



**HAL**  
open science

## Étude de la dynamique hydro-sédimentaire au niveau de la confluence entre l'Isère et le Rhône

G. Naudet, V. Dugué, B. Camenen, Jérôme Le Coz, Guillaume Dramais,  
André Paquier

► **To cite this version:**

G. Naudet, V. Dugué, B. Camenen, Jérôme Le Coz, Guillaume Dramais, et al.. Étude de la dynamique hydro-sédimentaire au niveau de la confluence entre l'Isère et le Rhône. irstea. 2016, pp.112. hal-02606157

**HAL Id: hal-02606157**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02606157>**

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

**Auteurs : Grégoire NAUDET, Violaine DUGUE, Benoît CAMENEN, Jérôme LE COZ, Guillaume DRAMAIS et André PAQUIER**

Version du document:  
25/03/2016

Unité de Recherche *Hydrologie – Hydraulique*  
Centre de Lyon, 5, rue de La Doua, CS 70077  
69626 Villeurbanne Cedex - France  
Tél : 04 72 20 87 87 – Fax : 04 78 47 78 75

**mars 2016**





## TABLE DES MATIÈRES

1. Contexte de l'étude.....	3
2. Examen des données disponibles.....	5
2.1. Données bathymétriques.....	5
2.1.1. Présentation des données.....	5
2.1.2. Évolutions bathymétriques suite à la crue de 2008.....	6
2.1.3. Volumes déposés suite à la crue de 2008.....	12
2.2. Données granulométriques.....	15
2.2.1. Localisation des mesures granulométriques.....	15
2.2.2. Isère : fondasol – oct/nov 2003.....	16
2.2.3. Isère : C4, C5, C9 – juin/août 2008.....	17
2.2.4. Garage amont et écluse de BV -juin 2008.....	18
2.3. Hydrologie.....	19
3. Crues et chasses 2015 sur la Basse-Isère.....	21
3.1. Hydrogrammes.....	21
3.2. Gestion des ouvrages lors de l'épisode de crue/chasse de mai 2015.....	21
3.2.1. Consigne de chasse sur la basse Isère.....	21
3.2.2. Consigne des ouvrages du Rhône.....	23
3.3. Chroniques de concentration en MES.....	24
.....	25
4. Campagnes de mesure du transport sableux.....	27
4.1. Essais de faisabilité de prélèvements in-situ.....	27
4.2. Campagnes de mesure.....	27
4.3. Mesures du transport en suspension.....	28
4.3.1. Présentation des mesures.....	28
4.3.2. Mélange des eaux Isère/Rhône.....	28
4.3.3. Mesure des concentrations dans l'Isère.....	30
4.3.4. Mesure des concentrations dans le canal d'amenée.....	33
4.3.5. Mesure de la granulométrie.....	38
4.4. Mesures du transport par charriage.....	42
4.4.1. Localisation du site de mesure.....	42
4.4.2. Campagne de mesure du 7 mai 2015.....	43
4.4.3. Campagne de mesure du 18 juin 2015.....	47
5. Courbe de tarage sédimentaire.....	51
5.1. Modélisation du transport solide local.....	51
5.1.1. Contraintes de cisaillement.....	51
5.1.2. Transport solide par charriage.....	51
5.1.3. Profils de concentration en sables.....	52
5.2. Un modèle simple pour estimer les flux sableux au travers d'une section.....	54
5.2.1. Station hydrométrique.....	54
5.2.2. Courbe de tarage sédimentaire.....	55
6. Modélisation 2D des écoulements au niveau de la confluence... ..	59
6.1. Étendue du modèle et bathymétrie.....	59
6.2. Code de calculs utilisé.....	62
6.3. Construction du modèle numérique 2D.....	63
6.3.1. Maillage.....	63
6.3.2. Conditions d'entrée des calculs.....	64
6.3.3. Calage du modèle 2D.....	64

6.3.4. Calculs réalisés.....	65
6.4. Résultats et discussion.....	66
6.4.1. Champs de vitesse.....	66
6.4.2. Paramètre de Shields.....	69
6.4.3. Discussion.....	72
7. Modélisation hydro-sédimentaire 1D.....	73
7.1. Le modèle hydro-sédimentaire de la confluence Isère-Rhône.....	73
7.1.1. Zone couverte.....	73
7.1.2. Données bathymétriques utilisées.....	73
7.1.3. Données hydrauliques utilisées.....	74
7.2. Codes de calculs utilisés.....	74
7.2.1. Modèle hydraulique 1D : Mage.....	74
7.2.2. Modèle 1D d'advection-diffusion : Adis-TS.....	75
7.3. Calage hydraulique.....	75
7.3.1. Calage des lignes d'eau.....	75
7.3.2. Intégration des aménagements hydroélectriques.....	77
7.4. Simulation hydraulique de la crue de mai-juin 2008.....	79
7.4.1. Hydrogrammes d'entrées.....	79
7.4.2. Hydrogrammes simulés.....	79
7.4.3. Respect des consignes d'exploitation.....	80
7.4.4. Décomposition des hydrogrammes.....	81
7.5. Simulation hydro-sédimentaire de la crue de mai-juin 2008.....	82
7.5.1. Condition limite amont à Beaumont-Montoux.....	82
7.5.2. Transport d'un soluté.....	84
7.5.3. Transport de sédiment à granulométrie simple.....	85
7.5.4. Transport de sédiments à granulométrie composée.....	86
7.5.5. Recomposition de la granulométrie et correction de la chronique de concentration.....	91
7.5.6. Tests de sensibilité.....	92
8. Conclusions et Perspectives.....	95
9. Références.....	97
10. Annexe liée aux mesures ADCP.....	99
11. Annexes liées au modèle 1D.....	107
11.1. Synthèse des données topographiques utilisées pour la construction du modèle du Rhône de la station hydrométrique de Ternay à l'aménagement de Caderousse.....	107
11.2. Débits turbinables maximum et débits réservés actuels (2014) des aménagements hydroélectriques modélisés.....	108
11.3. Consignes d'exploitation avec points de réglage associés pour les aménagements hydroélectriques modélisés.....	109
11.4. Lignes d'eau utilisées pour le calage des coefficients de Strickler.....	110
11.5. Coefficients de Strickler issus du calage hydraulique.....	111
11.6. Affluents du Rhône modélisés.....	112
11.7. Modélisation de la crue de mai-juin 2008 - Respect des consignes d'aménagement.....	113
11.8. Résultats à Pont-de-Valence des simulations avec les différents types de granulométrie.....	116

# 1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Suite à une première réunion d'échange CNR / EDF / OSR / DREAL le 13/11/13 sur le suivi complémentaire Basse-Isère, l'Observatoire des sédiments du Rhône (OSR) a été sollicité pour proposer des actions en vue de la mise en place d'un protocole de suivi complémentaire des flux sédimentaires apportés par la Basse-Isère au Rhône.

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 a comme objectif :

- d'une part 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 ;
- d'autre part de définir et tester des dispositifs permettant de suivre le transport sédimentaire pour envisager un pilotage en temps réel des aménagements.

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.

Un premier ensemble d'actions spécifiques à l'étude du fonctionnement hydro-sédimentaire du confluent Isère-Rhône (**examen des données disponibles, essais de faisabilité de prélèvements in-situ, tests de modélisation du transport de sables**) est proposé pour 2015, en complément du programme OSR4 (2015-2017).

Les travaux du programme OSR2 (2010-2013) ont permis d'améliorer l'observation et la quantification des apports au Rhône de l'Isère en charge de lessivage (« MES », washload : suspension fine homogène de limons et argiles), notamment sur l'**événement de mai-juin 2008**, mais aussi à l'échelle annuelle et pluri-annuelle (2002-2012), essentiellement grâce aux observations de la station Isère-Campus (EDF, LTHE, UJF).

Le programme OSR3 (2014) a permis l'amélioration du calage fin (hydraulique) du modèle hydro-sédimentaire de Lyon à la mer. Ce travail a donc inclus le périmètre d'investigation (aménagements de Bourg-lès-Valence et de Beauchastel), avec notamment des tests sur l'événement de 2008, mais pas sur les dépôts-érosions ni le transport de charge de fond, en particulier la charge de suspension graduée en sables, qui a fortement contribué aux dépôts dans les aménagements du Rhône en 2008. Toujours dans ce programme OSR3 (2014), aucune action sur l'observation et la modélisation des flux de sables n'a été financée en raison d'un budget réduit (report à OSR4).

Portée par l'OSR au travers des deux centres de recherche que sont Irstea et le CEREGE, la présente étude vise à la **mise en place d'un protocole de suivi complémentaire des flux sédimentaires apportés par la Basse-Isère au Rhône**. Un co-financement spécifique de CNR et EDF est mis en place pour la réalisation de cette étude spécifique en plus du financement déjà porté par EDF et CNR pour l'OSR4.

La zone d'étude est présentée Fig. 1. Elle se limite côté Isère à la partie aval à l'aménagement de Beaumont-Montoux. Côté Rhône, l'étude se focalisera tout particulièrement sur le canal d'amenée de l'usine de Bourg-lès-Valence en particulier en aval de la confluence avec l'Isère.

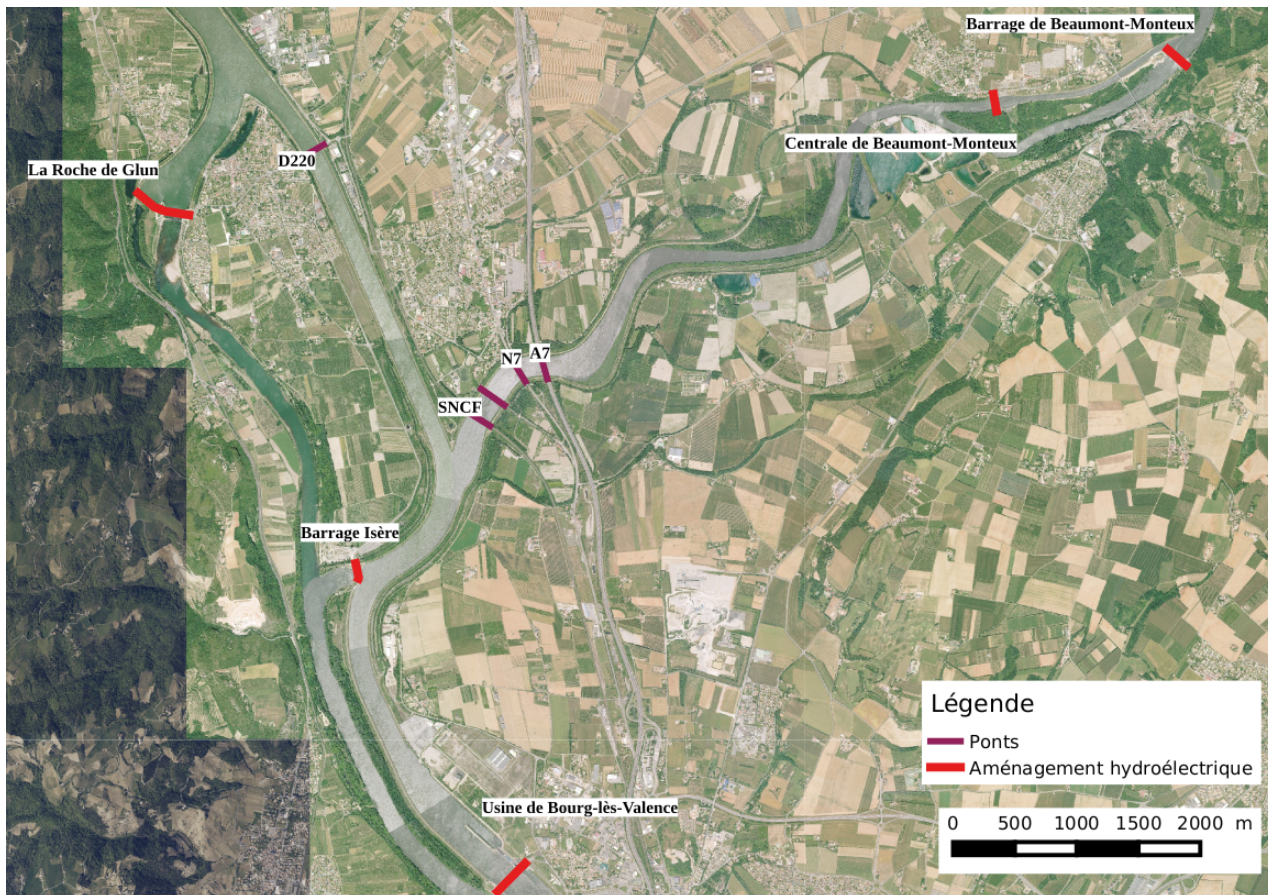


Figure 1: Plan de situation de l'étude de la confluence Rhône-Isère (source fond de carte : IGN).



## 2. EXAMEN DES DONNÉES DISPONIBLES

### 2.1. Données bathymétriques

#### 2.1.1. Présentation des données

Deux types de données existent et ont été transmises par la CNR en avril 2015. Il s'agit :

- de cartes bathymétriques qui présentent une altitude tous les mètres carrés à l'aval du pont SNCF sur l'Isère et le long du chenal navigable du Rhône. La dernière campagne de mesure a été effectuée en mars 2015.
- de profils en travers de l'Isère entre l'aval de l'usine de Beaumont-Monteux et la confluence et du Rhône sur tout son linéaire (distribués en différents tronçons levés à des dates différentes). La CNR a synthétisé ces informations par tronçon de cours d'eau (cf. Fig. 2 et Tab. 1). Les données sont disponibles entre 1995 et 2015.

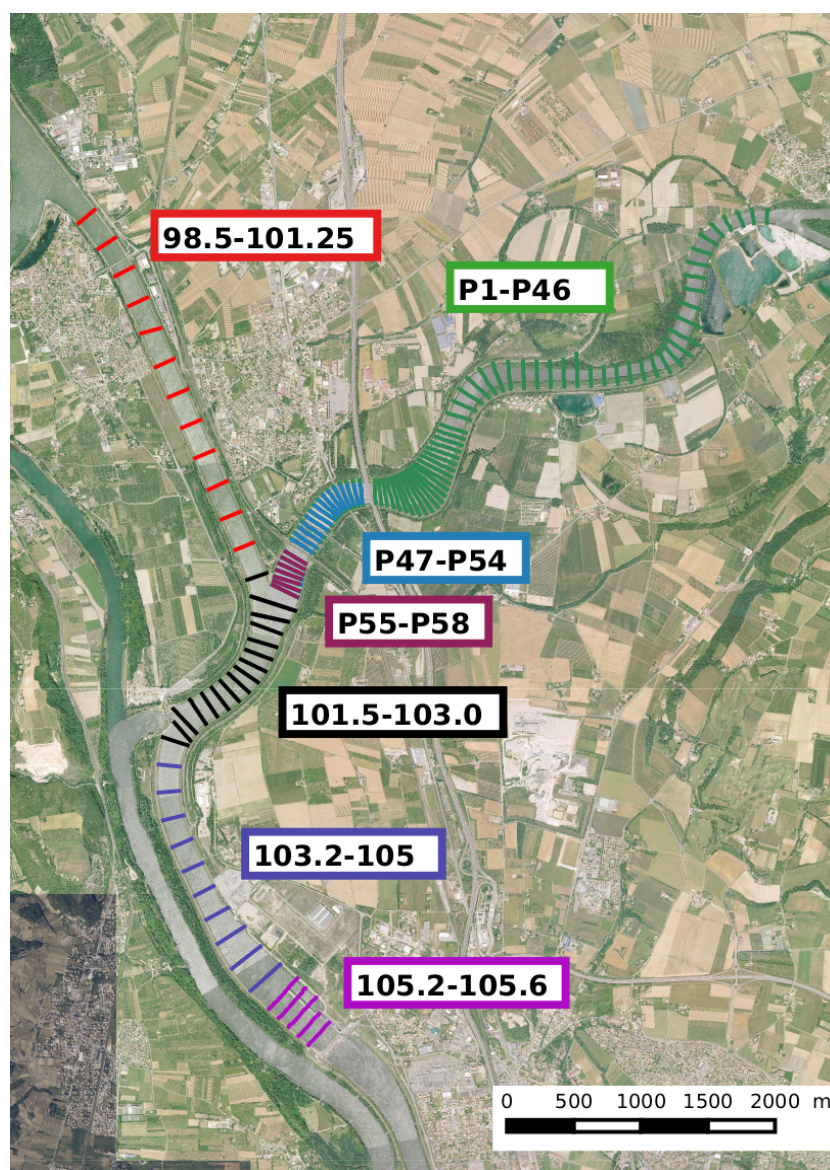


Figure 2: Plan de situation des différents transects bathymétriques mesurés sur la confluence Rhône-Isère (source fond de carte : IGN).

Tableau 1 : Liste des relevés bathymétriques sur la confluence Rhône-Isère

Cours d'eau	Tronçon	Date de levée	Code couleur carte			
Isère	P1 – P58	Mai 2006	■	■	■	
Isère	P47 – P58	Juin 2007		■	■	
Isère	P55 – P58	Mai 2008			■	
Isère	P1 – P46	Août 2008	■			
Isère	P47 – P58	Sept 2008		■	■	
Isère	P11 – P46	Oct 2013	■			
Isère	P47 – P58	Avril 2011		■	■	
Isère	P47 – P54	Juin 2012		■		
Isère	P47 – P54	Oct 2013		■		
Isère	P47 – P54	Avril 2014		■		
Isère	P47 – P58	Mars 2015		■	■	
Isère	P11 – P54	Juin 2015	■	■		
Rhône	P98.5 – P105	Mars 2004	■	■	■	
Rhône	P101.6 – P103	Mai 2006		■		
Rhône	P98.25 – P105.6	Déc 2006	■	■	■	■
Rhône	P101.5 – P103	Juin 2007		■		
Rhône	P101.6 – P103	Mai 2008		■		
Rhône	P101.6 – P103	Juin 2008		■		
Rhône	P98.25 – P105.6	Mars 2009	■	■	■	■
Rhône	P98.25 – P105	Févr 2011	■	■	■	
Rhône	P105.2 – P105.6	Mars 2011				■
Rhône	P101.5 – P103	Avril 2011		■		
Rhône	P101.6 – P103	Mai 2012		■		
Rhône	P101.5 – P103	Oct 2012		■		
Rhône	P101.5 – P103	Avril 2014		■		
Rhône	P101.5 – P105.6	Mars 2015		■	■	■
Rhône	P101.6 – P105	11 Mai 2015		■		
Rhône	P101.6 – P105.6	20 Mai 2015		■	■	■
Rhône	P101.5 – P103	Juin 2015		■		

### 2.1.2. Évolutions bathymétriques suite à la crue de 2008

Les levés bathymétriques sont nombreux mais n'encadrent pas la crue et la chasse de 2008 à l'exception :

- du tronçon P55-P58 (Isère) levé en mai et septembre 2008.
- du tronçon 101.6-103 (Rhône aval confluence) levé en mai et juin 2008

### 2.1.2.1. Canal d'aménée

Nous comparons ci-dessous les profils du **tronçon P101.6 -P103 (Rhône)** levés par la CNR en mai 2008, en juillet 2008, puis mars 2009.

La Fig. 3 symbolise les zones de dépôt selon leur épaisseur (comparaison entre la bathymétrie de juillet 2008 et celle de mai 2008). On observe que les dépôts dans le canal d'aménée apparaissent très vite après la confluence avec l'Isère et se concentrent en rive droite jusqu'au barrage Isère.

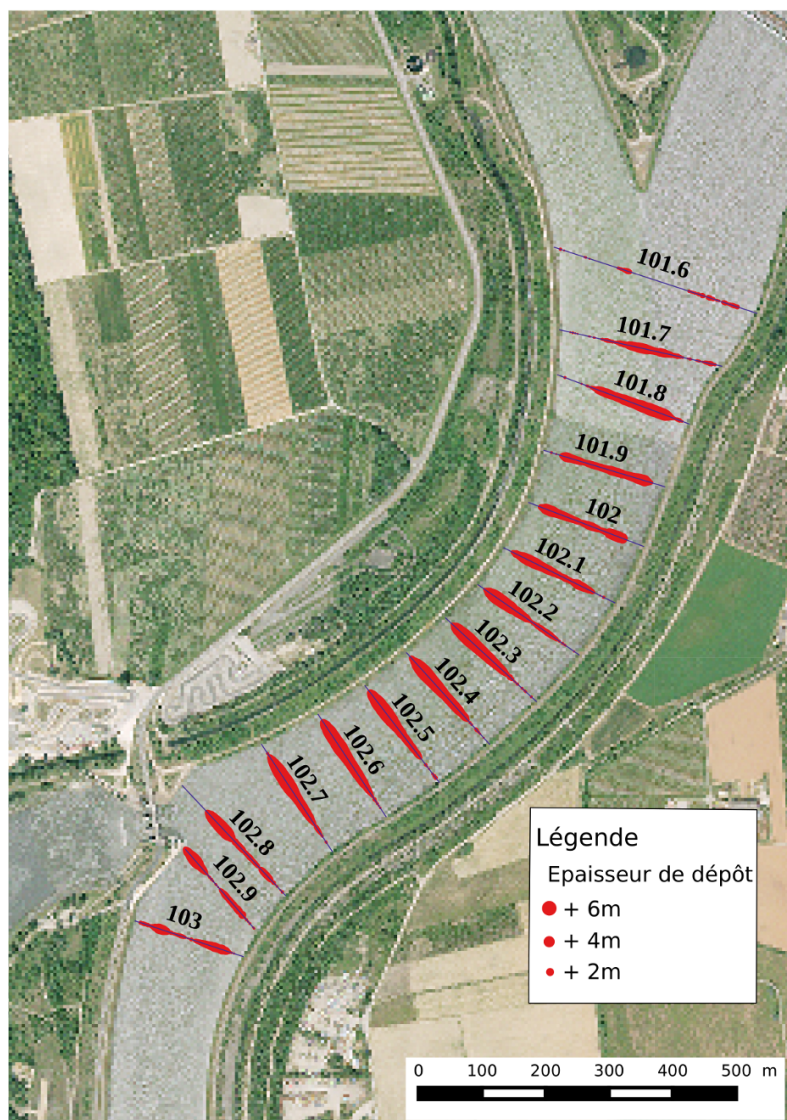
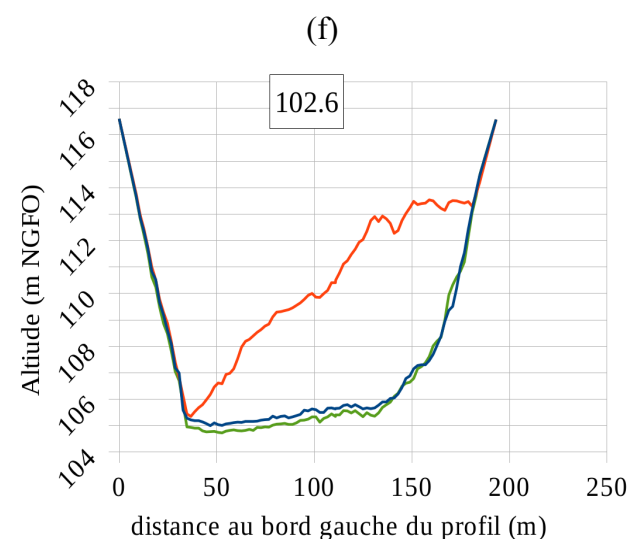
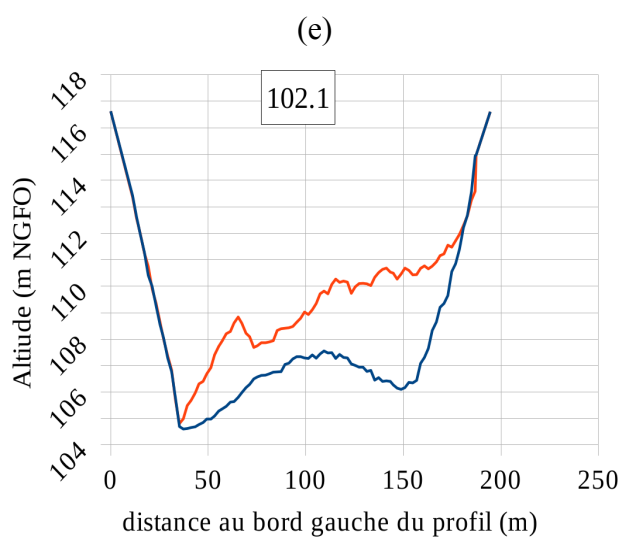
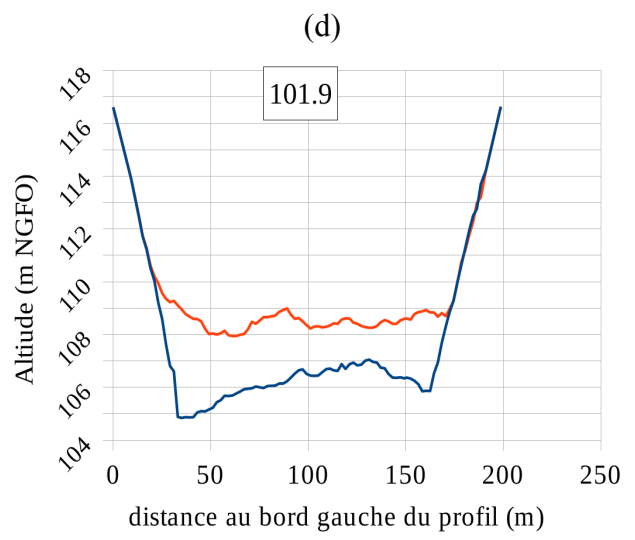
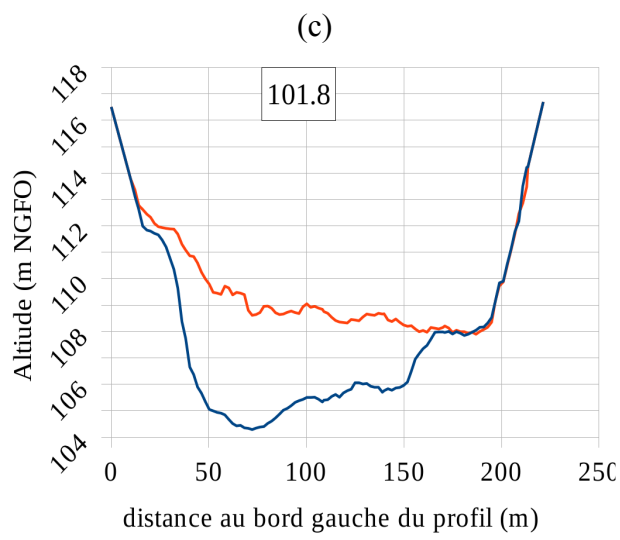
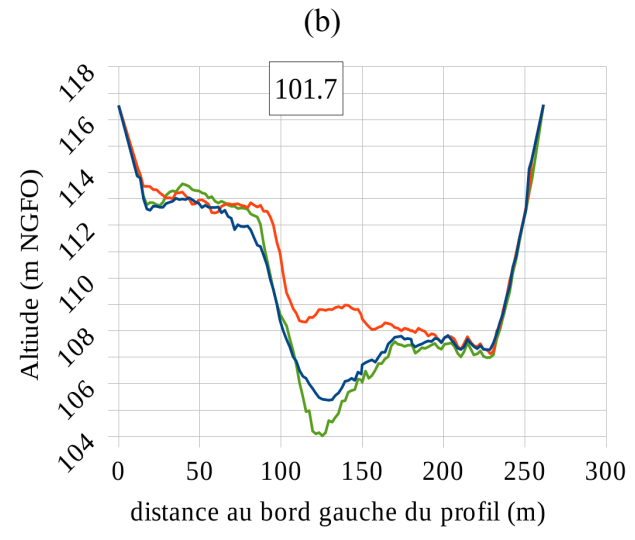
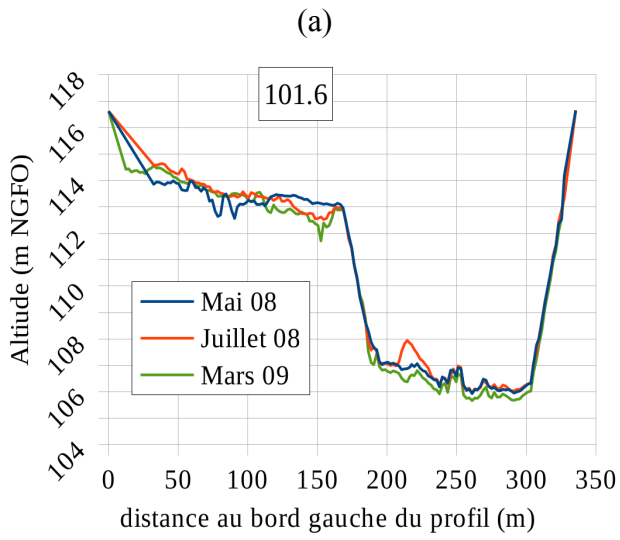


Figure 3: Visualisation des dépôts dans le canal d'aménée suite à la crue de 2008 (source fond de carte : IGN).

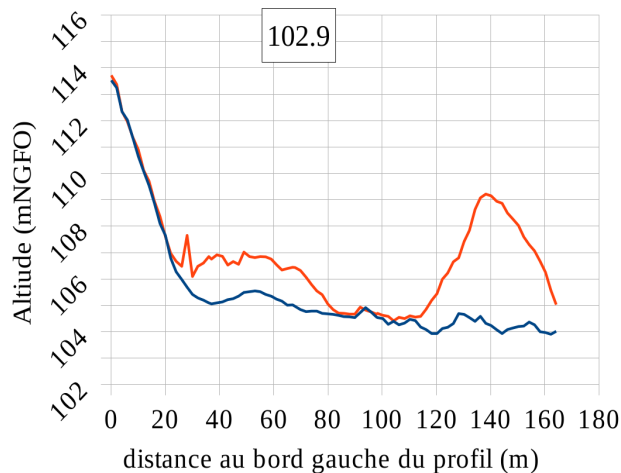
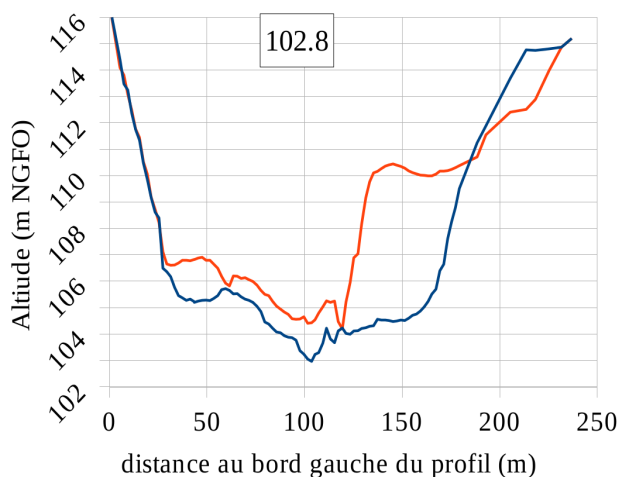
L'analyse de ces profils en travers montre qu'à la confluence, les dépôts impactent d'abord la rive gauche du Rhône (101.6 à 101.7, Fig. 4a et b) avant de s'étaler sur l'ensemble du lit (101.9, Fig. 4d). Ensuite la zone de dépôt se déplace en rive droite (intrados du méandre (102.0 à 102.8, Fig. 4e, f, et g). Ceci peut être lié au fait que l'on se situe à l'extrados de l'écoulement par rapport à l'Isère, sachant que l'écoulement de l'Isère en crue tend à plonger sous le Rhône du fait de la densité plus élevée. Une autre hypothèse est l'impact de l'ouverture du barrage de l'Isère qui « attire » l'écoulement. Dans le canal à l'aval du barrage de l'Isère, les dépôts se répartissent de part et d'autre du chenal (102.9 à 103, Fig. 4h et i). **La hauteur maximale des dépôts peut atteindre 7m** (profil 102.6, Fig. 4f).





(g)

(h)



(i)

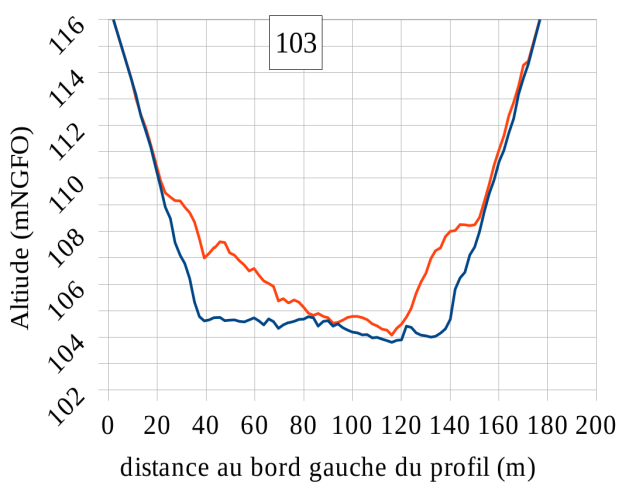


Figure 4: Transects bathymétriques dans le canal d'amenée avant et après la crue de 2008.

La comparaison de ces profils avec ceux de mars 2009 montre de plus que les matériaux déposés ont été évacués naturellement (cf. Fig.4b et f).

### 2.1.2.2. Isère aval

Nous comparons ci-dessous les profils du **tronçon P55-P58 (Isère)** levés par la CNR en mai 2008, en septembre 2008, puis avril 2011. La Fig. 5 symbolise les zones de dépôt selon leur épaisseur (comparaison entre la bathymétrie de septembre 2008 et celle de mai 2008).

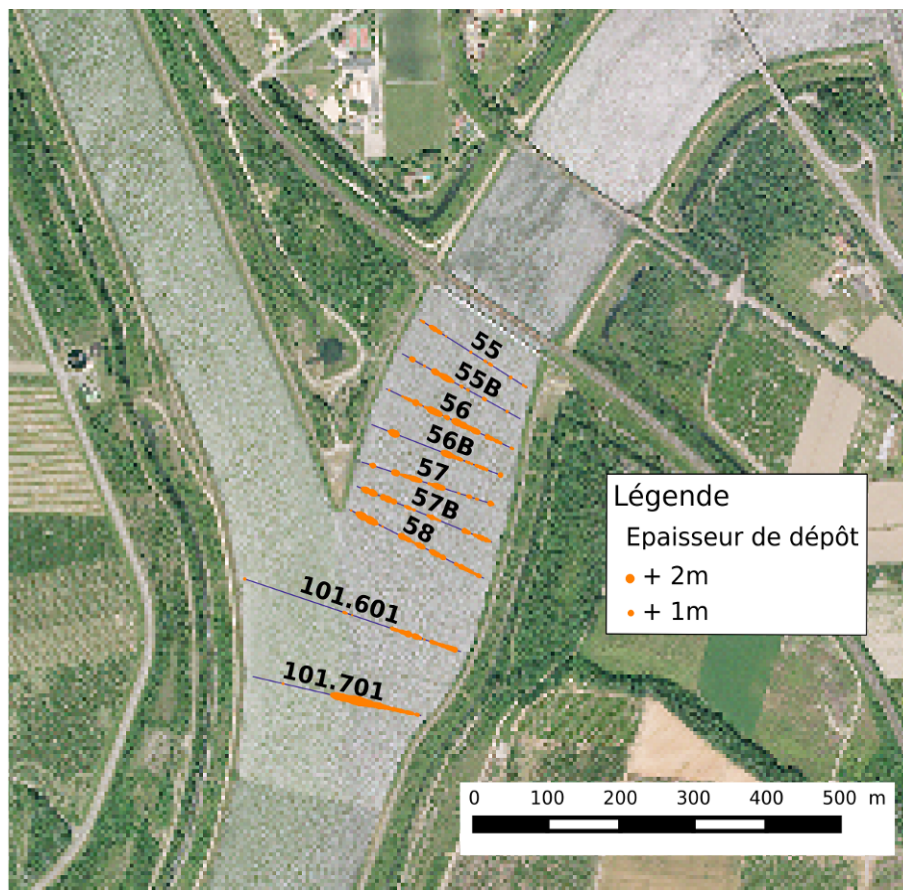


Figure 5: Visualisation des dépôts dans l'Isère juste en amont de la confluence suite à la crue de 2008 (source fond de carte : IGN).

L'analyse des évolutions bathymétriques entre mai 2008 et septembre 2008 montre une tendance au lissage des profils en travers : les principales fosses sont comblées tandis que les points hauts sont plutôt érodés (Fig. 6). L'axe d'écoulement principal reste en rive droite mais sa profondeur est atténuée.

Les exhaussements maximaux sont compris entre 0,70 m (P55) et 1,60 m (P58).

La comparaison de ces profils avec ceux d'avril 2011 (Fig. 6c, d et f) montre que les matériaux déposés ont été en grande partie évacués.

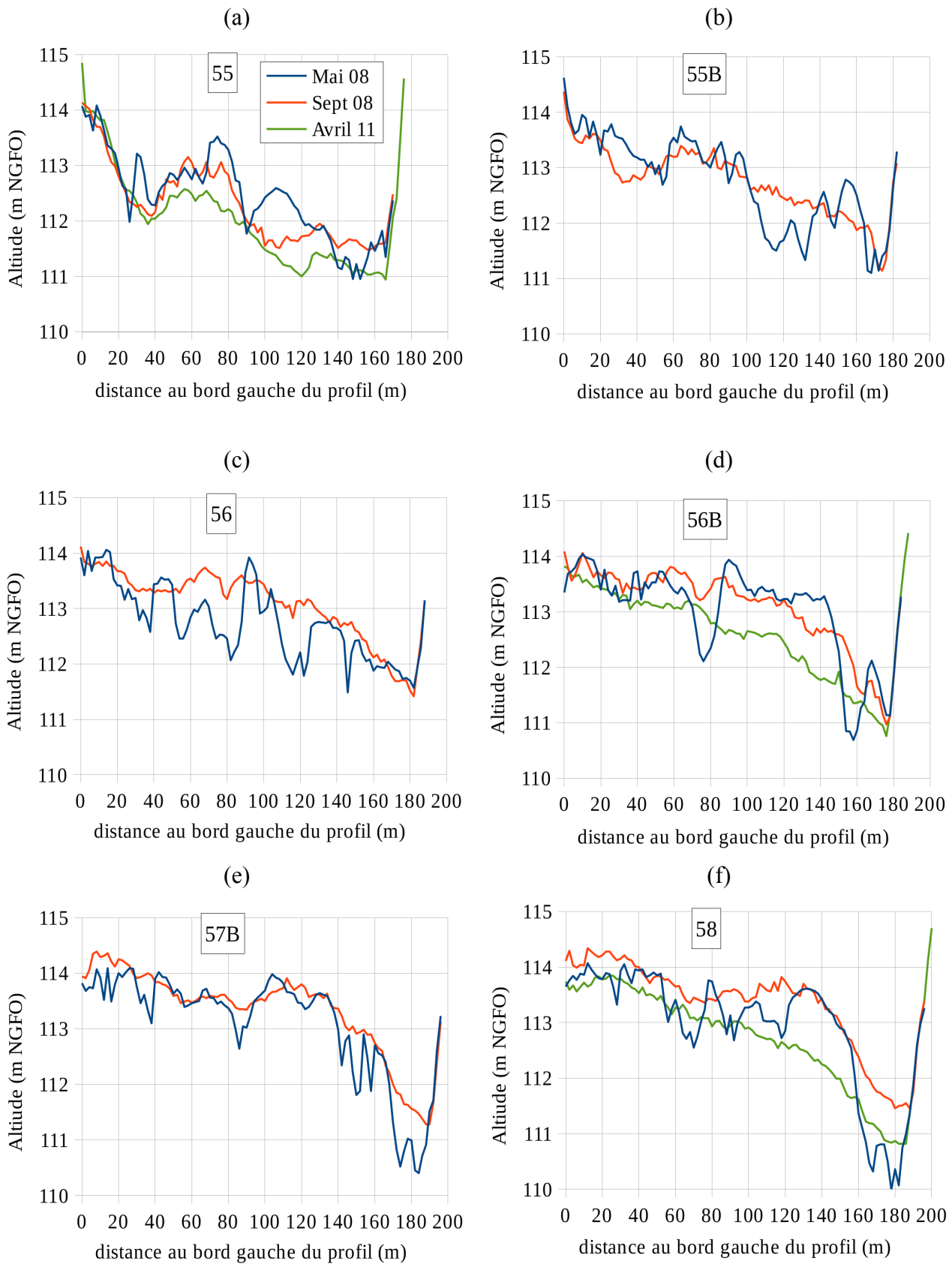


Figure 6: Transects bathymétriques dans l'Isère juste en amont de la confluence avec le Rhône avant et après la crue de 2008.



### 2.1.3. Volumes déposés suite à la crue de 2008

A partir des profils présentés au paragraphe 2.1.2.1, nous pouvons estimer les volumes déposés dans le canal d'amenée suite à la crue de 2008. Pour cela, nous avons associé à chaque aire de dépôt mesurée sur les transects entre mai et juillet 2008 une distance correspondant à la somme des deux demi-distances avec les transects précédent et suivant :

$$V_{\text{dépôts}} = \sum_i \frac{(D_{i-1} + D_i)}{2} S_{\text{dépôt}, i} \quad \text{Eq. 1}$$

où  $V_{\text{dépôt}}$  est le volume total des dépôts  $D_i$  la distance entre les transects  $i$  et  $i+1$ , et  $S_{\text{dépôt}, i}$  l'aire de dépôt mesurée sur le transect  $i$ . Les distances entre profils/transects ont été déterminées à partir de l'axe présenté en Fig. 7.

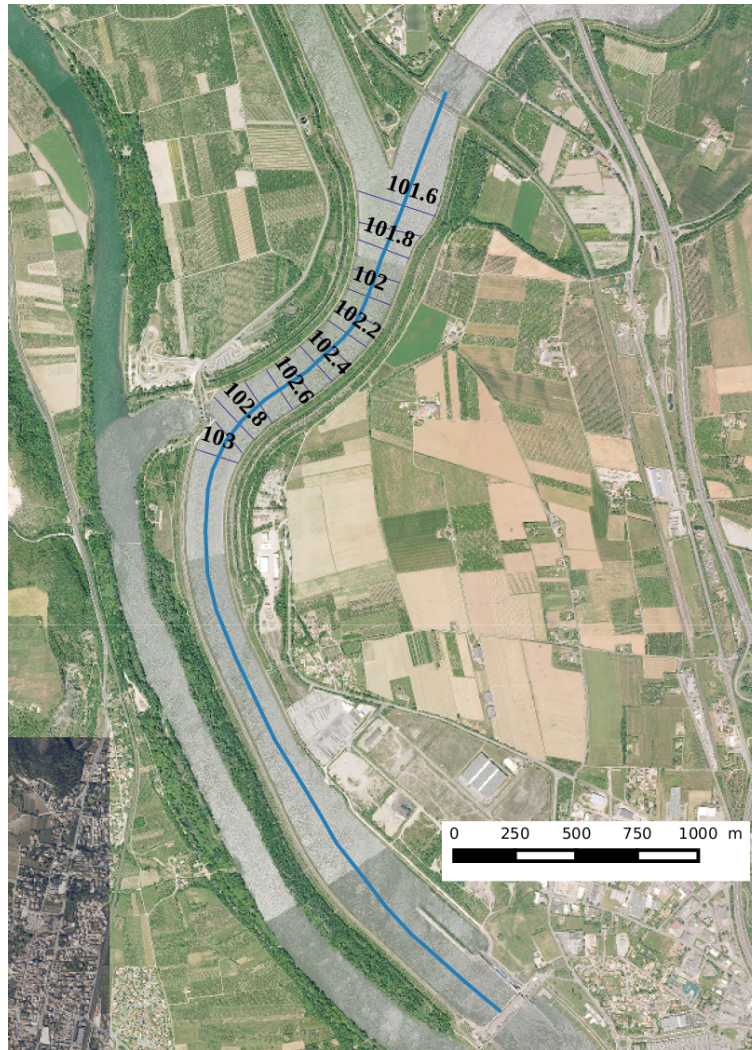


Figure 7: Axe de calcul des distances entre transects (source fond de carte : GoogleMap).

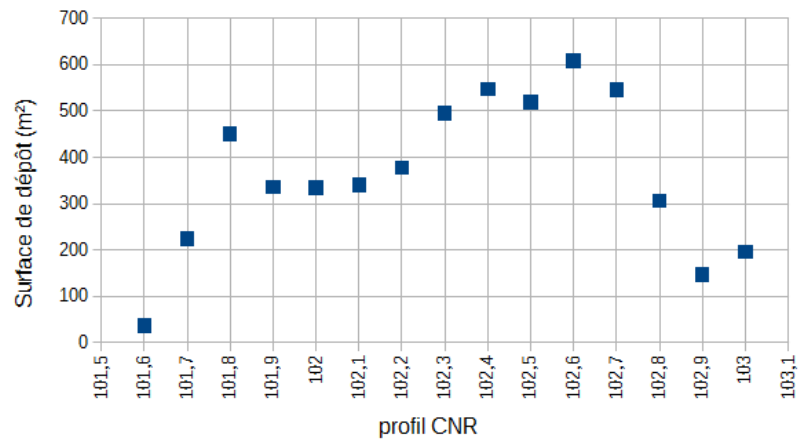
**Les volumes déposés dans le Rhône entre les profils 101.6 et 103 se montent à 515 000 m<sup>3</sup>** (Tab. 2). Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle fournie dans le rapport d'EDF CIH, CNR (2012) et qui avait été estimée à 572 000 m<sup>3</sup> entre la confluence Isère et le barrage Isère. La différence peut provenir en partie de la manière de calculer les distances entre profils mais reste dans la marge d'incertitude pour ce type de mesure (environ 10%).

En réalité, ce volume est le volume déposé encore présent en septembre 2008. En effet, comme nous le verrons par la suite, les sédiments sont évacués naturellement et relativement rapidement vers l'aval et se seraient accumulés dans la retenue de Beauchastel. Le volume calculé est donc a priori une sous-estimation du dépôt à l'issue de l'événement de mai 2008.

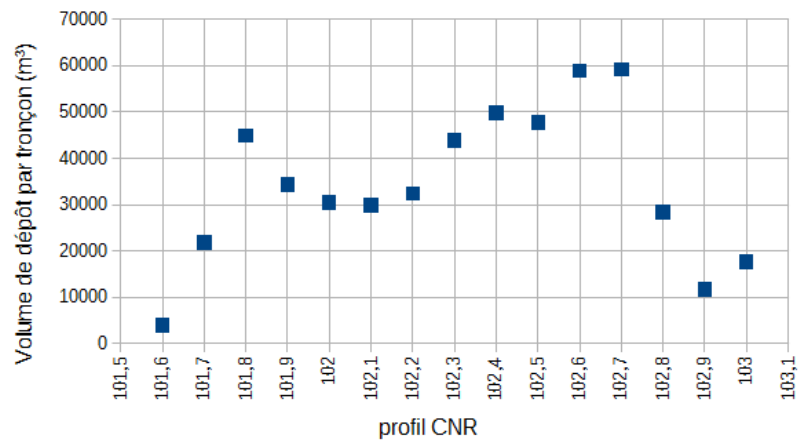
Tableau 2 : Synthèse des volumes de dépôt dans le canal d'aménée suite à la crue de 2008.

Profil	Distance au barrage de Beau-chastel [m]	Aire de la section de dépôt [m <sup>2</sup> ]	Distance entre deux sections [m]	Volume de dépôt autour de la section [m <sup>3</sup> ]	Volume de dépôt cumulé [m <sup>3</sup> ]
101.6	3989	36	107	3885	3885
101.7	3882	224	97	21816	25701
101.8	3795	450	100	44962	70663
101.9	3682	335	102	34302	104964
102	3590	335	91	30418	135382
102.1	3500	340	88	29806	165189
102.2	3415	377	86	32374	197563
102.3	3329	496	88	43831	241394
102.4	3238	548	91	49853	291247
102.5	3147	519	92	47798	339045
102.6	3054	608	97	58874	397919
102.7	2953	545	109	59211	457129
102.8	2837	306	93	28428	485557
102.9	2768	146	80	11655	497212
103,0	2678	196	90	17662	<b>514874</b>

(a)



(b)



(c)

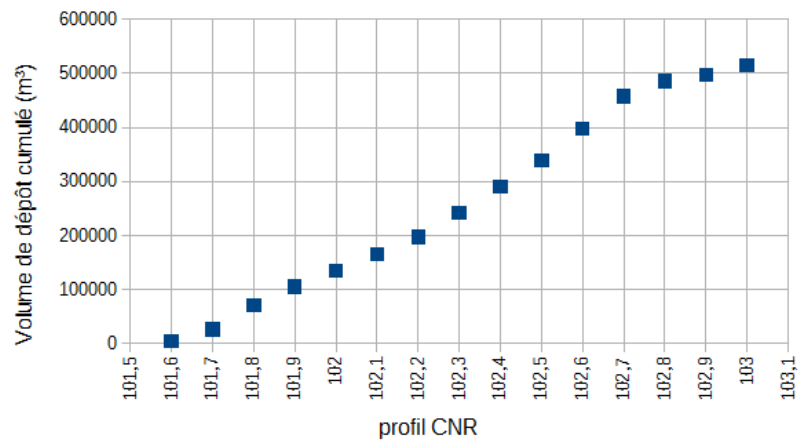


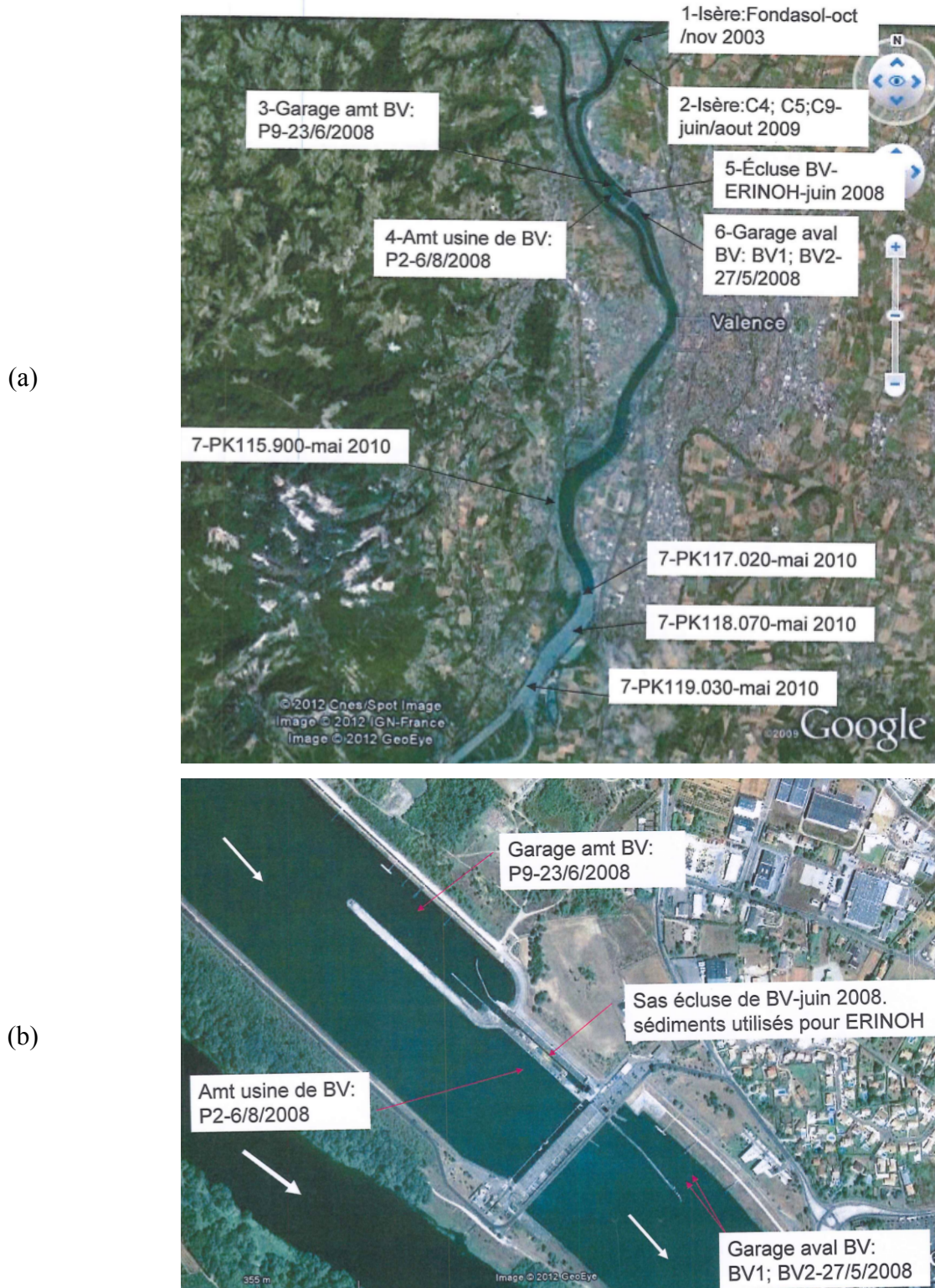
Figure 8: Évolution longitudinale des dépôts dans le canal d'aménée suite à la crue de 2008 : (a) aire des sections des dépôts, (b) volumes, (c) volumes cumulés.



## 2.2. Données granulométriques

### 2.2.1. Localisation des mesures granulométriques

La Fig. 9 localise et date les mesures granulométriques disponibles sur l'Isère, l'usine de Bourg-lès-Valence et la retenue de Beauchastel (sources CNR).





Nous résumons ci-après les résultats des sondages du secteur d'étude de l'amont vers l'aval :

### 2.2.2. Isère : fondasol – oct/nov 2003

Du 24 octobre au 5 novembre 2003, 9 sondages ont été réalisés sur l'Isère entre l'aval du pont de la nationale (P49) et la confluence (P58). La localisation des sondages est donnée en Fig. 10. Ils fournissent la description géologique du lit de 0 à 3m ainsi que les analyses granulométriques par tamisage des matériaux sondés (Tab. 3).

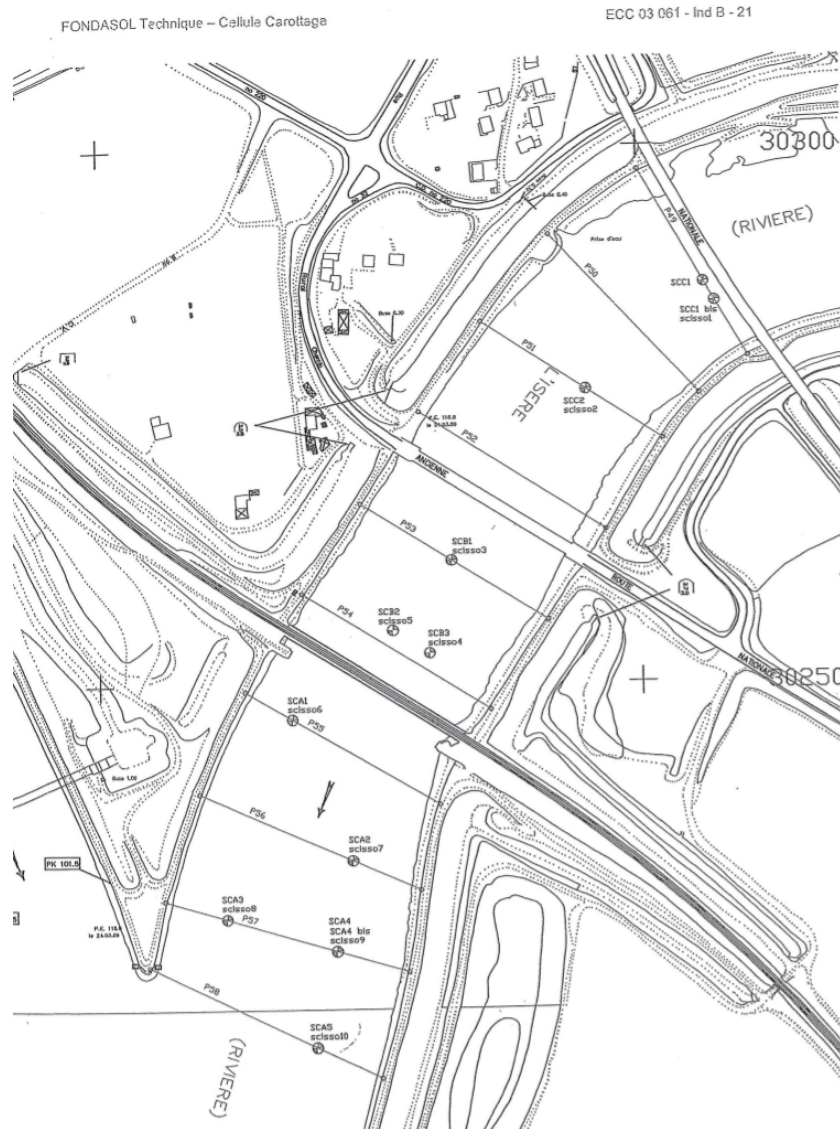


Figure 10: Carte de localisation des sondages réalisés sur l'Isère en 2003.

*Tableau 3 : Caractéristiques des échantillons des sondages réalisés sur l'Isère en 2003.*

Profil	N° sondage	Profondeur [m]	Nature du matériau
P49	SCC 1 bis	0-1 1-2	Sable fin limoneux et vasard avec débris végétaux Sable fin limoneux et vasard avec débris végétaux
P51	SCC 2	0-1 1-2 2-2,6	Sable fin Sable fin limoneux et vasard avec débris végétaux Sable fin limoneux et vasard avec débris végétaux
P53	SCB1	0-1 1-2 2-3	Sable fin limoneux et vasard avec débris végétaux Sable fin Sable fin
P54 - RD	SCB2	0-1 1-2 2-3	Sable fin Sable fin Sable fin
P54 - RG	SCB3	0-1 1-2 2-3	Sable fin Sable fin Sable fin limoneux et vasard avec débris végétaux
P55	SCA1	0-1 1-2 2-3	Sable fin Sable fin Sable fin
P56	SCA2	1,1-2,1 2,1-3,1	Sable fin limoneux et vasard avec débris végétaux Sable fin limoneux et vasard avec débris végétaux
P57 - RD	SCA3	0-1 1-2 2-3	Sable fin Sable fin Sable fin limoneux et vasard avec débris végétaux
P57 - RG	SCA4	0,5-1,5	Sable fin
P57 - RG	SCA4 bis	0,3-1,3 1,3-2,3 2,3-3,0	Sable fin Sable fin limoneux et vasard avec débris végétaux Sable fin limoneux et vasard avec débris végétaux
P58 - RG	SCA5	0-1 1-2 2-3	Sable fin Sable fin limoneux et vasard avec débris végétaux Sable fin limoneux et vasard avec débris végétaux

### 2.2.3. Isère : C4, C5, C9 – juin/août 2008

Des sondages ont été réalisés les 5 juin et 6 août 2008 dans l'Isère juste avant la confluence. Les analyses granulométriques par tamisage ou sédimentation des matériaux sondés sont données dans le Tab. 4. La localisation des sondages est donnée Fig. 11.

*Tableau 4 : Caractéristiques des échantillons des sondages réalisés sur l'Isère en 2008.*

Profil	N° sondage	Profondeur [m]	Nature du matériau
P55 ?	C5	0-0,55	Limon
P58 ?	C9	0-0,55	Limon



Figure 11: Carte de localisation des sondages réalisés sur l'Isère en 2008.

#### 2.2.4. Garage amont et écluse de BV -juin 2008

Des dragages du garage amont de l'écluse et de l'écluse ont été réalisés en 2004 et 2008. Il n'y a pas eu de dragages sur le reste du linéaire étudié entre 1999 et 2008.

Une partie des sédiments extraits et mis en dépôt lors des dragages du garage amont et de l'écluse de Bourg-lès-Valence a été réutilisée pour la réalisation du modèle physique d'une tranche de digue dans le cadre du projet ERINOH.

Ces dragages ont chacun fait l'objet d'une fiche incidence PCB nécessitant une analyse granulométrique. Concernant le garage amont, le prélèvement a eu lieu le 23/06/2008 ; concernant l'écluse, le prélèvement a été réalisé le 06/08/2008. L'analyse a été réalisée selon la méthode « Granulométrie méthode de la pipette » selon la norme NF X31-107. Les résultats des analyses granulométriques sont présentés au Tab. 5.

Tableau 5 : Caractéristiques granulométriques des échantillons fins (garage amont et écluse) prélevés en 2008.

Nom classe granulométrique	Diamètres	% en masse de la classe	
		Garage amont	Écluse
Argiles	$d < 2\mu\text{ m}$	6,0	6,0
Limons fins	$2 < d < 20\mu\text{ m}$	16,6	13,9
Limons grossiers	$20 < d < 50\mu\text{ m}$	20,8	14,8
Sables fins	$50 < d < 200\mu\text{ m}$	55,3	64,7
Sables grossiers	$200\mu\text{ m} < d < 2\text{ mm}$	1,3	0,6

De plus, les paragraphes et la Fig. 12 qui suivent (extrait de Rémi Béguin, 2012 p168) indiquent les hypothèses de provenance de ces dépôts et donnent une description plus précise des prélèvements.

« Ce stock de limon est issu de dragages en amont de l'écluse de Bourg-Lès-Valence, juste après la confluence entre l'Isère et le Rhône, et s'étend sur une surface d'environ 500 m<sup>2</sup> pour 3 m de profondeur. La majorité de ces sédiments provient de chasses réalisées sur les ouvrages de retenue de l'Isère. À ce titre, il est assez proche du sablon de l'Isère, [...].

Trois sondages (SC1, SC2 et SC3) ont été faits à la pelle mécanique sur le stock à 1,5 m de profondeur. Des mesures granulométriques par tamisage et sédimentation ont permis d'identifier un  $d_{50} = 0.2 \pm 0.07 \text{ mm}$  et une fraction fine ( $< 80 \mu\text{m}$ ) de  $30 \pm 10 \%$ . La fraction argileuse est peu présente, de l'ordre de 0,5%, ce qui est cohérent avec l'essai de valeur au bleu de méthylène qui donne un résultat faible :  $VBS = 0,4$ . C'est un sol sablo-limoneux, de classe B2 d'après la norme GTR. L'optimum de compactage Proctor du limon de BLV a été identifié pour 16,1 % de teneur en eau à  $1,65 \text{ g/cm}^3$ . Trois essais de perméabilité à 95% de l'optimum Proctor ont ensuite été réalisés, donnant une valeur moyenne de  $3,4 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ . Les propriétés mécaniques de ce limon en conditions consolidées, non drainées ont été obtenues par un essai de cisaillement à la boîte de Casagrande :  $Ccu = 15 \text{ kPa}$  et  $PHIcu = 36^\circ$ .

Les courbes granulométriques des sondages SC1 et SC2 sont différentes de moins de 2 %. Toutefois le sondage SC3 possède une fraction grossière plus importante et un  $d_{50}$  plus faible, indice d'une certaine hétérogénéité du stock. »

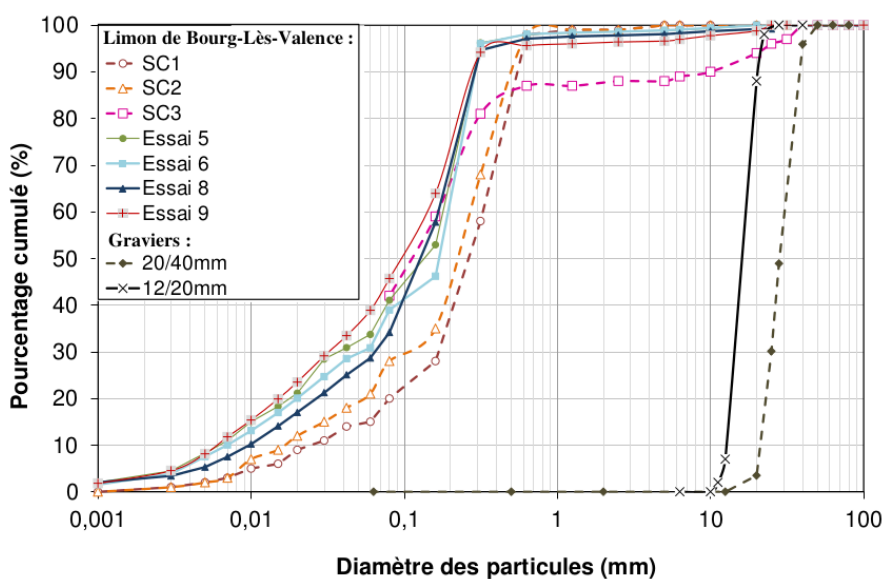


Figure 12: Courbes granulométriques des limons au niveau du barrage de Bourg-lès-Valence (Béguin, 2012).

### 2.3. Hydrologie

Le débit de l'Isère est fourni par la station hydrométrique de Beaumont-Montoux (CNR).

Le débit du Rhône est fourni par la station hydrométrique de Ternay (CNR)

## 3. CRUES ET CHASSES 2015 SUR LA BASSE-ISÈRE

### 3.1. Hydrogrammes

La Fig. 13 présente les chroniques de débit pour les différentes stations autour du site d'étude pendant la période de la crue/chasse de mai 2015.

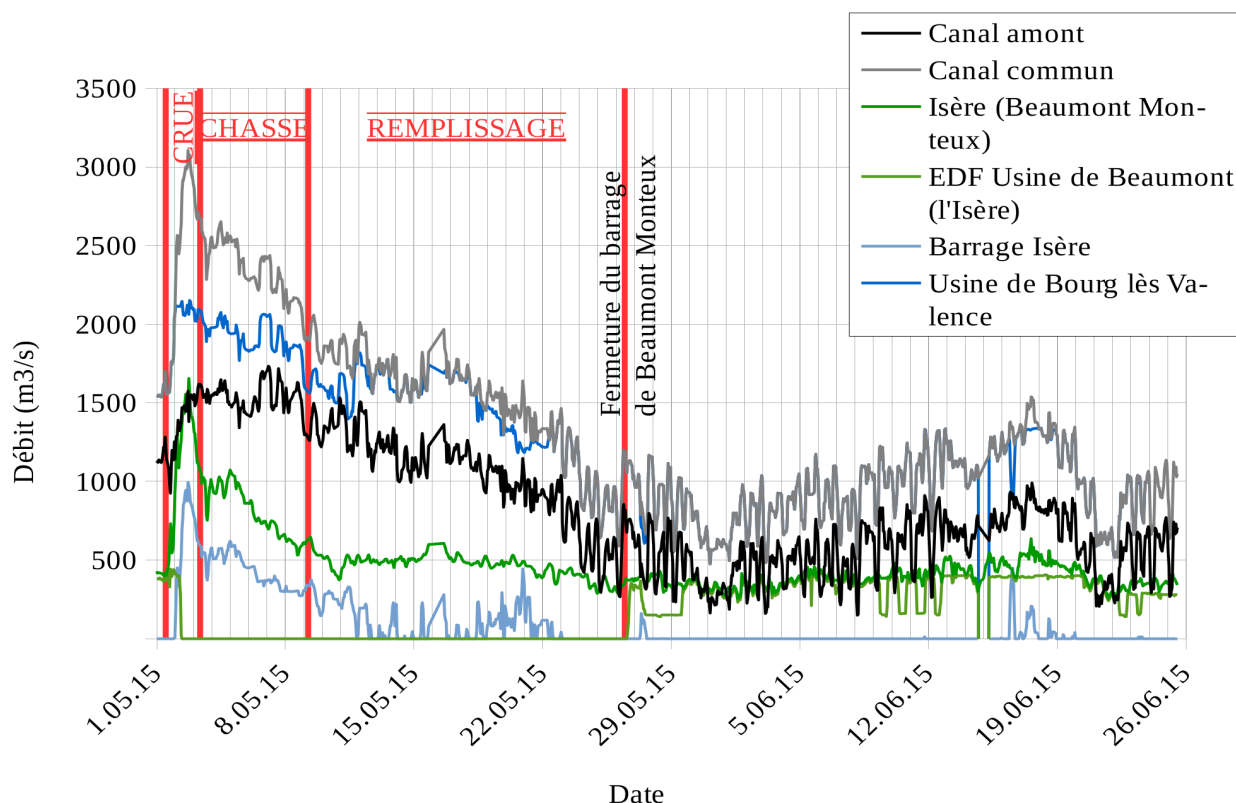


Figure 13: Débits mesurés le long de l'Isère et du Rhône lors de la crue/chasse de mai 2015 (source CNR).

### 3.2. Gestion des ouvrages lors de l'épisode de crue/chasse de mai 2015

#### 3.2.1. Consigne de chasse sur la basse Isère

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

L'Isère a été déclaré en crue à partir du vendredi 1<sup>er</sup> mai. Afin de respecter la consigne de niveau au droit des ponts de Roman et des Faury, 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.

A partir du 3 au 9 mai, EDF a mis en chasse tous les autres ouvrages (de l'aval vers l'amont).

Du 9 au 22 mai, s'est déroulée la phase de remplissage : EDF a fermé ses ouvrages de l'amont vers l'aval. Même si cette phase n'est pas incluse dans la phase de chasse, il faut bien avoir en tête que le dernier barrage (Beaumont-Monteux) est resté ouvert jusqu'au 22 mai et a donc pu apporter des sédiments jusqu'à cette date..

Le Tab. 6 et la Fig. 14 rappellent les différentes étapes de gestion des ouvrages EDF (source EDF)

Tableau 6 : Les différentes étapes de la gestion des ouvrages EDF de la basse Isère pendant la crue et la chasse de mai 2015

	Date	heure
Zone de veille	1 <sup>er</sup> mai	21h30
Zone de crue	1 <sup>er</sup> mai	22h30
Zone de chasse	3 mai	9h00
Zone de remplissage	9 mai	6h00
Fermeture de Beaumont-Monteux	26 mai	11h

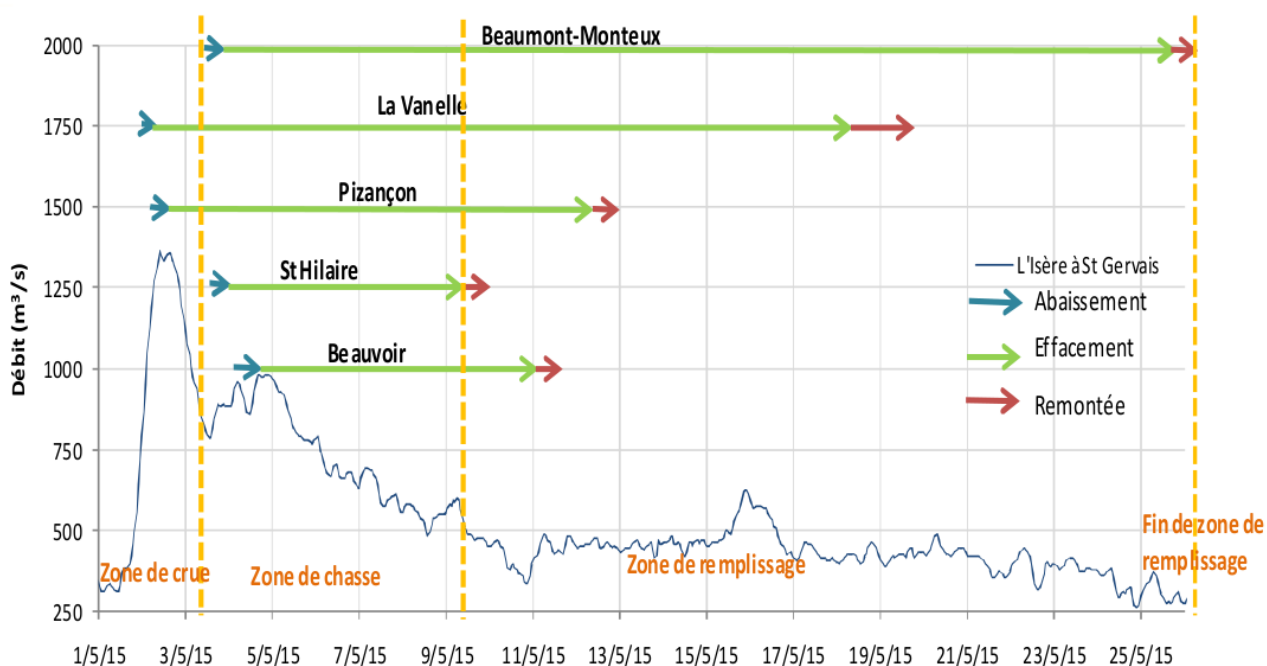


Figure 14: Gestion des ouvrages EDF pendant la crue et la chasse de mai 2015



Figure 15: Photographie du barrage de Beaumont-Monteux pendant la chasse (04/05/2015)



### 3.2.2. Consigne des ouvrages du Rhône

#### 3.2.2.1. Règle 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 Fig. 16.

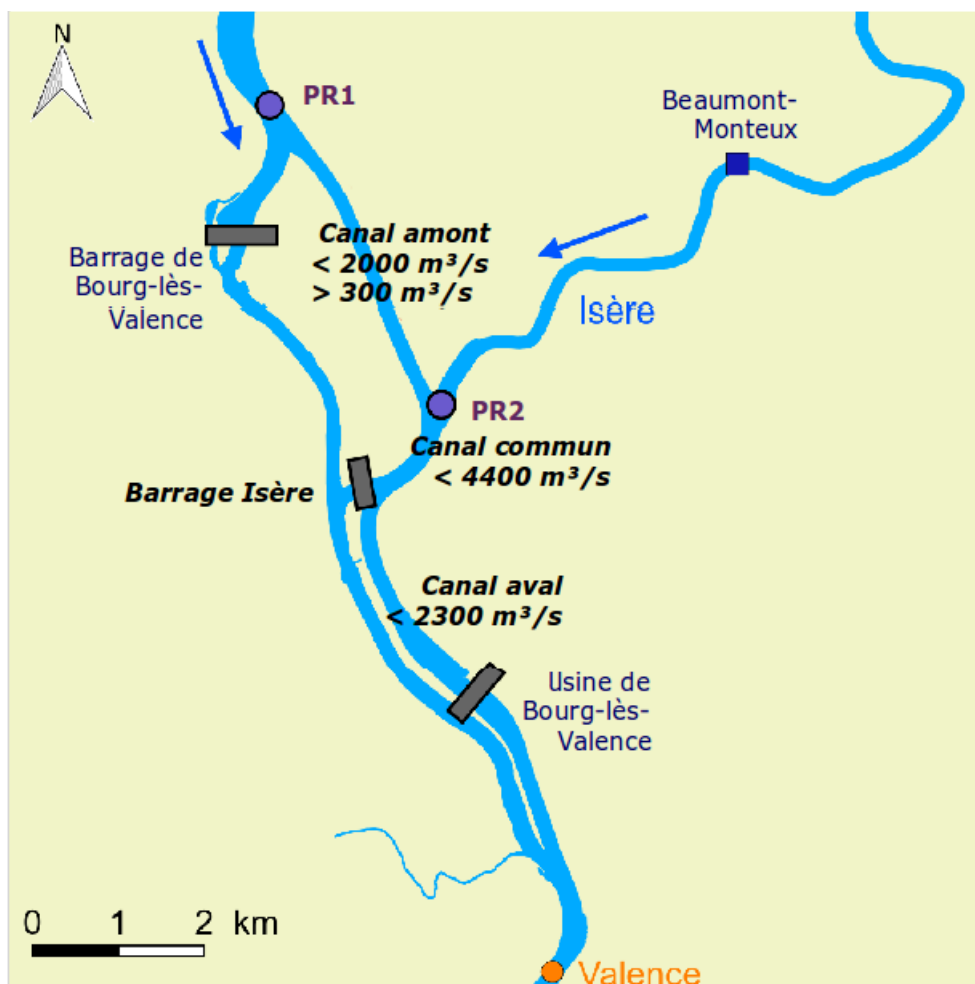


Figure 16: Règles de gestion des ouvrages de la retenue de Bourg-lès-Valence

Le débit turbinable maximal à l'usine de Bourg-lès-Valence est de  $2300 \text{ m}^3/\text{s}$ . En pratique, et surtout lors des crues de l'Isère, ce débit est compris entre  $2000$  et  $2100 \text{ m}^3/\text{s}$  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  $2300 \text{ m}^3/\text{s}$ . 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  $2300 \text{ m}^3/\text{s}$ , le barrage Isère était alors resté fermé.

A l'amont, la 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.

### 3.2.2.2. Règle de gestion pendant l'épisode de mai 2015

Cette crue de l'Isère a été synchronisée avec une crue du Rhône dont le débit a atteint sur l'épisode plus de 3200 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s.

Contrairement à 2008, les débits associés du canal amont et de l'Isère dépassaient les 2300 m<sup>3</sup>/s, le barrage Isère a donc été ouvert en respectant la consigne de gestion.



Figure 17: Photographies du barrage Isère pendant la chasse (04/05/2015)

### 3.3. Chroniques de concentration en MES

Sur la période étudiée, les concentrations en MES ont été mesurées sur les stations turbidimétriques Irstea de St George (Saône) et de Jons (Rhône). Ces données sont disponibles sur la plateforme BDOH.

La turbidité de l'eau provenant de l'Isère est acquise au pas de temps horaire à la station de Beaumont-Monteux (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-Monteux 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 18 utilise les données fournies par EDF. Les valeurs pendant la crue sont données à titre indicatif et sont susceptibles d'évoluer.

Plusieurs mesures de concentration en MES sont disponibles sur le Rhône. Les deux premières ont été réalisées par EDF et encadrent l'aménagement de Bourg-lès-Valence (la Roche-de-Glun et Pont-de-Valence). Ces mesures ont été faites par prélèvements.

Deux turbidimètres sont disponibles aux stations de Cruas et de Barcarin. Ces deux stations ne disposent pas de relation Turbidité/MES.

Cruas : le calage de la relation MES/Turbi a été fait sur les laves torrentielles de l'Arc-en-Maurienne en juillet-août 2014. Plusieurs pics de MES ont été observés à Beaumont-Monteux et également à Cruas. A priori, ce qui est observé à Beaumont-Monteux ne doit pas se déposer d'ici Cruas car les



sédiments ont déjà eu l'occasion de décanter dans plusieurs retenues. Une relation avec un coefficient de 1,89 (similaire à celui de Beaumont-Monteux) donne des résultats corrects.

Barcarin : des mesures ont été faites avec le turbidimètre de Barcarin et transmises par le Cerege. La relation MES/Turbidité n'est pas encore très bien calée pour les fortes concentrations en MES. La relation actuelle a quand même été utilisée dans une première approche.

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

Les valeurs fournies par la figure 18 sont données à titre indicatif et sont susceptibles d'évoluer.

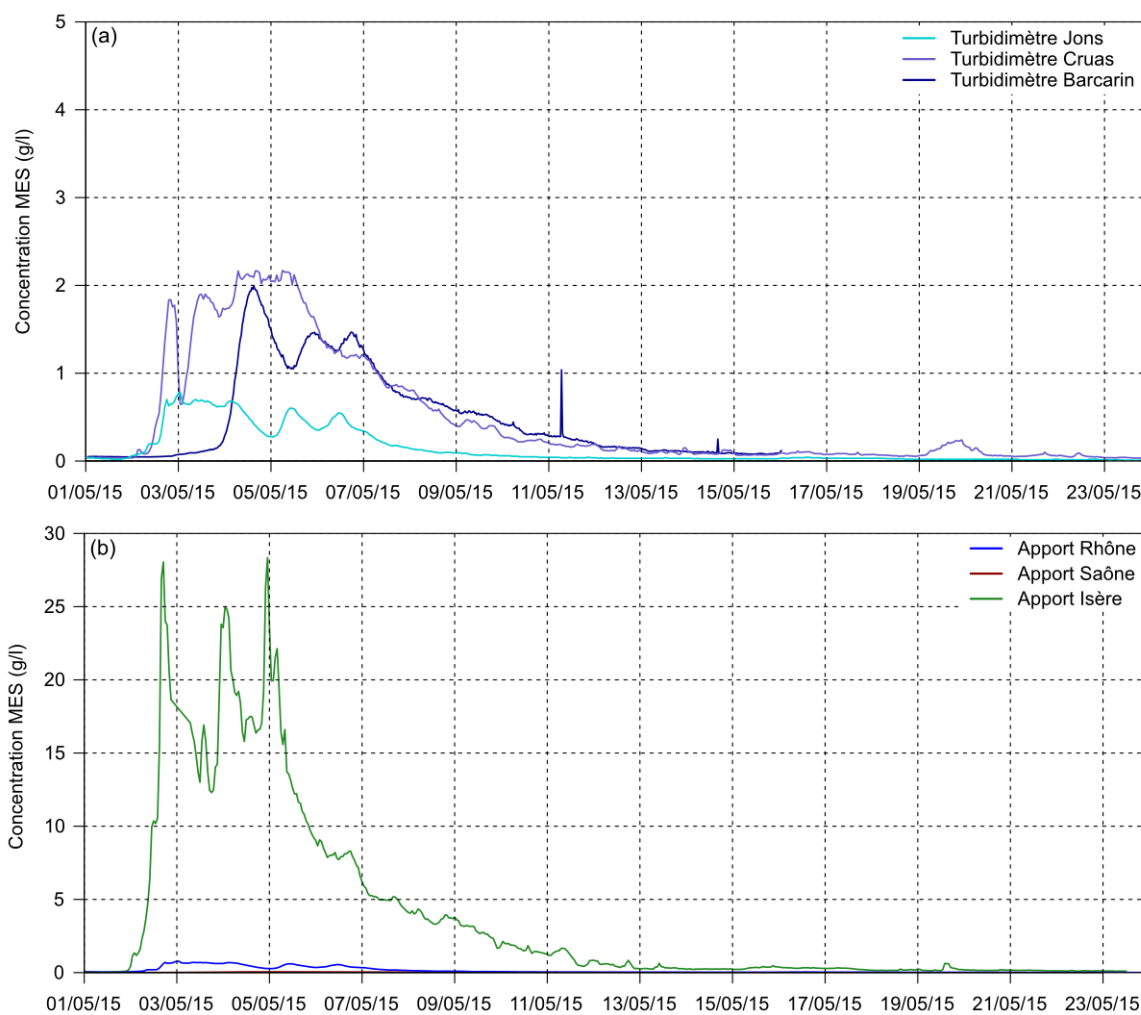


Figure 18: Chroniques de concentration en MES (a) sur le Rhône, (b)

## 4. CAMPAGNES DE MESURE DU TRANSPORT SABLEUX

### 4.1. Essais de faisabilité de prélèvements in-situ

Le 10 avril 2015, nous avons réalisé une visite de terrain afin de repérer les mises à l'eau permettant d'accéder à l'Isère et au Rhône, les conditions de navigabilité (passage des ponts notamment), ainsi que les sites présentant un intérêt pour la présente étude.

Nous avons de plus testé les méthodologies des mesures de jaugeage et de bathymétrie par ADCP et de prélèvement d'eau par bouteille de Niskin sur l'Isère environ 2 km en amont de la confluence.

### 4.2. Campagnes de mesure

Trois campagnes de mesure ont pu être réalisées pendant et après la crue/chasse de mai 2015 (cf. Fig. 19) avec l'appui du Centre d'analyse comportementale des ouvrages hydrauliques de la CNR (CACOH) :

- Pendant une première campagne sur deux jours (4 et 5 mai 2015), des mesures ADCP et par prélèvement ont été réalisées dans le canal d'amenée et sur l'Isère juste en amont de la confluence. Pour des raisons de sécurité et d'accès, aucune mesure n'a pu être réalisée plus en amont sur l'Isère comme initialement prévu.
- Une campagne de mesure par charriage a été faite la semaine suivante (7 mai 2015) au niveau de la station de mesure CNR de Beaumont-Monteux où une trille mécanique est présente.
- Une seconde campagne de mesure du charriage a pu être réalisée plus tard après la chasse le 18 juin 2015.

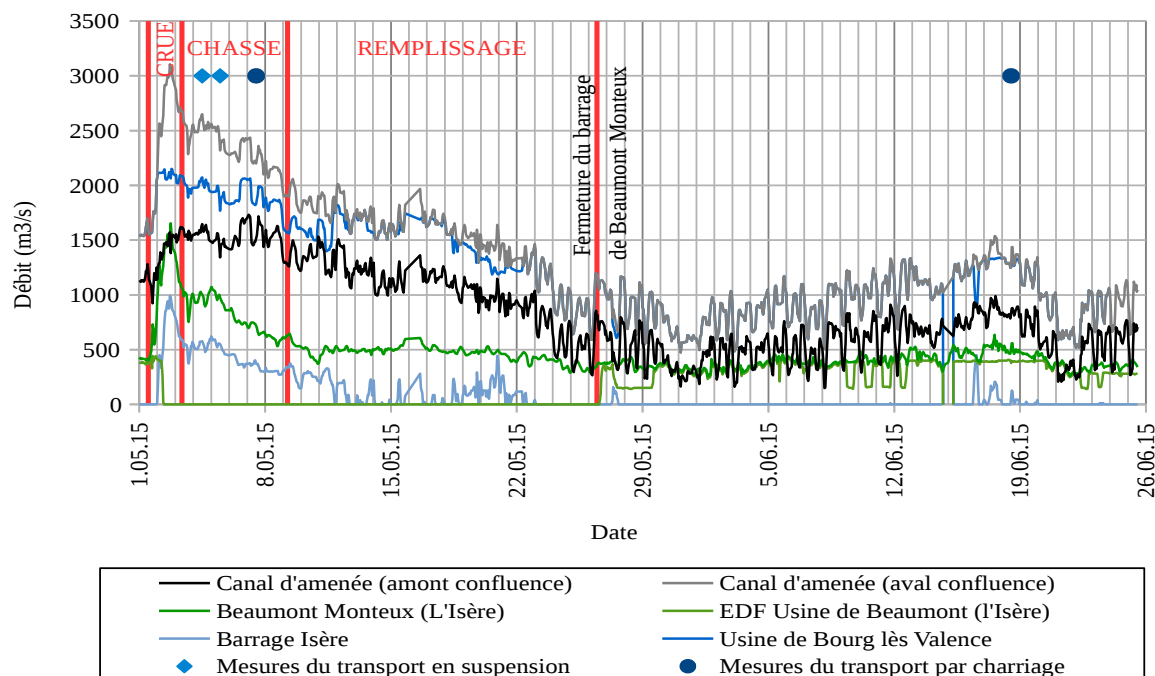


Figure 19: Débits mesurés le long de l'Isère et du Rhône lors des campagnes de mesure de mai-juin 2015.

## 4.3. Mesures du transport en suspension

### 4.3.1. Présentation des mesures

Le 4 et le 5 mai 2015, Irstea et le Centre d'analyse comportementale des ouvrages hydrauliques de la CNR (CACOH) ont réalisé des mesures de jaugeage, de turbidité, de bathymétrie ainsi que des prélèvements granulométriques à l'aide d'une bouteille de Niskin.

Ces mesures ont pu être réalisées entre la mise à l'eau du garage de l'écluse (Rhône) et le pont SNCF sur l'Isère. La mise à l'eau en rive droite de l'Isère n'était pas accessible du fait de dépôts de sédiments sur la piste trop importants.

Les mesures suivantes ont pu être réalisées :

- jaugeages en différents profils ;
- mesures de turbidité (surface) ;
- prélèvements de matières en suspension à différentes profondeurs à l'aide d'une bouteille de Niskin.

Le 4 mai 2015, les mesures de jaugeage et de bathymétrie ont été réalisées à l'aide d'un ADCP (RG 600 kHz) installé sur le bateau CNR. Il s'avère que le fond n'était pas détectable sur l'Isère et en aval de la confluence. Cela devait a priori provenir d'une charge en sédiments trop importante qui atténue de ce fait le signal et/ou ne permet pas d'atteindre le fond.

Le 5 mai 2015, les mesures ont été faites sur deux embarcations (bateau CNR et zodiac Irstea) à l'aide de deux ADCPs (River Ray et RG 600 kHz)

Les principaux résultats des mesures ADCP sont présentés en annexe 10. Du fait des difficultés observées lors des mesures, il apparaît difficile d'exploiter la rétrodiffusion et la dérive de fond.

### 4.3.2. Mélange des eaux Isère/Rhône

La différence de turbidité en surface entre le Rhône (plus clair) et l'Isère (plus foncée) était très bien visible à l'œil nu (Fig. 20). La limite entre les deux eaux se situe au droit de la confluence, parallèlement à l'écoulement du Rhône. Nous retrouvons une ligne de démarcation entre les eaux sombres de l'Isère et claires du Rhône plus en aval : principalement en rive gauche mais également en rive droite. Au centre la turbidité de surface est celle du Rhône (observation visuelle).



Figure 20: Photos montrant les différences de turbidité à la confluence entre l'Isère et le Rhône pendant la chasse de mai 2015.

La Fig. 21 est issue de Google Earth (date indiquée de la prise de vue : 13/04/2013). La limite entre les eaux est similaire à celle observée lors des mesures. A cette date, le débit moyen journalier du

Rhône à Ternay était de 2350 m<sup>3</sup>/s (source Banque HYDRO) et le débit instantané de l'Isère à Beaumont Montoux était compris entre 410 et 600 m<sup>3</sup>/s.



Figure 21: Image aérienne de la confluence Rhône-Isère pendant la crue/chasse de mai 2015 (source : GoogleMap).

Le mélange des eaux chargée de l'Isère et des eaux provenant du canal d'amenée du Rhône est peut-être limité par la géométrie de la confluence qui présente un merlon central immergé.



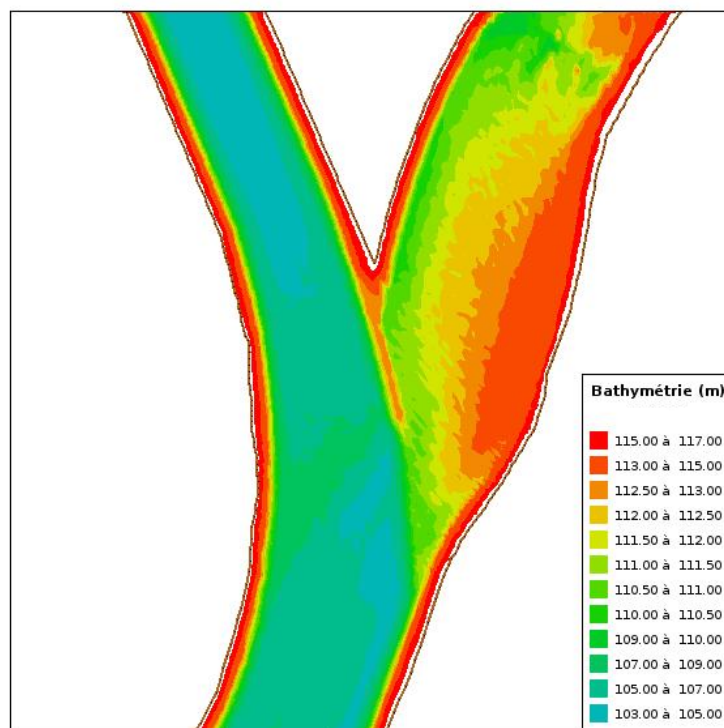


Figure 22: Carte de la bathymétrie autour de la confluence Isère-Rhône.

La température de l'Isère en surface est comprise entre 11 et 12°C tandis que celle du Rhône est comprise entre 14°C et 15°C. Nous n'avons pas observé d'évolution longitudinale de la température de surface du Rhône.

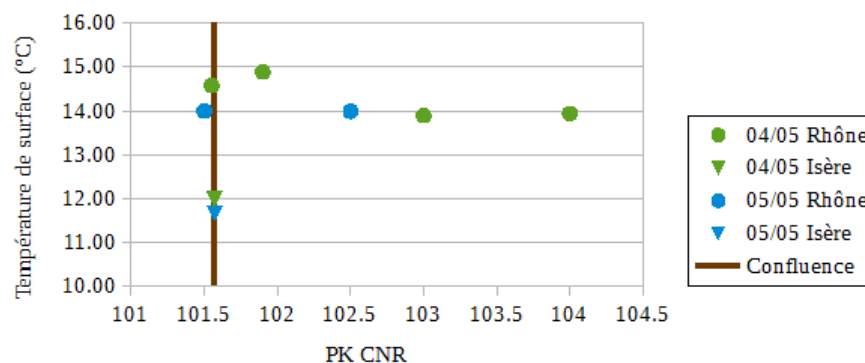


Figure 23: Température des eaux de surface mesurée pendant la campagne de mesure des 4 et 5 mai 2015.

Ces premières observations semblent montrer que les eaux de l'Isère (froides et chargées donc plus denses) plongent sous les eaux du Rhône avant de se mélanger à celles-ci assez loin en aval.

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

#### 4.3.3. Mesure des concentrations dans l'Isère

La Fig. 24 présente les concentrations des prélèvements réalisés dans l'Isère à l'amont immédiat de la confluence en fonction des profondeurs de prélèvement. Les concentrations étaient très élevées et variaient d'environ 5 g/l en surface à plus de 40 g/l au fond (verticale au centre).

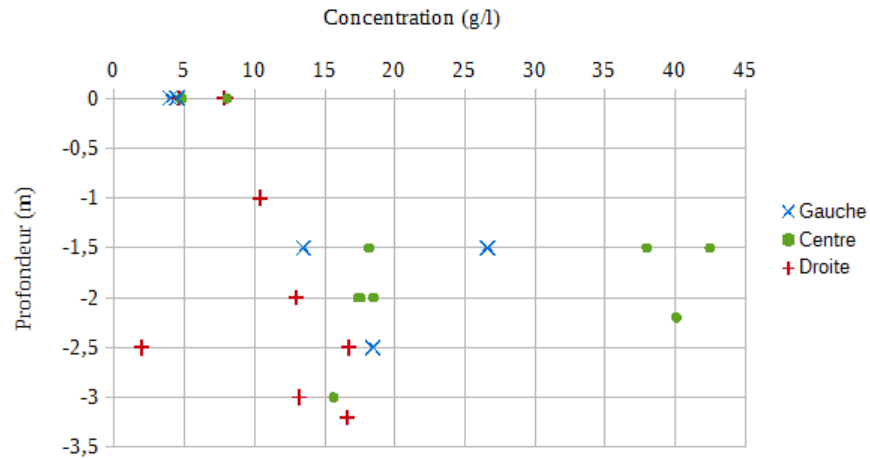


Figure 24: Concentrations mesurées pendant la campagne de mesure du 4 et 5 mai 2015 au niveau de l'Isère juste en amont de la confluence en fonction de la profondeur de prélèvement.

La technique de prélèvement par bouteille de Niskin nécessite une dérive vers l'aval du bateau qui peut fausser le rapport entre la profondeur de mesure et la profondeur maximale sur le site de mesure. Or, les mesures sont situées au droit de la confluence, c'est à dire dans une zone qui présente des évolutions longitudinales et latérales importantes (présence d'un dépôt de sédiments rive gauche). Il est plus difficile de relier les mesures à la profondeur réelle. Il n'était malheureusement pas possible de naviguer sur un site plus adapté à ce genre de mesure.

Ainsi, les valeurs les plus fortes ont sans doute été réalisées très près du fond et ne sont peut-être plus représentatives du transport en suspension.

La Fig. 25 donne une indication de la difficulté à réaliser des prélèvements sur la même verticale pour une configuration complexe où les courants sont assez élevés et la bathymétrie très variable.

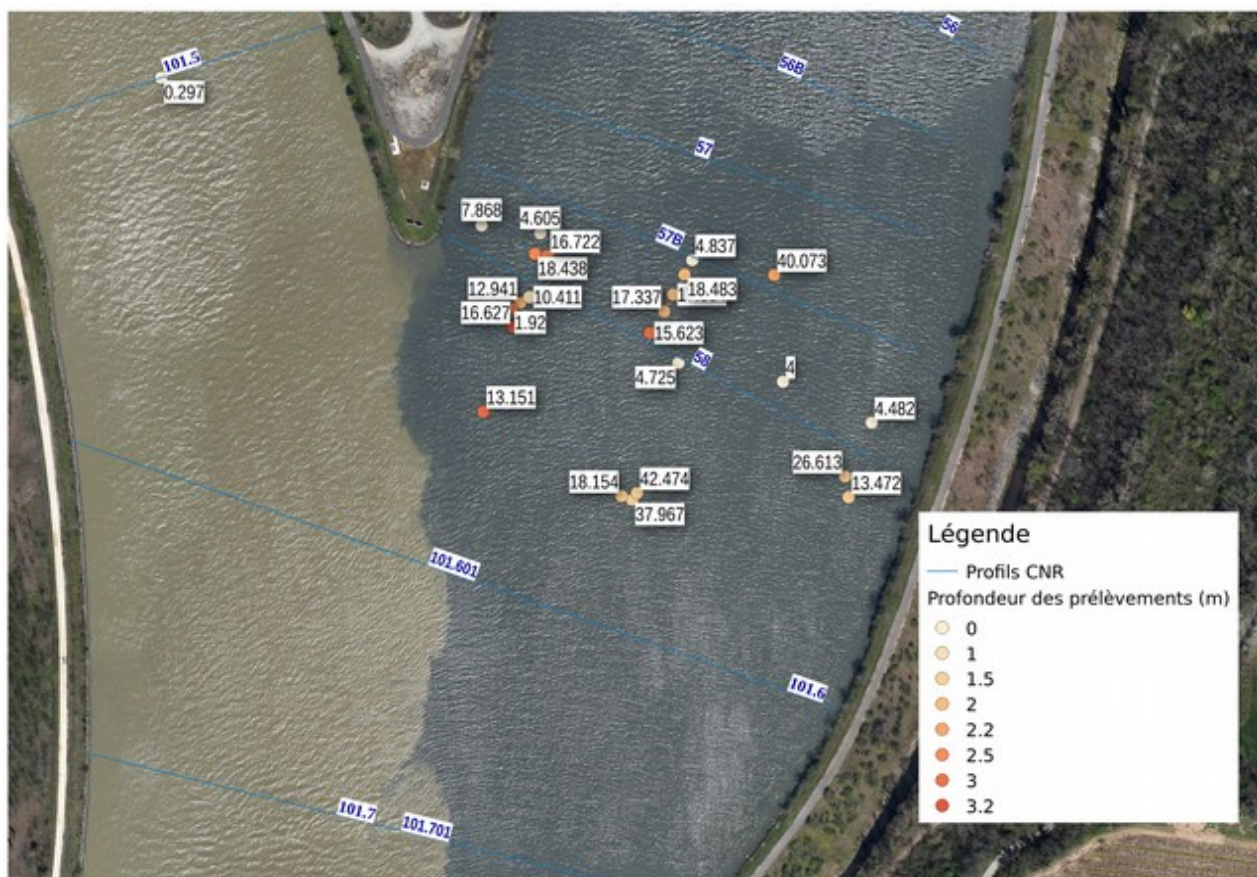


Figure 25: Position des prélèvements avec la bouteille Niskin réalisés lors de la campagne de mesure du 4 et 5 mai 2015 (source du fond de carte : GoogleMap).

L'analyse des résultats permet cependant de proposer une distribution spatiale des concentrations au droit de la confluence au moment des mesures sur le transect T004 (Fig. 26) localisé dans le chapitre 10. 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). En première approximation, le gradient de concentration serait lié au sable.

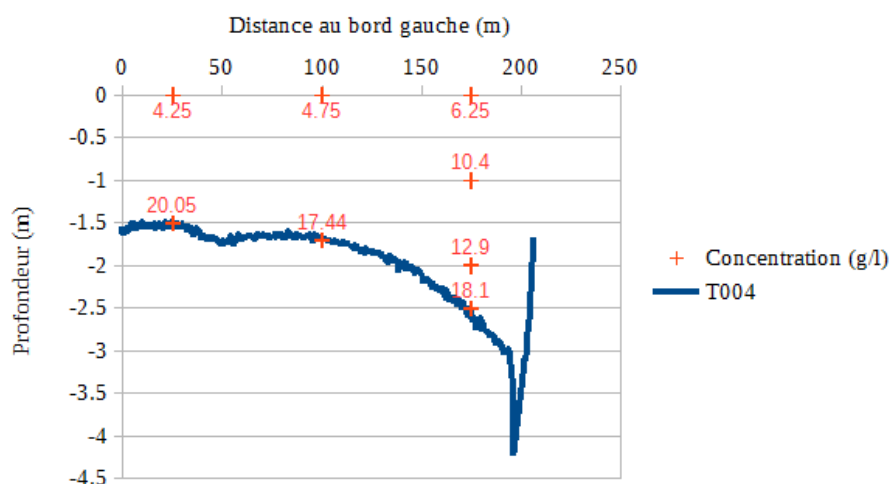


Figure 26: Estimation des concentrations en fonction de la profondeur et de la verticale de mesure au-dessus du transect T004.

La Fig. 27 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.

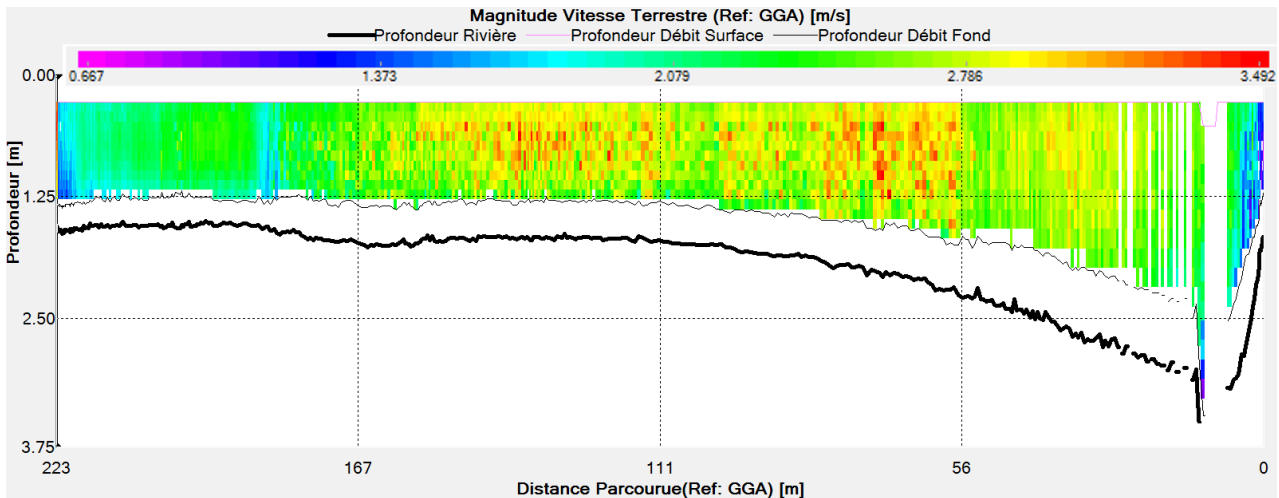


Figure 27: Vitesses mesurées par l'ADCP le 4 avril 2015 en amont du transect T004 (Isère).

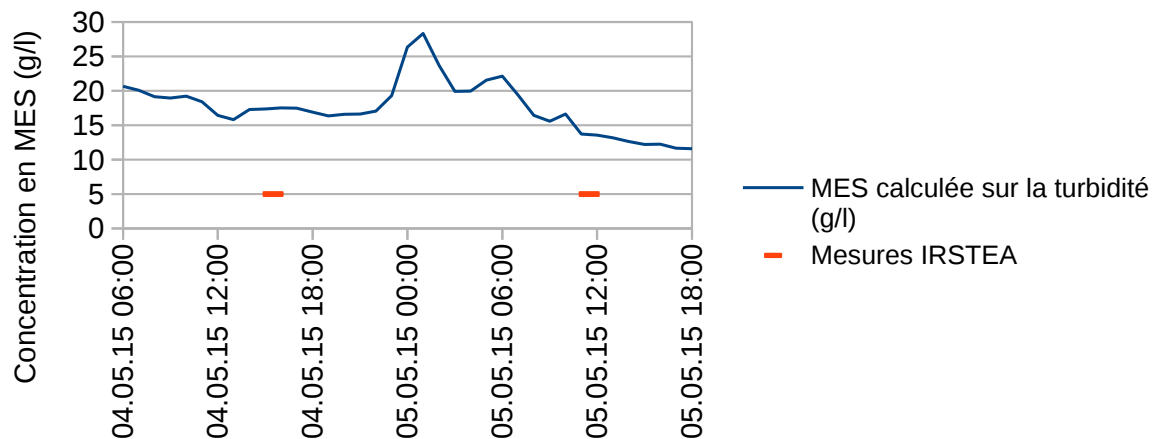


Figure 28: Concentration en MES calculée sur la turbidité à la station de Beaumont Montoux (source: EDF)

Les mesures EDF réalisées à la station de Beaumont Montoux et présentées à la figure 28 indiquent des concentrations en MES d'environ 17 g/l le 04/05 et de 17 g/l le 05/05/2015.

#### 4.3.4. Mesure des concentrations dans le canal d'aménée

Les Figs. 30 et 29 présentent les concentrations en g/l des différents échantillons prélevés en amont de la confluence et en aval de la confluence près de barrage Isère, respectivement, montrant ainsi que l'Isère ne modifie pas immédiatement les concentrations en surface le long du canal d'aménée. Fig. 29, on observe ainsi une légère augmentation des concentrations au niveau du barrage Isère indiquant un début de mélange des eaux.



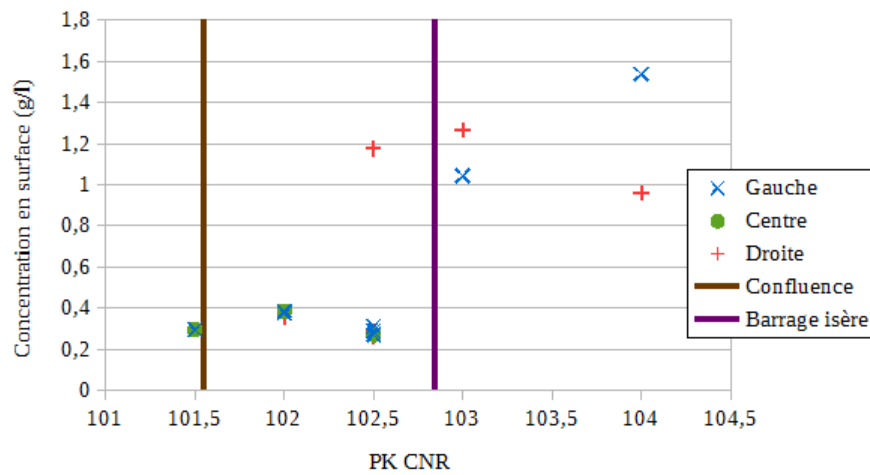


Figure 29: Concentration en surface le long du canal d'amenée.

La concentration en surface au PK 101,5 (amont confluence) est de 0,30 g/l tandis que celles au PK 102 et 102,5 varient entre 0,27 et 0,39 (aval confluence). Cela indique qu'il n'y a pas de mélange des eaux de surface de l'Isère (concentration supérieure à 4g/l en surface) et du Rhône en amont du barrage Isère. En revanche, à l'aval du barrage Isère, les concentrations en surface deviennent plus élevées (entre 0,96 et 1,54 g/l) indiquant un début de mélange.

De plus, les résultats montrent qu'en surface il n'y a pas d'écart latéral de concentration important contrairement à ce que peut faire croire la couleur de l'eau.



Figure 30: Position des prélèvements en amont de la confluence (a) et en aval de la confluence près du barrage Isère (b) avec la bouteille Niskin réalisés lors de la campagne de mesure du 4 et 5 mai 2015 et valeur des concentrations (source du fond de carte : GoogleMap).

En revanche, en profondeur (-6m) et au PK 102.4 (amont du barrage de l'Isère), les concentrations semblent plus fortes au centre et en rive droite (Figs. 29, 31, et 32). Les flux en suspension sont donc localisés plutôt dans l'axe et en rive droite. Ils pourraient être « aspirés » par le barrage Isère (cf. Fig. 33). Il faut cependant faire attention au nombre limité de mesures qui peut fausser l'interprétation.

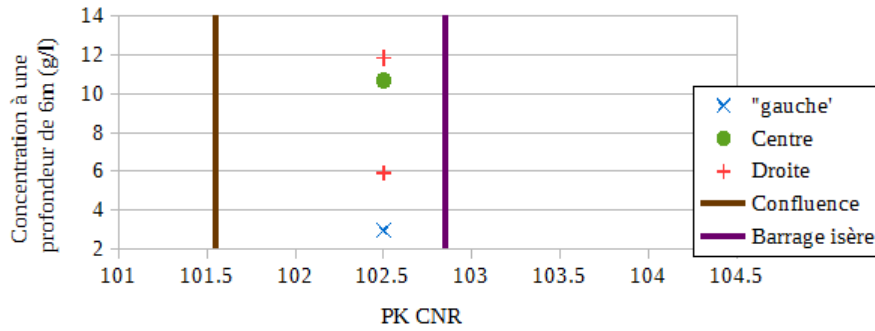


Figure 31: Concentration prélevée à 6 m de profondeur le long du canal d'amenée.

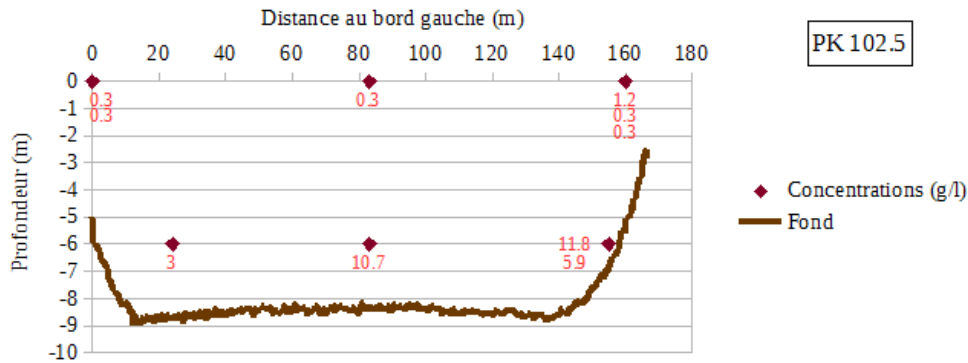


Figure 32: Concentration prélevée à 6 m de profondeur le long du canal d'amenée.

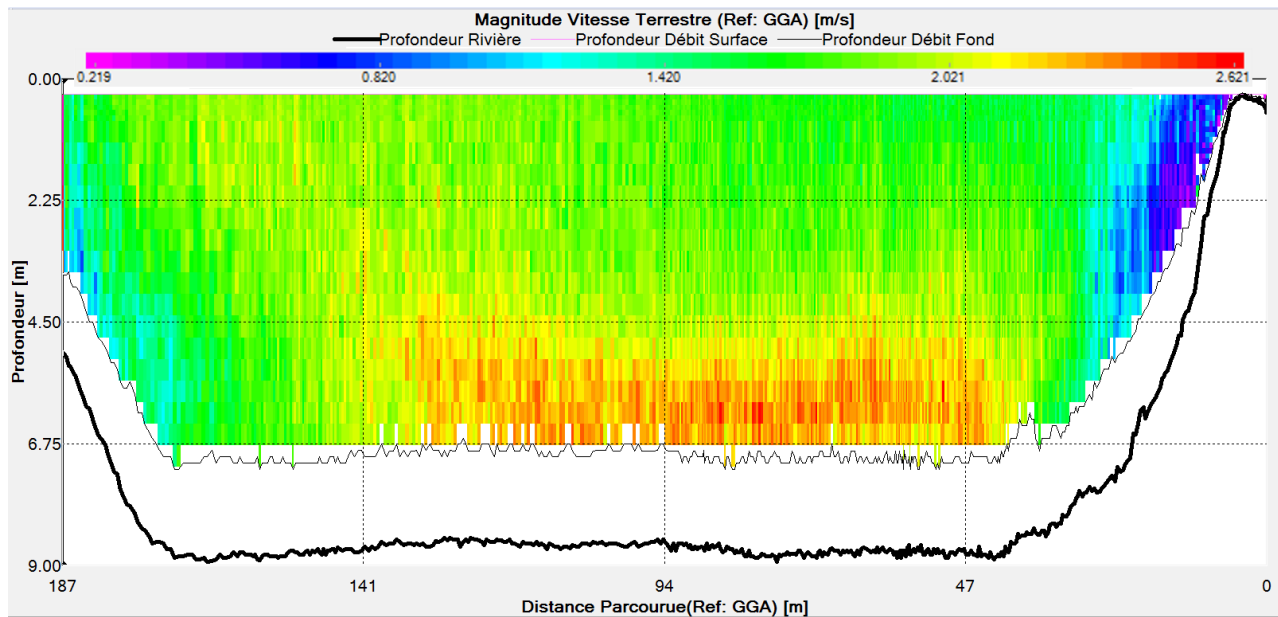


Figure 33: Vitesses mesurées par l'ADCP le 4 avril 2015 en amont du transect 102,5 du canal d'amenée.

Les eaux de l'Isère restent tout d'abord principalement en rive gauche, puis en rive droite du fait de l'exutoire sous la vanne du barrage Isère. C'est apparemment du fait de ce mouvement des eaux que le mélange commence à apparaître après le barrage Isère.

### 4.3.5. Mesure de la granulométrie

L'analyse granulométrique de chaque échantillon a été réalisée à l'aide d'un granulomètre laser de type Cilas.

Nous présentons ci-dessous les résultats concernant les échantillons que nous avons sélectionnés pour alimenter la discussion. Les mesures en surface sont homogènes sur toute la largeur d'écoulement (Fig. 34)

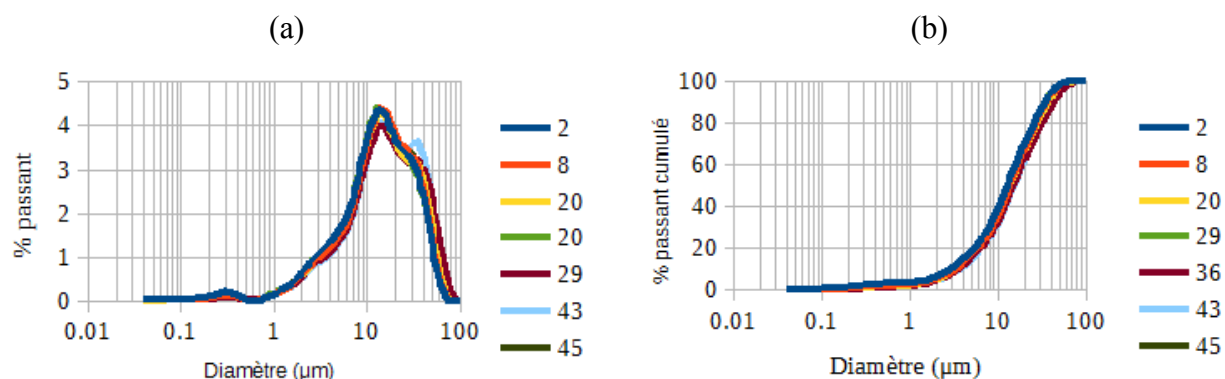
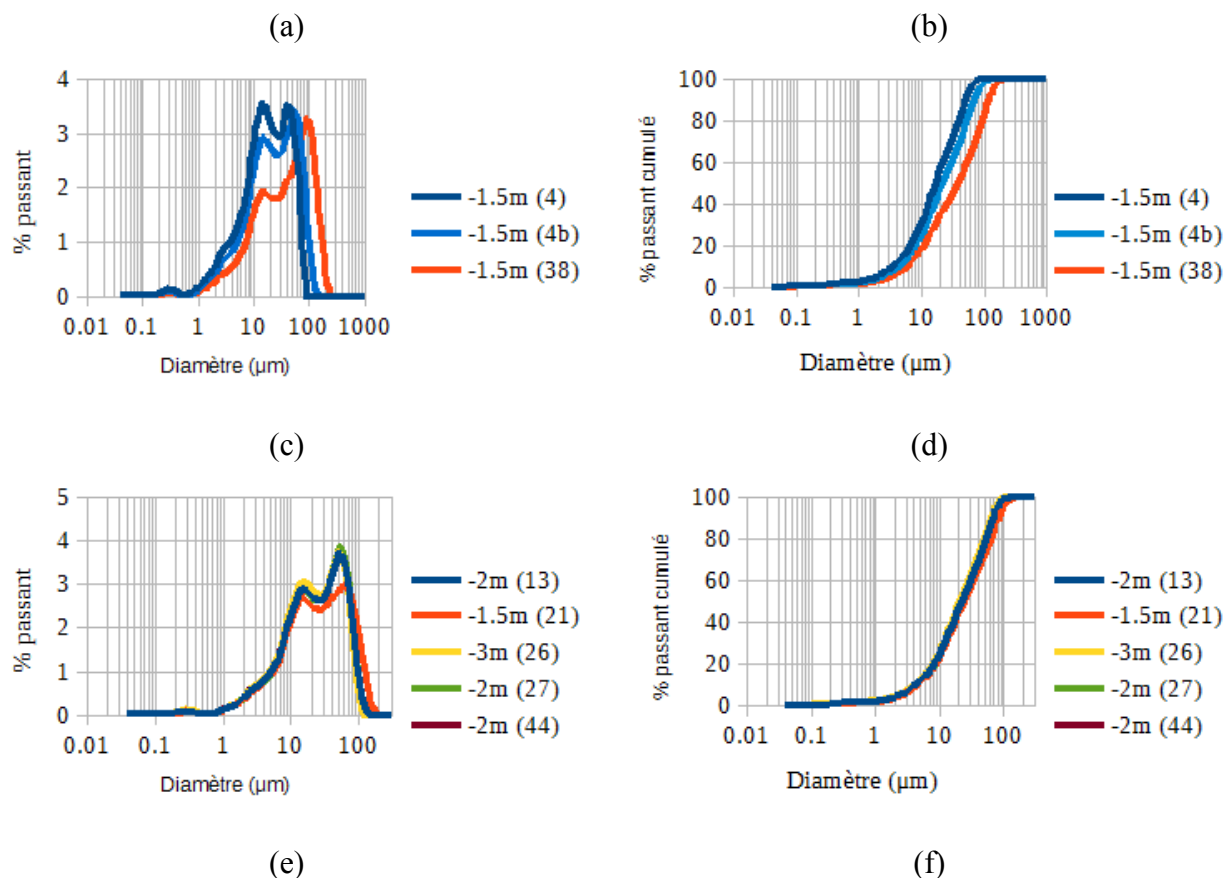


Figure 34: Courbes granulométriques par classe (a) ou cumulée (b) pour échantillons de surface sur le transect de mesure sur l'Isère juste en amont de la confluence.

Puis nous présentons les résultats des échantillons réalisés en rive gauche, au centre et en rive droite (Fig. 35). Ces mesures montrent que la part de sable ( $63\mu\text{m} < d < 2\text{mm}$ ) en suspension à la confluence est très faible.



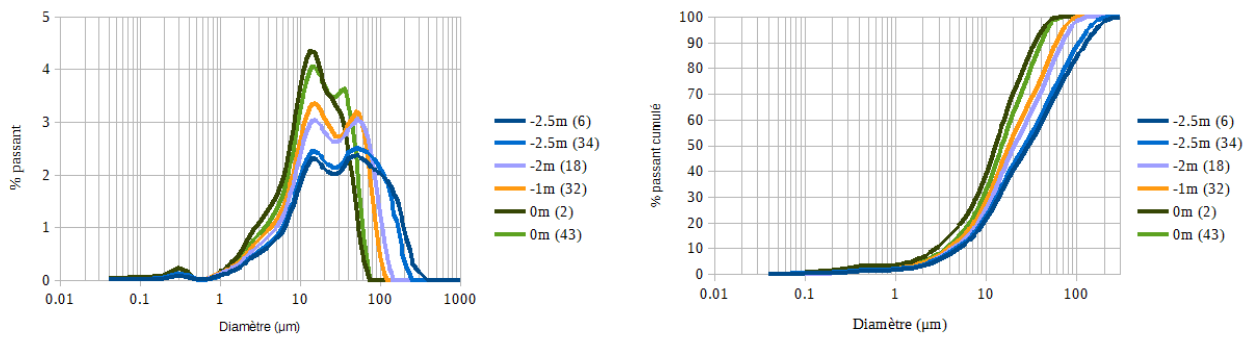


Figure 35: Courbes granulométriques par classe (a, c et e) ou cumulée (b, d et f) pour les verticales de mesure sur l'Isère en rive gauche (a et b), au centre (c et d) et en rive droite (e et f).

Les démodulations (Launay, 2014) réalisées sur les échantillons confirme que du sable fin est transporté par suspension au moins vers le fond (Fig. 36). La proportion de sable est cependant faible proche du fond (<15%) et quasi-nul en surface.

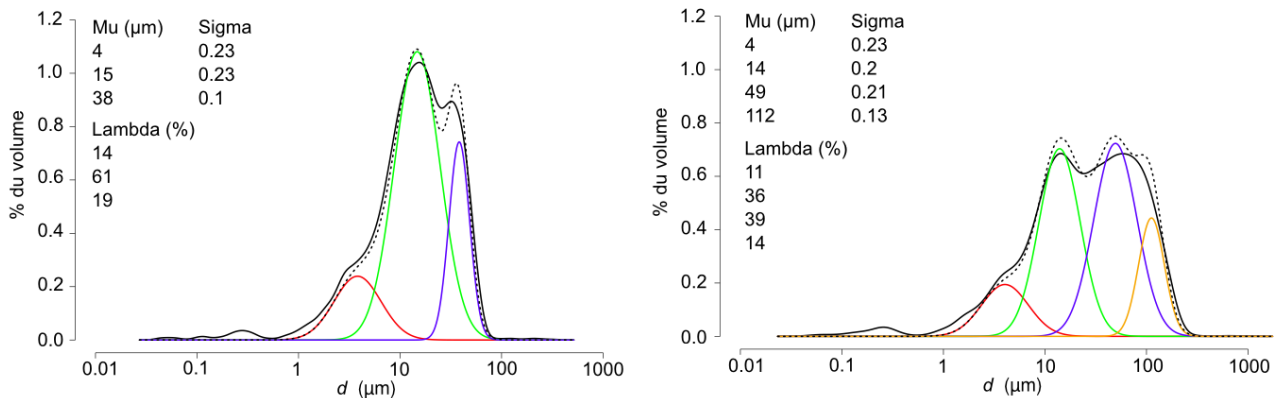


Figure 36: Démodulation des granulométries mesurées sur l'Isère et analysées par granulométries laser : (a) Échantillon « Surface chasse », (b) échantillon « Fond chasse »

La distribution granulométrique de l'échantillon prélevés au seau en surface au pont de Beaumont-Montoux est très similaire à ceux prélevés à la confluence (Fig. 37). La part de sable est légèrement plus importante à l'amont (Isère à Beaumont-Montoux).



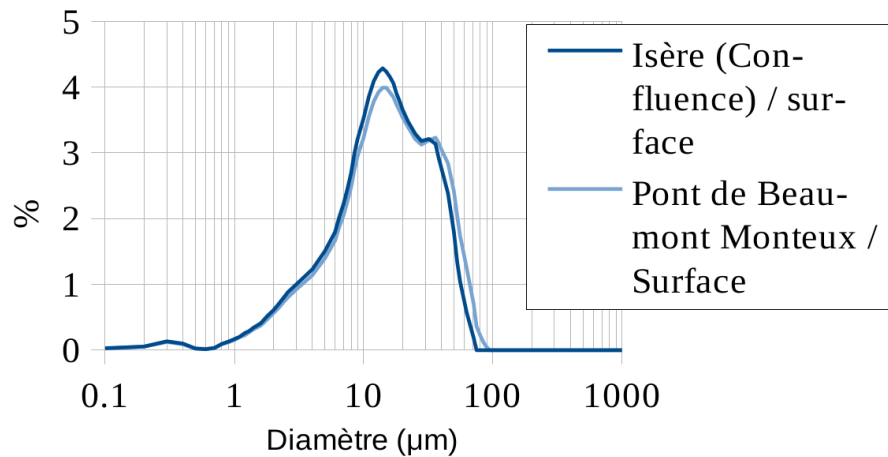


Figure 37: Comparaison des distributions granulométriques d'échantillons de surface pris sur l'Isère à la confluence et à Beaumont-Montoux

La distribution granulométrique des échantillons prélevés sur le chenal navigable en surface à l'amont et à l'aval de la confluence sont également semblables (Fig. 38a et b). Cela confirme que le mélange des eaux de l'Isère et des eaux du Rhône ne s'est pas encore réalisé.

En revanche, proche du fond, on retrouve dans le Rhône les modes observés dans l'Isère mais avec une part de sable plus faible (Fig. 38c et d).

Enfin, en surface à l'aval du barrage Isère, nous retrouvons une granulométrie plus proche de celle de l'Isère que de celle du Rhône. Cela tend à faire penser que le mélange se réalise (Fig. 38e et f).

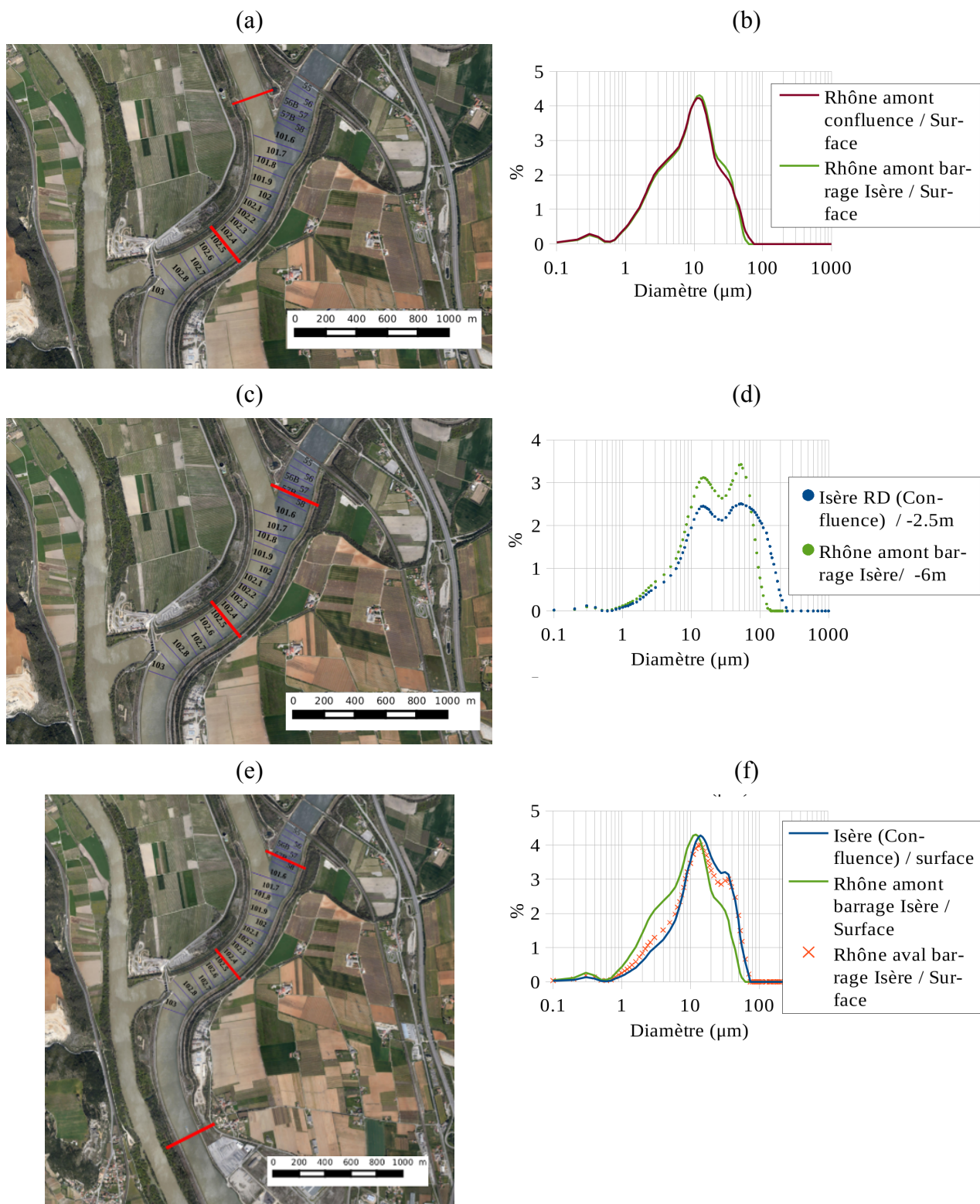


Figure 38: Comparaison des distributions granulométriques d'échantillons de surface pris sur l'Isère à la confluence et sur le Rhône (amont confluence, aval confluence, aval confluence au niveau du barrage Isère).

Ceci confirme que les eaux de l'Isère plus froides et plus chargées plongent sous les eaux du Rhône. Il apparaît en effet qu'une température plus froide de 3°C (Isère : 12°C et Rhône : 15°C) implique une augmentation de densité de l'eau de 0,05 %, et qu'une concentration supérieure de 4 g/l implique une augmentation de la densité de 0,25 %. La densité de l'Isère est ainsi estimée à 1,0023 alors que celle du Rhône est estimée à 0,9992. C'est donc principalement du fait de la différence de concentration que la densité des eaux de l'Isère est supérieure à celle des eaux du Rhône.

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

## 4.4. Mesures du transport par charriage

### 4.4.1. Localisation du site de mesure

Les campagnes de mesure par charriage ont été réalisées à la station hydrométrique de la CNR à l'aval de Beaumont-Montoux (cf. Fig. 39). Ces mesures ont été faites en collaboration avec le CACOH.

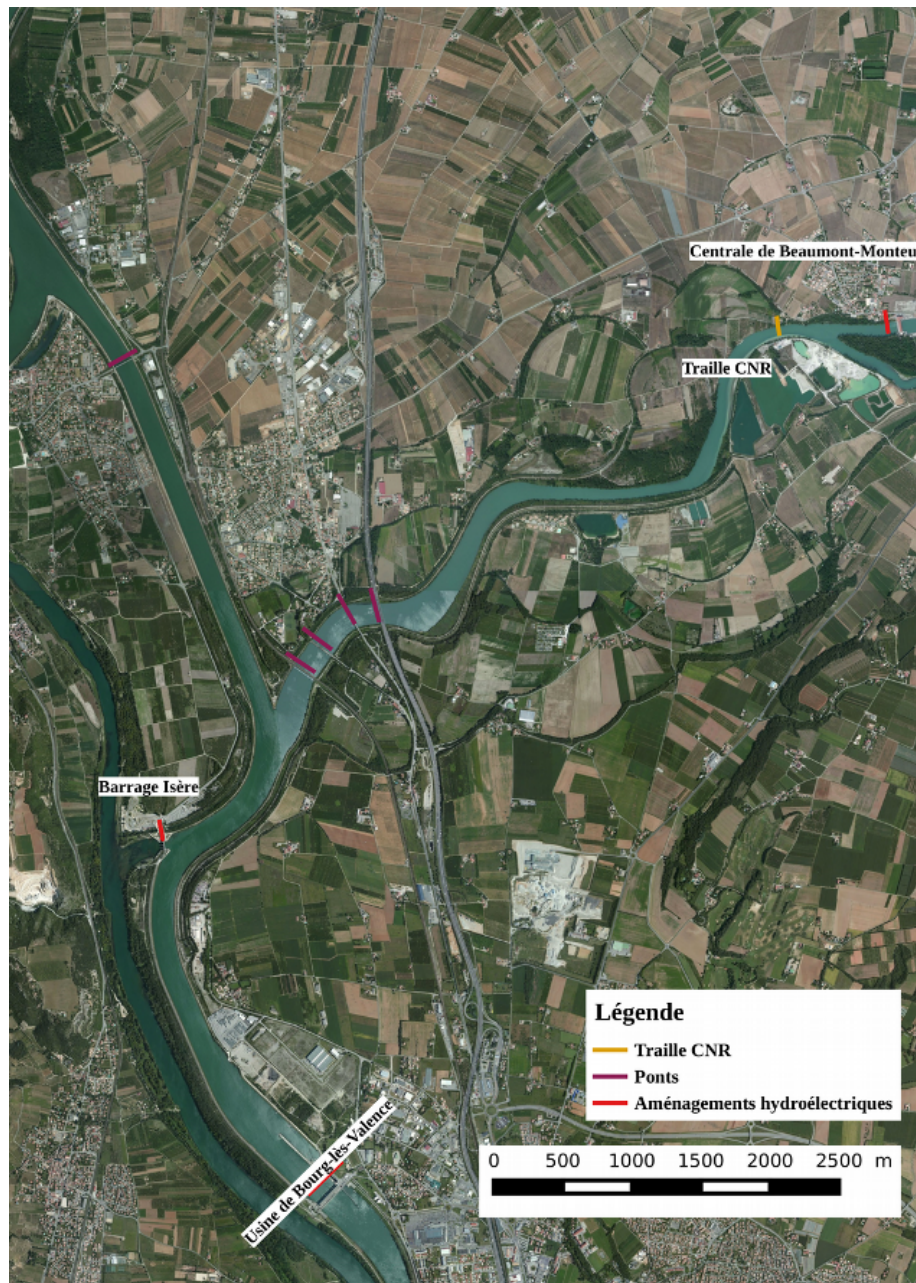


Figure 39: Localisation de la station hydrométrique de Beaumont-Montoux (source fond de carte : GoogleMap).

Ces mesures ont été faites à l'aide d'un préleveur Helley-Smith de section 7,7 cm x 7,7 cm (Fig. 40). Le préleveur était fixé et manœuvré à l'aide de la traille de la station hydrométrique.





Figure 40: Photo du préleveur Helley-Smith sur la trille de la station de Beaumont-Monteux.

Le protocole de mesure était le suivant :

- Réalisation d'un jaugeage à l'aide du saumon en début de mesure afin de connaître le débit, les vitesses et la cote de fond au droit des verticales sélectionnées pour les prélèvements. Ce jaugeage reste approximatif car nous n'avons réalisé que cinq verticales. Néanmoins, les débits mesurés sont cohérents avec la courbe de tarage.
- Prélèvement par charriage au droit des verticales définies précédemment. Nous avons réalisé au minimum 3 mesures par verticale. La durée de prélèvement était ajustée afin d'obtenir une quantité de sédiments ni trop faible, ni trop élevée.
- Réalisation d'un second jaugeage à l'aide du saumon en fin de mesure afin de déterminer les évolutions des débits et des vitesses.
- 

**ATTENTION** : pour conserver les données des mesures, les profils sont représentés de l'aval vers l'amont (c'est à dire que la rive droite est à gauche des figures).

#### 4.4.2. Campagne de mesure du 7 mai 2015

Le 7 mai 2015, Irstea et le CACOH ont ainsi réalisé une première campagne de mesure par charriage.

##### 4.4.2.1. Conditions hydrauliques

La Fig. 41 indique l'évolution du débit de l'Isère lors de la campagne de mesure du charriage du 7 mai 2015. Il apparaît que ce dernier a diminué de près de 70 m<sup>3</sup>/s entre le début et la fin de l'expérience, soit d'environ 10 %. Du début des mesures (9h40) à la fin des mesures (16h30), le niveau de l'Isère au droit de la station a baissé de 118,41 à 118,20 (source CNR), soit 20 cm. Le débit mesuré par les jaugeages a diminué de 710 à 630 m<sup>3</sup>/s.

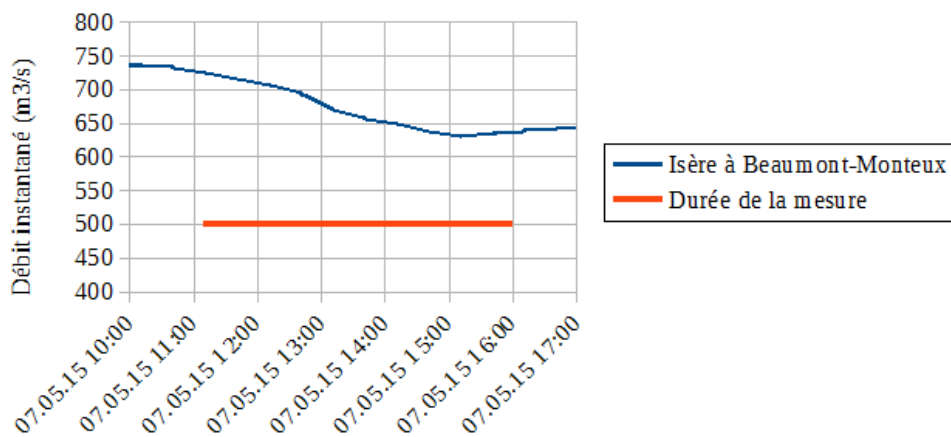


Figure 41: Évolution du débit de l'Isère à Beaumont-Monteux lors de la campagne de charriage du 7 mai 2015.

La Fig. 42 présente la bathymétrie de la section de mesure mesurée au niveau des verticales de mesure lors des deux jaugeages le matin et le soir. Quelques différences apparaissent. Les écarts de bathymétrie sont cependant probablement dus aux incertitudes de mesure plutôt qu'à une évolution des fonds. Pour la suite nous utiliserons la bathymétrie mesurée le matin.

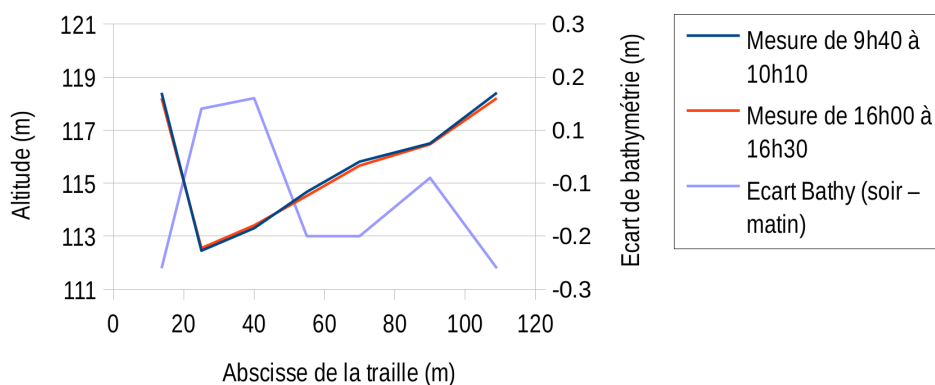


Figure 42: Bathymétries de la section mesurées pendant les deux jaugeages (7 mai 2015).

La Fig. 43 précise la répartition des vitesses et débits au sein de la section.



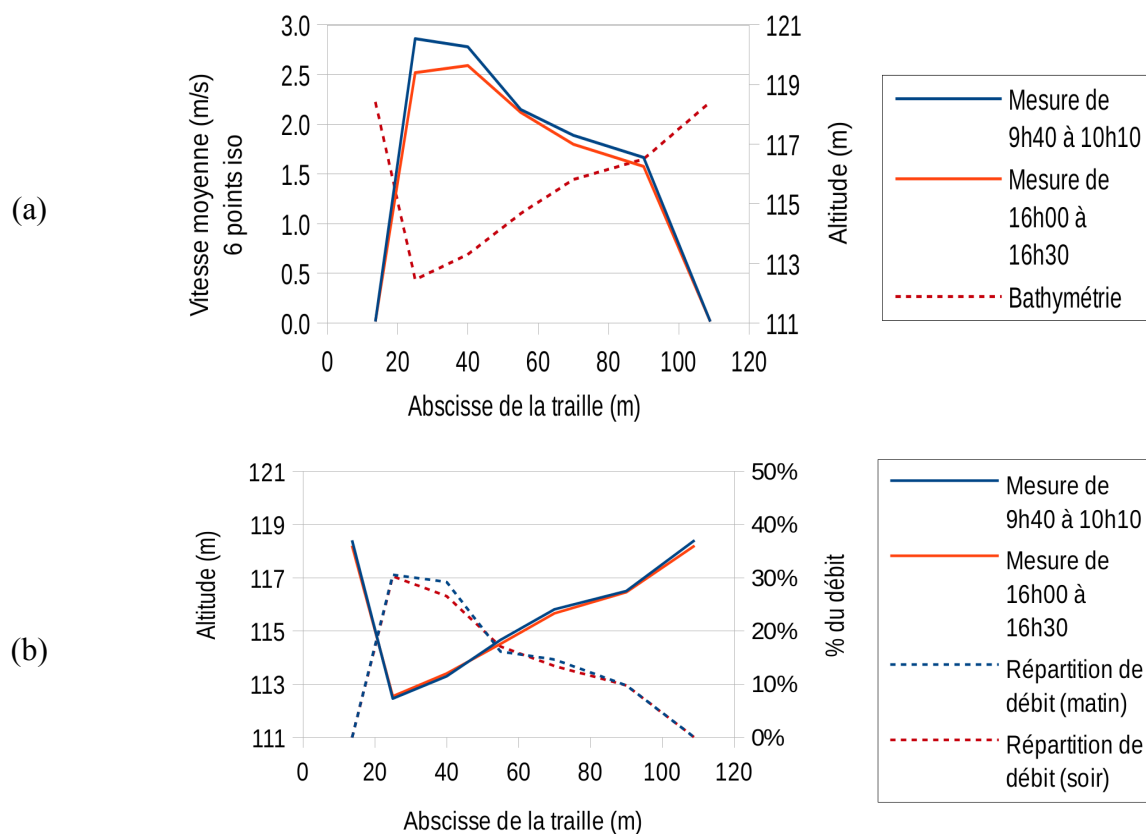


Figure 43: Répartition des vitesses moyennes (a) et des débits (b) lors des deux jaugeages (7 mai 2015).

On observe bien des vitesses et débits plus élevés en rive droite de la section, soit là où les profondeurs sont les plus élevées. La baisse de niveau entre les deux jaugeages se traduit par une diminution des vitesses moyennes en chaque verticale. Quant aux vitesses du fond, nous n'observons qu'une légère diminution qu'à la verticale 25m.

Nous considérerons donc que les conditions hydrauliques étaient assez stables au cours de la journée.

#### 4.4.2.2. Analyse des résultats

Chaque prélèvement a été sous-échantillonné et la granulométrie a été réalisée par tamisage humide. Les mailles des tamis avaient les diamètres suivants :

2 mm > 1 mm > 0.5 mm > 0.315 mm > 0.2 mm > 0.1 mm > 0.05 mm .

Tous les sous-échantillons correspondant aux prélèvements à 25m présentaient quelques particules de diamètres supérieurs à 2mm. Le diamètre maximal des particules présentes dans ces sous-échantillon est de 3,5 cm.

La Fig. 44 fournit la distribution granulométrique des sous-échantillons.

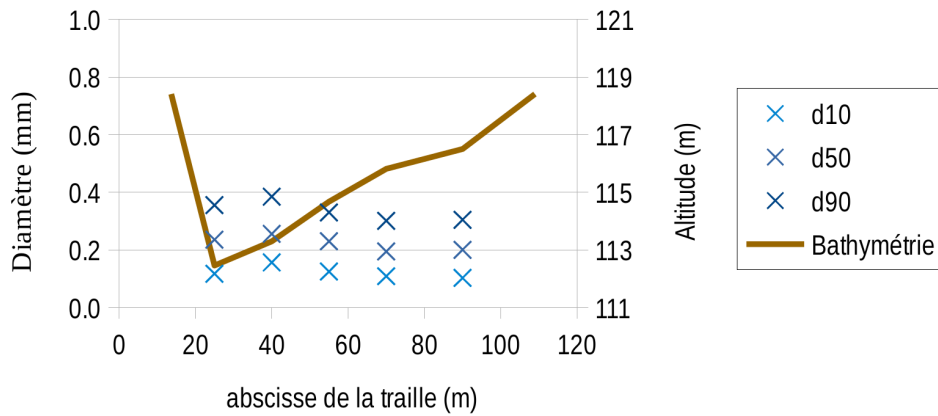


Figure 44: Caractéristiques granulométriques des échantillons de charriage sur le transect de e la station hydrométrique (7 mai 2015).

On remarque une légère décroissance de la rive droite à la rive gauche avec un maximum pour la verticale à 40m. Cela est cohérent avec la distribution des vitesses : le  $d_{50}$  augmente avec la vitesse.

En ne considérant que la partie sableuse, la distribution granulométrique moyenne (en mm) est présentée au Tab. 7.

Tableau 7 : Caractéristiques granulométriques moyennes des échantillons de charriage lors de la campagne de mesure du 7 mai 2015

$d_{10}$	$d_{16}$	$d_{50}$	$d_{84}$	$d_{90}$
0,11 mm	0,13 mm	0,21 mm	0,30 mm	0,32 mm

Cette valeur de  $d_{50}=0,21$  mm est conforme à celle obtenue lors des dragages du garage amont de l'écluse réalisés en 2008.

La Fig. 45 représente la valeur des débits solides unitaires (poids prélevé / durée de prélèvement/largeur d'ouverture) au droit de chaque verticale pour chaque prélèvement ainsi que le  $d_{50}$  associé à chaque verticale. Nous remarquons que en moyenne, la répartition du débit solide est symétrique par rapport au centre de la section. En revanche, les sédiments sont plus grossiers en rive droite.

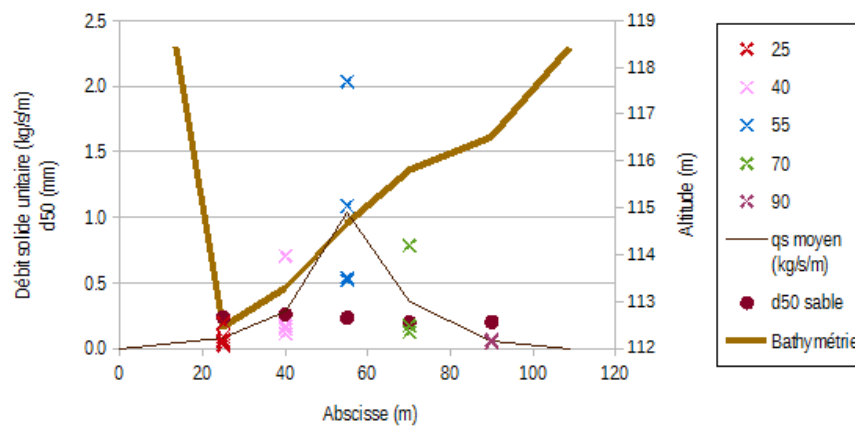


Figure 45: Débit solide unitaire mesuré au travers de la section sur le transect de la station hydrométrique (7 mai 2015).

Ce graphique montre une certaine hétérogénéité des valeurs de débit solide calculé. Cela peut provenir des incertitudes des mesures mais également du fait que le transport sédimentaire par charriage se réalise par « bouffée ».

N'ayant pas de critères objectifs pour éliminer certaines valeurs, nous avons réalisé la moyenne sur chaque verticale. **Le débit solide estimé est alors de 29 kg/s.**

Remarque : nous faisons de plus les hypothèses suivantes :

- le transport par charriage s'effectue sur une épaisseur inférieure ou égale à la hauteur d'ouverture du Helley-Smith.
- le Helley-Smith permet de prélever tous les sédiments qui transitent au droit de celui-ci sans modifier les écoulements (ni surestimation, ni sous-estimation du débit solide)

#### 4.4.3. Campagne de mesure du 18 juin 2015

##### 4.4.3.1. Conditions hydrauliques

Le 18 mai 2015, une nouvelle mesure du transport par charriage a été réalisé. Nous pouvons observer qu'entre 12h et 14h le débit a augmenté passant d'environ 475 m<sup>3</sup>/s à 575 m<sup>3</sup>/s, soit une augmentation de près de 20%.

La Fig. 46 montre que ce changement de débit a une incidence non négligeable sur le transport solide. Celui-ci est beaucoup plus important pendant le pic et est quasi-nul hors pic sur certaines verticales. Cela confirme que le débit de mise en mouvement des particules du fond est proche de 500 m<sup>3</sup>/s.

Ainsi, si on sépare les mesures pendant le pic du débit (entre 12 h et 14 h) et les autres, une nette différence est observée (Fig. 46b).

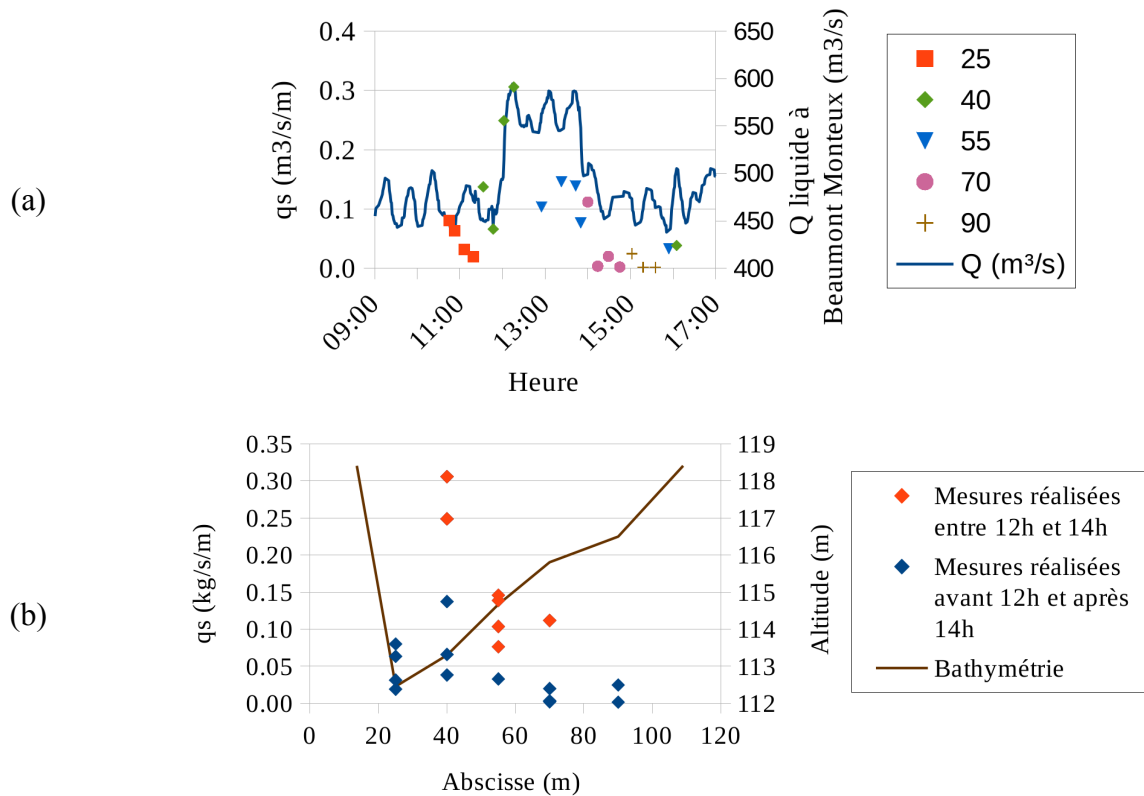


Figure 46: Débit solide unitaire mesuré le 18 juin 2015 sur chacune des verticales de la section sur le transect de la station hydrométrique (a) en fonction du temps (b) en fonction de la position sur le transect.

#### 4.4.3.2. Analyse des résultats

En ne considérant que les valeurs mesurées hors pic de débit, le débit solide est estimé à 3 kg/s.

En ne considérant que les valeurs mesurées pendant le pic lorsque celles-ci existent (toutes les valeurs dans le cas contraire), le débit solide est de 9 kg/s.

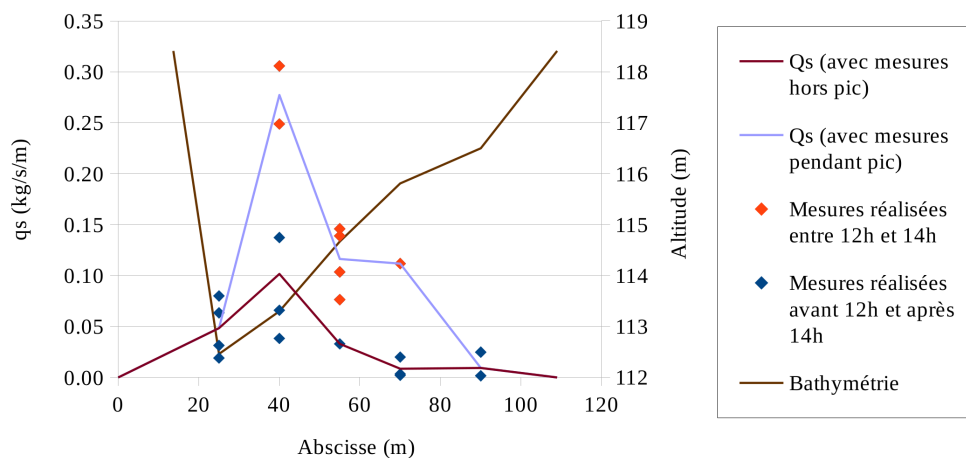


Figure 47: Débit solide unitaire mesuré sur le transect de la station hydrométrique (18 juin 2015) en fonction des verticales et de la période de mesure.

Le débit solide est donc bien plus faible que pendant les mesures du 7 mai 2015. Cet écart provient des débits liquides plus faibles mais également à la quantité beaucoup plus faible de matériaux fins (sable) mobilisables. Les sources de sédiments entre le barrage de Beaumont-Monteux et la section de mesure se sont donc a priori tariées au moins partiellement.

En effet, lors des prélèvements nous avons observé que la granulométrie des sédiments charriés était beaucoup plus grossière que pour ceux du 7 mai 2015. Le sable ne semblait présent que dans l'axe central d'écoulement (55 m). Ces observations sont confirmées par la Fig. 48.

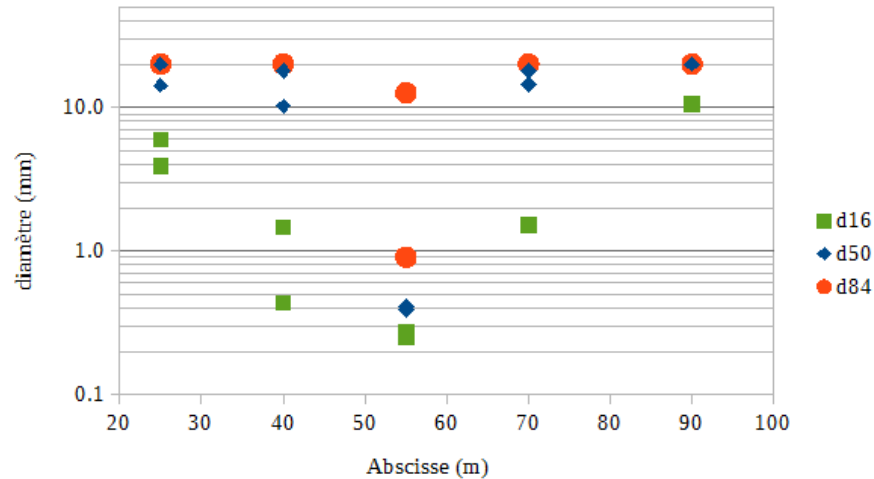


Figure 48: Diamètres caractéristiques des échantillons de charriage mesurés sur le transect de la station hydrométrique (18 juin 2015) en fonction des verticales et de la période de mesure.

Les sources de sédiments entre le barrage de Beaumont-Monteux et la section de mesure se sont donc a priori tariées au moins partiellement. Cela tend à montrer que, depuis les mesures du 7 mai 2015, les sables ont été évacués. Les mesures bathymétriques réalisées par la CNR devraient confirmer le déplacement des dépôts vers l'aval.



## 5. COURBE DE TARAGE SÉDIMENTAIRE

### 5.1. Modélisation du transport solide local

#### 5.1.1. Contraintes de cisaillement

Il est possible d'estimer les contraintes de cisaillement locales ainsi que le transport solide local à partir de paramètres hydro-sédimentaires simples (i.e. profondeur d'eau locale  $h$ , vitesse moyennée sur la hauteur d'eau  $U$ , et rugosité de fond  $k_{st}$ ).  $h$  et  $U$  peuvent être issus de mesures in-situ (mesures ADCP par exemple) ou d'un modèle numérique résolvant les équations de Barré de Saint Venant à deux dimensions.  $k_{st}$  peut être estimé à partir des caractéristiques sédimentaires du fond (granulométrie, présence éventuelle de formes de fond) et d'un éventuel calage hydraulique. Le paramètre de Shields s'écrit ainsi :

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

où  $u_*$  est la vitesse de frottement,  $g=9.81$  m/s<sup>2</sup> 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 :

$$C_D = \left( \frac{\kappa}{1 + \log(z_0/h)} \right)^2 \quad \text{Eq. 3}$$

avec  $\kappa=0,41$  la constante de Von Karman,  $z_0=k_s/30$  la longueur de rugosité, et  $k_s$  la hauteur de rugosité. Le profil des vitesses sur la verticale s'écrit ainsi :

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \log\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{Eq. 4}$$

Pour le calcul du charriage ou de la concentration au fond, il faut utiliser la rugosité de peau (ou de grain),  $k_s=2D_{84}$  avec  $D_{84}$  le diamètre pour lequel 84% des sédiments formant la population au fond sont plus fins. En supposant que la population de sédiments du fond puisse être décrit par une loi log-normale ( $D_{50}$  diamètre médian des grains,  $\sigma_D$  écart-type),  $D_{84}=\sigma_D D_{50}$ .

Pour le calcul de la dissipation d'énergie sur la colonne d'eau, la rugosité totale  $k_s=k_{st}$  est utilisée, qui inclut généralement la dissipation due au charriage, aux formes du lit, etc. Il existe des formules empiriques permettant de relier la rugosité totale aux caractéristiques des formes de fond. Si des mesures expérimentales du profil de vitesse vertical existent (mesures ADCP par exemple bien qu'elles ne décrivent pas les vitesses les plus proches du fond),  $k_{st}$  peut être ajustée afin que la loi logarithmique décrive correctement les données expérimentales.

#### 5.1.2. Transport solide par charriage

Par souci de simplification, les caractéristiques sédimentaires des sédiments charriés et en suspension seront par la suite supposées identiques à celles du lit, soit  $D_{50}=d_{50}$  et  $\sigma_D=\sigma_d$ .

Les formules de Meyer-Peter & Müller (1948) et Camenen & Larson (2005) ont été utilisées pour estimer le transport solide par charriage (en m<sup>3</sup>/s/m):

$$q_{sb,MPM} = 8 \sqrt{(s-1)g d_{50}^3} (\theta - \theta_{cr})^{3/2} \quad \text{Eq. 5}$$

$$q_{sb,CL} = 12 \sqrt{(s-1)g d_{50}^3} \theta^{3/2} \exp\left(-4.5 \frac{\theta_{cr}}{\theta}\right) \quad \text{Eq. 6}$$

où  $q_{sb}$  est le flux solide charrié unitaire (par unité de largeur) [m<sup>3</sup>/s/m],  $\theta_{cr}$  est le paramètre de Shields critique. Une estimation de ce dernier à partir du diamètre médian peut être obtenue à l'aide de la formule de Soulsby & Whitehouse (1997).

A partir des mesures ADCP couplées à un GPS (avec l'option "bottom tracking"), il est possible d'estimer qualitativement le débit solide charrié à partir de la déviation de la position du fond vue par l'ADCP par rapport à la position réelle du fait du lit mobile. Il est à noter cependant que la vitesse apparente du charriage dérivée des pulses de suivi de fond de l'ADCP est liée à une couche de sédiment en mouvement pouvant être en charriage, mais aussi en suspension. Il reste encore très difficile d'identifier exactement à quel mode de transport correspond cette vitesse de fond selon la taille des particules, la fréquence de mesure de l'ADCP et les concentrations observées au fond. La mesure permet cependant de donner un bon indicateur spatial du charriage et d'interpoler de façon plus réaliste les potentiels prélèvements réalisées sur un nombre de verticales limité (Dramais et al., 2013).

En supposant que le transport par charriage se fait de façon homogène sur l'épaisseur  $\delta_s$  de la couche de charriage, la vitesse  $V_b$  de la couche de charriage peut être simplement relié au flux solide par charriage :

$$V_b = \frac{q_{sb}}{\delta_s} \quad \text{Eq. 7}$$

En première approximation, nous avons relié l'épaisseur de la couche de charriage à la hauteur de rugosité des grains, soit  $\delta_s = k_s$ .

Au cours des campagnes réalisées, il n'y a pas eu de mesures ADCP exploitables pour estimer le transport solide par charriage à partir du suivi de fond. C'est cependant quelque chose qui pourra être réalisé sur des jaugeages plus anciens.

### 5.1.3. Profils de concentration en sables

La suspension sableuse peut être estimée en utilisant la formule de Camenen & Larson (2008). Cette dernière a pour hypothèse un coefficient de diffusion sédimentaire vertical  $\epsilon_s$  constant, impliquant un profil théorique de concentration en sable exponentiel :

$$\epsilon_s = \frac{\sigma_c}{6} \kappa u_* h \quad \text{Eq. 8}$$

où  $\sigma_c$  est un coefficient assimilé au nombre de Schmidt (il inclut sûrement d'autre sources d'incertitude),  $u_*$  la vitesse de frottement en supposant  $k_s = k_{st}$ . Van Rijn (1993) et Camenen & Larson (2008) ont proposé des formules empiriques pour  $\sigma_c$ , qui est proportionnelle à  $W_s/u_*$ , où  $W_s$  est la vitesse de chute des particules. Cependant, pour les grandes rivières, de meilleurs résultats ont été obtenus en utilisant  $\sigma_c = 1$  (Camenen et al., 2014). Nous ferons cette même hypothèse ici. Le profil de concentration exponentiel s'écrit :

$$c(z) = c_R \exp\left(\frac{W_s}{\epsilon_s} z\right) \quad \text{Eq. 9}$$

Avec la concentration de référence  $c_R$  supposée proportionnelle au flux charrié par l'intermédiaire de la relation  $q_{sb} \propto c_R u_*$ . En utilisant la formule de transport introduite par Camenen & Larson (2005), Camenen & Larson (2008) ont proposé :

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

avec  $d_* = [(s-1)g/\nu^2]^{1/3} d_{50}$  le diamètre sédimentologique ( $\nu \approx 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  est la viscosité cinématique de l'eau)

Dans la Fig. 49 sont présentés les résultats du modèle avec les mesures de vitesse et de concentration réalisées le 5 mai 2015 sur l'Isère juste en amont de la confluence sur trois verticales (voir présentation des résultats expérimentaux paragraphe 4.3.3).

Les vitesses moyennes sur la profondeur mesurées sur les trois verticales (river gauche V.R.G, centre V.CN et rive droite V.RD) étaient en moyenne de  $U = 2.5 \text{ m/s}$  lors des mesures expérimentales du 5 mai 2015. Les profils de vitesse ont été modélisés à l'aide de la loi logarithmique (Eq. 4) en adaptant la hauteur de rugosité  $k_{st} = 0,10 \text{ m}$  afin d'obtenir le meilleur accord possible avec les données expérimentales. Ces valeurs indiquent la présence soit de rides de fond, soit de sédiment plus grossiers comme des graviers. Ces valeurs de hauteur de rugosité totale sont utilisées pour

calculer la diffusion sédimentaire verticale  $\epsilon_s$  (Eq. 8) alors que la hauteur de rugosité de grain  $k_s = 2d_{84}$  est utilisée pour calculer la concentration de référence (Eq. 9). Comme observé en Fig. 49(b), en tenant bien compte des fortes incertitudes sur la mesure des concentrations et l'estimation de la position verticale, le modèle pour le profil exponentiel des concentrations en sable donne des résultats cohérents avec le profil de concentration observé sans calage autre que la rugosité totale. Une forte sur-estimation des concentrations en surface est cependant observée. Il faut noter que les concentrations en sables ont été ici estimées en retranchant une concentration homogène de fines estimée à 4 g/l.

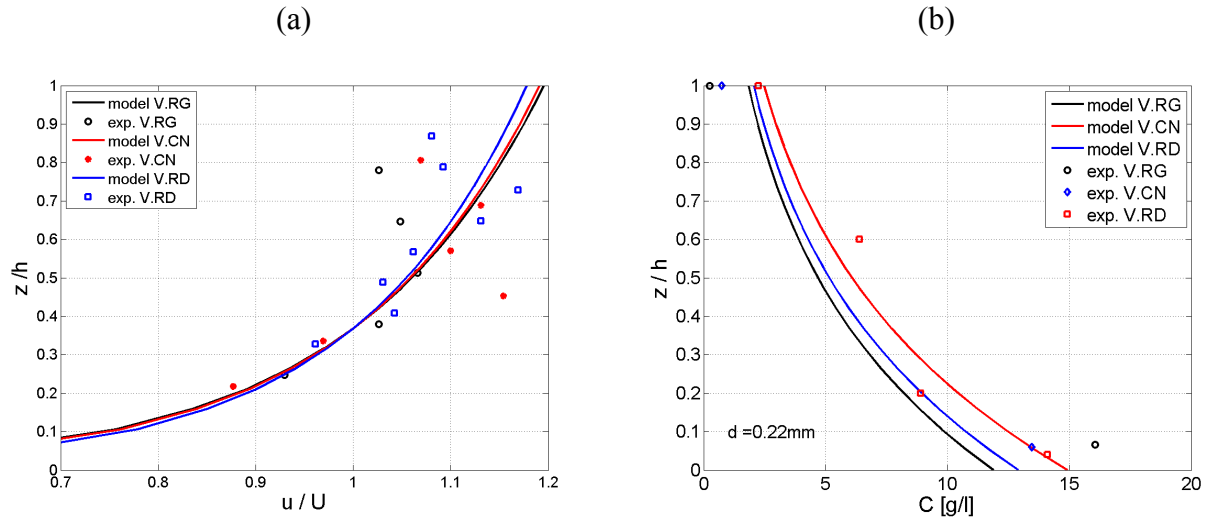


Figure 49: Profils verticaux (sans dimension) des vitesses (a) et des concentrations (b); comparaison entre le modèle et les mesures du 5 mai 2015 sur l'Isère juste en amont de la confluence.

La Fig. 50 donne une indication des différences de concentration pouvant être observées en surface par rapport à la concentration moyenne (sur la hauteur d'eau) ou la concentration au fond. Ces courbes ont été obtenues à partir des Eq. 8, 9 et 10 ; elles ne peuvent donc être utilisées que pour observer des tendances car issues d'un modèle avec des incertitudes élevées.

On peut cependant retenir que les rapports de concentration  $C_s/C_m$  sont très sensibles à la taille des sédiments, à la hauteur d'eau et à la vitesse de l'écoulement. Le rapport  $C_s/C_b$  ( $C_b = \rho_s c_R$  dans notre cas) est moins sensible à la hauteur d'eau car uniquement fonction de la diffusion sédimentaire verticale  $\epsilon_s$ . Pour des profondeurs d'eau supérieur à 4 m, un rapport 10 entre la concentration de surface et la concentration moyenne semble facilement atteint quelle que soit la vitesse de l'écoulement.

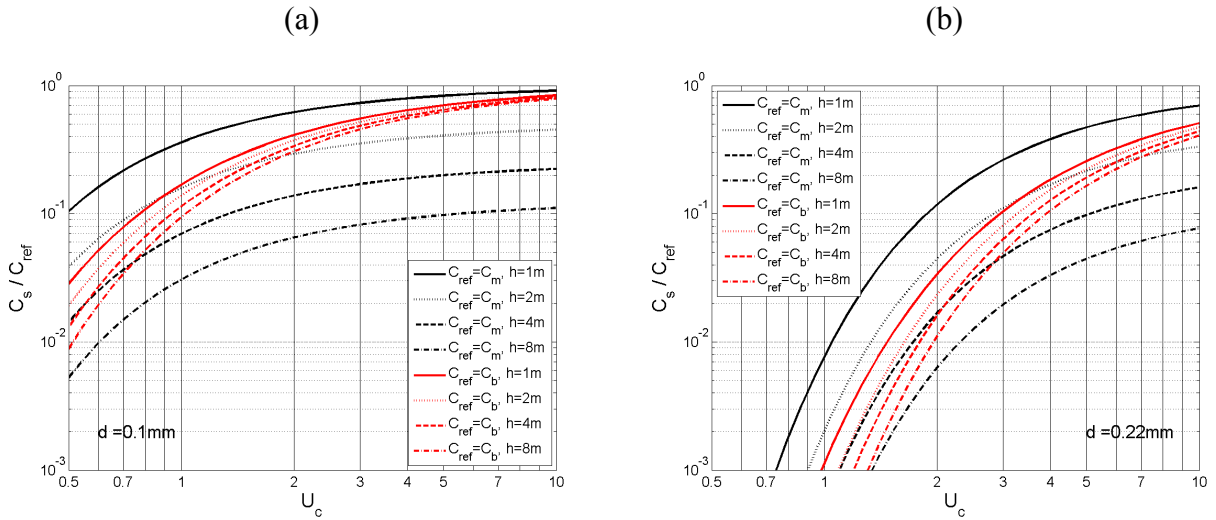


Figure 50: Estimation des rapports entre les concentrations de surface et les concentrations moyennées sur la hauteur d'eau (courbes noires) et entre les concentrations de surface et les concentrations au fond (courbes rouges) pour deux diamètres de sédiment : (a)  $d=0,10$  mm , (b)  $d=0,22$  mm .

## 5.2. Un modèle simple pour estimer les flux sableux au travers d'une section

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 où  $Q$  est le débit liquide exprimé en  $m^3/s$  et  $Z$  la cote de la surface libre (Camenen et al., 2014).

### 5.2.1. Station hydrométrique

En supposant un écoulement uniforme, il est possible d'appliquer la formule de Manning-Strickler, qui dans le cas d'une rivière large (où le rayon hydraulique peut être assimilé à la hauteur moyenne :  $R_h=H$  avec  $H=S/B$   $S$  étant la surface de la section mouillée et  $B$  la largeur de la rivière) donne la relation suivante :

$$Q = B K_s S^{1/2} H^{5/3} \quad \text{Eq. 11}$$

avec  $K_s$  le coefficient de Strickler [ $m^{1/3}/s$ ] et  $S$  la pente moyenne du tronçon. Ainsi, si la station hydrométrique est localisée sur un long tronçon rectiligne sans influence telle qu'un seuil ou une confluence, la relation hauteur-débit peut s'écrire comme suit :

$$Q = a(Z - Z_0)^{5/3} \quad \text{Eq. 12}$$

avec  $a$  un coefficient et  $Z_0$  le niveau de référence pour lequel le débit est supposé nul. Ces deux dernières variables peuvent être ajustées à des mesures expérimentales (jaugeages). Dans le cas d'une influence d'un seuil, l'exposant peut aussi varier (Le Coz et al., 2013). L'Eq. 12 a été appliquée pour la station hydrométrique de Beaumont-Monteux (voir Fig. 51). La courbe de tarage a ainsi été obtenue avec  $a=130$  et  $Z_0=-0.6$  m. Fig. 51b, on peut voir que les résultats sont cohérents avec ceux obtenus par la méthode BaRatin tenant compte de la possible influence aval (Le Coz et al., 2016).

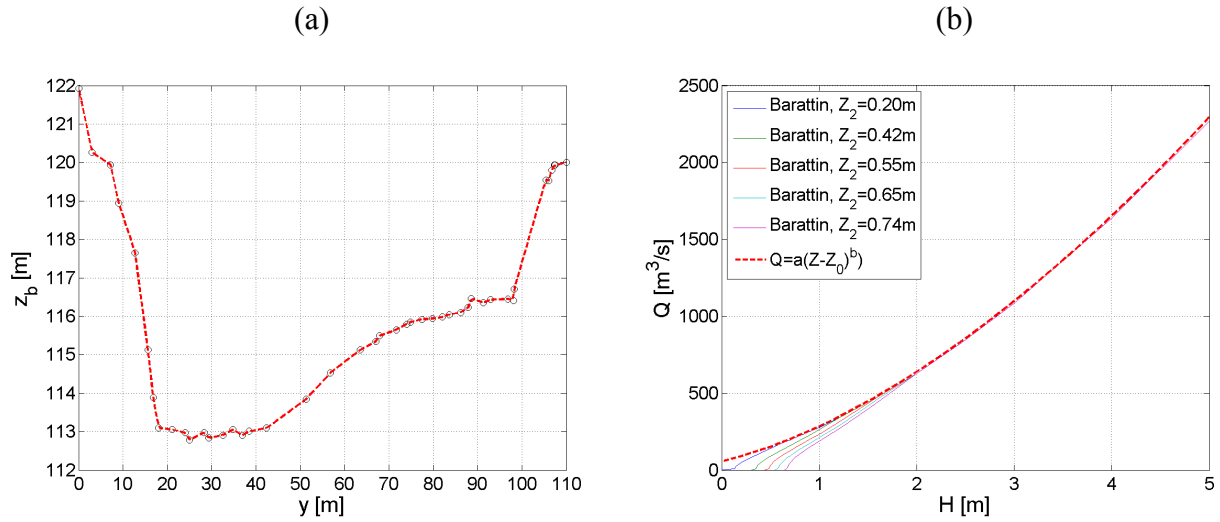


Figure 51: Bathymétrie de la section de mesure (a) et courbes de tarage (b) à la station de Beaumont-Monteux.

A partir des Eqs. 11 et 12, il est possible d'obtenir une estimation du coefficient de Strickler représentatif de la section de la station de jaugeage ( $K_s = a/(BS^{1/2})$ ). Une application à la station de Beaumont-Monteux donne  $K_s = 50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , ce qui est tout à fait réaliste pour une rivière sableuse.

### 5.2.2. Courbe de tarage sédimentaire

A partir de l'Eq. 12 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  $\theta$  estimé à partir des Eqs. 2 et 3 en remplaçant  $U$  par  $V$  et  $h$  par  $R_h$ .

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 ( $V \approx 4 \text{ m/s}$ ), impliquant une valeur du paramètre de Shields très grande (proche de 10 en prenant  $d_{50} = 0,22 \text{ mm}$ ). Ceci induit potentiellement que le transport solide par suspension prédomine largement lors des crues si les apports en sable sont suffisants, car le rapport de la vitesse de frottement  $u_*$  sur la vitesse de chute des sédiments  $W_s$  est très élevé ( $u_*/W_s > 1$ ).



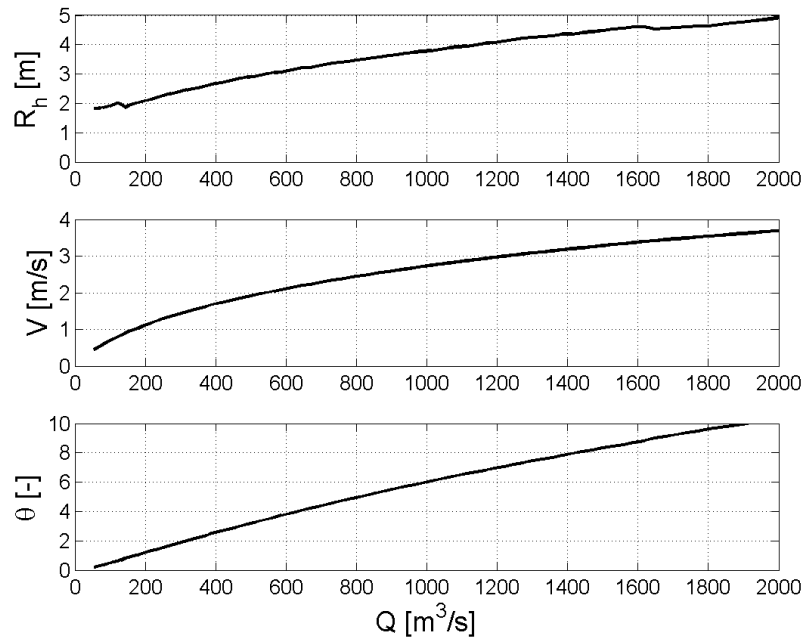


Figure 52: Caractéristiques hydrauliques moyennes sur la station hydrométrique de Beaumont-Monteux.

Les Eqs. 5 à 10 peuvent donc être appliquées afin d'estimer le flux solide en sable moyen sur la section en remplaçant les valeurs locales ( $h$  et  $U$ ) par les valeurs équivalentes moyennées sur la section ( $R_h$  et  $V$ , respectivement). Une estimation du flux solide total de sable (en kg/s) au travers de la section est ainsi donnée d'après l'équation suivante :

$$Q_s = Q_{sb} + Q_{ss} = \rho_s (q_{sb} + q_{ss}) L_a \quad \text{Eq. 13}$$

avec  $\rho_s \approx 2650$  kg/m<sup>3</sup> la masse volumique du sédiment,  $L_a$  la largeur active de la rivière,  $q_{sb}$  et  $q_{ss}$  les flux solides charriés et par suspension unitaires (par unité de largeur) [m<sup>3</sup>/s/m]. Pour le charriage, l'Eq. 6 est utilisée. Pour la suspension graduée de sable, la formule de Camenen & Larson (2008) est utilisée (sous la forme locale) :

$$q_{ss} = U c_R \frac{\epsilon_s}{W_s} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-W_s}{\epsilon_s h}\right) \right] \quad \text{Eq. 14}$$

avec  $\epsilon_s$  et  $c_R$  calculé à l'aide des Eqs. 8 et 10, respectivement, en utilisant les valeurs moyennées sur la section, soit  $R_h$  et  $V$  à la place de  $h$  et  $U$ , respectivement.

Les résultats sont présentés Fig. 53 où une classe de sable avec  $d_{50} = 0.22$  mm a été utilisée. Cette valeur se base sur la valeur moyenne des prélèvements de grossiers réalisés au cours de la chasse/crue de la Basse-Isère en 2015 (cf. paragraphe 4.4.2.2). Deux campagnes de mesure par charriage ont été réalisées le 7 mai 2015 en fin de chasse (barrage de Beaumont-Monteux ouvert) et le 17 mai 2015 après la chasse (barrage de Beaumont-Monteux fermé). Pour cette deuxième campagne, du fait de la variation du débit lors des mesures, deux valeurs sont proposées (avec des incertitudes plus élevées). Il apparaît que le modèle surestime largement le transport solide par charriage en comparaison avec les mesures. Ceci peut s'expliquer par un apport insuffisant de sédiments, la capacité de transport n'étant pas atteinte. Un coefficient  $\alpha = 0,1$  permet de caler une loi de tarage sédimentaire sur l'expérience du 7 mai tel que :

$$Q_{sb, \text{réel}} = \alpha Q_{sb, \text{cap}} \quad \text{Eq. 15}$$

En faisant le calage sur les expériences du 17 mai, on obtient  $\alpha = 0,03$ . Ceci confirme que les apports en sables amenuisent très vite après la chasse une fois le barrage de Beaumont-Monteux fermé. Comme discuté précédemment, les sédiments prélevés lors des expériences du 17 mai étaient

non seulement en quantité inférieure mais aussi différent en qualité (beaucoup plus grossiers) indiquant que les stocks de sable sur le tronçon étaient très faibles. Il serait donc intéressant de refaire une campagne de mesure par charriage pour des débits équivalents afin de confirmer cet amenuisement des stocks de sable.

Il est à noter que la suspension graduée en sable induirait selon le modèle des flux 3 à 5 fois supérieurs aux flux charriés. A priori, même si la capacité de transport n'est pas atteinte du fait du manque de sédiments, le flux de sables en suspension semble être non négligeable à la station de Beaumont-Monteux. Des mesures de la suspension graduée mériteraient donc d'être effectuées.

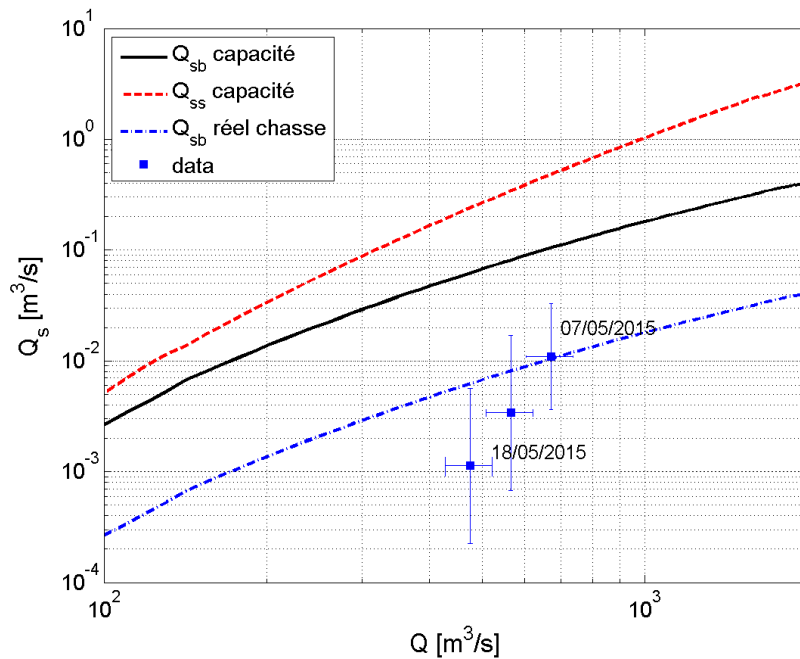


Figure 53: Courbe de tarage sédimentaire pour la station hydrométrique de Beaumont-Monteux.

## 6. MODÉLISATION 2D DES ÉCOULEMENTS AU NIVEAU DE LA CONFLUENCE

### 6.1. Étendue du modèle et bathymétrie

Le modèle numérique concerne la zone comprise entre (Fig. 54) :

- l'aval immédiat du pont de la D220 sur le Rhône (Profil CNR 99)
- l'aval immédiat du pont de l'A7 sur l'Isère (Profil CNR 47)
- l'amont immédiat de l'usine de Bourg-lès-Valence. (Profil CNR 105).

Les ponts ne seront pas représentés par le modèle et leur impact est en première approximation négligé.

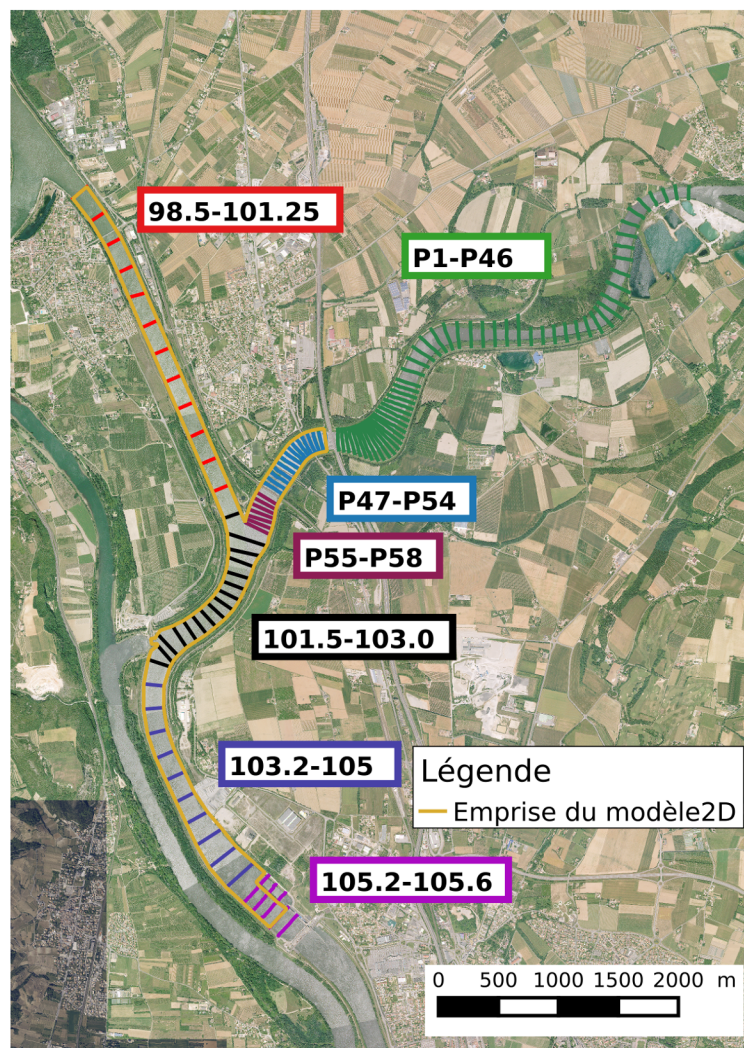


Figure 54: Étendue du modèle 2D de la confluence Rhône-Isère et données bathymétriques utilisées pour sa construction (source fond de carte : IGN).

Afin de représenter les écoulements à partir d'un état « avant chasse », nous recherchons la bathymétrie « d'équilibre », c'est-à-dire une bathymétrie suffisamment éloignée d'une crue ou d'une chasse et dont les levés ont été réalisés à peu près à la même époque sur l'ensemble de la zone d'étude.

Tableau 8 : Liste des relevés bathymétriques sur la confluence Rhône-Isère utilisés pour la construction du modèle 2D.

Cours d'eau	Tronçon	Date de levée	Code couleur carte			
Rhône	P98.5 – P105	Mars 2004	■	■	■	
Isère	P1 – P58	Mai 2006	■	■	■	
Rhône	P101.6 – P103	Mai 2006		■		
Rhône	P98.25 – P105.6	Déc 2006	■	■	■	■
Isère	P47 – P58	Juin 2007		■	■	
Rhône	P101.5 – P103	Juin 2007		■		
Isère	P55 – P58	Mai 2008			■	
Rhône	P101.6 – P103	Mai 2008		■		
Rhône	P101.6 – P103	Juin 2008		■		
Isère	P1 – P46	Août 2008	■			
Isère	P47 – P58	Sept 2008		■	■	
Isère	P11 – P46	Oct 2013	■			
Rhône	P98.25 – P105.6	Mars 2009	■	■	■	■
Rhône	P98.25 – P105	Févr 2011	■	■	■	
Rhône	P105.2 – P105.6	Mars 2011				■
Isère	P47 – P58	Avril 2011		■	■	
Rhône	P101.5 – P103	Avril 2011		■		
Rhône	P101.6 – P103	Mai 2012		■		
Isère	P47 – P54	Juin 2012	■	■		
Rhône	P101.5 – P103	Oct 2012	■	■	■	
Isère	P47 – P54	Oct 2013		■		
Isère	P47 – P54	Avril 2014		■		
Rhône	P101.5 – P103	Avril 2014		■		
Isère	P47 – P58	Mars 2015		■	■	
Rhône	P101.5 – P105.6	Mars 2015		■	■	
Rhône	P101.6 – P105	11 Mai 2015		■	■	■
Rhône	P101.6 – P105.6	20 Mai 2015		■	■	
Isère	P11 – P54	Juin 2015		■		■
Rhône	P101.5 – P103	Juin 2015		■	■	

Trois périodes correspondent à ces critères :

- les levés de 2006 (mai pour l'Isère et décembre pour le Rhône)
- les levés de 2011 (avril pour l'Isère et février pour le Rhône).
- les levés de 2015 (mars pour l'Isère et le Rhône)

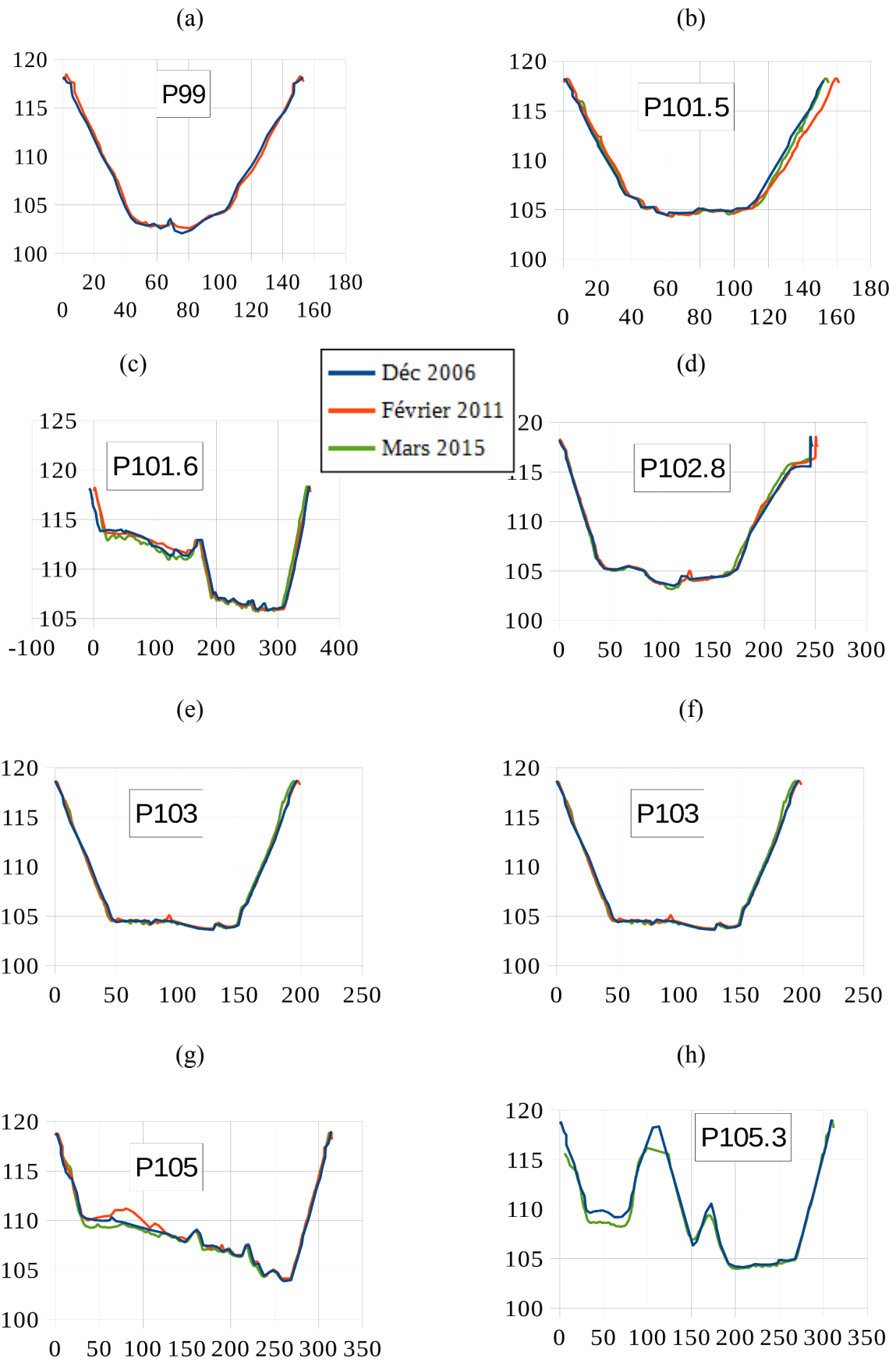


Figure 55: Transects bathymétriques « à l'équilibre » du canal d'amenée au niveau de la confluence avec l'Isère.



En comparant les profils de ces périodes (Fig. 55), nous vérifions qu'ils correspondent bien à des profils d'équilibre. Nous pouvons donc en conclure que les profils levés en 2006, 2011 et 2015 sont les profils d'équilibre sur ce tronçon du Rhône. Pour le Rhône en amont de la confluence, nous utiliserons les profils levés en 2011.

Fig. 56, nous comparons les profils réalisés sur l'Isère en 2006, 2008 (avant chasse), 2011 et 2015.

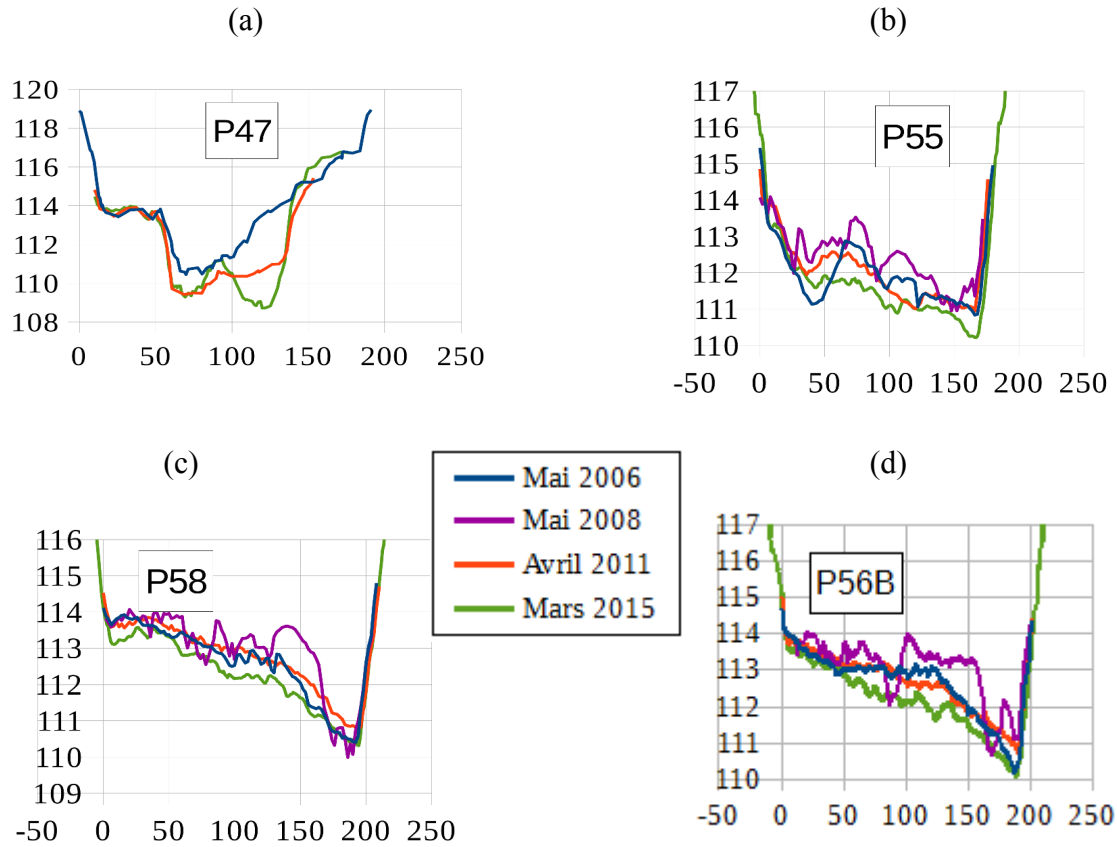


Figure 56: Transects bathymétriques « à l'équilibre » de l'Isère au niveau de la confluence avec le Rhône.

Les graphiques Fig. 56 montrent des fluctuations plus importantes entre les fonds « hauts » en mai 2008 et « bas » en mars 2015. Les profils réalisés en 2006 et 2011 sont relativement proches.

Il est intéressant de noter qu'en 2008, les fonds étaient déjà à un niveau relativement haut avant le passage de l'épisode crue / chasse.

La crue/chasse de 2015 étant l'événement pour lequel nous avons le plus d'éléments, nous utiliserons le semis réalisé en mars 2015. En effet, ce dernier couvre bien le linéaire de l'étude et permettra d'étudier la crue de 2015 en partant avec une bathymétrie la plus proche de la bathymétrie avant la crue de 2015.

## 6.2. Code de calculs 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 :

$$\text{conservation de la masse} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = 0 \quad \text{Eq. 16}$$

$$\frac{\partial hU}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hU^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (hUV) = -gh \frac{\partial z_f}{\partial x} - g \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{K_s^2 h^{1/3}} + D \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial U}{\partial y} \right) \right] \quad \text{Eq. 17}$$

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

$$\frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (hUV) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hV^2 + \frac{gh^2}{2} \right) = -gh \frac{\partial z_f}{\partial y} - g \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{K_s^2 h^{1/3}} + D \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right] \quad \text{Eq. 18}$$

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 :

$$Co = \frac{\sqrt{U^2 + V^2} \Delta t}{\Delta x} \quad \text{Eq. 19}$$

où  $\Delta x$  est l'intervalle spatial (m) et  $\Delta t$  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.

### 6.3. Construction du modèle numérique 2D

#### 6.3.1. Maillage

Le maillage initial a été obtenu à partir des profils bathymétriques disponibles à chaque PK CNR auxquels ont été ajoutés des profils au droit des zones plus complexes (confluence, barrage Isère) Ces profils ont ensuite été interpolés à l'aide du logiciel Secma. Le pas d'espace longitudinal et latéral sont compris entre 7 et 20m selon la taille de maille souhaitée. De plus, l'interpolation est contrainte par des lignes directrices, notamment au droit du merlon immergé de la confluence. Les mailles sont donc 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 (Fig. 57).

Les cotes de chaque sommet du maillage a ensuite ont ensuite modifiées projetant le maillage sur le semis 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 semis 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. Le merlon central de la confluence est ainsi bien représenté.

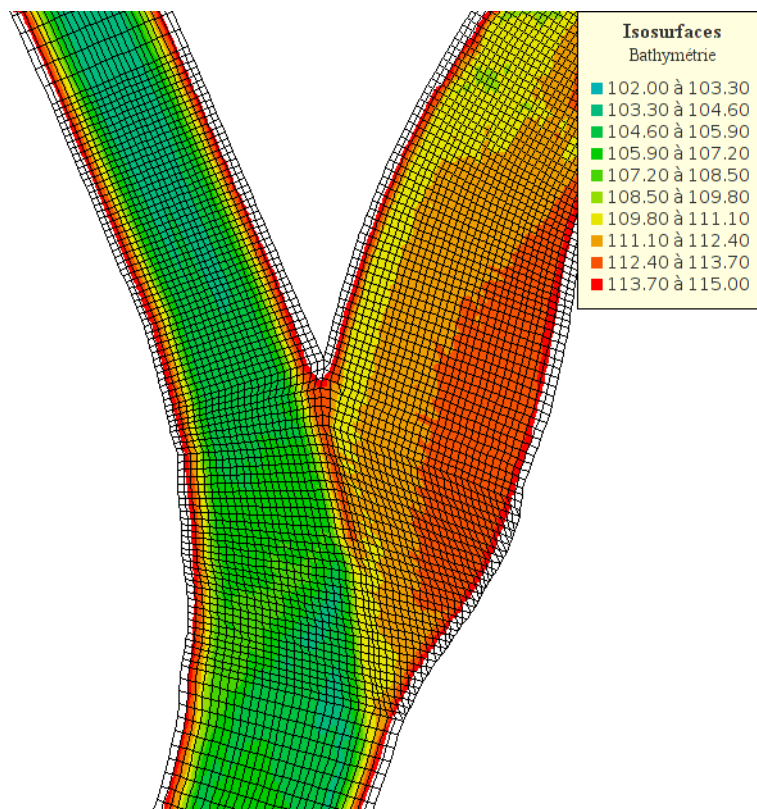


Figure 57: Zoom du maillage 2D autour de la confluence entre le Rhône et l'Isère

### 6.3.2. Conditions d'entrée des calculs

Les conditions limites amont sur l'Isère et le Rhône 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.

### 6.3.3. Calage du modèle 2D

En l'absence de données de calage fiables à la date de rédaction du présent rapport, nous avons repris les paramètres du modèle 1D (cf. chapitre 7) et comparé les résultats du modèle 2D à ceux du modèle 1D.

Les coefficients de Strickler retenus sont :

- 40 m<sup>1/3</sup>/s pour le Rhône
- 35 m<sup>1/3</sup>/s pour l'Isère.

Comme le montre la Fig. 58, les écarts entre les deux modèles dans le canal d'amenée sont compris entre -10 et +8cm pour les trois scénarios testés. Les écarts les plus notables se situent au droit du barrage Isère et dans le canal d'amenée en amont de la confluence.

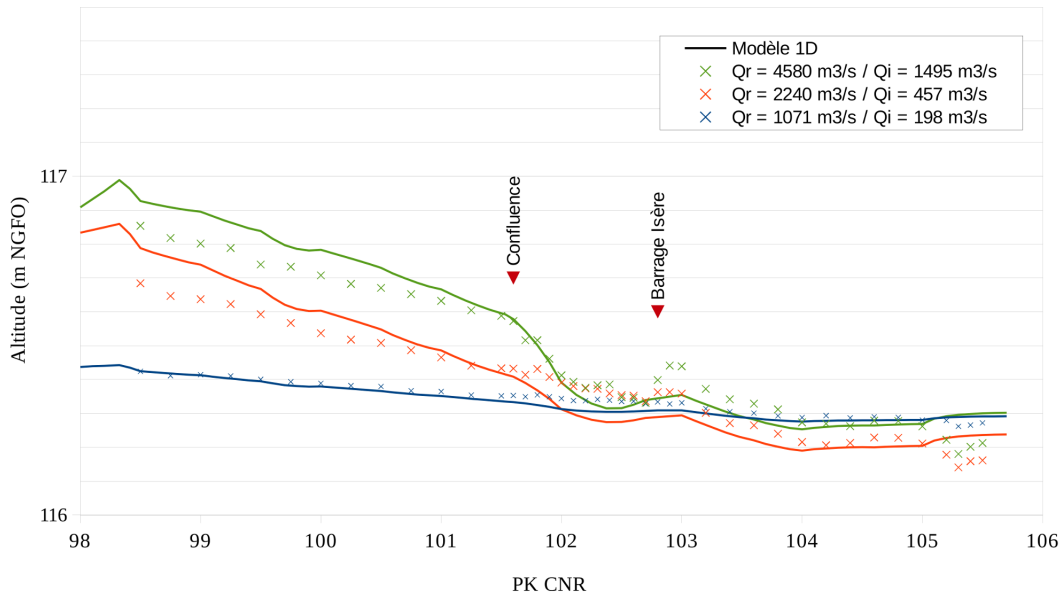


Figure 58 : Comparaison des résultats de ligne d'eau sur le canal d'aménée entre le modèles 2D et le modèle 1D.

Sur l'Isère (Fig. 59), les écarts sont compris entre -8 et +1 cm. La ligne d'eau modélisée avec le modèle 2D est plus basse que celle du modèle 1D. Les écarts se creusent entre les profils 54 et 55 qui encadrent le pont SNCF. Ces différences proviennent sans doute d'une différence de bathymétrie. En effet, la géométrie du modèle 2D est issue des levés bathymétriques réalisés par INGEO tandis que le modèle 1D utilise des profils interpolés entre les profils 54 et 55.

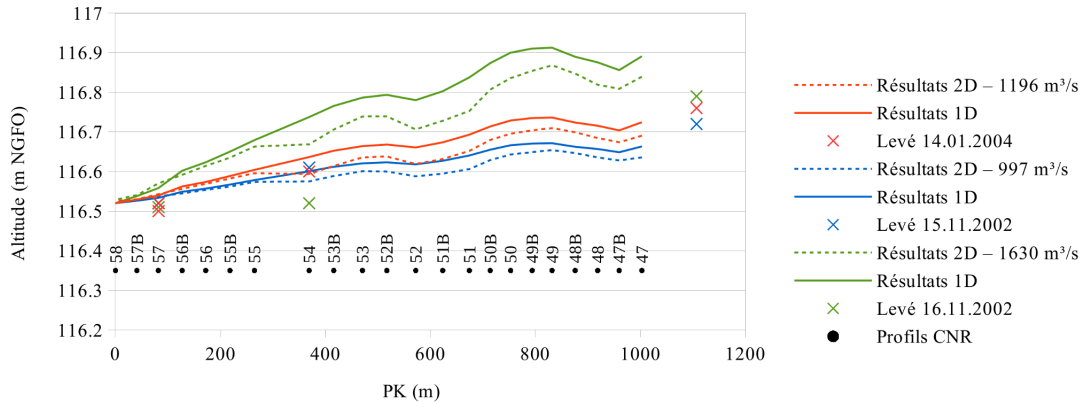


Figure 59 : Comparaison des résultats de ligne d'eau sur l'Isère entre le modèles 2D et le modèle 1D.

Sans données de calage fiables, il n'est pas possible d'affiner plus le calage hydraulique. Pour le modèle 2D le calage devrait aussi se faire sur les champs de vitesse soit avec l'aide d'une série de mesure ADCP à différents débits.

### 6.3.4. Calculs réalisés

Afin de mieux comprendre les écoulements au sein de la zone d'étude, nous avons modélisé les scénarios sélectionnés avec de représenter au mieux les principaux écoulements au cours de la crue et chasse de mai 2015 (Fig. 60). Ces scénarios permettent de se représenter les différents stades de l'épisode crue/chasse de manière chronologique. Ces conditions aux limites sont résumées dans le Tab. 9.

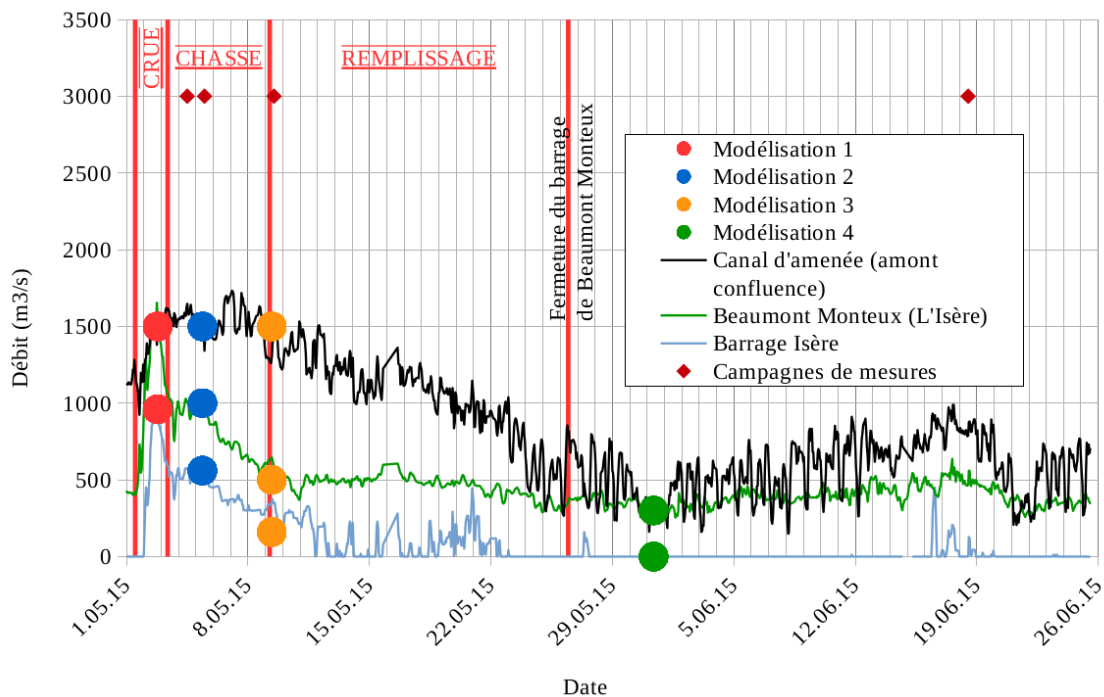


Figure 60 : Présentation des différents scénarios sélectionnés pour représenter différents écoulement caractéristiques de la crue et chasse de mai 2015.

Tableau 9 : Listing des conditions d'écoulement modélisées en permanents.

Débit Rhône amont ( $Q_{ca}$ en $m^3/s$ )	Canal	Débit Isère ( $Q_i$ en $m^3/s$ )	Débit barrage Isère ( $Q_{bi}$ en $m^3/s$ )	Remarques
1500		1500	960	Correspond au pic de crue
1500		1000	560	Mesures de charriage du 05/052015
1500		500	160	Fin de chasse
300		300	0	Faible débit après fermeture de Beaumont Montoux

Afin de pouvoir comparer les différents scénarios, nous réaliserons ces tests en maintenant un niveau constant à 116.30 à l'aval du modèle.

## 6.4. Résultats et discussion

### 6.4.1. Champs de vitesse

La Fig. 61 cartographie les vitesses calculées par le modèle 2D.

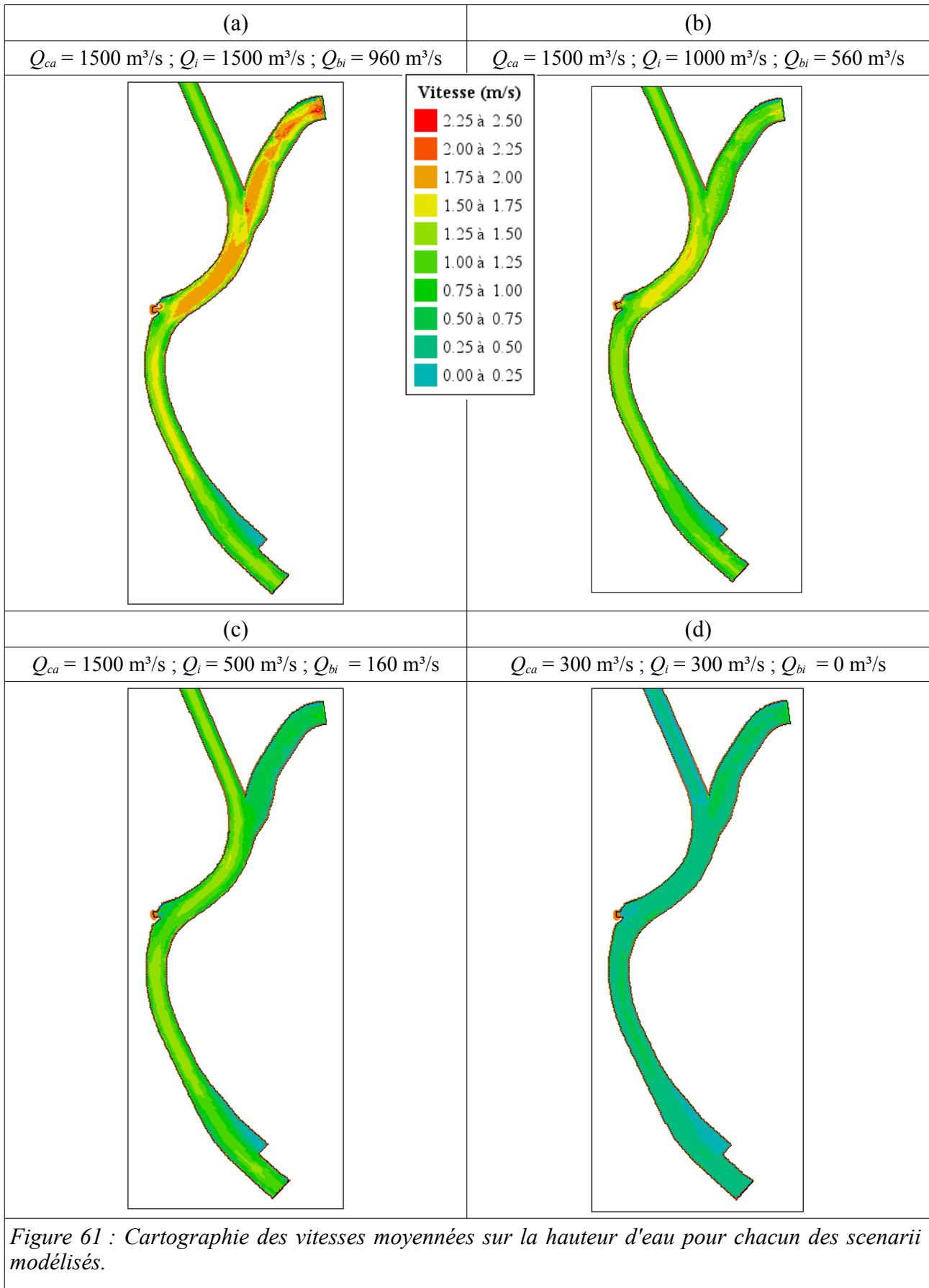
Dans les trois scénarios où le Rhône a un débit de 1500  $m^3/s$ , les vitesses les plus fortes (entre 1,75 et 2 m/s) sont situées dans le canal commun (canal d'aménée en aval de la confluence). Une chute des vitesses non négligeable est observée dans le canal d'aménée à l'**aval du barrage Isère** impliquant potentiellement des dépôts sédimentaires sur cette zone.

Dans le dernier scénario, les vitesses les plus fortes sont situées dans l'Isère. Des dépôts potentiels peuvent donc avoir lieu juste en aval de la **confluence** dans le canal d'aménée.

Si l'on se réfère à la Fig. 50b, pour des vitesses de 2 m/s, le rapport entre les concentrations de surface et les concentrations au fond peut atteindre un facteur 20 à 100 selon les profondeurs d'eau. Cela implique donc qu'il y a un transport très important proche de fond qui est très sensible à tout



ralentissement de l'écoulement et peut expliquer partiellement les dépôts observés dans la zone aval de l'Isère. Les vitesses restent cependant suffisamment élevées pour transporter les sables. Dans le cas du scénario 4 représentant une période post-chasse avec de faibles débits, les vitesses tournent autour de 0.5 m/s. Le transport solide par suspension devrait être a priori négligeable dans ce cas, mais il n'est pas impossible qu'un transport solide par charriage existe.



Ces observations sont cohérentes avec le suivi de la bathymétrie levée par la CNR à différentes dates. La Figure 62 montre que les zones de dépôts principales sont situées :

- à la confluences

- au droit du barrage Isère
- à l'aval, vers l'usine de Bourg-lès- Valence.

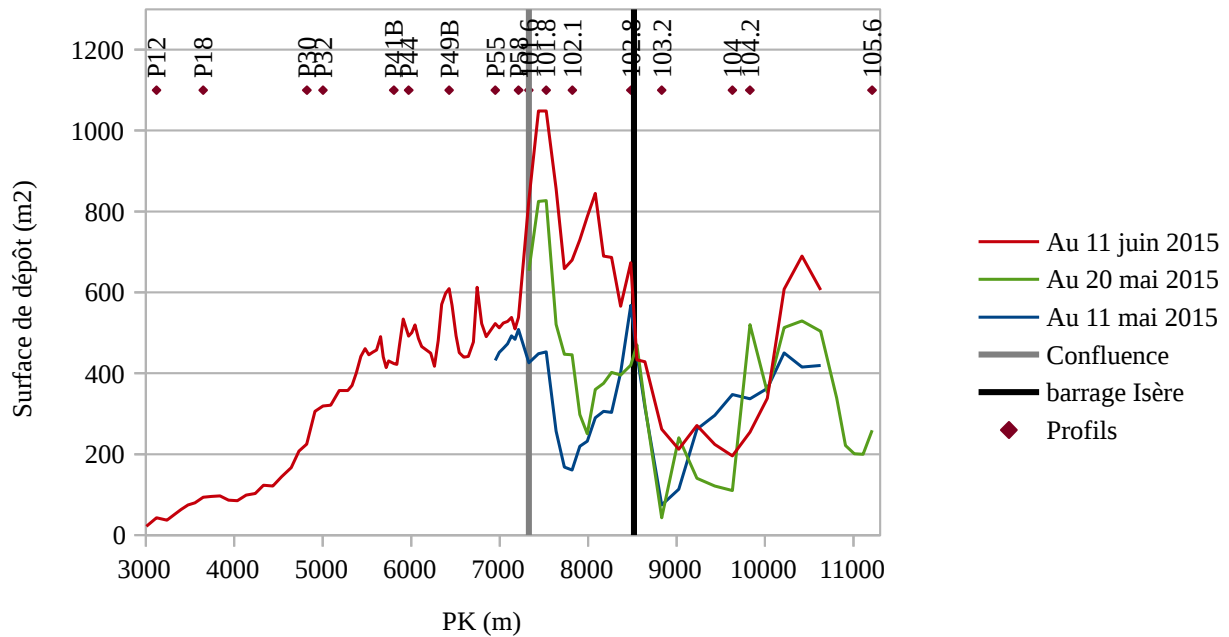


Figure 62: Aire des sections de dépôt par rapport à la bathymétrie avant chasse levée par INGEO entre janvier (Isère) et mars (Rhône) 2015

#### 6.4.2. Paramètre de Shields

La contrainte hydrodynamique de cisaillement moyenne  $\tau$  s'exerçant sur le fond de la rivière est fournie par la relation suivante (cf. Eq. 2 avec  $K_s = \sqrt{g/(h^{1/3} C_D)}$ ) :

$$\tau = \frac{\rho g V^2}{K_s^2 h^{1/3}} \quad \text{Eq. 20}$$

Afin de déterminer si la contrainte hydrodynamique est suffisante pour permettre une mise en mouvement des particules, il a été utilisé le paramètre de Shields  $\tau_*$  qui représente le rapport des forces tractrices sur le poids.

$$\tau^* = \theta = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)d_{50}} \quad \text{Eq. 21}$$

D'après la classification proposée par Ramette (1981), il est possible d'avoir une idée du type de transport selon la valeur du paramètre de Shields (Tab. 10)

Tableau 10 : Type de transport observé selon le paramètre de Shields (Ramette, 1981).

$\tau^* < 0,027$	Pas de transport
$0,027 < \tau^* < 0,047$	Apparition des premiers mouvements, transport non généralisé
$0,047 < \tau^* < 0,062$	Transport par charriage sur fond plat
$0,062 < \tau^* < 0,25$	Transport par charriage avec formation de dunes
$0,25 < \tau^* < 2,5$	Transport en suspension avec formation de dunes
$\tau^* > 2,5$	Transport en suspension sur fond plat

---

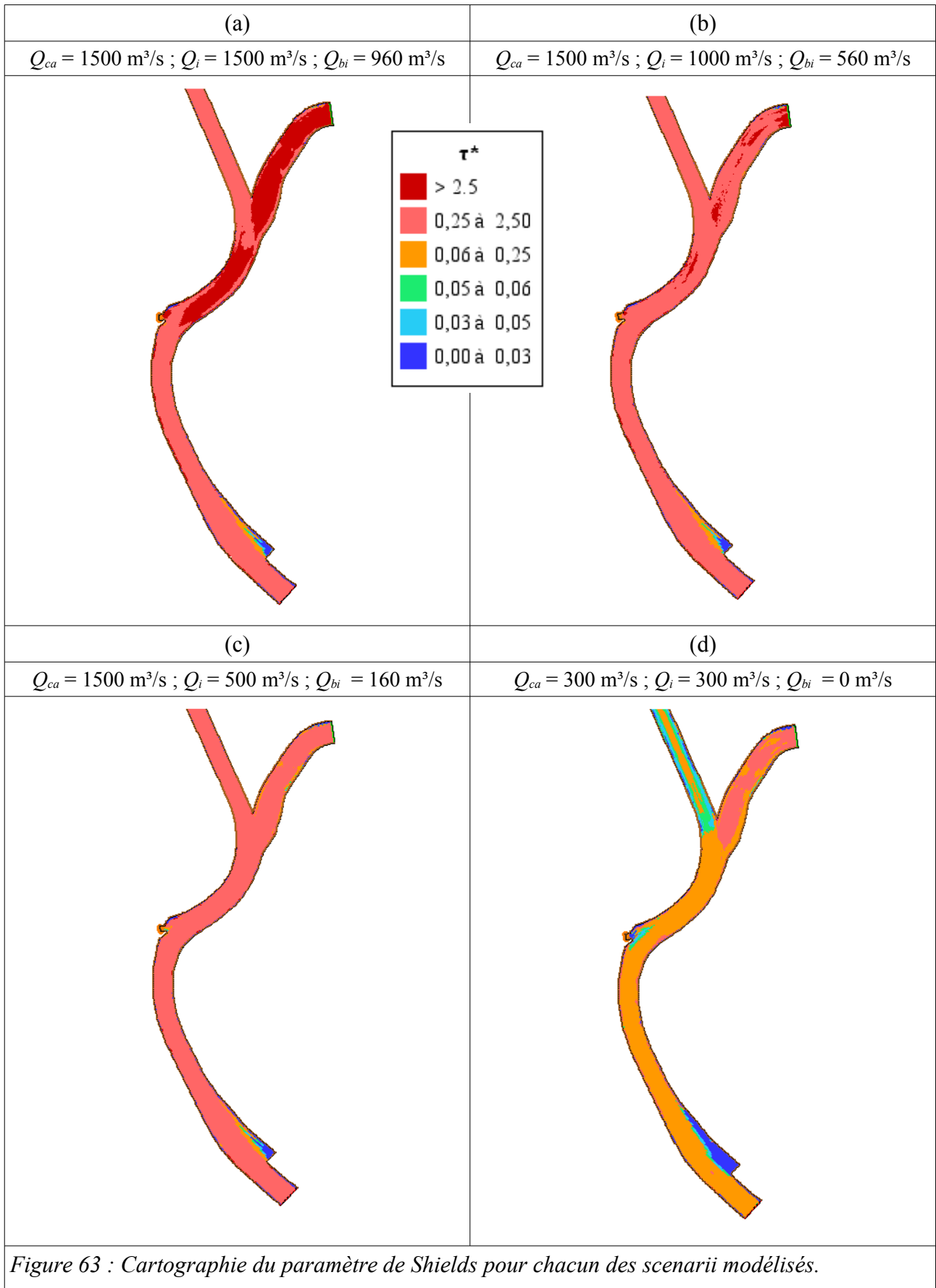
La Fig. 63 indique les valeurs du paramètre de Shields en chaque maille pour un  $d_{50}$  de 0.2 mm ( $d_{50}$  des prélèvements réalisés par la CNR dans les dépôts de l'Isère et du canal commun et aussi retrouvé dans les échantillons charriés au niveau de la station de Beaumont-Monteux).

Cette figure confirme les précédentes conclusions. Ainsi, d'après le modèle et pour tous les scénarios testés, les conditions d'écoulement apparaissent suffisantes pour transporter le sable fin ( $d_{50} = 0,2\text{mm}$ ) :

- par suspension dans l'Isère et le Rhône pendant la crue et la chasse,
- par suspension dans l'Isère et par charriage dans le Rhône pour le dernier scenario.

Un transport solide par suspension est prédominant sur l'ensemble de la période de la crue/chasse de mai 2015. Lors de la crue, les contraintes étaient même suffisamment importantes pour lessiver les formes du lit au niveau de l'Isère juste en amont de la confluence et dans le canal d'amenée juste en aval de la confluence (Fig. 63a). De très faibles contraintes sont observées au niveau du garage à bateau impliquant de toute évidence une capacité très forte au dépôt sur cette zone.

Hors événement (Fig. 63d), dans le cas où du sable transitent encore dans l'Isère, il se peut que ceux-ci se déposent plus facilement en atteignant le chenal navigable du fait de la réduction des contraintes de cisaillement entre l'Isère et le canal d'amenée. Cependant, les contraintes restent suffisamment élevées pour qu'il y ait un transport solide par charriage mais très peu de suspension. Ceci implique que les sédiments sableux peuvent être encore transportés avec des flux relativement faibles par rapport à la crue/chasse. Ceci explique donc la lente reprise des dépôts après l'événement.





---

### **6.4.3. Discussion**

Lors de la chasse de 2015, il a été observé des dépôts entre Beaumont-Monteux et la confluence, soit en amont du secteur modélisé. Il pourrait être intéressant d'étendre le modèle 2D, au moins jusqu'à la station de jaugeage CNR.

En vue d'une modélisation du transport solide, cela permettrait une définition plus fine des conditions limite amont de transport solide. En effet, les mesures de transport par charriage et les mesures de MES sont réalisées à cet endroit. De plus, cela permettrait de mieux comprendre les phénomènes de dépôt, reprise et transport des sédiments pendant et après l'épisode de crue/chasse.

## 7. MODÉLISATION HYDRO-SÉDIMENTAIRE 1D

### 7.1. Le modèle hydro-sédimentaire de la confluence Isère-Rhône

#### 7.1.1. Zone couverte

Le modèle de la confluence Isère-Rhône couvre le linéaire du Rhône entre la station hydrométrique de Ternay (PK 15,2) et la bifurcation à l'amont de l'aménagement de Caderousse (PK 212,84). Une vue d'ensemble de la zone couverte par le modèle est représentée sur la Figure 64.

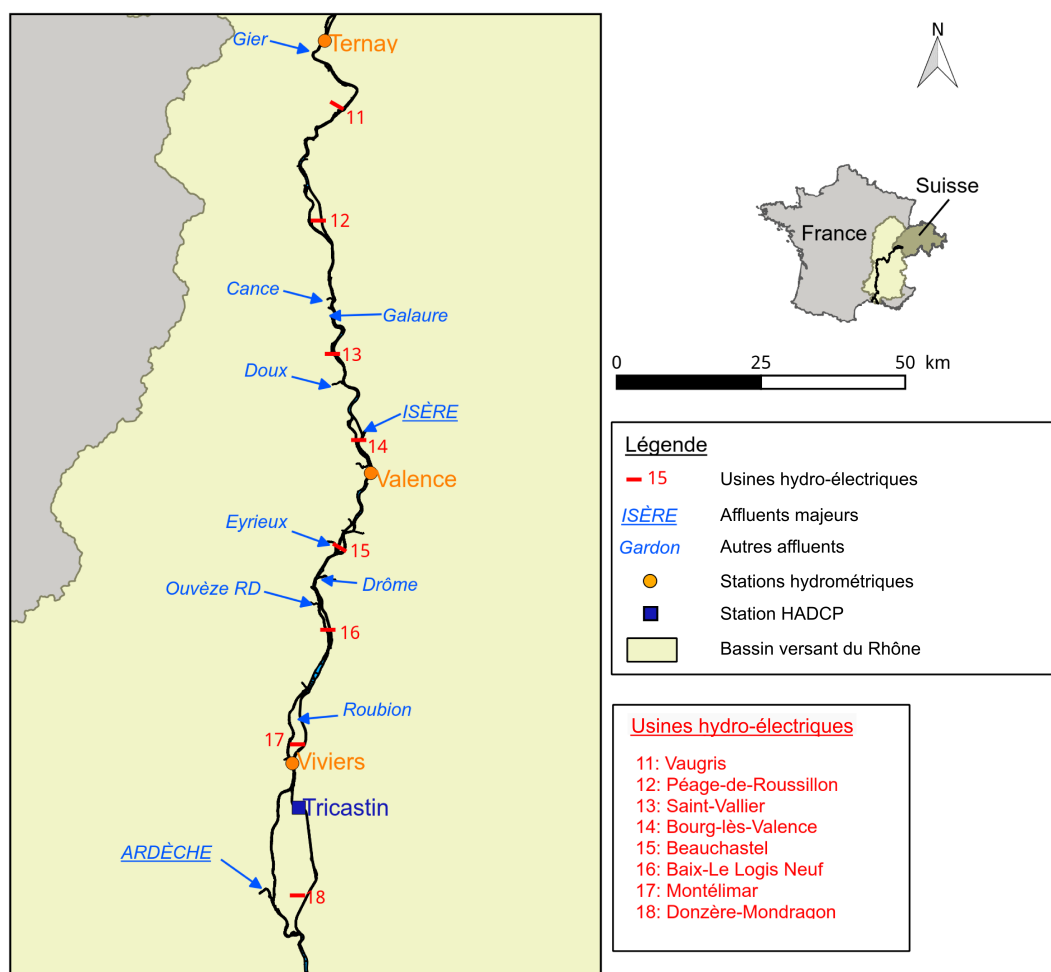


Figure 64 : Plan de situation du bief modélisé.

#### 7.1.2. Données bathymétriques utilisées

Un inventaire des transects utilisés dans le modèle a été effectué. Celui-ci indique pour chaque transect, le producteur, l'année du levé bathymétrique ainsi que les modifications effectuées pour l'intégration au modèle. Un résumé de cet inventaire est disponible en Annexe 11.1.

La géométrie de l'Isère est construite d'après une bathymétrie CNR (Compagnie Nationale du Rhône), mesurée en 2013. Le bief modélisé couvre un linéaire de 5,1 km et remonte jusqu'à la station hydrométrique et turbidimétrique de Beaumont-Monteux.

Des profils fictifs ont été ajoutés au modèle afin de mieux représenter les diffluences et confluences. Ainsi, pour chaque aménagement, un profil amont et un profil aval ont été définis à partir des données bathymétriques et Lidar de la BDT-Rhône. Des profils ont également été ajoutés aux emplacements des barrages et usines hydro-électriques. Ces profils sont basés sur les données Lidar, la lar-

geur de l'ouvrage mesurée à partir de la BDT-Rhône ainsi que l'altitude du seuil des vannes donnée dans l'Étude Globale du Rhône (CNR, 1999).

### 7.1.3. Données hydrauliques utilisées

Les données hydrauliques utilisées dans le modèle couvrent la période du 15/05/2008 jusqu'au 24/06/2008 et encadrent donc la crue de mai-juin 2008 sur l'Isère.

La station hydrométrique de Ternay (CNR) a été choisie comme condition amont au modèle. De même, la condition amont du bief de l'Isère est la station hydrométrique de Beaumont-Montoux.

Le modèle doit couvrir le linéaire jusqu'à la station turbidimétrique de Tricastin (PK 174,5). Le modèle a donc été prolongé au-delà de l'aménagement de Donzère-Mondragon, jusqu'à l'aménagement de Caderousse. La condition limite aval du modèle est donc le niveau de la retenue de Caderousse supposé constant et égal à 35,37 m NGF. Cette hypothèse un peu forte n'a pas d'influence sur les biefs étudiés dans cette étude. En effet, la station de Tricastin se situe en amont de l'usine de Mondragon et n'est donc pas influencée par les niveaux d'eau à l'aval de l'usine.

La plupart des affluents secondaires sont ajoutés sous la forme d'apport ponctuel (données CNR et DREAL). Ceux inclus dans le modèle sont documentés dans l'Annexe 11.6. Pour plusieurs d'entre eux, des nœuds ont été ajoutés au modèle afin de représenter plus précisément le point de confluence. Pour chaque affluent, la distance entre la station de mesure et la confluence a été mesurée sur Géoportail afin d'estimer un temps de propagation entre la mesure et l'apport dans le Rhône. La vitesse de propagation sur chaque affluent a été estimée en comparant les hydrogrammes de deux stations hydrométriques disponibles sur le même affluent.

## 7.2. Codes de calcul utilisés

La modélisation se fait en utilisant un logiciel de simulation hydraulique mono-dimensionnelle d'écoulement en rivière (Code de calcul Mage, Faure 2009) couplé à un modèle d'advection-dispersion pour simuler le transport de sédiments (Code de calcul Adis-TS, Faure 2012). Ces modèles présentent l'avantage d'une résolution rapide ce qui permet de simuler des événements de longues durées (plusieurs années et dizaines d'années) sur un long bief (plusieurs centaines de kilomètres).

### 7.2.1. Modèle hydraulique 1D : Mage

MAGE est un logiciel de simulation mono-dimensionnelle d'écoulement en rivière en régime transitoire. Son domaine d'application privilégié est la simulation des crues et des zones inondées. Les équations utilisées sont les équations de Barré de Saint-Venant unidimensionnelles avec la formule de perte de charge de Manning-Strickler qui s'expriment comme suit :

$$\text{conservation de la masse} \quad \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \quad \text{Eq. 22}$$

$$\text{équation dynamique} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta \frac{Q^2}{S} \right) + gS \frac{\partial z}{\partial x} = -gS(J + J_s) + kq_{lat}V \quad \text{Eq. 23}$$

avec :  $t$  le temps,  $x$  l'abscisse en long,  $S$  la section mouillée,  $Q$  le débit,  $Z$  la cote de la surface libre,  $V$  la vitesse moyenne ( $V = Q/S$ ),  $\beta$  le coefficient de quantité de mouvement (Boussinesq),  $g$  la gravité,  $J$  les pertes de charge linéaires par frottement,  $J_s$  pertes de charge singulières (élargissement ou rétrécissement brusques),  $q$  les pertes ou apports latéraux par unité de longueur (en  $m^2/s$  : ruissellement, pluie, déversements, échanges avec le lit majeur) et  $k$  un coefficient dépendant du signe de  $q_{lat}$  ( $k = 1$  si  $q_{lat} < 0$ ,  $k = 0$  si  $q_{lat} \geq 0$ ).

MAGE prend en compte la géométrie réelle du lit de la rivière définie par des profils en travers et utilise une modélisation géométrique de la rivière en lit composé – mineur, moyen (majeur actif) et majeur de stockage – avec calcul de la répartition des débits en utilisant les équations Debord (Nicollet & Uan, 1979) avec différentes valeurs du coefficient de Strickler possibles  $K_{m/M}$  pour le chenal (lit mineur) et le lit moyen, respectivement. Il est également possible de définir des casiers de stockage pour modéliser des plaines d'inondations où la vitesse de l'écoulement est supposée négligeable, ce qui permet la modélisation des échanges entre zones d'écoulement et zones de sto-

ckage. La topologie du réseau peut être maillée ce qui permet de représenter des confluences, des diffuences (îles) et des conditions aval multiples (deltas). La discrétisation des équations de Barré de Saint-Venant est faite selon un schéma aux différences finies semi-implicite à quatre points (schéma de Preissmann).

### 7.2.2. Modèle 1D d'advection-diffusion : Adis-TS

ADIS-TS résout l'équation classique d'advection-dispersion :

$$\frac{\partial(SC)}{\partial t} + \frac{\partial(CQ)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( S D_f \frac{\partial C}{\partial x} \right) + (P - D)W + q_{lat} C_{lat} \quad Eq. 24$$

avec  $D_f$  le coefficient de dispersion longitudinal,  $P$  le taux de reprise,  $D$  le taux de déposition,  $W$  la largeur de la rivière en eau, et  $C_{lat}$  la concentration de sédiments fins si  $q_{lat} > 0$ . L'équation de conservation de la masse permet de calculer la masse  $M_{fs} = \rho_s (1 - p) S_{fs} L$  de sédiments fins disponible dans la section et sa distribution à travers la section ( $\rho_s \approx 2650$  g/l est la masse volumique des sédiments,  $S_{fs}$  est la section en travers du dépôt de sédiment,  $p$  la porosité du dépôt et  $L$  la longueur de la section). Ce dépôt est hypothétique étant donné que le modèle ne prend pas en compte l'évolution du fond du lit.

La description ci-dessus est faite pour une classe de dépôt avec des caractéristiques fixes (la taille de grain, la vitesse, ...). Le modèle peut prendre en compte un mélange de plusieurs classes.

En première approximation, on suppose le dépôt uniforme sur le lit majeur et le lit mineur. Les taux de dépôt et d'érosion de l'Eq. 24 peuvent être estimés sur chacun des lits et chacune des classes de sédiments :

$$(P - D) = a_{PD} e_{disp} (C_{eq} - C) W_s \quad Eq. 25$$

où  $a_{PD}$  est un coefficient de calage ( $a_{PD} = 1$  en théorie),  $e_{disp}$  un coefficient indiquant la disponibilité de dépôt dans le canal ( $e_{disp} = 0$  s'il y a érosion et si  $M_{fs}$  ;  $e_{disp} = 1$  sinon),  $C_{eq}$  la concentration d'équilibre,  $W_s$  la vitesse de chute du sédiment. On considère ici la concentration  $C$  homogène dans toute la section. Finalement, il y a érosion si la concentration d'équilibre  $C_{eq}$  est supérieur à la moyenne de la concentration  $C$  calculée grâce au modèle ; il y a dépôt si  $C_{eq} < C$ .

La concentration d'équilibre dans chacun des lits et pour chacune des classes de sédiments peut être estimée en fonction de la contrainte de cisaillement  $\tau$  calculée par le modèle sur chacun des lits, comme suit :

$$C_{eq} = C_0 \left( \frac{\tau}{\tau_{cr}} - 1 \right) \quad Eq. 26$$

où  $C_0$  sont des paramètres de calage. Des valeurs de  $a_{PD} = 1$  et  $C_0$  ont été proposées par Lucie Guertault (2015).

## 7.3. Calage hydraulique

### 7.3.1. Calage des lignes d'eau

Le calage hydraulique a été effectué sur l'ensemble du Rhône entre Ternay et Caderousse. Le calage a été effectué bief par bief en suivant le découpage de la CNR. Chaque bief comprend un Vieux Rhône, le tronçon entre deux aménagements ainsi que le Rhône aménagé de l'aménagement aval.

Les calages se font avec des lignes d'eau fournies par la CNR qui sont fonction d'un débit amont, du débit de passage à travers les différents ouvrages de l'aménagement et d'une cote en amont de l'usine hydroélectrique.

Les tronçons de calage sont les suivants :

- Du barrage de Pierre-Bénite jusqu'au barrage-usine de Vaugris (Vaugris)
- Du barrage-usine de Vaugris à l'usine de Saint-Rambert d'Albon (Péage-de-Roussillon)

- Du barrage de Saint-Pierre-de-Boeuf jusqu'à l'usine de Gervans (Saint-Vallier)
- Du barrage d'Arras-sur-Rhône à l'usine de Bourg-lès-Valence (Bourg-lès-Valence)
- Du barrage de la Roche-de-Glun à l'usine de Beauchastel (Beauchastel)
- Du barrage de Charmes-sur-Rhône à l'usine du Logis Neuf (Baix-Le Logis Neuf)
- Du barrage du Pouzin à l'usine de Chateauneuf-du-Rhône (Montélimar)
- Du barrage de Rochemaure à l'usine de Bollène (Donzère-Mondragon)
- Du barrage de Donzère à l'usine de Caderousse (Caderousse)

La résistance à l'écoulement, modélisée par le coefficient de Strickler, est ainsi déterminée sur chacun des biefs considérés. Le tableau dans l'Annexe 11.4 résume les différentes lignes d'eau disponibles sur chacun des biefs. Une seule ligne d'eau est utilisée pour le calage, les autres lignes d'eau sont utilisées pour la validation. Seuls les coefficients de Strickler du lit mineur ont été calés. Ceux du lit majeur sont supposés constants ( $K = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ).

La Figure 65 montre, à titre indicatif, le résultat du calage hydraulique sur le bief de Bourg-lès-Valence qui a la particularité d'intégrer la confluence de l'Isère. Les coefficients de Strickler issus de ce calage ont été validés avec les autres lignes d'eau disponibles sur une gamme de débit allant de l'étiage à la crue (Figure 66). Le calage et la validation des lignes d'eau ont permis d'obtenir un modèle suffisamment robuste pour faire passer des hydrogrammes aux débits variés sans modifier le coefficient de frottement. Toutefois, la validité du modèle se limite au cas sans débordements.

Les valeurs des coefficients de Strickler sur l'ensemble des biefs mentionnés ci-dessus sont disponibles en Annexe 11.5.

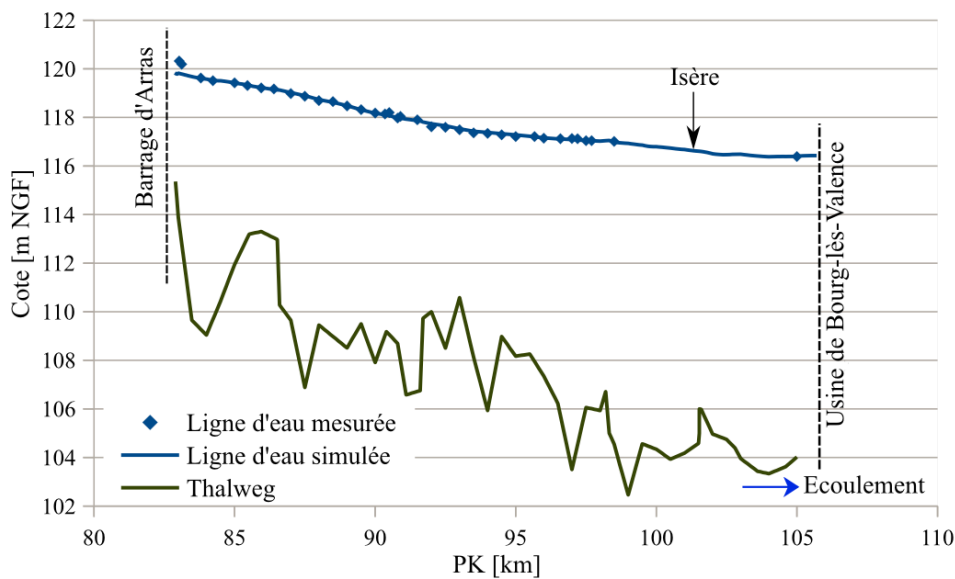


Figure 65 : Calage des coefficients de Strickler avec la ligne d'eau du 05/11/2002 sur le bief de Bourg-lès-Valence pour  $Q_{\text{Rhône}} = 2420 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $Q_{\text{Isère}} = 457 \text{ m}^3/\text{s}$ .



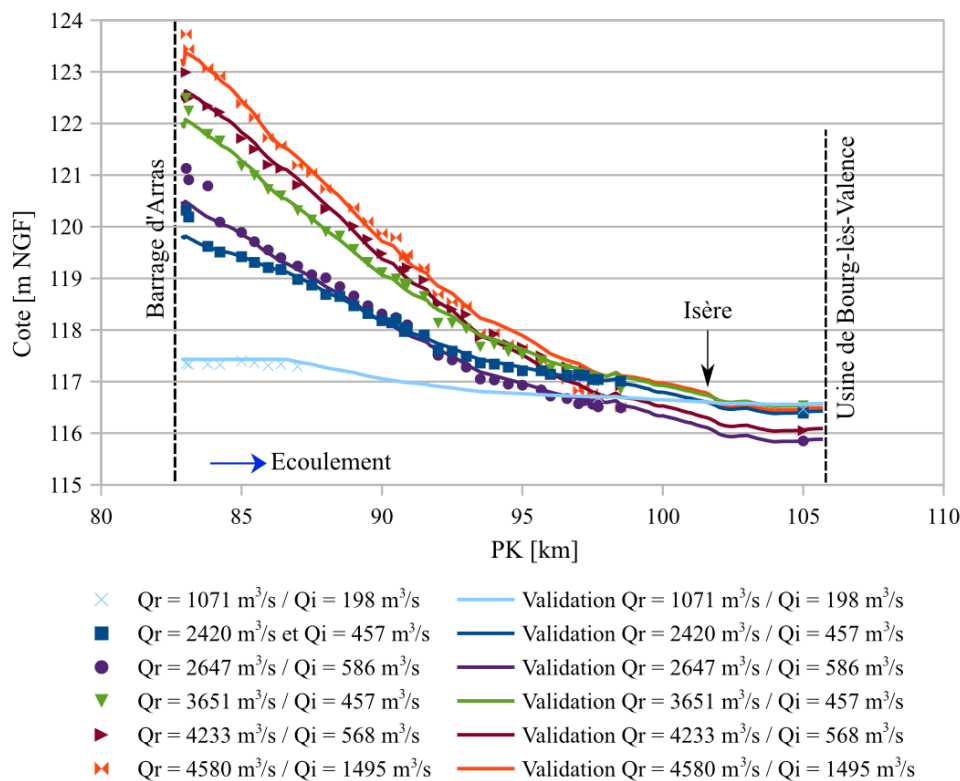


Figure 66 : Validation des coefficients de Strickler sur le bief de Bourg-lès-Valence.

### 7.3.2. Intégration des aménagements hydroélectriques

Huit aménagements hydroélectriques sont présents sur la zone étudiée entre Ternay et Caderousse, dont un barrage-usine et sept aménagements incluant un canal de dérivation. Pour chaque aménagement, les caractéristiques physiques des ouvrages ainsi que les consignes d'exploitation sont données au modèle.

L'aménagement de Bourg-lès-Valence, principalement concerné dans ce projet, est présenté dans la Figure 67. Le barrage de la Roche-de-Glun, situé sur le Vieux Rhône, règle les débits passant vers le canal usinier, sur lequel se trouve l'usine hydroélectrique de Bourg-lès-Valence. La particularité de cet aménagement réside dans la confluence entre l'Isère et le canal usinier. En cas de crue sur l'Isère, le barrage de l'Isère permet de dériver une partie du débit de l'Isère dans le Vieux Rhône.

Les consignes d'exploitation incorporées au modèle permettent de respecter la répartition des débits entre usine et barrage ainsi que de régler le niveau de la retenue au point de réglage en fonction du débit entrant. De plus, elles permettent de régler l'ouverture et la fermeture du barrage de l'Isère en fonction du débit de l'Isère.



Figure 67 : Aménagement de Bourg-lès-Valence

L'intégration des ouvrages dans le modèle 1D se fait au moyen des paramètres physiques de l'ouvrage, tels que la largeur de l'ouvrage, la cote du seuil des vannes ou des turbines, leurs hauteurs ainsi que leurs coefficients de déversement. Ces paramètres, une fois incorporés au modèle, n'ont plus à être modifiés. Un recensement de ces caractéristiques a été fait dans l'Étude Globale du Rhône (CNR, 1999).

Trois consignes d'exploitation sont données à l'aménagement de Bourg-lès-Valence :

- La loi  $Q_{max}$  permet de donner les débits prescrits passant par les deux bras de l'aménagement. Le point de réglage de cette loi se situe à la première section du bief du Rhône aménagé. Le débit maximal correspond au débit maximum admis dans le canal usinier ( $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et le débit minimal correspond au débit réservé dans le Vieux Rhône ( $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ). A partir du 1<sup>er</sup> janvier 2014, le débit réservé dans le Vieux Rhône est passé à  $72 \text{ m}^3/\text{s}$  (valeur non prise dans cette étude).
- La loi  $Z-Q$  (cote fonction du débit) permet de régler une cote au point de consigne, selon la consigne théorique fournie par la CNR. Pour l'aménagement de Bourg-lès-Valence, la loi théorique prescrit deux niveaux à respecter au niveau du Point de réglage (Pont SNCF sur l'Isère) selon que le débit de l'Isère à Beaumont-Monteux soit supérieur ou inférieur à  $700 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- La loi  $Q-Q$  (débit fonction du débit) permet de reproduire la loi de fonctionnement du barrage de l'Isère. En effet, l'ouverture du barrage de l'Isère est proportionnelle au débit de l'Isère. Cette loi, disponible dans l'Étude Globale du Rhône (CNR, 1999), suit la relation suivante :

$$Q_{\text{Barrage Isère}} = 0,80(Q_{\text{Isère}} - 300) \quad \text{Eq. 27}$$

D'après les observations et mesures sur le terrain, la consigne d'ouverture du barrage de l'Isère n'a pas été suivie au cours de l'événement de mai-juin 2008. En réalité, le barrage de l'Isère ne s'est pas ouvert afin de respecter les habitats du Vieux Rhône. Les simulations ont donc été faites avec le barrage de l'Isère fermé. De plus, comme la consigne réelle n'était pas disponible, la consigne automatique a été appliquée dans les simulations de ce rapport.

Ces trois lois s'affranchissent de la contrainte temporelle et permet d'avoir un modèle suffisamment robuste pour simuler tous types d'hydrogrammes. Cependant, elles ont l'inconvénient de ne pas reproduire les manœuvres journalières (éclusées) ou les consignes particulières lors de chasses hydrauliques. Si les manœuvres des différents ouvrages en fonction du temps sont connues, il est préférable de les donner directement au modèle.

Les consignes d'exploitation des aménagements hydroélectriques modélisés sont disponibles dans les Annexes 11.2 et 11.3.

## 7.4. Simulation hydraulique de la crue de mai-juin 2008

### 7.4.1. Hydrogrammes d'entrées

Les hydrogrammes utilisés dans le modèle hydraulique pour la simulation de la crue de mai-juin 2008 sont représentés dans la Figure 68. Les débits mesurés à Ternay sur le Rhône (PK 15,2) et à Beaumont-Monteux sur l'Isère sont utilisés comme condition amont au modèle tandis que le débit mesuré à Valence (PK 109,7 non représenté) et à Viviers (PK 166,5) sur le Rhône sont utilisés pour la validation des résultats hydrauliques. A titre indicatif, les débits mesurés à Beaucaire (PK 269,6) sur le Rhône et à Bonpas sur la Durance (crue concomitante) sont aussi représentés.

Deux périodes distinctes peuvent être observées. La première semaine couvre la crue de l'Isère. La deuxième semaine, à partir du 02/06/2008 à 12h00, couvre les chasses hydrauliques des barrages de la Basse-Isère.

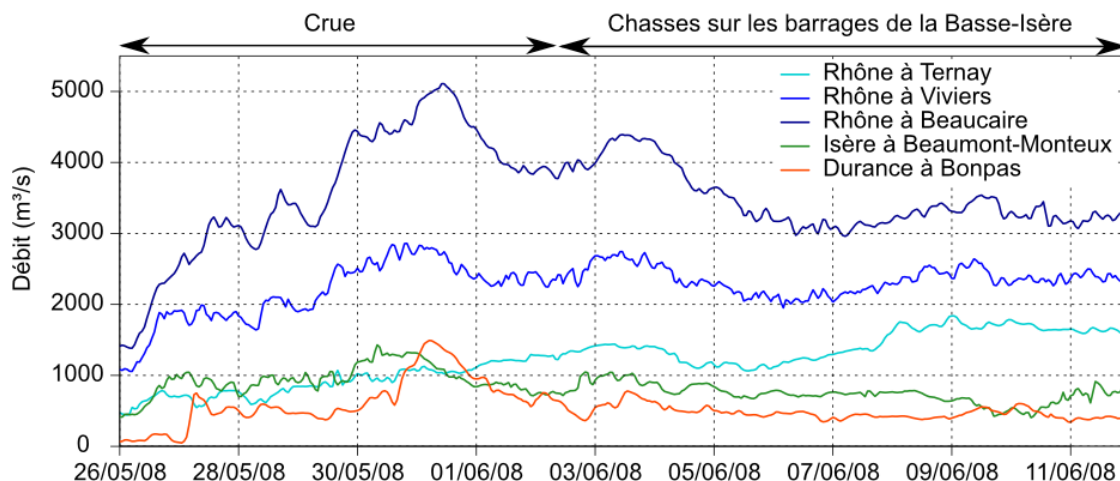


Figure 68 : Hydrogrammes du Rhône, de l'Isère et de la Durance au cours de la crue de mai-juin 2008.

### 7.4.2. Hydrogrammes simulés

L'événement de mai-juin 2008 est simulé sur le linéaire du Rhône entre Ternay (PK 15,2) et Viviers (PK 166,5) 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 69. Les mesures effectuées aux stations hydrométriques de Valence (Figure 69a) et Viviers (Figure 69b) 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 Strickler), et sans trop de petites variations (calage acceptable des aménagements). Dans une extension de l'étude, il serait intéressant d'appliquer les consignes réelles des différents aménagements pour voir si les résultats de la simulation hydraulique sont améliorés.

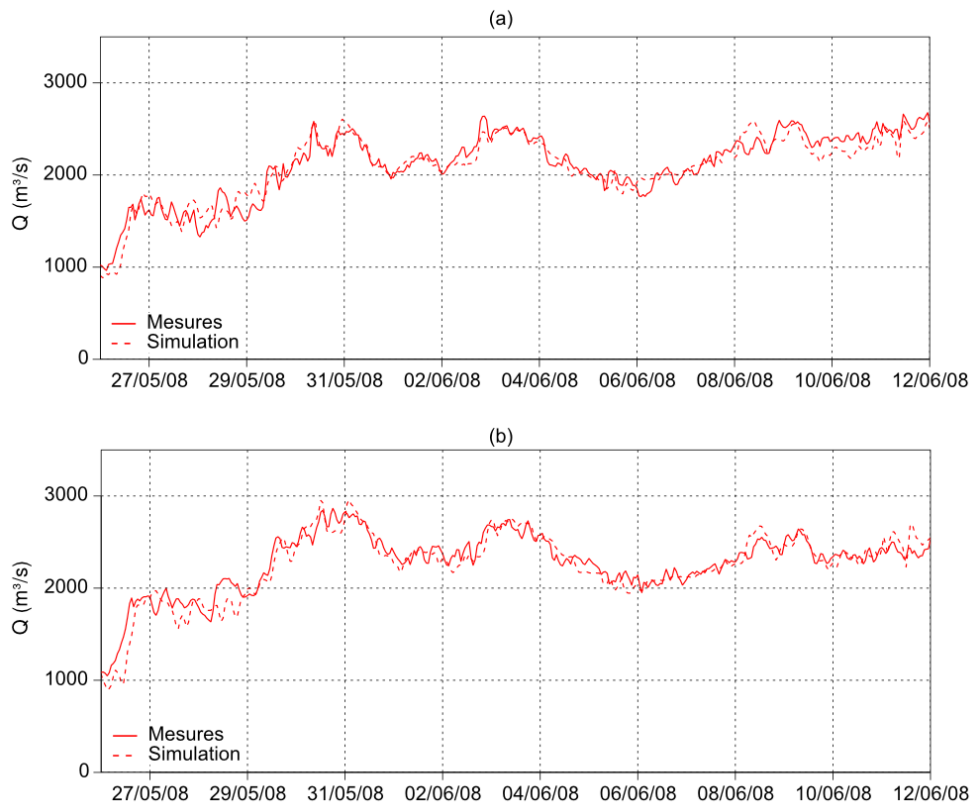


Figure 69 : Comparaison des hydrogrammes pour la crue de 2008 aux stations hydrométriques de Valence (PK 109,7) et Viviers (PK 166,5).

### 7.4.3. Respect des consignes d'exploitation

La Figure 70 présente les résultats du modèle hydraulique sur l'aménagement de Bourg-lès-Valence. La Figure 70a représente la répartition des débits dans les différents biefs de l'aménagement. Le débit réservé de 20 m<sup>3</sup>/s est correctement respecté dans le Vieux Rhône en aval du barrage de la Roche-de-Glun. Le débit maximum de 2200 m<sup>3</sup>/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 70b).

Le niveau d'eau dans la retenue est correctement reproduit au point de consigne (pont SNCF sur l'Isère, cf Figure 67). Lorsque le débit de l'Isère est inférieur à 700 m<sup>3</sup>/s, un niveau de 116,79 m NGF est appliqué. Lorsque le débit de l'Isère est supérieur à 700 m<sup>3</sup>/s, un niveau de 116,94 m NGF est appliqué. Ces deux niveaux sont correctement respectés par le modèle tout au long de la période modélisée.

Les résultats du modèle sur les autres aménagements présents sur le tronçon modélisé (Vaugris à Donzère-Mondragon) sont disponibles en Annexe 11.7.

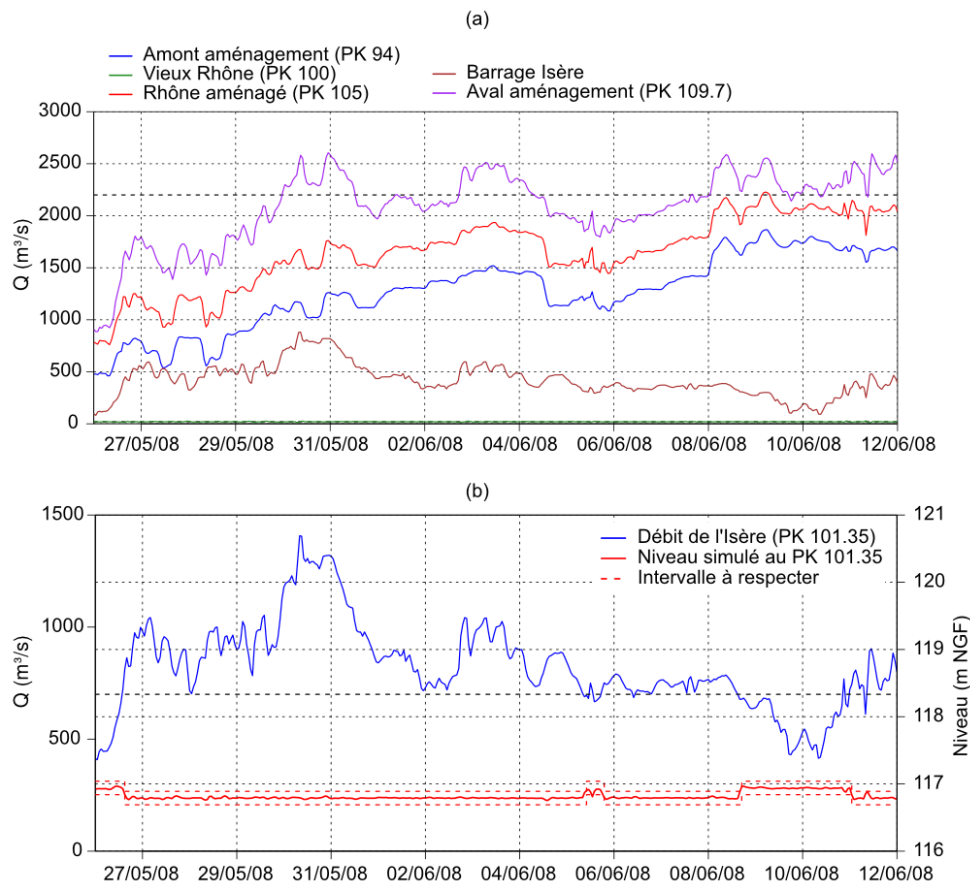


Figure 70 : Respect des consignes d'exploitation de l'aménagement de Bourg-lès-Valence. (a) Répartition des débits ; (b) Niveau d'eau dans la retenue.

#### 7.4.4. 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 Valence et à Viviers en fonction des apports des différents affluents.

En effet, en injectant un soluté sur chaque affluent (un soluté correspondant à un affluent) à la même concentration, il est possible en regardant dans une station aval de voir quelle est la composition de l'eau à un temps donné.

Les résultats de la décomposition des hydrogrammes à Valence, Viviers et Tricastin sont présentés dans la Figure 71. A Valence (Figure 71a), trois classes peuvent être distinguées : le Rhône provenant de Ternay (bleu), l'Isère (vert) et les affluents mineurs situés entre Ternay et Valence (orange). L'apport de ces affluents « amont » a été très faible au cours de l'événement.

A Viviers (Figure 71b), l'apport des affluents à l'aval de Valence (Eyrieux, Drôme, Ouvèze RD et Roubion) est rajouté. L'apport de ces affluents « aval » est plus significatif et est à prendre en compte pour l'analyse des résultats à Tricastin (Figure 71c). Dans cette dernière figure, le débit total est limité à 1980 m<sup>3</sup>/s, débit maximal du canal usinier de l'aménagement de Donzère-Mondragon où la station turbidimétrique est située.

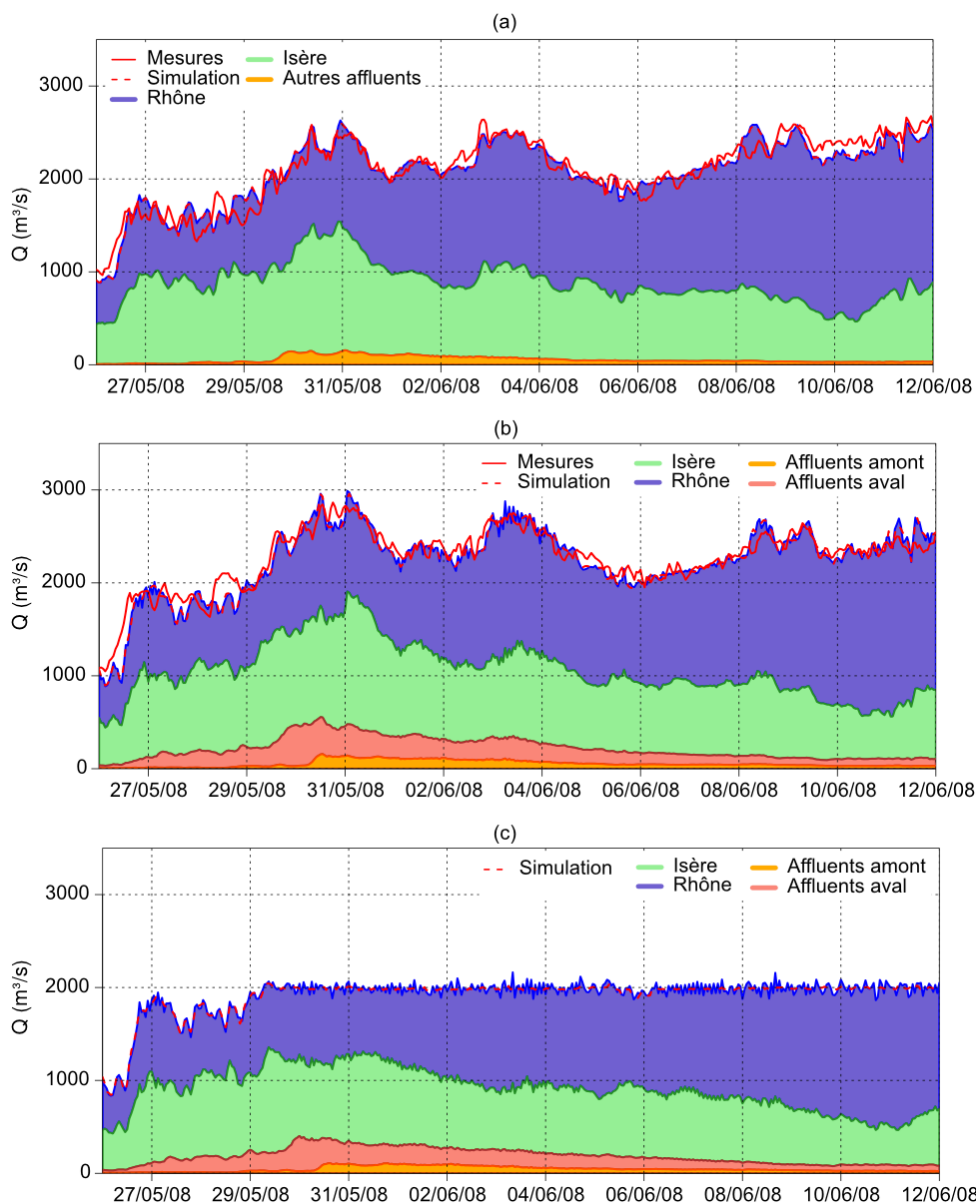


Figure 71 : Décomposition des hydrogrammes pour la crue de 2008 aux stations hydrométriques de (a) **Valence** (PK 109,7) et (b) **Viviers** (PK 166,5) et (c) à la station HADCP de **Tricastin** (PK 174,5).

## 7.5. Simulation hydro-sédimentaire de la crue de mai-juin 2008

### 7.5.1. Condition limite amont à Beaumont-Montoux

Plusieurs mesures de concentration en matières en suspension (MES) ont été faites au cours de la crue de 2008 sur le tronçon de la Basse-Isère. Les concentrations utilisées dans les simulations suivantes reprennent les mesures faites à :

- Tullins (turbidimètre, EDF ; Rapport Sogreah, 2011)
- Romans (HADCP, Irstea ; Moore, 2011)
- Beaumont-Montoux (Prélèvements, EDF ; Rapport Sogreah, 2011)

L'emplacement des stations ainsi que des aménagements hydroélectriques de la Basse-Isère est indiqué dans la Figure 72.



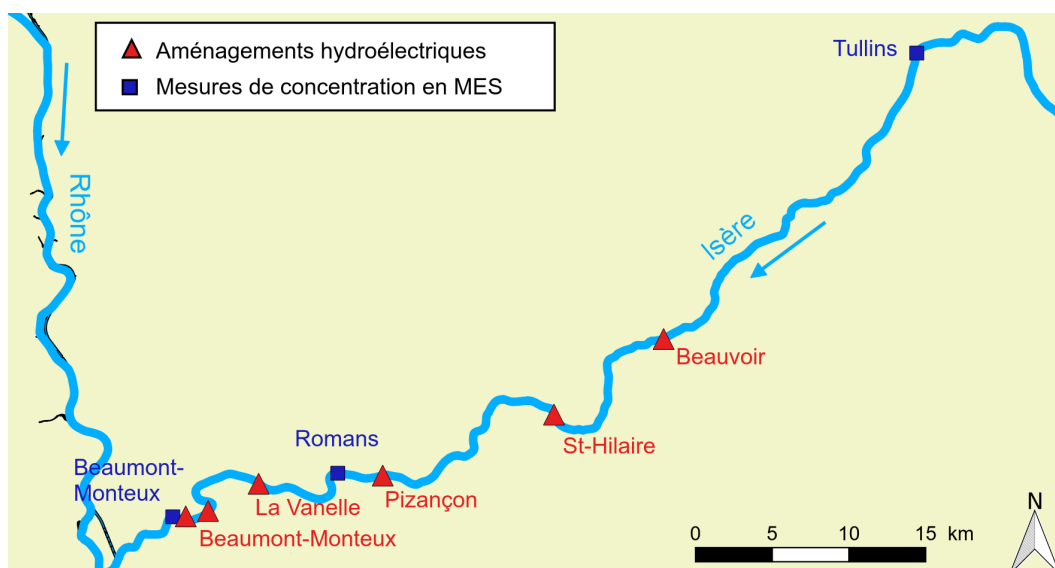


Figure 72 : Plan de situation de la Basse-Isère

La chronique de concentration en MES n'étant pas disponible à Beaumont-Montoux sur l'intégralité de l'événement, une nouvelle chronique a été reconstruite à l'aide des mesures faites à Tullins et à Romans (Figure 73). Entre le 26/05/08 et le 30/05/08, cette nouvelle chronique suit les mesures faites à Romans (en vert), station la plus proche de Beaumont-Montoux, moyennant un décalage de 1h. Puis, entre le 30/05/08 et 02/06/08 à 20h, la chronique reprend les données mesurées à Tullins (en orange), moyennant un décalage de 10h. Enfin, pendant la deuxième semaine, les données MES mesurées à Beaumont-Montoux sont directement utilisées jusqu'à la fin de la période modélisée.

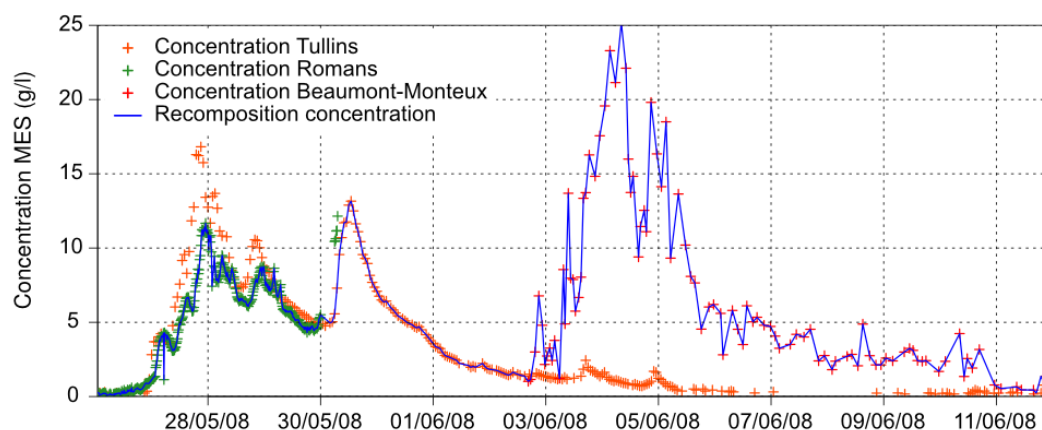


Figure 73 : Recomposition de la chronique de concentration en MES à Beaumont-Montoux

Plusieurs types d'erreur peuvent résulter de cette reconstitution :

- Le décalage temporel entre les stations a été calculé d'après les pics de concentration. Cependant, ce temps de décalage peut varier selon le type de sédiment considéré. D'autre part, les pics de concentration peuvent être influencés par la reprise ou le dépôt sur le bief non modélisé.
- Cinq aménagements hydroélectriques sont présents entre les stations de mesure de Tullins et de Beaumont-Montoux (Figure 72). Les reprises et dépôts qui peuvent avoir lieu dans ces aménagements au cours de la crue et de la chasse ne sont donc pas pris en compte.

Sur la Figure 73, trois pics de concentrations de MES peuvent être observés. La première augmentation, entre le 27/05/2008 et le 30/05/2008, résulte de la chasse du barrage de Saint-Egrève. Le sédi-

ment chassé, probablement riche en sable, a pu se redéposer dans les retenues situées entre Tullins et Romans, expliquant ainsi la diminution de la concentration. Le deuxième pic, vers le 31/05/2008, est directement lié à la crue et correspond au pic de MES mesuré sur l'Arc. Enfin, à partir du 02/06/2008, les chasses des barrages de la Basse-Isère sont responsables de l'augmentation de la concentration en MES.

Dans les sections suivantes, les résultats des simulations sont comparés aux mesures HADCP faites à la station de Tricastin (EDF), située sur le canal usinier de l'aménagement de Donzère-Mondragon (PK 174,5). Ces mesures ont été analysées dans le cadre de la thèse de Stéphanie Moore (2011).

Au cours de la deuxième semaine, pendant les chasses des barrages de la Basse-Isère, des prélèvements ont également été faits à Pont-de-Valence (PK 109,7) mais ces mesures n'ont pas été jugées exploitables. En effet, le point de prélèvement se situe près de la confluence du Vieux Rhône et du canal de fuite de Bourg-lès-Valence et il est probable que les concentrations en MES ne soient pas homogènes dans la section.

### 7.5.2. Transport d'un soluté

La première simulation hydrosédimentaire a été faite en utilisant la chronique de concentration présentée dans la Figure 73. Cette chronique est injectée dans le modèle à la station de Beaumont-Montoux tout en considérant qu'aucun dépôt ni érosion ne se produit 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 74 et comparés aux mesures turbidimétriques de la station de Tricastin.

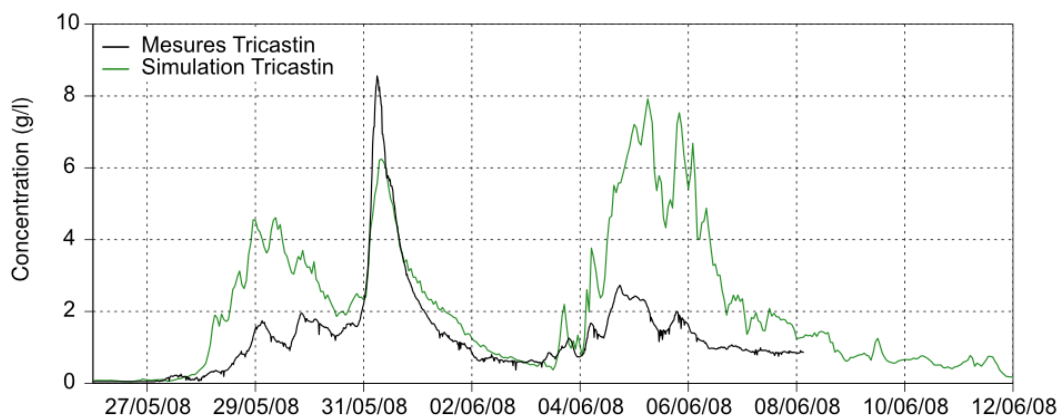


Figure 74 : Transfert d'un soluté entre Beaumont-Montoux et Tricastin

La courbe verte, concentration en MES simulée, suit les tendances de la courbe noire, mesures d'atténuation acoustique (HADCP). Les hypothèses de décalage temporel faites sur les stations de Tullins et de Romans semblent donc convenir.

De manière générale, le sédiment transporté au cours de la crue s'est déposé au cours de son passage dans les retenues du Rhône, principalement au cours de la période entre le 28/05/08 et 31/05/08 (début de la crue et chasse du barrage de Saint-Egrève) et pendant la chasse entre le 03/06/08 et le 08/06/08. Seul le pic de concentration observé entre le 31/05/08 et le 01/06/08 semble sous-estimé. Ce pic de concentration a été mesuré à Tullins et ne prend pas en compte la reprise de sédiment au cours du passage de la crue dans les 5 aménagements de la Basse-Isère. Il est donc possible que la condition limite amont soit sous-estimée. Cependant, il est difficile de confirmer ce résultat car les incertitudes liées à la mesure d'atténuation acoustique avec l'HADCP sont supérieures à 20 %.

De plus, ces résultats sont en accord avec les observations faites sur le terrain. Durant la première semaine (hors chasse de Saint-Egrève), des sédiments beaucoup plus fins, en provenance de l'Arc, ont été transportés. Dans la deuxième semaine, pendant la chasse, des sédiments beaucoup plus grossiers ont transité et se sont déposés avant la station de Tricastin.

Différents types de granulométries sont donc passées au cours de la crue et de la chasse.

### 7.5.3. Transport de sédiment à granulométrie simple

Plusieurs simulations ont été faites en utilisant six différents types de sédiment, allant de l'argile jusqu'au sable grossier. Ces types de sédiments sont répertoriés dans le Tab. 11. Les 3 premières classes de sédiments ont été déterminées sur des échantillons du Rhône dans le cadre de la thèse de Marina Launay (Launay, 2014). La classe des sables a été divisée en trois nouvelles classes dans le cadre de la thèse de Lucie Guertault (Guertault, 2015).

*Tableau 11 : Classes de sédiments considérées et paramètres du modèle hydrosédimentaire Adis-TS.  $d_m$  est le diamètre caractéristique, défini plus bas et  $a_{pd}$  et  $a_c$  sont des paramètres de calibration d'Adis-TS (Camenen et al., 2013, Guertault, 2015).*

Type	Argile	Limon fin	Limon grossier	Sable très fin	Sable fin	Sable moyen
Classe ( $\mu\text{m}$ )	(1 - 10)	(10 - 27)	(27 - 80)	(80 - 160)	(160 - 300)	(300 - 500)
$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	4	15	45	90	200	400
$d_m$ ( $\mu\text{m}$ )	7	20	50	100	220	460
$a_{pd}$	1	1	1	1	1	1
$a_c$	1	1	0,5	0,2	0,2	0,2

Le calage des paramètres sédimentaires du modèle ont été effectués par Lucie Guertault sur l'aménagement de Génissiat pour chacune des classes de sédiment modélisées (Guertault, 2015). A partir d'échantillons de sédiments en suspension collectés pendant la chasse de 2012, six modes granulométriques ont été mis en évidence dont les  $d_{50}$  sont répertoriés dans le Tab. 11. Du fait de la non linéarité de la vitesse de chute  $W_s$  par rapport  $d$ , calculer  $W_s$  à partir de  $d_{50}$  est différent de la moyenne des  $W_s$  de toutes les particules de la population. Utiliser directement le  $d_{50}$  dans le modèle sous-estime la vitesse de chute pour les sédiments les plus fins. Par conséquent, le diamètre caractéristique  $d_m$ , correspondant à la vitesse de chute moyenne de la population de sédiment, est utilisé dans le modèle.

Le calage et la validation des paramètres sédimentaires a été effectué pour chacune de ces classes et ces paramètres ont donc été repris dans cette étude. En effet, aucune granulométrie n'a été effectuée au cours de l'événement de 2008. Le calage des paramètres sédimentaires pour différents diamètres représentatifs n'est donc pas faisable sur cet événement.

L'objectif de ces premières simulations est d'observer le comportement de chacun des types de sédiments dans le tronçon étudié. Chaque simulation correspond donc à un seul type de sédiment (argile, limon grossier et sable fin). La Figure 75 regroupe les résultats de ces 3 simulations à la station de Tricastin en utilisant la chronique de concentration de Beaumont-Montoux (Figure 73) comme donnée d'entrée. Les pertes se produisant au passage des 4 aménagements hydroélectriques du tronçon sont indiquées sur la Figure 75 (BLV = Bourg-lès-Valence, BCT = Beauchastel, BL9 = Baix-Le Logis Neuf, MTL = Montélimar).

La première classe de sédiments (Figure 75a), les argiles, ne se dépose quasiment pas au cours des deux périodes étudiées. Les résultats de la simulation sont quasiment similaires à ceux de la modélisation d'un transport de soluté (Figure 74).

En revanche, pour les limons grossiers (Figure 75b), du dépôt est observé dans les quatre réservoirs du Rhône, avec un dépôt un plus important dans les retenues de Bourg-lès-Valence (en rose) et de Beauchastel (en bleu).

Pour le sable fin (Figure 75c), la quasi-totalité des dépôts se produit dans la retenue de Bourg-lès-Valence. Un peu de dépôt se produit également dans la retenue de Beauchastel mais pas au-delà. La

concentration en sable est nulle à Tricastin. Malheureusement, aucune mesure granulométrique à cette station au cours de l'événement ne permet de confirmer le type de sédiment transporté.

Ces résultats permettent de voir la propagation des différentes classes de sédiment de manière indépendante.

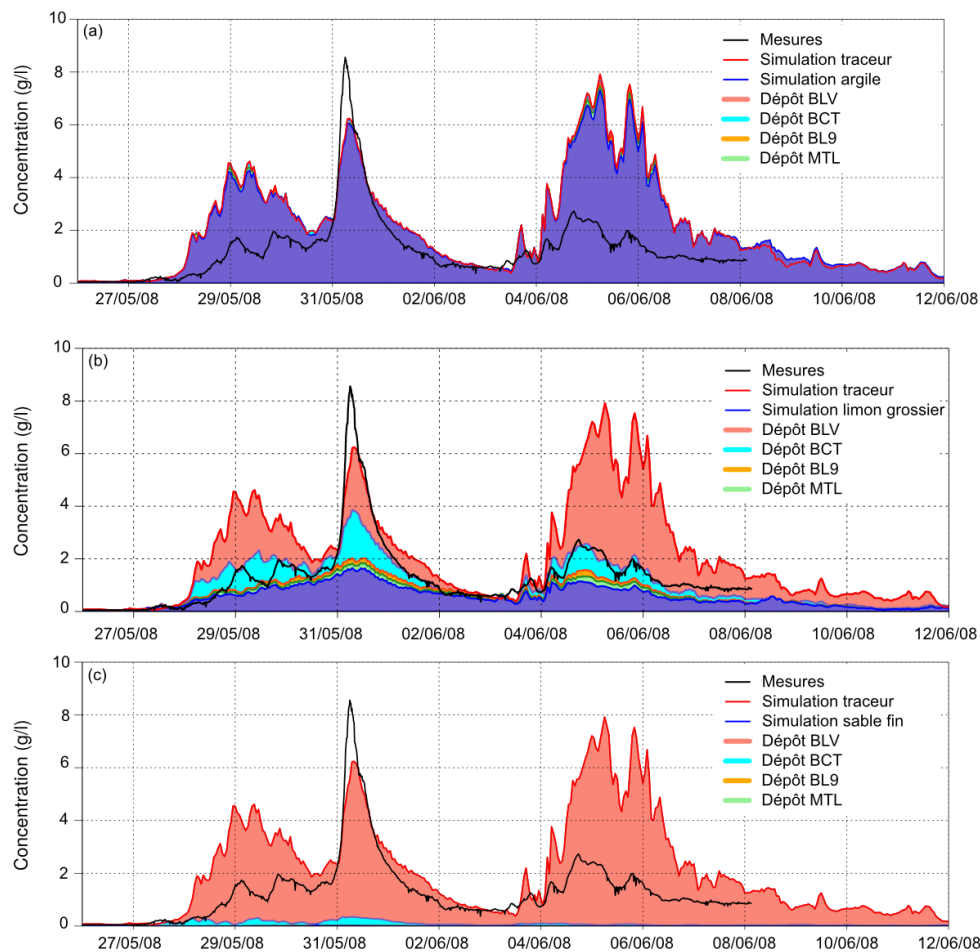


Figure 75 : Répartition des dépôts selon la taille du sédiment considéré. (a) argile  $d_{50} = 4 \mu\text{m}$ , (b) limon grossier  $d_{50} = 45 \mu\text{m}$ , (c) sable fin  $d_{50} = 200 \mu\text{m}$ .

#### 7.5.4. Transport de sédiments à granulométrie composée

Lors de l'événement de 2008, aucune analyse granulométrique n'avait pu être faite. Cependant, en mai 2015, une crue de l'Isère, associée aux chasses des barrages de la Basse-Isère a été documentée et a fourni différents types de granulométries, testées dans le présent rapport :

Ces granulométries sont récapitulées dans le Tab. 12 et ci-dessous. Le pourcentage de chacune des classes a été calculé d'après la courbe granulométrique de la Figure 76. Ces pourcentages sont également obtenus par la méthode de démodulation présentée dans la thèse de Marina Launay (2014). Or, comme cette méthode ne peut être appliquée à la granulométrie du « Garage écluse » qui n'a pas été analysée par granulométrie laser, la même méthode de décomposition en classes a été utilisée.

- Surface chasse et Fond chasse (granulométrie laser) : Deux échantillons ont été choisis parmi ceux effectués pendant la chasse de mai 2015. L'un correspond à un prélèvement de surface tandis que l'autre est plus proche du fond donc plus grossier. Les granulométries correspondant à ces échantillons ont également été testées sur le modèle car elles sont intermédiaires aux deux précédentes.
- Dépôt berge (granulométrie laser) : au cours de la crue de mai 2015 sur l'Isère, un échantillon de MES a été prélevé dans le dépôt présent sur la rive droite de l'Isère en aval de

Beaumont-Monteux. Ce dépôt correspond vraisemblablement au sédiment qui a été transporté au pic de crue.

- Garage écluse (analyse CNR – granulométrie méthode à la pipette) : Suite à la crue de mai-juin 2008, un dragage a été fait dans la retenue de Bourg-lès-Valence en août 2008. Un échantillon a été prélevé à la surface du dépôt. Sa granulométrie a également été testée avec le modèle.

Tableau 12 : Granulométries testées avec le modèle 1D.

Type	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	[%] Surface chasse (05/2015)	[%] Fond chasse (05/2015)	[%] Dépôt berge (05/2015)	[%] Garage écluse (08/2008)
Argile (1 – 10 $\mu\text{m}$ )	4	31	23	12	15
Limon fin (10 – 27 $\mu\text{m}$ )	15	44	28	18	9
Limon grossier (27 – 80 $\mu\text{m}$ )	45	24,5	31	40	32
Sable très fin (80 – 160 $\mu\text{m}$ )	90	0,5	16,5	28,5	31
Sable fin (160 – 300 $\mu\text{m}$ )	200	0	1,5	1,5	11,5
Sable grossier (300 – 400 500 $\mu\text{m}$ )		0	0	0	1,5

Les quatre granulométries testées avec le modèle sont représentées dans la Figure 76.

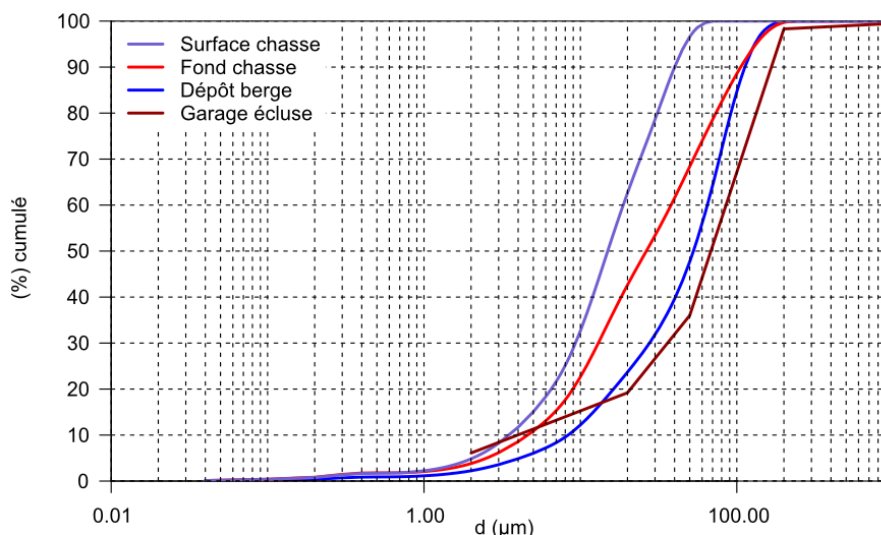


Figure 76 : Granulométries mesurées sur l'Isère et testées dans le modèle 1D du Rhône.

Les démodulations des échantillons « Dépôt berge », « Surface chasse » et « Fond chasse » sont présentées en Figure 77 à titre comparatif. L'inventaire des résultats sur les diamètres et pourcentages de chaque classe est présenté dans le Tab. 13. Le choix des diamètres représentatifs correspond bien à ceux obtenus par démodulation, de même que les pourcentages issus de chaque classe. Cependant, une différence est observée pour les sables fins et grossiers. En effet, ceux-ci, très peu présents dans les échantillons ne sont pas détectés avec la démodulation.

Cette comparaison permet de justifier le choix des diamètres représentatifs pour la modélisation avec Adis-TS.

Tableau 13 : Comparaison des diamètres représentatifs des échantillons analysés par granulométrie laser. En rouge, les valeurs obtenues par la démodulation. En noir, les valeurs obtenues en se basant sur les diamètres représentatifs définis par Guertault (2015).

Type	Surface chasse (05/2015)		Fond chasse (05/2015)		Dépôt berge (05/2015)	
	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	[%]	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	[%]	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	[%]
Argile (1 – 10 $\mu\text{m}$ )	4 (4)	31 (14)	4 (4)	23 (11)	4 (8)	12 (17)
Limon fin (10 – 27 $\mu\text{m}$ )	15 (15)	44 (61)	15 (14)	28 (36)	15 (15)	18 (12)
Limon grossier (27 – 80 $\mu\text{m}$ )	45 (38)	24,5 (19)	45 (49)	31 (39)	45 (49)	40 (36)
Sable très fin (80 – 160 $\mu\text{m}$ )	90 (-)	0,5 (0)	90 (112)	16,5 (14)	90 (92)	28,5 (35)
Sable fin (160 – 300 $\mu\text{m}$ )	200 (-)	0 (0)	200 (-)	1,5 (0)	200 (-)	1,5 (0)
Sable grossier (300 – 500 $\mu\text{m}$ )	400 (-)	0 (0)	400 (-)	0 (0)	400 (-)	0 (0)

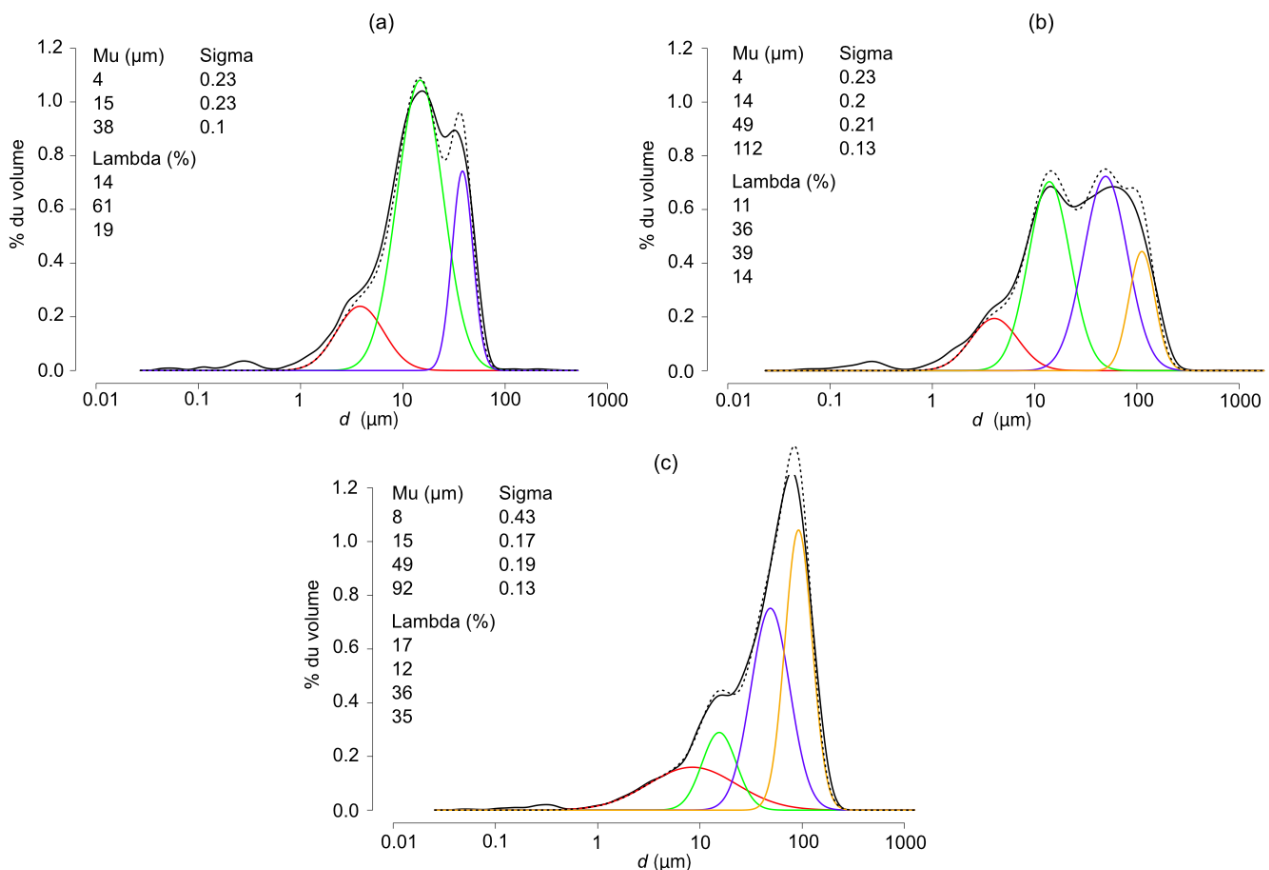


Figure 77 : Démodulation des granulométries mesurées sur l'Isère et analysées par granulométries laser : (a) Échantillon « Surface chasse », (b) échantillon « Fond chasse » et (c) échantillon « Dépôt berge ».

Les résultats de la simulation de 2008 en utilisant les 4 granulométries définies dans le Tableau 13 sont comparés aux mesures effectuées à Tricastin (passage de 4 aménagements) dans la Figure 78.



Plusieurs tendances peuvent être observées sur ces résultats. Plus la granulométrie de l'échantillon considéré est grossière, plus le sédiment se dépose vite. Entre la granulométrie la plus fine (Figure 78a) et la plus grossière (Figure 78d), la concentration observée au même point a été diminuée de 5 à 2,5 g/l pendant le pic de crue, et de 6 à 2,5 g/l pendant la chasse.

En annexe 11.8, les résultats des simulations à Pont-de-Valence sont également représentées. Ces résultats ne sont pas inclus dans le présent rapport car les mesures à Pont-de-Valence ont été jugées non fiables.

La diminution de concentration est beaucoup plus faible entre Pont-de-Valence et Tricastin, malgré l'apport d'eau claire des affluents mineurs. La majorité du dépôt a donc eu lieu dans la retenue de Bourg-lès-Valence ce qui va dans le sens des observations de terrain.

Deux remarques peuvent être faites sur les catégories de sédiments :

- Les sédiments les plus fins (argile et dans une moindre mesure limons) ayant passé la retenue de Bourg-lès-Valence sont retrouvés à Tricastin malgré le passage des 3 autres retenues.
- Les sables, encore observables à Pont-de-Valence, n'apparaissent plus à Tricastin. En effet, la majorité des sables se sont déposés dans les retenues de Bourg-lès-Valence et Beauchastel.

En comparant les simulations avec les mesures, plusieurs remarques peuvent être faites :

Lors du pic de crue, il y aurait eu très peu de dépôt entre Beaumont-Montoux et Tricastin. Le pic de concentration mesuré à Tricastin (aux incertitudes près >20 %) semble d'ailleurs largement supérieur à ce qui a été simulé. Il semble néanmoins cohérent de choisir une granulométrie très fine pour représenter correctement le passage des MES. La granulométrie « Surface chasse » semble la mieux adaptée pour représenter cette partie de l'évènement, moyennant une correction de la chronique de concentration amont qui a été sous-estimée (cf Section 7.5.5).

La deuxième partie de l'évènement, pendant les chasses, peut être comparée aux mesures de Pont-de-Valence (Annexe 8) et de Tricastin. Les résultats semblent diverger entre les deux stations. La granulométrie « Garage écluse » (Figure 78d) semble mieux représenter les mesures à Tricastin malgré une légère surestimation du dépôt. Inversement, à Pont-de-Valence, la granulométrie « Dépôt berge » (Annexe 8 Figure 18a) correspond mieux aux mesures. Il faut toutefois noter que les mesures à Pont-de-Valence sont à considérer avec précaution. En effet, celles-ci réalisées à l'aval direct de la confluence de Bourg-lès-Valence ne garantissent pas un bon mélange entre les eaux du Vieux Rhône et du canal usinier.

Une dernière remarque sur le début de la chronique, entre le 27/05/08 et le 31/05/08, une granulométrie grossière semble mieux correspondre aux mesures à Tricastin (Figure 78d). Les concentrations mesurées avant le pic de crue correspondent aux apports de la chasse du barrage de Saint-Egrève, et pourraient expliquer la présence d'une granulométrie plus grossière avant la crue.

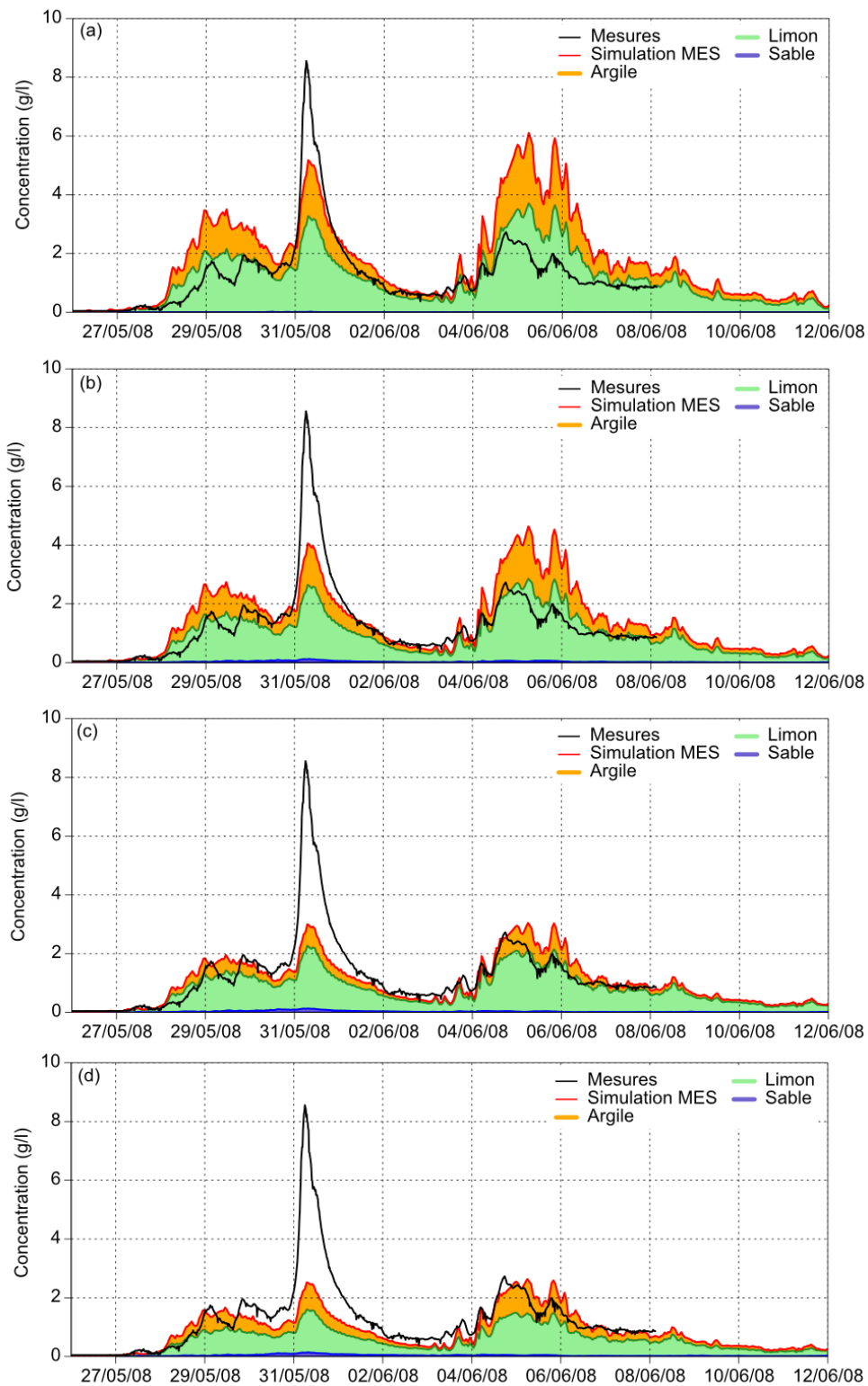


Figure 78 : Concentration en MES à Tricastin pour les différentes granulométries. (a) Granulométrie « Surface chasse », (b) Granulométrie « Fond chasse », (c) Granulométrie « Dépôt berge » et (d) Granulométrie « Garage écluse ».

Pour la suite des simulations, il a été décidé d'utiliser deux granulométries différentes : une plus fine représentative de la crue (« Chasse surface ») pour la première semaine de simulation et une plus épaisse représentative de la chasse (« Garage écluse ») pour la deuxième semaine à partir du 02/06/2008 à 12h00 (Tab. 14). Ces deux granulométries ont été légèrement corrigées, en supposant que la granulométrie moyenne pendant la crue était un peu plus grossière que celle à la surface pendant la chasse et que la granulométrie de la chasse était un peu moins grossière que celle du dépôt

du Garage écluse. Ce découpage en deux granulométries, ne prend pas en considération la chasse du barrage de Saint-Egrève.

Tableau 14 : Granulométries choisies pour représenter les différents sédiments passant au cours de la chasse et de la crue.

Type	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	Granulométrie première semaine (Crue) [%]	Granulométrie deuxième semaine (chasse) [%]
Argile (1 – 10 $\mu\text{m}$ )	4	25	15
Limon fin (10 – 27 $\mu\text{m}$ )	15	44	10
Limon grossier (27 – 80 $\mu\text{m}$ )	45	23	36
Sable très fin (80 – 160 $\mu\text{m}$ )	90	5	33
Sable fin (160 – 300 $\mu\text{m}$ )	200	3	5
Sable grossier (300 – 500 $\mu\text{m}$ )	400	0	1

### 7.5.5. Recomposition de la granulométrie et correction de la chronique de concentration

L'objectif de cette section est de corriger la chronique de concentration reconstituée à Beaumont-Montoux au niveau du pic de concentration lié à la crue. Les résultats des simulations précédentes à Tricastin (Figure 74 et les Figures 14 et 15) ont montré que le pic de concentration était toujours sous-estimé quelle que soit la granulométrie considérée.

Deux types de correction ont été apportées au pic de concentration et comparées avec la chronique initiale (Figure 73) :

- Correction Sogreah : Une chronique de concentration avait été modélisée à Beaumont-Montoux sur un modèle de la Basse-Isère par Sogreah (Rapport EDF/CNR, 2012 ; Figure : Reprise simulations mars 2012). Cette chronique a été reprise comme condition initiale à Beaumont-Montoux jusqu'au 02/06/2008 à 12h00.
- Correction Irstea : Pour des débits supérieurs à 1100  $\text{m}^3/\text{s}$ , le sédiment est remis en suspension dans les retenues de la Basse-Isère. La quantité de sédiment repris est calculée à partir du débit mesuré à Beaumont-Montoux via la formule ci-dessous :

$$C_{\text{repris}} = \alpha (Q - Q_{\text{repris}})^\beta \quad \text{Eq. 28}$$

avec  $Q_{\text{repris}} = 1100 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\alpha = 0,00015$  et  $\beta = 2$  et où  $Q$  est le débit à Beaumont-Montoux. La concentration en MES a été corrigée uniquement sur la première semaine. Le paramètre  $\beta = 2$  est cohérent avec les valeurs déterminées dans le cadre de la thèse de Marina Launay (Launay, 2014) et le coefficient  $\alpha$  a été calé pour que les valeurs calculées correspondent le plus aux valeurs mesurées.

Trois simulations ont donc été réalisées avec des chroniques différentes de concentration en MES à Beaumont-Montoux sur la première semaine (Tab. 14). Les résultats obtenus à Tricastin sont présentés dans la Figure 79a.

D'une part, la double granulométrie représente bien mieux le comportement sédimentaire la deuxième semaine. Les concentrations en MES ne sont plus surestimées à Tricastin mais en accord avec les mesures.

La chronique estimée par les simulations de Sogreah surestime largement les concentrations en MES lors de la crue. En effet, le pic de concentration mesuré à Tricastin atteint 7 g/l tandis que le résultat de la simulation avec la chronique de Sogreah atteint 12 g/l.

L'estimation de la reprise de sédiments dans les retenues de la Basse-Isère donne des résultats plus en accord avec les observations à Tricastin. Il semble néanmoins que le dépôt soit sous-estimé au niveau de la descente du pic de MES. Ceci est peut-être dû à l'utilisation d'une granulométrie plus fine que celle ayant réellement transité.

La Figure 79b a été obtenue en utilisant la chronique de concentration corrigée (Irstea) et différentes granulométries selon la semaine considérée. Cette condition initiale est choisie pour effectuer les tests de sensibilité de la section 7.5.6.

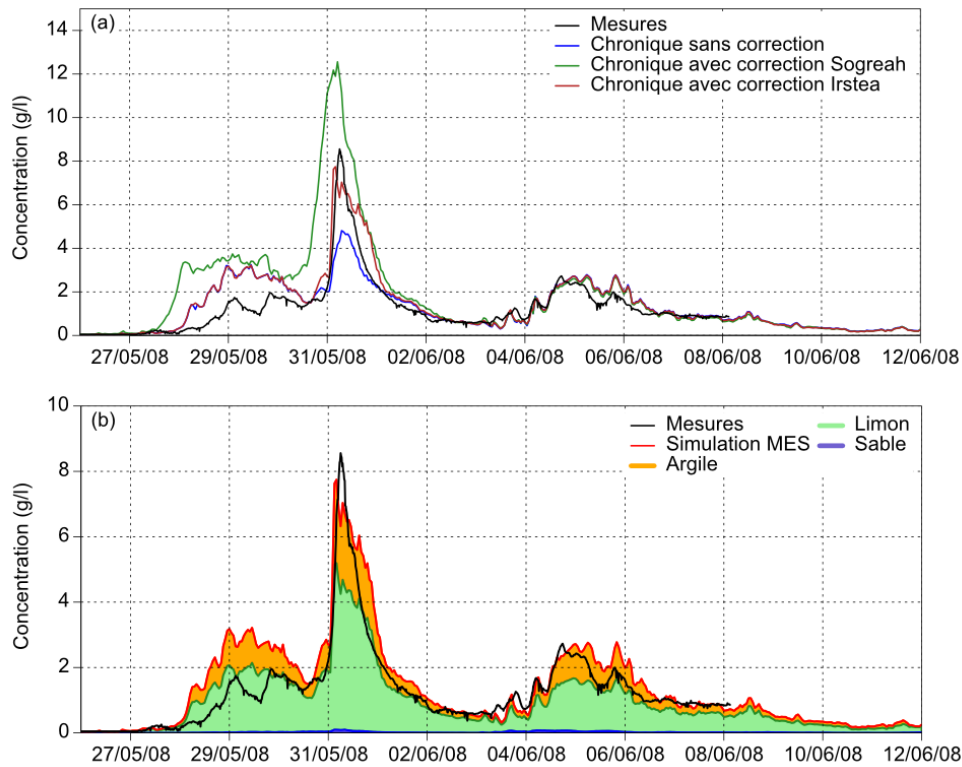


Figure 79 : Résultats à Tricastin obtenus avec la double granulométrie. (a) Comparaison des différentes chroniques de concentration pour la correction du pic de MES au cours de la crue. (b) Décomposition des résultats obtenus avec la chronique de concentration corrigée (correction Irstea) et la double granulométrie.

### 7.5.6. Tests de sensibilité

A partir de la chronique de concentration corrigée et en utilisant deux granulométries différentes (Figure 79b), des tests de sensibilité du modèle au débit du Rhône ont été effectués.

Ces tests ont pour objectif d'estimer l'impact du débit du Rhône sur le flux sédimentaire à travers l'aménagement de Bourg-lès-Valence.

Les débits issus de l'étude EDF/CNR (Negrello et al., 2012) ont été réutilisés à savoir  $Q_{Rh\hat{o}ne} = 600, 750, 1000, 1500, 2000$  et  $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ . Les débits supérieurs à  $2500 \text{ m}^3/\text{s}$  ne semblent pas très pertinents. En effet, le débit maximal du canal usinier de Bourg-lès-Valence, en amont de la confluence avec l'Isère, est fixé à  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pour les débits supérieurs à  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ , l'excédent est évacué par le Vieux Rhône

Les résultats des différents tests (hydrauliques + sédimentaires) sont présentés dans la Figure 80. Le flux total est représenté sur la Figure 80. Pour chaque débit testé, cette figure répertorie les dépôts obtenus à la fin de la période totale de simulation (jusqu'au 12/06/2008) dans chacun des biefs présents dans le modèle. Les volumes entrants et sortants du système sont également indiqués sur la figure. Enfin, la proportion de chacune des classes de sédiment est indiquée sous forme de camembert à côté de chaque bief où le dépôt est suffisamment important.

La Figure 80 montre que plus le débit du Rhône est important, plus le flux de MES transitant à la sortie de Beauchastel est important. D'un volume sortant de 1,49 M m<sup>3</sup> pour un débit du Rhône de 600 m<sup>3</sup>/s (Figure 80a), celui-ci passe à 2,34 M m<sup>3</sup> pour un débit de 2500 m<sup>3</sup>/s (Figure 80f). De plus le sédiment sortant devient plus grossier avec l'augmentation du débit du Rhône.

Le sédiment se dépose majoritairement dans le bief de l'Isère (pas d'impact du débit du Rhône sur ce bief), puis à l'amont des usines hydroélectriques de Bourg-lès-Valence et Beauchastel. Ce dépôt diminue avec l'augmentation du débit du Rhône. Quasiment aucun dépôt ne se produit dans le canal commun après la confluence mais avant le barrage de l'Isère. Du dépôt est observé seulement pour un débit du Rhône de 600 m<sup>3</sup>/s. Pour des débits supérieurs à 600 m<sup>3</sup>/s, l'écoulement est suffisant pour transporter le sédiment apporté par l'Isère. Ceci est en désaccord avec les observations de terrain. Il est possible que le sédiment présent dans cette zone ait pu être apporté par charriage et la simulation du transport par suspension n'est donc pas représentative de cet apport. D'autre part, le barrage de l'Isère est vraisemblablement resté fermé au cours de l'événement ce qui a pu influencer le transport dans le bief juste en amont.

Toutefois, cette étude de sensibilité montre que le modèle reproduit correctement les comportements attendus et représente donc un outil pour modéliser le transport par suspension au sein de l'aménagement.

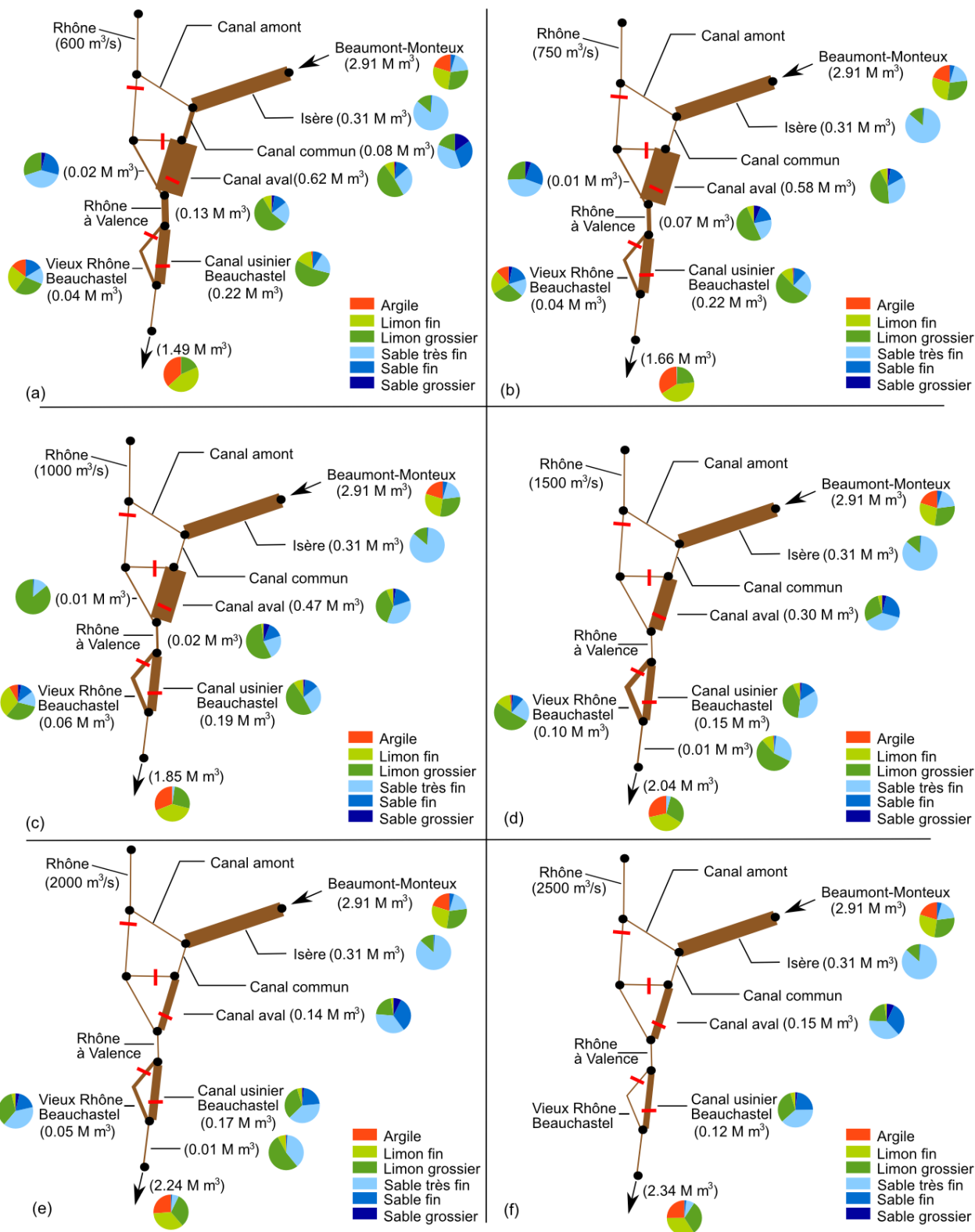


Figure 80 : Etude de sensibilité au débit du Rhône à l'amont de Bourg-lès-Valence pour (a) 600 m<sup>3</sup>/s, (b) 750 m<sup>3</sup>/s, (c) 1000 m<sup>3</sup>/s, (d) 1500 m<sup>3</sup>/s, (e) 2000 m<sup>3</sup>/s et (f) 2500 m<sup>3</sup>/s. Dépôt total de MES obtenu par simulation entre le 26/05/2008 et le 12/06/2008. Les volumes entrant à Beaumont-Monteux et sortant à l'aval de Beauchastel sont également indiqués. Epaisseur des traits proportionnelle au dépôt de MES. Les camemberts indiquent la proportion de chaque classe de sédiments au sein des dépôts et des apports.



## 8. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce rapport présente des résultats expérimentaux sur la dynamique des sables ainsi qu'une modélisation numérique 1D et 2D permettant d'alimenter la discussion sur la variabilité de la charge de fond en sable au niveau de la confluence et tenter d'expliquer les dépôts et reprises observés de par les mesures bathymétriques et granulométriques réalisées par la CNR.

Il est évident que les mesures de terrain de la charge sableuse restent difficiles et coûteuses (en temps mais aussi en équipement et personnels). Trois campagnes de terrain ont pu être réalisées lors de cette étude :

- une campagne de mesure de la suspension sableuse à partir d'embarcations au niveau de la confluence entre l'Isère et le Rhône ;
- deux campagnes de charriage à partir de la traille de la station de Beaumont-Monteux.

Ces campagnes ont permis de mettre en évidence un transport très fort mais demanderaient d'être validées par de nouvelles campagnes de mesure. Celles-ci pourront être en parties réalisées dans le cadre de l'OSR. La station de Beaumont-Monteux semble d'ailleurs être le site à privilégier en cas d'une nouvelle crue/chasse en incluant en plus des prélèvements de charriages des prélèvements de suspension ainsi que des mesures ADCP. Pour le site à la confluence, il semble nécessaire d'améliorer le protocole de mesure afin de mieux estimer les profils de concentration en sable sur l'Isère et dans le canal d'amenée.

La capacité de transport de l'Isère semble très élevée et les apports en sables provenant du barrage de Beaumont-Monteux lors des chasses ne permettent pas a priori d'assurer le maintien de cette capacité pendant l'événement. Après événement (barrage fermé) la charge sableuse diminue rapidement et la granulométrie du fond devient plus grossière. Les modèles et mesures confirment un transport solide par suspension graduée très important et a priori bien supérieur au transport par charriage pour de forts débits lors des crues/chasse.

La modélisation numérique a permis de confirmer le potentiel de dépôt au niveau du canal d'amenée au cours de l'événement de crue/chasse de par la modélisation hydraulique 2D de scénarios tests et la modélisation hydro-sédimentaire 1D de la crue/chasse de 2008. Une modélisation hydro-sédimentaire 1D de la crue/chasse de 2015 devrait permettre d'affiner ces résultats. De plus, une modélisation hydro-sédimentaire 2D devrait permettre de mieux comprendre la dynamique locale des sables. En particulier, cette modélisation devrait permettre de mieux comprendre la dynamique des dépôts sur la partie aval de l'Isère lors des événements ainsi que la reprise de ces dépôts pour des débits plus faibles suivants un événement de crue/chasse.

Il semble important de renforcer les mesures (incluant mesure de flux et granulométrie) sur la station de Beaumont-Monteux car ce site correspond à la condition à la limite amont des modèles. Elle est essentielle pour permettre une meilleure compréhension de la dynamique au niveau de la confluence. En particulier, il est fondamental de pouvoir bien mesurer séparément les flux de sables (transportés par charriage et suspension graduée) des flux de limons et argiles (transportés essentiellement par suspension homogène). En effet, les ouvrages gérés par la CNR semblent globalement transparents pour les sédiments fins (argile et limons) à l'exception de zones comme les garages à bateaux. Les sables sont par contre très affectés par les ouvrages CNR et leurs dépôts peuvent avoir de gros impact sur la navigabilité du canal d'amenée.

## 9. RÉFÉRENCES

- Beguin, R. (2012), Etude 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.
- 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).
- 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.
- 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.

---

van Rijn, L. C. (1993). Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas Aqua Publications, Amsterdam The Netherlands.

## 10. ANNEXE LIÉE AUX MESURES ADCP

Plusieurs transects ADCP ont été réalisés au niveau de la confluence entre l'Isère et le Rhône lors de la campagne de mesure du 4 et 5 mai 2015. Sont présentés dans cette annexe les résultats de champ de vitesse de champ de rétrodiffusion issus de WinRiverII pour chacun de ces transects ADCP.

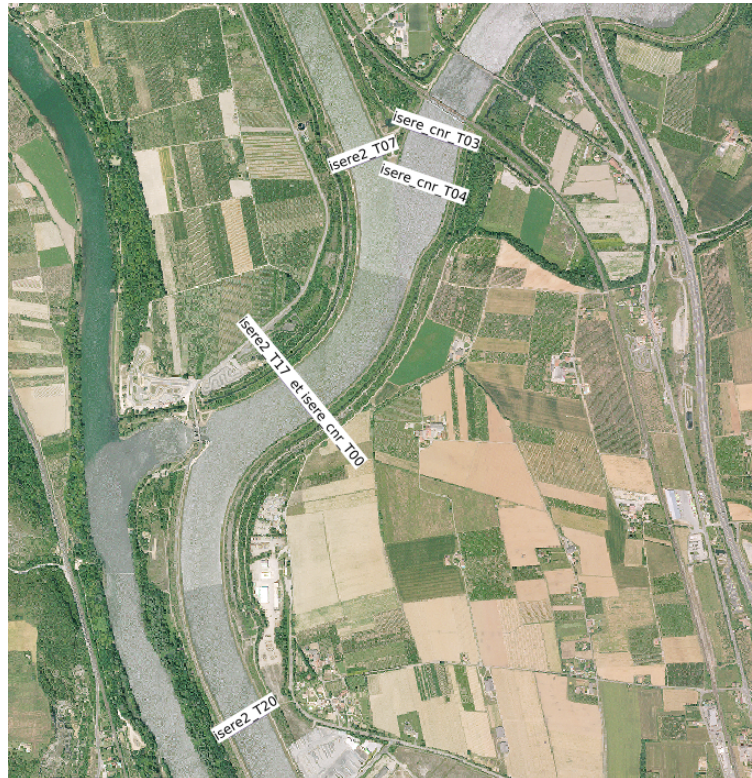


Figure 81: Carte de localisation des mesures ADCP réalisés sur l'Isère en 2003.

Les transects T03 et T04 correspondent donc au secteur Isère aval.

Le transect T07 correspond au transect sur le canal d'aménée en amont de la confluence.

Les transects T00 et T17 correspondent au transect sur le canal d'aménée entre la confluence et le barrage Isère.

Le transect T20 correspond au transect sur le canal d'aménée en aval du barrage Isère.

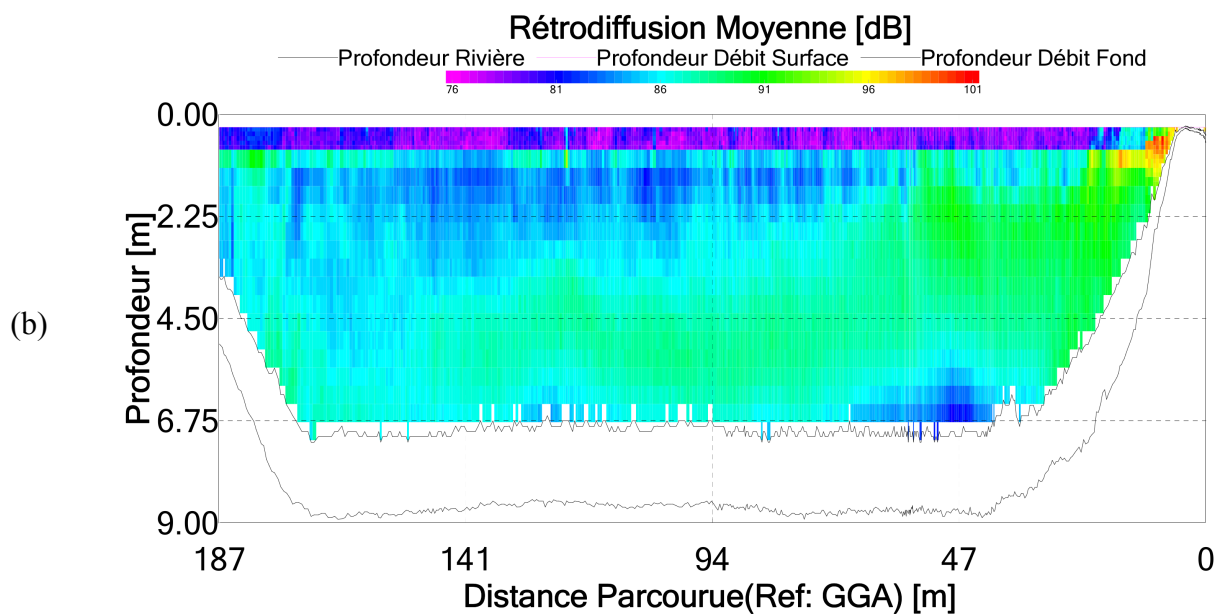
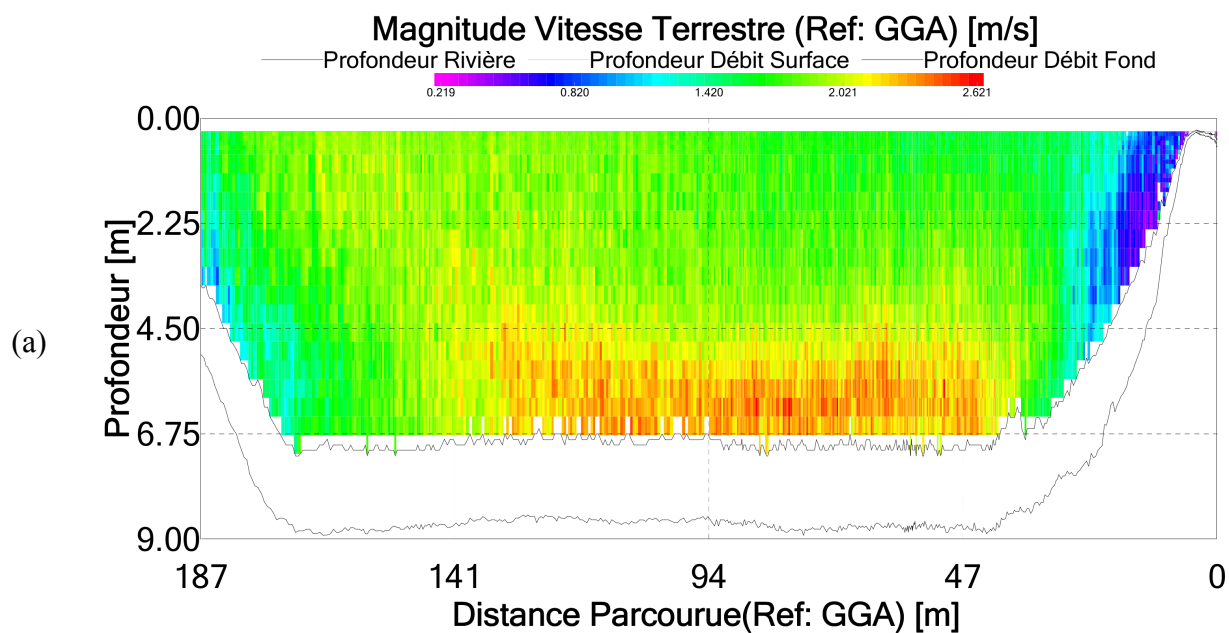


Figure 82: Résultats des mesures ADCP sur le transect T00 : (a) champ de vitesse (b) champ de rétrodiffusion.

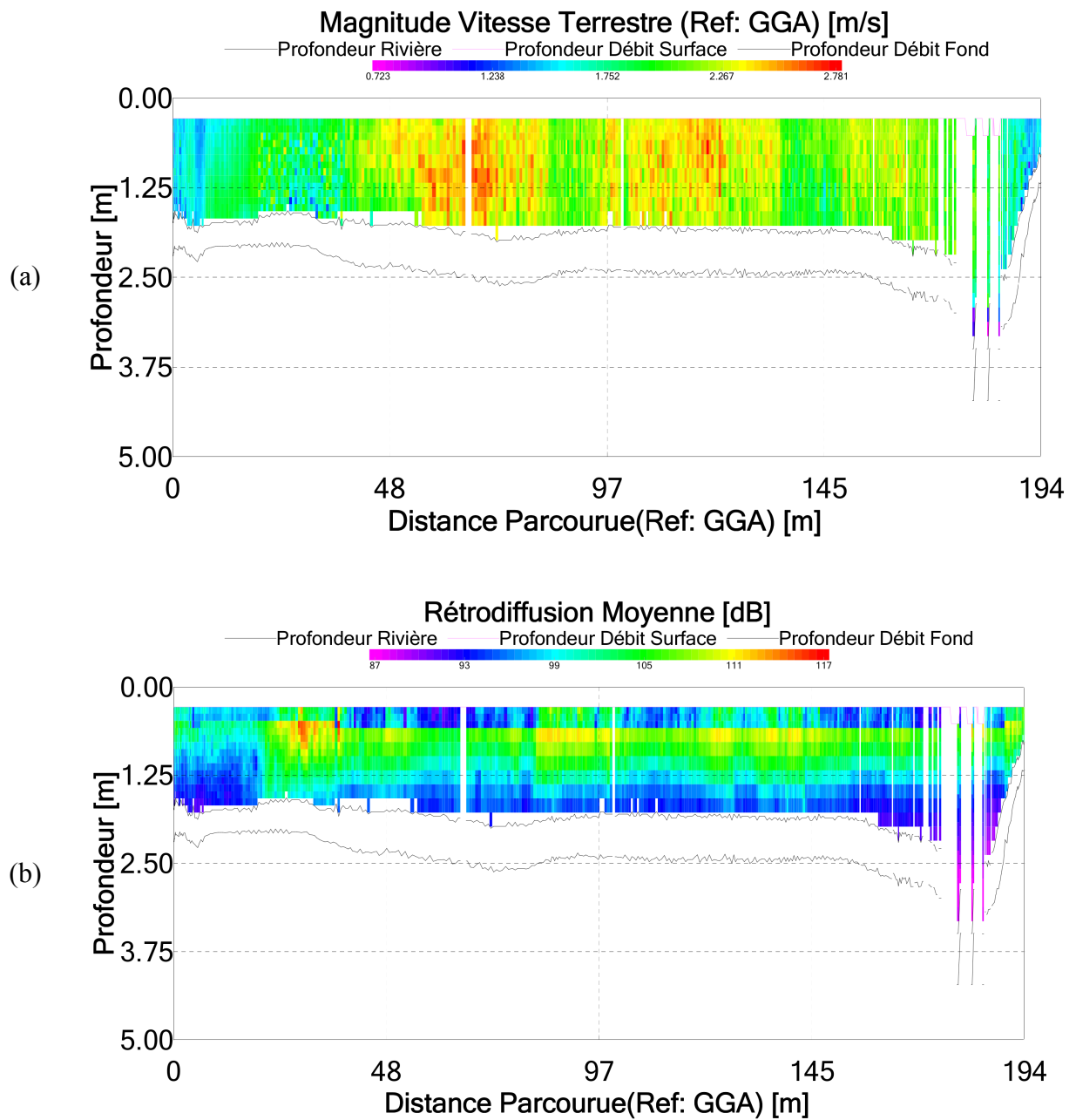


Figure 83: Résultats des mesures ADCP sur le transect T03 : (a) champ de vitesse (b) champ de rétrodiffusion.



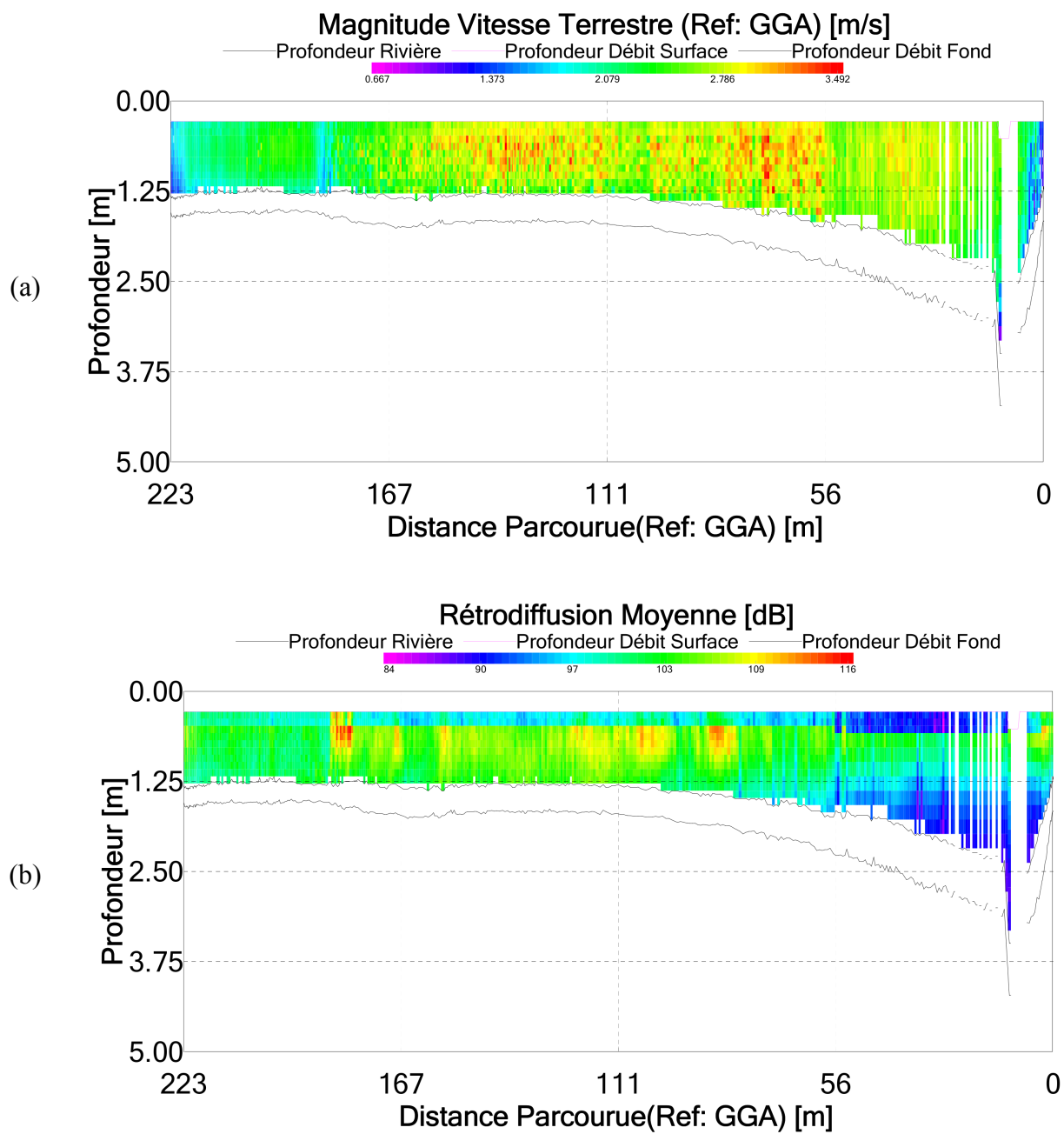


Figure 84: Résultats des mesures ADCP sur le transect T04 : (a) champ de vitesse (b) champ de rétrodiffusion.

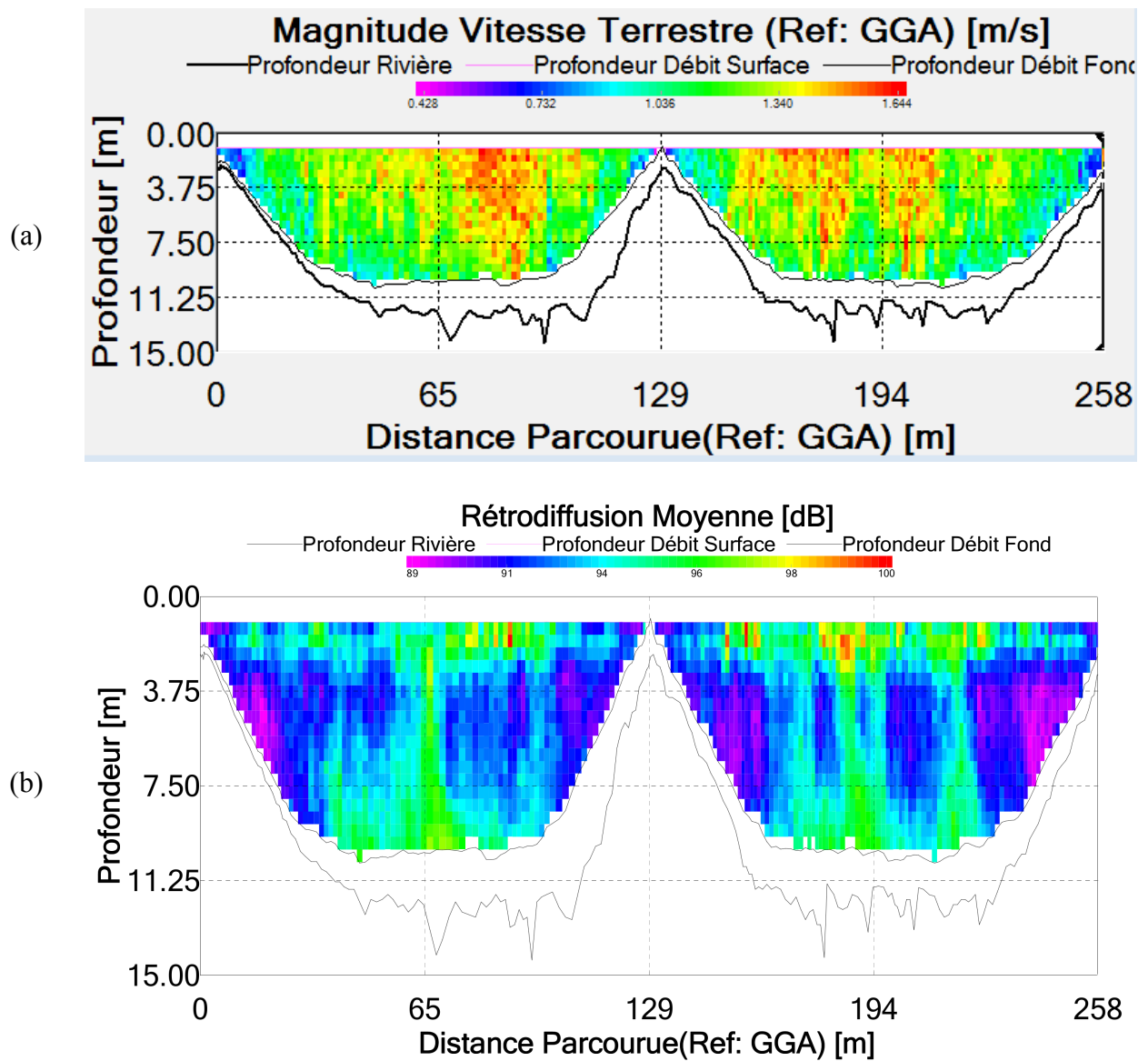


Figure 85: Résultats des mesures ADCP sur le transect T07 sur le Rhône : (a) champ de vitesse (b) champ de rétrodiffusion.

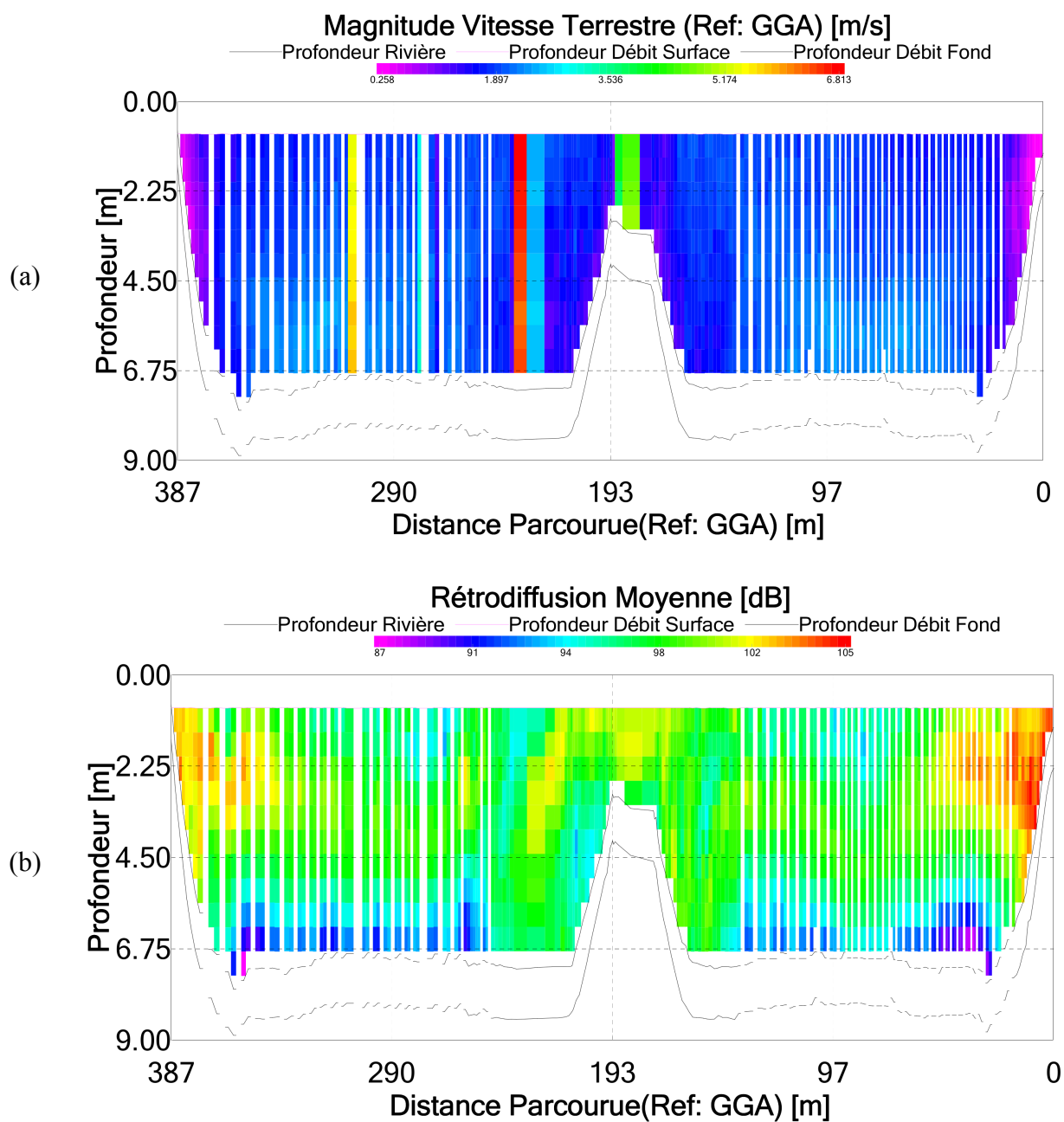


Figure 86: Résultats des mesures ADCP sur le transect T17 sur le Rhône : (a) champ de vitesse (b) champ de rétrodiffusion.

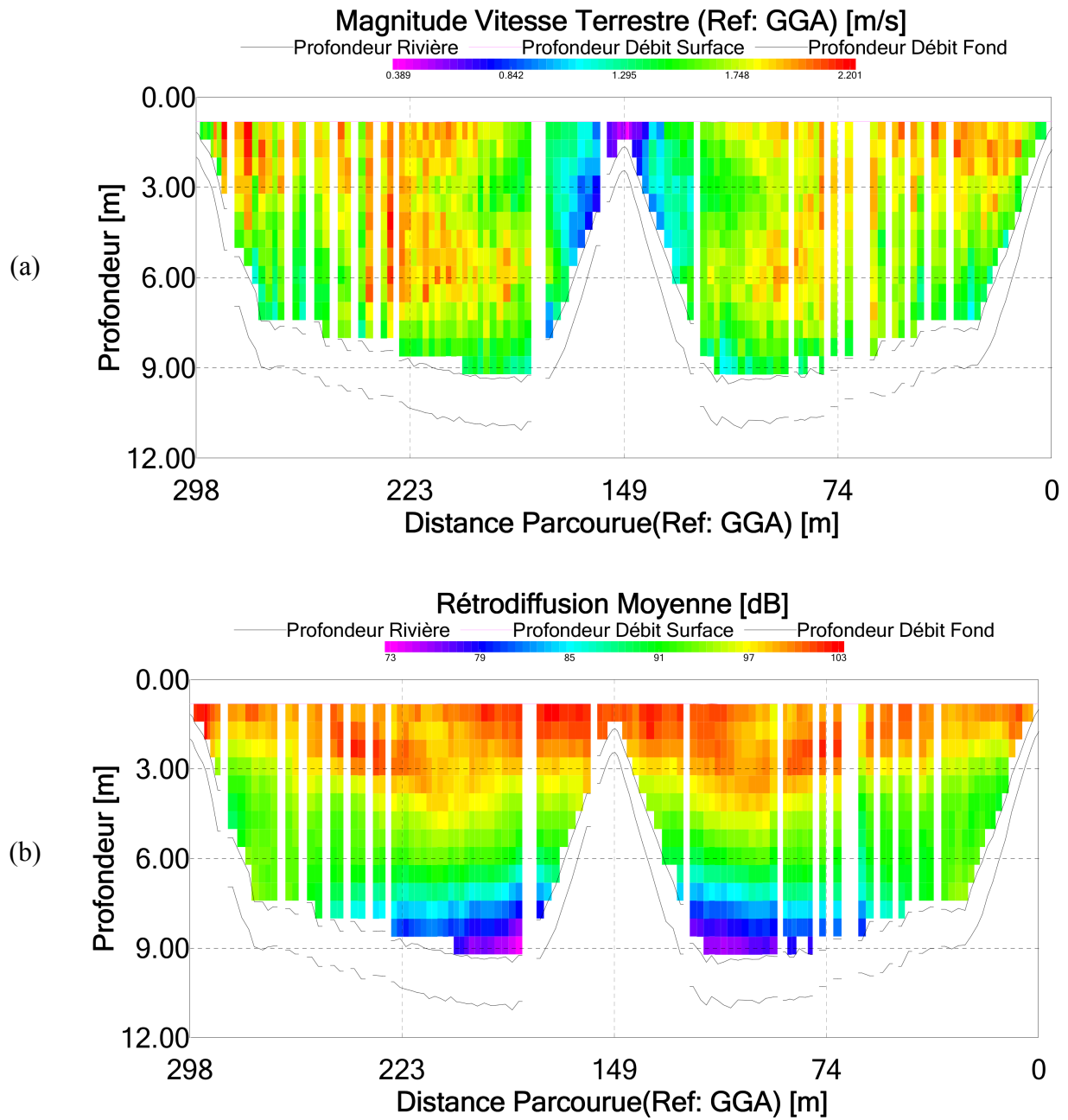


Figure 87: Résultats des mesures ADCP sur le transect T20 sur le Rhône : (a) champ de vitesse (b) champ de rétrodiffusion.

## 11. ANNEXES LIÉES AU MODÈLE 1D

### 11.1. Synthèse des données topographiques utilisées pour la construction du modèle du Rhône de la station hydrométrique de Ternay à l'aménagement de Caderousse

Secteur	Source des données / Producteur	Année	Espacement des profils en travers
Perrache – Barrage de Vaugris	BDT Rhône / CNR	2006	500 m
Barrage de Vaugris – Rhône aménagé de Péage-de-Roussillon	BDT Rhône / CNR	2005	500 m
Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon – Rhône aménagé de Saint-Vallier	BDT Rhône / CNR	2007	500 m
Vieux Rhône de Saint-Vallier – Barrage de La Roche-de-Glun	BDT Rhône / CNR	2006/2007	500 m
Rhône aménagé de Bourg-lès-Valence	BDT Rhône / CNR	2004	500 m
Vieux Rhône de Bourg-lès-Valence – Barrage de Charmes	BDT Rhône / CNR	2005	500 m
Vieux Rhône de Beauchastel – Vieux Rhône de Baix-Le Logis Neuf	BDT Rhône / CNR	2004	500 m
Rhône aménagé de Baix-Le Logis Neuf	BDT Rhône / CNR	2002	500 m
Usine du Logis Neuf – Usine de Château-neuf-du-Rhône	BDT Rhône / CNR	2008	500 m
Vieux Rhône de Montélimar	BDT Rhône / CNR	2003/2008	500 m
Usine de Châteauneuf-du-Rhône– Barrage de Donzère	BDT Rhône / CNR	2006/2007	500 m
Vieux Rhône de Donzère-Mondragon	BDT Rhône / CNR	2003	500 m
Rhône aménagé de Donzère-Mondragon	BDT Rhône / CNR	2003/2004	500 m
Mondragon – Caderousse	BDT Rhône / CNR	2004/2007	500 m
Isère	CNR	2013	50 à 100 m

## 11.2. Débits turbinables maximum et débits réservés actuels (2014) des aménagements hydroélectriques modélisés

N°	Nom aménagement	Nom usine	Nom barrage	Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>res</sub> [m <sup>3</sup> /s] avant 01/01/2014	Q <sub>res</sub> [m <sup>3</sup> /s] après 01/01/2014
1	Vaugris	Barrage-usine de Vaugris		1400	Sans objet	Sans objet
2	Péage-de-Roussillon	Sablons	Saint-Pierre-de-Boeuf	1600	Avr. - Août : 20 Sept. - Mars : 10	Variations entre 50 et 125
3	Saint-Vallier	Gervans	Arras	1620	Avr. - Août : 10 Sept. - Mars : 5	56
4	Bourg-lès-Valence	Bourg-lès-Valence	La Roche-de-Glun	2200	Avr. - Août : 20 Sept. - Mars : 10	72
5	Beauchastel	Beauchastel	Charmes	2100	Avr. - Août : 20 Sept. - Mars : 10	72
6	Baix-Le Logis Neuf	Le Logis Neuf	Le Pouzin	2100	Avr. - Août : 20 Sept. - Mars : 10	75
7	Montélimar	Châteauneuf-du-Rhône	Rochemaure	1850	15 si Q <sub>Rhône</sub> < 560 15 +4 par tranche de 100 60 si Q <sub>Rhône</sub> > 1660	76
8	Donzère-Mondragon	Bollène	Donzère	1980	60	75,5



### 11.3. Consignes d'exploitation avec points de réglage associés pour les aménagements hydroélectriques modélisés

N°	Nom aménagement	PK Point de réglage [km]	Cote à régler [m NGF] en fonction du débit [m³/s]
1	Vaugris	28,6	0 < Q < 3300 : 150,54
		33	3300 < Q < 4600 : 148,54 Q > 4600 : Evolution « naturelle », barrage complètement ouvert
2	Péage-de-Roussillon	41,15	0 < Q < 2820 : 143,74 2820 < Q < 4000 : 143,74 – 144,59
		50	4000 < Q < 6000 : 143,54 6000 < Q < 7500 : 143,54 – 144,34
3	Saint-Vallier	75,7	0 < Q < 4600 : 128,4
		82,5	4600 < Q < 7000 : 127,5 (jusqu'à pleine ouverture du barrage)
4	Bourg-lès-Valence	90,6 (Tain-Tournon)	0 < Q < 3000 : 118,49
		97,7	0 < Q < 1900 : 116,99 1900 < Q < 5000 : 116,94
		101,35 (viaduc SNCF)	116,94 si $Q_{\text{Isère}} < 700$ 116,79 si $Q_{\text{Isère}} > 700$
5	Beauchastel	113,6	0 < Q < 2600 : 104,58 2600 < Q < 4000 : 104,58 – 104,28 4000 < Q < 4900 : 104,28
6	Baix-Le Logis Neuf	131	0 < Q < 4700 : 90,91
		135	4700 < Q < 8500 : 89,16
7	Montélimar	152,2	0 < Q < 3000 : 77,12 3000 < Q < 5000 : 77,12 – 76,12 5000 < Q < 7000 : 76,12
8	Donzère-Mondragon	170,3	0 < Q < 1750 : 58,75 1750 < Q < 7100 : 59,1

## 11.4. Lignes d'eau utilisées pour le calage des coefficients de Strickler

En gras les lignes d'eau utilisées pour le calage, les autres pour la validation. Toutes les lignes d'eau disponibles sur le Rhône ont été données par la CNR.

N°	Bief	PK [km]	Date de la mesure et débit du Rhône [m <sup>3</sup> /s]
1	Vaugris	5,5 (aval barrage Pierre-Bénite) 33,8 (amont barrage-usine de Vaugris)	02/12/09 – 1496 m <sup>3</sup> /s <b>07/12/10 – 2681 m<sup>3</sup>/s</b> 07/11/13 – 2994 m <sup>3</sup> /s
2	Péage-de-Roussillon	33,84 (aval barrage-usine de Vaugris) 59,3 (amont usine de Sablons)	30/11/00 – 2132 m <sup>3</sup> /s 22/03/01 – 4700 m <sup>3</sup> /s <b>20/04/05 – 3150 m<sup>3</sup>/s</b> 26/04/05 – 2970 m <sup>3</sup> /s 10/03/06 – 2820 m <sup>3</sup> /s
3	Saint-Vallier	51 (aval barrage Saint-Pierre-de-Boeuf) 82,7 (amont usine Saint-Vallier)	<b>10/03/06 – 2835 m<sup>3</sup>/s</b> 05/03/07 – 3198 m <sup>3</sup> /s 29/07/09 – 766 m <sup>3</sup> /s 02/03/10 – 2240 m <sup>3</sup> /s 04/01/12 – 2911 m <sup>3</sup> /s
4	Bourg-lès-Valence	83,03 (aval barrage d'Arras) 105 (amont usine Bourg-lès-Valence)	10/03/01 – Q <sub>r</sub> = 3651 m <sup>3</sup> /s, Q <sub>i</sub> = 457 m <sup>3</sup> /s 15/03/01 – Q <sub>r</sub> = 4233 m <sup>3</sup> /s, Q <sub>i</sub> = 568 m <sup>3</sup> /s <b>05/11/02 – Q<sub>r</sub> = 2835 m<sup>3</sup>/s, Q<sub>i</sub> = 457 m<sup>3</sup>/s</b> 16/11/02 – Q <sub>r</sub> = 4580 m <sup>3</sup> /s, Q <sub>i</sub> = 1495 m <sup>3</sup> /s 03/12/03 – Q <sub>r</sub> = 2647 m <sup>3</sup> /s, Q <sub>i</sub> = 586 m <sup>3</sup> /s 20/08/07 – Q <sub>r</sub> = 1071 m <sup>3</sup> /s, Q <sub>i</sub> = 198 m <sup>3</sup> /s
5	Beauchastel	100 (aval barrage de la Roche-de-Glun) 123,4 (amont usine de Beauchastel)	14/01/04 – Q <sub>r</sub> = 3002 m <sup>3</sup> /s, Q <sub>i</sub> = 1128 m <sup>3</sup> /s 31/03/05 – Q <sub>r</sub> = 1265 m <sup>3</sup> /s, Q <sub>i</sub> = 395 m <sup>3</sup> /s 06/05/08 – Q <sub>r</sub> = 935 m <sup>3</sup> /s, Q <sub>i</sub> = 475 m <sup>3</sup> /s <b>04/01/12 – Q<sub>r</sub> = 2914 m<sup>3</sup>/s, Q<sub>i</sub> = 449 m<sup>3</sup>/s</b>
6	Baix-Le Logis Neuf	119,72 (aval barrage de Charmes) 142,77 (amont usine du Logis Neuf)	28/10/04 – Q = 2884 m <sup>3</sup> /s <b>24/03/05 – Q = 1646 m<sup>3</sup>/s</b> 03/04/06 – Q = 3420 m <sup>3</sup> /s 06/03/07 – Q = 3398 m <sup>3</sup> /s 29/11/10 – Q = 3790 m <sup>3</sup> /s 09/12/10 – Q = 3365 m <sup>3</sup> /s
7	Montélimar	135,82 (aval barrage du Pouzin) 164,16 (amont usine de Châteauneuf-du-rhône)	11/07/02 – Q = 772 m <sup>3</sup> /s <b>07/03/03 – Q = 1456 m<sup>3</sup>/s</b> 05/03/07 – Q = 3660 m <sup>3</sup> /s 30/05/07 – Q = 1588 m <sup>3</sup> /s 10/12/10 – Q = 3423 m <sup>3</sup> /s
8	Donzère-Mondragon	153,1 (aval barrage de Rochemaure) 187,2 (amont usine de Mondragon)	10/08/04 – Q = 755 m <sup>3</sup> /s <b>05/03/07 – Q = 3580 m<sup>3</sup>/s</b> 08/12/10 – Q = 3850 m <sup>3</sup> /s 06/01/12 – Q = 3730 m <sup>3</sup> /s 06/01/14 – Q = 3572 m <sup>3</sup> /s
9	Caderousse	171,6 (aval barrage de Donzère) 212,23 (amont usine de Caderousse)	29/10/04 – Q = 4090 m <sup>3</sup> /s 30/03/06 – Q = 3300 m <sup>3</sup> /s <b>11/07/07 – Q = 2641 m<sup>3</sup>/s</b> 31/07/07 – Q = 1090 m <sup>3</sup> /s 08/12/10 – Q = 4200 m <sup>3</sup> /s
10	Isère	5,26 (Station de Beaumont-Montoux) 0 (Confluence avec le Rhône)	15/11/02 – Q = 997 m <sup>3</sup> /s 16/11/02 – Q = 1626 m <sup>3</sup> /s <b>16/01/04 – Q = 1196 m<sup>3</sup>/s</b>

## 11.5. Coefficients de Strickler issus du calage hydraulique

N°	Bief	Tronçon	PK amont [km]	PK aval [km]	Strickler du lit mineur [ $m^{1/3}/s$ ]	Strickler du lit majeur [ $m^{1/3}/s$ ]		
1	Vaugris	Rhône	14,99	18,50	28	20		
			18,50	23,00	40	20		
			23,00	30,00	28	20		
			30,00	33,80	36	20		
2	Péage-de-Roussillon	Rhône	33,80	37,50	32	20		
			37,50	38,50	30	20		
			38,50	50,80	34	20		
		Vieux Rhône	50,80	63,00	36	20		
		Rhône aménagé	50,80	61,59	42	20		
3	Saint-Vallier	Rhône	63,00	79,00	36	20		
			79,00	82,70	30	20		
		Vieux Rhône	82,70	86,52	30	20		
		Rhône aménagé	82,70	86,55	30	20		
4	Bourg-lès-Valence	Rhône	86,60	90,40	30	20		
			90,40	98,325	35	20		
		Vieux Rhône	98,325	108,20	30	20		
		Rhône aménagé	98,325	107,81	40	20		
		Barrage Isère	0,00	0,31	36	20		
5	Beauchastel	Rhône	108,20	110,00	32	20		
			110,00	119,50	36	20		
		Vieux Rhône	119,50	126,30	30	20		
		Rhône aménagé	119,50	125,35	42	20		
6	Baix-Le Logis Neuf	Rhône	126,30	128,00	40	20		
			128,00	135,495	30	20		
		Vieux Rhône	135,495	143,68	36	20		
		Rhône aménagé	135,495	144,050	38	20		
7	Montélimar	Rhône	143,68	148,00	34	20		
			148,00	152,64	37	20		
		Vieux Rhône	152,64	165,90	32	20		
		Rhône aménagé	152,64	165,90	38	20		
8	Donzère-Mondragon	Rhône	165,90	170,60	32	20		
		Vieux Rhône	170,60	185,00	34	20		
			185,00	191,50	38	20		
			191,50	200,50	34	20		
		Rhône aménagé	170,60	200,50	42	20		
9	Caderousse	Rhône	200,50	203,00	42	20		
			203,00	212,84	40	20		
		Vieux Rhône	212,84	218,30	40	20		
		Rhône aménagé	212,84	216,50	42	20		
10	Isère	Isère	5,264	4,3	36	20		
			4,3	2,5	40	20		
			2,5	1,2	42	20		
			1,2	0	40	20		

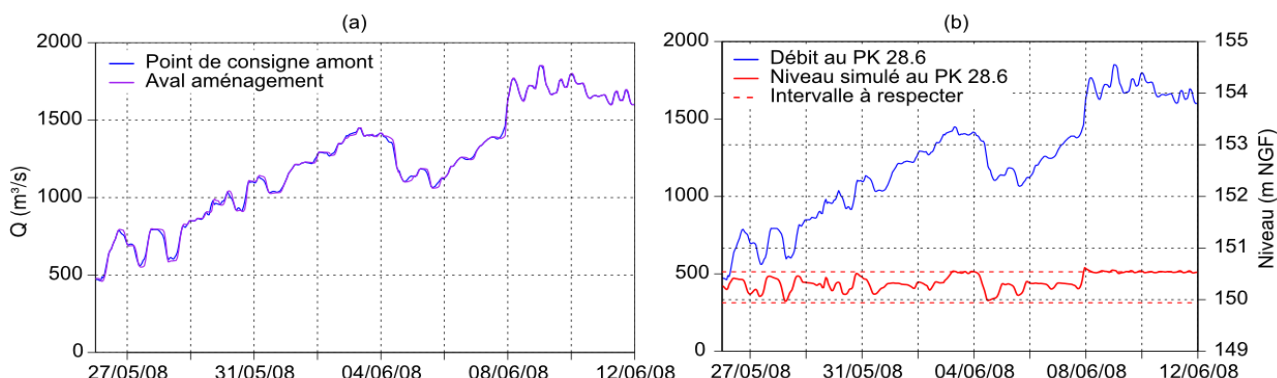
## 11.6. Affluents du Rhône modélisés

Cours d'eau	Nom station	Distance à la confluence [km]	Producteur	Délai de propagation [h]	Nom du nœud
Le Gier	Givors	3,1	DREAL	0,93	GIE
La Cance	Sarras	2,3	DREAL	0,64	CHP
La Galaure	Saint-Uze	5,5	DREAL	1,53	GAL
Le Doux	Colombier-le-Vieux	3,9	CNR	1,5	DOU
L'Isère	Beaumont-Montoux	5,1	CNR	-	CO1
L'Eyrieux	Pontpierre	10,99	CNR	1,02	EYR
La Drôme	Loriol	2,16	CNR	0,33	DRO
L'Ouvèze RD	Fond-du-Pouzin	2,02	CNR	0,35	OUV
Le Roubion	Montélimar	2,25	CNR	0,55	ROU
L'Ardèche	Sauze	11,3	CNR	1,05	PSE

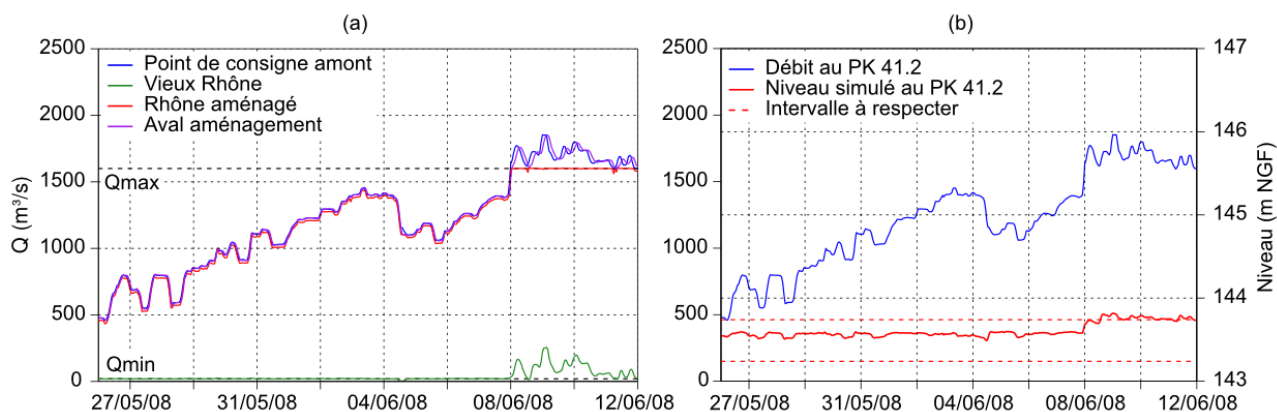
Modélisé comme un bief

Modélisé comme un apport ponctuel

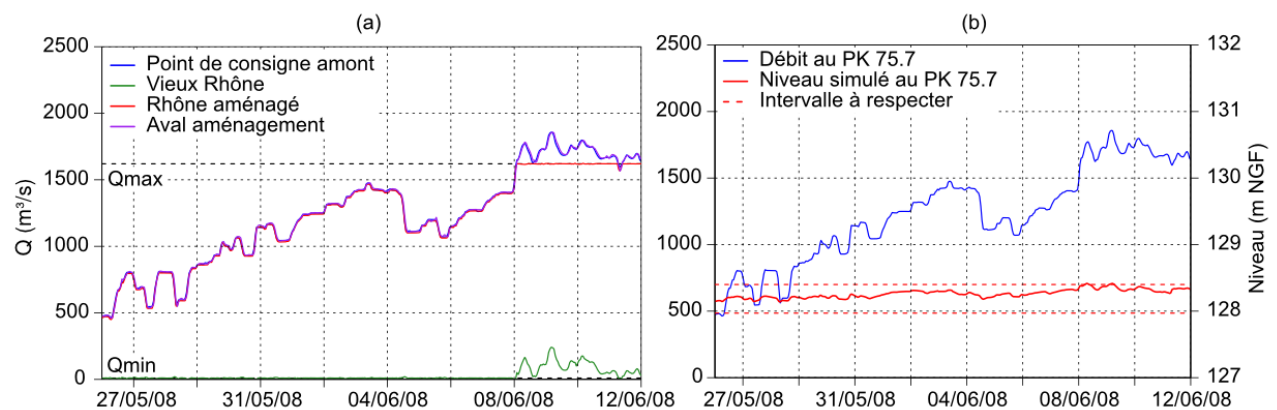
## 11.7. Modélisation de la crue de mai-juin 2008 - Respect des consignes d'aménagement



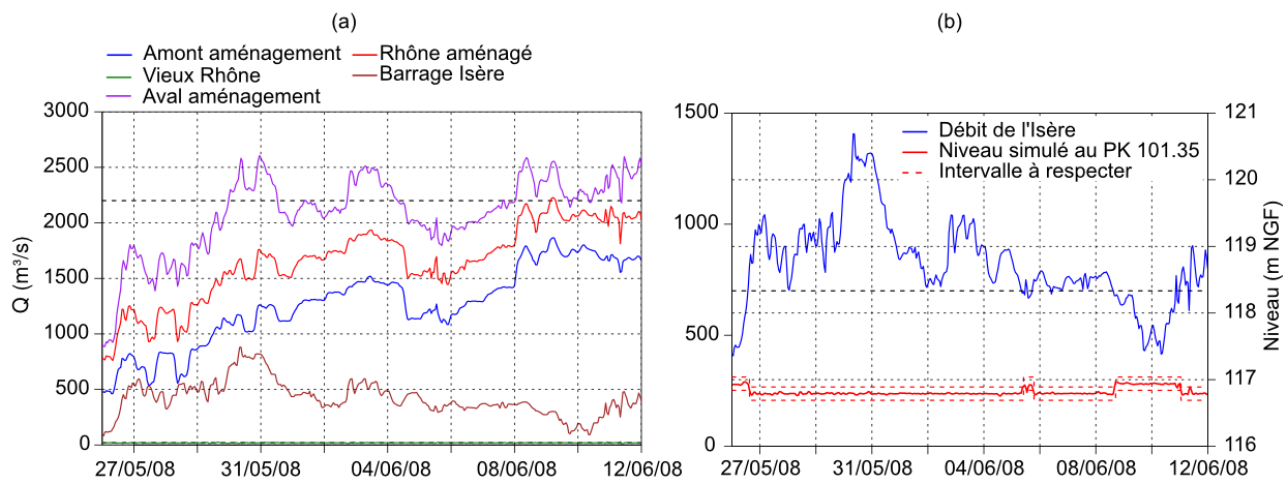
Résultats du modèle numérique au passage de l'aménagement de **Vaugris**. (a) Répartition des débits ; (b) Niveau de la retenue.



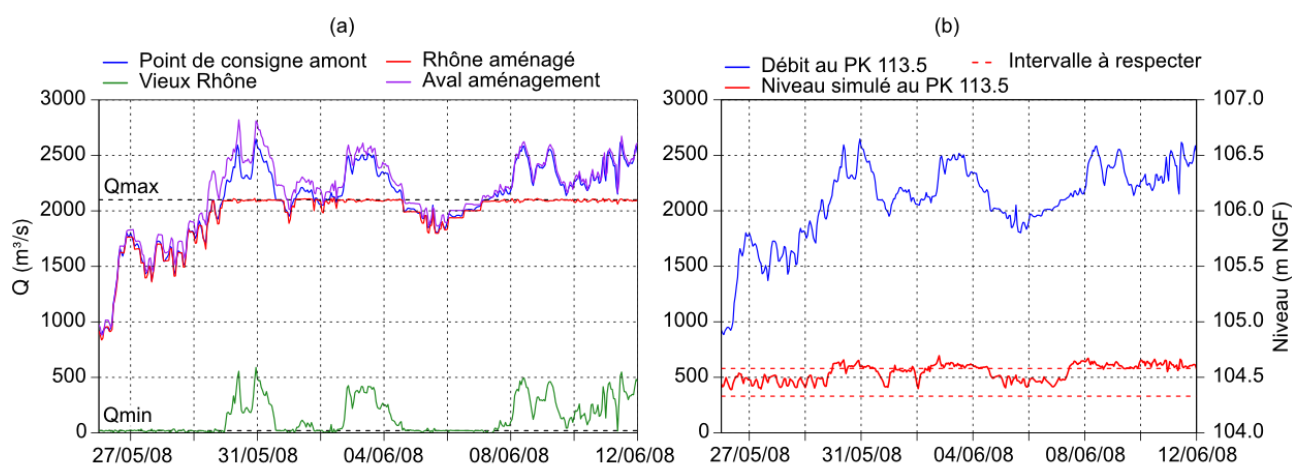
Résultats du modèle numérique au passage de l'aménagement de **Péage-de-Roussillon**. (a) Répartition des débits ; (b) Niveau de la retenue.



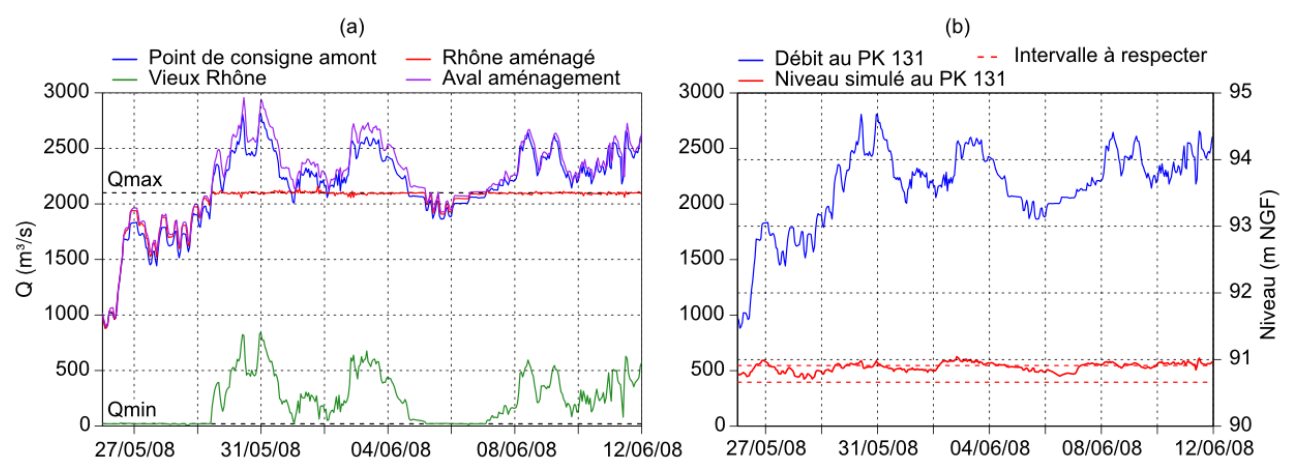
Résultats du modèle numérique au passage de l'aménagement de **Saint-Vallier**. (a) Répartition des débits ; (b) Niveau de la retenue.



Résultats du modèle numérique au passage de l'aménagement de **Bourg-lès-Valence**. (a) Répartition des débits ; (b) Niveau de la retenue.

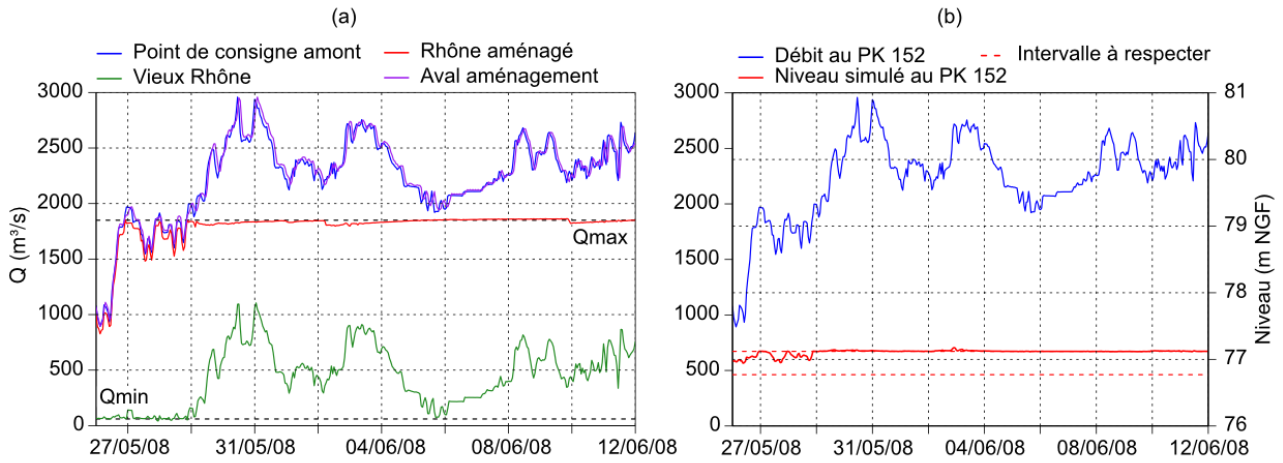


Résultats du modèle numérique au passage de l'aménagement de **Beauchastel**. (a) Répartition des débits ; (b) Niveau de la retenue.

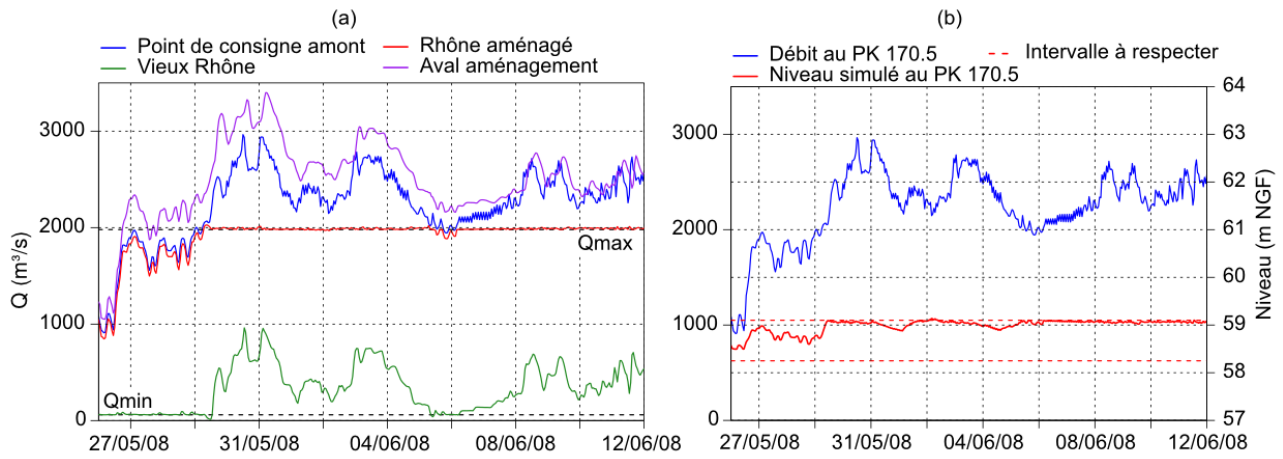


Résultats du modèle numérique au passage de l'aménagement de **Baix-Le Logis Neuf**. (a) Répartition des débits ; (b) Niveau de la retenue.



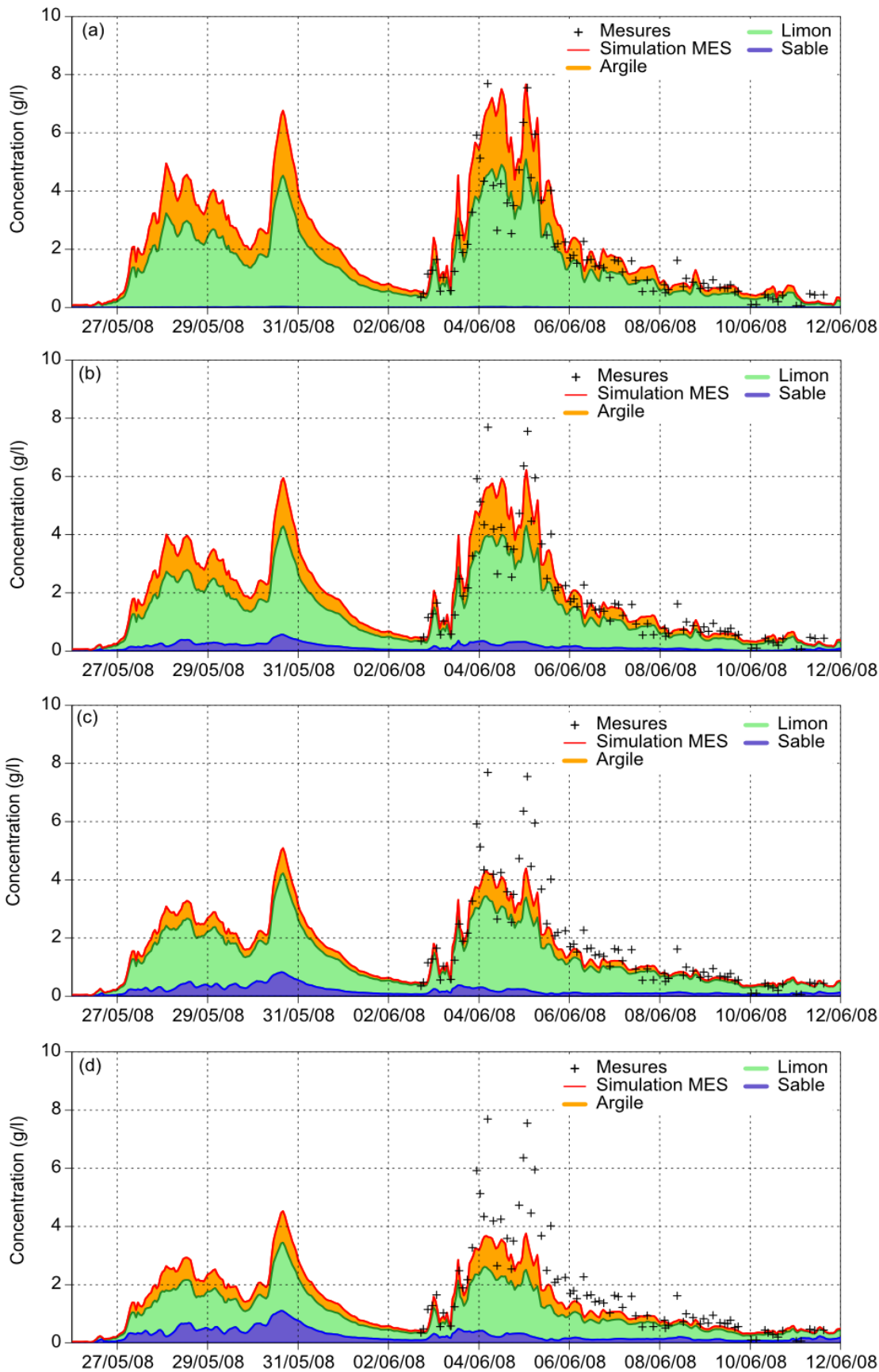


Résultats du modèle numérique au passage de l'aménagement de **Montélimar**. (a) Répartition des débits ; (b) Niveau de la retenue.



Résultats du modèle numérique au passage de l'aménagement de **Donzère-Mondragon**. (a) Répartition des débits ; (b) Niveau de la retenue.

## 11.8. Résultats à Pont-de-Valence des simulations avec les différents types de granulométrie.



Concentration en MES à Pont-de-Valence pour les différentes granulométries. (a) Granulométrie « Surface chasse », (b) Granulométrie « Fond chasse », (c) Granulométrie « Dépôt berge », et (d) Granulométrie « Garage écluse »

