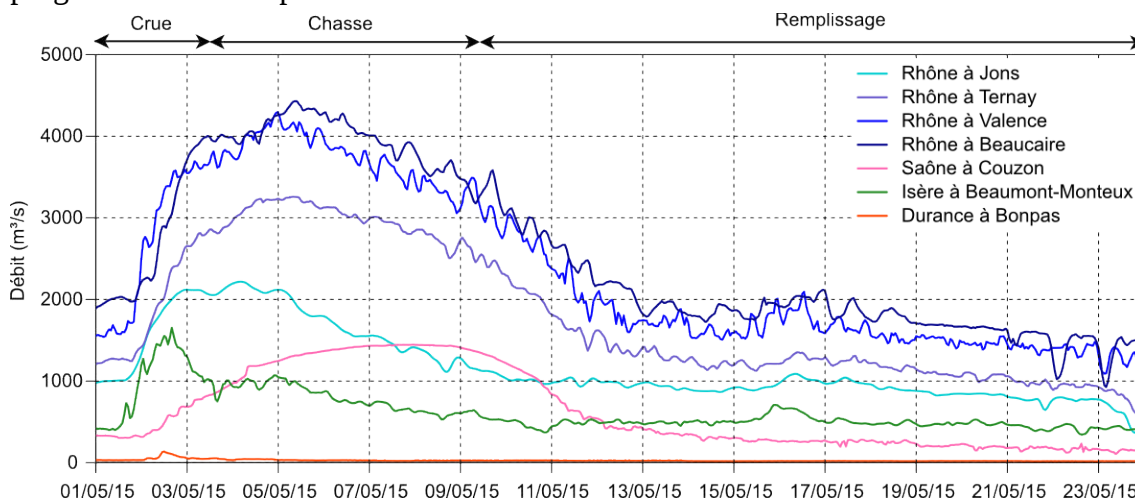


Figure 79 : Hydrogrammes du Rhône, de la Saône, de l'Isère et de la Durance au cours de l'événement de mai 2015.

6.2.2. Hydrogrammes simulés

L'événement de mai 2015 est simulé sur le linéaire du Rhône entre Jons (PK -26,75) et la mer Méditerranée afin de vérifier si la dynamique de l'écoulement est correctement reproduite ainsi que pour vérifier le respect des consignes d'aménagement.

Les résultats de la simulation hydraulique sont présentés dans la Figure 80. Les mesures effectuées aux stations hydrométriques de Ternay (Figure 80a), Valence (Figure 80b) et Beaucaire (Figure 80c) sont comparées aux résultats des simulations.

De manière générale, le modèle reproduit bien les tendances de l'hydrogramme mesuré, sans décalage temporel (calage correct des coefficients de frottement), et sans trop de petites variations (calage acceptable des aménagements). Les débits semblent légèrement surestimés par le modèle autour des pointes de débits de l'Isère et du Rhône.

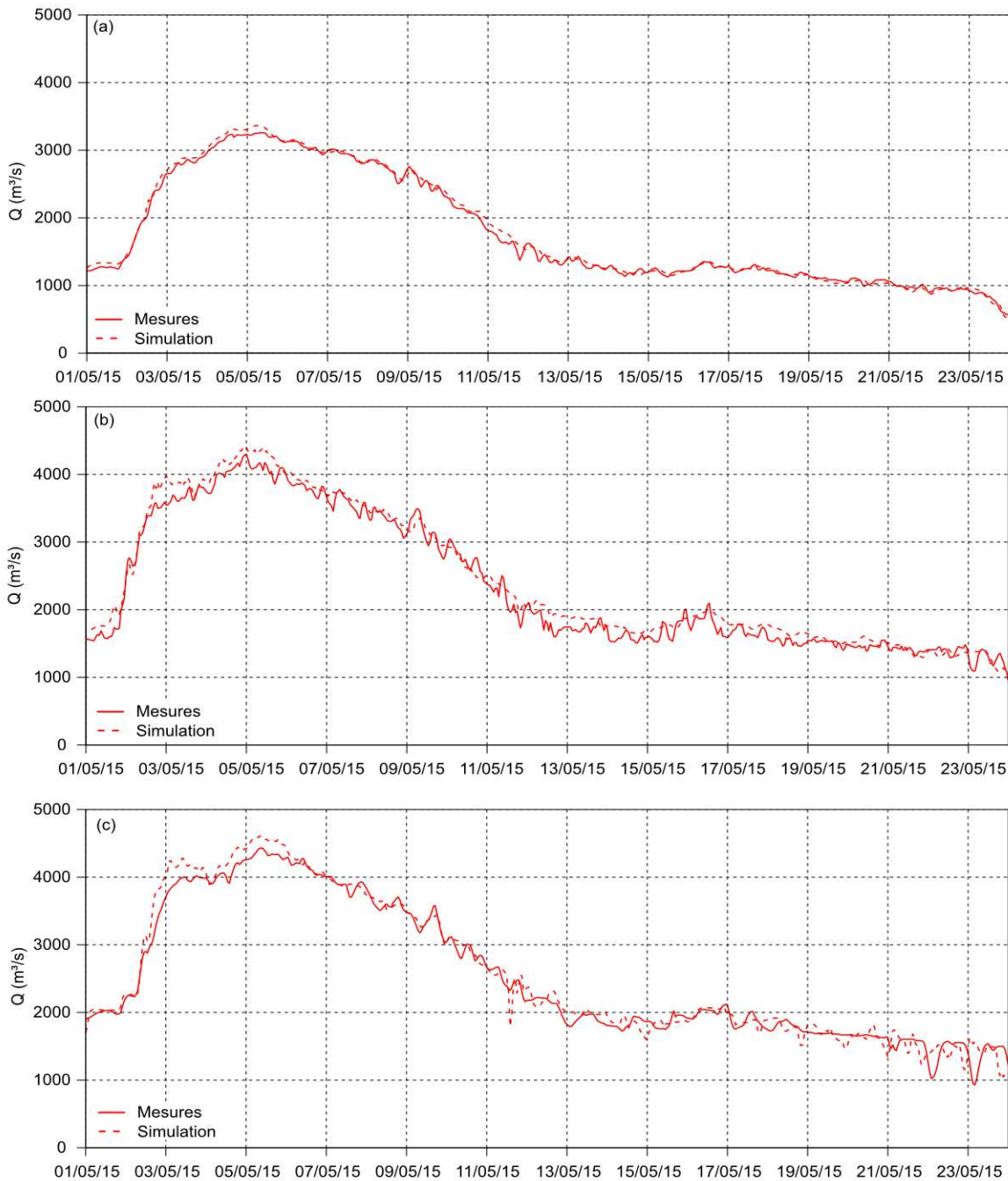


Figure 80 : Comparaison des hydrogrammes de l'événement de mai 2015 aux stations hydrométriques de (a) **Ternay** (PK 15,2), (b) **Valence** (PK 109,7) et (c) **Beaucaire** (PK 269,6).

6.2.3. Respect des consignes d'exploitation

Dans cette étude, les consignes mesurées sur l'aménagement de Bourg-lès-Valence ont été reproduites dans le modèle. Pour les autres aménagements, les consignes dites « automatiques » ont été conservées.

La Figure 81 présente les résultats du modèle hydraulique sur l'aménagement de Bourg-lès-Valence. La Figure 81a représente la répartition des débits dans les différents biefs de l'aménagement. Les résultats de la modélisation sont comparés aux mesures effectuées sur le barrage de La Roche-de-Glun, sur le barrage de l'Isère et sur l'usine de Beaumont-Montoux. Le débit réservé de 72 m³/s est correctement respecté dans le Vieux Rhône en aval du barrage de La Roche-de-Glun. Le débit maximum de 2200 m³/s à l'usine de Bourg-lès-Valence n'est pas dépassé au cours de la crue. Le barrage de l'Isère, quant à lui, évacue un débit proportionnel à celui de l'Isère (représenté dans la Figure 81b). La consigne automatique du barrage de l'Isère a été conservée et est correctement reproduite par le modèle numérique. En revanche, la consigne automatique du barrage de La Roche-de-Glun a dû être modifiée pour respecter les conditions de passage sur l'aménagement en cas de crue concomitante du Rhône et de l'Isère.

Le niveau d'eau dans la retenue est correctement reproduit au point de consigne PR2 (pont SNCF sur l'Isère, cf zoom Figure 78). La consigne automatique de l'usine de Beaumont-Montoux donne les règles suivantes :

- Niveau au PR2 : $Z = 116,94\text{m NGF}$ si $Q_{\text{Isère}} < 700\text{ m}^3/\text{s}$
- Niveau au PR2 : $Z = 116,79\text{ m NGF}$ si $Q_{\text{Isère}} \geq 700\text{ m}^3/\text{s}$

Cependant, les mesures montrent que le niveau au PR2 a été maintenu à 116,79 m NGF sur toute la durée de l'événement, bien que le débit de l'Isère ait été supérieur à 700 m³/s (Figure 81b). La consigne automatique du modèle numérique a donc été adaptée afin de respecter les observations.

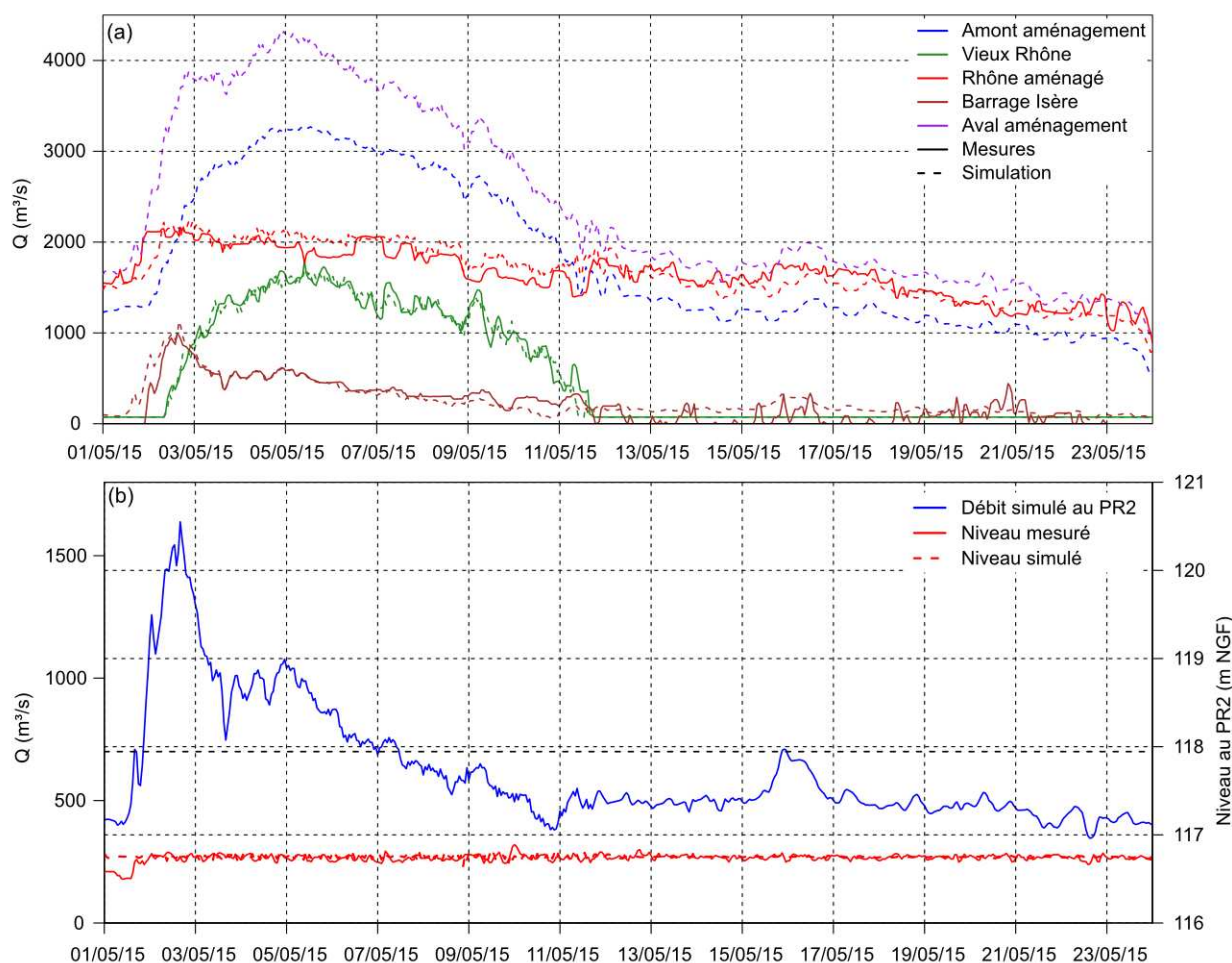


Figure 81 : Respect des consignes d'exploitation de l'aménagement de Bourg-lès-Valence : (a) Répartition des débits ; (b) Niveau d'eau dans la retenue.

6.2.4. Décomposition des hydrogrammes

Les premières simulations avec Adis-TS sur le tronçon modélisé sont faites en utilisant des solutés comme « traceur numérique » 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 à Ternay, Valence et Beaucaire sont présentés dans la Figure 82. A Ternay (Figure 82a), deux apports principaux se distinguent : le Rhône en provenance de Jons (en bleu) et la Saône (en rouge). Cette figure met en évidence la crue lente de la Saône (pic de crue arrondi) ainsi que les forts débits sur le Rhône.

À Valence (Figure 82b), les apports de l'Isère (en 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 82c), l'apport des affluents à l'aval de Valence est rajouté (dont l'Ar-dèche et la Durance). Quelques pics de débits peuvent être observés sur ces affluents avec des amplitudes très inférieures aux valeurs de débits observées sur l'Isère. Ces pics de débits sont observés à Beaucaire avant le pic de débit de l'Isère. Entre Valence et Beaucaire, l'hydrogramme n'est pas sensiblement modifié par les apports des affluents mineurs.

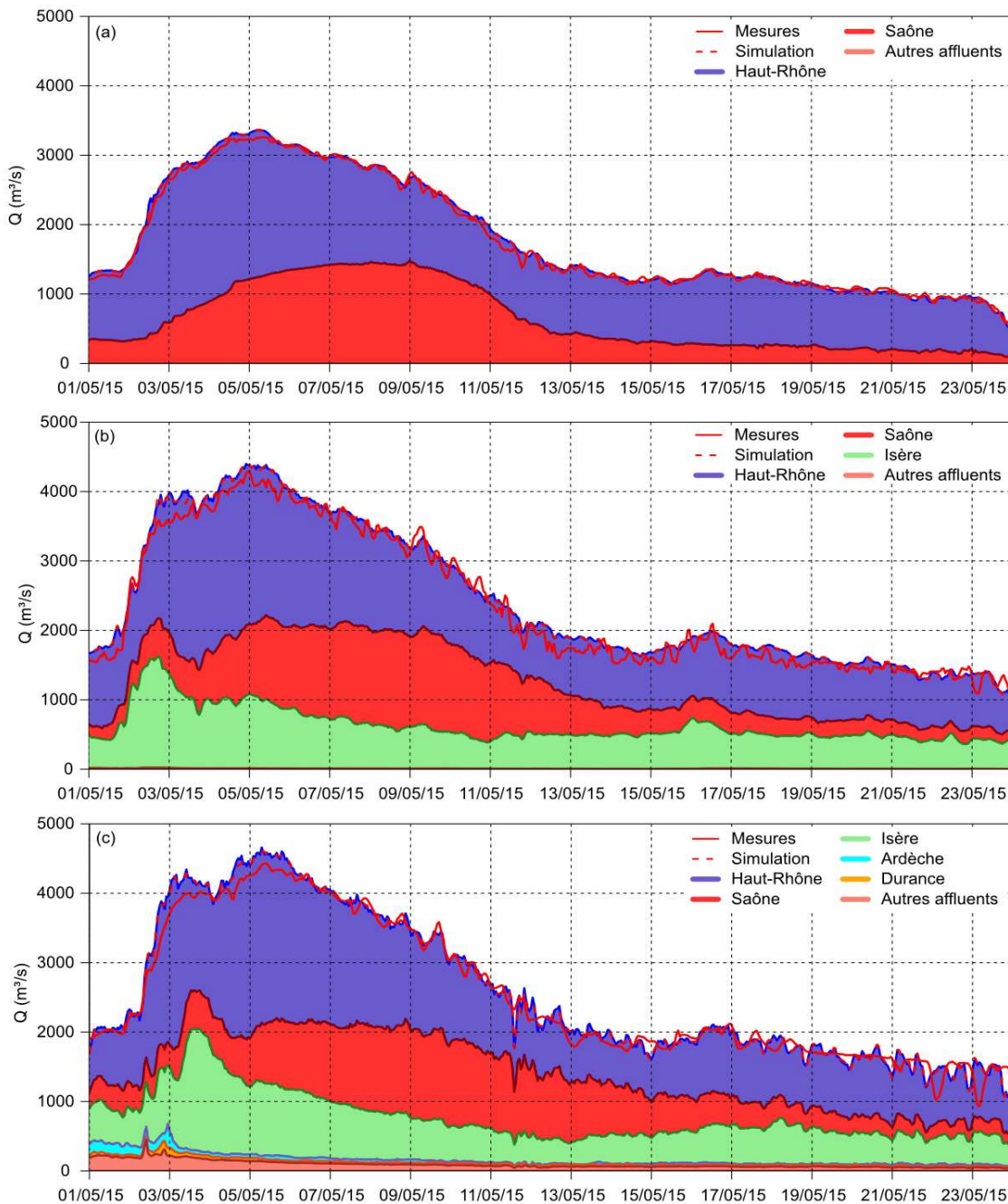


Figure 82: Décomposition des hydrogrammes pour l'événement de mai 2015 aux stations hydrométriques de (a) **Ternay** (PK 15,2), (b) **Valence** (PK 109,7) et (c) **Beaucaire** (PK 269,6).

6.3. Simulation hydro-sédimentaire de l'événement de mai 2015

6.3.1. Conditions limites amont du modèle

Sur la période étudiée, les concentrations en MES ont été mesurées sur les stations turbidimétriques Irstea de St-Georges (Saône) et de Jons (Rhône). Ces données sont disponibles via l'application BDOH.

La turbidité de l'eau provenant de l'Isère est acquise au pas de temps horaire à la station de Beaumont-Monteux (EDF). L'analyse du chapitre 4.4 a permis de quantifier plus finement les flux de

MES à Beaumont-Monteux. Cependant, la modélisation présentée dans cette section ayant été réalisée avant, elle a été effectuée avec la relation MES/turbidité établie par EDF sur l'épisode de la chasse via des prélèvements d'eau (filtration, séchage et pesée des échantillons) :

$$\text{Taux de MES} = 1,89 * \text{Turbidité}$$

Aucun prélèvement n'a été fait pendant la crue de l'Isère. Par conséquent, le coefficient de calage de la relation MES/Turbidité estimé 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. Malheureusement, aucune mesure de granulométrie n'a été faite à la station de Beaumont-Monteux.

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).

Deux turbidimètres sont disponibles aux stations de Cruas et de Barcarin. Le calage de la relation MES/Turbidité de Cruas a été fait d'après les résultats de la modélisation (Rhône 1D) des laves torrentielles de l'Arc-en-Maurienne en juillet-août 2014. Une relation avec un coefficient de 1,89 (similaire à celui de Beaumont-Monteux) donne des résultats corrects.

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 :

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

Les concentrations en MES utilisées dans le modèle comme condition d'entrée et comme données de validation sont représentées dans la Figure 83.

La concentration en MES mesurée sur l'Isère est nettement plus importante que celles mesurées sur le Rhône et sur la Saône (Figure 83b). Ainsi, l'importance des apports se fait clairement ressentir entre les stations de Jons et de Cruas (Figure 83a). Les concentrations sur le Rhône sont plus faibles à Barcarin qu'à Cruas, montrant qu'une partie des apports en MES s'est déposée dans le réseau.

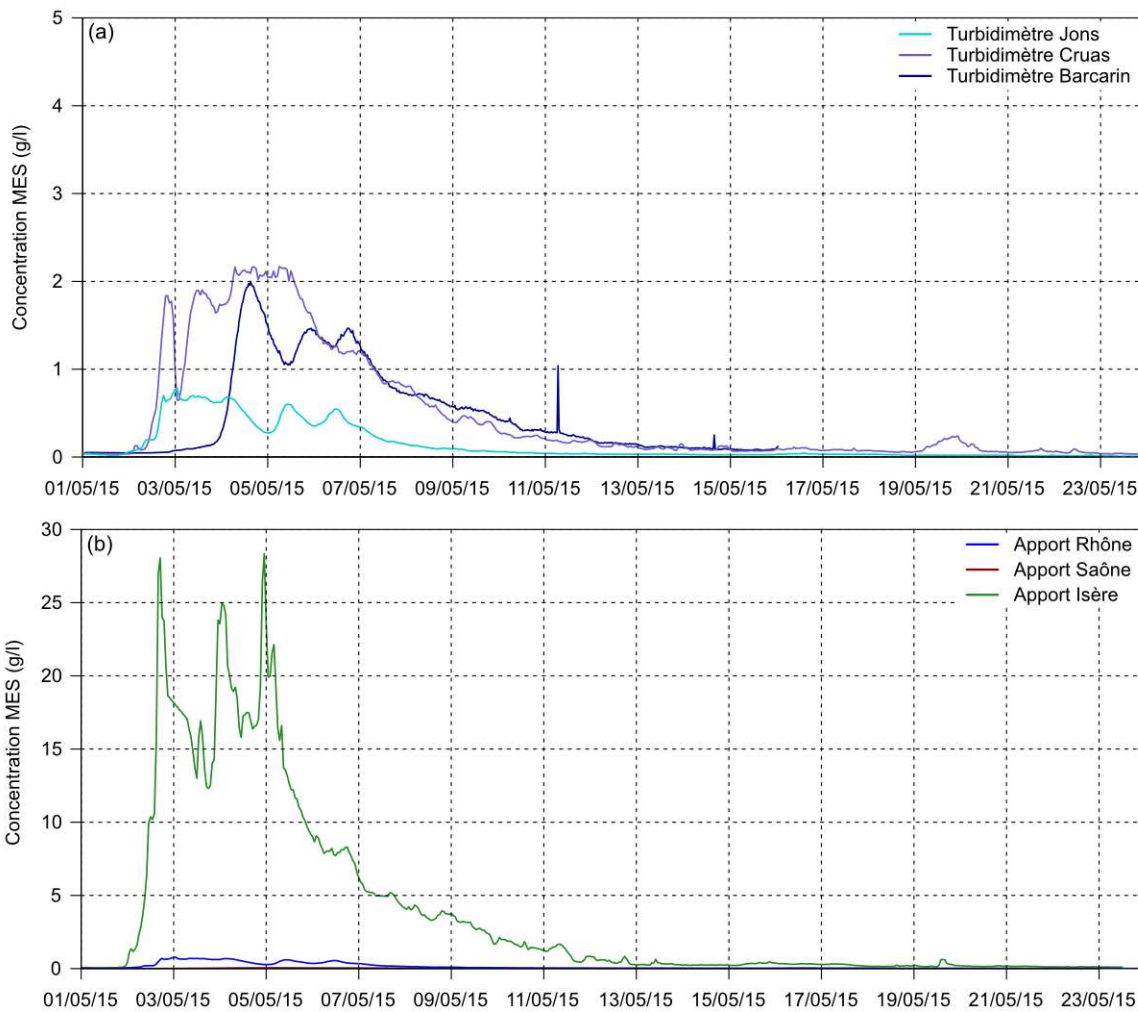


Figure 83: Chroniques de concentration en MES (a) sur le Rhône, (b) utilisées comme condition amont du modèle numérique.

Dans les sections suivantes, les résultats des simulations sont comparés aux mesures faites aux stations turbidimétriques de Cruas (EDF) et de Barcarin (Cerege) ainsi qu'aux prélèvements faits à La Roche-de-Glun et à Pont-de-Valence (EDF).

6.3.2. Transport des matières en suspension sans dépôt / reprise

La première simulation hydro-sédimentaire a été faite en utilisant les chroniques de concentration présentées dans la Figure 5b. 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 84 et comparés aux mesures de MES disponibles.

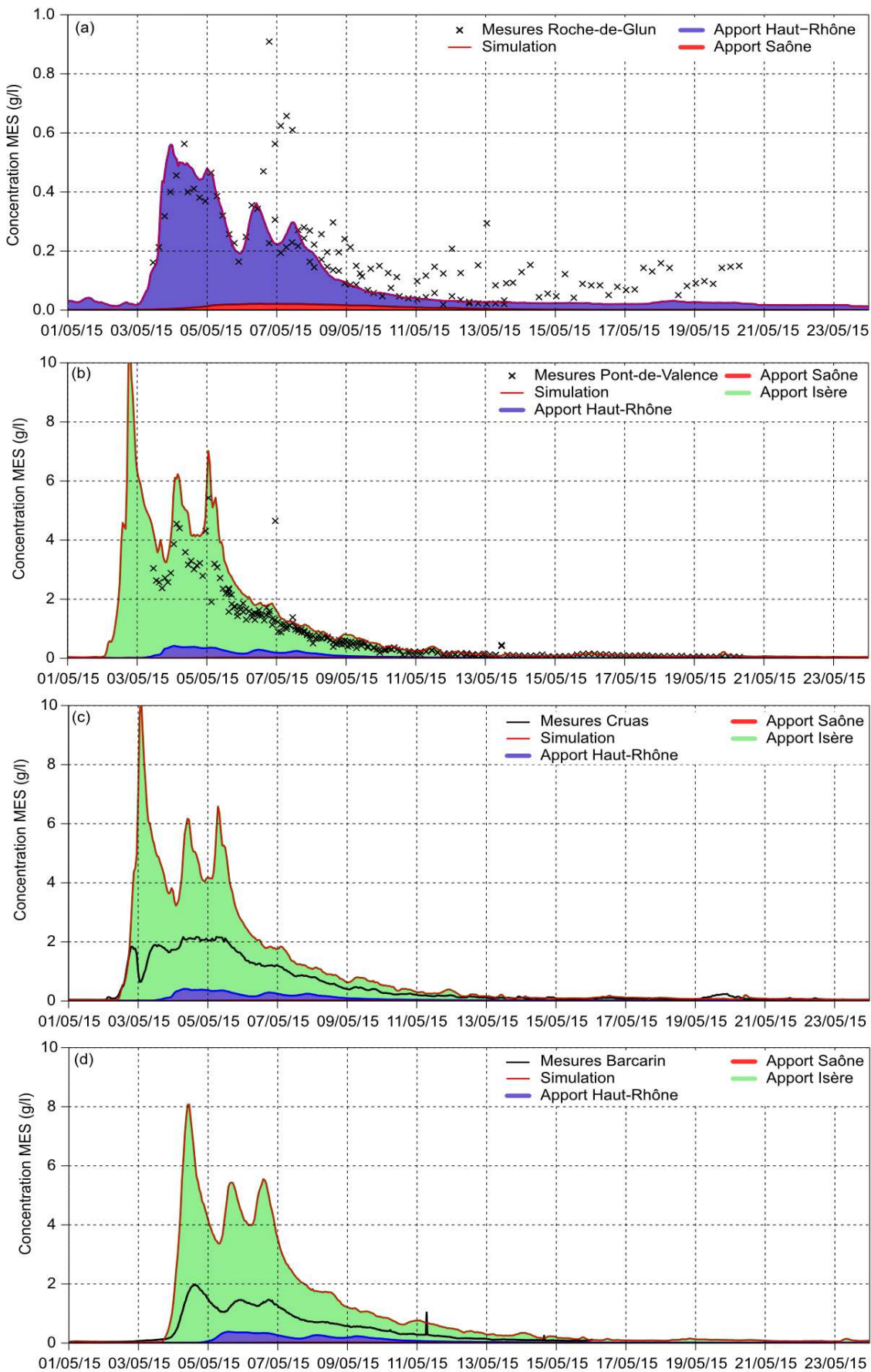


Figure 84: Comparaison des mesures avec les résultats des simulations sans dépôt ni reprise. Résultats à (a) **La Roche-de-Glun**, (b) **Pont-de-Valence**, (c) **Cruas** et (d) **Barcarin**.

La comparaison des mesures et des simulations à La Roche-de-Glun (Figure 84a) 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, Cruas et Barcarin) présentent des concentrations inférieures aux résultats des simulations sans dépôt ni érosion (Figure 84b, Figure 84c et Figure 84d). 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.

La mesure faite à Cruas semble peu fiable (Figure 84c). En effet, les pics de concentration observables à Pont-de-Valence mais également à Barcarin ne sont pas observés à Cruas (concentration plafonnée à 2 g/l). Il est possible que le turbidimètre ait saturé. D'après les informations communiquées par EDF, le turbidimètre se trouve sur le circuit de pompage de la centrale de Cruas et par conséquent les mesures de concentration provenant de cette station ne sont pas pertinentes pour l'étude de la propagation des MES dans le Rhône.

Ces résultats ne permettent pas de tirer des conclusions quant à la granulométrie des sédiments ayant transités au cours de la chasse et de la crue. D'après EDF (2015), le premier pic de MES est la conséquence de plusieurs phénomènes se superposant : la crue naturelle de l'Isère avec un transit sédimentaire important (plus de 10 g/l à Grenoble le 02/05/2015) ; la chasse du barrage de St-Egrève ayant débuté le 02/05/2015 (risque inondation de l'agglomération de Grenoble) ; les abaisssements des retenues de Pizanon et de La Vanelle, effacées pour respecter les niveaux d'eau en crue.

Ces premiers résultats montrent qu'une simulation avec dépôt et reprise des sédiments 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.

6.3.3. Transport des matières en suspension avec dépôt / reprise

La deuxième simulation hydro-sédimentaire reprend la procédure décrite ci-dessus 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 de l'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 6a). Par conséquent, les MES du Rhône et de la Saône sont modélisées par du limon fin (Tableau 1).

Tableau 1 : Granulométries choisies pour représenter les différents sédiments provenant de l'Isère passant au cours de la chasse et de la crue.

| Type | d_{50} (μm) | Granulométrie Crue [%] | Granulométrie Chasse [%] |
|---|----------------------------|------------------------|--------------------------|
| Argile (1 – 10 μm) | 4 | 25 | 15 |
| Limon fin (10 – 27 μm) | 15 | 44 | 10 |
| Limon grossier (27 – 80 μm) | 45 | 23 | 36 |
| Sable très fin (80 – 160 μm) | 90 | 5 | 33 |
| Sable fin (160 – 300 μm) | 200 | 3 | 5 |
| Sable grossier (300 – 500 μm) | 400 | 0 | 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 (Irstea, 2015) a été réutilisée. Cette double-granu-

lométrie 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 rappelés dans le Tableau 1.

Les résultats des simulations avec dépôt et reprise en utilisant les granulométries du Tableau 1 sont disponibles dans la Figure 85. 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 ni reprise (Figure 85a). 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 ni reprise.

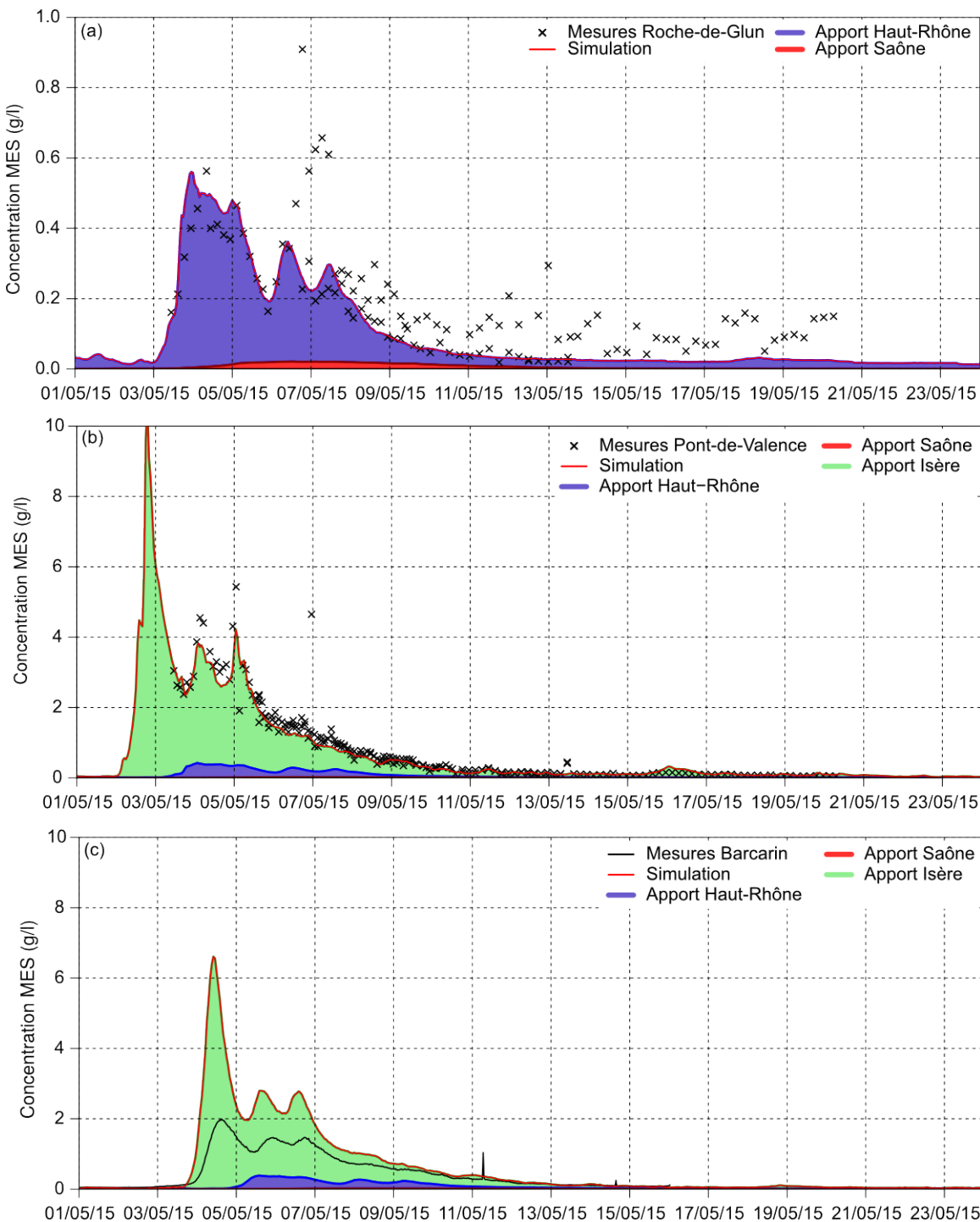


Figure 85: Comparaison des mesures avec les résultats des simulations avec dépôt et reprise. Résultats à (a) La Roche-de-Glun, (b) Pont-de-Valence et (c) Barcarin.

Les résultats de la simulation sur la chasse à la station de Pont-de-Valence (Figure 85b) sont plus proches des mesures. Une partie des sédiments s'est donc déposée dans la retenue de Bourg-lès-Valence pendant la chasse.

En revanche, les résultats de la simulation surestiment les concentrations en MES à Barcarin (Figure 85c). 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-Monteux est plus grossière que celle choisie pour le modèle (Tableau 1). Néanmoins, en utilisant une granulométrie plus grossière à Beaumont-Monteux, 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-Monteux 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 hydro-sédimentaires du modèle est à corriger. En effet, les paramètres hydro-sédimentaire 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 la modélisation de l'événement de mai-juin 2008 (Irstea, 2015). Il serait nécessaire de valider ce calage sur plusieurs événements.

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

6.4. Sensibilité du modèle au fonctionnement des ouvrages

Pour les deux dernières chasses des barrages de la Basse-Isère (mai/juin 2008 et mai 2015), le modèle numérique 1D a été testée avec les consignes de Bourg-lès-Valence en fonctionnement « automatique » (réglage des ouvrages en fonction des débits entrants) et en fonctionnement « temporel » (réglage des ouvrages pour respecter les grandeurs mesurées).

L'influence de ces deux types de fonctionnement sur les flux de MES et sur les quantités de sédiments déposés est étudiée ci-dessous.

6.4.1. Événement de mai 2015

Pour l'événement de mai 2015, les résultats présentés ci-dessus ont été obtenus en utilisant le modèle 1D avec les règles de gestion des ouvrages « temporelles » (Section 6.2.3).

Cette partie permet de comparer les résultats obtenus avec les deux types de gestion de l'aménagement de Bourg-lès-Valence (automatique et temporel). Les résultats sur la répartition des débits ainsi que sur la gestion du niveau d'eau dans la retenue de Bourg-lès-Valence au PR2 sont présentés respectivement dans la Figure 86 et dans la Figure 87.

Les débits passant par le barrage de l'Isère sont bien représentés par le modèle numérique en mode « automatique » (Figure 86a). Son fonctionnement n'est donc pas modifié pour l'élaboration de la consigne temporelle. En revanche, le débit passant par le barrage de La Roche-de-Glun ne correspond pas avec celui mesuré. En effet, le modèle sous-estime les débits passant au barrage de La Roche-de-Glun et par conséquent sur-estime les débits à l'usine de Bourg-lès-Valence.

La consigne « temporelle » est construite de manière à reproduire au mieux les mesures. Ainsi, les écarts de débits observés au barrage de La Roche-de-Glun et à l'usine de Bourg-lès-Valence sont correctement reproduits par le modèle avec les consignes temporelles (Figure 86b).

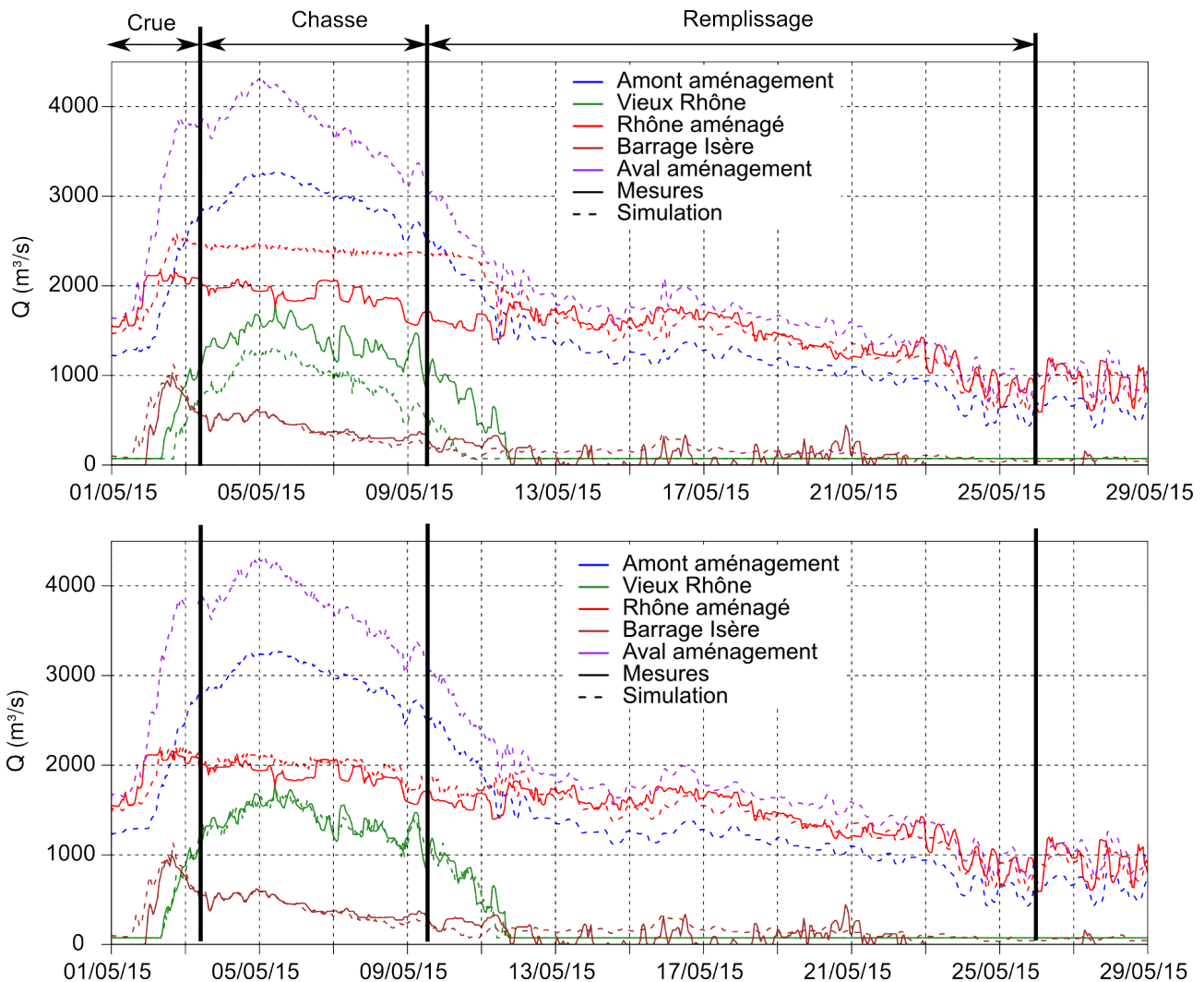


Figure 86: Comparaison des résultats du modèle avec les mesures pour des consignes (a) « automatiques » et (b) « temporelles ». Impact sur la répartition des débits dans l'aménagement de Bourg-lès-Valence pendant l'événement de mai 2015.

La comparaison des règles de gestion sur la hauteur d'eau au PR2 (Pont SNCF sur l'Isère) de Bourg-lès-Valence est représenté dans la Figure 87. Le réglage du niveau en mode automatique dépend du débit de l'Isère :

- Niveau au PR2 : $Z = 116,94$ m NGF si $Q_{\text{Isère}} < 700$ m³/s
- Niveau au PR2 : $Z = 116,79$ m NGF si $Q_{\text{Isère}} \geq 700$ m³/s

Ces deux consignes sont bien respectées par le modèle (Figure 87a) en mode « automatique ». En revanche, le niveau simulé ne correspond pas avec le niveau mesuré qui reste constant à 116,79 m NGF sur toute la durée de l'événement. Par conséquent, la consigne temporelle fixe le niveau d'eau au PR2 à 116,79 m NGF (Figure 87b).

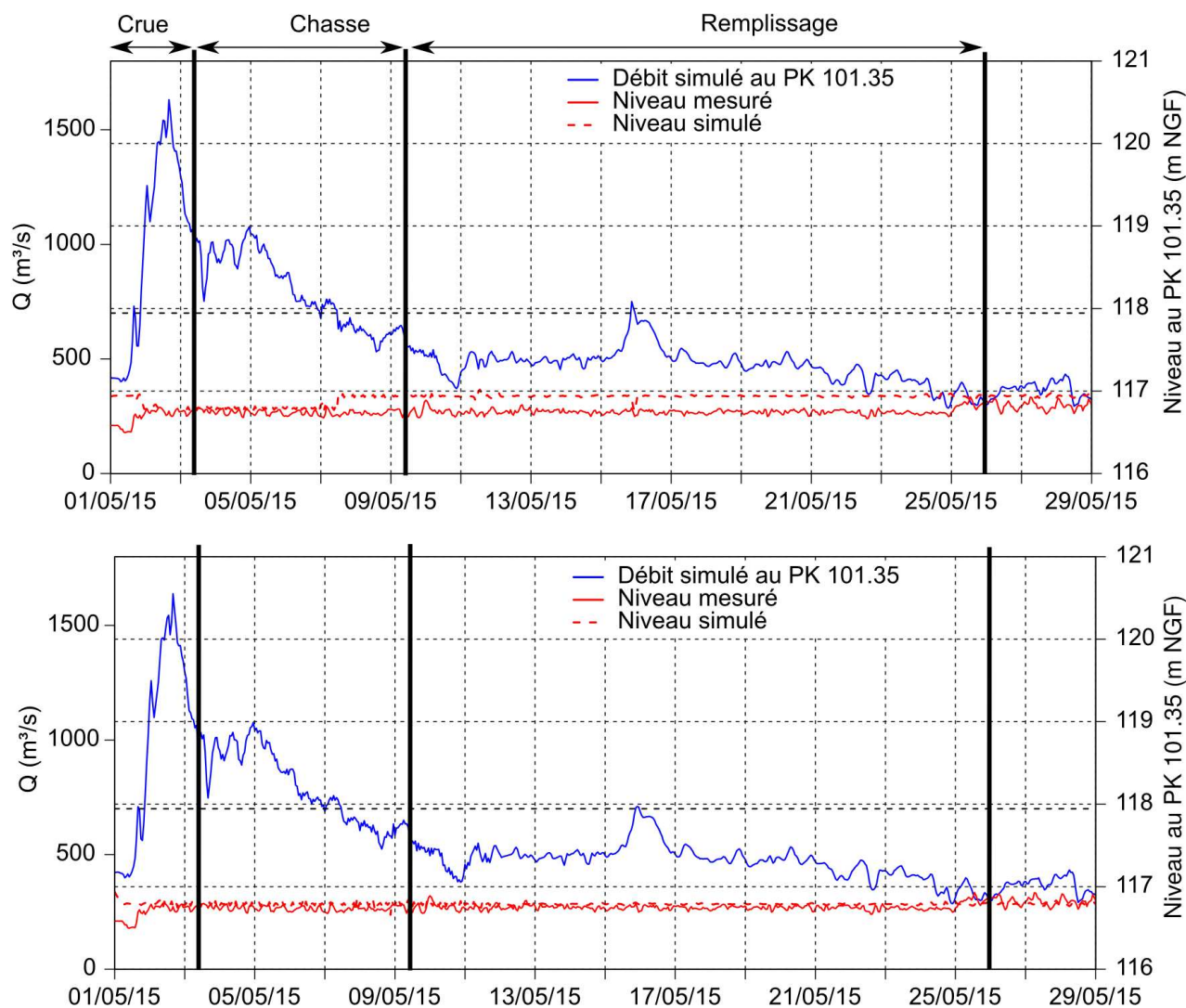


Figure 87: Comparaison des résultats du modèle avec les mesures pour des consignes (a) « automatiques » et (b) « temporelles ». Impact sur les hauteurs d'eau dans la retenue de Bourg-lès-Valence pendant l'événement de mai 2015.

Les simulations de transport de MES avec dépôt/érosion ont été faites pour les deux types de consigne de régulation de l'ouvrage de Bourg-lès-Valence. Les résultats sont présentés dans la Figure 88. La localisation des dépôts est similaire pour les deux simulations. Les dépôts de MES se retrouvent principalement dans l'Isère entre Beaumont-Monteux et la confluence (7,15 Mt), dans le canal usinier aval (0,69 Mt pour la régulation automatique et 0,74 Mt pour la régulation temporelle), ainsi que dans le canal usinier de Beauchastel (0,31 Mt).

La quantité de MES en sortie de l'aménagement est de 4,71 Mt pour la régulation automatique et de 4,75 Mt pour la régulation temporelle. Ces deux valeurs sont proches et correspondent à environ 66 % du flux total entrant. 34 % des sédiments mesurés à Beaumont-Monteux se sont donc déposés dans les aménagements de Bourg-lès-Valence et de Beauchastel.

La répartition granulométrique des dépôts ne varie pas selon les consignes. En sortie du modèle, les sédiments sont essentiellement composés d'argile et de limons fins. Les sables se retrouvent dans les trois dépôts principaux et ne sont quasiment plus observables en sortie de Beauchastel.

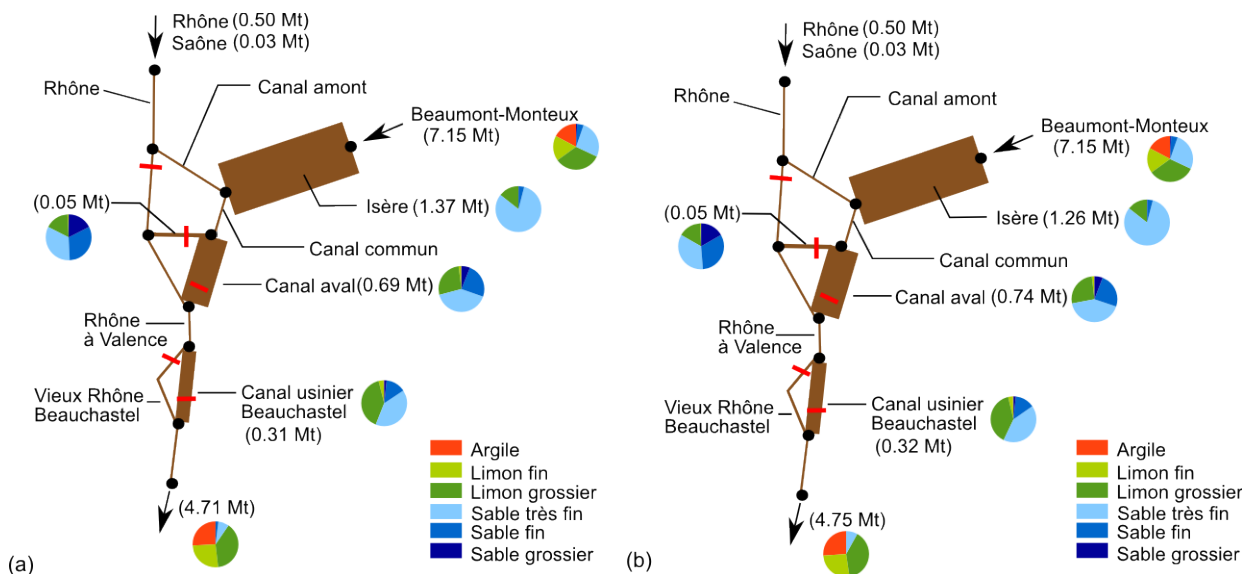


Figure 88: Étude de sensibilité aux consignes d'ouvrage de Bourg-lès-Valence : (a) régulation automatique et (b) régulation temporelle. Dépôt total de MES obtenus par simulation entre le 14/04/2015 et le 31/05/2015. Les volumes entrant à Beaumont-Montoux et sortant à l'aval de Beauchastel sont également indiqués. Épaisseur des traits proportionnelle au dépôt de MES. Les camemberts indiquent la proportion de chaque classe de sédiments au sein des dépôts et des apports.

6.4.2. Événement de mai-juin 2008

Les simulations présentées dans le premier rapport de l'étude sur la confluence Isère (Irstea 2015) ont été reprises. Celles-ci avaient été réalisées uniquement en fonctionnement « automatique » car les mesures de débits et de hauteurs d'eau de l'aménagement de Bourg-lès-Valence n'étaient alors pas disponibles.

Les mesures transmises par la CNR en 2016 incluent :

- les débits horaires au barrage de La Roche-de-Glun, au barrage de l'Isère et à l'usine de Bourg-lès-Valence.
- les hauteurs d'eau horaires au PR2 (Pont SNCF sur l'Isère).

Ces mesures ont permis d'établir des consignes « temporelles » pour le modèle. Les résultats du modèle numérique en mode « automatique » et en mode « temporel » sont comparés dans la Figure 89 pour la répartition des débits et dans la Figure 13 pour les niveaux d'eau de la retenue de Bourg-lès-Valence au PR2.

Les mesures de débit sur les différents ouvrages de l'aménagement de Bourg-lès-Valence montrent que les consignes automatiques du modèle ne sont pas adaptées pour cet événement (Figure 89a). En effet, les débits au barrage de l'Isère sont surestimés sur toute la durée de l'événement. Par conséquent, les débits à l'usine de Bourg-lès-Valence sont sous-estimés. De même, le modèle « automatique » ne fait passer que le débit réservé au barrage de La Roche-de-Glun. Les mesures montrent pourtant que celui-ci a été ouvert entre le 08/06/08 et le 12/06/08. Une consigne temporelle a donc été construite pour le barrage de La Roche-de-Glun et le barrage de l'Isère (Figure 89b).

Pour les niveaux d'eau au PR2, le modèle reproduit bien les mesures avec la consigne automatique (Figure 90a). Les mesures montrent que le niveau au PR2 a été conservé à 116,79 m NGF sur toute

la durée de l'événement. Par conséquent, la consigne temporelle force cette conservation du niveau, particulièrement sur la période entre le 09/06/08 et le 11/06/08 où les débits de l'Isère étaient faibles (Figure 90b).



Figure 89: Comparaison des résultats des consignes (a) « automatiques » et (b) « temporelles ». Impact sur la répartition des débits dans l'aménagement de Bourg-lès-Valence pendant l'événement de mai-juin 2008.

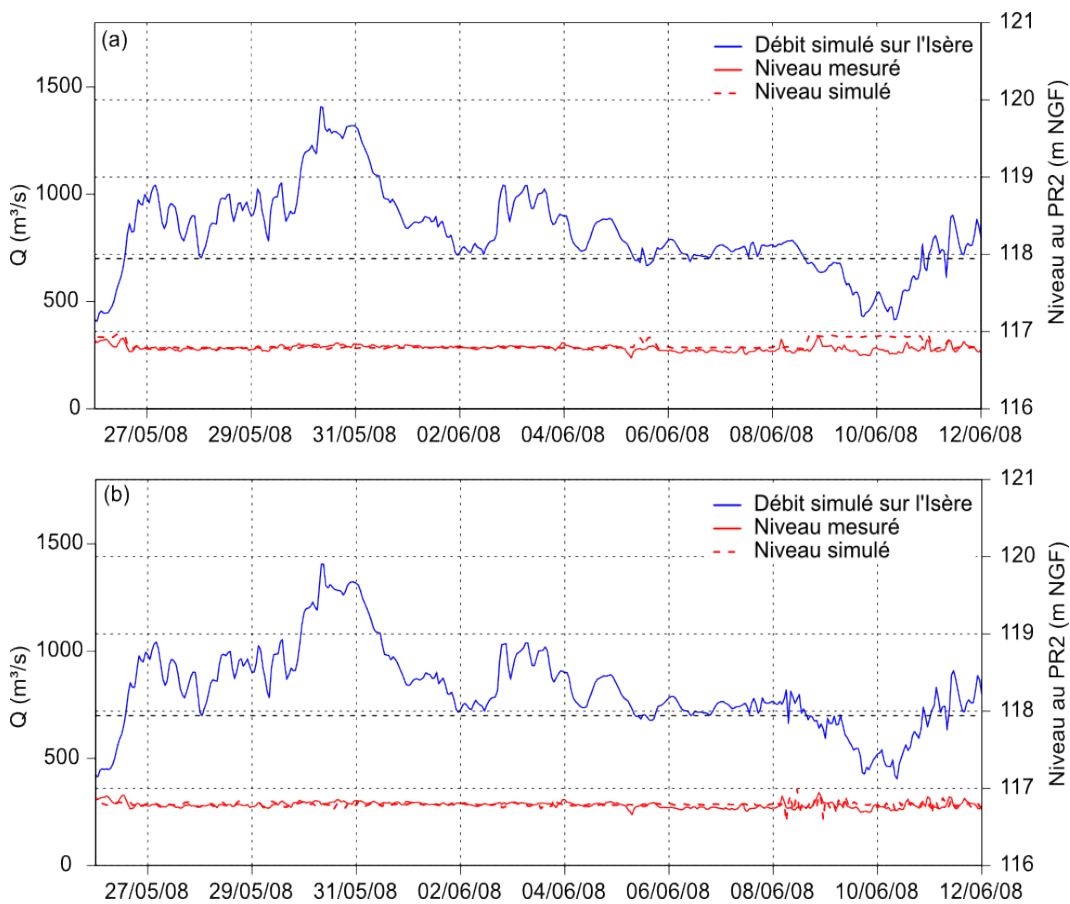


Figure 90: Comparaison des résultats des consignes (a) « automatiques » et (b) « temporelles ». Impact sur les hauteurs d'eau dans la retenue de Bourg-lès-Valence pendant l'événement de mai-juin 2008.

L'impact des deux types de consignes sur le transport de MES est présenté sur la Figure 91. Peu de différences sont observables entre ces deux cas. La fermeture du barrage de l'Isère pendant la majeure partie de l'événement entraîne un dépôt moins important à l'amont de l'usine de Bourg-lès-Valence (1,11 Mt lorsque le barrage Isère est ouvert contre 0,93 Mt lorsque le barrage Isère est fermé). Ce résultat est cohérent. En effet, lorsque le barrage Isère est fermé, le débit est plus important dans le canal usinier aval et à niveau égal, les vitesses sont plus importantes.

Le sédiment qui ne s'est pas déposé dans l'aménagement de Bourg-lès-Valence se dépose dans l'aménagement de Beauchastel. Ainsi, entre les consignes automatique et temporelle, le dépôt a augmenté de 0,03 Mt dans le canal usinier de Beauchastel et de 0,01 Mt dans le Vieux Rhône.

Le flux de sédiment en sortie du modèle est plus important avec les consignes temporelles qu'avec les consignes automatiques (augmentation de 0,12 Mt). Les consignes ont donc un impact important sur le flux de sédiment au sein du modèle ainsi que sur la répartition des dépôts.

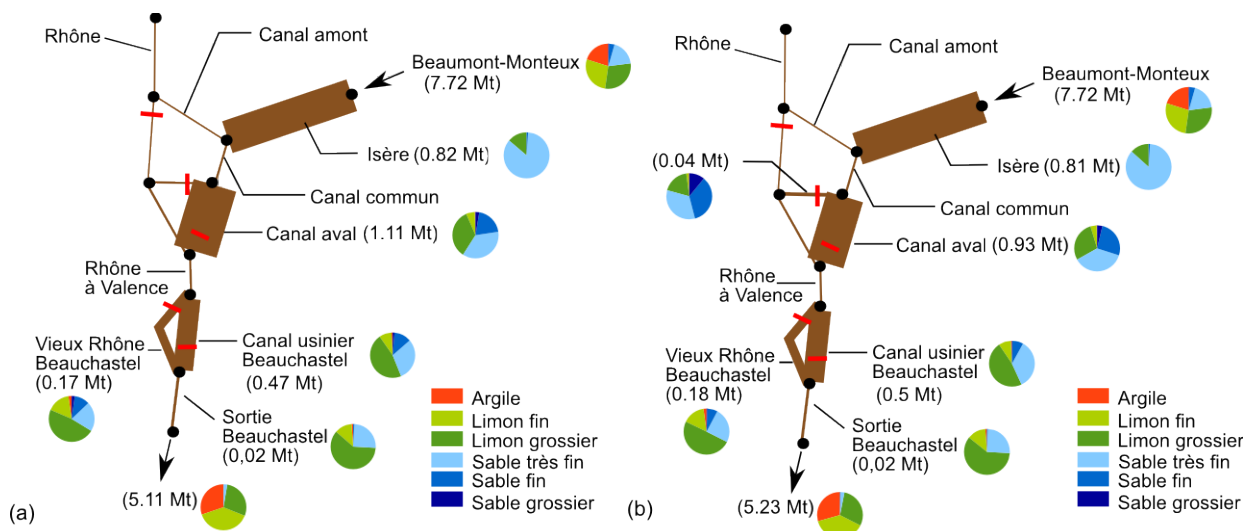


Figure 91: Étude de sensibilité aux consignes d'ouvrage de Bourg-lès-Valence : (a) régulation automatique et (b) régulation temporelle. Dépôt total de MES obtenu par simulation entre le 26/05/2008 et le 12/06/2008. Les volumes entrant à Beaumont-Montoux et sortant à l'aval de Beauchastel sont également indiqués. Épaisseur des traits proportionnelle au dépôt de MES. Les camemberts indiquent la proportion de chaque classe de sédiments au sein des dépôts et des apports.

6.5. Conclusions sur la modélisation 1D

L'événement de mai 2015 a été reproduit et simulé avec le modèle 1D du Rhône entre Lyon et la mer Méditerranée. Les principaux résultats des simulations sont les suivants :

- La crue de l'Isère a été concomitante avec une crue du Rhône (crue centennale sur l'Arve). Les débits provenant de la Saône (en crue également) sont arrivés à Bourg-lès-Valence pendant la période des chasses de la Basse-Isère. Les sédiments mesurés à La Roche-de-Glun correspondent aux apports du Rhône à la station de Jons. Ces deux mesures montrent qu'il n'y a pas eu de dépôt entre Jons et La Roche-de-Glun. Les sédiments en provenance du Rhône sont soit des argiles, soit des limons très fins. Par conséquent, ils n'ont pas pu se déposer dans la retenue de Bourg-lès-Valence.

- Les simulations avec transport sédimentaire ont montré qu'il y a bien eu du dépôt dans l'aménagement de Bourg-lès-Valence. Les mesures de concentration en MES correspondent avec les résultats de la simulation à la station de Pont-de-Valence. Néanmoins, les concentrations sont surestimées à la station de Barcarin, montrant ainsi que le modèle sous-estime le dépôt dans certains aménagements. Sur les flux de MES mesurés à Beaumont-Montoux, 66 % sont évacués à la sortie de l'aménagement de Beauchastel et 34 % ont été piégés dans les retenues de Bourg-lès-Valence et de Beauchastel.

- Les tests de sensibilité du modèle aux consignes de gestion des ouvrages montrent l'importance de celles-ci sur les flux de MES. L'emplacement des dépôts n'est pas modifié mais la quantité varie avec les débits et les hauteurs d'eau dans l'aménagement de Bourg-lès-Valence. La granulométrie des sédiments piégés dans les dépôts ne semblent pas varier avec les consignes.

Enfin, pour les prochains événements, il serait important de connaître la granulométrie des échantillons prélevés à Beaumont-Montoux et aux différentes stations pour ne pas avoir à faire d'hypothèse sur ces paramètres importants dans la modélisation.

7. CONSTRUCTION DU MODÈLE SÉDIMENTAIRE 2D

7.1. Code de calcul utilisé

La modélisation 2D horizontale (moyennée sur la hauteur d'eau) a été réalisée grâce au code de calcul Rubar20 développé par André Paquier (Paquier, 2013).

Rubar20 permet de réaliser tout calcul hydraulique découlant des équations de Barré de Saint-Venant bidimensionnelles :

$$\text{conservation de la masse} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = 0 \quad \text{Eq. 13}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hU}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hU^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (hUV) = \\ -gh \frac{\partial z_f}{\partial x} - g \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{K_s^2 h^{1/3}} + D \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial U}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad \text{Eq. 14}$$

conservation de la quantité de mouvement (selon x et y)

$$\begin{aligned} \frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (hUV) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hV^2 + \frac{gh^2}{2} \right) = \\ -gh \frac{\partial z_f}{\partial y} - g \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{K_s^2 h^{1/3}} + D \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad \text{Eq. 15}$$

avec : $h = z - z_f$ la hauteur d'eau, z la cote de la surface libre (m), z_f la cote du fond (m), U (respectivement V) la vitesse selon l'axe Ox (respectivement Oy) moyennée sur la verticale (m/s), g l'accélération de la pesanteur (m/s^2), D est une constante de viscosité (m^2/s), et K_s est le coefficient de Strickler global ($m^{1/3}/s$).

La résolution des équations s'effectue selon un schéma explicite en volumes finis, c'est-à-dire que la solution discrète x^{n+1} déterminée à l'instant t^{n+1} ne dépend pas de x^{n+1} mais est connue explicitement : $x^{n+1} = f(x^n, x^{n-1}, \dots, \text{données})$. L'inconvénient de ce principe est lié à la limitation du pas de temps par des contraintes de stabilité numérique. En pratique, ceci se traduit par un nombre de Courant inférieur à 1. Le nombre de Courant est défini par :

$$Co = \frac{\sqrt{U^2 + V^2} \Delta t}{\Delta x} \quad \text{Eq. 16}$$

où Δx est l'intervalle spatial (m) et Δt est l'intervalle temporel (s).

Le nombre de Courant correspond au nombre de mailles traversées par une particule d'eau pendant un pas de temps ; c'est pourquoi sa valeur doit être inférieure à 1.

7.2. Emprise

La Figure 92 précise l'emprise du modèle numérique.

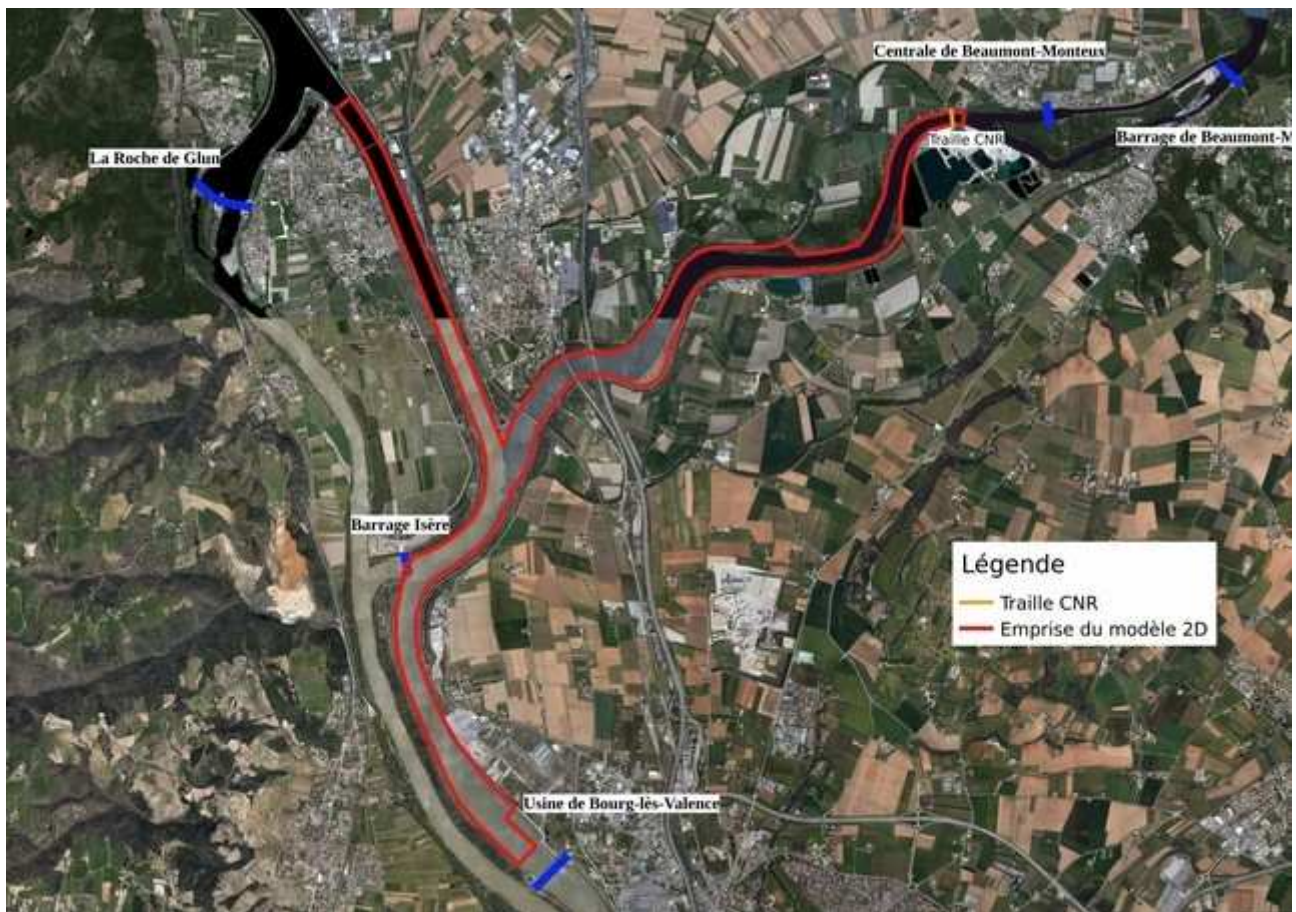


Figure 92: Emprise du modèle 2D

7.3. Topographie utilisée et maillage

Les mailles du modèle sont en moyenne de 7 m x 7 m à la confluence et sur l'Isère et s'élargissent en des mailles de 20 m x 20 m au maximum dans les zones à plus faibles enjeux.

Les cotes de chaque sommet du maillage ont été obtenues en projetant le maillage sur le semi de points réalisé par l'entreprise INGEO pour le compte de la CNR au cours de 6 sessions de mesures entre le 08/01/2015 et le 08/04/2015. Ce semi se compose de fichiers de points XYZ de maille 1 m par 1 m pour les biefs et de maille 0.5 m par 0.5 m pour les 300 m amont et aval directs des ouvrages de BLV et CHR.

La prise en compte de ce semi de points permet de bien représenter le merlon situé à la confluence de l'Isère et du canal d'aménagé. D'après le rapport d'étude sur modèle réduit des conditions de gestion du barrage de l'Isère permettant la reprise des dépôts à la confluence, CNR, 1999, le merlon :

- crée un rétrécissement du fond du lit de l'Isère à la confluence de manière à augmenter les vitesses de charriage et à mieux entraîner les matériaux vers la rive gauche du tronçon commun du canal d'aménagé. Ceux-ci sont ensuite dirigés vers la rive droite par l'effet de courbure.
- génère un rouleau d'axe horizontal qui permet de mieux mobiliser les matériaux de l'Isère qui franchissent le merlon, en les entraînant vers la rive gauche également. Cette fonction renforce l'effet obtenu par le décalage des radiers au niveau du confluent.
- diminue les courants transversiers provenant de l'Isère en crue pour perturber le moins possible la navigation.

7.4. Données d'entrée

Les conditions limites amont sur l'Isère et le canal amont sont des débits.

La condition aval est le niveau à l'usine de Bourg-lès-Valence.

Le barrage Isère est modélisé par un ouvrage qui retire un débit.

Chaque condition peut varier en fonction du temps.

7.5. Calage hydraulique

Afin de caler le modèle la CNR a fourni les chroniques de niveaux aux points suivants :

- station de Beaumont-Monteux
- PR2
- amont barrage Isère (PK 102.8)
- usine de Bourg-Lès-Valence

Les débits correspondants à ces chroniques sont connus :

- à Beaumont-Monteux (Q_{BM})
- au barrage Isère (Q_{BI})
- à l'usine de Bourg-lès-Valence (Q_{BLV}).

Ces débits permettent de retrouver le débit dans le canal amont : $Q_{CA} = Q_{BLV} + Q_{BI} - Q_{BM}$

Nous effectuerons le calage en régime permanent à partir de quatre épisodes pendant lesquels les débits et les niveaux ont été stables puis nous validerons ce calage en régime transitoire. sur deux épisodes pour lesquels des mesures de vitesses ont été réalisées.

Les tableaux qui suivent détaillent ces épisodes et les écarts de niveaux entre le modèle et les mesures. Les coefficient de Strickler donnant les écarts les plus faibles sont :

$$K_{\text{canal d'amenée}} = 38 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$K_{\text{Isère}} = 34 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$K_{\text{Isère hauts de berges}} = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

Épisode 1 : du 04/10/15 18h00 au 05/10/14 16h00

| | Débits | | | | |
|-----------|-------------|-----------------|---------------|--------------|-----|
| | Canal Amont | Baumont-Monteux | Barrage Isère | Canal Commun | BLV |
| min | 183 | 126 | 0 | 350 | 350 |
| max | 230 | 179 | 0 | 391 | 391 |
| amplitude | 47 | 53 | 0 | 41 | 41 |
| moyenne | 208 | 159 | 0 | 367 | 367 |

| | Niveaux | | | | |
|-----------|---------|----------------------------------|--------|------------------------|--------|
| | PR1 | Station de Beau- mont-Monteux | PR2 | Amont Barrage Isère | BLV |
| min | 116.66 | 116.83 | 116.68 | 116.64 | 116.64 |
| max | 116.72 | 116.94 | 116.74 | 116.71 | 116.71 |
| amplitude | 0.06 | 0.11 | 0.07 | 0.07 | 0.07 |
| moyenne | 116.70 | 116.89 | 116.72 | 116.68 | 116.68 |

| | | | | | |
|---------------------------------------|--|-------------|--------------|-------------|-------------|
| Écart Modèle - mesures | | 0.00 | -0.02 | 0.00 | 0.00 |
|---------------------------------------|--|-------------|--------------|-------------|-------------|

Épisode 2 : du 10/07/15 04h00 au 10/07/14 12h00

| Débits | | | | | |
|-----------|-------------|-----------------|---------------|--------------|------|
| | Canal Amont | Baumont-Monteux | Barrage Isère | Canal Commun | BLV |
| min | 1146 | 620 | 0 | 1773 | 1773 |
| max | 1165 | 633 | 3 | 1797 | 1797 |
| amplitude | 20 | 14 | 3 | 25 | 25 |
| moyenne | 1157 | 628 | 1 | 1784 | 1784 |

| Niveaux mesurés | | | | | |
|---------------------------------------|--------|----------------------------------|--------------|------------------------|-------------|
| | PR1 | Station de Beau- mont-Monteux | PR2 | Amont Barrage Isère | BLV |
| min | 116.51 | 118.01 | 116.41 | 116.28 | 116.14 |
| max | 116.60 | 118.04 | 116.48 | 116.37 | 116.24 |
| amplitude | 0.08 | 0.03 | 0.07 | 0.09 | 0.10 |
| moyenne | 116.54 | 118.02 | 116.43 | 116.31 | 116.17 |
| Écart Modèle - mesures | | -0.01 | -0.02 | 0.00 | 0.00 |

Épisode 3 : du 13/07/14 12h00 au 14/07/14 04h00

| Débits | | | | | |
|-----------|-------------|-----------------|---------------|-------------------|------|
| | Canal Amont | Baumont-Monteux | Barrage Isère | Canal Com- mun | BLV |
| min | 1424 | 406 | 80 | 1847 | 1767 |
| max | 1465 | 451 | 121 | 1904 | 1784 |
| amplitude | 40 | 44 | 41 | 57 | 17 |
| moyenne | 1439 | 427 | 87 | 1867 | 1779 |

| Niveaux mesurés | | | | | |
|---------------------------------------|--------|----------------------------------|--------------|------------------------|-------------|
| | PR1 | Station de Beau- mont-Monteux | PR2 | Amont Barrage Isère | BLV |
| min | 116.72 | 117.49 | 116.55 | 116.46 | 116.32 |
| max | 116.78 | 117.60 | 116.61 | 116.52 | 116.39 |
| amplitude | 0.06 | 0.11 | 0.06 | 0.06 | 0.07 |
| moyenne | 116.75 | 117.54 | 116.58 | 116.48 | 116.35 |
| Écart Modèle - mesures | | -0.01 | -0.02 | -0.02 | 0.00 |

Épisode 4 : du 31/07/14 02h00 au 31/07/14 08h00

| Débits | | | | | |
|-----------|-------------|-----------------|---------------|--------------|------|
| | Canal Amont | Baumont-Montoux | Barrage Isère | Canal Commun | BLV |
| min | 1445 | 751 | 365 | 2216 | 1849 |
| max | 1465 | 776 | 368 | 2221 | 1853 |
| amplitude | 21 | 25 | 3 | 5 | 4 |
| moyenne | 1458 | 760 | 367 | 2218 | 1851 |

| Niveaux mesurés | | | | | |
|---------------------------------------|--------|-----------------------------|--------------|---------------------|-------------|
| | PR1 | Station de Beaumont-Montoux | PR2 | Amont Barrage Isère | BLV |
| min | 116.69 | 118.33 | 116.53 | 116.38 | 116.24 |
| max | 116.71 | 118.39 | 116.56 | 116.41 | 116.28 |
| amplitude | 0.02 | 0.06 | 0.03 | 0.03 | 0.04 |
| moyenne | 116.70 | 118.35 | 116.55 | 116.40 | 116.26 |
| Écart Modèle - mesures | | -0.01 | -0.01 | -0.02 | 0.00 |

7.6. Validation du calage

Nous vérifions le calage hydraulique en régime transitoire sur deux journées :

- le 10/04/2015 (figure 93) qui présente des faibles débits. Irstea a réalisé des mesures de vitesses (ADCP) au droit du profil P22 (Isère) entre 11h et 13h (temps du modèle : 43200 s et 50400 s).
- le 19/06/2013 qui présente de forts débits (figure 95). La CNR a réalisé des mesures de vitesses (ADCP) au droit de la station de Beaumont Montoux.

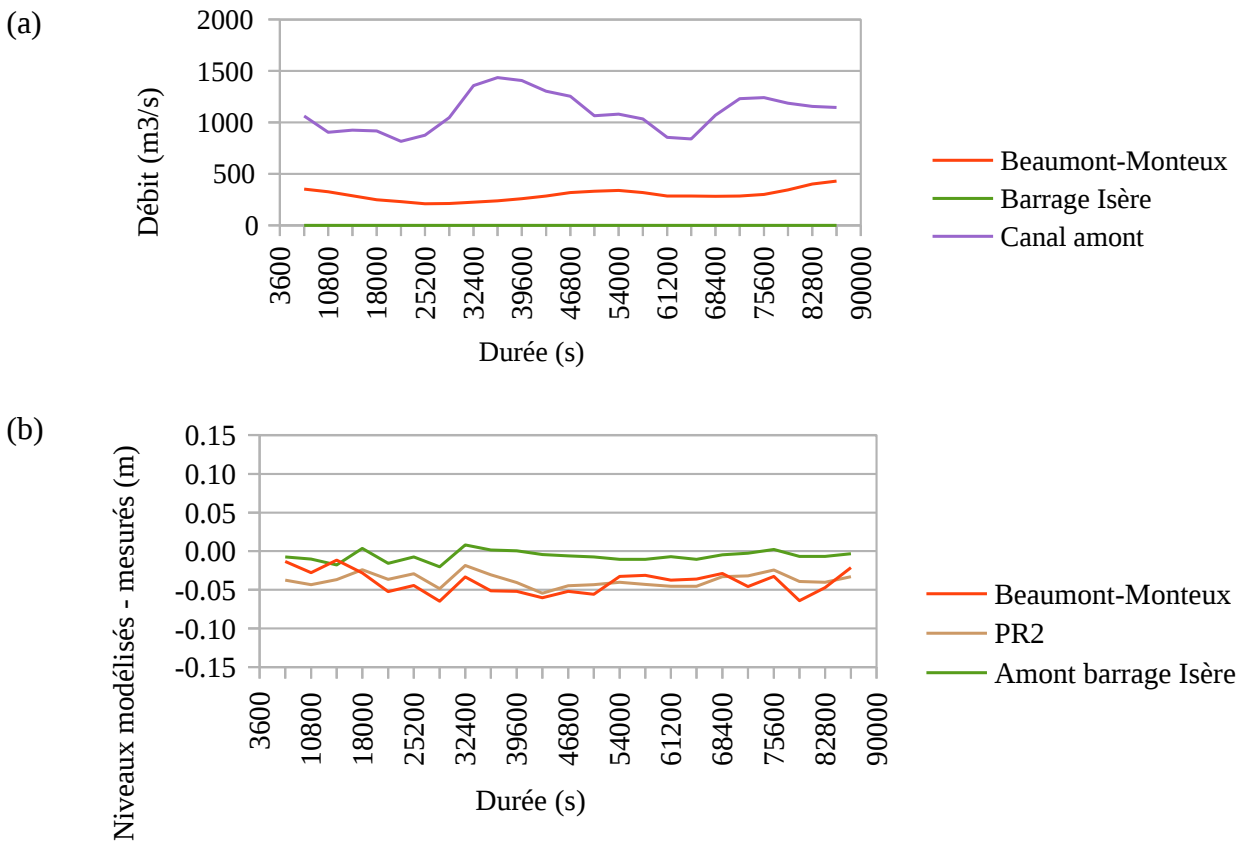


Figure 93: Débits (a) et écarts de niveaux (b) entre le modèle et les mesures pour le 10/04/2015 avec un ADCP

Le modèle suit bien les évolutions de niveaux relevés aux différents points de mesures (Figure 93).

La figure 94 compare les vitesses mesurées par ADCP au droit du profil P22 à celles modélisées. L'ordre de grandeur des vitesses moyennes est respecté. Cependant, les mesures ADCP semblent montrer une asymétrie du profil latéral des vitesses que ne reproduit pas le modèle.

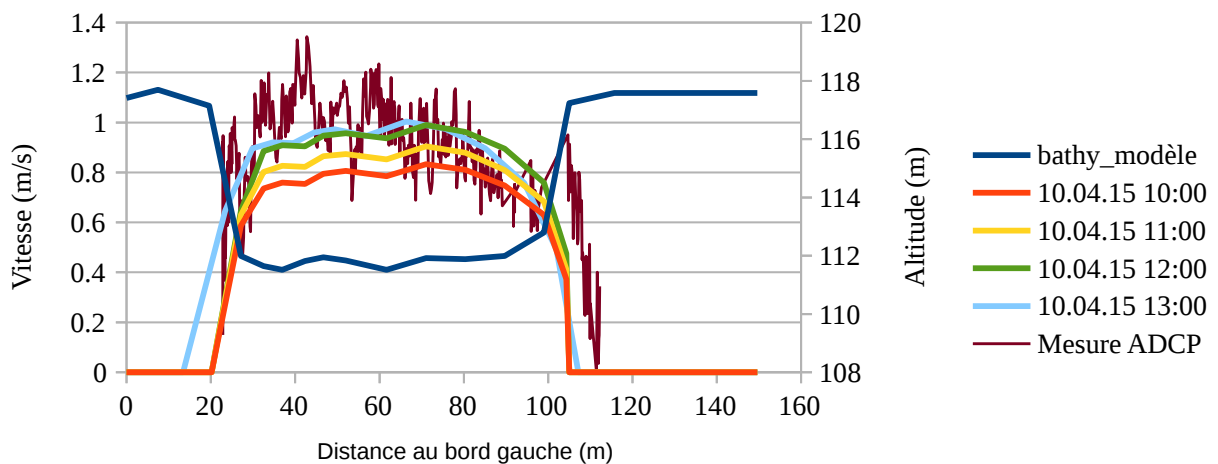


Figure 94: Profils transversaux des vitesses moyennées sur la verticale mesurées le 10/04/2015 et modélisés au droit du profil P22 et modélisés au droit de la station de Beaumont-Monteux

La figure 95 confirme que le modèle est bien calé pour les débits élevés.

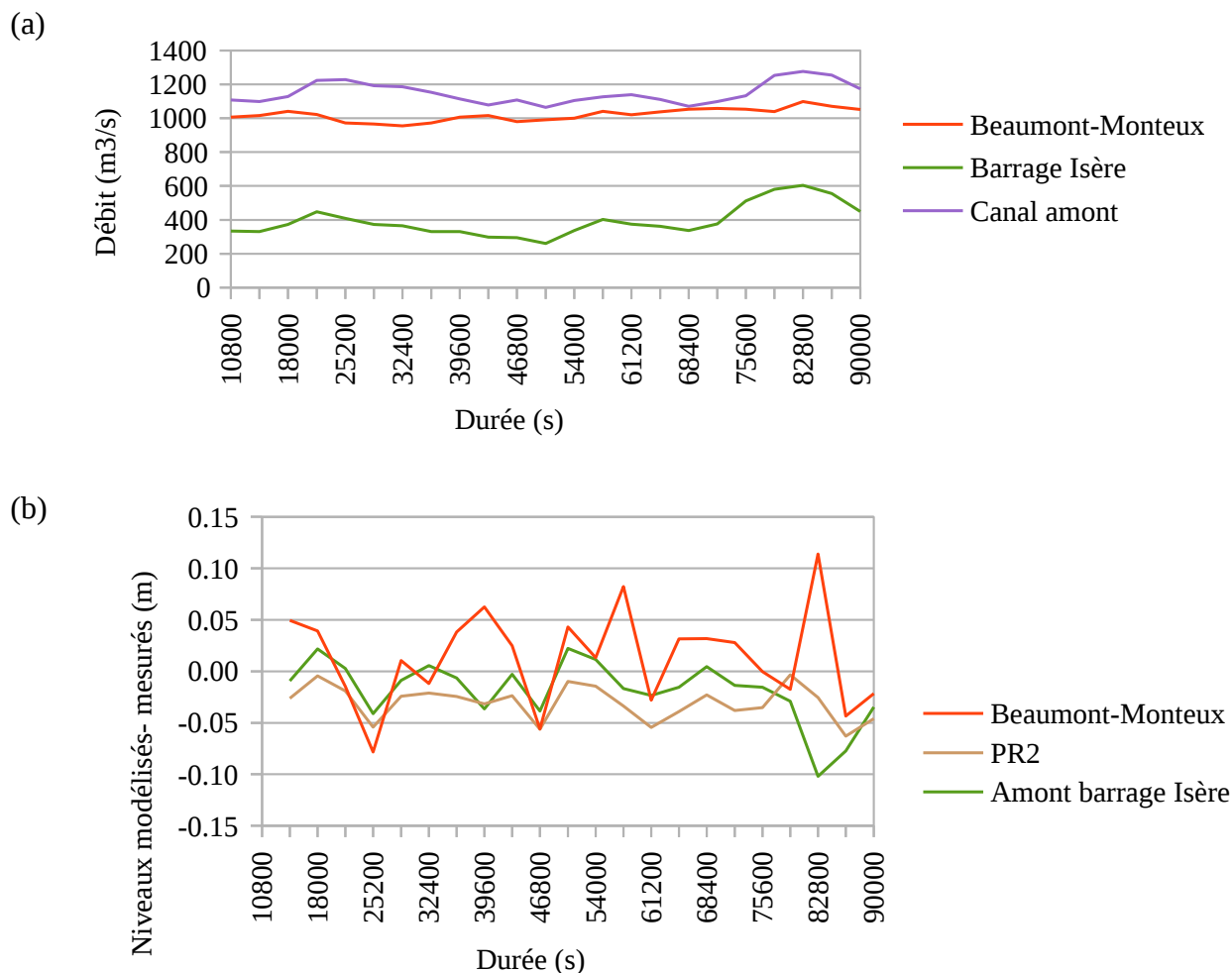


Figure 95: Débits (a) et écarts de niveaux (b) entre le modèle et les mesures pour le 19/06/2013

La figure 96 compare les vitesses mesurées par ADCP au droit de la station de Beaumont-Monteux à celles modélisées. L'ordre de grandeur des vitesses moyennes est respecté. La forme du profil est cependant légèrement différentes. Les vitesses sur les berges sont en effet plus faibles que celles modélisées.

Cela provient du fait que la station de Beaumont-Monteux est la section amont du modèle. La répartition du débit global sur les sous-section se fait au prorata des section interne ce qui implique une vitesse uniforme dans la section.

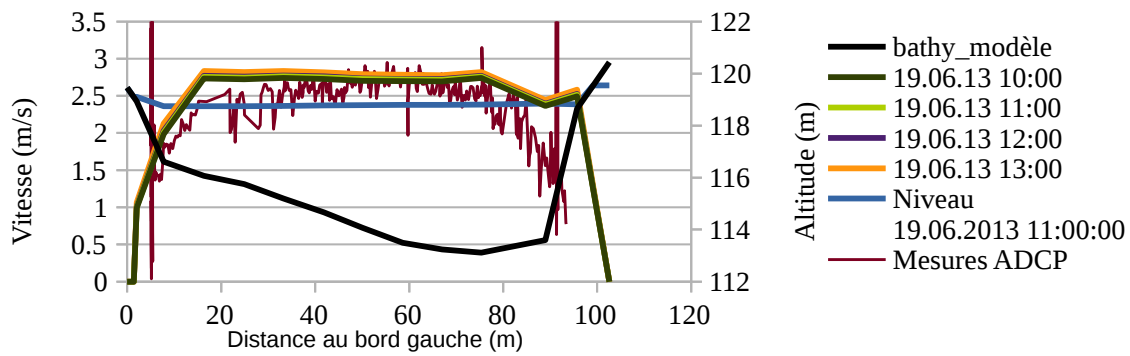


Figure 96: Profils transversaux des vitesses moyennées sur la verticale mesurées le 19/06/2013 avec un ADCP et modélisés au droit de la station de Beaumont-Monteux

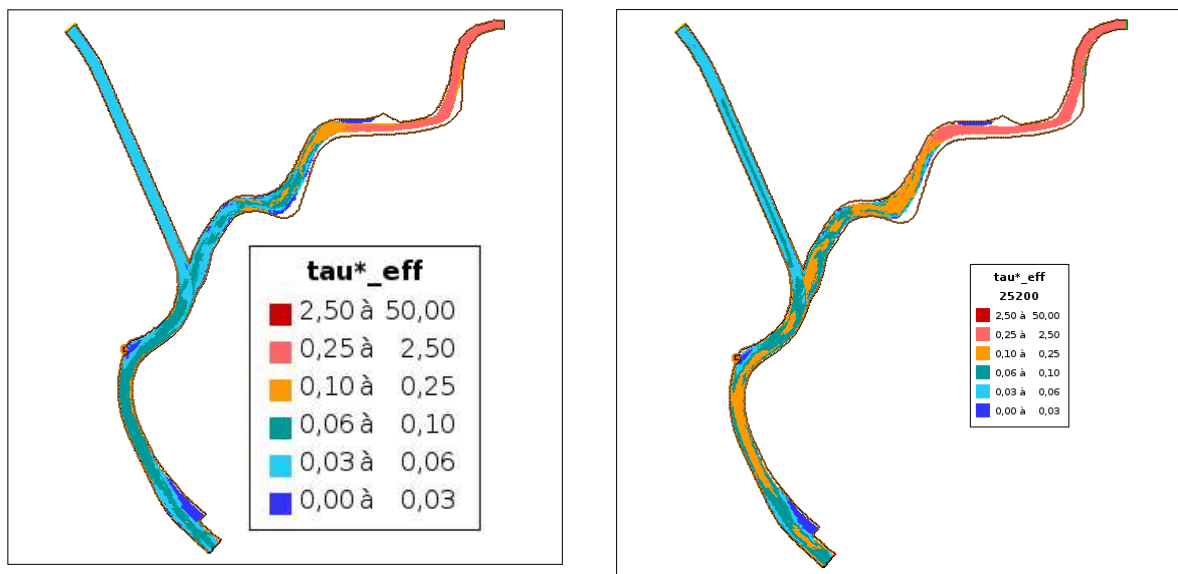
7.7. Incidence d'un abaissement de la retenue de Bourg-lès-Valence sur les contraintes efficaces

Nous avons vu précédemment que les débits de mise en mouvement des particules de sable dans l'Isère étaient de l'ordre de 400 à 500 m³/s et que les dépôts de sable avaient lieu principalement à la confluence.

La figure 97 représente la contrainte efficace pour les débits dans l'Isère de 374, 628 et 1060 m³/s. En deçà d'une contrainte efficace de 0.1, nous considérons que le transport est très faible (charriage uniquement), voir inexistant. Nous observons une nette décroissance de la contrainte efficace de l'amont vers l'aval. Les dépôts éventuels devraient donc être observés proche de la confluence.

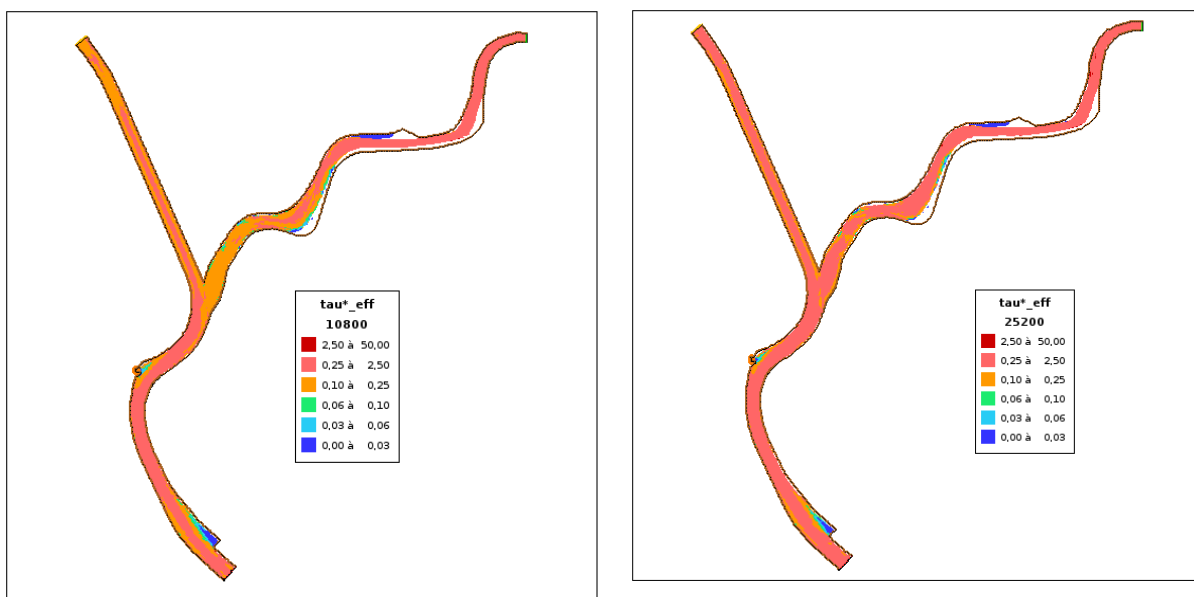
(a) Conditions hydrauliques :

Q canal amont = 496 m³/s ; Q Isère = 374 m³/s ; Q Barrage Isère = 0 m³/s ;
 N BLV = 116.60 m



(b) Conditions hydrauliques :

Q canal amont = 1157 m³/s ; Q Isère = 628 m³/s ; Q Barrage Isère = 0 m³/s
 N BLV = 116.17 m



(c) Conditions hydrauliques :

Q canal amont = 1150 m³/s ; Q Isère = 1060 m³/s ; Q Barrage Isère = 450 m³/s
 N BLV= 116.19 m N BLV= 115.19 m

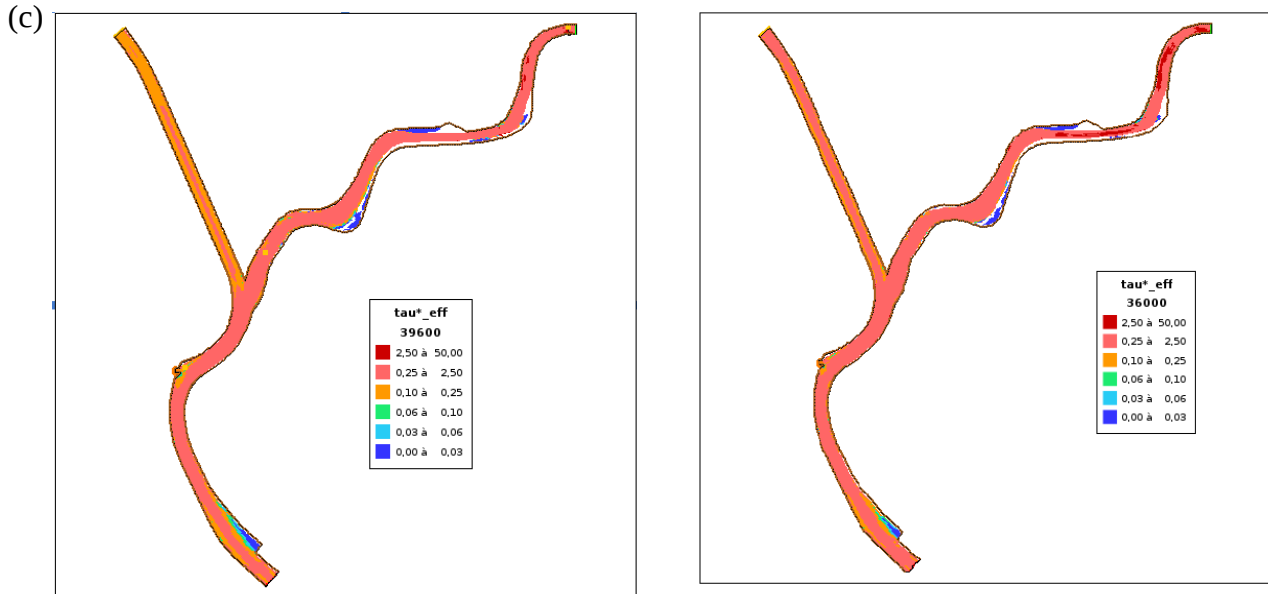


Figure 97: Cartographie des paramètres de Shields efficaces pour différents scénarios

La figure 97 (a) montre que pour des débits inférieurs à 400 m³/s, il ne peut y avoir un transport important de sable qu'en amont du bief Isère. A la confluence les contraintes ne sont pas assez importantes pour transporter du sable (même par charriage). Dans le canal d'aménagé, il peut y avoir transport de sable mais seulement par charriage (transport lent).

Pour des débits de l'Isère d'environ 600 m³/s (figure 97 b), les contraintes à la confluence permettent un transport des sable par charriage seulement. Le sable est a priori transporté en suspension de l'amont et se dépose. Dans le canal commun, les conditions hydrauliques permettent un transport important à l'exception des abords immédiats du barrage Isère fermé.

Pour les débits d'environ 1000 m³/s dans l'Isère et 1150 m³/s dans le canal amont (figure 97 c), les contraintes sont suffisantes pour faire transiter du sable a priori en suspension, donc avec des vitesses assez élevées y compris sur la partie aval de l'Isère.

Nous réalisons les mêmes modélisations en abaissant la retenue de Bourg les Valence d'un mètre (figure 97 a, b, c). Cela a pour effet d'abaisser le niveau d'eau et donc d'augmenter les vitesses.

En diminuant le niveau de la retenue de Bourg-lès-Valence de 1m, nous observons que les contraintes efficace à la confluence augmentent significativement et qu'un transport des sédiments par charriage deviendrait possible pour des débits de l'Isère faibles (400 m³/s). Pour des débits au-delà de 600 m³/s, les sables seraient transportés en suspension tout au long du système.

8. MODÉLISATION DE LA CRUE/CHASSE DE MAI 2015

8.1. Équation utilisée

Rubar20TS permet de modéliser le transport de substances dissoutes ou de sédiments. Une équation de convection-diffusion d'une concentration est ajoutée aux équations de l'eau.

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Chu_s}{\partial x} + \frac{\partial Chv_s}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + E - S$$

où C est la concentration de l'eau, h la hauteur d'eau, D_x et D_y les coefficients de diffusion suivant O_x et O_y , u_s et v_s la vitesse de sédiments suivants O_x et O_y .

E (taux d'érosion) et S (taux de sédimentation) sont calculés de différentes façon selon les options de transport solide choisies.

La méthode de résolution est la même que pour l'hydrodynamique, la résolution se faisant de manière couplée (même pas de temps).

Le code permet de prendre en compte dans la partie hydrodynamique la modification éventuelle du lit en cours de calcul.

8.2. Hypothèses de calculs

L'analyse des volumes transportés a montré que pendant la crue/chasse, le transport de sable par suspension était prépondérant. Nous avons donc opté pour la formulation suivantes des taux d'érosion et de sédimentation :

$$S = \alpha w_s C (1 - \tau / \tau_{crs}) \text{ si } \tau < \tau_{crs} ; \text{ sinon } S = 0$$

$$E = M(\tau / \tau_{cre} - 1) \text{ si } \tau > \tau_{cre} ; \text{ sinon } E = 0$$

où α (paramètre adimensionnel), M (paramètre en m/s), τ_{crs} (contrainte critique de sédimentation en Pa) et τ_{cre} (contrainte critique d'érosion en Pa) sont des paramètres à caler.

Dans un premier temps, nous faisons l'hypothèse d'une relation linéaire entre M et α telle que $M = \alpha w_s$ (pour $C = 1 \text{ g/l}$)

et supposons que $\tau_{crs} = \tau_{cre} = \tau_{cr,ad}$ = contrainte critique limite pour l'équilibre entre l'érosion et le dépôt par rapport à la contrainte totale.

Enfin, nous supposons le fond inérodable.

8.3. Conditions aux limites

Les conditions aux limites suivantes sont utilisées :

Canal amont :

- débit du canal amont (déterminé à partir des mesures de débits à Beaumont-Monteux, au barrage Isère et à l'usine de Bourg-lès-Valence.
- concentration du canal amont (issue du modèle 1D)
- granulométrie du canal amont ($d_{50}=0.010\text{mm}$)

Isère :

- débit de l'Isère à Beaumont-Monteux
- granulométrie de l'Isère ($d_{50}=0.220\text{mm}$)
- concentration de l'Isère issue de la courbe de tarage sédimentaire.

Barrage Isère :

- débit sortant

Usine de Bourg-lès-Valence

- niveau à l'usine

8.4. Tests réalisés

Afin de tester l'influence de chaque paramètre, nous avons réalisé les simulations suivantes :

| | $\tau_{cr,ad}$ | α | M |
|--------------|----------------|----------|--------|
| Simulation 1 | 20 | 0.1 | 0.0035 |
| Simulation 2 | 10 | 0.1 | 0.0035 |
| Simulation 3 | 5 | 0.1 | 0.0035 |
| Simulation 4 | 5 | 0.5 | 0.0035 |
| Simulation 5 | 5 | 1 | 0.0035 |
| Simulation 6 | 5 | 0.5 | 0.0175 |
| Simulation 7 | 1 | 0.1 | 0.0035 |

8.5. Vérification des niveaux

Des écarts de niveaux entre le modèle et les mesures peuvent avoir lieu. En effet, la condition limite aval est le niveau à l'usine de Bourg-lès-Valence mesuré par la CNR pendant la crue/chasse. Les volumes et la répartition des dépôts modélisés étant différents de ceux observés, la ligne d'eau peut en être affectée. Il convient donc de connaître ces écarts.

Les niveaux modélisés sont légèrement supérieurs aux niveaux relevés aux différents points de mesures. Les écarts restent cependant compris entre -20 cm et +20cm.

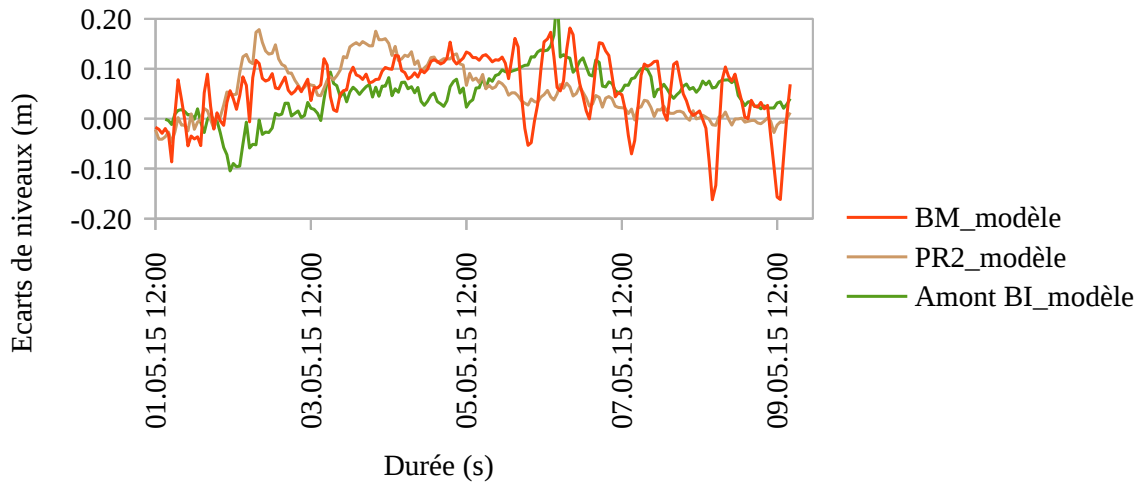


Figure 98: Écarts de niveaux entre les modèles et les mesures CNR pendant la crue/chasse

8.6. Résultats sur le canal d'amenée

Nous avons vu lors des campagnes de mesures et de l'analyse des dépôts que les eaux de l'Isère semblent plonger sous les eaux du Rhône et traverser le canal d'amenée en direction du barrage Isère avant de revenir en rive gauche puis se recentrer à l'approche de l'usine de Bourg-lès-Valence (trait marron figure 99). Le modèle ne représente pas ce « méandrement » et garde les sédiments provenant de l'Isère en rive gauche du canal d'amenée, le courant principal étant conditionné par la courbure du canal amont. Cela confirme les effets 3D pressentis précédemment.

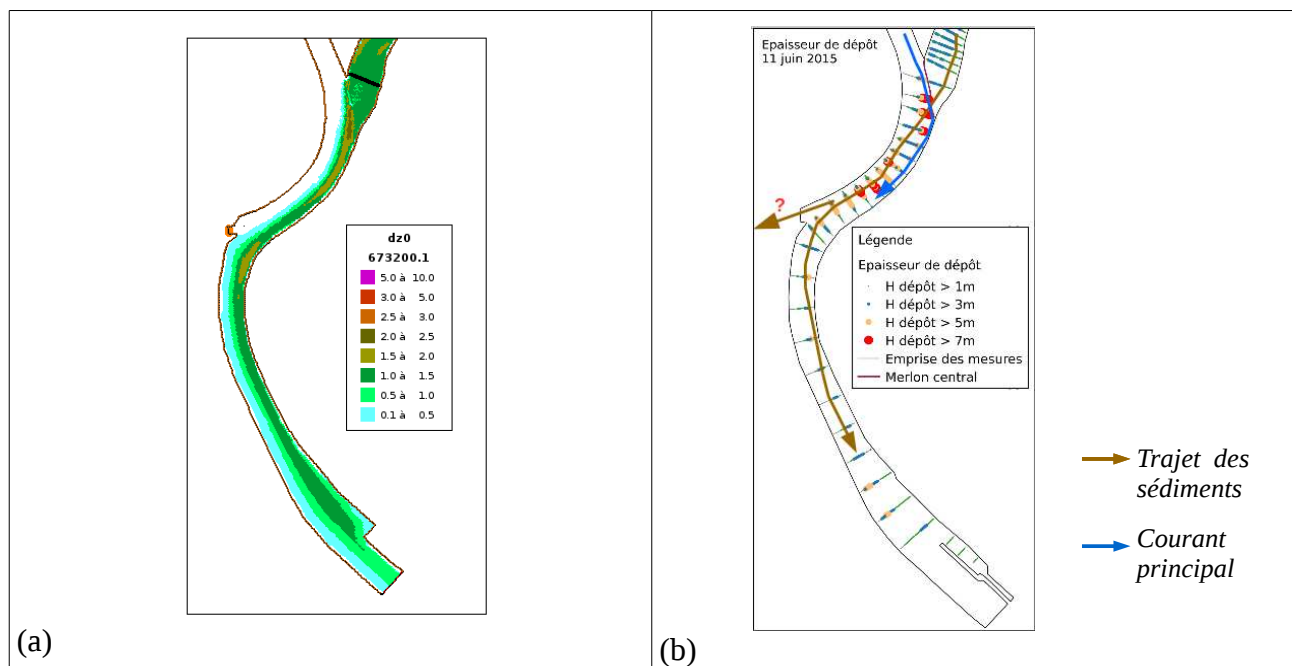


Figure 99: Comparaison du trajet des sédiments provenant de l'Isère représenté par le modèle 2D (a) et déterminé par l'analyse des dépôts observés (b).

8.7. Résultats sur le bief Isère

Les résultats du modèle présentés ci-dessous correspondent à la situation en fin de chasse (9 mai 2015).

8.7.1. Influence du paramètre $\tau_{cr,ad}$

Les figures 100 et 101 montrent que le paramètre $\tau_{cr,ad}$ déplace le barycentre des dépôts. Un $\tau_{cr,ad}$ trop élevé ($\tau_{cr,ad} = 10$ ou 20 Pa) surestime les dépôts en amont du bief Isère et trop peu de sédiments parviennent l'aval, d'où une sous-estimation des dépôts à la confluence. A l'inverse, un paramètre $\tau_{cr,ad}$ trop faible ($\tau_{cr,ad} = 1$ Pa) sous estime très largement les dépôts (quasiment tout les sédiments sortent du système).

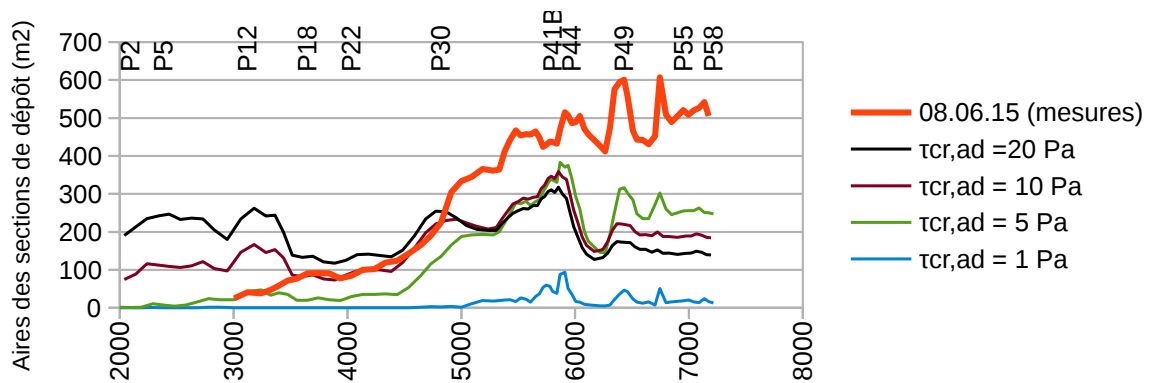


Figure 100: Profils en long des aires de section de dépôt levées le 08.06.15 et pour différentes valeurs de $\tau_{cr,ad}$

La valeur qui semble la plus réaliste se situe donc autour de $\tau_{cr,ad} = 5$ Pa. C'est en effet celle qui permet de respecter au mieux la localisation et l'ampleur des dépôts. Il apparaît cependant que les volumes déposés restent sous-estimés par rapport aux mesures avec un coefficient $\alpha = 0.1$. Nous garderons cette valeur de $\tau_{cr,ad}$ pour tester le paramètre α .

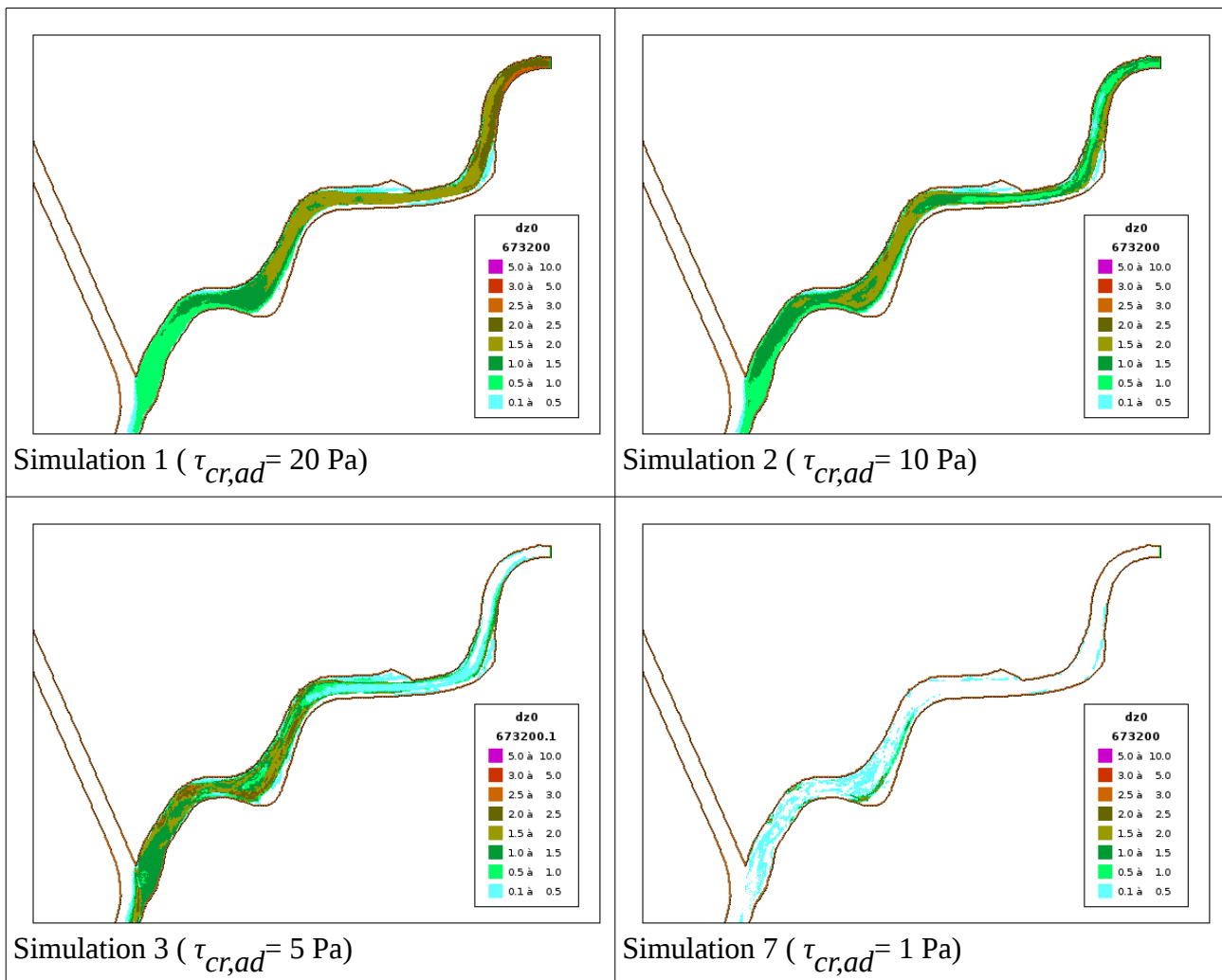


Figure 101: Tests de sensibilité sur le paramètre $\tau_{cr,ad}$ avec $\alpha = 0.1$ et $M = 0.0035 \text{ m/s}$.

8.7.2. Influence du paramètre α .

Les figures 102 à 106 montrent un test de sensibilité sur le paramètre α avec $\tau_{cr,ad} = 5 \text{ Pa}$. Il apparaît clairement que le coefficient α influence les volumes de dépôts. Une valeur de 0,5 améliore de façon nette les résultats.

La figure 102 montre qu'une valeur de α de 0.5 ou 1 permet de retrouver les volumes déposés au 08.06.15.

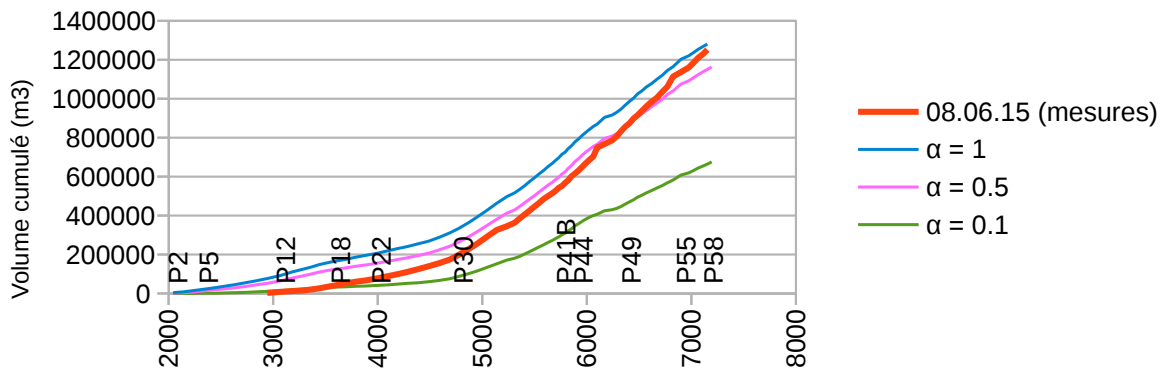


Figure 102: Volumes cumulés des dépôts levés le 08.06.15 et pour différentes valeurs de α avec $\tau_{cr,ad}=5$ Pa et $M=0.0035$ m/s

Cependant, nous observons que le modèle crée des dépôts plus importants dans la partie amont du bief Isère (vers P18) que ce qui a pu être observé le 08.06.15. Il faut toutefois noter que, d'une part les volumes concernés sont faibles par rapport au volume total, d'autre part, il n'est pas impossible que de tels dépôts est eu lieu avant d'être repris et déplacés vers l'aval entre la fin de la chasse et la date des premières mesures.

De plus, nous pouvons voir que le modèle sous-estime les dépôts à l'aval du profil P44. Cela peut-être dû soit à des contraintes modélisées trop fortes, soit à une sous-estimation des volumes de sédiments entrant dans le système, soit une influence des ponts non représentée dans le modèle.

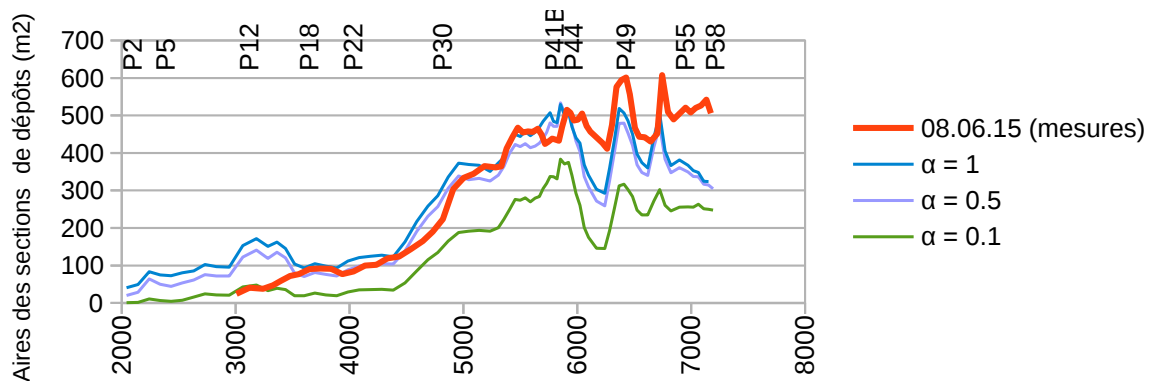


Figure 103: Profils en long des aires de section de dépôt levées le 08.06.15 et pour différentes valeurs de α avec $\tau_{cr,ad}=5$ Pa et $M=0.0035$ m/s

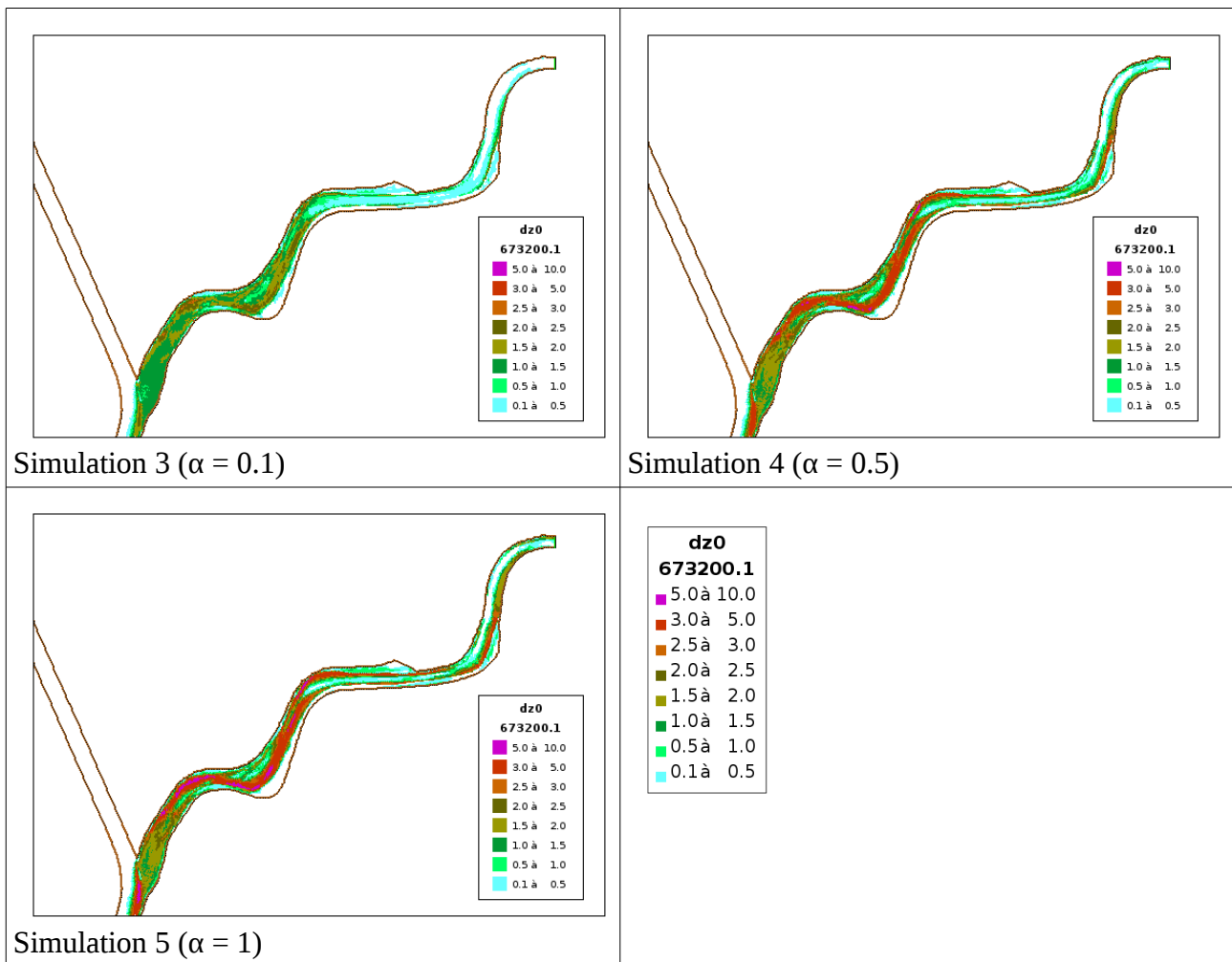


Figure 104: Tests de sensibilité sur le paramètre α avec $\tau_{cr,ad} = 5$ Pa et $M = 0.0035$ m/s

Afin de mieux comprendre l'influence du paramètre α , nous comparons les profils en travers en amont du bief Isère (P12), au milieu (P43) et à la confluence (P57B) (Figure 105).

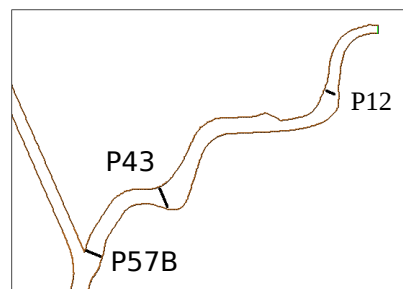


Figure 105: Localisation des profils P12, P43 et P57B

N'ayant pas de mesures bathymétriques sur l'Isère pendant l'événement, nous comparons les résultats du modèle à la fin de la chasse (9 mai) aux mesures réalisées le 8 juin (figure 106).

Le profil P12 montre que les dépôts modélisés sont supérieurs à ceux observés le 8 juin. Il est cependant difficile de conclure car nous avons vu que l'amont du bief Isère se « nettoyait » assez rapidement. Il est possible que des dépôts aient eu lieu pendant la chasse mais qu'ils aient été évacués rapidement.

Au profil P43, nous observons que le modèle garde la forme du profil d'origine tandis que les mesures semblent montrer un lissage du profil. Dans l'ensemble, les hauteurs de dépôts représentées par le modèle sont assez homogènes sur la largeur des profils tandis que les mesures montrent que les dépôts se feraient plus ou moins par couches horizontales, c'est à dire que les dépôts sont localisés dans l'axe d'écoulement.

Enfin, au profil 57B, nous notons que les dépôts sont sous-estimés pour les 3 paramètres α testés (une mesure le 5 mai est disponible). Les conditions aux limites amont ou les paramètres pourraient être affinés pour déplacer les sédiments plus à la confluence (par exemple abaisser légèrement le $\tau_{cr,ad}$ et augmenter α et M).

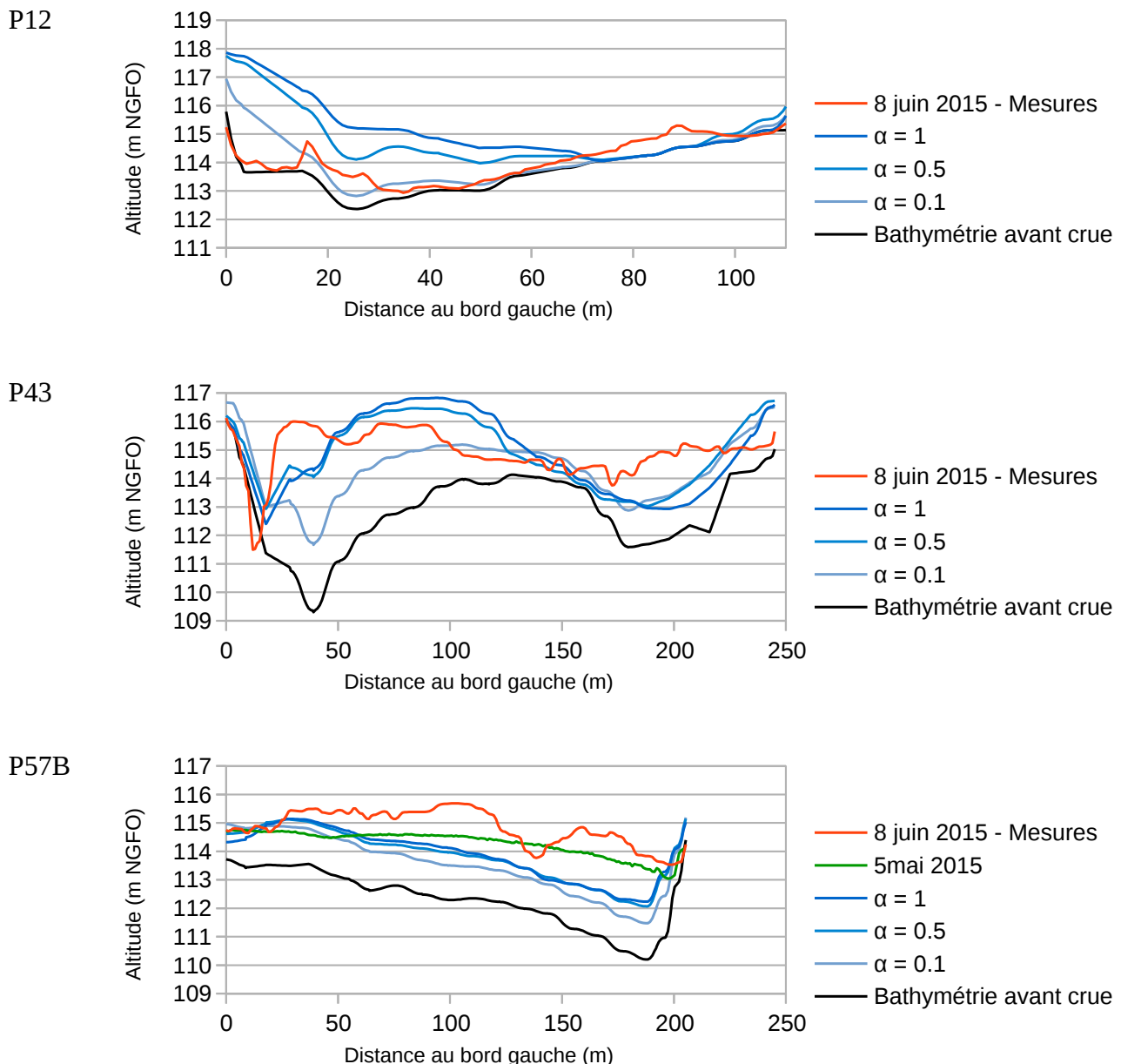
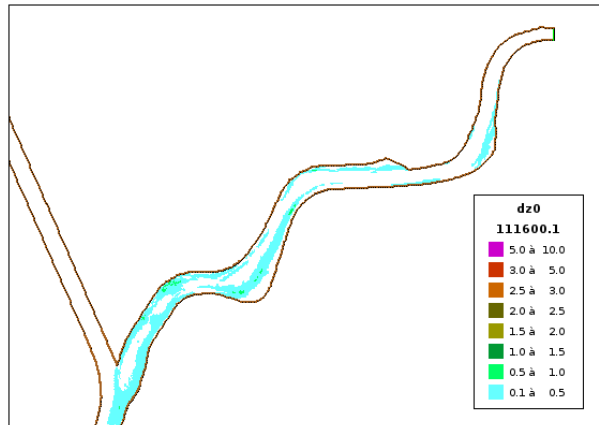


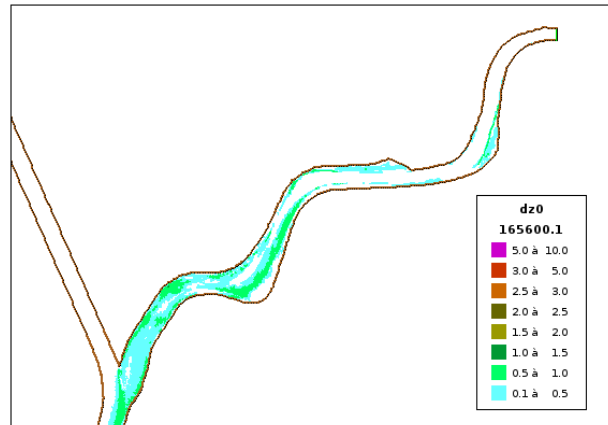
Figure 106: Comparaison de profils en travers issus des mesures à différentes dates et de la modélisation au 9 mai (fin de chasse).

8.7.3. Chronologie de la formation des dépôts

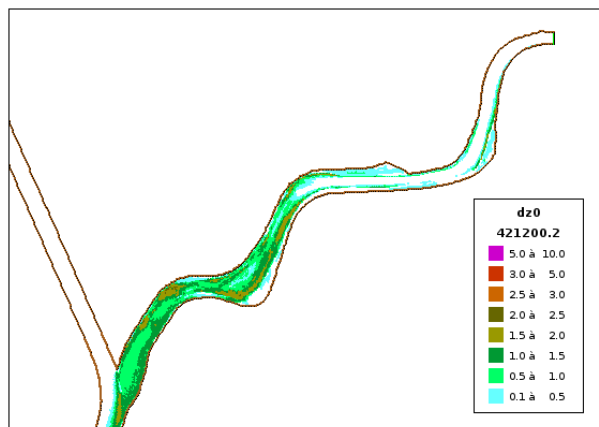
D'après le modèle (Figures 107 et 108) les sédiments se déposeraient en premier entre le dernier méandre du bief Isère et la confluence. Puis les dépôts s'étendraient de part et d'autre de cette zone. Cela confirme qu'il n'y a pas un front de sédiments qui avance au cours de la chasse mais bien un dépôt massif proche de la confluence. De plus, ce dépôt semble croître plus ou moins régulièrement et se renforce en se développant vers l'amont.



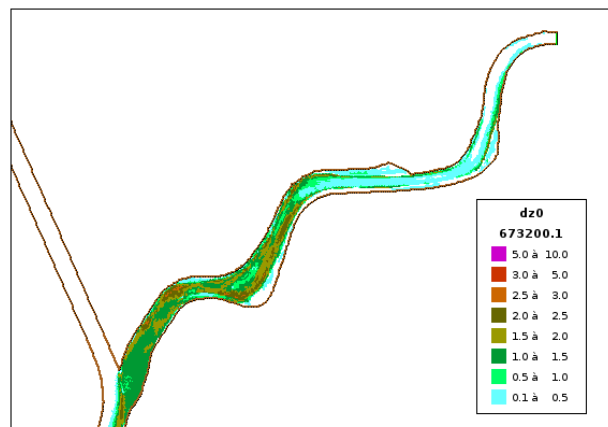
02/05 : Pic de crue de l'Isère



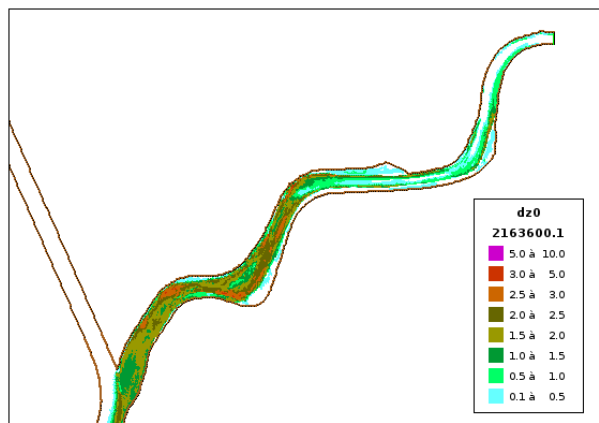
03/05 : Début de la chasse



06/05 : mi-chasse



09/05 : fin de la chasse



26/06 : fin de remplissage

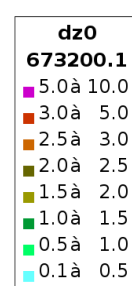


Figure 107: Vue en plan de l'évolution des dépôts dans l'Isère pendant la crue / chasse

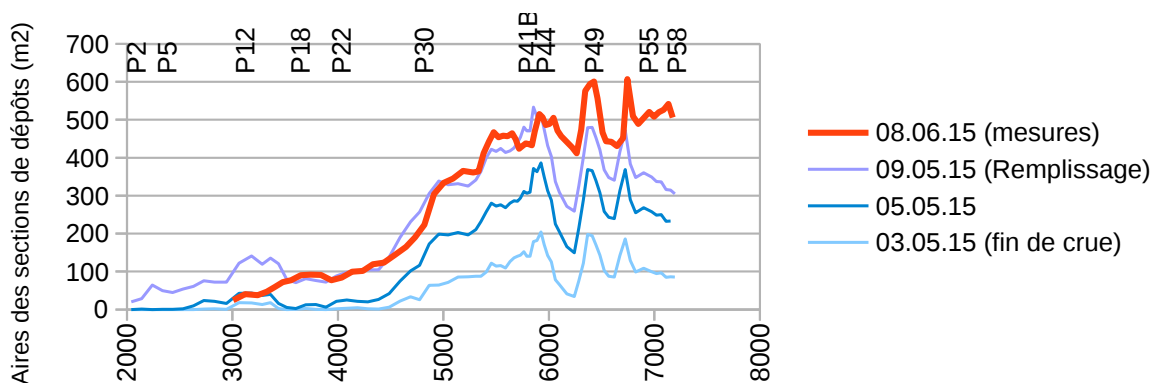


Figure 108: Evolution des aires de section de dépôt au cours de la crue / chasse (modélisation avec $\alpha = 0.5$ et $\tau_{cr,ad} = 5 \text{ Pa}$)

8.7.4. Modélisation avec le fond de l'Isère érodable

Les modélisations précédentes ont été réalisées en prenant pour hypothèse un fond inérodable. Nous réalisons donc la même modélisation mais permettons cette fois l'érosion du lit de l'Isère à l'exception des berges et du merlon centrale.

La modélisation montre une très forte érosion ($> 5 \text{ m}$ par endroit) de l'amont du bief Isère (environ jusqu'au profil P32). Cette érosion n'a a priori jamais été observée et semble largement surestimée. Nous avons vu que cette zone est soumise à de fortes contraintes. Les sédiments du fond sont donc sans doute plus grossier que ceux utilisés dans cette modélisation (0.3 mm). Les prélèvements effectués le 18/06/15 au Helley-Smith montraient un transport de sédiments dont le d_{50} était compris entre 0.3 et 11 mm . Dans la partie amont, la granulométrie au fond est donc sûrement proche de 10 mm .

A la confluence, nous ne notons pas d'érosion notable contrairement à ce qui a été observé par la CNR lors des crues de l'Isère. Il faudrait alors peut-être tester différents paramètres M pour reproduire cette érosion.

8.8. Influence de la gestion du barrage de Bourg-lès-Valence sur la formation des dépôt dans le bief Isère

Nous testons ci-après l'influence d'un abaissement d'un mètre de la retenue de Bourg-lès-Valence pendant la crue/chasse. Les paramètres de calcul sont : $M = 0.0035 \text{ m/s}$; $\alpha = 0.1$; $\tau_{cr,ad} = 5 \text{ Pa}$; Isère inérodable.

L'abaissement ne modifie pas les zones de dépôt mais modifie leur ampleur. Ainsi à la confluence, les dépôt sont diminués de 20 à 40 % par rapport à la modélisation avec les niveaux réels (Figure 110). Le volume total déposé est lui réduit d'environ 30 %.

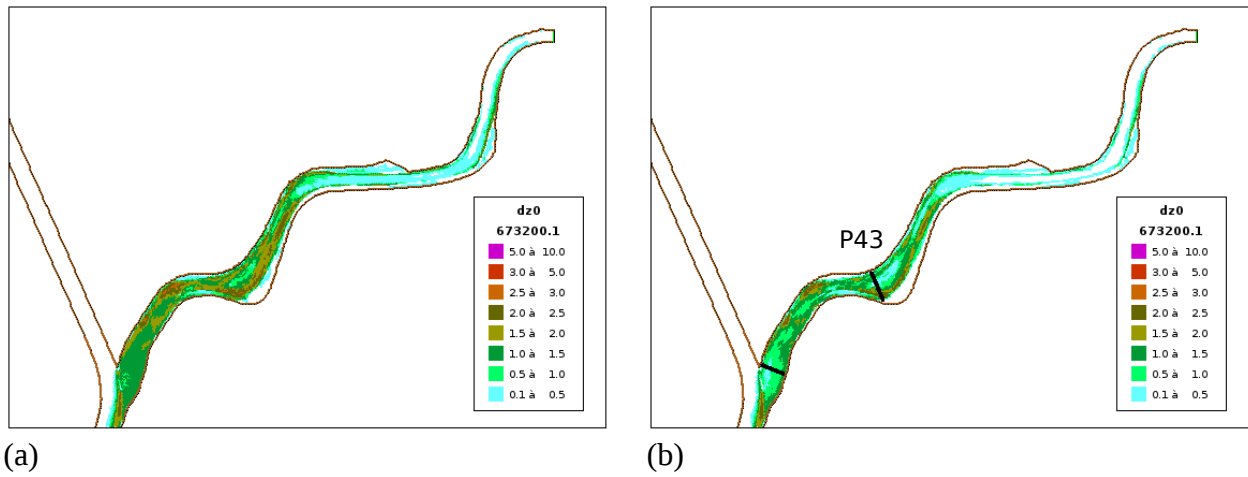


Figure 109: Vue en plan des dépôts en fin de chasse avec $\alpha=0.1$, $\tau_{cr,ad}=5 Pa$, $M=0.0035 m/s$ et les niveaux à l'usine de Bourg-lès-Valence fournis par la CNR (a) et abaissés d'un mètre (b).

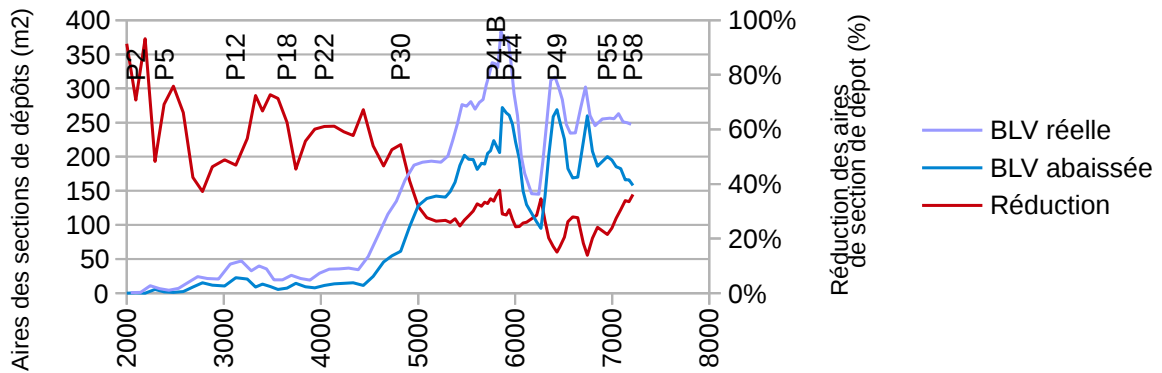


Figure 110: Comparaison des dépôts en fin de chasse pour les niveaux à l'usine de Bourg-lès-Valence fournis par la CNR et abaissés d'un mètre.

9. MODÉLISATION AVEC DÉPÔTS EN PLACE

9.1. Modification de la bathymétrie

Une bathymétrie 2D de l'Isère et du canal d'amenée a été réalisée par l'entreprise INGENIO pour le compte de la CNR et d'EDF en novembre 2016. Ces données ont été utilisées pour modifier l'ensemble de la bathymétrie du modèle.

9.2. Test de reprise des dépôts dans le canal d'amenée

9.2.1. Formulation de type suspension

Dans un premier temps nous testons la formulation testée au chapitre 8 avec $M = 0.0035 \text{ m/s}$; $\alpha = 0.1$; $\tau_{cr,ad} = 5 \text{ Pa}$. La période modélisée correspond à une période de 3 jours environ débutant au 31/01/2016. Les débits dans les différents tronçons sont précisés figure 111.

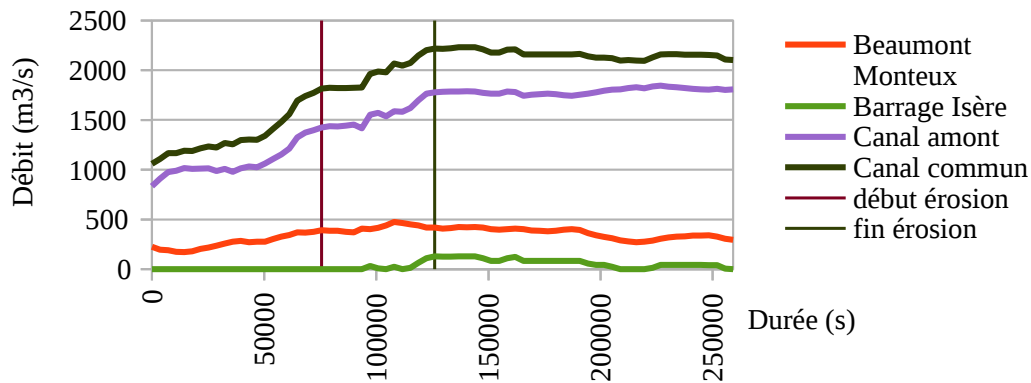


Figure 111: Débits modélisés pour le test de reprise des sédiments déposés

Nous notons un début d'érosion dans le canal aval pour un débit proche de $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figure 112), c'est-à-dire pour des débits supérieurs à ceux estimés à partir de l'analyse des mesures bathymétriques. Une réduction du paramètre $\tau_{cr,ad}$ pourrait permettre de s'approcher du débit souhaité. De plus, une fois le débit critique atteint, le modèle surestime la vitesse d'érosion et de propagation des sédiments. Les érosions sont alors très rapides, se stabilisent en quelques heures et nous n'observons pas de dépôt à l'aval des ces zones d'érosion. Les sédiments remobilisés sortent du système. L'évolution des dépôts ne correspond pas aux levés bathymétriques qui montrent que le canal d'amenée se vidange de l'amont vers l'aval, avec des dépôts intermédiaires à l'aval. Le calage obtenu pour la phase dépôt dans l'Isère n'est donc pas représentatif de la phase reprise dans le canal d'amenée.

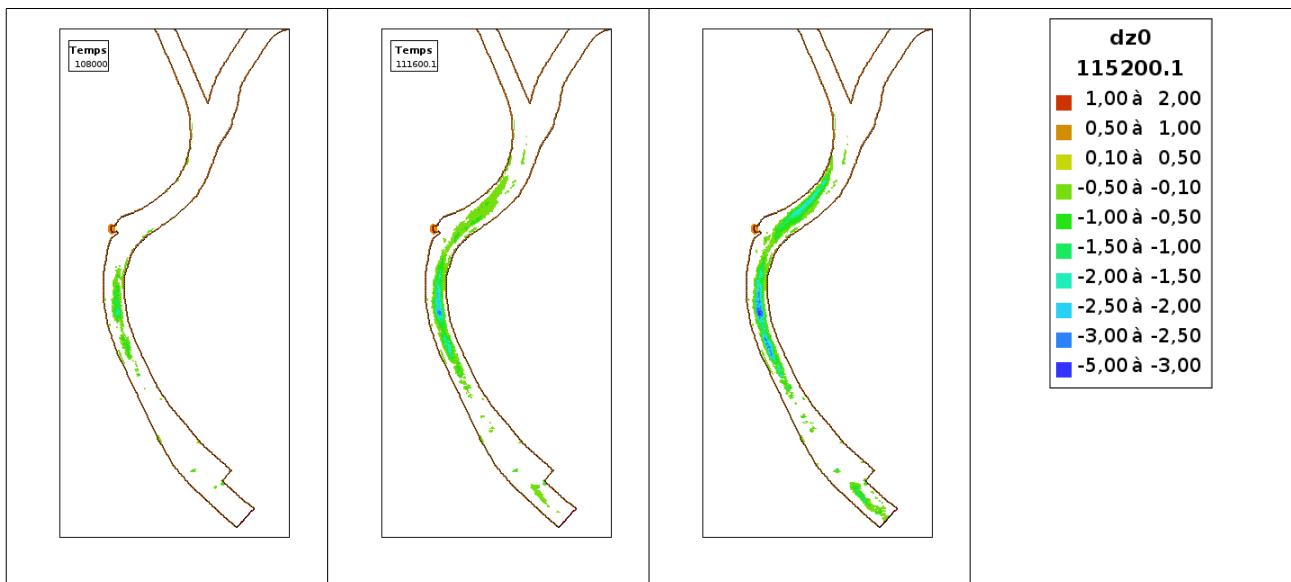


Figure 112: Evolution de la bathymétrie du canal d'amenée lors de l'épisode de février 2016

9.2.2. Formulation de type charriage

Nous faisons donc l'hypothèse que lors de la reprise des matériaux déposés pendant la chasse, ceux-ci sont principalement transporté par charriage.

Nous avons donc opté pour la formulation suivante des taux d'érosion et de sédimentation (Paquier A., 2013):

$$S = hC_{u_{ch}}/L_{char} \text{ si } \tau < \tau_{cr} ; \text{ sinon } S = 0$$

$$E = \beta(\tau_{eff}-\tau_{cr})^{3/2} \text{ si } \tau > \tau_{cre} ; \text{ sinon } E = 0$$

avec

u_{ch} : vitesse des sédiments charriés fonction d'un paramètre ζ de calage

L_{char} : distance de chargement

$\beta = 8M/(g(\rho_s - \rho)\rho^{0.5}L_{char})$ où M est un paramètre de calage

τ_{cr} : contrainte critique adimensionnelle

Nous effectuerons le calage sur l'épisode qui a eu lieu du 02/01/16 au 19/01/16 qui a présenté des débits faibles sur l'Isère (<500 m³/s) et forts sur le canal amont (environ 1800 m³/s).

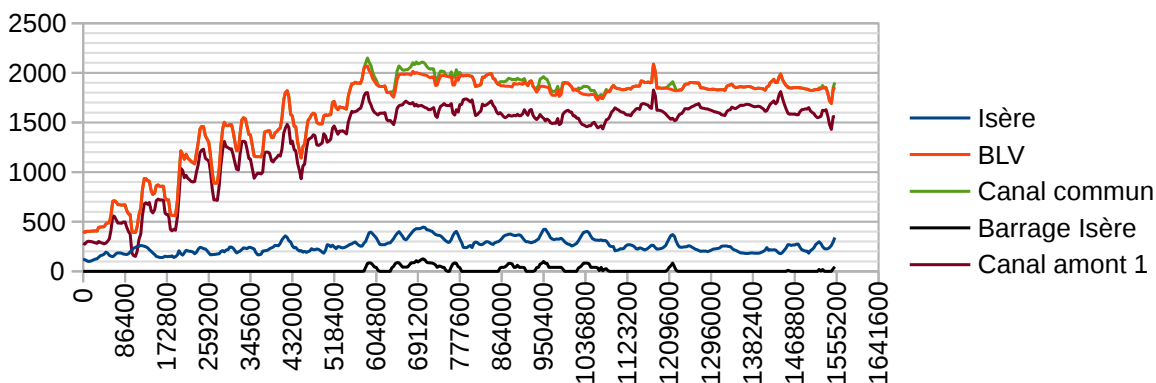


Figure 113: Hydrogrammes modélisés pour les tests de formulation du charriage

Les mesures bathymétriques des profils 101.6, 102.7, 104 et 105 réalisées par la CNR encadrent l'événement étudiés et nous permettent de commenter les résultats de la modélisation.

La comparaison des bathymétries réalisées à ces deux dates montrent une érosion de 780 000 m³ du profil 101.6 au profil 104 et un remblais de 270 000 m³/s du profil 104.2 au profil 105 (CNR, 2016).

Divers calages ont été testés. Nous présentons ci-dessous celui qui nous paraît le plus approprié et dont les coefficients sont :

- $\zeta = 1$
- $M = 100$
- $L_{\text{char}} = 300\text{m}$

La modélisation permet de différencier deux zones au fonctionnement sédimentaire différent (Figures 114, 115, 116):

- entre les profils 101.6 et 103.5 : zone soumise à l'érosion pour des débits supérieurs à 1000 m³/s dans le canal commun. Les érosions débutent à la confluence et avancent progressivement vers l'aval. Une zone de dépôt se crée provisoirement au droit du barrage Isère (P102.8) avant d'être reprise par le front d'érosion. Le volume érodé est d'environ 700 000 m³, ce qui est très proche des mesures.
- A l'aval du profil 103.5 : alternance de zones de dépôt et d'érosion qui se compensent en termes de volume. La figure 116 montre clairement l'influence du garage écluse sur la création des dépôts en amont de celui-ci.

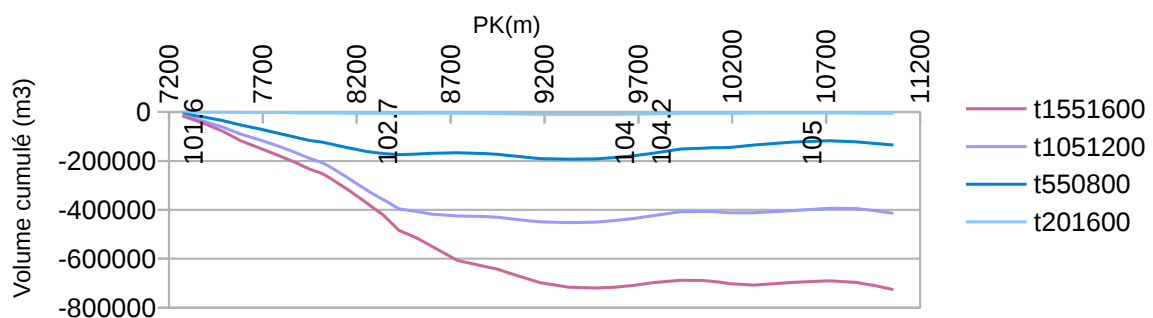


Figure 114: Volume d'érosion cumulé dans le canal d'amenée entre la confluence et l'usine de Bourg-lès-Valence à différents pas de temps

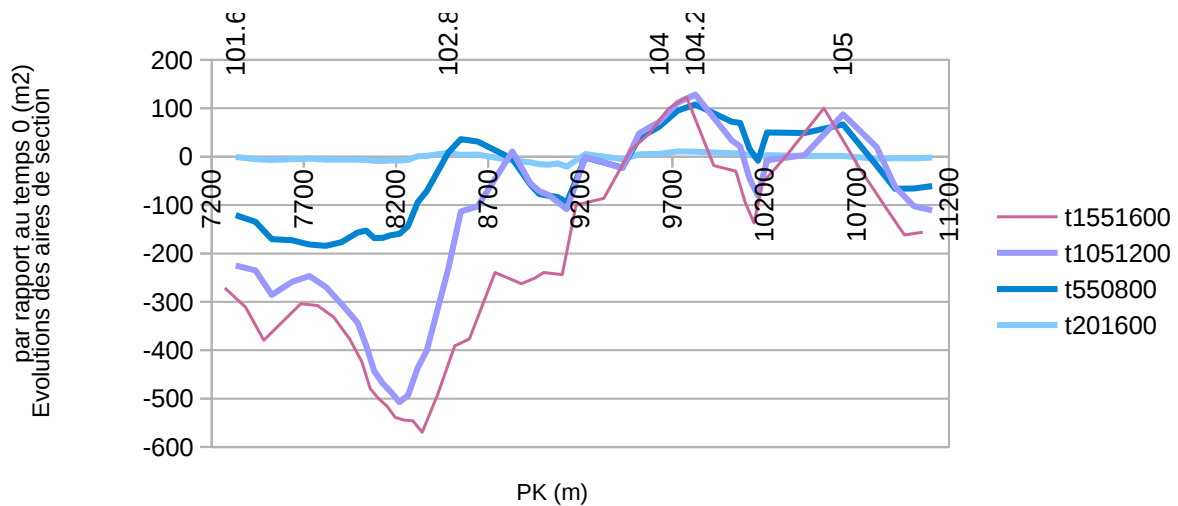


Figure 115: Profils en long des aires de section de dépôts à différents pas de temps

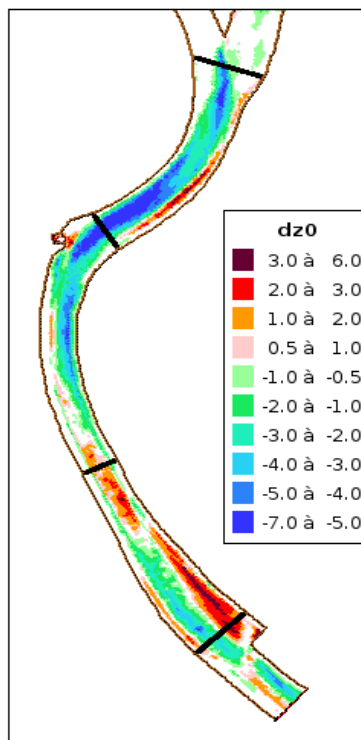


Figure 116: Vue en plan des épaisseurs de dépôt et d'érosion en fin de calcul

9.3. Test de reprise des dépôts dans l'Isère : Épisode du 17 juin 2016

Nous testons ci-après les modèles sur un épisode où les matériaux déposés dans l'Isère ont été repris.

Cependant, il faut garder à l'esprit que le volume total de dépôt représenté dans le modèle issu de la bathymétrie de novembre 2015 (930 000 m³) est beaucoup plus important que celui de juin 2016 (575 000 m³), notamment à l'amont. Nous devrions donc avoir un volume érodé par le modèle plus important que celui mesuré.

Nous comparerons de plus les volumes évacués entre le profil P41 (ou plutôt P43 car il n'y a pas de mesure au P41) et la confluence. Cela nous permettra de comparer des situations plus proches entre le modèle et les mesures. De plus, ce secteur est intéressant dans le cadre du risque inondation.

Une érosion de 190 000 m³ a été observée entre les mesures du 30.05.16 et du 20.06.16 (et 100 000 m³ à l'aval du P43). La figure 117 présente l'hydrogramme et la concentration en MES à Beaumont-Monteux sur cette période en ne considérant que les débits supérieurs à 400 m³/s, débits dépassés à partir du 15.06.16. Nous considérons ici que l'apport de sable est négligeable.

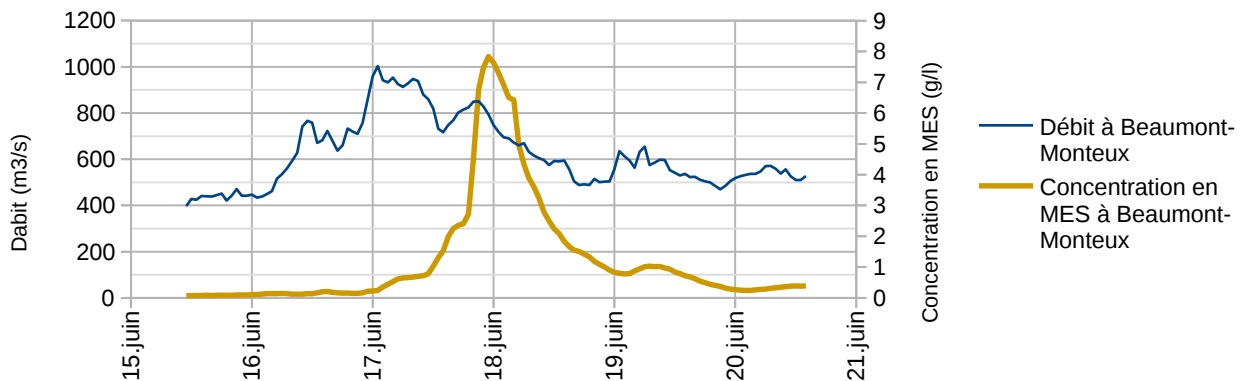


Figure 117: Hydrogramme et concentration en MES à Beaumont-Monteux lors de la crue du 17 juin 2016

9.3.1. Formulation type suspension

Nous deux paramétrages avec $\alpha = 0.1$ et $\alpha = 0.5$ avec les mêmes valeurs pour $\tau_{cr,ad} = 5$ Pa et $M = 0.0035$.

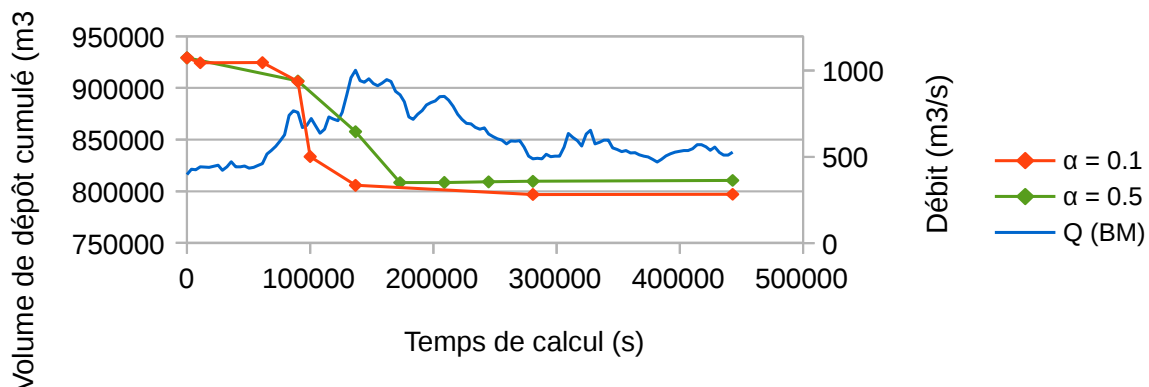


Figure 118: Évolutions des volumes de dépôt dans l'Isère représentés par les modèles "suspension"

A partir d'un débit proche de 750 m³/s, les modèles érodent et évacuent rapidement les matériaux mis en mouvement. A l'issue de cette phase d'érosion rapide, la bathymétrie atteint un état d'équilibre qui ne disparaît qu'à partir d'un nouveau débit seuil. Cela explique pourquoi nous n'observons plus d'érosion après le pic de crue pour $\alpha = 0.1$ alors que les débits restent élevés. L'augmentation du paramètre α atténue ce phénomène et rend l'évolution du volume de dépôt plus réaliste.

Les volumes érodés par les deux modèles sont tous deux d'environ 120 000 à 130 000 m³, ce qui est plus faible que les valeurs mesurées (190 000 m³) mais cohérent. Si on ne s'intéresse qu'au dépôt à l'aval du profil P43 le modèle évacue environ 75 000 m³, un volume inférieur aux 100 000 m³ mesurés.

9.3.2. Formulation type charriage

Nous testons le paramétrage défini au 9.2.2 soit - $\zeta = 1$, $M = 100$ et $L_{char} = 300m$.

La figure 119 montre que le débit pour lequel le volume total évolue sensiblement est compris entre 400 et 500 m³/s. Contrairement aux modèles « suspension », l'érosion est présente tant que les débits sont supérieurs à 400-500 m³/s, ce qui semble plus réaliste. Le modèle évacue environ 320 000 m³ de sédiments ce qui est beaucoup plus que les 190 000 m³ mesurés. Cependant, les sédiments évacués en grande partie issus de l'amont de l'Isère, secteur déjà purgé aux moment des mesures. Ainsi, si on ne s'intéresse qu'au dépôt à l'aval du profil P43 pour les problématique inondation (ou plutôt P43 car il n'y a pas de mesure au P41), le modèle évacue environ 110 000 m³. Cette valeur est conforme aux 100 000 m³ évacués réellement pendant l'événement sur cette zone.

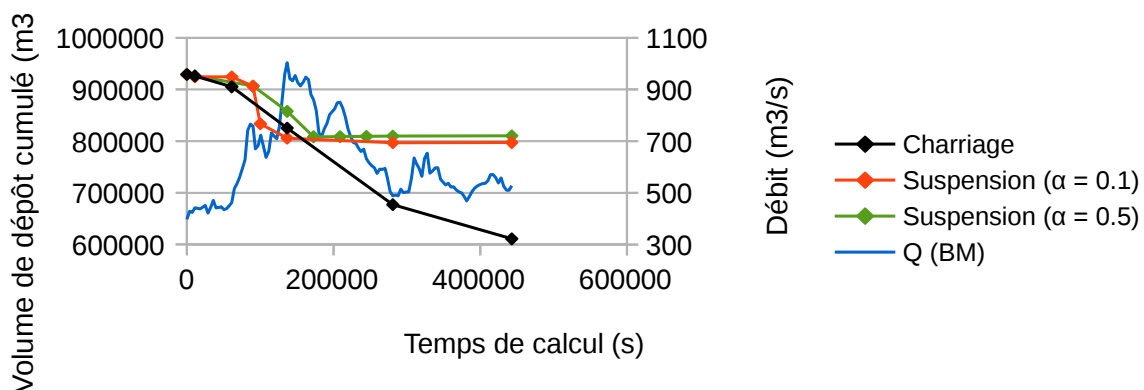


Figure 119: Comparaison des volumes de dépôt dans l'Isère représentés par les modèles "charriage" et "suspension"

9.3.3. Conclusion

Le modèle « charriage » semble mieux représenter la dynamique de reprise des matériaux dans l'Isère. Nous pouvons donc conclure que les sédiments arrivent en suspension lors des crues/chasses, se déposent, puis se déplacent ensuite vers l'aval par charriage. Des mesures complémentaires en crue/chasse permettrait de vérifier cette conclusion. D'un point de vue de la modélisation numérique avec Rubar20TS, ceci implique des calages différents pour la crue/chasse et la reprise des matériaux.

9.4. Influence des dépôts sur une opération de chasse

Afin de tester l'influence des dépôts sur une nouvelle chasse nous réalisons la modélisation de la crue/chasse de 2015 avec la bathymétrie modifiée. Les paramètres de calage sont ceux définis précédemment, à savoir $M = 0.0035$ m/s ; $\alpha = 0.5$; $\tau_{cr,ad} = 5$ Pa.

Le modèle est à fond mobile pour nous permettre de voir comment le modèle se comporte en érosion.

L'amont du modèle présente une érosion dès les premiers pas de calcul qui se stabilise très rapidement. Cela confirme que l'amont du tronçon a la capacité d'évacuer assez rapidement les sédiments

déposés pour des débits relativement faibles ($\sim 400 - 500 \text{ m}^3/\text{s}$). Cette érosion se stabilise rapidement. Les sédiments érodés à l'amont et ceux qui entrent dans le système se déposent progressivement de manière homogène ($< 25\text{cm}$) vers l'aval.

Quand le débit de l'Isère dépasse $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, une forte érosion débute à l'amont du modèle et à la confluence. Ainsi, comme nous l'avons vu avec la modélisation de la reprise des dépôts, le modèle sur-estime le débit de début de transport solide. Une réduction du paramètre $\tau_{cr,ad}$ pourrait permettre de s'approcher du débit souhaité. Ces zones d'érosion se propagent respectivement vers l'aval et vers l'amont. A l'issue de la crue, environ $400\,000 \text{ m}^3$ de sédiments sont évacués par le modèle. Il est aussi à noter que la prise en compte d'un transport par charriage permettrait un transport plus important de sédiments lors de la phase de crue comme indiqué précédemment. Ce volume évacué pourrait donc être encore plus important.

Puis, avec la chasse, les dépôts deviennent prépondérants et le volume de dépôt augmente.

Au final, le volume déposé pendant la chasse avec le modèle avec dépôt en place est du même ordre de grandeur qu'avec le modèle sans dépôt en place. Le volume total en fin de crue est augmenté du volume restant dans l'Isère à la fin de la crue.

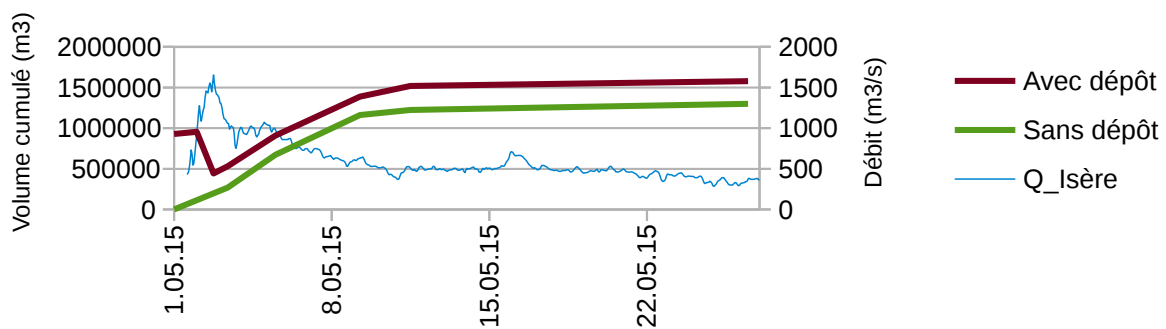


Figure 120: Evolution du volume de sédiments déposés dans l'Isère fourni par le modèle sans dépôt et le modèle avec dépôt

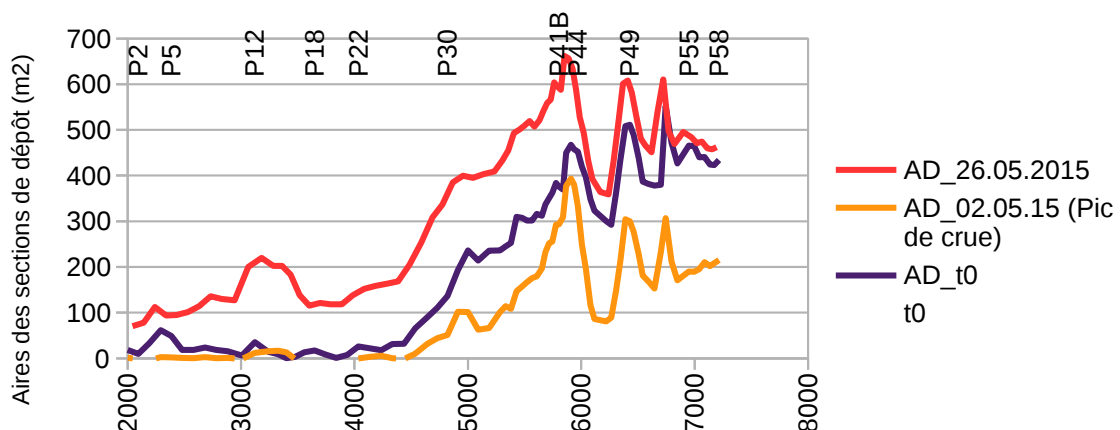


Figure 121: Aires des sections de dépôt fournies par le modèle avec dépôt à différents pas de temps

10. PRÉPARATION DES MESURES COMPLÉMENTAIRES

L'amélioration de la compréhension des phénomènes de transport sédimentaire pendant une crue/chasse de l'Isère nécessite des mesures supplémentaires. Suite à une concertation EDF, CNR et Irstea, il a été décidé d'étudier la faisabilité de mesures à partir du pont de la RN7 et du pont vélo. Les profils CNR correspondant sont les profils P49 et P55 (Figure 122)

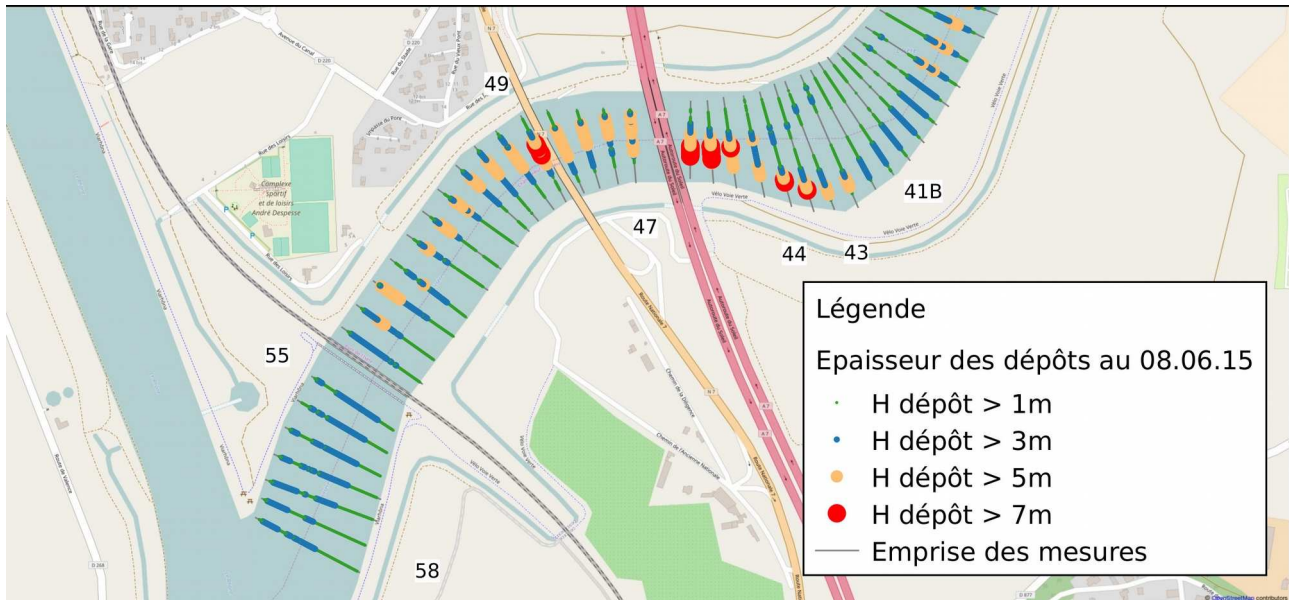


Figure 122: Plan de localisation des sites de mesures à la confluence

Il s'avère néanmoins utile de vérifier que les mesures bathymétriques réalisées au droit de ces profils sont représentatives du dépôt global dans l'Isère et à la confluence.

La figure 123 montre qu'il existe une relation linéaire entre les aires de sections de dépôts aux droit des profils P49 et P55 et :

- le volume de dépôt total dans l'Isère. Cette donnée est importante pour connaître le stock de sédiments qui pourra éventuellement rejoindre la confluence et le canal d'amenée si les débits sont suffisants.
- le volume de dépôt entre les profils P41 et P58. Cette donnée intéresse la CNR car ces dépôts conditionnent le niveau d'eau en amont immédiat du profil 41, secteur sensible aux débordements.

La figure 123 présente à la fois les résultats issus du modèle sédimentaire 2D de la crue/chasse de 2015 (phase de dépôt) et les résultats issus des levés bathymétriques (phase de reprise). Les figures 123a et 123b confirment l'analyse réalisée lors du calage du modèle, à savoir que pour les volumes importants, le modèle tend à sous-estimer les dépôts entre les profils P41 et la confluence et à surestimer les dépôts en amont de cette zone. C'est la raison pour laquelle pour une même aire de section de dépôts, le volume total correspondant est plus élevé avec le modèle. Cet écart diminue à mesure que le volume total ou le volume déposé en amont du profil P41 diminuent.

Si en revanche, nous ne considérons que les dépôts entre les profils P41 et P58, les relations issues du modèles et des mesures sont beaucoup plus proches (figures 123c et d). Cela vient du fait que si l'amplitude du dépôt est sous-estimé par le modèle, sa répartition est, elle, bien représentée.

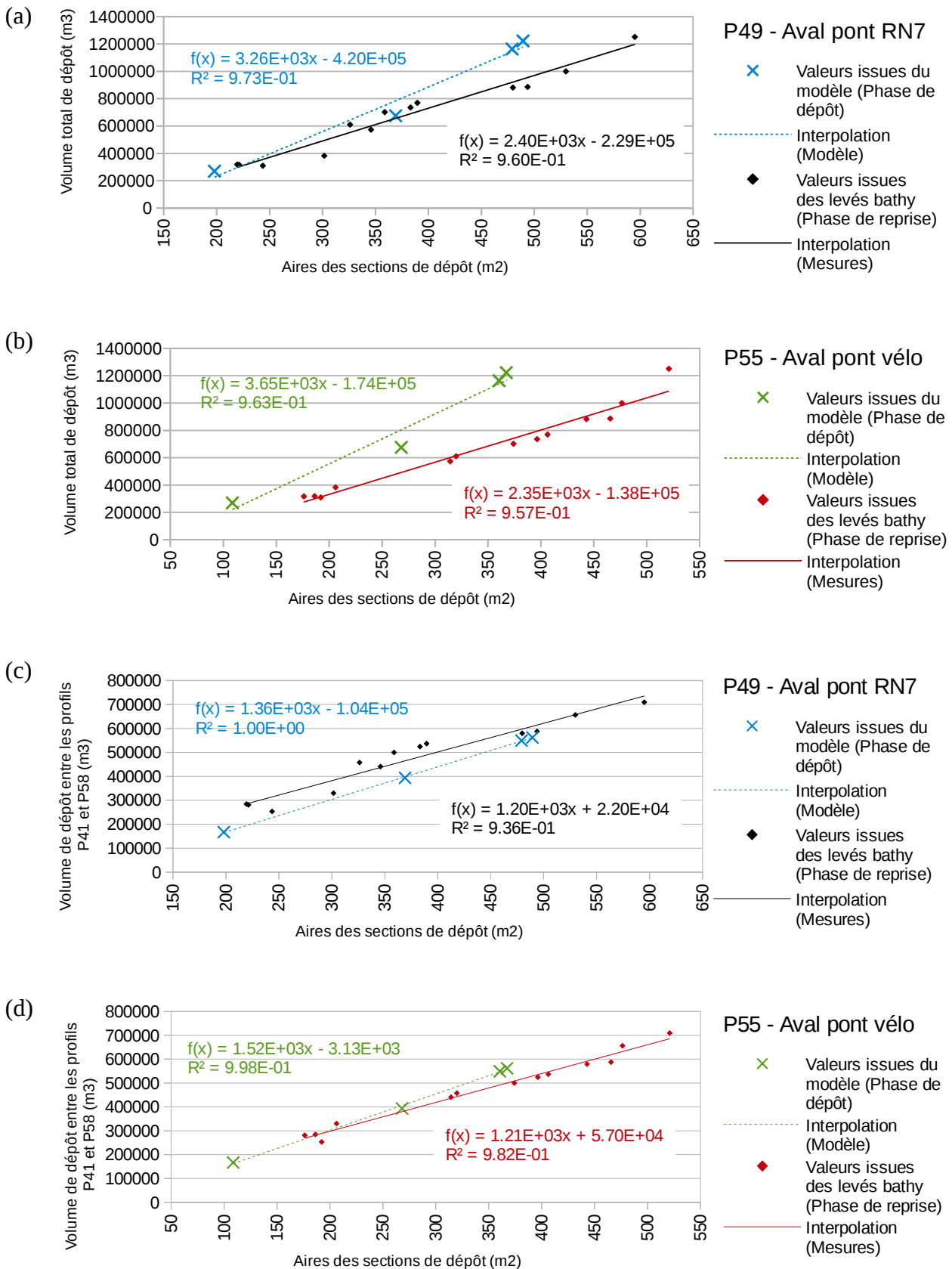


Figure 123: Relations entre les aires de sections de dépôt aux profils P49 et P55 et le volume total de dépôt dans l'Isère (respectivement (a) et (b)) ou le volume de dépôt entre les profils P41 et P45 (respectivement (c) et (d))

11. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'étude des flux de sédiments ayant transités à la station de Beaumont-Monteux sur l'Isère lors de l'événement de crue-chasse de mai 2015 a permis d'estimer le flux de matière en suspension (hors sable) à 7,6 millions de tonnes et celui de sable à un peu plus de 5 millions de tonnes. De très fortes incertitudes existent cependant sur ces valeurs notamment du fait de l'absence totale de mesures lors de la période de crue et du manque de données pendant la chasse (calage du turbidimètre, courbe granulométrique des échantillons, etc.). Il est donc importants de réaliser des prélèvements dès la crue et de faire une analyse granulométrique des échantillons prélevés.

Un modèle analytique pour les flux de sable a été proposé et calé à partir des volumes de sable déposés sur la partie aval de l'Isère et le canal d'amené. Il a servi de condition limite amont aux modèles numériques de transport de sable représentant la crue/chasse de 2015. Ceux-ci ont montré que lors de la crue/chasse, les sédiments transportés préférentiellement en suspension se déposent d'abord dans la partie aval de l'Isère avant qu'un exhaussement régressif se produise. Une partie des sédiments atteint cependant rapidement le canal d'amenée et s'y dépose. Néanmoins, comme cela avait pu être observé lors des campagnes de mesure, les eaux de l'Isère passent sous les eaux du Rhône du fait d'une densité plus élevée (température inférieure et concentration plus élevée) et les écoulements à la confluence ne peuvent donc pas être représentés par un modèle 2D. Enfin, les modèles 1D et 2D montrent que l'ampleur des dépôts est très dépendante des niveaux de la retenues de Bourg-lès-Valence.

L'analyse des mesures bathymétriques réalisés après la chasse a permis de mieux comprendre la dynamique de reprise des sédiments déposés. Dans la branche Isère, les débits de mise en mouvement des sédiments sont ainsi compris entre 400 et 500 m³/s, les volumes érodés diminuant avec le volume encore présent dans l'Isère. La modélisation de la reprise des sédiments montre que le modèle « suspension » calé pour la crue/chasse n'est plus adapté pour représenter la reprise des sédiments qui se fait a priori uniquement par charriage. Le modèle « charriage » permet de retrouver les débits de mise en mouvement et des volumes érodés plus cohérents avec les mesures, tout en présentant une dynamique d'érosion réaliste. Les conditions d'écoulement dans le canal d'amenée permettent une évacuation des dépôts de l'amont vers l'aval pour des débits relativement faibles (1000 m³/s).

Ces différents résultats permettent de mieux comprendre les différences entre les événements de 2008 et ceux de 2015. Si les apports devaient être à peu près les mêmes, les débits sont restés soutenus plus longtemps en 2008, ce qui a permis un meilleur transit des sédiments vers l'aval.

Il semble important de renforcer les mesures sur la station de Beaumont-Monteux car ce site correspond à la condition limite amont du site, notamment pour les apports en sables. En particulier, il est fondamental de pouvoir bien mesurer séparément les flux de sables (transportés par charriage gradué) des flux de limons et d'argiles (transportés essentiellement par suspension homogène). En effet, les ouvrages gérés par la CNR semblent globalement « transparents » pour les sédiments fins à l'exception des garages écluses (dépôts de limons grossiers). Les sables sont par contre très affectés par les ouvrages CNR et leurs dépôts peuvent avoir de gros impacts sur la navigabilité du canal d'amené et sur les risques de débordement. Il faut aussi consolider les mesures dans la zone des ponts pour vérifier la dynamique de dépôt représentée par le modèle. Pour limiter le nombre de mesures nécessaires, nous avons montré qu'il existait une relation entre le volume total déposé dans le tronçon aval de l'Isère et le niveau de dépôt dans la zone des ponts. Un critère d'arrêt des chasses pourrait donc être un niveau de référence dans la zone des ponts à définir

12. RÉFÉRENCES

- Beguïn, R. (2012), Étude multi-échelle de l'érosion de contact au sein des ouvrages hydrauliques en terre, Thèse de doctorat, LTHE, Université de Grenoble.
- Camenen, B., Andries, E., Faure, J.-B., de Linares, M., Gandilhon, F. & Raccasi, G. (2013). Experimental and numerical study of long term sedimentation in a secondary channel : example of the Beurre island on the Rhône river, France. Proc. Conference *ISRS Kyoto*, Japon.
- Camenen, B. & Larson, M. (2005). A bedload sediment transport formula for the nearshore Estuarine, *Coastal & Shelf Science*, 63: 249-260.
- Camenen, B. & Larson, M. (2008). A General Formula for Noncohesive Suspended Sediment Transport, *J. Coastal Res.*, 24: 615-627.
- Camenen, B.; Le Coz, J.; Dramais, G.; Peteuil, C.; Fretaud, T.; Falgon, A.; Dussouillez, P. & Moore, S. A. (2014). A simple physically-based model for predicting sand transport dynamics in the Lower Mekong River River Flow, Proc. 7th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, Schleiss, A. J.; de Cesare, G.; Franca, M. J. & Pfister, M. (Eds.), pp. 2189-2197.
- Compagnie Nationale du Rhône. (1999). Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Rapport technique. CNR Direction de l'Ingénierie.
- Compagnie Nationale du Rhône. (2016). Bourg lès Valence Données Bathymétriques Isère et canal d'aménée
- Dramais, G.; Dussouillez, P.; Moore, S.; Le Coz, J. & Camenen, B. (2013). Study of the sediment fluxes of the Lower Mekong River (2012 September 25 to October 6th field mission). World Wildlife Fund (WWF) / Mekong River Commission (MRC), 73p.
- EDF CIH, CNR (2012). Évaluation de la consigne de chasse des ouvrages de la Basse Isère, Rapport technique (5 juillet 2012).
- EDF-DPIH. (2015). *Synthèse du suivi environnemental de la chasse de la Basse-Isère du 3 au 26 mai 2015*. Rapport technique EDF, Division Production Ingénierie Hydraulique, Unité de Production Alpes, 39p. + annexes.
- Faure, J.-B. (2009). Résolution des équations de Barré de Saint-Venant 1D en réseaux complexes. Rapport technique Cemagref.
- Faure J.-B. (2012). Document de conception d'Adis-TS. Rapport technique Irstea.
- Guertault, L., Camenen, B., Peteuil, C., Paquier, A. (2014). 1D Modelling of fine sediments dynamics in a dam reservoir during a flushing event. Conférence *River Flow 2014*, Lausanne, Suisse.
- Guertault, L. (2015). Evaluation des processus hydro-sédimentaires d'une retenue de forme allongée : application à la retenue de Génissiat sur le Haut-Rhône. Thèse en préparation l'Université Lyon 1, France.
- Launay, M. (2014). Flux de contaminants particuliers dans un grand cours d'eau anthropisé : dynamique des PCB et du mercure transportés par les matières en suspension du Rhône, du Léman à la Méditerranée. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard, Lyon.
- Le Coz, J.; Chaléon, C.; Bonnifait, L.; Le Boursicaud, R.; Renard, B.; Branger, F.; Diribarne, J. & Valente, M. (2013). Analyse bayésienne des courbes de tarage et de leurs incertitudes : la méthode BaRatin *La Houille Blanche*, 6: 31-41.
- Le Coz, J.; Mansanarez, V.; Renard, B.; Pierrefeu, G.; Pobanz, K. & Le Boursicaud, R. (2016). Uncertainty analysis of stage-fall-discharge rating curves. Résumé soumis à *River Flow 2016*, Saint Louis, Etats-Unis.
- Meyer-Peter, E. & Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport Proc. 2nd IAHR Congress, pp. 39-64
- 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.
- Naudet, G., Dugué, V., Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G. & Paquier, A. (2015). *Étude de la dynamique hydrosédimentaire au niveau de la confluence entre l'Isère et le Rhône*. Rapport technique Irstea, 112p.

- Negrello, P., Menu, S. and Reynaud, S. (2012). Evolution de la consigne de chasse des ouvrages de la Basse Isère – Analyses complémentaires de la modélisation hydrosédimentaire du bief Rhône. Rapport technique EDF/CNR.
- Paquier A. (2013). Logiciel Rubar 20 - Notice d'emploi. Rapport technique Irstea.
- Sogreah (2011). Etude de nouvelles modalités de réalisation des chasses sur les ouvrages de la Basse-Isère – Rapport préliminaire de calage n°1741594.
- Ramette M. (1981). Guide d'hydraulique fluviale. Rapport LNH E40/81-04.
- Soulsby, R. L. & Whitehouse, R. J. S. W. (1997). Threshold of sediment motion in coastal environment. Proc. Pacific Coasts and Ports'97 Conf., University of Canterbury, pp. 149-154.
- Thollet, F.; Le Coz, J.; Antoine, G.; François, P.; Saguintaah, L.; Launay, M. & Camenen, B. (2013). *Influence de la granulométrie des particules sur la mesure par turbidimétrie des flux de matières en suspension dans les cours d'eau*. La Houille Blanche, 4 :50-56
- Van Rijn, L. C. (1993). Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas Aqua Publications, Amsterdam The Netherlands.