



Morphodynamique d'un banc de galets en rivière aménagée lors de crues

M. Jodeau

► To cite this version:

M. Jodeau. Morphodynamique d'un banc de galets en rivière aménagée lors de crues. Sciences de l'environnement. Doctorat en Mécanique, Energétique, Génie civil, Acoustique, Université Lyon 1, 2007. Français. NNT: . tel-02590266

HAL Id: tel-02590266

<https://hal.inrae.fr/tel-02590266>

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : 220-2007

THÈSE

présentée pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON I

Ecole doctorale Mécanique, Energétique, Génie civil, Acoustique
Spécialité *Mécanique*

MORPHODYNAMIQUE D'UN BANC DE GALETS EN RIVIÈRE AMÉNAGÉE LORS DE CRUES

Préparée dans l'Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique, *Cemagref*

par

Magali JODEAU

Soutenue publiquement le 22 novembre 2007 à Lyon devant le jury composé de :

M. François MÉTIVIER	Professeur (IPGP)	Rapporteur
M. Juan Pedro MARTIN VIDE	Professeur (UPC)	Rapporteur
M. Michel ESTEVES	Directeur de Recherche IRD (LTHE)	Examineur
M. Jean-Pierre BOUCHARD	Chercheur (EDF)	Examineur
M. Bernard GAY	Professeur (UCBL)	Examineur
M. Michel LECLERC	Professeur (INRS-ete)	Directeur de thèse
M. André PAQUIER	Chercheur HDR (<i>Cemagref</i> Lyon)	Directeur de thèse

Remerciements

C E TRAVAIL DE THÈSE est le résultat de nombreuses interactions à Lyon, en Maurienne ou encore au Québec.

Je remercie en premier lieu André Paquier pour avoir accepté d'encadrer ce travail, pour sa très grande disponibilité et ses innombrables conseils.

Merci également à Michel Leclerc pour son accueil à l'INRS-ete et pour ses interventions pertinentes à différents moments du travail.

Je remercie les membres du Jury (Juan Pedro Martin Vide, François Métivier, Michel Estèves, Jean-Pierre Bouchard, Bernard Gay) pour avoir accepté d'évaluer mon travail et pour leurs remarques pertinentes : de nombreuses pistes restent encore à explorer.

Ce travail a été effectué dans l'équipe de recherche Hydrologie Hydraulique du Cemagref à Lyon. J'ai largement apprécié l'ambiance de travail, je souhaite donc remercier Jean-Michel Grésillon et Michel Lang, responsables successifs de l'unité, Anne Eicholz et Hélène Faurant pour une gestion administrative sans faille. Je remercie également Bernard Chastan pour ses interventions et conseils au cours du travail. L'équipe des documentalistes du Cemagref de Lyon a également contribué au travail par son efficacité.

Les campagnes de mesures n'auraient pu être effectuées sans les autorisations et les informations fournies par :

- EDF GEH Maurienne, EDF DTG, EDF CIH. Je remercie en particulier Jean-Michel Sicard, Jean-Louis Guyomar, Jean-Luc Gachet, Gilles Besse, Eric Laperrousaz, Alain Poirel ;
- le Syndicat de Pays de Maurienne. Je remercie en particulier Fabien Bordon ;
- la DDE Savoie ;
- la Société Routière du Tunnel du Fréjus ;

Les résultats présentés dans ce manuscrit ont largement bénéficié de la contribution :

- de l'équipe météorologique de l'unité de recherche Hydrologie Hydraulique. Je remercie ainsi

-
- sincèrement Guillaume Dramais pour le suivi quasiment intégral de toutes les campagnes de mesures, en particulier pour le dispositif LS-PIV et les campagnes de bathymétrie sportives sur les retenues de la Maurienne ; Thierry Fournier pour les campagnes de photographies aériennes effectuées avec le drone en 2006 ; Mickaël Lagouy pour les campagnes topographiques, les prélèvements et les filtrations de sédiments ; Fabien Thollet pour toutes les interventions en Maurienne, les granulométries laser et le suivi limnimétrique au quotidien ;
- de la DIREN Rhône-Alpes, je remercie en particulier Claire Godayer, Patrick Duby et Paul Cluzel pour les jaugeages au cours des chasses 2006 et 2007 ;
 - de l'UMR5600 et en particulier l'équipe d'Hervé Piégay pour les campagnes de photographies avec le drone et l'accueil à l'ENS-LSH pour le traitement des images : Jérôme Lejot pour ses conseils sur la préparation des campagnes mais aussi sur le traitement des images ; Anne-Julia Rollet pour ses conseils d'analyse granulométrique ; Marie-Laure Trémélo pour son aide lors des campagnes de photographie ; Bertrand Moulin pour les informations et les photos aériennes fournies au début de la thèse ;
 - du LTHE, en particulier Alexandre Hauet, Matthieu de Linares, Philippe Belleudy, Vincent Mano et Julien Nemery. Ces trois années ont été l'occasion d'échanger des idées, des données, merci beaucoup !
 - de tous les membres de l'équipe HH lors des campagnes de mesure des chasses 2005, 2006 & 2007 : Julien Hervé, Clément Thomas, Sébastien Proust, Karine Pobanz, Eric Sauquet, Sophie Chopart, Jérôme Le Coz, Sofiane Belaid, Michel Lang, André Paquier, Kamal El Kadi, Jean-Michel Grésillon, Benoît Camenen, Flora Branger, Edouard Morin, Maria Helena Ramos, Sonya Jankowsky et d'autres équipes du Cemagref, en particulier Arnaud Boivin, Nathalie Ball.

Je remercie également Benoît Camenen pour la relecture attentive du mémoire. Bon courage en Maurienne !

Un grand merci à Jérôme Le Coz pour avoir partagé beaucoup plus qu'un bureau : des idées, des programmes Matlab, de la bibliographie, des sources $\text{\LaTeX}$, des journées de terrain, des plaques de chocolat...

Ces trois années passées à Lyon ont aussi été l'occasion de partager des très bons moments au parc de la Tête d'Or, au badminton, au ski, au ciné, chez Madame Gamel, à Lisbonne, au Québec... Merci à tous ! Elodie, Eric, Anne-Laure, Jérôme & Flora (merci pour les confitures), Alexandre, Guillaume, Benjamin, Mathieu, Aurélien, Kamal, Jean-Phillipe, Benoît, Sandhya, Aurélie ... ça va être dur de partir...

Merci aussi aux copains de l'ENS restés à Lyon pour leurs thèses : Thibaut et Melisa (bonne route

aux Pays-Bas), Aurélien et Aurélien.

Je n'oublierai pas non plus les deux séjours à Québec, l'occasion de partager la vie d'une autre équipe de recherche pendant quelques mois mais aussi de faire de belles rencontres, merci à Maude et Christian pour votre accueil et les moments passés ensemble à Rivière-du-Loup, Québec, Lyon, Paris ou Fontainebleau.

J'espère que les aventures qui m'attendent seront l'occasion de prolonger les collaborations, et tous les bons moments de cette thèse.

Je remercie, enfin, ma famille pour ses encouragements, mes parents et mes frères pour leur soutien sans faille depuis le début de ces longues études et Sylvain pour avoir été là dans les moments difficiles, mais pas seulement.

Résumé

Morphodynamique d'un banc de galets en rivière aménagée lors de crues

Ce travail porte sur la morphodynamique d'un banc de galets en rivière de montagne aménagée, l'Arc (Maurienne, France). L'analyse s'appuie sur des observations de terrain détaillées menées lors de trois chasses de dégravage et d'une crue naturelle. Des méthodes de suivi innovantes ont été exploitées et améliorées (LS-PIV et analyse de photographies aériennes).

A partir des observations expérimentales, une description du transfert des matières en suspension dans le cours d'eau est proposée pour les chasses. Les modifications morphologiques du banc de galets sont interprétées sur les quatre épisodes de débit important, mais aussi sur les périodes inter-événements. Au cours du temps, un renforcement du banc est observé, malgré les effets d'érosion/dépôt antagonistes des événements, crue ou chasse, et des érosions marquées de chenaux de jonction transversaux à la surface du banc. Les dépôts de sédiments fins à la surface du banc ont été évalués.

D'autre part, des modélisations numériques bidimensionnelles avec le code RUBAR20TS ont été utilisées pour modéliser les écoulements hydro-sédimentaires pour une chasse et une crue naturelle. Les modifications morphologiques calculées pour une chasse sont qualitativement proches de celles observées.

Mots-clés

banc de galets ; chasse de dégravage ; mesures ; transport sédimentaire ; morphologie ; modélisation hydraulique et sédimentaire

Abstract

Gravel bar morphodynamics in an engineered river during high flow events

This work deals with the morphodynamics of a gravel bar in an engineered mountain stream, the River Arc (France). The analysis is based on field measurements during three reservoir releases and a natural high flow event. Original methods have been used and improved (LS-PIV and analysis of aerial pictures).

The evolution of suspended sediments along the river is described according to observations during flushing flows. Morphological changes of the studied gravel bar were analysed for the four events, and for in-between time periods. Over the time of the study, the bar was strengthened, even if the flushings and the flood induced opposite changes and transverse channels were deeply eroded. Deposits of fine sediments have been estimated on the entire surface of the gravel bar.

Moreover numerical modelling owing to RUBAR20TS has been performed to calculate flow fields and sediment transport during a flushing event and during the flood. Qualitatively, calculated morphological changes agree with measurements.

Keywords

gravel bar ; reservoir release ; measurements ; sediment transport ; morphology ; hydraulic and sedimentary modelling

Table des matières

Liste des acronymes	xx
1 Introduction	3
1.1 Formes en plan des cours d'eau	3
1.1.1 Quelques généralités	3
1.1.2 Les bancs alternés, une forme spécifique des rivières endiguées	4
1.1.3 Modèles analytiques et numériques de formation des bancs alternés	5
1.1.4 Résultats expérimentaux, observations in situ et lois empiriques	7
1.2 Sédiments fins dans le contexte fluvial, végétalisation des bancs de galets	10
1.3 Morphologies des rivières aménagées	13
1.3.1 Aménagements du lit et conséquences	13
1.3.2 Effets des aménagements hydroélectriques : régime hydraulique, transport solide et morphologie à long terme	14
1.3.3 Effets des chasses hydrauliques	14
1.4 Démarche scientifique et objectifs	15
1.4.1 Problématique, objectifs et choix expérimentaux	15
1.4.2 Plan du mémoire	17
I Méthodes expérimentales	19
2 Présentation du site d'étude	21
2.1 L'Arc : une rivière fortement aménagée	21
2.1.1 Situation géographique et morphologie générale de la rivière	21
2.1.2 Régime hydrologique	23
2.1.3 Aménagement du lit	23
2.1.4 Aménagements hydroélectriques	24
2.1.5 Contexte institutionnel et actions en cours	24
2.2 Site d'étude	25
2.2.1 Caractéristiques des sites expérimentaux principal et secondaire	25

TABLE DES MATIÈRES

2.2.2	Sous-unités morphologiques du banc	26
2.2.3	Evolution morphologique du secteur d'étude depuis 1997	27
2.3	Evénements	28
2.3.1	Des chasses hydrauliques annuelles	29
2.3.2	Une crue naturelle de faible amplitude, automne 2006	31
2.4	Synthèse du chapitre	31
3	Mesures morphologiques	35
3.1	Topographie	35
3.1.1	Outils et protocole de mesure	35
3.1.2	Méthode d'interpolation	39
3.1.3	Incertitudes locales des Modèles Numériques de Terrains	40
3.1.4	Application au bilan sédimentaire	43
3.2	Mesures granulométriques de surface	45
3.2.1	Granulométrie des sédiments grossiers	45
3.2.2	Granulométrie des sédiments fins	47
3.3	Imagerie aérienne haute résolution	49
3.3.1	Matériel et mise en oeuvre	49
3.3.2	Application au suivi morphologique	50
3.3.3	Application à l'analyse granulométrique : suivi des surfaces de dépôt de sédiments fins	52
3.4	Bathymétrie des retenues	57
3.4.1	Dispositif et mesures	57
3.4.2	Post-traitement des données aDcp	57
3.4.3	Correction des perturbations magnétiques	59
3.4.4	Tri des données et interpolation	60
3.5	Synthèse du chapitre	62
4	Mesures hydrométriques	63
4.1	Mesure des hauteurs d'eau	63
4.1.1	Capteurs et limites	63
4.1.2	Station limnimétrique permanente	65
4.1.3	Mesures en cours d'évènements	66
4.2	Mesure de vitesse, jaugeage et estimation des débits	68
4.2.1	Jaugeages à faible et fort débit sur le site d'étude	68
4.2.2	Relation entre la vitesse de surface et la vitesse moyennée sur la verticale	68

4.2.3	Estimation du débit au barrage aval	70
4.2.4	Mesures de vitesse par la technique LS-PIV	70
4.2.4.1	Installation expérimentale	71
	Caméra vidéo et mât	71
	Ensemencement de l'écoulement en traceurs artificiels	72
	Sites de suivi LS-PIV	73
4.2.4.2	Amélioration de l'algorithme de traitement des données	73
	Rectification géométrique : GRPs et variation d'altitude de la surface libre	73
	Traitement des données LS-PIV	75
	Seuil d'intensité : traceurs et vagues stationnaires	76
4.2.4.3	Application au calcul du débit sur le site d'étude	77
4.3	Mesure des concentrations en MES	81
4.4	Synthèse du chapitre	82
II	Modifications morphologiques du lit	85
	Introduction de la partie 2	87
5	Transfert de MES et évolutions morphologiques pendant les chasses hydrauliques	89
5.1	La chasse hydraulique 2006, un suivi détaillé du site expérimental principal	89
5.1.1	Apports hydrosédimentaires : hydrogramme, signal de MES et bathymétries des retenues	90
5.1.2	Observations hydrométriques	97
5.1.3	Modifications topographiques	102
5.1.4	Modifications de la granulométrie de surface	104
5.1.5	Dépôts de sédiments fins	106
5.1.6	Synthèse des observations sur le site principal pendant la chasse 2006	109
5.2	Observations sur le site secondaire pendant la chasse 2006	111
5.2.1	Modifications topographiques	112
5.2.2	Modifications de la granulométrie de surface	114
5.2.3	Synthèse des observations sur les deux sites	115
5.3	Transfert de MES et évolutions topographiques sur les chasses 2005 et 2007 : des tendances similaires ?	115
5.3.1	Hydrogrammes et signaux de MES	116
5.3.2	Modifications topographiques	118

5.4	Synthèse des observations pendant les chasses hydrauliques	120
6	Effets d’une crue naturelle, évolutions inter-événementielles et annuelles	123
6.1	Observations sur la crue de l’automne 2006	123
6.1.1	Hydrogramme et apport en sédiments	123
6.1.2	Modifications morphologiques	125
6.2	Evolutions inter-événementielles	125
6.3	Evolutions annuelles	130
	Conclusion de la partie 2	133
III	Modélisation numérique hydro-sédimentaire	137
7	Modélisation numérique des écoulements liquides et solides	139
7.1	Modélisation numérique : présentation et objectifs	139
7.1.1	Hydrodynamique	139
7.1.2	Transport solide	140
7.1.2.1	Transport par charriage	141
7.1.2.2	Transport par suspension	142
7.1.3	Objectifs de la modélisation	143
7.2	Hydrodynamique	143
7.2.1	Maillage et frottements	143
7.2.2	Conditions aux limites et conditions initiales	145
7.2.3	Remarques sur le régime d’écoulement	145
7.2.4	Comparaison avec les observations hydrodynamiques	146
7.3	Interprétation des changements morphologiques à partir de l’hydrodynamique : une analyse préliminaire	155
7.3.1	Analyse pour l’événement : chasse 2006	156
7.3.2	Analyse pour la crue naturelle (automne 2006)	160
7.3.3	Synthèse de l’analyse des calculs hydrodynamiques	165
7.4	Modélisation du transport solide sur le site expérimental principal	165
7.4.1	Evolution morphologique au cours de la chasse 2006	165
7.4.1.1	Modélisation du transport par charriage des sédiments grossiers . . .	165
7.4.1.2	Modélisation du transport par suspension des sédiments fins	167
7.4.2	Evolution morphologique au cours de la crue naturelle (automne 2006)	170
7.4.3	Synthèse des résultats de modélisation du transport solide sur le site expérimental principal	170

7.5	Résultats sur le site secondaire, chasse 2006	171
7.6	Synthèse du chapitre modélisation numérique	173
 Conclusion générale et perspectives		 175
 Annexes		 185
A	Annexe : Aménagements hydroélectriques de l’Arc	185
B	Annexe : Campagnes topographiques sur le site expérimental principal	187
C	Annexe : Paramètres de rectification des images LS-PIV	195

Liste des tableaux

2.1	Retenues de l'Arc moyen concernées par les chasses hydrauliques annuelles	29
3.1	Campagnes topographiques	36
3.2	Classification granulométrique de Wentworth (1922)	46
3.3	Classification granulométrique	48
4.1	Estimation de débits	80
5.1	Récapitulatif des observations sur les repères fixes pour la chasse 2005	119
5.2	Bilans sédimentaires pour les chasse 2006 et 2007	121
6.1	Bilans sédimentaires sur le site expérimental principal	134

Table des figures

1.1	Exemple de formes de cours d'eau	4
1.2	Secteurs de rivière à bancs alternés	5
1.3	Courbe d'existence des bancs alternés d'après Jaeggi (1984)	7
1.4	Granulométrie des sédiments sur un banc de galets	9
1.5	Végétation et banc de galets	12
2.1	Localisation de l'Arc et de son bassin versant	22
2.2	Profil longitudinal de l'Arc	23
2.3	Photographies des sites expérimentaux	25
2.4	Sous-unités morphologiques d'un banc	26
2.5	Photographies aériennes du site d'étude	28
2.6	Hydrogramme estimé au site d'étude sur la période 2005-2006	29
2.7	Hydrogramme estimé pour la Chasse 2006	30
2.8	Retenue de Saint-Martin-la-Porte, chasse 2007	33
3.1	Déploiement des campagnes topographiques	37
3.2	Levé topographique sur le site principal	38
3.3	Ecarts des coordonnées des points de contrôle topographiques	39
3.4	Définition de sections en travers et de lignes directrices	40
3.5	Schéma géométrique pour l'estimation de l'incertitude	41
3.6	Estimation de l'incertitude locale sur l'exemple bav6	43
3.7	Exemples de repères fixes installés dans le lit	43
3.8	Gabarit granulométrique	47
3.9	Courbes granulométriques pour la classification finale du TAB. 3.3	48
3.10	Granulométrie des sédiments fins par tamisage	49
3.11	Comparaison des Granulométries par tamis ou granulomètre laser	49
3.12	Campagnes de photographies aériennes	50
3.13	Exemple d'états de surface du lit	52
3.14	Schéma d'identification des surfaces de sédiments fins	55
3.15	Détection des surfaces de sédiments fins, exemple	56

TABLE DES FIGURES

3.16 Retenues	58
3.17 Mesure de la bathymétrie des retenues	58
3.18 Recalage des trajectoires de l'aDcp	61
3.19 Bathymétrie de la retenue de Pont-des-Chèvres	61
4.1 Station limnimétrique permanente	65
4.2 Courbes de tarage	66
4.3 Chronique de débit estimée sur le site	67
4.4 Stations limnimétriques	67
4.5 Jaugeages sur le site d'étude	69
4.6 Profils devitesse verticaux adimensionnels	70
4.7 Schéma de l'installation expérimentale LS-PIV	72
4.8 Exemples d'images avant et après rectification	74
4.9 Motifs stationnaires et traceurs artificiels	77
4.10 Comparaison des vitesses calculées avec ou sans seuillage	78
4.11 Calculs de débits	79
4.12 Test d'homogénéité de la concentration de MES	82
4.13 Hydrogramme estimé au site d'étude et campagnes topographiques	87
5.1 Chasse 2006, hydrogramme et MES	91
5.2 Modèle de transfert de MES	93
5.3 Bathymétrie des retenues	96
5.4 Dépôts dans la partie aval des retenues	96
5.5 Dispositif expérimental sur le site principal pour la chasse 2006	98
5.6 Suivi limnimétrique au cours de la chasse 2006	99
5.7 Champs de vitesse LS-PIV SITE D	100
5.8 Champs de vitesse LS-PIV SITE C	101
5.9 Profils topographiques	103
5.10 Evolution topographique, chasse 2006	104
5.11 Evolution de la granulométrie de surface pendant la chasse 2006	105
5.12 Dépôts de sédiments fins	107
5.13 Granulométrie des sédiments fins, chasse 2006	109
5.14 Photographies du site expérimental secondaire	112
5.15 Topographie du site expérimental secondaire	113
5.16 Evolution topographique du site expérimental secondaire	114
5.17 Granulométrie du site expérimental secondaire	114
5.18 données hydrométriques chasses 2005 et 2007	116

5.19	Modèle de transfert des MES pour les trois chasses	117
5.20	Evolution topographique au cours de la chasse 2007	120
6.1	Hydrogramme et MES pour la crue naturelle 2006	124
6.2	Evolution topographique crue naturelle	124
6.3	Evolution des chenaux de jonction au cours de la période I2	127
6.4	Evolution topographique du site expérimental principal au cours de I1	128
6.5	Evolution topographique du site expérimental principal au cours de I2	128
6.6	Evolution topographique du site expérimental principal au cours de I1-2	129
6.7	Evolution topographique du site expérimental principal au cours de I3	129
6.8	Hydrogramme estimé au site d'étude et dates des campagnes topographiques	130
6.9	Evolution topographique du site expérimental principal au cours de l'année A1	131
6.10	Evolution topographique du site expérimental principal au cours de l'année A2	131
6.11	Evolution topographique du site expérimental principal au cours des années A1 et A2	132
7.1	Diagramme de Shields	142
7.2	Maillages de calcul	144
7.3	Conditions limites amont	146
7.4	Régime d'écoulement	146
7.5	Comparaison des cotes calculées et mesurées	147
7.6	Comparaison dans le plan horizontal des mesures de vitesse et des calculs dans la topographie avant la chasse 2006	149
7.7	Comparaison dans le plan horizontal des mesures de vitesse et des calculs dans la topographie après la chasse 2006	150
7.8	Comparaisons sur des sections des vitesses mesurées et calculées dans une configuration avant chasse	152
7.9	Comparaisons sur des sections des vitesses mesurées et calculées dans une configuration après chasse	153
7.10	Contrainte et modification morphologique	156
7.11	Contrainte et modification morphologique	157
7.12	Modification morphologique des zones granulométriques, chasse 2006	158
7.13	Evolution de la contrainte, chasse 2006	159
7.14	Hydrogramme de crue et temps d'analyse	160
7.15	Paramètre de Shields, crue 2006	162
7.16	Contrainte et modification morphologique des zones granulométriques, crue 2006	163
7.17	Evolution de la contrainte, crue 2006	164
7.18	Evolution morphologique calculée, chasse 2006	166

TABLE DES FIGURES

7.19	Calcul du transport solide par charriage, effet de la distance de chargement	168
7.20	Modélisation du transport par suspension	169
7.21	Modélisation du transport par charriage pendant la crue 2006	170
7.22	Modélisation du transport solide sur le site expérimental secondaire	172
A.1	Aménagements hydroélectriques de l’Arc	185
B.1	MNT bav3, campagne topgraphique du 01-09-2005	188
B.2	MNT bav4, campagne topgraphique du 29-03-2006	189
B.3	MNT bav5, campagne topgraphique du 08-06-2006	190
B.4	MNT bav6, campagne topgraphique du 05-07-2006	191
B.5	MNT bav7, campagne topgraphique du 05-10-2006	192
B.6	MNT bav8, campagne topgraphique du 01-06-2007	193
B.7	MNT bav9, campagne topgraphique du 06-06-2007	194

Liste des acronymes

aDcp : acoustic Doppler current profiler

Cemagref : Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement, anciennement CEntre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

Cetmef : Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales

EDF : Electricité de France

ENTPE : Ecole Nationale des Travaux publics de l'Etat

DDE : Direction Départementale de l'Equipement

dGPS : differential Global Positionning System

DIREN RA : Direction Régionale de l'Environnement Rhône-Alpes

GLONASS : acronyme russe de GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (Système GLObal de NAvigation par Satellite)

GRP : Ground Reference Point

IGN : Institut Géographique National

IIHR : Iowa Institute of Hydraulic Research

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

LS-PIV : Large Scale Particle Image Velocimetry

LTHE : Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement

MES : Matière En Suspension

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NGF : Nivellement Général de la France

OTHU : Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine

RTM : Restauration des Terrains de Montagne

RTK : Real Time Kinematic (GPS)

UMR 5600 : est désignée sous ce nom l'Unité Mixte de Recherche CNRS 5600 et plus particulièrement l'équipe des géographes du thème Hydrosystèmes fluviaux

Introduction

1

Introduction

1.1 Formes en plan des cours d'eau

1.1.1 Quelques généralités

Les formes des cours d'eau résultent d'un ensemble d'interactions entre l'écoulement liquide et les matériaux en place dans le lit de la rivière. En fonction des conditions géologiques, climatiques et anthropiques, de la présence de végétation, le cours d'eau adopte une géométrie qui lui permet d'évacuer les débits liquide et solide imposés en entrée du système (Alabyan et Chalov, 1998). Si un ajustement autour d'une géométrie moyenne est observé, le système est dit en équilibre dynamique (Degoutte, 2003). Un déséquilibre peut résulter de contraintes naturelles ou anthropiques, le système tendant alors à adopter progressivement la même ou une autre géométrie d'équilibre.

De sa source à son estuaire, un cours d'eau rencontre des conditions variables de pente, substrat, climat, végétation, sa forme évoluant en conséquence. Dans la partie amont, le torrent a une forte pente et un tracé rectiligne ; plus à l'aval sont observés successivement : un tracé en tresses, i.e. en chenaux instables séparés par des bancs, un tracé divaguant à bras multiples sinueux et enfin un tracé en méandres (FIG 1.1). Généralement les rivières de vallée, directement à l'aval des bassins versants montagneux, ont un tracé en tresses, ou divaguant ; et dans le cas des rivières endiguées, des motifs de bancs alternés se forment.

Deux modes de transport des sédiments sont distingués : la suspension et le charriage. La suspension concerne des particules fines, donc légères, qui sont maintenues dans le corps de l'écoulement, sans contact fréquent avec le lit, sous l'effet des fluctuations verticales turbulentes de la vitesse du liquide. Le charriage désigne le transport sur le fond d'éléments non cohésifs. L'effet des forces hydrodynamiques exercées par l'écoulement se traduit sur les particules par un mouvement de roulement, de glissement, ou de saltation (petits sauts successifs). Le transport solide par charriage concerne les particules grossières, typiquement de diamètre supérieur à 0.5 mm. Dans le cas de la suspension, le lit et l'écoulement sont facilement délimitables ; pour le charriage, il y a constamment des échanges entre le lit et l'écoulement. La distinction entre charriage et suspension pour un même écoulement



FIG. 1.1 – Exemple de formes de cours d’eau : (a) tresses sur la rivière la Leona (Argentine) ; (b) méandres dans les marais du delta de l’Okavango (Botswana).

Photographies© Yann Arthus-Bertrand (2002). www.yannarthusbertrand.org.

liquide dépend de la taille des particules, mais cette distinction n’est pas toujours aisée. Il existe le plus souvent un continuum entre les deux modes de transport.

Le transport solide résulte d’interactions entre la phase liquide et la phase solide. Ces interactions sont des actions constantes de l’écoulement sur la morphologie des cours d’eau et, réciproquement, des formes du lit sur la nature de l’écoulement.

Les deux modes de transport ne jouent pas un rôle de la même importance vis à vis des modifications morphologiques du lit de la rivière. Quand les deux modes coexistent, c’est souvent le charriage qui gouverne les évolutions majeures de la morphologie. Souvent, les sédiments fins, transportés en suspension, ont peu d’influence sur la morphologie des cours d’eau. Ils peuvent cependant avoir des effets sur la stabilité des berges, sur la consolidation des ensembles de graviers du lit par colmatage et sur la végétalisation du lit.

1.1.2 Les bancs alternés, une forme spécifique des rivières endiguées

Les bancs alternés sont de grandes ondulations du fond observées sur les tronçons de rivière rectilignes. Ces formes se caractérisent plus particulièrement par une succession alternée de zones d’érosion et de dépôt avec des fronts diagonaux par rapport à l’axe de la rivière (Tubino *et al.*, 2000). De façon générale, les bancs peuvent s’organiser en motifs alternés (FIG 1.2), centraux ou multiples en fonction de leur disposition sur une ou plusieurs rangées. Ces formes se distinguent des rides, dunes et antidunes par leur grande taille. Les longueurs caractéristiques des motifs sont une longueur d’onde de l’ordre de grandeur de la largeur du canal, et une hauteur de l’ordre de la hauteur d’eau (Lunt et Bridge, 2004).

Les chenaux rectilignes n’existent pas dans la nature, ce qui suggère qu’ils ne correspondent pas à un équilibre de géométrie stable (Parker *et al.*, 1975). Ainsi, lorsque les berges sont érodables, les



FIG. 1.2 – Exemples de secteurs de rivière avec des bancs alternés plus ou moins végétalisés. De haut en bas : l’Isère (Sainte-Hélène-sur-Isère, 73), la Drôme dans la réserve naturelle des Ramières (26), le Galéizon (amont d’Alès, 30). Photographies©IGN (<http://www.geoportail.fr>).

bancs alternés constituent souvent une phase transitoire vers des méandres ou des tresses avec une érosion progressive des berges (Jaeggi, 1987).

1.1.3 Modèles analytiques et numériques de formation des bancs alternés

La formation des bancs résulte d’interactions entre les matériaux du lit et les flux liquide et solide. Les conditions de formation des bancs ont été explorées par de nombreux travaux théoriques (Callander, 1969; Blondeaux et Seminara, 1985; Colombini *et al.*, 1987; Schielen *et al.*, 1993; Seminara, 1998; Federici et Seminara, 2003; Hall, 2004).

Parmi d’autres, Schielen *et al.* (1993) proposent une estimation des conditions de formation des bancs alternés sur la base d’un certain nombre d’hypothèses : un canal rectiligne infiniment long avec une pente uniforme et faible, de largeur constante large devant la hauteur d’eau, composé de sédiments non cohésifs, de berges non érodables, alimenté par un débit liquide permanent. Le transport des sédiments se fait majoritairement par charriage, l’intensité et la direction du transport solide ne sont pas corrigées par une prise en compte de la pente transversale. L’approche se place aussi à faible nombre de Froude et dans un cadre quasi-statique, i.e. le flux liquide s’adapte instantanément aux évolutions morphologiques.

Le système d’équations regroupant les équations de Saint Venant, l’équation de continuité de la

masse solide et une équation de fermeture pour le débit solide est résolu autour de la solution du régime permanent uniforme avec l'ajout d'une petite perturbation. Cette résolution linéaire des équations donne les conditions pour lesquelles des modifications du flux liquide ou solide engendrées par une petite perturbation d'un état stable du fond conduisent à une amplification. Les conditions de formation des formes sont fonctions du paramètre adimensionnel $R = B/D$, rapport largeur sur profondeur : les canaux très étroits ($R < R_c$) ne permettent pas la formation de bancs, les canaux de taille moyenne ($R \geq R_c$) sont susceptibles de développer les formes, et les canaux très larges ($R > pR_c$, $p \geq 2$) peuvent développer des bancs multiples. Le résultat s'écrit sous la forme d'ondes progressives dans la direction du chenal.

Les expressions obtenues avec la résolution linéaire sont valides seulement pour le début du développement des perturbations, lorsque leur amplitude reste très faible devant les grandeurs caractéristiques du canal. Elles permettent d'évaluer la longueur d'onde et la célérité des formes du fond. Une analyse non linéaire est menée pour des valeurs du rapport largeur/profondeur très proches du rapport critique permettant d'établir la hauteur des bancs.

Blondeaux et Seminara (1985) prennent en compte la composante transverse du transport solide due aux contraintes transversales et un effet gravitationnel. Leurs résultats montrent un effet stabilisateur sur la formation des bancs alternés. Tubino *et al.* (2000) considèrent un transport solide majoritairement par suspension. La valeur plus grande du paramètre de Shields a un effet déstabilisant et l'effet stabilisateur de la gravité est également diminué ; une compétition des processus non-linéaires en résulte et une agrégation de plusieurs modes instables est aussi possible.

En régime non permanent (Tubino, 1991), la réponse des bancs à l'hydrogramme dépend d'un paramètre fonction du temps caractéristique du caractère transitoire de l'écoulement et le temps caractéristique de croissance des bancs. Si les deux temps sont du même ordre de grandeur, l'évolution des bancs est fortement affectée par le caractère transitoire de l'écoulement.

Dans le cas d'un ensemble de sédiments de granulométrie variable (Lanzoni et Tubino, 1999), les résultats théoriques montrent que l'hétérogénéité des sédiments conduit à une diminution du taux de croissance et de la célérité des bancs, la longueur d'onde étant aussi réduite. Les sédiments les plus grossiers s'accumulant en tête de banc empêchent la migration des bancs vers l'aval.

D'autres travaux théoriques, fondées sur une approche qualitative du développement de la turbulence (Yalin et Ferreira da Silva, 2001; Ferreira da Silva, 2006) ou sur la théorie du régime (Ramez, 2005), proposent des évaluations des caractéristiques des bancs.

Les développements théoriques fournissent des éléments pour l'étude des bancs, mais ils sont souvent limités à un cadre restreint par les hypothèses de travail et les limites de résolution analytique.

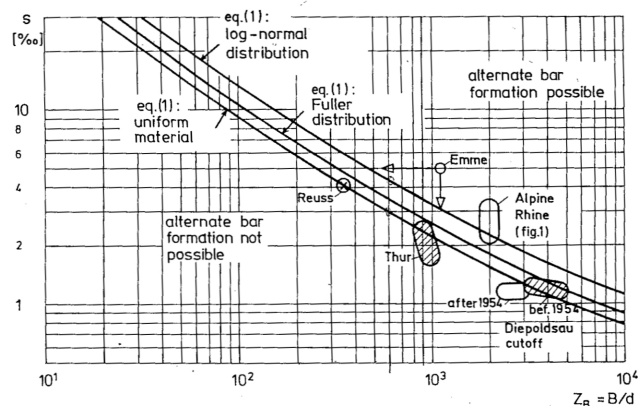


FIG. 1.3 – Courbe indiquant la pente minimale pour la formation des bancs alternés et comparaison avec quelques rivières suisses, d'après Jaeggi (1984).

La complexité et les interactions entre les phénomènes à considérer (géométrie, modes de transport, tri granulométrique...) justifient l'utilisation de modèles numériques pour prendre en compte un nombre maximal de variables.

Des modèles numériques ont été développés pour simuler la formation et le mouvement des bancs. Ces modèles sont fondés sur les mêmes équations que les modèles théoriques avec plus ou moins d'hypothèses simplificatrices. Souvent, le calcul d'évolution du lit est découplé des calculs hydrauliques, en considérant que le temps caractéristique d'évolution du lit est largement supérieur au temps caractéristique d'écoulement liquide. Les modèles ont permis de prendre en compte : l'effet de la pente locale, l'effet d'un écoulement fluvial ou torrentiel (Bernini *et al.*, 2003) ; des effets non-linéaires (Defina, 2003) ; les érosions de berges (Nagata *et al.*, 2000) ; des variations de la largeur du canal (Repetto *et al.*, 2002).

1.1.4 Résultats expérimentaux, observations in situ et lois empiriques

Les développements théoriques et numériques ci-dessus supposent un certain nombre d'hypothèses qui s'écartent des situations rencontrées dans la nature. Aussi des modèles expérimentaux ont été utilisés pour vérifier les résultats mathématiques (Garcia et Ninõ, 1994), pour établir des comparaisons avec les situations naturelles, et trouver des paramètres empiriques de description des bancs alternés et des conditions de leur formation.

A partir de résultats d'expériences en canal, Jaeggi (1984) a établi une relation entre la pente de la rivière, S , et le rapport largeur sur diamètre médian des sédiments, $Z_B = B/D_m$, autorisant l'existence de bancs alternés :

$$S = \exp(1.07Z_B^{0.15} + M)/12.9Z_B \quad (1.1)$$

où M est un paramètre empirique variant entre 0.34 et 0.7 en fonction de la composition granulomé-

trique des sédiments. Dans une géométrie de rivière donnée, si la pente est inférieure à celle donnée par l'équation (1.1), des bancs alternés ne pourront pas se développer. Toutes les rivières à bancs alternés étudiées par Jaeggi (1984) respectent le critère établi (FIG 1.3). En outre, les vitesses de migration observées sur le Rhin (à l'amont) sont de l'ordre de 150 m jusqu'à 400 m par an.

Ikeda (1984) propose des formules empiriques pour :

- la longueur d'onde : $\lambda = 5\sqrt{\frac{BD}{C_f}}$ pour $Fr < 0.8$ et $\lambda = 181BC_f \left(\frac{B}{D}\right)^{0.55}$ pour $Fr \geq 0.8$
- la hauteur des bancs : $H_B/D = 1.51C_f \left(\frac{B}{D}\right)^{1.45}$ pour $6 < \frac{B}{D} < 40$

où B est la largeur moyenne, D la hauteur moyenne, $C_f = gDS/U^2$ un coefficient de frottement, Fr le nombre de Froude. Ces formules sont utilisées par Del Giudice *et al.* (2004) pour prédire une profondeur d'érosion H_{sd} , définie comme la différence entre l'altitude moyenne du lit et l'altitude du fond. La comparaison avec des données de rivière américaines donne $H_{sd} = 0.76B/20$.

Des essais en canal expérimental montrent des ségrégations latérale et transversale des sédiments sur les bancs : les sédiments sont plus fins vers l'aval et en s'éloignant de l'écoulement vers le bord (Parker *et al.*, 1975; Bluck, 1982; Diplas, 1994; Lane, 2000) (FIG 1.4). Les sédiments fins sont aussi déposés surtout à l'aval et dans les mouilles (Diplas, 1994). Les résultats expérimentaux de Miwa *et al.* (2004) et Lane (2000) montrent aussi qu'avec une granulométrie étendue, la hauteur des bancs est inférieure à celle obtenue pour une granulométrie uniforme, car dans les zones d'écoulement, l'érosion est limitée par un grossissement des sédiments (tri granulométrique). Avec des sédiments de granulométrie bimodale, un tri granulométrique se met en place (Bertoldi *et al.*, 2002). Des expériences de traçage des particules en canal (Pyrce et Ashmore, 2003a, 2005) montrent que les sédiments commencent par se déposer en tête de banc, puis lors de la phase de croissance du banc, le transport des sédiments sur le banc diminue pour se concentrer dans le talweg et les dépôts ont lieu en bord de banc. En pente prononcée (0.03%), Lisle *et al.* (1991) montrent aussi que les particules grossières s'accumulent en tête de banc, empêchant son érosion et la progression du banc vers l'aval. Les mesures en rivière de Lisle et Madej (1992) mettent en évidence le tri granulométrique et le pavage s'opérant sur les bancs de galets. Hassan *et al.* (1991) observent un stockage des sédiments dans les bancs (traçage de particules). Pyrce et Ashmore (2003b) soulignent les effets de la morphologie sur les distances de transport des particules. Les bancs n'influencent pas systématiquement les distances de parcours, en imposant par exemple une distance caractéristique corrélée à la taille des bancs, mais ils exercent cependant un effet sur le transport en modifiant la forme des distributions statistiques des distances de parcours. En outre, à partir d'expériences en canal, Lisle *et al.* (1993) ont étudié la réponse d'un ensemble de bancs alternés à une diminution de l'apport solide. Ils observent un grossissement de la granulométrie des sédiments de surface, un rétrécissement de la zone de transport solide, une accumulation des particules grossières en tête de

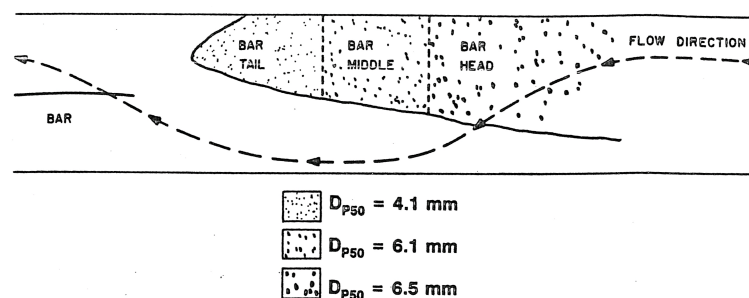


FIG. 1.4 – Vue en plan de la granulométrie des sédiments sur un banc, ségrégation longitudinale, d'après Diplas (1994).

banc et un affinement dans les zones inactives.

Les suivis de secteurs à bancs alternés in situ sont rares, et ils se focalisent souvent sur les mécanismes de formation des formes.

Landwehr et Rhoads (2003) analysent l'évolution historique d'un petit canal artificiel aux États-Unis suite à sa canalisation au début du XX^e siècle. Sa forme initiale correspond à un large fossé trapézoïdal. Suite à cet aménagement, des bancs latéraux se sont formés, ont eu une phase de croissance et se sont ensuite stabilisés. Les résultats de cette étude proviennent essentiellement de l'analyse de photos aériennes ou terrestres depuis 1940 et d'analyses sédimentologiques des bancs. Le premier stade de croissance des bancs est constitué d'un dépôt de sables grossiers et de petits graviers. Lorsque leur surface est recouverte de végétation permettant à une petite couche de sédiments en suspension de se déposer, les bancs sont en phase de stabilisation. Le dernier stade d'évolution est dominé par le dépôt de fines lors des crues. Le fossé initialement large a permis au système de s'ajuster naturellement en développant un canal morphologiquement stable. Cet ajustement est cité à titre d'exemple pour éviter la construction de canaux trop étroits, où le phénomène dominant est alors l'incision. Les auteurs soulignent également que ce canal n'a pas été entretenu contrairement à la majorité des autres canaux, permettant l'établissement bénéfique d'une configuration stable et d'une faune particulièrement riche.

Bartholdy et Billi (2002) se sont intéressés à la rivière Cecina (Italie), qu'ils qualifient de cours d'eau *pseudo-méandrant*, i.e. quasiment rectiligne, un peu incisée, avec de grands bancs latéraux. Un tronçon a été surveillé en particulier pour étudier les causes de la formation des bancs. Plusieurs facteurs ont été identifiés : l'incision du chenal, la cohésion des berges, un apport de sédiments supérieur à la sortie, le régime hydrologique avec des crues fréquentes et peu importantes, l'effet des crues éclairs.

A partir de mesures in situ sur une rivière à galets, Whiting et Dietrich (1991) ont examiné l'influence de la topographie d'un banc de galets sur la structure de l'écoulement. Des variations importantes

de la vitesse sont observées à l'aval du banc en raison des variations de section en travers, en particulier, l'augmentation de la profondeur. Les vitesses les plus importantes sont rencontrées à proximité des berges, ce qui montre comment la présence d'un banc peut forcer l'érosion des berges. Les variations de la contrainte de cisaillement au fond sont très importantes. S'il n'y avait pas de tri granulométrique, les auteurs se seraient attendus à une modification de la topographie telle que le haut du banc serait érodé et le chenal d'écoulement principal serait comblé. Cela aurait alors réduit les différences d'altitude.

1.2 Sédiments fins dans le contexte fluvial, végétalisation des bancs de galets

Les flux de sédiments fins sont plus ou moins marqués dans les rivières en fonction du contexte géologique et du régime hydrologique de la rivière. Mais il s'avère que les activités anthropiques ont un impact sur la quantité et la qualité des sédiments transitant dans les cours d'eau, notamment à cause des changements d'utilisation des sols, de la construction et de la gestion des barrages, et de la contamination des sédiments par des polluants (Owens *et al.*, 2005).

De nombreux travaux existent sur l'étude du transfert des Matières En Suspension (MES) dans les cours d'eau. Beaucoup de ces travaux portent sur l'établissement d'une relation entre la concentration et le débit sous la forme $C = aQ^b$ (VanSickle et Beschta, 1983; Lenzi et Marchi, 2000). La formule est calibrée sur des mesures en rivière; une fonction multiplicatrice rendant compte de la disponibilité de matériaux stockés dans le lit peut être ajoutée. L'utilisation d'une telle fonction n'est pas toujours évidente (Langlois *et al.*, 2005; Church et Krishnappan, 1998; Poirel, 2001), notamment à cause de la diversité des sources de sédiments, ponctuelles (de type retenue) ou continues (stockage dans le lit ou les berges), de la quantité variable de sédiments stockés dans le lit et de la dynamique du transfert.

Par exemple, grâce à un suivi des concentrations de sédiments fins sur deux ans (rivière Swale, Yorkshire, UK), Smith *et al.* (2003) montrent (i) que l'apport des affluents est conséquent, (ii) que la part des érosions de berge sur la quantité totale de sédiments qui transitent n'est pas importante, (iii) qu'une grande partie des sédiments transportés (66%) l'est pendant des événements hydrologiques significatifs, (iv) qu'un lien existe entre les apports de sédiments et la localisation des précipitations. Généralement, les transferts importants de MES ont lieu pendant les crues (Poirel, 2001; Le Coz *et al.*, 2007a) ou à la fonte des neiges en régime nival.

Il existe également des modèles à fonction de transfert (Lemke, 1991) qui ont l'avantage de prendre en compte la dynamique du système, de pouvoir ainsi reproduire des phénomènes d'hystérésis observés sur les courbes $C = f(Q)$. Des modèles unidimensionnels analytiques à base physique ont aussi été développés, par exemple celui de Dietrich *et al.* (1999) qui prend en compte la convection,

le dépôt, la resuspension des sédiments, ainsi que les apports latéraux.

Le lien entre les augmentations de concentration et les augmentations de contrainte de cisaillement au fond a été souligné (Ziegler et Nisbet, 1994). Sur la Saône à Lyon, Le Coz *et al.* (2007a) montrent que les pics de concentration sont liés à une resuspension des sédiments présents dans le lit ; ils ont lieu pendant les augmentations de débit et leur intensité diminue au fur et à mesure des pics de débit successifs. Les pics ont lieu pendant les augmentations de contrainte au fond.

Dans tous les cas, il est fait état de l'importance (i) de la nature de la source des sédiments (ponctuelle ou distribuée), (ii) de la quantité de sédiments disponibles, et (iii) de la prise en compte des événements passés (Lemke, 1991; Dietrich *et al.*, 1999), conduisant à la constitution ou à l'épuisement du stock de sédiments.

Les dépôts de sédiments sont localisés en fonction des caractéristiques de l'écoulement, généralement dans les zones à faible vitesse. Sur des bancs de galets, un dépôt préférentiel dans les mouilles a souvent été observé (Diplas, 1994; Lisle et Hilton, 1999), en queue de banc ainsi qu'une infiltration des sédiments fins dans le lit. Des typologies ont été développées pour identifier les zones préférentielles de dépôt. Par exemple, Wood et Armitage (1999) identifient : 1. les dépôts de bord, dans les zones de faible vitesse à proximité de l'écoulement ; 2. les dépôts de dépression, dans les zones de forte profondeur ; 3. les dépôts à proximité de macrophytes ; 4. les dépôts de débris, dans leur sillage ; 5. les dépôts fins de surface. En rivière à tresses, Ashworth *et al.* (1994) distinguent : 1. les dépôts aux jonctions de chenaux ; 2. les dépôts en surface de banc dans des zones d'eau morte ; 3. les dépôts dans les zones profondes du talweg ; 4. les dépôts dans les chenaux abandonnés ; 5. les dépôts fins continus à la surface des bancs ; 6. les dépôts en zone de recirculation dans le sillage du banc.

Une fois déposés dans le lit, les sédiments fins peuvent avoir un impact sur le transport solide (Diplas et Parker, 1992) : des quantités importantes de sédiments fins accumulées dans le lit augmentent la stabilité des particules de surface ; mais une fois que la zone sous le pavage devient saturée en sédiments fins et que les interstices du pavage se remplissent en sédiments fins, la surface du lit devient moins rugueuse et la mobilité des grains en mouvement est augmentée. Des sédiments fins cohésifs peuvent également former, en séchant, un ciment liant les galets entre eux et diminuant ainsi leur capacité à être mis en mouvement.

Les sédiments fins affectent le comportement, la santé, l'habitat de la faune aquatique (poissons et invertébrés) (Wood et Armitage, 1999; Watts *et al.*, 2003; Lisle, 1989; Huang et Garcia, 2000; Sear, 1993). Les impacts sur la végétation alluviale ont également été explorés.

Plusieurs facteurs favorisent l'implantation de la végétation dans le lit des cours d'eau : une réduction de la charge de fond dans les rivières, souvent due à des retenues amont ; la reforestation des bassins

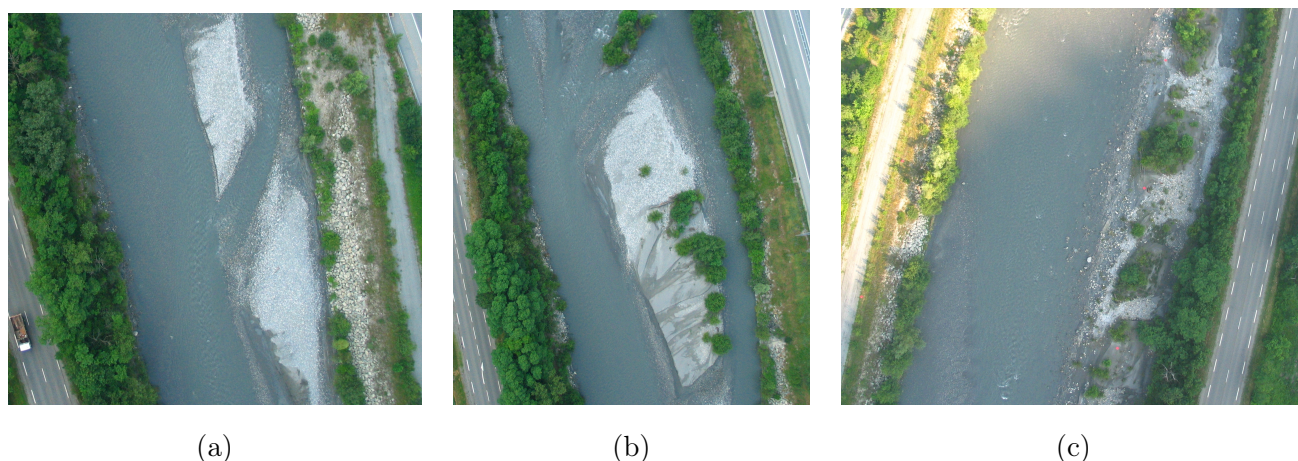


FIG. 1.5 – Banc de galets plus ou moins végétalisés, illustration sur l’Arc (Maurienne, 73). La route nationale donne l’échelle.

versants ; un confinement du transport solide à une bande étroite ; une diminution des fréquences de recouvrement et de remaniement des bancs. En particulier, l’absence de crue morphogène, i.e. susceptible de mobiliser une grande partie des sédiments du lit, sur plusieurs années entraîne une stabilisation du lit et sa végétalisation.

Le travail expérimental de Allain Jegou (2002) sur l’Isère en amont de Grenoble visait à la compréhension de l’influence de la végétation sur les paramètres hydrauliques et des interactions transport sédimentaire-écoulement-îles. Le terme île désignant des bancs végétalisés. La présence de la végétation implique un rehaussement des lignes d’eau, et surtout un stockage des sédiments fins dans les parties hautes du lit, menant à une végétalisation irréversible et croissante des îles. De même, des expériences en modèle réduit (Martin-Vide, 2001) montrent une élévation de la ligne d’eau en crue du fait de la présence de végétation, et l’observation d’une crue sur le cas de terrain correspondant indique des dépôts de sédiments fins dans les zones végétalisées.

Les bancs de galets constituent en effet un lieu privilégié pour l’implantation de la végétation (Gilvear *et al.*, 2005). Les bancs sont le résultat de séries chronologiques complexes de dépôts et d’érosions successifs associés aux crues. Le degré de végétalisation des bancs (FIG 1.5) est à mettre en étroite relation avec la durée d’exposition du banc au-dessus de la ligne d’eau, la profondeur de la nappe alluviale, la nature et la stabilité des sédiments, et enfin avec le type de végétation disponible pour la colonisation. Suivant ces critères, les bancs sont progressivement végétalisés alors qu’ils s’élargissent et augmentent de hauteur, et il devient alors difficile de définir le moment à partir duquel le banc alterné devient partie de la plaine d’inondation et le banc central une île végétalisée. Ainsi les bancs sont souvent le point de départ de la création d’une île.

Edwards *et al.* (1999) montrent que, sur les bancs de galets, la présence des débris les plus gros

(troncs) ont une forte influence sur le dépôt des sédiments fins et sont des sites de colonisation pour la végétation pionnière. Ces sites représentent le premier stade de végétalisation des îles et ont le potentiel pour s'accroître au fil des crues successives. Les plantes ont en outre la capacité de favoriser le dépôt de sédiments fins et autres débris par leur effet sur l'écoulement, alimentant de cette façon la végétalisation progressive du banc de galets.

La relation entre les dépôts de sédiments fins et la végétation sur un banc de galets est examinée par Langlade et Décamp (1995). L'étude expérimentale sur un banc de galets de la Garonne montre que le gradient, amont-aval de la végétation est corrélé au gradient des caractéristiques granulométriques (sédiments grossiers à l'amont, sédiments fins à l'aval). En tout point de ce gradient la richesse spécifique végétale augmente à l'abri d'obstacles (débris ligneux ou plantes pérennes) susceptibles d'accumuler des sédiments fins, et plus particulièrement des limons. Le taux de germination est corrélé à l'accumulation de limons, un maximum de densité et de richesse spécifique correspondant à des conditions d'humidité, de température et de pénétration de la lumière optimale pour l'établissement de végétaux pionniers sur un banc de galets.

Des solutions techniques existent pour éliminer la végétation des bancs ou pour limiter son développement (Allain Jegou, 2002). L'essartage est un coupage à ras de la végétation sans destruction des racines ; son effet est de court terme et peu efficace car la végétation reprend rapidement, cette solution tend à uniformiser la végétation du lit à des espèces jeunes. L'arasement des îles consiste à enlever la végétation et les sédiments fins jusqu'à la couche de galets sous-jacente. Le curage est l'extraction des sédiments grossiers jusqu'à une certaine cote.

1.3 Morphologies des rivières aménagées

Graduellement des rivières ont été à la fois endiguées et aménagées par des équipements hydrauliques, ces changements affectant la morphologie des rivières concernées (Gregory, 2006; Piégay, 2005; Martin-Vide, 2001).

1.3.1 Aménagements du lit et conséquences

Pour faciliter l'aménagement des vallées et protéger les zones urbaines, les rivières de montagne ont été progressivement endiguées conduisant à l'établissement d'un nouvel équilibre morphologique intra-digues. Les rivières initialement en tresses développent souvent des bancs alternés entre digues. L'étude de Moulin (2005) sur l'Isère et ses affluents montre que les actions anthropiques tendent à favoriser la stabilité des lits par fixation des formes fluviales. Les bancs de galets autrefois mobiles sont fixés et métamorphosés en îles stables et végétalisées d'abord par la végétation herbacée puis par les bois tendres. Cette végétalisation de l'espace intra-digue est un des enjeux majeurs de la

gestion des cours d'eau, du fait d'une élévation conséquente des lignes d'eau en crue ; du stockage des matériaux fins dans les sections végétalisées ; de l'augmentation de la production de bois mort disponible en cas de crue pour créer des embâcles.

Sur la Drôme, par comparaison de deux zones avec ou sans endiguements, Dufour *et al.* (2007) montrent que les endiguements affectent clairement la morphologie de la rivière en favorisant l'incision du chenal, un accroissement de la granulométrie, et en induisant des effets sur la végétation (homogénéisation des espèces et prédominance des espèces résistantes à des conditions sèches).

1.3.2 Effets des aménagements hydroélectriques : régime hydraulique, transport solide et morphologie à long terme

Les impacts des aménagements hydroélectriques sur la morphologie du lit des cours d'eau sont de deux types : (i) une rupture de la continuité des apports sédimentaires, les sédiments étant stockés dans les retenues, et (ii) une perturbation de l'écoulement, le régime naturel des cours étant fortement influencé par les prises d'eau, déviations et lâchers.

Brandt (2000) détaille les cas les plus courants de modification à l'aval des retenues : (i) une diminution du débit liquide et un débit solide inférieur à la capacité de transport de l'écoulement, et (ii) un débit liquide inchangé et une entrée solide inférieure à la capacité de transport. Ces deux situations conduisent à une érosion des berges et des tronçons à l'aval. Kondolf (1997) utilise le terme *hungry water* pour qualifier ces écoulements. Si le débit liquide est diminué jusqu'à la limite de mise en mouvement des galets, une réduction de la section active est seulement observée.

L'exemple de la rivière Piave en Italie (Surian, 1999), indique un rétrécissement du chenal, un passage du style en tresse au style divaguant, et l'absence d'un nouvel équilibre. L'établissement d'un débit réservé, souvent inférieur au débit naturel, favorise aussi la colonisation du lit par la végétation.

1.3.3 Effets des chasses hydrauliques

Les rivières aménagées sont non seulement affectées par les effets continus des retenues mais aussi par des événements ponctuels tels que les chasses hydrauliques. L'objectif des chasses est d'évacuer les sédiments stockés dans les retenues (Poirel, 2001). Les impacts sur l'aval sont loin d'être négligeables. En particulier, les débits importants générés par le lâcher d'eau ont des effets sur la morphologie des tronçons en aval. Mürle *et al.* (2003) ont observé l'érosion des cônes de déjection et l'accumulation de sédiments grossiers dans les tronçons les plus larges, ces sédiments étant repris par la suite. Fasolato *et al.* (2006) ont observé des évolutions du lit (érosion ou dépôt) atteignant plus de 4 m de haut.

Concernant le transfert des sédiments à l'aval de la retenue, Brandt (2005, 1999) note un décalage temporel croissant avec la distance au barrage entre le pic de débit et de MES, dû à des vitesses de

transfert différentes. Trois phases dans le signal de MES sont distingués :

- i. avant l'augmentation de la concentration liée à l'évacuation des sédiments dans la retenue, la concentration en MES dépend du débit et est limitée par la quantité de sédiments disponibles dans le lit.
- ii. une phase pendant laquelle la concentration ne dépend pas du débit mais de l'érosion dans la retenue (source ponctuelle de sédiments).
- iii. en fin d'événement, la concentration dépend à nouveau du débit.

Ces trois phases sont associées à une évolution granulométrique : les sédiments mobilisés par resuspension en début d'événement sont plus grossiers que ceux érodés dans la retenue.

Les concentrations en sédiments fins sont aussi susceptibles d'induire des dépôts conséquents. Rathburn et Wohl (2003) et Wohl et Cenderelli (2000) ont montré que les dépôts ont lieu préférentiellement dans les mouilles et les recirculations latérales de l'écoulement. Brandt (1999) a établi que les dépôts se font principalement dans le lit plutôt que sur les berges, et notamment dans les dépressions, la quantité et la taille des sédiments diminuant avec la distance au barrage. Des impacts sur la faune et la flore alluviales résultant des modifications morphologiques et des dépôts de sédiments fins sont aussi observés (Wood et Armitage, 1997; Lisle, 1989).

1.4 Démarche scientifique et objectifs

1.4.1 Problématique, objectifs et choix expérimentaux

La morphodynamique des rivières anthropisées est un enjeu majeur de l'aménagement du territoire. Les rivières endiguées à bancs alternés sont communes en région de piémont dans les pays européens. Souvent les aménagements (hydrauliques ou endiguements) rendent difficile l'établissement d'une géométrie d'équilibre du fait des modifications des apports liquide et solide. En dehors des expériences en canal, peu de travaux se sont attaqués à l'étude de tels systèmes en milieu naturel et peu d'études portent sur l'évolution de ces chenaux une fois établis.

L'objectif de ce travail est de fournir une description et une compréhension des écoulements et de la dynamique sédimentaire au voisinage de bancs de galets, plutôt que de s'intéresser aux lois générales de formation et d'évolution de bancs de galets alternés.

L'étude vise à répondre plus spécifiquement à plusieurs questions :

- dans le contexte des rivières endiguées à galets, existe-t-il un équilibre morphodynamique ?
- les sédiments fins jouent-ils un rôle dans la mobilité des bancs de galets ?
- réciproquement, quelle est l'influence des bancs dans le transfert des MES ?
- quelles solutions peuvent être proposées pour l'entretien des lits de rivières endiguées ?

La réponse à ces questions s'appuie sur des observations de terrain détaillées menées pendant plusieurs événements et sur plusieurs bancs de galets dans un secteur rectiligne. D'autres travaux récents ont adopté cette démarche consistant à mettre en place un suivi expérimental rigoureux pour viser une meilleure compréhension du fonctionnement hydrosédimentaire des sites alluviaux (Allain Jegou, 2002; Rodrigues, 2004; Meunier *et al.*, 2006; Le Coz, 2007).

Le site de terrain a été choisi sur la rivière Arc (Maurienne, 73) car il remplissait tous les critères d'une rivière de montagne aménagée. Les manœuvres de chasse de dégravage annuelles fournissent, en outre, l'opportunité d'observer des débits importants au moins une fois dans l'année. Il avait été envisagé, dans un premier temps, d'élargir l'étude à d'autres rivières du même type comme la Durance. L'absence de crue, le manque de données sur des secteurs intéressants, et le temps passé à acquérir les données sur l'Arc ont limité l'étude à une seule rivière, en permettant toutefois d'y intensifier les campagnes de mesure.

Tout au long du travail, un effort particulier a porté sur l'acquisition de données de qualité, sur le traitement et l'analyse de ces données. Des outils classiques (jaugeages au courantmètre, topographie optique ou GPS) et des méthodes innovantes (LS-PIV, analyse d'images aériennes) ont été utilisés et améliorés. De fait, ce travail est une contribution à la compréhension des bancs alternés en rivière aménagée et un apport technique sur les méthodes de suivi des processus.

Les observations de terrain sont complétées par des simulations numériques bidimensionnelles de l'hydrodynamique et du transport solide, pour obtenir, entre autres, des informations sur les écoulements solide et liquide distribuées dans l'espace et le temps. Le but de la modélisation numérique n'est pas de simuler exactement les processus mais d'aider à mieux comprendre le fonctionnement général du système. L'établissement d'un jeu de données de terrain le plus complet possible permet d'alimenter au mieux les modélisations numériques, et d'autoriser son utilisation ultérieure dans le sens de Nicholas (2003) :

This leads to something of a paradox in that while such models provide a means of generating hydraulic information that would be difficult to obtain in the field at an equivalent spatial resolution, they are, due to the problems inherent to data collection, difficult to validate conclusively. Despite this limitation, the application of spatially distributed models to investigate relationships between discharge and reach-scale form and process variables appears to have considerable potential.

Le travail a été développé autour de trois axes interdépendants : les mesures en site naturel, l'analyse des données et la modélisation numérique. Chaque étape a nécessité la mise en place de protocoles spécifiques.

1.4.2 Plan du mémoire

Le mémoire est organisé en trois parties :

La première partie détaille les méthodes expérimentales utilisées au cours du travail. Il s'agit aussi bien des choix d'instrumentation que des méthodes d'interpolation des données. Cette partie est séparée en trois chapitres : le chapitre 2 est une description du site d'étude et du contexte d'observation ; le chapitre 3 expose les mesures et méthodes d'analyse morphologiques ; le chapitre 4 présente les mesures et méthodes portant sur l'hydrodynamique.

La deuxième partie rassemble les observations faites au moyen des techniques de la partie précédente sur les bancs de galets au cours des événements suivis. Les évolutions morphologiques des sites expérimentaux sont analysées sur la période 2005-2007. Une analyse détaillée des processus au cours des chasses hydrauliques (chapitre 5) est comparée avec les modifications morphologiques ayant lieu sur les années 2006 et 2007 et celles d'une crue naturelle (chapitre 6).

La troisième partie vient compléter les observations de terrain par des modélisations bidimensionnelles de l'écoulement et du transport solide au voisinage du banc pour deux événements significatifs aux effets antagonistes : la chasse hydraulique de 2006 et la crue naturelle de l'automne 2006.

PREMIÈRE PARTIE

Méthodes expérimentales

2

Présentation du site d'étude

Sans prétendre à une description exhaustive de la rivière Arc (cf. Marnézy, 1999), cette partie précise le contexte spatial et temporel des mesures expérimentales réalisées dans le cadre de cette thèse. La situation géographique, le régime hydrologique et la morphologie générale de l'Arc expliquent une activité importante en terme de transport solide, mais aussi une influence non négligeable des activités anthropiques. Le site d'étude est repositionné dans son contexte fluvial, et ses caractéristiques morphologiques sont détaillées. L'étude porte sur quatre événements hydrologiques significatifs : trois chasses annuelles de dégravage et une crue naturelle. Les caractéristiques de ces événements sont détaillées.

2.1 L'Arc : une rivière fortement aménagée

2.1.1 Situation géographique et morphologie générale de la rivière

L'Arc¹ est une rivière de montagne à caractère torrentiel. La superficie du bassin versant alpin est de 1957 km² (FIG. 2.1), la pente de la rivière variant entre 0.5 et 6% (Hydratec et Cemagref, 1999) (FIG. 2.2). Entre sa source, à l'amont de Bonneval (Glacier des Sources de l'Arc), et sa confluence avec l'Isère (aval d'Albertville), les 120 km de l'Arc traversent toute la vallée de la Maurienne (Savoie), soit une succession de massifs cristallins et des bandes de roches assez diverses, schistes argileux, calcaires, gypses, marnes noires et grès (Gidon, 2007).

La vallée peut être découpée en trois secteurs morphologiquement différents (Hydratec et Cemagref, 1999) : une partie supérieure (amont de Saint-Michel-de-Maurienne) composée d'une vallée encaissée étroite avec quelques zones d'élargissement ; une partie intermédiaire (de Saint-Michel-de-Maurienne à La Chambre) constituée d'une série de plaines alluviales séparées par des zones plus étroites avec de nombreux affluents torrentiels et une pente comprise entre 0.5 et 2.5 % ; une partie aval formée de grandes plaines séparées par quelques resserrements avec une pente générale plus faible (0.25 à 0.75 %).

L'Arc est une rivière à graviers. La granulométrie des sédiments est très large et varie principalement en fonction des zones géographiques ; avec une possible coexistence au sein d'une même zone de sédiments fins (échelle du micromètre) et de blocs (échelle du mètre). A titre d'exemple, sur

¹La rivière Arc, en Maurienne, ne doit pas être confondue avec son homonyme en Provence.

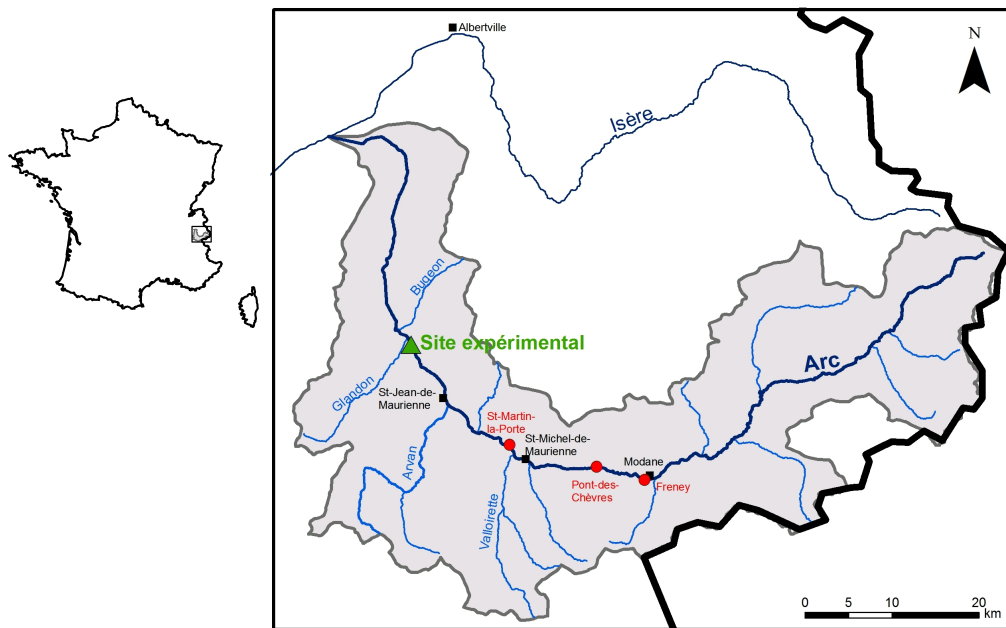


FIG. 2.1 – Localisation de l'Arc, de son bassin versant, des principales agglomérations, des principaux affluents et des trois retenues EDF de l'Arc Moyen (Saint-Martin-la-Porte, Pont-des-Chèvres et Freney).

une zone de l'Arc moyen (entre le Glandon et Saint-Martin-La-Porte), les matériaux du lit se décomposent en trois classes caractéristiques (Hydratec et Cemagref, 1999) : des alluvions torrentielles provenant des cônes de déjection des torrents, et caractérisées par une matrice fine plus ou moins argileuse et de très gros blocs ($d_{max}=600-1000$ mm, $d_{50}=150-400$ mm et $d_{10}<10$ mm) ; des alluvions communes du lit de l'Arc avec une granulométrie unimodale ($d_{max}=250-700$ mm, $d_{50}=150-400$ mm et $d_{10}<5$ mm) ; des alluvions de l'Arc plus fines provenant de torrents comme l'Arvan ($d_{max}=150-350$ mm, $d_{50}=15-25$ mm et $d_{10}<1.5$ mm).

Le transit des sédiments fins est estimé à environ 1.5×10^9 kg/an et le transport des sédiments plus grossiers à 1.5×10^5 m³/an, soit environ 4×10^8 kg/an (Marnézy, 1999). Le transport par charriage est plus important à la fonte des neiges (mai-juin-juillet), les éléments les plus gros étant mobilisés uniquement pendant les crues. Une des spécificités de l'Arc est son très fort transport de sédiments fins notamment à la fonte des neiges. Ces sédiments principalement constitués de schistes noirs proviennent des affluents, essentiellement de l'Arvan.

La qualité hydrobiologique et piscicole de l'Arc est considérée comme très mauvaise, et, par conséquent, les enjeux biologiques associés à la rivière sont faibles (EDF SIRA, 1997). En revanche, les risques en crue ne sont pas négligeables : des érosions de berge et des affouillements d'ouvrages de protection sont facilement observables. Il existe aussi un risque d'inondation sur plusieurs secteurs de la rivière du fait d'un engraissement du lit (Hydratec et Cemagref, 1999).

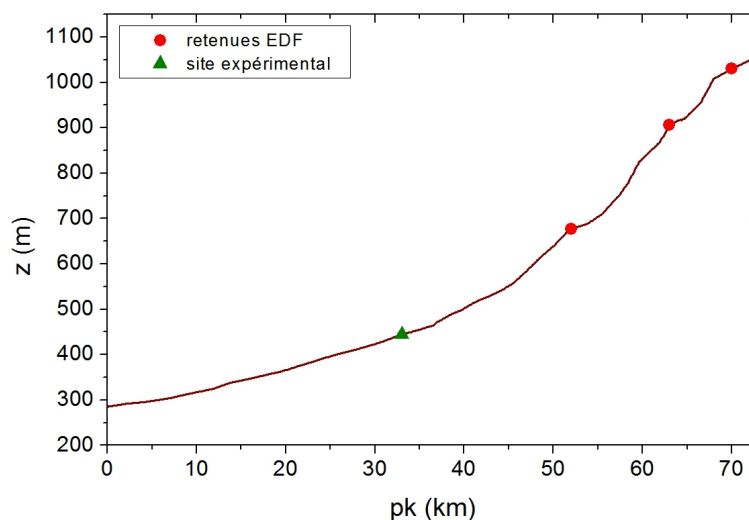


FIG. 2.2 – Profil longitudinal de l'Arc entre Modane et la confluence avec l'Isère (PK=0), données extraites de profils en travers datés de 2000 et 2006.

2.1.2 Régime hydrologique

Le régime hydrologique est de type nival avec un débit moyen en hiver de 6-8 m³/s et un débit moyen au printemps de 15-20 m³/s au niveau de La Chambre. Du fait du régime hydrologique et de la climatologie locale, les risques de crue sont faibles entre décembre et avril, et plus importants en juin-juillet pour les crues soutenues par la fonte des neiges et en septembre. Les dernières crues importantes ont effectivement eu lieu à l'automne et en début d'été : septembre 1993 (435 m³/s à Modane), juin 1994 (450 m³/s), septembre 1994 (300 m³/s), juin 1998 (220 m³/s au Pont des Chèvres), octobre 2000 (400 m³/s à Modane) (IRAP, 2000). A titre indicatif, à Saint-Michel-de-Maurienne les crues de l'Arc de périodes de retour 10 et 100 ans sont respectivement de 300 et 660 m³/s (Hydratec et Cemagref, 1999).

2.1.3 Aménagement du lit

Depuis les premiers endiguements mis en place au XIX^e siècle (Marnézy, 1999), le lit de la rivière a été souvent recalibré et endigué pour protéger à la fois les voies de communication vers l'Italie mais aussi les zones habitées. Actuellement, la vallée, large de seulement quelques centaines de mètres sur certains secteurs, contient, outre les agglomérations, une route nationale, une voie de chemin de fer et une autoroute. En particulier, la construction de l'autoroute A43 a nécessité des aménagements sur les torrents (cônes de déjection), mais aussi la mise en place de nombreux endiguements calibrés en principe pour le passage de la crue centennale.

Si l'Arc est originellement une rivière à tresses (Marnézy, 1999), cet endiguement en tronçons souvent rectilignes favorise l'apparition de nombreux bancs de galets organisés en motifs alternés

(cf. paragraphe 1.1.2) et présentant des degrés de végétalisation plus ou moins avancés. D'après Moulin (2005), la crue cinquantennale de septembre 1993 n'a eu qu'une incidence très limitée sur la végétation présente dans le chenal.

2.1.4 Aménagements hydroélectriques

La Maurienne est une vallée à très fort aménagement hydroélectrique (7 barrages, 3 liaisons avec les bassins versants voisins, 7 prises d'eau, 4 grands barrages d'altitude...). Du fait des prises d'eau et restitutions, les débits sont segmentés avec une alternance de longs tronçons en débit réservé (80% du cours de l'Arc) et de courtes sections à fort écoulement turbiné (cf. Annexe A). Par exemple, entre Bramans et Saint-Jean-de-Maurienne, le débit effectif dans la rivière représente entre 5 et 10% du débit naturel. Par contre, à la confluence avec l'Isère, après la restitution de Randens, les débits sont proches des débits avant aménagements (Marnézy, 1999). Sur l'ensemble de la rivière, seulement 5% des tronçons ont gardé leur écoulement naturel. Les aménagements hydroélectriques ont modifié fortement le régime hydrologique, la dynamique du transport solide et la morphologie du lit. Les débits de crue sont affectés : les petites crues (jusqu'à Q_5) sont quasiment supprimées ; par contre, les fortes crues ne sont que faiblement écrêtées (Marnézy, 1999). De même, le transport solide est fortement affecté par ces aménagements : les sédiments fins et grossiers sont stockés dans les retenues ; dans les tronçons court-circuités, les apports sédimentaires des affluents ne sont pas dilués, ce qui favorise la formation de cônes de déjection permanents à l'aval des torrents.

Globalement, l'Arc montre une tendance à l'incision généralisée depuis le début du XXe siècle, notamment du fait d'un blocage des apports solides amont par les ouvrages RTM (Restauration des Terrain de Montagne), les barrages et d'anciennes zones d'extraction. Plus localement, on observe des fluctuations de la cote du lit, avec des zones d'exhaussement dues aux contraintes latérales (endiguement) et à l'absence de crue importante. On trouve aussi des affouillements localisés probablement sur d'anciennes zones d'extraction (Ramez et Paquier, 1999), et des zones à forte érosion de berge (secteur de Randens).

2.1.5 Contexte institutionnel et actions en cours

A partir de 1996, l'Arc a été suivi dans le cadre d'un contrat de rivière *Arc et Affluents*. Outre l'assainissement, les actions du Syndicat de Pays de Maurienne sur la rivière et ses affluents portent sur la protection contre les crues, la restauration et la mise en valeur des cours d'eau avec des opérations à caractère hydraulique et des opérations de mise en valeur du milieu aquatique et du paysage. Aujourd'hui, un projet à long terme vise à réduire les dommages liés aux crues de l'Arc dans la vallée par un plan de gestion des sédiments et un Programme d'Actions et de Prévention des Inondations (PAPI). De nombreuses actions sont en cours : gestion du lit et des sédiments de

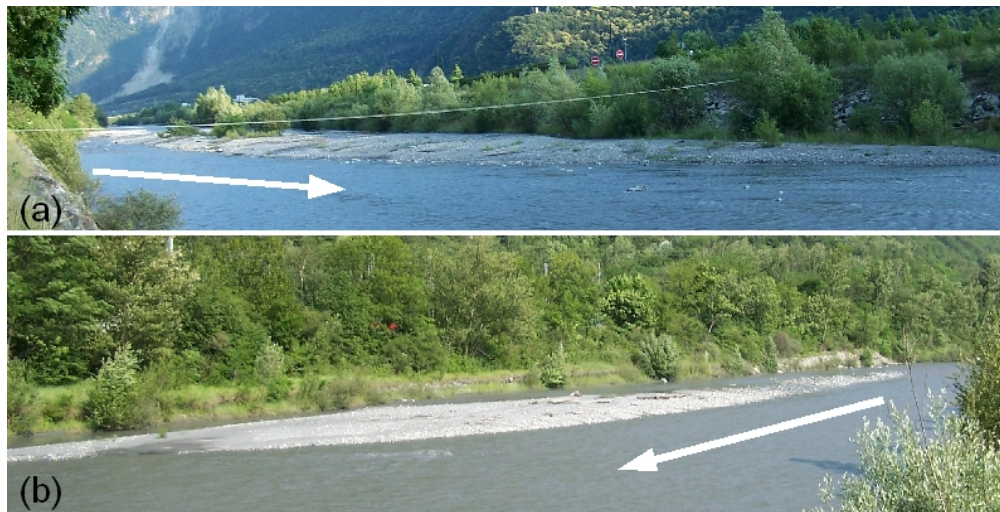


FIG. 2.3 – Photographies des sites expérimentaux : (a) site principal depuis la rive gauche (27-06-2006) (b) site secondaire depuis la rive droite (13-06-2006). Les flèches indiquent le sens de l'écoulement

l'Arc (curages du lit), ralentissement dynamique de l'Arc, actions sur la plage de dépôt de l'Arvan, protection contre la crue centennale à Saint-Michel-de-Maurienne, amélioration de la prévention et de l'annonce des crues...

2.2 Site d'étude

Le site d'étude contient deux sites expérimentaux qui ont été suivis entre 2005 et 2007.

2.2.1 Caractéristiques des sites expérimentaux principal et secondaire

Le site d'étude est constitué d'un tronçon court-circuité de l'Arc moyen d'environ 1.5 km. Il se situe au PK 33², à l'aval de la confluence avec l'Arvan et à l'amont immédiat de la confluence avec le Glandon, deux torrents très actifs en transport solide. Le site d'étude a été choisi représentatif du reste de la rivière sur sa partie la plus à l'aval. La zone est complètement endiguée (enrochement de gros blocs) et quasiment rectiligne sur 3 km ; elle présente une série nette de bancs alternés. D'après l'étude hydraulique Hydratec et Cemagref (1999), il s'agit d'une zone d'érosion de berges dans sa partie aval et d'engrèvement du lit dans sa partie amont. A l'aval direct du site d'étude, on trouve un pont facilitant les mesures de vitesse et de concentration à fort débit. La pente moyenne sur ce secteur est d'environ 1%. L'accès au lit (après autorisation EDF suivant le protocole standard) se fait plus ou moins facilement par les digues avec un cheminement le long du site facilité par un chemin carrossable. Dans toute l'étude, les digues composées de blocs métriques sont supposées fixes.

²distance à la confluence avec l'Isère en km

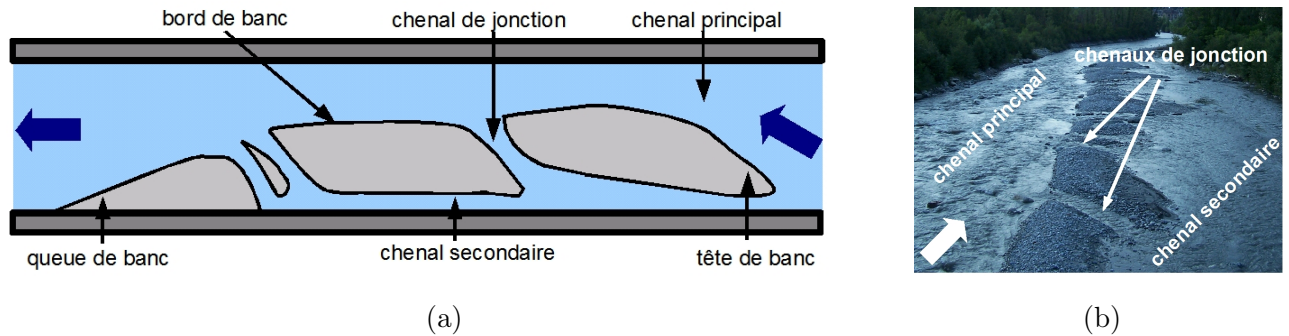


FIG. 2.4 – (a) Schéma des sous-unités morphologiques d'un banc et (b) illustration sur un exemple, banc de galets à l'aval du pont sur le site d'étude.

Sur ce secteur de la rivière, deux sites de quelques centaines de mètres de long ont été suivis expérimentalement (FIG. 2.3). Pour des raisons pratiques (limitation des campagnes topographiques à une journée), chacun des sites expérimentaux n'englobe qu'un seul banc de galets.

Le site principal comprend le banc de galets le plus à l'aval, situé en rive gauche et d'une longueur d'environ 400 m. Ce banc est le plus proche du pont (300 m). Quelques éléments d'influence mineure doivent être mentionnés : un rejet d'eau claire est localisé à l'aval du banc (réseau pluvial), cependant les débits déversés sont toujours négligeables devant les débits de la rivière. Il y a également un peu de végétation arbustive au milieu du banc et au pied des digues.

Un site secondaire a fait l'objet d'un suivi moins détaillé. Ce banc de galets d'étendue moindre (230 m environ) se situe en rive droite dans la partie amont du secteur d'étude, à 800 m à l'amont du site principal. Ce banc est plus simple que le banc principal, d'accès moins facile et surtout plus éloigné du pont où les mesures de hauteur d'eau, de concentration en MES et de débit sont réalisées.

Les résultats expérimentaux et numériques présentés dans cette thèse concernent essentiellement la zone d'étude principale. Le site secondaire permet de confronter les résultats obtenus à un deuxième site de terrain. Ce site secondaire a fait l'objet d'une étude numérique détaillée dans la thèse de Matthieu de Linares (2007) (LTHE, Sogheara, EDF), dont nous exploitons les résultats. Cette extension de la zone d'étude doit permettre un premier pas vers l'extrapolation spatiale des observations et des résultats.

2.2.2 Sous-unités morphologiques du banc

Pour faciliter les études morphologiques, une typologie des éléments caractéristiques des bancs de galets a été établie à partir de photos aériennes et de références bibliographiques. Les bancs de galets sont découpés en sous-unités morphologiques (FIG. 2.4) :

le chenal d'écoulement principal est la zone du lit à la cote la plus basse dans laquelle s'écoule

la part la plus importante du débit (talweg).

le **chenal secondaire** est situé le long de la berge, du côté opposé à l'écoulement principal. Il contient une proportion faible de l'écoulement ($\approx 10\%$) ; sa cote moyenne est plus élevée que celle du chenal principal. Hickin (1969) le nomme "chenal intérieur" (*inner channel*) ou "dépression morte" (*dead slough*) dans le cas où il ne débouche pas sur l'écoulement principal.

la **tête de banc** est définie classiquement comme la partie amont du banc.

la **queue de banc** est définie comme la partie aval du banc.

les **chenaux de jonction** permettent la connexion en travers du banc entre le chenal secondaire et le chenal principal. Pyrce et Ashmore (2005) les nomment "chenaux de chute" (*chute channel*) et les décrivent comme des chenaux orientés diagonalement sur le banc et intersectant le sommet du banc. Lunt et Bridge (2004) les désignent comme des "chenaux en travers du banc" (*cross-bar channels*). Dans leur description expérimentale de la formation des bancs alternés en canal pour une granulométrie étendue, Lisle *et al.* (1991) font référence à des petits chenaux d'incision sur le banc. On distingue les chenaux de jonction éphémères qui ont une durée de vie plus faible que les chenaux permanents de l'ordre de la durée inter-crue. En général, les chenaux permanents sont plus profonds que les chenaux éphémères.

le **bord du banc** est la limite entre le banc et le chenal d'écoulement principal. Cette zone contient des renforcements (*nooks*). Selon la définition de Rempel et Church (2002), cela correspond à des petites échancrures en bordure du banc, en contact avec l'écoulement principal mais où l'eau a une vitesse plus faible. Ces renforcements sont souvent les extrémités de chenaux de jonction qui ne sont plus en eau.

Ces éléments se retrouvent tous ou en partie sur les bancs des deux sites expérimentaux.

2.2.3 Evolution morphologique du secteur d'étude depuis 1997

Des éléments sur l'évolution récente du secteur d'étude sur 10 ans sont obtenus par comparaison de photographies aériennes. On dispose de quatre jeux de photographies aériennes géoréférencées depuis 1997, date qui correspond à un état initial après remaniement du lit de la rivière pour la construction de l'autoroute A43. Les photos sont de sources et de résolutions différentes (FIG. 2.5), mais elles permettent d'observer les grands traits d'évolution du secteur sur la période 1997-2006³. Sur le secteur d'étude, les zones végétalisées en rive droite sont visibles depuis 1997. Par contre, les bancs de galets n'existaient pas en 1997 ; des blocs dispersés, sûrement d'origine anthropique, sont présents dans le lit. A l'emplacement actuel de la tête du banc principal, il n'y a qu'un petit dépôt de galets. A l'amont, un banc central est apparent à proximité de la première zone végétalisée et

³Les photographies aériennes du 31-08-1997 ne sont pas présentées ici. Elles sont consultables en planches papier 1×1.5 m à la DDE73 à Chambéry.

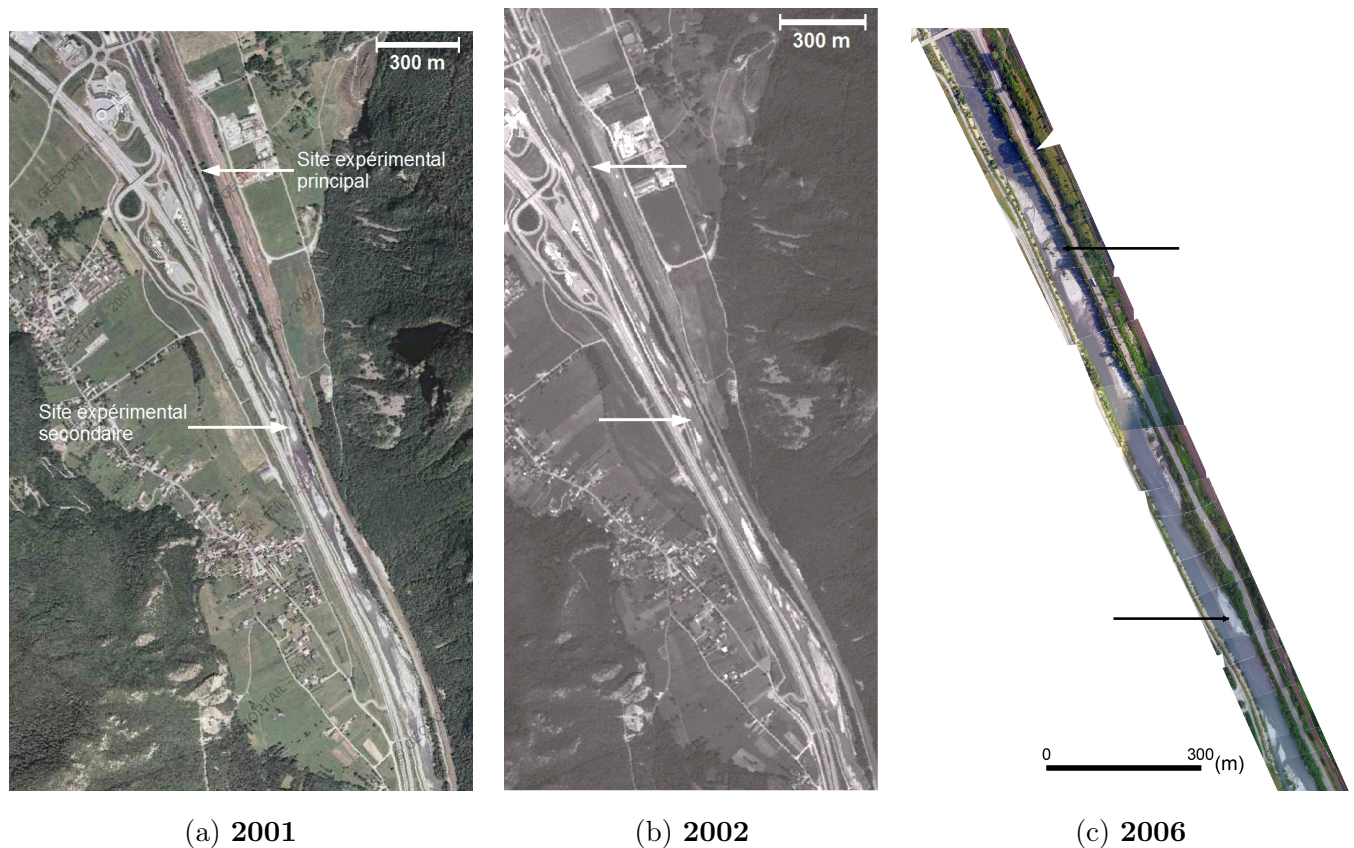


FIG. 2.5 – Site d'étude : (a) Photographie©IGN (<http://www.geoportail.fr>), 23-07-2001, pixel $\approx$ 40 cm. (b) Photographie satellite Spot5, 19-07-2002, pixel=2.5 m. (c) Photographie drone Cemagref, 05-07-2006, pixel=6 cm.

aucun autre dépôt n'est identifiable jusqu'à la limite amont du secteur d'étude. Les bancs de galets semblent s'être mis en place après 1997. Les bancs sont bien visibles en 2001, la crue d'octobre 2000 avec un fort apport sédimentaire est sûrement responsable de la formation des bancs. Depuis 2001, les bancs de galets sont sensiblement aux mêmes emplacements. Entre 2001 et 2006, ils se sont engraisés et des chenaux de jonction sont apparus. La faible résolution des photos de 2001 et 2002 ne permet ni de faire un bilan morphologique plus détaillé, ni de repérer une éventuelle végétalisation des bancs.

2.3 Evénements

Sur l'hydrogramme relatif à la période de la thèse 2005-2007 (FIG. 2.6), on peut facilement remarquer les variations saisonnières de débit liées à la fonte des neiges et détecter les variations journalières liées aux éclusées. Quatre événements dépassent 100 m³/s : les chasses hydrauliques annuelles effectuées par EDF (les 16-06-2005, 27-06-2006 et 05-06-2007) et une crue naturelle à l'automne 2006 (le 15-09-2006). Ces quatre événements significatifs ont été étudiés dans la thèse.

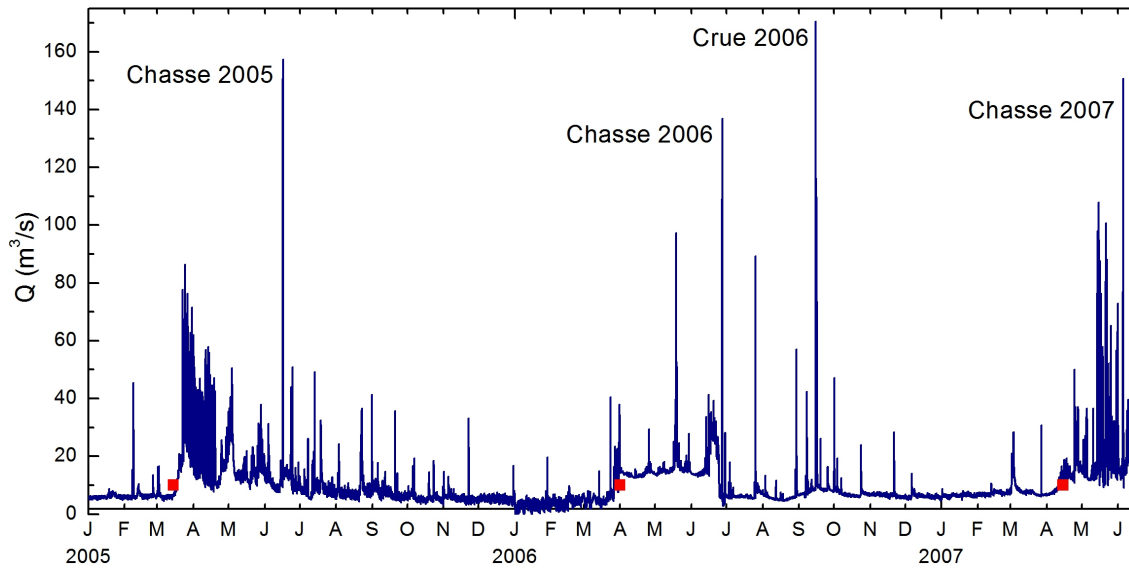


FIG. 2.6 – Hydrogramme estimé au site d'étude sur la période 2005-2006, le début de la fonte des neiges est indiqué par un carré rouge. Sources : EDF et Cemagref. L'hydrogramme est établi grâce à une relation hauteur-débit (cf. paragraphe 4.1.2).

Barrage	capacité utile (m ³)	date de construction	distance au site expérimental (km)
Freney	165000	1969	36
Pont-des-Chèvres	1000000	1972	30
Saint-Martin-La-Porte	125000	1972	18

TAB. 2.1 – Retenues de l'Arc moyen concernées par les chasses hydrauliques annuelles.

La planification quelques semaines à l'avance des chasses permet un déploiement facilité pour les campagnes de mesures, alors que les mesures en cours de crue sont moins faciles à planifier.

2.3.1 Des chasses hydrauliques annuelles

L'opération de chasse hydraulique est une procédure⁴ suivie par les exploitants de retenue pour évacuer des sédiments par lâcher de volumes d'eau importants. Les chasses hydrauliques sur l'Arc moyen concernent trois retenues (TAB. 2.1). Depuis la mise en service de ces barrages, les chasses sont régulièrement réalisées en fonction de l'engrèvement des retenues pour récupérer de la capacité utile (EDF, 2002). Depuis 1996, elles sont régies par une procédure qui s'inscrit dans le cadre du contrat "Rivière Arc" et résulte d'un arrêté préfectoral. D'après la Consigne de chasse de l'Arc moyen (EDF, 1999), les objectifs officiels sont :

⁴ L'opération de chasse ne doit pas être confondue avec l'opération de chasse dont la définition réglementaire correspond à un contrôle de sûreté du barrage (source EDF).

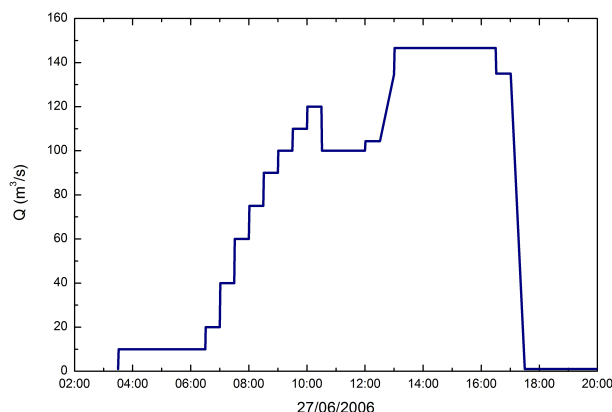


FIG. 2.7 – Hydrogramme estimé en sortie du barrage de Saint Martin-la-Porte pour la Chasse 2006. Source : EDF.

- *maintenir un état de référence défini, suivi et contrôlé par le comité "Rivière Arc" du lit de la rivière afin d'assurer le passage des crues. La chasse permet d'évacuer les cônes accumulés aux confluent des torrents avec la rivière.*
- *transiter les apports solides et sédiments accumulés par les trois retenues permettant à EDF de récupérer une partie des volumes perdus de ces retenues*
- *vérifier le bon fonctionnement des vannes de vidange des retenues par une ouverture complète de ces organes de sécurité.*

Ces chasses viennent compléter les curages mécaniques ponctuels ou réguliers des barrages qui ne concernent que les matériaux grossiers en amont de la retenue. Ces opérations visent à remobiliser les matériaux fins plus proches du barrage. Ces dernières années, la périodicité des chasses est annuelle ; elles ont lieu en période de fonte des neiges (mai-juin-juillet) pour profiter des débits naturels plus importants.

Le protocole suivi par EDF pendant la chasse (FIG. 2.7) est identique depuis 2005 (EDF, 2006). A partir de 3-4h le matin, La chasse commence par une vague d'alerte, i.e. un lâcher d'eau claire de 10 m³/s par les clapets de surface des trois barrages. L'abaissement des plans d'eau du Pont-des-Chèvres et de Saint-Martin-La-Porte est obtenu par turbinage jusqu'à la cote minimale d'exploitation et par augmentation progressive du débit lâché par les vannes de fond suivant une stratégie permettant d'éroder au mieux les sédiments de la retenue. Par exemple, sur le barrage de Saint-Martin-La-Porte en 2007 (FIG. 2.8), après fermeture des clapets de surface, la vanne rive gauche est d'abord remontée pour favoriser la reprise de la plage de dépôt quasi-permanente puis les deux autres vannes sont ensuite ouvertes. Pour la retenue amont (Freney), l'abaissement du plan d'eau est obtenu uniquement par ouverture progressive d'une vanne de fond. Les débits sont augmentés graduellement, avec un soutien par turbinage amont. Le débit maximum est maintenu environ 3h, et le retour au débit réservé se fait progressivement sur 2h. Les débits atteints lors des chasses

correspondent approximativement à ceux d'une crue annuelle, i.e. environ 150 m³/s.

Le débit déversé au barrage est calculé à partir de l'ouverture des vannes de façon fiable tant que les niveaux sont acquis correctement. Mais lorsque les plans d'eau passent sous la cote minimale de mesure des capteurs, le calcul n'est plus valide. Tant que la retenue n'a pas atteint le régime torrentiel, le débit lâché est donc estimé avec une erreur importante. En régime torrentiel le débit est déduit des débits turbinés par les différentes centrales amont et des limnimètres.

En général, les chasses sont jugées relativement efficaces (EDF, 2006), le gain de capacité utile étant variable d'une retenue à l'autre et d'une année à l'autre. A titre d'exemple, lors des derniers événements, les masses de sédiments évacués à l'aval de la dernière retenue sont estimées respectivement à 148×10^3 , 20×10^3 et 127×10^3 tonnes pour les années 2004, 2005 et 2006 (EDF, 2006).

Pendant les événements de chasse, la qualité de l'eau est suivie par le bureau d'étude IRAP pour le compte d'EDF sous la forme de mesures de paramètres physiques et chimiques : température, oxygène dissous, pH, conductivité, ammoniacale. Les différents états des lieux (IRAP, 2000, 2001, 2003, 2005; EDF, 2006) montrent une incidence faible des chasses sur la qualité de l'eau. L'effet des chasses sur les peuplements d'invertébrés est plus difficile à mettre en évidence par manque de données, ce peuplement étant naturellement limité à cause de l'instabilité du substrat et de l'homogénéité des habitats. On fait donc l'hypothèse d'un impact des chasses sur les peuplements d'invertébrés temporaire et négligeable. Etant données les potentialités réduites du milieu, le peuplement piscicole de l'Arc est faible. Il a tout de même été remarqué un effet d'emportement des individus les plus jeunes moins aptes à résister au courant. Globalement la qualité hydrobiologique de l'Arc est estimée très mauvaise avant et après les chasses (EDF, 2006).

2.3.2 Une crue naturelle de faible amplitude, automne 2006

Sur la durée de la thèse, aucune crue majeure n'a eu lieu sur l'Arc. Une crue d'amplitude similaire aux chasses hydrauliques a eu lieu le 15-09-06 : débit de pointe $Q_{max}=170$ m³/s et durée d'environ 40 h. Cet événement est lié à des pluies importantes sur l'amont du bassin de l'Arc. Les retenues ont été mises en mode "transparent" pendant la crue. L'événement est intéressant dans le sens où les apports sédimentaires sont a priori différents de ceux d'une chasse.

2.4 Synthèse du chapitre

Le secteur d'étude est localisé sur l'Arc (Maurienne). Il s'agit d'un secteur de rivière endigué rectiligne avec des bancs de galets alternés, représentatifs de la morphologie de l'Arc aval. Le régime hydrologique de type nival est fortement influencé par les aménagements hydrauliques. En l'absence de crue naturelle importante, l'étude s'est focalisée sur les chasses hydrauliques (2005-2006-2007) pratiquées sur les retenues de l'Arc moyen. La planification quelques semaines à l'avance des chasses

2. Présentation du site d'étude

permet aussi un déploiement facilité pour les campagnes de mesures. Une petite crue naturelle à l'automne 2006 a aussi été étudiée en complément des trois évènements artificiels. L'essentiel de l'étude se limite à un banc de galets à l'aval du site d'étude. Des données ont également été acquises sur un deuxième site expérimental, un banc alterné à l'amont du site principal. Son évolution est étudiée en complément des analyses faites sur le banc principal.

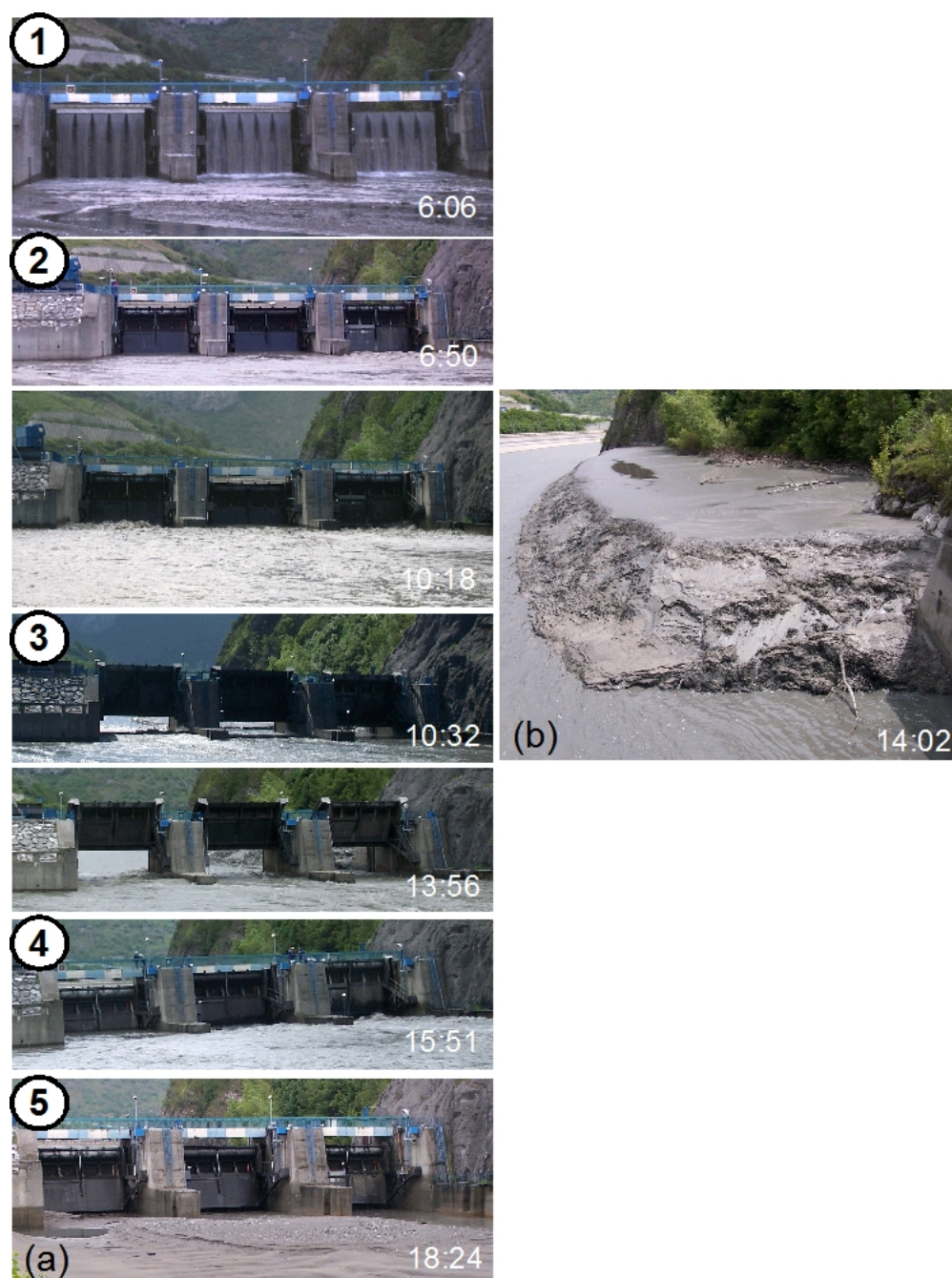


FIG. 2.8 – Retenue de Saint-Martin-la-Porte, chasse 2007. (a) Séquence d'ouverture des vannes (vues depuis l'aval) 1. lâcher d'eau claire par les clapets de surface 2. ouverture des vannes de fond en commençant par la vanne rive gauche 3. passage en torrentiel 4. fermeture des vannes en commençant par la vanne rive droite 5. retour au débit réservé. (b) Dépôt de sédiment dans la retenue en rive gauche, à proximité des vannes. Photos©N. Ball, B. Camenen.

Mesures morphologiques

La description morphologique du cours d'eau comprend une représentation détaillée de sa géométrie et de la granulométrie des sédiments. Dans ce chapitre, les techniques et les méthodes de mesure expérimentales sont détaillées, ainsi que les méthodes d'interpolation et d'analyse des données morphologiques. Si des techniques traditionnelles sont utilisées, des méthodes ont aussi été développées spécifiquement pour cette étude. Les méthodes d'interpolation des données topographiques ont aussi été appliquées à l'étude bathymétrique des retenues concernées par les chasses hydrauliques. Les mesures morphologiques sont utilisées à terme (i) pour visualiser les modifications du chenal au cours du temps, (ii) pour quantifier les motifs d'érosion/dépôt et les taux de transport de sédiments, et (iii) pour servir de données d'entrée et d'évaluation pour les modèles numériques bidimensionnels hydrodynamiques et sédimentaires. Bien qu'appliquées sur plusieurs configurations, toutes les méthodes sont illustrées sur un exemple seulement, l'ensemble des résultats expérimentaux étant présenté et analysé dans les chapitres 5 et 6.

3.1 Topographie

3.1.1 Outils et protocole de mesure

La géométrie des sites expérimentaux a été suivie entre 2005 et 2007 à travers neuf campagnes topographiques sur le site principal, et deux sur le site secondaire (TAB. 3.1). Sauf exceptions, les campagnes topographiques encadrent à quelques jours près les événements étudiés.

Les outils utilisés (FIG. 3.1), parfois simultanément, pour les campagnes topographiques sont :

un tachéomètre (station totale Leica TC305). Un opérateur ajuste la visée optique infra-rouge pour repérer la position d'une ou plusieurs mires montées sur des cannes de hauteur ajustable (1.5 m à 3.6 m). Pour couvrir l'ensemble du domaine à décrire, un changement de station est nécessaire lorsque la visibilité n'est pas suffisante. L'incertitude globale est de l'ordre de 2-3 cm sur les trois coordonnées (x,y,z).

un système dGPS (*differential Global Positioning System*). Un récepteur évalue sa position par rapport à une dizaine de satellites américains et/ou russes (système GLONASS), la communication se faisant par signal radio daté. Les écarts de position calculée provenant de l'incertitude sur la position des satellites, des perturbations de la propagation de l'onde radio dans l'atmosphère, de la non-synchronisation des horloges sont calculées en continu par un récepteur

3. Mesures morphologiques

site	événement	date	nom	débit (m ³ /s)	outil	nombre de points
banc aval	chasse 2005	15-06-2005	bav1	12	station totale	182
		17-06-2005	bav2	12		140
		01-09-2005	bav3	7		436
	hiver 2006	29-03-2006	bav4	13	dGPS	668
	chasse 2006	08-06-2006	bav5	10		664
		04-07-2006	bav6	6		844
	crue 2006	05-10-2006	bav7	9	dGPS et station totale	1093
	chasse 2007	01-06-2007	bav8	20		791
		06-06-2007	bav9	16		671
banc amont	chasse 2006	13-06-2006	bam1	12	station totale	469
		11-07-2006	bam2	6		381

TAB. 3.1 – Campagnes topographiques.

fixe de position connue (base). Ces écarts sont transmis aux récepteurs mobiles, localement affectés des mêmes perturbations, qui corrigent ainsi leur position en temps réel. La même méthode est utilisée pour exploiter un réseau d’antennes fixes (post-traitement). La qualité de la mesure dépend du nombre de satellites visibles par les récepteurs (base et mobiles) et de la communication base-mobile (par radio VHF). Les masses rocheuses et la végétation empêchent souvent la communication avec les satellites en les masquant. Malgré l’étroitesse de la vallée, aucun problème de masque n’a été rencontré sur le site expérimental. Les levés bav4 à bav9 ont été effectués avec les GPS Trimble 5800 RTK (matériel de l’UMR5600) et GPS Leica system 1200 utilisé avec 2 récepteurs mobiles. L’incertitude est de l’ordre de quelques centimètres sur les coordonnées (x,y,z)

Le protocole de mesure a été adapté après les deux premières campagnes de repérage de 2005 (bav1 et bav2). Pour optimiser le temps passé sur le terrain, le protocole est fortement lié à la méthode d’interpolation choisie (cf. paragraphe 3.1.2). Il est identique de la campagne bav3 à la campagne bam2. Pour des raisons pratiques (contraintes EDF), toutes les campagnes topographiques ont été faites sur la journée avec 3 à 6 personnes.

L’endiguement rectiligne de l’Arc dans ce secteur impose une direction d’écoulement privilégiée qui est aussi une direction remarquable en terme de topographie. Les variations latérales de la topographie du lit sont souvent plus importantes que les variations longitudinales. Dans cette situation, la topographie des rivières est souvent interpolée linéairement entre deux sections en travers (Ferguson *et al.*, 1992; Simon et Castro, 2003).

Suivant cette hypothèse, le levé topographique est constitué de sections en travers, espacées de 5 à 20 m. Dans les zones de rupture de pente, où l’interpolation linéaire n’est plus justifiée et où une



FIG. 3.1 – Déploiement pendant des campagnes topographiques (a) Station totale Leica TC305 et opérateur à la visée, (b) levé sur une section avec trois opérateurs munis de mires, (c) installation de la base dGPS (Leica system 1200), et (d) levé topographique avec le mobile dGPS du même système.

mesure distribuée est indispensable (Lane *et al.*, 1995), la densité des mesures est augmentée. En particulier, dans les zones de chenaux de jonction, des sections en travers de ces chenaux sont levées plus finement.

Pour des débits supérieurs à $10 \text{ m}^3/\text{s}$, la progression de l'opérateur dans le chenal d'écoulement principal est rendue difficile par des vitesses supérieures à 1 m/s , et des hauteurs d'eau supérieures à 1 m . La densité de points de mesure dans cette zone dépend donc fortement du débit. Sur la durée du suivi expérimental, les berges sont supposées fixes, et ces zones ne sont pas mesurées systématiquement.

A titre d'exemple, la campagne de juillet 2006 contenant 839 points sur une surface d'environ $20\,000 \text{ m}^2$ donne une densité de points d'approximativement 0.04 points/m^2 (FIG. 3.2).

Les coordonnées des points de mesure sont géoréférencées dans le système NGF/Lambert III par translation et rotation à partir de deux points de référence : un point fixe (point "murette") installé par le Cemagref sur le chemin carrossable le long du site d'étude et un point topographique DDE (point 3216A ou point 3217A) sur la route nationale. Des points de contrôle (repères DDE, repères Cemagref, bornes GDF) permettent de s'assurer de la cohérence des campagnes topographiques (FIG. 3.3)¹ Les écarts en z à la moyenne ne dépassent jamais 5 cm (écart type des écarts= 1.6 cm),

¹Des écarts aberrants ($\Delta z \approx -70 \text{ cm}$) ne sont pas présentés sur le graphique, ils correspondent au levé du pied d'une borne GDF plutôt que le sommet.

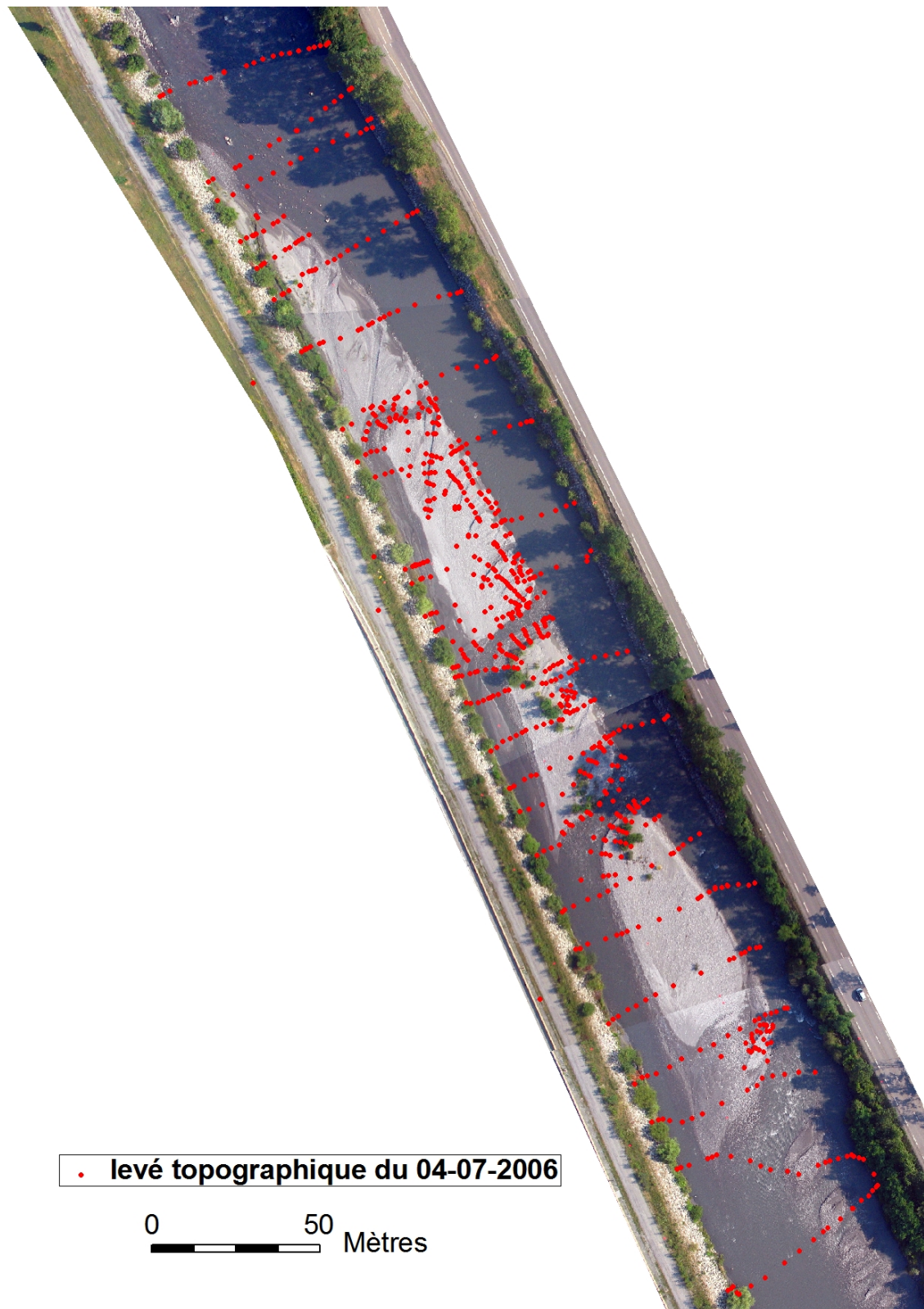


FIG. 3.2 – Levé topographique sur le site principal (campagne du 04-07-2006). Chaque point est une mesure topographique. La flèche donne le sens de l'écoulement.

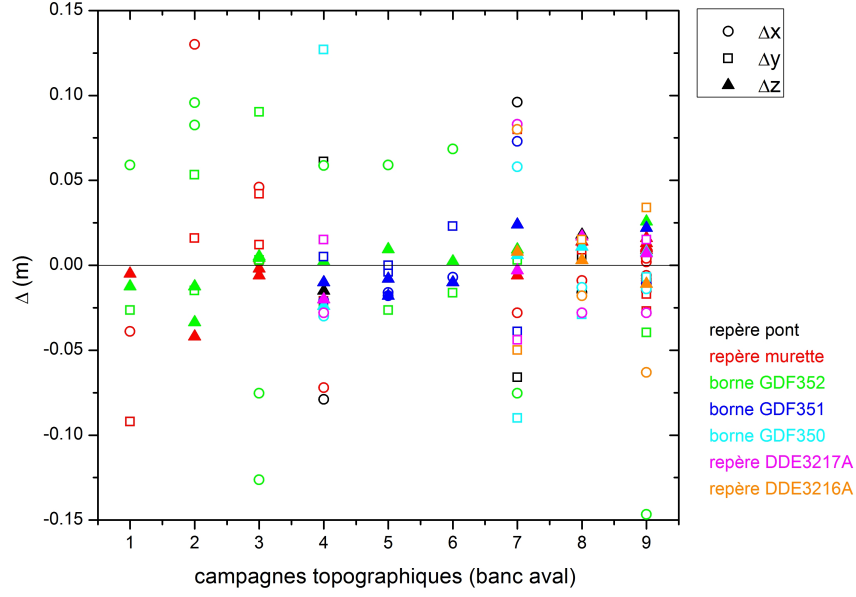


FIG. 3.3 – Ecarts des coordonnées (x,y,z) des points de contrôle par rapport à la moyenne pour toutes les campagnes du site principal.

les écarts en x et y sont plus importants (écarts types des écarts respectifs = 6.1 et 4.7 cm), mais restent satisfaisants. On gardera donc comme incertitude type sur les mesures topographiques 2 cm en z et 6 cm en x et y .

3.1.2 Méthode d'interpolation

Les levés topographiques sont utilisés pour estimer les changements d'altitude du lit et comme entrée des modèles hydrodynamiques et sédimentaires. Pour remplir ces objectifs, les données topographiques sont interpolées en deux temps :

1. Construction du maillage de calcul : Un semis de points de berge, réalisé antérieurement, est d'abord ajouté au levé topographique du lit. La densité des points topographiques est très hétérogène puisque les levés ont été faits principalement suivant des sections en travers pour gagner du temps sur le terrain. Les données sont donc interpolées linéairement sur la base des sections en travers et de lignes directrices, liées aux singularités ou rupture de pente des sections en travers (haut et bas de berge, limites de chenal, limite du banc), à l'aide de l'exécutable `secma.exe` développé par le Cemagref. Seules les sections en travers complètes sont dans un premier temps isolées². Sur cette base une interpolation longitudinale permet de compléter les sections en travers incomplètes. Des sections en travers et des lignes directrices sont ensuite spécifiquement définies pour les chenaux de jonction. Les sections en travers et

²Un programme MATLAB a été développé spécifiquement pour sélectionner graphiquement ces sections dans un semis de points.

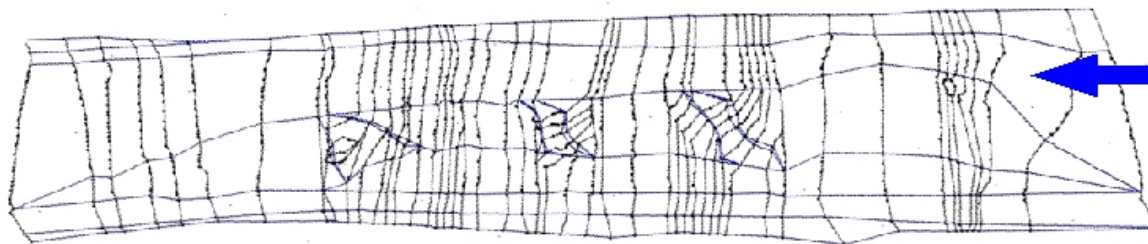


FIG. 3.4 – Exemple de définition de sections en travers et de lignes directrices (bleues) pour le levé topographique du 04-07-2006. Un semis de points de berge a été ajouté au levé topographique original. Le graphique a été tourné de 65° . La flèche indique le sens de l'écoulement.

les lignes directrices définies par l'utilisateur sont matérialisées dans un fichier `.st` (FIG. 3.4). Une interpolation linéaire est conduite avec un pas d'espace 2 m (executable `secma.exe`). Les points du semis n'ayant pas été pris en compte dans les sections en travers sont introduits grâce à l'exécutable `modifm.exe`.

2. Interpolation sur une grille régulière : pour permettre la comparaison de toutes les campagnes topographiques, le résultat de l'étape précédente est interpolé linéairement sur une grille régulière similaire pour toutes les campagnes avec le logiciel SURFER7.04. Le pas d'espace (0.5 m) est suffisamment petit pour prendre en compte toutes les singularités topographiques, du moins celles détectées lors des mesures. On appellera Modèle Numérique de Terrain (MNT³) le résultat de cette opération.

3.1.3 Incertitudes locales des Modèles Numériques de Terrains

Outre les incertitudes liées à la mesure (de l'ordre de quelques centimètres, cf. paragraphe 3.1.1) et à la taille des sédiments (quelques centimètres également), les points interpolés sont entachés d'une incertitude sur l'altitude liée à la distribution spatiale des points de mesure mais aussi à la méthode d'interpolation (Brasington *et al.*, 2000; Wechsler, 2003). La comparaison des valeurs interpolées avec des mesures de contrôle entre les sections en travers aurait permis d'estimer expérimentalement l'erreur d'interpolation. En l'absence de tels points supplémentaires, deux méthodes simples d'estimation de l'incertitude sur l'altitude ont été développées dans ce travail pour faciliter l'interprétation ultérieure des MNT. Une interpolation des points de mesure par krigeage aurait permis une estimation directe de l'incertitude associée au processus d'interpolation. Cependant, dans ce cas d'étude pour lequel la répartition des points de mesure est très inhomogène, une interpolation

³dans tout ce travail le terme MNT est l'équivalent du terme anglais *DEM*, *Digital Elevation Model*.

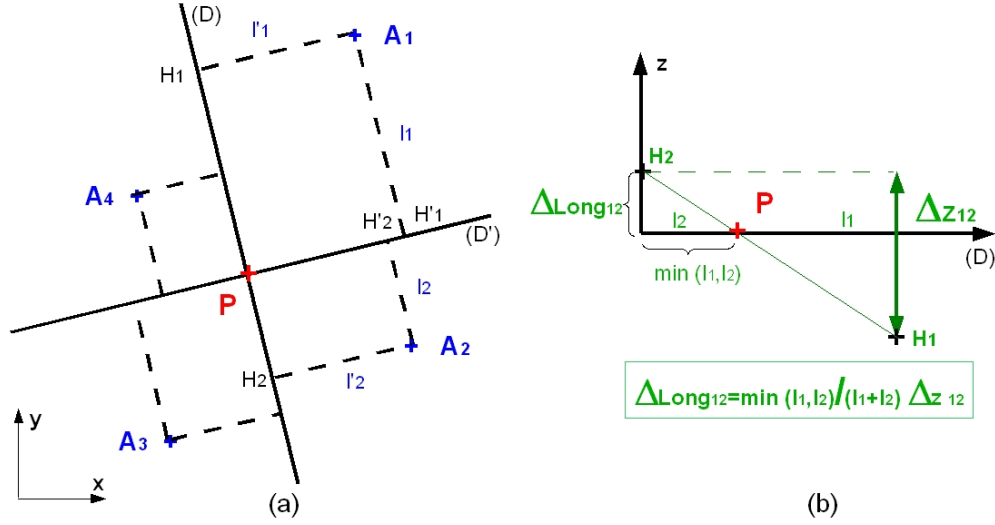


FIG. 3.5 – Schéma géométrique pour l'estimation de l'incertitude au point d'interpolation P. (a) Dans le plan (x,y) : (D) est la droite de direction moyenne de la rivière sur le site expérimental passant par P, D' sa perpendiculaire passant par P, et A_i les points de mesure les plus proches de P dans chacun des quatre cadrans. (b) dans le plan (D,z).

par krigeage n'aurait pas donné de résultat satisfaisant.

Une première méthode consiste à ne considérer que la distance entre un point d'interpolation et son voisin le plus proche, soit d cette distance. Cette méthode permet uniquement de cartographier la densité locale des points (FIG. 3.6 a). De façon simplifiée, l'incertitude au point d'interpolation peut être estimée comme le produit $d \times i$, avec i la pente moyenne du lit.

Une seconde méthode consiste à prendre en compte de façon simple le mode d'interpolation (méthode 2). L'interpolation linéaire se fait latéralement suivant des sections en travers et longitudinalement suivant des lignes directrices (cf. paragraphe 3.1.2). L'incertitude sur l'altitude du point interpolé est importante si (i) la densité locale de points est faible (distance au point le plus proche importante) et si (ii) la pente locale est importante (Δz de deux points proches important).

Pour prendre en compte les points (i) et (ii), un algorithme a été codé dans MATLAB avec plusieurs paramètres géométriques (FIG. 3.5). On définit la direction moyenne du chenal à partir des berges, en supposant les deux berges parallèles. Soit P (x,y) un point du plan où l'altitude est interpolée suivant la première étape de la méthode décrite au paragraphe 3.1.2 avant l'interpolation finale sur la grille fine. Quatre cadrans sont définis à partir de l'intersection de la droite parallèle aux berges, (D), et de sa perpendiculaire, (D'), passant par P. Soient $A_i (x_i, y_i, z_i)$, avec $i=1$ à 4, les points les plus proches de P dans chacun des quatre cadrans, H_i le projeté de A_i sur (D) et H'_i le projeté sur

(D'). $\Delta z_{ij} = z_j - z_i$ est défini comme la différence d'altitude entre A_j et A_i , et $l_i = H_i P$ et $l'_i = H'_i P$ les distances à P des projetés. On définit alors les incertitudes longitudinale et transversale au point P :

$$\Delta Long = \frac{1}{2} \left(\frac{\min(l_1, l_2)}{l_1 + l_2} \Delta z_{12} + \frac{\min(l_3, l_4)}{l_3 + l_4} \Delta z_{34} \right) \quad (3.1)$$

$$\Delta Lat = \frac{1}{2} \left(\frac{\min(l'_1, l'_4)}{l'_1 + l'_4} \Delta z_{41} + \frac{\min(l'_2, l'_3)}{l'_2 + l'_3} \Delta z_{32} \right) \quad (3.2)$$

On estime alors l'incertitude au point P en combinant les équations (3.1) et (3.2) :

$$e_2 = \alpha |\Delta Long| + (1 - \alpha) |\Delta Lat| \quad (3.3)$$

L'effet de l'incertitude longitudinale est rendu prédominant pour rendre compte de l'hypothèse forte d'interpolation linéaire suivant l'axe de la rivière, $\alpha = 0.75$. Les cartes d'incertitude pour les deux méthodes (e_1 et e_2) permettent d'évaluer les zones où l'interpolation est fiable. Pour la première méthode, la carte de la FIG. 3.6 (a) donne clairement la densité locale de points. En particulier, dans les parties aval et amont du site, où les variations d'altitude sont faibles et régulières, les sections sont espacées, et la topographie peut y être facilement interpolée linéairement longitudinalement à partir des sections en travers. Ces zones apparaissent naturellement comme des zones où la distance entre point est importante.

Sur la carte de la FIG. 3.6 (b), la prise en compte dans l'estimation de l'incertitude de la méthode d'interpolation fait mieux apparaître les quelques zones dans le lit où il aurait fallu détailler plus la topographie. Ces zones sont souvent difficilement accessibles à cause de fortes vitesses. Les berges, zones à très forte pente latérale, ont un fort coefficient e_2 . Si elles avaient fait l'objet d'une étude détaillée, un levé dense aurait été indispensable. Dans tout ce travail, les berges sont supposées fixes.

Pour toutes les campagnes topographiques sur le site expérimentale principal (bav1 à bav9), les MNT et les cartes d'estimation de l'incertitude associée à l'interpolation sont données en annexe B.

Lors de la comparaison par différence de deux MNT pour estimer les érosions et dépôts, en supposant les deux MNT indépendants, l'incertitude cumulée peut être estimée par la formule suivante (Brasington *et al.*, 2003) :

$$e_{total} = \sqrt{e_{MNT1}^2 + e_{MNT2}^2} \quad (3.4)$$

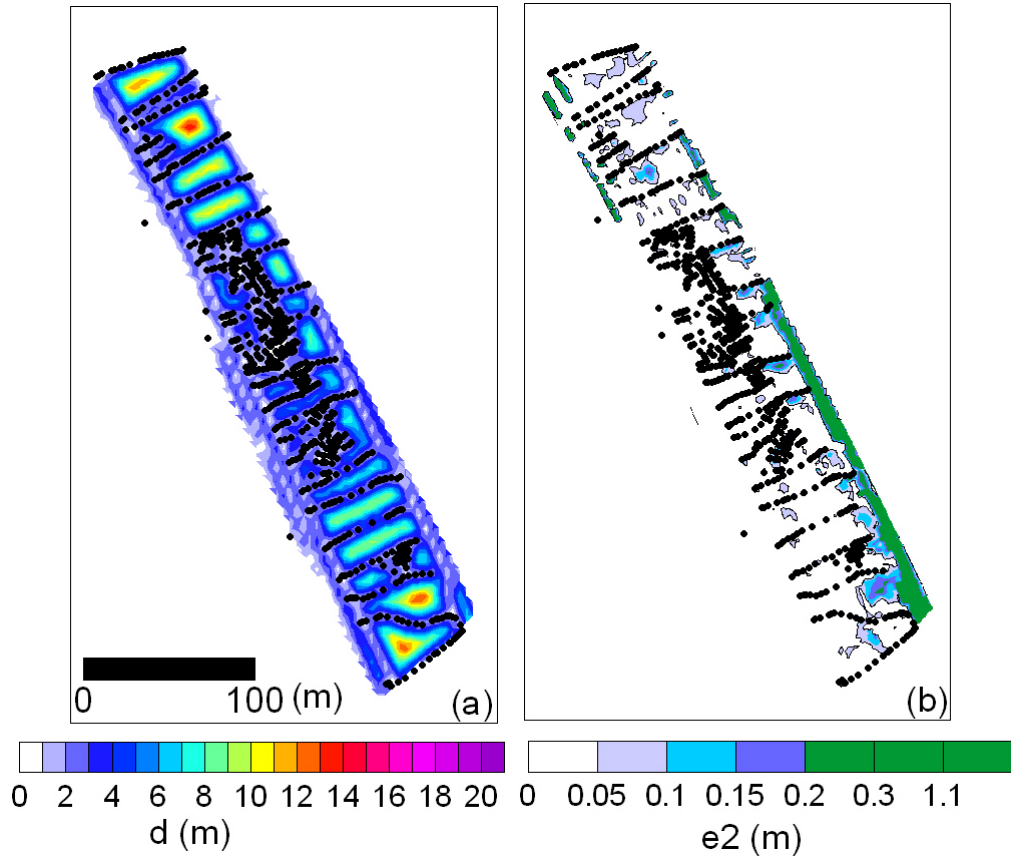


FIG. 3.6 – Estimation de l'incertitude locale sur l'exemple de la campagne topographique du 04-07-2006 (bav6). (a) cartographie de la densité locale de points (distance au point mesuré le plus proche). (b) Incertitude estimée suivant la méthode 2 (e_2 équation 3.3).

3.1.4 Application au bilan sédimentaire

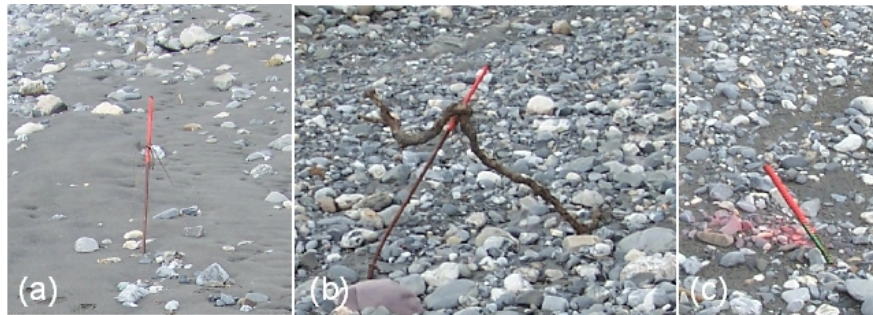


FIG. 3.7 – Exemples de repères fixes installés dans le lit (fers d'armature à béton). (a) repère ayant gardé son enfoncement d'origine, (b) repère en zone d'érosion, plié par l'écoulement avec une laisse de crue, (c) repère en zone de fort dépôt, une vingtaine de centimètres sont seulement hors du lit de galets.

Les modifications morphologiques du lit sont estimées suivant trois méthodes :

1. Une méthode ponctuelle donne une information locale, et directement vérifiable sur le terrain,

des épaisseurs d'érosion et/ou de dépôt. Des tiges métalliques, de type fer à béton de hauteur 1.5 m et de diamètre 12 mm (FIG. 3.7), sont enfoncées de 50 cm environ dans le lit de galets. Ces tiges ont été rarement arrachées, mais elles ont souvent été pliées dans le sens de l'écoulement. La cote du lit au pied de chaque repère fixe est topographiée systématiquement. Ce dispositif est proche de celui des chaînes d'érosion (Laronne *et al.*, 1994). Au cours d'une période d'observation, l'information dynamique sur une séquence érosion-dépôt n'est cependant pas observable pour ce dispositif. Les épaisseurs d'érosion et de dépôt observées varient entre quelques centimètres et 50 cm.

2. Des sections en travers de référence, prises systématiquement dans l'alignement des repères fixes du lit, sont aussi comparées. Ces sections sont projetées sur un même segment. L'identification des érosions et des dépôts sur ces sections en travers permet de dresser un premier bilan sédimentaire : soit en estimant de façon simple sur chaque section les aires verticales de dépôt et d'érosion, puis en moyennant sur chaque zone inter-section ; soit en prenant en compte les formes longitudinales, à la manière de Fuller *et al.* (2003). Cette comparaison permet un premier bilan sédimentaire, mais le banc contient des éléments, comme les chenaux de jonction, qui ne respectent pas la direction privilégiée matérialisée par les berges. Une comparaison tridimensionnelle est donc indispensable.
3. En confrontant une approche par comparaison de sections en travers et une approche par comparaison de MNT, Fuller *et al.* (2003) montrent que la première approche sous-estime largement les volumes érodés ou déposés, et cela à cause de changements morphologiques significatifs entre les sections en travers. L'estimation des volumes érodés et déposés et du bilan se fait par différence des MNT établis suivant la méthode du paragraphe 3.1.2. Le logiciel SURFER7.04 est utilisé pour effectuer les opérations algébriques sur les grilles fines.

Une fois le volume de changement estimé, de nombreux travaux (par exemple Eaton et Lapointe, 2001; Brasington *et al.*, 2003) en déduisent un débit solide net moyen en utilisant la formule suivante :

$$(1 - p)\Delta V = (Q_{bE} - Q_{bS})\Delta t \quad (3.5)$$

où p est la porosité, Q_{bE} et Q_{bS} les débits solides respectivement entrant et sortant (m^3/s) pendant l'intervalle de temps Δt considéré. Or, puisqu'elle n'est fondée que sur le stockage dans le tronçon considéré, cette estimation ne fournit qu'une borne inférieure du débit solide dans le tronçon : le transport peut avoir lieu sans modification morphologique visible et les zones d'érosion peuvent être compensées par des dépôts consécutifs (Fuller *et al.*, 2003).

3.2 Mesures granulométriques de surface

Les mesures granulométriques pour ce travail se sont limitées à des mesures surfaciques. Elles rendent compte de la rugosité de surface et des modifications granulométriques les plus récentes.

Une particule sédimentaire peut être caractérisée par les trois axes de l'ellipsoïde associé : l'axe le plus long (axe a), l'axe intermédiaire (axe b) et l'axe le plus petit, l'épaisseur (axe c). Pour de nombreux cas, une seule mesure caractéristique de la particule suffit. L'axe b sert de référence, il correspond à la dimension de la particule mesurée par tamisage.

Les particules sont généralement réparties en classes granulométriques. Pour obtenir une distribution normale des particules, les bornes de classes suivent une progression de facteur 2, avec des classes intermédiaires. Ces classes sont ensuite regroupées en catégories (TAB. 3.2). Dans tout ce travail, on distinguera les mesures des sédiments grossiers (graviers, galets et blocs) des mesures de sédiments plus fins (sables et limons, de dimension inférieure à 2 mm).

3.2.1 Granulométrie des sédiments grossiers

Alors que la taille des sédiments fins peut facilement être mesurée par tamisage, cette méthode peut difficilement être appliquée à des sédiments de taille plus importante, car elle nécessite le prélèvement de volumes d'échantillon représentatif très importants. Des méthodes alternatives ont été développées pour permettre la mesure granulométrique in-situ, sans trop perturber le lit de la rivière.

La méthode de référence adoptée pour nos mesures est celle de l'échantillonnage par grille (*grid sampling*) selon Rice et Church (1998) et Bunte et Abt (2001). Cette méthode consiste à mesurer l'axe b des particules situées exactement à tous les noeuds d'une grille régulière. Le pas d'échantillonnage est pris égal à deux fois l'axe b de la particule la plus grosse. Bunte et Abt (2001) ont observé que, pour obtenir un échantillonnage représentatif, le nombre minimal de particules à échantillonner doit être compris entre 100 et 200. L'utilisation du gabarit (FIG. 3.8 a) permet de classer rapidement une particule sédimentaire. On retient systématiquement la dimension du plus petit carré dans lequel la particule peut passer. Il faut compter une heure environ pour échantillonner une centaine de particules pour deux personnes.

Cette méthode d'échantillonnage sur grille engendre deux biais par rapport à un échantillonnage par tamisage : (i) une sous-estimation des particules les plus fines due aux difficultés rencontrées par les opérateurs pour les saisir ; (ii) une estimation des fréquences en nombre d'individus et non en fonction de leur masse.

La mesure granulométrique présentée au paragraphe précédent est très coûteuse en temps. Des

3. Mesures morphologiques

Description des particules		$d(mm)$	$\varphi = -\log_2(d)$
bloc <i>boulder</i>	très gros <i>very large</i>	4096	-12
	gros <i>large</i>	2048	-11
	moyen <i>medium</i>	1024	-10
	petit <i>small</i>	512	-9
		256	-8
cailloux <i>cobble</i>	grossier <i>large</i>	128	-7
	fins <i>small</i>		-6
gravier <i>gravel</i>	très grossier <i>very coarse</i>	64	
	grossier <i>coarse</i>	32	-5
	moyen <i>medium</i>	16	-4
	fin <i>fine</i>	8	-3
	très fin <i>very fine</i>	4	-2
sable <i>sand</i>		2	-1
	très grossier <i>very coarse</i>	1	0
	grossier <i>coarse</i>	0.5	1
	moyen <i>medium</i>	0.25	2
	fin <i>fine</i>	0.125	3
limon <i>silt</i>	très fin <i>very fine</i>	0.0625	4
	très grossier <i>very coarse</i>	0.0313	5
	grossier <i>coarse</i>	0.0156	6
	fin <i>fine</i>	0.00781	7
	très fin <i>very fine</i>	0.00391	8
argile <i>clay</i>	très grossier <i>very coarse</i>	0.00195	9
	grossier <i>coarse</i>	0.000977	10
	fin <i>fine</i>	0.000489	11
	très fin <i>very fine</i>	0.000244	12

TAB. 3.2 – Classification granulométrique de Wentworth (1922), d’après de Bunte et Abt (2001), avec les terminologies française et anglaise (en italique). *Le terme galet (pebble) correspond à un gravier ou cailloux avec les bords arrondis.*

techniques d’analyse d’image (Rollet, 2002) ou d’estimation visuelle des diamètres d_{16} , d_{50} et d_{90} par des opérateurs entraînés (Latulippe *et al.*, 2001) permettent de réduire ces temps de mesure. Dans ce travail, une évaluation granulométrique visuelle par zones, complétée par des mesures de référence, permet d’obtenir une information généralisée à tout le banc de galets étudié (Jodeau *et al.*, 2007a). La méthode comprend trois étapes :

1. Sur le terrain, un opérateur définit des polygones à l’intérieur desquels la granulométrie est jugée suffisamment homogène ; ces polygones sont tracés sur une photographie aérienne du banc. Pour chaque surface, l’opérateur évalue visuellement la proportion surfacique de chacune des classes (c_1 à c_5) de l’échelle de Wentworth (1922) : sables et limons (<2 mm), graviers (<6.4 cm), petits galets (<12.8 cm), gros galets (<25.6 cm), blocs (>25.6 cm). Un pourcentage surfacique p_i est retenu pour les trois classes dominantes.
2. Les polygones sont digitalisés, géoréférencés avec le logiciel ARCMAP, et convertis en format

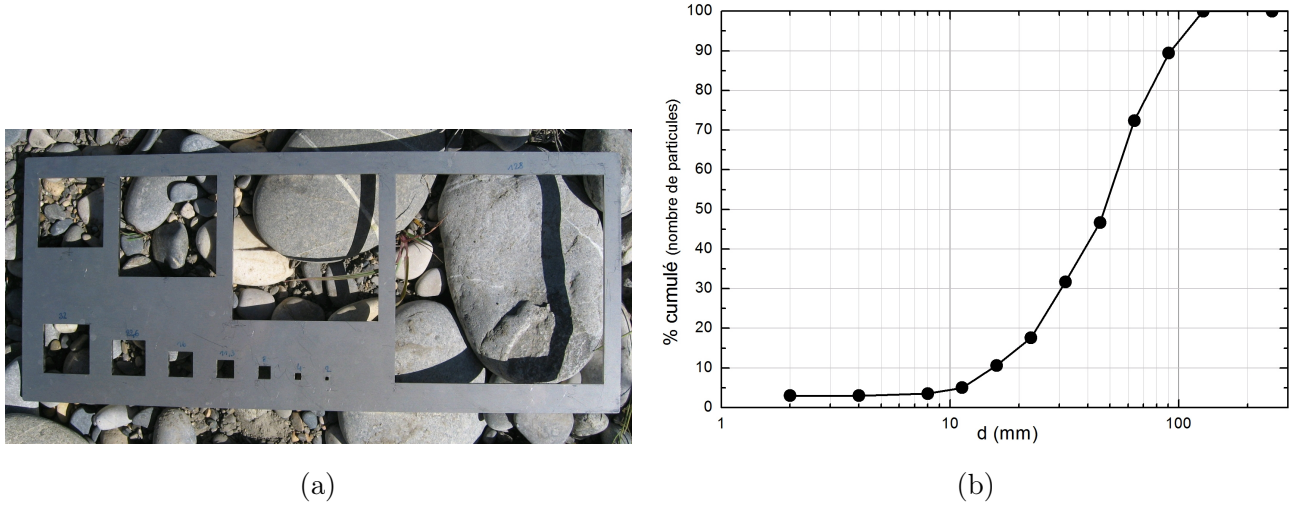


FIG. 3.8 – (a) Gabarit de mesure granulométrique, réalisé à partir du modèle de l'UMR5600. Les côtés des carrés mesurent 4, 8, 11.3, 16, 22.6, 32, 45.3, 64, 90.5, 128 mm. (b) Exemple de répartition granulométrique des sédiments de surface obtenue par échantillonnage sur grille (06-07-2007). Photo©B. Camenen.

raster pour faciliter les opérations ultérieures. Le format raster est composé d'une grille régulière de pixels contenant chacun cinq paramètres (p_i) représentant les proportions de sédiments dans chaque classe (c_i).

3. Cette première classification conduit à un nombre trop important de classes, et ne permet pas de comparaison facile entre des états différents. Une reclassification est proposée sur la base d'une classe moyenne : $c_{mean} = \sum_{i=1}^5 c_i p_i$, en affectant à c_i son indice (i.e. $c_i = i$). Si deux surfaces tombent alors dans la même classe avec des compositions très différentes, elles sont discriminées à partir de leur composition en utilisant un critère sur les p_i . La classification finale est donnée TAB. 3.3.

Ces nouvelles classes sont directement mises en relation avec des courbes de composition granulométrique obtenues par la méthode conventionnelle du paragraphe précédent (FIG. 3.9). Comme pour les mesures topographiques, les mesures granulométriques sont difficiles dans les zones à forte vitesse d'écoulement. Les observations de terrain laissent supposer que le chenal d'écoulement principal est composé de gros galets (12.8-25.6 cm).

3.2.2 Granulométrie des sédiments fins

La granulométrie des dépôts de sédiments fins est mesurée indépendamment des sédiments grossiers. Elle est mesurée classiquement par tamisage mécanique (FIG. 3.10). Un échantillon témoin permet de mesurer par pesée, après séchage, le pourcentage d'humidité dans l'échantillon. L'échantillon est pesé, et est ensuite passé dans un emboîtement de tamis du plus grossier au plus fin (tailles des mailles 1000, 500, 250, 125, 63, 40, 20 μm). Ces tamis sont mis en mouvement pendant 10 min

3. Mesures morphologiques

Classe (raster)	description	c_{mean}	formule de discrimination
1	sédiments fins et graviers	1-1.5	$p_1 \geq p_2$
2	graviers et sédiments fins	1.5-1.9	$p_1 < p_2$
3	petits galets et sédiments fins	2	$p_1 \approx p_3 \approx .5$
4	graviers	2	$p_2 = 1$
5	petits galets, graviers et séd. fins	2-2.5	$p_3 \geq 0.5 + p_2 + p_1$
6	"	2.5-3	"
7	gros galets (chenal principal)	3-3.5	$p_3 \geq 0.5 + p_2 + (p_4)$
8	blocs métriques (berges)	5	$p_5 = 1$

TAB. 3.3 – Classification utilisée pour la granulométrie des bancs de galets.

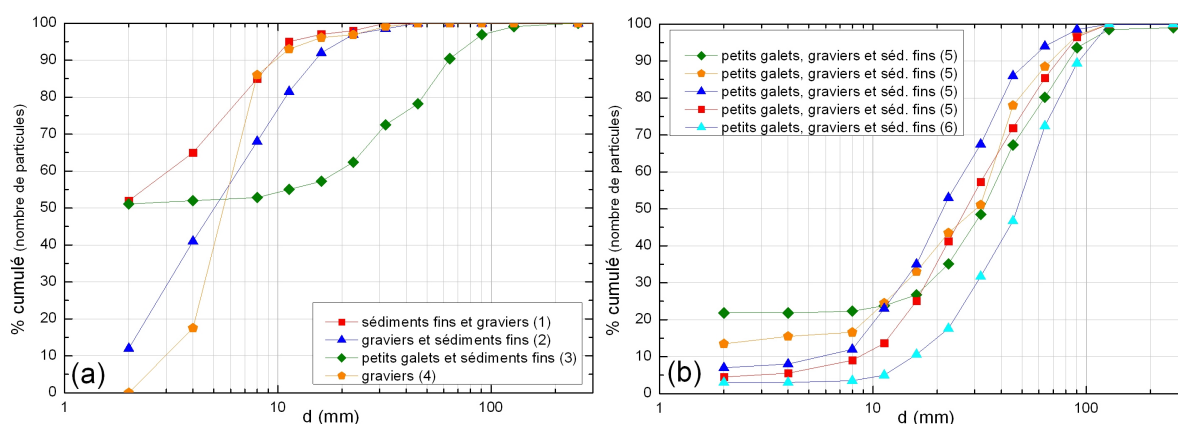


FIG. 3.9 – Courbes granulométriques pour la classification finale du TAB. 3.3. (a) Classes 1 à 4 et (b) classes 5 et 6

(période 10 s et amplitude des vibrations 1.30 mm). Toutes les fractions contenues dans les tamis sont récupérées, séchées à l'étuve (24 h à 90°C), et enfin pesées. Le pourcentage massique de chaque classe granulométrique est calculé.

La granulométrie laser permet d'automatiser et d'affiner la mesure granulométrique (classes de 0.02 μm à 2 mm). La technique est fondée sur la diffraction et sur la diffusion d'un faisceau laser (théorie de Fraunhofer, mesure de la dimension des particules par analyse de la figure de diffraction, et théorie de Mie pour les particules inférieures à 100 μm). Le granulomètre utilisé dans ce travail est un Mastersizer 2000 (Malvern), propriété de l'OTHU et disponible à l'ENTPE. Le résultat est un volume de particules (obtenu grâce à une hypothèse de sphéricité à partir des sections efficaces mesurées) pour chaque classe granulométrique ; le lien avec le pourcentage massique se fait simplement en supposant une masse volumique constante pour les particules (2650 kg/m³). Les résultats obtenus avec les deux méthodes de granulométrie sont directement comparables (FIG. 3.11).



FIG. 3.10 – Granulométrie des sédiments fins par tamisage : (a) colonne de tamis, agitateur mécanique et circuit d'eau, (b) échantillon de sédiments fins prélevé dans un dépôt du lit, (c) pesée (résolution 0.01 g). Photos©M. Lagouy.

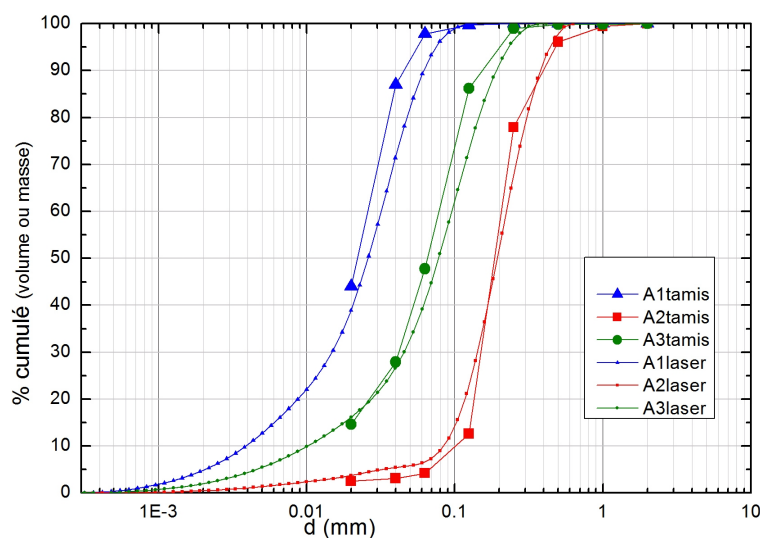


FIG. 3.11 – Comparaison des répartitions granulométriques obtenues par tamisage mécanique ou par granulomètre laser.

3.3 Imagerie aérienne haute résolution

3.3.1 Matériel et mise en oeuvre

Des campagnes de photos aériennes haute résolution ont été effectuées sur le secteur d'étude à trois reprises (avril, juin et juillet 2006). Pour ces campagnes, nous avons profité de l'expérience de l'UMR5600 à travers la thèse de Jérôme Lejot. Les photos sont prises avec un appareil numérique (Canon PowerShot G5 5 Mpixels ou Canon PowerShot G3 4 Mpixels) fixé sur un drone, petit engin

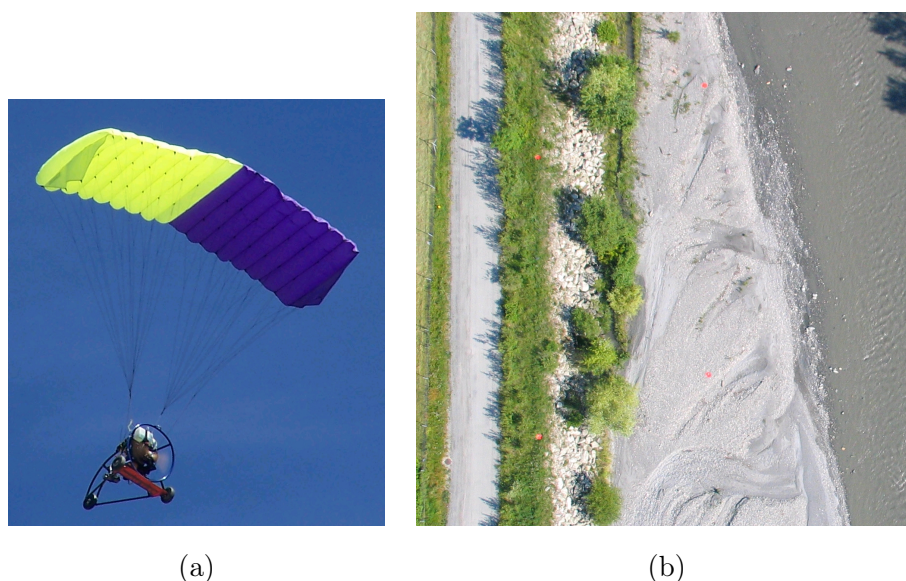


FIG. 3.12 – (a) Drone utilisé pour les campagnes de photos aériennes haute résolution. (b) Exemple de photographie obtenue, les carrés rouges sont les points de repère utilisés pour la rectification et le géoréférencement des images.

para-moteur radio-commandé mis au point par l'IRD Montpellier et commercialisé par la société ABS aerolight (France) sous le nom de *drone Pixy* (FIG. 3.12 a). Le drone vole à basse altitude (<150 m) à une vitesse moyenne de 10 m/s, et il est soumis à la réglementation concernant les aéro-modèles. La résolution des images dépend évidemment de l'altitude, elle est de 4-6 cm en moyenne. Les vols sont effectués le matin, car dès la fin de matinée, une brise de Nord empêche tout contrôle du drone, très sensible aux perturbations du vent. Le vol est impossible si le vent est supérieur à 25 km/h (Raclot *et al.*, 2005). Les vols des trois campagnes ont été menés par Marie-Laure Trémelo (assistance technique et topographie dGPS, UMR5600) et Thierry Fournier (pilotage, Cemagref). Les images obtenues sont rectifiées et géoréférencées avec le logiciel ARCMAP à partir de points de repère distribués sur tout le site d'étude. Les coordonnées de ces repères, carrés de toile cirée rouge de 40 ou 50 cm de côté, sont acquises par dGPS (Trimble 5800 RTK). Ces images souffrent de quelques inconvénients : des zones d'ombres parfois importantes, des écarts de luminosité entre les prises de vue même successives, une saturation de certains pixels due aux reflets sur la surface libre.

3.3.2 Application au suivi morphologique

Sous condition du respect d'un certain nombre de critères, ce type de photographie aérienne peut être utilisé pour le suivi morphologique des cours d'eau. Les résultats obtenus peuvent être de plusieurs natures : (i) une information sur le relief et (ii) une information sur la composition du sol (type de végétation, type de substrat, caractérisation granulométrie...). Cette information est

souvent qualitative bien que pouvant être quantitative pour certains cas spécifiques.

Théoriquement, il est possible à partir de deux photos aériennes (stéréo-photographies) de reconstituer la topographie de l'objet photographié. La principale technique utilisée est la photogrammétrie (Kraus et Waldhäusl, 1998; Baily *et al.*, 2003). Elle est appliquée en particulier à la topographie de lits de rivière exondés (Lane *et al.*, 1994; Lane, 2000) ou en eau ; on parlera dans ce cas de bathymétrie. Cette technique est employée notamment pour le suivi morphologique des rivières à tresses (Lunt et Bridge, 2004) et pour l'estimation des volumes d'érosion et dépôt (Landwehr et Rhoads, 2003).

Dans le cas général de reconstitution de relief par photographie aérienne, cette technique est opérationnelle (utilisée par exemple par l'IGN). L'utilisation d'une plate-forme légère et peu stable comme le drone et d'appareils non métriques comme les appareils photographiques commerciaux utilisés impose des adaptations spécifiques et le respect de plusieurs critères. Il faut (i) un rapport base (distance horizontale entre deux positions de prise de vue) sur hauteur proche de 1, (ii) un bon recouvrement entre deux photos (60%), (iii) de bonnes conditions de prise de vue (prise de vue verticale, ligne de vol rectiligne, hauteur de vol constante et une parallaxe dans la seule direction de vol⁴), (iv) un minimum de six points de repère identifiés sur chaque image. Si les conditions (i), (ii) et (iv) sont facilement respectées avec le drone, ce n'est pas le cas de la condition (iii) limitant ainsi fortement l'utilisation de la photogrammétrie. Des travaux de recherche sont actuellement en cours (notamment à l'UMR5600 avec la thèse de J. Lejot, et au Cemagref avec les thèses de A. Jacomes, D. Feurer) mais une utilisation directe dans ce travail n'a pas été possible.

Si l'objectif visé est l'obtention de la bathymétrie (Butler *et al.*, 2002; Westaway *et al.*, 2000), la tâche se complique, car il faut prendre en compte la réfraction à l'interface air-eau et les phénomènes de diffusion et d'atténuation dans l'eau. Et surtout, l'eau doit rester claire pour permettre la distinction du fond de la rivière. Des procédures fondées sur une calibration hauteur-couleur sont aussi utilisées (Carbonneau *et al.*, 2006). Sur l'Arc, même lorsque le transport solide par suspension est faible, il reste relativement important par rapport à d'autres rivières françaises, et l'eau n'est jamais suffisamment claire pour distinguer le fond sur tout le secteur étudié.

L'analyse des photos aériennes en terme de topographie restera donc qualitative ; les modifications des sous-unités morphologiques (cf. paragraphe 2.2.2) sont identifiées sur les trois jeux de photos aériennes.

⁴c'est-à-dire qu'un même point doit être idéalement situé sur une même ligne d'une image à l'autre, au minimum, il ne doit pas y avoir de rotation entre les images.

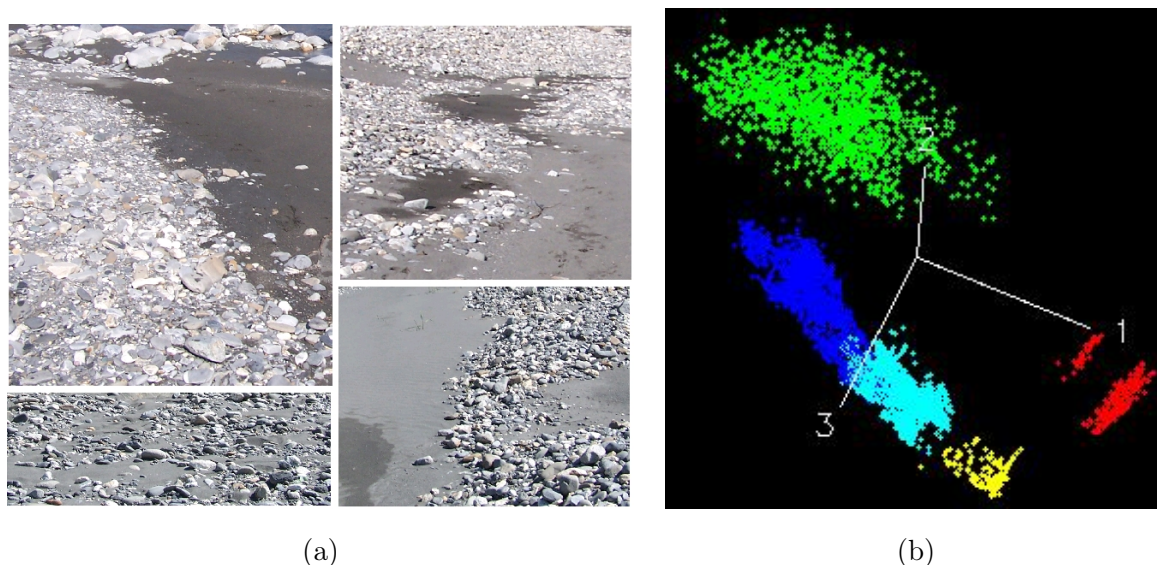


FIG. 3.13 – (a) Exemple d'états de surface du lit ; les galets se distinguent visuellement des sédiments fins. (b) Visualisation tridimensionnelle dans le repère RGB des signaux des ROI ; chaque point représente une zone de référence.

3.3.3 Application à l'analyse granulométrique : suivi des surfaces de dépôt de sédiments fins

Comme l'analyse granulométrique des sédiments grossiers (cf. paragraphe 3.2.1) est très coûteuse en temps de terrain, des techniques basées sur l'analyse d'image ont récemment émergé. Plusieurs travaux font état de résultats sur l'acquisition automatique de données granulométriques à partir d'images numériques. Si la résolution des photographies permet de distinguer clairement les particules (1 particule = 50 à 2000 pixels), par exemple sur des photographies prises depuis le sol, une analyse par segmentation peut fournir la taille des sédiments de type galet (Butler *et al.*, 2002; Graham *et al.*, 2005; Rollet, 2002). Lorsque la résolution est trop faible pour distinguer les particules une à une, une approche automatisée pour l'analyse granulométrique des zones émergées reste tout de même possible (Carbonneau *et al.*, 2004). A partir de paramètres calibrés sur des informations obtenues au sol, la semi-variance 2D peut être corrélée au diamètre médian des grains. Cette analyse de type géostatistique peut être complétée par une analyse de texture (Verdu *et al.*, 2005) et étendue aux zones immergées (Carbonneau et Bergeron, 2005).

La résolution des photographies des trois campagnes (1 pixel $\approx$ 5 cm) est comparable à la taille moyenne des galets (5-10 cm) dans le lit, et ne permet donc pas d'utiliser les images pour obtenir une information quantitative sur la taille des particules. Par contre, les surfaces de dépôt de sédiments fins sont facilement identifiables sur le lit de galets.

Une méthode simple est utilisée pour identifier quantitativement les surfaces de sédiments fins sur les images aériennes. Sur les surfaces émergées du lit de l’Arc, on peut facilement discriminer les zones de dépôts de sédiments fins du lit de galets : elles apparaissent comme des zones plus foncées mais aussi plus homogènes (FIG. 3.13 a).

Ces deux critères (couleur et texture) sont utilisés pour délimiter automatiquement les surfaces de sédiments fins de manière quantitative. Sur les jeux de photographies obtenues avec le drone, l’analyse de la couleur des pixels n’est pas suffisante car la luminosité varie d’une image à l’autre, même sur deux images successives. Cet effet est probablement lié à l’inclinaison variable de la plateforme de photographie. L’analyse de texture a été appliquée avec succès par Carbonneau *et al.* (2005), pour différencier les sables des galets. Dans un premier temps, pour juger de la faisabilité de la méthode, les surfaces de dépôt de sédiments fins ont été identifiées qualitativement sur les images et digitalisées manuellement avec les outils ARCMAP.

L’analyse, menée dans les locaux de l’UMR5600 grâce aux logiciels commerciaux ARCMAP et ENVI4.3, est détaillée sur la FIG. 3.14 et ci-dessous :

Préparation : la première étape du travail consiste à choisir les images à analyser pour couvrir toute la zone d’étude avec une résolution suffisamment importante. Ces images sont rectifiées et géoréférencées (ARCMAP). Sur chaque image, la zone d’analyse (ici le banc de galet émergé) est extraite avec un masque. Les images sont ensuite assemblées en mosaïque. Un ajustement des couleurs est effectué à partir d’une des images (l’image référence) ; les autres images étant ajustées à partir des statistiques des trois canaux de couleur de l’image référence. Les zones de recouvrement sont traitées en moyenne à partir des signaux des deux images (Envi4.3, 2006).

Analyse spectrale : la seconde étape consiste à classifier les pixels en fonction de leur couleur. La couleur de chaque pixel est définie par une valeur sur les trois canaux RGB (*Red Green Blue*). On définit au préalable, sur toute une mosaïque d’images, des zones de référence pour représenter les classes d’intérêt (ROI pour *Region Of Interest*). Les classes définies sont : végétation, balises, galets, sédiments fins clairs et sédiments fins foncés. La pertinence de la définition de ces ROI est vérifiée : il faut peu de recouvrement entre le signal de ces ROI dans l’espace à trois dimensions RGB. Le recouvrement est contrôlé avec l’outil *nD Visualizer* (FIG. 3.13 b). Une classification supervisée permet d’attribuer à chaque pixel une classe. La méthode de classification choisie est celle de la classification par distance minimale (*minimum distance classification*, Envi4.3, 2006). La distance euclidienne, dans l’espace tridimensionnel RGB, entre le pixel d’étude et le vecteur moyen de chaque ROI est calculée. Le pixel d’étude est ainsi associé à la classe la plus proche. La pertinence de cette classification est vérifiée qualitativement par comparaison du résultat et de l’image d’origine.

On peut ensuite effectuer une étape de généralisation qui consiste à modifier la classe d’un

pixel en fonction des classes de ses plus proches voisins par des filtres (*post classification processing, clumping and sieving*). Cela permet de lisser le résultat en regroupant les pixels quasi identiques.

Le résultat est exporté au format raster, chaque pixel du raster R_s contient une variable (1, 2, 3, 4, 5) qui correspond à une des classes précédentes : végétation (1), balises (2), galets (3), sédiments fins clairs (4) et sédiments fins foncés (5).

Analyse texturale : cette étape, inspirée de Carbonneau *et al.* (2005), est menée en parallèle de l'analyse spectrale. La texture permet de quantifier les motifs spatiaux et leur variabilité dans l'image. La matrice de co-occurrence permet de dénombrer les pixels identiques voisins. Elle est construite en comparant tous les pixels de l'image séparés par une distance d dans une direction v . L'élément (i, j) de la matrice de co-occurrence P est le nombre de fois que les niveaux de gris i et j sont séparés d'une distance d dans une direction v . Pour rendre l'analyse plus facile, la matrice P est souvent réduite à une seule valeur (moyenne, contraste, corrélation, énergie, entropie, homogénéité, écart-type). Une approche par fenêtre de taille réduite est utilisée pour récupérer une information spatialisée. Des tests sur la variable texturale, en comparant qualitativement le résultat avec la mosaïque originale, ont montré que la variable contraste, $C = \sum_{ij}(i - j)^2 P(i, j)$, avec une fenêtre de travail de 3×3 pixels, est bien adaptée à notre objectif.

Cette analyse donne une information sur la variabilité spatiale du signal spectral des pixels. Le résultat est simplifié par un seuillage : les pixels résultats sont classés en deux catégories : zone homogène (1) ou zone non homogène (2).

Le résultat est exporté au format raster, chaque pixel du raster R_t contient une variable (de valeur 0 ou 1) qui correspond à la variabilité spatiale de la zone considérée.

Résultat final : les deux analyses sont ensuite prises en compte simultanément au moyen d'une opération algébrique sur les rasters ($R_f = (R_s == 3 \text{ ou } R_s == 4) \times R_t$). Le résultat est lissé en comparant la valeur de chaque pixel avec ces plus proches voisins. Le résultat final (FIG. 3.15) permet d'attribuer à chaque pixel une catégorie : (i) galets ou (ii) sédiments fins, et surtout de comparer facilement cet état à ceux obtenus pour d'autres dates.

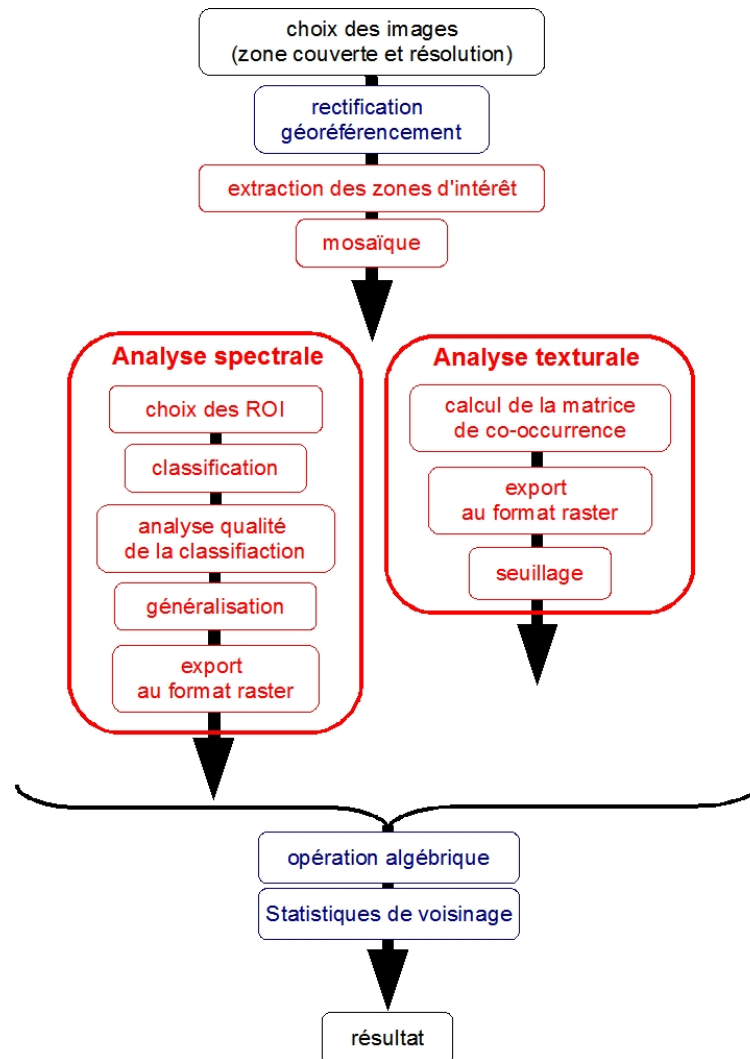


FIG. 3.14 – Schéma des étapes d'analyse des images aériennes pour l'identification des surfaces de sédiments fins. Les étapes bleues se font avec ARCMAP et les étapes rouges avec le logiciel Envi.

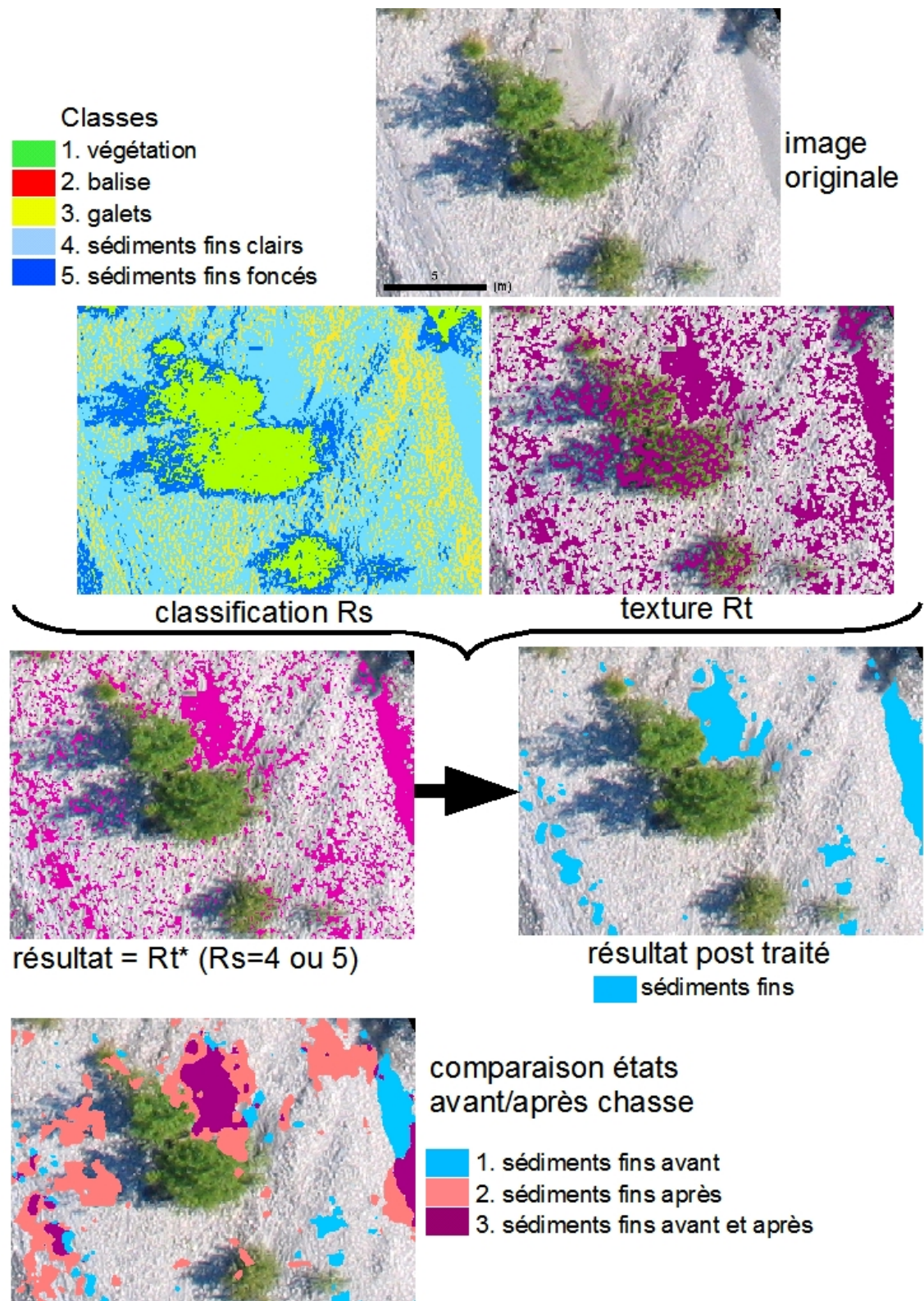


FIG. 3.15 – Etapes d’analyse des images aériennes pour l’identification des surfaces de sédiments fins sur un exemple de photographie aérienne.

3.4 Bathymétrie des retenues

Avant et après la chasse hydraulique de 2006, les bathymétries des deux retenues aval, Pont-des-Chèvres et Saint-Martin-la-Porte (FIG. 3.16), ont été mesurées par aDcp⁵ (ADCP WorkHorse Rio Grande 1200 kHz de marque Teledyne RDI). Lors des campagnes de mesure, les activités hydrauliques affectant directement les retenues ont été adaptées. Par exemple, les interventions sur la retenue de Saint-Martin-la-Porte ont demandé l'arrêt des deux centrales de Saussaz et Hermillon, imposant des interventions le samedi. Sur la retenue étroite du Freney, à l'amont, une montée très importante du niveau d'eau dans une telle configuration a empêché toute campagne de mesures. Chaque intervention s'est faite en coordination étroite avec EDF : plan de prévention, planification des dates d'intervention... La progression de l'embarcation sur les retenues a souvent été compliquée du fait d'un fort vent systématique en début d'après-midi. L'opération exigeait au minimum trois opérateurs : deux personnes sur l'embarcation pour la navigation et l'acquisition des données aDcp et un opérateur à la visée du tachéomètre sur la berge et au suivi du niveau d'eau.

3.4.1 Dispositif et mesures

Le signal de suivi du fond (*bottom-tracking*) de l'aDcp, a été utilisé pour estimer la profondeur suivant la technique proposée par Le Coz *et al.* (2007b). Un signal ultrasonique est envoyé par les quatre céramiques émetteurs/récepteurs de l'appareil ; le temps mis par le signal pour revenir au récepteur est directement proportionnel à la distance parcourue, soit deux fois la distance au fond vue par chaque capteur. Les profondeurs sont mesurées par rapport au centre des céramiques. Pour les raccorder correctement au système de référence NGF, il est nécessaire d'une part de connaître et de conserver constant l'enfoncement de l'appareil dans l'eau (e_{aDcp}), d'autre part de mesurer le niveau de la surface libre. La position de l'aDcp dans l'espace (x, y, z, t) est obtenue par repérage au tachéomètre, en notant le numéro d'ensemble correspondant (FIG. 3.17). La cote de l'eau, $z_{surface}(t)$, dans la retenue étant variable au cours du temps (remplissage pendant l'intervention), un suivi en continu est nécessaire, par lecture d'une échelle limnimétrique ou par enregistrement automatique. La cote du fond est obtenue par différence : $z_f(x, y, t) = z_{surface}(t) - h(x, y, t)$, où h est la hauteur d'eau. Des points de référence sur les berges (points IGN ou points installés par le Cemagref) permettent de comparer les campagnes bathymétriques entre elles.

3.4.2 Post-traitement des données aDcp

En général, le tirant d'eau est estimé par une moyenne arithmétique des profondeurs mesurées par chacun des quatre faisceaux. Il est cependant possible de repositionner la mesure de profondeur

⁵*acoustic Doppler current profiler*, ou courantomètre acoustique profileur, utilisé en général pour les mesures de vitesses et de débit (jaugeage).



FIG. 3.16 – Retenues de (a) Pont-des-Chèvres et (b) Saint-Martin-la-Porte.

Photos©IGN <http://www.geoportail.fr>.



FIG. 3.17 – Mesure de la bathymétrie des retenues de Pont-des-Chèvres et Saint-Martin-la-Porte à l'aDcp avant et après la chasse de 2006. (a) Embarcation avec aDcp et acquisition embarquée

effectuée par chaque faisceau à partir de la disposition géométrique des faisceaux et du cap (*heading*) mesuré par le compas. Dans le repère lié à l'appareil (axe des x du faisceau 4 vers le faisceau 3, et axe des y du faisceau 1 vers le faisceau 2), les coordonnées (x_i, y_i) des empreintes au fond des quatre faisceaux sont données par :

$$\begin{cases} (x_1, y_1) = (-h_1 \tan \beta, 0) \\ (x_2, y_2) = (h_2 \tan \beta, 0) \\ (x_3, y_3) = (0, h_3 \tan \beta) \\ (x_4, y_4) = (0, -h_4 \tan \beta) \end{cases} \quad (3.6)$$

avec β l'angle d'écartement des faisceaux (20° ici) et h_i la profondeur (verticale) mesurée par le faisceau i , une fois retranché l'enfoncement du capteur e_{aDcp} .

Pour des sections profondes, les angles de gîte (*roll angle*, ρ) et d'assiette (*pitch angle*, ϕ) enregistrés par les inclinomètres peuvent servir à corriger les erreurs de position et de profondeur dues aux rotations par rapport aux axes horizontaux. Le tangage (pitch) entraîne la modification des coordonnées y et z comme suit :

$$\begin{cases} y'_i = y_i \cos \phi + h_i \sin \phi \\ z'_i = -y_i \sin \phi + h_i \cos \phi \end{cases} \quad (3.7)$$

Le roulis (*roll*) entraîne une seconde rotation et la modification des coordonnées x et z comme suit :

$$\begin{cases} x'_i = x_i \cos \rho + z'_i \sin \rho \\ z''_i = -x_i \sin \rho + z'_i \cos \rho \end{cases} \quad (3.8)$$

Pour se repositionner dans le plan horizontal Est/Nord (x, y), il est nécessaire d'effectuer une rotation d'angle de cap γ mesuré à chaque ensemble :

$$\begin{cases} x_i = x'_i \cos \gamma + y'_i \sin \gamma \\ y_i = -x'_i \sin \gamma + y'_i \cos \gamma \end{cases} \quad (3.9)$$

Enfin, il faut ajouter l'enfoncement du capteur e_{aDcp} retranché au début des calculs :

$$z_i = z''_i + e_{aDcp} \quad (3.10)$$

Le raccordement au système de référencement NGF, ou à un repère local, est alors possible par simple translation si la position du centre du capteur et la cote de la surface de l'eau sont connues dans ce système.

3.4.3 Correction des perturbations magnétiques

En raison de perturbations magnétiques du compas de l'aDcp, probablement dues aux nombreuses lignes haute-tension et transformateurs de la vallée, des corrections ont du être apportées

aux trajectoires brutes. La formule de Smith et Evans (1861) donne l'écart, $\delta = \zeta - \zeta'$ entre le cap mesuré, ζ' , et le cap réel, ζ :

$$\sin \delta = A \cos \delta + B \sin \zeta' + C \cos \zeta' + D \sin(\zeta + \zeta') + E \cos(\zeta + \zeta') \quad (3.11)$$

d'où, si $\delta \ll 1$

$$\zeta - \zeta' = \underbrace{A + B \sin \zeta' + C \cos \zeta' + D \sin(2\zeta') + E \cos(2\zeta')}_{f(\zeta') \text{ courbe de déviation magnétique du compas}} \quad (3.12)$$

où A, B, C, D et E sont des coefficients propres à chaque fichier de données aDcp (environ 3-4 enregistrements par campagne).

Les coefficients (A, B, C, D, E) sont calculés pour minimiser la somme S des carrés des distances entre les N mesures de référence au tachéomètre, de coordonnées (x_n, y_n) , et les coordonnées aDcp corrigées, (x'_n, y'_n) , suivant l'équation (3.11) :

$$S = \sum_{n=1}^N (x_n - x'_n)^2 + (y_n - y'_n)^2 \quad (3.13)$$

Les coordonnées corrigées de l'aDcp au temps t_n sur sa trajectoire sont données par :

$$\begin{cases} x'_n = \sum_j u_{bj} \sin(\zeta'_j + f(\zeta'_j)) \Delta t_j \\ y'_n = \sum_j u_{bj} \cos(\zeta'_j + f(\zeta'_j)) \Delta t_j \end{cases} \quad (3.14)$$

où u_{bj} est la vitesse du bateau à l'instant t_j .

L'optimisation de la somme S est calculée dans un programme MATLAB en utilisant la fonction *fminsearch*.

3.4.4 Tri des données et interpolation

La mesure de profondeur par les quatre faisceaux de l'aDcp et une progression lente de l'embarcation donnent une densité de points de mesure bathymétrique sur la retenue très hétérogène. Pour réduire la densité de points sur la trajectoire du bateau, les données de profondeur sont interpolées sur une grille régulière de pas d'espace $p=1$ m. Les mesures sont interpolées avec une pondération suivant l'inverse de la distance (interpolation IDW, *Inverse Distance Weighting*), les points trop éloignés (distance au point d'interpolation $> p/2$) n'étant pas pris en compte. Le programme est écrit dans MATLAB, et, compte tenu du grand nombre de points et de la taille des mailles, le calcul est assez long (plusieurs heures).

La bathymétrie est ensuite interpolée linéairement sur la base de sections en travers et de lignes directrices, suivant la méthode appliquée à la topographie du site (cf. paragraphe 3.1.2). Une interpolation sur une grille régulière identique permet de comparer les bathymétries levées avant et après

la chasse (FIG. 3.19).

L'incertitude locale du MNT construit doit également être estimée suivant la méthode du paragraphe 3.1.3. Sur certaines campagnes, cette incertitude permet de repérer les zones dans lesquelles l'absence de point de mesure est marquée.

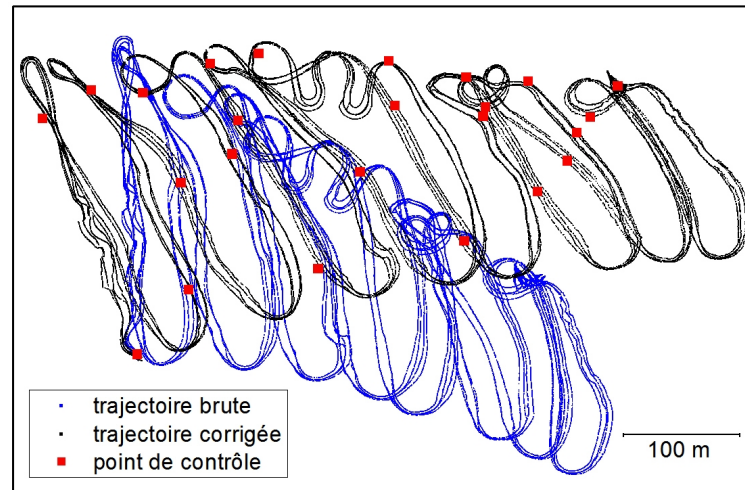


FIG. 3.18 – Recalage des trajectoires de l'aDcp sur la retenue de Pont-des-Chèvres sur un enregistrement (07-07-2006).

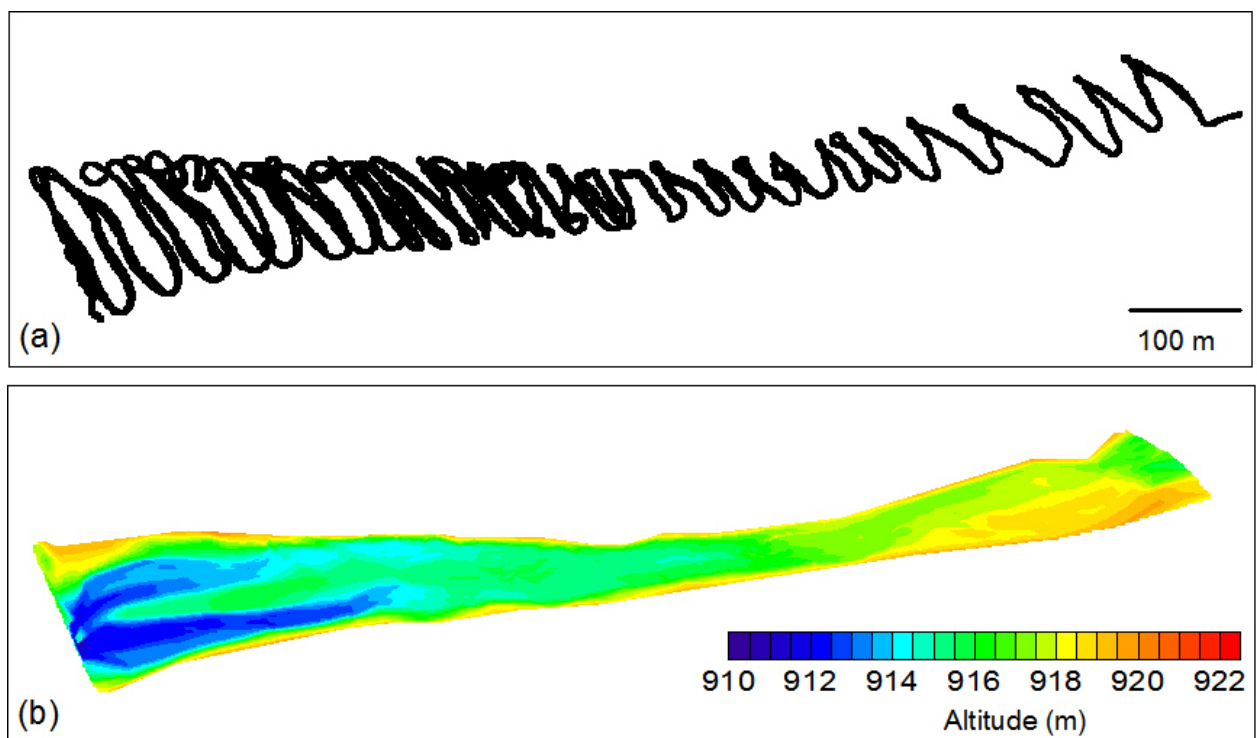


FIG. 3.19 – Bathymétrie de la retenue de Pont-des-Chèvres (07-07-2006) : (a) semis de points de mesure aDcp corrigés et (b) Modèle Numérique de Terrain estimé.

3.5 Synthèse du chapitre

La topographie des sites expérimentaux a été levée à la station totale et/ou au dGPS à neuf reprises pour le site principal et à deux reprises pour le site secondaire. Les données topographiques ont été interpolées linéairement suivant des directrices puis sur une grille homogène pour obtenir des MNT successifs directement comparables et permettre des bilans sédimentaires. La granulométrie des sédiments grossiers a été estimée à partir de repérages visuels et selon la méthode classique d'échantillonnage sur grille. Les dimensions des sédiments fins ont été mesurées par tamisage et granulométrie laser. L'imagerie aérienne du secteur d'étude n'a pas été utilisée pour une information quantitative sur la topographie, mais des analyses qualitatives d'évolution des unités morphologiques s'appuient sur ces photographies. Les photographies aériennes ont été exploitées pour déterminer quantitativement les surfaces de dépôts des sédiments fins. Les bathymétries de deux retenues ont été mesurées par aDcp, puis corrigées pour s'affranchir des perturbations magnétiques, et interpolées avec les outils utilisés pour traiter la topographie.

4

Mesures hydrométriques

Des mesures détaillées des hauteurs d'eau, des vitesses d'écoulement et des concentrations en Matières En Suspension (MES) ont été effectuées pendant les chasses hydrauliques. Des méthodes traditionnelles ont été utilisées aussi bien que des techniques plus récentes comme la méthode de suivi des champs de vitesses par LS-PIV. Sur le site d'étude, un suivi limnimétrique en continu permet l'estimation des débits entre les événements hydrologiques significatifs.

Le suivi des variables hydrodynamiques est un point essentiel des études morphodynamiques en rivière (Whiting et Dietrich, 1993; Ashworth, 1996; Eaton et Lapointe, 2001; Sukhodolov *et al.*, 2002; Le Coz, 2007). Les mesures hydrométriques permettent en effet de mieux connaître la dynamique des écoulements pour ensuite évaluer les processus sédimentaires.

4.1 Mesure des hauteurs d'eau

4.1.1 Capteurs et limites

Les capteurs de hauteur d'eau utilisés dans ce travail sont des capteurs de pression de deux types : des capteurs autonomes à membrane de type DIVER (utilisés en 2005 et 2007) et des capteurs de type bulle à bulle (utilisés en 2006 et 2007). Le capteur immergé mesure la pression exercée par la colonne d'eau. Sous une hypothèse hydrostatique, la pression, P , est reliée à la hauteur d'eau, h , par la relation :

$$P = \rho gh + P_{atmo} \quad (4.1)$$

où g est l'accélération de pesanteur, ρ la masse volumique du liquide et P_{atmo} la pression atmosphérique. Une mesure de la pression atmosphérique est toujours effectuée simultanément à la mesure de hauteur d'eau.

Le capteur autonome de type DIVER (Van Essen) transforme en grandeur électrique la déformation d'une membrane. La pression atmosphérique est suivie par un capteur BARO-DIVER. Les données sont directement stockées dans le capteur (FIG. 4.4 c). Son étendue de mesure est de 400 cm

de colonne d'eau (CE) à 4°C avec une gamme d'utilisation de 400 cm CE. La précision est de $\pm 0.1\%$ de la pleine échelle et la résolution est de 0.1 cm. Le pas d'enregistrement peut être fixé entre 0.5 s et 99 h (Dramais *et al.*, 2005). Le capteur est protégé par un tube métallique crépiné souvent fixé à la berge.

Un capteur de type bulle à bulle mesure la pression par expulsion de bulles d'air par un capillaire immergé. La pression du gaz permettant l'expulsion de la première bulle est égale à la pression du liquide à la sortie du capillaire. Le gaz utilisé pour la mesure est l'air ambiant, injecté dans le capillaire par un compresseur. La pression du gaz est mesurée par un transducteur qui émet un signal électrique. L'incertitude sur les mesures est de ± 1 cm (Courivaud, 2002). Le capillaire dont la longueur peut être de plusieurs mètres est purgé régulièrement, le voisinage de l'orifice est également nettoyé pour éviter un encrassement dû à des dépôts de sédiments fins ou au développement d'algues. Ce type d'installation est alimenté par batterie ou par panneau solaire. Les données sont stockées dans une station, et sont relevées régulièrement ou télé-transmises par GSM au Cemagref.

L'équation (4.1) montre que la mesure dépend de la masse volumique du liquide, ρ . Si l'effet de la température sur la variation de ρ et donc sur la mesure est négligeable dans la gamme d'utilisation des capteurs, il faut être plus prudent sur l'effet d'une concentration élevée en MES. La masse volumique du fluide "eau + MES" vaut

$$\rho_f = (1 - c)\rho + c\rho_s \approx \rho + C \quad (4.2)$$

où c est la concentration volumique des sédiments (m^3/m^3) supposée très faible devant 1, et $C = c\rho_s$ est la concentration massique en MES (g/l).

La pression réellement mesurée par le capteur est $P' = \rho_f g h + P_{atmo}$. La hauteur d'eau devrait donc être déduite par la relation $h' = (P' - P_{atmo})/\rho_f g$ alors que celle affichée est $h = (P' - P_{atmo})/\rho g$. L'erreur relative est donc

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{h - h'}{h} = \frac{C}{\rho + C} \quad (4.3)$$

Pour des valeurs maximales mesurées de concentrations (≈ 30 g/l), l'erreur sur la mesure de hauteur est de 2.5%, soit 4 cm seulement pour une hauteur d'eau de 1.5 m au-dessus du capteur.

Un effet d'aspiration des bulles d'air à la sortie du capillaire peut être généré par de fortes vitesses dans l'écoulement. Selon Bertrand-Krajewski *et al.* (2000), l'utilisation des capteurs bulle à bulle est limitée à des vitesses d'écoulement inférieures à 1 m/s. Pour toutes les mesures de ce travail, les capteurs ont été fixés à proximité des enrochements où les vitesses de l'eau sont largement inférieures à celles mesurées au milieu de l'écoulement. Les mesures de vitesse effectuées par Oldrich Navratil (LTHE) lors de la chasse 2007 à proximité des berges, dans une situation comparable aux

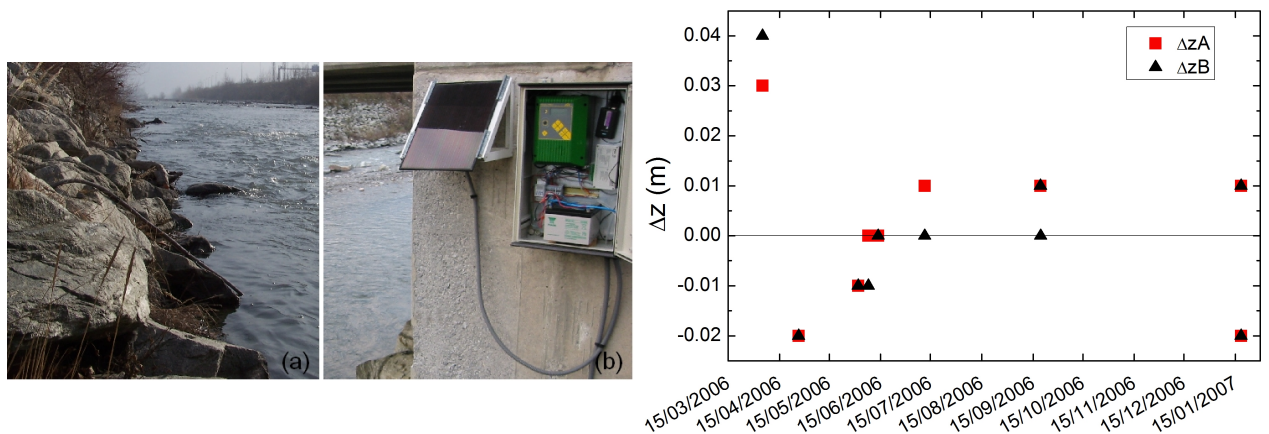


FIG. 4.1 – Station limnimétrique permanente. (a) Emplacement du tuyau protégeant le capillaire à proximité des enrochements. (b) Panneau solaire et boîtier contenant une batterie, le compresseur, la station de mesure et de stockage des données, le module de transmission par GSM. (c) Mesures de contrôle du capteur limnimétrique. L'altitude relative du zéro du capteur est mesurée par rapport à deux points fixes, A et B, marqués sur les enrochements. Photo©G. Dramais.

installations de capteurs, donnent des valeurs de vitesses qui ne dépassent pas 1.2 m/s. On peut donc admettre que les capteurs de hauteur d'eau sont utilisés dans leur gamme de fonctionnement.

4.1.2 Station limnimétrique permanente

Un capteur de hauteur d'eau avec télé-transmission a été installé en décembre 2005 sur le site d'étude. Il fournit un suivi depuis Lyon des variations de hauteur au cours de l'année, et permet éventuellement une intervention en cas de crue. La mesure se fait par un capteur bulle à bulle (capteur Nimbus avec un enregistreur OTTlog), installé dans la section du pont, à l'aval du site d'étude (FIG. 4.1a et b). Le boîtier contenant l'alimentation par batterie, le compresseur, la centrale d'acquisition et de stockage des données et le module de télé-transmission est fixé sur le pont. Un panneau solaire permet un fonctionnement en autonomie en alimentant l'ensemble. Le pas de temps de stockage des données est de 30 min, et chaque donnée correspond à une moyenne sur 20 s de 10 mesures. Les coordonnées du zéro du capteur, noté par la suite L0, ont été raccordées au système NGF. Une dérive éventuelle du capteur est contrôlée par des mesures régulières au niveau optique (Wild NA 20) de l'altitude relative du zéro du capteur par rapport à deux points fixes, A et B, marqués sur les enrochements (FIG. 4.1 c). Les variations de cote sont de l'ordre de -2 cm à +4 cm. Les deux dernières mesures avant et après nettoyage du capteur montrent qu'un encrassement de la protection de l'extrémité du capillaire peut conduire à une légère dérive de la mesure. Des données aberrantes sur les chroniques, facilement identifiables, ont également été associées à l'encrassement du capteur et éliminées.

Même si la section du pont n'est pas une section de jaugeage idéale (présence d'une pile de

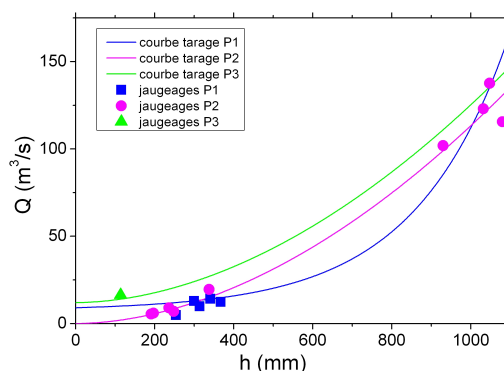


FIG. 4.2 – Courbes de tarage pour les trois périodes identifiées au site.

pont au milieu du lit et cote du fond variable dans le temps), une courbe de tarage a été établie pour estimer les variations de débit au cours de l'année. Les modifications de la section ont été identifiées clairement sur la chronique limnimétrique (du 01-12-2005 jusqu'à aujourd'hui). Trois périodes sont identifiées (P1 : du 01-12-2005 au 16-06-2006, P2 : du 16-06-2006 au 06-06-2007, P3 : du 06-06-2007 à aujourd'hui) et associées chacune à une relation hauteur-débit (FIG. 4.2). Ces courbes sont relativement arbitraires et critiquables du fait de l'absence de point de jaugeage pour les débits intermédiaires et des changements fréquents de forme pour la section. Les débits proviennent de jaugeages à faibles et forts débits (cf. paragraphe 4.2.1) et d'une chronique de débit mesurée à Saint-Rémy-de-Maurienne (2005-2006) fournie par EDF. La chronique de débit EDF, elle-même fondée sur une courbe de tarage, donne des valeurs aberrantes pour les forts débits, notamment en cours de chasse (de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ trop fortes). Elle est cependant jugée fiable à faible débit (par comparaison avec les jaugeages Cemagref). Elle permet d'identifier sur la chronique Cemagref d'éventuels points aberrants et surtout de fournir des données pour l'année 2005 avant l'installation du capteur (FIG. 2.6).

La chronique de débit obtenue pour la période 2006-2007 (FIG. 4.3) rend bien compte des variations de débit. Une comparaison des fortes valeurs de la chronique avec les estimations des jaugeages DIREN et les informations fournies par EDF permet de supposer que les débits les plus forts (aucun débordement sur cette période) sont justes. Mais les valeurs à faible débit peuvent souffrir d'une erreur relative importante due à d'éventuels changements du fond qui auraient nécessité d'augmenter la fréquence de jaugeage.

4.1.3 Mesures en cours d'évènements

Au cours des chasses hydrauliques, des mesures de hauteur d'eau ont spécifiquement été mises en place (FIG. 4.4).

En 2005, une mesure visuelle des variations de hauteur était faite sur une échelle limnimétrique installée sur la pile du pont et un capteur DIVER mesurait la hauteur sur le site expérimental

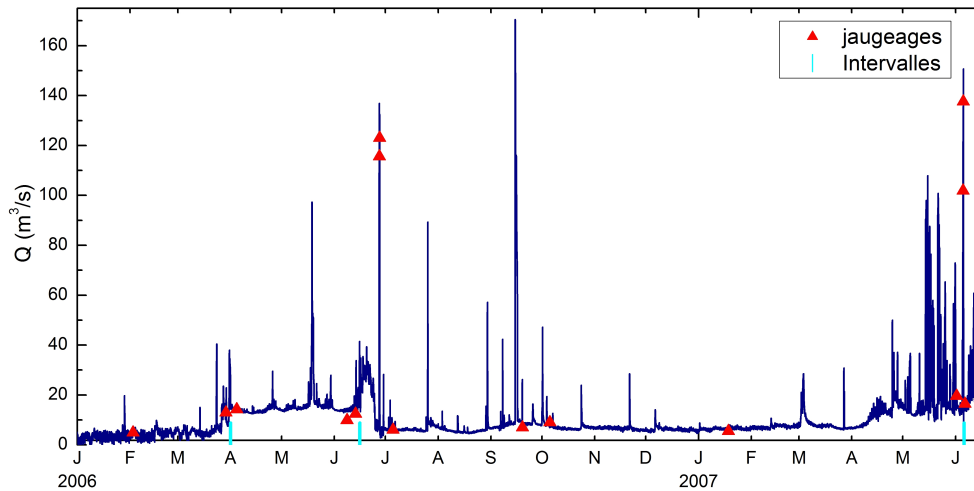


FIG. 4.3 – Chronique de débit estimée sur le site expérimental à partir de la mesure limnimétrique continue et de jaugeages à faibles et forts débits. Les intervalles de temps sur lesquels sont établies les courbes de tarage sont indiqués.

principal.

En 2006, l'instrumentation du site d'étude a été privilégiée, avec trois mesures au capteur bulle à bulle sur le site expérimental principal (aval, milieu et amont du site) et une mesure sur le site expérimental secondaire (en tout, quatre stations ISCO 4230).

En 2007, la mesure de hauteur d'eau était distribuée sur toute la rivière entre Saint-Martin-la-Porte et la confluence (cinq capteurs DIVER). Un essai de mesure avec des capteurs limnimétriques capacitifs n'a pas donné de résultats exploitables.



FIG. 4.4 – Exemples de stations limnimétriques installées provisoirement pour les chasses. (a) Emplacement d'un capillaire à proximité des enrochements pour (b) une station de mesure limnimétrique bulle à bulle ISCO 4230. (c) Capteur DIVER avant mise en place dans un tube métallique crépiné (diamètre du tube ≈ 10 cm). Photo©B. Camenen.

4.2 Mesure de vitesse, jaugeage et estimation des débits

4.2.1 Jaugeages à faible et fort débit sur le site d'étude

Des jaugeages ont été effectués à faible et fort débits sur le site expérimental selon la norme ISO 748.

A faible débit, lorsque la progression dans l'écoulement n'est pas trop difficile, les vitesses sont mesurées sur une section en travers par un opérateur avec un courantomètre électromagnétique (Nautilus OTT ou Marsh Mc-Birney Flo-Mate 2000) directement dans le lit de la rivière. La mesure est fondée sur le phénomène d'induction électromagnétique. Un champ magnétique généré par une bobine dans le capteur crée un courant électrique dans l'écoulement ; la tension induite dans l'eau, fonction de la vitesse axiale, est mesurée par le capteur. Suivant le protocole standard, les mesures sont faites en utilisant un décimètre tendu en travers de l'écoulement, sur chaque verticale les vitesses sont mesurées depuis le fond à 0.2h, 0.4h et 0.8h, où h est la hauteur d'eau totale (FIG. 4.5 c et d).

A fort débit, en particulier au cours des chasses 2006 et 2007, des jaugeages ont été effectués par la DIREN Rhône-Alpes depuis le pont à l'aval du site (FIG. 4.5 a et b). Le principe est identique, la section est parcourue avec un courantomètre plombé à hélice qui est descendu dans l'écoulement à l'aide de la potence du camion jaugeur. La mesure de vitesse peut être faite point par point ou par intégration. Un tel jaugeage est assez long, il faut une heure environ pour parcourir toute la section du site (50 m) en mode point par point.

Dans les deux cas, le débit est calculé par une double intégration de la vitesse sur la verticale et sur la section (méthode des rectangles), suivant la formule :

$$Q = \sum_i \sum_j v_{ij} \frac{(x_{i-1} - x_{i+1})}{2} \frac{(z_{i(j-1)} - z_{i(j+1)})}{2} \quad (4.4)$$

où v_{ij} est la vitesse mesurée sur la verticale d'abscisse x_i à la hauteur z_{ij} . On suppose que la vitesse à la surface de l'écoulement est égale à la vitesse maximale mesurée sur la verticale et que les vitesses au fond et aux bords sont nulles.

4.2.2 Relation entre la vitesse de surface et la vitesse moyennée sur la verticale

Pour pouvoir comparer les vitesses de surface mesurées, par exemple par LS-PIV, et les vitesses moyennées sur la verticale fournies par les modèles numériques 2Dh, une relation a été établie à partir des données expérimentales. Comme dans de nombreux travaux (Rantz, 1982; Wilcock *et al.*, 1996; Smart, 1999; Costa *et al.*, 2006), le profil vertical de vitesse est supposé suivre une loi logarithmique



FIG. 4.5 – Jaugeages sur le site d'étude. A fort débit (a) par le camion jaugeur de la DIREN depuis le pont aval avec (b) un saumon plombé. (c) A faible débit sur une section en travers du site avec (d) un courantomètre électromagnétique. Photo©J. Lecoq, M. Lang.

du type :

$$v(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4.5)$$

où u^* est la vitesse de frottement au fond, $\kappa = 0.4$ la constante de Von Karman, z l'altitude au-dessus du lit et z_0 l'altitude pour laquelle la vitesse est nulle, z_0 rend compte de la rugosité du lit. Ce profil logarithmique est confirmé par les mesures de vitesse détaillées sur la verticale (FIG 4.6) à fort débit ($102 \text{ m}^3/\text{s}$ et $115 \text{ m}^3/\text{s}$, chasse 2007) et à faible débit (5.5 , 16 et $20 \text{ m}^3/\text{s}$).

Graphiquement, on trouve l'altitude pour laquelle la vitesse s'annule : $z_0 \in [0.001, 0.015] \text{ m}$, ce qui est cohérent avec les diamètres de grains observés de quelques centimètres. Plusieurs relations permettent en effet de relier z_0 à un diamètre représentatif des grains : $z_0 = 0.095 d_{90}$ ou $z_0 = 0.1 d_{84}$ (Wilcock *et al.*, 1996).

Le coefficient $\alpha_v = V/v_{surface}$, où V est la vitesse moyennée sur la verticale et $v_{surface}$ la vitesse à la surface, peut aussi être déduit de ces graphes. On a, en effet, à la surface $v/v_{av} = 1/\alpha_v$. Cette relation simple et constante entre la vitesse de surface et la vitesse moyennée sur la verticale ($\alpha_v \approx 1 - 1/\ln(h/z_0) \approx \text{constante}$) est valable pour les hauteurs d'eau suffisamment importantes $h > 100z_0$.

Les mesures conduisent à $\alpha_v = 0.75$ à 0.83 . Dans la suite de ces travaux, la moyenne $\alpha_v = 0.79$ sera utilisée pour comparer vitesse de surface et vitesse moyennée sur la verticale. Cette valeur est légèrement inférieure au coefficient classique 0.85 , utilisé par exemple par Rantz (1982) et Creutin

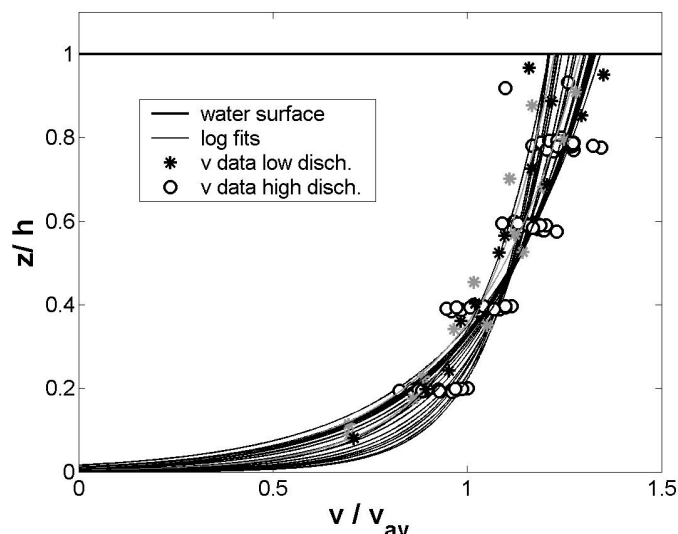


FIG. 4.6 – 24 profils de vitesse verticaux adimensionnels ajustés sur 24 jeux de données mesurés à fort et bas débits (102, 115 m³/s et 5.5, 16, 20 m³/s).

et al. (2003).

4.2.3 Estimation du débit au barrage aval

En cours de chasse, les débits sont estimés par EDF en entrée et sortie des trois retenues. Les débits sont estimés dans un premier temps en fonction de l'ouverture des vannes du barrage. Puis, lorsque l'on est en écoulement libre, en fonction des débits turbinés entrant, en faisant une hypothèse sur les temps de transfert (cf. paragraphe 2.3.1). Les débits mesurés sont utilisés d'une année sur l'autre pour les hydrogrammes de projet. Pour la préparation des campagnes de mesures, cette prévision permet (i) de connaître l'intensité des débits prévus (ii) d'anticiper la fréquence des mesures en cours d'événement en fonction des phases de l'hydrogramme.

4.2.4 Mesures de vitesse par la technique LS-PIV

La partie suivante est extraite d'un article soumis à Flow Measurement and Instrumentation (Jodeau et al., 2007a). Le travail d'analyse d'image a été effectué par Alexandre Hauet, alors en thèse au LTHE puis en séjour post-doctoral à l'université d'Iowa (IIHR).

En rivière de montagne, les mesures de vitesse et de débit sont généralement effectuées au courantmètre depuis des ponts, ou grâce à des filins tendus en travers de la rivière. Les mesures traditionnelles fournissent ainsi des données avec des résolutions spatiales et temporelles réduites. Par exemple, avec un courantmètre classique, une heure est nécessaire pour mesurer des profils verticaux

de vitesse sur une section de 50 m (cf. paragraphe 4.2.1) ; et les mesures sont souvent limitées à des sections de pont. D'autres techniques, comme l'aDcp, exigent l'intrusion dans l'écoulement d'un capteur (par bateau ou flotteur), ce qui n'est pas toujours facile et ne respecte pas toujours les règles de sécurité (Lu *et al.*, 2006). A fort débit, les vitesses, les hauteurs d'eau et la présence de flottants de taille importante (troncs, débris) empêchent toute intrusion systématique dans l'écoulement. Une mesure non-intrusive est donc nécessaire lorsque les conditions naturelles ne permettent pas d'utiliser les outils conventionnels. Des méthodes par dilution chimique peuvent donner des mesures précises de débit, mais ne donnent aucune information sur la structure du champ de vitesse.

La technique LS-PIV (*Large Scale Particle Image Velocimetry*) est utilisée dans ce travail pour mesurer, sans intrusion, les champs de vitesse en surface de l'écoulement. La technique est fondée sur l'analyse d'images et sur le calcul des déplacements de motifs en utilisant des techniques statistiques d'identification (Fujita *et al.*, 1998b).

Cette mesure de vitesse est utilisée en laboratoire (Weitbrecht *et al.*, 2002; Admiraal *et al.*, 2004; Kantoush *et al.*, 2006) et en milieu naturel (Creutin *et al.*, 2003). Alors que la PIV en laboratoire, utilisant une illumination laser, permet d'explorer la totalité de l'écoulement, la technique LS-PIV en condition d'éclairement naturel est réduite à l'exploration de la surface libre de l'écoulement. La méthode LS-PIV a été utilisée pour mesurer des vitesses en crue (Fujita *et al.*, 1998b) ; et les applications sont multiples : calcul du débit (Hauet *et al.*, 2006, 2008), cartographie des habitats aquatiques (Smith *et al.*, 2005), études des motifs d'écoulement entre épis (Fujita et Nakashima, 1999)...

Les crues naturelles transportent souvent de nombreux objets, ou des motifs liés à la turbulence, qui sont plus ou moins visibles à la surface de l'écoulement. S'ils sont suffisamment denses, ils peuvent être utilisés comme traceurs dans la procédure de calcul LS-PIV ; par exemple, des morceaux de glace sont suivis dans le travail de Jasek *et al.* (2001). Quand les traceurs naturels ne sont pas suffisants, des traceurs artificiels sont aussi couramment utilisés (Fujita et Hino, 2003; Admiraal *et al.*, 2004; Muto *et al.*, 2002; Kantoush *et al.*, 2006).

4.2.4.1 Installation expérimentale

Caméra vidéo et mât

Une caméra commerciale (Canon MV 750i) est utilisée pour filmer l'écoulement. L'enregistrement se fait sur des cassettes mini-DV à un taux d'enregistrement de 25 trames par seconde, et la résolution de l'image est de 540×720 pixels. La caméra est montée sur un mât télescopique mobile dont la hauteur peut être fixée entre 2 et 10 m (Maxi Primo, Fireco Components). Quatre haubans stabilisent le mât, notamment pour éviter les mouvements dus au vent (FIG 4.7 b). L'orientation de la plate-forme de la caméra est contrôlée à distance depuis le sol, permettant un ajustement des

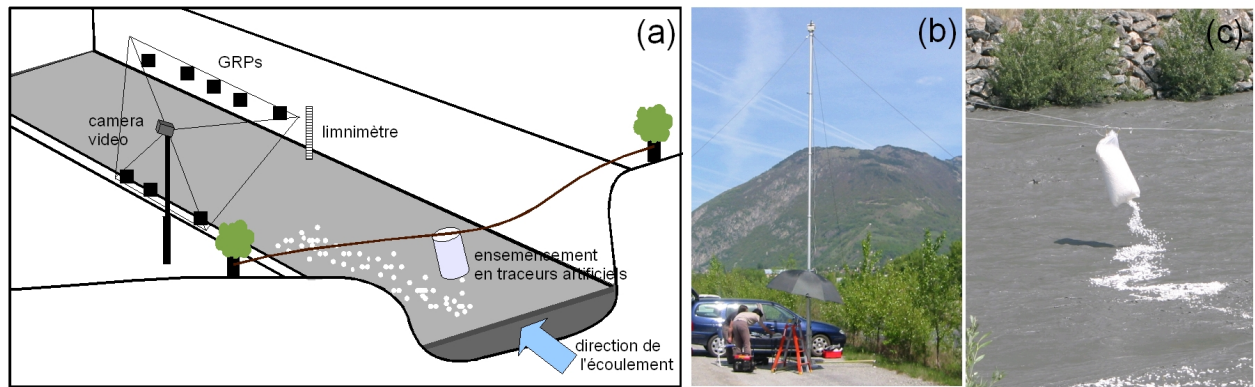


FIG. 4.7 – (a) Schéma de l'installation expérimentale LS-PIV : mât, caméra vidéo et champ de prise de vue, points de référence au sol (GRPs), dispositif d'ensemencement en traceurs et mesure du niveau d'eau. (b) Photographie du mât télescopique, la rivière est en contrebas derrière les arbres. (c) Photographie du dispositif d'ensemencement en traceurs artificiels.

angles de prise de vue. Un ordinateur portable permet enfin de commander le déclenchement de la caméra, et les séquences filmées sont enregistrées directement sur l'ordinateur. L'alimentation de la caméra est fournie par un convertisseur de courant branché sur l'allume cigarette d'un véhicule, ce qui permet de s'affranchir des limitations d'autonomie d'un fonctionnement avec une batterie.

Plusieurs points de contrôle (GRPs pour *Ground Reference Points*) sont installés dans le champ de prise de vue de la caméra pour permettre la rectification des images. Ils sont constitués de mires en plastique (40×40 cm) fixées sur des tiges métalliques ou des arbustes et de carrés de peinture de la même taille peints sur les enrochements.

Ensemencement de l'écoulement en traceurs artificiels

Comme peu de motifs étaient identifiables à la surface de l'écoulement, un dispositif simple a été développé pour ensemer l'écoulement en chips de maïs Ecofoam blanches solubles et biodégradables. Les traceurs flottent puis se dissolvent très rapidement en quelques minutes. En outre, les quantités ajoutées dans l'écoulement étant faibles devant le débit pendant la chasse, l'incidence sur la qualité de l'eau est quasi-nulle.

Comme les conditions naturelles empêchent toute intrusion dans l'écoulement, une corde porteuse de 50 m a été installée entre les deux berges à l'amont de la caméra. A la manière d'une tyrolienne, un sac distribue des chips sur toute la largeur de l'écoulement (Figure 4.7 a et c). Le mouvement du sac est contrôlé depuis les deux berges par des opérateurs grâce à deux cordes tractrices.

Sur la journée de la chasse hydraulique de 2006, huit séquences avec chips et dix-sept séquences sans traceurs artificiels ont été filmées. L'analyse LS-PIV est conduite sur des séquences de 200 à 1500 paires d'images avec des intervalles de 0.2 s entre deux images.

Sites de suivi LS-PIV

Dans tous les cas, l'écoulement est filmé depuis la berge (dont le niveau se situe 5 m au-dessus du lit), la hauteur du mât étant fixée à 8.4 m. La surface filmée dans ces conditions est d'environ 60 m×40 m. L'angle d'inclinaison¹ de la caméra est approximativement 20°.

Sur le site expérimental principal, deux points de vue ont été choisis. Un premier point de vue permet de filmer l'aval du banc et d'estimer les vitesses de surface sur toute la largeur de l'écoulement (SITE D). Les séquences et les résultats associés sont nommés D1 à D6. L'écoulement dans le chenal secondaire et dans un chenal de jonction est filmé sur le SITE C, au milieu du banc. Les séquences et les résultats associés sont nommés C1 et C2.

4.2.4.2 Amélioration de l'algorithme de traitement des données

L'algorithme de traitement des données a été amélioré pour prendre en compte les variations verticales de la surface libre au cours du temps et pour pouvoir isoler les traceurs artificiels.

Rectification géométrique : GRPs et variation d'altitude de la surface libre

La première étape de la procédure LS-PIV consiste à corriger géométriquement les images (FIG 4.8). La surface libre étant modélisée comme un plan à altitude constante, la transformation entre l'image originale et le repère d'étude est une projection d'un plan à un autre avec huit paramètres, et peut être résolue en utilisant au minimum six GRPs (Fujita *et al.*, 1998a). Les GRPs ont été installés, au sec, dans un plan horizontal. L'altitude des GRPs (z_{GRP}) est contrôlée au niveau optique et les coordonnées (x,y) des points sont obtenues par levé au dGPS ou au tachéomètre (méthodes du chapitre 3). Comme l'altitude de la surface libre varie de plus d'un mètre au cours des chasses hydrauliques, des équations corrigées pour prendre en compte les variations de niveau sont utilisées :

$$\begin{cases} i = \frac{a_1x + a_2y + a_3z + a_4}{c_1x + c_2y + c_3z + 1} \\ j = \frac{b_1x + b_2y + b_3z + b_4}{c_1x + c_2y + c_3z + 1} \end{cases} \quad (4.6)$$

où $[i, j]$ sont les coordonnées dans le repère de l'image (en pixel) du point de coordonnées $[x, y, z]$. Comme on suppose la surface libre plane, la coordonnée z peut s'écrire :

$$z = d_1x + d_2y + d_3 \quad (4.7)$$

En supposant que la pente de la surface libre est faible, l'équation précédente est transformée en : $z = d_3(t)$, où $d_3(t)$ est la différence d'altitude entre le plan des GRPs et celui de la surface libre au temps t donnée par une mesure limnimétrique. En combinant cette dernière équation et (4.6), on

¹angle entre l'horizontale et la droite reliant la caméra au centre du champ filmé

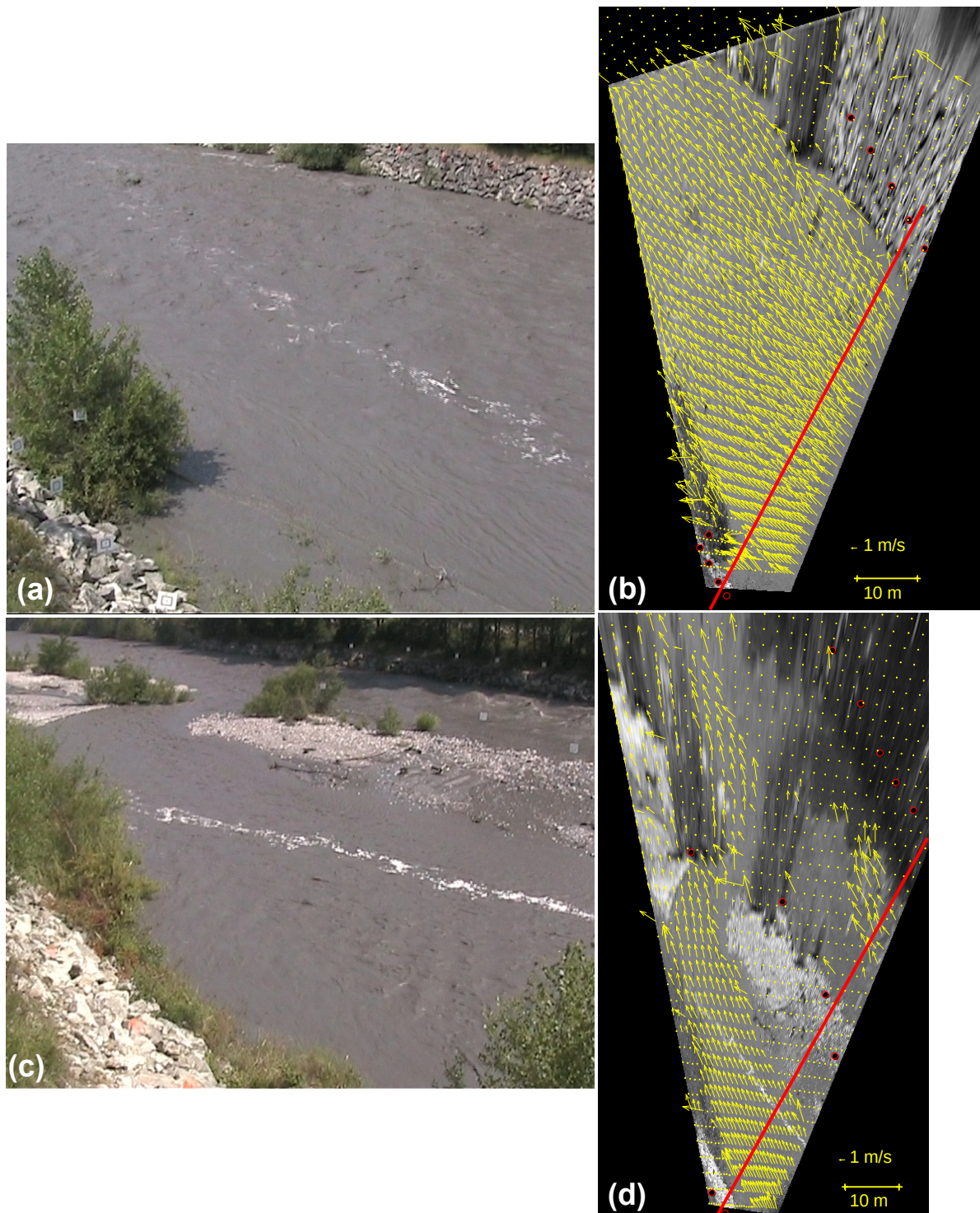


FIG. 4.8 – Exemples d’images avant (a et c) et après rectification (b et d) avec les champs de vitesses de surface moyennés et sections en travers utilisées pour les analyses : SITE D (a et b) et SITE C (c et d).

obtient :

$$\begin{cases} i = \frac{a_1x + a_2y + a_3d_3(t) + a_4}{c_1x + c_2y + c_3d_3(t) + 1} \\ j = \frac{b_1x + b_2y + b_3d_3(t) + b_4}{c_1x + c_2y + c_3d_3(t) + 1} \end{cases} \quad (4.8)$$

Le système d'équations (4.8) a 11 inconnues, et peut donc être résolu avec au moins six GRPs (12 variables : (x_i, y_i) où $i=1$ à 6) : $\mathcal{EF} = \mathcal{G}$ où, avec $N = 6$,

$$\mathcal{E} = [11 \times 2N] = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & d_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -i_1x_1 & -i_1y_1 & -i_1d_3 \\ x_2 & y_2 & d_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -i_2x_2 & -i_2y_2 & -i_2d_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & d_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -i_Nx_N & -i_Ny_N & -i_Nd_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & d_3 & 1 & -j_1x_1 & -j_1y_1 & -j_1d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & d_3 & 1 & -j_2x_2 & -j_2y_2 & -j_2d_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_N & y_N & d_3 & 1 & -j_Nx_N & -j_Ny_N & -j_Nd_3 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\mathcal{F} = [11 \times 1] = [a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4, c_1, c_2, c_3]^T \quad (4.10)$$

$$\mathcal{G} = [2N \times 1] = [i_1, i_2, \dots, i_N, j_1, j_2, \dots, j_N]^T \quad (4.11)$$

Cette équation est résolue par la méthode des moindres carrés :

$$\mathcal{F} = (\mathcal{E}^T \mathcal{E})^{-1} \mathcal{E}^T \mathcal{G} \quad (4.12)$$

La relation inverse donnant les coordonnées cartésiennes en fonction des coordonnées image est :

$$\begin{cases} x = \frac{m_1i + m_2j + m_3}{p_1i + p_2j + p_3} \\ y = \frac{q_1i + q_2j + q_3}{p_1i + p_2j + p_3} \end{cases} \quad (4.13)$$

où les paramètres m_i , p_i et q_i sont donnés en Annexe C.

Traitement des données LS-PIV

Un algorithme de PIV (Fincham et Spedding, 1997) pour des applications à large échelle avec des images basse résolution est utilisé. Le principe de l'algorithme est fondé sur le calcul de la corrélation entre une fenêtre d'interrogation (IA, pour *Interrogation Area*) centrée sur un point a_{ij} dans la première image (image A au temps t) et l'IA centrée sur le point b_{ij} dans la seconde image (image B, au temps $t + \delta t$). Le coefficient de corrélation $R(a_{ij}, b_{ij})$, mesure de la similitude des niveaux de gris d'un groupe de pixels contenu dans les deux fenêtres IAs, s'exprime comme suit :

$$R(a_{ij}, b_{ij}) = \frac{\sum_{\substack{1 \leq i \leq Mi \\ 1 \leq j \leq Mj}} (A_{ij} - \overline{A_{ij}}) (B_{ij} - \overline{B_{ij}})}{\left[\sum_{\substack{1 \leq i \leq Mi \\ 1 \leq j \leq Mj}} (A_{ij} - \overline{A_{ij}})^2 \sum_{\substack{1 \leq i \leq Mi \\ 1 \leq j \leq Mj}} (B_{ij} - \overline{B_{ij}})^2 \right]^{1/2}} \quad (4.14)$$

où Mi et Mj sont les tailles des fenêtres d'interrogation (en pixels), et A_{ij} et B_{ij} les distributions des niveaux de gris dans les deux IAs. Les coefficients de corrélation sont calculés pour les points b_{ij} dans des fenêtres de recherche.

L'approche PIV suppose que le déplacement le plus probable du fluide à partir du point a_{ij} pendant δt est celui qui correspond au coefficient de corrélation maximum. Une résolution inférieure à la taille des pixels peut être atteinte par un ajustement parabolique (Forliti *et al.*, 2000). Les vecteurs vitesse sont déduits simplement par division des déplacements par δt . Le calcul est conduit par itérations sur toute l'image. La taille des fenêtres d'interrogation est $2 \times 2 \text{ m}^2$ ce qui est bien adapté à la taille des motifs visibles à la surface (amas de chips). Cependant, tous les motifs inférieure à cette taille sont perdus pour l'analyse.

Le calcul LS-PIV donne les vitesses de surface instantanées et moyennées dans le temps. A cause d'absences temporaires de motifs dans certaines zones, il arrive que la vitesse instantanée n'y soit pas calculée, la valeur affichée étant alors zéro. Pour ne pas sous-estimer la moyenne temporelle de la vitesse, à chaque noeud de calcul, le calcul de la moyenne est fait uniquement sur les temps pour lesquels la vitesse est non nulle. Dans de nombreuses travaux faisant appel à la PIV, des critères globaux ou locaux sont utilisés pour filtrer les vitesses et réduire le nombre de vecteurs aberrants (Admiraal *et al.*, 2004; Le Coz *et al.*, 2006; Meselhe *et al.*, 2004). Dans ce travail, aucun critère n'a été implémenté systématiquement dans les calculs de vitesse.

Seuil d'intensité : traceurs et vagues stationnaires

Pour des débits importants, des vagues stationnaires se développent à la surface de l'écoulement créant ainsi des motifs (écume, reflets) quasi-fixes (FIG 4.9 a). Dans de nombreuses études LS-PIV, tous les motifs sont pris en compte (Creutin *et al.*, 2003; Fujita *et al.*, 1998a). Un seuillage sur les niveaux de gris est appliqué ici pour ne prendre en compte que les motifs créés par les chips (qui apparaissent blanches sur les images) et ne pas suivre les reflets ou l'écume sur les vagues stationnaires (qui apparaissent plus foncées). La valeur du seuil d'intensité est choisie en fonction de l'exposition de la séquence filmée.

Des essais pour traiter les images sans traceur aboutissent à une sous-estimation des vitesses de surface (inférieures de 30% aux valeurs attendues). En effet, sur la même séquence filmée, une comparaison des vitesses calculées avec l'algorithme classique (v1) et des vitesses calculées avec un seuillage (v2) (FIG 4.10) montre que v1 est quasiment toujours inférieure à v2. Les vitesses nulles

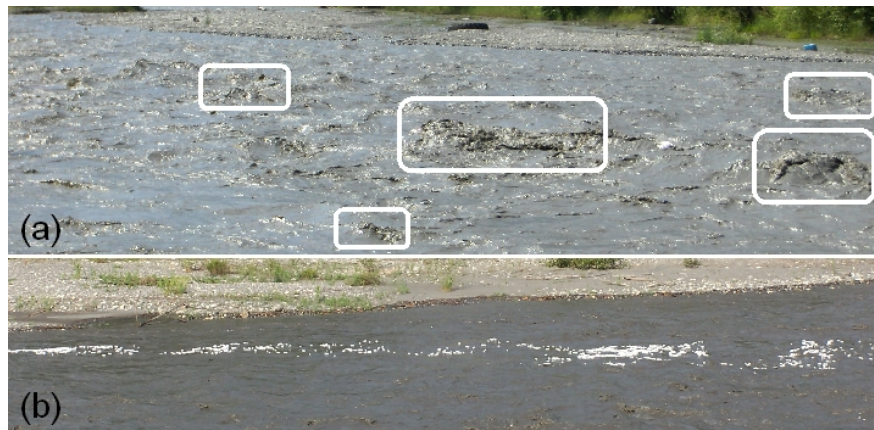


FIG. 4.9 – Exemples (a) de motifs quasi-fixes dus aux reflets du soleil sur des vagues stationnaires et (b) ensemencement artificiel de chips de maïs biodégradables. Photo©J. Le Coz.

du graphique sont des vitesses seulement détectées par un seul des deux calculs. Les vitesses de surface v_1 sont sous-estimées de 0.7 m/s en moyenne pour une majorité de séquences (D1, D3 à D6). Aucune relation évidente n'a pu être établie entre les vitesses calculées avec ou sans seuil. Dans toute la suite, uniquement les résultats issus des calculs avec seuil seront utilisés.

Le travail de Meselhe *et al.* (2004) suggère qu'une densité d'ensemencement de 10-30% de la surface doit être suffisante pour éviter des erreurs importantes. Ici, les traceurs sont limités à l'ensemencement artificiel, leur densité surfacique est inférieure à 10%. Cela conduit à des surfaces assez étendues sans vitesse calculée, mais cet effet est corrigé dans le calcul de la moyenne adapté à des densités surfaciques faibles (cf. paragraphe précédent).

L'ensemencement artificiel permet de fournir des traceurs dans le champ lointain de la caméra. Sans traceur artificiel, les vecteurs vitesse sont seulement calculés dans le champ proche car peu de motifs sont reconnus dans le champ lointain. Cet effet dû à la diminution de la résolution sur l'image a été souligné par Fujita et Aya (2004). Dans cette application à un cas de terrain particulier, la couleur blanche des traceurs est essentielle, car elle permet de maximiser le contraste entre la couleur gris foncé de la rivière et la couleur blanche des traceurs. Cependant, dans les zones d'ombre, le contraste entre les traceurs et la couleur de l'eau est plus faible que dans le reste de l'image, ce qui conduit à des zones sans estimation de vitesse.

4.2.4.3 Application au calcul du débit sur le site d'étude

Plusieurs calculs de débit ont été effectués à partir des données de la chasse 2006. D'une part, en utilisant les jaugeages à bas débit et à fort débit au pont (cf. paragraphe 4.2.1), une courbe de tarage exponentielle est utilisée pour déduire un débit de la hauteur d'eau mesurée à proximité du SITE D. Comme les données de hauteurs fluctuent rapidement, une moyenne mobile

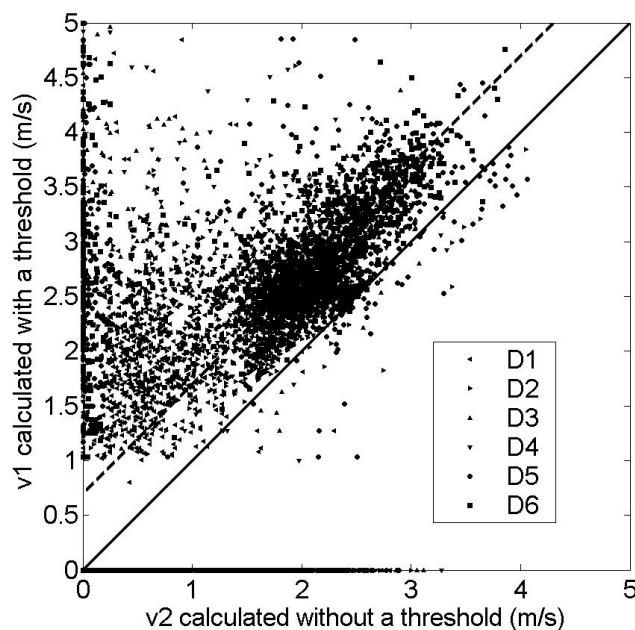


FIG. 4.10 – Comparaison des vitesses calculées avec (v_1) ou sans (v_2) seuillage sur le niveau de gris des images pour détecter uniquement les traceurs. Sont également présentées la droite d'équation $v_1=v_2$ (trait plein) et la droite d'équation $v_1=v_2+0.7$ (trait pointillé).

(intervalle 3 min) est utilisée pour lisser le signal. Les courbes $Q(t)$ associées sont présentées sur la FIG 4.11. Les fluctuations temporelles sont dans l'intervalle des courbes tracées pour $\pm 5\%$ de la valeur moyennée.

D'autre part, le débit a été estimé localement à partir des données de vitesse LS-PIV. Les calculs sont effectués sur une section oblique, à l'aval direct du banc de galets principal, sur le SITE D (FIG 4.8 b). le segment est divisé en $n_t = 100$ points uniformément distribués sur le segment ($\Delta l = 0.77$ m entre deux points de calcul).

Les vitesses de surface sont converties en vitesses moyennes grâce au coefficient $\alpha_v = 0.79$ (cf. paragraphe 4.2.2).

La topographie du lit évolue au cours de la chasse. Deux MNT sont disponibles : le premier, modélisant l'état avant la chasse, est utilisé tant que le pic de crue n'est pas atteint ; le deuxième, modélisant l'état après la chasse, est utilisé pour la seconde partie de l'hydrogramme.

En chaque point de calcul, la bathymétrie et les projetés des vitesses moyennées sur la verticale sont calculés par interpolation IDW. Une pente locale moyenne de 0.3% déduite des MNT est utilisée pour extrapoler, sur le segment de calcul, la hauteur d'eau mesurée. Dans le cas où, en rive droite de la rivière, il n'y a pas de mesure de vitesse du fait d'ombres ou de l'absence de traceur, les vitesses sont extrapolées. Le nombre de points d'interpolation sur le nombre total de points de calcul (100), f_{extr} , donne une estimation de la fiabilité du calcul de débit (TAB 4.1). Les valeurs extrapolées sont

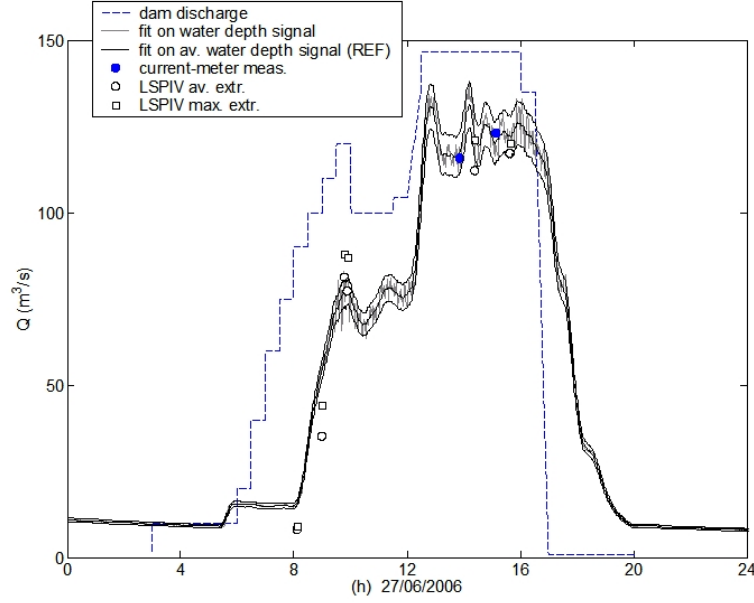


FIG. 4.11 – Débits en cours de chasse : (i) estimation EDF à partir de lois d'ouvrage aux vannes et des débits entrant dans le barrage (**dam discharge**); (ii) estimations à partir du signal de hauteur brut ou moyenné dans le temps en utilisant une courbe de tarage (**fit on water depth signal** et **fit on av. water depth signal(REF)**); (iii) mesures au courantomètre depuis le pont aval (**current-meter meas.**); (iv) calculs LS-PIV avec une extrapolation spatiale constante dans les zones d'ombre (avec une valeur moyenne ou une valeur maximale) (**LSPIV av. extr.** et **LSPIV max. extr.**).

choisies constantes, v_{extr} , soit égales à la valeur moyenne de la vitesse sur le transect, soit égales au maximum de la vitesse calculée sur la section (cette seconde approche est cohérente avec les profils de vitesse obtenus par modélisation numérique).

Les débits sont calculés avec la formule :

$$Q = \sum_{i=1}^{n_t} v_{Pi} h_i \Delta l = \underbrace{\Delta l \sum_{i=1}^{(1-f_{extr})n_t} v_{Pi} h_i}_{mesures} + \underbrace{\Delta l v_{extr} \sum_{i=(1-f_{extr})n_t+1}^{n_t} h_i}_{extrapolation} \quad (4.15)$$

où, sur chaque noeud de calcul, v_{Pi} est la projection, sur la normale au segment, de la vitesse moyennée sur la verticale et interpolée (vecteur normal au segment), h_i la hauteur d'eau interpolée, Δl la distance entre deux points de calcul, et n_t le nombre total de points de calcul.

Les résultats sont donnés dans le tableau TAB. 4.1. Les calculs de débit à partir des vitesses LS-PIV sans seuillage ne sont pas présentés, mais ils donnent des valeurs inférieures de 30% aux résultats présentés ici, confirmant ainsi la nécessité d'isoler les motifs se déplaçant avec l'écoulement.

Sur le deuxième palier de débit (FIG 4.11), les débits mesurés depuis le pont (méthode décrite au

nom	date	débit courbe de tarage (REF) (m³/s)	DEBITS ESTIMES LS-PIV				f_{extr} (%)
			extrapolation avec v_{moy}		extrapolation avec v_{max}		
			(m³/s)	ΔQ (%)	(m³/s)	ΔQ (%)	
D1	08 :02	17	8	53	9	47	4
D2	09 :01	57	35	39	44	23	31
D3	09 :48	77	81	-5	88	14	32
D4	09 :55	77	77	0	87	13	35
D5	14 :24	119	112	6	121	2	27
D6	15 :39	122	117	4	120	2	10

TAB. 4.1 – Débits estimés avec une courbe de tarage (REF) et débits estimés à partir des mesures LS-PIV avec une extrapolation constante avec la vitesse moyenne v_{moy} sur la section ou avec la valeur maximale sur le segment v_{max} . L'écart relatif entre les deux estimations de débit s'écrit : $\Delta Q = \frac{Q_{REF} - Q_{LS-PIV}}{Q_{REF}}$.

4.2.1) donnent des valeurs inférieures à celles estimées par EDF en 2006, 120 m³/s contre 150 m³/s en 2006. Il n'y a pas de dérivation entre la retenue aval et le site d'étude et des modélisations unidimensionnelles de l'événement (notamment par Hervé, 2006) montrent qu'il n'y a pas d'amortissement du pic de crue entre les deux points. Même si l'incertitude sur les estimations de débit au courantomètre est de l'ordre de $\pm 5\%$ du débit (Sauer et Meyer, 1992), ces mesures sont plus fiables que des estimations fondées sur des lois d'ouvrage. Par conséquent, les mesures de débit effectuées depuis le pont au courantomètre par la DIREN sont considérées dans la suite comme les mesures de débits de référence.

Les estimations de débit obtenues à partir des vitesses LS-PIV sont en bon accord avec la courbe $Q(t)$ déduite de la mesure limnimétrique et les mesures de débit de référence (FIG 4.11 et TAB 4.1). Pour la séquence D1, le coefficient d'extrapolation est faible, l'écart entre les deux calculs de débit est cependant important (50%). Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cet écart élevé :

- i. Le coefficient α utilisé pour convertir la vitesse de surface en vitesse moyenne, n'est pas à remettre en cause car il a justement été établi à partir de données à faible et fort débit.
- ii. une sous-estimation des vitesses par la méthode LS-PIV semble peu probable car au centre de l'écoulement la vitesse de surface est estimée à 1.7 m/s, ce qui est cohérent avec les mesures de vitesse effectuées au courantomètre électromagnétique pour la même gamme de débit.
- iii. une erreur sur l'extrapolation de la hauteur d'eau sur la section de calcul pourrait par contre conduire, à bas débit, à des écarts relatifs importants. En effet pour des débits entre 10 et 20 m³/s la hauteur d'eau moyenne est d'environ 30-40 cm sur une section large, une erreur de 10 cm sur la cote de l'eau conduit à une erreur de l'ordre 25 à 30% sur le débit.
- iv. une erreur sur le calcul de la courbe de tarage semble peu probable à fort débit (130 m³/s) et à faible débit (10-20 m³/s). Par contre pour les débits intermédiaires, en l'absence de mesures

de contrôle, la validité de la courbe de tarage peut être discutée.

Pour la séquence D2, la mesure LS-PIV a été faite en pleine phase d'augmentation rapide du débit. L'écart est ici encore important, et semble fortement dépendant du mode d'extrapolation (écart de 39% ou 23%). En effet le nombre de points de calculs sur lesquels une vitesse extrapolée a été utilisée est de 30%. Les hypothèses i. et iv. , même si elles sont peu probables, pourraient expliquer cet écart. Les hypothèses ii. et iii. ne peuvent plus justifier un tel écart pour des débits supérieurs à 50 m³/s. Par contre, du fait de l'augmentation très rapide du débit, un décalage temporel peut expliquer un tel écart. Sur les deux paliers de débits, les deux estimations de débits sont plus proches (écart inférieur à 15%) et satisfaisantes. A fort débit (séquences D5 et D6), le débit estimé à partir de la méthode LS-PIV est très proche de celui obtenu grâce à la courbe de tarage. En effet, malgré un nombre important de points où la vitesse est extrapolée ($f_{extr}=10$ ou 27%), l'écart entre les deux estimations est de 5% en moyenne si l'extrapolation des vitesses manquantes se fait avec v_{moy} et de 2% si elle se fait avec la valeur v_{max} . Les estimations de débit sont dans l'intervalle de confiance ($\pm 5\%$) des deux jaugeages effectués au courantomètre depuis le pont. Ces deux mesures LS-PIV correspondent d'ailleurs à une période où le régime peut être considéré quasi-permanent, la comparaison entre les deux méthodes de calcul y est donc la plus pertinente. Les mesures de vitesse par la méthode LS-PIV sont donc considérées satisfaisantes.

4.3 Mesure des concentrations en MES

Des protocoles toujours identiques ont été utilisés pour le prélèvement des échantillons et pour la mesure de la concentration de l'eau en MES pendant les chasses hydrauliques (2005, 2006 et 2007). Une grande part des prélèvements a été faite depuis des ponts le long de l'Arc et de l'Isère. Ces prélèvements sont réalisés en surface de l'écoulement à l'aide d'un seau. Les fortes vitesses en cours de chasse empêchaient l'immersion en profondeur de préleveurs de type bouteille Niskin. En 2006 et 2007, deux préleveurs automatiques (ISCO 3700, 24 flacons) ont permis des prélèvements nocturnes dans la partie aval de l'Arc.

En 2007, des comparaisons entre le mode de prélèvement "au seau en surface" et un prélèvement à proximité de la berge à altitude constante (par un préleveur automatique) montrent des différences de concentrations inférieures à 10%. Sur une section de l'Isère, des tests ont aussi été faits par l'équipe "RIVER" du LTHE en 2006. Pendant le passage des MES de la chasse, des prélèvements ont été effectués en surface pour trois points sur la section (à gauche, au milieu et à droite). Les écarts de concentration (FIG. 4.12) sont aussi de l'ordre de 10%. Sur l'Arc, l'écoulement est fortement turbulent, laissant supposer un bon mélange des sédiments fins dans la colonne d'eau.

A chaque étape de transfert du seau au flacon et ensuite au laboratoire, une attention particulière est apportée à l'homogénéisation des échantillons, de manière à reprendre systématiquement les

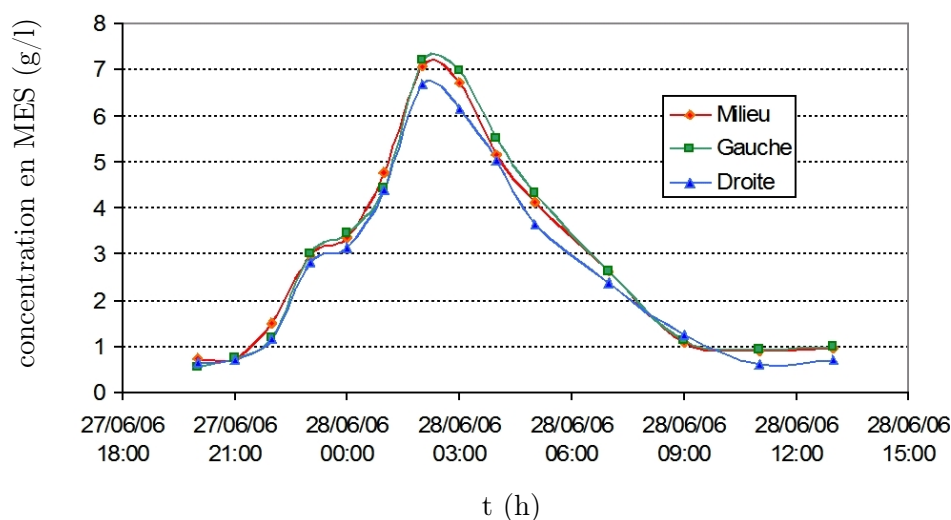


FIG. 4.12 – Test d’homogénéité de la concentration de MES (g/l) sur une section de l’Isère : données LTHE station Grenoble campus (Mano *et al.*, 2007). Les prélèvements ont été faits simultanément au milieu, à droite et à gauche dans une même section.

sédiments décantés au fond des flacons.

La mesure de concentration a été faite au laboratoire de chimie du Cemagref de Lyon suivant les normes en vigueur (ISO 11923, NF EN 872). Les échantillons ont été filtrés sur des filtres en fibre de verre de $0.45\ \mu\text{m}$, puis séchés à l’étuve à 105°C , pendant 1h à 2h, et au dessiccateur. La masse recueillie est déterminée par pesée différentielle, le poids initial des filtres propres et secs étant mesuré au préalable. La norme NF EN 872 rapporte une limite inférieure de dosage d’environ 2 mg/l. Des essais de reproductibilité sur toute la chaîne de mesure (du prélèvement à la filtration) donnent une variation de la mesure de moins de 4% en moyenne, sauf cas exceptionnels (deux cas à 23% et 17% sur quatorze cas tests).

Les données de concentration en MES obtenues pendant les chasses par le bureau d’étude IRAP pour le compte d’EDF (IRAP, 2001, 2003, 2005) ont aussi été exploitées. En principe, les prélèvements ont été faits au seau depuis les ponts, mais il est possible que certains prélèvements aient été effectués depuis le bord de la rivière, notamment à l’aval direct de la retenue de Saint-Martin-la-Porte. Le protocole de filtration est sinon identique à celui utilisé au Cemagref.

Les mesures de MES faites par l’équipe du LTHE pendant la chasse 2006 sur l’Isère sont également exploitées. Les modes de prélèvement sont identiques (préleveur automatique, seau ou préleveur Niskin) et les filtrations ont été faites suivant le même protocole (filtres $0.7\ \mu\text{m}$).

4.4 Synthèse du chapitre

Un suivi hydrométrique en continu sur le site d’étude, limité à des jaugeages ponctuels et à une mesure en continu de la hauteur d’eau, a été complété pour les chasses hydrauliques par un suivi

plus détaillé.

Les hauteurs d'eau ont été suivies avec des capteurs de pression. Malgré des conditions d'écoulement (fortes concentrations en MES et fortes vitesses) susceptibles d'engendrer des erreurs de mesure, l'examen en détail des sources de perturbation montre que les capteurs sont toujours fiables. Les vitesses d'écoulement ont été mesurées par des méthodes traditionnelles (courantomètre) à faible et fort débits. L'analyse des profils de vitesse verticaux permet d'établir une relation simple entre les vitesses de surface et les vitesses moyennées sur la verticale, $\alpha_v = V/v_{surface} = 0.79$. Les jaugeages permettent aussi d'estimer les variations de débit sur le site à partir de la mesure limnimétrique permanente. La méthode LS-PIV fournit des champs de vitesse pour plusieurs temps au cours de la chasse 2006. Un dispositif expérimental adapté a permis à la fois de suivre une large surface de l'écoulement mais aussi d'ensemencer l'écoulement en traceurs artificiels. Le suivi des traceurs en déplacement à la surface permet d'éviter une sous-estimation des vitesses mesurées. Les mesures LS-PIV sont utilisées, en outre, pour estimer le débit en cours d'événement. La mesure des concentrations en MES au cours des chasses a été effectuée principalement par le Cemagref mais aussi par le bureau d'étude IRAP pour le compte d'EDF et par le LTHE sur l'Isère. Les protocoles de mesure utilisés sont globalement équivalents.

DEUXIÈME PARTIE

Modifications morphologiques du lit

Introduction de la partie 2

Les évolutions morphologiques des deux sites expérimentaux sont analysées sur la période 2005-2006. L'analyse est organisée autour des observations faites sur le site expérimental principal pendant la chasse hydraulique 2006. Cet événement de référence a fait l'objet d'un suivi expérimental très détaillé. Les conclusions obtenues sur cet événement sur le site expérimental principal (5.1) sont comparées avec :

- i) les résultats concernant le site expérimental secondaire au cours du même événement (5.2)
- ii) les résultats sur le même site au cours des deux autres chasses 2005 et 2007 (5.3)
- iii) les résultats sur le même site au cours de la crue naturelle de septembre 2006 (6.1)
- iv) les résultats sur le même site au cours des périodes hiver-printemps 2006 et 2007 (6.2)
- v) l'évolution annuelle du site (6.3)

L'hydrogramme (FIG. 4.13) replace dans le temps les événements étudiés (décrits en détail au paragraphe 2.3). Pour chaque événement, chasse hydraulique ou crue, l'analyse de l'hydrogramme et du signal de MES permet de décrire le contexte hydrologique. Sur la base des observations expérimentales, sont identifiés : les changements topographiques, les changements granulométriques, les sites de dépôts des sédiments fins. En fonction des données hydrométriques disponibles, des schémas d'explication des processus sédimentaires sont proposés. Les comparaisons permettent d'examiner dans quelle mesure ces modifications sont généralisables dans le temps (entre événements) et dans l'espace (entre sites expérimentaux).

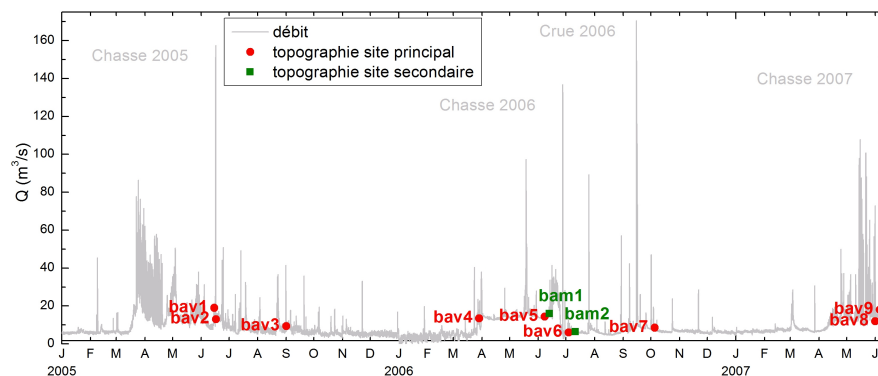


FIG. 4.13 – Hydrogramme estimé au site d'étude (suivant la méthode décrite au paragraphe 4.2) et date des campagnes topographiques sur les sites expérimentaux principal et secondaire.

5

Transfert de MES et évolutions morphologiques pendant les chasses hydrauliques

Sur les chasses hydrauliques suivies, une analyse des modifications morphologiques des sites expérimentaux est accompagnée d'une analyse du transfert des MES dans la rivière. Les observations sur le site expérimental principal au cours de la chasse 2006 constituent le noyau de ce travail, les modifications du banc de galets sont analysées à la lumière des écoulements observés. Un modèle simple de transfert des MES est proposé. Les résultats obtenus sur ce site et pendant cet événement sont comparés avec les modifications du banc de galets du site secondaire au cours de la même chasse et avec les modifications du site principal au cours des chasses 2005 et 2007. Les ressemblances et différences de comportement sont analysées.

5.1 La chasse hydraulique 2006, un suivi détaillé du site expérimental principal

Quatre événements ont été suivis sur la période de la thèse (2005-2007) : trois chasses hydrauliques et une crue naturelle. L'investissement, le travail expérimental et l'analyse ont été focalisés sur un site expérimental et sur un événement : le site principal et la chasse hydraulique de juin 2006. La chasse de juin 2005 a servi de préparation et de mise au point pour le suivi expérimental. La crue naturelle de septembre 2006 et la chasse de juin 2007 ont permis d'appliquer directement les méthodes développées en 2006. En outre, la crue s'est présentée comme l'opportunité de compléter l'étude avec l'analyse d'un événement naturel.

Les observations détaillées sur le site expérimental principal, menées avant, pendant et après la chasse 2006 constituent l'ensemble le plus complet de mesures acquises sur la période de suivi, et servent ainsi de référence pour l'étude des modifications morphologiques du secteur sur toute la période. Une analyse détaillée de cette chasse hydraulique et de ses conséquences en terme d'évolution du lit de la rivière constitue le centre de ce travail de thèse.

Pour cet événement, le transfert des MES est estimé à partir du suivi de la concentration en plu-

seurs points de la rivière, Quelques éléments supplémentaires sur les apports en sédiments fins sont apportés par les suivis bathymétriques des retenues. Sur le site expérimental principal, l'analyse des mesures topographiques et granulométriques fournit des informations sur l'évolution morphologique du site ; les zones de dépôts des sédiments fins sont identifiées précisément ; et les mesures de hauteurs d'eau et vitesses au cours de l'événement permettent d'appréhender la dynamique de l'écoulement du secteur au cours de la chasse.

Les résultats expérimentaux sur le site principal pour la chasse 2006 ont fait l'objet d'un article pour la conférence RCEM 2007 (Jodeau et al., 2007b) et d'un article soumis à la revue Earth Surface Processes and Landforms (Jodeau et al., 2007a).

5.1.1 Apports hydrosédimentaires : hydrogramme, signal de MES et bathymétries des retenues

Au niveau du site d'étude, l'hydrogramme de l'événement est estimé à partir du suivi limnimétrique en continu (cf. paragraphe 4.2). Les différentes phases de la procédure de chasse sont repérables sur cet hydrogramme (FIG. 5.1 a) :

1. la vague d'alerte déclenchée par l'ouverture des clapets de surface, en début d'événement, à partir de 6 h ;
2. une première augmentation de débit jusqu'au passage en régime torrentiel dans la retenue, entre 8 h et 10 h ;
3. une phase de débit provisoirement constant d'environ $80 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 3 h ;
4. une seconde augmentation du débit associée au supplément de débit apporté par les centrales d'altitude, entre 12 h et 13 h ;
5. le maintien d'un débit supérieur à $120 \text{ m}^3/\text{s}$, entre 13 h et 17 h ;
6. le retour au débit réservé sur 2 h, jusqu'à 20 h ;

Les débits maximaux estimés au site sont de l'ordre de $130 \text{ m}^3/\text{s}$. Comme cela a été détaillé au paragraphe 4.2.4.3, cet hydrogramme, en accord avec les jaugeages et les mesures LS-PIV, est utilisée pour l'analyse plutôt que le débit estimé au barrage de Saint-Martin-la-Porte. Il aurait sinon fallu transiter cette estimation du barrage au site d'étude ; par exemple, avec l'aide d'un modèle hydrodynamique unidimensionnel et des hypothèses sur les apports liquides latéraux.

L'évolution temporelle du signal de MES (FIG. 5.1 b) est directement corrélée aux différentes phases de l'hydrogramme :

1. La vague d'alerte est accompagnée d'une première augmentation de la concentration. Pour cette étape, l'eau évacuée des barrages est de l'eau de surface donc initialement pauvre en

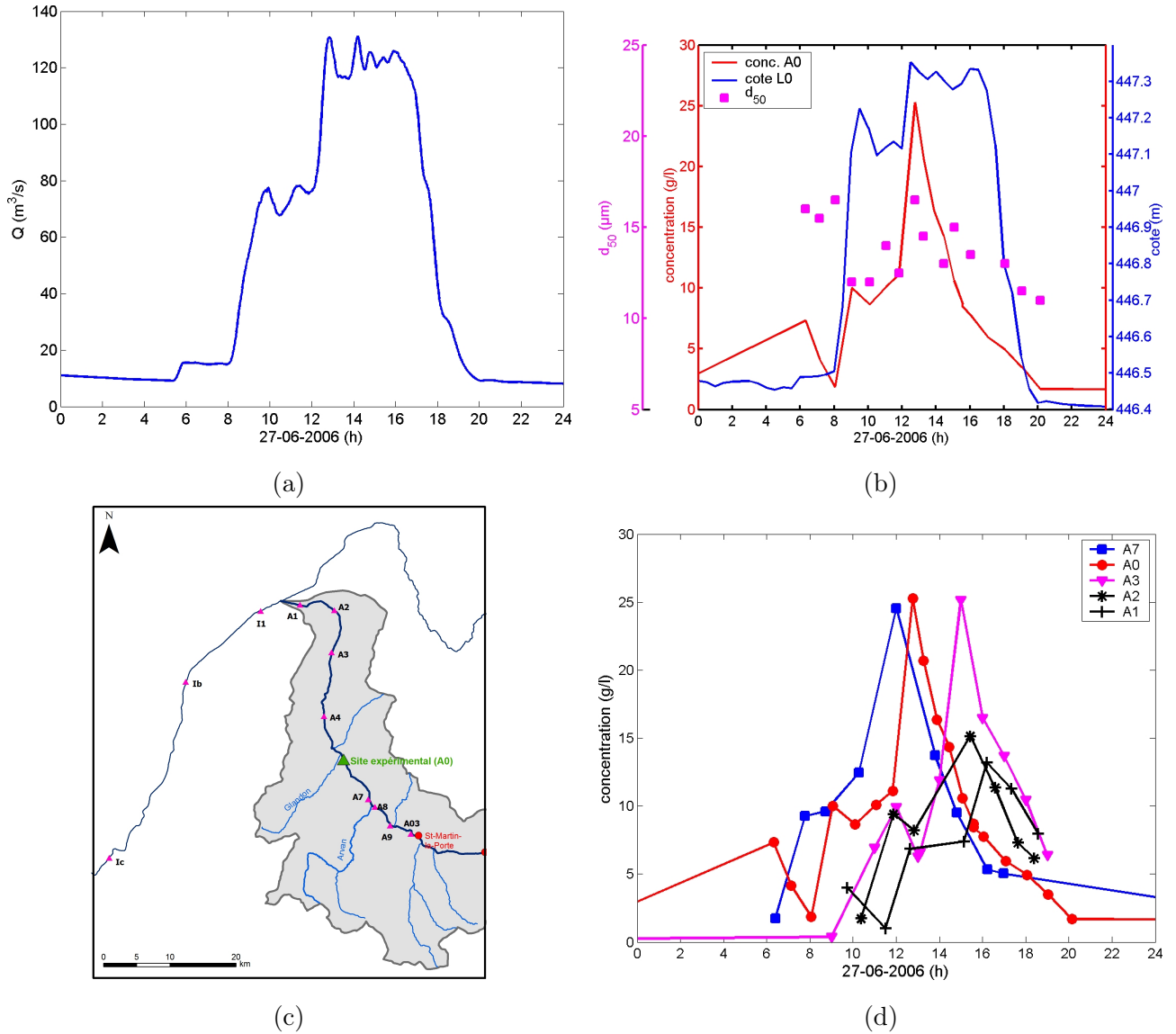


FIG. 5.1 – Apports hydrosédimentaires de la chasse 2006. (a) Hydrogramme estimé et (b) concentration en MES mesurée au site d'étude.

Transfert des MES dans l'Arc : (c) localisation des prélèvements en MES et (d) évolution de la concentration en MES.

MES. Les sédiments trouvés en suspension à l'aval ne proviennent donc pas des retenues. D'autre part, sur tout l'événement, les apports en MES par les affluents sont négligeables devant les concentrations dans l'Arc. Ce pic de MES est donc probablement dû à une reprise des sédiments fins présents dans le lit de l'Arc suite à l'augmentation de débit, associée à une augmentation de la contrainte au fond, comme Le Coz *et al.* (2007a) l'ont observé sur la Saône en crue.

2. Le deuxième pic de MES (10 g/l) se produit simultanément au passage en torrentiel dans la retenue alors que les vannes de fond sont ouvertes. Il correspond donc à une phase d'érosion

dans la retenue.

3. Le plateau de débit suivant est accompagné d'un plateau de concentration, l'érosion dans la retenue pendant cette phase est constante.
4. Le maximum de MES principal, de valeur sensiblement supérieure aux précédents (25 g/l), est simultanément à la dernière augmentation de débit. Cette phase semble être la plus active pour l'érosion dans la retenue.
5. La concentration en MES décroît ensuite progressivement, même lorsque le débit est maintenu à un niveau élevé.
6. La diminution de la concentration en MES est cependant plus lente (pente dC/dt plus faible) sur la fin de l'hydrogramme avec la diminution de débit.
7. Le retour au débit réservé est accompagné d'un retour de la concentration en MES à une valeur stable et inférieure à 5 g/l.

Les deux pics principaux de concentration en MES étant précisément simultanés aux augmentations de débit, ils correspondent à l'accroissement de la contrainte au fond dans la retenue. Cela suggère que les MES de ces deux pics proviennent des sédiments érodés dans les retenues alors que ceux de la vague d'alerte sont une remobilisation des sédiments dans le lit. Les données de granulométrie (FIG. 5.1 b) confirment cette hypothèse sur l'origine des sédiments au cours de la chasse : pendant la vague d'alerte, le diamètre médian des sédiments vaut $d_{50} \approx 16 \mu m$; les augmentations suivantes de MES correspondent à des sédiments un peu plus fins ($d_{50} \approx 10 \mu m$) ; le pic principal de MES est cependant associé à des sédiments au diamètre médian identique à ceux du début de l'événement ($d_{50} \approx 17 \mu m$), cela correspond peut-être à : une reprise des sédiments présents dans les zones les plus élevées dans le lit de l'Arc ; à une reprise des sédiments infiltrés dans le lit de galets ; et/ou à l'érosion des sédiments les plus grossiers de la retenue, en particulier en queue de retenue.

Concernant le transfert des MES dans la rivière, les mesures de concentration le long de l'Arc et de l'Isère (FIG. 5.1 c et d) montrent clairement que :

- en l'absence d'apport liquide latéral significatif, sur des distances importantes (points de prélèvement A7, A0 et A3), la valeur du maximum de MES reste constante. Il y a un bilan équilibré entre érosion et dépôts n'affectant pas la valeur maximale du signal de MES ;
- par contre, la concentration est fortement affectée par les dilutions dues aux apports latéraux. Par exemple, la restitution d'eau claire à Randens (entre les points A2 et A3) fait passer la concentration de 25 à 15 g/l.

Sur cet événement, des concentrations très importantes ont été mesurées 200 m à l'aval de la retenue de Saint-Martin-la-Porte par le bureau d'étude IRAP. Le maximum de concentration a été estimé à 80 g/l contre 25 g/l sur le reste de la rivière ! Dans un premier temps, ces mesures ont suggéré un dépôt significatif sur les premiers kilomètres à l'aval du barrage. Ce dépôt n'a cependant pas été

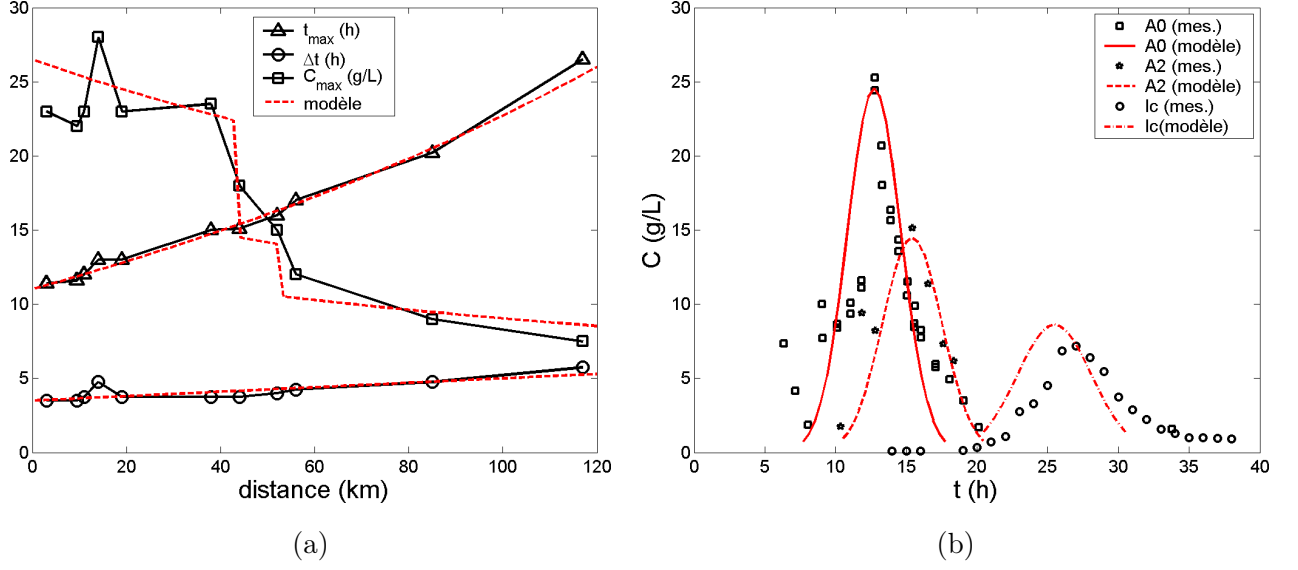


FIG. 5.2 – Modèle simplifié de transfert des MES, d'après Camenen *et al.* (2007). (a) Evolution des trois paramètres du modèle calés sur les mesures. (b) Transfert du signal de MES : mesures et signal modélisé par la propagation d'une gaussienne.

remarqué lors des observations de terrain. C'est finalement le mode de prélèvement sur ce site (au seau depuis la berge et non depuis la berge) qui semble être en cause, le fond ou les berges de la rivière ayant pu être raclés lors du prélèvement. Du fait du doute sur leur fiabilité, ces mesures ne sont donc pas exploitées.

Suivant ces observations, un modèle conceptuel très simple (Camenen *et al.*, 2007) a été développé pour rendre compte de la propagation du signal de MES dans la rivière. Le flux de MES étant supposé conservatif, la concentration en MES est modifiée seulement par :

les dilutions ponctuelles par les affluents ou par les apports artificiels d'eau claire (restitutions).

Aux points concernés, la dilution est modélisée par un coefficient A_{dil} . La conservation de la masse solide donne

$$C_{aval}Q_{aval} = C_{amont}Q_{amont} + C_{af}Q_{af} \quad (5.1)$$

où Q_{aval} , Q_{amont} , Q_{af} , C_{aval} , C_{amont} , C_{af} sont respectivement les débits (m^3/s) et les concentrations massiques en MES (g/l) à l'aval, à l'amont de la jonction et dans l'affluent. Le terme $Q_{af}C_{af}$ est souvent négligeable devant les deux autres termes, comme cela a été vérifié sur les apports latéraux principaux de l'Arc, c'est-à-dire l'Arvan, le Glandon, la restitution d'eau claire de Randens et la confluence avec l'Isère. On obtient donc

$$C_{aval} = A_{dil}C_{amont} \quad \text{avec} \quad A_{dil} = Q_{amont}/Q_{aval}$$

la **diffusion** qui est prise en compte dans un coefficient $A_{dif}(x)$ défini par

$$A_{dif}(x, x_0) = \frac{\Delta t(x) - \Delta t(x_0)}{x - x_0} \quad (5.2)$$

où x est le point de mesure, x_0 l'origine, $\Delta t(x)$ la largeur temporelle du signal aux 2/3 de sa hauteur. Pour respecter la conservation de la masse, l'élargissement du signal est associé à une diminution du pic de concentration.

Enfin, la propagation du signal est supposée uniforme suivant une vitesse v .

Le signal est décrit de manière simplifiée par une fonction gaussienne :

$$C(x, t) = C_{max}(x) \exp \left[-2 \left(\frac{t - t_{max}(x)}{\Delta t(x)} \right)^2 \right] \quad (5.3)$$

où, au point x , $C_{max}(x)$ est la valeur maximale de la concentration, $t_{max}(x)$ le temps pour lequel $C_{max}(x)$ est atteint, et $\Delta t(x)$ la largeur temporelle du signal aux 2/3 de $C_{max}(x)$. Le modèle ne rend ainsi compte que de la propagation du maximum principal du signal de MES.

Les paramètres du modèle sont (i) les coefficients de dilution des deux affluents majeurs : la restitution EDF à Randens et l'Isère, estimés respectivement à 0.65 et 0.75, et (ii) les termes A_{dif} , Δt et v , calés sur les mesures (FIG. 5.2 a).

Ce modèle très simplifié de propagation d'un signal gaussien explique de façon satisfaisante le transfert des MES de la retenue aval à Grenoble (FIG. 5.2 b). La sous-estimation de la vitesse sur l'Isère pourrait être facilement corrigée par une amélioration de la calibration sur ce tronçon (FIG. 5.2 a). La sur-estimation du maximum de concentration dans l'Isère est sûrement liée à des apports latéraux ignorés. Le modèle ne s'intéressant qu'à la propagation du maximum principal du signal, il suggère que ces sédiments transitent sans interaction avec le fond. Ce n'est, a priori, pas le cas des sédiments transportés en début d'hydrogramme qui ont été identifiés comme une reprise de sédiments dans le lit. Malheureusement, du fait d'un horaire très matinal sur la partie amont, le premier pic de MES associé à la vague d'alerte n'a pas été suivi en détail sur toute la rivière, ne permettant pas de confirmer cette hypothèse.

En principe, la masse des sédiments évacués pourrait être établie à partir des mesures bathymétriques dans les retenues levées avant et après la chasse. Les bathymétries des retenues du Pont-des-Chèvres et de Saint-Martin-la-Porte ont été mesurées et traitées suivant les méthodes du paragraphe 3.4 (FIG. 5.3). Pour des raisons pratiques, aucune donnée n'a été acquise sur la retenue amont du Freney. Sur la retenue de Saint-Martin-la-Porte, dans la partie amont, des difficultés de navigation ont compliqué la mesure avant la chasse. Pour cette retenue, la comparaison est donc faite uniquement à proximité des vannes (FIG. 5.3 f). S'ajoutant à ces lacunes de données, l'absence

d'information sur la porosité des sédiments en place rend tout bilan sédimentaire illusoire. Des informations qualitatives peuvent cependant être tirées des mesures bathymétriques sur les processus d'érosion pendant la chasse.

Sur les bathymétries des deux retenues avant comme après l'événement, l'emplacement des vannes de fond est marqué par des zones plus profondes (FIG. 5.3 a, b, d, e) matérialisant les zones de la retenue où les vitesses au fond sont les plus élevées. Les emplacements des deux vannes de la retenue de Pont-des-Chèvres sont bien visibles ; par contre, sur la retenue de Saint-Martin-la-Porte, la troisième vanne rive gauche n'est pas associée à un chenal marqué sur la bathymétrie, mais une plage de dépôt est toujours visible à cet endroit.

Dans la retenue de Pont-des-Chèvres (FIG. 5.3 c), la chasse a permis de renforcer ces deux chenaux d'arrivée aux vannes, visibles sur la photo FIG. 5.4 (a). L'opération a aussi permis d'éroder principalement des dépôts de sédiments en rive droite. Des zones de dépôt sont aussi visibles, surtout dans la partie aval de la retenue ; elles sont probablement dues à des dépôts en fin d'événement ou à l'effondrement ou au glissement des dépôts les plus élevés, comme observé par Bouchard (2001).

Dans la retenue de Saint-Martin-la-Porte, l'écoulement à proximité des vannes est forcé vers la rive droite par une avancée rocheuse (FIG. 3.16 b), expliquant des dépôts importants en rive gauche. Ces dépôts sont probablement dus à une zone d'écoulement plus lente, voire à une recirculation de l'écoulement à l'aval de l'éperon rocheux (FIG. 2.8 b et FIG. 5.4 b). Une partie de ces sédiments est érodée au cours de la chasse (FIG. 3.16 f), mais il reste des dépôts permanents en rive gauche qui se végétalisent progressivement. Des dépôts sont aussi visibles après la chasse à proximité des vannes, probablement dus à des apports solides en fin de chasse ou à une progression des sédiments dans la retenue (Bouchard, 2001).

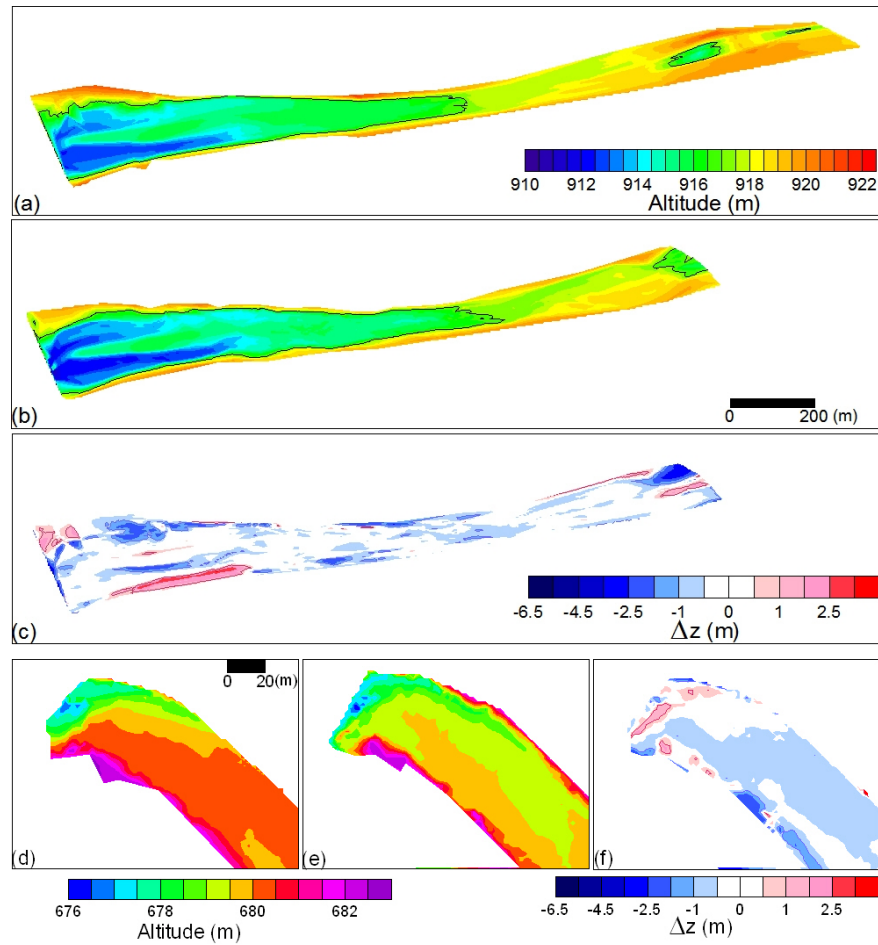


FIG. 5.3 – Bathymétries de la retenue de Pont-des-Chèvres (a) avant, (b) après la chasse et (c) différence entre les deux états. Bathymétrie de la retenue de Saint-Martin-la-Porte à proximité des vannes (d) avant, (e) après la chasse et (f) différence entre les deux états.

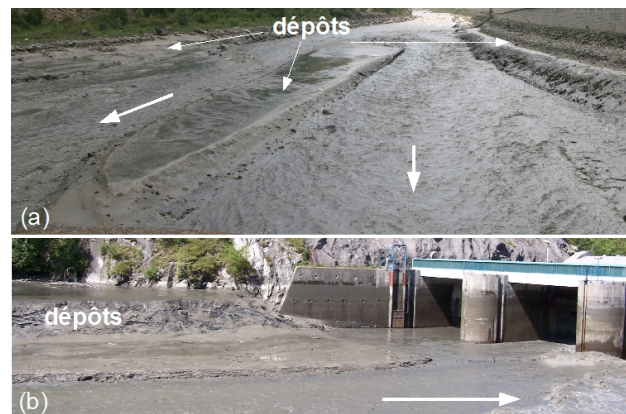


FIG. 5.4 – Dépôts dans la partie aval des retenues (a) de Pont-des-Chèvres (vue depuis l'ouvrage) et (b) de Saint-Martin-la-Porte (vue depuis la rive droite). Les flèches donnent le sens de l'écoulement. Vues prises pendant l'écoulement libre dans les retenues. Photo©M. Lagouy.

5.1.2 Observations hydrométriques

Le dispositif expérimental déployé sur le site principal pendant la chasse 2006 (FIG. 5.5) comprend : quatre mesures ponctuelles de la cote de la surface libre : L0 installé en permanence, L1, en section aval rive droite, L2, au milieu en rive droite et L3, en section amont en rive gauche ; les jaugeages DIREN dans la section de L0 ; et les deux sites de suivi LS-PIV (SITE D à l'aval et SITE C au milieu du banc). Toutes les méthodes de mesure sont décrites au chapitre 4.

Des premières informations sur les écoulements peuvent être tirées du suivi limnimétrique au cours de la chasse (FIG. 5.6).

Les quatre limnimètres permettent d'estimer des pentes moyennes de la surface libre en régime quasi-permanent pour les trois paliers de débit, pendant la vague d'alerte ($Q \approx 15 \text{ m}^3/\text{s}$), en début d'événement ($Q \approx 80 \text{ m}^3/\text{s}$) et au milieu de la chasse ($Q \approx 125 \text{ m}^3/\text{s}$). Entre les deux limnimètres aval, la pente de la surface libre est la même quel que soit le débit, laissant supposer que cette partie du site d'étude a le même type d'écoulement à fort et faible débit. Il n'y a en effet pas de banc de galets dans cette partie du site d'étude, la section y est quasiment uniforme. L'ajout de la partie du site d'étude entre L1 et L0 au site expérimental principal ne présente donc pas d'intérêt particulier. A faible débit, la pente de la ligne d'eau entre les points L2 et L3 est deux fois plus importante que la pente longitudinale moyenne de la rivière (1.2% contre 0.6%). La présence de gros blocs dans le chenal d'écoulement peut expliquer cette singularité de pente. Entre ces deux points, l'eau peut s'écouler soit par le chenal principal, soit par le chenal secondaire et le premier chenal de jonction. En considérant l'écoulement entre L3 et L2 par le chenal de jonction amont, les MNT montrent que la pente du fond jusqu'à l'entrée du chenal est de l'ordre de 0.6% comme dans le reste de la rivière, puis de l'ordre de 3% dans le chenal de jonction. Les contraintes au fond qui résultent de cette forte pente sont susceptibles de provoquer la mise en mouvement des sédiments dans cette partie du banc. Et l'accélération de l'écoulement dans cette zone peut entraîner l'érosion non seulement des sédiments du fond mais aussi des sédiments sur les bords des chenaux de jonction. A fort débit, toujours entre L2 et L3, la pente de la surface libre est un peu plus faible (0.5%), du même ordre de grandeur que dans le reste de la rivière, et l'écart de cote entre les surfaces du chenal secondaire et du chenal principal est réduit. L'effet de "barrière" du banc, marqué à faible débit, est diminué à fort débit, les chenaux de jonction ne constituant alors plus des chemins d'écoulement privilégiés. Les configurations topographiques des autres chenaux de jonction étant similaires à celui-ci, les observations sur le fonctionnement de ce chenal sont extrapolables aux autres chenaux de jonction.

Les suivis des champs de vitesse LS-PIV sur les SITES C et D donnent aussi des informations complémentaires sur la dynamique de l'écoulement. A cause de l'absence de traceurs ou d'ombres,

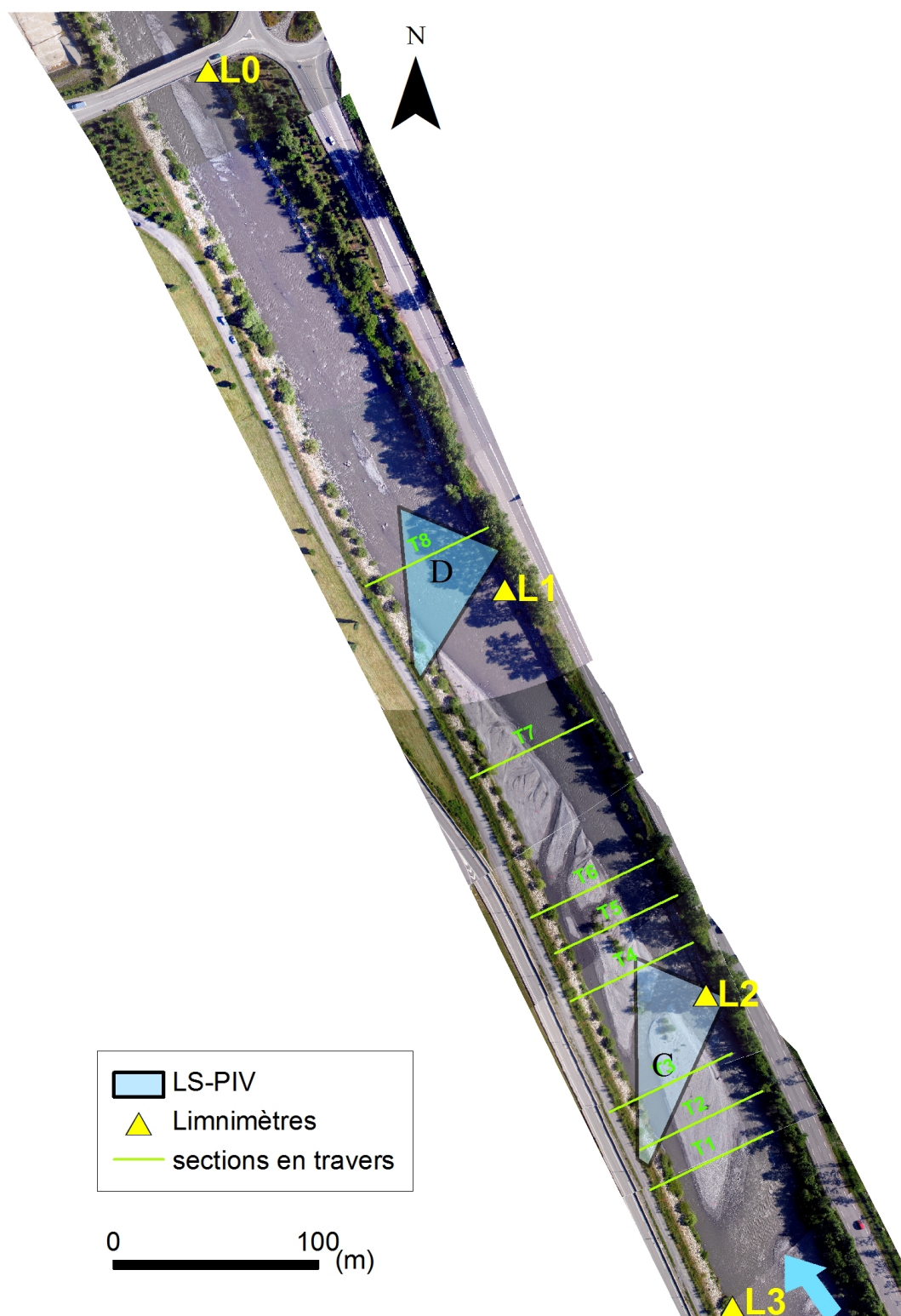


FIG. 5.5 – Dispositif expérimental sur le site principal pour la chasse 2006. Trois limnimètres mesurent la hauteur d'eau, deux sites de suivi LS-PIV donnent les champs de vitesse au cours du temps, des mesures de vitesse ont été faites par la DIREN RA depuis le pont à l'aval. Les sections en travers (T_i , $i= 1$ à 8) ont été levées avant et après la chasse. La flèche donne le sens de l'écoulement. Photos drone du 08-06-2006.

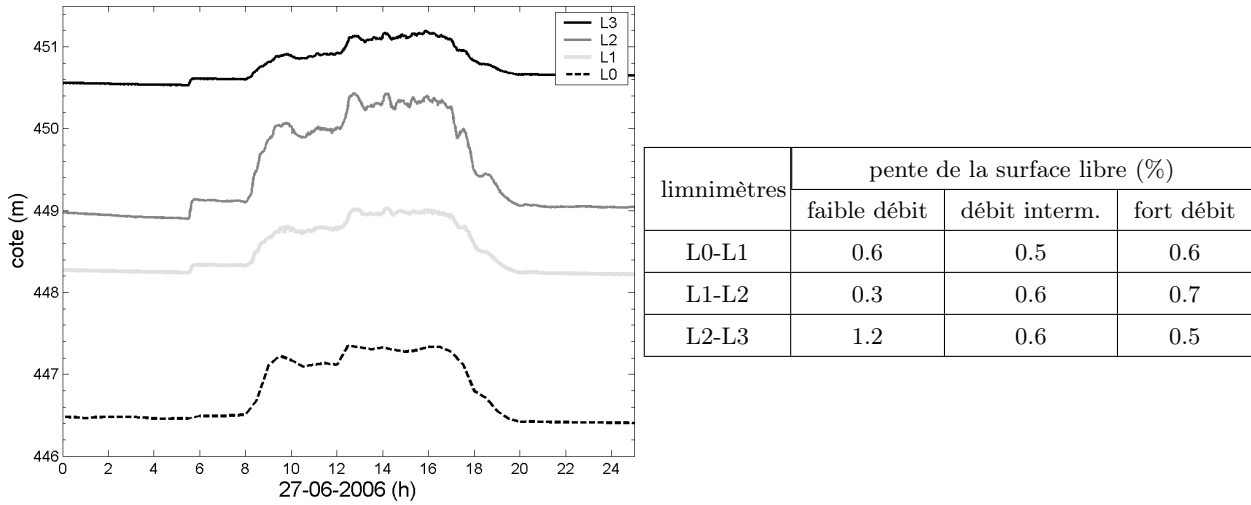


FIG. 5.6 – Suivi limnimétrique au cours de la chasse 2006. L0 est dans la section du pont, L1 est situé dans la section limite aval du site expérimental principal, L2 au milieu et L3 dans la section limite amont. La localisation des points de mesure est donnée sur la figure FIG. 5.5.

le champ de vitesse n'a pas toujours pu être exploré dans sa globalité.

Sur le point de vue à l'aval du banc (SITE D, FIG. 5.7), la répartition des vitesses est simple. A faible débit (D1, $17 \text{ m}^3/\text{s}$), l'intensité de vitesse est relativement uniforme. Par contre, à partir de D2 ($57 \text{ m}^3/\text{s}$), les vitesses sont plus fortes dans la partie droite de la rivière. Le profil en travers des vitesses est donc légèrement dissymétrique par rapport au profil attendu dans un canal uniforme, à cause de la présence à l'amont du banc de galets. Les vitesses sont plus homogènes sur la section, plus à l'aval du banc. L'asymétrie du profil en travers des vitesses sur la section est confirmée par l'analyse des orientations des vecteurs vitesse (FIG. 5.7), qui tendent vers la direction moyenne de la rivière en rive droite. La direction moyenne¹ sur le point de vue est quasiment constante au cours du temps : $\alpha_d \approx -11^\circ \pm 4^\circ$.

Le deuxième point de vue au milieu du banc (SITE C, FIG. 5.8) permet de suivre l'écoulement à proximité du chenal de jonction amont. Là, les vitesses sont surtout mesurées dans le champ proche de l'image (chenal secondaire et chenal de jonction), où les traceurs sont bien visibles et l'écoulement moins agité que dans le chenal d'écoulement principal. Les vitesses ont été mesurées pour deux configurations différentes : à 10h50 (C1, $77 \text{ m}^3/\text{s}$), le banc n'est pas encore immergé alors qu'à 12h38 (C2, $122 \text{ m}^3/\text{s}$) l'écoulement traverse le banc. Même si les hauteurs d'eau dans le chenal secondaire sont faibles, les vitesses sont de l'ordre de 3 m/s , ce qui peut être expliqué par des frottements plus faibles dus à des sédiments moins grossiers. L'accélération dans le chenal de jonction est clairement visible, même si pour le plus fort débit (C2) il manque des données à l'aval du chenal de jonction.

¹La direction du vecteur vitesse est définie comme l'angle entre le vecteur et la direction moyenne de la rivière (cf. FIG. 5.7).

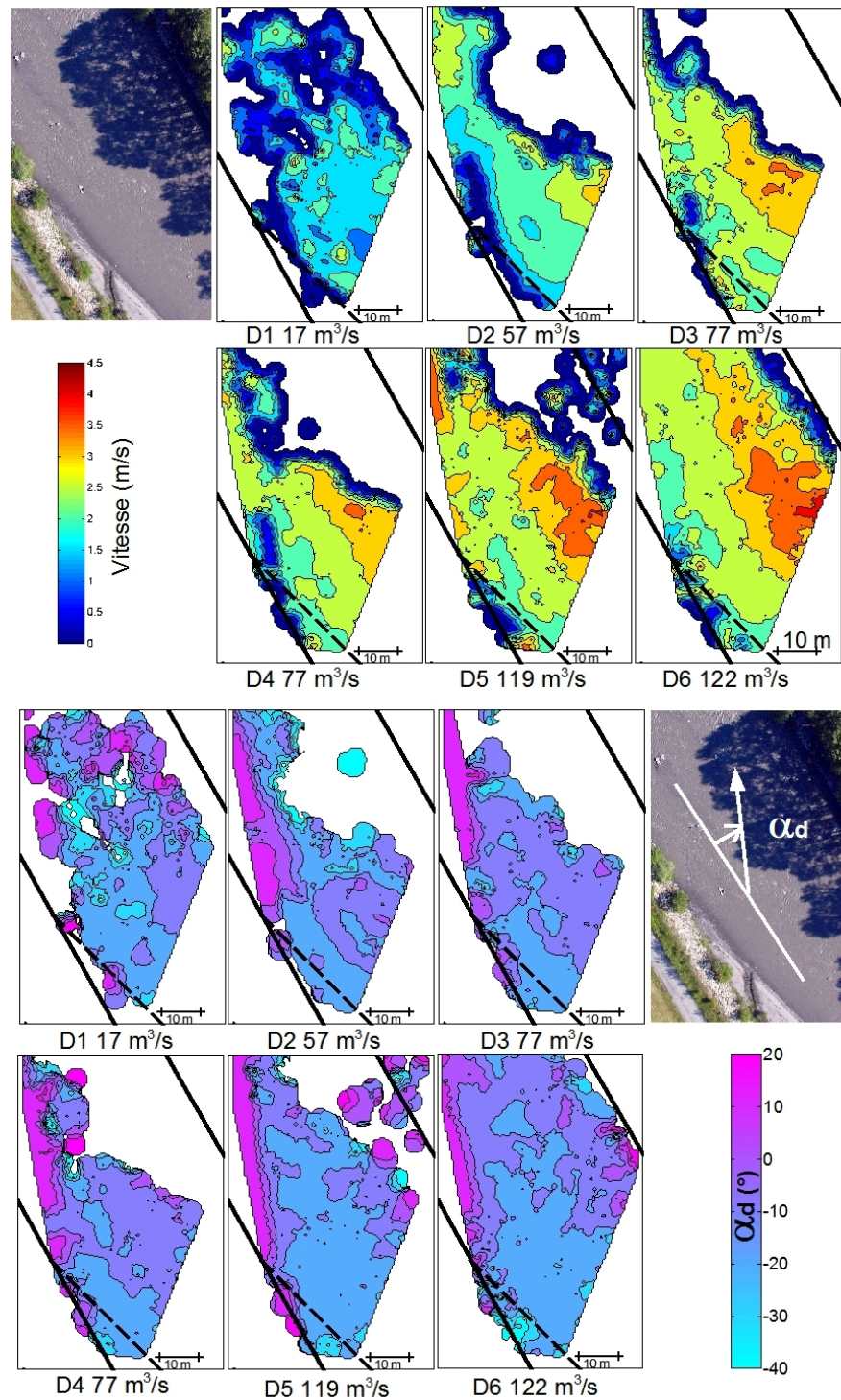


FIG. 5.7 – Intensités (en haut) et orientation (en bas) des vecteurs vitesse LS-PIV sur le SITE D au cours de la chasse 2006. Les lignes en pointillés donnent les positions approximatives des digues et des sous-unités morphologiques du banc. L'angle α_d est défini comme l'angle entre chaque vecteur vitesse et la direction moyenne de la rivière.

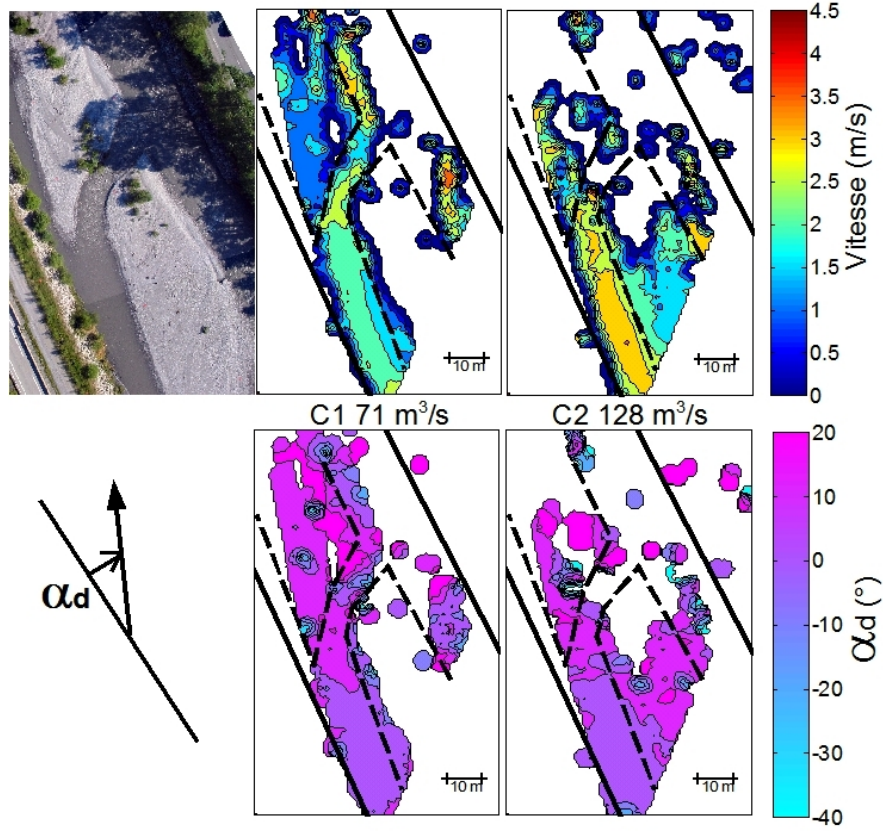


FIG. 5.8 – Intensité (en haut) et orientation (en bas) des vecteurs vitesse LS-PIV sur le SITE C au cours de la chasse 2006. Les lignes en pointillés donnent les positions approximatives des digues et des sous-unités morphologiques du banc. L'angle α_d est défini comme l'angle entre chaque vecteur vitesse et la direction moyenne de la rivière.

Ces observations sur les vitesses confirment l'hypothèse notée sur les observations limnimétriques d'un écoulement plus rapide dans le chenal de jonction. Sur tout ce site, l'orientation α_d des vecteurs vitesse est positive, ce qui indique l'influence forte de la topographie des chenaux sur la direction de l'écoulement. Sur le banc, aucune vitesse n'est mesurée à 10h50 ; à 12h38 les vitesses mesurées sur le banc sont plus faibles (2 m/s) que les vitesses dans le chenal secondaire. Par contre l'angle α_d est positif, cela indique que même si l'écoulement reste concentré dans le chenal de jonction, de l'eau s'écoule en "nappe" sur le banc (et non concentré dans le chenal de jonction) directement entre le chenal secondaire et le chenal principal. Le même phénomène est visible sur le banc, à l'aval du chenal de jonction, à 10h50.

En résumé, les observations hydrométriques faites au cours de la chasse 2006 permettent de remarquer que, à l'aval du banc, l'influence de ce dernier sur l'écoulement est rapidement atténuée, le champ de vitesse devenant rapidement plus proche de celui d'une section simple. La pente de la

surface libre reste la même au cours du temps.

Par contre, dans une zone autour d'un chenal de jonction, les formes de l'écoulement varient avec le débit. A faible débit, le banc a un effet d'obstacle entre le chenal secondaire et le chenal principal, et seul un chenal de jonction permet la rencontre des deux écoulements. Une forte pente existe entre les chenaux secondaire et principal, et l'eau est fortement accélérée dans le chenal de jonction. A fort débit, l'eau peut s'écouler en nappe sur le banc, réduisant cet effet d'obstacle.

5.1.3 Modifications topographiques

Huit sections en travers réparties sur le site expérimental ont été suivies avant et après la chasse (cf. paragraphe 3.1.1 pour la méthode). La localisation des transects, T_i ($i= 1$ à 8) de l'amont vers l'aval, est donnée sur la carte (FIG. 5.5). Leur comparaison donne la tendance générale d'évolution topographique du secteur (FIG. 5.9). La tête de banc est érodée (T1 à T3) de 30 à 50 cm pour sa partie la plus élevée. Dans sa partie intermédiaire, le banc est également érodé (T4 et T5). L'aval du chenal principal (T5 à T8) est aussi érodé, avec des affouillements maximaux de 30 à 50 cm dans chaque section. En revanche, le chenal secondaire est relativement stable (T1 à T6). Ces premières observations tendent à montrer que le site a été globalement érodé au cours de la chasse. Pour les zones avec des chenaux de jonction, la topographie ne peut pas être interpolée entre sections (Fuller *et al.*, 2003). Une comparaison plus fine à partir des mesures distribuées est donc indispensable.

La soustraction des MNT modélisant la topographie avant et après la chasse (opération : bav6-bav5) donne un MNT de différence entre les deux surfaces (FIG. 5.10 a). Les changements significatifs de la topographie sont clairement identifiables sur cette carte. Quelques zones sont à étudier avec vigilance du fait d'une incertitude importante sur l'interpolation de l'altitude. La carte d'incertitude² (FIG. 5.10 b) montre en effet que la partie amont, la partie intermédiaire du chenal d'écoulement principal, ainsi que quelques zones à proximité des berges ne disposent pas de données en densité suffisante pour permettre une comparaison juste.

La carte de différence (FIG. 5.10 a) indique nettement une tendance globale du site à l'érosion. Du fait de la granulométrie de surface, la variation minimale jugée significative est fixée à 10 cm. Un calcul des volumes et des surfaces modifiés avec le logiciel SURFER montre que, sur la surface totale du site, 47% a été érodé de plus de 10 cm, et seulement 5% a subi un dépôt supérieur à 10 cm. Les volumes³ d'érosion et de dépôt supérieurs à 10 cm sont respectivement de 2338 m³ et 219 m³, conduisant à des hauteurs moyennes de dépôt et d'érosion respectivement de 14 et 17 cm. La description de l'évolution topographique demande cependant à être nuancée par sous-unité morphologique :

²suivant la définition du paragraphe 3.1.3.

³L'incertitude sur les volumes est estimée qualitativement à 3 m³, ce qui représente une épaisseur de 12 cm sur une surface de 25 m².

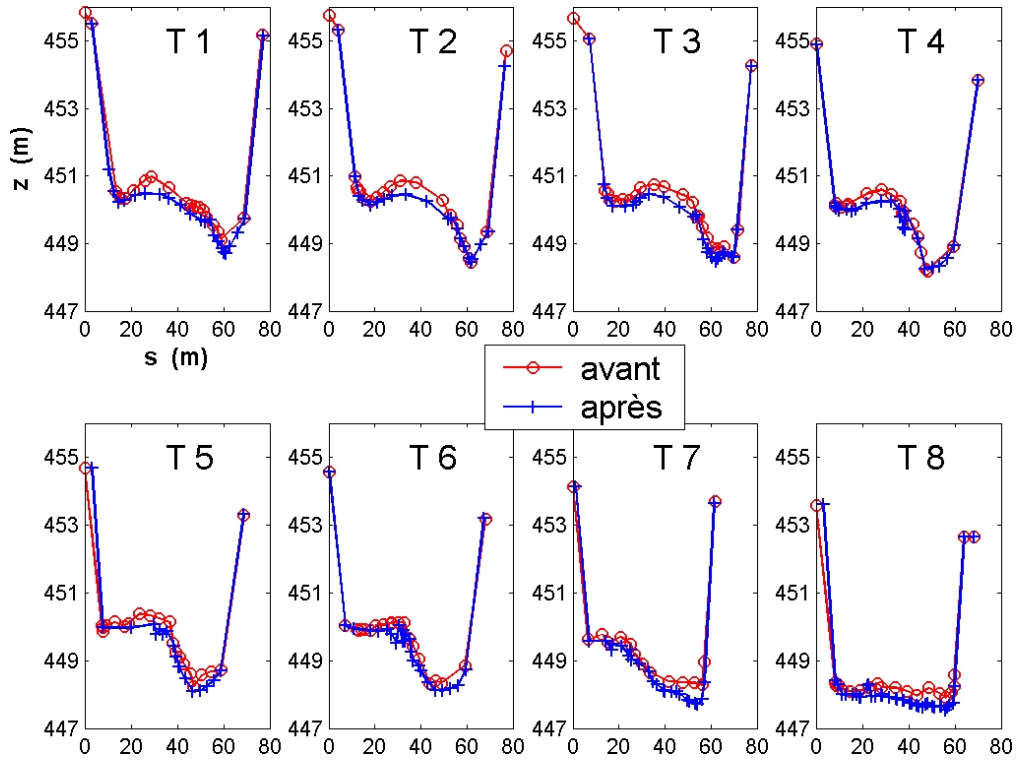


FIG. 5.9 – Profils topographiques de sections en travers levées avant et après la chasse 2006. Les profils T_i ($i= 1$ à 8) sont localisés sur la figure FIG. 5.5.

le chenal d'écoulement principal est globalement érodé. Il est particulièrement affecté dans sa partie aval avec des érosions de l'ordre de $\Delta z = -0.2$ à -0.4 m.

le chenal secondaire reste approximativement à la même altitude.

la tête de banc a été érodée jusqu'à $\Delta z = -0.4$ m.

la queue de banc a subi des dépôts localisés, surtout au bord ($\Delta z = +0.1$ à $+0.2$ m) et à proximité de la berge ($\Delta z > +0.5$ m) conduisant à un élargissement de la partie aval du banc.

le bord du banc apparaît sur la carte comme, à l'aval, une zone de changement en altitude de faible amplitude (-0.2 à $+0.1$ m). Mais il est nettement érodé dans sa partie amont et au milieu.

le chenal de jonction permanent amont a subi une érosion de berge à gauche dans sa partie amont et des dépôts dans sa partie aval, à proximité du chenal principal, sur la droite.

le chenal de jonction permanent du milieu a été fortement érodé ($\Delta z < -0.5$ m).

les chenaux de jonction à l'aval ont été comblés, et un nouveau chenal de jonction est apparu à l'amont.

Ces observations sur la différence des MNT indiquent, comme l'examen des sections en travers, une réelle tendance à l'érosion du site expérimental principal pendant la chasse 2006. Pour résumer, la

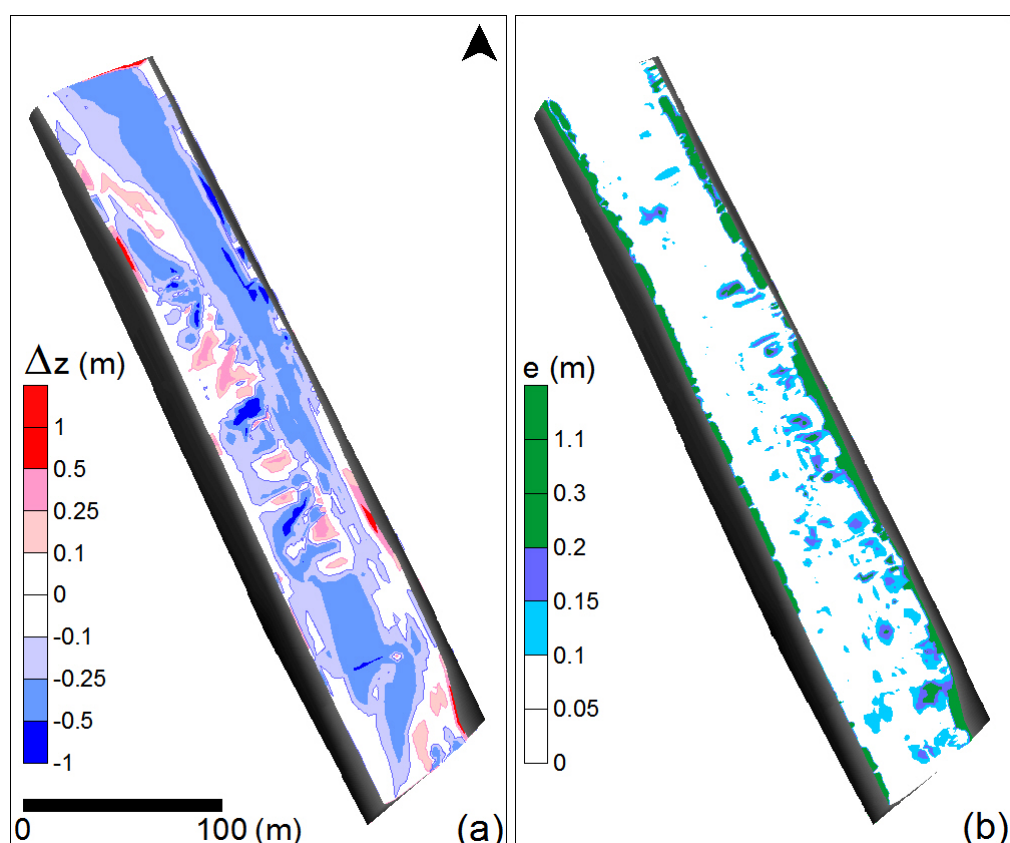


FIG. 5.10 – Evolution topographique au cours de la chasse 2006. (a) Différence des MNT avant et après la chasse (bav6-bav5) et (b) évaluation de l'incertitude suivant la méthode du paragraphe 3.1.3.

partie aval du chenal principal et le banc sont érodés ; les chenaux de jonction permanents ont été renforcés ; les chenaux de jonction éphémères ont été modifiés ; alors que le chenal secondaire est resté relativement stable. Les zones de chenaux et la queue de banc sont les seules à avoir subi des dépôts localisés. L'élargissement de la queue du banc et l'érosion de la tête du banc peuvent être identifiés comme une faible migration du banc vers l'aval.

5.1.4 Modifications de la granulométrie de surface

La granulométrie des sédiments grossiers de surface a été estimée sur le site expérimental avant et après la chasse suivant la méthode décrite au paragraphe 3.2.1. La surface du banc est découpée en surfaces homogènes et une classification granulométrique adaptée a été développée avec les classes suivantes (TAB. 3.3) : sédiments fins et graviers (c1) ; graviers et sédiments fins (c2) ; petits galets et sédiments fins graviers (c3) ; graviers (c4) ; petits galets, graviers et sédiments fins (c5 et c6) ; gros galets (chenal principal, c7) ; blocs métriques (berges, c8). L'analyse granulométrique est restreinte à la surface du banc émergée, car le manque de donnée empêche toute comparaison dans le chenal principal. Les enrochements des berges sont supposés stables. La zone d'étude granulométrique ainsi

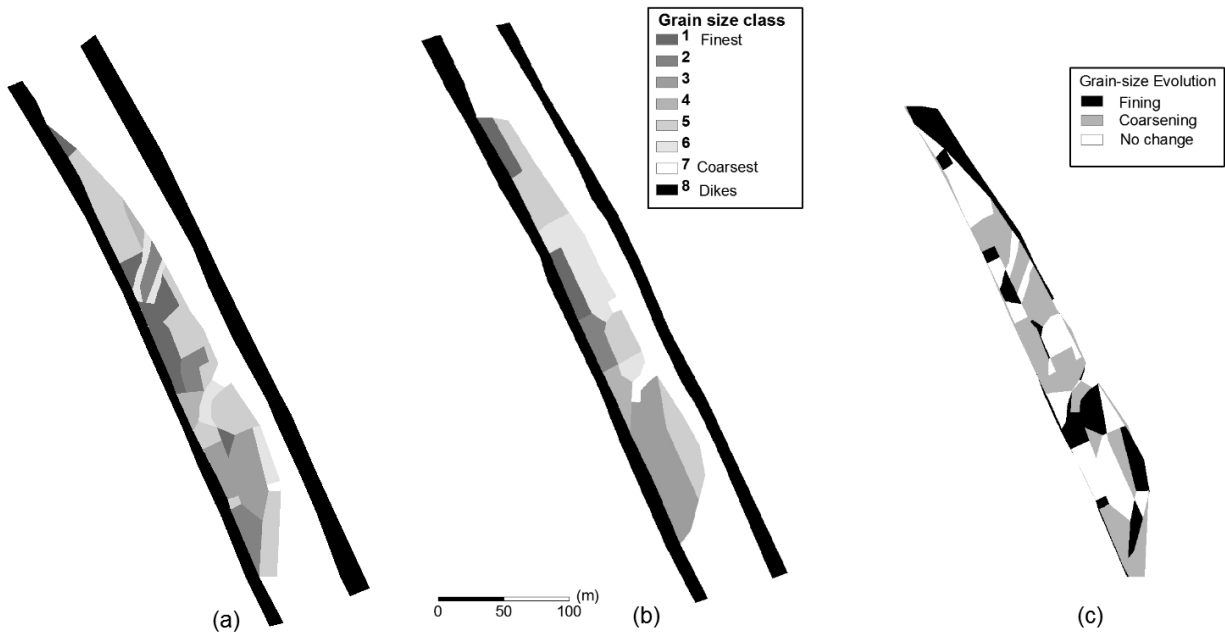


FIG. 5.11 – Evolution de la granulométrie de surface pendant la chasse 2006. (a) état avant, (b) état après, (c) comparaison des deux états. Les classes granulométriques ont été détaillées dans le tableau TAB. 3.3 : sédiments fins et graviers (c1); graviers et sédiments fins (c2); petits galets, sédiments fins et graviers (c3); graviers (c4); petits galets, graviers et sédiments fins (c5 et c6); gros galets (chenal principal, c7); blocs métriques (berges, c8).

définie représente 31% de la surface totale du site expérimental.

Dans les deux états, un affinement de la granulométrie est visible longitudinalement (FIG 5.11 a et b). Comme Church et Jones (1982); Diplas (1994); Lanzoni (2000); Hassan et Church (2001); Pyrcce et Ashmore (2005) l'ont observé, les sédiments les plus fins sont en queue de banc. Une ségrégation latérale caractéristique du banc est aussi visible : la fraction la plus fine (c1) est souvent éloignée du chenal principal et proche de la rive gauche.

Pour comparer les deux états granulométriques, les rasters granulométriques ont été soustraits, permettant d'identifier facilement les zones où les sédiments de surface deviennent plus fins et celles où ils deviennent plus grossiers (FIG 5.11 c). Une grande partie du banc a une granulométrie stable (42% de la surface du banc), et, lorsqu'il y a une modification de la granulométrie, c'est souvent une augmentation de la taille des sédiments (38% de la surface du banc). Les changements les plus communs ont lieu entre classes proches, et les évolutions suivantes sont le plus souvent observées :

- une augmentation de la fraction fine dans certaines zones (changement de la classe c5 à c3), par exemple en tête de banc ;
- changement sur le bord du banc de la classe granulométrique du chenal vers les classes du banc émergé ;

- changement de la classe c5 à la classe c6 correspondant à grossissement du mélange "gravier, petits galets et sédiments fins" ;
- des changements de sédiments fins vers le mélange des classes c5 ou c6, en particulier au milieu du banc ;
- des changements de la classe fins et graviers (c1) vers une classe plus grossière (c2) dans la partie intermédiaire du chenal secondaire.

Chacune des sous-unités morphologiques est caractérisée par une évolution granulométrique :

le chenal secondaire est modifié de façon importante à proximité des chenaux de jonction et les sédiments sont plus fins après la chasse dans la partie amont du chenal ;

la tête de banc est caractérisée par une augmentation de la taille des sédiments ;

la queue de banc présente des sédiments plus fins après la chasse, ce qui est lié à l'élargissement de la queue du banc ;

les chenaux de jonction permanents subissent une légère diminution de la taille de leurs sédiments ;

les chenaux de jonction éphémères qui évoluent beaucoup au cours de la chasse, voient par conséquent leur granulométrie fortement modifiée ;

le bord de banc présente des sédiments dont la taille diminue vers la queue de banc et augmente en tête de banc. Autrement, les changements sont liés avec les changements de la zone équivalente dans la section, par exemple le bord du banc à l'amont évolue comme la tête de banc.

La granulométrie de surface est loin d'être stable, ses modifications confirmant que la surface du banc est remaniée au cours de la chasse, soit sous forme d'érosion soit sous forme de dépôt, voire par une succession de différentes phases. Une information sur les distances parcourues par les sédiments sur l'événement pourrait être obtenue par traçage des particules. Des tests en 2005 de parcelles peintes ont cependant montré qu'il n'était pas évident de retrouver les particules (seulement une dizaine sur une centaine de galets peints a été retrouvée). Dans ce cas, les distances parcourues à la surface du banc sont de plusieurs dizaines de mètres. Un traçage avec des émetteurs électromagnétiques ou radio (McNamara et Borden, 2004; Habersack, 2001) permettrait d'acquérir cette information.

5.1.5 Dépôts de sédiments fins

Les surfaces de dépôt de sédiments fins sur le banc sont identifiées suivant la méthode d'analyse d'image décrite au paragraphe 3.3.3. A partir des photos aériennes haute résolution (quelques centimètres par pixel) prises avant et après la chasse, les surfaces de sédiments fins sont identifiées grâce à leur couleur et à leur texture.

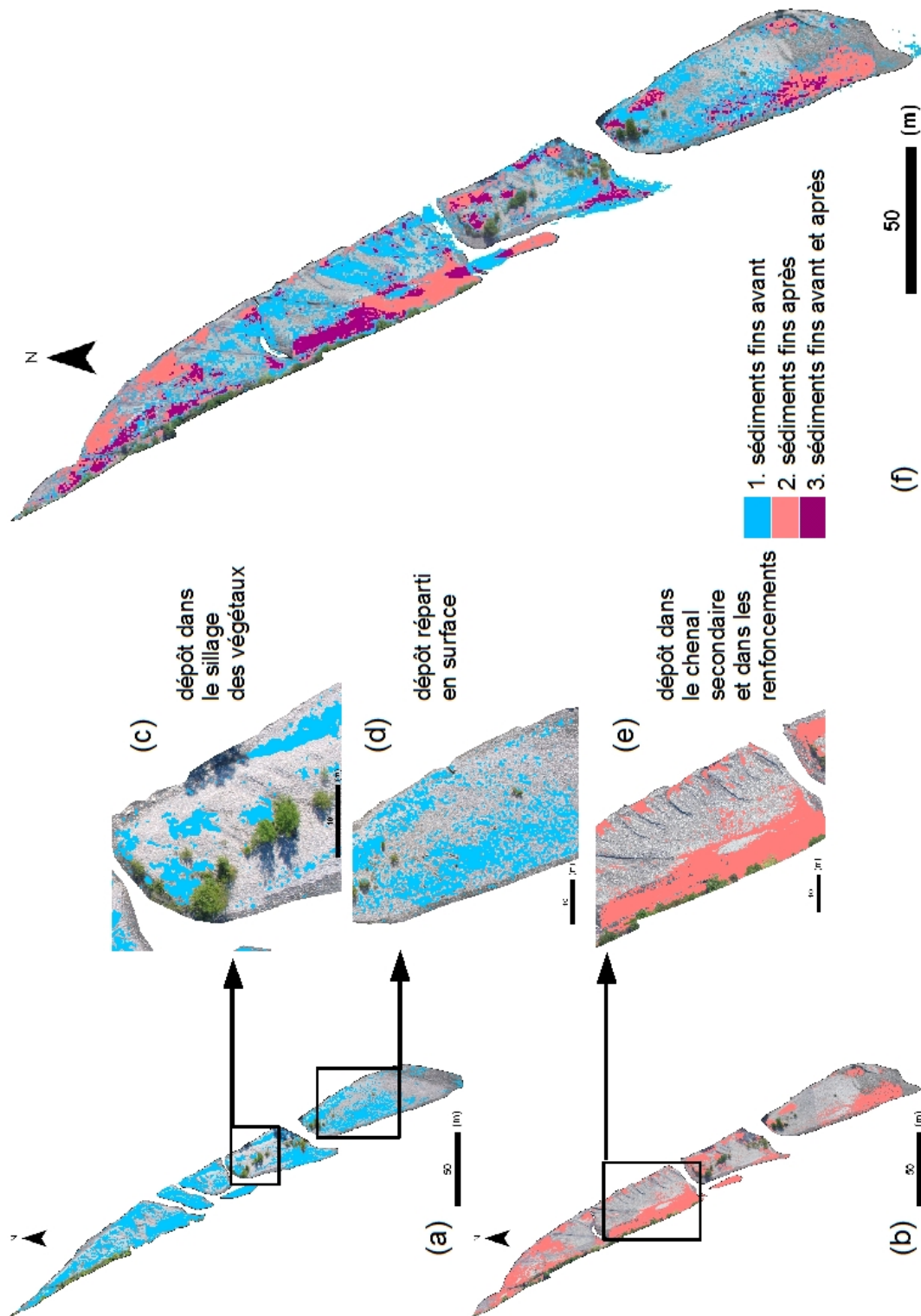


FIG. 5.12 – Dépôts de sédiments fins identifiés par analyse d'image. (a) surfaces de dépôt avant et (b) après la chasse ($Q=10$ et $6 \text{ m}^3/\text{s}$). Détails suivant la typologie développée : (c) dépôt dans le sillage des végétaux, (d) dépôt réparti en surface et (e) dépôt dans le chenal secondaire et en bord de banc, dans les renforcements. Comparaison des états avant/après (f)

Sur la base du travail de Wood et Armitage (1999) et des observations faites sur les images aériennes, une typologie des dépôts de sédiments fins sur le banc a été développée (cf. FIG 5.12) :

les dépôts en bordure de banc sont localisés dans les zones de vitesse faible. Ces dépôts se situent principalement dans les renforcements en bordure de banc (*nooks* en anglais). La queue de banc est comptée dans cette catégorie, car c'est une zone de vitesse réduite avec des motifs de recirculation de l'écoulement clairement visibles sur les films LS-PIV (SITE D). Cette catégorie représente la majorité des dépôts de sédiments fins avant et après l'événement.

les dépôts dans le chenal secondaire sont situés dans sa partie aval où les vitesses sont faibles à cause d'une pente peu prononcée.

les dépôts en fine couche de surface sont répartis sur tout le banc. Ils se trouvent plus particulièrement dans la partie amont de la tête de banc et à proximité des chenaux de jonction.

les dépôts proches d'obstacles (blocs, troncs, végétation) sont localisés dans le sillage de l'obstacle ou éventuellement au pied des macrophytes. Ils constituent les dépôts de sédiments fins les plus épais.

La taille des surfaces de dépôts fins (FIG 5.12) est sensiblement équivalente avant et après la chasse, respectivement 2 359 m² et 2 336 m², soit 34% et 31% de la surface du banc émergé. Cependant les surfaces de dépôt communes aux deux états sont peu étendues, 761 m², soit seulement 10% de la surface du banc émergé. Elles correspondent aux zones de dépôts stables : la queue de banc, le sillage des végétaux, le sillage des troncs ou obstacles stables, dans le chenal secondaire, et dans une moindre mesure sur la tête de banc. Les dépôts dans le chenal secondaire dépendent de l'étendue vers l'aval de ce dernier. En effet, plus il est étendu vers l'aval, plus les sédiments pourront se déposer sur le banc. Des dépôts en bordure de banc existent dans les deux cas, notamment dans les renforcements, mais, du fait de la différence de débit entre les deux états, les dépôts ne sont pas situés aux mêmes endroits.

Des analyses granulométriques des sédiments fins en suspension et déposés (FIG 5.13) montrent que naturellement les sédiments des dépôts sont plus grossiers que les sédiments en suspension ($d_{50} \approx 200 \mu\text{m}$ et $d_{50} \approx 10 \mu\text{m}$). Dans les dépôts, la fraction des sédiments similaires à ceux transportés en suspension représente seulement 10% du total, ce qui force la distinction entre les sédiments fins transportés en suspension sans interaction avec le fond et les sédiments fins transportés en suspension à proximité du fond.

Les prélèvements de sédiments fins dans les dépôts sur le banc correspondent aux lieux identifiés précédemment dans la typologie. Comme pour les sédiments grossiers (cf. paragraphe 5.1.4), des ségrégations granulométriques latérale et longitudinale sont observées sur la répartition spatiale des dépôts : les sédiments sont plus fins en queue de banc que sur le reste du banc ; et les sédiments du

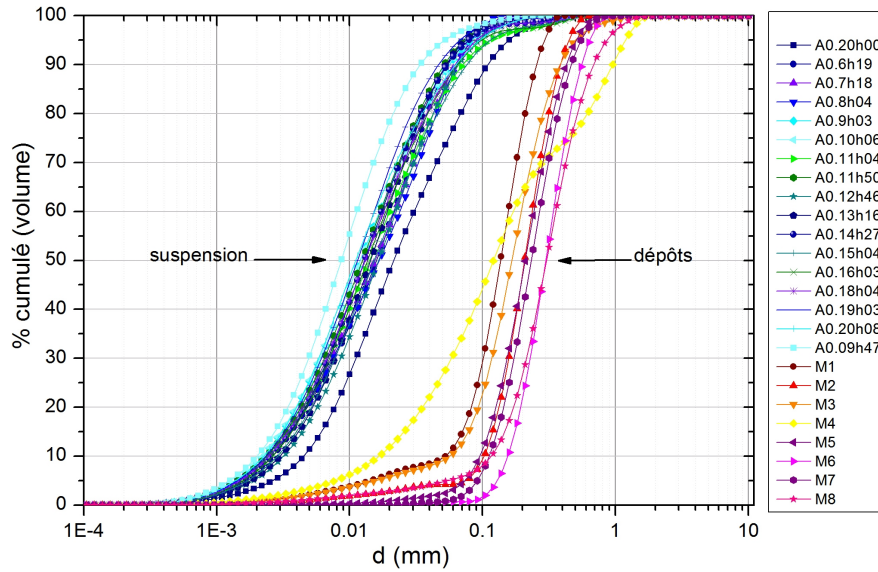


FIG. 5.13 – Granulométrie des sédiments fins en suspension et déposés sur le banc du site expérimental principal.

chenal secondaire sont bien plus fins que les autres dépôts.

5.1.6 Synthèse des observations sur le site principal pendant la chasse 2006

Evolution du banc de galets

A première vue, les photographies aériennes du banc de galets avant et après la chasse sont quasiment similaires. Les mêmes sous-unités morphologiques (tête et queue de banc, chenaux secondaire et de jonction...) sont identifiées avant et après l'événement. Cela suggère une certaine stabilité du banc face aux chasses hydrauliques pratiquées annuellement par EDF. Church et Jones (1982) attribuent cette stabilité apparente au fait que, en général, la majorité des sédiments des bancs est immobile. Leur conclusion est fondée sur l'observation suivante : une grande part du transport par charriage est concentrée dans le chenal d'écoulement principal sans affecter la migration des bancs. Dans notre cas d'étude, une analyse détaillée de la granulométrie de surface indique de nombreux changements, et la comparaison des deux états topographiques montre de grandes surfaces d'érosion et de dépôt sur le site expérimental, particulièrement dans la partie aval. Les sous-unités morphologiques du banc ont subi des modifications non négligeables : la tête de banc a été érodée comme les chenaux de jonction amont ; alors que des dépôts ont eu lieu sur la queue de banc et ont rempli les chenaux secondaires aval. Ces observations diffèrent de celles de Lisle *et al.* (1991), réalisées également en pente forte et avec une granulométrie de sédiments étendue. Ils ont observé que la présence de sédiments grossiers stoppait l'érosion de la tête de banc. Dans notre cas, bien que constituée de sédiments grossiers, la tête de banc est érodée comme le reste du banc. D'autre part, ces observa-

tions en site naturel renforcent l'idée de Jaeggi (1987) sur le transport des sédiments constitutifs des bancs : les sédiments sont érodés et transportés depuis la tête de banc, à travers les chenaux proches et déposés latéralement en queue de banc. D'autant plus qu'un élargissement latéral de la partie aval du banc est observé, confirmant l'idée classique de migration des bancs vers l'aval au cours du temps.

Rôle des chenaux de jonction

Une grande part des mesures a porté sur l'observation d'un chenal de jonction. C'est en effet un élément caractéristique du banc étudié. Les chenaux de jonction ont été fortement modifiés au cours de la chasse : le chenal de jonction amont reste au même endroit mais est érodé ; alors que les chenaux de jonction de la partie aval sont complètement modifiés ; un nouveau chenal est aussi apparu. Ces chenaux en travers du banc ont un rôle différent en fonction du débit.

A faible débit, les mesures de niveau indiquent une pente importante de la surface libre entre le chenal secondaire et le chenal principal. Des accélérations de l'écoulement sont observées dans le chenal de jonction grâce aux mesures LS-PIV. Les chenaux de jonction existants à la surface du banc sont donc des chemins préférentiels d'écoulement de l'eau en travers du banc. L'accélération de l'eau est susceptible d'éroder, non seulement les sédiments du fond, mais aussi ceux en bord de chenal, ce qui est bien visible sur l'évolution morphologique du banc.

A fort débit, du fait du recouvrement du banc par débordement du chenal secondaire, les chenaux de jonction ont une influence plus limitée sur l'écoulement.

Le mécanisme de division du banc dû au renforcement des chenaux transversaux est sûrement essentiel pour son évolution à long terme. L'initiation de tels chenaux à la surface des bancs de galets pourrait être un moyen pour favoriser les reprises de matériaux là où des nettoyages mécaniques du lit seraient nécessaires. Comme ce sont des zones très actives en terme d'érosion/dépôt, ces chenaux transversaux doivent être pris en compte dans les calculs de bilan sédimentaire pour les secteurs à bancs alternés.

Les chenaux de jonction observés peuvent aussi être associés à l'initiation de motifs de bancs diagonaux définis par Church et Jones (1982). Selon ces auteurs, les bancs diagonaux attachés aux berges sont plus stables que des bancs alternés, et, grâce à leur orientation oblique par rapport à la direction de l'écoulement, ils peuvent devenir des motifs permanents du lit de la rivière. L'estimation de la stabilité de ces formes à long terme dépasse le cadre de cette étude. Cela nécessiterait un suivi détaillé du site d'étude sur des périodes plus longues, ce qui permettrait d'observer des crues d'amplitude plus importante. Un modèle réduit sédimentologique pourrait éventuellement apporter des éléments de réponse.

Zones de dépôt des sédiments fins

Comme les sédiments grossiers transportés par charriage, les sédiments fins sont aussi canalisés par le chenal secondaire. Du fait de vitesses d'écoulement faibles à son extrémité aval, une grande quantité de sédiments fins est déposée dans cette zone. Même si la granulométrie d'une grande partie des sédiments déposés est plus grossière que celle des sédiments en suspension, la chasse contribue au dépôt des sédiments fins sur le banc de galets par un renouvellement des dépôts. La localisation des dépôts de sédiments fins est fortement liée aux motifs d'écoulement observés : les sédiments fins sont situés dans les zones de faible vitesse comme le sillage des végétaux ou dans les renforcements en bord de banc. La position de ces zones de dépôt semblent être dans l'ensemble variable à la surface du banc au cours du temps. Mais quelques zones de dépôt existent de façon permanente : dans le sillage des végétaux, à l'aval du chenal secondaire et en queue de banc.

L'estimation de la quantité de sédiments infiltrés dans le lit n'a pas été abordée dans cette étude. Des observations visuelles suggèrent que, même avant la chasse, les interstices des galets sur les premiers 50 cm du lit sont remplis de sédiments fins. Cette proportion de sédiments fins infiltrés reste-t-elle la même au cours de l'événement ? Quelle est la part des sédiments infiltrés dans un éventuel bilan des sédiments fins ? Ces questions nécessiteraient de nouvelles mesures sur le terrain potentiellement lourdes (par exemple des carottages cryogéniques).

Il s'agit maintenant d'examiner si, pendant la chasse 2006, l'évolution du banc de galets du site expérimental secondaire est similaire à l'évolution du banc de galets du site expérimental principal.

5.2 Observations sur le site secondaire pendant la chasse 2006

Le site secondaire a fait l'objet d'un suivi moins détaillé que le site principal pendant la chasse 2006. Le travail de terrain a été réalisé dans le cadre du stage de Master de Julien Hervé, et les données ont été pré-traitées et exploitées pour une modélisation numérique bidimensionnelle du transport solide dans la thèse de Matthieu de Linares (2007). Pour ce site, on dispose d'un jeu de données moins complet : des levés topographiques et des photos aériennes haute-résolution avant et après la chasse ; et d'un suivi limnimétrique à l'amont du site expérimental. L'hydrogramme et les concentrations sont raisonnablement estimés identiques à ceux mesurés à l'aval du site d'étude. On suppose en effet que les temps de transfert entre ces deux sites sont très faibles et que le flux sédimentaire est conservatif sur cette distance.

Ce banc en rive droite est plus simple et plus petit que celui du site principal. Un chenal secondaire

est à peine marqué en rive droite, et aucun chenal de jonction n'existe à la surface du banc.

L'absence de données hydrométriques détaillées empêche de mener une étude expérimentale approfondie de la dynamique de l'écoulement. En revanche les données morphologiques (topographie et granulométrie) permettent d'évaluer les traits d'évolution communs avec le site principal.

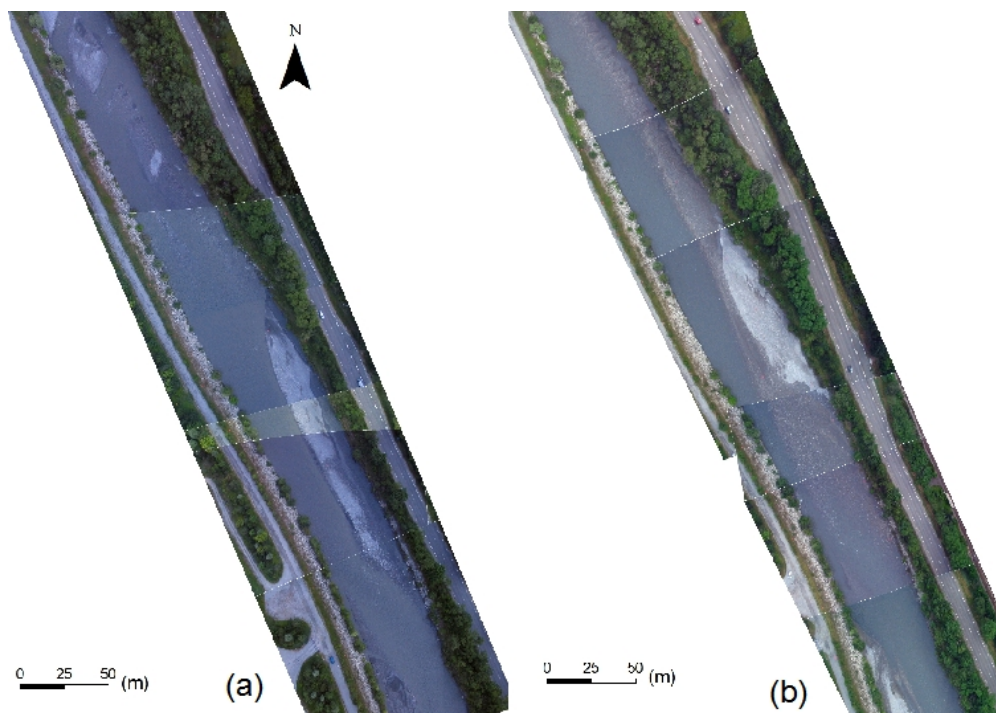


FIG. 5.14 – Photographies aériennes du site expérimental secondaire avant (a) et après (b) la chasse 2006. Les photos ont été prises le 8-06-2006 ($10 \text{ m}^3/\text{s}$) et le 5-07-2006 ($6 \text{ m}^3/\text{s}$). L'écoulement se fait vers le Nord

5.2.1 Modifications topographiques

D'un point de vue qualitatif, et malgré des débits différents, les photos aériennes du site (FIG 5.14) indiquent une progression nette du banc de galets vers l'aval. La tête de banc a avancé de 50 m environ vers l'aval. Les photographies suggèrent aussi un élargissement du banc. Une analyse quantitative de ces évolutions est obtenue par comparaison des MNT des deux états avant et après la chasse.

Les MNT (FIG 5.15) ont été générés à partir des maillages de calculs de Matthieu de Linares (2007), l'interpolation étant différente de celle utilisée dans ce travail de thèse (cf. paragraphe 3.1.2). Elle est effectuée suivant des lignes de contour reliant de façon réaliste les points mesurés. Le maillage de l'état initial a été extrapolé vers l'aval à partir des données de l'état final. Ces données, fournies par Matthieu de Linares (2007), sont ensuite interpolées sur une grille régulière (pas 0.5 m) pour permettre la comparaison des deux états avant/après. La comparaison se limite bien entendu à la zone de données communes matérialisée par un cadre rouge (FIG 5.15). Aucune estimation de l'incertitude

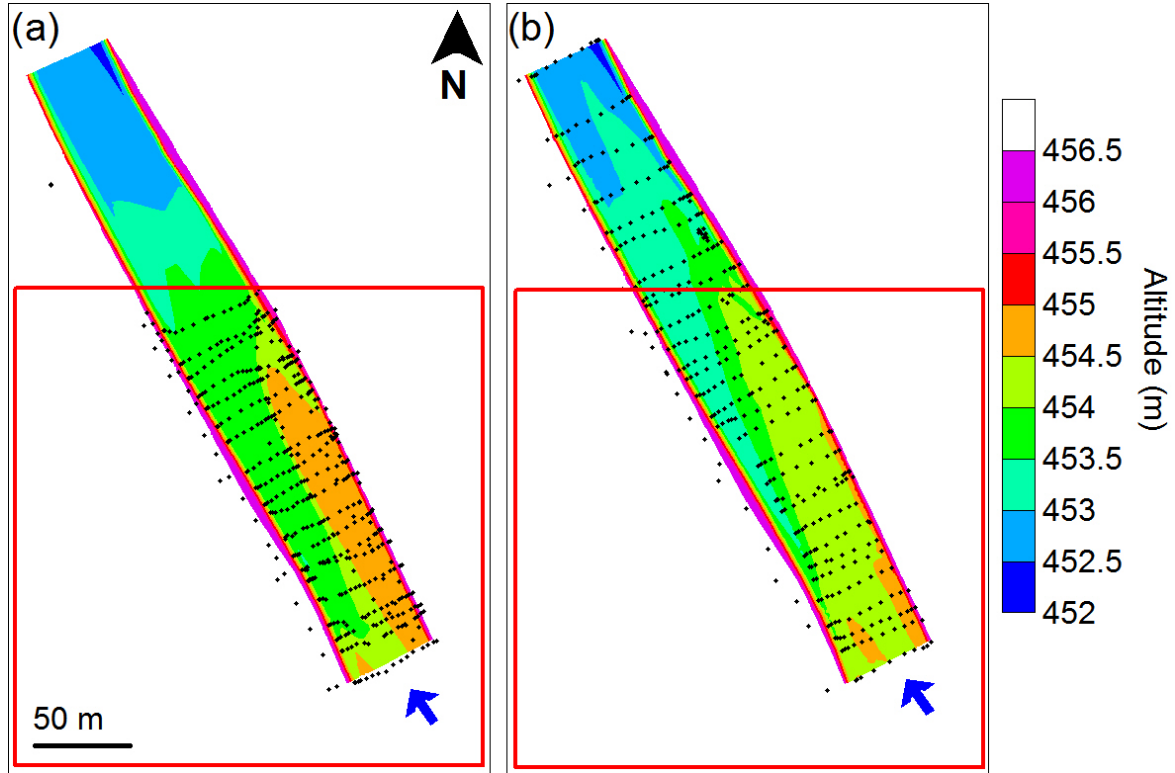


FIG. 5.15 – Topographie du site expérimental secondaire avant (bam1, a) et après (bam2, b) la chasse 2006. La zone rouge correspond à la zone dans laquelle les MNT sont comparables.

sur l'altitude n'a été faite suivant la méthode développée dans ce travail (cf. paragraphe 3.1.3). En effet, la méthode d'estimation de l'incertitude n'est plus adaptée à la méthode d'interpolation des altitudes. La topographie étant simple, le semis de point mesuré dense et homogène, on supposera que, par comparaison avec les estimations des MNT du site principal (annexe B), l'incertitude sur l'altitude des points interpolés est faible.

La différence des deux MNT avant et après la chasse donne les valeurs des érosions et dépôts sous la forme d'une carte de différence d'altitude et d'un calcul des volumes érodé et déposé (FIG 5.16). Quasiment tout le site est affecté par des modifications topographiques d'amplitude supérieures à 10 cm : 24% de la surface subit des dépôts, alors que 43% est érodé. La hauteur moyenne de sédiments déposés est de l'ordre de 22 cm et la hauteur moyenne d'érosion de l'ordre de 23 cm. Les motifs d'évolution sédimentaires sont simples. Il y a une érosion très nette de la tête de banc avec un dépôt sur le bord du banc et en queue de banc. Ce dépôt est supérieur à 1 m dans la zone amont du bord du banc. Une érosion de la partie aval du chenal d'écoulement principal est aussi identifiable, elle dépasse localement 1 m à proximité de la berge. Ces résultats rendent compte d'un élargissement et d'une progression du banc vers l'aval.

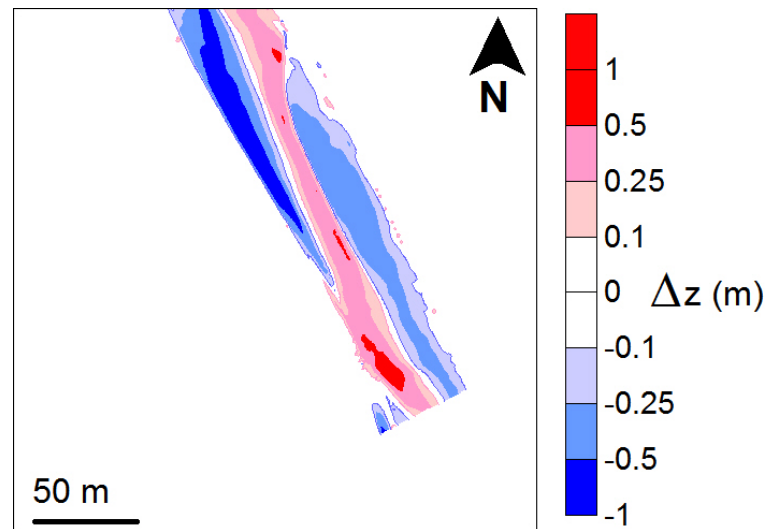


FIG. 5.16 – Evolution topographique du site expérimental secondaire pendant la chasse 2006. Différence des MNT avant et après la chasse 2006 : bam2-bam1 (FIG. 5.15).

5.2.2 Modifications de la granulométrie de surface

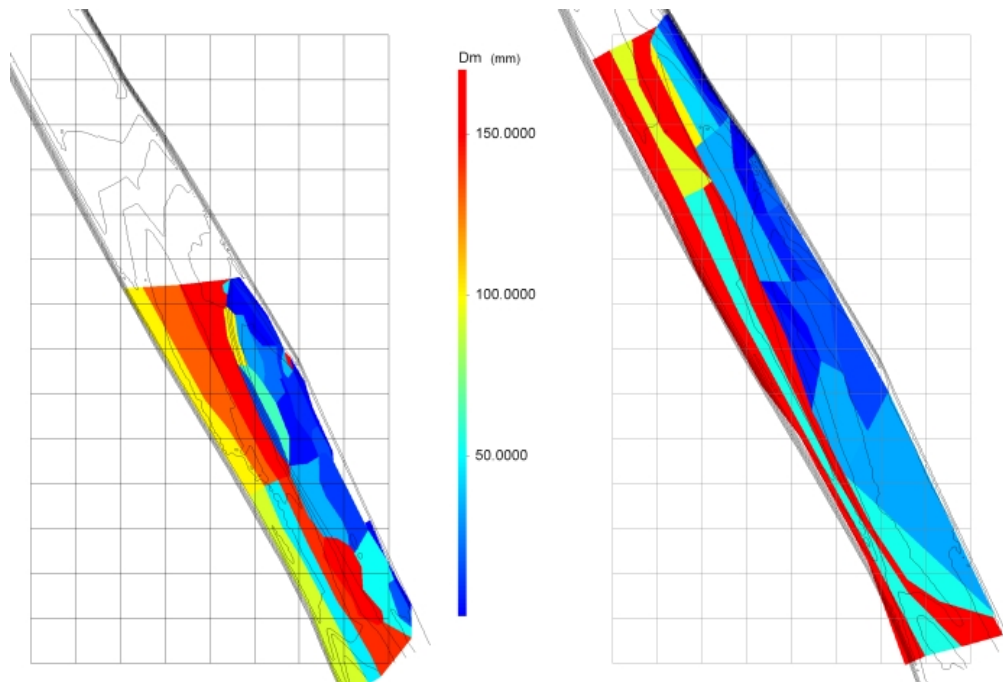


FIG. 5.17 – Granulométrie du site expérimental secondaire avant (a) et après (b) la chasse 2006. D'après de Linares (2007).

La granulométrie de ce banc de galets (FIG 5.17) garde la même répartition spatiale avant et après la chasse. Des sédiments plus grossiers composent le chenal d'écoulement en rive gauche. Sur le banc, les sédiments les plus fins sont situés à l'aval et à proximité de la rive droite, une zone de

sédiments plus grossiers occupe la tête de banc. Dans les deux cas, une zone de sédiments grossiers est aussi présente sur le bord de la queue de banc. Mis à part ce dernier point, les ségrégations latérale et longitudinale des sédiments grossiers sont observées sur le banc comme sur le site principal. L'évolution granulométrique du secteur est fortement liée à l'emprise spatiale du banc de galets, le banc étant composé de sédiments moins grossiers que ceux du chenal d'écoulement principal.

Faute de temps pour identifier quantitativement et automatiquement les zones de dépôt de sédiments fins sur ce site par analyse d'image, l'analyse reste qualitative. Dans les deux cas, des zones de dépôt des sédiments fins en queue de banc et à proximité de la rive droite sont visibles, des dépôts sont également présents en surface du banc. La granulométrie des dépôts (non présentée) est similaire à celle des dépôts du site principal.

5.2.3 Synthèse des observations sur les deux sites

Du fait de sa forme simple, l'évolution morphologique du site secondaire est basique : un élargissement et une progression du banc sont observés avec un creusement de l'aval du chenal d'écoulement principal. La granulométrie de surface des sédiments grossiers évolue en conséquence : la zone de sédiments grossiers du chenal est réduite. Sur cette chasse hydraulique et pour les deux sites expérimentaux, une érosion de la tête de banc, un dépôt en queue de banc et une érosion du chenal d'écoulement principal dans sa partie aval sont observés. Le bilan sédimentaire global sur les deux sites est négatif : l'érosion prédomine. Les débits générés par la chasse hydraulique semblent donc avoir mobilisé une grande partie des sédiments fins et grossiers, présents à la fois dans le chenal d'écoulement principal (talweg), mais aussi au sommet des bancs. Une progression des bancs vers l'aval entre quelques mètres et quelques dizaines de mètres est mesurée. Cette migration vers l'aval est moins forte pour le banc aval probablement du fait de l'influence des chenaux de jonction ou du pont aval. La localisation des dépôts de sédiments fins est fortement influencée par la topographie, les dépôts sont observés dans les zones de vitesse faible. Un renouvellement a eu lieu au cours de la chasse.

5.3 Transfert de MES et évolutions topographiques sur les chasses 2005 et 2007 : des tendances similaires ?

Le site expérimental principal a fait l'objet d'un suivi événementiel pour les chasses 2005 et 2007. L'objectif des paragraphes suivants est d'établir les ressemblances et différences d'évolution du site au cours des trois événements hydrologiques artificiels. Le suivi 2005 est largement moins riche que celui des autres années, et comprend : un suivi limnimétrique et des mesures de concentration à l'aval du site d'étude (point L0-A0) et quelques mesures topographiques sur des sections en travers.

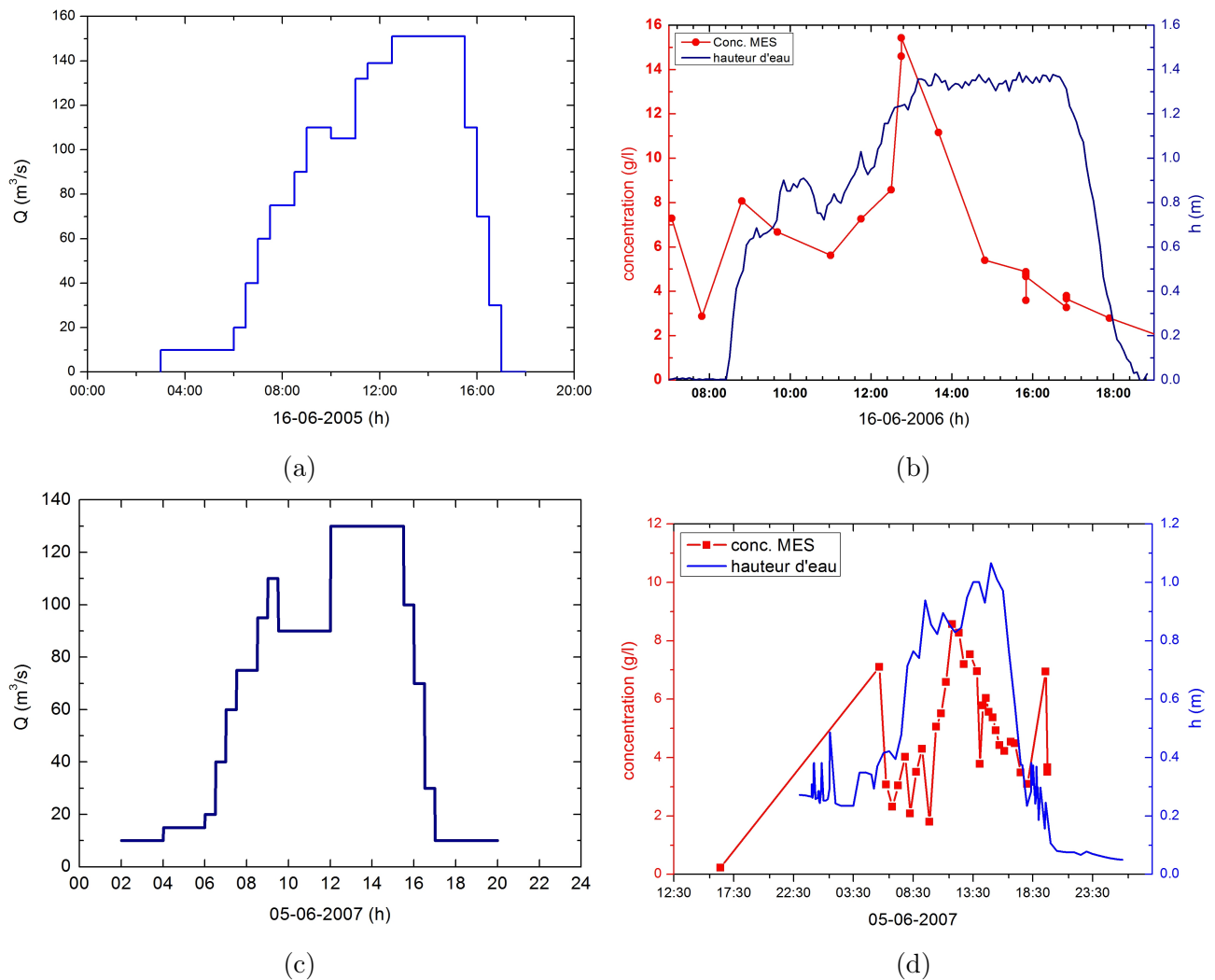


FIG. 5.18 – Données hydrométriques pour les chasses 2005 et 2007. Hydrogrammes de projet au barrage de Saint-Martin-la-Porte (donnée EDF) (a) et (c). Concentration en MES et mesure de la hauteur d'eau au site d'étude : en 2005 au niveau du banc (b) et en 2007 au point L0 (d) mesure de la hauteur d'eau.

En 2007 : le banc a fait l'objet d'un suivi topographique avant et après la chasse ; le suivi du transfert des MES a été intensifié, des prélèvements ont été effectués en neuf points le long de l'Arc.

Les résultats sur la chasse 2005 ont fait l'objet d'un article pour la conférence River Flow 2006 (Jodeau et Paquier, 2006).

5.3.1 Hydrogrammes et signaux de MES

Les hydrogrammes de projet des chasses 2005 et 2007 (FIG 5.18 a et c) sont similaires à celui de l'année 2006. Toutes les phases identifiées sur l'hydrogramme 2006 sont toujours présentes : vague d'alerte, augmentation jusqu'au passage en torrentiel dans la retenue, premier palier de débit, deuxième augmentation associée au soutien par les centrales d'altitude, palier de débit, et diminution

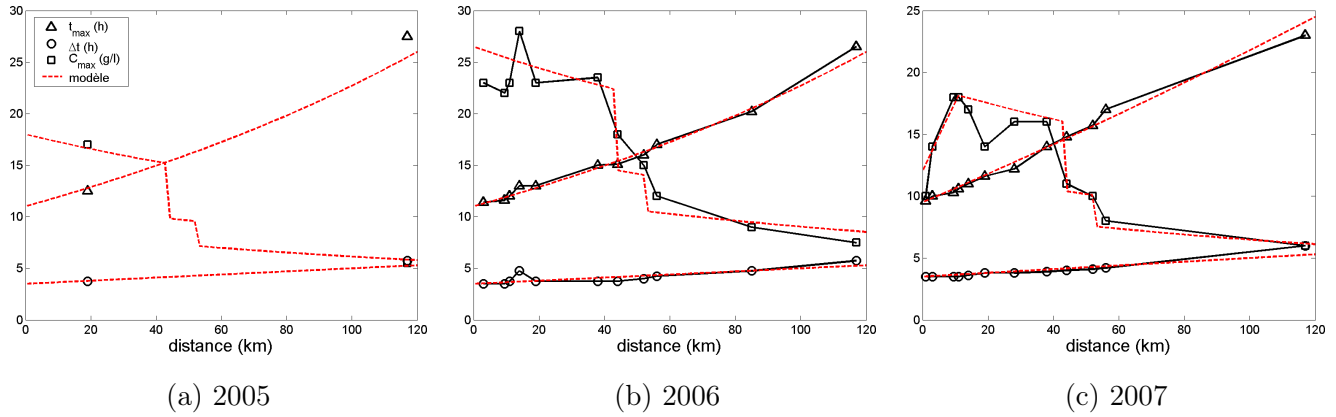


FIG. 5.19 – Modèle de transfert des MES pour les trois chasses, données expérimentales (symboles et trait pleins) et modèle de transfert (traits pointillés). L'origine des abscisses se situe au barrage de Saint-Martin-la-Porte.

rapide vers le débit réservé. Des différences sur les débits de pointe existent cependant ($150 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2005, $130 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2006 et 2007).

Dans les trois cas (FIG 5.18 b et d et FIG 5.1 b), une première augmentation de la concentration en MES, de l'ordre de $7\text{-}8 \text{ g/l}$, a lieu en début d'événement. Cette augmentation peut être associée, comme en 2006, avec la vague d'alerte et une reprise des sédiments déposés dans le lit. Au cours de la chasse 2005, l'évolution de la concentration en MES au site d'étude est très similaire à celle de la chasse 2006 : un palier est atteint avec le passage en torrentiel dans la retenue ; le maximum de MES, d'amplitude moindre (15 g/l contre 25 g/l en 2006) coïncide avec le début du palier maximum de débit.

Le signal pour la chasse de 2007 diffère de ceux des années précédentes : la concentration maximale ne dépasse pas 10 g/l ; le maximum coïncide avec le premier palier de débit associé au passage en torrentiel dans la retenue ; la chasse étant suivie d'une petite augmentation de débit vers 19h, un troisième pic de MES est mesuré. Il pourrait s'agir d'une déversée d'eau claire post-chasse remobilisant des sédiments fins déposés au cours de la chasse. L'augmentation de fréquence de mesure en 2007 fait apparaître des variations du signal qui n'étaient pas observables à partir des mesures des années précédentes. La chasse 2007 ne semble pas avoir le même effet que les autres chasses : la phase d'érosion maximale dans la retenue n'a pas lieu au même moment.

Si le signal de MES 2005 vient confirmer les hypothèses avancées dans le paragraphe 5.1.1 pour la chasse 2006, l'analyse du signal au niveau du site en 2007 amène d'autres questions qui ne peuvent être examinées qu'à la lumière de l'analyse des mesures faites sur l'ensemble de la rivière.

Les vitesses de transfert des MES et la diffusion sont du même ordre de grandeur sur les trois événements de chasse (FIG 5.19). Il n'en va pas de même pour l'intensité du maximum de concentration et son transfert dans le cours d'eau.

Dans le cas de la chasse 2007, une augmentation de la concentration maximale en MES est mesurée sur les 11 premiers kilomètres à l'aval de la retenue de Saint-Martin-la-Porte (FIG 5.19 c). Comme pour la vague d'alerte, cette augmentation de la concentration pourrait être due à une reprise des sédiments déposés dans le lit de la rivière, mais dans ce cas stoppée au bout de 11 km. Or, le bassin de Longefan se situe environ à 11 km à l'aval de la retenue de Saint-Martin-la-Porte. Ce bassin sert d'arrivée aux débits turbinés à la centrale d'Hermillon depuis la retenue de Saint-Martin-la-Porte, il sert aussi de prise d'eau pour la dérivation Arc-Isère vers le bassin du Flumet et l'usine du Cheylas. L'entrée maximale dans ce bassin est calibrée à $90 \text{ m}^3/\text{s}$ et la sortie maximale à $70 \text{ m}^3/\text{s}$, il arrive donc qu'un débit excédentaire ($20 \text{ m}^3/\text{s}$) soit déversé dans l'Arc (cf. Annexe A). Cette eau peut raisonnablement être supposée peu chargée en MES du fait de la décantation dans le bassin. Il est fort possible que, au cours de l'année, ces débits en sortie du bassin nettoient régulièrement le lit de l'Arc à l'aval de la restitution, ce qui expliquerait l'arrêt de l'augmentation de concentration en MES à partir de ce point, le lit contenant moins de dépôts de sédiments fins. Cette reprise est due à des débits plus forts, et concerne donc probablement des dépôts plus élevés dans le lit et des sédiments du fond remobilisés grâce à une contrainte au fond plus forte. Cette remobilisation des sédiments à l'aval de la retenue n'est pas observée en 2006. Les dépôts de sédiments fins dans les zones élevées du lit sont peut-être moins importants dans le lit en 2006 qu'en 2007, du fait de l'absence de crue dans l'année passée.

La concentration maximale suit ensuite la même évolution le long du cours d'eau que les autres années : elle est principalement modifiée par les dilutions dues aux apports latéraux.

Les faibles valeurs des concentrations atteintes pendant la chasse 2007 sont probablement dues à l'effet de la crue naturelle de l'automne 2006. Cette crue a sûrement eu les mêmes conséquences dans la retenue qu'une chasse artificielle. Les vannes de la retenue ayant été complètement ouvertes pendant l'événement, l'écoulement a pu éroder les sédiments déposés depuis la dernière chasse.

5.3.2 Modifications topographiques

Le suivi topographique du site expérimental principal pendant la chasse 2005 est très léger : avant l'événement, des sections en travers quasi-complètes ont été levées dans l'alignement des repères fixes ; après la chasse, seulement l'altitude au pied des repères fixes a été levée. Il s'agit donc d'une information très ponctuelle. Néanmoins, les variations d'altitude (TAB 5.1) indiquent une tendance globale du site à l'érosion. Seul le point 4, situé en bordure de banc, indique un dépôt. Ces observations, limitées, laissent penser que la chasse 2005 a érodé le site expérimental principal.

n° du repère	Localisation sur le banc	$\Delta_{altitude}$ (cm)	
1	tête de banc g.	-12.3	Érosion
2	tête de banc m.	-20.7	Érosion
3	tête de banc d.	-1.6	–
4	milieu banc d.	18.8	Dépôt
5	milieu banc m.	-6.1	Érosion
6	milieu banc g.	-16.4	Érosion
7	milieu banc m.	-14.2	Érosion
8	amont queue de banc	0.1	–
9	queue de banc	-8.8	Érosion
10	milieu section aval du banc	-42.6	Érosion

TAB. 5.1 – Récapitulatif des observations sur les repères fixes (fers à béton) pour la chasse 2005.

Les MNT du site principal avant (bav8) et après (bav9) la chasse 2007 sont donnés en annexe B. La carte de la différence (bav9-bav8) fait apparaître les zones d'érosion et de dépôt (FIG 5.20 a). La carte associée d'incertitude sur l'interpolation de l'altitude (FIG 5.20 b) indique que l'amont, la partie intermédiaire du chenal d'écoulement principal et la proximité des berges doivent être traités avec vigilance. L'évolution morphologique du site n'indique ni une érosion, ni un dépôt global sur le site. Un calcul des volumes érodé et déposé montre que moins de la moitié de la surface du site voit son altitude changer de plus de 10 cm au cours de cette chasse 2007. L'érosion est légèrement prédominante. Sur l'ensemble du site, 12% et 16% seulement de la surface totale sont touchées respectivement par un dépôt ou une érosion significatifs. Sur les zones modifiées, les hauteurs moyennes de dépôt et d'érosion sont respectivement de 13 et 14 cm. Au cours de cet événement, les zones de chenaux de jonction sont marquées par des modifications d'altitude. Le chenal de jonction amont présente des zones de dépôt et d'érosion supérieures à 50 cm mais de faible étendue spatiale, le chenal est exhausé dans sa partie amont, érodé sur les bords et des dépôts sont observés à l'aval. Le chenal de jonction plus à l'aval est aussi modifié par des érosions et des dépôts de sédiments. La queue de banc est stable, une érosion du bord du banc dans cette zone est cependant bien visible. Sur la tête de banc, une zone d'érosion succède à une zone de dépôt dans la partie la plus à l'amont du banc. Le chenal secondaire est relativement stable. Dans le chenal d'écoulement principal, quelques zones d'érosion sont relevées à l'aval, alors qu'un dépôt occupe la partie amont du chenal. Le bord du banc est affecté d'une érosion dans sa partie aval, mais, en revanche, des dépôts ont eu lieu dans la partie intermédiaire du bord du banc.

L'ensemble de ces observations dénote un rétrécissement du banc dans sa partie aval, des modifications de position des chenaux de jonction et un élargissement du banc dans sa partie intermédiaire ainsi qu'à l'amont.

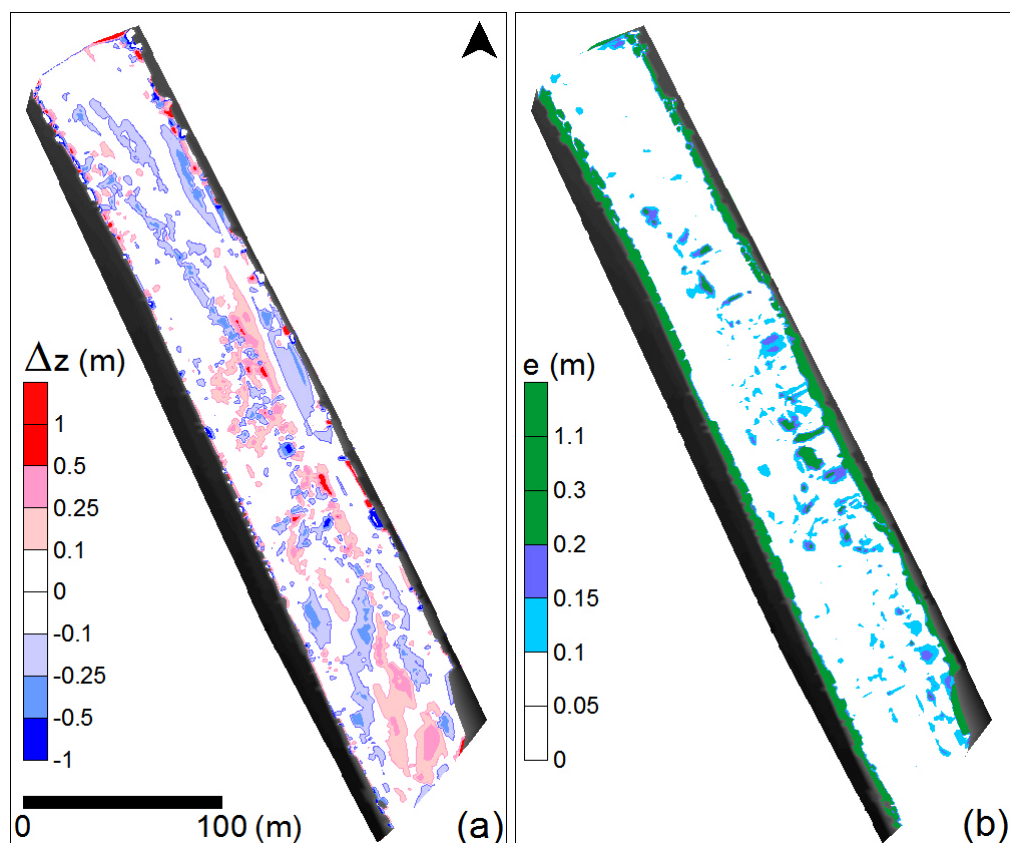


FIG. 5.20 – Evolution topographique au cours de la chasse 2007. (a) Différence des MNT bav9-bav8 et (b) carte d'incertitude associée.

5.4 Synthèse des observations pendant les chasses hydrauliques

Les conclusions tirées du suivi des trois chasses dépendent des données, de quantité très inégale, acquises au cours des événements. Des ressemblances et des différences ont été constatées sur le transfert des MES dans le cours d'eau mais aussi sur l'évolution morphologique du banc de galets du site principal.

Transfert des MES

Les concentrations de MES mesurées à l'aval des retenues engendrent un signal très caractéristique, fonction de la procédure de chasse. Des sédiments fins déposés dans le lit sont dans un premier temps remobilisés par les débits de la vague d'alerte, ensuite la majorité des MES semble provenir de la retenue. L'érosion dans la retenue est maximale après le passage en régime torrentiel dans la retenue. En 2005 et 2006, l'érosion est maximale précisément quand le débit est augmenté grâce aux apports d'altitude. En revanche en 2007, l'érosion est maximale avant cette augmentation de débit et inférieure aux concentrations rencontrées les années précédentes. Un modèle simple permet de

		volume (m ³)	surface (m ²)	% de surface totale	hauteur moy. (m)	Ω (m)
Ch. 2006	SITE PRINCIPAL					
	dépôt > 10 cm	+219	1558	5	+0.14	-0.07
	érosion > 10 cm	-2338	14017	47	-0.17	
	SITE SECONDAIRE					
	dépôt > 10 cm	+648	2968	24	+0.22	-0.05
	érosion > 10 cm	-1242	5311	43	-0.23	
Ch. 2007	SITE PRINCIPAL					
	dépôt > 10 cm	+456	3550	12	+0.13	-0.01
	érosion > 10 cm	-663	4692	16	-0.14	

TAB. 5.2 – Bilans sédimentaires sur les sites expérimentaux principal et secondaire pour les chasses hydrauliques 2006 et 2007. Les volumes et surfaces ont été calculés avec le logiciel SURFER. L'indice de bilan sédimentaire Ω est défini à partir des volumes $V_{\pm}$ érodés et déposés et de la surface totale du site S :

$$\Omega = \frac{V_+ + V_-}{S}$$

rendre compte du transfert des MES. En 2005 et 2006, le maximum de MES se conserve ; en 2007, les concentrations maximales augmentent jusqu'au bassin de Longefan, probablement par reprise de sédiments déposés dans le lit de l'Arc. La vitesse de propagation est approximativement constante et la diffusion est faible et constante sur toutes les chasses observées. En fin de chasse, une reprise des sédiments déposés pendant la chasse peut se produire comme en 2007. Les événements ayant lieu entre deux chasses sont importants, par exemple, la crue de l'automne 2006, ayant érodé de façon significative les sédiments dans la retenue, peut expliquer les faibles concentrations mesurées pendant la chasse 2007.

Modifications morphologiques

Tous les bilans sédimentaires effectués au cours des trois chasses hydrauliques sur les deux sites expérimentaux indiquent une tendance, plus ou moins prononcée, à l'érosion des bancs de galets (TAB 5.2). Mis à part des modifications affectant toujours les chenaux secondaires, les modifications morphologiques sont différentes d'une chasse à l'autre. Les chasses 2006 et 2007 seulement ont permis des études détaillées des évolutions morphologiques. La chasse 2006 a entraîné une érosion du site expérimental principal accompagnée d'une légère progression du banc principal vers l'aval. Une progression plus significative a été observée pour le banc de galets du site secondaire. En revanche, pendant la chasse 2007, la partie amont du banc a été renforcée et la queue du banc érodée, ce qui pourrait correspondre à une remontée du banc vers l'amont. Comment deux hydrogrammes identiques peuvent-ils conduire à des conséquences presque opposées ? Des éléments de réponse pour-

raient être apportés par la connaissance de l'apport solide grossier à l'amont du site d'étude au cours de la chasse. Du fait des événements hydrologiques de l'année précédente, notamment la crue de l'automne 2006, la topographie et surtout la granulométrie de surface du banc au début de la chasse 2007 ne sont vraisemblablement pas identiques à l'état initial du banc avant la chasse 2006, ce qui pourrait expliquer des évolutions distinctes. La crue de l'automne 2006, par un apport probable en sédiments grossiers dans toute la rivière, a pu favoriser la disponibilité des matériaux grossiers et aurait ainsi influencé l'évolution morphologique du banc pendant la chasse 2007.

Motifs d'écoulement

Les observations sur la dynamique des écoulements ont été effectuées uniquement sur le site expérimental principal et pendant la chasse 2006. Elles ont été limitées à la zone directement à l'aval du banc de galets et à une zone de chenal de jonction. Ces observations sont cependant extrapolables à d'autres événements de débits équivalents et à d'autres bancs de galets ayant des configurations identiques. L'influence limitée du banc sur l'écoulement à l'aval de ce dernier a été constatée. Le rôle des chenaux secondaires sur l'écoulement dépend du débit. A faible débit, le banc agit en obstacle entre le chenal secondaire et le chenal d'écoulement principal, l'écoulement est concentré dans le chenal de jonction. A fort débit, l'effet d'obstacle est diminué, l'eau s'écoule aussi directement sur le banc.

Dépôts de sédiments fins

Du fait d'une granulométrie grossière, les sédiments fins déposés sur les bancs de galets au cours de la chasse transitent en suspension à proximité du fond. Sur la base des observations, une typologie des dépôts de sédiments fins à la surface du banc a été développée. Les surfaces des dépôts sont généralement des zones à vitesse d'écoulement faible : en bordure de banc, dans le chenal secondaire, en fine couche à la surface, dans le sillage d'obstacles. Quelques zones de dépôts existent de façon permanente (sillage des végétaux, chenal secondaire et queue de banc), mais les surfaces des dépôts sont modifiées au cours d'une chasse.

6

Effets d'une crue naturelle, évolutions inter-événementielles et annuelles

L'évolution du site expérimental principal est examinée sur un événement naturel, la crue de l'automne 2006, sur les périodes inter-événements et au cours des années 2006 et 2007. La crue engendre des dépôts très importants sur le site, ses effets en terme d'évolution morphologique semblent opposés à ceux d'une chasse. Durant les périodes inter-événements, même si les débits restent faibles, des modifications du banc sont également observées.

6.1 Observations sur la crue de l'automne 2006

6.1.1 Hydrogramme et apport en sédiments

L'hydrogramme de la crue de l'automne 2006 (FIG 6.1) est proche de celui d'une chasse : les débits atteints sont du même ordre de grandeur ($Q_{max} = 160 \text{ m}^3/\text{s}$), les phases de crue et décrue sont très rapides. La durée de l'événement est plus longue (40h contre 12h). Le débit maximal est atteint très rapidement, en seulement une heure ; il reste supérieur à $120 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 4h ; et se maintient ensuite au-dessus de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 25h30 ; la décrue est aussi très rapide, le débit chutant de 70 à $10 \text{ m}^3/\text{s}$ en 3h30. Sur cet événement, l'apport de sédiments grossiers et fins est inconnu. Les retenues sont passées en mode transparent pendant la crue ; on peut donc supposer que les érosions de sédiments fins dans les retenues sont similaires, voire supérieures, à celles d'une chasse artificielle. Les concentrations mesurées par le LTHE sur l'Isère à Grenoble le 16 septembre 2006 suite à la crue (FIG 6.1 b) sont en effet supérieures à celles mesurées pour les chasses 2005 et 2006, les valeurs maximales des trois événements sont respectivement 14, 7 et 9 g/l. Les concentrations en MES à Grenoble résultent de l'apport de l'Arc mais aussi de l'Isère à l'amont de la confluence et des autres affluents. Ces mesures élevées confirment néanmoins que les concentrations en MES sur l'Arc doivent être sensiblement équivalentes à celles d'une chasse, voire plus élevées. Concernant les sédiments grossiers, l'apport est probablement différent de celui d'une chasse, car les bassins versants torrentiels (Valloirette, Arvan...) ont été affectés par les pluies importantes. L'apport en sédiments grossiers au cours de cette crue naturelle est supposé plus important que celui d'une chasse.

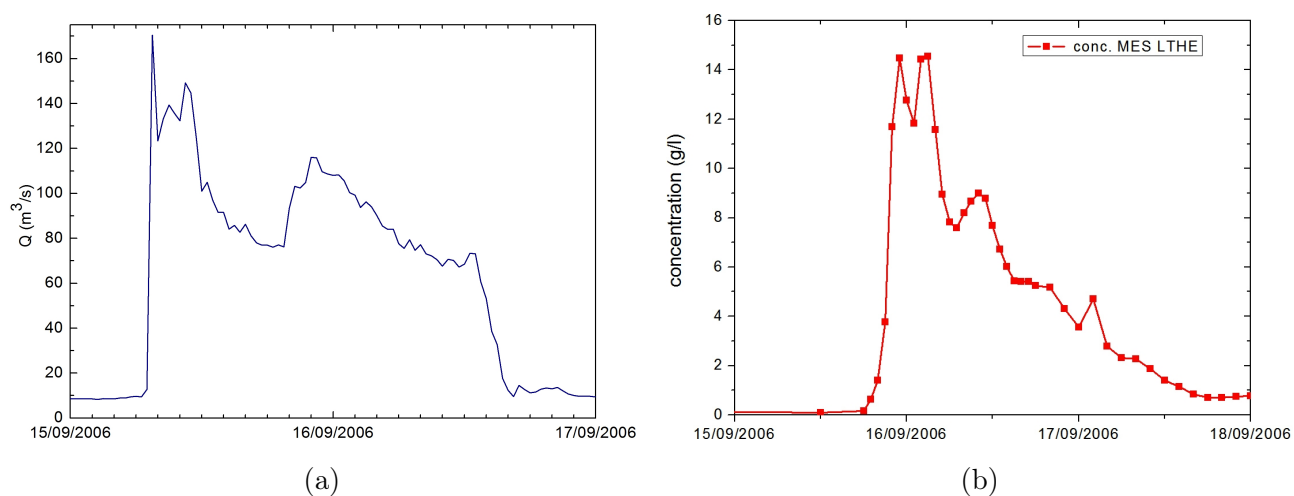


FIG. 6.1 – (a) Hydrogramme de la crue naturelle de l'automne 2006 (15 et 16 septembre 2006) estimé au site d'étude grâce au limnimètre installé en permanence (cf. paragraphe 4.1). (b) Concentration en MES mesurée sur l'Isère à Grenoble par le LTHE.

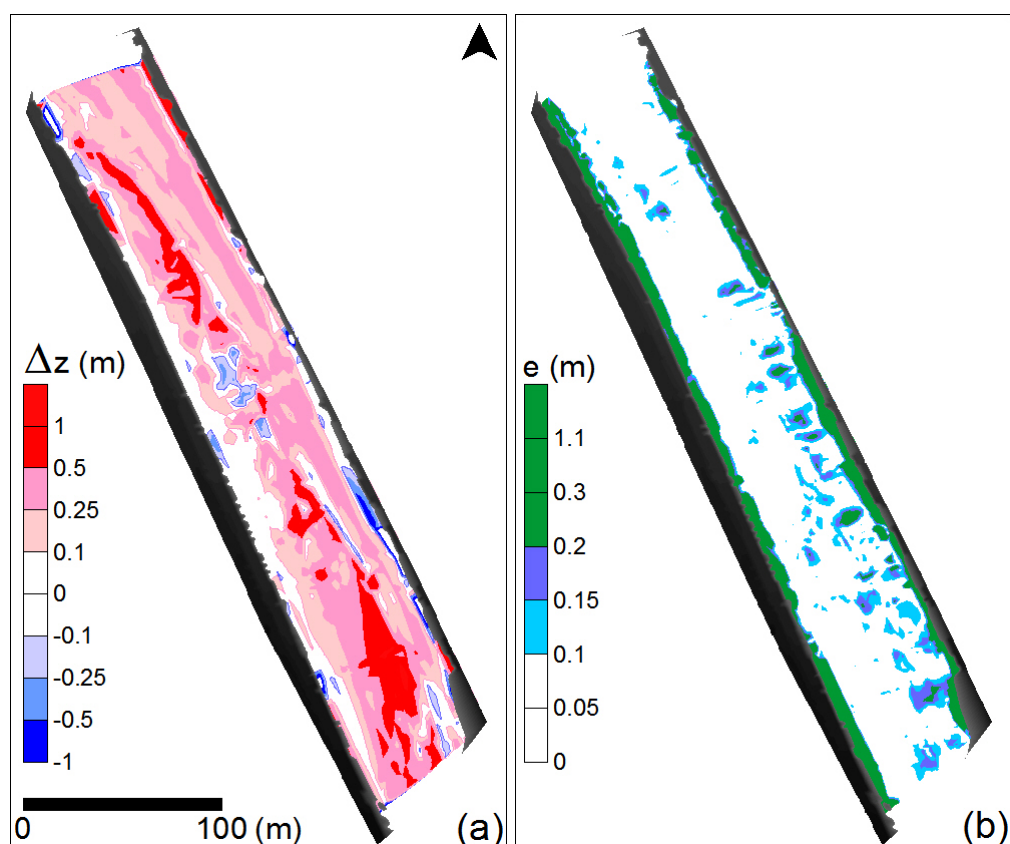


FIG. 6.2 – Evolution topographique du site expérimental principal au cours de la crue naturelle 2006. (a) Carte de différence des MNT (bav7-bav6) et (b) carte d'incertitude associée.

6.1.2 Modifications morphologiques

Comme pour les autres événements, les modifications du lit de la rivière sur le site expérimental principal sont étudiées. La différence des MNT des états avant (bav6) et après (bav7) donne les zones de dépôt et d'érosion (FIG 6.2 a). La carte d'incertitude sur l'interpolation des altitudes (FIG 6.2 b) doit être étudiée conjointement : les zones intermédiaires et amont du chenal d'écoulement doivent être analysées avec précaution.

Le dépôt prédomine très nettement sur ce site. En effet, 56% de la surface a subi un dépôt de sédiments grossiers supérieur à 10 cm, correspondant à un volume déposé de l'ordre de 3960 m³, soit une hauteur moyenne de dépôt de 23 cm ; seulement 4% de la surface a été érodée, soit un volume érodé de l'ordre 390 m³ et une hauteur moyenne d'érosion de 35 cm. Des zones étendues ont des dépôts supérieurs à 0.5 m en tête de banc, en queue de banc ainsi qu'à l'aval du chenal de jonction amont. La zone la moins affectée par les changements est la proximité de la rive gauche, et donc en particulier le chenal secondaire. La zone du chenal de jonction aval est une des seules zones du banc à avoir été érodée.

Cette évolution diffère complètement de celles observées pendant les chasses. Il aurait été évidemment intéressant de compléter ces observations par des mesures sur d'autres bancs de galets, notamment sur le site secondaire, pour savoir si ce dépôt est généralisé à tout ce secteur de la rivière.

6.2 Evolutions inter-événementielles

Les données topographiques acquises avant et après chaque événement sont exploitées pour examiner les évolutions inter-événementielles du site expérimental principal. Entre les chasses 2005 et 2006, grâce à une campagne topographique intermédiaire, la période peut être découpée en deux intervalles : un premier rassemblant l'automne et l'hiver 2005-2006 (I1 du 01-09-2005 au 29-03-2006) ; un deuxième correspondant au printemps 2006 (I2 du 29-03-2006 au 08-06-2006). On notera I1-2, l'ensemble de la période automne-hiver-printemps 2005-2006. L'intervalle de temps entre la crue de l'automne 2006 et la chasse 2007 (du 05-10-2006 au 01-06-2007) est noté I3, groupant la fin de l'automne, l'hiver et le début du printemps 2006-2007. Sur ces trois périodes, le débit ne dépasse jamais 50 m³/s (FIG 4.13), ses variations sont particulièrement faibles pendant l'automne et l'hiver, et augmentent au printemps avec la fonte des neiges.

Même avec des débits maximaux faibles, des évolutions morphologiques du site expérimental principal ont eu lieu dans ces intervalles inter-événementiels. Les différences des MNT sont cartographiées sur les figures FIG 6.4 à FIG 6.7 (a). Les cartes d'incertitudes associées (FIG 6.4 à FIG 6.7 b) montrent surtout que, sur les périodes I1 et I2, la zone du chenal d'écoulement principal ne peut pas être étudiée du fait des incertitudes. Un débit de 12 m³/s a empêché le levé de points dans cette

zone pour la campagne bav4. Pour toutes les campagnes, la zone à proximité des berges doit être traitée avec précaution.

Sur les intervalles de temps I1 et I2, la tête et la queue du banc de galets ne sont quasiment pas modifiées. A la surface du banc, les zones de chenaux de jonction sont par contre affectées par des érosions et des dépôts. Pendant I1, le chenal de jonction amont est érodé, des zones d'érosion sont visibles dans la partie intermédiaire, sur le bord, du banc et le chenal de jonction aval est érodé.

L'érosion du chenal de jonction amont est renforcée au cours de la période I2 (FIG 6.5), un élargissement du chenal est bien visible sur les photos aériennes (FIG 6.3 b). En revanche, la zone des chenaux de jonction aval est modifiée à cause de dépôts : la partie du milieu du double chenal de jonction aval est comblée, impliquant la formation de deux chenaux distincts (FIG 6.3 a). Une zone de dépôts est également marquée à l'aval du chenal secondaire expliquant la formation d'un chenal de jonction intermédiaire (FIG 6.3 a).

La somme des cartes FIG 6.4 et FIG 6.5 (a) donne l'évolution sur la période I1-2 (FIG 6.6 a). L'érosion du chenal de jonction amont est marquée comme la formation des deux chenaux de jonction à l'aval. Un dépôt affecte la tête de banc, résultant de dépôts successifs inférieurs à 10 cm et invisibles sur les deux cartes précédentes. Le bord de la queue de banc est érodé ainsi que l'amont du chenal d'écoulement principal.

Au cours de l'intervalle I3 entre la crue 2006 et la chasse 2007 (FIG 6.7), les motifs d'évolution morphologiques sont similaires : érosion de l'amont du chenal d'écoulement principal, dépôt sur la tête de banc, renforcement du chenal de jonction amont, érosion du bord de la queue de banc.

Les volumes de sédiments érodés et déposés sont d'ailleurs du même ordre de grandeur pour les deux périodes I1-2 et I3 : les dépôts affectant 11 et 14% de la surface totale du site (521 et 606 m³) ; et les zones érodées représentant 24 et 26% de la surface (1127 et 1827 m³).

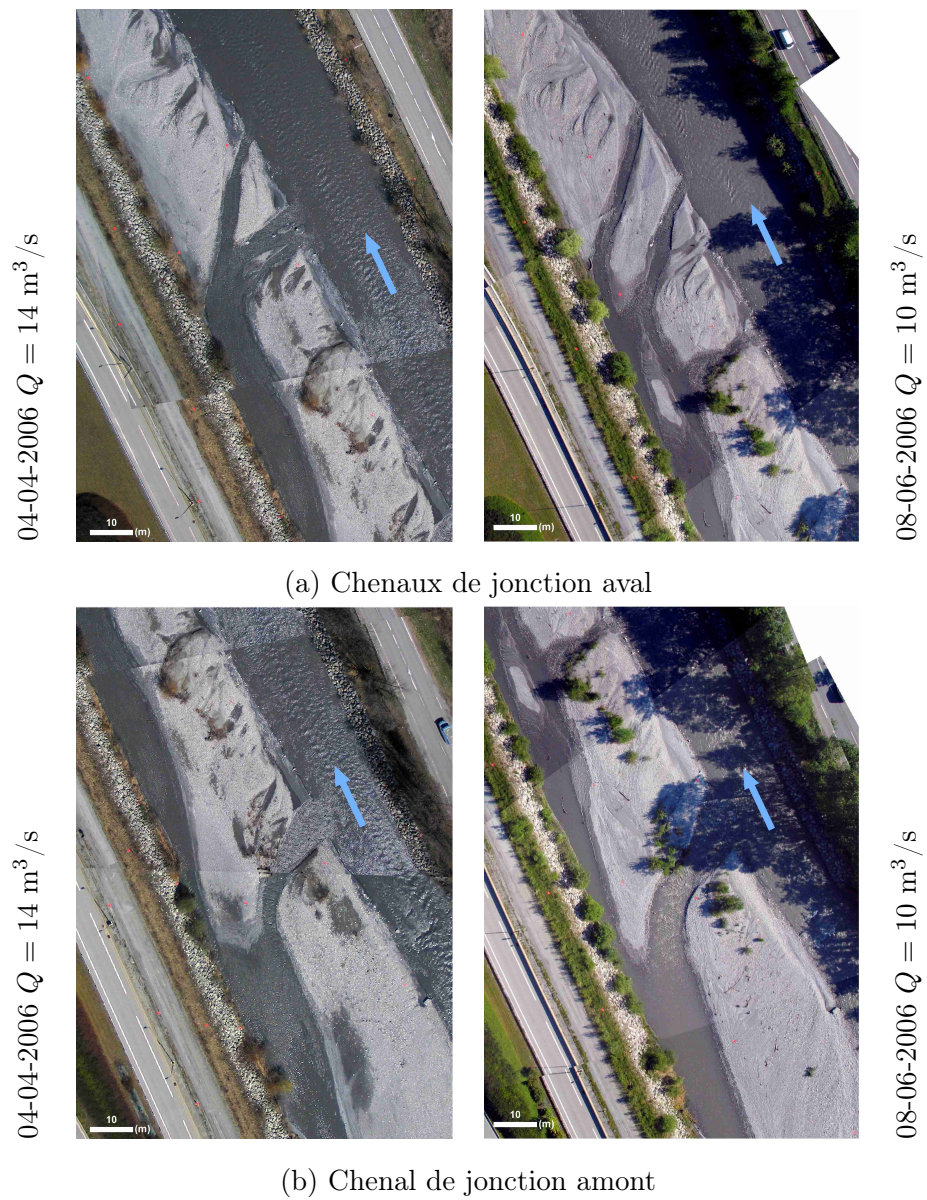


FIG. 6.3 – Evolution des chenaux de jonction au cours de la période I2 (printemps 2006). Prises de vue du 04-04-2006 et du 08-06-2006. Les flèches donnent le sens de l'écoulement

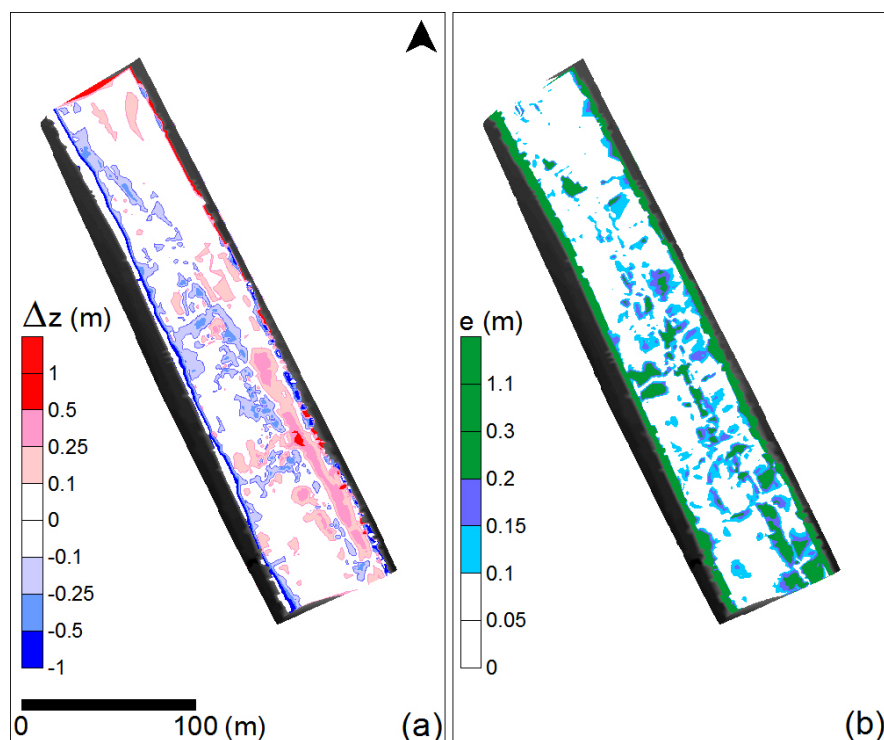


FIG. 6.4 – Evolution topographique du site expérimental principal au cours de l'intervalle I1 (automne-hiver 2005-2006). (a) Différence des MNT (bav4-bav3) et (b) carte d'incertitude associée.

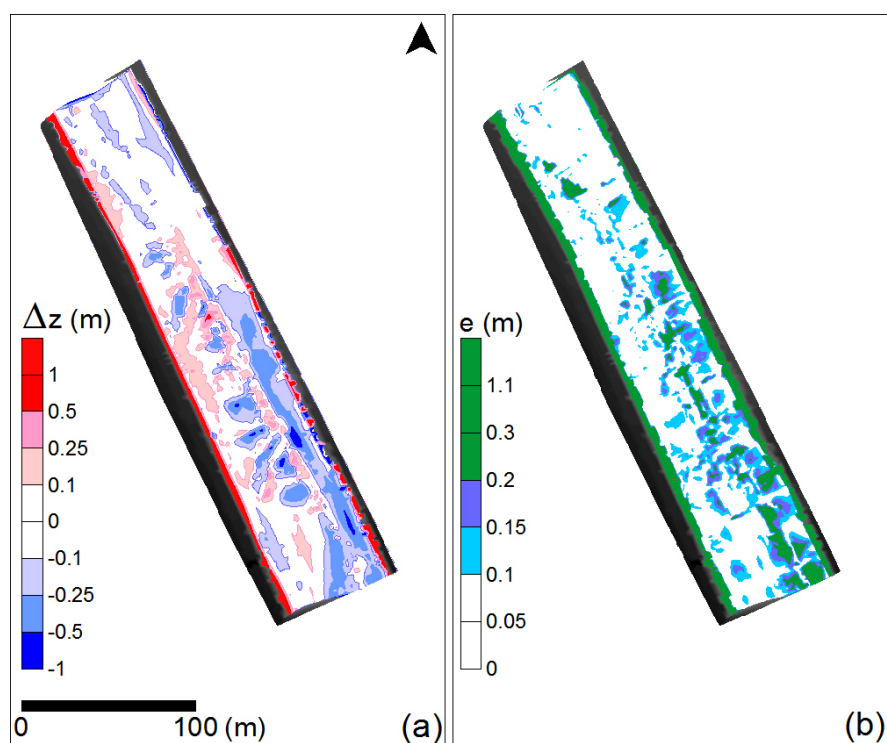


FIG. 6.5 – Evolution topographique du site expérimental principal au cours de l'intervalle I2 (printemps 2006). (a) Différence des MNT (bav5-bav4) et (b) carte d'incertitude associée.

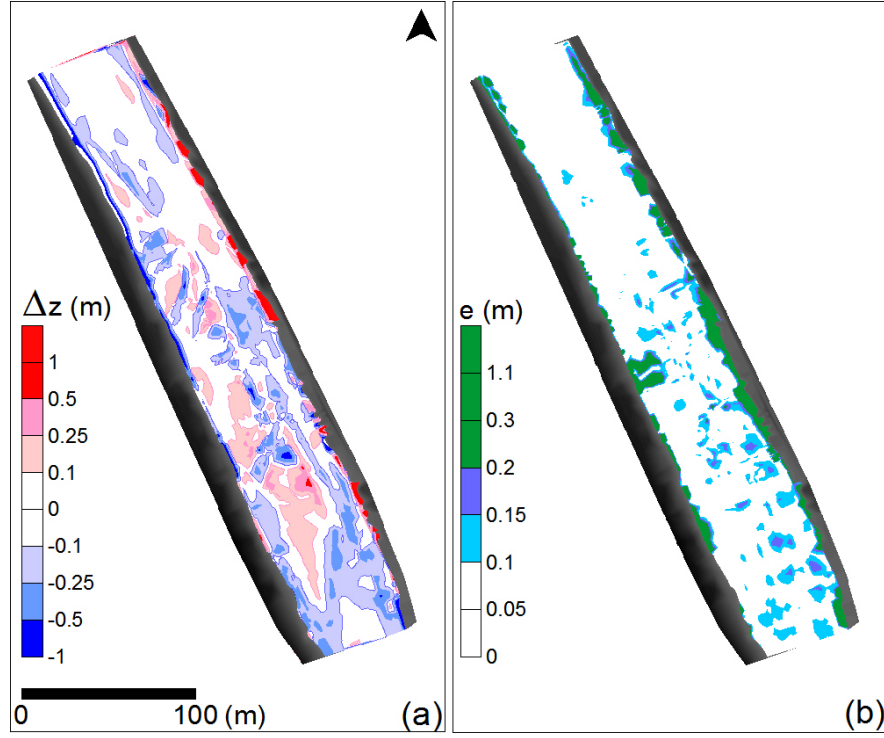


FIG. 6.6 – Evolution topographique du site expérimental principal au cours de l'intervalle I1-2 (automne-hiver-printemps 2005-2006). (a) Différence des MNT (bav5-bav3) et (b) carte d'incertitude associée.

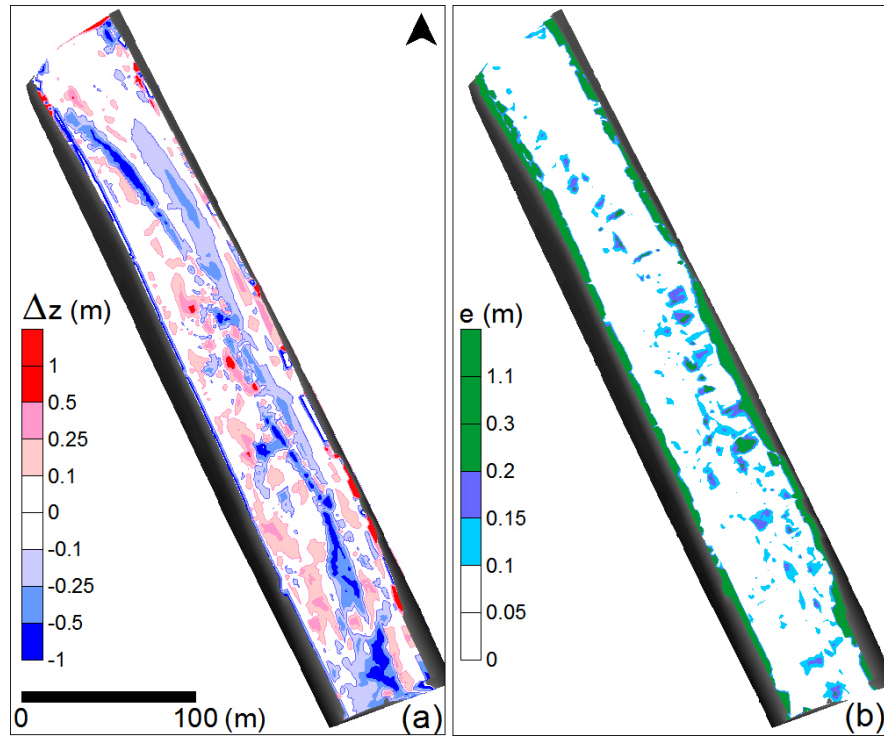


FIG. 6.7 – Evolution topographique du site expérimental principal au cours de l'intervalle I3 (automne-hiver-printemps 2006-2007). (a) Différence des MNT (bav8-bav7) et (b) carte d'incertitude associée.

6.3 Evolutions annuelles

L'évolution dite annuelle du site expérimental est définie par rapport aux chasses de dégravage : une première "année" A1 s'étend entre le lendemain de la chasse 2005 jusqu'au lendemain de la chasse 2006 ; une seconde "année" A2 correspond à la période entre le lendemain de la chasse 2006 et le lendemain de la chasse 2007. Les événements hydrologiques significatifs de débit maximal supérieur à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ au cours des deux périodes sont, pour A1, la chasse 2006 et, pour A2, la crue de l'automne et la chasse 2007 (FIG 4.13). Par rapport aux analyses précédentes, A1 est la réunion des périodes I1, I2 et de la chasse 2006 ; A2 est la réunion de l'été 2006, de la crue 2006, de la période I3 et de la chasse 2007 (FIG 6.8).

Pour les deux années A1 et A2, les changements morphologiques du site sont marqués et opposés (FIG 6.9 et FIG 6.10 a). Au cours de A1, le site a été globalement érodé, quelques dépôts existent cependant dans la zone des chenaux de jonction éphémères à l'aval du banc. En revanche, au cours de A2, le site a subi un dépôt global. Pour chaque période annuelle, l'événement le plus important semble déterminer l'évolution morphologique du site : pour A1 c'est la chasse 2006 et pour A2 c'est la crue de l'automne.

La constatation des évolutions antagonistes au cours de A1 et A2 amène à faire le bilan sur les deux périodes réunies (FIG 6.11). La carte d'évolution topographique indique globalement des dépôts en rive gauche et des érosions en rive droite. Cela signifie que l'altitude du banc est rehaussée, alors que le chenal d'écoulement principal est érodé. Des dépôts prononcés sont particulièrement remarquables en queue de banc. Les seules érosions sur le banc correspondent au chenal secondaire et aux deux chenaux de jonction, marquant la séparation du banc en plusieurs unités. L'érosion du chenal de jonction aval est principalement marquée. Malgré ces érosions locales sur le banc, ces dernières observations suggèrent une élévation du banc de galets et une accentuation du chenal d'écoulement principal sur la période d'étude.

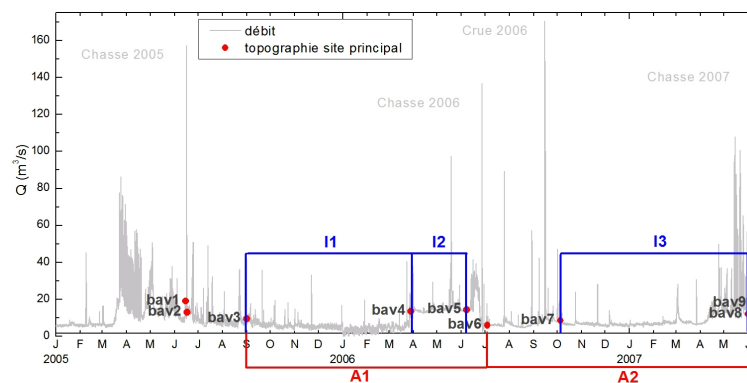


FIG. 6.8 – Hydrogramme estimé au site d'étude, dates des campagnes topographiques sur le site expérimental principal et périodes inter-événements (I1, I2, I3) et "annuelles" (A1, A2).

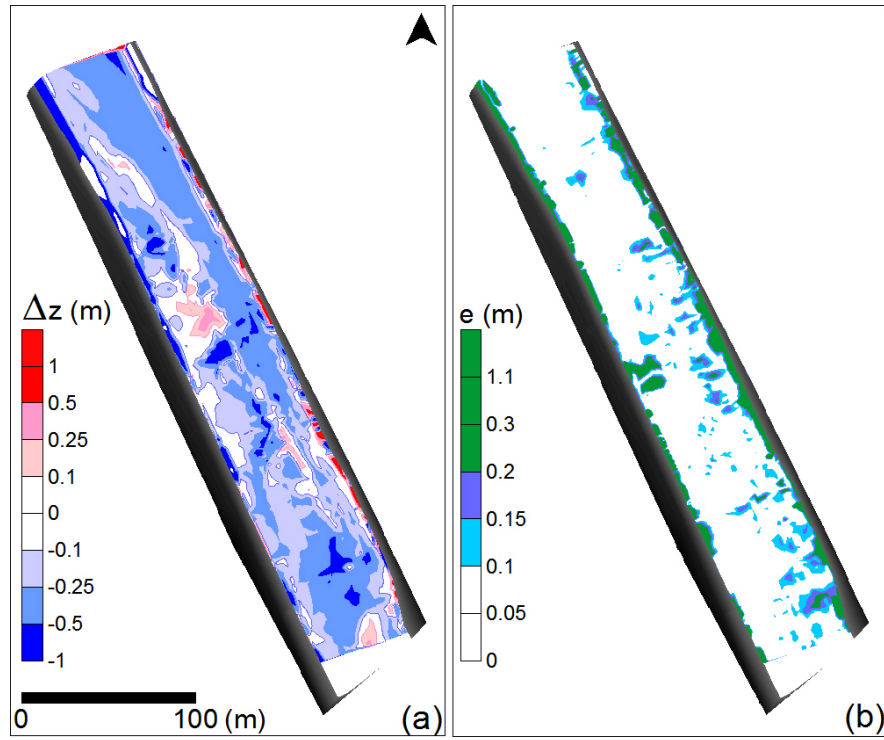


FIG. 6.9 – Evolution topographique du site expérimental principal au cours de l'année A1 (de la chasse 2005 à la chasse 2006). (a) Différence des MNT (bav6-bav3) et (b) carte d'incertitude associée.

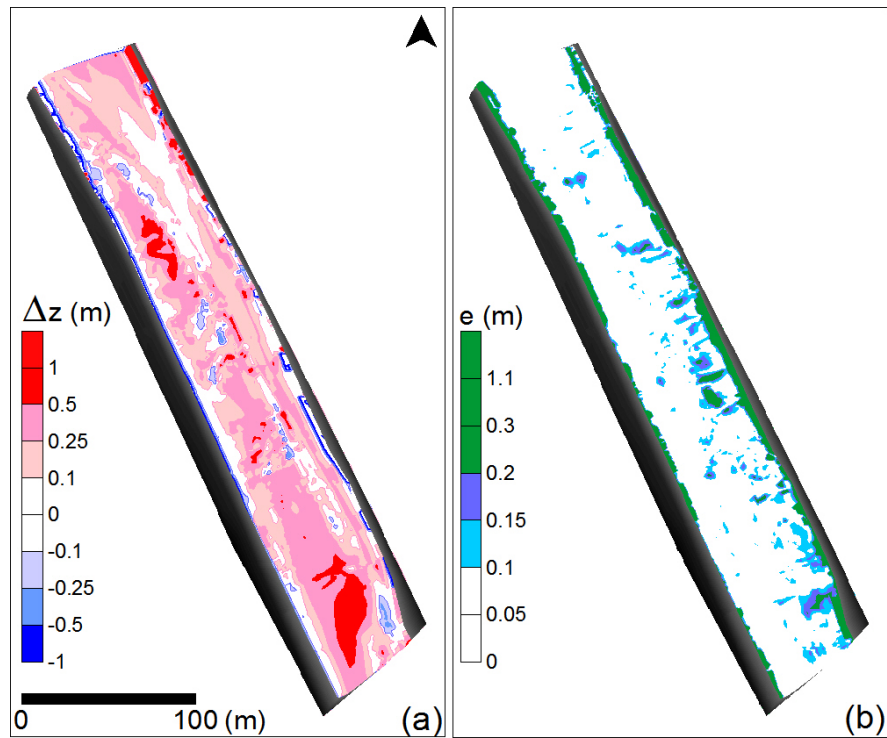


FIG. 6.10 – Evolution topographique du site expérimental principal au cours de l'année A2 (de la chasse 2006 à la chasse 2007). (a) Différence des MNT (bav9-bav6) et (b) carte d'incertitude associée.

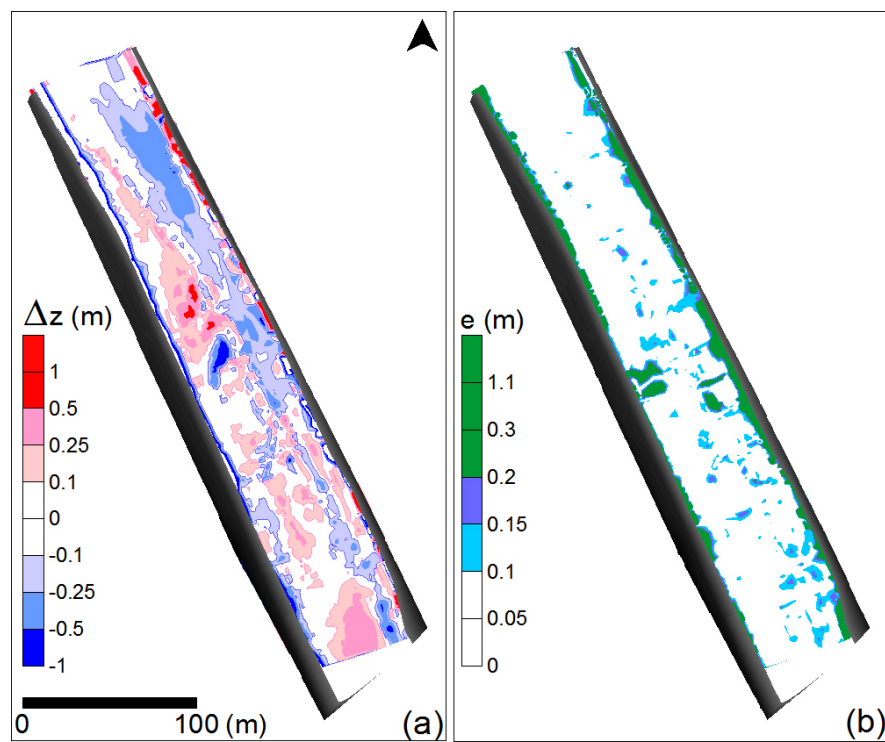


FIG. 6.11 – Evolution topographique du site expérimental principal au cours des années A1 et A2 réunies (de la chasse 2005 à la chasse 2007). (a) Différence des MNT (bav9-bav3) et (b) carte d'incertitude associée.

Conclusion de la partie 2

Transfert et dépôt des sédiments fins

Le transfert des MES a été analysé sur la base des mesures de concentration effectuées pendant les trois chasses 2005, 2006 et 2007. Le signal à l'aval des retenues est spécifique de ce type d'événement artificiel. Plusieurs phases ont été identifiées : (i) une remobilisation des sédiments fins du lit de l'Arc par la vague d'alerte ; (ii) un premier pic de concentration associé au passage en torrentiel dans la retenue ; (iii) un deuxième pic de concentration causé par l'augmentation principale de débit grâce aux apports d'altitude.

En outre, un modèle analytique a permis de rendre compte de façon simple du transfert des MES dans le cours d'eau au cours de ces événements. La vitesse de propagation du signal de MES est approximativement constante et la diffusion est faible et constante. D'autre part, les concentrations maximales observées pendant une chasse sont fortement dépendantes des événements ayant eu lieu depuis la chasse précédente : la crue de l'automne 2006 explique sans doute les faibles concentrations mesurées au cours de la chasse 2007.

Les dépôts de sédiments fins sur le banc représentent des surfaces importantes, de l'ordre du tiers de la surface totale. La valeur de cette surface est approximativement la même avant ou après une chasse, par contre la localisation des dépôts est modifiée même si quelques zones de dépôts persistent de façon permanente. Une typologie des zones de dépôts des sédiments a été développée permettant de les caractériser précisément.

Modifications morphologiques au cours des trois années de suivi

Les données acquises au cours de la période 2005-2007 ont permis d'évaluer les modifications morphologiques des sites expérimentaux principal et secondaire.

Au cours d'une chasse, sur un même secteur de rivière, les évolutions comparables des deux bancs de galets suivis indiquent qu'une extrapolation spatiale des observations sur le site principal aux bancs proches est pertinente.

Sur les trois chasses suivies, le site est principalement soumis à des érosions d'intensité variable suivant les années (TAB 6.1). Alors qu'en 2006 une progression des bancs vers l'aval est observée, en 2007, un renforcement de l'amont du banc est visible. Ces deux types d'évolution pourraient être associés à des états initiaux différents. En effet, entre les deux événements une crue naturelle a fortement modifié l'état du site expérimental par des dépôts importants de matériaux grossiers sur tout le site, et en particulier en tête et en queue de banc.

Les zones de chenaux de jonction à la surface du banc sont les seules zones d'érosion permanentes du banc. La dynamique de l'écoulement a été explorée plus précisément dans une de ces zones expliquant les érosions observées. Malgré ces érosions locales sur le banc, un bilan sur toute la période d'étude suggère un engraissement du banc de galets et une accentuation du chenal d'écoulement principal, soit un renforcement progressif du banc malgré les érosions induites par les chasses.

		volume (m ³)	surface (m ²)	% de surface totale	hauteur moy. (m)	Ω (m)
Ch.	2006	dépôt > 10 cm	+219	1558	5	+0.14
		érosion > 10 cm	-2338	14017	47	-0.17
Ch.	2007	dépôt > 10 cm	+456	3550	12	+0.13
		érosion > 10 cm	-663	4692	16	-0.14
Crue	2006	dépôt > 10 cm	+3956	16848	56	+0.23
		érosion > 10 cm	-390	1117	4	-0.35
I1-2		dépôt > 10 cm	+521	3398	11	+0.15
		érosion > 10 cm	-1127	7322	24	-0.15
I3		dépôt > 10 cm	+606	4227	14	+0.14
		érosion > 10 cm	-1827	7779	26	-0.23
A1		dépôt > 10 cm	+ 190	975	3	+ 0.19
		érosion > 10 cm	- 3852	10984	37	- 0.35
A2		dépôt > 10 cm	+ 2881	15043	50	+ 0.19
		érosion > 10 cm	- 1486	2350	8	- 0.63
A1 A2 +		dépôt > 10 cm	+ 631	5022	17	+ 0.13
		érosion > 10 cm	- 2959	8124	27	- 0.36

TAB. 6.1 – Bilans sédimentaires sur le site expérimental principal pour les événements suivis, les périodes inter-événements et les périodes "annuelles". Les volumes et surfaces ont été calculés avec le logiciel SURFER. L'indice de bilan sédimentaire Ω est défini à partir des volumes $V_{\pm}$ érodés et déposés et de la surface totale du site S : $\Omega = \frac{V_+ + V_-}{S}$.

Ces conclusions mériteraient d'être confirmées par une étude à plus long terme du site expérimental principal. Le suivi topographique sur plusieurs années consécutives permettrait de valider le

renforcement progressif du banc. L'extrapolation spatiale des résultats demande aussi à être consolidée par des observations sur d'autres bancs de galets du même secteur, voire plus éloignés.

Ces derniers points exigent une augmentation du temps passé sur le terrain, de nouveaux outils devant être utilisés pour réduire ce temps. La modélisation numérique des écoulement hydro-sédimentaires peut être un outil de compréhension de la dynamique sédimentaire. L'intérêt de son utilisation dans un contexte de chasse de dégravage ou de crue naturelle doit cependant être vérifié au préalable, ce qui fait l'objet de la partie suivante.

TROISIÈME PARTIE

Modélisation numérique hydro-sédimentaire

7

Modélisation numérique des écoulements liquides et solides

L'écoulement et le transport solide à proximité du banc de galets du site principal sont modélisés avec le modèle bidimensionnel RUBAR20. L'évaluation et l'analyse des résultats de calcul sont faites à partir des mesures de terrain locales (mesures limnimétriques, vitesses au courantomètre) ou distribuées (vitesses LS-PIV). Les résultats du modèle sont comparés avec les changements de topographie observés. Dans un premier temps, une analyse est effectuée à partir des résultats hydrodynamiques sur un fond fixe. Puis les résultats de modélisation du transport solide sont analysés. Deux événements hydrologiques représentatifs sont simulés : la chasse hydraulique 2006 et la crue naturelle de l'automne 2006. Les résultats obtenus sur le banc secondaire pour la chasse 2006 sont aussi exploités.

7.1 Modélisation numérique : présentation et objectifs

L'écoulement liquide et le transport solide sont modélisés avec le code bidimensionnel RUBAR20TS¹. Ce code est développé par le Cemagref pour simuler les écoulements à surface libre et le transport sédimentaire, notamment pour modéliser les inondations liées à des ruptures de barrages ou à des crues naturelles (Mignot *et al.*, 2006). Les données et les résultats sont pré- et post-traités avec le logiciel FUDAA-PREPRO, développé par le Cetmef, permettant la visualisation et la modification du maillage, des conditions initiales et aux limites, des coefficients de frottement et des résultats de calcul (hauteur d'eau, vitesses moyennées sur la verticale, évolution de la bathymétrie...).

7.1.1 Hydrodynamique

Le code RUBAR20 utilise un schéma explicite aux volumes finis, de type Godunov et du second ordre (Paquier, 1995). Il résout les équations bidimensionnelles de Barré de Saint-Venant (obtenues par intégration sur la verticale des équations de Navier-Stokes) en régime instationnaire détaillées

¹Le code RUBAR20 ne gère que les calculs hydrodynamiques alors que RUBAR20TS résout aussi les équations de transport sédimentaire. RUBAR20 est l'acronyme pour Rupture de BARRage.

ci-dessous :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + gh^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z}{\partial x} - g \frac{K_s^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} + \nu \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \\ \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2 + gh^2/2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z}{\partial y} - g \frac{K_s^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} + \nu \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \end{array} \right. \quad (7.1)$$

où u et v sont les vitesses respectivement selon les axes x et y , h la hauteur d'eau, z la cote du fond, g la gravité, K_s le coefficient de Strickler et ν le coefficient de viscosité turbulente.

Les équations de Saint-Venant doivent être utilisées dans les conditions suivantes : (i) une faible accélération verticale comparée à la gravité, (ii) des hauteurs d'eau importantes devant les irrégularités du lit, (iii) un rayon de courbure des lignes de courant grand dans le plan horizontal et (iv) une pente de la surface libre inférieure à 10%.

Le maillage irrégulier est constitué de quadrilatères ou de triangles qui ont zéro ou une arête commune. La construction du maillage est fondée sur des sections en travers et une interpolation linéaire suivant des lignes directrices morphologiques (cf. paragraphe 3.1.2).

7.1.2 Transport solide

Pour calculer les flux sédimentaires, une équation est ajoutée :

$$\underbrace{\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Chu_s}{\partial x} + \frac{\partial Chv_s}{\partial y}}_{\text{termes convectifs}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(h\sigma\nu \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h\sigma\nu \frac{\partial C}{\partial y} \right)}_{\text{termes diffusifs}} + \underbrace{E - S}_{\text{Taux d'érosion et de sédimentation (m/s)}} \quad (7.2)$$

où h est la hauteur d'eau, C la concentration volumique des sédiments en mouvement dans l'eau² (m^3/m^3), u_s et v_s sont les vitesses des sédiments respectivement selon les axes x et y , ν le coefficient de viscosité (m^2/s), σ le nombre adimensionnel de Smith.

Le schéma de résolution est identique et couplé avec celui du système (7.1). Les termes diffusifs ne sont pas pris en compte pour le transport par charriage. Comme dans de nombreux cas (Cao et Carling, 2002), les interactions entre charriage et suspension sont faibles, chaque mode de transport est donc simulé indépendamment.

L'évolution du lit peut être calculée avec l'équation d'Exner (équation de conservation de la masse solide) :

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{1}{1-p} (E - S) \quad (7.3)$$

²Sur chaque maille c'est le volume de sédiments en mouvement divisé par le volume d'eau.

où z_b est l'altitude du lit et p la porosité des sédiments dans le lit de graviers.

Les calculs peuvent être effectués avec ou sans modification du fond, les deux options étant utilisées dans ce travail.

En l'état actuel du code, les deux modes de transport (charriage et suspension) doivent être simulés indépendamment et un seul diamètre de particules est pris en compte, le diamètre médian supposé représentatif. Les calculs sont donc effectués avec un diamètre médian uniforme pour tout le site. Par contre des calculs menés avec des diamètres différents peuvent permettre d'analyser les évolutions morphologiques en fonction de la granulométrie.

7.1.2.1 Transport par charriage

Pour le charriage le taux d'érosion E est calculé avec l'équation suivante tirée de la formule de Meyer-Peter et Müller (1948) :

$$q_s^* = 8\sqrt{sgd_{50}^3}(\tau^* - \tau_{cr}^*)^{3/2} \text{ si } \tau^* > \tau_{cr}^* \quad (7.4)$$

$$\begin{cases} E = 8\sqrt{sgd_{50}^3}(\tau^* - \tau_{cr}^*)^{3/2}/L_c & \text{si } \tau^* > \tau_{cr}^* \\ E = 0 & \text{si } \tau^* < \tau_{cr}^* \end{cases} \quad (7.5)$$

où q_s^* est la capacité de transport par unité de largeur, $s = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ la densité relative des sédiments (en général 1.65), d_{50} le diamètre médian des sédiments, L_c une distance de chargement caractéristique du retard spatial dans la saturation de la capacité solide.

Dans ces formules, τ est une contrainte efficace calculée à partir de la contrainte totale au fond τ_T multipliée par un coefficient ϕ inférieur à 1. La contrainte est calculée à partir de la vitesse de frottement au fond u^* :

$$\tau = \phi \rho u^{*2} = \phi \rho g h J_e = \phi \rho g h^{-1/3} \frac{u^2 + v^2}{K_s^2} \quad (7.6)$$

$$\text{où } \phi = \left(\frac{K_s}{K_{sed}} \right)^{3/2} \text{ et } K_{sed} = \frac{21}{d_{50}^{1/6}}$$

La contrainte de cisaillement au fond adimensionnelle, appelée aussi nombre de Shields, s'écrit :

$$\tau^* = \tau / [(\rho_s - \rho)gd_{50}] \quad (7.7)$$

La contrainte critique τ_{cr}^* est donnée par le diagramme de Shields (FIG. 7.1).

Le taux de sédimentation S est calculé avec la formule suivante (loi de chargement) :

$$\frac{\partial q_s}{\partial L_L} = \frac{q_s^* - q_s}{L_c} = E - S \quad (7.8)$$

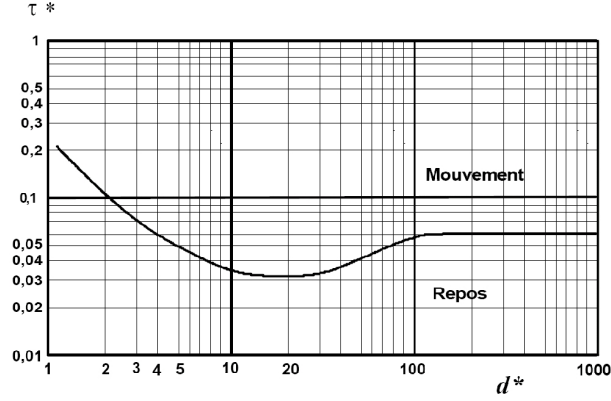


FIG. 7.1 – Diagramme de Shields donnant la contrainte adimensionnelle critique de mise en mouvement, d'après Degoutte (2003). Le diamètre adimensionnel des particules s'écrit : $d^* = [g(s-1)/\nu^2]^{1/3} d$.

où L_L est la dimension longitudinale, distance dans la direction de l'écoulement, $q_s = ChU_s$ est le débit solide par unité de largeur, U_s la vitesse des sédiments et $q_s^* = EL_C$. L'équation (7.8) donne :

$$S = \frac{Ch}{L_c} U_s \quad (7.9)$$

U_s peut être choisie proportionnelle à la vitesse de l'écoulement :

$$U_s = \zeta \sqrt{u^2 + v^2} \quad (7.10)$$

La vitesse des sédiments peut aussi être déterminée à partir de l'équation d'après Engelund et Fredsoe (1976) :

$$U_s = 10\zeta u^* \left(1 - 0.7\sqrt{\tau_{cr}/\tau}\right) \quad (7.11)$$

où ζ est un coefficient donné par l'utilisateur.

La vitesse des sédiments est supposée colinéaire à la vitesse de l'écoulement, bien que ce ne soit pas le cas en présence d'une pente transverse (Lanzoni et Tubino, 1999) mais le code ne permet pas de calculer l'angle de déviation.

7.1.2.2 Transport par suspension

Pour simuler le transport par suspension, l'équation (7.2) est utilisée. Le taux de sédimentation est calculé à partir de la loi de dépôt suivante :

$$\begin{cases} S = \alpha w_s C (1 - \tau/\tau_{cr}) & \text{si } \tau < \tau_{cr} \\ S = 0 & \text{si } \tau \geq \tau_{cr} \end{cases} \quad (7.12)$$

où α est un paramètre de calage de la vitesse de sédimentation, τ_{cr} la contrainte critique de sédimentation calculée à partir du diagramme de Shields (FIG. 7.1), et w_s la vitesse de chute donnée

par la formule de Stokes pour les particules inférieures à 0.1 mm :

$$w_s = \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) \frac{gd_{50}^2}{18\nu} \quad (7.13)$$

Aucune propriété de cohésion des sédiments n'est prise en compte.

Le taux d'érosion est calculé avec une équation symétrique de l'équation (7.12) :

$$\begin{cases} E = \alpha w_s C(\tau/\tau_{cr} - 1) & \text{si } \tau > \tau_{cr} \\ E = 0 & \text{si } \tau \leq \tau_{cr} \end{cases} \quad (7.14)$$

7.1.3 Objectifs de la modélisation

Une fois vérifié que les résultats numériques sont conformes aux observations expérimentales de hauteur, de vitesse et d'évolution morphologique, les modélisations numériques sont utilisées pour examiner la dynamique de l'écoulement et du transport solide au voisinage du banc de galets. La finalité de ces calculs numériques n'est pas d'étudier l'influence de chacun des paramètres régissant la modélisation du transport solide. Les hypothèses faites sur la modélisation du transport solide sont en effet relativement simplificatrices, et malgré ces simplifications l'objectif des modélisations numériques est d'arriver à une compréhension des processus sédimentaires au cours d'événements hydrologiques significatifs.

Parmi tous les événements observés, deux événements aux effets antagonistes sont simulés : la chasse hydraulique de 2006 et la crue naturelle de l'automne 2006. Tous les calculs sont effectués sur le site expérimental principal. Les écoulements sur le site expérimental secondaire n'ont pas été modélisés avec ce code de calcul faute de temps, mais les résultats de la thèse de Matthieu de Linares (2007) sur ce site sont exploités.

Les premiers essais de modélisation de chasse hydraulique ont été effectués sur une géométrie de 2005 (bav3) et avec l'hydrogramme de chasse fourni à cette époque par EDF (Jodeau et Paquier, 2006) à l'aide des code de calcul RUBAR20 et indépendamment avec le code HYDROSIM (INRS-ete). Sans fournir de résultats quantitativement intéressants du fait d'un maillage grossier et de l'absence de données hydrodynamiques de contrôle suffisantes, ce travail préliminaire a permis de vérifier la faisabilité d'une telle modélisation et la préparation des méthodes de travail.

7.2 Hydrodynamique

7.2.1 Maillage et frottements

Deux maillages représentatifs des topographies avant et après la chasse 2006 ont été construits. Les maillages ont été établis par interpolation linéaire à partir de lignes directrices morphologiques, le maillage étant raffiné dans les zones des chenaux de jonction (cf. paragraphe 3.1.2). L'étendue

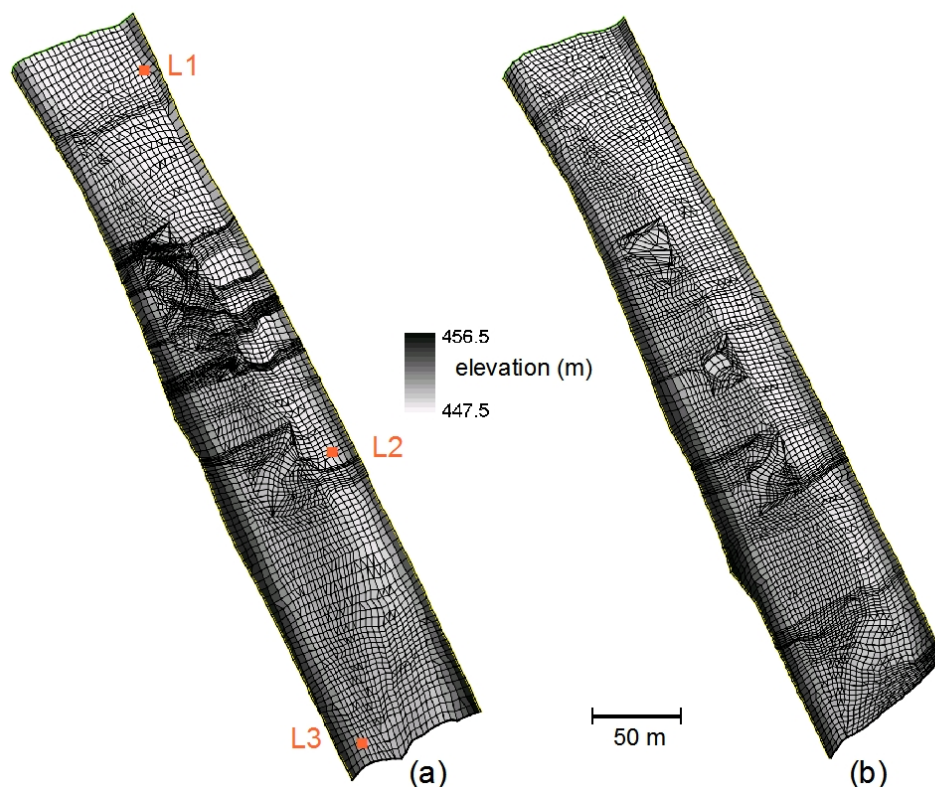


FIG. 7.2 – Maillages de calcul et emplacement des limnimètres : (a) pour la topographie avant, et (b) pour la topographie après la chasse hydraulique de 2006. L'écoulement se fait du bas vers le haut.

spatiale du maillage est limitée latéralement par le haut des berges artificielles et longitudinalement par deux sections à quelques dizaines de mètres respectivement de l'amont de la tête et de l'aval de la queue de banc. Les caractéristiques des deux maillages sont très similaires (FIG. 7.2), la taille moyenne des mailles étant environ 2×2 m ; ils diffèrent surtout dans les zones de chenaux de jonction. Le nombre de mailles est important (2577 et 5015). Du fait de la petite taille de certaines mailles, les temps de calcul sont relativement longs (utilisation d'un bi-processeur Intel EMT64 3.2 GHz avec 2 Go de RAM) : une fois le temps réel pour un calcul hydrodynamique pur ; deux fois le temps réel pour un calcul sédimentaire dans le premier maillage ; 5 à 10 fois le temps réel pour le deuxième maillage.

Pour reproduire au mieux la ligne d'eau sur le site expérimental, le coefficient de Manning-Strickler, K_s , est pris constant ($K_s = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$), sauf en queue de banc dans la partie aval ($K_s = 60 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$) pour rendre compte des sédiments les plus fins. Ces changements locaux de paramétrage n'induisent pas de changement significatif sur la ligne d'eau mais contribuent à quelques modifications du profil transversal de vitesses moyennées sur la verticale. Une adaptation plus fine du coefficient de frotte-

ment à la granulométrie observée localement a été testée sur le modèle de la chasse 2005, n'entraînant pas de modification majeure sur les hauteurs d'eau simulées.

Pour les calculs de la crue de l'automne 2006, faute de campagne de mesure juste avant la crue, aucune topographie du site n'est disponible. Les données topographiques et granulométriques après la chasse 2006 (juillet) sont utilisées comme état initial, en supposant que les évolutions morphologiques au cours de l'été sont mineures.

7.2.2 Conditions aux limites et conditions initiales

La condition initiale est le résultat d'un calcul en régime permanent avec le débit initial, ce qui permet de gagner un peu de temps de calcul.

En condition limite amont, un débit est imposé. Pour la chasse 2006, il est déduit de la mesure limnimétrique L1, et, pour la crue naturelle, il est déduit de la mesure limnimétrique permanente L0 (cf. Figure 7.3). Pour prendre en compte la présence, à l'amont, d'un autre banc alterné en rive droite, l'écoulement est forcé sur la partie gauche de l'arête d'entrée et une cote déduite du limnimètre le plus proche, L3, est imposée en condition limite amont car l'écoulement se fait globalement en régime torrentiel.

Sur l'arête limite aval, un régime critique est imposé. Une sortie de type "cote imposée variable" déduite de la mesure limnimétrique la plus proche (L1) entraînait un remplissage du site d'étude au cours du temps. Cette condition limite aval n'est peut-être pas la condition limite à l'aval la plus physique mais elle présente l'avantage de ne pas conduire à des résultats aberrants.

Pour la chasse 2006 le calcul se fait entre le temps initial $t_i = 10000$ s, soit 2h46 le 27-06-2006, et le temps final $t_f = 75000$ s, soit 20h50 le 27-06-2006. Pour la crue, $t_i = 18000$ s, soit 5h00 le 15-09-2006, et $t_f = 145690$ s, soit 16h28 le 16-09-2006.

7.2.3 Remarques sur le régime d'écoulement

La condition limite aval (régime critique imposé) amène quelques remarques sur les régimes d'écoulement rencontrés sur le site. Le nombre de Froude est défini par la relation adimensionnelle :

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (7.15)$$

Il permet de caractériser un écoulement fluvial ($Fr < 1$), critique ($Fr = 1$) ou torrentiel ($Fr > 1$). Les régimes d'écoulement sont cartographiés pour trois débits caractéristiques de la chasse (FIG 7.4). L'écoulement est essentiellement fluvial, avec $Fr > 0.5$ sur quasiment toute la zone en eau. Dans les chenaux de jonction ainsi que dans la partie amont du site l'écoulement est torrentiel. Il ne paraît ainsi pas aberrant d'imposer en condition limite aval un régime critique.

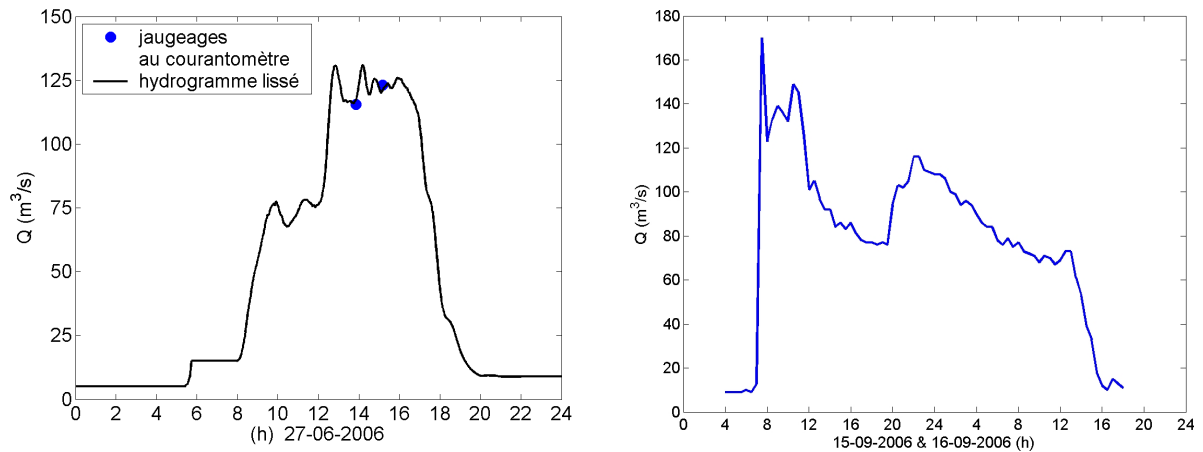


FIG. 7.3 – Conditions limites amont : (a) Hydrogramme de chasse 2006 déduit de la mesure limnimétrique L1 (cf. paragraphe 4.2.4.3) et (b) Hydrogramme de crue 2006 déduit du limnimètre L0.

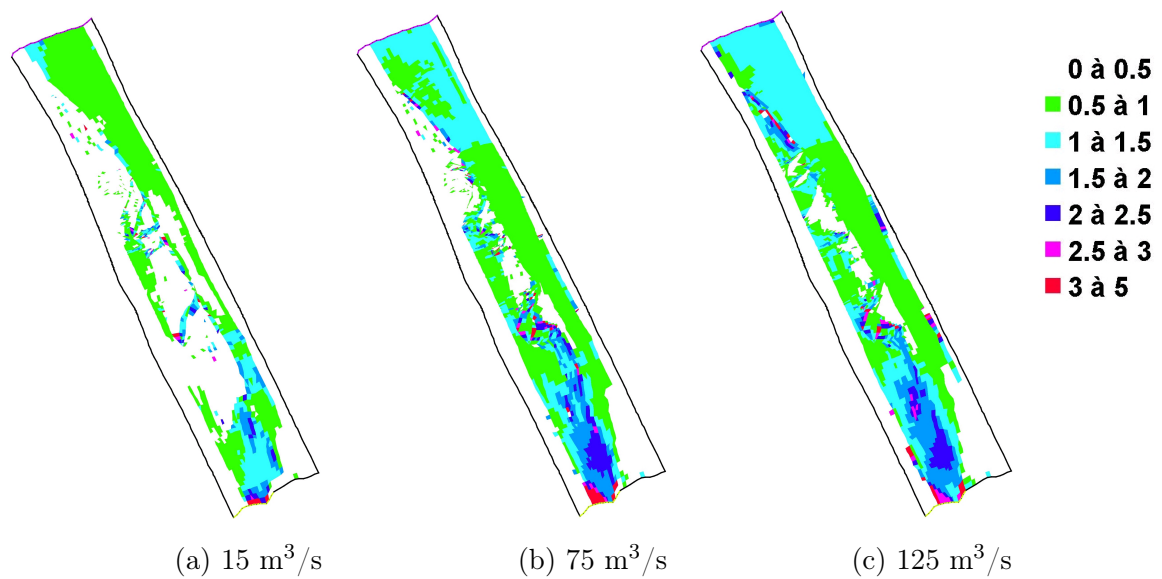


FIG. 7.4 – Cartographie du nombre de Froude (a) en début d'événement, (b) pendant le premier palier de débit et (c) au maximum de débit.

7.2.4 Comparaison avec les observations hydrodynamiques

Les opérations de calage des paramètres et de contrôle des résultats hydrodynamiques sont effectuées sur l'événement de chasse hydraulique 2006 sur lequel le jeu de données expérimental est le plus complet.

Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et calculées

Les hauteurs d'eau calculées sont comparées en trois points (L1, L2, L3) avec les mesures lim-

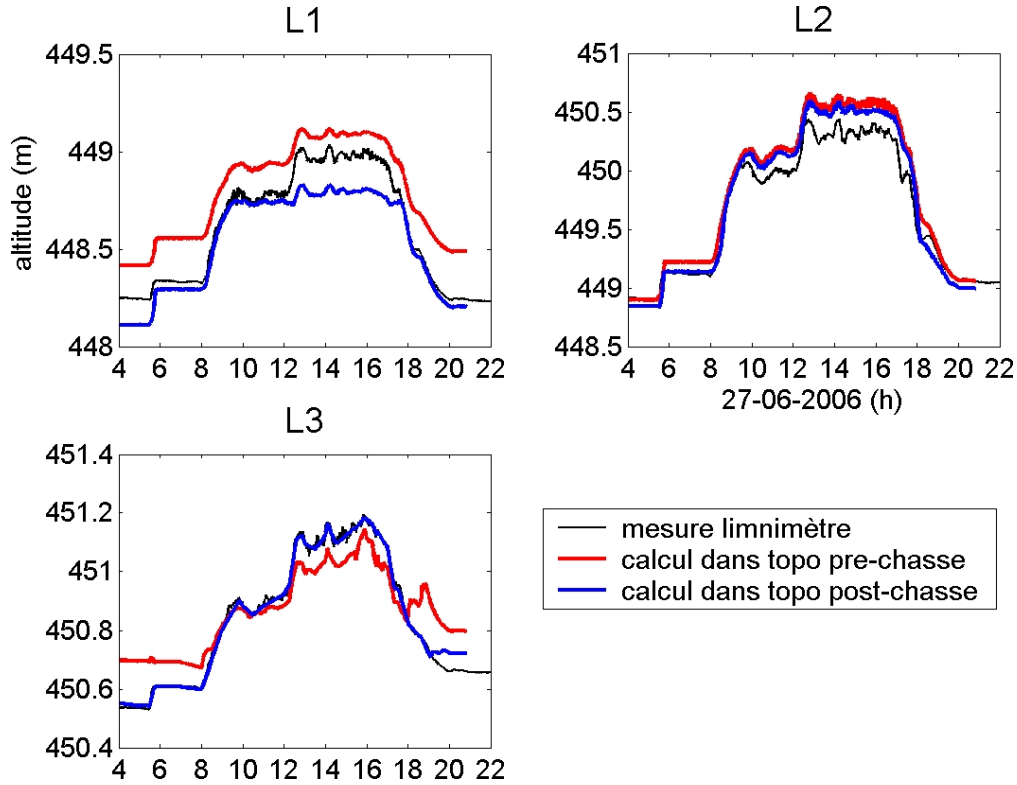


FIG. 7.5 – Comparaison des cotes calculées avec les deux topographies et mesurées au cours de la chasse hydraulique 2006 par les limnimètres L1, L2 et L3. La localisation des limnimètres est donnée FIG. 7.2.

nimétriques (paragraphe 4.1 et FIG 7.2). Les erreurs de mesure sont supposées négligeables même avec les concentrations importantes et les fortes vitesses rencontrées (cf. paragraphe 4.1). Les calculs diffèrent des mesures de seulement quelques centimètres à 20 cm maximum (FIG 7.5). Comme les limnimètres L1 et L3 sont proches des arêtes limites aval et amont, les hauteurs d'eau calculées sont probablement biaisées par des effets de bord. Pour L2, les calculs sont en bon accord avec les mesures. Sur le palier de débit maximal des écarts sont cependant importants (20 cm). La raison de cet écart réside sûrement dans la différence entre la topographie réelle et la géométrie de calcul. Alors que les mesures ont mis en évidence des changements topographiques significatifs (cf. paragraphe 5.1.3), les calculs hydrodynamiques ne prennent pas en compte l'évolution du fond au cours du temps. Il est difficile de déterminer, dans ces conditions, quelle topographie correspond à chaque temps de calcul, en particulier sur le palier de débit maximal. On peut cependant supposer que cette phase de l'hydrogramme est associée à une érosion importante du chenal d'écoulement principal qui est ensuite comblée à la décrue. Il n'est donc pas étonnant que les cotes d'eau calculées soient 20 cm au-dessus des cotes enregistrées.

Dans la suite, des comparaisons des cotes mesurées et calculées sont faites à l'aide de calculs numériques avec évolution du fond.

Comparaison des vitesses mesurées et calculées

Les résultats de comparaison entre les vitesses mesurées par la technique LS-PIV et les vitesses calculées par le code bidimensionnel sont présentés dans un article soumis à Flow Measurement and Instrumentation (Jodeau et al., 2008).

Les figures FIG 7.6 et FIG 7.7 présentent une comparaison dans le plan horizontal des intensités et directions des vitesses de surface mesurées par la technique LS-PIV et des vitesses moyennes sur la verticale calculées par le code bidimensionnel dans les topographies avant et après la chasse 2006. Les résultats sont confrontés sur les deux sites de mesure LS-PIV : le SITE D est situé à l'aval du banc et le SITE C dans une zone de chenal de jonction (cf. paragraphe 4.2.4).

Comme la grille de calcul LS-PIV est plus fine que celle du maillage, chaque vecteur calculé numériquement est comparé à son plus proche voisin obtenu par LS-PIV. Pour obtenir uniquement des confrontations pertinentes, deux critères sont utilisés : (i) les données comparées doivent être dans un rayon d'un mètre et (ii) l'angle entre les vecteurs doit être inférieur à $\pi/5 \approx 36^\circ$; dans le cas contraire, cela signifie sûrement que les vitesses LS-PIV sont biaisées, par exemple du fait de mouvements parasites.

Le coefficient $\alpha_v = 0.79$ est appliqué aux vitesses de surface mesurées par LS-PIV pour les comparer aux vitesses moyennées sur la verticale calculées par le code numérique (cf. paragraphe 4.2.2).

Pour les deux sites (SITE D et SITE C) et pour les deux maillages de calcul (avant et après la chasse), les angles entre les vecteurs mesurés et calculés sont proches (FIG 7.6 c et FIG 7.7 c). Quelques points (sur le bord des zones d'intérêt) conduisent à des écarts supérieurs à $\pm\pi/10 \approx 18^\circ$. Sur le SITE D, pour les deux géométries de calcul, les écarts entre les intensités de vitesse mesurée et calculée sont faibles pour les hauteurs d'eau supérieures à 50 cm (FIG 7.6 b et FIG 7.7 b). A forte hauteur d'eau, le modèle sur-estime les vitesses, surtout dans la configuration après chasse. Par contre, pour les faibles hauteurs d'eau, des écarts importants sont observés : le modèle semble sous-estimer les vitesses, surtout dans la géométrie après chasse. Les hauteurs d'eau faibles sont observées dans le champ proche à proximité de la rive gauche. Des contrôles visuels sur les films confirment les valeurs observées dans cette zone, les traceurs avançant approximativement à la même vitesse que ceux situés au milieu de la rivière. Comme l'écart est prononcé à faible hauteur d'eau seulement, la sous-estimation dans le calcul des vitesses pourrait être due à une mauvaise prise en compte des frottements à faible hauteur d'eau. Dans cette zone, un ajustement du coefficient de Strickler sur le banc ne semble pas réaliste, car pour reproduire la granulométrie plus fine en queue de banc, il est déjà fixé à $K_s = 60 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ (d'après Graf et Altinakar (1993), cette valeur correspondant plutôt

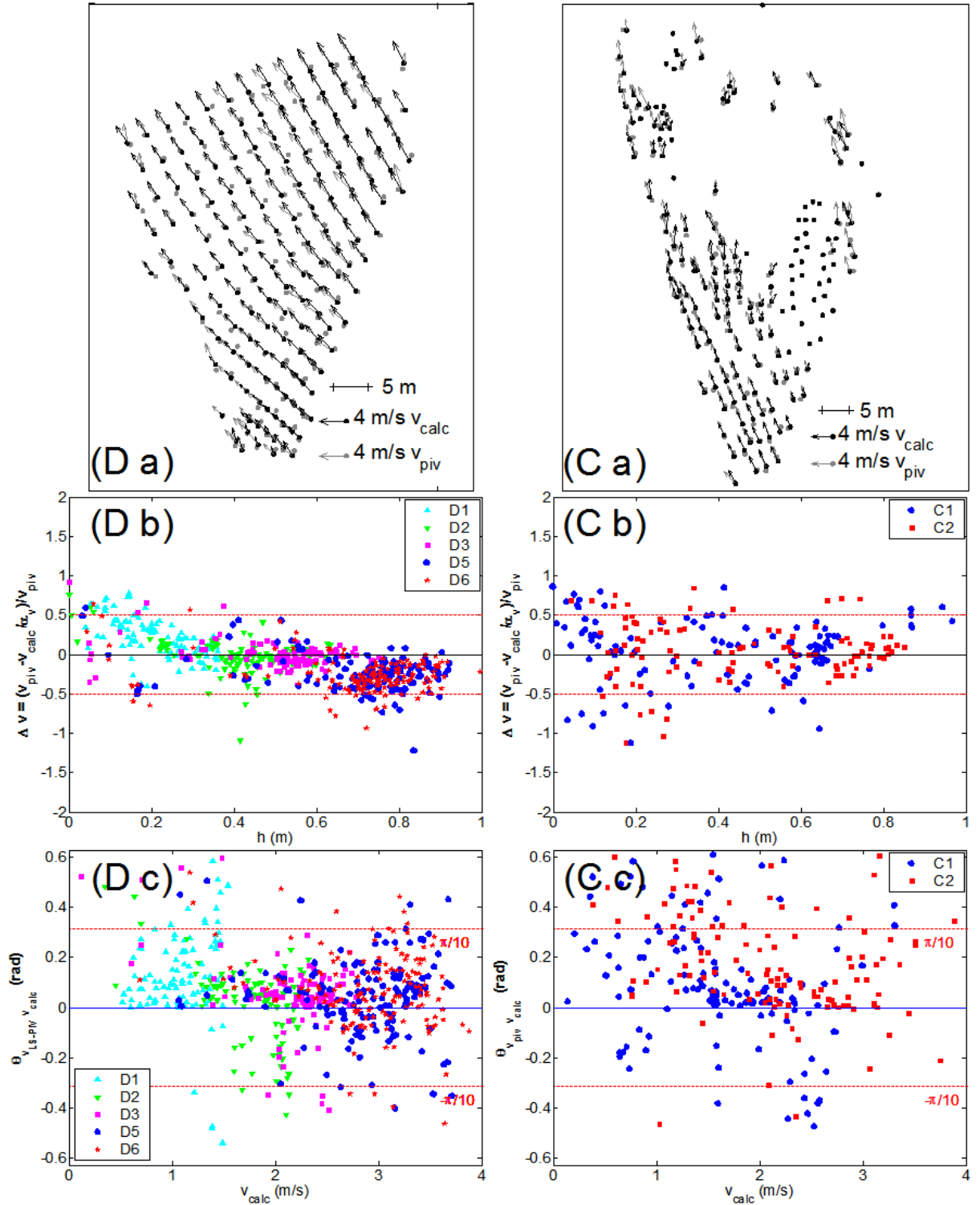


FIG. 7.6 – Comparaison dans le plan horizontal des mesures de vitesse par LS-PIV (v_{piv}) et des calculs bidimensionnels (v_{calc}) dans la topographie avant la chasse 2006. Les figure Da et Ca sont tracées avec les séquences D5 et C2.

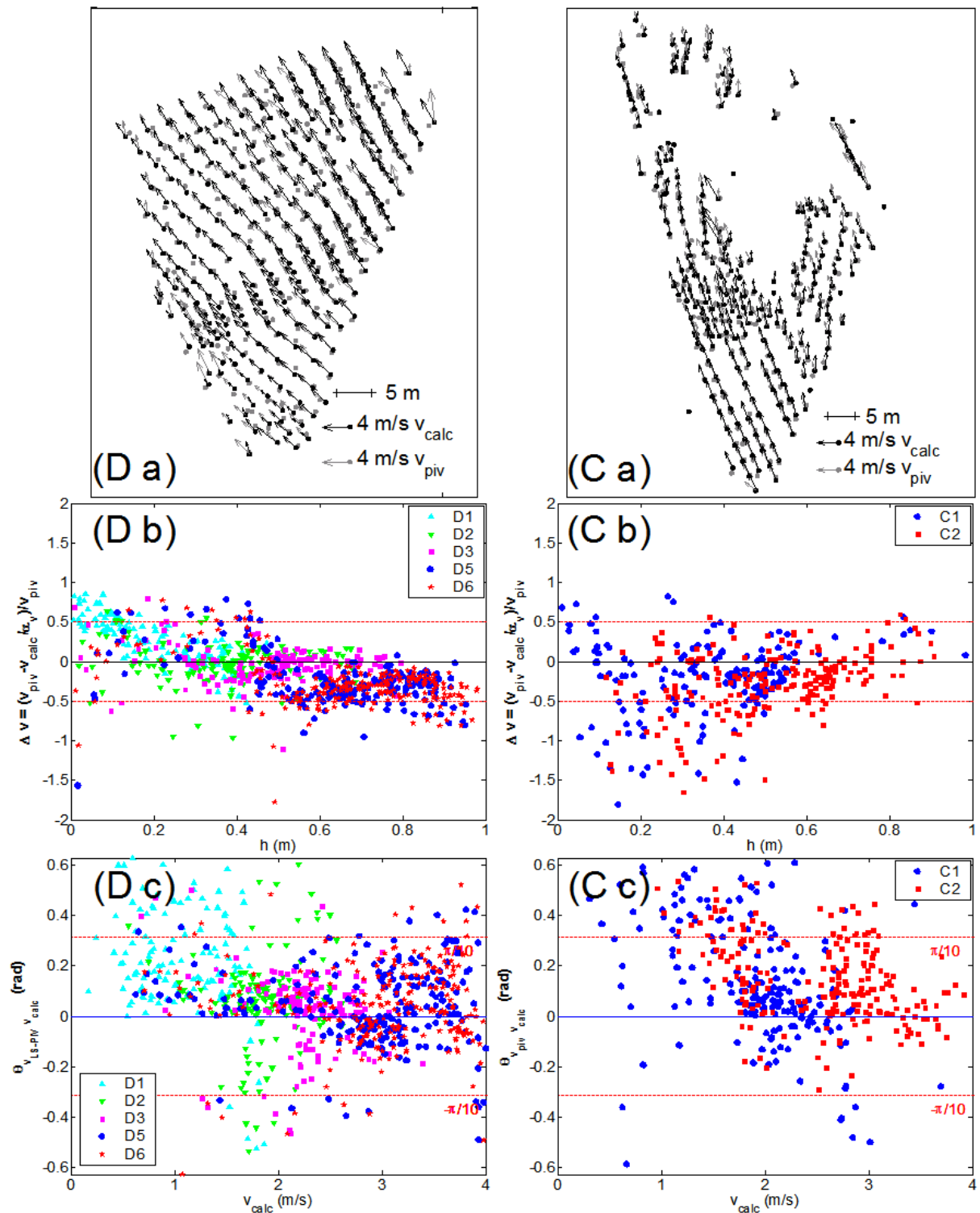


FIG. 7.7 – Comparaison dans le plan horizontal des mesures de vitesse par LS-PIV (v_{piv}) et des calculs bidimensionnels (v_{calc}) dans la topographie après la chasse 2006. Les figure Da et Ca sont tracées avec les séquences D5 et C2.

à une surface de pierre brute qu'à des graviers) ; une valeur plus élevée ne serait pas physique. Le biais est très marqué pour la séquence D1 ($Q \approx 17 \text{ m}^3/\text{s}$) pour laquelle les hauteurs d'eau sont plus faibles que 50 cm sur l'ensemble de la section. Comme cette séquence a été enregistrée au début de l'événement dans la phase de montée rapide du débit, un petit décalage temporel peut entraîner un écart considérable entre débit réel et débit estimé. Les mesures de la séquence D1 sont ainsi en meilleur accord avec les calculs 10 min plus tard. Ces écarts ne peuvent, a priori, pas être expliqués par un changement de morphologie du site, car dans la comparaison des mesures et des calculs dans la topographie après chasse (FIG 7.7) ces écarts persistent ou sont amplifiés.

Sur le SITE C, où l'écoulement est plus complexe, les écarts entre les mesures LS-PIV et les calculs ne sont plus corrélés avec la hauteur d'eau (FIG 7.6 et FIG 7.7 c). Les écarts sont cependant faibles dans le champ proche de la caméra.

La confrontation entre vitesse mesurée et vitesse calculée peut aussi être effectuée sur des sections en travers (positionnées sur la FIG 4.8). Les vitesses de surface obtenues par LS-PIV sont multipliées par le coefficient $\alpha_v = 0.79$ (cf. paragraphe 4.2.2).

Sur le SITE D, pour tous les débits, les écarts entre vitesses mesurées et calculées dans une configuration avant chasse sont satisfaisants (FIG 7.8). Les paliers visibles sur le tracé de la ligne d'eau calculée correspondent à une discrétisation grossière de la topographie sur les berges. L'absence de mesure de vitesse à proximité de la rive droite est la conséquence d'un manque de traceurs ou d'ombres dans cette zone.

Pour D1, le modèle sous-estime effectivement les vitesses, la figure montrant que la hauteur d'eau aussi est sous-estimée : des vitesses sont mesurées à proximité de la rive gauche indiquant un écoulement et donc une ligne d'eau plus élevée. Ces deux observations permettent de conclure à une sous-estimation probable du débit pour ce temps de calcul. Pour D2 et D4, les profils calculés et les profils mesurés multipliés par α_v sont en excellent accord. Pour D4, un léger écart existe à proximité de la rive droite, le modèle sous-estimant les vitesses. Cette sous-estimation du calcul à proximité de la rive gauche est atténuée pour les débits plus élevés (D5 et D6). En revanche, le profil calculé semble en meilleur accord avec les mesures LS-PIV brutes (sans coefficient multiplicateur). Trois raisons pourraient expliquer cet écart : (i) le coefficient multiplicateur α_v n'est plus adapté ; (ii) le modèle sur-estime les vitesses ; (iii) un creusement du chenal à fort débit pourrait expliquer des vitesses calculées trop fortes. L'hypothèse (i) semble peu probable car le coefficient a été déterminé à partir de mesures de vitesse au courantomètre à faibles et forts débits, il serait cependant nécessaire de tester la validité de ce coefficient sur un jeu plus important de profils de vitesse verticaux ; quant à l'hypothèse (ii) elle est difficile à vérifier sans données supplémentaires ; par contre l'hypothèse (iii), déjà évoquée pour expliquer les écarts entre limnigrammes calculés et mesurés, semble probable.

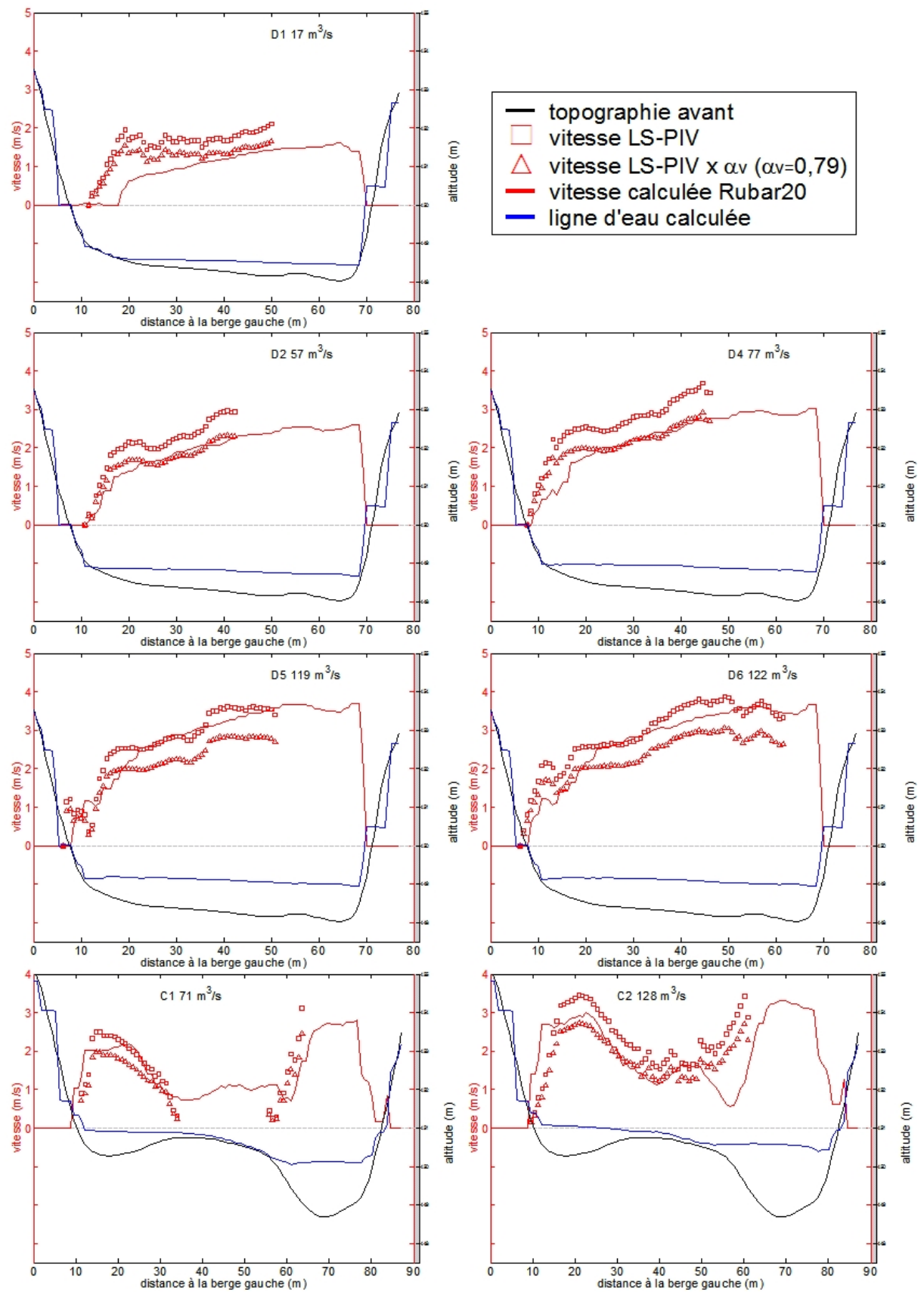


FIG. 7.8 – Comparaisons, pour les SITES D et C, sur des sections en travers, des normes des vitesses mesurées par LS-PIV et calculées par RUBAR20 dans la géométrie avant la chasse 2006 .

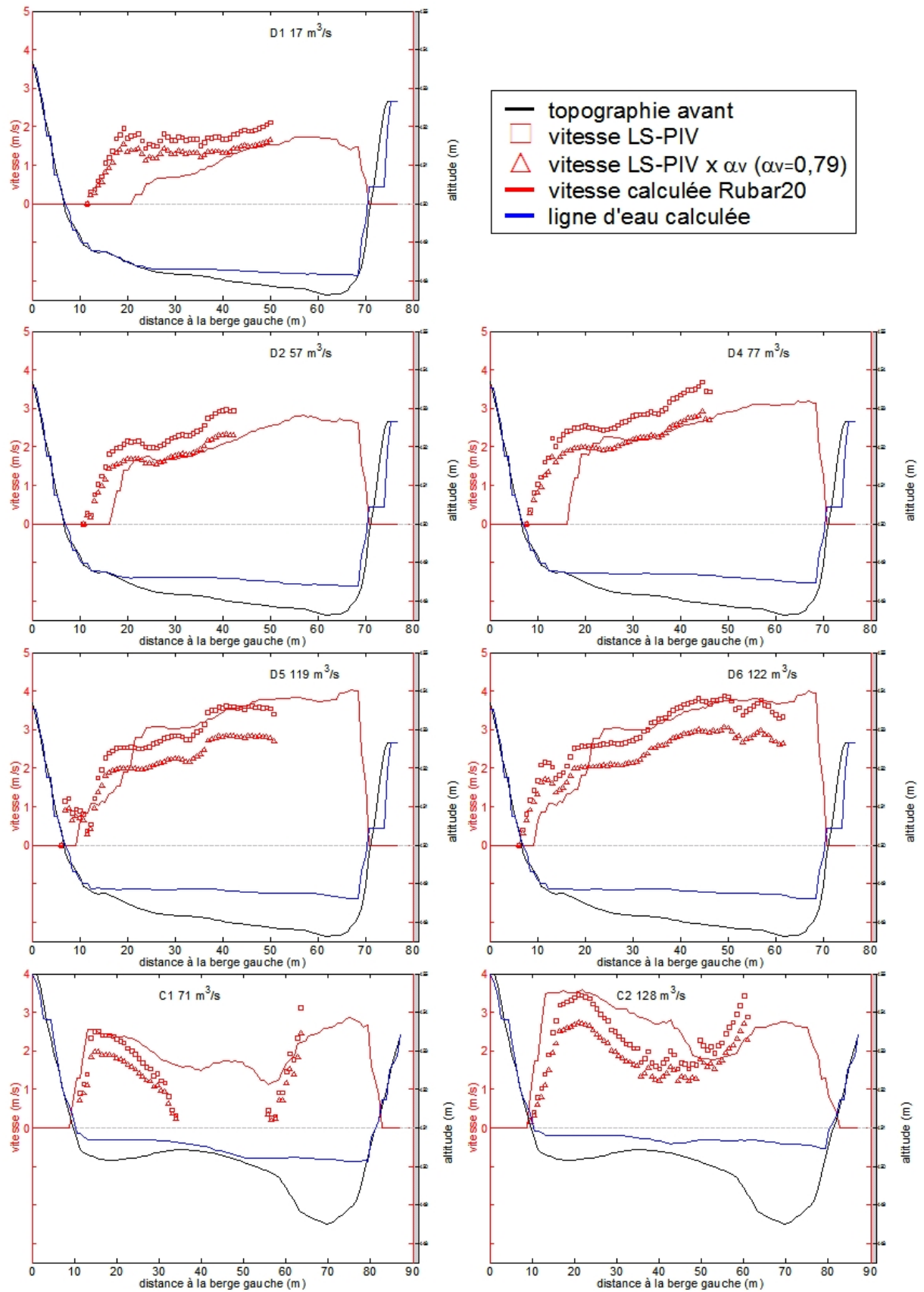


FIG. 7.9 – Comparaisons, pour les SITES D et C, sur des sections en travers, des normes des vitesses mesurées par LS-PIV et calculées par RUBAR20 dans la géométrie après la chasse 2006 .

Dans cette zone à l'aval du banc, les calculs produisent des profils transversaux de vitesses asymétriques, observés en particulier sur les mesures de la séquence D6 : la vitesse maximale est atteinte à proximité de la rive droite. Cela justifie une extrapolation des mesures sur le côté droit avec la vitesse maximale mesurée (cf. paragraphe 4.2.4.3).

Sur le SITE C, les vitesses calculées sont également proches des vitesses mesurées (deux derniers graphiques de la FIG 7.8). Dans le chenal secondaire, à proximité de la rive gauche, le profil de vitesse transversal est globalement bien reproduit par les calculs, justifiant l'utilisation d'un coefficient de Strickler moyen pour cette zone ($K_s = 40$), soit des frottements plus importants qu'à l'aval du banc. Dans le chenal principal, les vitesses calculées sont du même ordre de grandeur que les quelques vitesses qui ont été mesurées. Sur le banc, l'écoulement est bien reproduit pour le débit le plus élevé (C2). En revanche, pour le débit moyen (C1), le modèle indique un écoulement à faible vitesse (≈ 1 m/s) et à très faibles hauteurs d'eau (< 10 cm) sur le banc, alors que cet écoulement n'est pas observé dans la réalité.

La comparaison des mesures avec un calcul hydrodynamique effectué dans une topographie post-chasse (FIG 7.9) indique naturellement que cette topographie du lit est inadaptée aux calculs en début d'événement (au moins jusqu'à $Q=77$ m³/s) : les dépôts sur la queue de banc favorisent un écoulement du côté droit. Pour D5, la configuration avant chasse donne aussi de meilleurs résultats. Pour les séquences D6 et C2, observées à 122 et 128 m³/s, l'état du lit devait probablement être un état intermédiaire entre les deux topographies mesurées, car les profils de vitesses mesurés semblent être une combinaison des deux profils calculés.

Globalement, la distribution des vitesses à proximité du chenal de jonction est bien reproduite par le modèle (SITE C). Les vitesses calculées sur le SITE D sont en accord avec les mesures LS-PIV. Les lignes d'eau calculées sont aussi proches de celle mesurées dans la réalité par les limnimètres sauf sur le palier de débit maximal.

Ces confrontations suggèrent que les vitesses calculées sont généralement en bon accord avec les vitesses mesurées sauf à faible débit en début d'événement, les calculs semblant alors sous-estimer l'intensité des vitesses. Les modifications morphologiques ont surtout lieu à fort débit, i.e. lorsque le seuil de mise en mouvement des sédiments est dépassé. Pour ces débits, l'accord entre les mesures et les calculs valide la partie hydrodynamique du modèle en vue d'une utilisation pour la compréhension de la dynamique sédimentaire.

D'après les mesures de contrôle de hauteurs et de vitesses, avec des coefficients de frottement simples, le modèle rend compte de façon satisfaisante des écoulements sur le site expérimental principal. Dans toute la suite et notamment pour la modélisation du transport solide, ce paramétrage simple sera

conservé pour la modélisation de la chasse 2006 et appliqué pour la modélisation de la crue 2006.

7.3 Interprétation des changements morphologiques à partir de l'hydrodynamique : une analyse préliminaire

Les particules du lit sont mises en mouvement lorsque les forces déstabilisatrices qui s'exercent sur la particule deviennent supérieures aux forces stabilisatrices. Le paramètre de Shields représente le rapport entre les forces de frottement et portance, et la résultante du poids et de la poussée d'Archimède. Les formules de transport solide (érosion, dépôt, masse transportée) semi-empiriques sont souvent fonction de la différence entre la valeur calculée et une valeur seuil de la contrainte adimensionnelle au fond (paramètre de Shields), par exemple les formules de Meyer-Peter et Müller (1948); Hunziker (1995); Van Rijn (1984).

Une première analyse du transport solide fondée sur les variations temporelles du paramètre de Shields, en divers points du site expérimental, permet une évaluation préliminaire de la dynamique sédimentaire. Cette analyse est volontairement limitée à une granulométrie uniforme. Des expressions de la contrainte critique existent pour des granulométries étendues (Buffington et Montgomery, 1997). Une première analyse est cependant menée sur ce critère simple avec l'hypothèse d'une granulométrie uniforme et la prise en compte d'un seul diamètre médian.

La contrainte de cisaillement au fond peut être calculée suivant plusieurs méthodes, on privilégiera la plus simple face aux sorties du modèle. Ces calculs sont, dans un premier temps, effectués sans modification du fond.

Les résultats de calcul donnent la vitesse de frottement au fond (u^*). La contrainte efficace au fond est calculée par la formule $\tau = \phi \rho u^{*2}$. La contrainte efficace adimensionnelle s'écrit, d'après les équations (7.7) et (7.6) :

$$\tau^* = \frac{\phi u^{*2}}{gd_{50}(\rho_s - \rho)/\rho} = \frac{\phi h^{-1/3}(u^2 + v^2)}{K_s^2 d_{50} s} \quad (7.16)$$

où ϕ est le coefficient de correction de la contrainte efficace défini au paragraphe 7.1.2.1, d_{50} le diamètre médian des sédiments, u et v les composantes de la vitesse moyenne du fluide suivant les axes x et y respectivement, K_s le coefficient de Strickler.

On s'intéressera à trois diamètres représentatifs des particules constituant le lit : 2.5, 5 et 10 cm. Pour ces particules, le paramètre de Shields critique est pris égal à 0.047, selon la valeur classiquement utilisée (Meyer-Peter et Müller, 1948).

Des cartes du paramètre de Shields efficace sont tracées pour les débits les plus importants de chaque événement et elles sont confrontées aux répartitions granulométriques sur le banc et aux modifications topographiques observées.

L'évolution de la contrainte adimensionnelle efficace est aussi suivie au cours des événements en neuf

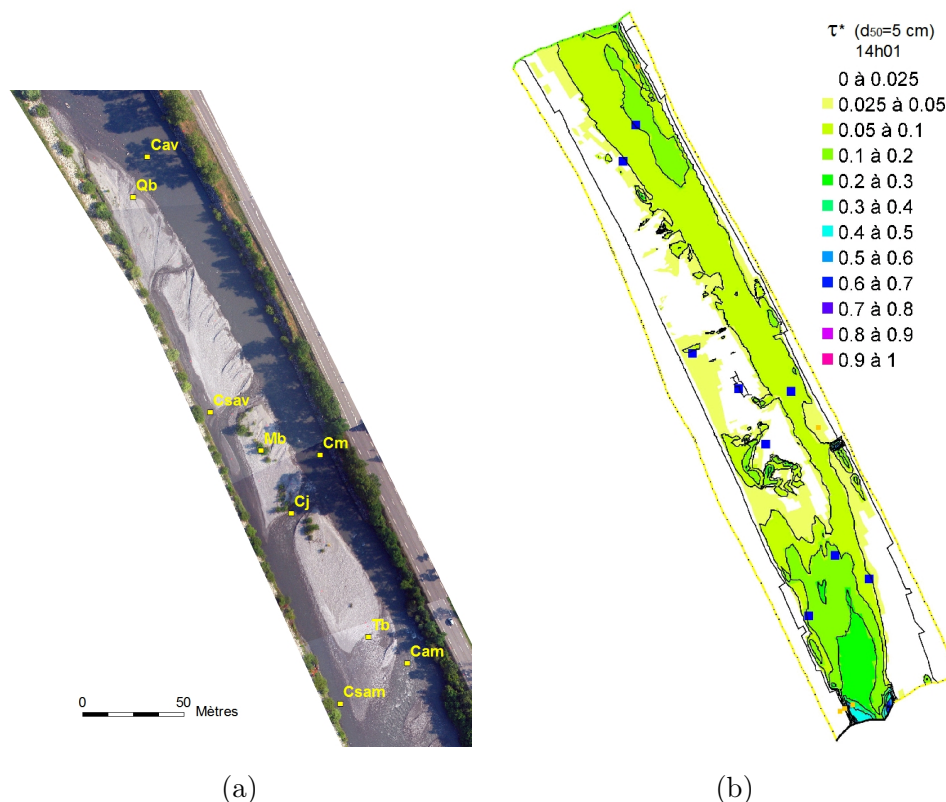


FIG. 7.10 – (a) Points de contrôle de la contrainte. (b) Distribution de la contrainte efficace adimensionnelle pour $d_{50} = 5$ cm à 14h01, $Q = 125$ m³/s.

points caractéristiques du banc de galets du site expérimental principal (FIG 7.10 a) : Tb et Qb en tête et queue de banc ; Cam, Cm et Cav à l’amont, au milieu et à l’aval du chenal d’écoulement principal ; Csam et Csav à l’amont et à l’aval du chenal secondaire ; Mb au milieu du banc ; Cj dans le chenal de jonction amont. Un dépassement de la contrainte critique est équivalent à une érosion possible alors qu’un non dépassement de cette valeur seuil est équivalent à un dépôt en cours d’événement.

7.3.1 Analyse pour l’événement : chasse 2006

Analyse au maximum de débit

La carte de la figure (FIG 7.10 b) donne le paramètre de Shields pour un diamètre médian, $d_{50} = 5$ cm, calculé sur le palier de débit ($Q = 125$ m³/s). Mis à part le voisinage proche de la limite amont, la contrainte est toujours inférieure à 0.4. La contrainte est très localement importante à l’entrée du modèle du fait du débit entrant distribué sur la moitié gauche de l’arête amont. Les zones de contrainte supérieure à la contrainte seuil $\tau_{c*} = 0.047$ sont la tête de banc, le chenal d’écoulement principal et l’amont des deux chenaux de jonction permanents. Pour les calculs d’évolution

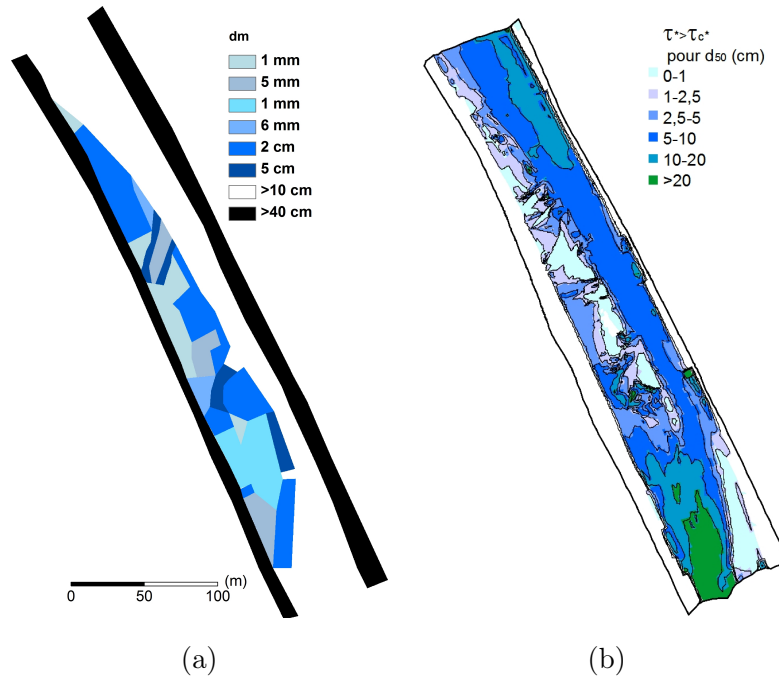


FIG. 7.11 – (a) Carte de granulométrie reprise du paragraphe 5.1.4. (b) Dépassement du paramètre de Shields critique en fonction du diamètre à 14h01, $Q = 125 \text{ m}^3/\text{s}$.

du fond, il faut donc s'attendre à des affouillements de ces zones sur le palier de débit maximal. Chacune de ces zones correspond clairement à des zones d'érosion au cours de la chasse (FIG 7.12 b).

Le paramètre de Shields représenté est calculé pour un diamètre représentatif de 5 cm. Pour les diamètres inférieurs, ce paramètre est évidemment plus important, les particules étant susceptibles d'être mise en mouvement dans des zones plus étendues ; pour les particules de taille plus grandes, ce paramètre est moins élevé, les particules étant plus difficilement mobilisées. La granulométrie du banc n'est pas uniforme, il faut donc prendre en compte différents diamètres représentatifs.

Les zones de dépassement du nombre de Shields critique pour des diamètres médians compris entre 1 et 20 cm sont représentées sur le secteur (FIG 7.11 b) pour le même débit ($Q = 125 \text{ m}^3/\text{s}$). Les particules de diamètre supérieur ou égal à 20 cm ne peuvent être mobilisées que sur la tête de banc et à l'amont du chenal d'écoulement principal. Les particules de diamètre compris entre 10 et 20 cm peuvent, en plus, être mobilisées sur une zone plus étendue de la tête de banc, à l'aval du chenal d'écoulement principal, à l'aval du chenal de jonction. Pour les diamètres de l'ordre de 5 cm on retrouve la carte (FIG 7.10 b). Quelques zones ne sont concernées que par la mise en mouvement de sédiments de taille inférieure à 1 cm : le sillage du banc amont, i.e. la partie amont en rive droite du site ; des parties élevées en milieu de banc et la queue de banc.

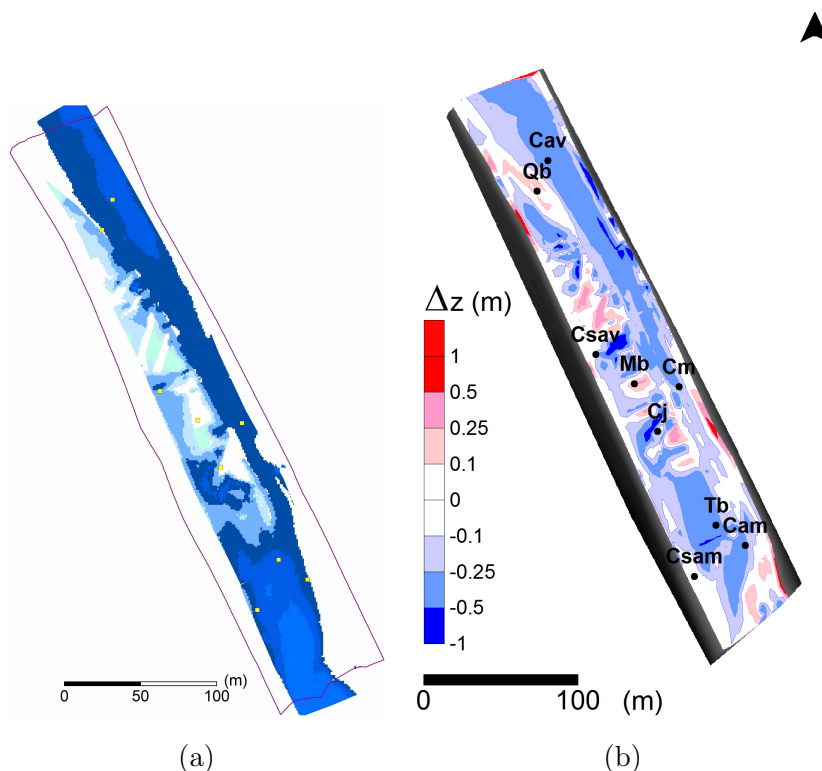


FIG. 7.12 – Modification morphologique des zones granulométriques. (a) zones susceptibles d'être mobilisées (zones de couleur) à 14h01, $Q = 125 \text{ m}^3/\text{s}$. Le dégradé de bleu donne l'intensité de la contrainte. (b) Modifications observées, chasse 2006.

La confrontation avec la carte de granulométrie, établie sur le terrain suivant la méthode du paragraphe 3.2.1, donne, suivant ce critère, les zones susceptibles d'être mobilisées au plus fort de la chasse (FIG 7.12 a). Pour établir cette carte on a utilisé les deux critères (i) granulométrie et (ii) dépassement ou non du seuil de contrainte avec des opérations sur les rasters (ArcMap) : la zone est mobilisable si, pour le diamètre moyen d de la zone, la contrainte de cisaillement adimensionnée par ce diamètre est supérieure à la contrainte critique $\tau_{c*} = 0.047$. Cette carte permet de prendre en compte les variations de la granulométrie de surface. Au plus fort de l'événement, une grande partie du site expérimental est mobilisable excepté : le sillage du banc situé à l'amont ; le sillage du banc étudié ; la zone de chenaux de jonction éphémères dans la partie aval du banc ; des zones peu étendues au milieu du banc. Toutes ces surfaces correspondent à des zones de dépôt au cours de la chasse.

Analyse en cours de chasse

L'évolution temporelle de la contrainte de cisaillement au fond dépend de la localisation sur le banc (FIG 7.13). En milieu de banc (Mb) et queue de banc (Qb) il n'y a pas de mise en mouvement des particules de taille supérieure à 2.5 cm au cours de l'événement de chasse. En queue de banc

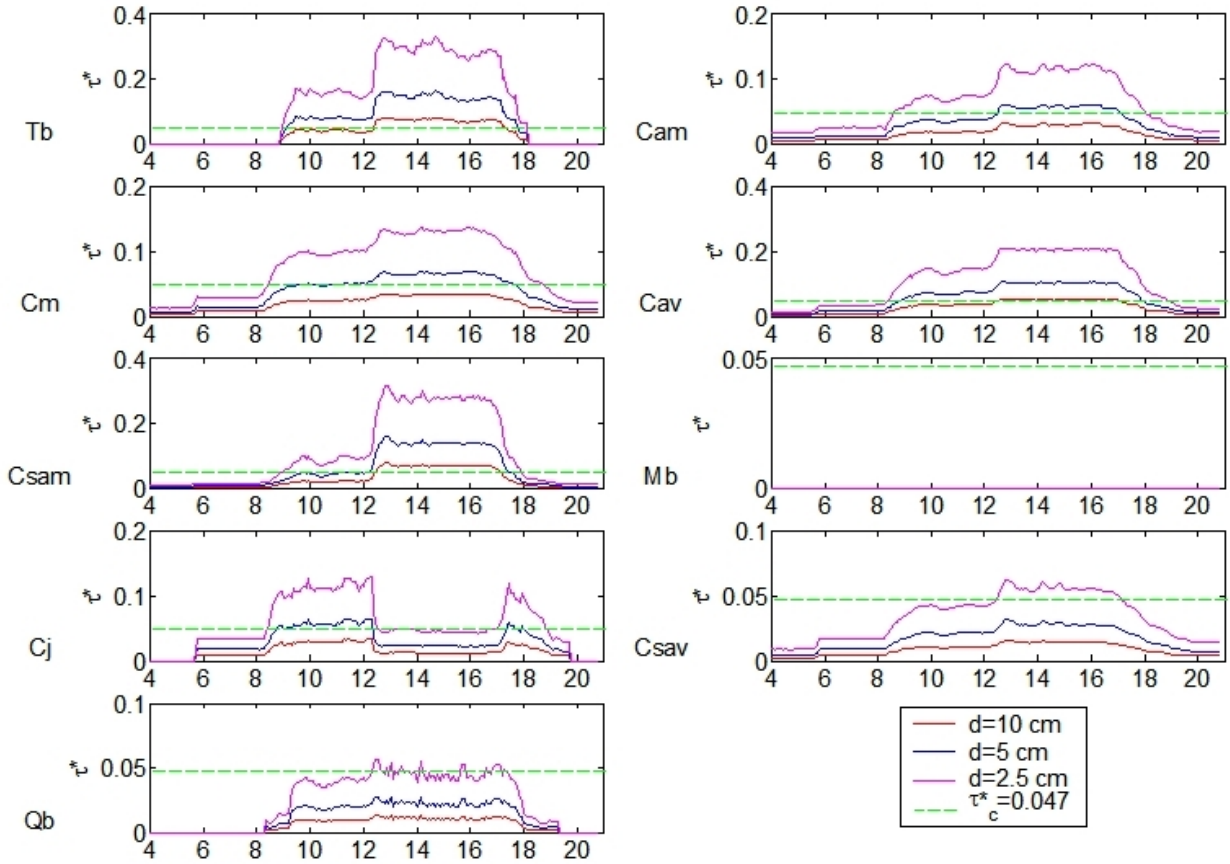


FIG. 7.13 – Evolution du nombre de Shields en différents points du banc au cours du temps pour la chasse 2006.

(Qb) les particules de taille inférieure à 1 cm seulement sont mobilisées, et ce pour les pointes de débit sur le palier maximal. Toutes les évolutions temporelles de contrainte suivent la forme de l'hydrogramme sauf dans le chenal de jonction (Cj). Dans cette zone, pour un débit supérieur à $80 \text{ m}^3/\text{s}$, la contrainte diminue. On retrouve ici l'effet de barrière du banc décrit au paragraphe 5.1.2 : à faible débit, l'eau s'écoule dans le chenal de jonction, à fort débit l'eau s'écoule surtout sur le banc. Pour les débits supérieurs à $80 \text{ m}^3/\text{s}$, une modification de la structure de l'écoulement est observée. Pour ce point (Cj) deux phases d'érosion seraient dissociées. Les phases d'érosion les plus marquées sont au début et à la fin de l'hydrogramme. En tête de banc (Tb) et à l'amont du chenal secondaire (Csam), si les particules de diamètre inférieur à 5 cm sont mobilisables pendant quasiment toute la chasse, les particules de diamètre supérieur à 10 cm ne peuvent être érodées que pendant le palier de débit maximal. Dans le chenal d'écoulement principal (Cam, Cm, Cav), les particules de diamètre supérieur à 10 cm ne sont pas toujours mobilisables alors que les particules de diamètre inférieur à 5 cm le sont, au moins sur le palier de débit maximal. A l'aval du chenal de jonction, seules les particules de diamètre inférieur à 1 cm sont mobilisables et seulement pour le palier de débit.

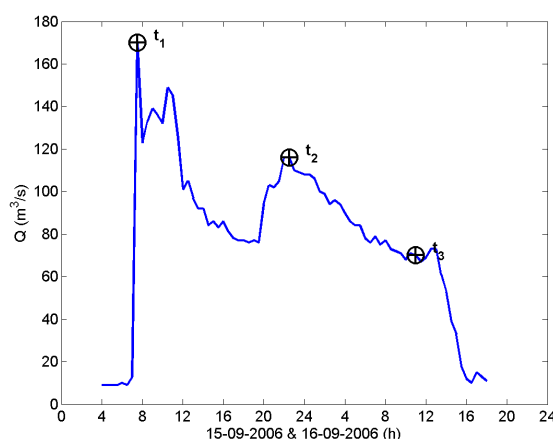


FIG. 7.14 – Hydrogramme de crue et temps d’analyse de la contrainte au fond. $t_1=15\text{-}09\text{-}2006\ 7\text{h}30$, $t_2=15\text{-}09\text{-}2006\ 22\text{h}30$, $t_3=16\text{-}09\text{-}2006\ 11\text{h}00$.

7.3.2 Analyse pour la crue naturelle (automne 2006)

Analyse à trois instants de la crue

Pour l’événement de crue naturelle de l’automne 2006, la carte des contraintes est analysée au maximum de la crue pour un débit de $170\ \text{m}^3/\text{s}$ et pour deux autres phases à $116\ \text{m}^3/\text{s}$ et $70\ \text{m}^3/\text{s}$ (FIG 7.14). Comme dans le paragraphe précédent, les cartes de contrainte pour un diamètre médian de 5 cm et les cartes de dépassement de la contrainte critique sont tracées (FIG 7.15). Du fait d’une topographie initiale similaire, et d’un débit de crue du même ordre de grandeur, la distribution spatiale de la contrainte est relativement similaire à celle de la chasse 2006. La surface du banc est plus ou moins affectée par l’érosion en fonction du débit : une zone sans érosion existe dans le sillage du banc situé en amont en rive droite et l’érosion des sédiments grossiers a lieu principalement dans le chenal d’écoulement principal.

Au plus fort de la crue (t_1 et FIG 7.15 a), les particules de diamètre inférieur à 5 cm sont susceptibles d’être érodées dans le chenal d’écoulement principal et en plusieurs endroits du banc. En revanche, les particules de diamètre supérieur à 20 cm ne peuvent être érodées en aucun endroit du site (FIG 7.15 b). Les particules de diamètre compris entre 10 et 20 cm peuvent être érodées seulement à l’amont et à l’aval du chenal d’écoulement principal. Les particules plus fines, i.e. inférieures à 5 cm, peuvent être mobilisées sur le banc.

En cours d’événement pour un débit intermédiaire (t_2), les zones d’érosion sont nettement moins étendues. Les particules de diamètre compris entre 10 et 20 cm peuvent être érodées dans des zones réduites en amont et en aval du chenal d’écoulement principal. Seules les particules fines, i.e. inférieures à 2.5 cm, peuvent être érodées sur le banc. Comme pour t_1 , des zones d’érosion des particules

grossières persistent sur le banc à proximité des chenaux de jonction.

En fin d'événement (t_3), le milieu du banc n'est quasiment plus concerné par de probables érosions, seules les particules relativement fines, i.e. de taille inférieure à 1 cm, peuvent être érodées. Les particules inférieures à 10 cm sont toujours susceptibles d'être reprises en tête de banc.

Comme au paragraphe précédent une carte de reprise des particules de surface est tracée pour le débit de pointe ($170 \text{ m}^3/\text{s}$). La confrontation entre la carte de granulométrie de surface mesurée au début de l'événement (cf. paragraphe 5.1.4 et FIG 5.11) et la carte des dépassements de la contrainte seuil (FIG 7.15 b) est obtenue par manipulation de rasters avec ARCMAP. Cette carte (FIG 7.16 a) indique des érosions probables quasiment sur tout le site expérimental excepté dans le sillage du banc amont et en plusieurs endroits sur le milieu du banc. Ces motifs sont très similaires à ceux obtenus par le même raisonnement pour la chasse 2006 (FIG 7.12 a). Mis à part dans le chenal secondaire (Cs) où des dépôts observés correspondent bien à une absence d'érosion (contrainte inférieure au seuil), ce raisonnement ne permet pas d'expliquer les importants dépôts observés au cours de la crue. Cette analyse indique une phase d'érosion en début d'événement. Pour expliquer les dépôts observés, il est indispensable de s'intéresser à la dynamique sédimentaire au cours de toute la crue.

Analyse en cours de crue

L'évolution temporelle de la contrainte de cisaillement au fond dépend ici aussi fortement de la localisation sur le banc (FIG 7.17 et FIG 7.10 (a) pour la localisation des points).

En queue de banc (Qb), dans le chenal de jonction (Cj), à l'aval du chenal secondaire (Csav), la contrainte seuil n'est jamais dépassée pour les particules de diamètre supérieur à 2.5 cm. Les particules de diamètre supérieur à 10 cm sont susceptibles d'être érodées seulement en tête de banc (Tb), au milieu et à l'aval du chenal d'écoulement principal (Cm et Cav). Pour ces points et ce diamètre, la contrainte adimensionnelle atteint juste sa valeur critique. A l'amont du chenal secondaire (Csam), cette valeur est à peine dépassée pour le pic de la crue. En tête de banc, au milieu du banc, à l'amont du chenal secondaire, à l'aval du chenal de jonction, les particules de diamètre inférieur à 5 cm peuvent être érodées pendant tout l'événement, et plus exactement pour les débits supérieurs à $70 \text{ m}^3/\text{s}$ environ. Mis à part les particules les plus fines (inférieures à 2.5 cm) et pour les maxima de débit principal et secondaire, le milieu de banc (Mb) n'est probablement pas érodé. Dans le chenal de jonction (Cj), l'évolution particulière de la contrainte observée au cours de la chasse n'est pas visible sur cet événement de crue, probablement du fait d'une topographie différente. Pour tous les points choisis et pour lesquels le seuil de contrainte est dépassé, l'évolution temporelle suit globalement celle de l'hydrogramme (FIG 7.14), sauf au milieu du chenal (Cm), où, une fois le pic de crue passé, la contrainte fluctue autour d'une valeur constante.

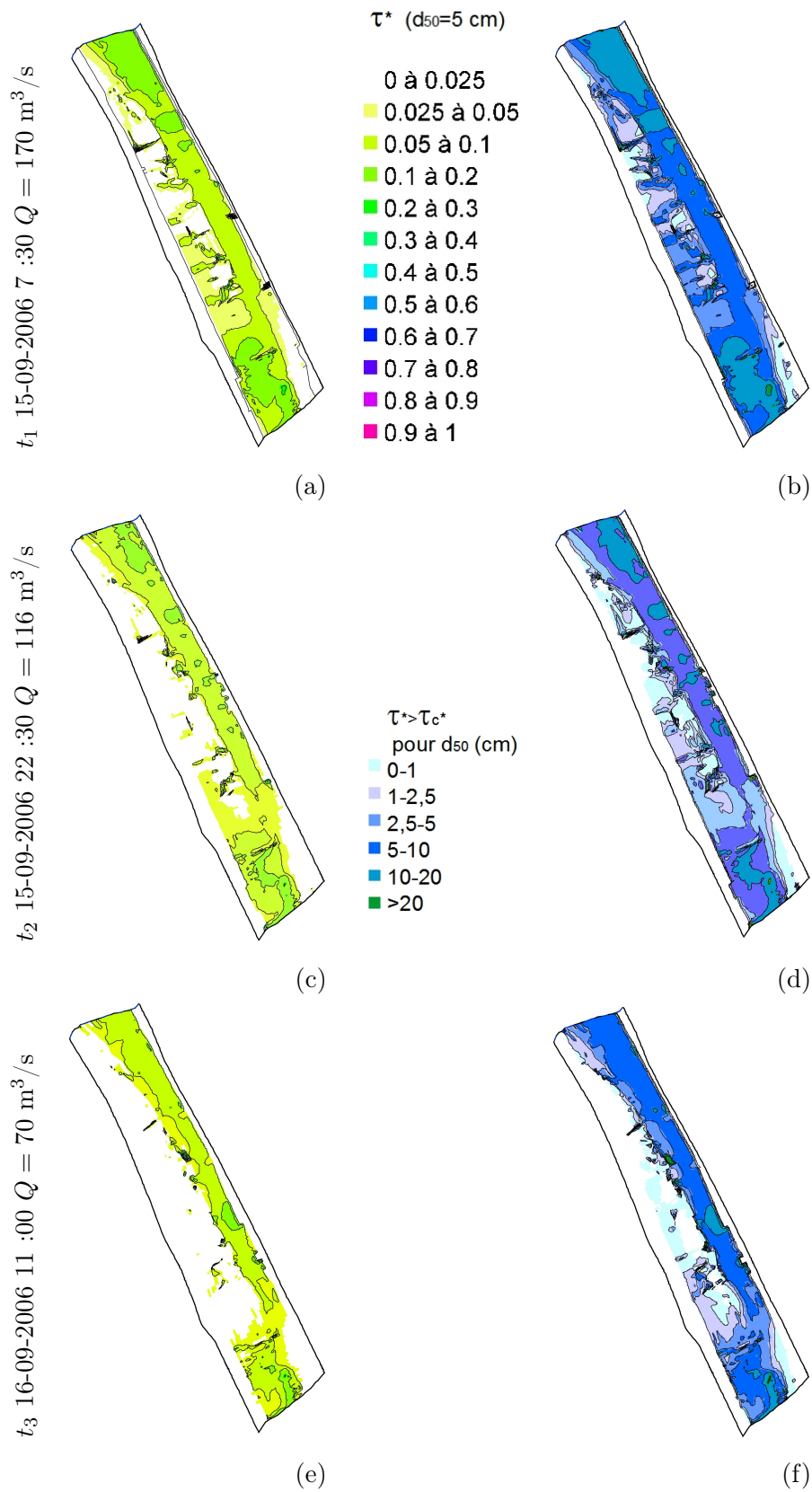


FIG. 7.15 – Contrainte et modification morphologique des zones granulométriques pour la crue 2006. Paramètre de Shields pour un diamètre médian de 5 cm (colonne de gauche) et dépassement du paramètre de Shields critique en fonction du diamètre (colonne de droite).

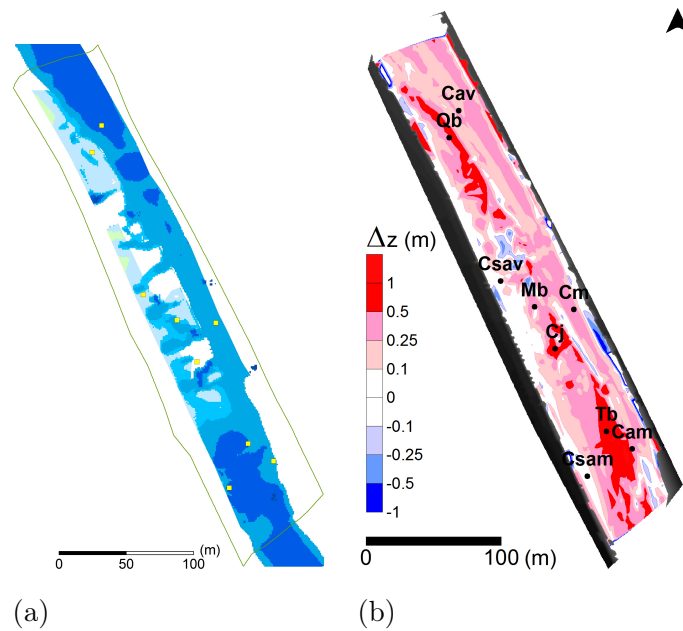


FIG. 7.16 – Contrainte et modification morphologique des zones granulométriques pendant la crue 2006. (a) Zones susceptibles d'être mobilisées (zones de couleur) à 7h30 le 15-09-2006 ($Q=170 \text{ m}^3/\text{s}$). Le dégradé de bleu donne l'intensité de la contrainte. (b) Modifications topographiques observées.

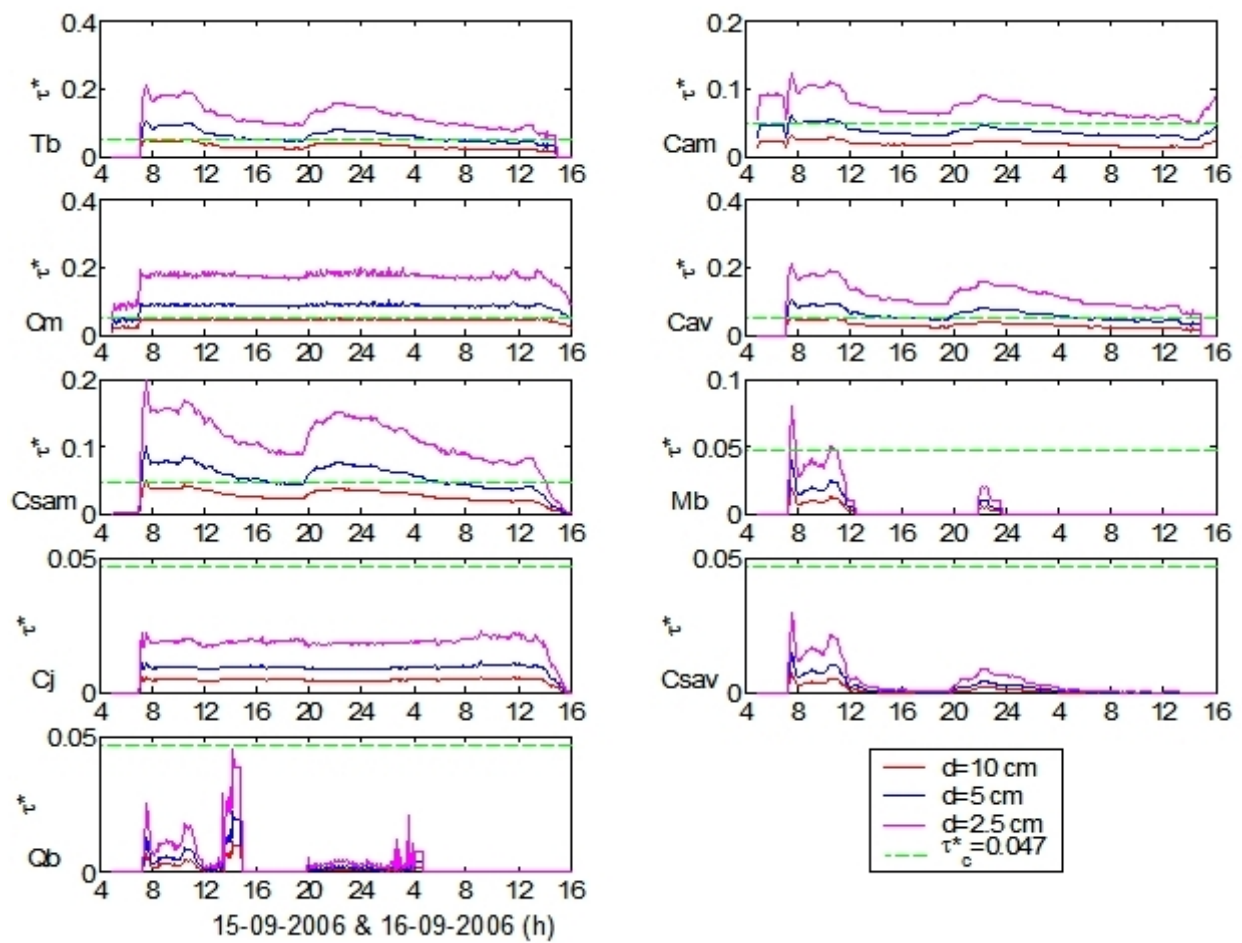


FIG. 7.17 – Evolution du nombre de Shields en différents points du banc au cours de la crue 2006.

7.3.3 Synthèse de l'analyse des calculs hydrodynamiques

Une première analyse fondée sur le dépassement de la contrainte seuil a été menée pour quelques diamètres représentatifs. Les cartes de granulométrie de surface relevées sur le terrain ont été intégrées au raisonnement. Cette analyse qualitative restitue bien les zones d'érosion dans le cas de la chasse 2006, les secteurs à forte contrainte correspondant à des érosions prononcées. Par contre dans le cas de la crue de l'automne 2006, il est plus difficile d'expliquer par cette méthode les forts dépôts observés.

Ce premier pas d'interprétation qualitative souligne l'intérêt d'une modélisation complète du transport sédimentaire sur le site expérimental. L'objectif étant alors d'identifier les dépôts et d'obtenir une quantification des volumes de sédiments déposés. Une modélisation numérique des flux sédimentaires permet, en outre, d'évaluer la dynamique sédimentaire au cours de l'événement, et donc de distinguer une éventuelle succession de phases d'érosion et de dépôt.

7.4 Modélisation du transport solide sur le site expérimental principal

Des calculs de transport sédimentaire avec ou sans évolution du fond ont été effectués pour les deux événements de référence (la chasse 2006 et la crue naturelle de l'automne 2006). Les choix de calage de l'hydrodynamique (paragraphe 7.2) effectués sur les données de la chasse 2006 sont conservés pour tous les calculs.

7.4.1 Evolution morphologique au cours de la chasse 2006

Les résultats de calculs numériques sont comparés avec les évolutions morphodynamiques du site expérimental principal observées (paragraphe 5.1). Le transport des sédiments fins en suspension est modélisé indépendamment du transport par charriage des sédiments grossiers.

7.4.1.1 Modélisation du transport par charriage des sédiments grossiers

Paramètres de calcul

Les calculs numériques sont effectués avec ou sans modification du fond. Le calcul du transport sédimentaire se faisant pour un seul diamètre médian, trois diamètres représentatifs sont utilisés (1 cm, 4 cm et 10 cm). Les formules utilisées pour les termes d'érosion et de dépôt sont détaillées au paragraphe 7.1.2.1. Pour tous les cas, la contrainte adimensionnelle critique est choisie égale à $\tau_{c*} = 0.047$. La vitesse des sédiments est calculée suivant la formule (7.11) avec un coefficient $\zeta = 1$. Une distance de chargement élevée a été choisie.

Résultats

Les calculs sans évolution du fond (non présentés ici) conduisent à des amplitudes d'érosion/dépôt localisées et très prononcées peu réalistes. Cet effet est dû à l'absence de ré-actualisation du fond à chaque pas de temps ; par conséquent, il est normal qu'une maille garde une évolution monotone au cours de l'événement. Dans la réalité, à conditions hydrodynamiques et sédimentaires équivalentes, une fois qu'une maille a été érodée ou a subi un dépôt, les variables hydrodynamiques se ré-ajustent à la nouvelle topographie, ce qui conduit à une évolution différente de la topographie. Les résultats analysés dans la suite sont donc obtenus par des calculs avec évolution du fond.

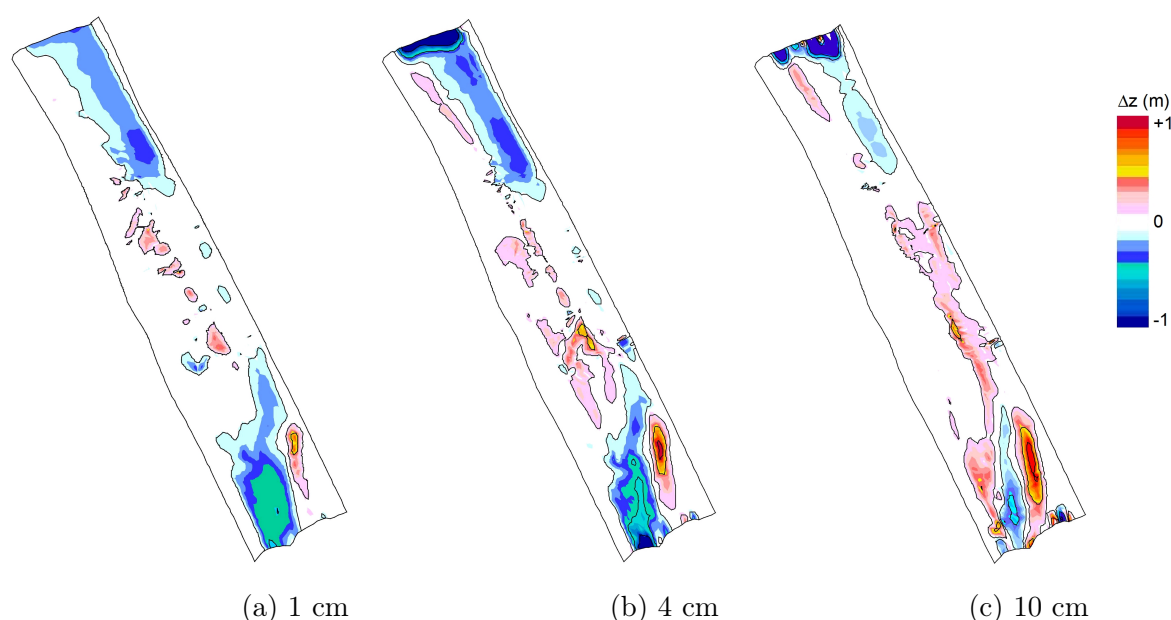


FIG. 7.18 – Evolution morphologique calculée pour la chasse 2006 et pour trois diamètres médians. Les dépôts sont dans les teintes de rouge, et les érosions dans les teintes de bleu, le pas de l'échelle de couleur est 0.1 m. Les isolignes ont été tracées pour les valeurs $[-1, -0.5, -0.1, 0.1, 0.5, 1]$ (m).

Les résultats de modification de la bathymétrie indiquent des érosions très importantes à proximité des arêtes entrantes et sortantes (FIG 7.18). En entrée, cet effet s'explique par un choix inapproprié de la condition limite amont. L'absence de mesures du débit solide, a en effet conduit à une condition arbitraire. Néanmoins, l'écoulement se charge sur les premières mailles à l'amont du modèle, permettant de supposer que, plus à l'aval, le débit solide se rapproche des conditions naturelles. En sortie, la condition limite aval conduisant au meilleur calage de la ligne d'eau étant une condition de régime critique, il est fort possible que cette condition génère les fortes érosions constatées.

La comparaison entre les modifications du lit calculées (FIG 7.18) et les changements observés (FIG 7.12 b) permet d'identifier les correspondances modèle-observations. Quel que soit le diamètre des grains dans le calcul, un dépôt supérieur à 50 cm est calculé dans le sillage du banc situé à l'amont ; ce dépôt est observé dans la réalité mais il ne dépasse pas 25 cm. Une érosion est également calculée à l'aval du chenal d'écoulement principal ; pour les diamètres 1 et 4 cm, la profondeur d'érosion calculée est du même ordre de grandeur que celle observée. Il semble que l'érosion importante (>10 cm) du banc n'est pas reproduite par le modèle sauf pour la tête de banc. Néanmoins, les calculs indiquent une érosion d'une grande partie du banc, mais seulement de l'ordre de quelques centimètres pour les sédiments de diamètre médian 1 cm. Il en va de même pour l'érosion du chenal de jonction amont, qui est bien reproduite par les calculs mais est inférieure à 10 cm. En revanche, pour le calcul avec le diamètre 1 cm, les dépôts observés dans les zones de chenaux de jonction sont bien reproduits avec des amplitudes proches de celles observées. Les calculs pour les diamètres 4 cm et 10 cm rendent bien compte du dépôt, de hauteur comprise entre 10 et 25 cm, observé en queue de banc. Par contre, les dépôts en bord de banc calculés par le modèle pour le diamètre 10 cm ne sont pas mesurés dans la réalité. Ces résultats différenciés illustrent la difficulté de choisir un diamètre représentatif sur l'ensemble du banc.

Finalement, si les érosions et les dépôts au cours de la chasse ne sont pas reproduites pour l'ensemble du site avec la bonne amplitude, on peut noter que les ordres de grandeur des évolutions calculées sont corrects et que les principales caractéristiques observées sont reproduites par les calculs.

Des tests ont été effectués pour évaluer l'effet de la distance de chargement L_c sur les évolutions bathymétriques calculées. Les résultats sont présentés pour un diamètre médian de 4 cm, à 11h30, pour un débit de $77 \text{ m}^3/\text{s}$ (FIG 7.19). Ce paramètre, caractéristique du retard spatial dans la saturation de la capacité solide, intervient au dénominateur des termes d'érosion et de dépôt décits par les équations (7.5), (7.8) et (7.9). Les résultats des calculs (FIG 7.19) confirment que plus la distance de chargement est choisie faible plus les échanges avec le fond sont importants. Les érosions et dépôts calculés dépassent de plusieurs mètres ceux observés (FIG 7.12 b). En particulier, les érosions en entrée et en sortie de modèle sont fortement amplifiées jusqu'à des valeurs non réalistes. L'érosion régressive de l'aval est, par conséquent, propagée quasiment jusqu'au milieu du site.

La valeur choisie ($L_c = 1000 \text{ m}$) peut sembler élevée mais c'est celle qui rend compte au mieux des modifications observées.

7.4.1.2 Modélisation du transport par suspension des sédiments fins

Paramètres de calcul

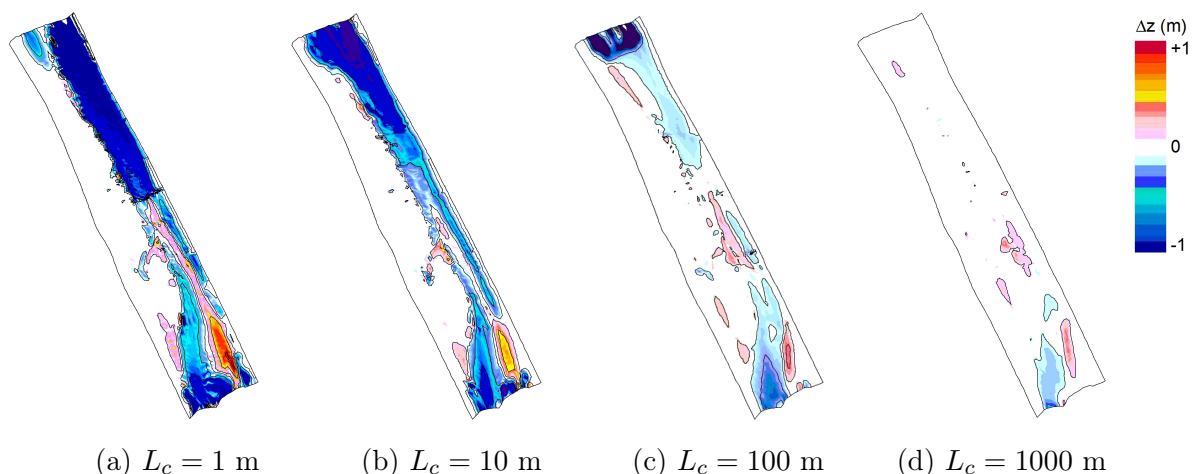


FIG. 7.19 – Calcul du transport solide par charriage, effet de la distance de chargement. Les cartes d'évolution sont tracées pour $t=41500=11h30$ soit $Q = 77 \text{ m}^3/\text{s}$ et un diamètre médian de 4 cm. Les dépôts sont dans les teintes de rouge, et les érosions dans les teintes de bleu, le pas de l'échelle de couleur est 0.1 m. Les isolignes ont été tracées pour les valeurs $[-1, -0.5, -0.1, 0.1, 0.5, 1]$ (m).

Les calculs sont effectués sans modification du fond par le transport en suspension. La topographie est celle qui correspond au début de l'événement, les modifications topographiques engendrées par les MES étant a priori négligeables devant celles causées par le charriage. Ce maillage a été privilégié pour ses temps de calcul beaucoup moins longs que ceux dans la topographie après chasse. Pour l'étude des dépôts de sédiments fins à la décrue, il aurait néanmoins été judicieux de faire des calculs dans la topographie post-chasse. Il aurait également pu être envisagé d'utiliser les évolutions du fond générées par le charriage pour faire les calculs de transport par suspension.

Les formules utilisées pour les termes d'érosion et de dépôt sont détaillées au paragraphe 7.1.2.2. La contrainte critique de sédimentation et d'érosion est calculée à partir du diagramme de Shields (FIG 7.1). Le coefficient α est choisi égal à 10^{-2} . D'après les courbes granulométriques obtenues pour les sédiments fins en suspension et déposés (FIG 5.13), deux diamètres médians sont utilisés (0.2 mm et $15 \mu\text{m}$). La concentration imposée en condition limite amont est celle mesurée au cours de la chasse (FIG 5.1 b).

Résultats

Une analyse qualitative des taux de dépôts est effectuée. La comparaison entre les taux de dépôt calculés pour un débit de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ et ceux observés sur le banc après la chasse (FIG 7.20 et paragraphe 5.1.5) indique une bonne correspondance. Seuls les taux de dépôts positifs, correspondant aux dépôts et non aux érosions, sont représentés. Les dépôts en queue de banc, dans le chenal

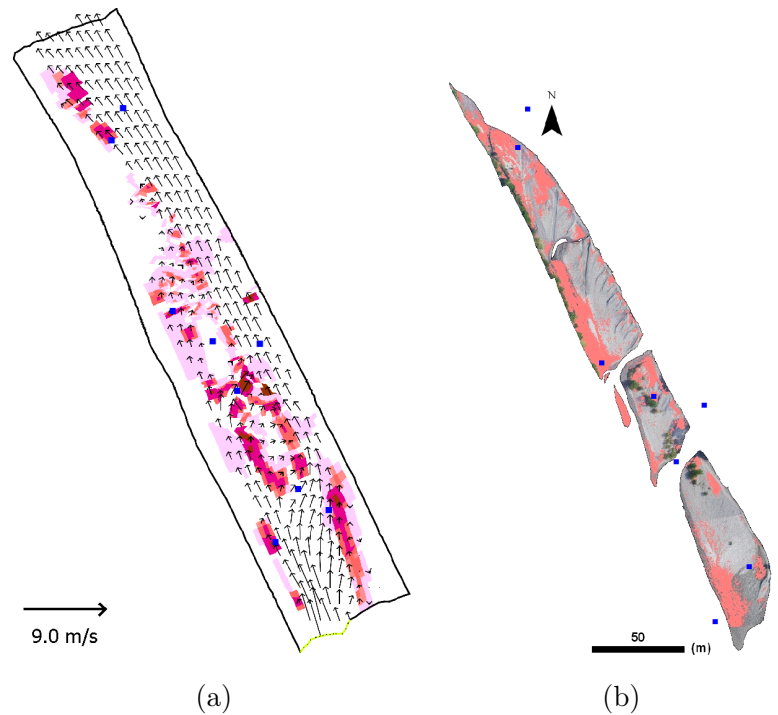


FIG. 7.20 – Modélisation du transport solide par suspension sur le site expérimental principal. (a) Taux de dépôts calculés pour un débit de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ (les nuances de rouge donnent l'intensité de dépôt). (b) Dépôts observés après la chasse 2006.

secondaire et sur le bord du banc sont bien représentés par le calcul. Les dépôts simulés dans le sillage du banc situé à l'amont n'ont pas été observés sur les photographies aériennes, car immergés sous plusieurs dizaines de centimètres d'eau. Lors des campagnes topographiques, il a pu cependant être constaté que cette partie du lit était composée de sédiments très fins rendant la progression difficile. Sur le banc, les dépôts dans le sillage de la végétation, notamment à l'aval du point Mb, ne sont naturellement pas représentés par le calcul, puisque la végétation n'est pas prise en compte. Pour la modélisation des sédiments fins, la présence d'un lit de galets doit être prise en compte. Les calculs ne doivent pas être effectués sans modification du fond, dans ce cas des érosions continues du lit conduiraient à des concentrations en MES trop importantes. Un fond inérodable doit être imposé dans toutes les zones de galets. Pour prendre en compte la présence de sédiments fins en début d'événement, une carte des sédiments fins mobilisables pourrait être établie à partir des mesures de terrain (FIG 5.12).

En gardant un calcul du transport par charriage indépendant de la suspension, il pourrait aussi être envisagé d'intégrer les modifications du fond (générées par le charriage) dans les calculs des dépôts liés à la suspension. Il faudrait alors autoriser le dépôt des MES seulement lorsque le lit de galets est stabilisé.

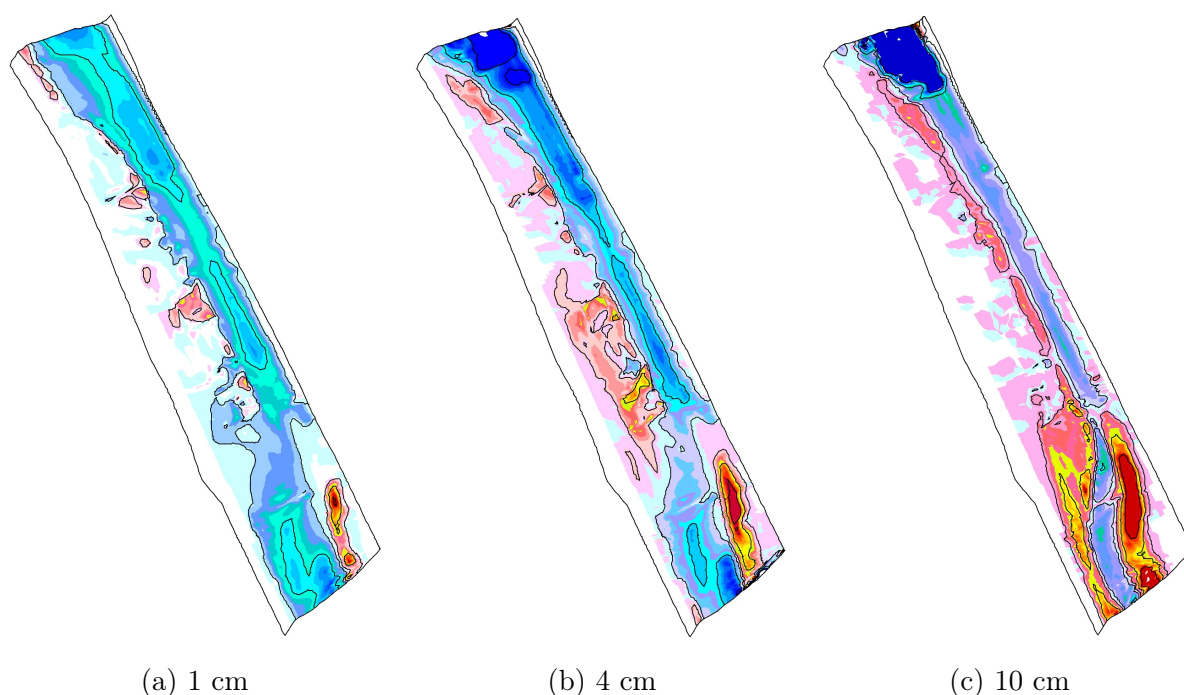


FIG. 7.21 – Modélisation du transport par charriage pendant la crue 2006. Evolution bathymétrique calculée jusqu'à 2h30 le 16-09-2006. Les dépôts sont dans les teintes de rouge, et les érosions dans les teintes de bleu, le pas de l'échelle de couleur est 0.1 m. Les isolignes ont été tracées pour les valeurs $[-1, -0.5, -0.1, 0.1, 0.5, 1]$ (m).

7.4.2 Evolution morphologique au cours de la crue naturelle (automne 2006)

L'étude de la crue naturelle est limitée au transport solide par charriage. L'objectif étant de voir si le modèle reproduit les dépôts observés au cours de cet événement.

Les tendances d'érosion/dépôt pour la crue calculée (FIG 7.21) sont proches de celles observées pendant la chasse, il y a cependant un dépôt de faible hauteur sur le banc pour les sédiments les plus grossiers (4 et 10 cm). La prise en compte de la granulométrie des sédiments transportés semble prépondérante pour estimer les évolutions du banc. La tendance au dépôt global mesurée sur le site après la crue (FIG 7.16 b) n'est pas reproduite; elle est probablement liée à la concentration de sédiments en condition limite amont, et peut-être à une modification de la taille moyenne des sédiments transportés.

7.4.3 Synthèse des résultats de modélisation du transport solide sur le site expérimental principal

Le jeu de paramètres élémentaires utilisé fournit des résultats cohérents avec les observations. Une étude détaillée sur les paramètres (distance de chargement, coefficient de vitesse de dépôt des

sédiments, coefficient multiplicateur du terme d'érosion, contrainte critique...) permettrait probablement d'affiner les résultats de calcul et de se rapprocher des modifications observées in situ. Cependant des temps de calculs long limitent une telle étude. Des incertitudes sur la composition granulométrique du lit en profondeur, sur les interactions entre classes granulométriques, sur les apports sédimentaires entrants, rendent pour l'instant le choix d'un jeu de paramètres spécifique difficile à établir. Le risque est d'aboutir aux évolutions observées avec une combinaison de paramètres sans signification physique.

7.5 Résultats sur le site secondaire, chasse 2006

Sur le site expérimental secondaire, les résultats de modélisation du transport solide obtenus par Matthieu de Linares (2007) dans sa thèse avec les outils numériques TELEMAC 2D et SISYPHE sont aussi exploités. Le calage du calcul hydrodynamique a été effectué, d'une part, en ne considérant que le frottement dû aux grains, d'autre part, avec un coefficient de frottement non uniforme (fonction de la granulométrie de surface) permettant d'atténuer les différences d'intensité de vitesse entre le chenal principal et le banc. Cependant, l'absence de données de contrôle ne permet pas de privilégier le choix d'un coefficient de frottement uniforme ou variable. Les paramètres donnant les meilleurs résultats d'évolution morphologique sont : (i) une loi de transport solide de type Meyer-Peter avec une loi de tri granulométrique empirique ; (ii) un paramètre de Shields critique de $\tau_{c*} = 0.04$; (iii) une prise en compte de la pente via un angle de frottement sur le sédiment (20°) et une déviation du transport solide.

Ces résultats montrent qu'une formule de transport simple de type Meyer-Peter donne des résultats satisfaisants. L'avancée et l'élargissement du banc ne sont reproduits correctement qu'avec la prise en compte de la granulométrie étendue dans les formules de transport solide.

L'évolution du site expérimental secondaire pour la chasse 2006 est bien reproduite (FIG 7.22). L'érosion du chenal principal n'est cependant pas assez prononcée, probablement du fait d'un diamètre représentatif trop grossier. L'avancée du banc vers l'aval est sous-estimée par le calcul.

Ces résultats de modélisation sur le site secondaire portent à penser que les options de calcul dans le code Rubar20TS gagneraient à être diversifiées par l'ajout d'options supplémentaires (prise en compte de la pente, ajout de paramètres de granulométrie étendue). Il faut cependant garder à l'esprit qu'un raisonnement simple avec des formules de transport basiques comme au paragraphe précédent fournit déjà des résultats satisfaisants.

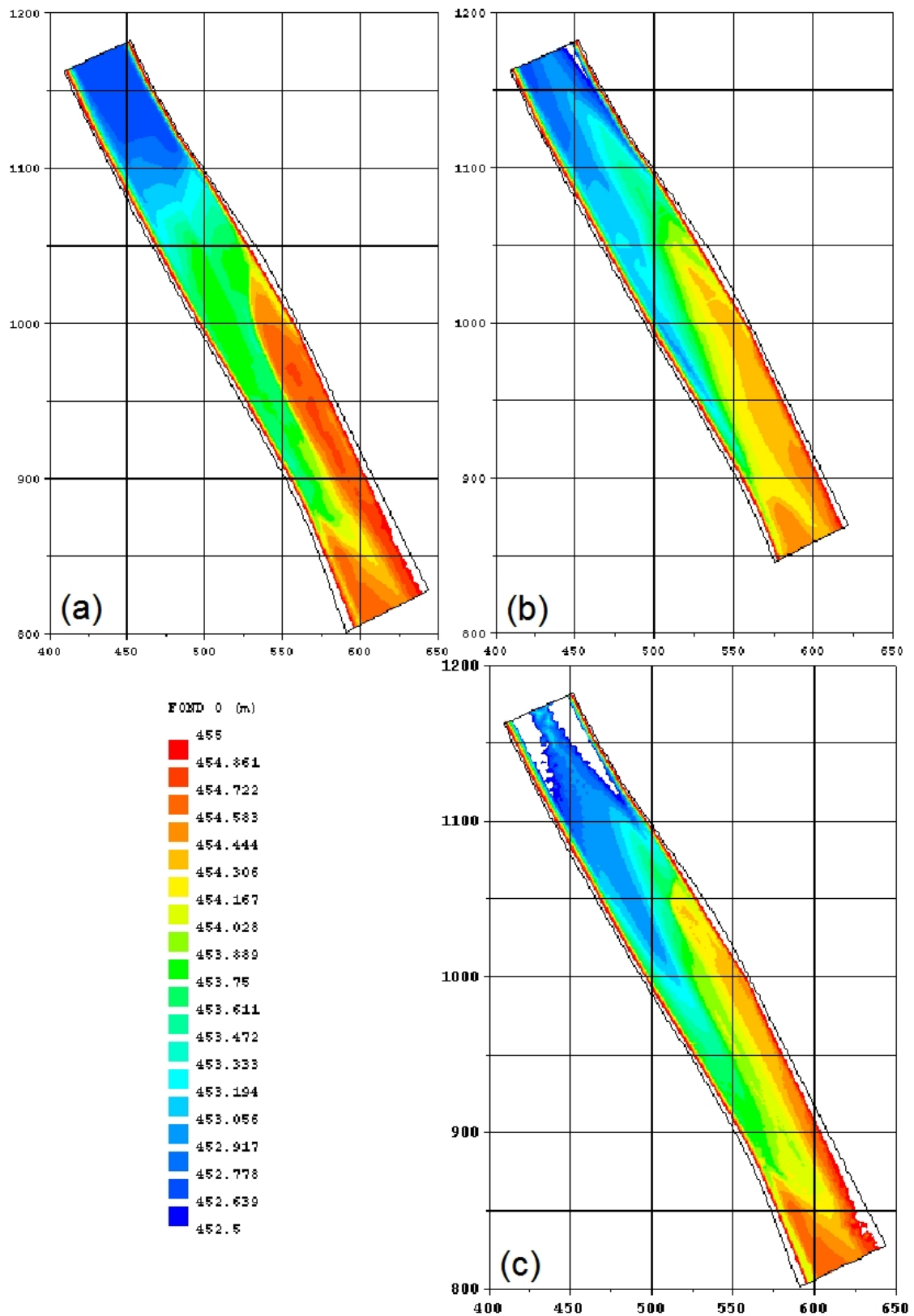


FIG. 7.22 – Modélisation du transport solide sur le site expérimental secondaire (de Linares, 2007). Topographie mesurée avant (a), après la chasse hydraulique 2006 (b) et calculée (c).

7.6 Synthèse du chapitre modélisation numérique

Par comparaison avec les observations de hauteur et de vitesse sur le site expérimental principal, les paramètres hydrodynamiques du modèle numérique RUBAR20TS sont choisis de façon à rendre compte le plus fidèlement possible de l'écoulement liquide sur le site expérimental principal au cours de la chasse. Ces choix sont conservés pour les modélisations du transport sédimentaire et pour les calculs concernant la crue naturelle de l'automne 2006.

Une première analyse qualitative à partir des résultats hydrodynamiques montre que, dans le cas de la chasse, les zones d'érosion sont bien restituées. En revanche, pour la crue naturelle, cette analyse ne permet pas de rendre compte des forts dépôts observés. Une modélisation numérique des flux sédimentaires sur le site est indispensable pour envisager de quantifier les volumes de sédiments déposés et érodés.

Avec un ensemble de formules empiriques classiques et de paramètres sédimentaires simples, les calculs numériques rendent qualitativement compte des dépôts et érosions pour le charriage et pour la suspension. Concernant la crue 2006, une comparaison des résultats de calcul et les observations montre que les dépôts importants constatés sur le banc ne sont pas reproduits par le modèle.

Une discrétisation plus fine des maillages permettrait de prendre en compte plus d'irrégularités à la surface du banc mais conduirait aussi à des temps de calculs beaucoup plus importants et moins raisonnables que ceux de ce travail. Les résultats numériques indiquant un bon accord avec les observations in situ, ces outils peuvent être utilisés, par exemple, pour anticiper les effets de crues plus importantes sur des secteurs de rivière avec des bancs alternés.

Une grande incertitude demeure sur les entrées de sédiments grossiers dans le système. En l'absence de données de terrain, l'écoulement se charge sur les premières mailles du modèle. Des mesures supplémentaires avec un échantillonneur de type Helley-Smith seraient nécessaires pour quantifier le flux entrant de sédiments grossiers.

Pour évaluer le transport des sédiments de taille différente, plusieurs calculs ont été effectués avec des diamètres médians uniques. La prise en compte d'un mélange sédimentaire apporterait probablement une meilleure description du système. Alors que certains codes considèrent une distribution de sédiments suivant des classes granulométriques, il pourrait être intéressant de développer (et de comparer) pour le modèle bidimensionnel une approche similaire à celle utilisée dans le code 1D RUBARBE (El Kadi Abderrezzak, 2006). Les mélanges sédimentaires y sont décrits par un diamètre représentatif d et une étendue granulométrique σ . A chaque pas de temps, les paramètres σ et d sont recalculés en fonction des apports via des lois de mixage/démixage, le substrat étant décrit par des couches sédimentaires.

Il pourrait également être intéressant de prendre en compte les effets de la pente transversale sur le transport solide par charriage.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Les bancs de galets sont des formes présentes dans de nombreuses rivières naturelles ou endiguées. Ils se forment pour un rapport largeur sur profondeur du lit suffisant. Ils représentent une zone de dépôt privilégiée des sédiments fins et d'établissement de la végétation. Ces formes constituent ainsi un véritable enjeu en terme de gestion du lit. En effet, leur végétalisation peut entraîner la fixation du banc et influencer les hauteurs et vitesses d'écoulement en crue. Ce travail de thèse a visé à déterminer, sur plusieurs événements hydrologiques significatifs, à l'échelle d'un banc de galets, les processus responsables de la dynamique des sédiments fins et grossiers.

Le site expérimental principal, volontairement limité, est un banc de galets dans un secteur rectiligne et endigué de la rivière Arc, Maurienne (France). L'analyse s'est appuyée sur des observations de terrain détaillées menées lors de trois chasses hydrauliques et sur une crue naturelle (Partie I). Les modifications morphologiques du banc de galets ont été, d'une part, interprétées à partir des observations expérimentales sur les quatre événements, sur les périodes inter-événements et sur les deux années de suivi (Partie II). D'autre part, des modélisations numériques bidimensionnelles hydrodynamiques et sédimentaires ont été utilisées pour analyser les écoulements et comprendre les changements morphodynamiques (Partie III).

***** Synthèse des résultats et conclusions *****

Les résultats de ce travail concernent les développements des méthodes de mesure, l'étude du transfert des MES dans un cours d'eau, l'analyse de la morphodynamique d'un banc de galets ainsi que sa modélisation numérique.

MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Des efforts ont porté sur la description morphologique des sites expérimentaux. Une description des bancs de galets en sous-unités morphologiques a permis dans toute l'étude une analyse ciblée des processus. Les protocoles de levés topographiques ont été adaptés aux méthodes d'interpolation de la topographie, qui sont fondées sur une identification a priori des singularités topographiques à décrire. En outre, une évaluation de la fiabilité de l'interpolation des altitudes des MNT a été proposée de façon à prendre en compte d'éventuelles lacunes dans la distribution spatiale des semis de points. Une méthode a été développée pour la description de la granulométrie de surface des sites

expérimentaux. En parallèle, les surfaces de dépôt des sédiments fins sur le banc ont été estimées grâce à l'analyse de photographies aériennes haute résolution. Un premier essai de bathymétrie au moyen de l'aDcp sur deux retenues s'est révélé concluant malgré une correction indispensable des perturbations magnétiques sur le compas.

L'utilisation de méthodes traditionnelles (mesures limnimétriques, jaugeages au courantomètre) et la mise en place de méthodes innovantes ont permis une description détaillée des écoulements sur les sites expérimentaux. En particulier, la technique de mesure des champs de vitesse par vidéo (LS-PIV) a été utilisée. Il a été nécessaire d'adapter la méthode aux conditions d'écoulement particulières : (i) la prise en compte des variations d'altitude de la surface libre au cours de la chasse s'est révélée indispensable, comme (ii) l'ensemencement de l'écoulement en traceurs facilement identifiables sur les séquences filmées.

TRANSFERT DES MATIÈRES EN SUSPENSION

Le suivi des concentrations de MES sur l'Arc au cours des chasses a permis une caractérisation du signal de concentration. Sur ces événements, l'évolution de la concentration est très clairement déterminée par la procédure d'ouverture des vannes aux barrages. Un modèle simple pour la propagation des MES à l'aval de la retenue a aussi été mis en place et testé sur les données des trois chasses 2005-2006-2007. Ces données ont également montré que les concentrations maximales observées pendant une chasse sont fortement dépendantes des événements ayant eu lieu depuis la chasse précédente. Les procédures de chasse gagneraient sans doute à être adaptées à l'historique des événements dans l'année.

EVOLUTIONS MORPHOLOGIQUES DE BANCS DE GALETS

Au cours d'une chasse, sur le même secteur de rivière, les évolutions comparables des deux bancs de galets suivis indiquent qu'une extrapolation spatiale des observations sur le site principal aux bancs proches est possible.

Sur les trois chasses, le banc de galets principal est soumis à des érosions d'intensité variable suivant les années. Alors qu'en 2006 une progression du banc vers l'aval est observée, en 2007, un renforcement de l'amont du banc est visible. Ces deux types d'évolutions pourraient être associés à des états initiaux différents. En effet, entre les deux événements une crue naturelle a fortement modifié l'état du site expérimental par des dépôts importants. Contrairement aux chasses, la crue naturelle a entraîné une élévation du niveau du lit quasi généralisée.

Les zones de chenaux secondaires à la surface du banc sont les seules zones d'érosion permanentes du banc. La dynamique de l'écoulement a été explorée plus précisément dans une de ces zones expliquant les érosions observées.

Malgré ces érosions locales sur le banc et les érosions induites par les chasses, un bilan sur toute la période d'étude suggère une élévation du banc de galets et une accentuation de la profondeur du chenal d'écoulement principal, soit un renforcement progressif du banc. Trois tendances ressortent de cette étude : (1) un engraissement du banc avec un creusement du chenal principal ; (2) une migration du banc vers l'aval, même si la tête est renforcée en 2007 ; (3) une scission du banc par renforcement des chenaux de jonction.

Les dépôts de sédiments fins sur le banc représentent des surfaces importantes, de l'ordre du tiers de la surface totale. Une typologie des zones de dépôt des sédiments a été développée permettant de les caractériser précisément. L'étendue des dépôts est approximativement la même avant ou après une chasse, par contre la localisation des dépôts est modifiée même si quelques zones de dépôt persistent de façon permanente (sillage des végétaux, chenal secondaire et queue de banc). Le renouvellement des sédiments fins à la surface du banc pourrait s'expliquer simplement par le remaniement du lit de galets observé sur tous les événements suivis. Le transport par charriage ayant ainsi un effet sur les dépôts des sédiments transportés en suspension. L'influence des sédiments fins sur la dynamique des sédiments grossiers est plus délicate à mettre en évidence à cette échelle d'étude. Il est néanmoins clair que la présence de la végétation, implantée sur les zones riches en sédiments fins, favorise la fixation du lit avec ses racines.

Le secteur d'étude avait été remanié en 1997 pour la construction d'une autoroute. Depuis cette date, et en particulier depuis trois ans, nos résultats indiquent un renforcement du banc de galets et des dépôts de sédiments fins localisés à proximité de la végétation. Même si les chasses se présentent comme une solution alternative à l'essartage pour ralentir la fixation des bancs, cela ne semble pas suffisant, d'autres solutions doivent être envisagées pour ralentir l'exhaussement progressif des bancs. L'influence des chenaux de jonction transversaux sur le banc a été soulignée dans ce travail, il pourrait être intéressant d'initier de tels motifs à la surface de bancs pour éventuellement favoriser la reprise des sédiments par l'écoulement.

MODÉLISATION NUMÉRIQUE HYDRO-SÉDIMENTAIRE

La modélisation numérique hydro-sédimentaire a été effectuée grâce au code RUBAR20TS développé au Cemagref. Les paramètres hydrodynamiques du modèle numérique ont été choisis de façon à rendre compte le plus fidèlement possible de l'écoulement liquide sur le site expérimental principal au cours de la chasse. Ces choix ont été conservés pour les modélisations du transport sédimentaire de la chasse 2006 et pour les calculs concernant la crue naturelle de l'automne 2006.

Une première analyse qualitative montre que, dans le cas de la chasse, les zones d'érosion ont bien été restituées. Une modélisation numérique des flux sédimentaires sur le site était donc indispensable pour la quantification des volumes de sédiments déposés et érodés. Avec un ensemble de formules empiriques classiques et de paramètres sédimentaires simples, les calculs numériques rendent compte

de façon qualitative des dépôts et érosions pour le charriage et pour la suspension lors d'une chasse. Concernant la crue 2006, une comparaison des résultats de calculs et les observations montre que les forts dépôts observés sur le banc de galets du site expérimental ne sont pas reproduits par le calcul.

***** Perspectives *****

Par l'exploration de nombreux aspects de la morphologie fluviale en contexte aménagé, ce travail a ouvert de nouvelles questions et des pistes d'investigation autour ses deux axes principaux.

MÉTHODES DE MESURE

Des choix ont été faits au cours de ce travail sur les variables mesurées pour limiter de façon raisonnable le temps passé sur le terrain. La connaissance du débit solide entrant dans les sites d'étude a manqué, et des solutions ont été utilisées pour gérer cette lacune dans les modélisations numériques. Néanmoins, une mesure du transport par charriage en cours d'événement par échantillonneur de type Helley-Smith ou une estimation de son intensité par hydrophone (déjà mis en place pendant les chasses 2006 et 2007 par le LTHE) permettrait de préciser ce terme.

La granulométrie du lit gagnerait à être complétée par une information en profondeur. Cela permettrait, entre autres, de savoir si la proportion de sédiments fins infiltrés dans le lit varie au cours des événements, et surtout de prendre en compte la composition du lit dans sa globalité sans se limiter à la couche de surface. L'utilisation de chaînes d'érosion (Laronne *et al.*, 1994) donnerait aussi une information expérimentale sur la dynamique sédimentaire, en particulier sur d'éventuelles successions de phases d'érosion-dépôt en crue.

Cette étude sur les aspects purement physiques des bancs de galets pourrait être complétée par un suivi de la végétation présente et de son développement. Il a été montré que les dépôts de sédiments fins sur le banc étaient influencés par la présence de végétaux et, réciproquement, il est probable que le développement et l'étalement de la végétation soient favorisés par la quantité de sédiments fins déposés.

Des améliorations pourraient être apportées aux protocoles de mesure, notamment la bathymétrie des retenues serait améliorée par un mode de navigation adapté aux conditions de navigation rencontrées, une embarcation plus robuste permettrait un semis de points de mesure plus dense et plus homogène. Un positionnement de l'appareil par couplage GPS permettrait de s'affranchir des problèmes de perturbation du compas. La procédure d'analyse des images aériennes pour l'évaluation des dépôts de sédiments fins gagnerait à être en partie automatisée.

SUIVI EXPÉRIMENTAL

Un suivi expérimental à plus long terme des bancs de galets serait nécessaire pour confirmer les résultats d'évolution morphologique et de renforcement du banc. Est-ce que le renforcement observé pendant cette étude sera confirmé ? Quel serait l'effet d'une crue importante ?

Même si les chenaux de jonction ont un rôle majeur sur la morphologie des bancs étudiés, le suivi à long terme de bancs de configuration plus simple, tels que celui du site secondaire, permettrait de confirmer les observations de la chasse 2006. Cela permettrait de mieux évaluer le rôle de chenaux de jonction sur la morphodynamique des bancs de galets, en particulier de savoir s'ils limitent la progression des bancs vers l'aval. Le rôle des singularités locales comme les piles du pont à l'aval pourrait aussi être évalué.

L'analyse de suivis morphologiques sur d'autres rivières à régime hydrologique plus ou moins influencé, comme la Durance, la Drôme, le Drac, la Romanche... permettrait aussi d'étendre et de généraliser les résultats de cette étude.

Ce travail a montré les points forts d'une réflexion articulée autour du suivi in situ et des résultats du modèle numérique. Des enseignements ont été tirés de chacun des outils pour gérer la complexité des phénomènes et les limites des connaissances théoriques. Des tests en modèle réduit complèteraient les deux approches précédentes. Par ce moyen, l'influence des chenaux de jonction et des singularités locales (pont, rétrécissement) sur l'évolution morphodynamique des bancs de galets pourrait être évaluée.

Certaines des questions soulevées ci-dessus pourraient dans un premier temps être abordées avec l'outil de modélisation numérique.

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU TRANSPORT SOLIDE

Les résultats de ce travail suggèrent qu'un choix plus approprié des paramètres utilisés pour le calcul des flux sédimentaires améliorerait les résultats numériques. En effet, une démarche de test systématique de l'influence de ces paramètres n'a pas été mise en oeuvre faute de temps. Concernant le calcul du transport solide par charriage, il pourrait notamment être intéressant d'étudier l'influence (i) de la valeur de la contrainte critique τ_{cr} , choisie égale à 0.047 dans cette étude, notamment sur l'étendue des surfaces modifiées ; (ii) du taux d'érosion ; (iii) de la vitesse des sédiments via le coefficient ζ ; (iv) de la distance de chargement L_c .

Pour prendre en compte les différentes tailles de particules rencontrées, différents calculs ont été effectués pour des diamètres médians représentatifs. La modélisation numérique du système serait probablement améliorée par une prise en compte du mélange granulométrique. La méthode développée pour le code unidimensionnel RUBARBE pourrait par exemple être appliquée au calcul bidimensionnel. Les mélanges sédimentaires y sont décrits par un diamètre représentatif d et une

étendue granulométrique $\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$. A chaque pas de temps, les paramètres σ et d sont recalculés en fonction des apports via des lois de mixage/démixage, le substrat étant décrit par des couches sédimentaires.

Concernant la modélisation du transport solide par suspension, les calculs demanderaient à être développés, notamment par un choix de paramètres sédimentaires obtenus, là aussi, par des tests systématiques.

Les interactions entre les sédiments fins et grossiers mériteraient d'être prises en compte dans les modélisations numériques. Il a été noté un remaniement du lit de galets pour tous les événements significatifs. Ainsi, tant que le lit de galets n'est pas stable, les sédiments fins ne peuvent a priori pas se déposer à sa surface. En gardant un calcul du transport par charriage indépendant de la suspension, il pourrait être envisagé d'intégrer les modifications du fond (générées par le charriage) dans les calculs des dépôts liés à la suspension. Il faudrait alors autoriser le dépôt des MES seulement lorsque le lit de galets est stabilisé.

D'autre part, les situations modélisées pourraient être complétées. Tout d'abord, à partir des données existantes, les écoulements pourraient aussi être calculés avec le code RUBAR20TS sur le site expérimental principal dans le cas de la chasse 2007 sur lequel un jeu de données complet est disponible et, pour la chasse 2006, sur le site expérimental secondaire. L'outil de modélisation numérique pourrait surtout être utilisé pour prévoir les effets d'une crue plus importante ou tester des solutions d'entretien du lit des rivières.

Annexes

Annexe : Aménagements hydroélectriques de l'Arc

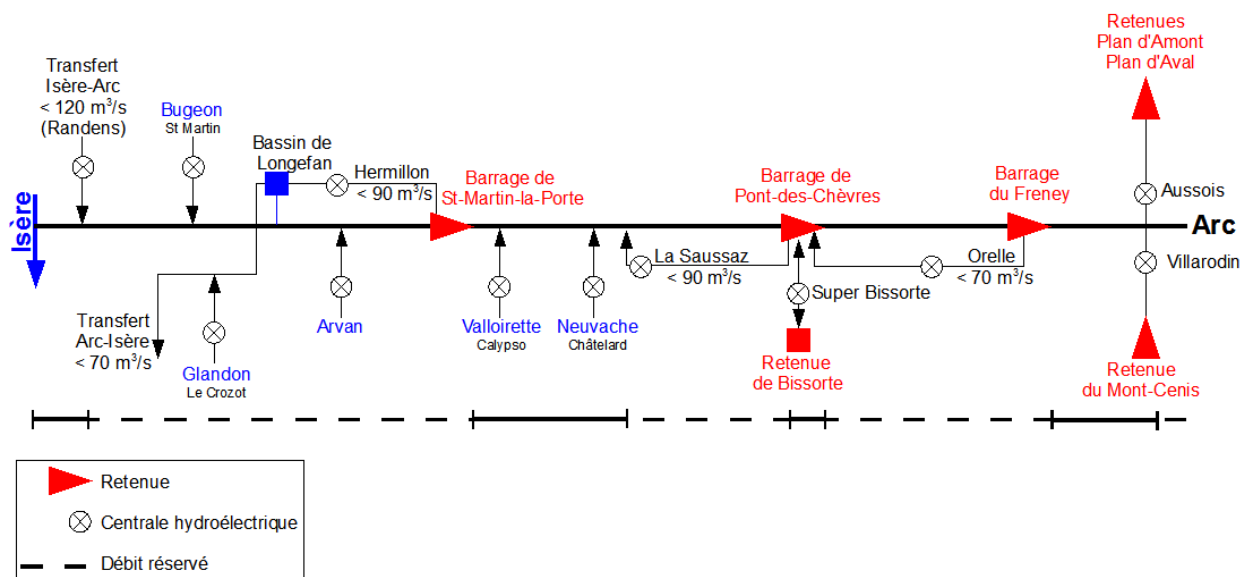
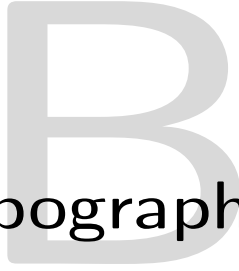


FIG. A.1 – Schéma des aménagements hydroélectriques de l'Arc, d'après Hydratec et Cemagref (1999)



Annexe : Campagnes topographiques sur le site expérimental principal

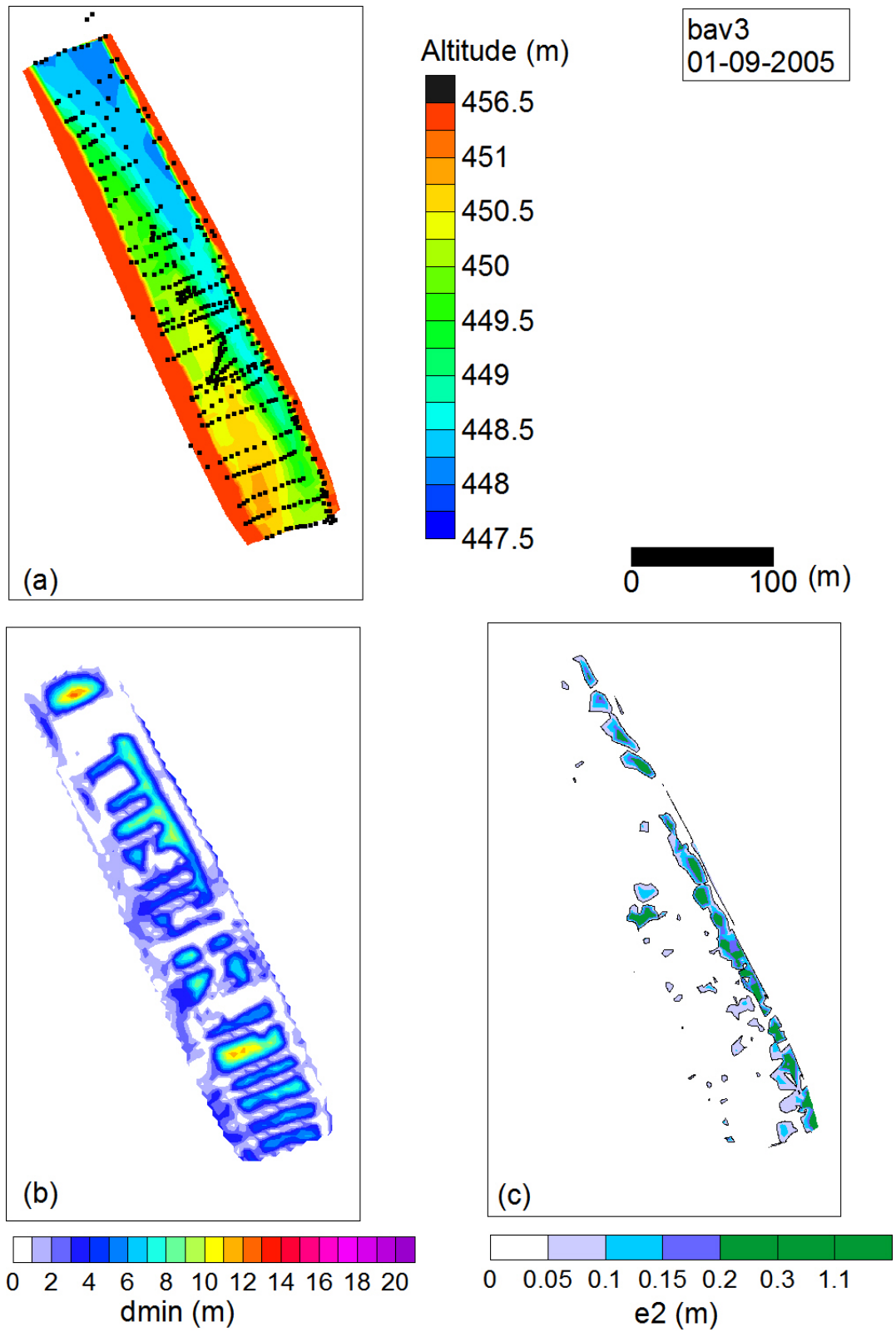


FIG. B.1 – Campagne topographique bav3 du 01-09-2005 : (a) levé topographique et MNT estimé par interpolation, (b) distance locale au plus proche voisin, (c) carte d'incertitude topographique estimée suivant méthode du paragraphe 3.1.2.

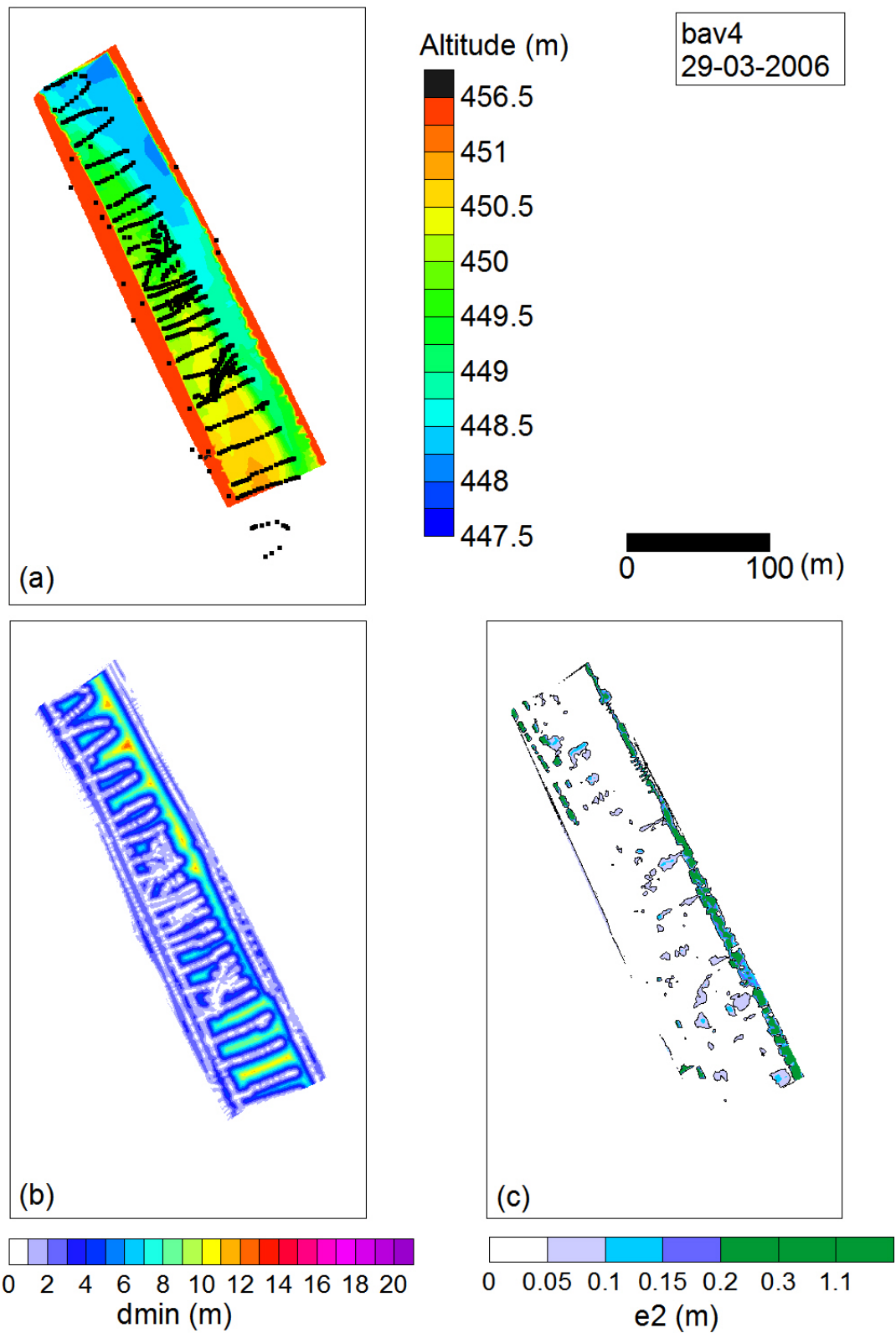


FIG. B.2 – Campagne topographique bav4 du 29-03-2006 : (a) levé topographique et MNT estimé par interpolation, (b) distance locale au plus proche voisin, (c) carte d'incertitude topographique estimée suivant méthode du paragraphe 3.1.2.

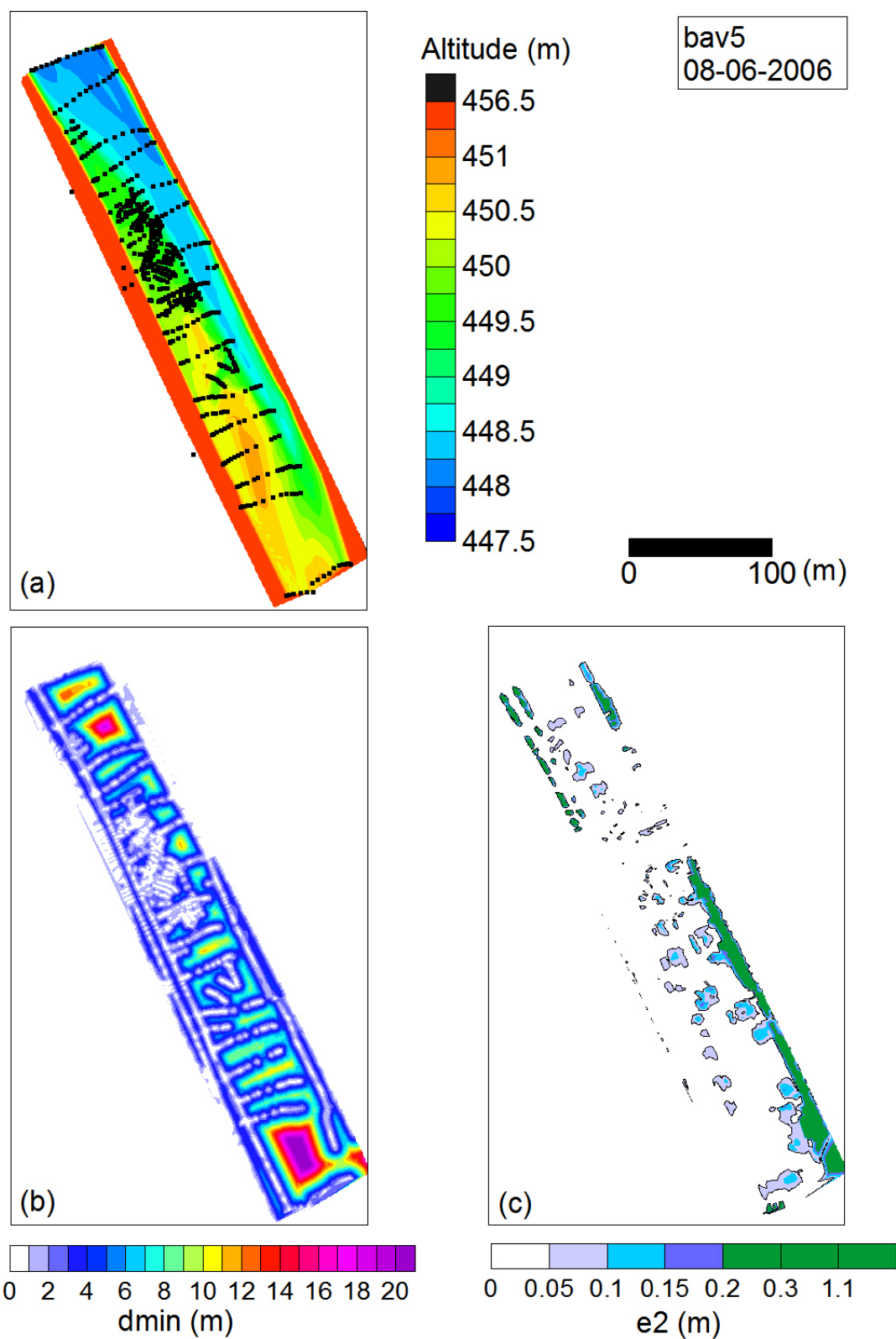


FIG. B.3 – Campagne topographique bav5 du 08-06-2006 : (a) levé topographique et MNT estimé par interpolation, (b) distance locale au plus proche voisin, (c) carte d'incertitude topographique estimée suivant méthode du paragraphe 3.1.2.

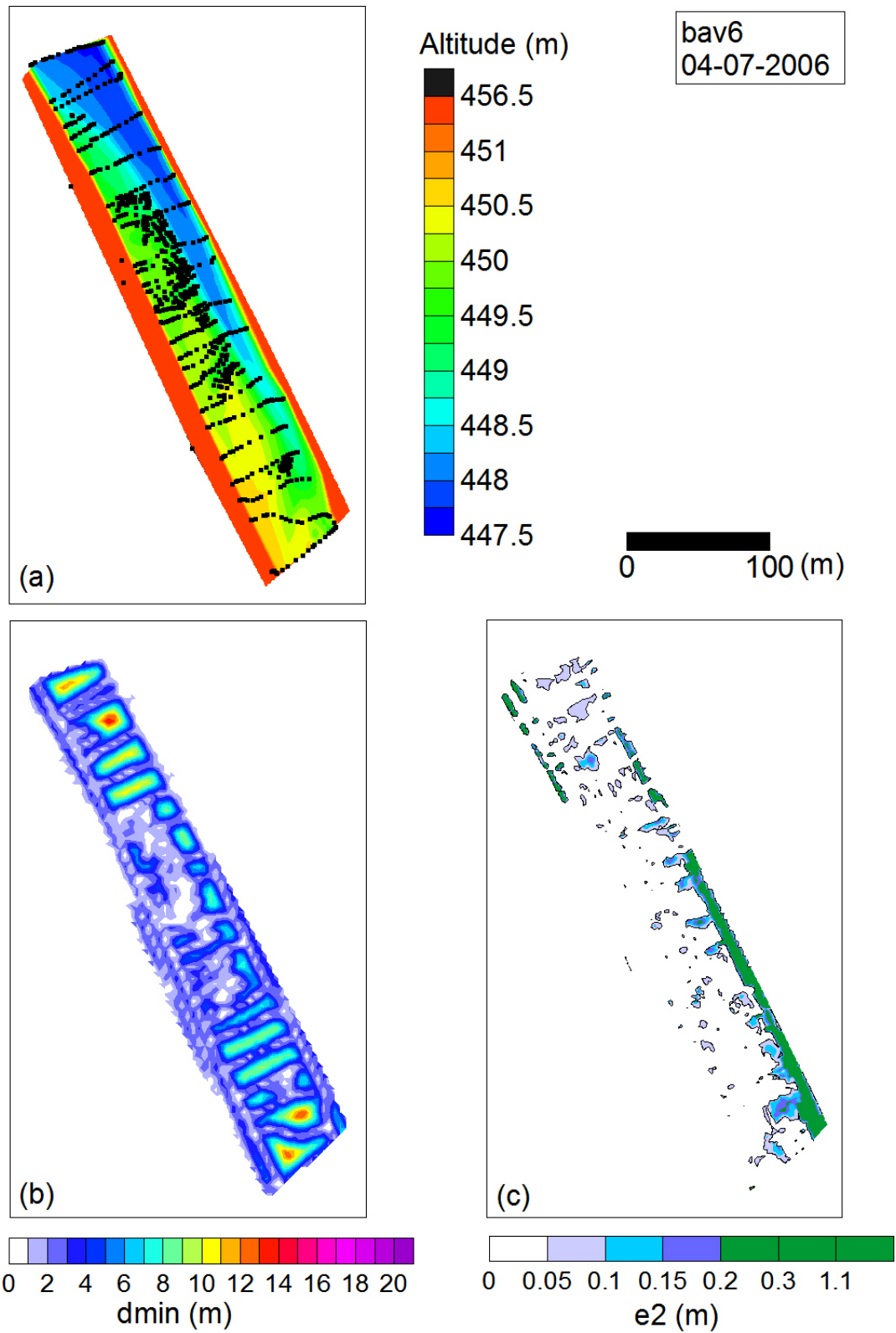


FIG. B.4 – Campagne topographique bav6 du 05-07-2006 : (a) levé topographique et MNT estimé par interpolation, (b) distance locale au plus proche voisin, (c) carte d'incertitude topographique estimée suivant méthode du paragraphe 3.1.2.

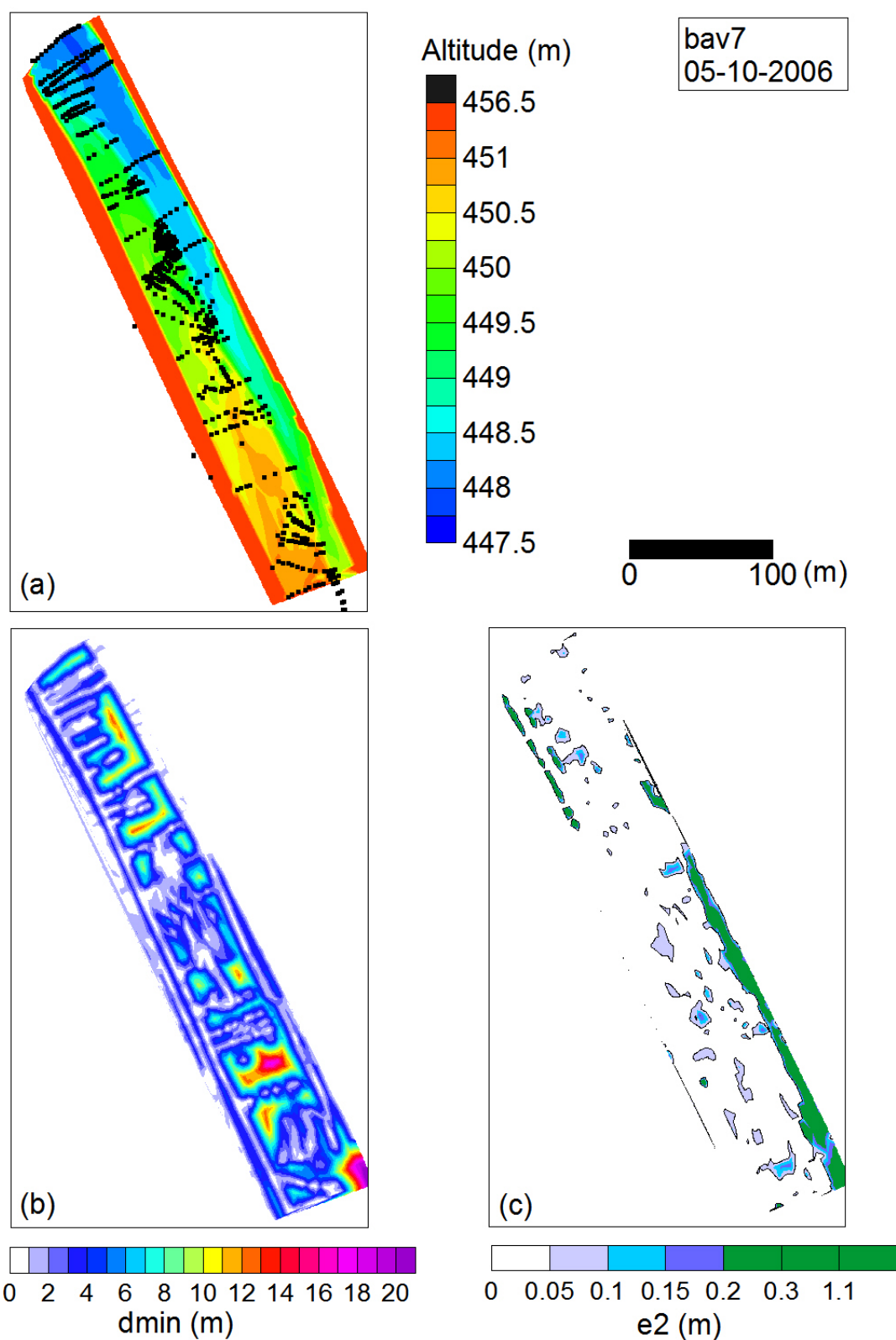


FIG. B.5 – Campagne topographique bav7 du 05-10-2006 : (a) levé topographique et MNT estimé par interpolation, (b) distance locale au plus proche voisin, (c) carte d'incertitude topographique estimée suivant méthode du paragraphe 3.1.2.

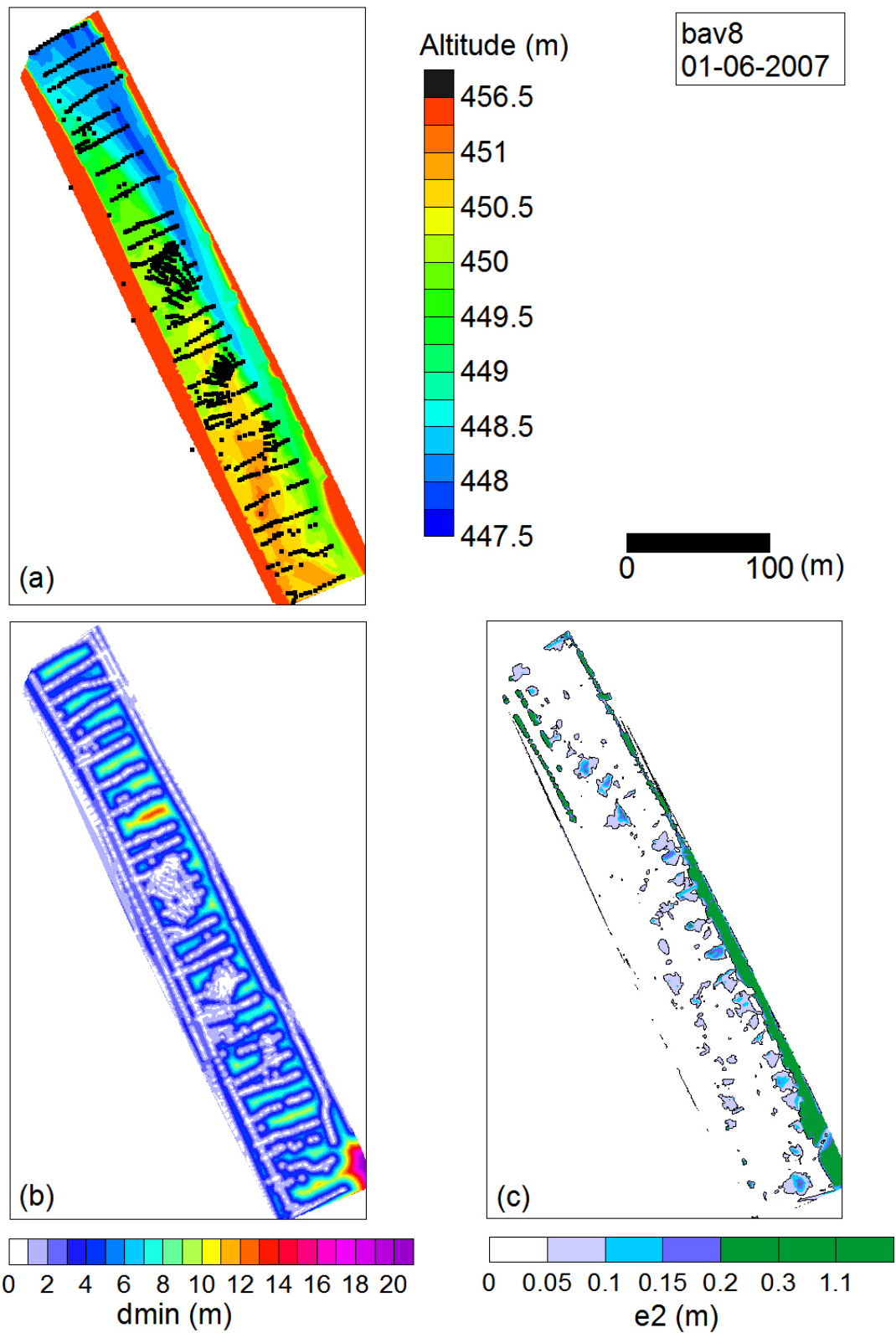


FIG. B.6 – Campagne topographique bav8 du 01-06-2007 : (a) levé topographique et MNT estimé par interpolation, (b) distance locale au plus proche voisin, (c) carte d'incertitude topographique estimée suivant méthode du paragraphe 3.1.2.

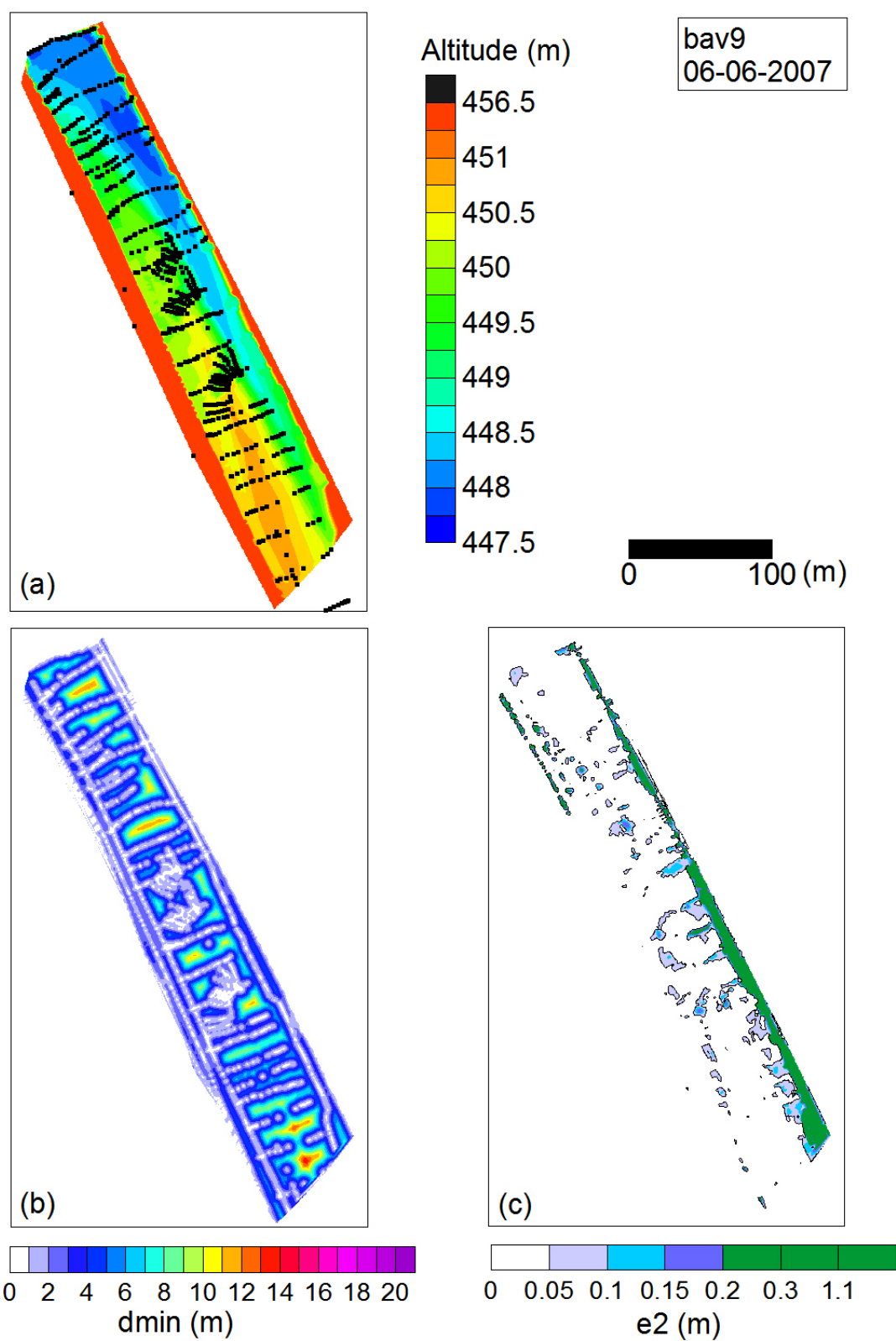


FIG. B.7 – Campagne topographique bav9 du 06-06-2007 : (a) levé topographique et MNT estimé par interpolation, (b) distance locale au plus proche voisin, (c) carte d'incertitude topographique estimée suivant méthode du paragraphe 3.1.2.

Annexe : Paramètres de rectification des images LS-PIV

Les coefficients m_i , p_i et q_i pour transformer les coordonnées images en coordonnées cartésiennes s'écrivent :

$$\begin{aligned}m_1 &= d_3(b_2c_3 - b_3c_2) + (b_2 - b_4c_2) \\m_2 &= -\{d_3(a_2c_3 - a_3c_2) + (a_2 - a_4c_2)\} \\m_3 &= d_3(a_2b_3 - a_3b_2) + (a_2b_4 - a_4b_2) \\p_1 &= (b_1c_2 - b_2c_1) \\p_2 &= -(a_1c_2 - a_2c_1) \\p_3 &= (a_1b_2 - a_2b_1) \\q_1 &= -\{d_3(b_1c_3 - b_3c_1) + (b_1 - b_4c_1)\} \\q_2 &= d_3(a_1c_3 - a_3c_1) + (a_1 - a_4c_1) \\q_3 &= -\{d_3(a_1b_3 - a_3b_1) + (a_1b_4 - a_4b_1)\}\end{aligned}$$

Bibliographie

- ADMIRAAL, D., STANSBURY, J. et HABERMAN, C. (2004). Case study : Particle velocimetry in a model of lake Ogallala. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130:599–607. 71, 76
- ALABYAN, A. et CHALOV, R. (1998). Types of river channel patterns and their natural controls. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23:467–474. 3
- ALLAIN JEGOU, C. (2002). *Relations végétation-écoulement-transport solide dans le lit des rivières, Etude de l'Isère dans le Grésivaudan*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France. 12, 13, 16
- ARTHUS-BERTRAND (2002). *La Terre vue du ciel*. La Martinière. 4
- ASHWORTH, P. (1996). Mid-channel bar growth and its relationship to local flow strength and direction. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21:103–123. 63
- ASHWORTH, P., BEST, J. et LEDDY, J. (1994). The physical modelling of braided rivers and deposition of fine-grained sediment. In KIRKBY, M., éditeur : *Process models and theoretical geomorphology*, pages 115–139. Wiley & Sons. 11
- BAILY, B., COLLIER, P., FARRES, P., INKPEN, R. et PEARSON, A. (2003). Comparative assessment of analytical and digital photogrammetric methods in the construction of DEMs of geomorphological forms. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28:307–320. 51
- BARTHOLDY, J. et BILLI, P. (2002). Morphodynamics of a gravel bar reach. *Geomorphology*, 42:293–310. 9
- BERNINI, A., CALEFFI, V. et A., V. (2003). Generation and development of alternate bars : numerical modelling. In *16th AIMETA Congress of theoretical and applied mechanics*. 7
- BERTOLDI, W., TUBINO, M. et ZOLEZZI, G. (2002). Experimental observations of river bifurcations with uniform and graded sediments. In *River Flow*. 8
- BERTRAND-KRAJEWSKI, J., LAPLACE, D., JOANNIS, C. et CHEBBO, G. (2000). *Mesures en hydrologie urbaine et assainissement*. Tec Doc. 64
- BLONDEAUX, P. et SEMINARA, G. (1985). A unified bar-bend theory of river meanders. *Journal of Fluid Mechanics*, 157:449–470. 5, 6
- BLUCK (1982). Texture of gravel bars in braided streams. In HEY, R., BATHURST, J. et THORNE, C., éditeurs : *Dynamics of gravel bed rivers*, pages 339–354. Wiley & Sons. 8
- BOUCHARD, J. (2001). la gestion des sédiments par chasse (2) : Outils d'optimisation et de prévision d'impact. *La Houille Blanche*, 6-7:62–66. 95
- BRANDT, S. (1999). Sedimentological and geomorphological effects of reservoir flushing : The Cachi reservoir, Costa Rica, 1996. *Geografiska Annaler A*, 81:391–407. 14, 15
- BRANDT, S. (2000). Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40:375–401. 14
- BRANDT, S. (2005). Conceptualization of hydraulic and sedimentary processes in downstream reaches during flushing of reservoirs. In *XXXI IAHR Congress*, pages 2577–2588. 14
- BRASINGTON, J., LANGHAM, J. et RUMSBY, B. (2003). Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology*, 53:299–316. 42, 44

BIBLIOGRAPHIE

- BRASINGTON, J., RUMSBY, B. et MCVEY, R. (2000). Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25:973–990. 40
- BUFFINGTON, J. et MONTGOMERY, D. (1997). A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. *Water Resources Research*, 33:1993–2029. 155
- BUNTE, K. et ABT, S. (2001). Sampling surface and subsurface, particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring. General technical report, United State Department of Agriculture, Forest service, Rocky Mountain Research Station. 45, 46
- BUTLER, J., LANE, S., CHANDLER, J. et PORFIRI, E. (2002). Through-water close range digital photogrammetry in flume and field environments. *Photogrammetric Records*, 99:419–439. 51, 52
- CALLANDER, R. (1969). Instability and river channel. *Journal of Fluid Mechanics*, 36:465–480. 5
- CAMENEN, B., JODEAU, M. et LE COZ, J. (2007). Modélisation du flux sédimentaire pendant une chasse hydraulique (Arc en Maurienne). In *Colloque SHF : Transports solides et gestion des sédiments en milieux naturels et urbains*. 93
- CAO, Z. et CARLING, P. (2002). Mathematical modelling of alluvial rivers : reality and myth. part i : General review. *Water and Maritime engineering*, 154:207–219. 140
- CARBONNEAU, P., LANE, S. et BERGERON, N. (2006). Feature based image processing methods applied to bathymetric measurements from airborne remote sensing in fluvial environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, in press. 51
- CARBONNEAU, P. E. et BERGERON, N. E. (2005). Automated grain size measurements from airborne remote sensing for long profile measurements of fluvial grain sizes. *Water Resources Research*, 41:1–9. 52
- CARBONNEAU, P. E., BERGERON, N. E. et LANE, S. (2004). Catchment-scale mapping of surface grain size in gravel bed rivers using airborne digital imagery. *Water Resources Research*, 40:1–11. 52
- CARBONNEAU, P. E., BERGERON, N. E. et LANE, S. (2005). Texture-based image segmentation applied to the quantification of superficial sand in salmonid river gravels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30:121–127. 53, 54
- CHURCH, M. et JONES, D. (1982). Channel bars in gravel-bed rivers. In HEY, R., BATHURST, J. et THORNE, C., éditeurs : *Gravel-bed rivers*, pages 291–338. Wiley & sons. 105, 109, 110
- CHURCH, M. et KRISHNAPPAN, B. (1998). Sediment sources, transport processes and modelling approaches for the Fraser River. In *Health of the Fraser River aquatic ecosystem : a synthesis of research conducted under the Fraser River Action Plan*. 10
- COLOMBINI, M., SEMINARA, G. et TUBINO, M. (1987). Finite-amplitude alternate bars. *Journal of Fluid Mechanics*, 181:213–232. 5
- COSTA, J., CHENG, R., HAENI, F., MELCHER, N., SPICER, K., HAYES, E., PLANT, W., HAYES, K., TEAGUE, C. et BARRICK, D. (2006). Use of radar to monitor stream discharge by noncontact methods. *Water Resources Research*, 42:1–14. 68
- COURIVAUD, J.-R. (2002). Mesures in situ en hydraulique à surface libre. *Techniques de l'ingénieur. Mesures et contrôle*, RC2:R2330.1–R2330.16. 64
- CREUTIN, J., MUSTE, M., BRADLEY, A., KIM, S. et KRUGER, A. (2003). River gauging using PIV techniques : a proof of concept experiment on the Iowa river. *Journal of Hydrology*, 277:182–194. 69, 71, 76
- de LINARES, M. (2007). *Modélisation numérique bidimensionnelle du transport solide et de la dynamique fluviale. Validation sur deux sites en Loire et sur l'Arc*. Thèse de doctorat, UJF, Grenoble. 26, 111, 112, 114, 143, 171, 172
- DEFINA, A. (2003). Numerical experiments on bar growth. *Water Resources Research*, 39:1092. 7
- DEGOUTTE, G. (2003). *Hydraulique, dynamique et morphologie fluviales*. DEA HHGG. 3, 142
- DEL GIUDICE, G., RASULO, G. et VIPARELLI, E. (2004). Bar height formulas to predict the maximum scour depth

- at riverbanks. In GROUP, T. . F., éditeur : *River Flow*, pages 205–214. 8
- DIETRICH, C., GREEN, T. et JAKEMAN, A. (1999). An analytical model for stream sediment transport : application to Murray and Murrumbidgee river reaches, Australia. *hydrological processes*, 13:763–776. 10, 11
- DIPLAS, P. (1994). Modelling of fine and coarse sediment interaction over alternate bars. *Journal of Hydrology*, 159:335–351. 8, 9, 11, 105
- DIPLAS, P. et PARKER, G. (1992). Deposition and removal of fines in gravel-bed streams. In BILLI, P., HEY, R., THORNE, C. et TACCONI, P., éditeurs : *Dynamics of gravel bed rivers*, pages 313–329. Wiley & Sons. 11
- DRAMAIS, G., BRANGER, F., LE COZ, J. et RIBOT-BRUNO, J. (2005). Note technique : Contrôle, mise en oeuvre et suivi des capteurs autonomes DIVER. Rapport technique, UR HHLY, UR QELY Cemagref. 64
- DUFOUR, S., BARSOUM, N., MULLER, E. et PIÉGAY, H. (2007). Effects of channel confinement on pioneer woody vegetation structure, composition and diversity along the River Drôme (SE France). *Earth Surface Processes and Landforms*, x:x-x. 14
- EATON, B. et LAPOINTE, M. (2001). Effects of large floods on sediment transport and reach morphology in the cobble-bed Sainte Marguerite River. *Geomorphology*, 40:291–309. 44, 63
- EDF (1999). Consigne de chasse de l'Arc moyen. Rapport technique, EDF. 29
- EDF (2002). Note de synthèse " chasses et curages de l'Arc ", perspectives. Rapport technique, EDF. 29
- EDF (2006). Compte rendu de la chasse de dégravage sur l'Arc du 27/06/06. Rapport technique, EDF. 30, 31
- EDF SIRA, Pole concertation environnement, S. M. (1997). Retenues du Freney, de Pont des Chèvres et de Saint Martin la Porte. Rapport technique, EDF. 22
- EDWARDS, P., KOLLMANN, J., GURNELL, A., PETTS, G., TOCKNER, K. et WARD, J. (1999). A conceptual model of vegetation dynamics on gravel bars of a large alpine river. *Wetlands Ecology and Management*, 7:141–153. 12
- EL KADI ABDERREZZAK, K. (2006). *Evolution d'un lit de rivière en fonction des apports*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon I. 173
- ENGELUND, F. et FREDSOE, J. (1976). A sediment transport model for straight alluvial channels. *Nordic Hydrology*, 7:293–306. 142
- ENVI4.3 (2006). *Guide d'utilisation*. ITT Visual Information Solutions. 53
- FASOLATO, G., RONCO, P. et TREGNAGHI, M. (2006). Morphodynamics of mountain rivers following repeated sediment release from reservoirs. In *River Flow 2006*, pages 1329–1336. 14
- FEDERICI, B. et SEMINARA, R. (2003). On the convective nature of bar instability. *Journal of Fluid Mechanics*, 487:125–144. 5
- FERGUSON, R., ASMORE, P., ASHWORTH, P., PAOLA, C. et PRESTEGAARD, K. (1992). Measurements in a braided river chute and lobe 1. flow pattern, sediment transport and channel change. *Water Resources Research*, 27:1877–1886. 36
- Ferreira da SILVA, A. (2006). On the initiation of meandering and the subsequent plan-development of meander loops. In *ICHE*. 6
- FINCHAM, A. M. et SPEDDING, G. (1997). Low cost, high resolution DPIV for measurement of turbulent fluid flow. *Experiments in Fluids*, 23:449–462. 75
- FORLITI, D. J., STRYKOWSKI, P. J. et DEBATIN, K. (2000). Bias and precision errors of digital particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 28:436–447. 76
- FUJITA, I. et AYA, S. (2004). Refinement of LSPIV technique for monitoring river surface flows. In *ASCE conference proceedings*. 77
- FUJITA, I., HARA, M., MORIMOTO, T. et NAKASHIMA, T. (1998a). Visualization and PIV measurement of river surface flow. In *Proceeding of VSJ-SPIE98*. 73, 76
- FUJITA, I. et HINO, T. (2003). Unseeded and seeded PIV measurements of river flows videotaped from a helicopter.

BIBLIOGRAPHIE

- Journal of Visualization*, 6:245–252. 71
- FUJITA, I., MUSTE, M. et KRUGER, A. (1998b). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36:397–414. 71
- FUJITA, I. et NAKASHIMA, T. (1999). Image-based technique for river monitoring. In *1999 IAHR Congress Proceedings Graz*, page 425. 71
- FULLER, I., LARGE, A., CHARLTON, M., HERITAGE, L. et MILAN, D. (2003). Reach-scale sediment transfers : an evaluation of two morphological budgeting approaches. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28:889–903. 44, 102
- GARCIA, M. et NINŌ, Y. (1994). Dynamics of sediment bars in straight and meandering channels : experiments on the resonance phenomenon. *Journal of Hydraulic Research*, 31:739–764. 7
- GIDON, M. (2007). Géologie Maurienne. <http://www.geol-alp.com> consulté le 20-06-07. 21
- GILVEAR, D., FRANCIS, R., WILLBY, N. et GURNELL, A. (2005). Gravel bars : a key habitat of gravel bed rivers for vegetation. In *Gravel bed rivers 6*. 12
- GRAF, W. et ALTINAKAR, M. (1993). *Hydraulique fluviale Tome 1 Ecoulement permanent uniforme et non uniforme*. Presses polytechniques et universitaire romandes. 148
- GRAHAM, D., REID, I. et RICE, S. (2005). A transferable method for the automated grain sizing of river gravels. *Water Resources Research*, 41:1–12. 52
- GREGORY, K. (2006). The human role in changing river channels. *Geomorphology*, 79:172–191. 13
- HABERSACK, H. (2001). Radio-tracking gravel particle in a large braided river in New Zealand : a field test of the stochastic theory of bed load transport proposed by Einstein. *Hydrological Processes*, 15:377–391. 106
- HALL, P. (2004). Alternating bar instabilities in unsteady channel flows over erodible beds. *Journal of Fluid Mechanics*, 499:49–73. 5
- HASSAN, M., CHURCH, M. et A.P., S. (1991). Distance of movement of coarse particles in gravel bed streams. *Water Resources Research*, 27:503–511. 8
- HASSAN, M. A. et CHURCH, M. (2001). Sensitivity of bed load transport in Harris Creek : seasonal and spatial variation over a cobble-gravel bar. *Water Resources Research*, 37(3):813–825. 105
- HAUET, A., CREUTIN, J., BELLEUDY, P., MUSTE, M. et KRAJEWSKI, W. (2006). Discharge measurements using Large Scale PIV under varied flow conditions, recent results, accuracy and perspectives. In FERREIRA, ALVES, LEAL et CARDOSO, éditeurs : *River Flow 2006*, pages 1829–1833. 71
- HAUET, A., KRUGER, A., KRAJEWSKI, W., BRADLEY, A., MUSTE, M., CREUTIN, J. et WILSON, M. (2008). Experimental system for real-time discharge estimation using an image-based method. *Journal of Hydrologic Engineering*. 71
- HERVÉ, J. (2006). Etude des évolutions morphologiques de l’Arc. Mémoire de D.E.A., Master Professionnel MEGA Lyon1. 80
- HICKIN, E. (1969). A newly identified process of point bar formation in natural streams. *American Journal of Science*, 267:999–1010. 27
- HUANG, X. et GARCIA, M. (2000). Pollution of gravel spawning grounds by deposition of suspended sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126:963–967. 11
- HUNZIKER, R. (1995). *Fraktionsweiser geschiebetransport*. Mitteilungen Nr. 138 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. 155
- HYDRATEC et CEMAGREF (1999). Etude hydraulique de l’Arc de Maurienne (de Modane à l’Isère), Morphologie du lit de l’Arc. Rapport technique, Hydratec and Cemagref. 21, 22, 23, 25, 185
- IKEDA, S. (1984). Prediction of alternate bars wavelength and height. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110:371–386.

-
- IRAP (2000). Synthèse des incidences environnementales des chasses de l'Arc moyen. Rapport technique, IRAP. 23, 31
- IRAP (2001). Chasse des retenues du Freney, Pont des Chèvres et de St Martin la Porte sur l'Arc Moyen. Rapport technique, irap. 31, 82
- IRAP (2003). Compte rendu IRAP sur la chasse du 14/10/2003. Rapport technique, irap. 31, 82
- IRAP (2005). Chasse des retenues du Freney, Pont des Chèvres et de St Martin la Porte sur l'Arc Moyen (16/06/2005), suivi qualité des eaux. Rapport technique, IRAP. 31, 82
- JAEGGI, M. (1984). Formation and effects of alternate bars. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110:142–156. xvii, 7, 8
- JAEGGI, M. (1987). Interaction of bed load transport with bars. In HEY, R., BATHURST, J. et THORNE, C., éditeurs : *Sediment transport in gravel-bed rivers*, pages 829–841. Wiley. 5, 110
- JASEK, M., MUSTE, M. et ETTEMA, R. (2001). Estimation of Yukon River discharge during an ice jam near Dawson City. *Can. J. Civ. Eng.*, 28:856–864. 71
- JODEAU, M., HAUET, A., PAQUIER, A., LE COZ, J. et DRAMAIS, G. (2008). Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, accepted for publication. 148
- JODEAU, M. et PAQUIER, A. (2006). Analysis of water and sediment flows over an alternate bar in a gravel bed river. In FERREIRA, ALVES, LEAL et CARDOSO, éditeurs : *River Flow 2006*, pages 1251–1257. 116, 143
- JODEAU, M., PAQUIER, A., HAUET, A. et LE COZ, J. (2007a). Investigation of flow-induced morphological changes of a gravel alternate bar during a reservoir release. *Earth Surface Processes and Landforms*, submitted for publication. 46, 70, 90
- JODEAU, M., PAQUIER, A., HAUET, A., LE COZ, J., THOLLET, F. et FOURNIER, T. (2007b). Effect of a reservoir release on the morphology of a gravel bar : field observations and 2dh modeling. In *RCEM2007*. 90
- KANTOUSH, S., BOLLAERT, E.F.R. and Boillat, J.-L. et SCHLEISS, A.J. and Uijttewaai, W. (2006). Experimental study of suspended sediment transport and deposition in a rectangular shallow reservoir. In FERREIRA, ALVES, LEAL et CARDOSO, éditeurs : *River Flow 2006*, pages 1623–1630. 71
- KONDOLF, G. (1997). Hungry water : Effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Managment*, 21:533–551. 14
- KRAUS, K. et WALDHÄUSL, P. (1998). *Manuel de photogrammétrie*. Editions Hermès Paris. 51
- LANDWEHR, K. et RHOADS, B. (2003). Depositionnal response of a headwater stream to channelization, East Central Illinois, USA. *River Research and Applications*, 19:77–100. 9, 51
- LANE, S. (2000). The measurement of river channel morphology using digital photogrammetry. *Photogrammetric Record* 200, 16:937–961. 8, 51
- LANE, S., CHANDLER, J. et RICHARDS, K. (1994). developments in monitoring and modelling small-scale bed topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19:349–368. 51
- LANE, S., RICHARDS, K. et CHANDLER, J. (1995). Morphological estimation of the time-integrated bed load transport rate. *Water Resources Research*, 31:761–772. 37
- LANGLADE, L.-R. et DÉCAMP, O. (1995). Accumulation de limon et colonisation végétale d'un banc de galets. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences Paris, Science de la vie*, 318:1073–1082. 13
- LANGLOIS, J., JOHNSON, D. et MEHUYS, G. (2005). Suspended sediment dynamics associated with snowmelt runoff in a small mountain stream of Lake Tahoe (Nevada). *Hydrological Processes*, 19:3569 – 3580. 10
- LANZONI, S. (2000). Experiments on bar formation in a straight flume 2. Graded sediment. *Water Resources Research*, 36:3351–3363. 105
- LANZONI, S. et TUBINO, M. (1999). Grain sorting and bar instability. *Journal of Fluid Mechanics*, 393:149–174. 6,
-

- LARONNE, J., OUTHET, D., CARLIN, P. et MCCABE, T. (1994). Scour chain employment in gravel bed rivers. *Catena*, 22:299–306. 44, 180
- LATULIPPE, C., LAPOINTE, M. F. et TALBOT, T. (2001). Visual characterization technique for gravel-cobble river bed surface sediments; validation and environmental applications contribution to the programme of CIRSA (Centre Interuniversitaire de Recherche sur le Saumon Atlantique). *Earth Surface Processes and landforms*, 26:307–318. 46
- LE COZ, J. (2007). *Fonctionnement hydro-sédimentaire des bras morts de rivière alluviale*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Lyon. 16, 63
- LE COZ, J., HAUET, H., VÉDIE, F., DRAMAIS, G., CHASTAN, B. et PAQUIER, A. (2006). Recirculating flow assessment from aDcp, LS-PIV and 2Dh modelling. In FERREIRA, ALVES, LEAL et CARDOSO, éditeurs : *River Flow 2006*, 1843-1851. 76
- LE COZ, J., PIERREFEU, G., BROCHOT, J.-F., PAQUIER, A., CHASTAN, B. et LAGOUY, M. (2007a). Suspended-load dynamics during floods in the River Saône, France. In *10th International Symposium on River Sedimentation, Moscow*. 10, 11, 91
- LE COZ, J., PIERREFEU, G., SAYSET, G., BROCHOT, J.-F. et MARCHAND, P. (2007b). *Utilisation des profileurs acoustiques de vitesse à effet Doppler (aDcp) sur les cours d'eau - Guide méthodologique*. Publication prévue aux Editions QUAE. 57
- LEMKE, K. (1991). Transfer function models of suspended sediment concentration. *Water Resources Research*, 27:293–305. 10, 11
- LENZI, M. et MARCHI, L. (2000). Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (Northeastern Italy). *Catena*, 39:267–282. 10
- LISLE, T. (1989). Sediment transport and resulting deposition in spawning gravels, North Coastal California. *Water Resources Research*, 25:1303–1319. 11, 15
- LISLE, T. et HILTON, S. (1999). Fine bed material in pools of natural gravel bed channels. *Water Resources Research*, 35:1291–1304. 11
- LISLE, T., IKEDA, H. et ISEYA, F. (1991). Formation of stationary alternate bars in a steep channel with mixed-size sediment : a flume experiment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16:463–469. 8, 27, 109
- LISLE, T., ISEYA, F. et IKEDA, H. (1993). Response of a channel with alternate bars to a decrease in supply of mixed-size bed load : a flume experiment. *Water Resources Research*, 29:3623–3629. 8
- LISLE, T. et MADEJ, M. (1992). Spatial variation in armouring in a channel with high sediment supply. In *Dynamics of Gravel-bed rivers*. 8
- LU, J.-Y., SU, C.-C. et WANG, C.-Y. (2006). Application of a portable measuring system with acoustic Doppler current profiler to discharge observations in steep rivers. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17:179–192. 71
- LUNT, I. et BRIDGE, J. (2004). Evolution and deposits of a gravelly braid bar, Sagavanirktok River, Alaska. *Sedimentology*, 51:415–432. 4, 27, 51
- MANO, V., NÉMERY, J., BELLEUDY, P. et POIREL, A. (2007). Un an de mesure des flux de Matières En Suspension (MES) et de Carbone sur une rivière alpine : l'Isère. In *Colloque SHF : Transports solides et gestion des sédiments en milieux naturels et urbains*, Lyon. 82
- MARNÉZY, A. (1999). *L'Arc et sa vallée, Anthropisation et géodynamique d'une rivière alpine dans son bassin versant*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble I, Grenoble, France. 21, 22, 23, 24
- MARTIN-VIDE, J. (2001). Restoration of an urban river in barcelona, spain. *Environmental Engineering Policy*, 2:113–119. 12, 13
- MCMANARA, J. et BORDEN, C. (2004). Observation on the movement of coarse gravel using implanted motion-sensing radio transmitters. *hydrological processes*, 18:21871–1884. 106

- MESELHE, E., PEEVA, T. et MUSTE, M. (2004). Large scale image velocimetry for low velocity and shallow water flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130:937–940. 76, 77
- MEUNIER, P. and Métivier, F., LAJEUNESSE, E., MÉRIAUX, A. et FAURE, J. (2006). Flow pattern and sediment transport in a braided river : The "torrent de St Pierre" (French Alps). *Journal of Hydrology*, 330:496–505. 16
- MEYER-PETER, E. et MÜLLER, R. (1948). Formulas for bed-load transport. *In Report on second meeting of IARH*, pages 39–64. 141, 155
- MIGNOT, E., PAQUIER, A. et HAIDER, S. (2006). Modeling floods in a dense urban area using 2d shallow water equations. *Journal of Hydrology*, 327:186–199. 139
- MIWA, H., YOKOGAWA, J. et DAIDO, A. (2004). Alternate bar transformation due to change of water discharge in graded and uniform sediment. *In 9th ISRS*. 8
- MOULIN, B. (2005). *Variabilité spatiale et temporelle du bois mort dans le réseau hydrographique de l'Isère à l'amont de Grenoble*. Thèse de doctorat, Université Jean Monnet, St Etienne, France. 13, 24
- MÜRLE, U., ORTLEPP, J. et ZAHNER, M. (2003). Effects of experimental flooding on riverine morphology, structure and riparian vegetation : the River Spöl, Swiss National Park. *Aquatic Science*, 65:191–198. 14
- MUTO, Y., BABA, Y. et AYA, S. (2002). Velocity measurements in open channel flow with rectangular embayments formed by spur dikes. *Annals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, 45B:2. 71
- NAGATA, N., HOSODA, T. et MURAMOTO, Y. (2000). Numerical analysis of river channel processes with bank erosion. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126:243–252. 7
- NICHOLAS, A. (2003). Investigation of spatially distributed braided river flows using a two-dimensional hydraulic model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28:655–674. 16
- OWENS, P., BATALLA, R., COLLINS, A., GOMEZ, B., HICKS, D., HOROWITZ, A., KONDOLF, G., MARDEN, M., PAGE, M., PEACOCK, D., PETTICREW, E., SALOMONS, W. et TRUSTRUM, N. (2005). Fine-grained sediment in river systems : environmental significance and management issues. *River Research and Applications*, 21:693–717. 10
- PAQUIER, A. (1995). *Modélisation et simulation de la propagation de l'onde de rupture de barrage (in French)*. Thèse de doctorat, Université Jean Monnet, St Etienne, France. 139
- PARKER, G., ANDERSON, A. G. et WOOD, A. (1975). The flow and stability characteristics of alluvial river channels. Rapport technique, SAFL Project Report 161. 4, 8
- PIÉGAY, H. (2005). Editorial : sediment management in river systems : a need to assess changing processes in the long term and at a large scale. *River Research and Applications*, 21:689–691. 13
- POIREL, A. (2001). la gestion des sédiments par chasse (1) : retour d'expérience sur quelques aménagement hydrauliques alpins. *La Houille Blanche*, 6-7:55–61. 10, 14
- PYRCE, R. et ASHMORE, P. (2003a). Particle path length distributions in meandering gravel-bed-streams : results from physical models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28:951–966. 8
- PYRCE, R. et ASHMORE, P. (2003b). The relation between particle path length distributions and channel morphology in gravel-bed streams : a synthesis. *Geomorphology*, 56:167–187. 8
- PYRCE, R. et ASHMORE, P. (2005). Bedload path length and point bar development in gravel-bed river model. *Sedimentology*, 52:839–857. 8, 27, 105
- RACLOT, D., PUECH, C., MATHYS, N., ROUX, B., JACOMES, A., ASSELINE, J. et BAILLY, J.-S. (2005). Photographies aériennes prises par drone et modèle numérique de terrain : apports pour l'observatoire sur l'érosion de Draix. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1:7–20. 50
- RAMEZ, P. (2005). Formation de bancs dans un lit endigué partie 1 : théorie. *La Houille Blanche*, 6:20–28. 6
- RAMEZ, P. et PAQUIER, A. (1999). Etude hydraulique de l'Arc de Maurienne (de Modane à l'Isère) : Modélisation des écoulements d'eau et de sédiments. Rapport technique, Cemagref. 24
- RANTZ, S. (1982). Measurement and computation of streamflow : Volume 2. Computation of discharge. Rapport

BIBLIOGRAPHIE

- technique, USGS. 68, 69
- RATHBURN, S. et WOHL, E. (2003). Predicting fine sediment dynamics along a pool riffle mountain channel. *Geomorphology*, 55:111–124. 15
- REMPEL, L. et CHURCH, M. (2002). Morphological and habitat classification of the lower Fraser River gravel-bed reach : Confirmation and testing. Rapport technique, The Fraser Basin Council. 27
- REPETTO, R., TUBINO, M. et PAOLA, C. (2002). Planimetric instability of channels with variable width. *Journal of Fluid Mechanics*, 457:79–109. 7
- RICE, S. et CHURCH, M. (1998). Grain-size along two gravel-bed rivers : statistical variation, spatial pattern and sedimentary links. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23:345–363. 45
- RODRIGUES, S. (2004). *Dynamique sédimentaire et végétation : évolution de chenaux fluviaux en Loire moyenne (France)*. Thèse de doctorat, Université de Tours. 16
- ROLLET, A.-J. (2002). Les effets du barrage d'Allement sur la granulométrie du lit de la basse rivière d'Ain : Essai méthodologique par analyse d'image. Mémoire de D.E.A., Géographie, Université Lyon 3. 46, 52
- SAUER, V. B. et MEYER, R. W. (1992). Determination of error in individual discharge measurements, open file report 92-144. Rapport technique, USGS. 80
- SCHIELEN, R., DOELMAN, A. et DE SWART, H. (1993). On the nonlinear dynamics of free bars in straight channels. *Journal of Fluid Mechanics*, 252:325–356. 5
- SEAR, D. (1993). Fine sediment infiltration into gravel spawning beds within a regulated river experiencing floods : ecological implications for salmonids. *Regulated Rivers : Research and Management*, 8:373–390. 11
- SEMINARA, G. (1998). Stability and morphodynamics. *Meccanica*, 33:59–99. 5
- SIMON, A. et CASTRO, J. (2003). *measurement and analysis of alluvial channel form*, chapitre Analysis of processes and forms : water and sediment interactions, pages 291–322. Wiley. 36
- SMART, G. M. (1999). Turbulent velocity profiles and boundary shear stress in gravel bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125:106–116. 68
- SMITH, A. et EVANS, F. (1861). On the effect produced on the deviations of the compass by the length and arrangement of the compass-needles ; and on a new mode of correcting the quadrantal deviation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 151:161–181. 60
- SMITH, B., NADEN, P., LEEKS, G. et WASS, P. (2003). The influence of storm events on fine sediment transport, erosion and deposition within a reach of the river Swale, Yorkshire, UK. *The Science of the Total Environment*, 314-316:451–474. 10
- SMITH, J., BÉRUBÉ, F. et BERGERON, N. (2005). A field application of particle image velocimetry (PIV) for the measurement of surface flow velocities in aquatic habitat studies. In *Paper No. 87, Proceedings of the 26th Canadian Symposium on Remote Sensing, Wolfville, Nova Scotia, June 14-16, 2005*. 71
- SUKHODOLOV, A., UIJTTEWAAL, W. et ENGELHART, C. (2002). On the correspondance between morphological and hydrodynamical patterns of groyne fields. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27:289–305. 63
- SURIAN, N. (1999). Channel changes due to river regulation : the case of the Piave River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24:1135–1151. 14
- TUBINO, M. (1991). Growth of alternate bars in unsteady flow. *Water Resources Research*, 27:37–52. 6
- TUBINO, M., REPETTO, R. et ZOLEZZI, G. (2000). Free bars in rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 37:759–774. 4, 6
- VAN RIJN, L. (1984). Sediment transport, part i : bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110:1431–1456. 155
- VANSICKLE, J. et BESCHTA, R. (1983). Supply-based models of suspended sediment transport in streams. *Water Resources Research*, 19:768–778. 10

- VERDU, J., BATTALLA, R. et MARTINEZ-CASASNOVAS, J. (2005). High-resolution grain-size characterisation of gravel bars using imagery analysis and geo-statistics. *Geomorphology*, 72:73–93. 52
- WATTS, C., NADEN, P. et COOPER, D.M. Gannon, B. (2003). Application of a regional procedure to assess the risk to fish from high sediment concentrations. *The Science of the Total Environment*, 314-316:551–565. 11
- WECHSLER, S. (2003). Perceptions of digital elevation model uncertainty by DEM users. *Journal of the Urban and Regional Information Systems Association (URISA)*, 15:57–64. 40
- WEITBRECHT, V., KÜHN, G. et JIRKA, G. (2002). Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13:237–245. 71
- WENTWORTH, C. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, -:377–392. xv, 46
- WESTAWAY, R., LANE, S. et HICKS, D. (2000). The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25:209–206. 51
- WHITING, P. et DIETRICH, W. (1991). Convective accelerations and boundary shear stress over a channel bar. *Water Resources Research*, 27:783–796. 9
- WHITING, P. et DIETRICH, W. (1993). Experimental studies of bed topography and flow patterns in large-amplitude meanders 1. Observations. *Water Resources Research*, 29:3605–3614. 63
- WILCOCK, P., KONDOLF, G., MATTHEWS, W. et BARTA, A. (1996). Specification of sediment maintenance flows for a large gravel-bed river. *Water Resources Research*, 32:2911–2921. 68, 69
- WOHL, E. et CENDERELLI, D. (2000). Sediment deposition and transport patterns following a reservoir sediment release. *Water Resources Research*, 15:319–333. 15
- WOOD, P. et ARMITAGE, P. (1997). Biological effects of fine sediment in the lotic environment. *Environmental Management*, 21:203–217. 15
- WOOD, P. et ARMITAGE, P. (1999). Sediment deposition in a small lowland stream - Management implications. *Regulated Rivers : Research and Management*, 15:199–210. 11, 108
- YALIN, M. et Ferreira da SILVA, A. (2001). *Fluvial Processes*. IAHR. 6
- ZIEGLER, C. et NISBET, B. (1994). Fine-grained sediment transport in Pawtuxet river, Rhode Island. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120:561–575. 11

MORPHODYNAMIQUE D'UN BANC DE GALETS

EN RIVIÈRE AMÉNAGÉE LORS DE CRUES

Magali JODEAU

Cemagref

Résumé :

Ce travail porte sur la morphodynamique d'un banc de galets en rivière de montagne aménagée, l'Arc (Maurienne, France). L'analyse s'appuie sur des observations de terrain détaillées menées lors de trois chasses de dégravage et d'une crue naturelle. Des méthodes de suivi innovantes ont été exploitées et améliorées (LS-PIV et analyse de photographies aériennes).

A partir des observations expérimentales, une description du transfert des matières en suspension dans le cours d'eau est proposée pour les chasses. Les modifications morphologiques du banc de galets sont interprétées sur les quatre épisodes de débit important, mais aussi sur les périodes inter-événements. Au cours du temps, un renforcement du banc est observé, malgré les effets d'érosion/dépôt antagonistes des événements, crue ou chasse, et des érosions marquées de chenaux de jonction transversaux à la surface du banc. Les dépôts de sédiments fins à la surface du banc ont été évalués.

D'autre part, des modélisations numériques bidimensionnelles avec le code RUBAR20TS ont été utilisées pour modéliser les écoulements hydro-sédimentaires pour une chasse et une crue naturelle. Les modifications morphologiques calculées pour une chasse sont qualitativement proches de celles observées.

Mots-clés :

banc de galets ; chasse de dégravage ; mesures ; transport sédimentaire ; morphologie ; modélisation hydraulique et sédimentaire

GRAVEL BAR MORPHODYNAMICS

IN AN ENGINEERED RIVER DURING HIGH FLOW EVENTS

Abstract :

This work deals with the morphodynamics of a gravel bar in an engineered mountain stream, the River Arc (France). The analysis is based on field measurements during three reservoir releases and a natural high flow event. Original methods have been used and improved (LS-PIV and analysis of aerial pictures). The evolution of suspended sediments along the river is described according to observations during flushing flows. Morphological changes of the studied gravel bar were analysed for the four events, and for in-between time periods. Over the time of the study, the bar was strengthened, even if the flushings and the flood induced opposite changes and transverse channels were deeply eroded. Deposits of fine sediments have been estimated on the entire surface of the gravel bar.

Moreover numerical modelling owing to RUBAR20TS has been performed to calculate flow fields and sediment transport during a flushing event and during the flood. Qualitatively, calculated morphological changes agree with measurements.

Keywords :

gravel bar ; Reservoir release ; measurements ; sediment transport ; morphology ; hydraulic and sedimentary modelling